



การบำบัดกลิ่นจากก๊าซเสียที่เกิดขึ้นจากกระบวนการอบยางแท่งโดยใช้  
สารละลายไอรอน(III)คีเลต  
**Treatment of Odor from Waste Gas in Rubber Drying Process  
using Iron(III)chelate**

อิสรินทร์ มะหมัด

Isarin Mamad

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**

2555

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

ชื่อวิทยานิพนธ์                      การบำบัดกลิ่นจากก๊าซเสียที่เกิดขึ้นจากกระบวนการอบยางแท่งโดยใช้  
สารละลายไอโรน(III)คีเลท  
ผู้เขียน                                      นายอิสรินทร์ มะหมัด  
สาขาวิชา                                    วิศวกรรมเคมี

---

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

คณะกรรมการสอบ

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

.....ประธานกรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร.กัลยา ศรีสุวรรณ)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

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

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

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

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

.....กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พகามาศ เจษฎ์พัฒนานนท์)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้  
เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา ตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรม  
เคมี

.....  
(ศาสตราจารย์ ดร.อมรรัตน์ พงศ์ดารา)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

ชื่อวิทยานิพนธ์	การบำบัดกลิ่นจากก๊าซเสียที่เกิดขึ้นจากกระบวนการอบยางแท่งโดยใช้สารละลายไอโรน(III)คีเลท
ผู้เขียน	นายอิสรินทร์ มะหมัด
สาขาวิชา	วิศวกรรมเคมี
ปีการศึกษา	2554

### บทคัดย่อ

มลพิษทางอากาศที่สำคัญของอุตสาหกรรมยางแท่ง STR20 คือ กลิ่นเหม็นรบกวนชุมชนบริเวณใกล้เคียงที่เกิดจากสารระเหยจากก๊าซเสียในระหว่างการอบยาง โดยพบว่าองค์ประกอบหลักที่ก่อให้เกิดกลิ่น คือ กรดอะซิติก งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการบำบัดกรดอะซิติกในก๊าซเสียจากกระบวนการอบยางแท่งด้วยสารละลายไอโรน(III)คีเลท เนื่องจากเป็นสารที่ไม่เป็นพิษ เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม เป็นสารละลายที่ไม่ก่อให้เกิดการกัดกร่อน มีค่า Selectivity ที่สูงสำหรับการดูดซึมแก๊ส และสามารถฟื้นฟูสภาพสารดูดซึมได้ง่ายด้วยการป้อนอากาศให้กับสารละลายดูดซึม แบ่งการศึกษาออกเป็น 3 ตอน ดังนี้

ตอนที่ 1 ศึกษาปฏิกิริยาระหว่างสารละลายไอโรน(III)คีเลทกับกรดอะซิติกในปฏิกรณ์แบบแบทช์ และวิเคราะห์สารที่ได้จากปฏิกิริยาโดยใช้เทคนิคทางเคมีวิเคราะห์ เพื่อศึกษาโครงสร้างทางเคมีของสารก่อนและหลังทำปฏิกิริยา ผลการวิเคราะห์พบว่าสารหลังทำปฏิกิริยามีหมู่ฟังก์ชันของสารที่เปลี่ยนแปลงไป จึงสรุปได้ว่าสารละลายไอโรน(III)คีเลทสามารถทำปฏิกิริยากับกรดอะซิติกได้

ตอนที่ 2 ศึกษาการนำสารละลายไอโรน(III)คีเลทไปใช้ในการบำบัดกรดอะซิติกจากกระบวนการอบยางแท่ง และหาสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดกรดอะซิติกในก๊าซเสียที่ปล่อยจากปล่องควันของกระบวนการอบยางแท่งโดยกระบวนการดูดซึมทางเคมีในคอลัมน์บรรจุขนาดต้นแบบ ติดตั้งที่บริษัทสยามอินโด รับเบอร์ จำกัด จังหวัดพัทลุง ตัวแปรที่ศึกษาประกอบด้วยความเข้มข้นของสารละลายไอโรน(III)คีเลท ( $C_{Fe,0}$ ) อัตราการไหลของสารละลายไอโรน(III)คีเลท (L) และปริมาณอากาศที่ใช้ในการฟื้นฟูสภาพสารละลายไอโรน(III)คีเลท (A) ที่มีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดกรดอะซิติก โดยออกแบบการทดลองด้วยเทคนิค RSM ด้วยโปรแกรม Microsoft Excel ผลการทำ Regression Analysis ได้ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการบำบัดกรดอะซิติกกับตัวแปรที่ศึกษา ดังสมการ

$$\%RE = 111.37 - 3.597C_{Fe,0} + 6.926L + 1.276C_{Fe,0}A - 4.310LA$$

และได้สถานะที่เหมาะสมในการบำบัดกรดอะซิติกในก๊าซเสียที่ปล่อยจากปล่องควันของกระบวนการอบยางแท่งโดยกระบวนการดูดซึมทางเคมีในคอลัมน์บรรจุ คือ  $C_{Fe,0}=11.12$  g/L  $L=2$  L/min และ  $A=3$  L/min ให้ค่าประสิทธิภาพในการบำบัดกรดอะซิติกสูงถึง 94.70% และสามารถลดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ปล่อยสู่บรรยากาศสูงถึง 70%

ตอนที่ 3 นำสถานะที่เหมาะสมจากการบำบัดกรดอะซิติกโดยใช้คอลัมน์บรรจุขนาดต้นแบบมาประยุกต์ใช้กับหอดูดซึมแบบเปียกของโรงงานอุตสาหกรรมโดยใช้สารละลายไอโรน(III)คิเลท  $C_{Fe,0}=11.12$  g/L ได้ประสิทธิภาพการบำบัดกรดอะซิติกสูงถึง 91.70% สอดคล้องกับผลสอบถามความคิดเห็นจากพนักงาน บริษัท สยามอินโด รับเบอร์ จำกัด ต่อระดับความแรงของกลิ่นเมื่อทำการบำบัดแล้ว ซึ่งทำการวิเคราะห์ผลโดยใช้วิธี One-way ANOVA พบว่าหลังการบำบัดระดับความรุนแรงของกลิ่นมีค่าลดลงและแตกต่างจากก่อนการบำบัดในทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% อย่างมีนัยสำคัญ จึงสามารถสรุปได้ว่าสารละลายไอโรน(III)คิเลทสามารถบำบัดกรดอะซิติกได้อย่างมีประสิทธิภาพ ดังนั้นจึงมีความเป็นไปได้สูงที่จะนำสารดูดซึมหอดูดซึมดังกล่าวไปใช้บำบัดกลิ่นจริงในโรงงานอุตสาหกรรม

<b>Thesis Title</b>	Treatment of Odor from Waste Gas in Rubber Drying Process using Iron(III)chelate
<b>Author</b>	Mr. Isarin Mamad
<b>Major Program</b>	Chemical Engineering
<b>Academic Year</b>	2011

### ABSTRACT

The major problem from STR20 rubber industry is smell disturbing nearby communities that occur from volatile compound emitted from the waste gas in a rubber drying process. The main composition that caused odor is acetic acid. The aims of studying is acetic acid removal in rubber drying process by Iron(III)chelate because it is non-toxic, eco friendly environment, corrosion resistance, high selectivity for gas absorption and easily rehabilitation of absorption solution by feeding air into absorption solution. The scope of this work was divided into 3 parts.

Part one, the studying of oxidation reaction between acetic acid in batch reactor. The variation techniques were used to determine identity of reaction product. The chemical structure of reaction products were different from reactants thus it was concluded that acetic acid can be reacted with Iron(III)chelate.

Part two, the feasibility study of the acetic acid treatment by Iron(III)chelate in pilot scale packed column. The optimum condition for acetic acid removal using Iron(III)chelate were determined. The experimental was set at Siam Indo Rubber industry in Phattalung province. The variable studied included concentration of Iron(III)chelate solution ( $C_{Fe,0}$ ), Flow rate of Iron(III)chelate solution (L) and volume of air used in rehabilitation Iron(III)chelate solution (A). The result of regressing analysis gave the relation between the removal efficiency of acetic acid and operating variables as express by equation shown below.

$$\%RE = 111.37 - 3.597C_{Fe,0} + 6.926L + 1.276C_{Fe,0}A - 4.310LA$$

The optimum conditions of acetic acid removal from waste gas in rubber drying process were  $C_{Fe,0}$ , L and A of 11.12 g/L, 2 L/min and 3 L/min, respectively. The maximum efficiency of acetic acid removal was 94.70%. At the same time, Iron(III)chelate reduced the carbon dioxide emitted to atmosphere.

Last part, the optimum condition obtained from pilot packed column study was applied for industry wet scrubber scale. The results show that by using  $C_{Fe,0}$  at 11.12 g/L which the acetic acid removal efficiency of 90.70% was achieved. The factory staff opinions on the level of smell before and after treatment of waste gas using Iron(III)chelate were investigated and analyze by one-way ANOVA. It was found that the odor level before and after significantly different at 95% confidence level. Consequently, Iron(III)chelate was effective for acetic acid removal that was feasible for actual used in the industry.

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี เนื่องจากได้รับความร่วมมือเป็นอย่างดีจากบุคคลหลายๆ ท่านดังนี้

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร.จรัญ บุญกาญจน์ ที่กรุณาให้คำปรึกษาและเสนอแนะแนวทางในการวิจัยและตรวจทานวิทยานิพนธ์ ตลอดจนชี้แนะแนวทางแก้ปัญหาที่พบในการทำวิจัย และขอขอบคุณ ผศ.ดร.จันทิมา ชั่งสิริพร กรรมการที่ปรึกษาร่วมที่กรุณาให้คำปรึกษา และคำแนะนำในระหว่างการทดลองรวมถึงช่วยตรวจทานวิทยานิพนธ์

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร.กัลยา ศรีสุวรรณ ประธานกรรมการสอบ ผู้แทนบัณฑิตวิทยาลัย ผศ.ดร.ลือพงศ์ แก้วศรีจันทร์ และ ผศ.ดร.ผกามาศ เจษฎ์พัฒนานนท์ กรรมการผู้แทนคณะวิศวกรรมศาสตร์ ที่กรุณาให้คำแนะนำ และช่วยตรวจทานแก้ไขวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้มีความถูกต้องสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณบริษัท สยามอิน โด รับเบอร์ จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์ด้านสถานที่และเครื่องมือ อุปกรณ์ในการทดลองในโรงงาน รวมไปถึงพี่ๆ พนักงานทุกคนในโรงงานที่คอยให้คำปรึกษาและให้ความร่วมมือเป็นอย่างดี

ขอขอบพระคุณบัณฑิตวิทยาลัย และ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่ได้จัดสรรทุนอุดหนุนสนับสนุนในการทำวิจัยในครั้งนี้ และขอขอบพระคุณบุคลากรในภาควิชาวิศวกรรมเคมีที่ให้ความช่วยเหลืออำนวยความสะดวกในการทำวิจัยนี้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณทีมงานของหน่วยวิจัยเทคโนโลยีการบำบัดมลพิษและสิ่งแวดล้อม (PTRU) ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ทุกคน ที่คอยให้ความช่วยเหลือและคอยแนะนำการแก้ปัญหาตลอดจนความอนุเคราะห์ด้านสารเคมีที่ใช้ในการทำงานวิจัยตลอดการทำวิทยานิพนธ์นี้

ท้ายสุดขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อและคุณแม่ที่ให้กำลังใจการศึกษต่อในระดับบัณฑิตศึกษา สาขาวิศวกรรมเคมี และเป็นกำลังใจเสมอมาตลอดในการทำวิทยานิพนธ์ ขอขอบคุณครูจรรยา และ พี่จุฑารัตน์ พี่ๆ เพื่อนๆ ในหน่วยวิจัย PTRU เป็นอย่างมาก และทุกๆ คนที่มีส่วนช่วยเหลือและเป็นกำลังใจให้การทำวิทยานิพนธ์ในครั้งนี้เสร็จสมบูรณ์ลุล่วงไปได้ด้วยดี

อิสรินทร์ มะหมัด

## สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	(8)
รายการตาราง	(13)
รายการภาพประกอบ	(18)
<b>บทที่ 1 บทนำ</b>	
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	3
1.3 ขอบเขตการวิจัย	3
1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
<b>บทที่ 2 ทฤษฎีและผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง</b>	
2.1 กลิ่น (Odor)	4
2.2.1 คำจำกัดความ	4
2.1.2 คุณสมบัติ	4
2.1.3 การเกิดกลิ่นจากยางธรรมชาติ	5
2.1.4 กลิ่นที่เกิดจากโรงงานอุตสาหกรรมยางแท่ง	6
2.1.5 มาตรฐานคุณภาพอากาศเกี่ยวกับกลิ่นในประเทศไทย	7
2.1.6 วิธีตรวจวัดกลิ่น	8
2.1.7 การสำรวจปัญหากลิ่นในชุมชน	8
2.2 อุตสาหกรรมยางแท่ง	9
2.2.1 การผลิตยางแท่งจากน้ำยางสด	10
2.2.1 การผลิตยางแท่งจากยางแห้ง	10
2.3 ทฤษฎีการดูดซึม	12
2.3.1 ระบบที่ใช้น้ำเป็นตัวทำละลาย (Aqueous systems)	13
2.3.2 ระบบที่ไม่ใช้น้ำเป็นตัวทำละลาย (Non-aqueous systems)	13
2.3.3 กลไกของการดูดซึม	14
2.3.4 อุปกรณ์การดูดซึม	15
2.3.5 ปัจจัยที่ต้องพิจารณาในการออกแบบหอดูดซึม	17



## สารบัญ (ต่อ)

เรื่อง	หน้า
2.4 การเติมอากาศหรือออกซิเจนเพื่อกำจัดเหล็ก	21
2.4.1 การเติมออกซิเจนโดยการเป่าอากาศ (Forced air/Draft aeration)	22
2.4.2 การเติมออกซิเจนโดยการสัมผัสอากาศ (Natural draft aeration)	22
2.4.3 การเติมอากาศลงในน้ำ (Diffused aeration)	23
2.5 ปฏิริยาเคมีที่เกี่ยวข้อง	24
2.5.1 ปฏิริยาเคมีระหว่างสารละลายเหล็กกับกรดอะซิดิก	24
2.5.2 ปฏิริยาเคมีระหว่างก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์กับน้ำ	25
2.5.3 ปฏิริยาเคมีที่เกี่ยวข้องระหว่างกรดอะซิดิกกับสารดูดซึมในการวิเคราะห์ความเข้มข้นของกรดอะซิดิก	26
2.6 Response Surface Methodology (RSM)	27
2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	29
2.8 ข้อสรุปข้อมูลที่ได้จากการค้นคว้า	38
<b>บทที่ 3 วัสดุอุปกรณ์ และวิธีการวิจัย</b>	
3.1 สารเคมี	40
3.1.1 สารเคมีที่ใช้ในการเตรียมสารละลายไอรอน(III)คลอไรด์	40
3.1.2 สารเคมีที่ใช้ในการวิเคราะห์ความเข้มข้นของกรดอะซิดิก	40
3.1.3 สารเคมีที่ใช้ในการวิเคราะห์ปริมาณเหล็ก (Fe)	40
3.1.4 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง	40
3.1.5 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเก็บตัวอย่าง	41
3.1.6 อุปกรณ์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ความเข้มข้นของเหล็ก	41
3.1.7 สารเคมีสำหรับการวิเคราะห์ข้อมูลด้วยเทคนิค GC 6890	42
3.1.8 อุปกรณ์สำหรับการวิเคราะห์ตัวอย่างกรดไขมันระเหยง่าย	43
3.2 วิธีการทดลอง	44
3.2.1 การศึกษาการเกิดปฏิกิริยาระหว่างสารละลายไอรอน(III)คลอไรด์กับกรดอะซิดิกในระดับห้องปฏิบัติการ	44

## สารบัญ (ต่อ)

เรื่อง	หน้า
3.2.2 การศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการใช้สารละลายไอออน(III)คีเลท บำบัดกรดอะซิติคโดยในคอลัมน์บรรจุ (Packed column)	45
3.2.3 การออกแบบสภาวะการทดลอง	47
3.2.4 วิธีการทดลอง	49
3.3 การเก็บตัวอย่างก๊าซเสีย	51
3.3.1 การเก็บตัวอย่างในอิมพิงค์เจอร์	52
3.3.2 การเก็บตัวอย่างก๊าซเสียโดยใช้ Sorbent tube	53
3.4. การคำนวณประสิทธิภาพการบำบัดกรดอะซิติค (%Removal efficiency)	55
3.5 วิธีการวิเคราะห์สารละลายไอออน(III)คีเลท	55
3.5.1 การเก็บตัวอย่าง	55
3.5.2 การวิเคราะห์ตัวอย่างเพื่อหาความเข้มข้นของ Fe ในสารละลาย	56
3.6 ศึกษาการประยุกต์ใช้สารละลายไอออน(III)คีเลทในการบำบัดกลิ่นจาก อุตสาหกรรมยางแท่งในหอดูดซึมแบบเปียก (Wet scrubber) ของโรงงาน	58
<b>บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์</b>	
4.1 การศึกษาการเกิดปฏิกิริยาระหว่างสารละลายไอออน(III)คีเลทกับกรดอะซิติค	61
4.1.1 ผลจากการวัดค่าความยาวคลื่นแสงโดยใช้ UV-VIS spectroscopy	61
4.1.2 ผลจากการวิเคราะห์ CHNOS-analyzer	61
4.1.3 ผลจากการวิเคราะห์โดยใช้เทคนิคอินฟราเรดสเปกตรัม (Infrared Spectral Analysis) ด้วยเครื่อง FT-IR สเปกโตรมิเตอร์	62
4.1.4 ผลจากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคนิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์สเปก โทรสโกปี (Nuclear magnetic resonance spectroscopy, NMR)	65
4.2 การบำบัดกรดอะซิติคโดยใช้สารละลายไอออน(III)คีเลทโดยใช้สารละลาย ไอออน(III)คีเลทในคอลัมน์บรรจุขนาดต้นแบบ	68
4.2.1 ประสิทธิภาพการบำบัดกรดอะซิติคจากปล่องควันโดยใช้สาร ละลายไอออน(III)คีเลท	68

## สารบัญ (ต่อ)

เรื่อง	หน้า
4.2.2 ผลการวิเคราะห์ส่วนประกอบของก๊าซอื่นๆ ก่อนและหลังการบำบัด กรดอะซิติกจากกระบวนการอบยางแท่งของโรงงานอุตสาหกรรม	71
4.2.3 ผลการวิเคราะห์ปริมาณของก๊าซคาร์บอน ไดออกไซด์	73
4.2.4 ความแตกต่างระหว่างการฟื้นฟูสภาพสารละลายด้วยการเติมอากาศ และไม่มีการเติมอากาศในถังบรรจุสารละลาย	74
4.2.5 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการบำบัดกรดอะซิติกในคอลัมน์บรรจุ	75
4.3 การประยุกต์ใช้สารดูดซึมน้ำไอออน(III)คีเลทกับหอดูดซึมแบบเปียกขนาด อุตสาหกรรม	90
4.3.1 การหาประสิทธิภาพในการบำบัดกรดอะซิติกโดยใช้สารดูดซึมน้ำ ไอออน(III)คีเลทในหอดูดซึมแบบเปียกของโรงงานอุตสาหกรรม	90
4.3.2 การวัดค่าความเข้มข้นของสารละลายไอออน(III)คีเลทในการบำบัด กรดอะซิติกตลอดระยะเวลาของการดำเนินการ	92
4.3.3 การสำรวจและสอบถามความคิดเห็นของพนักงานบริษัทสยาม อินโดรับเบอร์ จำกัด ต่อระดับความแรงของกลิ่น	93
4.4 การศึกษาการวิเคราะห์ข้อมูลเชิงเศรษฐศาสตร์ในการบำบัดกรดอะซิติกใน หอดูดซึมแบบเปียกขนาดอุตสาหกรรม	95
<b>บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง</b>	
5.1 สรุปผลการทดลอง	99
5.1.1 การศึกษาการเกิดปฏิกิริยาระหว่างสารละลายไอออน(III)คีเลท กับกรดอะซิติก	99
5.1.2 การศึกษาประสิทธิภาพในการบำบัดกรดอะซิติกด้วยสารละลาย ไอออน(III)คีเลทในคอลัมน์บรรจุ	100
5.1.3 การศึกษาประสิทธิภาพในการบำบัดกรดอะซิติกโดยใช้สารละลาย ไอออน(III)คีเลทในหอดูดซึมขนาดอุตสาหกรรม	101
<b>บรรณานุกรม</b>	105

<b>ภาคผนวก</b>	
ก. ข้อมูลเบื้องต้นการทดลอง	111
ข. วิธีการวิเคราะห์	117
ค. ผลการทดลอง	133
ง. ผล Experimental design and regression model	154
จ. สภาวะการทดสอบและผลการทดสอบ	156
ฉ. ผลประเมินระดับความรุนแรงของกลิ่นก่อนและหลังบำบัด	164
<b>ประวัติผู้เขียน</b>	167

## รายการตาราง

ตารางที่	หน้า
2-1 แสดงกรดไขมันระเหยง่ายและประเภทของกลิ่น	7
2-2 แสดงการประเมินความแรงของกลิ่นที่แต่ละระดับความเข้มข้น	9
2-3 แสดงความสามารถในการละลายน้ำของกรดชนิดต่างๆ	26
3-1 แสดงสภาวะการทดลองโดยใช้สารละลายไอโรน(III)คีเลท เป็นสารดูดซึมในการบำบัดกรดอะซิติกในคอลัมน์บรรจุ (Packed column)	48
4-1 แสดงองค์ประกอบของธาตุต่างๆที่ได้จากการวิเคราะห์ในสารละลายก่อนและหลังทำปฏิกิริยา	62
4-2 แสดงองค์ประกอบของก๊าซเสียที่เข้าและออกของ Packed column โดยทำการวัดค่า 3 ครั้งในแต่ละการทดลอง	72
4-3 แสดงค่าแรงดึงผิวของสารละลายไอโรน(III)คีเลทและน้ำที่อุณหภูมิ 30 °C	74
4-4 แสดงประสิทธิภาพการบำบัดกรดอะซิติกด้วยสารละลายไอโรน(III)คีเลทในคอลัมน์บรรจุ (Packed column) ที่สภาวะการทดลองต่างๆ จากการทดลองด้วยเทคนิค RSM แบบ CCD	76
4-5 แสดงผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของการทดลองที่มีรูปแบบสมการเป็น Linear interaction model (4-2)	77
4-6 แสดงข้อมูลทางสถิติของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของค่าประสิทธิภาพการบำบัดกรดอะซิติก	78
4-7 แสดงสภาวะที่เหมาะสมซึ่งได้จากการ Optimized เพื่อให้ได้ประสิทธิภาพการบำบัดสูงสุดจากการ Regression จากโมเดล Linear interaction จากสมการ (4-2)	83
4-8 แสดงสภาวะการดำเนินการที่เหมาะสมของการบำบัดกรดอะซิติกโดยใช้สารละลายไอโรน(III)คีเลทในคอลัมน์บรรจุ โดยใช้ GC 6890 เมื่ออัตราการไหลของก๊าซเสียที่เข้าระบบคงที่ 40 L/min	86
4-9 แสดงค่า Henry's law constant ของกรดอะซิติกและคาร์บอนไดออกไซด์ที่ 25°C	88
4-10 แสดงสภาวะการดำเนินการที่เหมาะสมของการบำบัดกรดอะซิติกโดยใช้สารละลายไอโรน(III)คีเลทในคอลัมน์บรรจุ เมื่ออัตราการไหลของก๊าซเสียที่เข้าระบบคงที่ 40 L/min	88

## รายการตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4-11 แสดงผลการทดสอบข้อมูลระดับของกลิ่น โดยการวิเคราะห์โดย One way ANOVA	94
4-12 แสดงค่าสารดูดซึมแต่ละชนิด	96
4-13 แสดงค่าสภาวะการดำเนินการของระบบ (Operating condition) และการประเมิน ค่าใช้จ่ายเชิงเศรษฐศาสตร์ที่เกิดของหอดูดซึมแบบเปียกของโรงงานอบยางแท่ง	96
4-14 การเปรียบเทียบอัตราค่าไฟฟ้าขายปลีกเฉลี่ยกับต้นทุนหน่วยสุดท้าย	97
4-15 แสดงค่าใช้จ่ายทั้งหมดของการดำเนินการตลอดระยะเวลา 2 สัปดาห์	97
5-1 แสดงสภาวะที่เหมาะสมในการศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดกรดอะซิติกด้วย สารละลายไอรอน(III)คีเลทในคอลัมน์บรรจุ	101
ข-1 แสดง Physical Properties ของกรดอะซิติกที่ 20 °C	120
ข-2 แสดงค่าคงที่ที่ใช้ในการแปลงหน่วย mg/m <sup>3</sup> เป็น ppm	120
ข-3 แสดงสารละลายกรดไขมันระเหยง่ายมาตรฐานกรดอะซิติกในตัวทำละลายผสม	123
ข-4 แสดงผลจากการทำกราฟมาตรฐานโดยวิธีการใช้วิธี AAS	127
ข-5 แสดงผลจากการทำกราฟมาตรฐานโดยวิธีการ Phenanthroline (APHA, 1985)	131
ค-1.1 ข้อมูลความเข้มข้นของกรดอะซิติกและประสิทธิภาพการบำบัดกรดอะซิติก (%) กับ เวลาในหน่วยนาที (min) ที่ความเข้มข้นของสารละลายไอรอน(III)คีเลท (C <sub>Fe,0</sub> ) = 25.06 g/L, อัตราการไหลของสารละลายไอรอน(III)คีเลท (L) = 3 L/min และปริมาณอากาศที่ใช้ในการฟื้นฟูสภาพสารละลาย (A) = 1.25 L/min	134
ค-1.2 ข้อมูลความเข้มข้นของกรดอะซิติกและประสิทธิภาพการบำบัดกรดอะซิติก (%) กับเวลา (min) ที่ (C <sub>Fe,0</sub> ) = 25.06 g/L, (L) = 6 L/min และ (A) = 1.25 L/min	135
ค-1.3 ข้อมูลความเข้มข้นของกรดอะซิติก และประสิทธิภาพการบำบัดกรดอะซิติก (%) กับเวลา (min) ที่ (C <sub>Fe,0</sub> ) = 25.06 g/L, (L) = 8 L/min และ (A) = 1.25 L/min	135
ค-1.4 ข้อมูลความเข้มข้นของกรดอะซิติกและประสิทธิภาพการบำบัดกรดอะซิติก (%) กับเวลา (min) ที่ (C <sub>Fe,0</sub> ) = 11.12 g/L, (L) = 6 L/min และ (A) = 1.25 L/min	136
ค-1.5 ข้อมูลความเข้มข้นของกรดอะซิติกและประสิทธิภาพการบำบัดกรดอะซิติก (%) กับเวลา (min) ที่ (C <sub>Fe,0</sub> ) = 39 g/L, (L) = 6 L/min และ (A) = 1.25 L/min	136

## รายการตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ค-1.6 ข้อมูลความเข้มข้นของกรดอะซิติคและประสิทธิภาพการบำบัดกรดอะซิติค (%) กับเวลา (min) ที่ $(C_{Fe,0}) = 33.35 \text{ g/L}$ , $(L) = 4 \text{ L/min}$ และ $(A) = 1.70 \text{ L/min}$	137
ค-1.7 ข้อมูลความเข้มข้นของกรดอะซิติคและประสิทธิภาพการบำบัดกรดอะซิติค (%) กับเวลา (min) ที่ $(C_{Fe,0}) = 33.35 \text{ g/L}$ , $(L) = 7 \text{ L/min}$ และ $(A) = 1.70 \text{ L/min}$	137
ค-1.8 ข้อมูลความเข้มข้นของกรดอะซิติคและประสิทธิภาพการบำบัดกรดอะซิติค (%) กับเวลา (min) ที่ $(C_{Fe,0}) = 16.77 \text{ g/L}$ , $(L) = 4 \text{ L/min}$ และ $(A) = 1.70 \text{ L/min}$	138
ค-1.9 ข้อมูลความเข้มข้นของกรดอะซิติคและประสิทธิภาพการบำบัดกรดอะซิติค (%) กับเวลา (min) ที่ $(C_{Fe,0}) = 16.77 \text{ g/L}$ , $(L) = 7 \text{ L/min}$ และ $(A) = 1.70 \text{ L/min}$	138
ค-1.10 ข้อมูลความเข้มข้นของกรดอะซิติคและประสิทธิภาพการบำบัดกรดอะซิติค (%) กับเวลา (min) ที่ $(C_{Fe,0}) = 25.06 \text{ g/L}$ , $(L) = 6 \text{ L/min}$ และ $(A) = 2 \text{ L/min}$	139
ค-1.11 ข้อมูลความเข้มข้นของกรดอะซิติคและประสิทธิภาพการบำบัดกรดอะซิติค (%) กับเวลา (min) ที่ $(C_{Fe,0}) = 25.06 \text{ g/L}$ , $(L) = 6 \text{ L/min}$ และ $(A) = 0.5 \text{ L/min}$	139
ค-1.12 ข้อมูลความเข้มข้นของกรดอะซิติคและประสิทธิภาพการบำบัดกรดอะซิติค (%) กับเวลา (min) ที่ $(C_{Fe,0}) = 25.06 \text{ g/L}$ , $(L) = 6 \text{ L/min}$ และ $(A) = 1.25 \text{ L/min}$	140
ค-1.13 ข้อมูลความเข้มข้นของกรดอะซิติคและประสิทธิภาพการบำบัดกรดอะซิติค (%) กับเวลา (min) ที่ $(C_{Fe,0}) = 16.77 \text{ g/L}$ , $(L) = 4 \text{ L/min}$ และ $(A) = 0.80 \text{ L/min}$	140
ค-1.14 ข้อมูลความเข้มข้นของกรดอะซิติคและประสิทธิภาพการบำบัดกรดอะซิติค (%) กับเวลา (min) ที่ $(C_{Fe,0}) = 16.77 \text{ g/L}$ , $(L) = 7 \text{ L/min}$ และ $(A) = 0.80 \text{ L/min}$	141
ค-1.15 ข้อมูลความเข้มข้นของกรดอะซิติคและประสิทธิภาพการบำบัดกรดอะซิติค (%) กับเวลา (min) ที่ $(C_{Fe,0}) = 33.35 \text{ g/L}$ , $(L) = 4 \text{ L/min}$ และ $(A) = 0.80 \text{ L/min}$	141
ค-1.16 ข้อมูลความเข้มข้นของกรดอะซิติคและประสิทธิภาพการบำบัดกรดอะซิติค (%) กับเวลา (min) ที่ $(C_{Fe,0}) = 33.35 \text{ g/L}$ , $(L) = 7 \text{ L/min}$ และ $(A) = 0.80 \text{ L/min}$	142
ค-1.17 ข้อมูลความเข้มข้นของกรดอะซิติคและประสิทธิภาพการบำบัดกรดอะซิติค (%) กับเวลา (min) ที่ $(C_{Fe,0}) = 25.06 \text{ g/L}$ , $(L) = 6 \text{ L/min}$ และ $(A) = 1.25 \text{ L/min}$	142
ค-1.18 ข้อมูล pH ที่แต่ละความเข้มข้นของสารละลายไอออน(III)คือเลข	143

## รายการตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ค-1.19 ข้อมูลความเข้มข้นของสารละลายไอรอน(III)ที่เลทกับเวลา (min) ที่ความเข้มข้น( $C_{Fe,0}$ ) = 25.06 g/L, L = 6 L/min และ A = 1.25 L/min	143
ค-1.20 ข้อมูลความเข้มข้นของสารละลายไอรอน(III)ที่เลทกับเวลา (min) ที่ความเข้มข้น( $C_{Fe,0}$ ) = 11.12 g/L, L = 6 L/min และ A = 1.25 L/min	144
ค-1.21 ข้อมูลความเข้มข้นของสารละลายไอรอน(III)ที่เลทกับเวลา (min) ที่ความเข้มข้น( $C_{Fe,0}$ ) = 39 g/L, L = 6 L/min และ A = 1.25 L/min	144
ค-1.22 ข้อมูลความเข้มข้นของสารละลายไอรอน(III)ที่เลทกับเวลา (min) ที่ความเข้มข้น( $C_{Fe,0}$ ) = 11.17 g/L, L = 6 L/min และ A = 1.25 L/min	145
ค-1.23 ข้อมูลความเข้มข้นของสารละลายไอรอน(III)ที่เลทกับเวลา (min) ที่ความเข้มข้น( $C_{Fe,0}$ ) = 11.17 g/L, L = 6 L/min และ A = 0	145
ค-1.24 ข้อมูลความเข้มข้นของ CO <sub>2</sub> และ CO <sub>2</sub> removal efficiency (%) กับเวลา (min) ที่ $C_{Fe,0}$ = 25.06 g/L, L = 6 L/min และ A = 1.25 L/min	146
ค-1.25 ข้อมูลความเข้มข้นของ CO <sub>2</sub> และ CO <sub>2</sub> removal efficiency (%) กับเวลา (min) ที่ $C_{Fe,0}$ = 11.12 g/L, L = 6 L/min และ A = 1.25 L/min	147
ค-1.26 ข้อมูลความเข้มข้นของ CO <sub>2</sub> และ CO <sub>2</sub> removal efficiency (%) กับเวลา (min) ที่ $C_{Fe,0}$ = 39 g/L, L = 6 L/min และ A = 1.25 L/min	148
ค-2.1 ข้อมูลความเข้มข้นของกรดอะซิติกและประสิทธิภาพการบำบัดกรดอะซิติก (%) กับเวลา (min) L = 6 L/min	148
ค-2.2 ข้อมูล pH ของน้ำและอุณหภูมิกับเวลาที่อัตราการไหลของน้ำ L= 6 L/min	149
ค-2.3 ข้อมูลผลของการบำบัดก๊าซคาร์บอน ไดออกไซด์โดยใช้น้ำเป็นสารดูดซึม	149
ค-3.1 ข้อมูลผลของการบำบัดกรดอะซิติกโดยใช้ GC 6890	150
ค-3.2 ข้อมูลผลของความเข้มข้นของสารละลายไอรอน(III)ที่เลท	150
ค-3.3 ข้อมูลผลของการบำบัดก๊าซคาร์บอน ไดออกไซด์โดยใช้สารละลายไอรอน(III)ที่เลท เป็นสารดูดซึม	151
ค-3.4 ข้อมูลผลของอุณหภูมิและ pH ของสารละลายไอรอน(III)ที่เลทกับเวลา (min)	151



## รายการตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ค-4.1 ข้อมูลความเข้มข้นของกรดอะซิติกและประสิทธิภาพในการบำบัดกรดอะซิติก (%) กับเวลา (ชั่วโมง) ที่อัตราการไหลของก๊าซเสีย (G) = 6,390 m <sup>3</sup> /min และ L=33 L/min	151
ค-4.2 ข้อมูลผลของความเข้มข้นของสารละลายไอออน(III)คีเลทกับเวลา (min) ที่ใช้ในการทดลอง	152
ค-4.3 ข้อมูลผลของการบำบัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์กับเวลา (ชั่วโมง)	152
ค-4.4 ข้อมูล pH และอุณหภูมิกับเวลา	153

## รายการภาพประกอบ

ภาพประกอบที่	หน้า
1-1 แสดงปริมาณการผลิตยางธรรมชาติในประเทศไทย	1
1-2 แสดงโครงสร้างของสารละลาย Fe(III)EDTA และสารละลาย Fe(II)EDTA	2
2-1 แสดงกลไกการย่อยโปรตีน	5
2-2 แสดงกระบวนการหมักแบบไร้อากาศ	5
2-3 แสดงปฏิกิริยาออกซิเดชันเกิดสารประกอบเมทิลโอนีน	6
2-4 แสดงการผลิตยางแท่งจากน้ำยางสด STR 5L (ซ้าย) แสดงและการผลิตยางแท่งจากยางแห้ง STR 20 (ขวา)	11
2-5 แสดงทฤษฎีสองฟิล์ม (Two resistance theory) สำหรับการถ่ายโอนมวลระหว่างแก๊ส และของเหลว	15
2-6 แสดงอุปกรณ์แบบแพคทาวเวอร์แบบไหลสวนทาง (Countercurrent) (ซ้าย) และแบบไหลผ่าน (Cross-flow) (ขวา)	16
2-7 แสดงวัสดุที่บรรจุในแพคคอลลัมน์ Berl Saddle (a), Intalox Saddle (b), Raschig Ring (c), Lessing Ring (d), Pall Ring (e), Tellerette (f)	17
2-8 แสดงคุณสมบัติของกระแสน้ำวนและก๊าซในหลอดซึมแบบไหลสวนทางกัน	18
2-9 แสดงการหาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่เหมาะสมของการออกแบบ Packed column	19
2-10 แสดง Oxygenation of Fe <sup>+2</sup>	21
2-11 ระบบกำจัดเหล็กโดยการเป่าอากาศ (Forced air/Draft aeration)	22
2-12 แสดงการเติมออกซิเจนโดยการสัมผัสอากาศ (Natural draft aeration)	23
2-13 แสดงการเติมออกซิเจนแบบการเติมอากาศลงในน้ำ (Diffused aeration)	23
2-14 แสดงสูตรโครงสร้างของ Ethylene diaminetetraacetic acid (EDTA)	24
2-15 แสดงกราฟของการไทเทรตสารละลายกรดกับเบส	26
3-1 แสดงเครื่อง UV-Spectrophotometer สำหรับใช้วิเคราะห์หาเหล็กเฟอรัส Fe(II)	42
3-2 แสดงเครื่อง Atomic absorption spectrometer (AAS) สำหรับใช้วิเคราะห์ปริมาณ เหล็กรวม (Perkin Elmer model AA Analyst)	42
3-3 แสดงเครื่องวิเคราะห์ Gas chromatography (GC 6890)	43

## รายการภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบที่	หน้า
3-4 แสดงชุดการทดลองเบื้องต้นสำหรับการทำปฏิกิริยาระหว่างกรดอะซิติกและสารละลายไอโรน(III)คีเลทในสถานะของเหลว	45
3-5 แสดงชุดทดลองการบำบัดก๊าซเสียจากปล่องควันจากกระบวนการอบยางแท่งด้วยกระบวนการดูดซึมโดยใช้สารละลายไอโรน(III)คีเลทในคอลัมน์บรรจุ	46
3-6 แสดงลักษณะทางกายภาพของสารละลายไอโรน(III)คีเลท	49
3-7 แสดงท่อส่งก๊าซเสียที่ออกจากกระบวนการอบยางแท่งเพื่อ By part เข้าสู่ระบบบำบัดโดยใช้คอลัมน์บรรจุ	50
3-8 แสดงคอลัมน์บรรจุ (Packed column) ที่ใช้ในการบำบัดก๊าซเสียจากปล่องควันติดตั้งที่บริษัทสยามอินโด รีบเบอร์ จำกัด อ.ตะโพนด จ.พัทลุง	51
3-9 แสดงการใช้อิมฟังก์เจอร์ในการเก็บตัวอย่างสารเพื่อไปวิเคราะห์ความเข้มข้นของปริมาณกรดอะซิติก โดยใช้สารละลายฟีนอล์ฟทาลินเป็นอินดิเคเตอร์	52
3-10 แสดงวิธีการเก็บตัวอย่างด้วยปั๊มเก็บอากาศ และ Sorbent tube	53
3-11 แสดงกราฟมาตรฐานสำหรับใช้วิเคราะห์หาความเข้มข้นของกรดอะซิติกโดยใช้วิธี GC 6890	54
3-12 แสดงการเก็บตัวอย่างสารดูดซึมจากการทำปฏิกิริยามาทำการวิเคราะห์ความเข้มข้นที่เวลาต่างๆ	56
3-13 แสดงกราฟแสดงการ Scan หาช่วงความยาวคลื่นที่เหมาะสมสำหรับใช้ในการวิเคราะห์เหล็กเฟอรัส Fe(II) โดยใช้อุปกรณ์ UV-VIS spectroscopy	57
3-14 แสดงกราฟมาตรฐานสำหรับใช้ในการวิเคราะห์เหล็กเฟอรัส Fe(II) โดยใช้ อุปกรณ์ UV – VIS spectroscopy ที่ความยาวคลื่น 510 นาโนเมตร	57
3-15 แสดงกราฟมาตรฐานสำหรับใช้ในการวิเคราะห์เหล็กรวม (Total Fe) โดยใช้ อุปกรณ์ AAS	58
3-16 แสดงหอดูดซึมแนวนอนขนาดอุตสาหกรรมที่ใช้จริงในการบำบัดกรดอะซิติกจากปล่องควันจากกระบวนการอบยางแท่งของ บริษัท สยามอินโดรีบเบอร์ จำกัด	59

## รายการภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบที่	หน้า
3-17 แสดงไดอะแกรมแสดงการไหลของก๊าซและของสารดูดซึ่มในหอคูดซึ่มแนวนอนขนาดอุตสาหกรรมที่ใช้ในการบำบัดกรดอะซิดิกที่ปล่อยจากเตาอบยาง บริษัทสยามอินโดรับเบอร์ จำกัด จ.พัทลุง	60
4-1 แสดงสัญญาณอินฟราเรดสเปกตรัม (IR bands) ของ (ก) สารละลายไอรอน(III)คีเลทก่อนทำปฏิกิริยา และ (ข) สารละลายไอรอน(III)คีเลทหลังทำปฏิกิริยาตามลำดับ	64
4-2 แสดงลักษณะ Proton magnetic resonance spectrum ของกรดอะซิดิกก่อนทำปฏิกิริยา	66
4-3 แสดงลักษณะ Proton magnetic resonance spectrum ของสารละลายไอรอน(III)คีเลทก่อนทำปฏิกิริยา	66
4-4 แสดงลักษณะ NMR (NMR band) ของ (ก) สารละลายไอรอน(III)คีเลทก่อนทำปฏิกิริยา และ (ข) สารละลายไอรอน(III)คีเลทหลังทำปฏิกิริยาตามลำดับ เมื่อใช้ Radio frequency 50 MHz	67
4-5 แสดงประสิทธิภาพการบำบัดกรดอะซิดิกกับเวลา สำหรับการทดสอบระบบบำบัดกรดอะซิดิก โดยปริมาณของอากาศในการฟื้นฟูสารละลายไอรอน(III)คีเลท (A) = 1.25 L/min และ L/G = 150 L/m <sup>3</sup>	69
4-6 แสดงความเข้มข้นของสารละลายไอรอน(III)คีเลทกับเวลา สำหรับการทดสอบระบบบำบัดกรดอะซิดิก โดยปริมาณของอากาศในการฟื้นฟูสารละลายไอรอน(III)คีเลท (A) = 1.25 L/min และ L/G = 150 L/m <sup>3</sup>	71
4-7 แสดงอุปกรณ์ portable GC ที่ใช้ในการวัดปริมาณส่วนประกอบของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในก๊าซเสียที่เข้าและออกของคอลัมน์บรรจุ	72
4-8 แสดงประสิทธิภาพการบำบัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์กับเวลา สำหรับการทดสอบระบบบำบัดกรดอะซิดิก โดยปริมาณของอากาศในการฟื้นฟูสารละลายไอรอน(III)คีเลท (A) = 1.25 L/min และ L/G = 150 L/m <sup>3</sup> เปรียบเทียบกับการใช้น้ำ	73
4-9 แสดงการเปรียบเทียบระบบที่ใช้ก๊าซเสียมาฟื้นฟูสภาพสารละลายไอรอน(III)คีเลทกับระบบที่ไม่ใช้ก๊าซเสียมาฟื้นฟูสภาพในถังบรรจุสารละลาย (C <sub>Fe,0</sub> = 11.12 g/L, L = 6 L/min)	75

## รายการภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบที่	หน้า
4-10 แสดงกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการบำบัดกรดอะซิติกที่ได้จากการทดลองและจากการทำนายโดยใช้แบบจำลองตามสมการ Linear interaction (4-2)	79
4-11 แสดงกราฟพื้นผิวแสดงความสัมพันธ์ระหว่างผลของความเข้มข้นของสารละลายไอออน(III)คีเลท ( $C_{Fe,0}$ ) และปริมาณการเติมอากาศเพื่อใช้ในการฟื้นฟูสภาพสารละลายไอออน(III)คีเลท (A) ที่มีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดกรดอะซิติก	80
4-12 แสดงกราฟพื้นผิวแสดงความสัมพันธ์ระหว่างผลของปริมาณการเติมอากาศเพื่อใช้ในการฟื้นฟูสภาพสารละลายไอออน(III)คีเลท (A) และอัตราการไหลของสารละลายไอออน(III)คีเลทที่มีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดกรดอะซิติก	81
4-13 แสดงกราฟพื้นผิวแสดงความสัมพันธ์ระหว่างผลของความเข้มข้นของสารละลายไอออน(III)คีเลท ( $C_{Fe,0}$ ) และอัตราการไหลของสารละลายไอออน(III)คีเลท (L) ที่มีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดกรดอะซิติก	82
4-14 แสดงผลการวิเคราะห์กรดไขมันระเหยง่ายที่ทางเข้าคอลัมน์บรรจุด้วยเครื่อง GC-6890	84
4-15 แสดงผลการวิเคราะห์กรดไขมันระเหยง่ายที่ทางออกจาก Packed column เมื่อเวลาผ่านไป 8 ชั่วโมงของการดำเนินการด้วยเครื่อง GC-6890	85
4-16 แสดงประสิทธิภาพการบำบัดกรดอะซิติกและก๊าซคาร์บอน ไดออกไซด์จากสภาวะที่เหมาะสม	87
4-17 แสดงความเข้มข้นของสารละลายไอออน(III)คีเลทตลอดระยะเวลาดำเนินการ	89
4-18 แสดงความเข้มข้นของสารละลาย ไอออน(II)คีเลทตลอดระยะเวลาดำเนินการ	89
4-19 แสดงระบบดูดซึมแบบเปียก Three bed cross flow packed tower	91
4-20 ประสิทธิภาพการบำบัดกรดอะซิติกด้วยการใช้สารละลายไอออน(III)คีเลทในหอดูดซึมแบบเปียกของ โรงงานอุตสาหกรรม	91
4-21 แสดงความเข้มข้นของของสารละลายไอออน(III)คีเลทตลอดระยะเวลาดำเนินการ	92
4-22 แสดงระดับผลการประเมินความแตกต่างของระดับความรุนแรงของกลิ่นก่อนบำบัด (1) และหลังจากการบำบัดด้วยการใช้สารละลายไอออน(III)คีเลท (2) ตามลำดับ	93

## รายการภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบที่	หน้า
4-23 แสดงระดับความแตกต่างของระดับความรุนแรงของกลิ่นก่อนบำบัด (1) และหลังจากการบำบัดด้วยการใช้สารละลายไอรอน(III)คีเลท (2) ตามลำดับ	95
5-1 แสดงพื้นที่บริเวณหน้าเตาอบยาง ของบริษัท สยามอินโด รีบเบอร์ จำกัด จ.พัทลุง	103
5-2 แสดงพื้นที่บริเวณในส่วนของกระบวนการล้างทำความสะอาดยาง ของบริษัท สยามอินโด รีบเบอร์ จำกัด จ.พัทลุง	104
5-3 แสดงพื้นที่เก็บหรือพักยางกันด้วยก่อนผ่านกระบวนการตัดและการล้างทำความสะอาดต่อไป ของ บริษัท สยามอินโด รีบเบอร์ จำกัด	104
ข-1 แสดงการไทเทรต (Titration) หาปริมาณกรดอะซิติกโดยใช้สารละลาย Phenolphthalein เป็นอินดิเคเตอร์เริ่มจากไม่มีสีจนได้จุดเปลี่ยนสี (สีชมพู)	121
ข-2 แสดงวิธีการเก็บตัวอย่างด้วยปั๊มเก็บอากาศ และ Sorbent tube	122
ข-3 แสดงกราฟมาตรฐานสำหรับวิเคราะห์หาความเข้มข้นของกรดอะซิติกโดยใช้วิธี GC 6890	124
ข-4 แสดงกราฟมาตรฐานสำหรับวิเคราะห์หาความเข้มข้นของเหล็กรวม (Total Fe) ใช้ AAS	127
ข-5 แสดงโมเลกุลของสาร 1,10 phenanthroline ทำการรีดิวซ์เหล็กเฟอร์รัสเพื่อให้สารละลายเกิดเป็นสีแดงส้ม	132
ข-6 แสดงกราฟมาตรฐานสำหรับวิเคราะห์หาความเข้มข้นของเหล็กเฟอร์รัส ( $Fe^{2+}$ ) โดยวิธีการ Phenanthroline	132
ง-1 แสดงผลจากการ Regression model ที่ได้จากการทดลอง	155
ฉ-1 แสดงผลจากการทดสอบทางสถิติโดยใช้ One way ANOVA	166

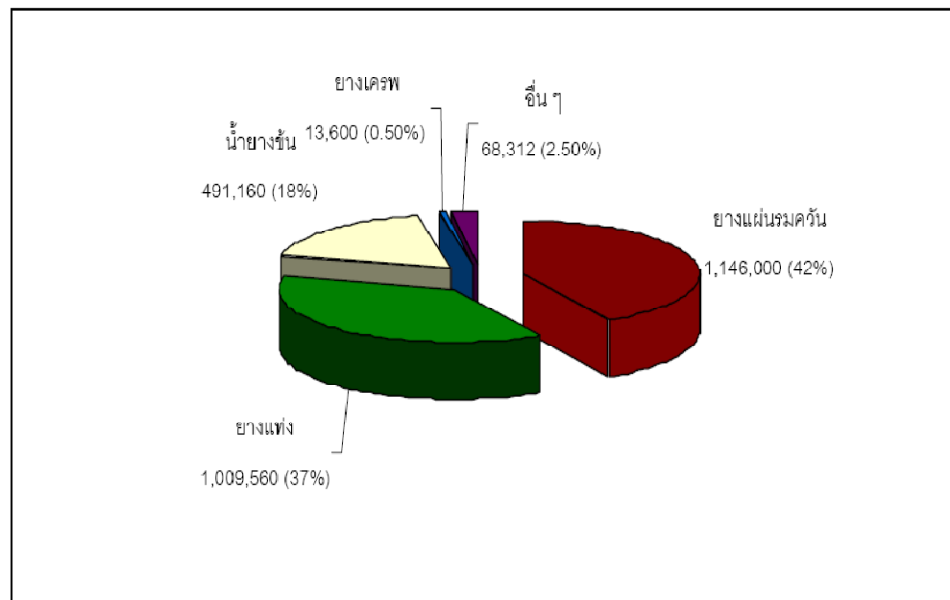
# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

อุตสาหกรรมยางพารานับเป็นอุตสาหกรรมที่มีความสำคัญต่อประเทศ ทั้งในด้านของการจ้างงานและการส่งออก ประเทศไทยเป็นประเทศผู้ผลิตและผู้ส่งออกยางธรรมชาติหรือยางแปรรูปพื้นฐานรายใหญ่ที่สุดของโลก โดยมีกำลังการผลิตประมาณ 2.5 ล้านตัน/ปี (สถาบันวิจัยยาง, 2547) คิดเป็น 1 ใน 3 ของการผลิตยางพาราของโลก โดยพื้นที่ปลูกยางพาราส่วนใหญ่ในประเทศไทยจะอยู่บริเวณภาคใต้ ที่เหลือกระจายอยู่ในภาคตะวันออกและภาคตะวันออกเฉียงเหนือซึ่งผลผลิตยางธรรมชาติมีอยู่ 4 ประเภทหลัก ได้แก่ ยางแผ่นรมควัน ยางแท่ง ยางเครพและน้ำยางข้น (กรมโรงงานอุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม, 2548) โดยมีสัดส่วนดังแสดงในภาพประกอบที่

1-1



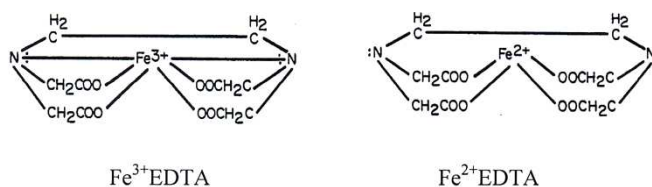
หน่วย : เมตริกตัน

ภาพประกอบที่ 1-1 แสดงปริมาณการผลิตยางธรรมชาติในประเทศไทย

ที่มา : กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2548

อุตสาหกรรมยางแท่งเป็นอุตสาหกรรมหลักที่มีความสำคัญทางเศรษฐกิจในภาคใต้ของประเทศไทย แต่ปัญหามลพิษทางอากาศที่สำคัญของอุตสาหกรรมยางแท่ง STR20 คือ ปัญหากลิ่นเหม็นรบกวนชุมชนบริเวณใกล้เคียง ซึ่งเกิดจากการอบยางและบริเวณพื้นที่กักเก็บยางกันด้วย เนื่องจากในกระบวนการการผลิตยางแท่ง STR20 จะประกอบไปด้วย การนำยางกันด้วยมาตัด ล้าง ทำความสะอาด บดย่อยให้มีขนาดเล็กกลงแล้วนำไปอบ และในขั้นตอนสุดท้ายนำสู่การห่อหุ้มด้วยบรรจุภัณฑ์ (สมทิพย์ และคณะ, 2550) ในขั้นตอนการอบยางจะทำให้เกิดสารมลพิษทางอากาศซึ่งเป็นสารระเหยออกมาจากก๊าซร้อนที่อบยางแล้วระบายออกสู่บรรยากาศทางปล่องควันของโรงงาน โดยเป็นสารที่มีกลิ่นและเป็นปัญหาหลักของโรงงานอุตสาหกรรมยางแท่ง จึงจำเป็นต้องหาแนวทางการกำจัดกลิ่นที่เกิดขึ้น

งานวิจัยนี้ศึกษาการบำบัดกลิ่นจากก๊าซเสียที่ปล่อยออกจากเตาอบยางโดยใช้การดูดซึมทางเคมีด้วยสารละลายไอรอน(III)คีเลท (Fe(III)EDTA) ซึ่งมีโครงสร้างดังภาพประกอบที่ 1-2 โดยก๊าซเสียที่ปล่อยจากเตาอบยางที่ก่อให้เกิดกลิ่นในกระบวนการอบยางแท่งเป็นพวกสารจำพวกกรดอินทรีย์ระเหยง่าย ได้แก่ กรดอะซิติก กรดบิวทิริก กรดไฮโซวาเลริก กรดเฮกซาเดคานอิก กรดโอเลอิก และเมทิลเอสเทอร์ของกรดโอเลอิก เป็นต้น (สมทิพย์ และคณะ, 2550) งานวิจัยนี้เลือกใช้การดูดซึมทางเคมีของสารละลายไอรอน(III)คีเลท เนื่องจากเป็นสารที่ไม่เป็นพิษ เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม เป็นสารละลายที่ต่อต้านการกัดกร่อน มีความสะดวกต่อการดำเนินการ เกิดมลพิษที่เร็ว มีค่า Selectivity ที่สูงสำหรับการดูดซึมแก๊ส ไม่มีข้อจำกัดของส่วนประกอบ และมีความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ (Manus *et al.*, 1997) ดังนั้นถ้าสามารถพิสูจน์ให้เห็นว่าสารละลายไอรอน(III)คีเลทมีประสิทธิภาพและสามารถบำบัดกรดอินทรีย์ระเหยง่ายได้ และสามารถฟื้นฟูสภาพสารดูดซึมได้ง่ายด้วยการป้อนอากาศให้กับระบบแล้ว จึงเป็นทางเลือกหนึ่งที่เหมาะสมกับการนำไปใช้งานกับโรงงานอุตสาหกรรมในการแก้ปัญหากลิ่นเหม็นของโรงงานอุตสาหกรรมยางแท่ง โดยใช้สารดังกล่าวเป็นสารดูดซึมในหอดูดซึมแบบเปียกของโรงงาน



ภาพประกอบที่ 1-2 แสดงโครงสร้างของสารละลาย Fe(III)EDTA และสารละลาย Fe(II)EDTA

(Sealee *et al.*, 2009)



ดังนั้นการวิจัยนี้ศึกษาสภาวะดำเนินการที่เหมาะสมในการนำสารละลายไอออน (III) คีเลทมาบำบัดกลิ่นของก๊าซเสียจากปล่องควันที่ปล่อยออกจากโรงงานอุตสาหกรรมยางแท่ง เพื่อเป็นแนวทางและเป็นทางเลือกให้กับโรงงานอุตสาหกรรมยางแท่งนำสารดังกล่าวไปประยุกต์ใช้ แก้ปัญหากลิ่นเหม็นของโรงงานอุตสาหกรรมยางแท่งที่เกิดขึ้นให้ลดน้อยลงต่อไป

### 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. เพื่อศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดกลิ่นจากก๊าซเสียของปล่องควัน โดยใช้สารละลายไอออน(III)คีเลท ในคอลัมน์บรรจุ (Packed column) ขนาดต้นแบบ และศึกษาแนวทางในการฟื้นฟูสภาพของสารละลายไอออน(III)คีเลท
2. เพื่อประยุกต์ใช้สารละลายไอออน(III)คีเลทในการบำบัดกลิ่นในโรงงานอุตสาหกรรมยางแท่ง และทำการวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายในการบำบัดกลิ่นเพื่อเป็นทางเลือกให้กับโรงงานอุตสาหกรรมยางแท่งนำไปประยุกต์ใช้ต่อไป

### 1.3 ขอบเขตการวิจัย

ขอบเขตของงานวิจัยนี้มุ่งเน้นการศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการบำบัดกรดอะซิติกในก๊าซเสียที่ปล่อยจากปล่องควันของเตาอบยางโดยใช้คอลัมน์บรรจุ (Packed column) ขนาดต้นแบบ และนำสภาวะที่ดีที่สุดที่ได้จากการศึกษาไปประยุกต์ใช้กับหอดูดซึมแบบเปียกขนาดอุตสาหกรรมของโรงงานจริง รวมทั้งคำนวณค่าใช้จ่ายในการดำเนินการบำบัดกรดอะซิติก เพื่อเป็นแนวทางในการนำผลการศึกษาไปใช้ประโยชน์จริงในโรงงานอุตสาหกรรมยางแท่ง

### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้แนวทางใหม่สำหรับการบำบัดกลิ่นเหม็นที่เกิดขึ้นจากกระบวนการอบยางแท่ง
2. สามารถนำผลการวิจัยไปประยุกต์ใช้ในการแก้ปัญหามลพิษที่เกิดจากกระบวนการอบยางของโรงงานอุตสาหกรรมยางแท่งได้

## บทที่ 2

### ทฤษฎีและผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 กลิ่น (Odor)

##### 2.1.1 คำจำกัดความ

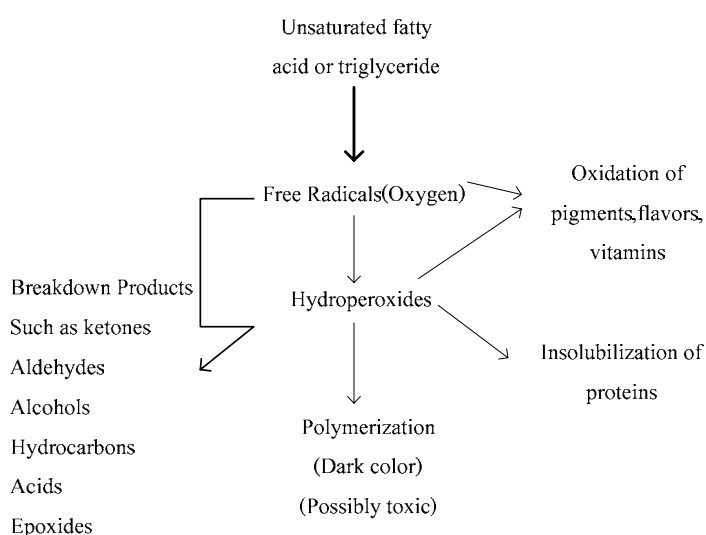
กลิ่น หมายถึง ความรู้สึกที่มีผลมาจากสารเคมีที่ระเหยได้ ไปสัมผัสกับระบบประสาทรับรู้ของร่างกายและทำให้เกิดการส่งสัญญาณไปยังสมองเพื่อแปรผลของการสัมผัสกลิ่นขึ้น และแม้ว่าความเข้มข้นของสารที่ก่อให้เกิดกลิ่นจะต่ำมาากๆ ก็สามารถก่อให้เกิดการรับรู้กลิ่นได้ หากมีการปรากฏของไอระเหยที่ก่อให้เกิดกลิ่นอยู่ ค่านี้เป็นค่า Odor detection threshold เป็นค่าความเข้มข้นของสารเคมีในอากาศซึ่งคนปกติที่มีน้ำหนักตัว 60 กิโลกรัม และไม่ป่วยเป็นโรคใด ๆ จะสามารถรับเข้าสู่ร่างกายได้โดยไม่เกิดผลกระทบใด ๆ หรืออาจนิยามว่าเป็นค่าความเข้มข้นต่ำสุดของสารที่มีได้ในอากาศ พอที่ผู้ปฏิบัติงานในบริเวณนั้น ทุกวันๆ ละ 8 ชั่วโมง ซึ่งที่ระดับนี้สมองอาจจะไม่สามารถแยกแยะความเฉพาะของกลิ่นได้ แต่หากเมื่อความเข้มข้นมากขึ้น ระบบประสาทรับรู้สัมผัสกลิ่นจะเกิดการแยกแยะความเฉพาะของกลิ่นได้ ซึ่งเรียกว่าเป็นค่าของ Odor recognition threshold ซึ่งความแตกต่างของทั้ง 2 ค่านี้จะแตกต่างกันด้วยระดับความเข้มข้นในช่วง 2-10 เท่าของแต่ละสารระเหย (ธีรภัทร์ และคณะ, 2553) โดยปริมาณกรดอะซิติกที่ความเข้มข้น 0.48 ถึง 1.0 ppm ที่อยู่ในอากาศก็สามารถรับรู้กลิ่นนั้นได้

##### 2.1.2 คุณสมบัติ

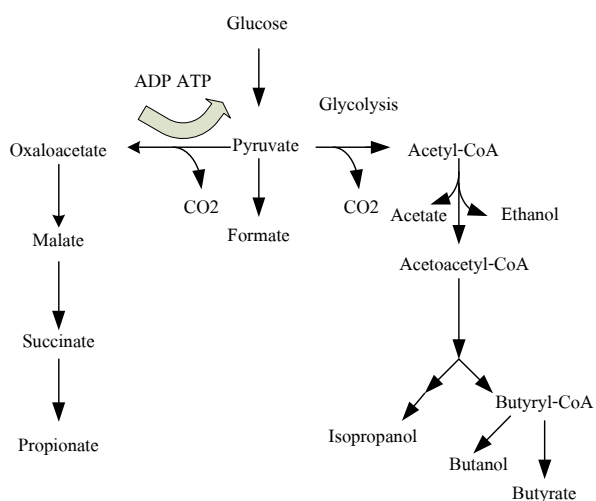
กลิ่นเป็นสสารที่ไม่สามารถจับต้องได้และไม่สามารถเห็นรูปของกลิ่นได้แต่สามารถเห็นรูปร่างของแหล่งที่มาของกลิ่นได้ โดยสิ่งที่ทำให้เกิดกลิ่นคือ ตัวสารเคมี (ในรูปของโมเลกุล) กลิ่นจึงเป็นโมเลกุลของสสารที่มีความไวมากจะหลุดตัวออกจากสารตั้งต้นได้ง่าย หากได้รับกลิ่นจากตัวสารมลพิษจะมีผลต่อสุขภาพ โดยผลกระทบที่ได้รับจะขึ้นอยู่กับความเป็นพิษของตัวสารมลพิษนั้น ระยะเวลาและปริมาณที่ได้รับด้วยการหายใจเข้าไป ซึ่งโดยส่วนมากจะส่งผลกระทบต่อให้เกิดปัญหาการระคายเคืองต่อระบบทางเดินหายใจ ทำให้เกิดการปวดหัว มึนงง การมองเห็นผิดปกติ และมีผลต่อการทำงานของสมอง และหากมีการสะสมในปริมาณที่มากเพียงพอ ก็อาจเกิดเป็นมะเร็งในอวัยวะต่างๆ ได้ (ธีรภัทร์ และคณะ, 2553)

### 2.1.3 การเกิดกลิ่นจากยวธรรมชาติ

ปฏิกิริยาเคมีในยวธรรมชาติเกิดได้ในผลิตภัณฑ์ขงยวตลอดเวลา ด้วยสภาวะที่เหมาะสมยวธรรมชาติจะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันระหว่งไขมันกับออกซิเจนในอากาศเกิดเป็นโปรตีน ซึ่งมีส่วนประกอบของกรดอะมิโนในโมเลกุล และปลดปล่อยสารอินทรีย์ระเหยง่าย (VOC) ออกมา ดังในภาพประกอบที่ 2-1 ส่วนคาร์โบไฮเดรตที่อยู่ในยว จะถูกจุลินทรีย์ย่อยสลายด้วยกระบวนการหมักภายใต้สภาวะไร้อากาศ กลายเป็นแอลกอฮอล์ชนิดต่าง ๆ เช่น บิวทานอล โพรพานอล ฯลฯ ดังภาพประกอบที่ 2-2



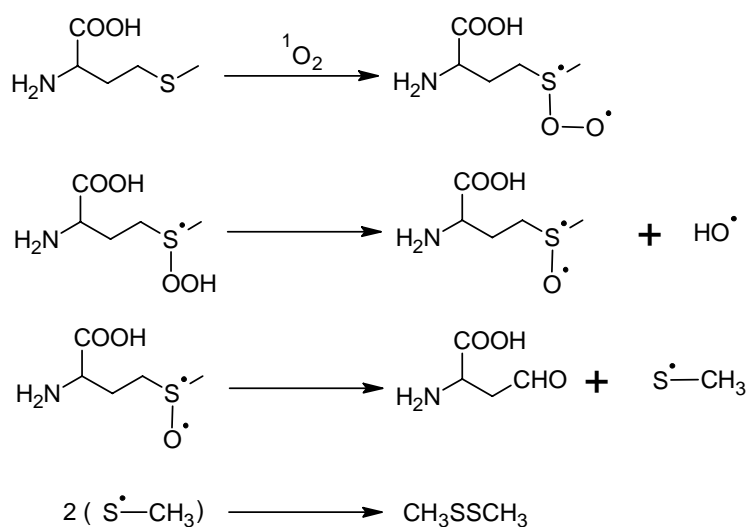
ภาพประกอบที่ 2-1 แสดงกลไกการย่อยโปรตีน



ภาพประกอบที่ 2-2 แสดงกระบวนการหมักแบบไร้อากาศ

ที่มาภาพประกอบ (2-1) และ (2-2): <http://www.thaiblogonline.com>

ปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชัน โดยปกติจะต้องได้รับพลังงานความร้อนกระตุ้นปฏิกิริยา แต่ด้วยจุลชีพประเภท Esterases สามารถทำให้เกิดปฏิกิริยาได้ สารประกอบเอสเทอร์ที่เกิดขึ้นมีคุณสมบัติที่มีกลิ่นฉุน และน้ำที่เหลือจากปฏิกิริยานั้นมีปริมาณค่อนข้างมาก ในกรณีของยางสกีมยางกล้วย หรือยางแท่งที่มีการใช้กรดซัลฟิวริกเพื่อเป็นสารจับตัวในน้ำยาง ปฏิกิริยาออกซิเดชันจะก่อให้เกิดสารประกอบเมทไธโอนีน (Methionene) ซึ่งเป็นกรดอะมิโนที่มีซัลเฟอร์เป็นองค์ประกอบในภาพประกอบที่ 2-3



ภาพประกอบที่ 2-3 แสดงปฏิกิริยาออกซิเดชันเกิดสารประกอบเมทไธโอนีน

ที่มา : <http://www.thaiblogonline.com>

#### 2.1.4 กลิ่นที่เกิดจากโรงงานอุตสาหกรรมยางแท่ง

การผลิตยางแท่ง SRT20 ประกอบด้วยการนำยางก้อนถ้วยมาตัดล้างทำความสะอาด บดย่อยให้มีขนาดเล็กลง นำไปบด และนำเข้าสู่การห่อหุ้มด้วยบรรจุภัณฑ์ ซึ่งในขั้นตอนการอบยางจะเป็นแหล่งกำเนิดของกลิ่นเหม็น เนื่องจากในกระบวนการอบยางจะทำให้สารอินทรีย์ระเหยออกไปสู่บรรยากาศ สารอินทรีย์นั้นคือกรดไขมันระเหยง่าย ซึ่งประกอบด้วย Acetic acid, Propionic acid, Isobutyric acid, Butyric acid, Isovaleric acid และ Valeric acid (สมทิพย์ และคณะ, 2550)

กรดไขมันระเหยง่ายที่พบจากก๊าซที่ระบายออกมาจากที่อบยางก้อนถ้วยจะให้กลิ่นเหม็นฉุนที่น่ารังเกียจ (Ali *et al.*, 2000) Acetic acid และ Butyric acid เป็นสารเคมีที่ได้กลิ่นออกเปรี้ยว Propionic acid, Isobutyric acid, Isovaleric acid และ Valeric acid จะให้กลิ่นเหม็น ดังนั้นที่ความเข้มข้นต่ำๆ ของกรดไขมันระเหยง่ายแต่ละชนิด ก็สามารถรับรู้และแยกแยะกลิ่นได้ แต่หากมีการรวมกันที่หลากหลายก็อาจทำให้ไม่สามารถแยกแยะถึงความเฉพาะของกลิ่นนั้นได้ ทำให้เป็น

กลิ่นเหม็นในภาพรวม Acetic acid และ Butyric acid เนื่องจากมีค่า Order recognition threshold เท่ากับ 1.0 และ 0.001 ppm โดยปริมาตรอากาศตามลำดับ และมีลักษณะที่แยกแยะของกลิ่นว่าเป็น กลิ่นเหม็นเปรี้ยว (Hesketh *et al.*, 1989)

ตารางที่ 2-1 แสดงกรดไขมันระเหยง่ายและประเภทของกลิ่น

Volatile fatty acid	Type of odor
Acetic acid	Vinegar, sour, acetic
Propionic acid	Pungent
Butyric acid	Rancid, sour, cheesy
Isovaleric acid	Rancid, cheesy, sweaty
Valeric acid	Sweaty, rancid

ที่มา: Fenaroli's Handbook (Furia and Bellanca, 1975), Sigma-Aldrich (2003) and personal observation

### 2.1.5 มาตรฐานคุณภาพอากาศเกี่ยวกับกลิ่นในประเทศไทย

สำหรับประเทศไทย จากการตรวจสอบเบื้องต้นพบว่า มีกฎหมายที่เกี่ยวข้องกับปัญหาด้านกลิ่นอยู่หลายฉบับ ได้แก่

1) พระราชบัญญัติส่งเสริมและรักษาคุณภาพสิ่งแวดล้อม พ.ศ. 2535 ซึ่งให้อำนาจกรมควบคุมมลพิษในการออกเกณฑ์ และวิธีในการควบคุมมลพิษ รวมทั้งมีอำนาจในการปรับหรือเรียกค่าเสียหายของผู้ก่อมลพิษได้

2) พระราชบัญญัติโรงงาน พ.ศ. 2535 ซึ่งให้อำนาจโรงงานอุตสาหกรรมในการกำหนดมาตรฐานและเกณฑ์ในการควบคุมการดำเนินงานและการปล่อยของเสียของโรงงาน

3) พระราชบัญญัติการสาธารณสุข พ.ศ. 2535 ซึ่งให้อำนาจท้องถิ่นเกี่ยวกับการตั้งและการขนย้ายขยะและของเสียรวมทั้งอำนาจในการตั้งเกณฑ์ในการควบคุม สิ่งก่อให้เกิดความเดือดร้อนรำคาญต่อสาธารณะ เช่น กลิ่น แสง เสียง ความร้อน ฯลฯ

แต่ในพระราชบัญญัติที่กล่าวมาทั้งหมดนั้น ก็ยังไม่ได้มีการกำหนดค่ามาตรฐานหรือวิธีการตรวจสอบกลิ่นที่ชัดเจน คงระบุไว้แต่เพียงว่าเป็น “ความเดือดร้อนรำคาญ” เท่านั้น

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จะดำเนินการทดลองเพื่อให้ทราบถึงประสิทธิภาพสูงสุดในการบำบัดก๊าซเสียจากปล่องควันของโรงงานสยามอิน โดริบเบอร์ จำกัด โดยไม่ได้เจาะจงว่าจะต้องลด

ความเข้มข้นของสารที่มีกลิ่นลงจนเป็นเท่าไร เนื่องจากในประเทศไทยยังไม่ได้มีมาตรฐานกำหนดไว้

### 2.1.6 วิธีตรวจวัดกลิ่น

วิธีการตรวจวัดกลิ่นแบ่งออกเป็น 3 วิธีดังนี้

1. การตรวจวัดกลิ่นโดยวิธีทางเคมี
2. การตรวจวัดกลิ่นโดยวิธีการดมกลิ่น เป็นการวัดระดับความรู้สึกของคนที่มีต่อกลิ่น โดยหาค่าความสัมพันธ์ของความเข้มข้นของกลิ่นกับความรู้สึกของคนที่ได้รับกลิ่น
3. ในการสำรวจปัญหากลิ่นที่เกิดขึ้นในชุมชนมีวัตถุประสงค์เพื่อหาแหล่งกำเนิดหาปริมาณความเข้มข้น และนำข้อมูลมาใช้ในการตัดสินใจหาเรื่องการร้องเรียนเรื่องกลิ่น ซึ่งควรมีแนวทางการดำเนินการที่ถูกต้องและควรมีการจดบันทึกที่เป็นระบบ เพื่อจะได้นำข้อมูลที่ได้มาใช้วิเคราะห์ให้เกิดประโยชน์มากที่สุด

### 2.1.7 การสำรวจปัญหากลิ่นในชุมชน

ในกรณีที่มีปัญหาเรื่องกลิ่นต่อชุมชน เจ้าหน้าที่ผู้รับผิดชอบต้องไปดำเนินการสำรวจเพื่อให้ทราบถึงสาเหตุและความรุนแรงของปัญหาที่เกิดขึ้น โดยมีวัตถุประสงค์หลัก ดังนี้

(1) เพื่อตรวจหาแหล่งกำเนิดของกลิ่นที่ก่อให้เกิดปัญหาต่อชุมชน และตรวจวัดหาปริมาณความเข้มข้นของกลิ่นที่เกิดขึ้นในพื้นที่บริเวณทิศทางได้ลมของแหล่งกำเนิดภายใต้สภาพอุตุนิยมวิทยาที่เกิดขึ้นจริง

(2) เพื่อจัดทำข้อมูลเพื่อนำมาใช้ประกอบการพิจารณาตัดสินใจหาการร้องเรียนเรื่องกลิ่นและใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อศึกษาการแพร่กระจายของกลิ่นจากแหล่งกำเนิดที่สำรวจได้ภายใต้สภาพอุตุนิยมวิทยาที่แท้จริง เพื่อใช้ในการวางแผนควบคุมป้องกันและแก้ไขปัญหาจากกลิ่นในชุมชนนั้น

วิธีการสำรวจทำได้โดยการเดินเข้าไปในบริเวณพื้นที่รอบๆ แหล่งกำเนิด เช่น โรงงานอุตสาหกรรม ทำการจดข้อมูลในเรื่องตำแหน่งที่ตั้งของโรงงาน ตรวจวัดระดับความเข้มข้นของกลิ่น ลักษณะเฉพาะของกลิ่นและค่าความเข้มของกลิ่นที่รับรู้ได้ ตัวอย่างการบันทึกข้อมูลในแบบสำรวจเรื่องกลิ่นแสดงในแง่ความเสถียรของบรรยากาศจะเกิดในช่วงเวลา ดังนี้

อากาศแบบเสถียร (Stable condition) : ช่วงเวลาเช้า (6.00 - 8.00 น.)

: ช่วงเวลาเย็น (หลัง 20.00 น.)

อากาศไม่เสถียร (Unstable condition) : ระหว่างเวลา 9.00 น. และ 19.00 น

ช่วงที่สภาพอากาศเป็นแบบเสถียรจะสำรวจหาความเข้มข้นเรื่องกลิ่นได้ดี เนื่องจากช่วงนี้กลิ่นที่เกิดขึ้นจะไม่ค่อยมีการแพร่กระจายไปไกลจากแหล่งกำเนิด จึงทำให้หาแหล่งกำเนิดของกลิ่นได้ง่ายขึ้น ในการบันทึกสเกลแสดงระดับความรุนแรงของกลิ่น ก็นิยมใช้สเกล ซึ่งแบ่งออกเป็น 5 ระดับ แสดงในตารางที่ 2-2

ตารางที่ 2-2 แสดงการประเมินความแรงของกลิ่นที่แต่ละระดับความเข้มข้น

สเกล		ความรู้สึกรบกวนเรื่องกลิ่น
0	ไม่มีกลิ่น	ไม่ได้กลิ่น
1	กลิ่นอ่อนมาก	โดยปกติคนทั่วไปจะไม่ได้กลิ่นแต่คนที่ทำหน้าที่ทดสอบกลิ่นและคนที่มีความรู้สึกไวต่อกลิ่นเป็นพิเศษจะรู้สึกได้
2	กลิ่นจาง , กลิ่นอ่อน	กลิ่นที่เกิดขึ้นจะอ่อนหรือจางมาก ซึ่งหากจะรู้สึกได้จะต้องตั้งใจดม มิเช่นนั้นก็จะไม่ทราบว่ามิกลิ่น
3	มีกลิ่นที่รับรู้ได้	ความเข้มข้นของกลิ่นอยู่ในระดับปานกลาง ซึ่งทำให้รู้สึกว่าได้กลิ่นที่ไม่ชอบ ระดับกลิ่นที่เกิดขึ้นอาจเกิดปัญหาการรบกวนในชุมชนที่อาศัย
4	กลิ่นแรง	ความเข้มข้นของกลิ่นที่เกิดขึ้นจะทำให้รู้สึกได้และเกิดความเดือนร้อนรำคาญเรื่องกลิ่น
5	กลิ่นแรงมาก	กลิ่นที่เกิดขึ้นเข้มข้นรุนแรงมาก จนไม่เหมาะที่จะใช้เป็นอากาศหายใจ

ที่มา : <http://www.pcd.go.th>

## 2.2 อุตสาหกรรมยางแท่ง

อุตสาหกรรมยางพาราเป็นอุตสาหกรรมการแปรรูปยางพาราขั้นต้นที่นำเอาน้ำยางสดที่กรี๊ดได้จากต้นยางพารามาแปรรูปให้อยู่ในสภาพที่เหมาะสมและสะดวกในการนำไปใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตผลิตภัณฑ์ยาง ยางพาราที่ผลิตได้แบ่งออกได้เป็น 5 ชนิด ได้แก่ ยางแผ่นรมควัน ยางแท่ง ยางเครพ ยางฟุ้งแห้ง และน้ำยางข้น

ยางพาราเหล่านี้จะนำไปใช้ในการผลิตผลิตภัณฑ์สำเร็จรูปอื่นๆ เช่น ยางยานพาหนะ ประกอบด้วย ยางรถยนต์ ยางรถจักรยานยนต์ ยางรถจักรยาน ถูมมือยาง ถูขางอนามัย ยางรัดของ และท่อต่างๆ เป็นต้น

กระบวนการผลิตยางแปรรูปพื้นฐาน โดยอุตสาหกรรมยางแปรรูปพื้นฐานจะนำเอาน้ำยางสดที่กรี๊ดได้จากต้นยางพารามาแปรรูปให้อยู่ในสภาพที่เหมาะสมและสะดวกในการนำไปใช้เป็นวัตถุดิบสำหรับอุตสาหกรรมผลิตภัณฑ์อื่น ๆ โดยทำให้เป็นยางแห้งชนิดต่างๆ (ยางแผ่นรมควัน ยางแท่ง ยางแผ่นฟุ้งแห้ง และยางเครพ) หรือน้ำยางข้น (Concentrated latex) กระบวนการผลิตยางแท่ง (Block rubber or standard Thai rubber: STR) มี 2 วิธี คือ การผลิตจากน้ำยางสด และการผลิตจากยางแห้ง

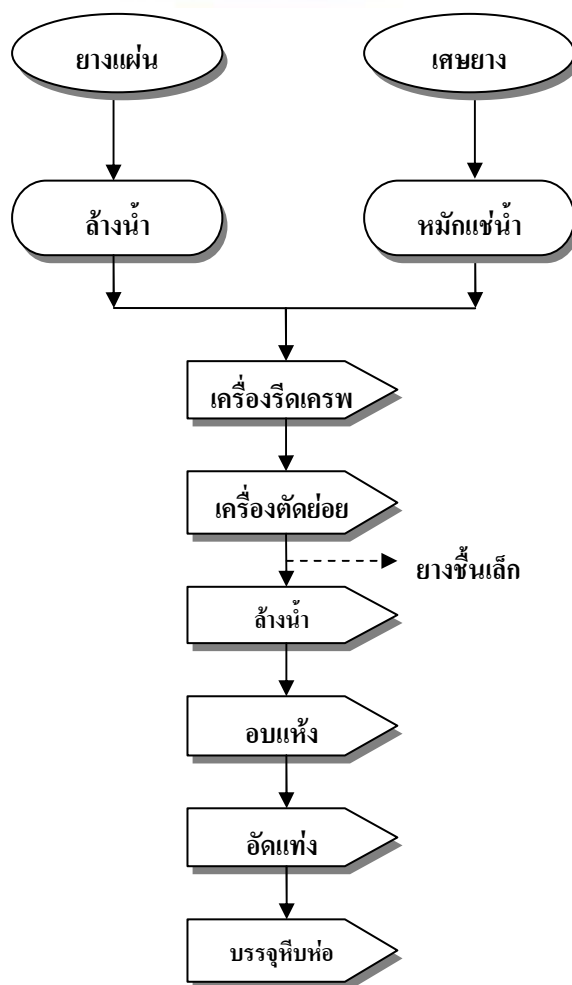
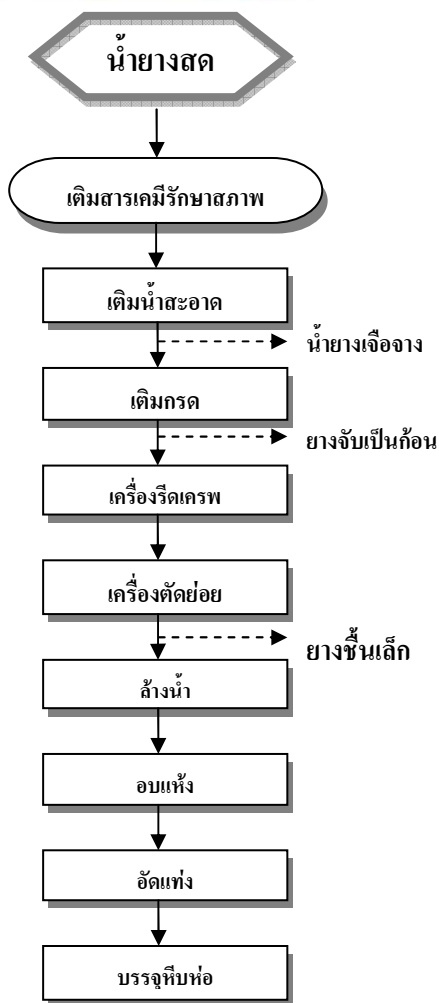
### 2.2.1 การผลิตยางแท่งจากน้ำยางสด

ขั้นตอนการผลิตจะเริ่มขึ้นจากการคัดเลือกน้ำยางที่มีสีขาวสม่ำเสมอ รักษาสภาพด้วยสารป้องกันน้ำยางจับตัว และการเกิดปฏิกิริยาของเอนไซม์ในน้ำยาง รวบรวมน้ำยางใส่ในถังพักเพื่อผสมให้น้ำยางที่มาจากแหล่งต่าง ๆ เข้าเป็นเนื้อเดียวกัน แล้วเจือจางน้ำยางด้วยน้ำสะอาด ทำให้น้ำยางจับตัวด้วยกรดฟอร์มิคก่อนยางที่จับตัวใหม่ๆ ผ่านเครื่องรีดแผ่นเครพ ผ่านเครื่องจักรตัดย่อยเป็นชิ้นเล็กๆ ล้างยางด้วยน้ำสะอาดใส่ลงในกระบะ นำไปเข้าเครื่องอบแห้งที่อุณหภูมิประมาณ 100 องศาเซลเซียส นานประมาณ 4 ชั่วโมง แล้วเป่าลมเย็นหรือทิ้งใ้ยางเย็นลงเหลือประมาณ 60 องศาเซลเซียส นำไปอัดเป็นแท่งด้วยไฮโดรลิก ห่อแท่งยางด้วยแผ่นพลาสติกแล้วบรรจุลงไม้เพื่อรอการจำหน่าย ยางแท่งที่ทำจากน้ำยางสดจะมีสิ่งสกปรก และสิ่งเจือปนน้อยกว่ายางแท่งที่ทำจากยางแห้ง อีกทั้งมีคุณสมบัติที่ดีกว่ายางที่ทำจากยางแห้ง ตามมาตรฐานยางแท่งไทยจะอยู่ในชั้น STR XL และ STR 5L1

### 2.2.2 การผลิตยางแท่งจากยางแห้ง

ขั้นตอนการผลิตจะนำเศษยางและยางแผ่นมาจัดสิ่งสกปรกออกด้วยการหมักแช่น้ำและการใช้เครื่องจักรล้าง หลังจากนั้นจะนำแผ่นยางไปยังชุดเครื่องรีดเครพ เครื่องจักรตัดย่อยยางเป็นชิ้นเล็กๆ ล้างด้วยน้ำสะอาด นำยางเข้าเครื่องอบยาง เป่าใ้ยางเย็นลง อัดเป็นแท่ง ห่อด้วยพลาสติกโพลีเอททิลีนและบรรจุลงไม้เพื่อการจำหน่ายยางแท่งที่ทำจากยางแห้งจะมีสิ่งเจือปนมากกว่าการผลิตจากน้ำยางสด และมีความอ่อนตัวน้อยกว่า ตามมาตรฐานยางแท่งไทย จะถูกจัดอยู่ในชั้น STR 10 และ STR 20 กระบวนการผลิตยางแท่งจากน้ำยางสด STR 5L และการผลิตยางแท่งจากยางแห้ง STR 20 แสดงดังในภาพประกอบ 2-4





ภาพประกอบที่ 2-4 แสดงกระบวนการผลิตยางแท่งจากน้ำยางสด STR 5L (ซ้าย) และการผลิตยางแท่งจากยางแห้งSTR 20 (ขวา)

ที่มา: กรม โรงงานอุตสาหกรรม, 2548

### 2.3 ทฤษฎีการดูดซึม

**การดูดซึม (Absorption)** เป็นกระบวนการทางวิศวกรรมเคมีซึ่งใช้หลักการการถ่ายโอนมวลสาร (Mass transfer) ที่เป็นก๊าซ (ไอ) ซึ่งมีความสามารถในการละลาย (Soluble gas) ออกจากกระแสอากาศ ไปยังตัวทำละลายที่เป็นของเหลว (Solvent liquid) โดยทำให้กระบวนการนี้เกิดขึ้นในเครื่องมือหรืออุปกรณ์ที่ทำให้มีการสัมผัสกันระหว่างกระแสอากาศและตัวทำละลายดังกล่าว โดยใช้แรงผลักดัน (Driving force) เป็นตัวผลักดันให้เกิดการถ่ายโอนมวลสาร แรงผลักดันที่ใช้ในการผลักดันก๊าซที่ต้องการกำจัดออกจากกระแสอากาศไปสู่ตัวทำละลายได้แก่ ความแตกต่างของความดันย่อย (Partial pressure) ของก๊าซชนิดนั้นๆ ในกระแสอากาศที่ถูกปล่อยออกมากับความดันไอ (Vapor pressure) ของก๊าซชนิดดังกล่าวที่ผิวหน้าของสารละลายที่สัมผัสกับก๊าซนั้น การดูดซึมจะเกิดขึ้นเมื่อแรงผลักดันเป็นบวก กล่าวคือ ก๊าซจะออกจากกระแสอากาศไปสู่ตัวทำละลาย แต่ถ้าแรงผลักดันเป็นลบจะไม่มี การดูดซึมเกิดขึ้น สิ่งที่เกิดขึ้นคือกระบวนการที่ตรงกันข้ามกับการดูดซึม นั่นคือ ดีซอร์ปชัน (Desorption) หรือสตรipping (Stripping) ได้แก่ กระบวนการที่ก๊าซออกจากตัวทำละลายไปสู่กระแสอากาศซึ่งใช้ในการกำจัดสารมลพิษที่ปะปนอยู่ในน้ำเสีย (Wastewater) การดูดซึมเป็นวิธีที่ใช้อย่างแพร่หลายสำหรับการบำบัดกลิ่นก๊าซชนิดสารอินทรีย์ อัตราการดูดซึมขึ้นกับลักษณะทางกายภาพของก๊าซ เช่น การแพร่กระจาย อัตราการไหล ความเข้มข้น ความหนาแน่นและสถานะของตัวทำละลาย เช่น อุณหภูมิ อัตราการไหลของของเหลว เป็นต้น

การดูดซึมเกิดขึ้นได้ทั้งทางกายภาพและทางเคมี การดูดซึมทางกายภาพเกิดขึ้นเมื่อ ก๊าซที่ถูกดูดซึมละลายอยู่ในตัวทำละลายโดยไม่มีปฏิกิริยาเคมีเกิดขึ้น หากเกิดปฏิกิริยาเคมีระหว่าง ก๊าซที่ถูกดูดซึมกับตัวทำละลายก็จะเป็นการดูดซึมทางเคมี ถ้าก๊าซที่ปนเปื้อนในกระแสอากาศนั้นละลายในตัวทำละลายได้ดีการบำบัดด้วยวิธีการดูดซึมจะมีประสิทธิภาพสูง ดังนั้นสำหรับก๊าซปนเปื้อนที่ละลายไม่ดีในตัวทำละลายบางครั้งอาจต้องมีการเติมสารเคมีเข้าไป ในสารเคมีอาจมีสารช่วยให้การละลายของก๊าซดีขึ้นเพื่อเพิ่มความสามารถในการละลายของก๊าซที่ปนเปื้อนนั่น เช่น การเติมสารโซเดียมซัลไฟต์ในการดูดซึมก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ หรืออาจเกิดปฏิกิริยาเคมีระหว่าง สารเคมีที่เติมเข้าไปกับก๊าซปนเปื้อน เช่น การใช้ปูนขาวในการพ่นจับก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ เป็นต้น การเลือกตัวทำละลายที่ใช้ในการดูดซึมควรพิจารณาถึงประสิทธิภาพที่ต้องการและราคาของสารเคมีโดยทั่วไปมักใช้น้ำเป็นตัวทำละลาย เนื่องจากก๊าซปนเปื้อนส่วนใหญ่สามารถละลายในน้ำได้ อีกทั้งน้ำยังสามารถหาได้ง่ายและราคาถูก ตัวทำละลายที่ดีควรมีคุณสมบัติดังต่อไปนี้

1. สามารถละลายก๊าซที่ต้องการกำจัดออกจากกระแสอากาศได้ดี
2. ควรมีอัตราการระเหยต่ำเพื่อลดการสูญเสียตัวทำละลาย
3. ควรเป็นสารที่ไม่กัดกร่อนเพื่อช่วยลดค่าบำรุงรักษาเครื่องมือ

4. ควรมีราคาไม่แพงและหาง่าย
5. ควรมีความหนืดต่ำเพื่อช่วยเพิ่มการดูดซึมและลดการเกิดทว่มขังของตัวทำละลายในอุปกรณ์ (Flooding)
6. ควรเป็นสารที่ไม่เป็นพิษไม่ติดไฟและมีจุดเยือกแข็งต่ำ

**ระบบการดูดซึม** ระบบการดูดซึมแบ่งออกเป็น 2 แบบ ได้แก่ แบบที่ใช้น้ำเป็นตัวทำละลายและแบบที่ไม่ใช้น้ำเป็นตัวทำละลาย ดังนี้

### 2.3.1 ระบบที่ใช้น้ำเป็นตัวทำละลาย (Aqueous systems)

ในระบบนี้ก๊าซที่ต้องการกำจัดออกไปจะต้องมีความสามารถในการละลาย (Solubility) ในน้ำที่เพียงพอ ณ อุณหภูมิของกระแสอากาศเสียที่ถูกปล่อยออกมาจากกระบวนการผลิต สำหรับก๊าซที่มีความสามารถในการละลายในน้ำต่ำ เช่น ซัลเฟอร์ไดออกไซด์จะต้องใช้น้ำในการบำบัดเป็นปริมาณมากจึงไม่เหมาะสมที่จะใช้น้ำในการบำบัด ก๊าซที่เหมาะสมสำหรับใช้น้ำในการบำบัด ได้แก่ ก๊าซไฮโดรคลอริก (Hydrochloric) และก๊าซไฮโดรฟลูออริก (Hydrofluoric) เป็นต้น และถ้ายังใช้น้ำที่มีค่า pH สูงหรือมีความเป็นด่างก็จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการกำจัดก๊าซที่มีคุณสมบัติเป็นกรดดังกล่าวให้สูงขึ้น จึงมีการใช้น้ำจากแหล่งน้ำที่มีค่า pH สูง หรือเติมสารเคมีที่มีความเป็นด่างลงในน้ำเพื่อเพิ่มค่า pH ของน้ำให้สูงขึ้น เช่น การเติมโซดาไฟหรือปูนขาว เป็นต้น โดยทั่วไปแล้วจะใช้น้ำเป็นตัวทำละลายเพื่อกำจัดสารอินทรีย์ที่มีคุณสมบัติในการละลายน้ำได้ดีเท่านั้น

### 2.3.2 ระบบที่ไม่ใช้น้ำเป็นตัวทำละลาย (Non-aqueous systems)

ในระบบนี้จะใช้ของเหลวที่เป็นสารอินทรีย์ เช่น ไดเมทิลออลานีน (Dimethylalanine) และเอมีน (Amine) เป็นตัวทำละลายแทนน้ำ ข้อจำกัดของของเหลวหรือสารละลายเหล่านี้ คือสามารถที่จะใช้ได้เฉพาะกับกระแสอากาศเสียที่มีสารมลพิษปนเปื้อนเป็นก๊าซอย่างเดียวไม่มีอนุภาคเจือปน เพราะถ้าหากว่ามีอนุภาคเจือปนอยู่ในกระแสอากาศแล้วจะทำให้เกิดการรวมตัวระหว่างตัวทำละลายกับอนุภาคกลายเป็นกากตะกอน (Sludge) ซึ่งยากที่จะกำจัดออกไป ในภายหลัง สารละลายอินทรีย์นี้เหมาะสำหรับใช้ในการบำบัดไอของสารอินทรีย์ เพราะไอของสารอินทรีย์จะละลายและผสมกันได้ดีกับสารละลายเหล่านี้ และเมื่อต้องการนำไอของสารอินทรีย์เหล่านั้นมาใช้ใหม่ก็สามารถสกัดออกมาได้ที่อุณหภูมิต่ำซึ่งจะเป็นการประหยัดพลังงาน

ไฮโดรคาร์บอนที่มีน้ำหนักโมเลกุลมากชนิดต่างๆ เช่น เฮกซะดีเคน (Hexadecane) ก็สามารถใช้ในการดูดซึมไอของสารอินทรีย์ที่มีความเข้มข้นต่ำๆ ได้ดี

### 2.3.3 กลไกของการดูดซึม

การถ่ายเทมวลโดยการแพร่หรือการพาเกิดขึ้นเมื่อมีเกรเดียนท์ (Gradient) ความเข้มข้นเฉลี่ยในแต่ละวัฏภาค ซึ่งไม่ได้อยู่ในสภาวะสมดุลกัน ทำให้เกิดการปรับเข้าสู่สภาวะสมดุลของความเข้มข้น ซึ่งจุดนี้สามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างก๊าซและของเหลวอุดมคติได้จากกฎของราอูลต์ (Raoult's law) ดังสมการที่ (2-1) และ (2-2) ตามลำดับ (Welty, 1984)

$$\text{สำหรับของเหลวอุดมคติ} \quad P_A = x_A P'_A \quad (2-1)$$

เมื่อ

$$P_A = \text{ความดันย่อยขององค์ประกอบ A}$$

$$x_A = \text{เศษส่วนโมล A ในวัฏภาคของเหลว}$$

$$P'_A = \text{ความดันไอของ A}$$

$$\text{และสำหรับแก๊สอุดมคติ} \quad P_A = y_A P'_A \quad (2-2)$$

เมื่อ

$$P_A = \text{ความดันย่อยขององค์ประกอบ A}$$

$$y_A = \text{เศษส่วนโมล A ในวัฏภาคของก๊าซ}$$

$$P'_A = \text{ความดันไอของ A}$$

การถ่ายเทมวลของแก๊สไปยังของเหลวสามารถอธิบายโดยใช้ทฤษฎีสองความต้านทาน (Two resistance theory) ซึ่งประกอบด้วย 3 ขั้นตอนคือ (Welty, 1984)

1. การถ่ายเทมวลจากวัฏภาคก๊าซไปยังผิวสัมผัสของก๊าซ

2. การถ่ายเทข้ามผิวสัมผัสไปยังฟิล์มของเหลว

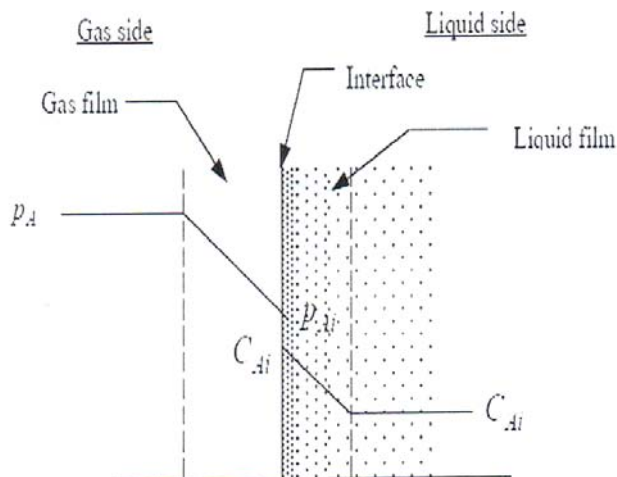
3. การถ่ายเทจากฟิล์มของเหลวเข้าไปยังวัฏภาคของเหลว

ทฤษฎีนี้ได้อ้างสมมติฐานดังนี้ คือ

1. มีฟิล์มสองชั้นอยู่ที่แต่ละข้างของผิวสัมผัส (ฟิล์มด้านก๊าซและฟิล์มด้านของเหลว) และอัตราการถ่ายเทมวลถูกควบคุมโดยอัตราการแพร่ผ่านฟิล์มของก๊าซและของเหลว

2. ความต้านทานในการถ่ายเทมวลข้ามผิวสัมผัสมีค่าน้อยมาก เมื่อเทียบกับความต้านทานของฟิล์มก๊าซและของเหลว

ขั้นตอนในการถ่ายเทมวลจากก๊าซสู่ของเหลวมากขึ้น ได้แสดงดังภาพประกอบที่



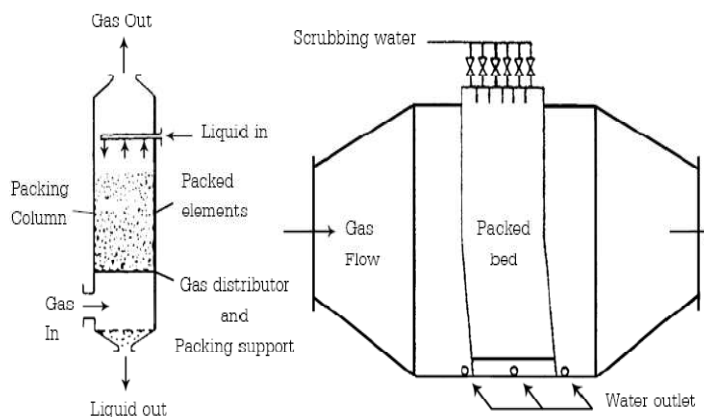
ภาพประกอบ 2-5 แสดงทฤษฎีสองฟิล์ม (Two resistance theory) สำหรับการถ่ายโอนมวลระหว่างแก๊สและของเหลว

### 2.3.4 อุปกรณ์การดูดซึม

หน้าที่ของอุปกรณ์ระบบการดูดซึม คือ การทำให้เกิดการสัมผัสกันระหว่างกระแสอากาศที่มีมลพิษปนเปื้อนกับของเหลวที่เป็นตัวทำละลายโดยทำให้ของเหลวกลายเป็นหยดเล็กๆ หรือเป็นแผ่นฟิล์มบางๆ เพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวในการสัมผัสซึ่งจะทำให้เกิดการถ่ายโอนมวลสารได้ดี อุปกรณ์ระบบการดูดซึมที่นิยมใช้กันมาก คือ แพลททาวเวอร์

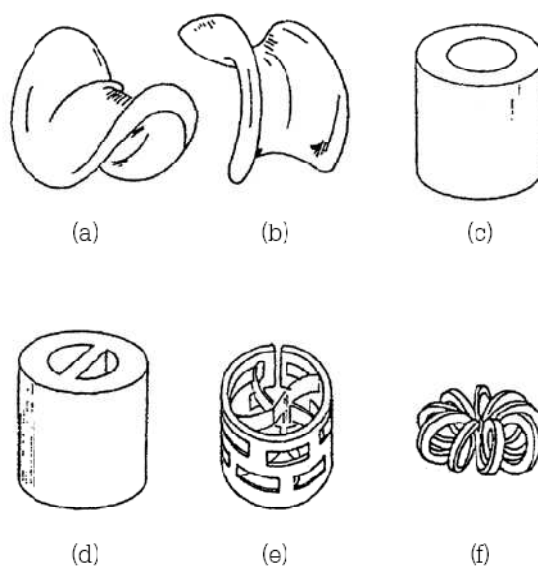
#### 2.3.4.1 แพลททาวเวอร์ (Packed tower)

แพลททาวเวอร์ (Packed tower) เป็นอุปกรณ์ที่ทำให้เกิดการถ่ายโอนมวลสารได้ดีมากจึงทำให้แพลททาวเวอร์มีขนาดเล็กเมื่อเปรียบเทียบกับอุปกรณ์ชนิดอื่นๆ ที่ใช้สำหรับบำบัดมลพิษทางอากาศจากแหล่งเดียวกัน แพลททาวเวอร์ที่นิยมใช้มี 2 แบบ ได้แก่ แบบไหลสวนทาง (Counter current) และแบบไหลผ่าน (Cross-flow) ดังแสดงในภาพประกอบ 2-6 ตามลำดับ



ภาพประกอบ 2-6 แสดงอุปกรณ์แบบ Pack tower แพคทาวเวอร์แบบไหลสวนทาง (Countercurrent) (ซ้าย) และ แบบไหลผ่าน (Cross-flow) (ขวา)

วัสดุที่บรรจุในแพคคอลัมน์ (Packed column) หรือแพคเบด (Packed bed) เพื่อใช้เป็นตัวกลางสำหรับเพิ่มพื้นที่ผิวของการสัมผัสอาจจะเป็นวัสดุแบบต่างๆ ดังภาพประกอบ 2-7 วัสดุที่ใช้บรรจุในแพคคอลัมน์นี้ควรมีพื้นที่ผิวมากเพื่อบรรจุในแพคคอลัมน์ แล้วจะทำให้เกิดการสัมผัสระหว่างก๊าซกับของเหลวได้มากและควรมีช่องว่าง (Void space) มากพอ รวมทั้งต้องมีความแข็งแรงทนทานพอสมควรไม่แตกหักง่ายเมื่อทำการบรรจุและใช้งาน นอกจากนี้วัสดุดังกล่าวต้องไม่ทำปฏิกิริยากับสารเคมีและราคาไม่สูงจนเกินไป วัสดุที่มีรูปร่างแบบอานม้า (Saddles) จะทำให้การสัมผัสระหว่างก๊าซและของเหลวดีมากรวมทั้งมีการสูญเสียความดันน้อยกว่าวัสดุชนิดอื่นๆ ข้อเสียของวัสดุชนิดนี้ คือ มีราคาแพง วัสดุชนิดพอลลิ่งริง (Pall ring) จะทำให้มีการถ่ายโอนมวลสารดีกว่าชนิดเรสชิจริง (Raschig ring) หรือเลสซิ่งริง (Lessing ring) แต่ต้องเคลือบด้วยโลหะเพื่อป้องกันการกัดกร่อนทำให้มีราคาแพง วัสดุที่เป็นเซรามิกหรือถ่านจะทนการกัดกร่อนได้ดี วัสดุที่เป็นพลาสติก เช่น เทอเลอร์เรต (Tellerette) จะใช้ได้ดีที่อุณหภูมิไม่เกิน 35.5-36.0 เคลวินเท่านั้น การจัดเรียงวัสดุในแพคคอลัมน์อาจทำได้ 2 แบบด้วยกัน คือ การกองแบบสุ่มหรือการเรียงแบบสมมาตร การกองแบบสุ่มให้พื้นที่ผิวที่มากกว่าแต่ทำให้เกิดความดันลดสูงกว่าการเรียงแบบสมมาตร การเรียงแบบสมมาตรนอกจากจะทำให้เกิดความดันลดน้อยแล้วยังก่อให้เกิดการกระจายตัวของของเหลวบนพื้นที่ผิวของวัสดุดีกว่าด้วยการจัดเรียงวัสดุแบบสมมาตร มักไม่ใช้กับระบบขนาดใหญ่ยกเว้นในกรณีที่ต้องการอัตราการไหลสูง



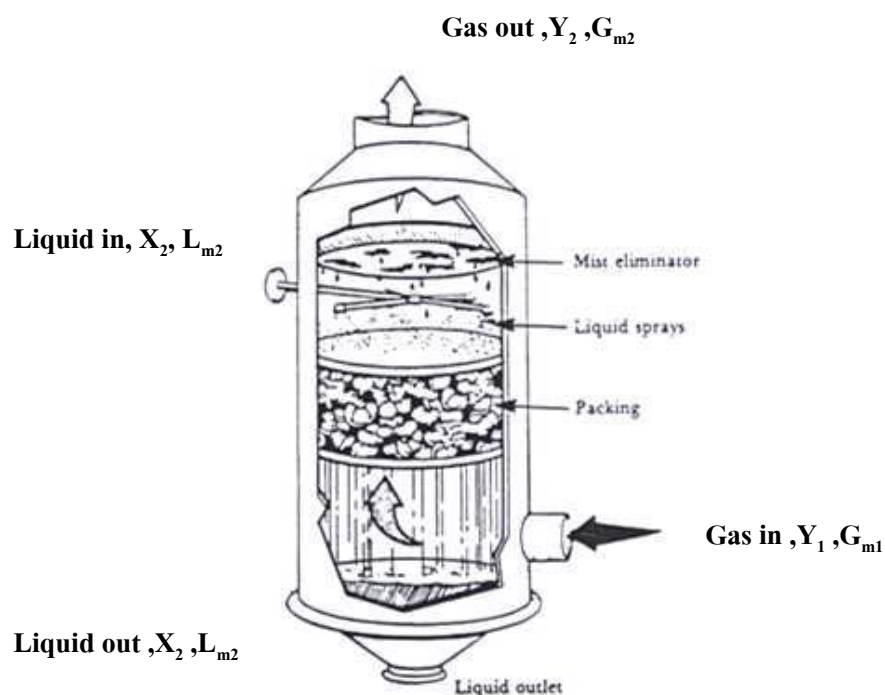
ภาพประกอบที่ 2-7 แสดงวัสดุที่บรรจุในแพคคอลัมน์ Berl Saddle (a), Intalox Saddle (b), Raschig Ring (c), Lessing Ring (d), Pall Ring (e), Tellerette (f)

ที่มา: [www.safety-stou.com](http://www.safety-stou.com)

### 2.3.5 ปัจจัยที่ต้องพิจารณาในการออกแบบหอดูดซึม

#### 2.3.5.1 อัตราส่วนของของเหลวต่อก๊าซ (L/G Ratio)

เป็นสิ่งที่ควรพิจารณาเป็นลำดับแรกในการออกแบบ คือ อัตราการไหลและองค์ประกอบของกระแสก๊าซที่จะไหลเข้าสู่ระบบ คู่มือลสารเป็นเทคนิคที่ถูกลนำมาใช้เพื่อพิจารณาอัตราการไหลและองค์ประกอบในแต่ละกระแสนของไหลที่เข้าและออกจากระบบ ดังแสดงในภาพประกอบที่ 2-8



ภาพประกอบ 2-8 แสดงคุณวมวลของกระแสของเหลวและก๊าซในหอดูดซึมแบบไหลสวนทางกัน  
ที่มา: <http://www.pcd.go.th/>

จากคุณวมวลรวมของระบบ

$$G_{m1} + L_{m2} = G_{m2} + L_{m1} \quad (2-3)$$

คุณวมวลองค์ประกอบในระบบ

$$Y_1 G_{m1} + X_2 L_{m2} = Y_2 G_{m2} + X_1 L_{m1} \quad (2-4)$$

เมื่อ  $G_m$  เป็นการไหลของก๊าซ, กรัมโมล/ชั่วโมง

$L_m$  เป็นการไหลของของเหลว เช่น น้ำที่ใช้ดูดซึมสารในอากาศ, กรัมโมล/ชั่วโมง

$Y_1$  เป็นความเข้มข้นของสารที่มีกลิ่นในก๊าซ เช่น 1,000 ส่วนในล้านหรือ ppm

$Y_2$  เป็นความเข้มข้นของสารที่มีกลิ่นในก๊าซขาออก

$X_2$  เป็นสัดส่วนของสารที่มีกลิ่นในของเหลวขาออก คิดเป็นเศษส่วนของโมลของของเหลวทั้งหมด

$X_1$  เป็นสัดส่วนของสารที่มีกลิ่นในของเหลวขาเข้า คำนวณเหมือน  $X_2$

### 2.3.5.2 การหาปริมาณของเหลวที่ต้องการ (Liquid Requirements)

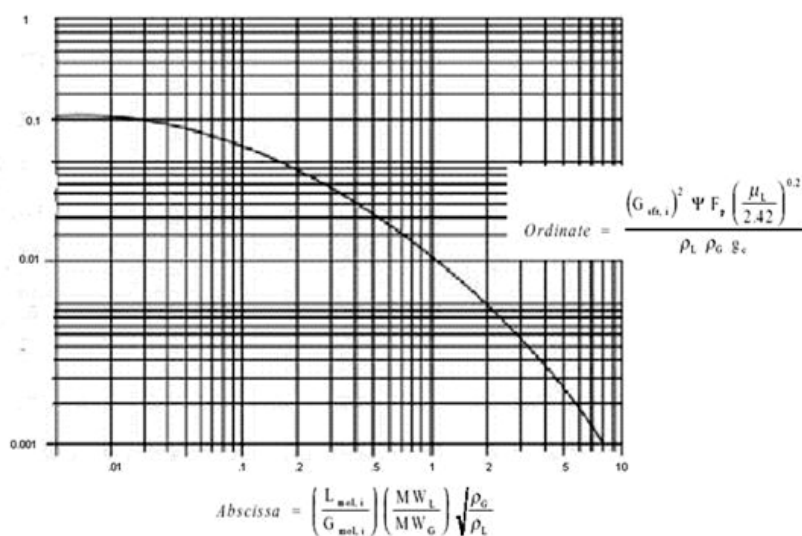
ในการออกแบบหอดูดซึมจะต้องทราบอัตราการไหลของก๊าซเสียที่ต้องการบำบัด ( $G_m$ ) ทราบความเข้มข้นก๊าซเสียที่เข้า ( $Y_1$ ) และต้องทราบความเข้มข้นของสารดูดซึมก่อนเข้าระบบ



( $X_2$ ) หรือสามารถประมาณค่าให้เท่ากับศูนย์ถ้าไม่มีการนำของเหลวที่วนกลับมาใช้ใหม่และต้องระบุค่าความเข้มข้นของก๊าซเสียหลังผ่านการบำบัด ( $Y_2$ ) จากหลักการสมดุลของมวลทำให้สามารถประมาณอัตราการไหลของของเหลวที่ต้องการใช้น้อยที่สุดในการดูดซึมก๊าซเสียได้โดยให้มีความเข้มข้นอยู่ในมาตรฐาน ( $Y_2$ ) สำหรับการใช้งานจริงนั้นจะไม่ใช้สัดส่วนอัตราการไหลของสารดูดซึมต่อก๊าซที่ต่ำที่สุด ( $(L_m/G_m)_{\min}$ ) แต่จะเพิ่มเพื่ออัตราการไหลของสารดูดซึมให้มากกว่าค่าต่ำสุดดังกล่าว โดยทั่วไปนั้นอัตราการไหลของสารดูดซึมจะเพิ่มขึ้น 25 ถึง 100% จากค่าความต้องการต่ำสุด เช่น 1.5 เท่าของอัตราส่วนของอัตราการไหลของเหลวต่อก๊าซต่ำสุด (Joseph and Beachler, 1981)

### 2.3.5.3 เส้นผ่านศูนย์กลางของหอดูดซึม (Pack tower diameter)

หอบรรจุตัวกลางจะมีผลต่อความเร็วของอากาศที่ไหลผ่าน หากหอกว้างมากไปอากาศจะไหลผ่านที่ความเร็วต่ำแม้จะบำบัดได้ดีแต่บำบัดมวลของสารที่ทำให้เกิดกลิ่นได้น้อยไม่คุ้มกับค่าที่ก่อสร้าง หากหอบแคบเกินไปความเร็วของอากาศจะสูงและจะดันน้ำที่ตกลงมาให้ย้อนขึ้นข้างบน ปกติแล้วค่าของเส้นผ่านศูนย์กลางของการออกแบบหาได้จากกราฟในภาพประกอบ 2-9



ภาพประกอบที่ 2-9 แสดงการหาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่เหมาะสมของการออกแบบ Packed column

ที่มา: <http://www.pcd.go.th/>

การประมาณขนาดของหอดูดซึมที่เหมาะสมกับสภาวะการไหลของของเหลวและก๊าซ ซึ่งโดยปกติจะออกแบบเพื่อให้เล็กที่สุดแต่ทำงานได้เพื่อที่จะได้มีค่าใช้จ่ายต่ำที่สุด แต่การลด

ขนาดพื้นที่หน้าตัดลง (เพื่อให้หอคูดซิมมีขนาดเล็กลง) มีผลที่ตามมาคือ ความเร็วของอากาศที่มีทิศทางจากด้านล่างขึ้นสู่ด้านบนของหोजจะสูงขึ้นและเมื่อถึงความเร็วหนึ่งจะสูงจนกระทั่งสารละลายหูดซิมถูกกระแสดักดันไหลย้อนขึ้นทางด้านบนของหอคูดซิม ความเร็วนี้เรียกว่า “Flooding velocity” จะไม่สามารถใช้งานหอคูดซิม ในการออกแบบโดยใช้ความเร็วเท่ากับหรือเกินกว่า Flooding velocity ได้ ดังนั้นโดยหลักการแล้วเส้นผ่านศูนย์กลางของหोजจะถูกออกแบบเพื่อให้ความเร็วของอากาศในหोजมีค่าต่ำเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการไหลย้อนของของเหลวในหอคูดซิม ซึ่งโดยทั่วไปจะใช้ค่าความเร็วที่ 50-75% ของ Flooding velocity เป็นเกณฑ์ในการออกแบบ ค่า Flooding velocity ขึ้นกับอัตราส่วนของอัตราการไหลของของเหลวต่อก๊าซ ความหนืดของของเหลว คุณสมบัติของตัวกลาง เช่น ประเภท ขนาด การอิมตัวของน้ำ และพื้นที่ผิวต่อปริมาตรของตัวกลางที่ใช้ (Richard, 1981)

#### 2.3.5.4 ความสูงของหอบรรจุตัวกลาง

เมื่อได้เส้นผ่านศูนย์กลางของหอบรรจุตัวกลางแล้วจะต้องคำนวณความสูงของตัวกลางที่เหมาะสม โดยต้องทราบข้อมูลว่าความสูงสำหรับตัวกลางประเภทต่างๆ ควรเป็นเท่าใด เพราะเป็นข้อมูลที่ได้จากการทดลอง ดังนี้ กลิ่นและสารละลายที่ใช้หูดซิม

HCl (ก๊าซ) H<sub>2</sub>O (น้ำ) ความสูง 0.18-0.34 เมตร

Cl<sub>2</sub> (ก๊าซ) NaOH (ในน้ำ) ความสูง 0.24-0.37 เมตร

NH<sub>3</sub> (ก๊าซ) H<sub>2</sub>O (น้ำ) ความสูง 0.09-0.21 เมตร

OH (ก๊าซ) H<sub>2</sub>O (น้ำ) ความสูง 0.24-0.39 เมตร

H<sub>2</sub>S (ก๊าซ) NaOH (ในน้ำ) ความสูง 0.24-0.39 เมตร

NH<sub>3</sub> (ก๊าซ) H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (ในน้ำ) ความสูง 0.9-0.16 เมตร

ความสูงข้างบนนี้เป็นเพียงความสูง 1 หน่วยของที่เรียกกันว่า Transfer unit เท่านั้น ระบบจะทำงานได้ดีต้องมีหลาย Transfer unit ซึ่งเรียกว่าจำนวน Transfer unit นี้ว่า NTU ค่า NTU นี้หาจาก

$$N_{tu} = \frac{\ln \left[ \left( \frac{y_1 - mx_1}{y_0 - mx_1} \right) \left( 1 - \frac{1}{AF} \right) + \frac{1}{AF} \right]}{1 - \frac{1}{AF}} \quad (2-5)$$

$y_1$  = ความเข้มข้นของสารที่มีกลิ่นในก๊าซ เช่น 1,000 ส่วนในล้านหรือ ppm ก็จะ  
เป็นสัดส่วน 0.001

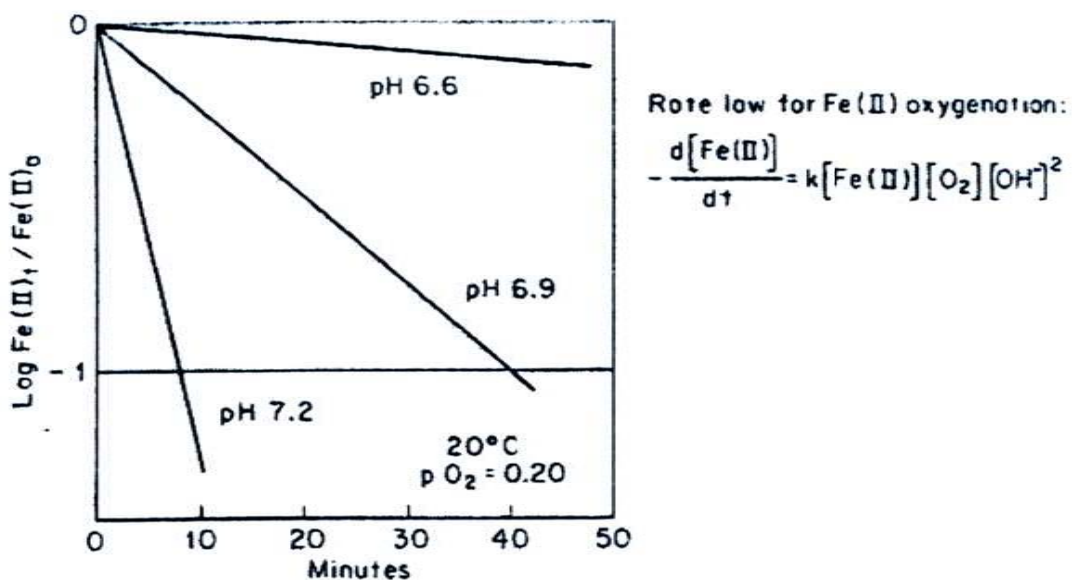
$y_0$  = ความเข้มข้นของสารที่มีกลิ่นในก๊าซขาออก เช่น 10 ppm ก็จะเป็นสัดส่วน  
0.00001

$$AF = \frac{L_{mol,i}}{mG_{mol,i}} \quad (2-6)$$

เมื่อ  $L_{mol,i}$  และ  $G_{mol,i}$  เป็น Molecular flow rate หรืออัตราการไหลของของเหลวและ  
อากาศที่เข้าระบบเป็นโมล/ชั่วโมง ตามลำดับ ซึ่งค่า  $m$  ที่ใกล้จุดสมดุลมีค่าใกล้ 0 ดังนั้น จะเห็นได้  
ว่า ค่า NTU มีค่า  $\ln y_1/y_0$  โดยประมาณ

#### 2.4 การเติมอากาศหรือออกซิเจนเพื่อกำจัดเหล็ก

การเติมอากาศเพื่อทำการฟื้นฟูสภาพสารละลายโดยการใช้ออกซิเจน ซึ่งอัตราการ  
เกิดเฟอรัสกับออกซิเจน แสดงดังภาพประกอบที่ 2-10



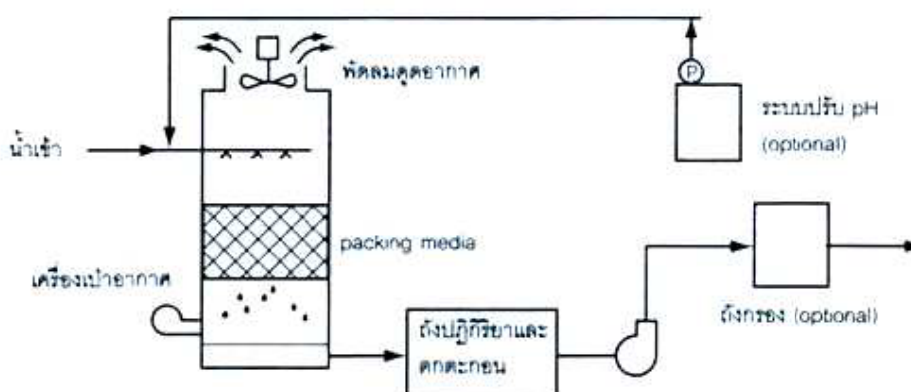
ภาพประกอบ 2-10 แสดงกระบวนการ Oxygenation of Fe<sup>+2</sup>

ที่มา: <http://202.129.59.73/>

วิธีการที่นิยมใช้ในการเติมอากาศแบ่งออกเป็น 3 วิธี ดังนี้

#### 2.4.1 การเติมออกซิเจนโดยการเป่าอากาศ (Forced air/Draft aeration)

การเติมออกซิเจนให้กับน้ำกระทำโดยใช้ถัง Packed tower ลักษณะคล้ายคลึงกับการกำจัดก๊าซออกจากน้ำ Packing media ที่ใช้อาจจะเป็นประเภทเดียวกันกับการกำจัดก๊าซ หรืออาจจะเป็นแผ่นไม้ (Wood slate) วางเรียงสลับกันก็ได้ การเติมอากาศอาจใช้เครื่องเป่าอากาศเป่าเข้าทางด้านล่าง (Forced air) สวนทางกับการไหลของน้ำ หรืออาจใช้พัดลมดูดอากาศดูดออกทางด้านบน (Draft) ดังแสดงในภาพประกอบ 2-11 ในกรณีหลังนี้จำเป็นต้องมีช่องเปิดให้อากาศไหลเข้าด้านล่างด้วย หลังจากการเติมอากาศแล้วจำเป็นต้องมีถังปฏิกริยากักเก็บน้ำไว้อย่างน้อย 60 นาที เพื่อให้ปฏิกิริยาเคมีเกิดขึ้นอย่างมีประสิทธิภาพ ขนาดของถังอาจจะใหญ่พอที่จะเป็นถังตกตะกอนได้ด้วย ถ้าการตกตะกอนไม่สมบูรณ์พอก็อาจจะต้องมีถังกรองไว้กรองโลหะเพิ่มเติม ตัวกลางกรองที่ใช้อาจจะเป็นทรายหรือแอนทราไซต์



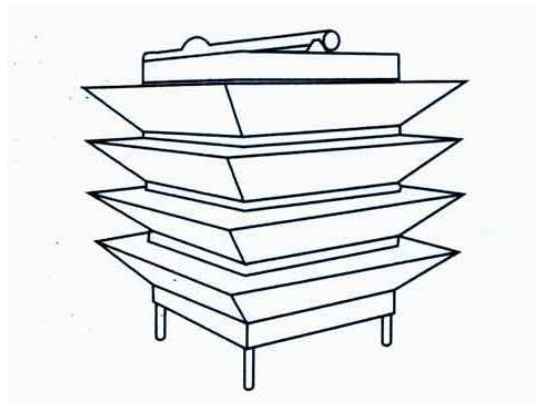
หมายเหตุ ใช้เครื่องเป่าอากาศหรือพัดลมดูดอากาศเพียงอย่างเดียว

ภาพประกอบ 2-11 แสดงระบบกำจัดเหล็กโดยการเป่าอากาศ (Forced air/Draft aeration)

ที่มา : <http://202.129.59.73/>

#### 2.4.2 การเติมออกซิเจนโดยการสัมผัสอากาศ (Natural Draft Aeration)

การเติมออกซิเจนเข้าสู่สู่น้ำวิธีนี้กระทำโดยการโปรยน้ำผ่านชั้น Packing media หรือชั้นถาด (Tray) ที่มีถ่าน Coke ขนาด 50-100 มม. ซึ่งมีช่วงห่างแต่ละชั้นประมาณ 0.1-0.15 เมตร สัมผัสกับอากาศโดยธรรมชาติความสูงของถังจะอยู่ระหว่าง 1.20-1.90 เมตร ดังแสดงในภาพประกอบ 2-12 อัตราการระหลศาสตร์ (Hydraulic loading rate) จะอยู่ระหว่าง 24-48 ม.<sup>3</sup>/ม.<sup>2</sup>/ชม. เป็นระบบที่มีประสิทธิภาพต่ำมากไม่สามารถจะควบคุมการถ่ายเทออกซิเจนเข้าสู่สู่น้ำได้อย่างแน่นอน

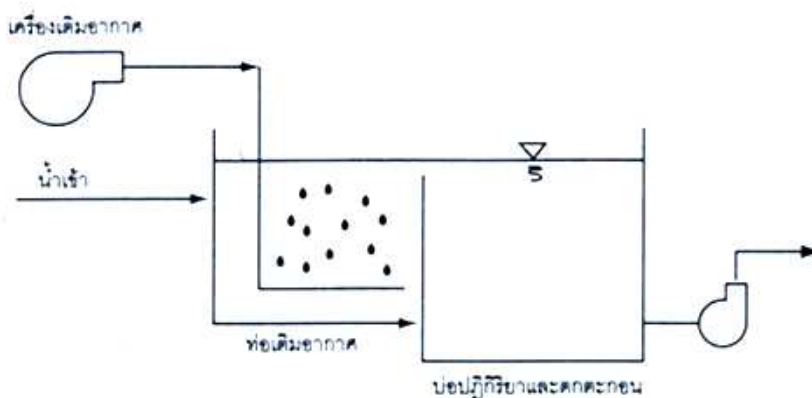


ภาพประกอบ 2-12 แสดงการเติมออกซิเจน โดยการสัมผัสอากาศ (Natural draft aeration)

ที่มา: <http://202.129.59.73/>

#### 2.4.3 การเติมอากาศลงในน้ำ (Diffused aeration)

การเติมอากาศแบบนี้ก็อาศัยหลักการเดียวกันกับการเติมอากาศในระบบบำบัดน้ำเสีย ดังภาพประกอบ 2-13 ประสิทธิภาพในการถ่ายเทอากาศเข้าสู่ น้ำจะสูงกว่าเติมอากาศทั้งสองแบบที่กล่าวถึงเบื้องต้น แต่จะต้องใช้พลังงานในการอัดอากาศลงสู่น้ำสูงกว่าประสิทธิภาพในการถ่ายเทอากาศขึ้นอยู่กับชนิดของตัวเติมฟองอากาศ (Diffuser) ถ้าตัวเติมฟองอากาศเป็นท่อพีวีซีเจาะรูธรรมดา ก็จะมีประสิทธิภาพประมาณ 1-2 % ถ้าเป็นตัวเติมฟองอากาศแบบฟองอากาศละเอียด (Fine bubble diffuser) ประสิทธิภาพอาจจะสูงถึง 15 % ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความลึกของน้ำด้วย (ประมาณ 1-3 เมตร) ขนาดของบ่อเติมอากาศขึ้นอยู่กับเวลาที่ใช้กับการสัมผัส ประมาณ 10-15 นาที และ 60 นาที



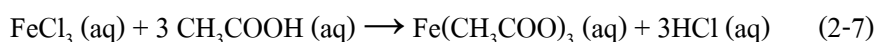
ภาพประกอบที่ 2-13 แสดงการเติมออกซิเจนแบบการเติมอากาศลงในน้ำ (Diffused aeration)

ที่มา: <http://202.129.59.73/>

## 2.5 ปฏิริยาเคมีที่เกี่ยวข้อง

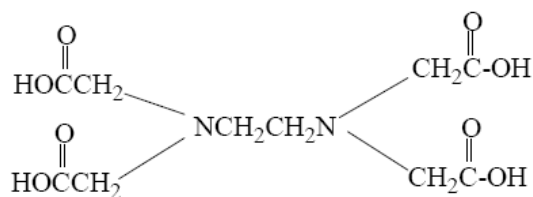
### 2.5.1 ปฏิริยาเคมีระหว่างสารละลายเหล็กกับกรดอะซิติก

เมื่อนำสารละลายเฟอร์ริกคลอไรด์ ( $\text{FeCl}_3$ ) มาทำปฏิริยากับกรดอะซิติก จะได้ผลิตภัณฑ์ที่ได้ดังสมการที่ 2-7



ที่มา : <http://otvety.google.ru/>

โดยจะพบว่าสารละลายเฟอร์ริกคลอไรด์ 1 โมลทำปฏิริยากับกรดอะซิติก 3 โมล และผลิตภัณฑ์ที่ได้จะเป็นสารประกอบเหล็กอะซิเตตกับสารละลายกรดไฮโดรคลอริก โดยจากสมการ (2-7) พบว่าเหล็กสามารถรวมตัวกับหมู่อะซิเตตที่มาจากกรดอะซิติกได้ แต่จะมีสภาพความเป็นกรดของสารละลายที่เพิ่มขึ้น จึงเกิดผลเสียส่งผลกระทบต่อระบบท่อและระบบสูบน้ำสารละลายได้ งานวิจัยนี้จึงประยุกต์ใช้เหล็กิลิแทนเหล็กคลอไรด์ โดยที่ลิแทนเป็นสารประกอบเชิงซ้อนที่มี Ligand หรือเรียกว่าเป็น Chelating agents ที่สามารถให้คู่อิเล็กตรอนได้ตั้งแต่ 2 หมู่ขึ้นไป ซึ่งเมื่อจับรวมกับโลหะจะเกิดโครงสร้างลักษณะวงแหวน (Ring structure) ขึ้นโดยที่ตำแหน่งของโลหะและ Ligands จะอยู่ในตำแหน่งที่จำเพาะ Ligand สำหรับสารประกอบเชิงซ้อนชนิดนี้สามารถให้อิเล็กตรอนได้ 2,3,4 และ 6 คู่ แก่โลหะหรือเรียกว่า Bidentate, Tridentate และ Hexadentate ตามลำดับ โดย Ligand หรือ Chelating agent มีลักษณะดังนี้ คือ 1 โมเลกุลจะต้องให้คู่อิเล็กตรอนอย่างน้อย 2 คู่ และ Functional groups ต้องอยู่ในตำแหน่งซึ่งจับรวมกับโลหะได้พร้อมกัน โดยในงานวิจัยนี้ใช้เกลือของ EDTA คือ Disodium EDTA โดย EDTA เป็น Hexadentate ligand ที่มีอะตอมที่สามารถให้อิเล็กตรอนได้ คือ ออกซิเจน 4 อะตอม และไนโตรเจน 2 อะตอม (อุรา รังสาตทอง , 2546) ตามสูตรโครงสร้างในรูปที่ 2-14

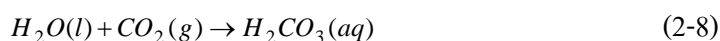


ภาพประกอบที่ 2-14 แสดงสูตรโครงสร้างของ Ethylene diaminetetraacetic acid (EDTA) (อุรา รังสาตทอง , 2546)

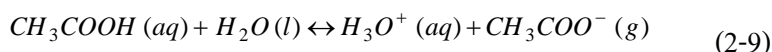
Chelates ที่เกิดขึ้นอาจทำให้เกิดการตกตะกอนของโลหะหรืออาจได้เป็นสารประกอบเชิงซ้อนที่คงตัวและละลายน้ำได้ นอกจากนี้เนื่องจาก EDTA สามารถจับกับไอออนของโลหะหนัก เช่น Iron ได้ จึงสามารถนำมาใช้ในการป้องกันการเสื่อมสลายจากปฏิกิริยาออกซิเดชันที่เกิดจากโลหะเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาได้ (อุรา รังสาทอง, 2546)

## 2.5.2 ปฏิกิริยาเคมีระหว่างก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์กับน้ำ (<http://www.maceducation.com>)

เมื่อแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในก๊าซเสียละลายในน้ำทำให้น้ำมีสภาพเป็นกรดคาร์บอนิก ( $H_2CO_3$ ) ดังสมการที่ (2-8)



กรดคาร์บอนิกที่เป็นกรดแก่ซึ่งเป็นอิเล็กโทรไลต์แก่ เมื่อละลายในน้ำสามารถแตกตัวได้อย่างสมบูรณ์ สำหรับกรดคาร์บอกซิลิกเป็นกรดอ่อน แตกตัวได้บางส่วนจึงยังเหลือโมเลกุลส่วนที่ไม่แตกตัวอยู่มาก ให้ไฮโดรเนียมไอออน ( $H_3O^+$ ) น้อยหรือแตกตัวไม่สมบูรณ์ ถ้าให้กรดอะซิติก ( $CH_3COOH$ ) เป็นตัวแทนของกรดคาร์บอกซิลิก การแตกตัวของกรดอะซิติก แสดงได้ดังสมการ (2-9) และมีค่าคงที่ของการแตกตัวดังสมการ (2-10)



$$K_a = \frac{[H_3O^+][CH_3COO^-]}{[CH_3COOH]} = 1.8 \times 10^{-5} \quad (2-10)$$

ค่าคงที่การแตกตัวของกรด ( $K_a$ ) ดังสมการ (2-10) มีค่าน้อย แสดงว่ากรดอะซิติกแตกตัวได้น้อยหรือเกิดปฏิกิริยาไปข้างหน้าได้น้อย เนื่องจากกรดอะซิติกเป็นกรดคาร์บอกซิลิก และนอกจากนี้กรดคาร์บอกซิลิกสามารถละลายน้ำได้เนื่องจากโมเลกุลมีสภาพขั้วโมเลกุลสูง โดยหมู่ฟังก์ชันที่มีขั้วมีถึง 2 หมู่ คือหมู่ไฮดรอกซิลและหมู่คาร์บอนิล แต่ความสามารถในการละลายได้ของกรดคาร์บอกซิลิกจะลดลงเมื่อจำนวนอะตอมคาร์บอนเพิ่มขึ้น เนื่องจากโมเลกุลมีส่วนที่ไม่มีขั้วมากขึ้น

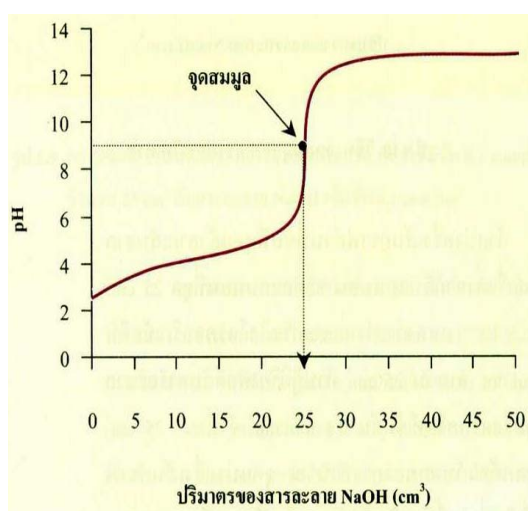
ตารางที่ 2-3 แสดงความสามารถในการละลายน้ำของกรดชนิดต่างๆ

ชื่อ	สูตรโครงสร้าง	จุดเดือด (°C)	สภาพละลายได้ในน้ำที่ 20 °C (g/น้ำ 100 g)
กรดเมทาโนอิก	HCOOH	100.8	ละลายได้ดี
กรดเอทาโนอิก	CH <sub>3</sub> COOH	117.9	ละลายได้ดี
กรดโพรพาโนอิก	CH <sub>3</sub> CH <sub>2</sub> COOH	140.8	ละลายได้ดี
กรดบิวทาโนอิก	CH <sub>3</sub> (CH <sub>2</sub> ) <sub>2</sub> COOH	163.3	ละลายได้
กรดเพนทาโนอิก	CH <sub>3</sub> (CH <sub>2</sub> ) <sub>3</sub> COOH	185.5	3.7
กรดเพนทาโนอิก	CH <sub>3</sub> (CH <sub>2</sub> ) <sub>4</sub> COOH	205.7	1.0

ที่มา : <http://www.promma.ac.th/>

### 2.5.3 ปฏิริยาเคมีที่เกี่ยวข้องระหว่างกรดอะซิติคกับสารดูดซึ่มในการวิเคราะห์ความเข้มข้นของกรดอะซิติค

ความสัมพันธ์ระหว่าง pH และปริมาตรของเบสในการไทเทรตระหว่างกรดอ่อนกับเบสแก่ เช่น สารละลายกรดอะซิติคกับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ แสดงดังภาพประกอบที่ 2-15



ภาพประกอบที่ 2-15 แสดงกราฟของการไทเทรตสารละลายกรดกับเบส

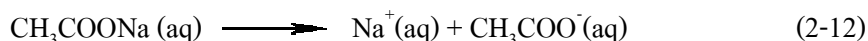
ที่มา : <http://ujutchemical.exteen.com/>



จากภาพประกอบที่ 2-15 พบว่าค่า pH จะเปลี่ยนอย่างช้าๆ ในตอนเริ่มต้น และจะเปลี่ยนอย่างรวดเร็วเมื่อใกล้จุดสมมูล และช่วงที่กราฟมีความชันมากที่สุด คือ ช่วง pH 6-11 เมื่อหา pH ที่จุดสมมูลจะได้สูงกว่า 7 คือประมาณ 8.7 ทั้งนี้อธิบายได้ว่า ปฏิกิริยาระหว่างกรดอะซิติกกับโซเดียมไฮดรอกไซด์จะได้เกลือโซเดียมอะซิเตตเกิดขึ้น ดังสมการ (2-11)



$\text{CH}_3\text{COONa}$  เมื่อละลายน้ำจะแตกตัวเป็นไอออนได้หมด และ  $\text{CH}_3\text{COO}^-$  ก็เกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสกับน้ำต่อไปได้  $\text{OH}^-$  ดังสมการ (2-12) และ (2-13)



ดังนั้นการไทเทรตกรดอะซิติกด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ จึงได้สารละลายผสมมีสมบัติเป็นเบส pH ของสารละลายที่จุดสมมูลจึงมีค่ามากกว่า 7

## 2.6 Response Surface Methodology (RSM)

RSM คือ การรวบรวมข้อมูลทางสถิติและเทคนิคทางคณิตศาสตร์ เพื่อเป็นประโยชน์ในการพัฒนาการเพิ่มประสิทธิภาพและการหาจุดที่เหมาะสมของกระบวนการ ซึ่ง RSM ประกอบด้วยกลุ่มของตัวแปรตามหลักการทางคณิตศาสตร์และสถิติ โดยจะใช้หลักการเหล่านี้ในการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างผลตอบสนองและตัวแปรอิสระ โดย RSM ประกอบขึ้นมาจากผลของตัวแปรอิสระซึ่งอาจมีเพียงตัวเดียวหรือหลายตัว สำหรับการวิเคราะห์ของตัวแปรอิสระที่ได้จากผลการทดลองนั้นจะถูกนำมาสร้างเป็นสมการทางคณิตศาสตร์ซึ่งจะอยู่ในรูปแบบของผลตอบสนองในรูปแบบของพื้นผิวตอบสนอง (Response surface methodology) โดยความสัมพันธ์ระหว่างผลตอบสนองที่ได้กับข้อมูลดิบแสดงดังสมการที่ 2-14

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_n) + \epsilon \quad (2-14)$$

ซึ่ง  $y$  คือ ผลตอบสนองที่เกิดขึ้น

$f$  คือ ฟังก์ชันการทำงานที่ตัวแปรที่ยังไม่ทราบต่อผลตอบสนอง

$x_1, x_2, \dots, x_n$  คือ ตัวแปรอิสระ ซึ่งจะถูกรู้จักว่า ตัวแปรธรรมชาติด้วย

$n$  คือ จำนวนของตัวแปรอิสระ

$\epsilon$  คือ ค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นซึ่งเกิดมาจากแหล่งต่างๆซึ่งไม่สามารถถูกรวบรวมเอาไว้ใน  $f$  ได้ ซึ่งแหล่งที่ว่านี้ก่อให้เกิดผลกระทบ เช่น ค่าการวัดผิดพลาด โดยที่จะถูกคาดคะเนด้วยค่า  $\epsilon$  มีการกระจายตัวด้วยค่าเฉลี่ยศูนย์และค่าความแปรปรวน

การออกแบบการทดลองโดยใช้เทคนิค RSM มีขั้นตอนดังนี้

1. กำหนดตัวแปรที่จะศึกษา ซึ่งประกอบไปด้วยตัวแปรอิสระ และตัวแปรตาม กระบวนการทางเคมีและทางชีวเคมีที่สามารถได้รับผลกระทบจากกระบวนการต่างๆ มากมาย เพราะเป็นไปไม่ได้ที่จะระบุผลกระทบต่างๆ ที่เกิดขึ้นได้จากทุกตัวแปรที่เกี่ยวข้อง ซึ่งมีความจำเป็นในการเลือกตัวแปรบางตัวที่สร้างผลกระทบได้โดยตรงออกมา การคัดเลือกโดยการทดลองนั้นมีความสำคัญในการระบุตัวแปรอิสระ โดยหลังจากทำการระบุตัวแปรสำคัญต่างๆ แล้วจะสามารถกำหนดทิศทางในการพัฒนารูปแบบขึ้นซึ่งจะสามารถระบุระดับความสำคัญของตัวแปรต่างๆ ขึ้นมาได้ การระบุความสำคัญของตัวแปรต่างๆ นั้นมีความสำคัญเพราะความสำเร็จของกระบวนการหาจุดที่เหมาะสมนั้นเกี่ยวข้องกับสิ่งนี้โดยตรง ซึ่งความผิดพลาดในการระบุระดับความสำคัญนั้นส่งผลถึงความผิดพลาดในการระบุจุดที่เหมาะสมได้

2. กำหนดรหัส (Code) ของตัวแปรอิสระที่เหมาะสมเพื่อใช้ในการออกแบบสถานะที่ใช้ในการทดลองโดยวิธีการ Central composite design (CCD) และทำการแปลงค่ารหัสตัวแปรอิสระ (Coded variables) ที่ได้ออกแบบไว้เป็นตัวแปรเดิมทำได้โดยใช้สมการที่ 2-17

$$x = \left[ \frac{x - \frac{x_{\max} + x_{\min}}{2}}{\frac{x_{\max} - x_{\min}}{2}} \right] \quad (2-15)$$

โดยที่  $x =$  Coded variables

$x$  = ตัวแปรอิสระ

$x_{\max}$  = ค่าสูงสุดของตัวแปรอิสระ

$x_{\min}$  = ค่าต่ำสุดของตัวแปรอิสระ

3. ทำการทดลองตามสถานะการทดลองที่ได้ออกแบบไว้

4. แสดงผลของตัวแปรอิสระต่างๆ ที่ได้จากการทดลองในรูปแบบของ Surface plot โดยใช้โปรแกรม Regression analysis ซึ่งแบบจำลองที่ได้จะอยู่ในรูปแบบสมการกำลังสอง (Quadratic equation) ดังแสดงได้ในสมการที่ 2-16

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \left[ \sum_{i=1}^{k-1} \sum_{j=i+1}^k \beta_{ij} x_i x_j \right]_{i(j)} \quad (2-16)$$

โดยที่  $\beta_0$ ,  $\beta_i$ ,  $\beta_{ii}$  และ  $\beta_{ij}$  คือสัมประสิทธิ์ถดถอยทั้งแบบเชิงเส้นและแบบกำลังสอง และสัมประสิทธิ์เชิงซ้อน ตามลำดับ

RSM มีประโยชน์มากถ้าเปรียบเทียบกันระหว่างการหาค่าที่เหมาะสมในการทดลองโดยวิธีดั้งเดิมกับ RSM โดยข้อได้เปรียบที่สำคัญคือ จำนวนชุดการทดลองที่ออกแบบโดยใช้ RSM นั้นมีจำนวนที่น้อยกว่าเมื่อเทียบกับการออกแบบการทดลองแบบดั้งเดิม เพราะ RSM นั้นจะนำเสนอข้อมูลจำนวนมากจากการทดลองเพียงไม่กี่ครั้ง ซึ่งต่างจากการทดลองในแบบดั้งเดิมที่จะใช้จำนวนการทดลองที่มากกว่าเพื่ออธิบายถึงพฤติกรรมของระบบ และ RSM มีความเป็นไปได้ที่จะเจอผลกระทบที่มีลักษณะเป็นผลกระทบภายใน (Interactive effect) จากตัวแปรอิสระ โดยเฉพาะกระบวนการทางชีวเคมี นอกจากนี้โมเดลสมการอย่างง่ายของ RSM จะเพิ่มความเข้าใจต่อผลที่เกิดจากการผสมกันของตัวแปรอิสระต่างๆ เมื่อสังเกตสมการนั้นผ่านการทดลองต่างๆ ก็จะพบว่าข้อมูลของตัวแปรอิสระต่างๆ ที่ได้กับผลตอบสนองนั้นมีความสอดคล้องกัน จึงกล่าวได้ว่า RSM เป็นเครื่องมือที่เป็นประโยชน์สำหรับการหาจุดที่เหมาะสมของกระบวนการทางเคมีและกระบวนการทางชีวเคมี

## 2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในการศึกษาการบำบัดกลิ่นของก๊าซเสียที่เกิดขึ้นจากกระบวนการอบยางแท่งโดยการดูดซึมด้วยสารละลายไอออน(III)โคเลทในคอลัมน์บรรจุ (Packed column) ได้ทำการศึกษาเอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้องเพื่อใช้เป็นแนวทางในการทดลองเลือกพารามิเตอร์ที่ต้องการศึกษาซึ่งมีงานวิจัยที่เกี่ยวข้องดังนี้

สมทิพย์ และคณะ (2550) ได้ทำการศึกษาปัญหามลพิษทางอากาศที่สำคัญของอุตสาหกรรมยางแท่ง STR 20 คือ ปัญหากลิ่นเหม็น ซึ่งเกิดจากการอบยางและบริเวณพื้นที่กักเก็บยางกันด้วย ผลจากการศึกษาในห้องปฏิบัติการพบว่ากรดไขมันระเหยที่ระเหยออกจากการอบยางกันด้วยโดยวิธีการดูดซับในน้ำกลั่น สามารถคำนวณว่าอยู่ในช่วง 0.031–0.235 มก.ของกรดอะซิติค/กรัมยางแห้งและ 0.031–0.055 มก.ของกรดอะซิติค/กรัมยางแห้งของตัวอย่างยางกันด้วยที่เก็บไว้ในสภาวะเปียกและแห้งตามลำดับ ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่ายางกันด้วยที่เปียกที่เก็บบ่มไว้ในสภาวะเปียกจะสามารถให้กรดไขมันระเหยซึ่งเป็นสาเหตุของปัญหากลิ่นเหม็นได้มากกว่าการเก็บในสภาวะแห้ง สามารถจำแนกสารประกอบอินทรีย์ที่เป็นสาเหตุของปัญหากลิ่นเหม็นในอุตสาหกรรมยางแท่ง STR 20 ตัวอย่างก๊าซที่ระเหยจากการอบยางกันด้วยทั้งในห้องปฏิบัติการและจากการอบยางในโรงงานยางแท่ง STR 20 และตัวอย่างน้ำเสียที่ได้จากการล้างยางกันด้วยจากโรงงานยางแท่ง STR 20 ได้ดำเนินการโดยใช้ GC-MS ในการวิเคราะห์และได้ดำเนินการวิเคราะห์

หาความเข้มข้นของแต่ละประเภทของกรดไขมันระเหยในเทอมของกรดอะซิติก กรดพรอพิโนอิก กรดบิวทิริก กรดไอโซวาเลริก โดยใช้ GC ในการวิเคราะห์ ผลการศึกษาพบ 25 ชนิด ของสารประกอบอินทรีย์ในตัวอย่างดังกล่าวข้างต้น และสารอินทรีย์ที่เด่นซึ่งพบในทุกตัวอย่างที่วิเคราะห์ได้แก่ กรดอะซิติก กรดบิวทิริก กรดไอโซวาเลริก กรดเฮกซาเดคานอิก กรดโอเลอิก และเมทิลเอสเทอร์ของกรดโอเลอิก

สมทิพย์ และคณะ (2550) ศึกษาการใช้สารดูดซึมสำหรับดักจับแบบเปียกให้เหมาะสม โดยสามารถใช้น้ำที่ปรับ pH ระหว่าง 8-10 หรือน้ำที่เติมสาร Oxidizing agent เช่น ใช้ Sodium hypochloric หรือ Potassium permanganate ที่ความเข้มข้นเท่ากับ 10 mg/L จากผลการตรวจวิเคราะห์ตัวอย่างก๊าซก่อนเข้าและออกจากระบบดักจับแบบเปียกของโรงงานยางแท่ง STR20 พบว่าประสิทธิภาพการบำบัดแต่ละประเภทของกรดไขมันระเหยของระบบดักจับแบบเปียกของโรงงานซึ่งภายในบรรจุด้วยตัวกลางพลาสติกมีค่าระหว่าง 19-100%

สมทิพย์ และคณะ (2550) ศึกษาผลการทดลองบำบัดกลิ่นโดยใช้ตัวกรองทางชีวภาพที่เป็นส่วนผสมของวัสดุปุ๋ยหมัก เปลือกมะพร้าวและขี้เถ้า ภายใต้สภาวะที่แตกต่างกันของอัตราการป้อนของก๊าซที่ต้องการบำบัดซึ่งมาจากแหล่งที่แตกต่างกัน ระบบตัวกรองทางชีวภาพมีประสิทธิภาพการบำบัดเฉลี่ยมีค่าระหว่าง 26-63%, 0.1-16%, 2-10%, 8-35% และ 5-35% สำหรับการบำบัดกรดอะซิติก กรดพรอพิโนอิก กรดไอโซบิวทิริก และกรดไอโซวาเลริก ในก๊าซที่ระบายออกจากที่อบยางและมีค่าเฉลี่ยของประสิทธิภาพในการบำบัดในช่วง 29-65%, 42-59% และ 50% สำหรับการบำบัดกรดอะซิติก กรดบิวทิริก กรดไอโซวาเลริก ในก๊าซที่ระบายออกจากระบบดักจับแบบเปียก ระบบตัวกรองทางชีวภาพสามารถลดค่า VFA ในก๊าซที่ระบายออกจากที่อบยางได้ด้วย และก๊าซที่ระบายออกจากระบบดักจับแบบเปียกของโรงงานยางแท่ง STR20 ได้ แต่จะสามารถให้ประสิทธิภาพการบำบัดในก๊าซที่ออกมาจากระบบดักจับแบบเปียกได้ดีกว่าการใช้กับก๊าซที่ระบายออกจากที่อบยางโดยตรง

สิริรัตน์ และคณะ (2552) ได้ทำการศึกษาการฟื้นฟูสภาพสารละลายในกระบวนการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ ก๊าซชีวภาพเป็นเชื้อเพลิงซึ่งมีก๊าซมีเทน ( $CH_4$ ) เป็นองค์ประกอบหลัก และประกอบด้วยก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ ( $H_2S$ ) อีกเล็กน้อย แม้ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์จะมีปริมาณน้อยแต่ก็มีฤทธิ์กัดกร่อนสูง และทำให้เครื่องยนต์สันดาปเสื่อมเร็ว กระบวนการรีดอกซ์ของเหลว (Liquid redox process) เป็นกระบวนการหนึ่งที่มีประสิทธิภาพสูงในการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ ปฏิริยาเคมีในกระบวนการเป็นการออกซิเดชันในเฟสของเหลวโดยใช้สารละลายเหล็ก (III) กิเลทซึ่งเป็นการเปลี่ยนก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์เป็นตะกอนกำมะถัน การใช้ปฏิกรณ์ก๊าซลิฟต์ (Gas-lift reactor) เหมาะสมสำหรับกระบวนการรีดอกซ์ของเหลว เนื่องจากเป็น

การรวมขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาและขั้นตอนการฟื้นฟูสภาพอยู่ในปฏิกรณ์เดียวกัน ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ลดลง เมื่อเวลาในการเดินเครื่องนานขึ้น นอกจากนี้การเพิ่มการฟื้นฟูสภาพสารละลายในขณะที่หยุดทำปฏิกิริยาการกำจัด และการปรับ pH ที่เหมาะสม เป็นผลให้ประสิทธิภาพกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์เพิ่มขึ้น ดังนั้นการทำการฟื้นฟูสภาพของสารละลายอย่างต่อเนื่อง และการปรับพีเอชสามารถยืดระยะเวลาของสารละลายให้ใช้งานได้ยาวนานขึ้น

ธีรภัทร์ และคณะ (2553) ศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดกรดอะซิติกในก๊าซเสียที่ปล่อยจากปล่องควันของเตาอบยาง โดยกระบวนการดูดซึมทางเคมีในคอลัมน์บรรจุขนาด Pilot โดยใช้สารดูดซึม 2 ชนิด คือ สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) และสารละลายโมโนเอทานอลเอมีน (MEA) โดยทำการศึกษาตัวแปรที่เกี่ยวข้อง 4 ตัวแปร ได้แก่ ความเข้มข้นของสารดูดซึม (C) อัตราการไหลของสารดูดซึม (L) อัตราการไหลของก๊าซร้อน (G) และอัตราส่วนของอัตราการไหลของสารดูดซึมต่ออัตราการไหลของก๊าซ (L/G) ผลการศึกษาในการใช้หอดูดซึมพบว่าสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดกรดอะซิติกในคอลัมน์ขนาดบรรจุ คือ ความเข้มข้นของ NaOH 0.7 mol/L และอัตราส่วนของอัตราการไหลของสารดูดซึมต่ออัตราการไหลของก๊าซ (L/G) คือ 30 L/m<sup>3</sup> โดยให้ประสิทธิภาพในการบำบัดกรดอะซิติกเท่ากับ 90% และที่สภาวะเดียวกันนี้สารละลาย MEA จะให้ประสิทธิภาพในการบำบัดกรดอะซิติกเพียง 62% ดังนั้นสารละลาย NaOH จึงถูกเลือกนำไปใช้กับหอดูดซึมขนาดอุตสาหกรรมของโรงงานผลการศึกษาโดยการใช้ NaOH แทนการใช้น้ำเป็นสารดูดซึมพบว่าการเติม NaOH ในระบบอัตรา 1 2 และ 3 kg/hr ซึ่งการเติม NaOH ในอัตรา 2 kg/hr จะให้ประสิทธิภาพในการบำบัดกรดอะซิติกสูงที่สุด เมื่อพิจารณาจากความคุ้มค่าทางด้านค่าใช้จ่ายและความคิดเห็นจากพนักงานบริษัท สยามอินโด รับเบอร์ จำกัด

Freudenthal *et al.* (2005) ศึกษาการบำบัดกลิ่นโดยใช้ Waste gas scrubber โดยใช้กระบวนการดูดซึมซึ่งเป็นเทคนิคดักจับก๊าซสามารถทำได้โดยการใช้ Washing liquid วิธีการ Screening Test ถูกนำมาใช้เพื่อลดค่าเครื่องมือสำหรับ Washing Liquid ในการบำบัดกลิ่นในก๊าซเสีย ดัชนีของกลิ่นเป็นการบ่งชี้ถึงกลิ่นที่มีลักษณะจำเพาะและสามารถวิเคราะห์ประสิทธิภาพการดูดซึมของ Washing Liquids ได้ง่ายขึ้นโดยวิธีการนี้ประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมซ็อกโกแลตและการกลั่นน้ำมัน

Schlegelmilch *et al.* (2005) ศึกษาประสิทธิภาพในการบำบัดกลิ่นโดยใช้แนวทางที่เหมาะสม โดยส่วนใหญ่กระบวนการที่มักจะนำมาใช้ในการบำบัดกลิ่นได้แก่ กระบวนการทางกายภาพ กระบวนการทางเคมี และกระบวนการทางชีวภาพ โดยที่กระบวนการดูดซับจะใช้สารดูดซับต่างชนิดกัน เช่น Activated carbon, Activated alumina, Silica gels และ Zeolites เป็นต้น

กระบวนการดูดซึม ได้แก่กระบวนการดูดซึมทางกายภาพและกระบวนการทางเคมี กระบวนการบำบัดกลิ่นทางชีวภาพ ได้แก่ Bioscrubbers Biotrickling filter และ Biofilters การบำบัดกลิ่นโดยใช้ความร้อน ได้แก่ Thermal afterburners catalytic incinerators และ Regeneration thermal oxidation (RTO) กระบวนการออกซิเดชันแบบไม่ใช้ความร้อน ได้แก่ Ozone UV และ Non-thermal plasma การทดสอบระบบบำบัดกลิ่น 2 ระบบ ได้แก่

1. Static test system เป็นระบบที่ใช้ถุงพลาสติกที่ใช้ใน Olfactometry กับ Treatment media เช่น Adsorbent scrubbing และ Biofilter

2. Dynamic test system ใช้ในกระบวนการบำบัดกลิ่นที่ประกอบด้วยยูนิตต่างๆ เช่น Test Unit, Air Pump และ Flowmeters การจัดการกลิ่นสามารถสรุปได้เป็น Odor problem, Odour assessment และ Chemical analysis เป็นต้น

Sakdapipanich *et al.* (2006) ทำการศึกษาวิเคราะห์องค์ประกอบของกลิ่นจากยางตัวอย่าง โดยใช้เทคนิค Head space ในการเก็บตัวอย่างก๊าซจากการนำตัวอย่างอบโดยใช้ลมร้อนที่อุณหภูมิ 60 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง และวิเคราะห์ตัวอย่างก๊าซโดยใช้ GC-MS ในการวิเคราะห์พบว่าสำหรับยาง STR20 ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากยางกันถ้วยซึ่งเป็นวัตถุดิบโดยส่วนใหญ่จะมีองค์ประกอบของกรดไขมันระเหยที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำๆ ได้แก่ กรดอะซิติก กรดพรอพิโนอิก กรดไอโซบิวทริก และสารประกอบเอสเทอร์ ซึ่งเกิดขึ้นมาจากกระบวนการหมักคาร์โบไฮเดรตและเกิดจากการหมักในน้ำเป็นเวลานานหลายชั่วโมงเพื่อกำจัดสิ่งสกปรกที่ติดมากับยางกันถ้วย ส่วนประกอบของเอสเทอร์และแอลกอฮอล์นั้นเกิดขึ้นจากปฏิกิริยา Microbial esterification ของกรดอินทรีย์และแอลกอฮอล์

Tan *et al.* (2007) ได้ใช้วิธีการออกแบบการทดลองด้วย CCD เพื่อทำการศึกษปัจจัยที่มีผลต่อการเตรียม Activated carbon ซึ่งได้แก่ อุณหภูมิสำหรับการกระตุ้น ระยะเวลาการกระตุ้น และอัตราส่วน KOH : Char ต่อการดูดซับ Methyl blue แต่ผู้ทำวิจัยต้องการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการเตรียม Activated carbon จึงนำไปสู่การวิเคราะห์การทดลองโดยใช้วิธีการพื้นผิวตอบสนอง (Response surface method of process optimization) พบว่าสภาวะที่เหมาะสมที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีนี้คือ สภาวะอุณหภูมิประมาณ 816 °C ระยะเวลาในการกระตุ้นประมาณ 1 ชั่วโมง และต้องใช้อัตราส่วน KOH : Char เท่ากับ 3.9

ปัทมา และ คณะ (2552) ศึกษาจลนพลศาสตร์ปฏิกิริยาออกซิเดชันและการกำจัด H<sub>2</sub>S ด้วย KMnO<sub>4</sub> ในหอดูดซึม โดยทำการศึกษาผลของตัวแปรดำเนินการต่างๆ ประกอบด้วย ความเข้มข้นของ H<sub>2</sub>S ความเข้มข้นของสารละลาย KMnO<sub>4</sub> อัตราการไหลของสารดูดซึม (L) และ อัตราการไหลของแก๊ส (G) อัตราส่วนของอัตราการไหลของของเหลวต่ออัตราการไหลของแก๊ส (L/G

ratio) และความสูงของเบดต่อประสิทธิภาพการกำจัด  $H_2S$  และพัฒนาแบบจำลองที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรดำเนินการเหล่านี้กับประสิทธิภาพ ผลการศึกษาพบว่าสารละลาย  $KMnO_4$  สามารถใช้กำจัด  $H_2S$  ได้อย่างมีประสิทธิภาพ และแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นสามารถใช้ทำนายสภาวะการดำเนินการที่เหมาะสมได้ดีซึ่งเมื่อเทียบกับกับการทดลองกำจัด  $H_2S$  จากก๊าซชีวภาพจริงพบว่าแบบจำลองดังกล่าวมีความผิดพลาดไม่เกิน 2% ซึ่งสามารถยอมรับได้ อย่างไรก็ตามข้อเสียของระบบกำจัด  $H_2S$  ด้วยสารละลาย  $KmMO_4$  คือเกิดสารละลายที่เป็นของเสียจากสารดูดซึมน้ำที่ใช้ซึ่งไม่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้

Aroonwilas *et al.* (1999) ศึกษาการทดลองการบำบัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์โดยการดูดซึมในหอดูดซึม 3 ขนาด ได้แก่ ระดับห้องทดลอง ระดับ pilot ระดับอุตสาหกรรม เป็นต้น และใช้ตัวกลางในการดูดซึมประเภท Sulzer EX, Gempak 4A และ Sulzer BX โดยใช้สารดูดซึมโซเดียมไฮดรอกไซด์ โมโนเอทานอลเอมีน และ AMP ประสิทธิภาพในการบำบัดอธิบายในเทอมของสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลเชิงปริมาตร พารามิเตอร์ที่ทำการศึกษา ได้แก่ อัตราการไหลของก๊าซ ความดันส่วนของคาร์บอนไดออกไซด์ อัตราการไหลของของเหลว อุณหภูมิของของเหลว ความเข้มข้นของสารดูดซึม ชนิดของสารดูดซึม และชนิดของตัวกลางตามลำดับ จากการทดลองพบว่าอัตราการไหลของก๊าซไม่มีอิทธิพลต่อประสิทธิภาพในการบำบัด พารามิเตอร์ที่มีผลต่อการทดลอง คือ ความดันส่วนของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ อัตราการไหลของของเหลว อุณหภูมิของของเหลว ความเข้มข้นของสารดูดซึม ชนิดของสารดูดซึมและชนิดของตัวกลาง โดยที่ระบบ  $CO_2$ -NaOH จะมีสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลเชิงปริมาตรสูงกว่าการใช้ระบบ  $CO_2$ -AMP แต่ระบบ  $CO_2$ -NaOH จะมีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลเชิงปริมาตรต่ำกว่าเมื่อเทียบกับระบบ  $CO_2$ -MEA เนื่องจาก NaOH มีค่าแรงตึงผิวที่ต่ำกว่า MEA ทำให้ในระบบ  $CO_2$ -NaOH จะมีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลเชิงปริมาตรสูง

Manus *et al.* (1997) ได้ทำการศึกษาความก้าวหน้าของการใช้ Fe(III) ซึ่งสามารถนำกลับมาใช้ใหม่โดยการ Oxidant โดยการเติมอากาศ และทำให้  $H_2S$  เป็นผลิตภัณฑ์กำมะถัน (S) ของแข็งภายใต้กระบวนการ Oxidation ของ  $Fe_2O_3$  โดยวิธีการใช้สารละลายเบส  $Fe(OH)_3$  และ  $Fe(CN)_6$  เป็นกระบวนการพื้นฐาน ซึ่งเป็นสารละลายเนื้อเดียวภายใต้ปฏิกิริยา Redox โดยใช้ Amino polycarboxylate chelate Iron ในกระบวนการโดยตรงโดยให้ก๊าซ  $H_2S$  ซึ่งอยู่ในกระแสแก๊สสัมผัสกับสารละลายเจือจางของเหล็กความเข้มข้น 5 mM–0.5 M ความเป็นเบสระดับกลาง pH 7–9 โดยประยุกต์ใช้สารละลาย Amino polycarboxylate chelate Iron ที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับความสัมพันธ์ของก๊าซและของเหลว กำมะถัน (S) คือ สิ่งที่เกิดขึ้นและสิ่งที่ถูกกำจัดออกไปอย่างต่อเนื่อง สิ่งที่เกิดขึ้นพร้อมกัน คือ  $Fe(III)L$  ลดรูปเป็น  $Fe(II)L$  และสามารถฟื้นฟูสภาพโดยการเติมอากาศในที่

เดียวกัน ขึ้นอยู่กับความจำเป็นหรือการขัดขวางกันการผสมกันของการเกิด Reoxidation ของอากาศกับแก๊ส  $H_2S$  อิสระ กระบวนการพื้นฐานของปฏิกิริยาเคมีจะถูกตรวจสอบและศึกษาผลข้างเคียงของปฏิกิริยา ประกอบไปด้วยการทำลาย Ligand โดยการทำให้ปฏิกิริยา Reduction ของผลผลิต Dioxygen และควบคุมเหตุการณ์ที่เกิด  $S_2O_3^{2-}$  เป็นสิ่งที่อธิบายร่วมกันกับการศึกษากลไกของปฏิกิริยา เป็นการเลือก Ligand ตัวที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการและการใช้สาร Chelate ตัวใหม่เพื่อเพิ่มความเสถียรของระบบที่ทำให้ชัดเจนขึ้น ข้อดีและขีดจำกัดของกระบวนการที่มีความยืดหยุ่นเพื่อเป็นแนวทางเลือกและสิ่งที่คาดว่าจะนำไปใช้ในอนาคต

Piche *et al.* (2005) ได้ทำการศึกษาการดูดซึม  $H_2S$  ด้วยสารละลาย Ferric chelate ชนิด trans-1,2-diaminocyclohexanetetraacetate (CDTA) ด้วยการใช้หลอดดูดซึม Packed column ที่มีการไหลสวนทางโดยใช้วัสดุบรรจุพลาสติก Ralu ขนาด 15 มิลลิเมตร โดยนำไปใช้กับอุตสาหกรรมการผลิตเยื่อกระดาษซึ่งมีปริมาณ  $H_2S$  ที่เจือจางซึ่งมีอยู่ทุกที่ทางออกของก๊าซ มีตัวแปรที่สำคัญ 6 ตัวแปรที่ศึกษา คือ ความเป็นเบสของสารละลาย (pH 8.5–10.5) อัตราการไหลของของเหลว ( $L: 1.73-5.19 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ) การเป็นไอออนิกของสารละลาย ( $I_c: 0.01-0.1 \text{ mol/dm}^3$ ) ความเข้มข้นที่ทางเข้าของ  $H_2S$  ( $C_{H_2S,0}: 70-430 \text{ ppm}$ ) และความเข้มข้นเริ่มต้นของ Ferric CDTA ( $C_{Fe,0}: 100-400 \mu\text{mol/dm}^3$ ) ตอนเริ่มต้นใช้ Plackett-Berman ในการออกแบบของทั้ง 7 การทดลองแสดงให้เห็นว่า pH เป็นตัวแปรที่สำคัญ ผลการวิเคราะห์โดยใช้ผลตอบสนองพื้นผิวเป็นพื้นฐานโดยทำการทดลอง 11 การทดลองซ้ำตามความเป็นจริง เพิ่ม 10 ค่ากลางที่ประกอบด้วยทดลองซ้ำซึ่งเกี่ยวข้องกับปริมาณ  $H_2S$  ที่เพิ่มขึ้นแต่อัตราการไหลของของเหลวที่ลดน้อยลงกับภาระไหลของก๊าซ  $H_2S$  ที่ค่อยๆ เพิ่มขึ้น นอกจากนี้การทดสอบเกี่ยวกับปริมาณของ Ferric CDTA ที่ใช้ในการดูดซึมก๊าซ  $H_2S$  อยู่ในช่วงความเข้มข้น  $0-2,000 \mu\text{mol/dm}^3$  ที่ pH 9.5 และ pH 10.5 แสดงให้เห็นศักยภาพที่ดีของความเข้มข้นของ Ferric CDTA ที่  $2,000 \mu\text{mol/dm}^3$  ซึ่งสามารถกำจัดปริมาณของ  $H_2S$  ที่กำจัดได้เพิ่มขึ้นโดยมีนัยสำคัญ 25 เปอร์เซ็นต์ สำหรับทั้ง 2 pH ในการเปรียบเทียบกับสารละลายเบสบริสุทธิ์ที่ไม่มี Ferric CDTA

Karimi *et al.* (2010) ได้ทำการศึกษาเรื่องของถังปฏิกรณ์แบบ Airlift ซึ่งถูกใช้ในการกำจัดก๊าซ  $H_2S$  ออกจากแก๊สที่เป็นกรดโดยใช้สารละลาย Iron chelate สมการอัตราการดูดซึมและปฏิกิริยาการฟื้นฟูสภาพสามารถหาได้และสุดท้ายจะใช้โปรแกรม “Auto sweet” เพื่อใช้ปรับปรุงการออกแบบและการ Simulate ถังปฏิกรณ์ โดยทำการศึกษาโปรไฟล์ความเข้มข้นของ 2 วัฏภาคที่ Steady state และปริมาตรของถังปฏิกรณ์และการดูดซึมและในส่วนของกราฟฟื้นฟูสภาพสามารถคำนวณได้บนพื้นฐานของวิธีการแบบจำลองในการศึกษานี้ เพื่อเปรียบเทียบผลทางทฤษฎีและผลจากการทดลองที่แสดงให้เห็นตรงกันและเพื่อพิสูจน์แบบจำลอง โดยใช้พื้นฐานแบบจำลองแบบ 2



ขั้นตอน โดยใช้ถังปฏิกรณ์ 1 ลูกบาศก์เมตรและอุปกรณ์ถูกสร้างขึ้นที่สถาบันวิจัย NIOC Institute of petroleum industry

Kass *et al.* (2002) ได้ทำการศึกษากระบวนการสำหรับการหาความเข้มข้นของปริมาณ Fe(III) และปริมาณ Fe รวมโดยใช้เทคนิคการวิเคราะห์โดยการฉีดอย่างต่อเนื่อง (Injection) เป็นวิธีการพื้นฐานบนสารประกอบเชิงซ้อนที่มีสีฟ้าซึ่งเกิดจากการรวมตัวกันระหว่าง Fe(III) และ Tiron ค่าการดูดกลืนแสงของสารประกอบเชิงซ้อนจะถูกวัดโดยใช้ Spectrophotometric ที่ความยาวคลื่น 635 นาโนเมตร ปฏิกิริยาออกซิเดชันของ Fe(III) และสารแทรกสอดของฟลูออรีนจะทำพร้อมๆกัน โดยใช้การฉีดจากชั้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์และ Thorium(IV) ระหว่างตัวอย่างและชั้นที่ทำปฏิกิริยา ความเข้มข้นของ Fe(III) และปริมาณ Fe รวมอยู่ในช่วง 0.002–0.026 M ในการเจือจางตัวอย่างจากอ่าง Pickle สามารถคำนวณได้ โดยค่าที่ได้จะเบี่ยงเบนออกไป 0.4% วิธีการนี้จะถูกใช้ในกระบวนการแบบ Pilot ของกระบวนการสังเคราะห์สังกะสีสำหรับการหาปริมาณ Fe(III) ในช่วงความเข้มข้น 0.2–3.0 g/L ตัวอย่างที่วิเคราะห์เสร็จสิ้นประมาณ 17 ตัวอย่างต่อชั่วโมง ประกอบด้วยการทำ 3 การทดลองซ้ำเพื่อความแม่นยำของแต่ละตัวอย่าง

Saracoglu *et al.* (2006) ได้ทำการศึกษากระบวนการเตรียมความเข้มข้นเบื้องต้นสำหรับการหาตะกั่วและเหล็กในตัวอย่างต่างๆไปโดยใช้ Flame atomic absorption spectrometry โดยที่ Lead(II) และ Fe(III) เป็นสารที่ตกตะกอนร่วมกันโดยใช้ Violuric acid–Copper(II) เป็น Collector โดยที่ Violuric Acid เป็นวิธีการวิเคราะห์ทางเคมีซึ่งใช้ในการหาปริมาณธาตุโคบอลต์และเหล็กโดยใช้การดูดซับเชิงโมเลกุล หลังจากนั้นจึงพิจารณาสารที่ตกตะกอนนำมาละลายด้วย 1 M ของสารละลาย HNO<sub>3</sub> และไอออนของโลหะสามารถหาได้ ขั้นตอนที่เหมาะสมสำหรับใช้ในการออกแบบประกอบด้วยตัวแปร pH Violuric acid (VA) และความเข้มข้นของ Cu ภายใต้สภาวะการทดลองที่เหมาะสมโดยมีจุดมุ่งหมายสำหรับคำนวณหาปริมาณ โลหะหนักในปริมาณจำกัดของปริมาณเหล็ก 0.18 µg/L และสำหรับตะกั่ว 0.16 µg/L และจะต้องมีการศึกษาผลของการมีไอออนในกระบวนการที่เตรียมความเข้มข้นเริ่มต้น ผลที่ได้จะนำไปใช้ในการวิเคราะห์หาเหล็กและตะกั่วในตัวอย่างจริง การทดลองนี้ประสบความสำเร็จในการใช้วิเคราะห์น้ำทะเล น้ำปัสสาวะ น้ำแร่ ดิน ความเข้มข้นของตะกั่วและเหล็กที่ได้จากตัวอย่างเป็นที่ยอมรับได้ซึ่งสอดคล้องกับกับงานวิจัยอื่นๆ

Chungsiriporn *et al.* (2006) ศึกษาการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H<sub>2</sub>S) โดยใช้ Wet-scrubber ร่วมกับสารดูดซึม 2 ชนิด คือ โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) และ โซเดียมไฮโปคลอไรด์ (NaOCl) พบว่า NaOCl ให้ประสิทธิภาพในการกำจัด H<sub>2</sub>S ได้ถึง 94% เนื่องจากการเกิดการดูดซึมร่วมกับปฏิกิริยาออกซิเดชัน แต่ต้องใช้ NaOCl ในอัตราที่สูง ส่วน NaOH ให้ประสิทธิภาพการกำจัดครั้งที่ 70% ตลอดช่วงเวลาการดำเนินการ 0.5 ชั่วโมง

Chen *et al.* (2001) ศึกษาการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ ( $H_2S$ ) จากอากาศโดยใช้ หอคูดซึมแบบแพคคอลัมน์ขนาดต้นแบบสูง 5 m ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.45 m บรรจุด้วยวัสดุ บรรจุชนิด No.2 K-type Tellerete ขนาด 3.25 in ความสูงของชั้นบรรจุเท่ากับ 1.8 m สารดูดซึมที่ใช้ เป็นสารละลายผสมของ โซเดียมไฮโปคลอไรต์ ( $NaOCl$ ) กับ โซเดียมไฮดรอกไซด์ ( $NaOH$ ) ความเข้มข้นของ  $H_2S$  ที่ศึกษาอยู่ในช่วง 50 ถึง 200 ppm ตัวแปรที่ศึกษา ประกอบด้วย ความเข้มข้นขาเข้า ของ  $H_2S$  pH อัตราส่วนของของเหลวต่อแก๊ส (Liquid to gas ratio) และ อัตราการไหลของแก๊ส ผล การศึกษาพบว่าประสิทธิภาพการกำจัด  $H_2S$  ไม่ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นขาเข้าของ  $H_2S$  แต่เพิ่มขึ้นตาม pH และความเข้มข้นของ  $NaOCl$  ที่เพิ่มขึ้น คือการเพิ่ม pH จาก 8 เป็น 11.5 จะทำให้ประสิทธิภาพ การกำจัด  $H_2S$  เพิ่มขึ้นจาก 10 เป็น 90% ในขณะที่การเพิ่มความเข้มข้นของ  $NaOCl$  ซึ่งแสดงใน เทอมของ Oxidation reduction potential (ORP) ที่เพิ่มจาก 350 mV เป็น 550 mV จะทำให้ ประสิทธิภาพการกำจัด  $H_2S$  เพิ่มจาก 87 เป็น 93% ส่วนผลของอัตราส่วนของของเหลวต่อแก๊สจะมี ผลต่อประสิทธิภาพการกำจัด  $H_2S$  เฉพาะที่ pH ต่ำกว่า 11 ในช่วงที่ pH สูงกว่า 11 อัตราส่วนของ ของเหลวต่อแก๊สมีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัด  $H_2S$  น้อยมาก

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

Demmink and Beenackers (1998) ศึกษาผลของ pH ต่อค่า Chemical enhancement factor ของปฏิกิริยาการกำจัด  $H_2S$  โดยใช้สารละลายเกลือ  $Fe(III)EDTA$  พบว่าที่  $pH=7$  จะให้ค่า Chemical enhancement factor สูงสุด ที่  $pH$  ต่ำกว่า 6 และ  $Fe(III)EDTA$  จะอยู่ในรูปไฮเดรต (Hydrated form),  $Fe^{3+}EDTA^{4-}$  ซึ่งมีความว่องไวต่อปฏิกิริยาน้อย และเมื่อ  $pH$  สูงกว่า 6 นั้น  $Fe(III)EDTA$  จะอยู่ในรูปของไฮดรอกซิเลต (Hydroxylated species) ซึ่งมีความว่องไวต่อปฏิกิริยา

Kazuisa *et al.* (2002) จดสิทธิบัตร JP 2002-177716 เกี่ยวกับการเตรียมวัสดุที่ใช้ใน การกำจัดไฮโดรเจนซัลไฟด์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยวัสดุที่ใช้เป็นสารเคมีที่มีโซ่กิ่ง (Side chains) ที่ประกอบด้วยเงิน (Silver) ที่มีไอออนบวก (Cationic) เป็นกลุ่มที่ใช้แลกเปลี่ยนประจุหรือ กลุ่มคีเลต (Chelating group) ที่เติมเข้าไปยังเส้นใยโพลีโอลิฟิน (Polyolefin fiber) ที่มีขนาดเส้นผ่าน ศูนย์กลาง  $\leq 30 \mu m$  โซ่กิ่งนี้จะทำให้เกิดเป็นโพลิเมอร์แบบกราฟต์ (Graft polymerization) ทำให้ สามารถนำวัสดุที่เตรียมได้นี้ไปใช้ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

Cecile *et al.* (2001) จดสิทธิบัตร JP 2001-025640 ศึกษาเกี่ยวกับการกำจัด ไฮโดรเจนซัลไฟด์โดยใช้สารคีเลตที่ประกอบด้วย Chelating agent และโลหะไอออนโพลีวา-

เลนท์ (Polyvalent metal ions) โดยการให้เกิดการสัมผัสระหว่างก๊าซกับสารเคมีที่เตรียมได้ และสามารถส่งสารเคมีที่ได้จากการทำปฏิกิริยากับไฮโดรเจนซัลไฟด์ไปทำการฟื้นฟูสภาพ

Claude *et al.* (1999) จดสิทธิบัตร JP. 11-246206 เกี่ยวกับวิธีการ Desulfurization method โดยการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์และนำซัลเฟอร์ที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยากลับมาใช้ใหม่ได้ (Recovery) โดยการนำก๊าซที่ปนเปื้อนไฮโดรเจนซัลไฟด์มาสัมผัสกับสารละลายของตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalytic aqueous solution) ซึ่งมีส่วนประกอบของโลหะที่มีประจุ (Multivalent metal) ที่เป็นสถานะออกซิเดชัน (Oxidation state) ของสารคีเลต โดยเมื่อสารเข้าทำปฏิกิริยาจะทำให้ไฮโดรเจนซัลไฟด์ถูกออกซิไดซ์ให้กลายเป็นธาตุซัลเฟอร์ และทำให้สารคีเลตกลายเป็นสถานะรีดิวซิง (Reducing state) ธาตุซัลเฟอร์จะถูกแยกออกมาเป็นผลิตภัณฑ์ ส่วนสารตัวเร่งปฏิกิริยาจะถูกทำการฟื้นฟูสภาพด้วยการป้อนอากาศ ก็จะทำให้สามารถนำกลับไปใช้ใหม่ในกระบวนการได้อย่างต่อเนื่อง

Boonyakan *et al.* (2006) ได้ทำการศึกษาการใช้สารละลายโซเดียมไฮโปคลอไรด์ สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ และใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ร่วมกับสารละลายไฮโปคลอไรด์ในการบำบัดแอมโมเนียในอากาศเสีย พารามิเตอร์ที่ทำการศึกษาได้แก่ ความเข้มข้นของแอมโมเนียที่ทางเข้า อัตราการไหลของก๊าซ L:G ratio และ pH ตามลำดับ พบว่าเมื่อใช้สารดูดซับเป็นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์อยู่ในช่วง pH 8-12 ประสิทธิภาพการบำบัดแอมโมเนียในอากาศเสียจําลองน้อยกว่าการใช้น้ำเป็นสารดูดซับ และการใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์และการใช้น้ำเป็นสารดูดซับในระบบ พบว่าประสิทธิภาพในการบำบัดแอมโมเนียมีแนวโน้มลดลงเรื่อยๆ เนื่องจากสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ไม่ได้ทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมีในระบบ

Saelee *et al.* (2009) ได้ศึกษากำจัด  $H_2S$  จากก๊าซชีวภาพที่ผลิตจากน้ำเสียของโรงงานน้ำยางข้น พบว่าการกำจัด  $H_2S$  โดยกระบวนการทางเคมีโดยเฉพาะ Iron(III)chelate มีประสิทธิภาพสูงและใช้ได้อย่างมีประสิทธิภาพแม้ว่าจะมีความเข้มข้นของ  $H_2S$  ในก๊าซชีวภาพสูงถึง 26,000 ppm และสามารถทำการฟื้นฟูสภาพ Iron(III)chelate กลับมาใช้ใหม่ได้โดยการให้อากาศที่เพียงพอแก่ระบบ ซึ่งเป็นกระบวนการฟื้นฟูสภาพที่ง่ายและประหยัดค่าใช้จ่ายได้มากเมื่อเทียบกับการใช้ NaOCl และ  $KMnO_4$  ตามข้อเสียของระบบกำจัด  $H_2S$  ด้วยสารละลาย  $K_2MnO_4$  คือเกิดสารละลายที่เป็นของเสียจากสารดูดซับที่ใช้ที่ยังไม่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้

Sunda and Hutsmand (2003) ได้ศึกษาผลของอุณหภูมิ pH และแสงที่มีผลต่อค่าคงที่สมดุลของสารละลาย Fe-EDTA ซึ่งแสดงถึงความแข็งแรงของพันธะระหว่าง Fe และ EDTA พบว่าเมื่อเพิ่ม pH ในช่วง 7.7-9 จะเป็นการเพิ่มค่าคงที่สมดุลของการรวมกันของ Fe-EDTA ซึ่งเป็นผลมาจากการช่วยให้เกิดการผสมที่ดีของ EDTA-hydroxy chelate และการเพิ่มปริมาณของแสงจะ

ทำให้เกิดการรวมตัวได้ดีขึ้นเป็นผลมาจากการเกิดปฏิกิริยา Reduction นอกจากนี้การลดลงของอุณหภูมิจาก 20 °C เป็น 10 °C จะส่งผลเพียงเล็กน้อยต่อค่าคงที่สมดุล แสดงได้ว่าค่าคงที่ของการสะสมและการหายไปของ Fe-EDTA ไม่ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ

## 2.10 ข้อสรุปข้อมูลที่ได้จากการค้นคว้า

ข้อมูลที่ได้จากการศึกษาค้นคว้าพบว่าก๊าซเสียที่เกิดจากกระบวนการอบยางแท่งจะเป็นกรดไขมันระเหยง่ายที่มีมวลโมเลกุลต่ำๆ ในเทอมของกรดอะซิติก กรดพรอพิโนอิก กรดไอโซวาเลริก กรดบิวทริก กรดวาเลริก เป็นต้น (สมทิพย์ และคณะ, 2550) และใช้วิธีการวัดกรดไขมันระเหยจากน้ำเสียเป็นวิธีการหนึ่งที่สามารถใช้วัดปริมาณของกรดไขมันระเหยในเทอมของกรดอะซิติกได้ (จรรยา และคณะ) และจากการศึกษาของสมทิพย์และคณะ (2550) ยังพบอีกว่าองค์ประกอบทางเคมีที่เด่นชัดจากก๊าซเสียที่ระบายจากที่อบยาง คือ กรดอะซิติก โดยการศึกษาของ Galli *et al.* (2002) พบว่ากรดอะซิติกซึ่งพบในก๊าซเสียที่ระบายออกจากเตาอบยางนั้นเกิดขึ้นจากกระบวนการหมักของคาร์โบไฮเดรตและการแย่งกันด้วยในน้ำเป็นเวลานานทำให้มีปริมาณของกรดอะซิติกสูงขึ้น และจากการรายงานของสมทิพย์ และคณะ (2550) ได้ระบุค่า Odor recognition threshold ของกรดอะซิติกมีค่าเท่ากับ 1 ppm โดยปริมาตรอากาศ และมีลักษณะที่แยกแยะของกลิ่นว่าเป็นกลิ่นเหม็นเปรี้ยว (Hesketh and Cross, 1989) ในขณะที่เมทิลปาล์มมีเตทนั้นจะมีค่า Odor recognition threshold มากกว่า 1 ppm โดยปริมาตรอากาศ (Moretti *et al.*, 2008) ดังนั้นกรดอะซิติกมีค่า Odor recognition threshold น้อยกว่าเมทิลปาล์มมีเตทแสดงว่าจะสามารถรับรู้กลิ่นของอะซิติกได้ก่อนเมทิลปาล์มมีเตท และเนื่องจากกรดอะซิติกมีจุดเดือดที่ต่ำกว่าเมทิลปาล์มมีเตท ดังนั้นกรดอะซิติกสามารถระเหยกลายเป็นไอได้ดีกว่าเมทิลปาล์มมีเตท นอกจากนั้นแล้วกรดอะซิติกยังมีความสามารถในการแพร่ในอากาศได้ดีกว่าเมทิลปาล์มมีเตท เนื่องจากกรดอะซิติกมีมวลโมเลกุลน้อยกว่ามวลโมเลกุลของเมทิลปาล์มมีเตท (ธีรภัทร์ และคณะ, 2553) ดังนั้นจากเหตุผลที่กล่าวมาข้างต้นทำให้สามารถระบุได้ว่าองค์ประกอบทางเคมีของก๊าซเสียที่ปล่อยจากเตาอบยางและทำให้รับรู้ได้ว่ามีกลิ่นเหม็น คือ กรดอะซิติก

ดังนั้นงานวิจัยนี้ศึกษาการบำบัดกรดอะซิติกในก๊าซเสียที่เกิดจากกระบวนการอบยางแท่งโดยใช้สารละลายไอรอน(III)คีเลทประกอบไปด้วย การศึกษาปฏิกิริยาระหว่างสารละลายไอรอน(III)คีเลทกับกรดอะซิติกในปฏิกรณ์แบบแบทช์ การศึกษาการบำบัดกรดอะซิติกด้วยสารละลายไอรอน(III)คีเลทในหอดูดซึมแบบเปียกชนิดแพคคอลัมน์ขนาดต้นแบบ โดยมีพารามิเตอร์ที่ทำการศึกษา คือ ความเข้มข้นของสารดูดซึม ( $C_{Fe,0}$ ) อัตราการไหลของสารดูดซึม (L) และปริมาณการเติมอากาศที่เหมาะสม (A) ทำการออกแบบการทดลองพร้อมทั้งหาแบบจำลองที่ได้

จากการใช้สารละลายไอโรน(III)คีเลท และหาสภาวะที่เหมาะสมในการทดลองโดยใช้เทคนิค Response surface methodology (RSM) และในขั้นตอนสุดท้ายเป็นการนำสภาวะที่ได้จากการทดลองในระดับคอลัมน์บรรจุ (Packed column) ไปประยุกต์ใช้ในการบำบัดกลิ่นจากก๊าซเสียที่เกิดจากกระบวนการอบยางแท่งโดยใช้หอดูดซึมแบบเปียก (Wet scrubber) ขนาดอุตสาหกรรมของโรงงานและทำการวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายในการใช้สารดูดซึมไอโรน(III)คีเลทในการบำบัดกลิ่นเพื่อเปรียบเทียบกับการใช้สารละลายอื่นๆ ที่ได้มีการศึกษาไว้ก่อนหน้านี้ ทั้งนี้เพื่อเป็นทางเลือกให้กับอุตสาหกรรมในการนำวิธีการบำบัดกลิ่นโดยใช้สารละลายไอโรน(III)คีเลทไปใช้ประโยชน์ต่อไป

### บทที่ 3

## วัสดุอุปกรณ์ และวิธีการวิจัย

### 3.1 สารเคมี

#### 3.1.1 สารเคมีที่ใช้ในการเตรียมสารละลายไอรอน(III)คีเลท (Fe(III)EDTA)

- EDTANa<sub>4</sub>·4H<sub>2</sub>O Powder
- น้ำ
- 40% เฟอริกคลอไรด์ (%wt/wt)

#### 3.1.2 สารเคมีที่ใช้ในการวิเคราะห์ความเข้มข้นของกรดอะซิติก

- โซเดียมไฮดรอกไซด์ (Lab scan, 99%)
- ฟีนอล์ฟทาลีน อินดิเคเตอร์

#### 3.1.3 สารเคมีที่ใช้ในการวิเคราะห์ปริมาณเหล็ก (Fe)

- กรดไฮโดรคลอริก (HCl)
- กรดไนตริก (HNO<sub>3</sub>)
- สารละลายไฮดรอกซีลามีน (NH<sub>2</sub>OH·HCl)
- สารละลายแอมโมเนียมอะซิเตทบัฟเฟอร์ (NH<sub>4</sub>C<sub>2</sub>H<sub>3</sub>O)
- สารละลายฟีนานโทรีน (C<sub>12</sub>H<sub>8</sub>N<sub>2</sub>·H<sub>2</sub>O)
- สารละลายสต็อกเหล็ก Fe(NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>·6H<sub>2</sub>O
- 0.1 นอร์มอล โพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต (KMnO<sub>4</sub>)
- น้ำกลั่น (DI)

#### 3.1.4 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

- ปฏิกรณ์แบบแบทช์ สำหรับศึกษาปฏิกิริยาระหว่างไอรอน(III)คีเลทกับกรดอะซิติก
- ชุดหอคูดซิมแบบเปียก ชนิด แพคคอลัมน์ ขนาดต้นแบบ พร้อมอุปกรณ์ประกอบ

-ชุดหอดูดูดซึมแบบเป็ยกชนิดแพคคอล์มน์ ขนาดอุตสาหกรรม

### 3.1.5 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเก็บตัวอย่าง

- ปั้มเก็บอากาศ Air sampling pump (Aircheck sampler รุ่น Model 224 – PCXR8)
- สายยางซิลิโคน
- ปั๊กเกอร์
- กระบอกตวง
- อิมฟิงเจอร์
- ขวดเก็บตัวอย่างขนาด 50 ซีซี
- นาฬิกาจับเวลา (Stop watch)
- Absorbant tube ชนิด SKC (Coconut charcoal, SKC)
- สายยางซิลิโคน

### 3.1.6 อุปกรณ์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ความเข้มข้นของเหล็ก

- pH meter
- อุปกรณ์เครื่องแก้ว
- นาฬิกาจับเวลา
- เครื่องชั่ง
- เครื่องกวนแม่เหล็ก
- ปิเปต
- บิวเรต
- หลอดหยด
- ยูวี-สเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (รุ่น Hewlett Packard 8453) ดังแสดงในภาพประกอบ

ที่ 3-1

- เครื่อง Atomic absorption spectroscopy (AAS) ดังภาพประกอบที่ 3-2



ภาพประกอบที่ 3-1 แสดงเครื่อง UV-Spectrophotometer สำหรับใช้วิเคราะห์หาเหล็กเฟอรัส Fe(II)  
(HEWLETT PACKARD 8453)



ภาพประกอบที่ 3-2 แสดงเครื่อง Atomic absorption spectrometer (AAS) สำหรับใช้วิเคราะห์  
ปริมาณเหล็กรวม (Perkin Elmer model AA Analyst)

### 3.1.7 สารเคมีสำหรับการวิเคราะห์ข้อมูลด้วยเทคนิค GC 6890

- เอทิลอะซิเตท (AR grade, 95%)
- เอทานอล (Commercial grade, 95%) ผลิตโดย Sigma-aldrich



-อะซีโตน

-สารละลายมาตรฐานกรดไขมันระเหยง่าย (Acetic acid)

### 3.1.8 อุปกรณ์สำหรับการวิเคราะห์ตัวอย่างกรดไขมันระเหยง่าย (กรดอะซีติก)

-ปิเปต

-บีกเกอร์

-นาฬิกาจับเวลา (Stop watch)

-ตู้ควัน (Hood)

-Syringe ขนาด 10 mL

-Syring filter (Nylon) ขนาดรูพรุน 0.45  $\mu\text{m}$

-Micro pipette ขนาด 10-1000  $\mu\text{L}$

-Ultrasonic bath

-เครื่อง Gas chromatography (model 6890, Hewlett Packard Series) คอลัมน์ที่ใช้

เป็นแบบ HP-1 (Crosslinked methyl siloxane) ดังแสดงในภาพประกอบที่ 3-3



ภาพประกอบที่ 3-3 แสดงเครื่องวิเคราะห์ Gas chromatography (GC 6890)

### 3.2 วิธีการทดลอง

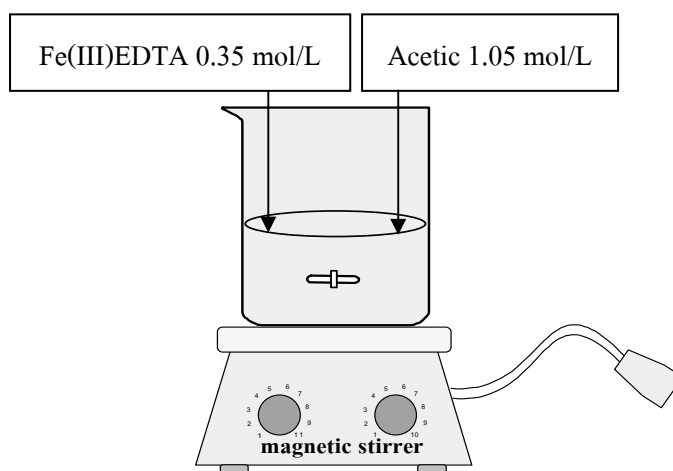
#### 3.2.1 การศึกษาการเกิดปฏิกิริยาระหว่างสารละลายไอออน(III)คีเลทกับกรดอะซิติกในระดับห้องปฏิบัติการ

ทำการทดลองศึกษาการเกิดปฏิกิริยาระหว่างสารละลายไอออน(III)คีเลทกับกรดอะซิติก ในปฏิกรณ์แบบเบตซ์ที่มีส่วนประกอบต่างๆ ดังแสดงในภาพประกอบ 3-4 และมีขั้นตอนการทดลองดังต่อไปนี้

1. เตรียมสารละลายไอออน(III)คีเลท โดยใช้ 187 กรัม ของ EDTA•4Na powder ละลายในน้ำ DI 900 มิลลิลิตร หลังจากนั้นเติมสารละลาย 40% FeCl<sub>3</sub> ปริมาณ 100 มิลลิลิตร (Sealee *et al.*, 2009) กวนผสมให้เข้ากันจะได้สารละลายไอออน(III)คีเลท ความเข้มข้น 0.35 โมล Fe/ลิตร

2. นำสารละลายไอออน(III)คีเลทที่ความเข้มข้น 0.35 โมล Fe/ลิตร มาทำปฏิกิริยากับกรดอะซิติก โดยใช้ความเข้มข้นของกรดอะซิติก 1.05 โมล/ลิตร โดยอัตราส่วนเชิงโมลของความเข้มข้นของสารละลายไอออน(III)คีเลทต่อความเข้มข้นของกรดอะซิติก คือ 1:3 (Kamnev *et al.*, 2001) ในปฏิกรณ์แบบเบตซ์ที่มีการกวนผสมอยู่ตลอดเวลา โดยดำเนินการที่อุณหภูมิห้องและความดันบรรยากาศ

3. ทำการเก็บตัวอย่างสารละลายที่ได้หลังจากการทำปฏิกิริยา 2 ชั่วโมง และนำตัวอย่างที่ได้ไปทำการวิเคราะห์ที่ศูนย์เครื่องมือกลางมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ เพื่อตรวจสอบการเกิดปฏิกิริยาระหว่างสารละลายไอออน (III)คีเลทกับกรดอะซิติกโดยใช้ UV-VIS spectroscopy, CHNO-S analyzer, FTIR spectroscopy และ NMR spectroscopy ตามลำดับ

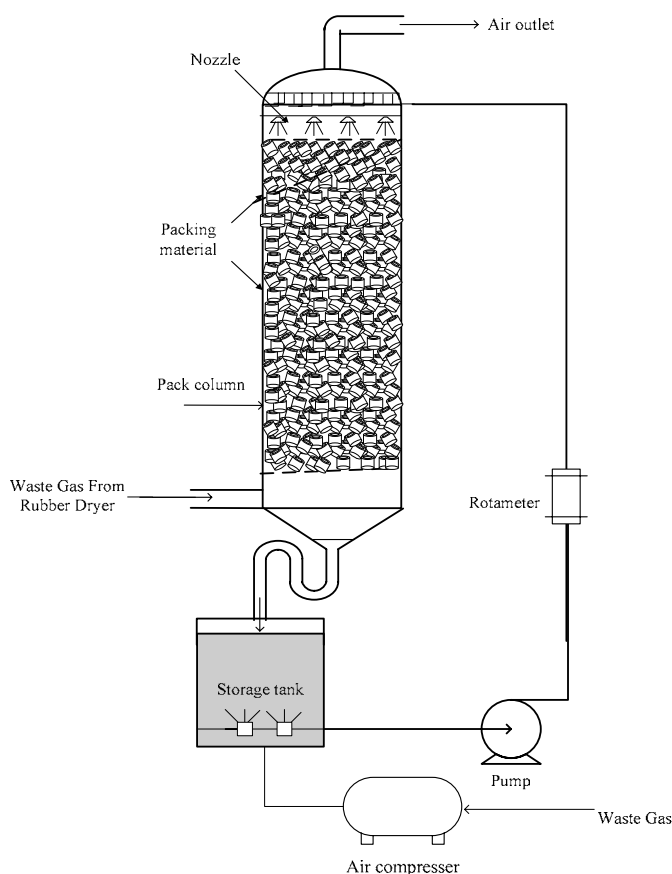


ภาพประกอบที่ 3-4 แสดงชุดการทดลองเบื้องต้นสำหรับการทำปฏิกิริยาระหว่างกรดอะซิติกและสารละลายไอออน(III)คีเลทในสถานะของเหลว

### 3.2.2 การศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการใช้สารละลายไอออน(III)คีเลท บำบัดกรดอะซิติกในคอลัมน์บรรจุ (Packed Column) ขนาดต้นแบบ

#### 3.2.2.1 ชุดหอดูดซึมแบบเปียก ชนิด แพคคอลัมน์ ขนาดต้นแบบ พร้อมอุปกรณ์ประกอบ

ชุดหอดูดซึมแบบเปียก ชนิดแพคคอลัมน์ ขนาดต้นแบบ สำหรับการศึกษการบำบัดกรดอะซิติกในก๊าซเสียจากปล่องควันของเตาอบยางในอุตสาหกรรมยางแท่งโดยใช้สารละลาย(III)คีเลท ประกอบด้วย 3 ส่วนหลักๆ คือ คอลัมน์บรรจุ (Packed column) ระบบเติมอากาศในการฟื้นฟูสภาพสารละลายดูดซึมไอออน(III)คีเลทและระบบเก็บและป้อนสารละลายไอออน(III)คีเลท โดยแต่ละส่วนมีรายละเอียด แสดงดังภาพประกอบที่ 3-5



ภาพประกอบที่ 3-5 แสดงชุดหอดูดซึมแบบเปียกชนิดแพคคอลัมน์ขนาดต้นแบบ สำหรับการบำบัดก๊าซเสียจากปล่องควันของเตาอบในกระบวนการอบยางแห้งด้วยกระบวนการดูดซึมโดยใช้สารละลายไอโรน(III)คีเลท

จากภาพประกอบที่ 3-5 ส่วนประกอบแต่ละส่วนของชุดหอดูดซึมแบบเปียก ชนิดแพคคอลัมน์ ขนาดต้นแบบ สำหรับการบำบัดก๊าซเสียจากปล่องควันของเตาอบ มีรายละเอียดต่างๆ ดังนี้

### 1. คอลัมน์บรรจุ (Packed column)

คอลัมน์บรรจุที่ใช้ศึกษาเป็นท่ออะคริลิกใส รูปทรงกระบอกมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร สูง 100 เซนติเมตร ภายในคอลัมน์ทำการบรรจุด้วยวัสดุตัวกลางแบบ Raschig Rings ที่ทำจากโพลีเอทิลีนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 มิลลิเมตร

### 2. ระบบเติมอากาศในการฟื้นฟูสภาพสารละลายไอโรน(III)คีเลท

ประกอบด้วยถังบรรจุสารละลายไอโรน(III)คีเลทจำนวน 1 ถัง ภายในถังมีหัวฟู่ซึ่งต่อกับท่อก๊าซจากเครื่องอัดอากาศทำหน้าที่เติมอากาศเพื่อทำการฟื้นฟูสภาพให้กับสารละลาย

### 3. ระบบเก็บและป้อนสารละลายไอโรน(III)คีเลท ประกอบด้วย

- ถังเก็บสารดูดซึม (Storage tank) เป็นถังพลาสติกขนาด 20 ลิตร
- โรตاميเตอร์ (Rotameter) ใช้วัดอัตราการไหลของสารดูดซึม
- หัวพ่นฝอย (Spray nozzle) ติดตั้งอยู่ที่ปลายท่อด้านบนสุดของ Column ทำหน้าที่เพิ่มการกระจายตัวของสารละลายไอรอน(III)คีเลท
- วาล์วควบคุมอัตราการไหล ใช้ควบคุมอัตราการไหลของของสารละลาย
- เครื่องสูบน้ำ (Pump) ใช้ส่งสารละลายจากถังเก็บเข้าสู่คอลัมน์ดูดซึม เครื่องสูบน้ำมีการเดินเครื่องตลอดเวลาในช่วงการดำเนินการเพื่อหมุนเวียน (Circulate) สารละลายไอรอน(III)คีเลทที่ผ่านการใช้งานกลับเข้าสู่คอลัมน์อย่างต่อเนื่อง

### 3.2.3 การออกแบบสภาวะการทดลอง

การศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดกรดอะซิติกในก๊าซเสียจากปล่องควัน โดยการดูดซึมด้วยสารละลายไอรอน(III)คีเลท ในหอดูดซึมแบบเปียก ชนิดแพคคอลัมน์ ขนาดต้นแบบมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของตัวแปรดำเนินการของหอดูดซึมต่อประสิทธิภาพการบำบัดกรดอะซิติก และเพื่อหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการทำนายสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดกรดอะซิติกโดยการดูดซึมด้วยสารละลายไอรอน(III)คีเลท และนำสภาวะที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลองไปใช้สำหรับหอดูดซึมแบบเปียก (Wet scrubber) ขนาดอุตสาหกรรม ของโรงงานอุตสาหกรรมยางแท่งของบริษัท สยามอินโดรับเบอร์ จำกัด จ.พัทลุง

การออกแบบสภาวะการทดลองใช้โปรแกรม Response surface methodology (RSM) ในการออกแบบโดยทำการ

กำหนดตัวแปรที่จะศึกษาซึ่งประกอบด้วย

ตัวแปรอิสระ ประกอบด้วย

- ความเข้มข้นของสารละลายไอรอน(III)คีเลทในช่วง 11.12-39.00 กรัม/ลิตร
- อัตราการไหลของสารละลายไอรอน(III)คีเลทในช่วง 3-8 ลิตร/นาท
- ปริมาณอากาศที่ใช้ในการฟื้นฟูสภาพสารละลายไอรอน(III)คีเลทในช่วง 0.50-2.0 ลิตร/นาท

ตัวแปรตาม คือ ประสิทธิภาพการบำบัดกรดอะซิติก (%RE)

เมื่อทำการกำหนดตัวแปรอิสระ รหัสตัวแปร และช่วงของตัวแปรที่ต้องการศึกษาแล้ว จึงใช้เทคนิค RSM ในการออกแบบสภาวะการทดลองจะได้จำนวนการทดลองทั้งหมด 17 การทดลอง ดังตารางที่ 3-1

ตารางที่ 3-1 แสดงสถานะการทดลองโดยใช้สารละลายไอออน(III)คีเลท เป็นสารดูดซับในการบำบัดกรดอะซิติกในหอดูดซับแบบเปียกชนิดแพคคอลัมน์ขนาดต้นแบบ

ชุดการทดลองที่	ความเข้มข้นของ Fe(III) (กรัม/ลิตร)	อัตราการไหลของเหลว (ลิตร/นาที)	ปริมาณการเติมอากาศ (ลิตร/นาที)
1	16.77	4	0.80
2	16.77	4	1.70
3	25.06	8	1.25
4	11.12	6	1.25
5	25.06	6	2.00
6	39.00	6	1.25
7	25.06	3	1.25
8	25.06	6	1.25
9	16.77	7	0.80
10	33.35	4	1.70
11	33.35	7	0.80
12	33.35	4	0.80
13	25.06	6	1.25
14	25.06	6	0.50
15	16.77	7	1.70
16	33.35	7	1.70
17	25.06	6	1.25

### ขั้นตอนการวิเคราะห์จากการใช้ RSM

1. แสดงผลของตัวแปรอิสระต่างๆที่ได้จากการทดลองในรูปแบบของ Response surface
2. หาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระต่าง ๆ กับตัวแปรตามในรูปแบบของสมการสหสัมพันธ์จากข้อมูลที่ได้จากการทดลองโดยใช้ Multiple regression analysis
3. หาสถานะที่ทำให้ได้ประสิทธิภาพในการบำบัดกรดอะซิติกสูงสุด (%RE) โดยการทำให้ Optimization ซึ่งมีขั้นตอน ดังนี้
  - 3.1. ทำการ Optimization problem เพื่อหาสถานะที่เหมาะสม ซึ่งกำหนดโดยสมการสหสัมพันธ์ที่ได้จากการใช้ RSM

3.2. นำสถานะที่เหมาะสมไปทำการทดลองซ้ำ เพื่อหาค่าความแตกต่างของประสิทธิภาพที่ได้จากสหสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์จากแบบจำลอง และประสิทธิภาพที่วัดจริง พร้อมทั้งนำสถานะที่ดีที่สุดไปประยุกต์ใช้กับหอดูดซึมแบบเปียกขนาดอุตสาหกรรมของโรงงานอุตสาหกรรมต่อไป

### 3.2.4 วิธีการทดลอง

#### 3.2.4.1 ขั้นตอนการเตรียมสารละลายไอออน (III)คีเลท

สารละลายไอออน(III)คีเลทที่อยู่ในรูปของ Fe(III)EDTA ที่มีสัดส่วนเชิงโมลของลิแกนด์ต่อเหล็กเป็น 1.1 : 1 (Ligand to iron mole ratio) (Sealee *et al.*, 2009) มีขั้นตอนการเตรียมดังนี้

1. เจือจางสารละลาย 40%  $FeCl_3$  ด้วยน้ำให้ได้สารละลายที่มีความเข้มข้น 0.35 โมล/ลิตร และมี pH มากกว่า 1 เพื่อป้องกันการตกตะกอนของ  $Fe(OH)_3$  กับ Chelating agent
2. ละลาย EDTA-4Na ในน้ำซึ่งจะได้สารละลายที่มีความเป็นด่างเข้มข้น โดยทำการกวนผสมเป็นเวลาประมาณ 30 นาที เพื่อให้มั่นใจว่า EDTA-4Na เกิดการละลายได้อย่างสมบูรณ์
3. ค่อยๆ เทสารละลาย EDTA ลงในสารละลาย  $FeCl_3$  โดยจะต้องจะต้องไม่เท  $FeCl_3$  ใส่ใน EDTA เนื่องจากจะทำให้  $Fe(OH)_3$  เกิดการตกตะกอนในสารละลายต่างจะได้สารละลายไอออน(III)คีเลทที่อยู่ในรูปของไอออน(III)คีเลท ตามต้องการ ดังภาพประกอบที่ 3-6



ภาพประกอบที่ 3-6 แสดงลักษณะทางกายภาพของสารละลายไอออน(III)คีเลท

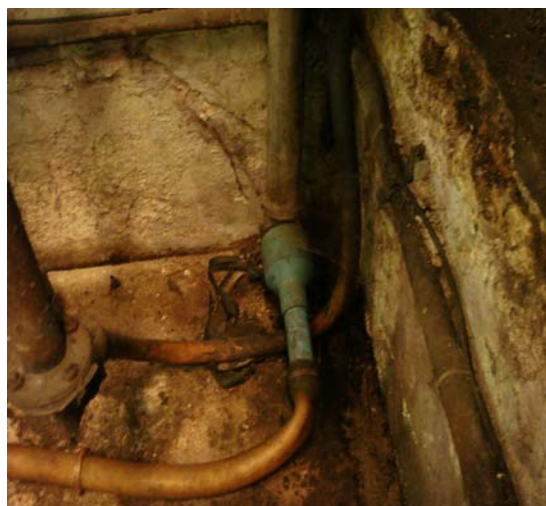
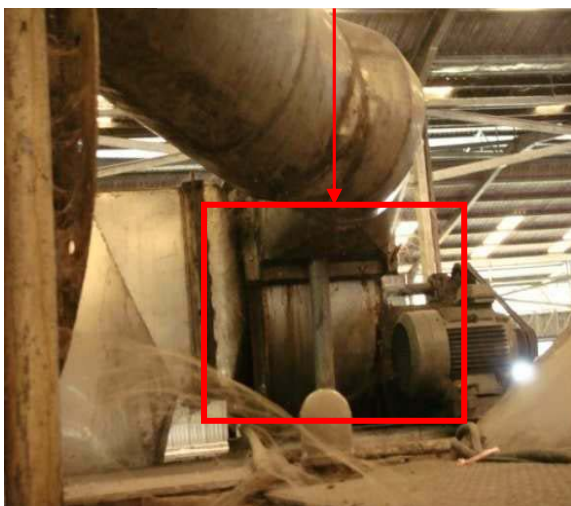
### 3.2.4.2 ขั้นตอนการทดลอง

นำสภาวะการทดลองจากตารางที่ 3-1 มาบำบัดกรดอะซิติกในก๊าซเสียจากปล่องควันของเตาอบในกระบวนการอบยางแท่ง โดยมีวิธีการทดลองในแต่ละการทดลอง ดังนี้

1. เตรียมสารละลายไอรอน(III)คีเลทให้มีความเข้มข้นตามที่ต้องการใช้ในการทดลอง (ความเข้มข้นของสารละลายไอรอน(III)คีเลทที่ศึกษาอยู่ในช่วง 11.12-39.00 กรัม/ลิตร) บรรจุสารละลายปริมาตร 15 ลิตร ลงใน Storage tank ของหอดูดซึมแบบเปียก ชนิด แพคคอล์มน์ ขนาดต้นแบบ เปิดเครื่องสูบสารละลาย (Pump) เพื่อสูบสารละลายไอรอน(III)คีเลทป้อนเข้าสู่คอล์มน์บรรจุทางด้านบนและปรับอัตราการไหลของสารละลายไอรอน(III)คีเลทให้มีอัตราการไหลตามที่ต้องการใช้ในการทดลอง (อัตราการไหลของสารละลายไอรอน(III)คีเลทที่ศึกษาอยู่ในช่วง 3-8 ลิตร/นาที)

2. ปล่องกระแสก๊าซเสียจากเตาอบในกระบวนการอบยางแท่งซึ่งทำการ By part มาจากปล่องควันของเตาอบ (ดังภาพประกอบที่ 3-7) ให้ไหลเข้าสู่คอล์มน์บรรจุทางด้านล่างของคอล์มน์ดังภาพประกอบที่ 3-8

ก๊าซเสียที่ By pass มาใช้ในคอล์มน์



ภาพประกอบที่ 3-7 แสดงท่อส่งก๊าซเสียที่ออกจากกระบวนการอบยางแท่งเพื่อ By part เข้าสู่ระบบบำบัดโดยใช้คอล์มน์บรรจุ





ภาพประกอบที่ 3-8 แสดงหอดูดซึมแบบเป็ยก ชนิดแพคคอลัมน์ ขนาดต้นแบบที่ใช้ในการบำบัด ก๊าซเสียจากปล่องควัน ติดตั้งที่บริษัทสยามอินโด รีบเบอร์ จำกัด อ.ตะโหนด จ.พัทลุง

3. กระแสของก๊าซเสียและสารละลายไอรอน(III)คีเลทจะไหลแบบสวนทางกัน (Counter Current) ในคอลัมน์บรรจุที่มีวัสดุตัวกลาง (Packing) ช่วยเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างก๊าซเสียและสารละลายไอรอน(III)คีเลท ภายในคอลัมน์ทำให้เกิดการสัมผัสระหว่างเฟสก๊าซและเฟสของเหลวทำให้เกิดการดูดซึมและปฏิกิริยาเคมีขึ้นภายในคอลัมน์บรรจุ

4. ทำการเก็บตัวอย่างก๊าซเสียที่ทางเข้า (Inlet) และที่ทางออก (Outlet) ของคอลัมน์บรรจุ โดยใช้ปั๊มเก็บตัวอย่าง (Sampling pump) ที่ต่อเข้ากับอิมฟังก์เจอร์ที่บรรจุด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 0.002 นอร์มัล เพื่อทำการวิเคราะห์ความเข้มข้นของกรดอะซิดิก และทำการเก็บตัวอย่างสารละลายดูดซึมไอรอน(III)คีเลทในถังบรรจุสารละลายดูดซึม (Storage tank) ไปทำการวิเคราะห์หาความเข้มข้นตลอดระยะเวลาการทดลอง

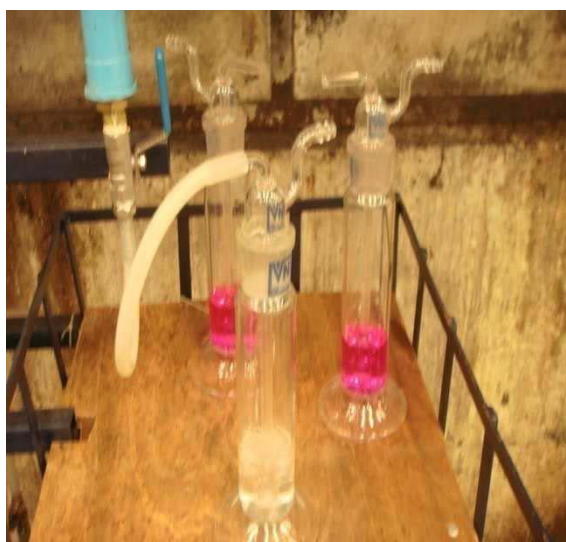
### 3.3 การเก็บตัวอย่างก๊าซเสีย

การเก็บตัวอย่างก๊าซเสียทำได้โดยใช้ชุดเก็บตัวอย่างก๊าซ โดยมีรายละเอียดของวิธีการเก็บตัวอย่างก๊าซเสีย ดังนี้

### 3.3.1 การเก็บตัวอย่างในอิมพิงเจอร์

วิธีเก็บตัวอย่างโดยวิธีนี้เป็นการเก็บตัวอย่างก๊าซเสียที่มีความสะดวกและง่าย คือสามารถทำการวิเคราะห์หาความเข้มข้นของกรดอะซิติคที่วัดได้บริเวณหน้างานได้โดยตรง โดยมีอุปกรณ์ที่ใช้ดังต่อไปนี้

1. อิมพิงค์เจอร์ เป็นขวดแก้วทรงกระบอกที่ประกอบด้วย ท่อก๊าซทางเข้า ท่อก๊าซทางออก และมีหัวกระจายก๊าซ ภายในขวดแก้วบรรจุสารละลาย NaOH 0.002 นอร์มัล ปริมาตร 40 มิลลิลิตร โดยก๊าซเสียจะไหลเข้าสู่ท่อทางเข้าของอิมพิงเจอร์ผ่านหัวกระจายก๊าซซึ่งช่วยให้ก๊าซสามารถดูดซึมลงในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ หลังจากนั้นนำสารละลายที่ได้ไปวิเคราะห์หาความเข้มข้นของกรดอะซิติค ด้วยวิธีการไทเทรตด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.02 นอร์มัล ดังภาพประกอบที่ 3-9



ภาพประกอบที่ 3-9 แสดงการใช้อิมพิงค์เจอร์ในการเก็บตัวอย่างสารเพื่อไปวิเคราะห์หาความเข้มข้นของกรดอะซิติค โดยใช้สารละลายฟีนอล์ฟทาลีนเป็นอินดิเคเตอร์

2. ปัมป์เก็บตัวอย่างก๊าซ (Sampling pump) ใช้เก็บตัวอย่างก๊าซจากท่อก๊าซที่ทางเข้าและที่ทางออกของคอลัมน์ที่บรรจุ เพื่อส่งก๊าซตัวอย่างเข้าสู่อิมพิงค์เจอร์ ในการใช้ปัมป์เก็บตัวอย่างก๊าซเสียจะต้องปรับอัตราการไหลของก๊าซเสียและกำหนดเวลาที่ใช้ในการเก็บตัวอย่างให้เหมาะสมกับค่าความเข้มข้นของกรดอะซิติคในก๊าซ ซึ่งในการทดลองนี้จะทำการเก็บตัวอย่างก๊าซที่อัตราการไหล 2 L/min โดยใช้เวลาในการเก็บตัวอย่างก๊าซเสียเป็นเวลา 4 นาที

3. Gilibrator air flow Calibration ใช้สำหรับการตรวจสอบค่าอัตราการไหลของก๊าซที่ผ่านปั๊มเก็บตัวอย่าง

4. สายยางซิลิโคน

### 3.3.2 การเก็บตัวอย่างก๊าซเสียโดยใช้ Sorbent tube และการเตรียมตัวอย่างเพื่อการวิเคราะห์

#### 1. การเก็บตัวอย่างก๊าซเสียโดยใช้ Sorbent tube

ทำการเก็บตัวอย่างก๊าซเสียที่ทางเข้าและที่ทางออกของคอลัมน์บรรจุ (Packed column) ทุกๆ 2 ชั่วโมงด้วย Sorbent tube โดยหักปลายทั้งสองด้านของ Sorbent tube ออก และต่อปลายด้านทางเข้ากับปั๊มเก็บตัวอย่างอากาศ ตั้งค่าอัตราการไหลของอากาศในการเก็บตัวอย่างเป็น 1 ลิตร/นาที ทำการเก็บตัวอย่างอากาศเป็นเวลา 60 นาที โดยวิธีการเก็บตัวอย่างแสดงดังภาพประกอบ 3-10 จากนั้นปิดปลายทั้งสองของ Sorbent tube ด้วยฝาพลาสติกให้สนิท



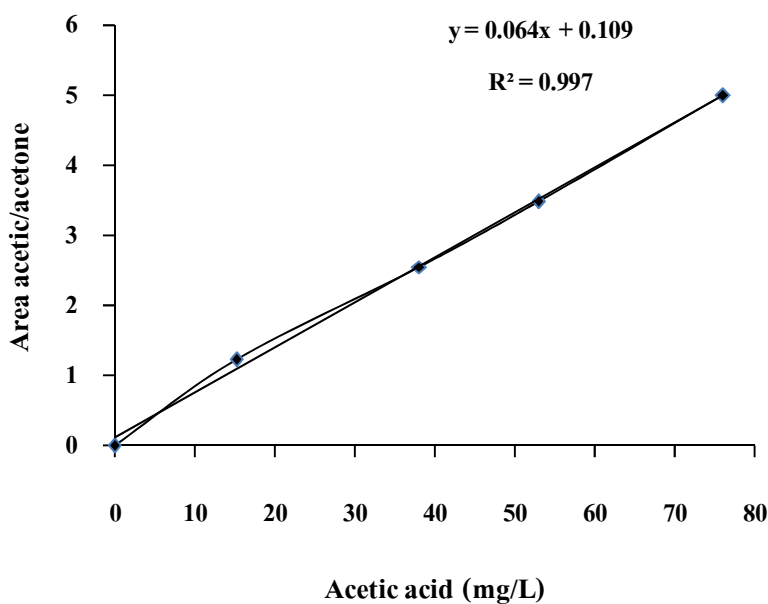
ภาพประกอบ 3-10 แสดงวิธีการเก็บตัวอย่างด้วยปั๊มเก็บอากาศ และ Sorbent tube

#### 2. การเตรียมตัวอย่างเพื่อการวิเคราะห์

2.1 สร้างกราฟมาตรฐาน ของสารละลายมาตรฐานกรดไขมันระเหยง่าย ที่ความเข้มข้นต่างๆ โดยละลายสารละลายมาตรฐานกรดไขมันระเหยง่าย ในตัวทำละลายผสมที่ประกอบด้วย เอทิลอะซิเตท : เอทานอล : น้ำ ในอัตราส่วน 5:1:0.5 โดยปริมาตร ให้มีความเข้มข้นต่างๆ และเติมอะซิโตนเข้มข้น 0.05% โดยปริมาตร 10  $\mu\text{L}$  และเพื่อใช้เป็น Internal standard จากนั้นจึงนำตัวอย่างของสารละลายมาตรฐานไปทำการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง GC โดยมีสภาวะดำเนินการของเครื่อง GC ดังนี้

Inlet Temperature	: 260 °C
Oven Temperature	: 80 °C (1 min), 120 °C (10 °C/min), 240 °C (15 °C/min), 240 °C (2 min)
Detector Temperature	: 260 °C
Column	: HP-FFAP, 25 m, 0.32 mm, 0.5 μm
Carrier Gas Flow	: Helium @ 10.8 psi (42 cm/s), Constant Flow
Split Ratio	: 20/1
Inject Sample	: 1 μl

กราฟมาตรฐานที่ได้จะแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของพื้นที่ใต้กราฟของกรดอะซิติกกับอะซิโตน (Internal standard) ดังภาพประกอบที่ 3-11



ภาพประกอบที่ 3-11 แสดงกราฟมาตรฐานสำหรับวิเคราะห์หาความเข้มข้นของกรดอะซิติกโดยใช้วิธี GC 6890

2.2 การวิเคราะห์ความเข้มข้นของกรดอะซิติกและกรดไขมันระเหยง่ายในตัวอย่างก๊าซที่เก็บโดยใช้ Sorbent tube จะต้องมีขั้นตอนในการสกัดกรดอะซิติกและกรดไขมันระเหยง่ายที่ถูกดูดซับไว้ด้วยถ่านกัมมันต์ โดยนำถ่านกัมมันต์ที่อยู่ในส่วนทางเข้าของ Sorbent tube มาสกัดด้วยตัวทำละลายผสม ที่ประกอบด้วย เอทิลอะซิเตท : เอทานอล : น้ำ ในอัตราส่วน 5:1:0.5 โดยปริมาตรตามลำดับ ทำการสกัดใน Ultrasonic bath ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 30 นาที กรองสารละลายที่สกัด

ได้ด้วย Syringe filter ขนาด 0.45  $\mu\text{m}$  จนได้สารละลายใสจากนั้นจึงเติมอะซิโตนเข้มข้น 0.05% โดยปริมาตร 10  $\mu\text{L}$  เพื่อใช้เป็น Internal standard และนำสารละลายผสมที่ได้ไปวิเคราะห์หาความเข้มข้นของกรดอะซิติกและกรดไขมันระเหยง่าย โดยใช้เครื่อง GC (ปราณี และคณะ, 2554)

### 3.4. การคำนวณประสิทธิภาพการบำบัดกรดอะซิติก (%Removal efficiency)

เมื่อทราบความเข้มข้นของกรดอะซิติกที่ทางเข้าและที่ทางออกของคอลัมน์บรรจุ ก็จะสามารถหาประสิทธิภาพในการบำบัดกรดอะซิติกของคอลัมน์ได้ โดยประสิทธิภาพการบำบัดสามารถคำนวณได้จาก สมการที่ 3-1

$$\text{Acetic acid removal efficiency (\%)} = \frac{C_1 - C_2}{C_1} \times 100 \quad (3-1)$$

เมื่อ  $C_1$  = ความเข้มข้นของกรดอะซิติกในกระแสก๊าซที่เข้า หน่วย (มิลลิกรัม/ลิตร)

$C_2$  = ความเข้มข้นของกรดอะซิติกในกระแสก๊าซที่ออก หน่วย (มิลลิกรัม/ลิตร)

### 3.5 วิธีการวิเคราะห์สารละลายไอออน(III)คิเลท

#### 3.5.1 การเก็บตัวอย่าง

เก็บตัวอย่างสารละลายไอออน(III)คิเลท 50 มิลลิลิตร เพื่อนำไปวิเคราะห์หาความเข้มข้นของเหล็กเฟอรัส ( $\text{Fe}^{2+}$ ) ที่เวลาต่างๆ โดยเก็บตัวอย่างสารละลายจากถังบรรจุสารละลายของหอคูดซึ่มใส่ขวดที่มีฝาปิด แล้วทำการหยุดปฏิกิริยาของสาร โดยการเติมกรด HCl เข้มข้น 2 มิลลิลิตร เก็บขวดตัวอย่างในกล่องโฟมที่มีฝาปิด และเก็บตัวอย่างทันทีอีก 50 มิลลิลิตร เพื่อนำไปวิเคราะห์หาความเข้มข้นของเหล็กรวม (Total Fe) ที่เวลาต่างๆ โดยเก็บตัวอย่างสารละลายใส่ขวดที่มีฝาปิดและเติมกรดไนตริกเข้มข้น 0.5 มิลลิลิตร ต่อสัดส่วนสารละลายไอออน(III)คิเลท 50 มิลลิลิตร เพื่อหยุดปฏิกิริยา (APHA, 1985) ลักษณะการเก็บตัวอย่างสารละลายไอออน(III)คิเลทเพื่อวิเคราะห์หาความเข้มข้นของเหล็กเฟอรัส ( $\text{Fe}^{2+}$ ) และความเข้มข้นของเหล็กรวม (Total Fe) แสดงดังภาพประกอบที่ 3-12 ตัวอย่างที่ได้จะถูกนำไปวิเคราะห์โดยใช้ Atomic absorption spectroscopy

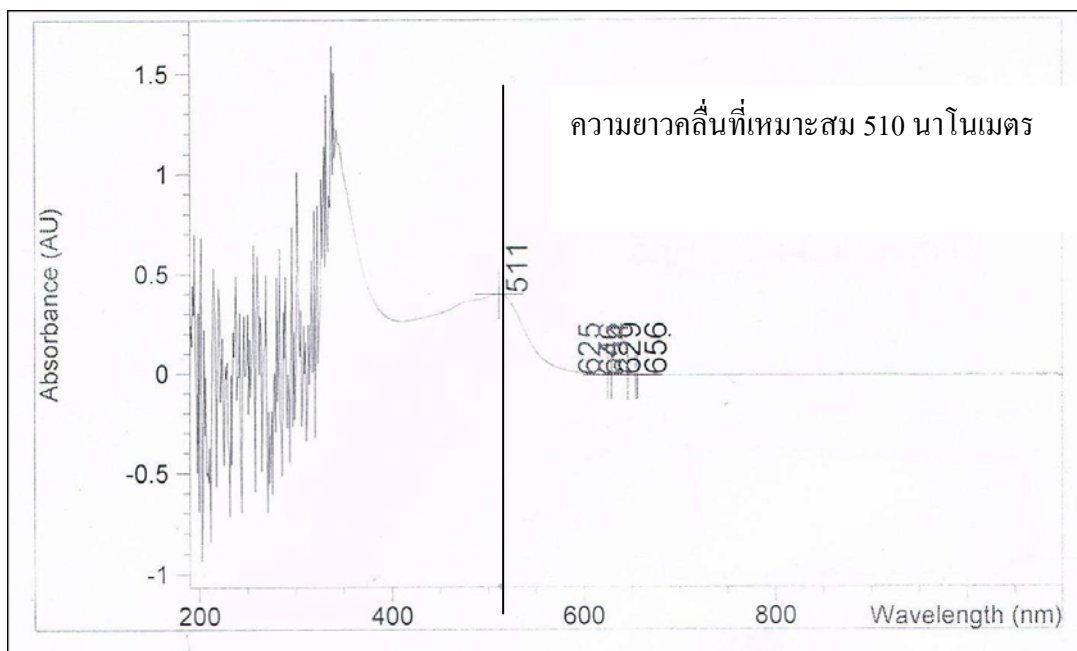


ภาพประกอบที่ 3-12 แสดงการเก็บตัวอย่างสารดูดซึมจากการทำปฏิกิริยามาทำการวิเคราะห์ความเข้มข้นที่เวลาต่างๆ

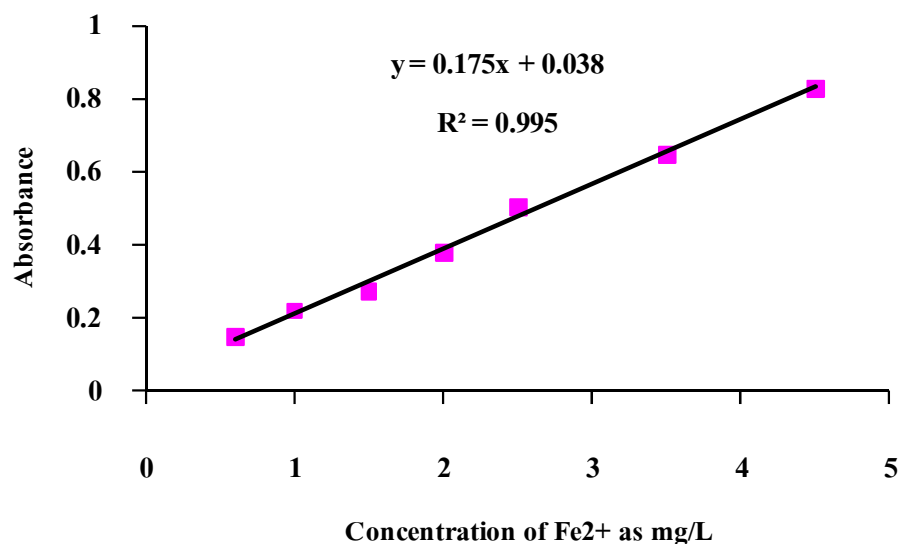
### 3.5.2 การวิเคราะห์ตัวอย่างเพื่อหาความเข้มข้นของ Fe ในสารละลายดูดซึม

วิเคราะห์ความเข้มข้นของ สารละลายไอออน(II)คีเลท ในตัวอย่างของสารละลายดูดซึมที่เวลาต่างๆ โดยดึงตัวอย่างของสารละลายดูดซึมจากตัวอย่างของสารละลายดูดซึมที่เวลาต่างๆ ปริมาตร 100  $\mu\text{L}$  โดยใช้ไมโครปิเปต บรรจุตัวอย่างลงขวดวัดปริมาตรขนาด 50 mL ซึ่งบรรจุด้วยสารละลายแอมโมเนียมอะซีเตดบัฟเฟอร์ 10 mL และสารละลายฟีนแอนโทโรลีน (Phenanthroline) 20 mL แล้วเจือจางด้วยน้ำปราศจากไอออนจนได้ปริมาตรเท่ากับ 50 mL หลังจากนั้นเขย่าแล้ววางทิ้งไว้ 5 นาทีจนเกิดสีส้ม จากนั้นนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสง (Absorbance) ที่ความยาวคลื่น 510 นาโนเมตร (nm) ด้วย UV-VIS spectrophotometer โดยวิธีการของฟีนแอนโทโรลีน (APHA, 1985) เพื่อหาความเข้มข้นของสารละลายไอออน(II)คีเลท จากกราฟมาตรฐานดังภาพประกอบที่ 3-14 และทำการเก็บตัวอย่างของสารดูดซึม 50  $\mu\text{L}$  เพื่อหาความเข้มข้นของเหล็กรวม (Total Fe) โดยทำการเติม 2% กรดไนตริก และปรับปริมาตรเป็น 50 mL ด้วยน้ำกลั่น (DI) จากนั้นนำไปวัดค่าเหล็กรวม (Total Fe) โดยใช้ AAS และกราฟมาตรฐานสำหรับการวิเคราะห์เหล็กรวม (Total Fe) ดังภาพประกอบที่ 3-15 จากนั้นจึงคำนวณความเข้มข้นของไอออน(III)คีเลทที่เวลาต่างๆ จากความเข้มข้นของเหล็กรวมและความเข้มข้นของไอออน(II)คีเลท ดังสมการที่ 3-2

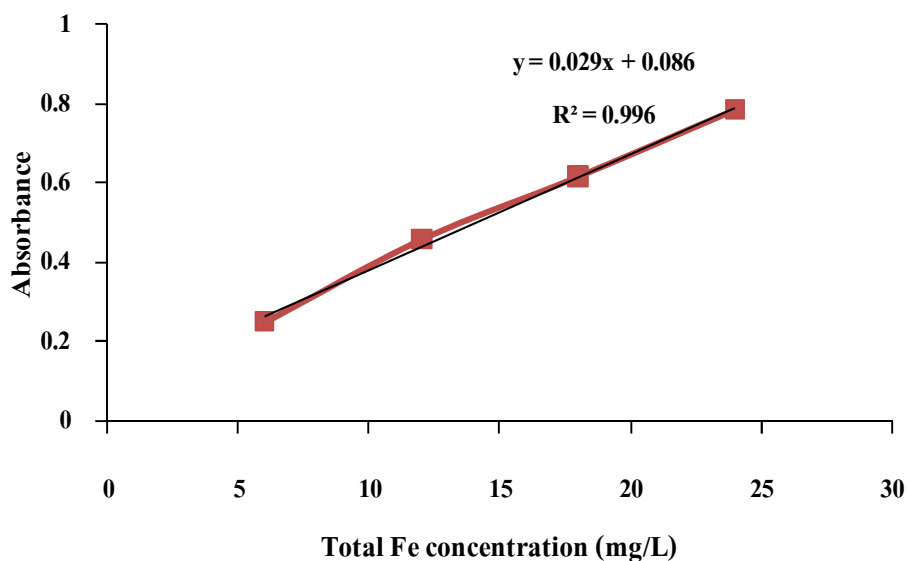
$$\text{Fe (III)EDTA} = \text{Total Fe} - \text{Fe(II)EDTA} \quad (3 - 2)$$



ภาพประกอบที่ 3-13 กราฟแสดงการ Scan หาช่วงความยาวคลื่นที่เหมาะสมสำหรับการวิเคราะห์เหล็กเฟอรัส Fe(II) โดยใช้อุปกรณ์ UV-VIS spectrophotometer



ภาพประกอบที่ 3-14 กราฟมาตรฐานสำหรับการวิเคราะห์เหล็กเฟอรัส Fe(II) โดยใช้อุปกรณ์ UV-VIS spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 510 นาโนเมตร



ภาพประกอบที่ 3-15 แสดงกราฟมาตรฐานสำหรับการวิเคราะห์เหล็กกรรม (Total Fe) โดยใช้ อุปกรณ์ AAS

### 3.6 ศึกษาการประยุกต์ใช้สารละลายไอออน(III)คีเลทในการบำบัดกลิ่นจากอุตสาหกรรมยางแท่งใน หอดูดซึมแบบเปียก (Wet scrubber) ขนาดอุตสาหกรรม ของโรงงาน

ศึกษาการประยุกต์ใช้สารละลายไอออน(III)คีเลทในหอดูดซึมแบบเปียก (Wet scrubber) ขนาดอุตสาหกรรม ที่ใช้ในโรงงานอุตสาหกรรมยางแท่ง STR 20 เพื่อการควบคุมปัญหา มลพิษทางอากาศที่เกิดจากกระบวนการอบยางแท่งที่บริษัทสยามอินโดรับเบอร์ จำกัด หอดูดซึม แบบเปียก (Wet scrubber) ขนาดอุตสาหกรรม ของโรงงานที่ใช้ทำการทดลองแสดงดังภาพประกอบ ที่ 3-16 และภาพไดอะแกรมแสดงการไหลของก๊าซและของสารดูดซึมในหอดูดซึมดังกล่าวแสดงดัง ภาพประกอบที่ 3-17 โดยมีขั้นตอนการดำเนินการทดลองดังนี้

1. ทำการเตรียมสารละลายไอออน(III)คีเลทที่ความเข้มข้น 11.12 กรัม/ลิตร บรรจุ ลงในถังบรรจุสารละลายขนาด 250 ลิตร และทำการป้อนสารดูดซึมไอออน(III)คีเลทให้ไหลเข้า ทางด้านบนของหอดูดซึมขนาดอุตสาหกรรมผ่านอุปกรณ์การกระจายของเหลว (Liquid distributor) ด้วยอัตราการไหลของสารดูดซึม 33 ลิตร/นาที่ และอัตราการไหลของก๊าซเสีย 6,390 ลูกบาศก์เมตร/ นาที่ ดังนั้นจึงมีอัตราการไหลของสารดูดซึมต่ออัตราการไหลของก๊าซ 0.005 ลิตร/ลูกบาศก์เมตร

2. ก๊าซเสียที่ออกจากปล่องควันของกระบวนการอบยางแท่งจะไหลเข้าหอดูดซึม แบบเปียกขนาดอุตสาหกรรมในแนวนอน ก๊าซเสียและสารละลายไอออน(III)คีเลทจะไหลผ่านวัสดุ บรรจุ (Packing media) ชนิด Pall rings ภายในหอดูดซึม และเกิดการสัมผัสกันระหว่างเฟสก๊าซและ เฟสของเหลว เกิดการดูดซึมและทำปฏิกิริยาเคมีระหว่างสารดูดซึมกับกรดอะซิติกซึ่งเป็น



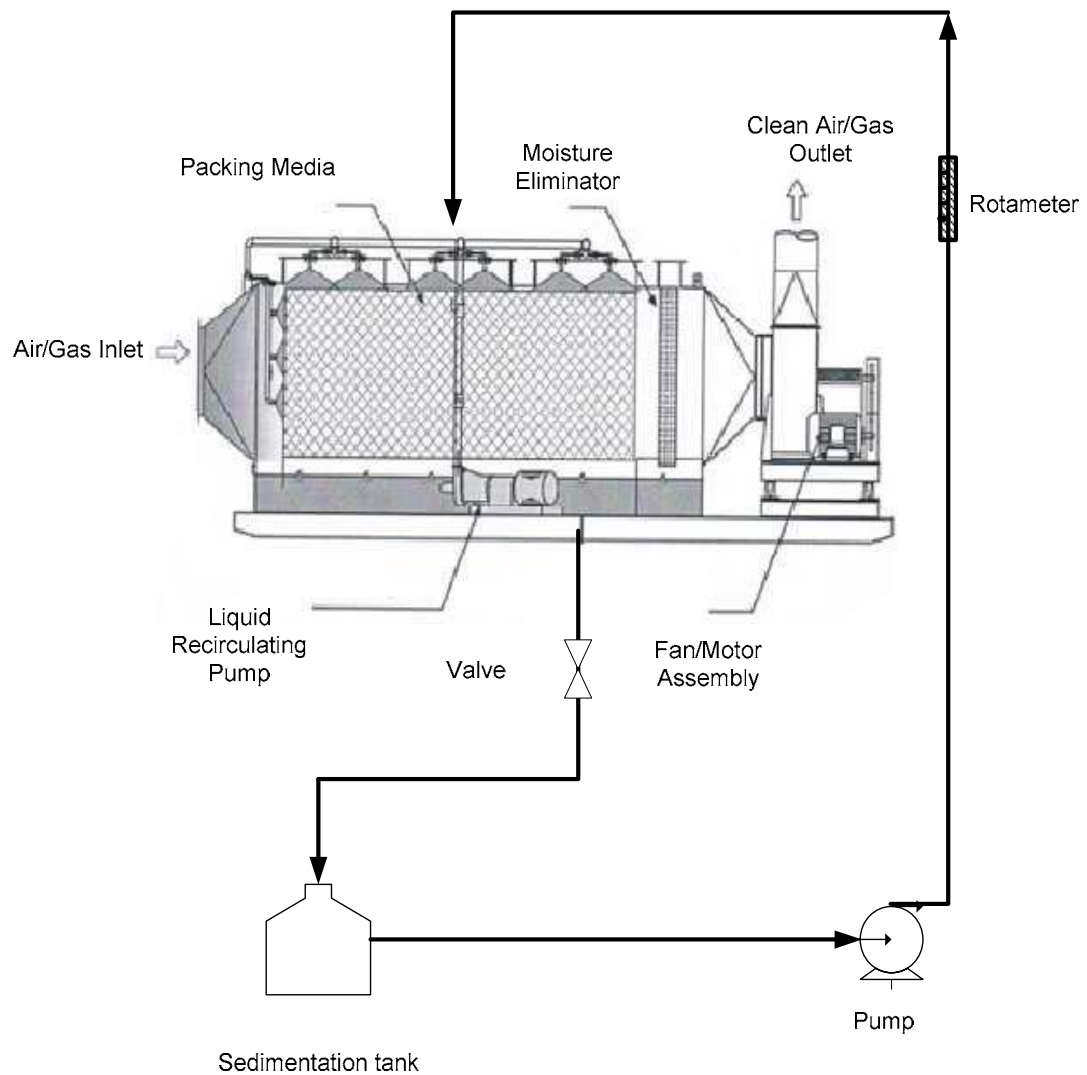
องค์ประกอบที่ก่อให้เกิดกลิ่นในก๊าซเสีย โดยก๊าซเสียที่ผ่านการบำบัดจะถูกปล่อยออกสู่บรรยากาศทางปล่องควัน ทำการเก็บตัวอย่างก๊าซเสียมาวิเคราะห์หาองค์ประกอบของกรดอะซิติกโดยใช้ Sorbent tube ชนิด SRK พร้อมกันนั้นทำการเก็บสารละลายไอรอน(III)คีเลทที่ไหลผ่านหอดูดซึมก่อนจะลงสู่ถังบรรจุสารละลาย Sedimentation tank ไปทำการวิเคราะห์หาความเข้มข้นของสารละลายไอรอน(III)คีเลทโดยวิธีการของพีแนน โทรลีน (APHA, 1985) ที่เหลืออยู่ในถังที่เวลาต่างๆจนถึงสุดการทดลอง และทำการหมุนเวียนสารละลายไอรอน(III)คีเลทเพื่อนำกลับไปใช้ใหม่

3. ทำการวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายในการบำบัดกรดอะซิติกเมื่อใช้สารละลายไอรอน(III)คีเลทเป็นสารดูดซึม เทียบกับการใช้สารดูดซึมชนิดอื่น

4. สืบหาความคิดเห็นของพนักงาน บริษัท สยามอินโดรรับเบอร์ จำกัด ถึงระดับความรุนแรงของกลิ่นในโรงงานเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการบำบัดกลิ่นของหอดูดซึมแบบเปียกของโรงงานกับกรณีที่ไม่ได้ใช้สารละลายไอรอน(III)คีเลท เป็นสารดูดซึมของระบบ



ภาพประกอบที่ 3-16 แสดงหอดูดซึมแนวนอนขนาดอุตสาหกรรมที่ใช้จริงในการบำบัดกรดอะซิติกจากปล่องควันจากกระบวนการอบยางแท่งของ บริษัท สยามอินโดรรับเบอร์ จำกัด จ.พัทลุง



ภาพประกอบที่ 3-17 แสดงไดอะแกรมแสดงการไหลของก๊าซและของสารดูดซึ่มในหอดูดซึ่ม  
 แนวนอนขนาดอุตสาหกรรมที่ใช้ในการบำบัดกรดอะซิติคที่ปล่อยจากเตาอบยาง บริษัท สยามอิน

โคร์บเบอร์ จำกัด จ.พัทลุง

ที่มา : ตัดแปลงจากงานวิจัยของธีรภัทร์ และคณะ, 2553

## บทที่ 4

### ผลการทดลองและวิจารณ์

#### 4.1 การศึกษาการเกิดปฏิกิริยาระหว่างสารละลายไอออน(III)คีเลทกับกรดอะซิติก

##### 4.1.1 ผลจากการวัดค่าความยาวคลื่นของแสงโดยใช้ UV-VIS spectroscopy

จากผลการทดลองเบื้องต้นพบว่าสารละลายไอออน(III)คีเลทเป็นสารอนินทรีย์ Unsaturated functional group ซึ่งสามารถดูดกลืนแสงในช่วงยูวี-วิสิเบิลได้ สามารถแสดงลักษณะ และสมบัติเฉพาะที่เรียกว่าโครโมฟอร์ (Chromophore) (แม้น และคณะ, 2552) จากผลการทดลอง วัดค่า  $\lambda_{max}$  หรือค่าความยาวคลื่นที่สารมีการดูดกลืนรังสีสูงสุดก่อนทำปฏิกิริยาของสารละลายไอออน(III)คีเลทพบว่า  $\lambda_{max}$  มีค่าเป็น 251 nm และเมื่อนำสารละลายไอออน(III)คีเลทมาทำปฏิกิริยากับกรดอะซิติกพบว่าค่า  $\lambda_{max}$  เปลี่ยน 257 nm ซึ่งเป็นสมมติฐานเบื้องต้นว่า สารดังกล่าวมีแนวโน้มที่เปลี่ยนแปลงไปซึ่งเป็นผลมาจากโครโมฟอร์อย่างง่ายเกิด Conjugated กันเอง หรือกับโครโมฟอร์ชนิดอื่น จะส่งผลให้เกิด Absorption band ขึ้นใหม่ และทำให้ Absorption spectra เปลี่ยนไปทางความยาวคลื่นที่เพิ่มขึ้น ซึ่งแสดงถึงผลของกรุปบางชนิดเข้าไปแทนที่ไฮโดรเจน เรียกว่า ออกโซโครม (Auxochrome) โดยส่งผลให้ค่าความยาวคลื่นที่ดูดกลืนได้เพิ่มขึ้น (แม้น และคณะ, 2552) และผลของออกโซโครมที่เกิดขึ้นจากการทดลองเป็นชนิด การเปลี่ยนแปลงแบบ Bathochromic shift หรือ Red shift ซึ่งจะทำให้ Absorption spectra ของสารเปลี่ยนแปลงไปในทางความยาวคลื่นที่เพิ่มขึ้น ( $\lambda_{max}$  เพิ่ม) และเกิดเป็น Hyper chromic effect ทำให้เกิดการเพิ่ม Intensity หรือการดูดกลืนแสงมากขึ้น ( $\epsilon_{max}$  เพิ่ม) และนอกจากนี้ออกโซโครมที่มีผลกระทบต่อโครโมฟอร์จะขึ้นอยู่กับสภาพขั้วของสารนั้นๆ (Polarity) ของออกโซโครม เช่น กรุปเมทิล (-CH<sub>3</sub>) เอทิล (-C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>) และฮาโลเจน (-x) มีผลที่ทำให้เกิด Red shift ได้ (แม้น และคณะ, 2552)

##### 4.1.2 ผลจากการวิเคราะห์ CHNO-S analyzer

การวิเคราะห์โดยใช้ CHNO-S analyzer เป็นการตรวจสอบ % Weight ของ Carbon (C), Hydrogen (H), Nitrogen (N) และ Sulfur (S) ที่เปลี่ยนแปลงไปอันเนื่องจากการทำปฏิกิริยาโดยมีผลการวิเคราะห์สารก่อนและหลังทำปฏิกิริยา แสดงดังตารางที่ 4-1

ตารางที่ 4-1 แสดงองค์ประกอบของธาตุต่างๆที่ได้จากการวิเคราะห์ในสารละลายก่อนและหลังทำปฏิกิริยา

ธาตุ	สัญลักษณ์	น้ำหนักโมเลกุล	% โดยน้ำหนัก	
			ก่อนทำปฏิกิริยา	หลังทำปฏิกิริยา
Carbon	C	12.01	32.72	1.71
Hydrogen	H	1.01	3.30	6.59
Iron	Fe	55.84	15.21	40.18
Nitrogen	N	14.01	7.63	0.31
Oxygen	O	16.00	34.87	51.21
Sulfur	S	32.07	0	0

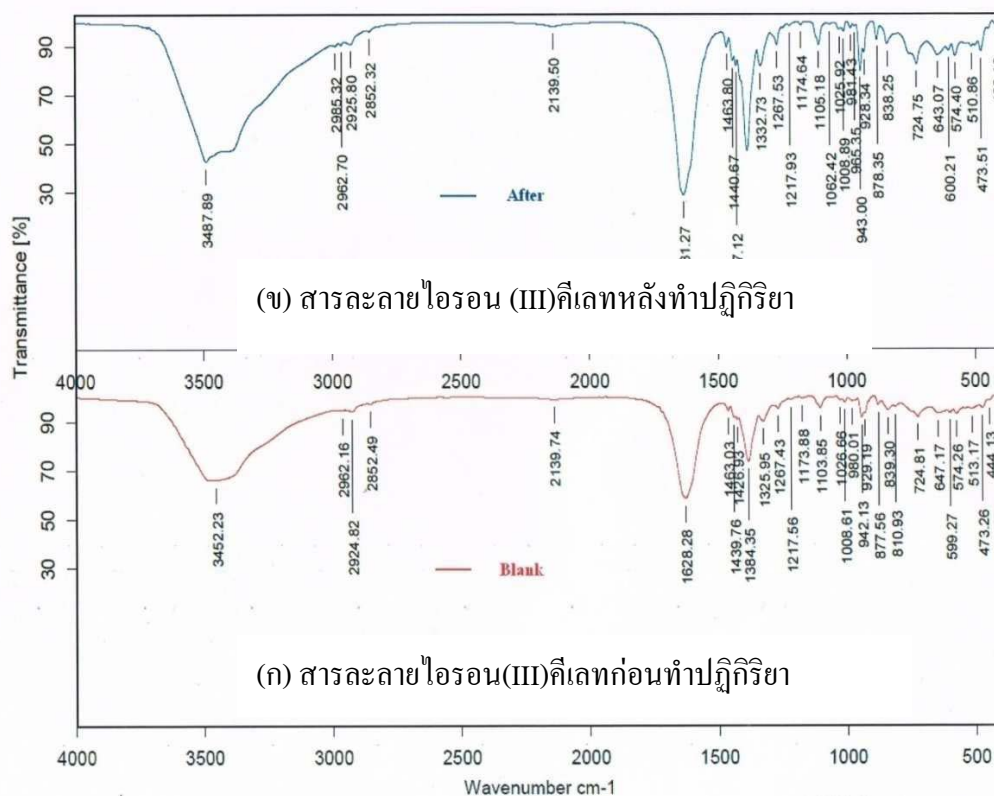
จากตารางที่ 4-1 แสดงการเปลี่ยนแปลงเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของธาตุต่างๆ ก่อนและหลังทำปฏิกิริยาพบว่าทุกธาตุมีแนวโน้มที่ลดลง แต่ปริมาณของธาตุไฮโดรเจนและออกซิเจนที่เพิ่มขึ้นซึ่งเป็นผลของการดึงอิเล็กตรอนมาจากหมู่ออกซิโครมที่มาจากกรุปเมทิล ( $-CH_3$ ) และหมู่คาร์บอกซิล ( $-COOH$ ) จากกรดอะซิติกจึงส่งผลให้แนวโน้มปริมาณธาตุออกซิเจนและไฮโดรเจนเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน และนอกจากนี้กรดคาร์บอกซิลิกสามารถละลายได้เนื่องจากโมเลกุลมีสภาพขั้วสูง โดยมีหมู่ฟังก์ชันที่มีขั้วมีถึง 2 หมู่ คือ หมู่ไฮดรอกซิลและหมู่คาร์บอกซิล แต่สภาพละลายได้ของกรดคาร์บอกซิลิกจะลดลงเมื่อจำนวนอะตอมคาร์บอนเพิ่มขึ้น ดังนั้นในการศึกษานี้การที่สารหลังทำปฏิกิริยามีจำนวนคาร์บอนลดลงแสดงว่าสารละลายไอออน(III)ก็เลทสามารถละลายสภาพขั้วของกรดอะซิติกได้ดีทำให้ปริมาณของคาร์บอนลดลงอย่างชัดเจน การเปลี่ยนแปลงของปริมาณธาตุก่อนและหลังการเกิดปฏิกิริยาเป็นการยืนยันว่ามีปฏิกิริยาเกิดขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับการวิเคราะห์ด้วย UV-VIS spectroscopy

#### 4.1.3 ผลจากการวิเคราะห์โดยใช้เทคนิคอินฟราเรดสเปกตรัม (Infrared spectral analysis) ด้วยเครื่อง FT-IR สเปกโตรมิเตอร์

อินฟราเรดสเปกโตรสโคปีเป็นเทคนิคที่นำแสงอินฟราเรดมาประยุกต์ใช้ในการตรวจเอกลักษณ์ หาสูตรโครงสร้างหรือหาปริมาณของสาร โดยโมเลกุลของสารแต่ละชนิดจะดูดกลืนแสงอินฟราเรดในช่วงความถี่ที่มีค่าเฉพาะแตกต่างกันแล้วทำให้เกิดการเคลื่อนไหวของพันธะ ปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นจะถูกบันทึกเป็นสเปกตรัมซึ่งแสดงลักษณะเฉพาะตัวของสารแต่ละ

ชนิด การดูดกลืนแสงอินฟราเรดของสารมีลักษณะเช่นเดียวกับการดูดกลืนแสงชนิดอื่นๆ นั่นคือ โมเลกุลหนึ่งๆ จะดูดกลืนแสงที่มีพลังงานพอดีที่ทำให้เกิดการกระตุ้นหนึ่งๆ เท่านั้น แต่แสงอินฟราเรดมีพลังงานต่ำ เมื่อโมเลกุลดูดกลืนแสงจึงทำให้เกิดเพียงการเคลื่อนไหวของพันธะ โดยพันธะแต่ละชนิดจะดูดกลืนแสงที่มีความถี่เฉพาะแตกต่างกันไป การดูดกลืนขนาดพลังงานที่เฉพาะนี้ เราเรียกว่าเป็น Quantized energy ผลของการดูดกลืนพลังงานที่เฉพาะนี้ ทำให้เราทราบได้ว่าเป็นการดูดกลืนแสงที่เกิดจากพันธะชนิดใด อย่างไรก็ตาม หากการเคลื่อนไหวของพันธะเป็นการเคลื่อนไหวในลักษณะที่ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลง Dipole moment แล้ว เราจะตรวจไม่พบการดูดกลืนแสงของพันธะนั้น ๆ ยิ่งการเคลื่อนไหวของพันธะที่ก่อให้เกิด Dipole moment มากเท่าใดสัญญาณที่ตรวจได้จะยิ่งสูงขึ้นเท่านั้น (แม้น และคณะ, 2552)

ค่าอินฟราเรดสเปกตรัมเป็นสเปกตรัมที่พล็อตระหว่างเลขคลื่น (Wavenumber) มีหน่วยเป็นต่อเซนติเมตร ( $\text{cm}^{-1}$ ) กับค่าการดูดกลืนคลื่นอินฟราเรด หรือค่า Transmittance (%T) ซึ่งในการวิเคราะห์อินฟราเรดสเปกตรัมของสารตัวอย่าง การตรวจหาแถบของการสั่นหรือฟิสิกของหมู่ฟังก์ชันหลักในโครงสร้างของสารประกอบที่อาจปรากฏในสเปกตรัมเป็นสิ่งสำคัญที่สุด เช่นหมู่ฟังก์ชัน จะทำให้ทราบถึงข้อมูลหลักเกี่ยวกับโครงสร้างได้ (แม้น และคณะ, 2552) อินฟราเรดสเปกตรัมของสารละลายไอออน(III)คือเลขก่อนทำปฏิกิริยา และสารละลายไอออน(III)คือเลขหลังทำปฏิกิริยาแสดงดังภาพประกอบที่ 4-1



ภาพประกอบที่ 4-1 แสดงสัญญาณอินฟราเรดสเปกตรัม (IR bands) ของ (ก) สารละลายไอออน(III)คลอไรด์ก่อนทำปฏิกิริยา และ (ข) สารละลายไอออน(III)คลอไรด์หลังทำปฏิกิริยาตามลำดับ

ผลจากการวิเคราะห์ที่สามารถแปลผลของการทดลองจากการเปรียบเทียบโดยใช้ภาพประกอบที่ 4-1 (ก) และ (ข) ตามวิธีการพิจารณาของ แม้น และคณะ, 2552 ได้ดังนี้

ที่ตำแหน่ง  $2,985 \text{ cm}^{-1}$  จะพบเฉพาะในสารหลังจากทำปฏิกิริยา ซึ่งในตำแหน่งนี้จะเป็นตำแหน่งความยาวคลื่นในช่วง  $3,000\text{--}2,800$  ซึ่งแสดงช่วงเลขคลื่นของแถบการสั่นของหมู่ฟังก์ชันของพวก Aliphatic groups เช่น  $-\text{CH}$ ,  $-\text{CH}_2$ ,  $-\text{CH}_3$  ซึ่งเป็นไปในแนวทางเดียวกันกับการวิเคราะห์ด้วย UV-Visible spectrophotometer

จากการตรวจหาหมู่คาร์บอนิล ( $\text{C}=\text{O}$ ) ซึ่งฟังก์ชันของหมู่คาร์บอนิล จะปรากฏในช่วง  $1,820\text{--}1,600 \text{ cm}^{-1}$  และจะมีการดูดกลืนแสงมากที่สุด และจากภาพประกอบที่ 4-1 ก่อนและหลังทำปฏิกิริยาสามารถตรวจพบสัญญาณที่ตำแหน่งสัญญาณสเปกตรัมที่ตำแหน่ง  $1,630 \text{ cm}^{-1}$  เมื่อมีหมู่คาร์บอนิลสามารถตรวจหาหมู่ฟังก์ชัน  $-\text{OH}$  หรือฟีนอล จะพบว่าหลังจากทำปฏิกิริยาจะปรากฏฟังก์ชันที่กว้างมากใกล้  $3,400\text{--}2,400 \text{ cm}^{-1}$  ซึ่งฟังก์ชันจะทับซ้อนกับฟังก์ชันของ  $-\text{CH}$

จากการตรวจหาหมู่แอมไนด์ โดยการตรวจดูหมู่ (-NH) พบว่าสารทั้งก่อนทำปฏิกิริยาและหลังทำปฏิกิริยาจะปรากฏพีกที่มีความสูงขนาดใกล้เคียง 3,400  $\text{cm}^{-1}$  แต่หลังจากการทำปฏิกิริยาจะพบว่าพีกที่ปรากฏจะมีความถี่เพิ่มขึ้น

จากการตรวจสอบหมู่ของเอสเทอร์ (C-O) จะพบทั้งในสารก่อนทำปฏิกิริยาและหลังทำปฏิกิริยาที่ปรากฏพีกที่มีการดูดกลืนแสงในช่วง 1,300-1,000  $\text{cm}^{-1}$

จากการพิจารณาพีกที่ตำแหน่งที่มีความยาวคลื่นในช่วง 1,100-800  $\text{cm}^{-1}$  จะเป็นตำแหน่งของหมู่ฟังก์ชัน Phosphorus compound (P-O) และ Organosilicon (Si-O) และพบว่าที่ตำแหน่งความยาวคลื่นก่อนทำปฏิกิริยาที่ 810.93  $\text{cm}^{-1}$  หายไป แสดงว่าหลังจากทำปฏิกิริยาตำแหน่งนี้หรือหมู่ฟังก์ชันนี้จะหายไป

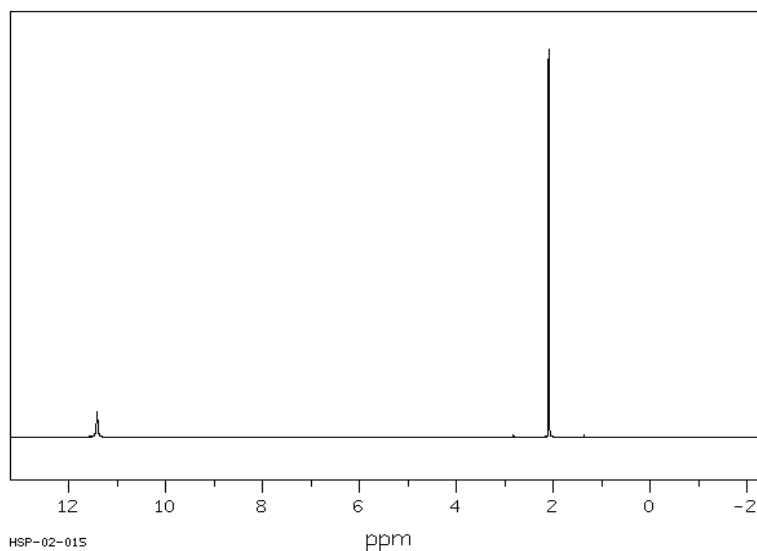
พิจารณาพีกที่ตำแหน่งความยาวคลื่นในช่วง 800-400  $\text{cm}^{-1}$  จะเป็นตำแหน่งของหมู่ฟังก์ชัน Halogen compounds (C-halogen) และ Aromatic compounds (Aromatic rings) จะพบว่าสารก่อนทำปฏิกิริยาจะพบหมู่ฟังก์ชันเหล่านี้ที่ตำแหน่งความยาวคลื่น 444.13  $\text{cm}^{-1}$  แต่เมื่อพิจารณาสารหลังทำปฏิกิริยาพบว่าหมู่ฟังก์ชันที่ปรากฏก่อนหน้าหายไป

นอกจากนี้จะสามารถตรวจสอบพบความแตกต่างที่บ่งชี้ได้อีกชนิดหนึ่งคือ ที่ตำแหน่ง Finger print region ซึ่งที่ความยาวคลื่นต่ำกว่า 1500  $\text{cm}^{-1}$  ซึ่งเป็นส่วนที่สำคัญที่ใช้ในการพิจารณาถึงเอกลักษณ์เฉพาะตัวของสาร (Identity) ที่แตกต่างกัน ซึ่งจะเป็นลักษณะเฉพาะตัวของสาร จากภาพประกอบที่ 4-1 (ก) และ (ข) จะมีความคล้ายคลึงกันมากแต่เมื่อดูส่วน Finger print region จะมีส่วนที่แตกต่างกัน และสามารถบอกได้ว่าสารทั้งสองมีลักษณะโครงสร้างของโมเลกุลของสารที่แตกต่างกัน เพราะมีหมู่ของฟังก์ชันของสารที่ปรากฏแตกต่างกันออกไป

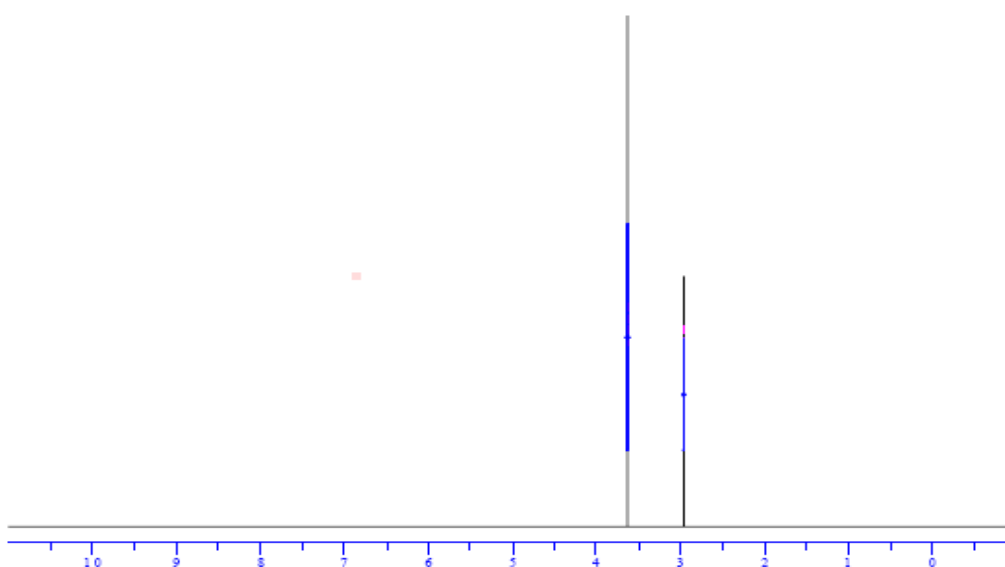
#### 4.1.4 ผลจากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคนิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์สเปกโทรสโกปี (Nuclear magnetic resonance spectroscopy, NMR)

NMR เป็นเทคนิคที่ศึกษาเกี่ยวกับนิวเคลียสและสภาวะข้างเคียงรอบนิวเคลียส โดยใช้นิวคลีโอของธาตุ (Nuclei) เนื่องจากนิวคลีโอของธาตุบางชนิดมีสมบัติเป็นแม่เหล็กและมีประจุซึ่งประพฤติตัวเหมือนกับมันหมุนอยู่ตลอดเวลา ซึ่งในการวิเคราะห์นี้จะศึกษานิวคลีโอของ  $^1\text{H}$  โดยนิวคลีโอที่อยู่ในสนามแม่เหล็กเกิดแตรอนชิชันจากพลังงานต่ำไปพลังงานสูงเมื่อเมื่อผ่านความถี่คลื่นวิทยุที่เหมาะสม (แม่เหล็ก และคณะ, 2552) ตัวแปรที่สำคัญให้ข้อมูลเด่นชัดและตรงไปตรงมาที่สุด นั่นคือตัวแปรในรูปของ Chemical shift เป็นหน่วย Hz หรือ ppm จะเปลี่ยนแปลงไปตามขนาดของสนามแม่เหล็ก ที่เปลี่ยนแปลงไปจากเดิม ลักษณะของ Proton magnetic resonance spectrum ของ

กรดอะซิติกและของสารละลายไอออน(III)ที่เลขก่อนทำปฏิกิริยาแสดงดังภาพประกอบที่ 4-2 และ 4-3 ตามลำดับ



ภาพประกอบที่ 4-2 แสดงลักษณะ Proton magnetic resonance spectrum ของกรดอะซิติกก่อนทำปฏิกิริยา



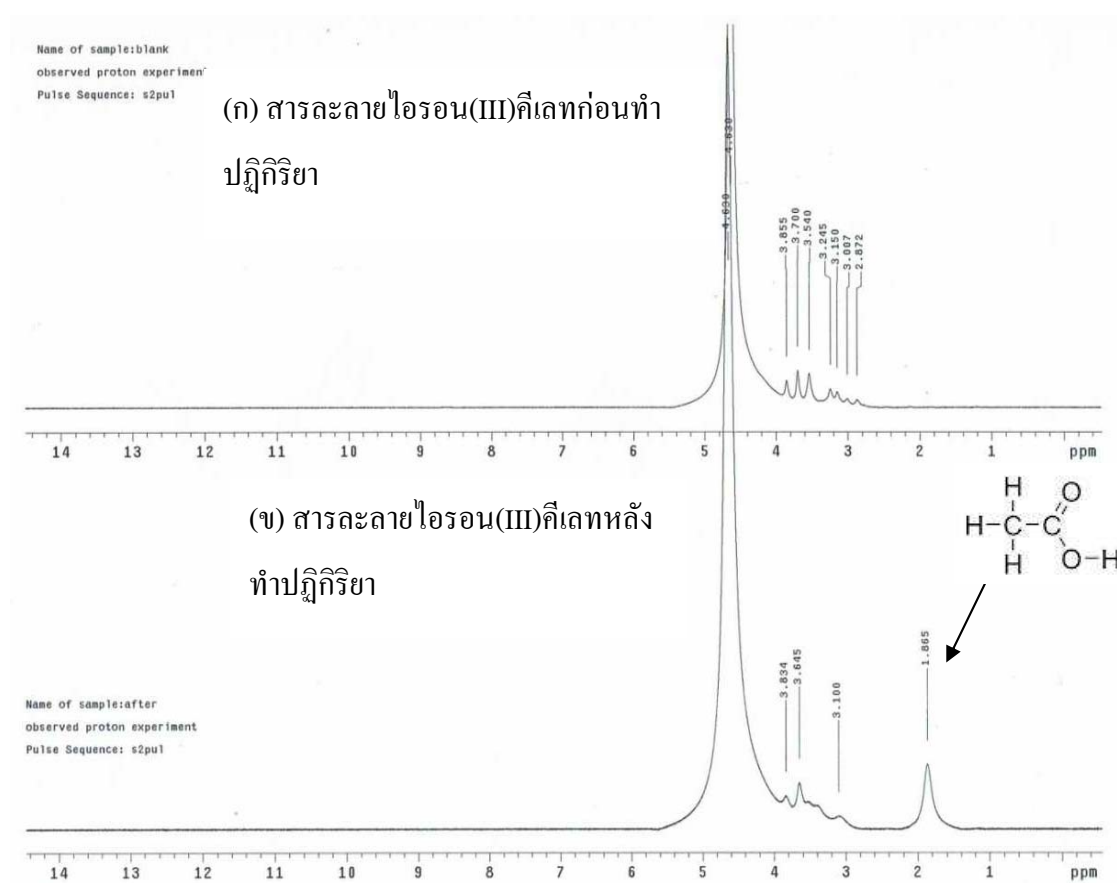
ภาพประกอบที่ 4-3 แสดงลักษณะ Proton magnetic resonance spectrum ของสารละลายไอออน(III)ที่เลข ก่อนทำปฏิกิริยา

ที่มา : <http://www.rod.beavon.clara.net/>



จากภาพประกอบที่ 4-2 และ 4-3 พบว่ากรดอะซิติคก่อนทำปฏิกิริยามีค่า Chemical shift ที่ตำแหน่ง 2 ppm และสารละลายไอออน(III)คีเลทมีค่า Chemical shift ที่ตำแหน่ง 3 และ 3.6 ppm ตามลำดับ

ลักษณะสัญญาณ NMR ของสารละลายไอออน(III)คีเลทก่อนทำปฏิกิริยา และสารละลายไอออน(III)คีเลทหลังทำปฏิกิริยาตามลำดับ เมื่อใช้สัญญาณความถี่วิทยุ (Radio frequency) 50 MHz แสดงดังภาพประกอบที่ 4-4



ภาพประกอบที่ 4-4 แสดงลักษณะ NMR (NMR band) ของ (ก) สารละลายไอออน(III)คีเลทก่อนทำปฏิกิริยา และ (ข) สารละลายไอออน(III)คีเลทหลังทำปฏิกิริยาตามลำดับ เมื่อใช้ Radio frequency

50 MHz

จากภาพประกอบที่ 4-4 (ก) และ (ข) ศึกษาการเกิดปฏิกิริยาโดยวิเคราะห์ค่า Chemical shift ซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะตัวของโปรตอนแต่ละชนิด ดังนั้นค่า Chemical shift จึงเป็นสิ่งบ่งบอกที่สำคัญถึงชนิดของโปรตอนที่มีอยู่ในโมเลกุล การวิเคราะห์ NMR ใช้วิธีการเปรียบเทียบกับ

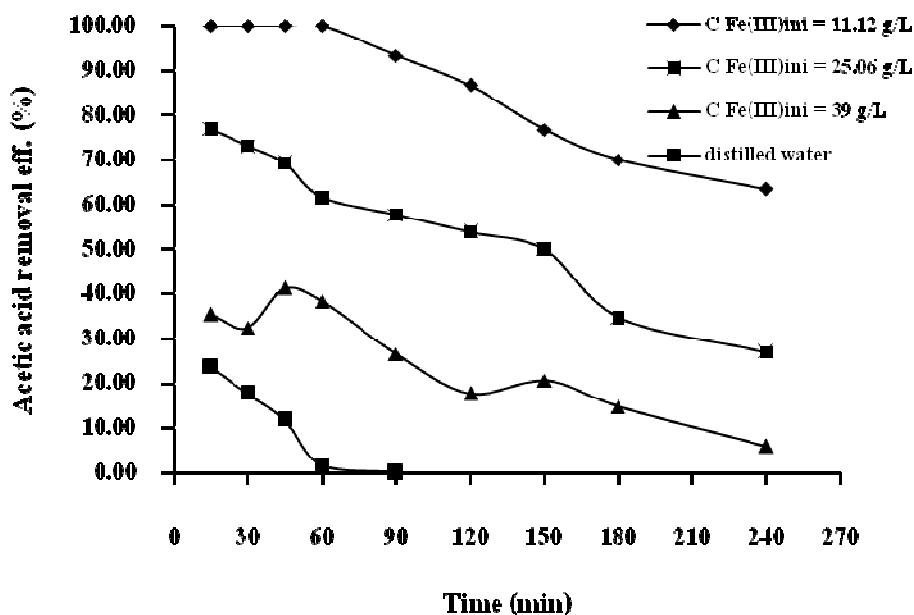
ความถี่ของสารมาตรฐาน (เม็่น และคณะ, 2552) ดังแสดงในภาพประกอบที่ 4-2 ถึงภาพประกอบที่ 4-4 โดยศึกษาถึงการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นได้จากมีลักษณะพีกที่มีความแตกต่างกันของสาร กล่าวคือ หลังจากทำปฏิกิริยาจะมีหมู่เมธิลที่ต่ออยู่กับหมู่คาร์บอนิลจะเกิดเรโซแนนซ์ที่ตำแหน่งประมาณ 2 ppm ซึ่งแสดงว่าหมู่เมธิลที่ต่ออยู่กับคาร์บอนิลจะมาจากการแตกตัวของกรดอะซิติกเกิดขึ้น มารวมตัวกับ โมเลกุล หรือ โครงสร้างของสารละลายไอออน(III)คีเลทจริง จึงทำให้สารมีลักษณะโครงสร้างโมเลกุลและลักษณะเฉพาะตัวของสารที่เปลี่ยนแปลงไป หรือกล่าวอีกนัยสำคัญอีกประการหนึ่งว่าสารละลายไอออน(III)คีเลทสามารถทำปฏิกิริยากับกรดอ่อนอะซิติกได้จริงและสามารถที่จะดูดซึมหรือให้หมู่ของอะซิเตทมาเกาะกับสารละลายไอออน(III)คีเลทได้

ดังนั้นผลที่ได้จากการวิเคราะห์ NMR, FTIR และ CHNO-S จึงสอดคล้องกับผลที่ได้จาก UV-Visible spectroscopy ที่เป็นไปในทิศทางเดียวกันคือพบว่าสารตั้งต้นที่ใช้มีการเปลี่ยนแปลงไป ซึ่งจากผลการศึกษาดังกล่าวจึงสามารถสรุปได้ว่าสารละลายไอออน(III)คีเลททำปฏิกิริยากับกรดอะซิติกได้ จึงเป็นเหตุผลสนับสนุนในการนำสารละลายไอออน(III)คีเลท ไปทดลองใช้กำจัดก๊าซเสียจากเตาอบยางของโรงงานอุตสาหกรรมยางแท่งซึ่งมีกรดอะซิติกเป็นองค์ประกอบที่สำคัญได้

## 4.2 การบำบัดกรดอะซิติกโดยใช้สารละลายไอออน(III)คีเลทในคอลัมน์บรรจุขนาดต้นแบบ

### 4.2.1 ประสิทธิภาพการบำบัดกรดอะซิติกจากปล่องควันโดยใช้สารละลายไอออน(III)คีเลท

ในหัวข้อนี้จะนำเสนอผลของตัวแปรดำเนินการที่สำคัญๆที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการบำบัดกรดอะซิติกโดยการดูดซึมด้วยสารละลายไอออน(III)คีเลทในคอลัมน์บรรจุ (Packed column) โดยทำการ Fixed อัตราการไหลของก๊าซเสียที่เข้าระบบคงที่ เนื่องจากต้องการบำบัดก๊าซทั้งหมดที่เข้าระบบซึ่งเหมือนกับการประยุกต์นำไปใช้ในระบบหอดูดซึมแบบเปียกขนาดอุตสาหกรรม ซึ่งในความเป็นจริงแล้ว มีก๊าซเสียที่ออกมาจากปล่องควันมากเท่าไรก็จะต้องบำบัดก๊าซเสียของโรงงานอุตสาหกรรมโดยใช้ Wet scrubber แต่ในระบบ Packed column ที่ใช้ในการศึกษาเบื้องต้นจะทำการ Fixed ให้อัตราการไหลของก๊าซเสียที่เข้าเป็น 40 L/min (0.04 m<sup>3</sup>/min) ซึ่งเป็นอัตราการไหลสูงสุด ป้อนเข้าสู่ระบบ Packed column และทำการศึกษาตัวแปรดำเนินการที่สำคัญๆ ประกอบด้วยความเข้มข้นของสารละลายไอออน(III)คีเลท อัตราการไหลของของเหลว (L) ปริมาณการเติมอากาศเพื่อฟื้นฟูสภาพสารละลาย (A) ที่มีต่อประสิทธิภาพในการบำบัดกรดอะซิติก (%RE) จากการทดลองใช้คอลัมน์บรรจุเพื่อบำบัดกรดอะซิติกในก๊าซจากกระบวนการอบยางแท่ง โดยใช้สารละลายไอออน(III)คีเลทที่บริษัท สยามอิน โค รับเบอร์ จำกัด จ.พัทลุงสามารถแสดงประสิทธิภาพในการบำบัดกรดอะซิติกของระบบได้ดังภาพประกอบที่ 4-5



ภาพประกอบที่ 4-5 แสดงประสิทธิภาพการบำบัดกรดอะซิติกเทียบกับเวลา สำหรับการทดสอบระบบบำบัดกรดอะซิติก โดยปริมาณของอากาศในการฟื้นฟูสารละลายไอออน(III)คีเลท (A) = 1.25 L/min และ L/G = 150 L/m<sup>3</sup>

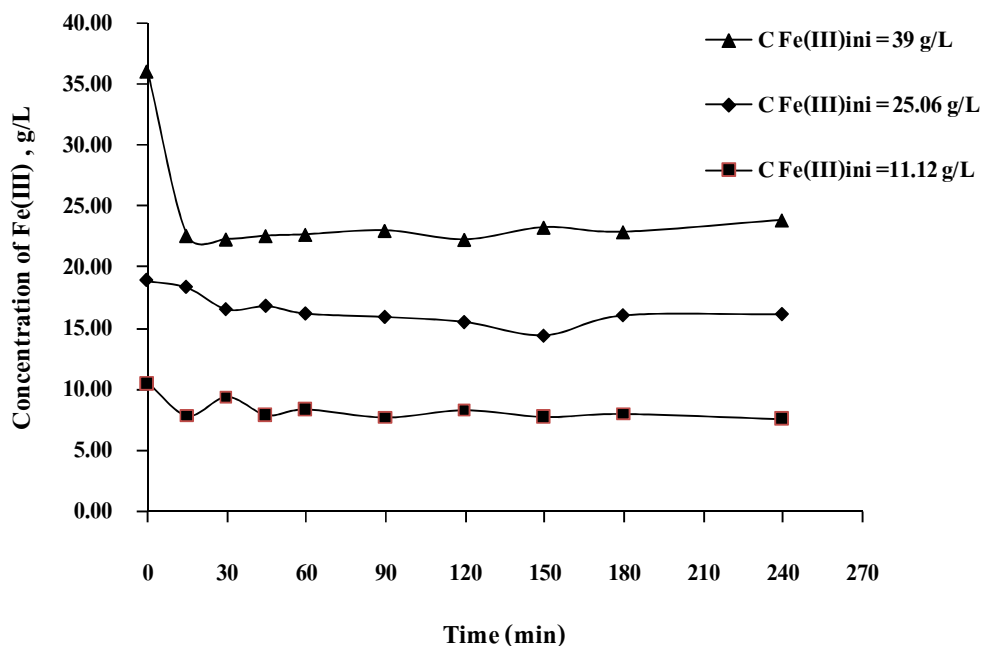
จากผลการทดลองบำบัดกรดอะซิติกจากก๊าซเสียจากระบวนการอบยางแท่งโดยใช้สารละลายไอออน(III)คีเลท ในหอดูดซึมแบบแพคที่ใช้งานจริงในโรงงาน ซึ่งเมื่อดำเนินการระบบโดยใช้อัตราการไหลของสารละลายไอออน(III)คีเลท (L) เท่ากับ 6 L/min อัตราการไหลของก๊าซเสียที่เข้าระบบบำบัดเท่ากับ 40 L/min (0.04 m<sup>3</sup>/min) และปริมาณอากาศที่ใช้ในการฟื้นฟูสารละลายไอออน(III)คีเลท (A) 1.25 L/min พบว่าที่ความเข้มข้นของสารละลายไอออน(III)คีเลทเท่ากับ 11.12 g/L จะได้ประสิทธิภาพในการบำบัดกรดอะซิติกสูงถึง 100% ตลอดระยะเวลาดำเนินการในระยะเวลา 60 นาที หลังจากนั้นประสิทธิภาพค่อยๆ ลดลงเหลือ 70% เมื่อเวลาผ่านไป 4 ชั่วโมง ส่วนการทดลองเมื่อใช้สารละลายไอออน(III)คีเลท ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 25.06 g/L ได้ประสิทธิภาพในการบำบัดกรดอะซิติกสูง 80% ตลอดระยะเวลาดำเนินการในระยะเวลา 60 นาที และประสิทธิภาพลดลงเมื่อเวลาเพิ่มขึ้นและลดลงเป็น 32% ในเวลา 4 ชั่วโมง และการทดลองใช้สารละลายไอออน(III)คีเลทที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 39 g/L ได้ประสิทธิภาพในการบำบัดกรดอะซิติกสูง 37% ตลอดระยะเวลาดำเนินการในระยะเวลา 60 นาที และประสิทธิภาพลดลงเป็น 10% เมื่อเวลาผ่านไป 4 ชั่วโมง อย่างไรก็ตามผลการทดสอบในทุกสภาวะแสดงให้เห็นว่าระบบคอลัมน์บรรจุที่ใช้สารละลายไอออน(III)คีเลท เป็นสารดูดซึม และใช้สภาวะการดำเนินการข้างต้นจะสามารถ

บำบัดกรดอะซิดิกจากก๊าซเสียของโรงงานอบยางแท่ง ได้ดีกว่าการใช้น้ำ ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าการดูดซึมที่เกิดขึ้นเมื่อใช้สารละลายไอออน(III)คีเลทเป็นการดูดซึมทางเคมีเนื่องจากเกิดปฏิกิริยาเคมีระหว่างก๊าซที่ถูกดูดซึม (กรดอะซิดิก) กับตัวทำละลาย (สารละลายไอออน(III)คีเลท) และก๊าซที่ปนเปื้อนในกระแสดูดอากาศนั้นละลายในตัวทำละลายได้ดีและเกิดปฏิกิริยาขึ้นจึงส่งผลให้มีประสิทธิภาพสูงกว่าการใช้น้ำ

ซึ่งจะเห็นได้ว่าเมื่อใช้น้ำเป็นสารดูดซึมกรดอะซิดิกจากก๊าซเสียจะมีประสิทธิภาพในการบำบัดกรดอะซิดิกได้สูงสุดเพียง 23.53% และมีแนวโน้มลดลงอย่างรวดเร็วกับเวลาที่ดำเนินการที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากน้ำเป็นกรดอ่อน แดกตัวได้บางส่วนจึงยังเหลือโมเลกุลส่วนที่ไม่แตกตัวอยู่มากโดยที่ให้ไฮโดรเนียมไอออน ( $H_3O^+$ ) แดกตัวไม่สมบูรณ์ ทำให้ความแตกต่างระหว่างความเข้มข้นของกรดอะซิดิกในก๊าซเสียและน้ำลดลงส่งผลให้แรงขับเคลื่อน (Driving force) ลดลง ดังนั้นเพื่อให้การบำบัดกรดอะซิดิกจากก๊าซเสียให้มีประสิทธิภาพต้องใช้น้ำใหม่ตลอดเวลาทำให้เกิดการสิ้นเปลืองน้ำและเกิดเป็นน้ำเสียที่มีกลิ่นในปริมาณมากซึ่งผลที่ตามมาคือต้องมีค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำเสียจากกระบวนการ

การฟื้นฟูสภาพสารละลายไอออน(III)คีเลทด้วยการเติมอากาศในระบบการบำบัดกรดอะซิดิก พบว่าภายใต้การดำเนินการที่มีการเติมอากาศให้กับสารละลายไอออน(III)คีเลทอย่างเพียงพอจะสามารถควบคุมความเข้มข้นของสารละลายไอออน(III)คีเลทให้คงที่ได้ตลอดเวลา ซึ่งสามารถยืนยันผลดังกล่าวได้จากข้อมูลความเข้มข้นของสารละลายไอออน(III)คีเลท กับเวลาในการดำเนินการดังแสดงในภาพประกอบที่ 4-6

ซึ่งพบว่าความเข้มข้นของสารละลายไอออน(III)คีเลทมีแนวโน้มคงที่ตลอดเวลา และจะพบว่าที่ความเข้มข้นของสารละลายไอออน(III)คีเลทสูง จะให้ประสิทธิภาพการบำบัดกรดอะซิดิกที่ต่ำกว่าเนื่องจากที่ความเข้มข้นค่าที่ 11.12 g/L ค่าของ pH อยู่ในช่วง 9.5-10.5 โดย pH มีค่ามากกว่า 6 มากๆ จากงานวิจัยของ Demmink and Beenackers (1998) อธิบายได้ว่าที่สภาวะดังกล่าว Ferric EDTA จะมีความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยาของหมู่ Hydroxylate สูงมาก โดย Ferric EDTA จะอยู่ในรูปของ  $Fe^{3+}OH^-EDTA^{4-}$  ดังนั้นเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายไอออน(III)คีเลทสูงขึ้นไปจะไม่มีผลต่อการเกิดปฏิกิริยา ทำให้ประสิทธิภาพการบำบัดกรดอะซิดิกที่ความเข้มข้นของสารละลายไอออน(III)คีเลทสูงจึงต่ำกว่าที่ความเข้มข้นที่ต่ำกว่า ดังภาพประกอบที่ 4-5



ภาพประกอบที่ 4-6 แสดงความเข้มข้นของสารละลายไอออน(III)ที่เลทกับเวลา สำหรับการทดสอบระบบบำบัดกรดอะซิติก โดยปริมาณของอากาศในการฟื้นฟูสภาพสารละลายไอออน(III)ที่เลท

$$(A) = 1.25 \text{ L/min และ } L/G = 150 \text{ L/m}^3$$

จากการวิเคราะห์ความเข้มข้นของสารละลายไอออน(III)ที่เลทที่เวลาต่างๆ ดังภาพประกอบที่ 4-6 พบว่าในช่วงแรกของการดำเนินการความเข้มข้นของสารละลายไอออน(III)ที่เลทมีแนวโน้มลดลงอย่างรวดเร็วเพราะเป็นช่วงของการเติมอากาศเข้าสู่ระบบ ทำให้มีปริมาณของออกซิเจนไม่เพียงพอต่อการฟื้นฟูสภาพ แต่หลังจากอากาศเข้าสู่สภาวะคงตัวแล้วจะพบว่าความเข้มข้นของสารละลายไอออน(III)ที่เลทมีแนวโน้มคงที่ตลอดเวลา แสดงว่าปริมาณอากาศที่เติมนั้นอยู่ในระดับที่เพียงพอสำหรับการฟื้นฟูสภาพของสารละลายไอออน(III)ที่เลท

#### 4.2.2 ผลการวิเคราะห์ส่วนประกอบของก๊าซอื่นๆ ก่อนและหลังการบำบัดกรดอะซิติกจากกระบวนการอบยางแท่งของโรงงานอุตสาหกรรม

ผลการวิเคราะห์ปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO<sub>2</sub>) และก๊าซออกซิเจน (O<sub>2</sub>) ที่ทางเข้าและทางออกของคอลัมน์บรรจุ แสดงดังตารางที่ 4-2

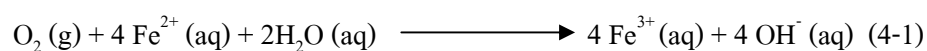
ตารางที่ 4-2 แสดงองค์ประกอบของแก๊สเสียที่เข้าและออกของ Packed column โดยทำการวัดค่า 3 ครั้งในแต่ละการทดลอง

กระแสก๊าซ	ส่วนประกอบ (% โดยปริมาตร)	
	CO <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>
ขาเข้า	0.3%	20%
ขาออก	0%	19.20%



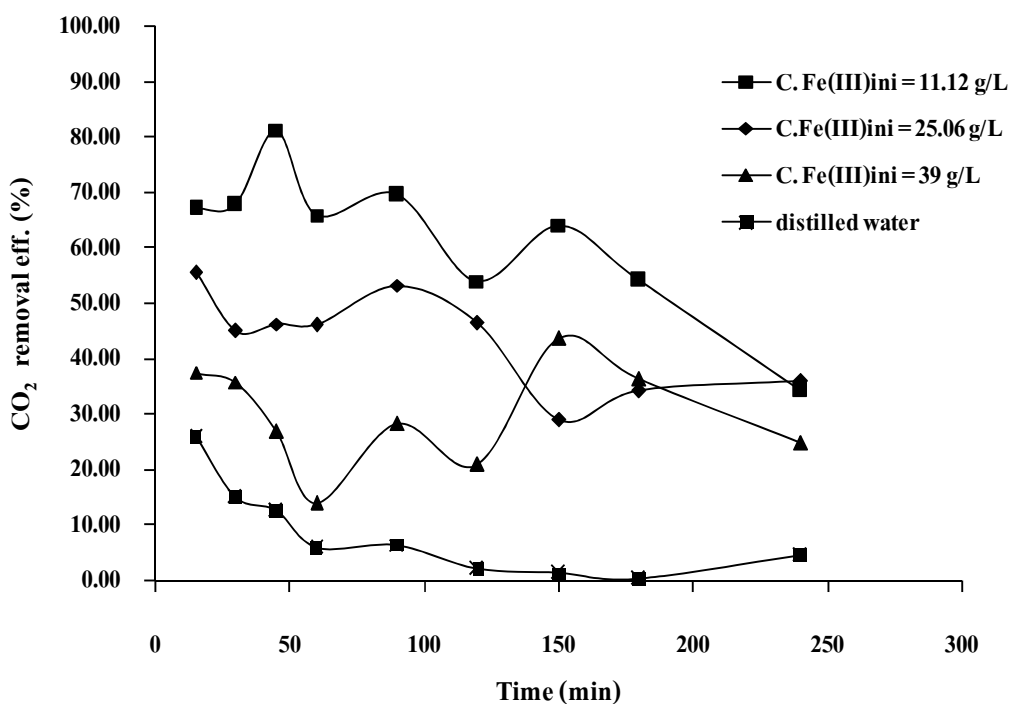
ภาพประกอบที่ 4-7 แสดงอุปกรณ์ portable GC ที่ใช้ในการวัดปริมาณส่วนประกอบของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในแก๊สเสียที่เข้าและออกของคอลัมน์บรรจุ

จากตารางที่ 4-2 แสดงว่าสารละลายไอออน(III)คีเลทมีประสิทธิภาพในการบำบัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และปริมาณออกซิเจนในแก๊สเสียที่ลดลงเนื่องจากถูกใช้ไปในการฟื้นฟูสภาพสารละลายไอออน(III)คีเลท กล่าวคือออกซิเจนในแก๊สเสียที่เข้าสู่คอลัมน์บรรจุจะทำปฏิกิริยากับสารละลายไอออน(II)คีเลทเพื่อเปลี่ยนเป็นไอออน(III)คีเลทดังสมการ (4-1) ส่งผลให้ออกซิเจนในแก๊สเสียที่ทางออกของคอลัมน์บรรจุลดลงเล็กน้อย



#### 4.2.3 ผลการวิเคราะห์ปริมาณของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

ก๊าซเสียอีกชนิดหนึ่งที่ถูกปล่อยออกมาพร้อมๆ กับกรดอะซิติก คือ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ซึ่งจากการวัดโดยใช้ Portable probe ของคาร์บอนพบว่าปริมาณก๊าซคาร์บอนที่ถูกปล่อยออกมาจากปล่องควันจะอยู่ที่ 9,500 ppm และเมื่อทำการเปรียบเทียบค่าปริมาณของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์กับข้อมูลการรายงานของ Jonathan *et al.* (2008) ซึ่งระบุว่ามาตรฐานการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ คือ 0.5 % โดยปริมาตรต่ออากาศหรือ 5,000 ppm โดยเฉลี่ยในระยะเวลา 8 ชั่วโมง แสดงว่าปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ปล่อยจากเตาอบยางมีปริมาณที่สูงกว่าปริมาณที่กำหนดอยู่ ดังนั้นการบำบัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จึงเป็นผลพลอยได้จากการบำบัดกรดอะซิติกด้วย ผลการศึกษาการบำบัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์โดยใช้สารละลายไอรอน(III)คีเลท ที่อัตราการไหลของสารละลายคูดซิม (L) 6 L/min และปริมาณอากาศที่ใช้ในการฟื้นฟูสภาพสารละลาย (A) ที่ใช้ 1.25 L/min ดังแสดงดังภาพประกอบที่ 4-8



ภาพประกอบที่ 4-8 แสดงประสิทธิภาพการบำบัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์กับเวลา สำหรับการทดสอบระบบบำบัดกรดอะซิติก โดยปริมาณของอากาศในการฟื้นฟูสารละลายไอรอน(III)คีเลท

(A) = 1.25 L/min และ L/G = 150 L/m<sup>3</sup> ซึ่งเปรียบเทียบกับการใช้

ผลการวิเคราะห์การบำบัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์โดยใช้สารละลายไอออน (III)คี-เลทเมื่อเปรียบเทียบกับการใช้น้ำเป็นสารดูดซึมพบว่าประสิทธิภาพในการบำบัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เมื่อใช้สารละลายไอออน(III)คีเลทที่มีความเข้มข้น 11.12 g/L เป็นสารดูดซึมมีค่าสูงถึง 70% ซึ่งมีประสิทธิภาพที่สูงกว่าการใช้น้ำ ที่ให้ประสิทธิภาพสูงสุดเพียง 28% และจะลดลงตลอดเวลาของการดำเนินการ ทั้งนี้เนื่องจากสารละลายไอออน(III)คีเลทมีแรงดึงผิวที่ต่ำกว่าน้ำ ดังแสดงในตารางที่ 4-3 โดยค่าแรงดึงผิวที่ต่ำกว่าจะมีผลต่อค่าความสามารถในการกระจายตัวของเหลวบนพื้นผิวของตัวกลาง (Packing media) ได้อย่างทั่วถึง จึงทำให้สามารถสัมผัสกับก๊าซเสียได้มากกว่าจึงส่งผลให้ประสิทธิภาพในการบำบัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์โดยการดูดซึมได้สูงกว่า (Aroonwilas *et al.*, 1999)

ตารางที่ 4-3 แสดงค่าแรงดึงผิวของสารละลายไอออน(III)คีเลทและน้ำดำเนินการที่อุณหภูมิ 30 °C

Parameter	Water	Fe(III)EDTA
Surface tension (N/m)	$71.2 \times 10^{-3}$	$30 \times 10^{-3}$ (Victoria <i>et al.</i> , 2006)

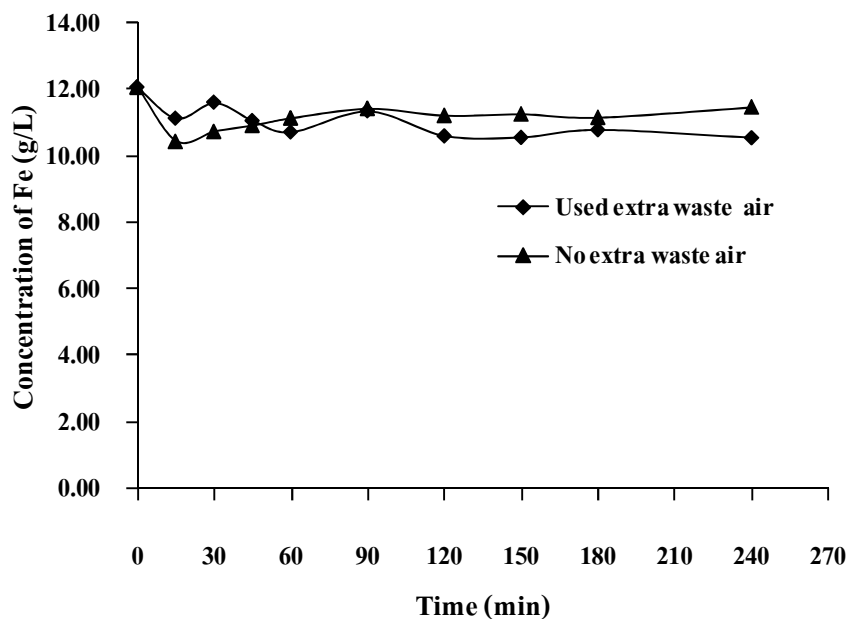
#### 4.2.4 ความแตกต่างระหว่างการฟื้นฟูสภาพสารละลายด้วยการเติมอากาศและไม่มีการเติมอากาศในถังบรรจุสารละลาย

จากการศึกษาการฟื้นฟูสภาพสารละลายไอออน(III)คีเลทโดยการเติมอากาศเสียที่มีองค์ประกอบของก๊าซออกซิเจนด้วยอาศัยหลักการเดียวกันกับการเติมอากาศในระบบบำบัดน้ำเสีย (Diffused aeration) และกรณีที่ไม่มีการเติมอากาศเสียเพิ่มเติมแต่ใช้ออกซิเจนที่มีอยู่ในกระแสก๊าซเสียโดยอาศัยหลักการสัมผัสกับอากาศ (Natural draft aeration) โดยตรง พบว่าการเติมอากาศและไม่เติมอากาศนั้นผลที่ได้ไปในทำนองเดียวกัน กล่าวคือระบบมีปริมาณออกซิเจนที่เกินพอที่จะใช้สำหรับการฟื้นฟูสภาพสารละลายไอออน(III)คีเลทไปพร้อมๆ กับการบำบัดกรดอะซิติกขณะที่ก๊าซเสียจากปล่องควันมาสัมผัสกับสารละลายไอออน(III)คีเลท ซึ่งเป็นผลสนับสนุนการหายไปของออกซิเจน 0.8% ดังตารางที่ 4-2 ซึ่งถูกใช้ไปในการออกซิไดส์เหล็กที่อยู่ในรูปของเฟอร์รัสเป็นสารละลายไอออน(III)คีเลท ดังเดิมได้ ดังภาพประกอบที่ 4-9

การศึกษานี้ยืนยันได้ว่าก๊าซเสียจากปล่องควันของกระบวนการอบยางแท่งมีปริมาณของออกซิเจนที่เพียงพอต่อความต้องการสำหรับฟื้นฟูสภาพของสารละลายไอออน(III)คีเลท ซึ่งง่ายต่อการนำไปประยุกต์ใช้กับหอดูดซึมแบบเปียกขนาดอุตสาหกรรมโดยไม่ต้องมีการเติมอากาศเพิ่มเติม อย่างไรก็ตามในกลไกการดูดซึมด้วยปฏิกิริยาเคมีในคอลัมน์บรรจุนี้ยังมีขั้นตอน



อื่นๆ เข้ามาเกี่ยวข้องในกระบวนการอีกหลายขั้นตอน เช่น การถ่ายโอนมวลของออกซิเจนจากเฟส ก๊าซเข้าสู่เฟสของเหลวของสารดูดซึม และการถ่ายโอนมวลจากเฟสก๊าซของเสียเข้าสู่เฟสของเหลว ของสารดูดซึม ดังนั้นระบบกำจัดก๊าซเสียจากปล่องควันที่ออกแบบจะต้องออกแบบให้สามารถ ฟื้นฟูสภาพสารละลายไอออน(III)คีเลทได้และสามารถใช้งาน ได้จริง



ภาพประกอบที่ 4-9 แสดงการเปรียบเทียบระบบที่เติมก๊าซเสียมาฟื้นฟูสภาพสารละลายไอออน- (III)คีเลทในระหว่างดำเนินการกับระบบที่ไม่เติมก๊าซเสียเพิ่มเติมในถังบรรจุสารละลาย ( $C_{Fe,0} = 11.12 \text{ g/L}$ ,  $L = 6 \text{ L/min}$ )

#### 4.2.5 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการบำบัดกรดอะซิติกในคอลัมน์บรรจุ

เทคนิค Response surface methodology (RSM) เป็นการรวบรวมข้อมูลทางสถิติ และเทคนิคทางคณิตศาสตร์เพื่อเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพและหาจุดที่เหมาะสมในกระบวนการ ซึ่ง RSM ประกอบด้วยกลุ่มของตัวแปรตามหลักการทางคณิตศาสตร์และสถิติที่ใช้เพื่อแสดงความสัมพันธ์ระหว่างผลตอบสนองและตัวแปรอิสระ แผนการทดลองแบบ Central composite design (CCD) เป็นการออกแบบการทดลอง โดยที่การทดลองทุกระดับของแต่ละปัจจัยห่างจาก Center ของ Design เท่ากัน และทำซ้ำที่จุดกึ่งกลาง แต่ละปัจจัยจะมีระดับการทดลอง 5 ระดับ ( $-\alpha$ ,  $-1$ ,  $0$ ,  $1$ ,  $\alpha$ ) งานวิจัยนี้จึงนำเทคนิค RSM แบบ CCD มาใช้ในการศึกษาการออกแบบและวิเคราะห์ ผลการทดลองการบำบัดก๊าซกรดอะซิติกจากกระบวนการอบยางแท่งโดยใช้สารละลายไอออน- (III)คีเลท

#### 4.2.5.1 ผลการหาแบบจำลองที่เหมาะสมในการบำบัดกรดอะซิติกด้วยสารละลายไอรอน(III)คีเลทเป็นสารดูดซับใน Packed column

ประสิทธิภาพการบำบัดก๊าซเสียจากปล่องควันโดยการดูดซับด้วยสารละลาย ไอรอน(III)คีเลทใน Packed column ที่สภาวะต่างๆแสดงดังตารางที่ 4-4

ตารางที่ 4-4 แสดงประสิทธิภาพการบำบัดกรดอะซิติกด้วยสารละลายไอรอน(III)คีเลทในคอลัมน์บรรจุ ขนาดต้นแบบที่สภาวะการทดลองต่างๆ จากการทดลองด้วยเทคนิค RSM แบบ CCD

Exp #	$C_{Fe,0}$ (g/L)	L (L/min)	A (L/min)	% Observed acetic acid removal eff.	% Predicted acetic acid removal eff.
1	25.06	6	1.25	77.5	69.67
2	25.06	6	2.00	81.82	75.88
3	33.35	7	1.70	60	60.92
4	16.77	4	1.70	79.55	85.80
5	33.35	4	0.80	41.14	39.54
6	25.06	6	0.50	64	63.47
7	11.12	6	1.25	100	97.57
8	25.06	6	1.25	79.41	69.67
9	16.77	7	1.70	78.5	84.66
10	16.77	7	0.80	92	92.43
11	39.00	6	1.25	38.24	41.77
12	25.06	3	1.25	72.73	65.83
13	25.06	6	1.25	60	69.67
14	16.77	4	0.80	77.27	82.14
15	33.35	7	0.80	46	49.82
16	33.35	4	1.70	57.5	62.06
17	25.06	8	1.25	78.79	73.52

จากข้อมูลประสิทธิภาพการบำบัดกรดอะซิติกด้วยสารละลายไอรอน(III)คีเลทในคอลัมน์บรรจุที่แสดงในตารางที่ 4-4 นั้นสามารถนำมาวิเคราะห์หาสมการแบบจำลองที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพในการบำบัดกรดอะซิติกกับตัวแปรดำเนินการที่ศึกษาได้โดยใช้

เทคนิคผลตอบสนองพื้ผิว (RSM) และได้แบบจำลองของสมการทางคณิตศาสตร์ที่เหมาะสม เป็นสมการ Linear interaction ดังแสดงในสมการที่ (4-2)

$$\%RE = 111.37 - 3.597C_{Fe,0} + 6.926L + 1.276C_{Fe,0}A - 4.310LA \quad (4-2)$$

เมื่อ %RE = ประสิทธิภาพการบำบัดกรดอะซิติก (ร้อยละ)  
 A = ปริมาณการเติมอากาศสำหรับการฟื้นฟูสภาพของของสารละลายคูดซิม (L/min)  
 $C_{Fe,0}$  = ความเข้มข้นในตอนเริ่มต้นของสารละลายไอออน(III)คีเลท (g/L)  
 L = อัตราการไหลของสารละลายคูดซิม (L/min)

ในการพิจารณาความเหมาะสมของแบบจำลองที่ได้ตามสมการ (4-2) นั้นได้พิจารณาจากการวิเคราะห์ค่าความแปรปรวนของสมการแบบจำลองด้วยวิธี ANOVA สำหรับรายละเอียดในการวิเคราะห์สมการแบบจำลองด้วยวิธี ANOVA ของแบบจำลองตามสมการ (4-2) นั้น อธิบายได้ดังตารางที่ 4-5

ตารางที่ 4-5 แสดงผลการวิเคราะห์ค่าความแปรปรวนของการทดลองที่มีรูปแบบสมการเป็น Linear interaction model (4-2)

Source of variation	SS	SS%	MS	F	F Significant	df
Regression	4258.7	89	1064.7	24.62	1.04224E-05	4
Residual	518.91	11	43.24			12
LOF Error	290.03	6 (56)	29.00	0.2534	0.945	10
Pure Error	228.88	5 (44)	114.44			2
Total	4777.6	100				16

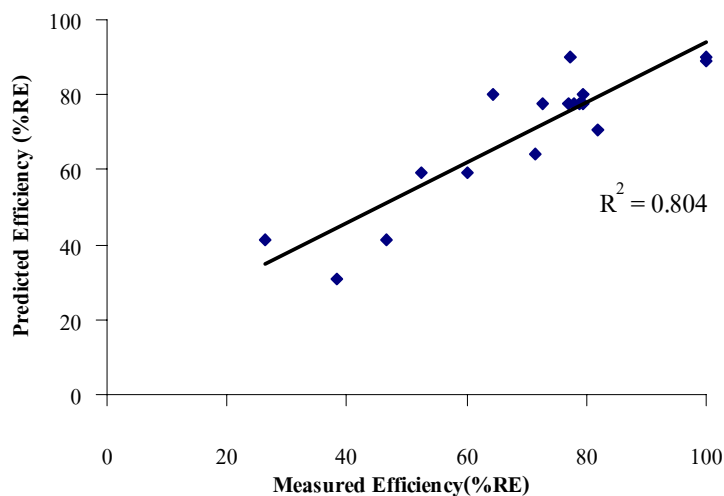
จากตารางที่ 4-5 แสดงผลการวิเคราะห์ค่าความแปรปรวนของการทดลอง ค่า F-significant มีค่าเท่ากับ 1.04224E-05 ซึ่งน้อยกว่า 0.05 มาก แสดงว่าตัวแปรที่ศึกษาทุกตัวที่ปรากฏ

ในสมการมีผลต่อประสิทธิภาพอย่างมีนัยสำคัญ ในทำนองเดียวกันเมื่อพิจารณาค่า P-value ของตัวแปรแต่ละตัวนั้น ถ้าตัวแปรใดมีค่า P value ต่ำกว่า 0.05 มาก ๆ แสดงว่าตัวแปรนั้นมีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดอย่างมีนัยสำคัญเช่นกัน ส่วนตัวแปรที่มีค่า P-value สูงกว่า 0.05 ถือว่ามีนัยสำคัญน้อยและจะตัดทิ้งไป ผลการวิเคราะห์ตัวแปรที่มีผล คือ ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายไอรอน(III)คีเลท อัตราการไหลของสารละลายไอรอน(III)คีเลทและปริมาณการเติมอากาศที่เหมาะสมสำหรับการฟื้นฟูสภาพสารละลาย โดยในทุกๆ เทอมข้างต้นมีค่า P value น้อยกว่า 0.05 ดังตารางที่ 4-6

ตารางที่ 4-6 แสดงข้อมูลทางสถิติของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของค่าประสิทธิภาพการบำบัดกรดอะซิติก

Coefficient		P value	Std Error	-95%	95%	t Stat	VIF
$b_0$	111.37	2.20261E-08	8.651	92.52	130.22	12.87	
$b_1$	-3.597	0.000130	0.650	-5.014	-2.179	-5.529	9.179
$b_2$	6.926	0.04346	3.069	0.239	13.61	2.257	6.573
$b_3$	1.276	0.02331	0.491	0.206	2.346	2.598	18.31
$b_4$	-4.310	0.04081	2.261	-9.236	0.616	-1.906	15.70

ค่า  $R^2$  เป็นค่าสถิติที่แสดงถึงสัดส่วนหรือร้อยละของความผิดพลาดที่แบบจำลองสามารถอธิบายได้จากสมการการประมาณและเป็นค่าที่มีความสำคัญในการพิจารณาความน่าเชื่อถือของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้ที่มีความสำคัญอีกค่าหนึ่ง กล่าวคือค่า  $R^2$  ควรมากกว่า 0.75 จึงเป็นค่าที่ยอมรับได้ (Seyedeh *et al.*, 2007) โดยค่า  $R^2$  ที่สมควรมีค่าเข้าใกล้ 1 ส่วนค่า  $R^2_{adj}$  หากมีค่าใกล้เคียงกับค่า  $R^2$  แสดงว่าแต่ละเทอมในแบบจำลองที่ได้ล้วนส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อประสิทธิภาพการบำบัดทั้งหมด โดยจากการทดลองพบว่า  $R^2$  และ  $R^2_{adj}$  เท่ากับ 0.891 และ 0.855 ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นว่าจากการทดลองค่า  $R^2_{adj}$  มีค่าต่ำกว่า  $R^2$  เนื่องจากได้จากการปรับค่าผลการทดลองและค่าจากแบบจำลองให้มีความสัมพันธ์กันมากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับเกณฑ์ดังกล่าวและเมื่อเปรียบเทียบความน่าเชื่อถือของสมการแบบจำลองกับค่าที่ได้จากการทดลองสามารถแสดงได้ดังภาพประกอบที่ 4-10



ภาพประกอบที่ 4-10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการบำบัดกรดอะซิติกที่ได้จากการทดลองและจากการทำนายโดยใช้แบบจำลองตามสมการ Linear interaction (4-2)

ภาพประกอบที่ 4-10 แสดงถึงความสัมพันธ์ของประสิทธิภาพการบำบัดกรดอะซิติกที่ได้จากการทดลองและจากการทำนายโดยใช้สมการที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในสมการที่ (4-2) ซึ่งข้อมูลที่ได้มีค่าการกระจายตัวรอบเส้นที่แสดงความสอดคล้องในระดับที่ยอมรับได้ ( $R^2=0.804$ ) แสดงว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้สามารถใช้ทำนายประสิทธิภาพการบำบัดกรดอะซิติกในช่วงตัวแปรที่ศึกษาได้ดี

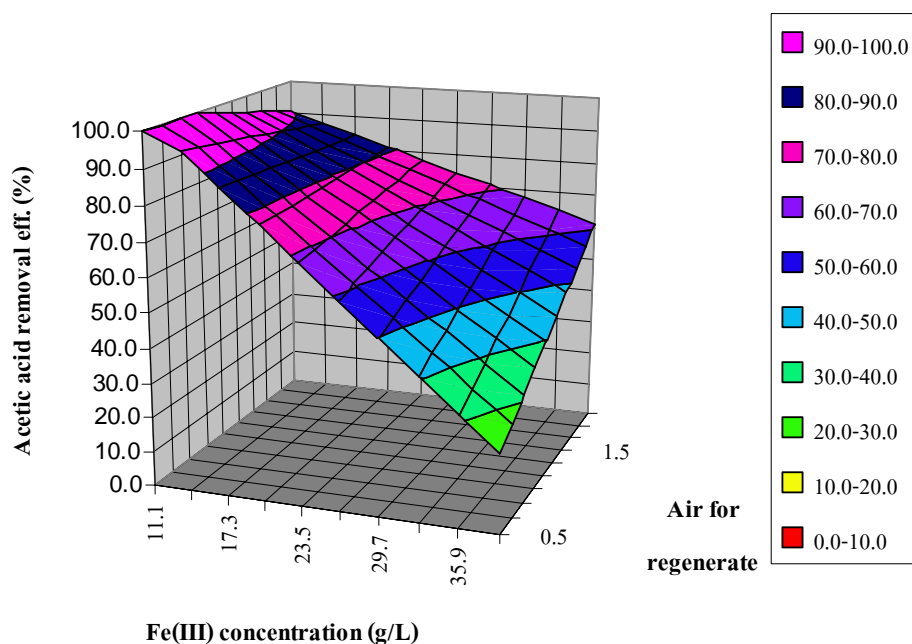
#### 4.2.5.2 พื้นผิวตอบสนองของตัวแปรต่อค่าประสิทธิภาพในการบำบัดกรดอะซิติก

จากสมการแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สามารถนำผลมาแสดงความสัมพันธ์ของค่าประสิทธิภาพในการบำบัดกรดอะซิติกในรูปกราฟพื้นผิวตอบสนอง (Response surface) ที่แสดงผลของตัวแปรอิสระครั้งละ 2 ตัวแปร คือ ความเข้มข้นของสารละลายไอรอน(III)คีเลท และปริมาณอากาศที่ใช้ในการฟื้นฟูสภาพสารละลาย และอัตราการไหลของสารละลายไอรอน(III)คีเลทต่อประสิทธิภาพในการบำบัดกรดอะซิติกได้ โดยมีรายละเอียดดังนี้

**ผลของความเข้มข้นของสารละลายไอรอน(III)คีเลท ( $C_{Fe,0}$ ) และปริมาณการเติมอากาศสำหรับการฟื้นฟูสภาพสารละลายไอรอน(III)คีเลท (A)**

ผลของความเข้มข้นของสารละลายไอรอน(III)คีเลทและปริมาณของอากาศที่ใช้ในการฟื้นฟูสภาพสารละลายต่อประสิทธิภาพในการบำบัดกรดอะซิติก เมื่อนำไปวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ในรูปของกราฟพื้นผิวตอบสนองแสดงผลการทดลองได้ดังภาพประกอบที่ 4-11

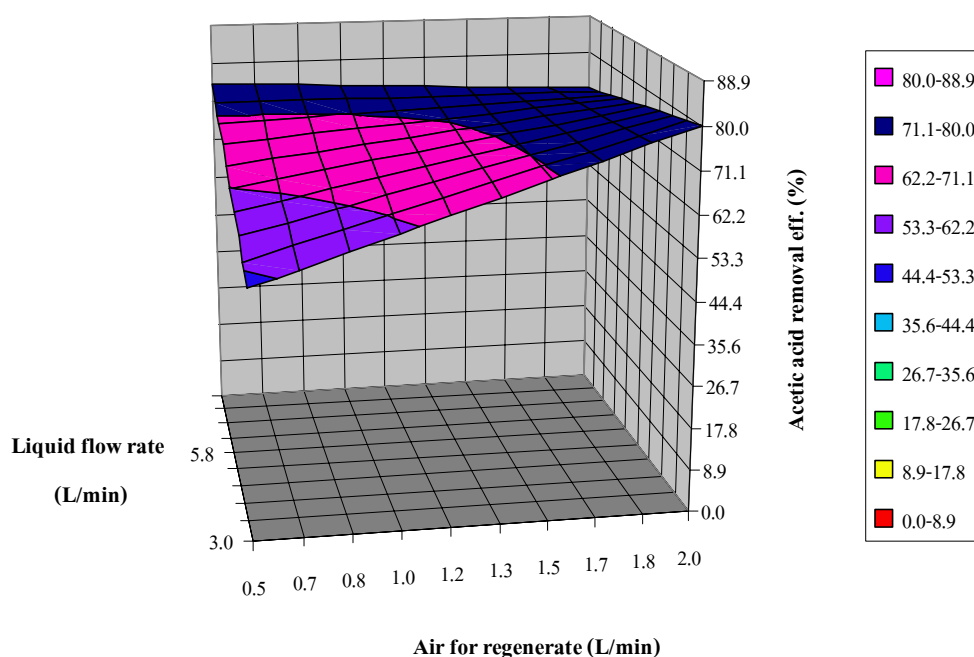
พบว่าเมื่อความเข้มข้นของสารละลายไอออน(III)คีเลตลดลงจะส่งผลให้ประสิทธิภาพในการบำบัดกรดอะซิติกเพิ่มขึ้น สอดคล้องกับสัมประสิทธิ์หน้า  $C_{Fe,0}A$  ในสมการ (4-2) ซึ่งมีค่าเป็นบวก คือ 1.276 เนื่องจากที่ความเข้มข้นของสารละลายไอออน(III)คีเลตมีความเข้มข้นต่ำ จะทำให้สารละลายมีความเป็นเบสมากขึ้น และจะเป็นการเพิ่มแรงขับเคลื่อน (Driving force) ในการเกิดปฏิกิริยาและอัตราการดูดซึมของกรดอะซิติก จึงส่งผลให้ประสิทธิภาพในการบำบัดกรดอะซิติกได้เพิ่มขึ้น นอกจากนี้เมื่อความเข้มข้นของสารละลายไอออน(III)คีเลตน้อยลงจะทำให้ประสิทธิภาพในการบำบัดกรดอะซิติกสูงขึ้นอย่างชัดเจน และสอดคล้องกับสัมประสิทธิ์หน้าตัวแปร  $C_{Fe,0}$  ในสมการที่ (4-2) มีค่าเป็นลบ เนื่องจากสารละลายไอออน(III)คีเลตมีความเข้มข้นต่ำ และพบว่าที่ความเข้มข้นของสารละลายไอออน(III)คีเลตที่ 11.12 g/L เป็นความเข้มข้นที่ให้ประสิทธิภาพในการบำบัดกรดอะซิติกสูงถึง 100% ซึ่งเป็นช่วงที่มีความเป็นเบส (alkalinity) ในช่วง 9.5-10.5 ซึ่งจะเป็นช่วงที่ให้ประสิทธิภาพในการบำบัดสูงสุดซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Piche *et al.* (2005)



ภาพประกอบที่ 4 -11 กราฟพื้นผิวแสดงความสัมพันธ์ระหว่างผลของความเข้มข้นของสารละลายไอออน(III)คีเลต ( $C_{Fe,0}$ ) และปริมาณการเติมอากาศเพื่อใช้ในการฟื้นฟูสภาพสารละลายไอออน(III)คีเลต (A) ที่มีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดกรดอะซิติก

### ผลของปริมาณการเติมอากาศเพื่อใช้ในการฟื้นฟูสภาพสารละลายไอออน(III)คิเลท (A) และอัตราการไหลของสารละลายไอออน(III)คิเลท (L)

ภาพประกอบที่ 4-12 แสดงค่าปริมาณของการเติมอากาศสำหรับทำการฟื้นฟูสภาพสารละลาย (A) และอัตราการไหลของสารละลายไอออน(III)คิเลทที่มีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดกรดอะซิติก พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณของการเติมอากาศสำหรับทำการฟื้นฟูสภาพสารละลาย (A) ส่งผลต่อค่าประสิทธิภาพการบำบัดกรดอะซิติกอย่างมีนัยสำคัญ จึงปรากฏทอมสัมประสิทธิ์ของปริมาณการเติมอากาศในรูปแบบของ interaction ในสมการที่ (4-2) ของตัวแปร ( $C_{Fe_0}$ A และ LA) และพบว่าเมื่อปริมาณการเติมอากาศเพื่อฟื้นฟูสภาพสารละลายไอออน(III)คิเลทเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการบำบัดกรดอะซิติกเพิ่มขึ้น

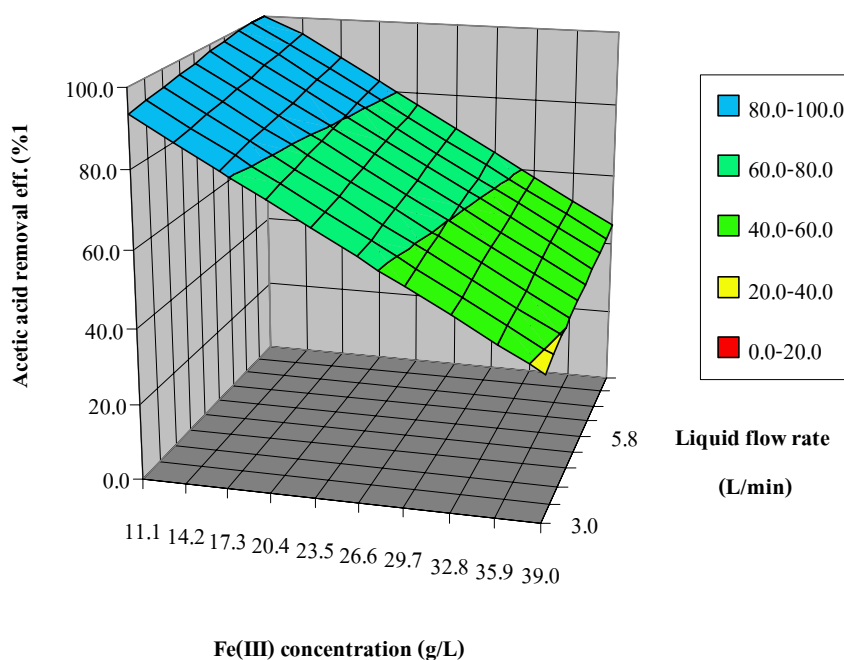


ภาพประกอบที่ 4-12 กราฟพื้นผิวแสดงความสัมพันธ์ระหว่างผลของปริมาณการเติมอากาศเพื่อใช้ในการฟื้นฟูสภาพสารละลายไอออน(III)คิเลท (A) และอัตราการไหลของสารละลายไอออน(III)คิเลทที่มีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดกรดอะซิติก

### ผลของความเข้มข้นของสารละลายไอออน(III)คิเลท ( $C_{Fe_0}$ ) และอัตราการไหลของสารละลายไอออน(III)คิเลท (L)

ผลของอัตราการไหลของสารละลายคูดซิมไอออน(III)คิเลทแสดงดังภาพประกอบที่ 4-13 จากภาพประกอบดังกล่าวแสดงแนวโน้มที่สอดคล้องกัน คือ การเพิ่มอัตราการไหลของสาร

ดูดซึมในระบบส่งผลให้การดูดซึมของกรดอะซิติกในก๊าซเสียจากกระบวนการอบยางแท่งเข้าสู่สารละลายเกิดขึ้นได้ดี ทำให้ปฏิกิริยาระหว่างกรดอะซิติกกับสารละลายไอออน(III)คีเลทสามารถเกิดได้เร็วขึ้น และการเพิ่มปริมาณของของเหลวจะเป็นการเพิ่มพื้นที่สัมผัสระหว่างเฟสของเหลวกับเฟสของกระแสก๊าซเสีย ส่งผลให้ประสิทธิภาพสูงสุดถึง 100% จากสมการ (4-2) อิทธิพลของอัตราการไหลเดี่ยวๆ มีความสำคัญกว่าตัวอื่นๆจะเห็นได้จากสัมประสิทธิ์หน้าตัวแปร (L) ที่มีค่าเป็นบวกมากๆ ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการบำบัดกรดอะซิติกของระบบเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ



ภาพประกอบที่ 4 -13 กราฟพื้นผิวแสดงความสัมพันธ์ระหว่างผลของค่าเข้มข้นของสารละลายไอออน(III)คีเลท ( $C_{Fe,0}$ ) และอัตราการไหลของสารละลายไอออน(III)คีเลท (L) ที่มีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดกรดอะซิติก

#### 4.2.5.3 การหาค่าสถานะดำเนินการที่เหมาะสมและสถานะที่เหมาะสม (Optimum condition) ด้วยสารละลายไอออน(III)คีเลทใน Packed column

สมการแบบจำลองสามารถใช้ทำนายประสิทธิภาพการบำบัดกรดอะซิติกในช่วงของตัวแปรที่ศึกษาได้ และยังสามารถใช้แบบจำลองดังกล่าวเพื่อทำนายสถานะที่เหมาะสมในการดำเนินการได้เช่นกัน ซึ่งสามารถวิเคราะห์หาผลเฉลยของสถานะที่เหมาะสมจากสมการ (4-2) ได้โดยใช้โปรแกรม Optimized จะได้ค่าที่ดีที่สุดที่ทำให้ผลตอบสนองพื้นผิวหรือประสิทธิภาพการบำบัด (%RE) ได้สูงสุด และสามารถใช้เป็นแนวทางในการกำหนดสถานะการดำเนินการของตัว



แปรที่เกี่ยวข้อง เช่น อัตราการไหลของของสารดูดซึม ปริมาณการเติมอากาศ ความเข้มข้นของสารดูดซึม เป็นต้น

จากการวิเคราะห์ด้วยแนวทางข้างต้น พบว่าสภาวะการทดลองที่เหมาะสม (Optimum condition) ที่ได้จากการใช้สารละลายไอรอน(III)คีเลทเป็นสารดูดในการบำบัดก๊าซเสียจากปล่องควันจากระบวนการอบยางแท่งในคอลัมน์บรรจุ สภาวะดำเนินการที่เหมาะสม คือ ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายดูดซึมไอรอน(III)คีเลท 11.12 g/L ปริมาณการเติมอากาศสำหรับพื้นที่ฟูสภาพสารละลายไอรอน(III)คีเลท 2 L/min และอัตราการไหลของสารดูดซึมที่ใช้ในระบบ 3 L/min และปริมาณของก๊าซเสียที่เข้าคอลัมน์บรรจุคงที่ คือ 40 L/min ซึ่งจะให้ประสิทธิภาพในการบำบัดกรดอะซิติกสูงสุด (%Removal efficiency) คือ 94.70% โดยตารางที่ 4-7 แสดงค่าต่ำสุดและสูงสุดของตัวแปรข้างต้นที่ทำการศึกษา

ตารางที่ 4-7 แสดงสภาวะที่เหมาะสมซึ่งได้จากการ Optimized เพื่อให้ได้ประสิทธิภาพการบำบัดสูงสุดจากการRegression จากโมเดล Linear interaction จากสมการ (4-2)

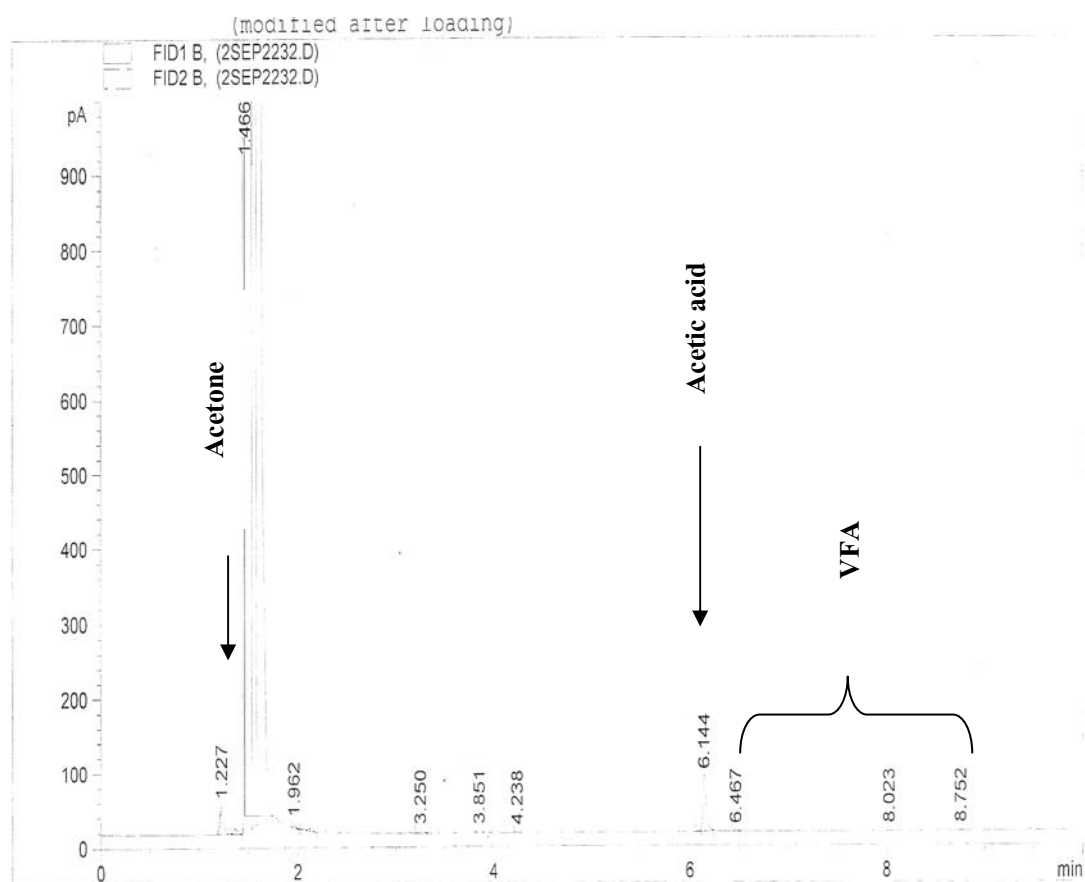
Term	ปริมาณการเติมอากาศ (A) (L/min)	ความเข้มข้นของสารละลายดูดซึม ( $C_{Fe,0}$ ) (g/L)	อัตราการไหลของสารดูดซึม (L) (L/min)
Data Min	0.5	11.12	3
Data Avg	1.25	25.06	6
Data Max	2	39	8
Cur Value	2	11.12	3

ผลการศึกษาดังกล่าวจึงเป็นแนวทางในการนำไปประยุกต์ใช้ในการบำบัดก๊าซเสียจากปล่องควันของกระบวนการอบยางแท่งที่มีองค์ประกอบของกรดอะซิติกของบริษัท สยามอินโดรับเบอร์ จำกัด ซึ่งจะได้นำเสนอผลการศึกษาในหัวข้อถัดไป

#### 4.2.5.4 การทดสอบสถานะดำเนินการที่เหมาะสมในการบำบัดกรดอินทรีย์ระเหยง่ายเมื่อใช้สารละลายไอออน(III)คีเลทในคอลัมน์บรรจุ

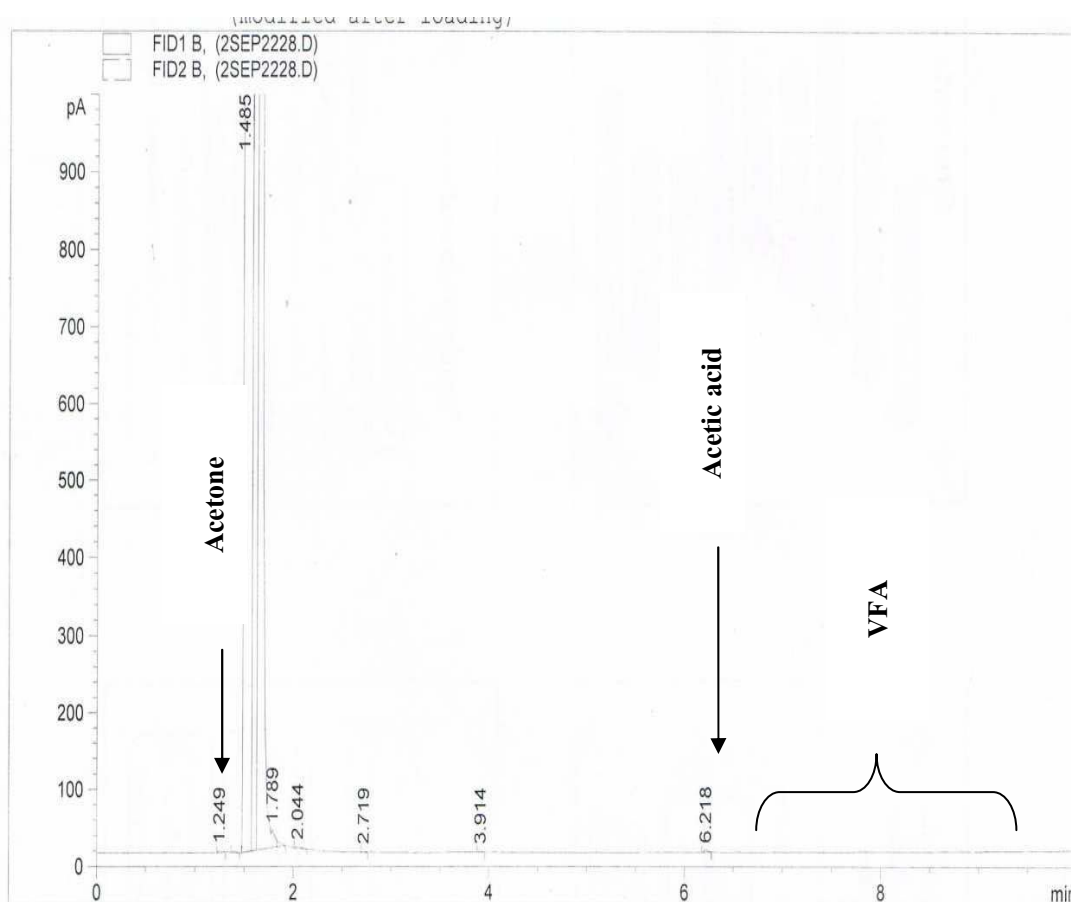
องค์ประกอบและความเข้มข้นของกรดไขมันระเหยง่าย ที่ทางเข้าและทางออกจากคอลัมน์บรรจุ

ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบและความเข้มข้นของกรดไขมันระเหยง่ายในก๊าซเสียที่ทางเข้าและทางออกของคอลัมน์บรรจุขนาดต้นแบบที่ดำเนินการที่สภาวะที่เหมาะสม แสดงดังภาพประกอบ 4-14 และ 4-15 ตามลำดับ



ภาพประกอบ 4-14 แสดงผลการวิเคราะห์กรดไขมันระเหยง่ายที่ทางเข้าคอลัมน์บรรจุด้วยอุปกรณ์

GC-6890



ภาพประกอบ 4-15 แสดงผลการวิเคราะห์กรดไขมันระเหยง่ายที่ทางออกคอลัมน์บรจุเมื่อเวลาผ่านไป 8 ชั่วโมงของการดำเนินการด้วยอุปกรณ์ GC-6890

จากภาพประกอบ 4-14 และ 4-15 พบว่าก๊าซเสียที่เกิดจากกระบวนการอบแห้งยางแท่ง STR 20 มีองค์ประกอบทางเคมีเป็นสารประกอบอินทรีย์จำพวกกรดไขมันระเหยง่ายที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ โดยมี Acetic acid เป็นองค์ประกอบหลัก ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยการศึกษาของ สมทิพย์ และคณะ (2550) ทั้งนี้เพราะภายในยางก้อนถ้วยจะมีส่วนประกอบของคาร์โบไฮเดรตที่อยู่ในเนื้อยาง ซึ่งจะถูกจุลินทรีย์ย่อยสลายด้วยกระบวนการหมักภายใต้สภาวะไร้อากาศ กลายเป็นแอลกอฮอล์ชนิดต่าง ๆ เช่น บิวทานอล โพรพานอล ฯลฯ ด้วยปฏิกิริยา Hydrolysis ของจุลินทรีย์ทำให้เกิดกรดไขมันระเหยง่ายและ Peptide (Hasma *et al.*, 1990)

เมื่อพิจารณา Peak area ของโครมาโทแกรมประกอบที่ 4-14 และ 4-15 ตามลำดับ พบว่าความเข้มข้นของกรดไขมันระเหยง่ายที่ทางออกของคอลัมน์บรจุ โดย Peak area ของอะซิติก จะปรากฏที่ตำแหน่ง Retention time ที่ตำแหน่ง 6.144 สำหรับก๊าซเสียที่เข้าของคอลัมน์ ซึ่งเป็นลักษณะเด่นที่สุด โดยมีสัดส่วนพื้นที่เป็น 97% ของพื้นที่ 100% จากพื้นที่ Peak area ของ VFA

ทั้งหมด โดยที่ทางเข้าจะพบว่ามี VFA ตัวอื่นๆได้แต่จะพบปริมาณน้อย โดยอาศัยสมมุติฐานจากผลงานวิจัยของ ปราณี และคณะ (2554) พบว่าหลังจากตำแหน่ง Retention time ของกรดอะซิติก ในช่วง 6.144-9 จะเป็นตำแหน่งของ VFA ตัวอื่นๆ เช่น Propionic acid, Isobutyric acid, Butyric acid, Isovaleric acid และ Valeric acid ตามลำดับ และเมื่อพิจารณาที่ขาออกของคอลัมน์บรรจุจาก โครมาโทแกรมที่ 4-15 พบว่าขนาดของ Peak area ที่ปรากฏที่ตำแหน่งใกล้เคียงกันซึ่งเป็นตำแหน่ง ที่ Retention time มีค่าเป็น 6.218 พบว่าความสูงของ Peak area มีค่าน้อยมากซึ่งแสดงถึงปริมาณของ กรดอะซิติกที่ออกจากคอลัมน์มีน้อยมาก และสาร VFA ตัวอื่นๆก็ไม่ปรากฏ ดังนั้นสารละลายไอ รอน(III)คีเลทมีความสามารถในการกำจัดกรดอะซิติกได้ดีแล้วยังสามารถที่บำบัด VFA ตัว อื่นๆ ได้เช่นกัน

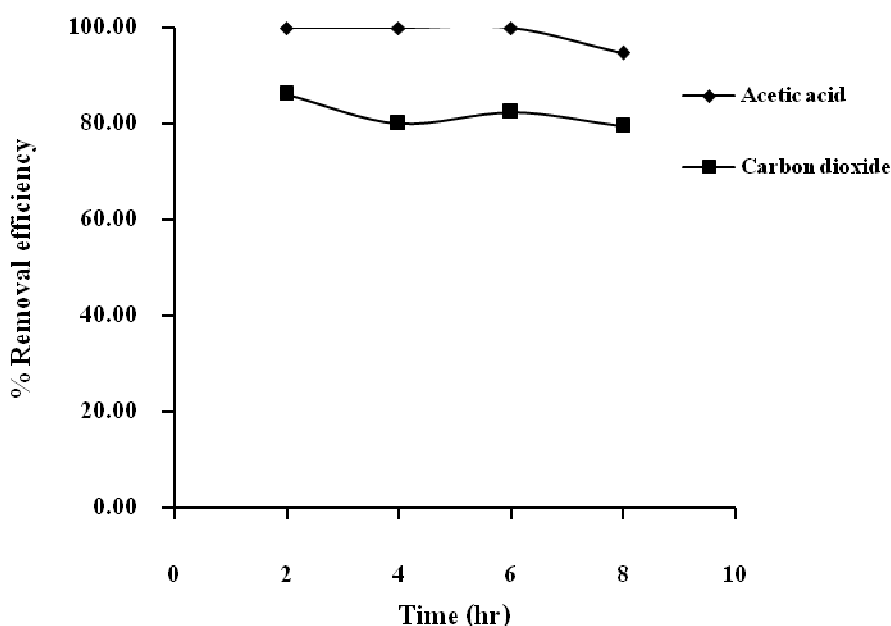
#### ประสิทธิภาพในการบำบัดของ Packed column

เพื่อตรวจสอบว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของสมการที่ (4-2) สามารถใช้ทำนาย ประสิทธิภาพการบำบัดกรดอะซิติกได้ จึงต้องทำการทดสอบแบบจำลองโดยการนำสภาวะที่ เหมาะสมจากตารางที่ 4-7 มาทดลองศึกษาหาประสิทธิภาพการบำบัดกรดอะซิติกจริง ผลการ ทดลองที่ได้แสดงในตารางที่ 4-8

ตารางที่ 4-8 แสดงสภาวะการดำเนินการที่เหมาะสมของการบำบัดกรดอะซิติกโดยใช้สารละลายไอ รอน(III)คีเลทในคอลัมน์บรรจุ โดยใช้ GC 6890 เมื่ออัตราการไหลของก๊าซเฉื่อยที่เข้าระบบคงที่ 40 L/min

Time (hr)	Acetic acid removal eff. (%)
2	100.00
4	100.00
6	100.00
8	94.80
<b>Average</b>	<b>98.70</b>

จากตารางที่ 4-8 พบว่าระบบมีประสิทธิภาพการบำบัดกรดอะซิติกเป็น 100% ในช่วง 6 ชั่วโมงแรก และประสิทธิภาพจะลดลงเป็น 94.80% เมื่อเวลาผ่านไป 8 ชั่วโมง โดยมีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของประสิทธิภาพกับเวลาดังภาพประกอบที่ 4-16



ภาพประกอบที่ 4-16 แสดงประสิทธิภาพการบำบัดกรดอะซิติกและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากสถานะที่เหมาะสม

จากภาพประกอบ 4-16 พบว่าเมื่อใช้สารละลายไอรอน(III)คีเลทเป็นสารดูดซับสามารถบำบัด Acetic acid ได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงถึง 100% อย่างต่อเนื่องไปตลอดการทดลองถึง 6 ชั่วโมงและพบว่าเมื่อใช้สารดูดซับไปเป็นเวลา 8 ชั่วโมง ประสิทธิภาพการบำบัดกรดอะซิติกมีค่าสูงถึง 94.80% และพบว่าประสิทธิภาพในการบำบัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มีค่าสูงถึง 80% จากการทดลองพบว่าประสิทธิภาพในการบำบัดกรดอะซิติกสูงกว่าก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ เนื่องจากความสามารถในการดูดซับกรดอะซิติกและคาร์บอนไดออกไซด์จะขึ้นอยู่กับความสามารถในการละลายน้ำ (Bunyakan, 2006) โดยที่ค่าความสามารถในการดูดซับด้วยน้ำจะสัมพันธ์กับความสามารถในการละลายของสารแต่ละชนิด โดยสารที่สามารถละลายน้ำได้ดีก็สามารถดูดซับได้มากกว่าสารที่ละลายน้ำได้น้อย (ธีรภัทร์ และคณะ, 2553) ซึ่งค่าความสามารถในการละลายน้ำของสารพิจารณาจากค่า Henry's law constant ดังแสดงในตารางที่ 4-9

ตารางที่ 4-9 แสดงค่า Henry's law constant ของกรดอะซิติกและคาร์บอนไดออกไซด์

สาร	สูตรเคมี	ค่าคงที่ของ Henry ที่ 25 °C (atm m <sup>3</sup> mol <sup>-1</sup> )
กรดอะซิติก	CH <sub>3</sub> COOH	1.0×10 <sup>-7</sup>
ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์	CO <sub>2</sub>	2.94×10 <sup>-2</sup>

ที่มา: <http://www.arb.ca.gov/db/>

จากตารางที่ 4-9 เมื่อเปรียบเทียบค่า Henry's law constant ของกรดอะซิติกกับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์พบว่าค่า Henry's law constant ของกรดอะซิติกมีค่าน้อยกว่า ดังนั้นจึงทำให้ประสิทธิภาพในการบำบัดกรดอะซิติกได้ดีกว่าก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ดังภาพประกอบที่ 4-16 ซึ่งสารละลายสามารถบำบัดกรดอะซิติกได้มากกว่าก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

เมื่อทำการพิจารณาผลประสิทธิภาพจากการทดลองจริงที่เวลาต่างๆ โดยใช้สภาวะการดำเนินการที่เหมาะสมของการบำบัดกรดอะซิติกโดยใช้สารละลายไอรอน(III)คีเลทในคอลัมน์บรรจุขนาดต้นแบบ ผลแสดงดังตารางที่ 4-10

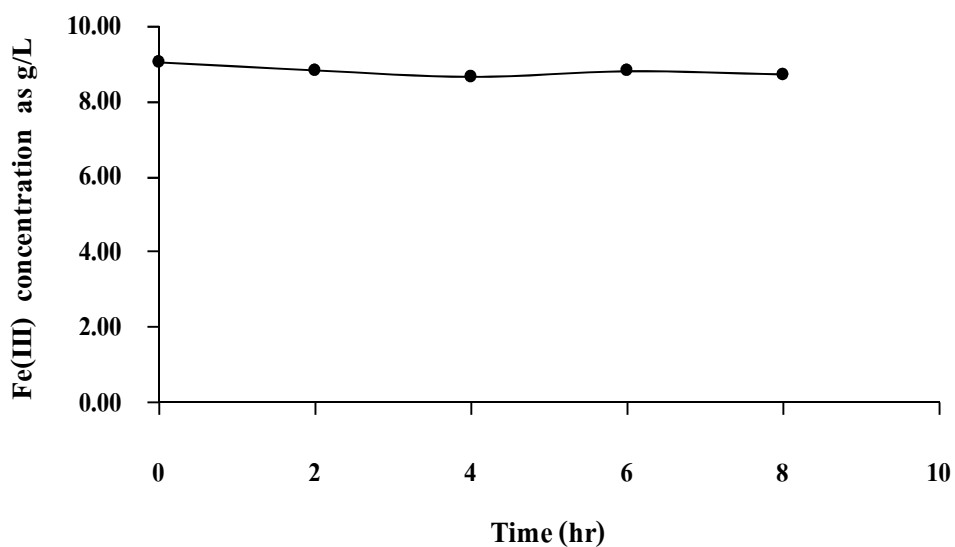
ตารางที่ 4-10 แสดงสภาวะการดำเนินการที่เหมาะสมของการบำบัดกรดอะซิติกโดยใช้สารละลายไอรอน(III)คีเลทในคอลัมน์บรรจุ เมื่ออัตราการไหลของก๊าซเสียที่เข้าระบบคงที่ 40 L/min

ความเข้มข้นสารละลายไอรอน(III)คีเลท (g/L)	ปริมาณการเติมอากาศ (L/min)	อัตราการไหลของสารละลายดูดซึม (L/min)	ประสิทธิภาพในการบำบัดกรดอะซิติก (%)	
			จากแบบจำลอง	จากการทดลอง
11.12	2	3	94.70	98.70

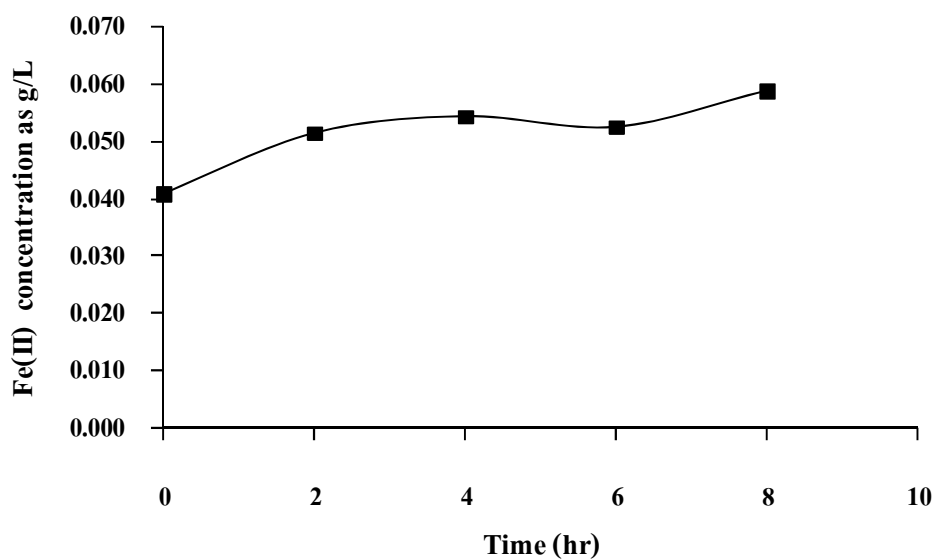
จากตารางที่ 4-10 พบว่าประสิทธิภาพในการบำบัดกรดอะซิติกที่ได้จากการทดลองโดยใช้สภาวะที่เหมาะสมจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ให้ประสิทธิภาพในการบำบัดกรดอะซิติกเฉลี่ย 98.97% โดยมีค่าคลาดเคลื่อนไปจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ประมาณ 4% ดังนั้นสมการแบบจำลองที่แสดงดังสมการที่ (4-2) มีความแม่นยำเพียงพอสำหรับการนำไปใช้ทำนายประสิทธิภาพการบำบัดกรดอะซิติกด้วยสารละลายไอรอน(III)คีเลทในคอลัมน์บรรจุขนาดต้นแบบในช่วงของตัวแปรที่ทำการศึกษาได้

### ความเข้มข้นของสารละลายไอออน(III)คิเลท

ภาพประกอบที่ 4-17 แสดงความเข้มข้นของสารละลายไอออน(III)คิเลท กับเวลาที่ได้จากการทดลองบำบัดก๊าซเสียจริงและเป็นการทดลองโดยไม่มีการเติมอากาศสำหรับการฟื้นฟูสภาพสารละลายไอออน(III)คิเลทเพิ่มเติม พบว่าเมื่อเวลาการดำเนินผ่านไป 8 ชั่วโมง ค่าความเข้มข้นของสารละลายไอออน(III)คิเลทลดลงเพียงเล็กน้อยซึ่งสอดคล้องกับความเข้มข้นของสารละลายไอออน(II)คิเลทที่เพิ่มขึ้นเล็กน้อยดังภาพประกอบที่ 4-18



ภาพประกอบที่ 4-17 แสดงความเข้มข้นของสารละลายไอออน(III)คิเลทตลอดระยะเวลาดำเนินการ



ภาพประกอบที่ 4-18 แสดงความเข้มข้นของสารละลายไอออน(II)คิเลทตลอดระยะเวลาดำเนินการ

เมื่อพิจารณาประสิทธิภาพการบำบัดกรดอะซิติกสูงถึง 94.80% แสดงว่าปริมาณของก๊าซออกซิเจนที่มีในก๊าซเสียมีปริมาณที่เพียงพอสำหรับฟื้นฟูสภาพสารละลายไอรอน(III)คีเลทในสารดูดซึม ส่งผลทำให้ระบบคอลัมน์บรรจุมีประสิทธิภาพใกล้เคียงกับตอนเริ่มต้น ดังนั้นความเข้มข้นของสารละลายไอรอน(III)คีเลทที่ความเข้มข้น 11.12 g/L จึงเพียงพอต่อการนำไปใช้งานเพื่อบำบัดกรดอะซิติกในก๊าซเสียของระบบดูดซึมแบบเปียกจริง

และเมื่อพิจารณาค่า pH ของสาร ไอรอน(III)คีเลทที่ใช้มีแนวโน้มค่า pH ลดลงแต่ลดลงอย่างช้าๆ ของการดำเนินการ เป็นผลมาจากในตอนเริ่มต้นสารละลายไอรอน(III)คีเลทที่ใช้มี pH ในช่วง 7-12 และมีแนวโน้มของ pH มีค่าลดลงเพราะเนื่องจากการดูดซึมกรดอะซิติกจึงส่งผลทำให้ค่าของ pH มีค่าลดลงน้อยมาก และสารละลายมีอุณหภูมิที่สูงเนื่องจากการไหลเวียน (Circulation) ในระบบอย่างต่อเนื่อง แต่อย่างไรก็ตามถึงแม้ผลของอุณหภูมิที่มีค่าสูงขึ้นแต่ไม่ได้ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพในการบำบัดก๊าซเสียซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Sunda and Huntsman (2003) และจากการทดลองเมื่อทำการเริ่มระบบโดยใช้อัตราการไหลของก๊าซเสียที่เข้า Packed column จากการ By part ก๊าซเสียมาจากกระบวนการอบยางแท่งในอุตสาหกรรม พบว่าค่าความเร็วของก๊าซเสียที่อัตราการไหลคงที่ 40 L/min ที่ทุกการทดลองพบว่าความดันลดมีค่า 2 cm H<sub>2</sub>O คงที่ตลอดการทดลอง โดยที่ความเร็วของอากาศมีทิศทางจากด้านล่างขึ้นสู่ด้านบนของหอที่ไม่ส่งผลกระทบต่อทำให้เกิดการท่วม และไม่มีการไหลย้อนของสารดูดซึม

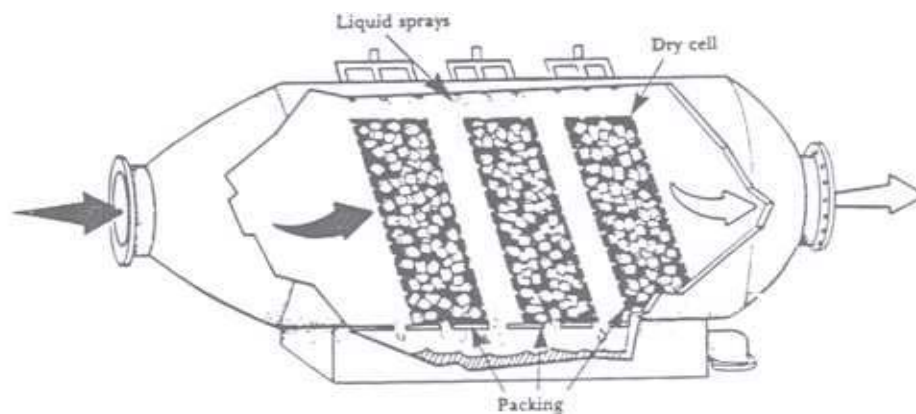
#### 4.3 การประยุกต์ใช้สารดูดซึมไอรอน(III)คีเลทกับหอดูดซึมแบบเปียกขนาดอุตสาหกรรม

##### 4.3.1 การหาประสิทธิภาพในการบำบัดกรดอะซิติกโดยใช้สารดูดซึมไอรอน(III)คีเลทในหอดูดซึมแบบเปียกของโรงงานอุตสาหกรรม

หอดูดซึมแบบเปียกที่ใช้ในโรงงานอุตสาหกรรมยางแท่งเพื่อควบคุมปัญหามลพิษทางอากาศที่เกิดจากเตาอบยาง เป็นระบบที่อาศัยหลักการดูดซึมเพื่อดูดซึมสารมลพิษในอากาศเสียที่ปล่อยจากเตาอบยาง โดยเดิมใช้น้ำเป็นสารดูดซึมใส่ตัวกลาง (Packing) ไว้ภายในเพื่อเพิ่มผิวของการสัมผัสระหว่างก๊าซและของเหลว ตัวกลางที่ใช้ในบริษัท สยามอินโดรับเบอร์ จำกัด มีลักษณะเป็นตัวกลางพลาสติกประเภท Pall ring หอดูดซึมแบบเปียกของโรงงานเป็นหอดูดซึมสแตนเลส มีขนาดกว้าง 3.6 m ยาว 2 m และสูง 2 m อากาศไหลเข้าและออกในแนวนอน (Cross flow) โดยใช้มอเตอร์ขับเคลื่อนที่ความเร็วรอบ 1500 rpm ท่อมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.2 m โดยมีอัตราการไหลของก๊าซเสีย 6,390 m<sup>3</sup>/min มีการสเปรย์น้ำจากด้านบน และสำหรับงานวิจัยนี้จะประยุกต์โดยการใส่สารละลายไอรอน(III)คีเลทมาเป็นสารดูดซึม โดยเลือกความเข้มข้นที่เหมาะสมซึ่งให้ประสิทธิภาพสูงสุดจากระบบคอลัมน์บรรจุขนาดต้นแบบมาเป็นแนวทางเบื้องต้น โดยประยุกต์ใช้ความเข้มข้นเริ่มต้นของ



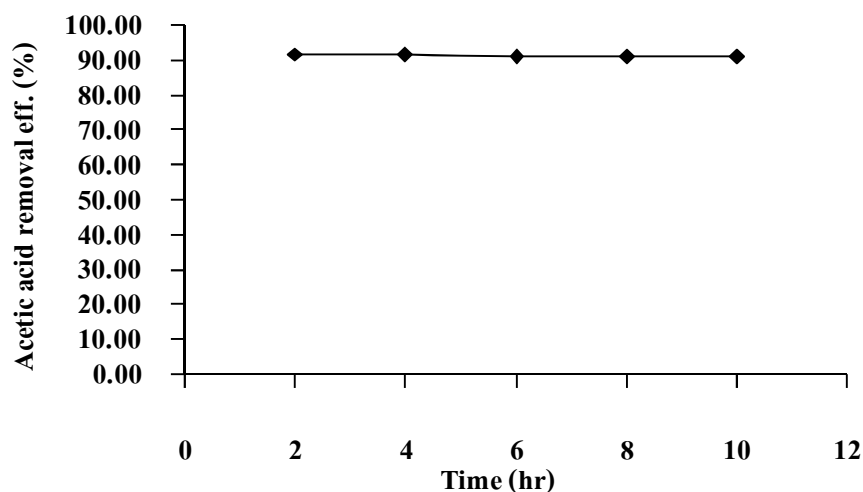
สารละลายไอออน(III)คีเลทที่ความเข้มข้น ( $C_{Fe,0}$ ) 11.12 g/L หอดูดซึมที่ใช้มีลักษณะดังภาพประกอบที่ 4-19



ภาพประกอบ 4-19 แสดงระบบดูดซึมแบบเปียก Three bed cross flow packed tower

ที่มา : [http://www.pcd.go.th/info\\_serv/Datasmell/design\\_scrubing.htm](http://www.pcd.go.th/info_serv/Datasmell/design_scrubing.htm)

ในการเก็บตัวอย่างก๊าซเสียทางโรงงานให้ความอนุเคราะห์ช่วยเจาะรูระบบดูดซึมแบบเปียก เพื่อให้สามารถเก็บตัวอย่างก๊าซเสียได้โดยใช้ Sorbent tube เพื่อทำการวิเคราะห์หาประสิทธิภาพการบำบัดกรดอะซิติกที่ได้เมื่อใช้สารละลายไอออน(III)คีเลทที่ความเข้มข้น 11.12 g/L ในหอดูดซึมแบบเปียกของโรงงานแสดงดังภาพประกอบที่ 4-20

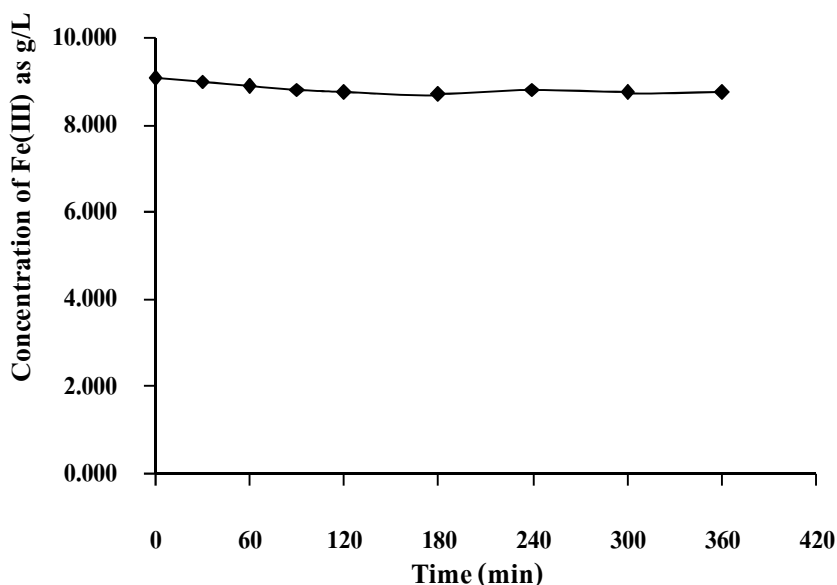


ภาพประกอบที่ 4-20 แสดงประสิทธิภาพการบำบัดกรดอะซิติกด้วยการใช้สารละลายไอออน(III)คีเลทในหอดูดซึมแบบเปียกของโรงงานอุตสาหกรรม

จากภาพประกอบที่ 4-20 พบว่าที่เวลาเริ่มต้นของการทดลองมีประสิทธิภาพในการบำบัดกรดอะซิติกสูงสุด 91.7% และเมื่อเวลาผ่านไป 10 ชั่วโมง พบว่าประสิทธิภาพยังคงมีค่าสูงถึง 90.76% ซึ่งระบบมีประสิทธิภาพการบำบัดกรดอะซิติกที่คงตัวตลอดการทดลอง

#### 4.3.2 การวัดค่าความเข้มข้นของสารละลายไอรอน(III)คิเลทในการบำบัดกรดอะซิติกตลอดระยะเวลาของการดำเนินการ

เมื่อใช้สารละลายไอรอน(III)คิเลทที่ความเข้มข้น 11.12 g/L และปริมาณอากาศเสียที่ไหลเข้าระบบบำบัดแบบเปียกที่อัตราการไหล 6,390 m<sup>3</sup>/min และอัตราการไหลของสารละลายไอรอน(III)คิเลทเป็น 33 L/min ซึ่งคิดเป็น L/G = 0.005 L/m<sup>3</sup> หลังจากนั้นทำการวิเคราะห์ความเข้มข้นของสารละลายไอรอน(III)คิเลทในระบบ โดยที่ไม่มีการควบคุมความเข้มข้นของสารละลายไอรอน(III)คิเลท ได้ผลดังภาพประกอบที่ 4-21

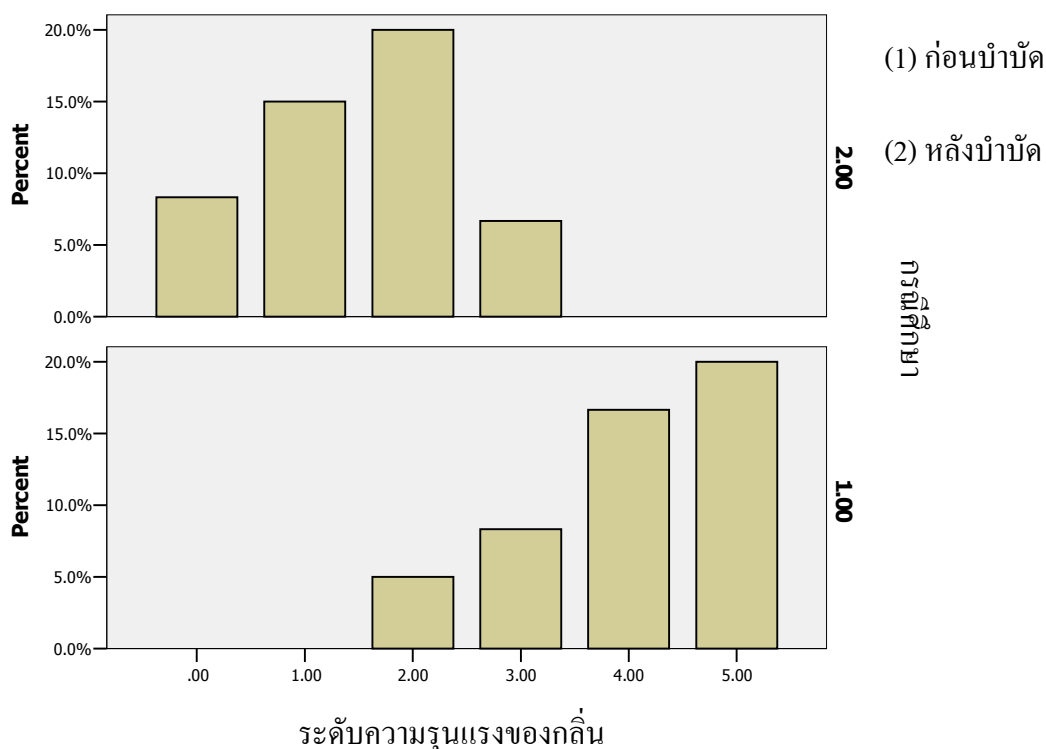


ภาพประกอบที่ 4-21 แสดงความเข้มข้นของของสารละลายไอรอน(III)คิเลทตลอดระยะเวลาดำเนินการ

จากภาพประกอบที่ 4-21 พบว่าการทดลองใช้สารละลายไอรอน(III)คิเลทมีแนวโน้มคงที่ตลอดเวลาที่ดำเนินการ 6 ชั่วโมง ซึ่งสอดคล้องกับประสิทธิภาพการบำบัดกรดอะซิติกที่มีค่าคงตัวตลอดการทดลอง ดังนั้นความเข้มข้นของสารละลายไอรอน(III)คิเลทที่ 11.12 g/L มีความเหมาะสมที่จะนำไปใช้กับหอดูดซึมแบบเปียกของโรงงานอุตสาหกรรม

#### 4.3.3 การสำรวจและสอบถามความคิดเห็นของพนักงานบริษัทสยามอินโดรับเบอร์ จำกัด ต่อระดับความแรงของกลิ่น

การศึกษาเพื่อตรวจสอบผลการบำบัดกรดอะซิติกโดยใช้สารดูดซึ่มไอรอน(III)คิเลทในระบบบำบัดกลิ่นจริงของโรงงาน นอกจากตรวจวัดประสิทธิภาพการบำบัดแล้วยังได้ใช้การสำรวจความคิดเห็นของพนักงานและชุมชนต่อระดับความรุนแรงของกลิ่นกรณีก่อนบำบัดและหลังบำบัด จำนวนทั้งสิ้น 30 คน โดยให้พนักงานกรอกแบบสอบถามแล้วนำผลของข้อมูลดิบที่ได้แสดงระดับความแตกต่างของกลิ่นที่สามารถสัมผัสได้ก่อนและหลังบำบัด แสดงดังภาพประกอบที่ 4-22



ภาพประกอบที่ 4-22 แสดงระดับผลการประเมินความแตกต่างของระดับความรุนแรงของกลิ่นก่อนบำบัด (1) และหลังจากการบำบัดด้วยการใช้สารละลายไอรอน(III)คิเลท (2) ตามลำดับ

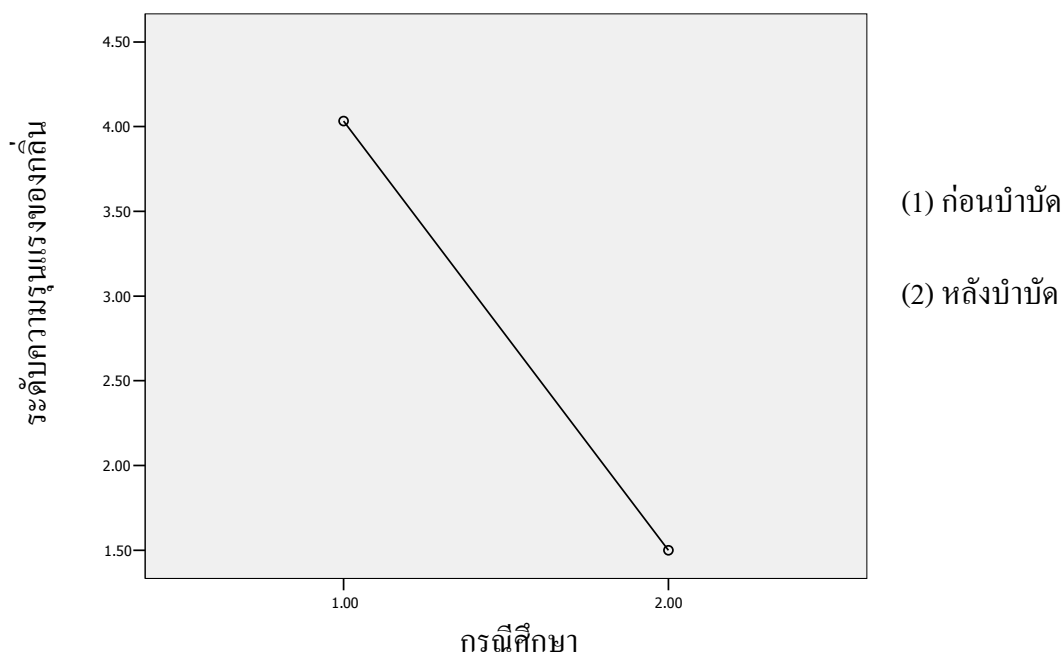
และนำข้อมูลที่ได้มาทำการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติโดยใช้โปรแกรม SPSS เพื่อเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ย โดยใช้การวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียว (One way ANOVA) และผลจากการวิเคราะห์ ANOVA ดังตารางที่ 4-11

ตารางที่ 4-11 แสดงผลการทดสอบข้อมูลโดยการวิเคราะห์โดย One way ANOVA

	N	Mean	Std. Deviation	Std. Error
กรณี ก่อนบำบัด	30	4.0333	0.99943	0.18247
กรณี หลังบำบัด	30	1.5000	0.93772	0.17120
Total	60	2.7667	1.59837	0.20635
Model			0.96906	0.12511
Fixed Effects				
Random Effects				1.26667

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	96.267	1	96.267	102.512	0.000
Within Groups	54.467	58	0.939		
Total	150.733	59			

จากตารางที่ 4-11 ผลจากการใช้ One way ANOVA ในการวิเคราะห์การสำรวจความความคิดเห็นต่อระดับความรุนแรงของกลิ่นก่อนบำบัดและหลังบำบัดกลิ่นที่เกิดขึ้น ประชากรส่วนใหญ่มีความรู้สึกของกลิ่นที่สามารถสัมผัสได้ซึ่งมีความแตกต่างกันอย่างชัดเจนอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ความเชื่อมั่น 95% ( $\alpha = 0.05$ ) ส่งผลให้ค่า F-significant มีค่าสูงถึง 102.51 ค่า P-value = 0.000 และนำผลค่าเฉลี่ยที่ได้จาก ANOVA แสดงดังภาพประกอบที่ 4-23 เพื่อแสดงความแตกต่างของระดับของกลิ่นก่อนและหลังบำบัดโดยใช้สารละลายไฮรอน(III)คีเลทในหอดูดซึมแบบเปียกของโรงงานอุตสาหกรรม



ภาพประกอบที่ 4-23 แสดงระดับความแตกต่างของระดับความรุนแรงของกลิ่นก่อนบำบัด (1) และหลังจากการบำบัดด้วยสารละลายไอออน(III)ลิเทียม (2) ตามลำดับ

จากภาพประกอบที่ 4-23 พบว่าระดับความรุนแรงของกลิ่นก๊าซเสียก่อนและหลังการบำบัดเป็นดังนี้ ก่อนการบำบัดพบว่าระดับของกลิ่นจะอยู่ที่ระดับ 4 คือ รู้สึกความเข้มข้นของกลิ่นที่เกิดขึ้นจะทำให้รู้สึกได้และเกิดความเดือดร้อนรำคาญเรื่องกลิ่น โดย ค่า  $STD = 0.999$  แต่เมื่อหลังจากการบำบัดกลิ่นด้วยการใช้สารละลายไอออน(III)ลิเทียม พบว่าระดับของกลิ่นจะอยู่ที่ระดับที่ 1 คือ กลิ่นที่เกิดขึ้นเป็นกลิ่นที่อ่อนมาก โดยปกติคนทั่วไปจะไม่ได้กลิ่นแต่คนที่ทดสอบกลิ่นและคนที่มีความรู้สึกไวต่อกลิ่นเป็นพิเศษจะรู้สึกได้ ซึ่งมี  $STD = 0.937$

#### 4.4 การศึกษาการวิเคราะห์ข้อมูลเชิงเศรษฐศาสตร์ในการบำบัดกรดอะซิติกในหอดูดซึมแบบเปียกขนาดอุตสาหกรรม

ในการดำเนินการทดลองบำบัดกลิ่นโดยใช้สารละลายไอออน(III)ลิเทียมเป็นสารดูดซึมในหอดูดซึมแบบเปียกขนาดอุตสาหกรรม จะพิจารณาถึงราคาของสารเคมีแต่ละตัวเพื่อความสะดวกในการพิจารณาเลือกมาใช้สารเคมีเพื่อความคุ้มค่าในการลงทุน แสดงดังตารางที่ 4-12

ตารางที่ 4-12 แสดงค่าสารดูดซึมแต่ละชนิด

ชนิดของสารดูดซึม	ราคา (บาท/ลิตร)
น้ำ (ซีรภัทร์ และคณะ, 2553)	3.5
โซเดียมไฮดรอกไซด์ (Commercial grade) (ซีรภัทร์ และคณะ, 2553)	20
โมโนเอทานอลเอมีน (Commercial grade) (ซีรภัทร์ และคณะ, 2553)	187
ไอรอน(III)คีเลท (งานวิจัยนี้)	45

ตารางที่ 4-13 แสดงค่าสภาวะการดำเนินการของระบบ (Operating condition) และการประเมินค่าใช้จ่ายเชิงเศรษฐศาสตร์ที่เกิดของหอดูดซึมแบบเปียกของโรงงานอบยางแท่ง

สภาวะการดำเนินการของระบบ (Operating condition)	
อัตราการไหลของแก๊สเสียที่เข้า (m <sup>3</sup> /min) (ตามพื้นที่หน้าตัดของ wet scrubber)	6,390
ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายไอรอน(III)คีเลท (g/L)	11.12
ปริมาตรสารละลายดูดซึม (ลิตร)	350
มูลค่าการลงทุน (Investment cost) หน่วย: บาท	
ค่าสารเคมีไอรอน(III)คีเลท (บาท/ลิตร)	45
*หมายเหตุ : ข้อมูลราคาสารเคมีจาก L.B.Science LTD, Thailand	
ค่ากำลังไฟฟ้าที่ใช้ตลอดระยะเวลาดำเนินการ (Electricity)	
ค่ากำลังไฟฟ้าที่ใช้ (w) (กิโลวัตต์ชั่วโมง)	0.25
ระยะเวลาการดำเนินการ(ชั่วโมง) (7.00-21.00 น. เวลาทำงานปกติ)	14
กำลังไฟฟ้าที่ใช้ ต่อวัน (กิโลวัตต์ชั่วโมง)	3.50
ค่าไฟฟ้าที่ใช้ (บาท/กิโลวัตต์ชั่วโมง)	2.45

ดำเนินการของระบบ (2 สัปดาห์) (กิโลวัตต์ชั่วโมง)	49
ค่าพลังงานไฟฟ้าทั้งหมด (บาท)	120.05

\*หมายเหตุ การคำนวณเป็นการคำนวณเบื้องต้นของการดำเนินการเมื่อใช้สารละลายไอออน(III)คือ  
เลขเป็นสารดูดซึมตลอดระยะเวลา 2 สัปดาห์

ตารางที่ 4 -14 การเปรียบเทียบอัตราค่าไฟฟ้าขายปลีกเฉลี่ยกับต้นทุนหน่วยสุดท้าย (การไฟฟ้าส่วน  
ภูมิภาค, 2551)

ประเภทอัตราค่าไฟฟ้า	ค่าไฟฟ้าเฉลี่ย (บาท/หน่วย)	
	หลักเกณฑ์ ต้นทุนหน่วยสุดท้าย	อัตราปัจจุบัน
บ้านอยู่อาศัย	3.27	2.84
กิจการขนาดเล็ก	3.06	3.26
กิจการขนาดกลาง	2.62	2.79
กิจการขนาดใหญ่	2.27	2.45
กิจการเฉพาะอย่าง	2.40	2.52
ส่วนราชการและองค์กรที่ไม่แสวงหากำไร	3.02	2.71
สูบน้ำเพื่อการเกษตร	4.06	2.28
ไฟฟ้าสำรอง	3.40	4.78
รวมทุกประเภท	2.69	2.70

ที่มา : <http://www.eppo.go.th/>

การคำนวณค่าไฟฟ้า จากสมการ (4-3)

$$\text{Cost} = W \times C \quad (4-3)$$

เมื่อ  $C =$  ค่าพลังงานไฟฟ้าต่อหน่วย (บาทต่อกิโลวัตต์ชั่วโมง)

$W =$  หน่วยการใช้ไฟฟ้า

ตารางที่ 4-15 แสดงค่าใช้จ่ายในการใช้สารดูดซึมไอรอน(III)คีเลทเปรียบเทียบกับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์

รายละเอียด	โซเดียมไฮดรอกไซด์	ไอรอน(III)คีเลท
ค่าสารเคมีเริ่มต้น (บาท/ลิตร)	20	45
อัตราการเติมสารเคมีเพิ่มเติม (kg/hr)	2 (ซีรภัทร์ และคณะ, 2553)	0 (งานวิจัยนี้)
ราคาสารเคมีที่เติม (บาท/ชั่วโมง)	40	0
ระยะเวลาดำเนินการ (ชั่วโมง/วัน)	14	14
รวมราคาสารเคมีเพิ่มเติม (บาท/วัน)	560	0
รวมค่าใช้จ่ายค่าสารเคมีเพิ่มเติม ระยะเวลา 2 สัปดาห์ (บาท)	7,840	0

จากตารางที่ 4-15 เมื่อทำการเปรียบเทียบราคาสารเคมีระหว่างไอรอน(III)คีเลท (Fe(III)EDTA) และโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) พบว่าการใช้สารละลายไอรอน(III)คีเลทในการบำบัดก๊าซเสียจากกระบวนการอบยางแท่งในการดำเนินการของระบบในระยะยาวพบว่าสารละลายไอรอน(III)คีเลทมีราคาที่ถูกกว่าการใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ โดยเมื่อใช้สารดูดซึมโซเดียมไฮดรอกไซด์ต้องทำการเติมสารดูดซึมในอัตรา 2 kg/hr (ซีรภัทร์ และคณะ, 2553) ซึ่งคิดเป็นค่าสารเคมี 40 บาท/ชั่วโมง เมื่อดำเนินการเป็นเวลา 2 สัปดาห์ จึงมีค่าใช้จ่ายสูงกว่าการใช้สารละลายไอรอน(III)คีเลท 7,840 บาท และนอกจากนี้สารดูดซึมไอรอน(III)คีเลทมีความคงตัวของสารดูดซึมที่สามารถใช้สารดูดซึมหดงกล่าวได้อย่างต่อเนื่อง ประสิทธิภาพในการบำบัดกรดอะซิติกที่สูง และการใช้งานได้นานโดยไม่ต้องเติมสารเคมีเพิ่มเติม เพราะสามารถฟื้นฟูสภาพด้วยอากาศเสียซึ่งมีองค์ประกอบของก๊าซออกซิเจนที่เกินพอสัมผัสกับสารดูดซึมหดงกล่าว ซึ่งแตกต่างจากสารดูดซึม NaOH ที่ใช้แล้วหมดไปไม่สามารถฟื้นฟูสภาพกลับมาใช้ใหม่ได้ การใช้สารละลายไอรอน(III)คีเลทจึงสามารถลดความยุ่งยากของระบบได้และช่วยลดค่าใช้จ่ายตลอดการใช้งาน ดังนั้นการใช้สารละลายไอรอน(III)คีเลทจึงเป็นทางเลือกที่เหมาะสมและมีความสะดวกต่อการนำไปใช้เพื่อบำบัดกลิ่นที่เกิดจากกระบวนการอบยางของโรงงานอุตสาหกรรมยางแท่งกว่าการใช้สารละลายชนิดอื่นๆ เช่น โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) และ โมโนเอทานอลเอมีน (MEA)



## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลอง

#### 5.1 สรุปผลการทดลอง

##### 5.1.1 การศึกษาการเกิดปฏิกิริยาระหว่างสารละลายไอออน(III)คีเลทกับกรดอะซิติก

จากการศึกษาการเกิดปฏิกิริยาระหว่างสารละลายไอออน(III)คีเลทกับกรดอะซิติก ในปฏิกิริยาแบบเบสในสถานะของเหลว สามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

1. ผลการวิเคราะห์จากการใช้เครื่อง UV-VIS spectroscopy เบื้องต้น พบว่า สารละลายไอออน(III)คีเลท มีแนวโน้มที่เปลี่ยนแปลงไป ซึ่งเป็นผลมาจากโครโมฟอร์อย่างง่ายเกิด Conjugated กันเอง หรือกับโครโมฟอร์ชนิดอื่น จึงทำให้เกิด Absorption band ขึ้นใหม่ และทำให้ Absorption spectra เปลี่ยนไปทางความยาวคลื่นเพิ่มขึ้น แสดงถึงผลของกรุปบางชนิดที่เข้าไป แทนที่ไฮโดรเจน เรียกว่า ออกโซโครม (Auxochrome) ส่งผลให้ค่าความยาวคลื่นที่ดูดกลืนได้ เพิ่มขึ้น ผลของออกโซโครมที่เกิดขึ้นจากการทดลอง เป็นชนิดการเปลี่ยนแปลงแบบ Bathochromic shift (Red shift) และนอกจากนี้ออกโซโครมที่มีผลกระทบต่อโครโมฟอร์ ขึ้นอยู่กับสภาพขั้วของสารนั้นๆ (Polarity) ของออกโซโครม เช่น เมทิลกรุป (-CH<sub>3</sub>) เอทิลกรุป (-C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>) และ ฮาโลเจนกรุป (-x) มาเกาะจึงมีผลทำให้เกิด Red shift

2. การเปลี่ยนแปลงเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของธาตุต่างๆ ก่อนและหลังทำปฏิกิริยา พบว่าทุกธาตุมีแนวโน้มที่ลดลง แต่ปริมาณของธาตุไฮโดรเจนและออกซิเจนที่เพิ่มขึ้นซึ่งเป็นผลของการดึงอิเล็กตรอนมาจากหมู่ ออกโซโครมที่มาจากกรุปเมทิล (-CH<sub>3</sub>) และคาร์บอนิล (-COOH) จากกรดอะซิติกจึงส่งผลให้แนวโน้มปริมาณธาตุออกซิเจนและไฮโดรเจนเพิ่มขึ้น และพบว่าสารหลังทำปฏิกิริยามีจำนวนคาร์บอนลดลงแสดงว่าสารละลายไอออน(III)คีเลทสามารถละลาย สภาพขั้วของกรดอะซิติกได้ดีทำให้ปริมาณของคาร์บอนลดลง ซึ่งสอดคล้องกับการวิเคราะห์ด้วย UV-VIS spectroscopy

3. จากการวิเคราะห์โดยใช้เทคนิคอินฟราเรดสเปกตรัม (Infrared spectral analysis) ชนิด FT-IR พบว่าสารก่อนทำปฏิกิริยาและหลังทำปฏิกิริยา มีลักษณะ โครงสร้างของโมเลกุลของ สารที่แตกต่างกัน เพราะมีหมู่ของฟังก์ชันของสารที่ปรากฏแตกต่างกันออกไป ซึ่งจะพบลักษณะที่เด่นชัดของสารหลังทำปฏิกิริยาโดยจะสามารถตรวจพบการสั่นของโมเลกุลของหมู่ฟังก์ชันของ

พวก Aliphatic groups เช่น  $-\text{CH}$ ,  $-\text{CH}_2$ - และ  $-\text{CH}_3$  ซึ่งเป็นไปในแนวทางเดียวกันกับการวิเคราะห์ด้วย UV-VIS spectroscopy

4. ผลจากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคนิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์สเปกโทรสโกปี (Nuclear magnetic resonance spectroscopy, NMR) ซึ่งศึกษา Chemical shift เป็นสิ่งบ่งบอกที่สำคัญถึงชนิดของโปรตอนที่มีอยู่ในโมเลกุล ซึ่งค่าดังกล่าวเป็นลักษณะเฉพาะตัวของโปรตอนแต่ละชนิด พบว่าหลังจากทำปฏิกิริยาจะมีหมู่เมธิลที่ต่ออยู่กับคาร์บอนิลจะเกิดเรโซแนนซ์ที่ตำแหน่งประมาณ 2 ppm ซึ่งแสดงว่าหมู่เมธิลที่ต่ออยู่กับคาร์บอนิลจะเกิดการแตกตัวของกรดอะซิติกเกิดขึ้น มารวมตัวกับโมเลกุลหรือโครงสร้างของสารละลายไอรอน(III)คีเลทจริง จึงทำให้สารมีลักษณะโครงสร้างโมเลกุลและลักษณะเฉพาะตัวของสารที่เปลี่ยนแปลงไป หรือกล่าวอีกนัยสำคัญอีกประการหนึ่งว่า สารละลายไอรอน(III)คีเลทสามารถทำปฏิกิริยากับกรดอะซิติกได้จริง และสามารถดูดซึมหมู่ของอะซิเตทมาเกาะกับสารละลายไอรอน(III)คีเลทได้

ดังนั้นผลที่ได้จาก CHNO-S analyzer, NMR และ FTIR จึงสอดคล้องกับผลที่ได้จาก UV-visible spectroscopy ซึ่งเป็นไปในทิศทางเดียวกัน กล่าวคือพบว่าสารตั้งต้นที่ใช้มีการเปลี่ยนแปลงไป ถึงแม้จะเป็นการยากที่จะเขียนเป็นสมการเคมีหรือสมการการดูดซึมของสารได้ แต่ก็สามารถสรุปได้ว่าสารละลายไอรอน(III)คีเลทสามารถทำปฏิกิริยากับกรดอะซิติก

### 5.1.2 การศึกษาประสิทธิภาพในการบำบัดกรดอะซิติกด้วยสารละลายไอรอน(III)คีเลทในคอลัมน์บรรจุ

จากการศึกษาการบำบัดกรดอะซิติกจากก๊าซเสียของกระบวนการอบยางแท่งโดยใช้สารละลายไอรอน(III)คีเลทในคอลัมน์บรรจุ โดยใช้เทคนิค RSM ในการออกแบบการทดลองแบบ CCD ทั้งหมด 17 การทดลอง จากการวิเคราะห์ผลการทดลองเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดกรดอะซิติกด้วยเทคนิคนี้ได้สมการแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่สามารถใช้ทำนายประสิทธิภาพการบำบัดกรดอะซิติกที่สภาวะต่างๆในช่วงขอบเขตของการศึกษาได้ สมการ 5-1

$$\%RE = 111.37 - 3.597C_{Fe,0} + 6.926L + 1.276C_{Fe,0}A - 4.310LA \quad (5-1)$$

เมื่อ  $\%RE$  = ประสิทธิภาพการกำจัดกรดอะซิติก (ร้อยละ)  
 $A$  = ปริมาณการเติมอากาศสำหรับพื้นฟูสภาพสารละลายดูดซึม (L/min)

$C_{Fe,0}$  = ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายไอออน(III)คีเลท  
(g/L)

$L$  = อัตราการไหลของสารละลายดูดซึม (L/min)

และได้สถานะที่เหมาะสมที่ใช้ในการบำบัดกรดอะซิติกด้วยสารละลายไอออน(III)คีเลท แสดงดังตารางที่ 5-1

ตารางที่ 5-1 สถานะที่เหมาะสมในการศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดกรดอะซิติกด้วยสารละลายไอออน(III)คีเลทในคอลัมน์บรรจุ

Fe(III)EDTA concentration (g/L)	Air for regenerate (A) (L/min)	Liquid flowrate (L) (L/min)	Acetic acid removal efficiency (%)
11.12	2	3	94.70

จากการทดสอบสถานะที่เหมาะสมพบว่ามีความคลาดเคลื่อนน้อยกว่า 5% สามารถสรุปได้ว่าแบบจำลอง Linear interaction สามารถใช้ทำนายประสิทธิภาพการบำบัดกรดอะซิติกในคอลัมน์บรรจุโดยใช้สารละลายไอออน(III)คีเลทได้ดี นอกจากนั้นพบว่าเมื่อทำการทดลองใช้สารละลายไอออน(III)คีเลทในการบำบัดกรดอะซิติกแล้วยังสามารถช่วยลดปริมาณของคาร์บอนไดออกไซด์ และกรดไขมันระเหยง่ายที่เป็นองค์ประกอบที่ทำให้เกิดกลิ่นอื่นๆ ซึ่งเป็นองค์ประกอบของก๊าซเสียที่เกิดขึ้นจากกระบวนการอบแห้งได้อีกด้วย

### 5.1.3 การศึกษาประสิทธิภาพในการบำบัดกรดอะซิติกโดยใช้สารละลายไอออน(III)คีเลทในหอดูดซึมขนาดอุตสาหกรรม

จากการศึกษาการบำบัดกรดอะซิติกโดยใช้สารละลายไอออน(III)คีเลทในหอดูดซึมแบบเปียกขนาดอุตสาหกรรม มีข้อสรุปคือ สารละลายไอออน(III)คีเลทให้ประสิทธิภาพการบำบัดกรดอะซิติกสูงถึง 91.70% จากการทดลองพบว่าเมื่อเวลาผ่านไป 10 ชั่วโมงประสิทธิภาพยังคงมีค่าสูงถึง 90.76% และมีค่าสูงกว่าการใช้น้ำเป็นสารดูดซึม ที่ให้ประสิทธิภาพในการดูดซึมเพียง 30% และเมื่อทำการเปรียบเทียบกับการใช้สารดูดซึมโซเดียมไฮดรอกไซด์ ที่ต้องมีการเติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้าสู่ระบบอยู่ตลอดเวลาในอัตรา 2 kg/hr ถึงจะให้ประสิทธิภาพสูงถึง 77% (ธีรภัทร์ และคณะ, 2553) แต่มีประสิทธิภาพที่น้อยกว่าการใช้สารดูดซึมไอออน(III)คีเลท

และเมื่อทำการเปรียบเทียบราคาสารเคมีระหว่างสารละลายไอรอน(III)คีเลท (Fe(III)EDTA) และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) พบว่าการใช้สารละลายไอรอน(III)คีเลทในการบำบัดก๊าซเสียจากกระบวนการอบยางแท่งในการดำเนินการของระบบในระยะยาว พบว่าสารละลายไอรอน(III)คีเลทมีราคาที่ถูกกว่าการใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ โดยเมื่อใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ต้องทำการเติมสารดูดซึมน้ำในอัตรา 2 kg/hr (ธีรภัทร์ และคณะ, 2553) ซึ่งคิดเป็นค่าสารเคมี 40 บาท/ชั่วโมง เมื่อดำเนินการเป็นเวลา 2 สัปดาห์ จึงมีค่าใช้จ่ายสูงกว่าการใช้สารละลายไอรอน(III)คีเลทถึง 7,840 บาท และนอกจากนี้สารดูดซึมน้ำไอรอน(III)คีเลทมีความคงตัวของสารดูดซึมน้ำที่สามารถใช้สารดูดซึมน้ำดังกล่าวได้อย่างต่อเนื่อง ประสิทธิภาพในการบำบัดกรดอะซิติกที่สูงและคงที่และการใช้งานได้นานโดยไม่ต้องเติมสารเคมีเพิ่มเติม เพราะสารละลายไอรอน(III)คีเลทสามารถฟื้นฟูสภาพด้วยอากาศเสียซึ่งมีองค์ประกอบของก๊าซออกซิเจนที่เกินพอมาสัมผัสกับสารดูดซึมน้ำดังกล่าว ซึ่งแตกต่างจากสารดูดซึมน้ำ NaOH ที่ใช้แล้วหมดไปไม่สามารถฟื้นฟูสภาพกลับมาใช้ใหม่ได้ และนอกจากนี้ผลจากการใช้แบบสอบถามความคิดเห็นมาทดสอบความพึงพอใจของพนักงานบริษัท สยามอินโด รีบเบอร์ จำกัด ถึงระดับความรุนแรงของกลิ่น โดยทำการวิเคราะห์ข้อมูลเชิงสถิติโดยใช้ One way ANOVA พบว่าก่อนและหลังการบำบัดกลิ่นก๊าซเสียจากปล่องควันมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ความเชื่อมั่น 95% ( $\alpha = 0.05$ ) จากการวิเคราะห์โดยใช้ One way ANOVA จากผลความความคิดเห็นต่อระดับความรุนแรงของกลิ่นก่อนบำบัดและหลังบำบัดกลิ่นที่เกิดขึ้น ส่วนใหญ่มีความรู้สึกของกลิ่นที่สามารถสัมผัสได้ซึ่งมีความแตกต่างกันอย่างชัดเจนอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ความเชื่อมั่น 95% ส่งผลให้ค่า F-significant มีค่าสูงถึง 102.51 ค่า P value = 0.000 โดยที่ระดับความรุนแรงของกลิ่นก๊าซเสียก่อนและหลังการบำบัดเป็นดังนี้ ก่อนการบำบัดพบว่าระดับของกลิ่นจะอยู่ที่ระดับ 4 คือ รู้สึกความเข้มข้นของกลิ่นที่เกิดขึ้นจะทำให้รู้สึกได้ และเกิดความเดือดร้อนรำคาญเรื่องกลิ่น โดยมีค่า STD = 0.999 แต่หลังจากการบำบัดกลิ่นด้วยการใช้สารละลายไอรอน(III)คีเลท พบว่าระดับของกลิ่นจะอยู่ที่ระดับที่ 1 คือ กลิ่นที่เกิดเป็นกลิ่นที่อ่อนมาก โดยปกติคนทั่วไปจะไม่ได้กลิ่นแต่คนที่ทดสอบกลิ่นและคนที่มีความรู้สึกไวต่อกลิ่นเป็นพิเศษจะรู้สึกได้ ดังนั้นสารละลายไอรอน(III)คีเลทจึงเป็นสารดูดซึมน้ำที่มีประสิทธิภาพและเป็นทางเลือกหนึ่งที่คุ้มค่าและมีความเหมาะสมต่อการนำไปใช้ในระดับอุตสาหกรรมได้

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 ในการออกแบบการทดลองการบำบัดกรดอะซิติกในคอลัมน์บรรจุด้วยโปรแกรม RSM ควรจะมีการปรับเปลี่ยนช่วงของตัวแปรที่ใช้ในการทดลองให้กว้างขึ้น เช่น ความเข้มข้นของการใช้สารละลายไอรอน(III)คีเลท และศึกษาในส่วนของ L/G ที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพ

ของการบำบัดกรดอะซิติค เพื่อสามารถช่วยลดปริมาณของของเหลวที่ใช้เป็นสารดูดซึมและครอบคลุมขอบเขตของการศึกษาได้มากยิ่งขึ้น

5.2.2 ควรมีการศึกษาถึงการเชื่อมโยงระหว่างระบบคอลัมน์บรรจุกับหอดูดซึมแบบเปียกของโรงงานที่สอดคล้องกันในการนำสารละลายไอรอน(III)คิเลทไปใช้ในการบำบัดกลิ่นของโรงงานอย่างต่อเนื่อง

5.2.3 ควรมีการศึกษาเกี่ยวกับจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาระหว่างสารละลายไอรอน(III)คิเลทกับกรดอะซิติค และศึกษาแบบจำลองของการดูดซึมที่ได้

5.2.4 ควรศึกษาวิธีการดูดก๊าซเสียที่มาจากกระบวนการอบยางแท่ง เพราะควันจำนวนมากฟุ้งกระจายอยู่ที่บริเวณหน้าเตาซึ่งส่งผลกระทบต่อสุขภาพการทำงาน



ภาพประกอบที่ 5-1 แสดงพื้นที่บริเวณหน้าเตาอบยาง ของบริษัท สยามอินโด รับเบอร์ จำกัด  
จ.พัทลุง

5.2.5 ควรหาแนวทางในการกำจัดกลิ่นในส่วนพื้นที่อื่นๆ ที่ส่งผลกระทบให้เกิดกลิ่น เช่น บริเวณพื้นที่เครื่องจักรในขั้นตอนการตัดและล้าง ดังภาพประกอบที่ 5-2 และบริเวณพื้นที่กักเก็บยางกันด้วย ดังภาพประกอบที่ 5-3 เพราะบริเวณเหล่านี้ยางจะได้รับความชื้นและถูกย่อยสลายด้วยโปรตีนที่มีอยู่ในยางก็ส่งผลให้เกิดกลิ่นเกิดขึ้น ควรมีการจัดการเรื่องสถานที่ในการกักเก็บยางกันด้วยให้ดีขึ้นกว่าเดิม



ภาพประกอบที่ 5-2 แสดงพื้นที่บริเวณในส่วนของกระบวนการล้างทำความสะอาดยาง ของบริษัท สยามอินโด รีบเบอร์ จำกัด จ.พิจิตร



ภาพประกอบที่ 5-3 แสดงพื้นที่เก็บหรือพักยางก้อนถ้วยก่อนผ่านกระบวนการตัดและการล้างทำความสะอาดของ บริษัท สยามอินโด รีบเบอร์ จำกัด

## บรรณานุกรม

- กรมควบคุมมลพิษ. 2544. รายงานฉบับสมบูรณ์ โครงการวิจัยพัฒนาเทคโนโลยีการจัดการและควบคุมมลพิษในอากาศ สืบค้นจาก [http://www.pcd.go.th/info\\_serv/Datasmell/P3.htm](http://www.pcd.go.th/info_serv/Datasmell/P3.htm)
- กรมโรงงานอุตสาหกรรม. กันยายน 2544. หลักปฏิบัติเพื่อการป้องกันมลพิษ (เทคโนโลยีการผลิตที่สะอาด) สำหรับอุตสาหกรรมรายสาขา: อุตสาหกรรมน้ำแข็ง อุตสาหกรรมยางแท่ง มาตรฐาน STR20
- กฎกระทรวงอุตสาหกรรม. 2548. เรื่องมาตรฐานและวิธีการตรวจสอบกลิ่นในอากาศจากโรงงานอุตสาหกรรม คณะกรรมการวิชาการสาขาลี้ดสิ่งแวดล้อม ประจำปี 2545-2545 วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์.
- คู่มือวิเคราะห์น้ำและน้ำเสีย. พิมพ์ครั้งที่ 1 พฤษภาคม 2545. 187-196. จรรยา อินทมณี. 2546. การวิเคราะห์น้ำและน้ำเสียเบื้องต้น. สงขลา: มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
- จรัญ บุญกาญจน์ จันทิมาชังศิริพร จรรยา อินทมณี รัตนา แซ่หลี. 2551. การกำจัดไฮโดรเจนซัลไฟด์ในก๊าซชีวภาพโดยใช้ wet-scrubber ร่วมกับปฏิกิริยาออกซิเดชัน. รายงานวิจัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์. 45 หน้า
- จรัญ บุญกาญจน์ จันทิมาชังศิริพร จรรยา อินทมณี ปัทมา อรุณราช. 2553. จลนพลศาสตร์ปฏิกิริยาออกซิเดชันและการกำจัดไฮโดรเจนซัลไฟด์ด้วยโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต วิทยานิพนธ์ปริญญาโท สาขาวิศวกรรมเคมี มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- จรรยา อินทมณี จรัญ บุญกาญจน์ และจันทิมา ชังศิริพร. การเตรียมและทดสอบหลอดดูดซับจากถ่านกัมมันต์กะลามะพร้าว สำหรับการวิเคราะห์สารอินทรีย์ระเหย.การประชุมวิชาการเทคโนโลยีและนวัตกรรมสำหรับการพัฒนาอย่างยั่งยืน
- วินัย นุตมากุล อุษณีย์ อุยะเสถียร เทวัญ ฉวางวงศานุกูล และไกรชาติ ตันตระการอาภา. 2550. การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารที่มีกลิ่นกับความแรงของกลิ่น. คณะสิ่งแวดล้อมและทรัพยากรศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล นครปฐม ภาควิชาวิทยาศาสตร์อณามัยสิ่งแวดล้อม คณะสาธารณสุขศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล กรุงเทพมหานคร Environment and Natural Resources Journal. 5(2):101-108.

ธีรภัทร์ ดันกุลโรจน์. 2552. การบำบัดกลิ่นในก๊าซเสียที่เกิดจากกระบวนการอบยางแท่งโดยการดูดซึมด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์และโมโนเอทานอลเอมีนในคอลัมน์บรรจุ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเคมี มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.

ปราณี อุษปะโค. 2554. การบำบัดกลิ่นในก๊าซเสียที่เกิดจากกระบวนการอบยางแท่งโดยใช้ตัวกรองทางชีวภาพในคอลัมน์บรรจุ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเคมี มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.

แม่น อมรสิทธิ์ และคณะ. 2552. หลักการและเทคนิคการวิเคราะห์เชิงเครื่องมือ. ศูนย์หนังสือจุฬาลงกรณ์ มหาวิทยาลัย กรุงเทพมหานคร. 10700

สมทิพย์ ด้านธีรวิชย์ สุนิดา ย่องเหล่ายุ่ง พรทิพย์ ศรีแดง และสุวลักษณ์ วิสุนทร. 2550. ประเด็นสิ่งแวดล้อมในปัจจุบันของอุตสาหกรรมยางแท่ง STR20 ในภาคใต้ของไทย. โครงการวิจัยปัญหามลพิษสิ่งแวดล้อมและแนวทางการลดปัญหาจากการใช้ยางกันด้วยเพื่อผลิตยางแท่งคณะเทคโนโลยีและการจัดการ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ เขตการศึกษาสุราษฎร์ธานี 1-13.

สมทิพย์ ด้านธีรวิชย์ ไก่วัส ราษฎร์ พรทิพย์ ศรีแดง และสุวลักษณ์ วิสุนทร. 2550. สารมลพิษที่สกัดจากยางกันด้วยซึ่งเป็นวัตถุอันตรายในอุตสาหกรรมยางแท่ง STR20 พิจารณาจากสวนยางถึงโรงงาน. โครงการวิจัยปัญหามลพิษสิ่งแวดล้อมและแนวทางการลดปัญหาจากการใช้ยางกันด้วยเพื่อผลิตยางแท่ง คณะเทคโนโลยีและการจัดการ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ เขตการศึกษาสุราษฎร์ธานี 14-24.

สมทิพย์ ด้านธีรวิชย์ สุนิดา ย่องเหล่ายุ่ง พรทิพย์ ศรีแดง สุวลักษณ์ วิสุนทร และพิมพ์พิมพ์ม เพ็ญจรรย์ส. 2550. การจำแนกสารประกอบอินทรีย์ที่เป็นสาเหตุของกลิ่นเหม็นในอุตสาหกรรมยางแท่ง STR20. โครงการวิจัยปัญหามลพิษสิ่งแวดล้อมและแนวทางการลดปัญหาจากการใช้ยางกันด้วยเพื่อผลิตยางแท่ง คณะเทคโนโลยีและการจัดการ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ เขตการศึกษาสุราษฎร์ธานี 25-35.

สมทิพย์ ด้านธีรวิชย์ สุนิดา ย่องเหล่ายุ่ง พรทิพย์ ศรีแดง สุวลักษณ์ วิสุนทร และพิมพ์พิมพ์ม เพ็ญจรรย์ส. 2550. การตรวจสอบเบื้องต้นของการบำบัดกรดไขมันระเหยในระบบดักจับแบบเปียกของอุตสาหกรรมยางแท่ง STR20. โครงการวิจัยปัญหามลพิษสิ่งแวดล้อมและแนว



ทางการลดปัญหาจากการใช้ยางกันด้วยเพื่อผลิตยางแท่ง คณะเทคโนโลยีและการจัดการ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ เขตการศึกษาสุราษฎร์ธานี 36-45.

สมทิพย์ ด้านธีรวณิชย์ เฉลิมพงศ์ อินทร์แก้ว พรทิพย์ ศรีแดง สุวลักษณ์ วิสุนทร และพิมพ์พิมพ์ 2550. การบำบัดกรดไขมันระเหยจากก๊าซที่ระบายออกมาจากที่อบยางกันด้วยของอุตสาหกรรมยางแท่ง STR20 ด้วยระบบตัวกรองทางชีวภาพ. โครงการวิจัยปัญหามลพิษสิ่งแวดล้อมและแนวทางการลดปัญหาจากการใช้ยางกันด้วยเพื่อผลิตยางแท่ง คณะเทคโนโลยีและการจัดการ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ เขตการศึกษาสุราษฎร์ธานี 46-57.

สุนารี ดิลกานนท์. 2548. การวิเคราะห์หักกลิ่นด้วยการดม (Sensory test) ตามวิธีการของJIS. สำนักเทคโนโลยีน้ำและการจัดการมลพิษโรงงานกรมโรงงานอุตสาหกรรมวารสารโรงงาน 29-46.

ศูนย์ข้อมูลวัตถุอันตรายและเคมีภัณฑ์ กรมควบคุมมลพิษ. 2544. เอกสารข้อมูลความปลอดภัยเคมีภัณฑ์ (MSDS). สืบค้นจาก <http://msds.pcd.go.th>

APHA, AWWA and WEF.1992. Standard Methods for the Examination of water and Wastewater, 18<sup>th</sup> ed., American Public Health Association, NewYork.

A.A. Kamnev, A.G. Shchelochkov, Yu.D. Perfiliev , P.A. Tarantilis and M.G. Polissiou. 2001. Spectroscopic investigation of indole-3-acetic acid interaction with iron(III). Journal of molecular structure . 563-564.

Aroonwilas, A., Veawab, A. and Tontiwachwuthikul, P.1999. Behavior of the Mass-Transfer coefficient of Structured Packing in CO<sub>2</sub> absorbers withchemical reactions. Ind. Eng. Chem. RES. 38:2044-2050.

M. Ahmadi, F. Vahabzadeh, B. Bonakdarpour, E. Mofarrah and M. Mehranian, J.2005. Application of the central composite design and response surface methodology to the advanced treatment of olive oil processing wastewater using Fenton's peroxidation.J.of Hazardous Materials B123 (2005) 187–195.

Cecile, B., Christian, S., and Thierry, H. 2001. Method and Apparatus for Treating Hydrogen

- Sulfide Containing Gas by Recirculating Reduced Catalyst Solution. PATENT ABSTRACTS OF JAPAN. JP 2001-025640.
- Chungsiriporn, J., Bunyakan, C., Intamane, J., Petmala, A., and Hayema, H. 2006. Feasibility Study of H<sub>2</sub>S Removal from Biogas by Oxidation Reaction in NaOCl Aqueous Solution. The First Joint PSU-UNS International Conference. 17-19 August 2006. Hatyai. Songkla. Thailand.
- Chen, L., Huang, J., and Yang, C.L. 2001. Absorption of H<sub>2</sub>S in NaOCl Caustic an Aqueous Solution. *Environmental Progress*, 20(3): 175-181.
- Claude, D., Patrice, L., and Jacques, Q. 1999. High Pressure Recovery Method for Sulfur. PATENT ABSTRACTS OF JAPAN. JP. 11-246206.
- Demmink, J.F., and Beenackers, A.A.C.M. 1998. Gas Desulfurization with Ferric Chelates of EDTA and HEDTA: New Model for the Oxidative Absorption of Hydrogen Sulfide. *Ind. Eng. Chem. Res.* 37: 1444-1453.
- Fenaroli's Handbook (Furia and Bellanca, 1975), Sigma – Aldrich (2003) and personal observation.
- Freudenthal, K., Otterpohl, R. and Behrendt, J. 2005. Absorption of odourous substances using selective gas-liquid separation processes. *Waste Management*. 25(9): 975-984.
- Galli, V., Olmo, N. and Barbas, C. 2002. *Journal of Chromatography*. 949(1-2): 367.
- Hesketh, H.E. and Cross, F.L. 1989. *Oder Control Including Hazardous Toxic Odors*. Technomic Publishing CO., Inc., USA.
- Horikawa, M.S., Rossi, F., Gimenes, M.L., Costa, C.M.M., and Da, M.G.C. 2004. Chemical Absorption of H<sub>2</sub>S for Biogas Purification. *Braz. J. Chem. Eng.* 21(3).
- I.W.A. Tan, 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.
- Jonathan, L., David, G. and Randal, J. 2008. Occupational hazards of carbon dioxide exposure. *Journal of Chemical Health and Safety of the American Chemical Society*. 16(2): 18-22.

- Joseph, G.T. and Beachler, D.S. 1981. Control of Gaseous Emission: Student Manual New York, Northrop Service.
- Kazuisa, T., Kunio, F., and Mari, K 2002. Hydrogen Sulfide Removing Material, Its Manufacturing Method and Filter using the Same. PATENT ABSTRACTS OF JAPAN. JP 2002-177716.
- McManus, D., and Martell, A.E. 1997. The Evolution Chemistry and Applications of Chelated Iron. Hydrogen Sulfide Removal and Oxidation Processes. Journal of Molecular Catalysis A: Chemical, 117: 289-297.
- Moretti, V., Caprino, F., Bellagamba, F., Turchini, G., Busetto, M., Giani, I., Paleari, M. and Pazzaglia, M. 2008. Fatty acid composition and volatile compounds of caviar from farm white sturgeon (*Acipenser transmontanus*). Analytica Chimica Acta. 617: 139- 147.
- Moosavi, R.G., Naddafi, K., Mesdaghinia, A., Vaezi, F., and Mohmoudi, M. 2005. H<sub>2</sub>S Removal in an Oxidation Packed Bed Scrubber using Different Chemical Oxidation. J. Applied Science. 5(4): 651-654.
- OSHA (2002), Occupational Safety and Health Administration; Available online: [www.OSHA.gov](http://www.OSHA.gov) ( 10 มกราคม 2555)
- Piche, S., Ribeiro, N., Bacaoui, A., and Larachi. 2005. Assessment of a Redox Alkaline/iron-chelate Absorption Process for the Removal of Dilute Hydrogen Sulfide in Air Emissions. Chemical Engineering Science 60: 6452-6461.
- Piche', S. and Larachi, F. 2006. Dynamics of pH on the Oxidation of HS<sup>-</sup> with Iron(III)Chelates in Anoxic Conditions. Chemical Engineering Science. 61: 7673-7683.
- Pagella.C., Favari De M. D. 2000. H<sub>2</sub>S Gas Treatment by Iron Bioprocess. Chemical Engineering Science. 55: 2185-2194.
- Richards, J. 1981. Control of Gaseous Emission, 2<sup>nd</sup> edition, North Carolina State University. USA.

- Saello, R., Chungsiriporn, J., Intamane, J., and Bunyakan, C. 2009. Removal of H<sub>2</sub>S in Biogas from Concentrated Latex Industry with Iron(III)chelate in Packed Column. *Songklanakarin J. Sci. Technol.* 31(2): 195-203.
- Sakdapanich, J.T. and Insom, K. 2006. High-resolution gas chromatography-mass spectrometry: Characterization and mechanism to generate the obnoxious odor in natural rubber. *Kautschuk Gummi Kunststoffe*.6: 382-387.
- Seyedeh, F.G.O., Fatemeh, T., Bagher, Y., and Fereshteh, E. 2007. *Biochemical Engineering Journal*. 39: 37-42.
- Schlegelmilch, M., Streese, J. and Stegmann, R. 2005. Odour management and treatment technologies. *Waste Management*.25: 928-939.
- Sunda and Huntsman (2003).Effect of pH, light, and temperature on Fe-EDTA chelation and Fe hydrolysis in seawater *Marine Chemistry* 84: 35-47.
- Welty, J. R., Wicks, C.E. and Wilson, R.E.1984. *Fundamentals of Momentum Heat and Mass Transfer*. JohnWiley&Sons, NewYork, p. 803.
- Yoshiro,W., Minoru,H., Yoshinori,M. 1982. Simultaneous removal of malodorant components. PATENT ABSTRACTS OF JAPAN. JP 57-171421.
- .2554 (online). Available:<http://www.thaiblogonline.com/peenok.blog?PostID=3462> (12 ตุลาคม 2553)
- .2554 (online). Available: [http://www.pcd.go.th/info\\_serv/Datasmell/P3.htm](http://www.pcd.go.th/info_serv/Datasmell/P3.htm) (10 ธันวาคม 2553)
- .2554 (online). Available: [www.safety-stou.com/UserFiles/File/54114-6.pdf](http://www.safety-stou.com/UserFiles/File/54114-6.pdf) (15 ธันวาคม 2554)
- .2554 (online): Available: <http://202.129.59.73/tn/waterIndustry07-54/waterindustry.htm> (20 ธันวาคม 2554)
- .2554(online): Available: <http://www.maceducation.com/e-knowledge/2422210100/23.htm> (21 ธันวาคม 2554)
- .2554 (online): Available: <http://ujutchemical.exteen.com/category/lab> (24 ธันวาคม 2554)
- .2555(online):Available:[http://www.promma.ac.th/main/chemistry/boonrawd\\_site/carboxylic\\_prop.htm](http://www.promma.ac.th/main/chemistry/boonrawd_site/carboxylic_prop.htm) (10 มกราคม 2555)

ภาคผนวก ก

ข้อมูลเบื้องต้นสารเคมี

### ก-1 กรดอะซิติก (Acetic acid)

สูตรโมเลกุล :  $\text{CH}_3\text{COOH}$

น้ำหนักโมเลกุล : 60.05 g/mol

ชื่อเรียกอื่น : ethanoic acid



คุณสมบัติ : เป็นของเหลวใสไม่มีสี มีกลิ่นฉุน แสบจมูก ระเหยได้ละลายน้ำได้ดี มีความเสถียร มีลักษณะเป็นผลึกที่อุณหภูมิต่ำกว่า 17 องศาเซลเซียส

จุดเดือด : 118 องศาเซลเซียส

จุดเยือกแข็งที่ : 17 องศาเซลเซียส

อันตรายต่อสุขภาพและสิ่งแวดล้อม :

**สัมผัสทางหายใจ** การหายใจเอาไอ ละอองหรือฝุ่นเข้าไปทำให้แสบไหม้จมูก คอและตา ไอ แน่นหน้าอก และหายใจติดขัด การสัมผัสเป็นเวลานานทำให้มีอาการ cyanosis (ผิวหนังและริมฝีปากเป็นสีเขียวคล้ำ) โรคปอดอักเสบ ทำลายปอดหรือ เสียชีวิตได้

**สัมผัสทางผิวหนัง** การสัมผัสถูกผิวหนังจะก่อให้เกิดการระคายเคือง เจ็บปวด เป็นผื่นแดง และบวม มีอาการแสบไหม้ เกิดเป็นตุ่มตามผิวหนัง และเนื้อเยื่อถูกทำลาย

**กินหรือกลืนเข้าไป** การกลืนกินเข้าไปทำให้แสบไหม้ปาก คอ และปวดท้อง เจ็บหน้าอก คลื่นไส้ อาเจียน ท้องร่วง ระบายน้ำ อ่อนเพลีย และเป็นแผลในท้อง ทำให้อาเจียน และทำลายปอด

**สัมผัสถูกตา** การสัมผัสถูกตาจะก่อให้เกิดการระคายเคือง เจ็บปวด น้ำตาไหล ทำให้ตาบวม เป็นผื่นแดง และ แสบไหม้ตา ถ้ารุนแรงอาจทำให้ตาบอดได้

**การก่อมะเร็ง ความผิดปกติอื่น ๆ** การหายใจเอาสารเข้าไปนานๆ จะทำลายปอด ถ้าถูกผิวหนังเป็นเวลาดีติดต่อกันทำให้เป็นโรคผิวหนัง เป็นโรคหลอดลมอักเสบ โรคปอด ทำลายฟัน ได้

**ความคงตัวทางเคมี** : สารนี้มีความเสถียร

**สารที่เข้ากันไม่ได้** : น้ำ ความร้อน สารออกซิไดซ์รุนแรง สารทำปฏิกิริยารุนแรงกับเบส

**สถานะที่ควรหลีกเลี่ยง** : ความชื้น

### ก-2 Hydrochloric acid (HCl)

สูตรโมเลกุล : HCl

สถานะ : ของเหลว , ก๊าซ

สี	:	ไม่มีสี
กลิ่น	:	ฉุน
น้ำหนักโมเลกุล	:	36.46 g/mol

#### อันตรายต่อสุขภาพอนามัย (Health effect) :

**สัมผัสทางหายใจ** การหายใจเอาไอระเหยของสารนี้เข้าไปจะก่อให้เกิดอาการไอ หายใจติดขัด เกิดการอักเสบของจมูก ลำคอ และทางเดินหายใจส่วนบน และในกรณีที่รุนแรง จะก่อให้เกิดอาการน้ำท่วมปอด ระบบหายใจล้มเหลว และอาจเสียชีวิตได้

**สัมผัสทางผิวหนัง** การสัมผัสถูกผิวหนังจะก่อให้เกิดการระคายเคืองเกิดผื่นแดง ปวดและเกิดแผลไหม้ การสัมผัสกับสารที่มีความเข้มข้นสูงจะก่อให้เกิดแผลพุพองและผิวหนังเปลี่ยน

**กินหรือกลืนเข้าไป** การกลืนหรือกินเข้าไปจะก่อให้เกิดการระคายเคือง จะก่อให้เกิดอาการปวด และเกิดแผลไหม้ในปาก คอ หลอดอาหาร และทางเดินอาหาร อาจก่อให้เกิดอาการ คลื่นไส้ และท้องร่วง และอาจทำให้เสียชีวิตได้

**สัมผัสถูกตา** - การสัมผัสถูกตาจะก่อให้เกิดการระคายเคืองและอาจก่อให้เกิดการทำลายได้ อาจทำให้เกิดแผลไหม้อย่างรุนแรง และก่อให้เกิดทำลายตาอย่างถาวรได้

**การก่อมะเร็ง ความผิดปกติอื่น ๆ** การสัมผัสกับไอระเหยของสารเป็นระยะเวลานานจะก่อให้เกิดการกัดกร่อนต่อกัน และทำให้เกิดฤทธิ์กัดกร่อน เช่นเดียวกับฤทธิ์ของการสัมผัสกรด .ในบุคคลที่มีอาการผิดปกติทางผิวหนัง หรือเป็น โรคทางตา จะมีความไวต่อการเกิดผลกระทบสารนี้ และไม่เป็นสารก่อมะเร็งตาม NTP จัดเป็นสารก่อมะเร็งประเภท 3 ตามบัญชีรายชื่อของ IARC

**ความคงตัวทางเคมี:** สารนี้มีความเสถียรภายใต้สภาวะปกติของการใช้และการเก็บ ภาชนะบรรจุของสารอาจเกิดการแตกออกและระเบิดได้เมื่อสัมผัสกับความร้อน

**สารที่เข้ากันไม่ได้:** โลหะ โลหะออกไซด์ ไฮดรอกไซด์ เอมีน คาร์บอนเนต สารที่เป็นเบส และสารอื่น ๆ เช่น โซดาไฟ โซลไฟด์ และฟอสฟอไรต์

**สภาวะที่ควรหลีกเลี่ยง:** ความร้อน และการสัมผัสโดยตรงกับแสง

**สารเคมีอันตรายที่เกิดจากการสลายตัว:** เมื่อสารนี้สัมผัสกับความร้อน จะเกิดการสลายตัวและปล่อยฟลูมหรือควันของไฮโดรเจนคลอไรด์ที่เป็นพิษและจะเกิดปฏิกิริยากับน้ำหรือไอน้ำ ทำให้เกิดความร้อน และเกิดฟลูมหรือควันของสารที่เป็นพิษและมีฤทธิ์การสลายตัวของสารจากปฏิกิริยาออกซิเดชัน เนื่องจากความร้อนจะทำให้เกิดฟลูม/ควันของก๊าซไฮโดรเจนซึ่งสามารถระเบิดได้

**อันตรายจากการเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์:** จะไม่เกิดขึ้น

### ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม (Environmental Impacts)

- เมื่อรั่วไหลลงสู่ดินคาดว่าสารนี้จะไม่เกิดการสลายตัวทางชีวภาพ และสารนี้อาจถูกดูดซึมเข้าสู่แหล่งน้ำใต้ดินได้
- สารนี้จะก่อให้เกิดอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตที่อาศัยในน้ำ จะเกิดอันตรายจากการเปลี่ยนแปลงค่าพีเอช
- ห้ามทิ้งลงสู่ระบบน้ำ น้ำเสีย หรือดิน

### ก-3 สารละลาย Sodium hydroxide (NaOH)

สถานะ	:	ของแข็ง
สี	:	ขาว
กลิ่น	:	ไม่มีกลิ่น
น้ำหนักโมเลกุล	:	40 g/mol

### อันตรายต่อสุขภาพอนามัย (Health Effect)

**สัมผัสทางหายใจ** การหายใจเข้าไปจะก่อให้เกิดการระคายเคือง และทำให้เกิดการทำลายต่อทางเดินหายใจส่วนบน ทำให้เกิดอาการจาม ปวดคอ หรือน้ำมูกไหล ปอดอักเสบอย่างรุนแรง หายใจติดขัด หายใจถี่เร็ว

**สัมผัสทางผิวหนัง** การสัมผัสถูกผิวหนัง จะก่อให้เกิดการระคายเคืองรุนแรง เป็นแผลไหม้ และเกิดเป็นแผลพุพองได้

**กินหรือกลืนเข้าไป** การกลืนหรือกินเข้าไป ทำให้แสบไหม้บริเวณปาก คอ ภาวะอาหาร ทำให้เป็นแผลเป็น เลือดออกในกระเพาะอาหาร อาเจียน ท้องร่วง ความดันเลือดลดต่ำลง อาจทำให้เสียชีวิต

**สัมผัสถูกตา** การสัมผัสถูกตา จะมีฤทธิ์กัดกร่อน ทำให้เกิดการระคายเคืองรุนแรง เป็นแผลแสบไหม้ อาจทำให้มองไม่เห็นถึงขั้นตาบอดได้

**การก่อมะเร็ง ความผิดปกติ** การสัมผัสสารติดต่อกันเป็นเวลานาน จะทำให้เกิดการทำลายเนื้อเยื่อ สารนี้มีฤทธิ์กัดกร่อนเนื้อเยื่อ

**ความคงตัวทางเคมี:** สารนี้มีความเสถียรภายใต้สภาวะปกติของการใช้และการเก็บ

**สารที่เข้ากันไม่ได้:** น้ำ, กรด, ของเหลวไวไฟ, สารประกอบอินทรีย์ของฮาโลเจน โดยเฉพาะไตรคลอโรเอทิลีน ซึ่งอาจก่อให้เกิดไฟหรือการระเบิด การสัมผัสในไตรมีเทนและสารประกอบไนโตรทำให้เกิดเกลือที่ไวต่อการกระแทก

**สถานะที่ควรหลีกเลี่ยง:** ความชื้น, ฝุ่น และสารที่เข้ากันไม่ได้



**สารเคมีอันตรายที่เกิดจากการสลายตัว :** โซเดียมออกไซด์ การทำปฏิกิริยากับโลหะเกิดก๊าซไฮโดรเจนที่ไวไฟ สารนี้ผสมความชื้นในอากาศและทำปฏิกิริยากับคาร์บอนไดออกไซด์ในอากาศเป็นสารโซเดียมคาร์บอเนต สารนี้มีฤทธิ์เป็นเบสเข้มข้น

**อันตรายจากการเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ :** จะไม่เกิดขึ้น

#### การปฐมพยาบาล (First Aid)

**หายใจเข้าไป** ถ้าหายใจเข้าไป ให้เคลื่อนย้ายผู้ป่วยออกสู่บริเวณที่มีอากาศบริสุทธิ์ ถ้าผู้ป่วยหยุดหายใจให้ช่วยผายปอด ถ้าหายใจลำบากให้ออกซิเจนช่วย นำส่งไปพบแพทย์

**กินหรือกลืนเข้าไป** ถ้ากลืนหรือกินเข้าไป อย่ากระตุ้นให้เกิดการอาเจียน ให้ดื่มน้ำหรือนมปริมาณมากๆ ห้ามไม่ให้สิ่งใดเข้าปากผู้ป่วยที่หมดสติ นำส่งไปพบแพทย์

**สัมผัสถูกผิวหนัง** ถ้าสัมผัสถูกผิวหนัง ให้ฉีดล้างผิวหนังทันทีด้วยน้ำปริมาณมากอย่างน้อย 15 นาที พร้อมถอดเสื้อผ้าและรองเท้าที่ปนเปื้อนสารเคมีออก นำส่งไปพบแพทย์ทันที ชักทำความสะอาดเสื้อผ้าและรองเท้าก่อนนำกลับมาใช้ใหม่

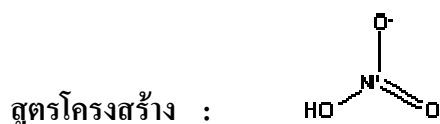
**สัมผัสถูกตา** ถ้าสัมผัสถูกตา ให้ฉีดล้างตาโดยทันทีด้วยน้ำปริมาณมากอย่างน้อย 15 นาที พร้อมกระพริบตาถี่ๆ นำส่งไปพบแพทย์ทันที

#### ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม (Environmental Impacts)

- ห้ามทิ้งลงสู่แหล่งน้ำ น้ำเสีย หรือดิน
- สารนี้ไม่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ
- สารนี้เป็นพิษต่อปลาก และแพลงก์ตอน ซึ่งส่งผลเป็นอันตรายเนื่องจากเปลี่ยนแปลงพีเอช

#### ก-4 กรดไนตริก (Nitric acid)

สูตรโมเลกุล :  $\text{HNO}_3$



สถานะ : สารละลาย

สี : ไม่มีสี

กลิ่น : ขุน

น้ำหนักโมเลกุล : 63.01 g/mol

จุดเดือด :  $83^{\circ}\text{C}$

จุดหลอมเหลว :  $-42^{\circ}\text{C}$

### อันตรายต่อสุขภาพอนามัย (Health Effect)

**สัมผัสทางหายใจ** การหายใจเข้าไปจะทำให้เกิดการระคายเคืองต่อทางเดินหายใจ ทำให้เกิดอาการเจ็บคอ ไอ หายใจติดขัดอย่างรุนแรง ในบางกรณีอาจเสียชีวิตได้

**สัมผัสทางผิวหนัง** การสัมผัสถูกผิวหนัง จะก่อให้เกิดผื่นแดง ปวด และเกิดแผลไหม้ ทำให้เกิดการระคายเคือง

**กินหรือกลืนเข้าไป** การกลืนหรือการกินเข้าไป จะก่อให้เกิดอาการเจ็บคอ และปวดท้อง

**สัมผัสถูกตา** การสัมผัสถูกตา จะก่อให้เกิดการระคายเคืองต่อตา ทำให้ตาแดง ปวดตา และทำให้มองเห็นไม่ชัดเจน

**ความคงตัวทางเคมี :** สารนี้ไม่เสถียร

### ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม (Environmental Impacts)

ไม่ก่อให้เกิดผลกระทบต่อระบบนิเวศน์ หากมีการใช้และจัดการกับผลิตภัณฑ์อย่างเหมาะสม

### การปฐมพยาบาล (First Aid)

**หายใจเข้าไป** ถ้าหายใจเข้าไปให้เคลื่อนย้ายผู้ป่วยออกไปสู่ที่ที่มีอากาศบริสุทธิ์ จัดให้ผู้ป่วยอยู่ในท่าสบาย นำส่งไปพบแพทย์

**กินหรือกลืนเข้าไป** ถ้ากลืนหรือกินเข้าไป ให้ผู้ป่วยบ้วนล้างปากด้วยน้ำ นำส่งไปพบแพทย์

**สัมผัสถูกผิวหนัง** ถ้ากลืนหรือกินเข้าไป ให้ผู้ป่วยบ้วนล้างปากด้วยน้ำ นำส่งไปพบแพทย์

**สัมผัสถูกผิวหนัง** ถ้าสัมผัสถูกผิวหนัง ให้ฉีดล้างผิวหนังด้วยน้ำ นำส่งไปพบแพทย์

**สัมผัสถูกตา** ถ้าสัมผัสถูกตาให้ฉีดล้างออกด้วยน้ำ นำส่งไปพบแพทย์

ภาคผนวก ข  
วิธีการวิเคราะห์

## ภาคผนวก ข วิธีการวิเคราะห์

### 1 การวิเคราะห์หาสภาพกรด (Acidity)

สภาพกรดของสารละลายใด ๆ คือ ความสามารถของสารละลายนั้นในการแตกตัวให้โปรตอน ซึ่งรวมทั้งกรดอ่อน เช่น กรดคาร์บอนิก กรดแทนนิก เป็นต้น นอกจากนี้ยังเกิดจากสารละลายเกลือที่แตกตัวในน้ำ เช่น เกลือเหล็ก(II)ซัลเฟต หรืออะลูมิเนียมซัลเฟต เป็นต้น สภาพกรดจะขึ้นอยู่กับจุดยุติที่ต้องการหรือที่กำหนดซึ่งมักจะใช้เครื่องวัดพีเอชหรืออินดิเคเตอร์เป็นตัวบอกจุดยุติ

เนื่องจากฟีนอล์ฟธาลินเป็นอินดิเคเตอร์ที่เปลี่ยนสีจากไม่มีสีเป็นสีชมพูที่พีเอชประมาณ 8.3 ดังนั้นจึงใช้เป็นจุดยุติมาตรฐานและเป็นอินดิเคเตอร์มาตรฐานในการหาสภาพกรดทั้งหมด (Total acidity) ซึ่งรวมทั้งคาร์บอนไดออกไซด์และกรดอ่อนเกือบทั้งหมด

#### 1.1 สารแทรกสอด

ถ้าในน้ำตัวอย่างมีคาร์บอนไดออกไซด์ ไฮโดรเจนซัลไฟด์หรือแอมโมเนีย ก็อาจจะทำให้เกิดปัญหาบ้างในการวิเคราะห์หาสภาพกรด เนื่องจากก๊าซเหล่านี้อาจจะสูญหายระหว่างขั้นตอนการเก็บตัวอย่าง การรักษาสภาพตัวอย่างหรือในขั้นตอนการวิเคราะห์ก็ได้ซึ่งจะก่อให้เกิดข้อผิดพลาดในทางลบต่อการวิเคราะห์ อย่างไรก็ตามปัญหานี้สามารถแก้ไขได้บ้างโดยการหาสภาพกรดในทันทีที่เก็บตัวอย่าง ปิดฝาขวดตัวอย่างให้แน่น หลีกเลี่ยงการเขย่าอย่างรุนแรง ระวังป้องกันมิให้น้ำตัวอย่างนำถูกอากาศมากเกินไป และอย่าให้น้ำที่เก็บมามีอุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิขณะเก็บตัวอย่าง

ถ้าในตัวอย่างน้ำที่ต้องการหาสภาพกรดมีคลอรีนอยู่ คลอรีนนี้อาจจะไปฟอกสีของอินดิเคเตอร์ได้ซึ่งคลอรีนสามารถกำจัดได้โดยการเติมสารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟต ความเข้มข้น 0.1 M ลงไปในตัวอย่างน้ำประมาณ 1-2 หยด

#### 1.2 การเก็บตัวอย่างน้ำ

ในการเก็บตัวอย่างน้ำเพื่อวิเคราะห์หาสภาพกรด อาจจะเก็บในขวดพีอีหรือแก้วบอโรซิลิเกตก็ได้ แล้วเก็บไว้ในที่มีอุณหภูมิต่ำที่ 4 องศาเซลเซียสโดยให้ใส่ตัวอย่างจนเต็มขวดและปิดฝาให้แน่นและควรจะวิเคราะห์ภายใน 24 ชั่วโมง ถ้าสงสัยว่าจะมีเชื้อจุลินทรีย์หรือสารที่อาจจะก่อให้เกิดปฏิกิริยาเคมีก็ควรจะวิเคราะห์ภายใน 6 ชั่วโมง ทั้งนี้เพื่อป้องกันการเปลี่ยนแปลงปริมาณ

สารที่ทำให้สภาพกรดเปลี่ยนแปลงไป เนื่องจากในกระบวนการทางชีววิทยาหรือจุลชีววิทยาอาจจะทำให้เกิดการสูญเสียหรือได้รับเพิ่มขึ้นซึ่งก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์หรือก๊าซอื่นๆจะถูกลบออกหรือเก็บในตู้ทำความเย็น ในกรณีที่มีความจำเป็นหรือมีปัญหาหลายๆก็สามารถเก็บรักษาสภาพตัวอย่างไว้ได้นานที่สุดไม่เกิน 14 วัน ตามที่กำหนดไว้โดย US EPA (United States Environmental Protection Agency)

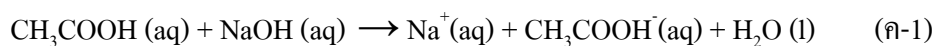
### 1.3 หลักการวิเคราะห์สภาพกรด

ในการวิเคราะห์หาสภาพกรด ต้องคำนึงถึงปัจจัยต่างๆ ดังนี้

1. ใช้ปริมาณตัวอย่างน้ำที่เหมาะสม
2. ใช้ความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานอัลคาไลน์ที่เหมาะสม เพื่อให้ปริมาตรในการไทเทรต มากกว่า 20 มิลลิลิตร แต่ไม่เกิน 25 มิลลิลิตร จากบิวเรต 50 มิลลิลิตร ทั้งนี้เพื่อความแม่นยำในการวิเคราะห์

### 1.4 ขั้นตอนการวิเคราะห์หากรดอะซิติก (Acetic acid) โดยวิธีการไทเทรต (Titration)

หลักการวิเคราะห์หาความเข้มข้นของกรดอะซิติก โดยวิธีไทเทรตมีหลักการประยุกต์ใช้โดยอาศัยพื้นฐานเรื่องกรด-เบส โดยสารละลายเบส NaOH จะทำปฏิกิริยากับกรดอะซิติกในอัตราส่วน 1:1 ดังแสดงในสมการที่ (ค-1) ดังภาพประกอบที่ ข-1



ดังนั้นจำนวนโมลของ NaOH ที่ถูกใช้ไปจะเท่ากับจำนวนโมลของกรดอะซิติก

### 1.5 การคำนวณ

1. หาจำนวนโมลของสารละลาย NaOH เมื่อใช้ Tritrant = 0.45 mL และความเข้มข้นของสารละลาย NaOH 0.02 M จะได้

$$\text{จะได้} \quad \frac{0.45 \text{ ml}}{1000 \text{ mL}} \times 0.02 \frac{\text{mol NaOH}}{\text{L}} = 9 \times 10^{-3} \text{ mol NaOH}$$

2. จากสมการเคมี (ค-1) คำนวณหาค่าจำนวนโมลของกรดอะซิติก จะได้

$$9 \times 10^{-3} \text{ mol NaOH} \times \frac{1 \text{ mol CH}_3\text{COOH}}{1 \text{ mol NaOH}} = 9 \times 10^{-3} \text{ mol CH}_3\text{COOH}$$

3. ใช้จำนวนปริมาตรของสารดูดซึม คือ 40 mL เพื่อหาความเข้มข้นของกรดอะซิติกจะได้

$$\frac{9 \times 10^{-3} \text{ molCH}_3\text{COOH}}{\left( (40\text{mL}) \left( \frac{1\text{L}}{1,000\text{mL}} \right) \right)} = 2.25 \times 10^{-7} \frac{\text{molCH}_3\text{COOH}}{\text{L}} = 2.25 \times 10^{-7} \text{ M}$$

4. กำหนดหาความเข้มข้นของกรดอะซิติก

ตาราง ข-1 แสดง Physical properties ของกรดอะซิติก

Physical constants:	HCOOH	CH <sub>3</sub> COOH
Density, 20.0 °C:	1.220 g/cm <sup>3</sup>	1.049 g/mL
Melting point:	8.4 °C	16.6 °C
Boiling point:	100.7 °C	117.9 °C
Formula weight:	46.03	60.06

ที่มา : OSHA , ID 186SG

จะได้

$$\frac{2.25 \times 10^{-7} \text{ molCH}_3\text{COOH}}{1\text{L}} \times \frac{60.06 \text{ gCH}_3\text{COOH}}{1 \text{ molCH}_3\text{COOH}} = 1.351 \times 10^{-5} \frac{\text{gCH}_3\text{COOH}}{\text{L}}$$

ทำการแปลงหน่วยจาก g/L เป็น mg/m<sup>3</sup> จะได้

$$\left( 1.351 \times 10^{-5} \frac{\text{gCH}_3\text{COOH}}{\text{L}} \right) \left( \frac{1,000\text{mg}}{1\text{gCH}_3\text{COOH}} \right) \left( \frac{1,000\text{L}}{1\text{m}^3} \right) = 13.51 \frac{\text{mg}}{\text{m}^3}$$

5. การเปลี่ยนความเข้มข้นของกรดอะซิติกในหน่วย ppm โดยการเปลี่ยน mg/m<sup>3</sup> โดยการทำการคูณด้วยค่าคงที่ดังต่อไปนี้ (OSHA ID-186SG)

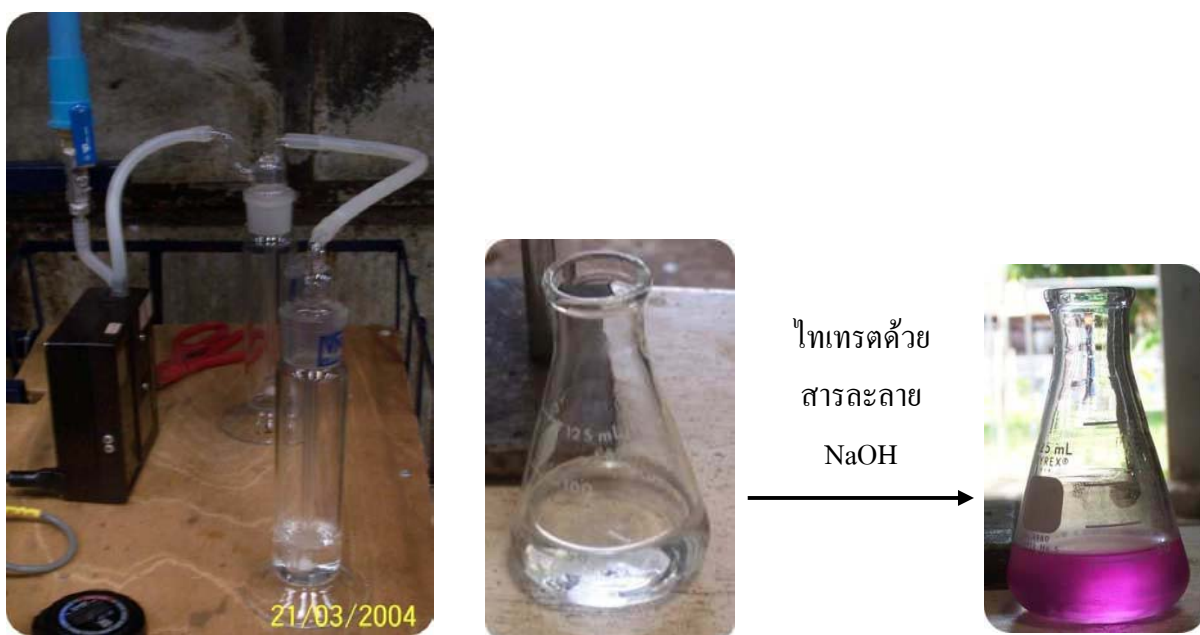
ตารางที่ ข-2 แสดงค่าคงที่ที่ใช้ในการแปลงหน่วย mg/m<sup>3</sup> เป็น ppm

Acid	Conversion Factor
HCOOH	0.532
CH <sub>3</sub> COOH	0.407

ที่มา : Acetic and formic acids in workplace atmospheres

$$\text{จะได้ } \frac{13.51\text{mg}}{\text{m}^3} \times 0.407 = 5.498 \text{ ppm}$$

จากโจทย์ตัวอย่างข้างต้น ผลการวิเคราะห์ตัวอย่างอากาศจากการบำบัดก๊าซเสียที่เกิดขึ้นจากกระบวนการอบยางแท่งโดยใช้สารละลายไอออน(III)ทิตเลท พบว่ามีไอระเหยของอะซิติกเท่ากับ 5.498 เมื่อเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐานของ OSHA ประเทศสหรัฐอเมริกา ซึ่งกำหนดไว้ให้มีค่าได้ไม่เกิน 10.0 ppm ดังนั้น ไอระเหยของกรดอะซิติกจึงมีค่าน้อยกว่ามาตรฐาน



ภาพประกอบที่ ข-1 แสดงการไทเทรต (Titration) หาปริมาณกรดอะซิติกโดยใช้สารละลาย phenolphthalein เป็นอินดิเคเตอร์เริ่มจากไม่มีสีจนได้จุดเปลี่ยนสี (สีชมพู)

## 2 การวิเคราะห์ตัวอย่างก๊าซเสียโดยใช้เทคนิค GC 6890

### 2.1 การเก็บตัวอย่าง

ทำการเก็บตัวอย่างอากาศที่เข้าและออกจากหอดูดซึมแบบคอลัมน์บรรจุ ทุกๆ 2 ชั่วโมง ด้วย Sorbent tube โดยหักปลายทั้งสองด้านของ Sorbent tube ออก และต่อปลายด้านทางเข้ากับปั๊มเก็บอากาศ ตั้งค่าอัตราการไหลของอากาศในการเก็บตัวอย่างเป็น  $1 \text{ L min}^{-1}$  ทำการเก็บตัวอย่างอากาศเป็นเวลา 60 min โดยวิธีการเก็บตัวอย่างแสดงดังภาพประกอบ ข-2 จากนั้นปิดปลายทั้งสองของ Sorbent tube ด้วยฝาพลาสติกให้สนิท



ภาพประกอบ ข-2 แสดงวิธีการเก็บตัวอย่างด้วยปั๊มเก็บอากาศ และ Sorbent tube

## 2.2) การวิเคราะห์ตัวอย่าง

### 2.2.1) การสกัดตัวอย่าง

ตัวอย่างที่เก็บใน Sorbent tube ก่อนนำมาวิเคราะห์หาความเข้มข้นของกรดไขมันระเหยง่าย จะต้องมีส่วนในการสกัดกรดไขมันระเหยง่าย ที่ถูกดูดซับไว้ด้วยผงคาร์บอน โดยเขี่ยผงคาร์บอนส่วนทางเข้าของ Sorbent tube ออกให้หมด ละลายผงคาร์บอนด้วยตัวทำละลายผสมประกอบด้วย เอทิลอะซิเตต : เอทานอล : น้ำ คือ 5:1:0.5 โดยปริมาตร นำตัวอย่างไปสกัดใน Ultrasonic bath ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 30 min จากนั้นทิ้งให้เย็น เติมอะซิโตนเข้มข้น 0.05% by volume (Internal standard) 10  $\mu$ l และกรองตัวอย่างผ่าน Syringe filter จนได้สารละลายใส เก็บตัวอย่างไว้ในขวดปิดสนิท เพื่อนำไปวิเคราะห์หาความเข้มข้นของกรดไขมันระเหยง่าย โดยใช้เครื่อง GC ต่อไป (ปราณี และคณะ, 2552)

### 2.2.2) การหาค่าความเข้มข้นของกรดไขมันระเหยง่าย

#### 2.2.2.1).กราฟมาตรฐานของกรดไขมันระเหยง่าย

เตรียมสารละลายมาตรฐานกรดไขมันระเหยง่าย ที่ความเข้มข้นต่างๆ โดยละลายในตัวทำละลายผสม จากนั้นเติม Internal standard 10  $\mu$ l และทำการวิเคราะห์หาพื้นที่ใต้กราฟของสารละลายมาตรฐานแต่ละความเข้มข้นด้วยเครื่อง GC โดยมีสถานะดำเนินการของเครื่อง GC ได้แก่



Inlet Temperature	: 260 °C
Oven Temperature	: 80 °C (1 min), 120 °C (10 °C/min), 240 °C (15 °C/min), 240 °C (2 min)
Detector Temperature	: 260 °C
Column	: HP-FFAP, 25 m, 0.32 mm, 0.5 µm
Carrier Gas Flow	: Helium @ 10.8 psi (42 cm/s), Constant Flow
Split Ratio	: 20/1
Inject Sample	: 1 µl

กราฟมาตรฐานที่ได้จะแสดงความสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่ใต้กราฟของอัตราส่วนของพื้นที่ที่พีกกรดอะซิติกกับอะซิโตน ดังภาพประกอบที่ ข-3

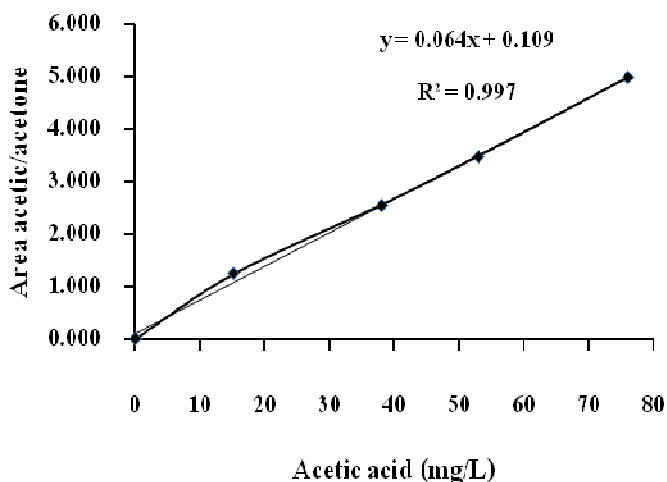
1). การคำนวณหาอัตราส่วนของพื้นที่ที่พีก สามารถหาได้จากสมการ (ค-2)

$$\text{อัตราส่วนของพื้นที่ที่พีก} = \frac{\text{พื้นที่ที่พีกของกรดอะซิติก (acetic acid)}}{\text{พื้นที่ที่พีกของอะซิโตน (acetone)}} \quad (\text{ค-2})$$

2). การคำนวณหาความเข้มข้นของกรดอะซิติกในหน่วย ppm (air) ได้ตามมาตรฐาน OSHA

ตารางที่ ข-3 แสดงสารละลายกรดไขมันระเหยง่ายมาตรฐานกรดอะซิติกในตัวทำละลายผสม

Concentration mg/L	Peak ratio Acetic : Aceton
0	0.000
15.17	1.234
38.01	2.550
52.93	3.470
76.02	4.985



ภาพประกอบที่ ข-3 แสดงกราฟมาตรฐานสำหรับวิเคราะห์หาความเข้มข้นของกรดอะซิติกโดยใช้วิธี GC 6890

### 2.2.3.2). ความเข้มข้นของกรดไขมันระเหยง่ายในตัวอย่าง

ตัวอย่างอากาศที่ผ่านการสกัดด้วยตัวทำละลายผสมจะถูกนำมาวิเคราะห์ความเข้มข้นของกรดไขมันระเหยง่ายโดยใช้เครื่อง GC ภายใต้สภาวะเดียวกับการเตรียมกราฟมาตรฐาน ซึ่งอัตราส่วนพื้นที่ใต้กราฟของกรดไขมันระเหยง่าย ที่ได้จะถูกนำมาเทียบกับกราฟมาตรฐาน เพื่อคำนวณค่าความเข้มข้นของกรดไขมันระเหยง่ายในตัวอย่าง

## 3 การวิเคราะห์หาความเข้มข้นของเหล็ก

### 3.1 การวิเคราะห์หาปริมาณของเหล็กรวม (Total Fe) ด้วยวิธีอะตอมมิกแอบซอร์ชันสเปกโทรโฟโตเมตรีหรือวิธีเอเอเอส (Atomic absorption spectrophotometry : AAS)

#### หลักการทั่วไป

วิธีการวิเคราะห์ด้วยอะตอมมิกแอบซอร์ชันสเปกโทรโฟโตมิเตอร์(AAS) วิธีการวิเคราะห์ความเข้มข้นหรือปริมาณของโลหะที่มีอยู่ในตัวอย่าง ดังนั้นวิธีการวิเคราะห์จึงแบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอน ประกอบด้วย

#### 3.1.1 การเก็บและการรักษาคุณภาพตัวอย่างน้ำ (Sample collection and preservation)

ในการหาปริมาณของธาตุโลหะจำนวนน้อยๆ นั้นข้อที่ต้องระมัดระวังมากๆ คือ การปนเปื้อนและการสูญหายของเนื้อโลหะ ซึ่งต้นเหตุที่สำคัญในการทำให้เกิดการปนเปื้อนของตัวอย่างน้ำ ได้แก่ ผุ่นในห้องทดลอง สิ่งเจือปนที่อยู่ในรีเอเจนต์ที่ใช้และที่อยู่ในเครื่องใช้ในห้องทดลอง โดยทั่วไปการทดลองที่เกี่ยวข้องกับสารที่เป็นของเหลว ภาชนะที่ใส่สารตัวอย่างนั้น

มีบทบาทสำคัญที่จะทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนเชิงบวก (Positive error) หรือความคลาดเคลื่อนเชิงลบ (Negative error) โดย

1. ภาชนะเป็นตัวให้สิ่งปนเปื้อนออกมาในขณะที่ทำการชะล้าง (Leaching) หรือเมื่อภาชนะเกิดกระบวนการคายสารออกมาจากผิว (Desorption) และ

2. ภาชนะดูดซับโลหะบางส่วนไว้ที่ผิว ทำให้ความเข้มข้นของธาตุโลหะน้อยลง ดังนั้นขวดเก็บตัวอย่างควรล้างขวดเก็บตัวอย่างให้สะอาด โดยทำตามลำดับต่อไปนี้ คือ (ก) ล้างด้วยน้ำยาล้างจานและน้ำ (ข) ล้างด้วยกรดไนตริก 1+1 และน้ำ (ค) ต่อด้วยกรดไฮโดรคลอริก 1+1 ตามด้วยน้ำ และ (ง) สุดท้ายล้างด้วยน้ำ DI

หมายเหตุ : กรดโครมิกใช้ได้ดีในการกำจัดสารอินทรีย์ที่อยู่บนผิวของเครื่องแก้ว อย่างไรก็ตามก็ดีต้องทำการล้างกรดโครมิกออกให้หมดด้วย มิฉะนั้นจะมีโลหะโครเมียมหลงเหลืออยู่ซึ่งจะเป็นสิ่งแทรกสอดในกระบวนการวิเคราะห์

### 3.1.2 การเตรียมตัวอย่างเพื่อวิเคราะห์โลหะทั้งหมด (Total Fe)

ในขณะที่ทำการเก็บตัวอย่าง ให้ทำตัวอย่างน้ำให้เป็นกรด (พีเอช 2) โดยใช้กรดไนตริก 1+1 แล้วทำการเติมตัวอย่างให้เต็มขวดแล้วปิดฝาเพื่อนำมาทำการวิเคราะห์ผลในทันที

### 3.1.3 สิ่งแทรกสอดในการวิเคราะห์

สิ่งแทรกสอดในการวิเคราะห์มีมากมายหลายชนิด แต่ชนิดที่ทำความยุ่งยากมากที่สุด ก็คือ สิ่งแทรกสอดทางเคมี อันเกิดจากปฏิกิริยาเคมีที่เกิดในเปลวไฟ ทำให้การวัดการดูดกลืนแสงของอะตอมของธาตุที่ต้องการวิเคราะห์คลาดเคลื่อนไป จำเป็นต้องหาวิธีการแก้ไขโดยการเติมเกลือพวกแคลเซียมลงไป เพื่อจัดการรบกวนของซิลิกาในการวิเคราะห์เหล็กและแมงกานีส

### 3.1.4 ขั้นตอนการวิเคราะห์

-เครื่องมือและอุปกรณ์

1. อะตอมิกแอบซอร์พชันสเปกโทรโฟโตมิเตอร์

-รีเอเจนต์

1. อากาศ อากาศที่ใช้ต้องสะอาดและแห้ง ซึ่งจะใช้อากาศที่มาจากเครื่องอัดอากาศ

2. แก๊สอะเซทิลีน ใช้ชนิดมาตรฐานการค้าที่บรรจุอยู่ในท่อ

3. สารละลายแคลเซียม

ซึ่งแคลเซียมคาร์บอเนตหนัก 630 กรัม ละลายในกรดไฮโดรคลอริก (1+5) 50 ลบ. ซม. บางครั้งจำเป็นต้องต้มสารละลายให้เดือดอย่างช้าๆ เพื่อที่จะให้ได้สารละลายใสทำให้เย็นและเติมน้ำกลั่นจนได้ปริมาตร 1,000 มิลลิลิตร

4. สารละลายโลหะมาตรฐาน ใช้สารละลายมาตรฐาน Ferric chloride ซึ่งมีความเข้มข้น 1 mg/mL ของบริษัท Farmitalia Carlo Erba ที่ความเข้มข้นต่างๆกัน โดยทำการเจือจางด้วย 2% กรดไนตริก

### 3.1.5 วิธีวิเคราะห์

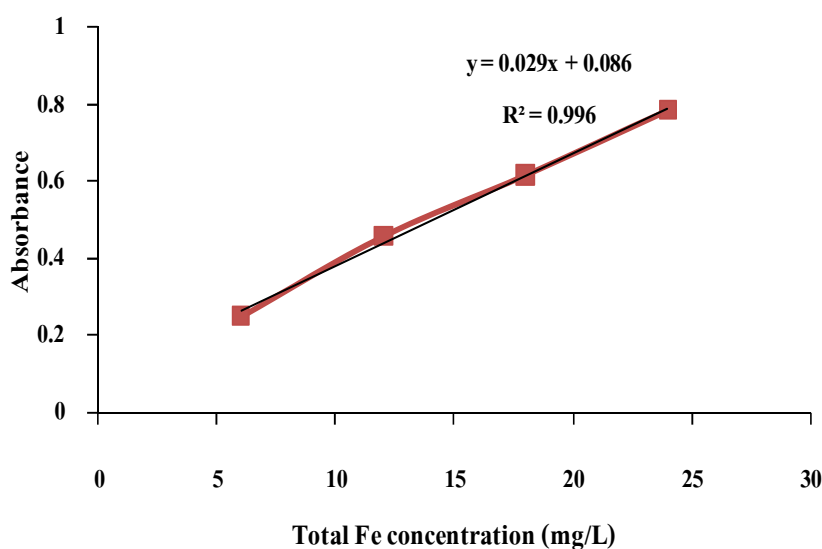
เนื่องจากอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโทรโฟโตมิเตอร์มีหลายแบบ ขึ้นอยู่กับบริษัทที่ทำจำหน่าย ซึ่งขั้นตอนการวิเคราะห์โดยทำการเลือก Fe เป็นฮอลโลวแคโทดแลมป์โดยใช้ความยาวคลื่นที่ 248.3 นาโนเมตร โดยใช้ความกว้างของ slit width 0.7 nm และปล่อยอากาศให้ผ่านเข้าไปในเครื่องมือและพร้อมกับการปล่อยแก๊สอะเซทิลีนเข้าไปแล้วเริ่มจุดเปลวไฟด้วยความระมัดระวัง และทำการจุ่มหลอดพลาสติกกรูเล็กของเครื่องอะตอมไมเซอร์ลงไปใต้น้ำกลั่นมากกว่า 1 นาที พร้อมกันนั้นก็ให้เครื่องมือให้อ่านสารละลาย (blank) และหลังจากนั้นจุ่มหลอดพลาสติกกรูเล็กของเครื่องอะตอมไมเซอร์ลงในสารละลาย มาตรฐานที่ทราบความเข้มข้น เมื่อทำการเตรียมข้อมูลสารละลายมาตรฐานก็สามารถทำการวิเคราะห์ความเข้มข้นของสารตัวอย่างได้ และเมื่อทำการวิเคราะห์เสร็จแล้วให้ดับเปลวไฟโดยปิดท่ออะเซทิลีนก่อนแล้วจึงปิดทางเดินอากาศ

### 3.1.6 การสร้างกราฟมาตรฐาน

เพื่อให้ได้สิ่งแวดล้อมเดียวกัน จึงจำเป็นต้องสร้างกราฟมาตรฐานทุกครั้งสำหรับการวิเคราะห์แต่ละครั้ง โดยเลือกสารละลายโลหะเหล็กมาตรฐานใช้สารละลายมาตรฐาน Ferric chloride ซึ่งมีความเข้มข้น 1 mg/mL มาทำการเจือจางด้วย 2% กรดไนตริก จนได้ปริมาตร 50 มิลลิลิตร ความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานอยู่ในช่วง 6 – 24 mg/L ซึ่งจะใช้สารมาตรฐานอย่างน้อย 4 ความเข้มข้น แล้วทำการจุ่มหลอดพลาสติกกรูเล็กลงในสารละลายแต่ละความเข้มข้นแล้ววัดค่าแอบซอร์พแบนซ์ ดังตารางที่ ข-4

ตารางที่ ข-4 แสดงผลจากการทำกราฟมาตรฐานโดยวิธีการใช้วิธี AAS

Fe concentration (mg/L)	Absorbance			
	STD 1	STD2	STD3	average
6	0.2490	0.249	0.248	0.249
12	0.456	0.456	0.457	0.456
18	0.615	0.614	0.614	0.614
24	0.785	0.780	0.780	0.782



ภาพประกอบที่ ข-4 แสดงกราฟมาตรฐานสำหรับวิเคราะห์หาความเข้มข้นของเหล็ก  
รวม (Total Fe) โดยใช้ AAS

### 3.1.7 การวิเคราะห์สารตัวอย่าง

1. ทำการล้างอะตอมไมเซอร์ จนกระทั่งค่ามาตรฐานของระบบอ่านให้คงที่แล้วจัดเครื่องมือให้อ่านศูนย์ (set zero)
2. จุ่มหลอดพลาสติกกรูเล็กลงในสารละลายตัวอย่างแล้ววัดค่าแอมบอร์บแนนซ์ (Absorbance) หรือค่าการดูดกลืนแสง

### 3.1.8 การคำนวณ

การคำนวณหาความเข้มข้นของสารตัวอย่างโดยคิดเป็น mg/L โดยอ่านจากกราฟมาตรฐานที่ถูกต้องซึ่งจะต้องมีนัยสำคัญของ  $R^2$  มีค่ามากกว่า 0.995 เป็นต้นไป

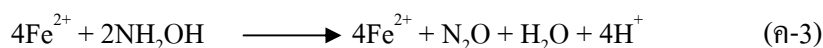
### 3.2 การวิเคราะห์หาปริมาณของเหล็กเฟอรัส (Fe(II)) ด้วยเทคนิควิธีวิธึเบิลสเปกโตรมิเตอร์

จะใช้สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ จะกล่าวถึงแต่วิธีหลังเพราะสะดวก ประหยัดและง่าย น้ำประปามักมีปริมาณของเหล็กต่ำและมักไม่มีตัวขัดขวาง โดยใช้วิธีการ Phenanthroline method (APHA, 1985)

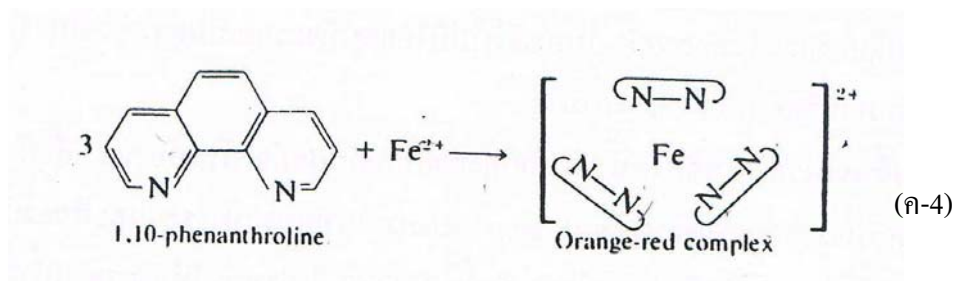
#### 3.2.1 หลักการ

เหล็กถูกทำให้ละลาย หลังจากนั้นรีดิวซ์ให้ไปอยู่ในรูป  $Fe^{2+}$  โดยการต้มด้วยกรด และไฮดรอกซีลลามีน และทำปฏิกิริยากับ 1,10 phenanthroline ที่ pH 3.2-3.3 พบว่า 3 โมเลกุลของ ฟีนแอนโทรลีนจะจับกับ 1 อะตอมของ  $Fe^{2+}$  เกิดเป็นสารเชิงซ้อนสีส้มแดง สีของสารละลายที่เกิดขึ้น เป็นไปตามกฎของเบียร์ ความเข้มของสีที่เกิดขึ้นไม่ขึ้นกับ pH ในช่วง 3-9 ถ้า pH อยู่ระหว่าง 2.9-3.5 ก็จะทำให้สีเกิดเร็ว เมื่อมีฟีนแอนโทรลีนในปริมาณเกินพอสามารถมาตรฐานอยู่ตัวได้ถึง 6 เดือนเป็นอย่างน้อย วัดได้ด้วยการเปรียบเทียบด้วยตาหรือด้วยเครื่องมือ

เนื่องจาก 1,10 phenanthroline ใช้วัดได้เฉพาะ  $Fe^{2+}$  ดังนั้นเหล็กในรูป  $Fe^{2+}$  จะถูกเปลี่ยนมาอยู่ในรูป  $Fe^{2+}$  ให้หมดโดยใช้ hydroxylamine ซึ่งเป็นตัวลดออกซิเจนปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นดังสมการ (ก-3)



หลังจากนี้ pH ของสารละลายจะถูกทำให้อยู่ในช่วง 3.2-3.3 โดยการเติมสารละลาย amoniumacetate buffer ลงไปแล้วจึงตามด้วย 1,10 phenanthroline พบว่า 3 โมเลกุลของ phenanthroline จะจับกับ  $Fe^{2+}$  1 ตัว เกิดเป็น complex ดังสมการที่ (ก-4)



ภาพประกอบที่ ข-5 แสดงโมเลกุลของสาร 1,10 phenanthroline ทำการรีดิวซ์เหล็กเฟอรัสเพื่อให้สารละลายเกิดเป็นสีส้มแดง

วิธีนี้ใช้หาเหล็กในรูป  $Fe^{2+}$  อย่างไรก็ตามต้องใช้ความระมัดระวังในการเก็บตัวอย่าง การนำตัวอย่างมาวิเคราะห์ เพื่อป้องกันการเปลี่ยนแปลงต่างๆ อันอาจเกิดขึ้นด้วย ในการหา  $Fe^{2+}$  โดยวิธีนี้นั้นจะเห็นว่า Phenanthroline ที่ใช้จะมากผิดปกติทั้งนี้เพื่อให้มากเกินพอ (นั่นคือให้ mole ratio ของ Phenanthroline ต่อ  $Fe^{2+} + Fe^{3+}$  มากกว่า 30)

ตัวขัดขวางสำหรับวิธีนี้ คือ ตัวเติมออกซิเจนอย่างแรง โซดาไนท์ ไนไตรท์ และ ฟอสเฟต นอกจากนี้พวกโลหะหนัก เช่น โครเมียม สังกะสี (ถ้ามีมากกว่า 10 เท่าของเหล็ก) โคบอลท์และทองแดง (ถ้ามากกว่า 5 มิลลิกรัมต่อลิตร) นิกเกิล (ถ้ามากกว่า 2 มิลลิกรัมต่อลิตร) บิสมัท แคลเซียม พรอทเงิน และ โมลิบดีนัม จะตกตะกอน การต้มกับกรดจะเปลี่ยน polyphosphate ให้เป็น orthophosphate และกำจัดโซดาไนท์กับไนไตรท์ การเติม hydroxylamine จะจำกัดค่าผิดพลาด เนื่องจากพวกตัวเติมออกซิเจนอย่างแรงที่มีอยู่เป็นจำนวนมากๆ ในกรณีที่มีโลหะหนักซึ่งเป็นตัวขัดขวางมากต้องเติม phenanthroline ให้เกินพอ เพื่อให้ไปแทนที่พวกที่ไปจับเป็น complex กับโลหะเหล่านั้น ส่วนใหญ่มักใช้สกัดเหล็กด้วย isopropyl ether ก่อนที่จะเติม phenanthroline ถ้าตัวอย่างมีสีหรือสารอินทรีย์อยู่มาก ให้ระเหยตัวอย่างให้แห้งแล้วละลายตะกอนซึ่งเผาให้เป็นแก้วอ่อนด้วยกรดใน porcelain crucible วิธีใช้หาเหล็กได้ในความเข้มข้นต่ำถึง  $10 \mu\text{g/l}$  โดยใช้เซลล์ขนาด 5 เซนติเมตร หรือยาวกว่านี้ ให้ทำเบลนค์โดยผ่านกระบวนการทุกอย่างเหมือนกับตัวอย่าง ในกรณีที่ใช้เซลล์ขนาด 1 เซนติเมตร วิธีนี้ใช้หาตัวอย่างซึ่งมีเหล็กในช่วง  $0.02-4.0 \text{ mg/l}$  ได้โดยตรง ถ้าเข้มข้นมากกว่านี้ให้ลดปริมาตรตัวอย่าง

### 3.2.2 เครื่องมือ

สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ ที่  $510 \text{ nm}$  พร้อมเซลล์ขนาด 1 ซม. (HP 8453 UV-VIS Spectrophotometer)

### 3.2.3 สารเคมี

ให้ใช้น้ำกลั่นและสารเคมีที่มีเหล็กต่ำ เก็บน้ำยาเคมีในขวดพร้อมจุกแก้ว กรดเกลือ และแอมโมเนียมอะซิเตทบัฟเฟอร์จะอยู่ตัวตลอดไปถ้าปิดจุกให้แน่น ไฮดรอกซิลลามีน ฟีนานโทโรลีน และสต็อกเหล็ก อยู่ตัวได้หลายเดือน สารละลายมาตรฐานเหล็กไม่อยู่ตัวให้เตรียมใช้แต่ละวัน โดยการเจือจางจากสต็อกเหล็ก

1. conc.HCl
2. สารละลายไฮดรอกซิลลามีน : ละลาย  $NH_2OH.HCl$  10 กรัมในน้ำกลั่น 100 มิลลิลิตร

3. สารละลายแอมโมเนียมอะซิเตทบัฟเฟอร์ : ละลาย  $\text{NH}_4\text{C}_2\text{H}_3\text{O}_2$  250 กรัมในน้ำกลั่น 150 มิลลิลิตร เติม glacial acetic ลงไป 700 มิลลิลิตร คนให้เข้ากัน
4. สารละลายฟิแนนโทรีน : ละลาย 1,10-phenanthroline monohydrate ( $\text{C}_{12}\text{H}_8\text{N}_2\cdot\text{H}_2\text{O}$ ) 100 มิลลิกรัม ในน้ำกลั่น 100 มิลลิลิตร ซึ่งได้เติม conc.HCl ลงไปแล้ว 2 หยด ถ้าสารละลายมีสีเข้มจะต้องเตรียมใหม่ (สารละลายนี้ 1 มิลลิลิตรเพียงพอสำหรับเหล็กไม่เกิน 1 ไมโครกรัม)
5. สารละลายสต็อกเหล็ก : ค่อยๆ เติม 20 มิลลิลิตร conc. $\text{H}_2\text{SO}_4$  ลงในน้ำกลั่น 50 มิลลิลิตร แล้วใช้สารละลาย 1.404 กรัม  $\text{Fe}(\text{NH}_4)_2(\text{SO}_4)_2\cdot 6\text{H}_2\text{O}$  ค่อยๆ เติม 0.1 นอร์มัล  $\text{KMnO}_4$  ที่ละหยดจนกระทั่งได้สีชมพูอ่อนๆ เติมน้ำกลั่นจนได้ 1,000 มิลลิลิตร เขย่าให้เข้ากัน สารละลายนี้ 1.00 มิลลิลิตร = 200 ไมโครกรัมเหล็ก
6. สารละลายมาตรฐานเหล็ก : ให้เตรียมในวันที่จะใช้โดยเลือกข้อใดข้อหนึ่ง
  - ก. ปิเปต 50.00 มิลลิลิตรสารละลายสต็อกเหล็ก ลงในขวดวัดปริมาตรขนาด 1 ลิตร แล้วเติมน้ำกลั่นจนได้ปริมาตร 1,000 มิลลิลิตร เขย่าให้เข้ากัน  
1.0 มิลลิลิตร = 10.00 ไมโครกรัมเหล็ก
  - ข. ปิเปต 25.00 มิลลิลิตรสารละลายสต็อกเหล็ก ลงในขวดวัดปริมาตรขนาด 1 ลิตร แล้วเติมน้ำกลั่นจนได้ปริมาตร 1,000 มิลลิลิตร เขย่าให้เข้ากัน  
1.0 มิลลิลิตร = 5.00 ไมโครกรัมเหล็ก
7. โปตัสเซียมเปอร์แมงกานेट 0.1 M : ละลาย 0.316 กรัม  $\text{KMnO}_4$  ในน้ำกลั่นเจือจางจนเป็น 100 มิลลิลิตร

### 3.2.4 วิธีการหา

#### 3.2.4.1 Ferrous Fe ( $\text{Fe}^{2+}$ )

หาค่า Ferrous Fe ที่จับเก็บเพราะเป็นไปได้ที่จะมีการเปลี่ยนแปลงของอัตราส่วน  $\text{Fe}^{2+} - \text{Fe}^{3+}$  กับเวลาในสารละลายกรด ในการหาเฉพาะ ferrous Fe ให้ acidify ตัวอย่างที่แยกมาต่างหากด้วย 2 มิลลิลิตร conc.HCl ต่อตัวอย่าง 100 มิลลิลิตร ณ ที่จุดเก็บ เติมตัวอย่างให้เต็มและปิดจุก เขย่า คูณตัวอย่างนี้มา 50 มิลลิลิตรเติมฟิแนนโทรีน 20 มิลลิลิตร และสารละลาย



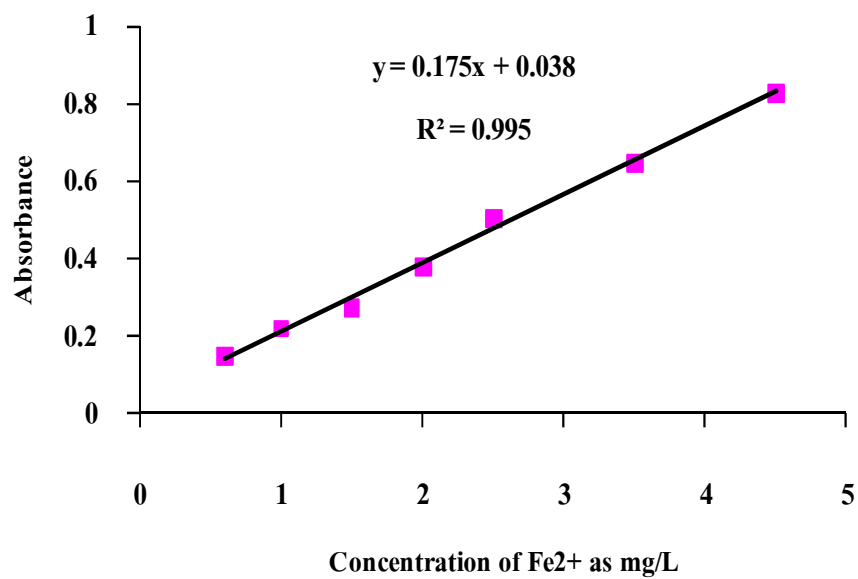
แอมโมเนียมอะซิเตทบัฟเฟอร์ 10 มิลลิลิตร เขย่าให้เข้ากันอย่างแรง เติมน้ำกลั่นจนได้ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ตั้งทิ้งไว้โดยไม่ให้ถูกแสง วัสดุที่เกิดขึ้นภายในเวลา 5-10 นาที (สีจะเกิดขึ้นเร็วมากเพราะเติมฟิแนนโทรลีนในปริมาณที่เกินพอ) ฟิแนนโทรลีนที่เติมลงไปเหมาะสมสำหรับ total Fe ที่น้อยกว่า 50  $\mu\text{g}$  ถ้ามี Fe มากกว่านี้ให้เพิ่มปริมาตรของฟิแนนโทรลีน หรือใช้สารเคมีที่เข้มข้นขึ้น) คำนวณ  $\text{Fe}^{3+}$  โดยลบ  $\text{Fe}^{2+}$  (3) จาก total Fe (1)

### 3.2.4.2 Color measurement

เตรียมอนุกรมของมาตรฐานโดยปิเปตสารละลายมาตรฐานเหล็กในช่วง 0.6 – 4.5 mg/L ทำทุกอย่างเหมือนในวิธีการหาโดยเริ่มต้นจาก 50 หรือ 100 มิลลิลิตรซึ่งที่ความยาวคลื่น 510 นาโนเมตร ซึ่งทุกๆจุดวัดโดยใช้สเปคโตรโฟโตมิเตอร์ ดังตาราง และจะใช้สำหรับการอ้างอิง (Reference) ให้ใช้น้ำหรือ Sample blank ที่เตรียมทุกขั้นตอนเหมือนตัวอย่างดังกล่าวข้างต้น เปลี่ยนค่า Absorbance ที่อ่านได้ไปเป็นความเข้มข้นของเหล็กโดยใช้ Calibration curve ดังภาพประกอบที่ ข-6

ตารางที่ ข-5 แสดงผลจากการทำกราฟมาตรฐานโดยวิธีการ Phenanthroline (APHA, 1985)

Fe concentration (mg/L)	Absorbance			
	STD 1	STD2	STD3	average
0.6	0.1510	0.151	0.151	0.151
1	0.222	0.222	0.223	0.222
1.5	0.275	0.275	0.275	0.275
2	0.383	0.383	0.383	0.383
2.5	0.505	0.504	0.502	0.504
3.5	0.648	0.648	0.648	0.648
4.5	0.829	0.830	0.829	0.829



ภาพประกอบที่ ข-6 แสดงกราฟมาตรฐานสำหรับวิเคราะห์หาความเข้มข้นของเหล็กเฟอรัส (Fe<sup>2+</sup>) โดยวิธีการ Phenanthroline

ภาคผนวก ค  
ผลการทดลอง

ค-1 ผลการทดลองการศึกษาพารามิเตอร์ในการดำเนินการที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการบำบัดกรดอะซิติกในคอลัมน์บรรจุขนาดต้นแบบ

ค-1.1 ศึกษาพารามิเตอร์ในการดำเนินการที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการบำบัดกรดอะซิติก โดยใช้สารละลายไอออน(III)คีเลท เป็นสารดูดซับในคอลัมน์บรรจุ Packed column

ตารางที่ ค-1.1 ข้อมูลความเข้มข้นของกรดอะซิติกและประสิทธิภาพการบำบัดกรดอะซิติก (%) กับเวลาในหน่วยนาที (min) ที่ความเข้มข้นของสารละลายไอออน(III)คีเลท ( $C_{Fe,O}$ ) = 25.06 g/L, อัตราการไหลของสารละลายไอออน(III)คีเลท (L) = 3 L/min และปริมาณอากาศที่ใช้ในการฟื้นฟูสภาพสารละลาย (A) = 1.25 L/min

Time (min)	Acetic acid (ppm)		Removal efficiency (%)
	inlet	outlet	
15	20.16	5.50	72.73
30	20.16	6.11	69.70
45	20.16	7.94	60.61
60	20.16	8.55	57.58
90	20.16	7.94	60.61
120	20.16	8.55	57.58
150	20.16	7.33	63.64
180	20.16	7.94	60.61
240	20.16	8.55	57.58

ตารางที่ ค-1.2 ข้อมูลความเข้มข้นของกรดอะซิติกและประสิทธิภาพการบำบัดกรดอะซิติก (%) กับ เวลา (min) ที่  $(C_{Fe,0}) = 25.06 \text{ g/L}$ ,  $L = 6 \text{ L/min}$  และ  $A = 1.25 \text{ L/min}$

Time (min)	Acetic acid (ppm)		Removal efficiency (%)
	inlet	outlet	
15	15.89	3.67	76.92
30	15.89	4.28	73.08
45	15.89	4.89	69.23
60	15.89	6.11	61.54
90	15.89	6.72	57.69
120	15.89	7.33	53.85
150	15.89	7.94	50.00
180	15.89	10.39	34.62
240	15.89	11.61	26.92

ตารางที่ ค-1.3 ข้อมูลความเข้มข้นของกรดอะซิติก และประสิทธิภาพการบำบัดกรดอะซิติก (%) กับ เวลา (min) ที่  $C_{Fe,0} = 25.06 \text{ g/L}$ ,  $L = 8 \text{ L/min}$  และ  $A = 1.25 \text{ L/min}$

Time (min)	Acetic acid (ppm)		Removal efficiency (%)
	inlet	outlet	
15	20.16	4.28	78.79
30	20.16	4.89	75.76
45	20.16	6.11	69.70
60	20.16	6.72	66.67
90	20.16	7.94	60.61
120	20.16	8.55	57.58
150	20.16	9.78	51.52
180	20.16	10.39	48.48
240	20.16	8.55	57.58

ตารางที่ ค-1.4 ข้อมูลความเข้มข้นของกรดอะซิติกและประสิทธิภาพการบำบัดกรดอะซิติก (%) กับ เวลา (min) ที่  $C_{Fe,0} = 11.12 \text{ g/L}$ ,  $L = 6 \text{ L/min}$  และ  $A = 1.25 \text{ L/min}$

Time (min)	Acetic acid (ppm)		Removal efficiency (%)
	inlet	outlet	
15	14.664	0.00	100.00
30	14.664	0.00	100.00
45	14.664	0.00	100.00
60	14.664	0.00	100.00
90	14.664	1.22	91.67
120	14.664	2.44	83.33
150	14.664	2.69	81.67
180	14.664	3.30	77.50
240	14.664	3.60	75.42

ตารางที่ ค-1.5 ข้อมูลความเข้มข้นของกรดอะซิติกและประสิทธิภาพการบำบัดกรดอะซิติก (%) กับ เวลา (min) ที่  $C_{Fe,0} = 39 \text{ g/L}$ ,  $L = 6 \text{ L/min}$  และ  $A = 1.25 \text{ L/min}$

Time (min)	Acetic acid (ppm)		Removal efficiency (%)
	inlet	outlet	
15	20.77	13.44	35.29
30	20.77	14.05	32.35
45	20.77	12.22	41.18
60	20.77	12.83	38.24
90	20.77	15.28	26.47
120	20.77	17.11	17.65
150	20.77	16.50	20.59
180	20.77	17.72	14.71
240	20.77	19.55	5.88

ตารางที่ ค-1.6 ข้อมูลความเข้มข้นของกรดอะซิติกและประสิทธิภาพการบำบัดกรดอะซิติก (%) กับ เวลา (min) ที่  $C_{Fe,0} = 33.35 \text{ g/L}$ ,  $L = 4 \text{ L/min}$  และ  $A = 1.70 \text{ L/min}$

Time (min)	Acetic acid (ppm)		Removal efficiency (%)
	inlet	outlet	
15	24.44	15.89	35.00
30	24.44	15.89	35.00
45	24.44	14.66	40.00
60	24.44	12.83	47.50
90	24.44	12.22	50.00
120	24.44	11.61	52.50
150	24.44	12.83	47.50
180	24.44	12.83	47.50
240	24.44	13.44	45.00

ตารางที่ ค-1.7 ข้อมูลความเข้มข้นของกรดอะซิติกและประสิทธิภาพการบำบัดกรดอะซิติก (%) กับ เวลา (min) ที่  $C_{Fe,0} = 33.35 \text{ g/L}$ ,  $L = 7 \text{ L/min}$  และ  $A = 1.70 \text{ L/min}$

Time (min)	Acetic acid (ppm)		Removal efficiency (%)
	inlet	outlet	
15	24.44	25.00	50.00
30	24.44	20.00	60.00
45	24.44	22.50	55.00
60	24.44	22.50	55.00
90	24.44	22.50	55.00
120	24.44	21.25	57.50
150	24.44	21.25	57.50
180	24.44	21.25	57.50
240	24.44	23.75	52.50

ตารางที่ ค-1.8 ข้อมูลความเข้มข้นของกรดอะซิติกและประสิทธิภาพการบำบัดกรดอะซิติก (%) กับ เวลา (min) ที่  $C_{Fe,0} = 16.77 \text{ g/L}$ ,  $L = 4 \text{ L/min}$  และ  $A = 1.70 \text{ L/min}$

Time (min)	Acetic acid (ppm)		Removal efficiency (%)
	inlet	outlet	
15	26.88	5.50	79.55
30	26.88	6.72	75.00
45	26.88	7.33	72.73
60	26.88	6.11	77.27
90	26.88	7.94	70.45
120	26.88	8.55	68.18
150	26.88	8.55	68.18
180	26.88	9.78	63.64
240	26.88	10.39	61.36

ตารางที่ ค-1.9 ข้อมูลความเข้มข้นของกรดอะซิติกและประสิทธิภาพการบำบัดกรดอะซิติก (%) กับ เวลา (min) ที่  $C_{Fe,0} = 16.77 \text{ g/L}$ ,  $L = 7 \text{ L/min}$  และ  $A = 1.70 \text{ L/min}$

Time (min)	Acetic acid (ppm)		Removal efficiency (%)
	inlet	outlet	
15	17.108	6.11	64.29
30	17.108	6.72	60.71
45	17.108	7.33	57.14
60	17.108	7.94	53.57
90	17.108	9.17	46.43
120	17.108	10.39	39.29
150	17.108	9.78	42.86
180	17.108	11.00	35.71
240	17.108	12.22	28.57



**ตารางที่ ค-1.10** ข้อมูลความเข้มข้นของกรดอะซิติกและประสิทธิภาพการบำบัดกรดอะซิติก (%)  
 กัมเวลา (min) ที่  $C_{Fe,0} = 25.06$  g/L,  $L = 6$  L/min และ  $A = 2$  L/min

Time (min)	Acetic acid (ppm)		Removal efficiency (%)
	inlet	outlet	
15	20.16	3.67	81.82
30	20.16	4.89	75.76
45	20.16	6.72	66.67
60	20.16	7.33	63.64
90	20.16	7.94	60.61
120	20.16	9.78	51.52
150	20.16	8.55	57.58
180	20.16	9.17	54.55
240	20.16	10.39	48.48

**ตารางที่ ค-1.11** ข้อมูลความเข้มข้นของกรดอะซิติกและประสิทธิภาพการบำบัดกรดอะซิติก (%)  
 กัมเวลา (min) ที่  $C_{Fe,0} = 25.06$  g/L,  $L = 6$  L/min และ  $A = 0.5$  L/min

Time (min)	Acetic acid (ppm)		Removal efficiency (%)
	inlet	outlet	
15	21.39	6.11	71.43
30	21.39	9.17	57.14
45	21.39	9.17	57.14
60	21.39	7.94	62.86
90	21.39	11.61	45.71
120	21.39	12.83	40.00
150	21.39	12.83	40.00
180	21.39	15.28	28.57
240	21.39	15.89	25.71

**ตารางที่ ค-1.12** ข้อมูลความเข้มข้นของกรดอะซิติกและประสิทธิภาพการบำบัดกรดอะซิติก (%)  
 กัมเวลา (min) ที่  $C_{Fe,0} = 25.06$  g/L,  $L = 6$  L/min และ  $A = 1.25$  L/min

Time (min)	Acetic acid (ppm)		Removal efficiency (%)
	inlet	outlet	
15	20.774	4.28	79.41
30	20.774	5.50	73.53
45	20.774	6.11	70.59
60	20.774	6.72	67.65
90	20.774	7.33	64.71
120	20.774	7.94	61.76
150	20.774	8.55	58.82
180	20.774	9.78	52.94
240	20.774	11.06	46.76

**ตารางที่ ค-1.13** ข้อมูลความเข้มข้นของกรดอะซิติกและประสิทธิภาพการบำบัดกรดอะซิติก (%)  
 กัมเวลา (min) ที่  $C_{Fe,0} = 16.77$  g/L,  $L = 4$  L/min และ  $A = 0.80$  L/min

Time (min)	Acetic acid (ppm)		Removal efficiency (%)
	inlet	outlet	
15	26.88	6.11	77.27
30	26.88	6.72	75.00
45	26.88	7.33	72.73
60	26.88	7.94	70.45
90	26.88	8.55	68.18
120	26.88	10.39	61.36
150	26.88	11.61	56.82
180	26.88	12.83	52.27
240	26.88	11.61	56.82

**ตารางที่ ค-1.14** ข้อมูลความเข้มข้นของกรดอะซิติกและประสิทธิภาพการบำบัดกรดอะซิติก (%)  
 กักเวลา (min) ที่  $C_{Fe,0} = 16.77$  g/L,  $L = 7$  L/min และ  $A = 0.80$  L/min

Time (min)	Acetic acid (ppm)		Removal efficiency (%)
	inlet	outlet	
15	17.719	0.00	100.00
30	17.719	0.00	100.00
45	17.719	0.61	96.55
60	17.719	0.92	94.83
90	17.719	1.22	93.10
120	17.719	1.34	92.41
150	17.719	1.47	91.72
180	17.719	1.53	91.38
240	17.719	1.77	90.00

**ตารางที่ ค-1.15** ข้อมูลความเข้มข้นของกรดอะซิติกและประสิทธิภาพการบำบัดกรดอะซิติก (%)  
 กักเวลา (min) ที่  $C_{Fe,0} = 33.35$  g/L,  $L = 4$  L/min และ  $A = 0.80$  L/min

Time (min)	Acetic acid (ppm)		Removal efficiency (%)
	inlet	outlet	
15	18.330	12.22	33.33
30	18.330	11.00	40.00
45	18.330	10.39	43.33
60	18.330	11.00	40.00
90	18.330	12.22	33.33
120	18.330	11.00	40.00
150	18.330	14.66	20.00
180	18.330	13.44	26.67
240	18.330	9.78	46.67

**ตารางที่ ค-1.16** ข้อมูลความเข้มข้นของกรดอะซิติกและประสิทธิภาพการบำบัดกรดอะซิติก (%)  
 กั๊บเวลา (min) ที่  $C_{Fe,0} = 33.35 \text{ g/L}$ ,  $L = 7 \text{ L/min}$  และ  $A = 0.80 \text{ L/min}$

Time (min)	Acetic acid (ppm)		Removal efficiency (%)
	inlet	outlet	
15	20.774	15.28	26.47
30	20.774	17.11	17.65
45	20.774	16.50	20.59
60	20.774	17.11	17.65
90	20.774	15.89	23.53
120	20.774	18.33	11.76
150	20.774	17.11	17.65
180	20.774	16.50	20.59
240	20.774	17.72	14.71

**ตารางที่ ค-1.17** ข้อมูลความเข้มข้นของกรดอะซิติกและประสิทธิภาพการบำบัดกรดอะซิติก (%)  
 กั๊บเวลา (min) ที่  $C_{Fe,0} = 25.06 \text{ g/L}$ ,  $L = 6 \text{ L/min}$  และ  $A = 1.25 \text{ L/min}$

Time(min)	Acetic acid (ppm)		Removal efficiency (%)
	inlet	outlet	
15	20.163	4.12	79.55
30	20.163	4.46	77.88
45	20.163	4.77	76.36
60	20.163	4.95	75.45
90	20.163	4.64	76.97
120	20.163	5.50	72.73
150	20.163	6.72	66.67
180	20.163	7.94	60.61
240	20.163	9.17	54.55

**ค-1.2 ผลของ pH ของสารละลายไอออน(III)คีเลทเป็นสารดูดซับในคอลัมน์บรรจุ Packed column**

ตารางที่ ค-1.18 ข้อมูล pH ที่แต่ละความเข้มข้นของสารละลายไอออน(III)คีเลท

ความเข้มข้นเริ่มต้น (g/L)	pH
11.12	10.72
16.77	10.35
25.06	8.85
33.35	7.25
39	5.09

**ค-1.3 ข้อมูลความเข้มข้นของสารละลายไอออน(III)คีเลทในการบำบัดกรดอะซิติกจากก๊าซเสียโดยใช้คอลัมน์บรรจุ Packed column**

ตารางที่ ค-1.19 ข้อมูลความเข้มข้นของสารละลายไอออน(III)คีเลทกับเวลา (min) ที่ความเข้มข้น

( $C_{Fe,0}$ ) = 25.06 g/L, L = 6 L/min และ A = 1.25 L/min

Time(min)	Total Fe (g/L)	Fe(II) concentration (g/L)	Fe(III) (g/L)
0	23.38	4.48	18.90
15	20.44	2.11	18.33
30	18.62	2.10	16.51
45	18.41	1.62	16.79
60	17.92	1.76	16.16
90	17.61	1.73	15.88
120	17.78	2.32	15.46
150	16.64	2.29	14.35
180	17.57	1.55	16.02
240	18.50	2.38	16.11

ตารางที่ ค-1.20 ข้อมูลความเข้มข้นของสารละลายไอออน(III)ที่เลทกับเวลา (min) ที่ความเข้มข้น  
( $C_{Fe,0}$ ) = 11.12 g/L, L = 6 L/min และ A = 1.25 L/min

Time(min)	Total Fe (g/L)	Fe(II) concentration (g/L)	Fe(III) (g/L)
0	10.63	0.091	10.54
15	7.91	0.082	7.82
30	9.45	0.085	9.36
45	7.94	0.061	7.88
60	8.40	0.063	8.34
90	7.77	0.088	7.68
120	8.34	0.064	8.27
150	7.79	0.067	7.72
180	8.05	0.088	7.97
240	7.64	0.099	7.54

ตารางที่ ค-1.21 ข้อมูลความเข้มข้นของสารละลายไอออน(III)ที่เลทกับเวลา (min) ที่ความเข้มข้น  
( $C_{Fe,0}$ ) = 39 g/L, L = 6 L/min และ A = 1.25 L/min

Time(min)	Total Fe (g/L)	Fe(II) concentration (g/L)	Fe(III) (g/L)
0	36.33	0.231	36.09
15	22.87	0.262	22.61
30	22.61	0.287	22.32
45	22.87	0.282	22.59
60	22.96	0.259	22.70
90	23.26	0.233	23.02
120	22.54	0.245	22.29
150	23.59	0.301	23.28
180	23.13	0.225	22.91
240	24.14	0.261	23.88

ตารางที่ ค-1.22 ข้อมูลความเข้มข้นของสารละลายไอออน(III)ที่เลทกับเวลา (min) ที่ความเข้มข้น  $(C_{Fe,0}) = 11.17 \text{ g/L}$ ,  $L = 6 \text{ L/min}$  และ  $A = 1.25 \text{ L/min}$

Time(min)	Total Fe (g/L)	Fe(II) concentration (g/L)	Fe(III) (g/L)
0	12.10	0.039	12.06
15	11.16	0.044	11.12
30	11.64	0.039	11.60
45	11.09	0.044	11.05
60	10.75	0.044	10.70
90	11.39	0.046	11.34
120	10.63	0.044	10.59
150	10.59	0.041	10.54
180	10.82	0.047	10.77
240	10.59	0.058	10.53

ตารางที่ ค-1.23 ข้อมูลความเข้มข้นของสารละลายไอออน(III)ที่เลทกับเวลา (min) ที่ความเข้มข้น  $(C_{Fe,0}) = 11.17 \text{ g/L}$ ,  $L = 6 \text{ L/min}$  และ  $A = 0$  (ไม่มีการเติมอากาศเพิ่มเติม)

Time(min)	Total Fe (g/L)	Fe(II) concentration (g/L)	Fe(III) (g/L)
0	12.10	0.039	12.06
15	10.49	0.024	10.47
30	10.78	0.023	10.76
45	10.96	0.021	10.94
60	11.18	0.025	11.16
90	11.46	0.024	11.44
120	11.25	0.019	11.23
150	11.29	0.015	11.27
180	11.20	0.025	11.17
240	11.51	0.027	11.48

ค-1.4 ศึกษาพารามิเตอร์ในการดำเนินการที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการบำบัดคาร์บอนไดออกไซด์ โดยใช้สารละลายไอรอน(III)คลอไรด์

ตารางที่ ค-1.24 ข้อมูลความเข้มข้นของ CO<sub>2</sub> และ CO<sub>2</sub> removal efficiency (%) กับเวลา (min) ที่ C<sub>Fe,0</sub> = 25.06 g/L, L = 6 L/min และ A = 1.25 L/min

Time(min)	CO <sub>2</sub> inlet (ppm)	CO <sub>2</sub> outlet (ppm)	CO <sub>2</sub> removal efficiency (%)
15	7,970.00	3,550.00	55.5
30	7,970.00	4,386.00	45.0
45	7,970.00	4,293.00	46.1
60	7,970.00	4,300.00	46.0
90	7,970.00	3,734.00	53.1
120	7,970.00	4,272.00	46.4
150	7,970.00	5,672.00	28.8
180	7,970.00	5,250.00	34.1
240	7,970.00	5,115.00	35.8
<b>average</b>			43.44



ตารางที่ ค-1.25 ข้อมูลความเข้มข้นของ CO<sub>2</sub> และ CO<sub>2</sub> removal efficiency (%) กับเวลา (min) ที่

$C_{Fe,0} = 11.12 \text{ g/L}$ ,  $L = 6 \text{ L/min}$  และ  $A = 1.25 \text{ L/min}$

Time(min)	CO <sub>2</sub> inlet (ppm)	CO <sub>2</sub> outlet (ppm)	CO <sub>2</sub> removal efficiency (%)
15	7,402.00	2,451.00	66.89
30	7,402.00	2,393.00	67.67
45	7,402.00	1,397.00	81.13
60	7,402.00	2,534.00	65.77
90	7,402.00	2,258.00	69.49
120	7,402.00	3,412.00	53.90
150	7,402.00	2,666.00	63.98
180	7,402.00	3,408.00	53.96
240	7,402.00	4,880.00	34.07
<b>average</b>			61.87

ตารางที่ ค-1.26 ข้อมูลความเข้มข้นของ CO<sub>2</sub> และ CO<sub>2</sub> removal efficiency (%) กับเวลา (min) ที่ C<sub>Fe,0</sub> = 39 g /L, L = 6 L/min และ A = 1.25 L/min

Time(min)	CO <sub>2</sub> inlet (ppm)	CO <sub>2</sub> outlet (ppm)	CO <sub>2</sub> removal efficiency (%)
15	9,910.00	6,206.00	37.38
30	9,910.00	6,372.00	35.70
45	9,910.00	7,261.00	26.73
60	9,910.00	8,543.00	13.79
90	9,910.00	7,129.00	28.06
120	9,910.00	7,854.00	20.75
150	9,910.00	5,597.00	43.52
180	9,910.00	6,325.00	36.18
240	9,910.00	7,468.00	24.64
average			29.64

ค-2 ศึกษาพารามิเตอร์ในการดำเนินการที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการบำบัดกรดอะซิติกโดยใช้น้ำเป็นสารดูดซึม

ตารางที่ ค-2.1 ข้อมูลความเข้มข้นของกรดอะซิติกและประสิทธิภาพการบำบัดกรดอะซิติก (%) กับเวลา (min) L = 6 L/min

Time(min)	Acetic acid (ppm)		Removal efficiency (%)
	inlet	outlet	
15	24.44	19.55	20.00
30	24.44	20.16	17.50
45	24.44	20.77	15.00
60	24.44	22.00	10.00
90	24.44	23.22	5.00
120	24.44	23.83	2.50
150	24.44	24.44	0.00

ตารางที่ ค-2.2 ข้อมูล pH ของน้ำและอุณหภูมิกับเวลาที่อัตราการไหลของน้ำ  $L = 6 \text{ L/min}$

Time(min)	pH	Temp(°C)
30	8.000	33.5
45	8.450	34
60	8.500	35
90	8.600	36
120	8.770	36
150	9.000	37
180	9.320	42
240	9.430	43

ตารางที่ ค-2.3 ข้อมูลผลของการบำบัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์โดยใช้น้ำเป็นสารดูดซับ

Time(min)	CO <sub>2</sub> inlet (ppm)	CO <sub>2</sub> outlet (ppm)	CO <sub>2</sub> removal efficiency (%)
15	8,520.00	6,320.00	25.82
30	8,520.00	7,251.00	14.89
45	8,520.00	7,457.00	12.48
60	8,520.00	8,025.00	5.81
90	8,520.00	7,980.00	6.34
120	8,520.00	8,350.00	2.00
150	8,520.00	8,425.00	1.12
180	8,520.00	8,500.00	0.23
240	8,520.00	8,140.00	4.46
<b>average</b>			8.13

ค-3 ศึกษาสถานะที่เหมาะสมในการดำเนินการที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการบำบัดก๊าซเสียจากปล่องควันโดยใช้สารละลายไอออน(III)คีเลทในคอลัมน์บรรจุ

ตารางที่ ค-3.1 ข้อมูลผลของการบำบัดกรดอะซิติกโดยใช้ GC 6890

Time (hr)	Acetic acid (ppm)		Removal efficiency (%)
	Inlet	Outlet	
0	81.26	0.00	100.0
2	81.26	0.00	100.0
4	81.26	0.00	100.0
6	81.26	0.00	100.0
8	81.26	4.25	94.8

ตารางที่ ค-3.2 ข้อมูลผลของความเข้มข้นของสารละลายไอออน(III)คีเลท

Time (hr)	Concentration (g/L)		
	total Fe (g/L)	Fe <sup>2+</sup> (g/L)	Fe(III) (g/L)
0	9.03	0.041	8.98
2	8.82	0.051	8.77
4	8.65	0.054	8.60
6	8.80	0.052	8.74
8	8.72	0.059	8.66

ตารางที่ ค-3.3 ข้อมูลผลของการบำบัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์โดยใช้สารละลายไอรอน(III)คีเลทเป็นสารดูดซึม

Time(min)	CO <sub>2</sub> inlet (ppm)	CO <sub>2</sub> outlet (ppm)	% CO <sub>2</sub> removal efficiency
2	6924	957.00	86.20
4	6924	1,381.00	80.10
6	6924	1,215.00	82.50
8	6924	1,415.00	79.60

ตารางที่ ค-3.4 ข้อมูลผลของอุณหภูมิและ pH ของสารละลายไอรอน(III)คีเลทกับเวลา (min)

Time(min)	pH	Temp(°C)
0	8.96	28
2	8.92	34
4	8.9	37
6	8.68	39
8	8.75	41

#### ค-4 การประยุกต์ใช้สารละลายไอรอน(III)คีเลทในหอดูดซึมแบบเปียกของโรงงานอุตสาหกรรม

ตารางที่ ค-4.1 ข้อมูลความเข้มข้นของกรดอะซิติกและประสิทธิภาพในการบำบัดกรดอะซิติก (%)

กับเวลา (ชั่วโมง) ที่อัตราการไหลของก๊าซเสีย (G) = 6,390 m<sup>3</sup>/min และ L=33 L/min

Time(hr)	Acetic acid (ppm)		Removal efficiency (%)
	inlet	Outlet	
2	112.88	9.94	91.20
4	112.88	10.64	90.58
6	112.88	10.91	90.33
8	112.88	11.21	90.07
10	112.88	11.27	90.02

ตารางที่ ค-4.2 ข้อมูลผลของความเข้มข้นของสารละลายไอออน(III)ที่เลทกับเวลา (min) ที่ใช้ในการทดลอง

Time (min)	total Fe (g/L)	Fe(II) (g/L)	Fe(III) (g/L)
0	9.07	0.011	9.055
30	9.01	0.019	8.992
60	8.91	0.028	8.878
90	8.85	0.039	8.809
120	8.78	0.034	8.745
180	8.71	0.036	8.676
240	8.83	0.026	8.802
300	8.77	0.052	8.720
360	8.78	0.037	8.745

ตารางที่ ค-4.3 ข้อมูลผลของการบำบัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์กับเวลา (ชั่วโมง)

Time(hr)	CO <sub>2</sub> (ppm)		CO <sub>2</sub> removal efficiency (%)
	inlet	outlet	
2	6,924.00	957.00	86.18
4	6,924.00	1,381.00	80.05
6	6,924.00	1,215.00	82.45
8	6,924.00	1,415.00	79.56
10	6,924.00	1,235.00	82.16

ตารางที่ ค-4.4 ข้อมูล pH และอุณหภูมิกับเวลา

<b>Time(hr)</b>	<b>pH</b>	<b>Temp</b>
0	8.96	28
2	8.92	34
4	8.9	37
6	8.68	39
8	8.75	41
10	8.64	43

ภาคผนวก ง

**Experimental design and regression model**



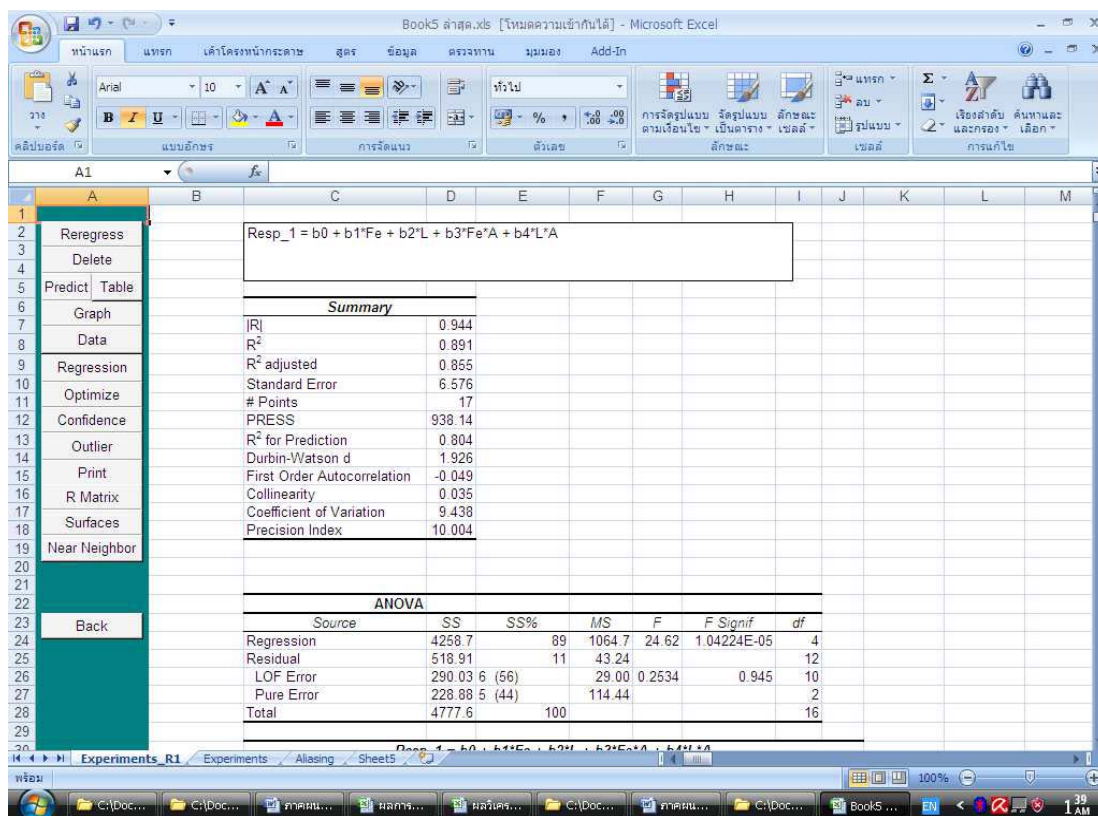
## ภาคผนวก ง

## Essential Experimental design and Essential Regression

การออกแบบการทดลองเบื้องต้นโดยใช้ Essential and Experimental Design (EED) software

จุดมุ่งหมายเพื่อทำการออกแบบการทดลอง เพื่อศึกษาพารามิเตอร์ต่างๆ ได้แก่ ความเข้มข้นของ Fe(III)EDTA (C) อัตราการไหลของสารละลายดูดซึม Fe(III)EDTA (L) และปริมาณอากาศที่ใช้ในการฟื้นฟูสภาพสารละลาย (A) ที่มีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดกรดอะซิติกของระบบ (%RE) โดยใช้ Central Composite Design (CCD) ใน Essential Experimental Design (EED) โดยมีขั้นตอนดังนี้

1).ทำการ Design experimental โดยกำหนดใช้การเลือก 3 CCD และเลือก Resp\_1 คือ ผลตอบสนองเป็นประสิทธิภาพในการบำบัดกรดอะซิติก โดยทำการศึกษา 3 ตัวแปร และใช้ระดับความเชื่อมั่นของการทำนายที่ 95% Confidence ทำการ Regression model หรือ ทำการ Analyze data และทำการ Back eliminate ข้อมูล เพื่อทำการลดทอนตัวแปรที่มีผลต่อค่าผลตอบสนอง ซึ่งจะได้ผลตามภาพประกอบข้างล่าง ง-1



ANOVA						
Source	SS	SS%	MS	F	F Signif	df
Regression	4258.7	89	1064.7	24.62	1.04224E-05	4
Residual	518.91	11	43.24			12
LOF Error	290.036 (56)		29.00	0.2534	0.945	10
Pure Error	228.885 (44)		114.44			2
Total	4777.6	100				16

ภาพประกอบ ง-1 แสดงผลจากการ Regression model ที่ได้จากการทดลอง

**ภาคผนวก จ**  
**สภาวะการทดสอบและผลการทดสอบ**

จ-1 สภาวะการทดสอบของเหลวโดยการวิเคราะห์ด้วยเครื่องมือ CHNS-O Analyzer, CE Instrument Flash EA 1112 Series, Thermo Quest, Italy โดยใช้เทคนิคการทดสอบ Dynamic Flash Combustion



ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์  
 ชั้น 1 อาคารบริหารวิชาการรวม มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตหาดใหญ่ อำเภอหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา 90110  
 Scientific Equipment Center, Prince of Songkla University  
 Central Academic Administrator Bld. Hat-Yai Campus, Songkhla 90110 Tel.0 7428 6904-7 Fax.0 7421 2813

F-RES-003T ฉบับที่ 6 บังคับใช้ 20/10/53

เลขที่ 2066/54 หน้า 1/1

รายงานผลการทดสอบ

ชื่อและที่อยู่ลูกค้า : นายอิสรินทร์ มะหมัด  
 ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

เลขที่ใบขอใช้บริการฯ : 2163/54

วันที่รับตัวอย่าง : 26 กรกฎาคม 2554

วันที่ขอใช้บริการฯ : 26 กรกฎาคม 2554

ผู้ทดสอบ : นางสาวทรงสุดา พรหมทอง

วันที่ทำการทดสอบ : 28-29 กรกฎาคม 2554

วิธีการทดสอบ : อ้างอิง WI-RES-CHNS-O-001

เครื่องมือทดสอบ : CHNS-O Analyzer, CE Instruments Flash EA 1112 Series, Thermo Quest, Italy

เทคนิคการทดสอบ : Dynamic Flash Combustion

สภาวะการทดสอบ : สำหรับ คาร์บอน ไฮโดรเจนและไนโตรเจน  
 Left Furnace temperature: 900 °C Oven temperature: 65 °C  
 Carrier flow: 130 mL/min Reference flow: 100 mL/min  
 Oxygen flow: 250 mL/min

สำหรับออกซิเจน  
 Right Furnace temperature: 1060 °C Oven temperature: 65 °C  
 Carrier flow: 130 mL/min Reference flow: 100 mL/min

รายละเอียดตัวอย่าง : ของเหลว จำนวน: 1 ตัวอย่าง

ผลการทดสอบ :

ลำดับที่	ชื่อตัวอย่าง	% ธาตุ			
		ไนโตรเจน	คาร์บอน	ไฮโดรเจน	ออกซิเจน
1	after	0.31	1.71	6.59	51.21

ข้อมูลลิ้นชักจัดเก็บในโฟลเดอร์ 2163-54

(นางรุสนี กูลวิจิตร)

หัวหน้าฝ่ายบริการเครื่องมือวิจัยทางวิทยาศาสตร์

1 สิงหาคม 2554

หมายเหตุ รายงานผลการทดสอบนี้มีผลเฉพาะกับตัวอย่างที่นำมาทดสอบเท่านั้น และรายงานผลการทดสอบนี้ต้องไม่ถูกทำสำเนาเพื่อบางส่วน  
 ยกเว้นทำหังฉบับ โดยไม่ได้รับความยินยอมเป็นลายลักษณ์อักษรจากทางศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์

จ-2 สภาวะการทดสอบของแข็งโดยการวิเคราะห์ด้วยเครื่องมือ Fourier Transform Infrared Spectrometer, EQUINOX 55, Bruker, Germany โดยใช้เทคนิคการทดสอบ Pellet (KBr)



ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์  
 ชั้น 1 อาคารบริหารวิชาการรวม มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตหาดใหญ่ อำเภอหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา 90110  
 Scientific Equipment Center, Prince of Songkla University  
 Central Academic Administrator Bld. Hat-Yai Campus, Songkhla 90110 Tel.0 7428 6904-7 Fax.0 7421 2813

F-RES-003T ฉบับที่ 6 บังคับใช้ 20/10/53

เลขที่ 2156/54 หน้า 1/1

รายงานผลการทดสอบ

ชื่อและที่อยู่ลูกค้า : นายอิสรินทร์ มะหมัด  
 ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

เลขที่ใบขอใช้บริการฯ : 2257/54

วันที่รับตัวอย่าง : 3 สิงหาคม 2554

วันที่ขอใช้บริการฯ : 3 สิงหาคม 2554

ผู้ทดสอบ : นางสาวชริราภรณ์ ทองบุญ

วันที่ทำการทดสอบ : 5 สิงหาคม 2554

วิธีการทดสอบ : อ้างอิง WI-RES-FTIR-001

เครื่องมือทดสอบ : Fourier Transform Infrared Spectrometer , EQUINOX 55 , Bruker, Germany

เทคนิคการทดสอบ : Pellet (KBr)

สภาวะการทดสอบ : ช่วงเลขคลื่น : 4000-400  $\text{cm}^{-1}$

รายละเอียดตัวอย่าง : ของแข็ง จำนวน : 2 ตัวอย่าง

ผลการทดสอบ :

ที่	ชื่อตัวอย่าง
1.	Blank
2.	After

แสดงดังสเปกตรัมที่แนบและอ้างอิงใดเรกทอรี : 2257ISSARIN

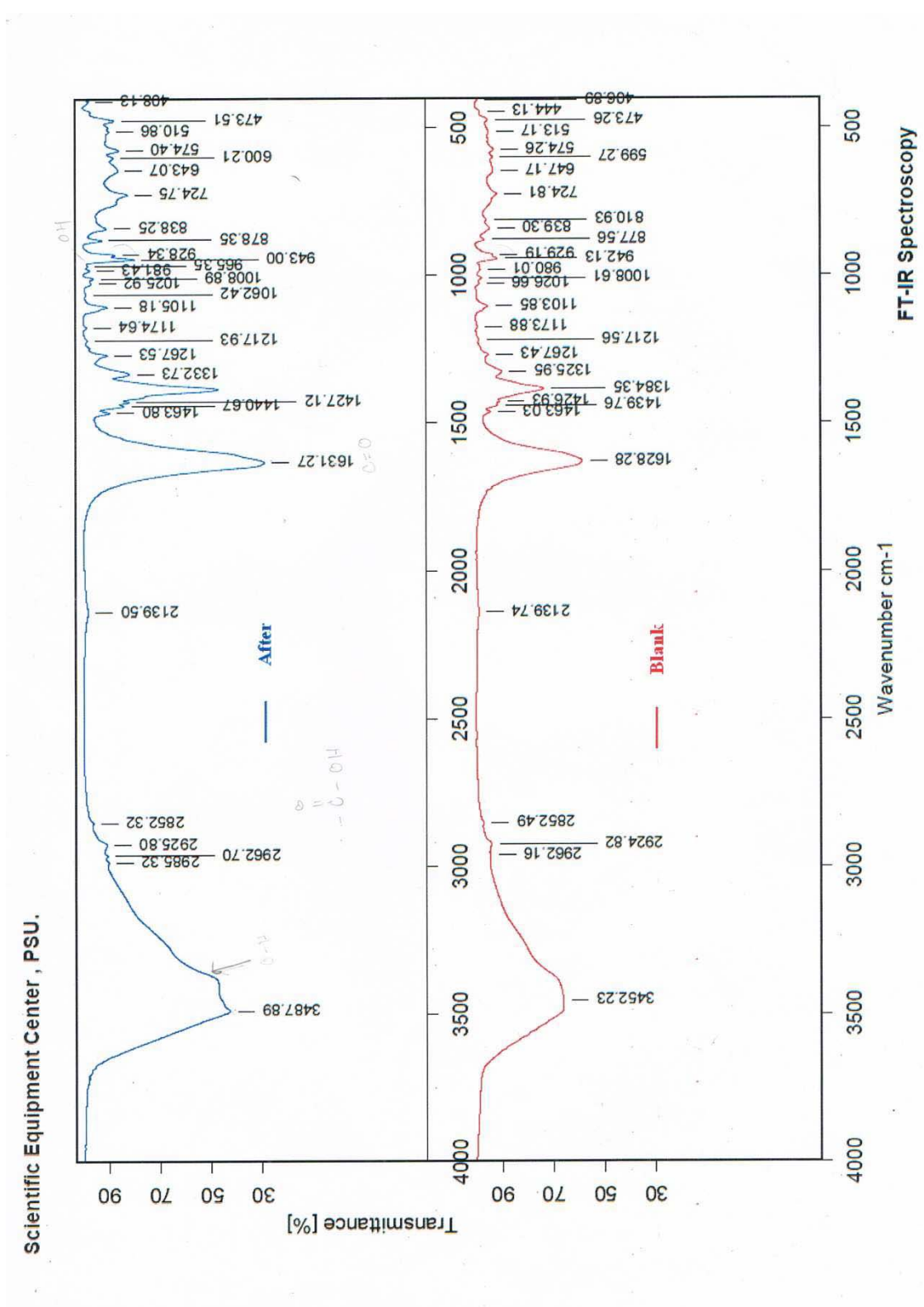
(นางรฐณี กุลจิตร)

หัวหน้าฝ่ายบริการเครื่องมือวิจัยทางวิทยาศาสตร์

8 สิงหาคม 2554

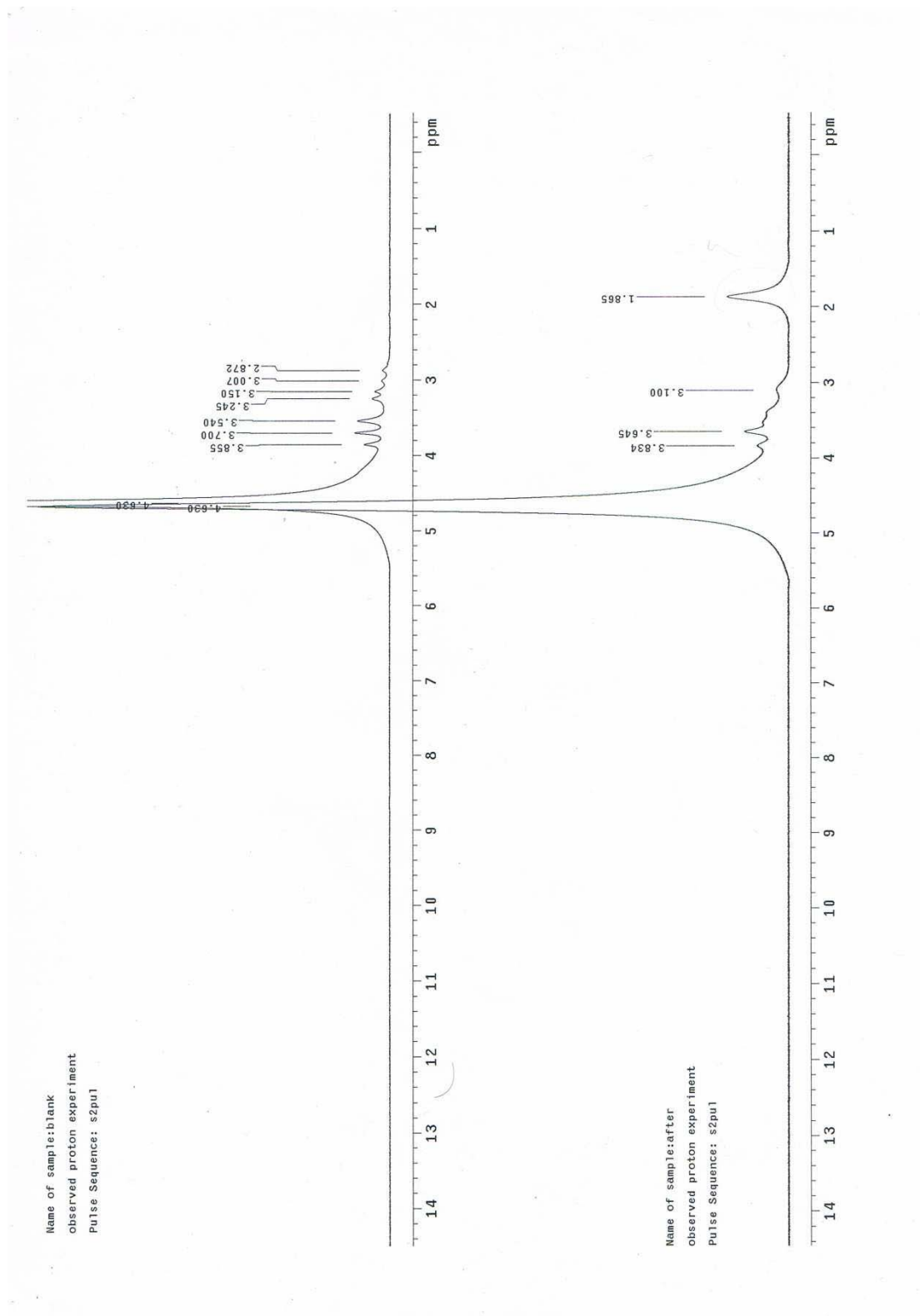
**หมายเหตุ** รายงานผลการทดสอบนี้มีผลเฉพาะกับตัวอย่างที่นำมาทดสอบเท่านั้น และรายงานผลการทดสอบนี้ต้องไม่ถูกทำสำเนาเพียงบางส่วน  
 ยกเว้นทำทั้งฉบับ โดยไม่ได้รับความยินยอมเป็นลายลักษณ์อักษรจากทางศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์

จ-2 สถานะการทดสอบของแข็งโดยการวิเคราะห์ด้วยเครื่องมือ Fourier Transform Infrared Spectrometer, EQUINOX 55, Bruker, Germany โดยใช้เทคนิคการทดสอบ Pellet (KBr) (ต่อ)





จ-3 สถานะการทดสอบของเหลวโดยการวิเคราะห์ด้วยเครื่องมือ Fourier Transform NMR Spectrometer 500 MHz, Unity Inova, Varian, Germany โดยใช้เทคนิค  $^1\text{H}$  observe experiment (ต่อ)



**จ-4 สภาวะการทดสอบของเหลวโดยการวิเคราะห์ด้วยเครื่องมือ Optical Emission Spectrometer, Optima 4300 DV, Perkin Elmer Instruments, USA โดยใช้เทคนิค Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectrometer**



ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์  
 ชั้น 1 อาคารบริหารวิชาการรวม มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตหาดใหญ่ อำเภอหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา 90110  
**Scientific Equipment Center, Prince of Songkla University**  
 Central Academic Administrator Bld. Hat-Yai Campus, Songkhla 90110 Tel.0 7428 6904-7 Fax.0 7421 2813

F-RES-003T ฉบับที่ 6 บังคับใช้ 20/10/53

เลขที่ 2173/54 หน้า 1/1

**รายงานผลการทดสอบ**

ชื่อและที่อยู่ลูกค้า: นายอิสรินทร์ มะหมัด  
 ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์  
 เลขที่ไปขอใช้บริการฯ: 2162/54  
 วันที่รับตัวอย่าง: 26 กรกฎาคม 2554  
 วันที่ขอใช้บริการฯ: 26 กรกฎาคม 2554  
 ผู้ทดสอบ: นายเวียงชัย จงศรีรัตนกุล  
 วันที่ทำการทดสอบ: 4 สิงหาคม 2554  
 วิธีการทดสอบ: อ้างอิง WI-RES-ICP-OES-001  
 เครื่องมือทดสอบ: Optical Emission Spectrometer, Optima 4300 DV, Perkin Elmer Instruments, USA  
 เทคนิคการทดสอบ: Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectrometr  
 สภาวะการทดสอบ: ความยาวคลื่น Fe = 238.204 nm  
 รายละเอียดตัวอย่าง: ของเหลว จำนวน : 1 ตัวอย่าง  
 ผลการทดสอบ:

ชื่อตัวอย่าง	พารามิเตอร์	ผลการทดสอบ	
		g/L	%RSD
after	Fe	7.08	0.76

- \* ขีดจำกัดในการตรวจวัด (LOQ); Fe = 0.004 mg/L
- \* ข้อมูลถูกจัดเก็บในไฟล์; 2212-54

(นางรุสนี กุลวิจิตร)

หัวหน้าฝ่ายบริการเครื่องมือวิจัยทางวิทยาศาสตร์

9 สิงหาคม 2554

**หมายเหตุ** รายงานผลการทดสอบนี้มีผลเฉพาะกับตัวอย่างที่นำมาทดสอบเท่านั้น และรายงานผลการทดสอบนี้ไม่ต้องไม่ถูกทำสำเนาเพียงบางส่วน  
 ยกเว้นทำทั้งฉบับ โดยไม่ได้รับความยินยอมเป็นลายลักษณ์อักษรจากทางศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์



จ-5 สภาวะการทดสอบของเหลวโดยการวิเคราะห์ด้วยเครื่องมือ UV-Visible Spectrophotometer, UV-1601, SHIMADZU, JAPAN โดยใช้เทคนิค Spectrum transmission



ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์  
 ชั้น 1 อาคารบริหารวิชาการรวม มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตหาดใหญ่ อำเภอหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา 90110  
 Scientific Equipment Center, Prince of Songkla University  
 Central Academic Administrator Bld. Hat-Yai Campus, Songkhla 90110 Tel.0 7428 6904-7 Fax.0 7421 2813

F-RES-003T ฉบับที่ 6 บังคับใช้ 20/10/53

เลขที่ 2075/54 หน้า 1/1

รายงานผลการทดสอบ

ชื่อและที่อยู่ลูกค้า : นายอิสรินทร์ มะหมัด  
 ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

เลขที่ใบขอใช้บริการฯ : 2161/54

วันที่รับตัวอย่าง : 26 กรกฎาคม 2554

วันที่ขอใช้บริการฯ : 26 กรกฎาคม 2554

ผู้ทดสอบ : นางสาวชिरาภรณ์ ทองบุญ

วันที่ทำการทดสอบ : 31 กรกฎาคม 2554

วิธีการทดสอบ : อ้างอิงถึง WI-RES-UV-001

เครื่องมือทดสอบ : UV-Visible spectrophotometer, UV-1601, SHIMADZU, JAPAN

เทคนิคการทดสอบ : Spectrum transmission

สภาวะการทดสอบ : -

รายละเอียดตัวอย่าง : ของเหลว จำนวน : 2 ตัวอย่าง

ผลการทดสอบ :

ลำดับที่	ชื่อตัวอย่าง	ความยาวคลื่น (นาโนเมตร)	%RSD
1.	blank	251.00	0.00
2.	after	257.00	0.00

\* ข้อมูลสืบถูกจัดเก็บในโฟลเดอร์ 2161-54

(นางรุสนี กุลกิจิตร)

หัวหน้าฝ่ายบริการเครื่องมือวิจัยทางวิทยาศาสตร์

1 สิงหาคม 2554

หมายเหตุ รายงานผลการทดสอบนี้มีผลเฉพาะกับตัวอย่างที่นำมาทดสอบเท่านั้น และรายงานผลการทดสอบนี้ต้องไม่ถูกทำสำเนาเพียงบางส่วน  
 ยกเว้นทำทั้งฉบับ โดยไม่ได้รับความยินยอมเป็นลายลักษณ์อักษรจากทางศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ สกุล	นายอิสรินทร์ มะหมัด	
รหัสประจำตัวนักศึกษา	5310120043	
วุฒิการศึกษา		
วุฒิ	ชื่อสถาบัน	ปีที่สำเร็จการศึกษา
วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมเคมี)	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์	2551

ทุนการศึกษา (ที่ได้รับในระหว่างการศึกษา)

ทุนศึกษยก้นกุฎิ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

การตีพิมพ์เผยแพร่ผลงาน

Isarin mamad and Charun Bunyakan, Application of the Central Composite Design and Response Surface Methodology to the Advanced Treatment of Waste Gas in Rubber Drying Process using Iron(III)chelate in Packed Column. Proceeding of the 10<sup>th</sup> International PSU Engineering Conference. May 14-15, Songkla, Thailand.