

อุปกรณ์ดักจับไอกรดในห้องปฏิบัติการเคมี

ACID SCRUBBER IN LABORATORY

กรกนก	จันทรนิยม
เพชรรัตน์	योगเพชร
วรวิช	ทรัพย์อมรเลิศ

โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมีสิ่งแวดล้อม)  
ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2558

อุปกรณ์ดักจับไอกรดในห้องปฏิบัติการเคมี

ACID SCRUBBER IN LABORATORY



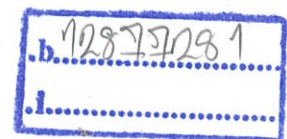
T148949

กรรณก จันทรมิยม

เพชรรัตน์ ยองเพชร

วรวิช ทรัพย์อมรเลิศ

เลขหมู่.....  
เลขทะเบียน.....148949  
วัน,เดือน,ปี.....1 8 S.ค. 2560



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาเคมีสิ่งแวดล้อม

ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2558

# ACID SCRUBBER IN LABORATORY

GORNGANOK      JANTARANIYOM

PETCHARAT      YONGPACH

WORAWIT      SUBAMORNLERD

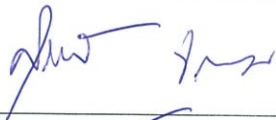
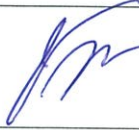

A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF  
THE REQUIREMENT FOR  
THE DEGREE OF BACHELOR OF SCIENCE (ENVIRONMENTAL CHEMISTRY)  
DEPARTMENT OF CHEMISTRY FACULTY OF SCIENCE  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG  
ACADEMIC YEAR 2015

หัวข้อโครงการพิเศษ      อุปกรณ์ดักจับไอกรดในห้องปฏิบัติการเคมี  
 ACID SCRUBBER IN LABORATORY

ชื่อนักศึกษา      นางสาวกรกนก      จันทรมนิยม      รหัสนักศึกษา 55050884  
                                  นางสาวเพชรรัตน์      ยองเพชร      รหัสนักศึกษา 55050969  
                                  นายวรวิช      ทรัพย์อมรเลิศ      รหัสนักศึกษา 55050988

ปริญญา      วิทยาศาสตร์บัณฑิต (เคมีสิ่งแวดล้อม)  
 ภาคเคมี      เคมี  
 ปีการศึกษา      2558  
 อาจารย์ที่ปรึกษา      ผศ.กรองแก้ว      ทิพย์ศักดิ์

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง(สจล.) อนุมัติให้โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมีสิ่งแวดล้อม) ประจำปีการศึกษา 2558

คณะกรรมการสอบ	ลายมือชื่อ
ผศ.ดร.สุวรรณี จรรยาพูน ประธานกรรมการ	
ผศ.ดร.ชมพูนุท ไชยรักษ์ กรรมการ	
ผศ.กรองแก้ว ทิพย์ศักดิ์ กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษา	

ลิขสิทธิ์ของคณะวิทยาศาสตร์  
 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

หัวข้อโครงการพิเศษ	อุปกรณ์ดักจับไอกรดในห้องปฏิบัติการเคมี		
ชื่อนักศึกษา	น.ส.กรรณก	จันทรนิม	รหัสนักศึกษา 55050884
	น.ส.เพชรรัตน์	ยองเพชร	รหัสนักศึกษา 55050969
	นายวรวิช	ทรัพย์อมรเลิศ	รหัสนักศึกษา 55050988
ปริญญา	วิทยาศาสตร์บัณฑิต (เคมีสิ่งแวดล้อม)		
ภาควิชา	เคมี		
คณะ	วิทยาศาสตร์		
มหาวิทยาลัย	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.)		
ปีการศึกษา	2558		
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผศ.กรองแก้ว	ทิพย์ศักดิ์	

### บทคัดย่อ

โครงการพิเศษนี้มีวัตถุประสงค์ในการศึกษาประสิทธิภาพของอุปกรณ์ดักจับไอกรดในอากาศ (AS) โดยใช้ระบบสารดูดซึ่มและระบบดูดซับ โดยจำลองการเกิดไอกรดในตู้ดูดควัน ด้วยการย่อยตัวอย่างน้ำเสีย ตามวิธี USEPA method 3050B โดยใช้กล่องอะคริลิกดักไอกรด แล้วไหลเข้าระบบดูดซึ่ม ระบบดูดซึ่มประกอบด้วย บั้มดูดอากาศและระบบดูดซึ่มที่มีสารละลายบรรจุอยู่ในขวดทั้งสองขวด (โซเดียมคาร์บอเนต และบัฟเฟอร์ พีเอช 10.5) ศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อประสิทธิภาพ เช่น ความเข้มข้นของสารดูดซึ่ม  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  ปริมาณแหล่งกำเนิดไอกรด อัตราการไหลของระบบ อุปกรณ์ดักจับไอกรด การทำงานร่วมกันของตู้ดูดควันกับอุปกรณ์ดักจับไอกรด และการทำงานร่วมกันของระบบดูดซึ่มและดูดซับ ที่มาจากขวดพลาสติกบรรจุด้วยหินปูนและใยสังเคราะห์ที่เปียกน้ำ

ผลการทดลองพบว่า เมื่อใช้โซเดียมคาร์บอเนต ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) เข้มข้น 1 โมลาร์ และสารละลายบัฟเฟอร์ มีประสิทธิภาพดีที่สุด เมื่อให้เป็นแหล่งกำเนิดไอกรดโดยการย่อยน้ำเสีย 3 ฟลาสก์ โดยศึกษาแหล่งกำเนิดไอกรดที่ย่อยตัวอย่างน้ำเสีย 1-3 ฟลาสก์ มีประสิทธิภาพการกำจัดไอกรดไม่แตกต่างกันของการทดลอง (49.88 - 55.90 %) โดยมีอัตราการไหลของอากาศที่เหมาะสมของระบบคือ 0.2 ลิตรต่อนาที เมื่อเปิดตู้ดูดควัน พบว่าปริมาณไอกรดออกไปทำให้ค่าไอกรดไม่เกินมาตรฐานคุณภาพอากาศในสถานที่ปฏิบัติงานของประกาศกระทรวงมหาดไทย (พ.ศ.2520) ความเข้มข้นไอกรดที่พบน้อยกว่า 1 มิลลิกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ในทางตรงกันข้าม เมื่อปิดตู้ดูดควันที่ทำงานกับระบบดูดซึ่มเพียงระบบเดียว หรือทั้งสองระบบ พบว่า ไอกรดในบรรยากาศไม่ผ่านเกณฑ์มาตรฐาน

คำสำคัญ : ระบบดูดซับ ระบบดูดซับ อุปกรณ์ดักจับไอกรด ไอกรด

Title	ACID SCRUBBER IN LABORATORY		
Students	Miss Gornganok	Jantaraniyom	Student ID 55050884
	Miss Petcharat	Yongpach	Student ID 55050969
	Mr. Worawit	Subamornlerd	Student ID 55050988
Degree	Bachelor of Science (Environmental Chemistry)		
Department	Chemistry		
Faculty	Science		
University	King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMITL)		
Academic Year	2015		
Advisor	Asst. Prof. Krongkaew Tippayasak		

### ABSTRACT

This special project aims to study the efficacy of acid scrubber (AS) by absorption and adsorption system. Acid vapor was stimulated in fume hood by acid digestion of wastewater sample (US EPA method 3050B). Acrylic box was designed to trap acid vapor and flow through AS system. Absorption system consists of air pump, acid scrubber by two bottoms of absorbing solution ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$  and buffer at pH 10.5). Factors affecting the efficiency were studied such as the absorption system; concentration of  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  solution, quantity of acid source, flow rate of AS, fume hood operation and both absorption and adsorption co-operation. Adsorption system made from plastic column contained wet limestone and synthetic fabrics.

The result showed that the sodium carbonate ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) 1 M and buffer has the best removal efficiency while source of acid from wastewater digestion with triplicate done. Acid vapor was varied by numbers of sample digestion (1-3 samples). The removal efficiency of AS showed insignificantly difference between each set of experiment (49.88 – 55.90 %). The appropriate flow rate of AS was 0.2 L/min. When the fume hood turned on, the acid vapor flew out and met the requirement of the air quantity standard in workplace by the Ministry of interior (B.E. 1977). The acid concentration was less than  $1 \text{ mg/m}^3$ . On the other hand, turned off the fume hood, only the absorption or the absorption and adsorption co-operation the air did not meet this requirement.

**Keywords:** Acid adsorption, Acid absorption, Acid scrubber, Acid vapor

## กิตติกรรมประกาศ

การจัดทำโครงการพิเศษนี้สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เนื่องจากการได้รับการดูแล เอาใจใส่ ความช่วยเหลือ และคำแนะนำต่างๆเป็นอย่างมาก คณะผู้จัดทำจึงขอขอบพระคุณทุกท่านที่ให้ความร่วมมือช่วยเหลือต่อไป

ขอขอบพระคุณ ผศ.กรองแก้ว ทิพย์ศักดิ์ อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการพิเศษ ที่ให้ความรู้คำแนะนำ ชี้แนวทางการแก้ปัญหาต่างๆ เอาใจใส่ ตรวจสอบ และแก้ไขโครงการพิเศษเล่มนี้ให้มีความสมบูรณ์ ตลอดจนคำสอนต่างๆ ที่สามารถนำไปใช้ในชีวิตประจำวันได้

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.สุวรรณี จรรยาพูน และ ผศ.ดร.ชมพูนุท ไชยรักษ์ ที่ให้คำแนะนำ และชี้แนะแนวทางการแก้ปัญหาในการศึกษา ตรวจสอบ และแก้ไขโครงการพิเศษเล่มนี้

ขอขอบพระคุณ คุณปราณี บุญวัฒน์ เจ้าหน้าที่ภาคเคมี ที่ให้ความรู้ต่างๆในการใช้เครื่องไอออนโครมาโทกราฟี และอนุญาตการใช้ห้องนอกเวลาราชการ

ขอขอบพระคุณ เจ้าหน้าที่ภาคเคมีทุกท่าน ที่ให้ความสะดวกในการเบิกสารเคมีและอุปกรณ์ต่างๆที่ใช้ในการทดลอง

ขอขอบพระคุณบิดา มารดาและญาติ ที่คอยให้กำลังใจเสมอมาจนกระทั่งการทำโครงการพิเศษสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบคุณเพื่อน ที่คอยช่วยเหลือ เป็นที่ปรึกษาในการทำโครงการพิเศษเล่มนี้ รวมทั้งคำแนะนำและคำติชมต่างๆ

กรกนก จันทรมิยม

เพชรรัตน์ ยองเพชร

วรวิช ทรัพย์อมรเลิศ

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูป.....	ญ
คำย่อและสัญลักษณ์.....	ฎ
<b>บทที่ 1 บทนำ.....</b>	<b>1</b>
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	2
1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่ได้รับ.....	2
<b>บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....</b>	<b>3</b>
2.1 กรด.....	3
2.1.1 นิยามของกรด.....	3
2.1.2 ประเภทของกรด.....	4
2.1.3 สมบัติทั่วไปของกรดและการใช้ประโยชน์.....	5
2.1.4 ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม.....	9
2.1.5 การตรวจสอบความเป็นกรด-เบสของสารละลาย.....	11
2.2 ทฤษฎีการดูดซับ.....	14

## สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
2.3 ชนิดไอโซเทอร์ม.....	15
2.3.1 ไอโซเทอร์มแบบแลงเมียร์ (Langmuir isotherm).....	15
2.3.2 ไอโซเทอร์มแบบฟรอยด์ลิค (Freundlich isotherm) .....	16
2.3.3 ไอโซเทอร์มแบบบรูนาเออร์-เอมเมทท์-เทลเลอร์.....	17
(Brunauer-Emmett-Teller Isotherm)	
2.4 การเก็บตัวอย่างอากาศ.....	17
2.4.1 ฝุ่น.....	18
2.4.2 ก๊าซที่มีฤทธิ์เป็นกรด.....	18
2.5 สารเคมีที่ใช้ในการดูดซับ.....	21
2.5.1 ซิลิกาเจล (Silica Gel) .....	21
2.5.2 ถ่านกัมมันต์ (Activated Carbon).....	23
2.5.2.1 สมบัติของถ่านกัมมันต์.....	23
2.5.2.2 ประเภทถ่านกัมมันต์.....	25
2.5.2.3 การดูดซับด้วยผงถ่านกัมมันต์.....	26
(Adsorption by Activated Carbon)	
2.5.2.4 การดูดซับด้วยผงถ่านกัมมันต์ที่เคลือบสารเคมี.....	27
(Adsorption by Impregnated Activated Carbon)	
2.5.3 แคลเซียมคาร์บอเนต (Calcium Carbonate) .....	27
2.5.3.1 สมบัติเฉพาะ.....	28

## สารบัญ(ต่อ)

หน้า

2.5.3.2 สมบัติแคลเซียมคาร์บอเนตที่นำมาใช้ประโยชน์.....	28
2.6 ระบบสครับบิง (Scrubbing).....	29
2.6.1 การออกแบบระบบสครับบิง (Scrubbing).....	29
2.6.2 เส้นผ่านศูนย์กลางของหอบรรจุตัวกลาง.....	31
2.6.3 ความสูงของหอบรรจุตัวกลาง.....	32
2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	33
<b>บทที่ 3 วิธีการดำเนินการวิจัย.....</b>	<b>36</b>
3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์.....	36
3.2 สารเคมี.....	36
3.3 การทดสอบสมบัติเบื้องต้น.....	37
3.3.1 การเตรียมอุปกรณ์ สำหรับการเก็บอากาศ.....	37
3.3.2 การเตรียมสารเคมีสำหรับการเก็บอากาศ.....	39
3.3.3 การจำลองสถานการณ์ไอกรด.....	40
3.3.4 การวิเคราะห์หาปริมาณกรดในสารดูดซึ่ม.....	41
3.4 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	42
3.4.1 การศึกษาผลของความเข้มข้นของสารดูดซึ่มต่อประสิทธิภาพของอุปกรณ์.....	42
ดักจับไอกรด	
3.4.2 การศึกษาผลของปริมาณไอกรดจากแหล่งกำเนิด.....	43
3.4.3 การศึกษาอัตราการไหลของป้มีผลต่ออุปกรณ์ดักจับไอกรด.....	43

## สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
3.4.4 การศึกษาการเปิดที่ดูดควันควบคู่กับการทำงานของอุปกรณ์ดักจับไอกรด.....	43
3.4.5 การศึกษาการเพิ่มคอลัมน์สารดูดซับเข้ามาในชุดอุปกรณ์ดักจับไอกรด.....	43
3.4.6 การควบคุมคุณภาพในการวิเคราะห์.....	43
<b>บทที่ 4 ผลการวิจัยและการอภิปรายผล.....</b>	<b>45</b>
4.1 ผลการศึกษาความเข้มข้นของสารดูดซึ่มต่อประสิทธิภาพของอุปกรณ์ดักจับไอกรด.....	47
4.2 ผลการศึกษาแหล่งกำเนิดไอกรดต่อประสิทธิภาพของอุปกรณ์ดักจับไอกรด.....	49
4.3 การศึกษาอัตราการไหลของบีมที่มีผลต่ออุปกรณ์ดักจับไอกรด.....	50
4.4 ผลการศึกษาใช้ที่ดูดควันควบคู่กับการทำงานของอุปกรณ์ดักจับไอกรด.....	52
4.5 ผลการดักจับไอกรดด้วยการดูดซึ่มและดูดซับ.....	54
<b>บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....</b>	<b>56</b>
เอกสารอ้างอิง.....	57
ภาคผนวก.....	61
ภาคผนวก ก.....	62
ภาคผนวก ข.....	67
ภาคผนวก ค.....	68
ภาคผนวก ง.....	96

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
ตารางที่ 2.1 ประเภทสารประกอบกรด.....	4
ตารางที่ 2.2 สมบัติทั่วไปของกรดบางชนิด.....	5
ตารางที่ 2.3 ช่วงการเปลี่ยนสีของอินดิเคเตอร์.....	12
ตารางที่ 2.4 สมบัติของการดูดซับทางเคมีและทางกายภาพ.....	15
ตารางที่ 2.5 สมบัติทางเคมี.....	22
ตารางที่ 2.6 ความสามารถในการดูดความชื้น.....	22
ตารางที่ 3.1 การวิเคราะห์สมบัติเบื้องต้นของสารละลายและอุปกรณ์ดักจับไอกรด.....	37
ตารางที่ 3.2 สภาวะที่ใช้ในการวิเคราะห์ด้วยเครื่องไอออนโครมาโทกราฟี.....	42
ตารางที่ ข-1 ความปลอดภัยในการทำงานเกี่ยวกับภาวะแวดล้อม (สารเคมี).....	67
ตารางที่ ค-1 ข้อมูลแหล่งกำเนิด 1 ฟลาस्क ความเข้มข้น 0.1 M.....	68
ตารางที่ ค-2 ข้อมูลแหล่งกำเนิด 1 ฟลาस्क ความเข้มข้น 0.5 M.....	70
ตารางที่ ค-3 ข้อมูลแหล่งกำเนิด 1 ฟลาस्क ความเข้มข้น 1 M.....	72
ตารางที่ ค-4 ข้อมูลแหล่งกำเนิด 2 ฟลาस्क ความเข้มข้น 0.1 M.....	74
ตารางที่ ค-5 ข้อมูลแหล่งกำเนิด 2 ฟลาस्क ความเข้มข้น 0.5 M.....	76
ตารางที่ ค-6 ข้อมูลแหล่งกำเนิด 2 ฟลาस्क ความเข้มข้น 1 M.....	78
ตารางที่ ค-7 ข้อมูลแหล่งกำเนิด 3 ฟลาस्क ความเข้มข้น 0.1 M.....	80
ตารางที่ ค-8 ข้อมูลแหล่งกำเนิด 3 ฟลาस्क ความเข้มข้น 0.5 M.....	82
ตารางที่ ค-9 ข้อมูลแหล่งกำเนิด 3 ฟลาस्क ความเข้มข้น 1 M.....	84

## สารบัญตาราง(ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ตารางที่ ค-10 ข้อมูลอัตราการไหล 0.1 L/min.....	86
ตารางที่ ค-11 ข้อมูลอัตราการไหล 0.2 L/min.....	88
ตารางที่ ค-12 ข้อมูลอัตราการไหล 0.3 L/min.....	90
ตารางที่ ค-13 ข้อมูลการเปิดตู้ดูดควันควบคู่.....	92
ตารางที่ ค-14 ข้อมูลระบบดูดซับร่วมกับระบบดูดซึม.....	94
ตาราง ง-1 ตารางเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าแต่ละซ้ำ โดยใช้ Multiple Comparison.....	96
ด้วยวิธี Tukey's ของแหล่งกำเนิดไอกรด	
ตาราง ง-2 ตารางเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าแต่ละซ้ำ โดยใช้ Multiple Comparison.....	96
ด้วยวิธี Tukey's ของอัตราการไหลชุดอุปกรณ์	

## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
รูปที่ 2.1 pH meter และ Electrode.....	13
รูปที่ 2.2 เครื่องวัดพีเอช.....	14
รูปที่ 2.3 High volume.....	18
รูปที่ 2.4 ซิลิกาเจล (Silica Gel) .....	21
รูปที่ 2.5 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำในอากาศที่อุณหภูมิต่างๆ ณ ความชื้นสัมพัทธ์ 50%.....	23
และ 100%	
รูปที่ 2.6 ถ่านกัมมันต์.....	23
รูปที่ 2.7 ผงแคลเซียมคาร์บอเนต.....	27
รูปที่ 2.8 การใช้การผสมอากาศกับน้ำโดยการใช้คอคอดและแรงดันสูงแบบเวนจูรี.....	30
รูปที่ 2.9 ระบบสครับบิงแบบ Three Bed Cross Flow Packed Tower.....	30
รูปที่ 2.10 ระบบสครับบิงแบบ Countercurrent Packed Tower.....	31
รูปที่ 2.11 เส้นผ่านศูนย์กลาง.....	31
รูปที่ 3.1 ชุดอุปกรณ์ดักจับไอกรดด้วยสารดูดซึ่ม.....	38
รูปที่ 3.2 ชุดอุปกรณ์ดักจับไอกรดด้วยสารดูดซึ่มและคอลัมน์ดูดซับ.....	39
รูปที่ 4.1 ปริมาณไอกรดที่ดักได้ทั้งหมด (AS) ต่อความเข้มข้นของสารดูดซึ่ม.....	47
รูปที่ 4.2 ประสิทธิภาพการบำบัดไอกรดต่อความเข้มข้นของสารดูดซึ่ม.....	48
รูปที่ 4.3 ปริมาณไอกรดที่ดักได้ทั้งหมด (AS) ต่อแหล่งกำเนิด.....	49
รูปที่ 4.4 ประสิทธิภาพการบำบัดไอกรดต่อแหล่งกำเนิด.....	50

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
รูปที่ 4.5 ปริมาณไอกรดที่ดักได้ทั้งหมด (AS) ต่ออัตราการไหล.....	51
รูปที่ 4.6 ประสิทธิภาพการบำบัดไอกรดต่ออัตราการไหล.....	52
รูปที่ 4.7 ปริมาณไอกรดที่ดักได้ทั้งหมด (AS) ต่อการจำลองสถานการณ์ตู้ดูดควัน.....	53
รูปที่ 4.8 ปริมาณไอกรดที่ดักได้ทั้งหมด (AS) ต่อระบบของชุดอุปกรณ์ดักจับไอกรด.....	55

## คำย่อและสัญลักษณ์

คำย่อ/สัญลักษณ์	คำอธิบาย
AS	อุปกรณ์ดักจับไอกรด (Acid Scrubber)
IM	อิมพิงเจอร์ (Impinger)
°C	องศาเซลเซียส
K	เคลวิน
Mpa	เมกะปาสกาล
mM	มิลลิโมลาร์
uS/cm	ไมโครซีเมนต์
R <sup>2</sup>	สหสัมพันธ์เชิงเส้น (Coefficient of Determination)
eq/m <sup>3</sup>	น้ำหนักสมมูลต่อลูกบาศก์เมตร
mg/L	มิลลิกรัมต่อลิตร
kJ/mol	กิโลจูลต่อโมล
qe	ปริมาณของสารถูกดูดซับบนสารดูดซับหนึ่งกรัม
Ce	ความเข้มข้นของสารละลายที่สภาวะสมดุล
Q°	ปริมาณของสารถูกดูดซับอิ่มตัวแบบขั้นเดียว
b	ค่าคงที่แลงเมียร์ที่อุณหภูมิหนึ่งๆ
Vair STP	ปริมาตรอากาศที่อุณหภูมิและความดันที่มาตรฐาน
V Absorber	ปริมาตรของสารละลายดูดซึม
[SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> ]	ความเข้มข้นของซัลเฟต
IC	การวิเคราะห์ด้วยเครื่องไอออนโครมาโทกราฟี
atm	หน่วยของบรรยากาศมาตรฐาน
Qacid	ปริมาณกรดในขวดแก้ว (Quantity of acid)
Cair	ความเข้มข้นกรดในห้องปฏิบัติการ (Concentration of acid in the air)

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

กรด (Acid) เป็นสารประกอบซึ่งทำปฏิกิริยากับเบสได้เกลือ และน้ำ โดยทั่วไปกรดมีรสเปรี้ยว มีสมบัติทำปฏิกิริยากับโลหะ และเบสได้ เช่น แคลเซียม ( $\text{Ca}^{2+}$ ) โซเดียมคาร์บอเนต ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) เมื่อกรดละลายน้ำมี pH ของสารละลายน้อยกว่า 7 โดยที่ความแรงของกรดจะแรงขึ้นตามค่า pH ที่ลดลง และเปลี่ยนกระดาษลิตมัสสีน้ำเงินเป็นแดง ตัวอย่างของกรดที่ใช้ทั่วไปรวมไปถึงกรดจากในโรงงานอุตสาหกรรม เช่น กรดอะซิติกพบในน้ำส้มสายชู กรดซัลฟิวริกพบในแบตเตอรี่รถยนต์ และกรดทาร์ตริกพบในการทำขนม กรดสามารถเป็นได้ทั้งสารละลายของเหลว หรือของแข็ง สำหรับก๊าซ อย่างเช่น ก๊าซไฮโดรเจนคลอไรด์ กรดแก่และกรดอ่อนที่มีเข้มข้นสูงบางชนิดมีฤทธิ์กัดกร่อน ปัจจุบันมีการทำการทดลองทางวิทยาศาสตร์เป็นจำนวนมาก ซึ่งในการทดลองแต่ละการทดลองนั้นมีการใช้กรดต่างๆ ในแต่ละขั้นตอน เช่น ขั้นตอนการย่อย กรดที่ใช้ในการย่อย เช่น กรดไฮโดรโบรมิก ( $\text{HBr}$ ), กรดฟอสฟอริก ( $\text{H}_3\text{PO}_4$ ), กรดไนตริก ( $\text{HNO}_3$ ) และกรดซัลฟิวริก ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) เป็นต้น ซึ่งในระหว่างการย่อยนั้นจึงส่งผลให้เกิดไอกรดในบรรยากาศเกิดขึ้นทำให้ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมในบริเวณดังกล่าว ส่งผลต่อสุขภาพอนามัยของผู้ปฏิบัติงาน และมีผลต่อการเกิดฝนกรดได้

ฝนกรดเป็นผลมาจากก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (Sulfur dioxide,  $\text{SO}_2$ ) และไนโตรเจนออกไซด์ (Nitrogen oxide,  $\text{NO}$ ) โดยก๊าซทั้งสองชนิดนี้มักจะเกิดจากการเผาผลาญเชื้อเพลิงฟอสซิล เช่น ถ่านหิน ก๊าซธรรมชาติ และน้ำมัน ก๊าซทั้งสองชนิดนี้จะทำปฏิกิริยากับน้ำ และสารเคมีอื่น ๆ ในชั้นบรรยากาศเพื่อก่อให้เกิดกรดซัลฟิวริก (Sulfuric acid,  $\text{H}_2\text{SO}_4$ ), กรดไนตริก (Nitric acid,  $\text{HNO}_3$ ) และสารมลพิษอื่น ๆ สามารถดูดซับหรือเกิดปฏิกิริยากับสารอื่นๆผสมในชั้นบรรยากาศ ทั้งในรูปของอนุภาค หรือแอโรซอล ละลายในชั้นเมฆ แพร่กระจายไปได้ไกล หรืออาจถูกขจัด (Sink) ออกจากบรรยากาศแบบเปียก (Wet deposition) ในรูปฝนกรด

ผู้ได้รับสารพิษจากการปนเปื้อนของไอกรดเข้าสู่ร่างกาย จะก่อให้เกิดอันตรายต่อสุขภาพทั้งในระยะสั้นและระยะยาว เช่น ในระบบทางเดินหายใจ ผิวหนัง ตา และระบบหัวใจและหลอดเลือด เป็นต้น นอกจากนี้ ไอกรดนี้มีฤทธิ์กัดกร่อนจึงทำให้เกิดความเสียหายเครื่องมือและอุปกรณ์รอบข้าง

หากผู้ปฏิบัติการได้รับไอกรดเข้าไปเป็นเวลาต่อเนื่อง และมีจำนวนไอกรดในอากาศสูงเกินมาตรฐาน เป็นการได้รับสารพิษเรื้อรัง ทำให้เกิดปัญหาทั้งด้านสุขภาพและทรัพย์สินได้ เพื่อเป็นการรักษาสุขภาพแวดล้อมที่ดีในการทำการทดลองในห้องปฏิบัติการ จึงนำปัญหานี้มาศึกษาเพื่อหาอุปกรณ์ดักจับไอกรดในอากาศของห้องปฏิบัติการ เป็นแนวทางป้องกันและลดความเสี่ยง เพื่อให้ผู้ปฏิบัติการทำการทดลองได้อย่างมีประสิทธิภาพ และไม่มีผลกระทบต่อสุขภาพในอนาคต

## 1.2 วัตถุประสงค์

- 1.2.1 เพื่อศึกษาปริมาณไอกรดในอากาศที่เกิดขึ้นในห้องปฏิบัติการขณะทำการทดลอง
- 1.2.2 ประดิษฐ์อุปกรณ์ดักจับไอกรดในห้องปฏิบัติการ
- 1.2.3 เพื่อประเมินประสิทธิภาพของอุปกรณ์ดักจับไอกรด

## 1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย

- 1.3.1 ผลิตอุปกรณ์ดักจับไอกรดโดยใช้หลักการดูดซึมและแปรค่าปัจจัย คือ
  - แปรค่าชนิดของสารดูดซึม 2 ชนิด คือ สารละลายโซเดียมคาร์บอเนต และ สารละลายบัพเฟอร์ของเกลือคาร์บอเนต
  - แปรค่าความเข้มข้นของสารดูดซึมต่อการทำงานของอุปกรณ์
  - แปรค่าแหล่งกำเนิดไอกรดของสารดูดซึมต่อการทำงานของอุปกรณ์
  - แปรค่าอัตราการไหลของป้อนที่เหมาะสมต่อการทำงานของอุปกรณ์
  - การจำลองสถานการณ์ของผู้ดูดควันที่เหมาะสมต่อการทำงานของอุปกรณ์
- 1.3.2 ผลิตอุปกรณ์ดักจับไอกรดโดยใช้หลักการดูดซึมด้วยสารละลายและการดูดซับด้วยของแข็ง

## 1.4 ประโยชน์ที่ได้รับ

- 1.4.1 สามารถดักจับไอกรดที่เกิดขึ้นระหว่างทำการทดลอง
- 1.4.2 สามารถลดความเป็นพิษจากแหล่งกำเนิดก่อนที่ปล่อยสู่สิ่งแวดล้อม
- 1.4.3 ลดการนำเข้าอุปกรณ์จากต่างประเทศ
- 1.4.4 ยืดอายุการใช้งานของเครื่องมือในห้องปฏิบัติการ
- 1.4.5 ลดความเสี่ยงการจากได้รับไอกรดระหว่างทำการทดลอง
- 1.4.6 ลดปริมาณกรดที่ไม่ส่งผลกระทบต่อสุขภาพในระยะสั้น และระยะยาว

## บทที่ 2

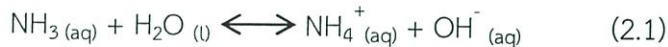
# ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 กรด

#### 2.1.1 นิยามของกรด

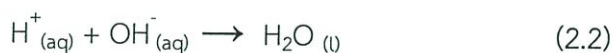
นักวิทยาศาสตร์หลายท่านได้ศึกษาเรื่องกรด-เบส และได้ตั้งทฤษฎีขึ้นหลายทฤษฎี เช่น ตามทฤษฎี Arrhenius Concept ได้กล่าวว่า กรด ได้แก่ สารที่ละลายน้ำแล้วให้โปรตอน ( $H^+$ ) หรือไฮโดรเนียมไอออน ( $H_3O^+$ ) เบส ได้แก่ สารที่ละลายน้ำแล้วให้ไฮดรอกไซด์ ( $OH^-$ )

Bronsted-Lowry Concept กล่าวว่า กรด คือ สารที่สามารถให้โปรตอน (Proton donor) แก่สารอื่น เบส คือ สารที่สามารถรับโปรตอน (Proton acceptor) จากสารอื่น ปฏิกริยาระหว่างกรดกับเบสจึงเป็นการถ่ายโปรตอนจากกรดไปยังเบส เช่น แอมโมเนีย ( $NH_3$ ) ละลายในน้ำ



ในปฏิกิริยาไปข้างหน้า  $NH_3$  จะเป็นตัวรับโปรตอนจาก  $H_2O$  ดังนั้น  $NH_3$  จึงเป็นเบส และ  $H_2O$  เป็นกรด แต่ในปฏิกิริยาย้อนกลับ  $NH_4^+$  จะเป็นฝ่ายให้โปรตอนแก่  $OH^-$  ดังนั้น  $NH_4^+$  จึงเป็นกรด และ  $OH^-$  เป็นเบส เมื่อมีการถ่ายโอน  $H^+$  (Protolytic) จะได้ว่า เมื่อกรดให้  $H^+$  ไป จะกลายเป็นเบส เช่น  $H_2O$  ซึ่งเป็นกรดให้  $H^+$  กลายเป็น  $OH^-$  ซึ่งเป็นเบส เมื่อเบสรับ  $H^+$  จะกลายเป็นกรด เช่น  $NH_3$  ซึ่งเป็นเบสรับ  $H^+$  กลายเป็น  $NH_4^+$  ซึ่งเป็นกรด สารบางประเภทสามารถให้หรือรับ  $H^+$  ก็ได้ เช่น  $H_2O$ ,  $NH_3$  ข้อจำกัดของทฤษฎีนี้คือ สารประกอบต้องละลายได้ในน้ำ ซึ่งในบางครั้ง ตัวทำละลายอาจไม่ใช่ น้ำ

Lewis Concept กล่าวว่า กรด คือ สารที่สามารถรับอิเล็กตรอนคู่โดดเดี่ยว (Electron pair acceptor) จากสารอื่น เบส คือ สารที่สามารถให้อิเล็กตรอนคู่โดดเดี่ยว (Electron pair donor) แก่สารอื่น เบสต้องมีอิเล็กตรอนคู่โดดเดี่ยว ทฤษฎีนี้ใช้อธิบาย กรด-เบส ตาม concept ของ Arrhenius และ Bronsted-Lowry ได้ และมีข้อได้เปรียบ คือสามารถอธิบาย กรด-เบส ในกรณีที่เกิดปฏิกิริยาระหว่างกัน และได้สารประกอบที่มีพันธะโคเวเลนต์ เช่น



### 2.1.2 ประเภทของกรด

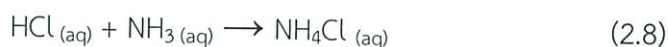
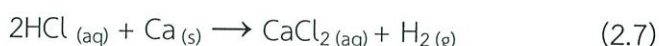
การจำแนกกรดอย่างง่ายตามแหล่งกำเนิด แยกเป็นกรดอินทรีย์ (Organic acid) ได้จากสิ่งมีชีวิต และ กรดอนินทรีย์ (Inorganic acid) เป็นกรดที่ได้มาจากแร่ธาตุ หรือกระบวนการผลิตทางอุตสาหกรรม ตัวอย่างดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ประเภทสารประกอบกรด

ประเภท	สารประกอบกรด	สูตรเคมี	แหล่งที่พบ
กรดอินทรีย์ (Organic acid)	กรดอะซิติก (Acetic acid)	$\text{CH}_3\text{COOH}$	ได้จากการหมักแป้งหรือน้ำตาล โดยใช้จุลินทรีย์
	กรดซิตริก (Citric acid)	$\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7$	เป็นกรดที่อยู่ในผลไม้ที่มีรสเปรี้ยว
	กรดแอสคอร์บิก (Ascorbic acid)	$\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_6$	วิตามินซี มีอยู่ในผลไม้ที่มีรสเปรี้ยว
	กรดอะมิโน (Amino acid)	$\text{R-CH(NH}_2\text{)-COOH}$	พบในเนื้อสัตว์ ผลไม้เปลือกแข็ง หรือพืชตระกูลถั่ว
กรดอนินทรีย์ (Inorganic acid) - กรดออกซี (Oxy acid)	กรดไนตริก (Nitric acid)	$\text{HNO}_3$	สังเคราะห์
	กรดซัลฟิวริก (Sulfuric acid)	$\text{H}_2\text{SO}_4$	สังเคราะห์
	กรดคาร์บอนิก (Carbonic acid)	$\text{H}_2\text{CO}_3$	สังเคราะห์
	กรดคลอริก (Chloric acid)	$\text{HClO}_3$	สังเคราะห์
- กรดไฮโดร (Hydro acid)	กรดไฮโดรคลอริก (Hydrochloric acid)	$\text{HCl}$	สังเคราะห์
	กรดไฮโดรไซยานิก (Hydrocyanic acid)	$\text{HCN}$	พบในพืชอาหารสัตว์ ได้แก่ มันสำปะหลัง ข้าวฟ่าง
	กรดไฮโดรโบรมิก (Hydrobromic acid)	$\text{HBr}$	สังเคราะห์
	กรดไฮโดรฟลูออริก (Fluorhydric acid)	$\text{HF}$	สังเคราะห์

### 2.1.3 สมบัติทั่วไปของกรดและการใช้ประโยชน์

กรดสามารถเกิดปฏิกิริยากับเบสได้ผลิตภัณฑ์เป็นเกลือ กรณีที่เป็นต่างได้ผลิตภัณฑ์เป็นเกลือและน้ำ ดังสมการเคมี เช่น



ตารางที่ 2.2 สมบัติทั่วไปของกรดบางชนิด

กรด	จุด หลอมเหลว (°C)	จุด เดือด (°C)	ความ ถ่วงจำเพาะ	ความดันไอ	LD <sub>50</sub> (รับสารพิษทาง ปาก)
อะซิติก(CH <sub>3</sub> COOH)	16.5	118.1	1.05	11 mm at 20°C	3310 mg/kg
ซิตริก (C <sub>6</sub> H <sub>8</sub> O <sub>7</sub> )	153	175	1.42	0.001 mmHg at 20°C	3000 mg/kg
แอสคอร์บิก (C <sub>6</sub> H <sub>8</sub> O <sub>6</sub> )	190-192	553	-	-	11900 mg/kg.
ไนตริก (HNO <sub>3</sub> )	-42	121	1.41	62 mm at 20°C	>90 mL/kg
ซัลฟิวริก (H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> )	-2	327	1.84	<0.3 mmHg at 20°C	2140 mg/kg
บอริก (H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub> )	171	300	1.44	2.6 mmHg at 20°C	2660 mg/kg
ไฮโดรคลอริก (HCl)	-25	109	1.19	-	>90 mL/kg
ไฮโดรโบรมิก(HBr)	-86.9	-66.8	-	2.3 Mpa at 21°C	350 mg/kg
ไฮโดรฟลูออริก (HF)	-35	108	1.16	-	>90 mL/kg
ไฮโดรไซยานิก (HCN)	-13	27	-	-	3.62-4.21 mg/kg

## การใช้ประโยชน์

กรดอะซิติก ( $\text{CH}_3\text{COOH}$ ) เป็นสารประกอบเคมีอินทรีย์ชนิดหนึ่งที่มีอยู่ในน้ำส้มสายชู (ไม่ใช่พืชตระกูลส้ม ซึ่งให้กรดซิตริก) มีรสเปรี้ยว และกลิ่นฉุน กรดอะซิติกแข็งตัวที่อุณหภูมิต่ำกว่า  $16.7^\circ\text{C}$  มีลักษณะเป็นผลึกใส กรดชนิดนี้มีฤทธิ์กัดกร่อน ไอของกรดสามารถทำให้ตา และจมูกระคายเคือง แต่ก็ยังมีฤทธิ์เป็นกรดอ่อนหากละลายน้ำ ซึ่งมีประโยชน์มากในการขจัดตะกอนในท่อน้ำ ในด้านอุตสาหกรรมอาหาร กรดอะซิติกใช้เป็นวัตถุเจือปนอาหารเพื่อควบคุมความเป็นกรด ในน้ำส้มสายชูมีกรดอะซิติกผสมอยู่ร้อยละ 3-6 กรดกลูตาเมตอะซิติก คือ กรดอะซิติกที่มีเนื่อกรดอยู่ร้อยละ 99.5 มีฤทธิ์กัดผิวหนัง กรดนี้มีจุดเยือกแข็งที่อุณหภูมิ  $17$  องศาเซลเซียส มีลักษณะเหมือนน้ำแข็ง จึงอาจสร้างปัญหาในการเก็บ เพราะจะสามารถขยายตัวเมื่อแข็ง ทำให้ภาชนะที่ใส่แตกได้ กรดอะซิติกเป็นกรดอินทรีย์ที่สำคัญที่สุด อาจสังเคราะห์ได้จากการออกซิไดซ์อะซิโตนไฮโดร โดยแมงกานีสอะซิเตตเป็นแคตตาไลต์ หรือโดยการออกซิไดซ์สารประกอบพาราฟินที่มีจำนวนคาร์บอน 5-7 อะตอม หรือจากน้ำมันปิโตรเลียม ผลพลอยได้จากการผลิตกรดอะซิติก โดยวิธีนี้มีกรดฟอร์มิก กรดโพรพิโอนิก กรดซักซินิก และกรดอะซิโตน นอกจากนั้นยังมีวิธีผลิตจากปฏิกิริยาระหว่างเมทานอลกับคาร์บอนมอนอกไซด์ที่อุณหภูมิและความดันสูง จากการเผาไหม้ในที่มีอากาศจำกัด และจากการหมักอุตสาหกรรมที่ใช้กรด อะซิติก ในการทำสี การจับก้อนของยางดิบ ทำน้ำส้มสายชู ใช้เป็นตัวทำละลาย ในการผลิตเซลลูโลส อะซิเตตอะซิติกแอนไฮไดร เป็นอนุพันธ์ของกรด ใช้ทำแอสไพริน

กรดซิตริก ( $\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7$ ) เป็นกรดอ่อน ใช้ประโยชน์เพื่อการถนอมอาหารโดยมีบทบาทสำคัญในการเพิ่มรสชาติให้กับอาหารให้มีรสเปรี้ยว และมีกลิ่นหอมชวนรับประทาน ได้รับการยอมรับโดยทั่วไปว่ามีความปลอดภัยในการบริโภค สามารถเติมลงไปในการอาหารโดยไม่เกิดอันตราย และสามารถย่อยสลายได้ง่าย และไม่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม กรดซิตริกพบได้ตามธรรมชาติโดยทั่วไป ในผักและผลไม้ที่มีรสเปรี้ยว โดยเฉพาะพืชตระกูลมะนาว สับปะรด และส้ม ซึ่งมีสัดส่วนกรด ซิตริกเป็นองค์ประกอบสูง ในระยะแรก ๆ การผลิตกรดซิตริกทำโดยคั้นมะนาวโดยตรง เพื่อให้ได้น้ำมะนาว ซึ่งนิยมผลิตด้วยวิธีการสังเคราะห์กรดซิตริก จากน้ำกลูโคสผ่านวิถีไกลโคไลซิส (Glycolysis Pathway) ได้เป็นสารออกซาโลอะซิเตต (Oxaloacetate) แล้วสะสมเป็นกรดซิตริก

กรดแอสคอร์บิก ( $\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_6$ ) เป็นสารอาหารจำเป็นสำหรับมนุษย์ และสัตว์อื่นบางชนิด ยังเป็นวิตามินประเภทที่ละลายในน้ำ วิตามินซี หมายถึง หลายวิตามินเมอร์ซึ่งมีกัมมันตภาพวิตามินซีในสัตว์ ซึ่งรวมกรดแอสคอร์บิก และเกลือของมัน บางรูปก็ออกซิไดซ์ของโมเลกุล เช่น กรดดีไฮโดรแอสคอร์บิก แอสคอร์เบต และกรดแอสคอร์บิก ที่มีอยู่ธรรมชาติในร่างกาย เมื่อตัวใดตัวหนึ่งถูกนำเข้าสู่เซลล์ เนื่องจากเปลี่ยนรูปได้ตาม pH

กรดอะมิโน ( $R-CH(NH_2)-COOH$ ) สารชีวโมเลกุลเป็นสารที่สิ่งมีชีวิตใช้ในการดำรงชีวิต ซึ่งจำแนกได้เป็น 4 ประเภท ได้แก่ โปรตีน คาร์โบไฮเดรต ลิพิด และกรดนิวคลีอิก ซึ่งทั้งสี่ประเภทเกี่ยวข้องกับการดำรงชีวิต คือ ช่วยให้ร่างกายเจริญเติบโต ให้พลังงานในการทำกิจกรรมต่างๆ ช่วยให้ร่างกายแข็งแรง และช่วยถ่ายถอดลักษณะทางพันธุกรรมอาหารที่รับประทานเข้าไป สารอาหารมี 6 ประเภท คือ ไขมัน คาร์โบไฮเดรต โปรตีน แร่ธาตุ วิตามิน และน้ำ ซึ่งแร่ธาตุ วิตามิน และน้ำ ไม่ใช่สารชีวโมเลกุลเนื่องจากเป็นสารอนินทรีย์

กรดไนตริก ( $HNO_3$ ) ส่วนใหญ่จะใช้ในปุ๋ยแอมโมเนียมไนเตรต และในการผลิตวัตถุระเบิด นอกจากนี้ยังใช้ในการสังเคราะห์สารอินทรีย์อุตสาหกรรม การแกะสลักโลหะ และเพื่อให้จรวดขับเคลื่อน หากหายใจเข้าไปจะระคายเคืองต่อทางเดินหายใจ เมื่อเปรียบเทียบกับกรดซัลฟูริก จะมีฤทธิ์กัดกร่อนเนื้อเยื่อน้อยกว่า และมีความเป็นพิษเช่นเดียวกับกรดไฮโดรคลอริก กรดนี้ใช้ในการผลิตปุ๋ยแอมโมเนียมไนเตรต และวัตถุระเบิด เช่น Trinitrotoluene (TNT) และ Nitroglycerine ใช้ในการสังเคราะห์ กรดไนตริกมีการเรียกชื่ออีกชื่อหนึ่ง คือ Nitrate aqua fortis ใช้กัดโลหะ เขียนลวดลายลงบนแผ่นโลหะ และ Fuming nitric acid หมายถึง กรดไนตริกที่มีความเข้มข้นของไนโตรเจนออกไซด์สูง กัดผิวหนังเป็นแผลสีเหลือง กัดสารได้หลายชนิดทั้งโลหะ และอโลหะ กรดไนตริกนี้ นอกจากจะมีฤทธิ์กัดกร่อนแล้ว ยังเป็นตัวให้ออกซิเจนได้ดี และให้ความพิษของ ไนโตรเจนออกไซด์ ดังนั้น เมื่อกรดไนตริกเข้มข้นถูกกับวัสดุที่เป็นเชื้อเพลิงได้ดี เช่น เศษผ้า เศษไม้ หรือสารอินทรีย์ ทำให้ลุกไหม้ได้ ภาชนะที่ใช้บรรจุจึงใช้แก้ว ซึ่งต้องป้องกันการกระแทกอย่างดี กรดไนตริกยังเป็นอันตรายเมื่อผสมกับสารที่มีรีดิวซิงเอเจนต์ เช่น แอลกอฮอล์ ตัวอย่างอุบัติเหตุจากกรดไนตริก เช่น เป็นสาเหตุของอุบัติเหตุเครื่องบิน Pan American ตกเมื่อเดือนพฤศจิกายน 2516 เมื่อเครื่องบินขึ้นได้ 2-3 นาที เกิดมีควันออกมาจากที่เก็บสินค้า 35 นาทีต่อมา เครื่องบินตกที่สนามบินบอสตัน ไฟที่เกิดขึ้นเนื่องมาจากกรดไนตริกซึมออกจากขวด ซึ่งบรรจุอยู่ในลังไม้ที่มีขี้เลื่อยเป็นตัวกันกระแทก คนที่ขนส่งสินค้าไม่ได้สังเกตเครื่องหมายนอกถังที่แสดงให้เอาด้านไหนตั้งขึ้น ขวดไนตริก จึงอยู่ในท่าตะแคง ทำให้กรดซึมออกมาผสมกับขี้เลื่อยได้ จึงเกิดไฟลุกขึ้น

กรดซัลฟูริก ( $H_2SO_4$ ) กรดกำมะถันที่ใช้ในอุตสาหกรรมปุ๋ยสำหรับการผลิต Superphosphates และ Ammonium sulfate กรดกำมะถันถูกนำมาใช้ในการผลิตของกระดาษ และอลูมิเนียม และซัลเฟต มีการใช้อย่างกว้างขวางสำหรับการทำน้ำให้บริสุทธิ์ อุตสาหกรรมปิโตรเลียมใช้กรดกำมะถันในกระบวนการอัลคาเลชั่น และในการกลั่นปิโตรเลียม ถ้าสัมผัสผิวหนังทำให้เป็นแผลไหม้ ปวดแสบปวดร้อน การสัมผัสถูกตาทำให้ตาแดง ปวดตา และสายตาวัวมัว หากหายใจเอาละออง หรือไอระเหยเข้าไปจะระคายเคืองต่อเนื้อเยื่อปาก จมูก คอ และปอด คัน ระคายในจมูก คอหอย มีอาการไอ จาม และหายใจลำบาก กรดนี้เป็นกรดที่สำคัญ และนิยมใช้กันมากในอุตสาหกรรมแทบทุกประเภท ถึงแม้ว่าบางครั้งจะไม่ปรากฏในการทำผลิตภัณฑ์สำเร็จรูป

อุตสาหกรรมที่ใช้กรดซัลฟิวริก เช่น การทำปุ๋ย การผลิตสารประกอบพวกซัลเฟต ต่าง ๆ อุตสาหกรรมหนัง ทำแผ่นดีบุก โลหะชุบ น้ำตาล สี สิ่งทอ ทำสบู่ โรงกลั่นน้ำมัน กรดนี้มีขายในรูปของสารละลายกรดซัลฟิวริกในน้ำ หรือซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ในกรดซัลฟิวริก เรียกว่า โอเลียม (Oleum)

**กรดคาร์บอนิก ( $H_2CO_3$ )** พบได้ในเครื่องดื่มอัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (Carbonated beverage) เช่น น้ำโซดา น้ำอัดลม เกลือของคาร์บอนิก คือ ไบคาร์บอเนต และคาร์บอเนต

**กรดคลอริก ( $HClO_3$ )** เป็นกรดออกซิของคลอรีน และถือว่าเป็นสารประกอบเกลือคลอเรตตัวแรกในลำดับที่กำหนดไว้อย่างเป็นทางการ กรดคลอริกเป็นกรดแก่ มีค่าคงที่สมดุลของกรด (pKa) ประมาณ -1 และยังเป็นตัวรับอิเล็กตรอน (Oxidant)

**กรดไฮโดรคลอริก (HCl)** เป็นสารประกอบเคมีประเภทกรดละลายในน้ำ โดยเป็นสารละลายของไฮโดรเจนคลอไรด์ (HCl) เป็นกรดแก่ เป็นส่วนประกอบหลักของกรดในกระเพาะ (Gastric acid) และใช้กันอย่างกว้างในอุตสาหกรรมเป็นของเหลวที่มีพลังการกัดกร่อนสูง ใช้อย่างกว้างขวางในการผลิตสารประกอบอินทรีย์ เช่น ไวนิลคลอไรด์ สำหรับผลิต PVC พลาสติก และ MDI/TDI (Toluene Diisocyanate) สำหรับผลิตพอลิยูรีเทน (Polyurethane) และใช้ในการผลิตขนาดเล็ก เช่น การผลิต เจนลาติน (Gelatin) ใช้ปรุงอาหาร และใช้ฟอกหนัง ถึงแม้ว่าปริมาณการใช้กรดไฮโดรคลอริกไม่มากเท่ากรดซัลฟิวริก กรดไฮโดรคลอริกเป็นกรดที่สำคัญตัวหนึ่ง ผลิตขึ้นจากปฏิกิริยาระหว่างโซเดียมคลอไรด์กับกรดซัลฟิวริก กรดนี้มีทั้งชนิดที่เป็นก๊าซไฮโดรเจนคลอไรด์บรรจุถัง และชนิดที่เป็นสารละลาย ใช้ในการสังเคราะห์สารประกอบพวกคลอไรด์ ใช้ในการบัดกรี ใช้ทำความสะอาดโลหะก่อนนำไปชุบ ใช้ทำกรดอื่นๆ ใช้กัดโลหะ และในการเขียนลายบนแผ่นโลหะ ใช้ในอุตสาหกรรมแก้ว เหล็กกล้า กาว หนัง กระดาษ สี ล้าง และอัดรูป น้ำตาล ผงชูรส ใช้ผสมน้ำยาขัดห้องน้ำ Aqua regia เป็นน้ำยาที่มีกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้นผสมกับไนตริก เข้มข้นในอัตราส่วน 3 : 1 หรือเรียกว่า กรดไนโตรไฮโดรคลอริก ใช้เป็นน้ำยากัดโลหะ โดยเฉพาะทองและแพลตตินัม ตัวกรดไฮโดรคลอริกไม่ทำปฏิกิริยากับสารที่เป็นเชื้อเพลิงดังเหมือนกรดไนตริก ถ้าทำกรดรั่วไหลจะให้ความร้อนของก๊าซไฮโดรเจนคลอไรด์กัดเยื้องจุก เวลาเปิดขวดควรทำให้เย็นเสียก่อน มิฉะนั้น ถ้าความดันไอในขวดสูง ให้ความร้อนพุ่งออกมา

**กรดไฮโดรไซยานิก (HCN)** เป็นกลุ่มของสารเคมีที่มีไซยาไนด์ไอออน ( $CN^-$ ) เป็นองค์ประกอบ สารเคมีกลุ่มนี้มีความเป็นพิษสูงมาก ใช้ในการทำงานบางอย่าง เช่น การชุบโลหะ การสังเคราะห์ สารเคมี การตรวจวิเคราะห์ทางเคมีในห้องปฏิบัติการ สารประกอบกลุ่มที่เป็นเกลือไซยาไนด์ (Cyanide salts) มีหลายชนิดที่พบบ่อย เช่น โซเดียมไซยาไนด์ (Sodium cyanide) โพแทสเซียมไซยาไนด์ (Potassium cyanide) หรือพบในรูปเกลือชนิดอื่นๆ เช่น แคลเซียมไซยาไนด์ (Calcium cyanide) ไอโอดีนไซยาไนด์ (Iodine cyanide) เป็นต้น เมื่อเกลือไซยาไนด์สัมผัสกับกรด

หรือมีการ เผาไหม้ของพลาสติกหรือผ้าสังเคราะห์ จะได้แก๊สไฮโดรเจนไซยาไนด์ (Hydrogen cyanide) เกิดขึ้น แก๊สชนิดนี้มีพิษอันตรายเช่นเดียวกับเกลือไซยาไนด์ แต่แพร่กระจายได้ง่ายกว่า เป็นสาเหตุสำคัญ อย่างหนึ่งของการเสียชีวิตในผู้ที่สูดควันไฟกรณีที่มีไฟไหม้ในอาคาร นอกจากนี้ยังพบแหล่งของ ไซยาไนด์ในธรรมชาติได้จากสารอะมิกดาลิน (Amygdalin) ซึ่งพบได้ในเมล็ดของ แอปพรicot (Apricot) เซอร์รี่ดำ (Black cherry) และสารลินามาริน (Linamarin) ซึ่งพบได้ในหัว และใบของ มันสำปะหลัง (Cassava) ในประเทศไทยพบมีรายงานพิษไซยาไนด์ เนื่องจากการกินมันสำปะหลังได้ และบางรายถึงกับทำให้เสียชีวิต

**กรดไฮโดรโบรมิก (HBr)** ถูกนำมาใช้ในการผลิตของ organic and inorganic bromides และ hydrobromic acid (เป็นตัว reducing agent) เมื่อหายใจเอาแก๊สไฮโดรเจนโบรมด์เข้าไป ฤทธิ์ระเหยของสารจะทำให้เกิดอาการระคายเคืองอย่างรุนแรง อาจเป็นสาเหตุทำให้ระบบทางเดินหายใจ และปอดถูกทำลาย เมื่อสัมผัสทางผิวหนัง จะทำให้เกิดแผลไหม้อย่างรุนแรง เมื่อสัมผัสดวงตา

**กรดไฮโดรฟลูออริก (HF)** เป็นสารละลายของไฮโดรเจนฟลูออไรด์ในน้ำ แม้ว่าจะมีฤทธิ์กัดกร่อนอย่างแรง และยากแก่การใช้งาน กรดนี้เป็นเพียงกรดอ่อนเท่านั้น กรดไฮโดรฟลูออริกใช้เป็น แหล่งของฟลูออรีนในการสังเคราะห์สารประกอบต่างๆ ทั้งยา และพอลิเมอร์ เช่น เทฟลอน คนทั่วไป รู้จักกรดไฮโดรฟลูออริกในฐานะกรดกัดแก้ว เพราะกรดชนิดนี้ทำปฏิกิริยากับซิลิกอนไดออกไซด์ได้

#### 2.1.4 ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม

##### มลพิษทางอากาศ

แหล่งกำเนิดมลพิษทางอากาศที่สำคัญของประเทศไทย อาจแบ่งเป็น 2 กลุ่มใหญ่ ดังนี้ แหล่งกำเนิดจากยานพาหนะ ปัญหานี้เป็นมลพิษทางอากาศที่เกิดจากการจราจรเป็นสำคัญ ซึ่งให้ ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ ก๊าซออกไซด์ของไนโตรเจน สารประกอบไฮโดรคาร์บอน ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ รวมทั้งฝุ่นละอองขนาดเล็ก และสารตะกั่ว ส่วนแหล่งกำเนิดจากโรงงานอุตสาหกรรม โดยส่วนมากเกิดจากกระบวนการผลิต เช่น จากการระเหยของก๊าซบางชนิด ซึ่งเกิดจากขยะมูลฝอย และของเสีย เป็นต้น ซึ่งเชื้อเพลิงที่นำมาใช้ในการเผาไหม้ และในกระบวนการผลิตนั้น มี 3 ประเภทใหญ่ๆ คือ เชื้อเพลิงที่เป็นของแข็ง เชื้อเพลิงที่เป็นของเหลว ได้แก่ น้ำมันเตา และน้ำมันดีเซล เชื้อเพลิงที่เป็น ก๊าซ ได้แก่ ก๊าซธรรมชาติ และก๊าซ LPG สิ่งที่มาจากแหล่งกำเนิดดังกล่าว คือ สารมลพิษทางอากาศที่เกิดจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงต่างๆ ได้แก่ ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ ฝุ่นละออง ก๊าซซัลเฟอร์ ไดออกไซด์ และก๊าซออกไซด์ของไนโตรเจน

สารมลพิษ คือของเสียหรือมลสารใดๆ ที่ก่อให้เกิดหรืออาจก่อให้เกิดผลกระทบต่อ คุณภาพสิ่งแวดล้อม หรือภาวะที่เป็นพิษภัยอันตรายต่อสุขภาพอนามัยของประชาชน สารมลพิษบาง ชนิดเกิดจากการเผาเชื้อเพลิงฟอสซิล (Fossil Fuels) ได้แก่ ก๊าซออกไซด์ของซัลเฟอร์ และก๊าซ

ออกไซด์ของไนโตรเจน เมื่อลอยเข้าสู่บรรยากาศ และถูกพัดพาไปได้ไกล ส่งผลให้หมอก น้ำค้าง และฝน มีสภาพเป็นกรด กลายเป็นปัญหาสิ่งแวดล้อมของภูมิภาคและของโลก สารกรดในบรรยากาศเป็นปัญหาสิ่งแวดล้อมที่รุนแรงในประเทศอุตสาหกรรมหรือประเทศที่พัฒนาแล้ว ทำให้ความเสียหายต่อสุขภาพ ทรัพย์สิน แหล่งผลิตอาหาร และทรัพยากรธรรมชาติ ต้องหาแนวทางเพื่อลดการปล่อยมลพิษ และบรรเทาความเสียหายที่เกิดขึ้น

ประเทศไทยเป็นประเทศหนึ่งในภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ที่กำลังมีการพัฒนา ด้านเศรษฐกิจและสังคมในอัตราที่สูง ทำให้ชุมชนเมือง อุตสาหกรรม และการคมนาคมขนส่งมีการขยายตัวอย่างรวดเร็ว เป็นผลให้มีการใช้พลังงานจากเชื้อเพลิงฟอสซิลเพิ่มขึ้นเป็นจำนวนมาก ปัญหาเรื่องสารกรดในบรรยากาศจึงได้เริ่มปรากฏขึ้นแล้ว โดยในบางครั้งตรวจพบว่าน้ำฝนที่ตกลงมาในเขตเมือง และเขตอุตสาหกรรมมีความเป็นกรดสูงกว่าน้ำฝนธรรมชาติ สำหรับประเทศไทยปัญหานี้อาจทวีความรุนแรงขึ้นได้ในอนาคต เช่นเดียวกับที่เกิดในประเทศอุตสาหกรรมที่พัฒนาแล้ว สารกรดสามารถแพร่กระจายไปในบรรยากาศได้ไกลหลายร้อยกิโลเมตรจากแหล่งกำเนิด (กรมควบคุมมลพิษ, 2555)

### ผลกระทบของก๊าซมลพิษที่มีฤทธิ์เป็นกรด

#### 1. คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO)

ก๊าซที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ของสารประกอบคาร์บอน เป็นก๊าซที่ไม่มีสีรส และกลิ่นเบากว่าอากาศทั่วไป เมื่อหายใจเข้าไปก๊าซนี้จะรวมตัวฮีโมโกลบิน (Haemoglobin) ในเม็ดเลือดแดงได้มากกว่าออกซิเจนถึง 200-250 เท่า เกิดเป็นคาร์บอกซีฮีโมโกลบิน (Carboxyhemoglobin) ทำให้เม็ดเลือดแดงไม่สามารถรับออกซิเจน ( $O_2$ ) ได้ตามปกติ ร่างกายได้รับ  $O_2$  น้อยลง และหัวใจต้องสูบฉีดโลหิตมากขึ้น เพื่อให้โลหิตผ่านปอดมากขึ้น ได้มีการรับ  $O_2$  ให้มากขึ้นหัวใจ และปอดจะต้องทำงานหนักขึ้น อาการทั่วไปเมื่อร่างกายได้รับ CO คือ วิงเวียนศีรษะหายใจอึดอัด คลื่นไส้อาเจียน และปวดศีรษะมึนงง หากร่างกายได้รับ CO มากอาจช็อกหมดสติหรือตายได้

#### 2. ก๊าซออกไซด์ของไนโตรเจน ( $NO_x$ )

ออกไซด์ของไนโตรเจนประกอบด้วยไนตรัสออกไซด์ ( $N_2O$ ) ไนตริกออกไซด์ (NO) ไดไนโตรเจน ไตรออกไซด์ ( $N_2O_3$ ) ไนโตรเจนไดออกไซด์ ( $N_2O$ ) ไดไนโตรเจนเตตราออกไซด์ ( $N_2O_4$ ) และไดไนโตรเจนเพนตะออกไซด์ ( $N_2O_5$ ) โดยทั่วไปก๊าซที่ทำให้เกิดมลพิษทางอากาศ คือ ก๊าซไนตริกออกไซด์ (NO) และก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์ ( $NO_2$ )

ก๊าซไนตริกออกไซด์ (NO) เป็นก๊าซเฉื่อย มีคุณสมบัติเป็นยาสลบ เป็นก๊าซไม่มีสีและกลิ่น ในธรรมชาติทั่วไปพบในปริมาณน้อยกว่า 0.5 ppm ละลายน้ำได้เล็กน้อย ส่วนไนโตรเจนไดออกไซด์ ( $NO_2$ ) เป็นก๊าซสีน้ำตาล ถ้ามีจำนวนมากจะมองเห็น ก๊าซทั้งสองชนิดจะเกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ ได้แก่ ฟ้าผ่า ฟ้าแลบ ภูเขาไฟระเบิด หรืออาจเกิดจากกลไกของจุลินทรีย์ และนอกจากนี้ อาจเกิดจาก

มนุษย์ เช่น อุตสาหกรรมผลิตกรดไนตริกและกรดกำมะถัน โรงงานผลิตวัตถุระเบิด และการเผาไหม้ของเครื่องยนต์ เป็นต้น

ก๊าซไนตริกออกไซด์ทำปฏิกิริยากับโอโซนในบรรยากาศ จะเกิดเป็นไนโตรเจนไดออกไซด์และออกซิเจน ในทางตรงกันข้าม เมื่อมีแสงแดดจะทำให้ไนโตรเจนออกไซด์เกิดปฏิกิริยาผันกลับโดยทั่วไป ก๊าซ  $\text{NO}_2$  ไม่เป็นอันตรายต่อร่างกาย เกิดอันตรายแต่  $\text{NO}_2$  รวมตัวกับน้ำในอากาศเป็นกรดไนตริก ( $\text{HNO}_3$ ) กรดไนตริก ซึ่งมีฤทธิ์กัดกร่อน



### 3. ซัลเฟอร์ออกไซด์ ( $\text{SO}_x$ )

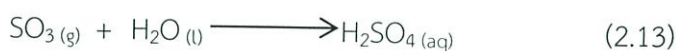
ออกไซด์ซัลเฟอร์ประกอบด้วย  $\text{SO}_2$  และ  $\text{SO}_3$  โดยทั่วไปมักเขียนแทนซัลเฟอร์ออกไซด์ ด้วย  $\text{SO}_x$  ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ( $\text{SO}_2$ ) เป็นก๊าซไม่มีสี ไม่ติดไฟ มีกลิ่นแสบจมูก ละลายได้ดีในน้ำ โดยจะเปลี่ยนเป็นกรดซัลฟูริก ในธรรมชาติทั่วไปจะมีปริมาณน้อยในบรรยากาศ คือ 0.02 - 0.1 ppm. แต่ถ้าพบในปริมาณสูงแล้วส่วนมากจะเกิดจากการเผาไหม้ โดยใช้เชื้อเพลิงหรือวัสดุที่มีกำมะถันเป็นส่วนประกอบปฏิกิริยาการเกิดซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ( $\text{SO}_2$ )



ถ้า  $\text{SO}_2$  ทำปฏิกิริยากับ  $\text{O}_2$  ในอากาศจะได้  $\text{SO}_3$  ยิ่ง ถ้าในบรรยากาศมีตัวเร่งปฏิกิริยา เช่น มังกานีส เหล็ก หรือกลุ่ม metallic oxide จะทำให้ปฏิกิริยาเร็วขึ้น



ถ้าในบรรยากาศ มีละอองน้ำหรือความชื้นสูง  $\text{SO}_2$  เกิดการรวมตัวเป็นฝนกรด (acid rain) ซึ่งส่งผลกระทบต่อระบบนิเวศ ป่าไม้ แหล่งน้ำ สิ่งมีชีวิตและมีฤทธิ์กัดกร่อนอาคารสิ่งก่อสร้างต่างๆ



#### 2.1.5 การตรวจสอบความเป็นกรด-เบสของสารละลาย

การตรวจสอบความเป็นกรด-เบส ของสารละลายกรด สามารถใช้อินดิเคเตอร์ ซึ่งเป็นสารที่ใช้บอกสมบัติบางอย่างในปฏิกิริยาเคมี โดยการเปลี่ยนสี หรือการเปลี่ยนแปลงสมบัติบางอย่างที่มองเห็นได้ สารที่นำมาใช้ในการตรวจสอบความเป็นกรด-เบสของสารละลายต่างๆ เรียกว่า อินดิเคเตอร์สำหรับกรด-เบส (Acid-base indicator)

อินดิเคเตอร์ (Indicator) คือ สารที่ใช้ตรวจสอบไฮโดรเนียมไอออน ( $H_3O^+$ ) และไฮดรอกไซด์ไอออน ( $OH^-$ ) ได้ เนื่องจากสารละลายที่เป็นกรด มีความเข้มข้นของไฮโดรเนียมไอออนมากกว่า สารละลายที่เป็นเบส กรดเป็นสารประกอบไฮโดรเจน เมื่อละลายอยู่ในน้ำจะแตกตัวให้ไฮโดรเนียมไอออน อินดิเคเตอร์กลุ่มเบสเป็นไฮดรอกไซด์ของโลหะ หรืออนุมูลที่มีค่าเทียบเท่าโลหะ ซึ่งเมื่อละลายอยู่ในน้ำ จะแตกตัวให้ไฮดรอกไซด์ไอออน เช่น ฟีนอล์ฟทาลีน ( $C_{20}H_{14}O_4$ ), เมทิลเรด, บรอมไทมอลบลู

การใช้อินดิเคเตอร์ในการทดสอบหาค่า pH ของสารละลายนั้น ทราบค่า pH โดยประมาณเท่านั้น ถ้าต้องการทราบค่า pH ที่แท้จริง จะต้องใช้เครื่องมือวัด pH ที่เรียกว่า พีเอซีมิเตอร์ (pH meter) ซึ่งเป็นเครื่องมือที่สามารถตรวจวัดค่า pH ของสารละลายได้เป็นเวลานานติดต่อกัน ทำให้ตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงความเป็นกรด-เบสของสารละลายได้ และค่า pH ที่อ่านได้จะมีความละเอียดมากกว่าการใช้อินดิเคเตอร์

### ตารางที่ 2.3 ช่วงการเปลี่ยนสีของอินดิเคเตอร์

อินดิเคเตอร์	ช่วง pH ของการเปลี่ยนสี	การเปลี่ยนสี
เมทิลออนเรนจ์	3.2-4.4	ส้ม-เหลือง
เมทิลเรด	4.2-6.3	ส้ม-เหลือง
ลิตมัส	5.0-8.0	ส้ม-น้ำเงิน
บรอมไทมอลบลู	6.0-7.6	เหลือง-น้ำเงิน
ฟีนอลเรด	6.8-8.4	เหลือง-ส้ม
ฟีนอล์ฟทาลีน	8.3-10.0	ใส-ชมพู
ไทมอลบลู	1.2-2.8	ส้ม-เหลือง
โบรโมฟีนอลเรด	4.8-6.8	เหลือง-ชมพู
อินดิโกคาร์มีน	11.4-13.0	น้ำเงิน-เหลือง
ครีซอลเรด	0.2-1.8	ส้ม-เหลือง
คองโกเรด	3.0-5.0	น้ำเงิน-ส้ม

ที่มา: ถนัด ศรีบุญเรือง และคณะ, 2554

การวิเคราะห์ความกรด-ด่าง เป็นการวิเคราะห์ความเข้มข้นของไฮโดรเจน ( $H^+$ ) ในน้ำ ซึ่งสามารถแสดงค่าให้สะดวกต่อการนำไปใช้คำนวณเป็นค่าลบของ  $\log$  ไฮโดรเจนไอออนที่มีความเข้มข้นเป็นโมล/ลิตร ดังสมการ

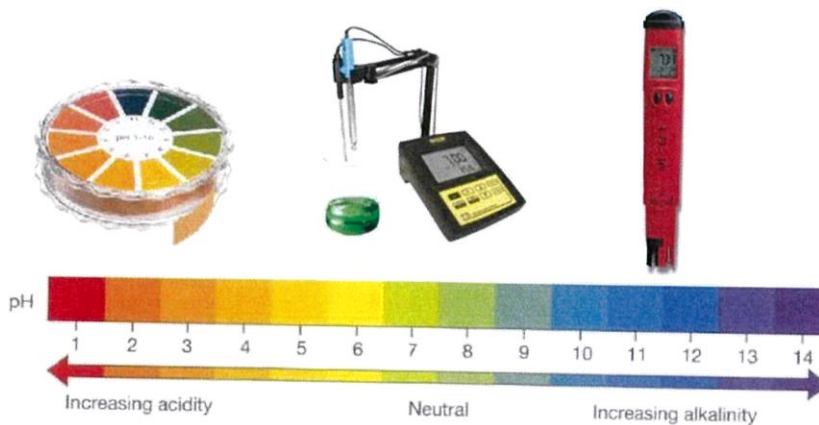
$$\text{pH} = -\log [\text{H}^+] \quad (2.14)$$

ในน้ำบริสุทธิ์ที่ 25 องศาเซลเซียส ปริมาณไฮโดรเจนไอออนมีค่าเท่ากับปริมาณไฮดรอกซิลไอออน ( $\text{OH}^-$ ) คือ  $1.0 \times 10^{-7}$  โมล/ลิตร หรือ  $\text{pH} = 7$  จากการคำนวณ pH ด้วย  $\log$  ฐาน 10 ดังนั้นเมื่อ pH เปลี่ยนไป 1 หน่วย แสดงว่า ความเข้มข้นของไฮโดรเจนไอออนเปลี่ยนไป 10 เท่า

pH เป็นค่าที่แสดงว่าสารละลายนั้นเป็นกรดหรือเป็นเบส เป็นตัวแปรที่ใช้ประเมินคุณภาพน้ำในเบื้องต้น ว่าน้ำนั้นมีค่า pH หรือไม่มี pH มีค่าอยู่ระหว่าง 1-14 ถ้า pH มีค่าน้อยกว่า 7 แสดงว่าน้ำนั้นเป็นกรด ถ้า pH มีค่ามากกว่า 7 แสดงว่าน้ำนั้นเป็นด่าง น้ำที่มีค่านำไฟฟ้าต่ำกว่า  $0.2 \text{ dS m}^{-1}$  อาจมีค่า pH อยู่นอกช่วงปกติ เนื่องจากน้ำมีสมบัติในการต้านทานการเปลี่ยนแปลง (Buffering capacity) ต่ำ ซึ่งควรวิเคราะห์หัตตัวแปรอื่นๆ ประกอบเพื่อประเมินคุณภาพของน้ำ (อรทัย, 2546)

### หลักการของการวัดด้วยเครื่อง pH

การวัด pH คือ การวัดสภาพความเป็นกรดหรือเป็นเบสของสารละลายที่มีน้ำเป็นตัวทำละลาย โดยวัดความต่างศักย์ที่เกิดขึ้นระหว่างอิเล็กโทรดอ้างอิง (Reference Electrode) กับอิเล็กโทรดตรวจวัด (Sensing Electrode) ความต่างศักย์ที่ได้เกิดจากจำนวนของไฮโดรเจนไอออน ( $\text{H}^+$ ) อิเล็กโทรดเปลี่ยนความต่างศักย์ที่เกิดจากไอออนให้เป็นความต่างศักย์ไฟฟ้า แล้วขยายให้มีความต่างศักย์สูงขึ้นด้วยเครื่องวัด pH (มันสิน, 2543)



รูปที่ 2.1 pH meter และ Electrode



รูปที่ 2.2 เครื่องวัดพีเอช

## 2.2 ทฤษฎีการดูดซับ

การดูดซับ (Adsorption) คือ การที่โมเลกุลของสารถูกดึงเข้ามาติดผิวของสารดูดซับ หรือ การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารที่พื้นผิวของสารถูกดูดซับ (Adsorbate) ที่สัมผัสโดยตรงกับสารดูดซับ (Adsorbent) โดยสารที่มีพลังงานอิสระที่ผิวต่ำจะถูกดูดซับได้ แต่สารที่มีพลังงานอิสระที่ผิวสูง จะไม่ถูกดูดซับ พลังงานอิสระที่ผิวของสารดูดซับจะมีความสัมพันธ์กับแรงตึงผิวและพื้นที่ผิว ดังสมการ (2.15) เมื่อความตึงผิว (Surface tension) หรือพื้นที่ผิว (Surface area) เปลี่ยนไปเป็นผลให้เกิดการเพิ่มขึ้นหรือลดลงของพลังงานอิสระที่ผิว ( $\Delta G_{\text{surface}}$ )

$$\Delta G_{\text{surface}} = \gamma A \quad (2.15)$$

เมื่อ  $\Delta G_{\text{surface}}$  = พลังงานอิสระที่ผิว  
 $\gamma$  = ความตึงผิว  
 $A$  = พื้นที่ผิว

ปริมาณสารถูกดูดซับขึ้นอยู่กับอุณหภูมิสัมบูรณ์ ความดันและพลังงานศักย์ของอันตรกิริยา (Interaction potential energy) ระหว่างสารถูกดูดซับ ซึ่งอาจเป็นของแข็ง ของเหลวหรือก๊าซ กับสารดูดซับซึ่งอาจเป็นของเหลวหรือของแข็ง ดังนั้น เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความดันหรือความเข้มข้น และการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิจะทำให้ปริมาณการดูดซับเปลี่ยนแปลง

การดูดซับบนผิวของแข็ง แบ่งออกได้ตามแรงที่ดูดซับระหว่างพื้นผิวโมเลกุลเป็น 2 ชนิด คือ การดูดซับทางกายภาพ (Physical adsorption หรือ Physisorption) แรงที่ใช้ดูดซับเป็นแรง แวนเดอวาลส์ (Van der Waals) เนื่องจากแรงดึงดูดระหว่างสารที่อยู่ในของเหลวกับสารดูดซับมีมากกว่าแรงดึงดูดระหว่างสารในของเหลวกับของเหลว ทำให้สารที่อยู่ในของเหลวเข้าติดอยู่ที่สารดูดซับแทน ตัวอย่างเช่น การดูดซับของถ่านกัมมันต์ ซึ่งภายในโครงสร้างของพื้นผิวมีรูพรุนมาก ทำให้มีการดูดซับบนพื้นที่ผิวของสารดูดซับสูงขึ้น ดังนั้น รูพรุนของสารดูดซับจึงมีความสำคัญ ส่วนการดูดซับทางเคมี (Chemical adsorption หรือ Chemisorption) แรงที่ใช้ดูดซับเป็นพันธะโคเวเลนต์ มักเกิดขึ้น

เมื่ออุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิวิกฤตของสารที่ถูกดูดซับ โดยมีค่าพลังงานสูงมากในการเกิดพันธะ และการดูดซับทางเคมีเป็นการดูดซับอย่างแท้จริง สมบัติการดูดซับทางเคมีและทางกายภาพแสดงการเปรียบเทียบไว้ในตาราง 2.4

ตารางที่ 2.4 สมบัติของการดูดซับทางเคมีและทางกายภาพ

การดูดซับทางเคมี	การดูดซับทางกายภาพ
ค่าความร้อนของการดูดซับ 100-500 kJ/mol	ค่าความร้อนของการดูดซับประมาณ 20 kJ/mol หรือน้อยกว่า
เกิดได้ที่อุณหภูมิสูง	เกิดได้ที่อุณหภูมิต่ำ
ไม่เกิดการผันกลับ	เกิดการผันกลับได้เป็นส่วนใหญ่
เกิดการดูดซับเพียงชั้นเดียว	เกิดการดูดซับหลายชั้น
มีพลังงานก่อกัมมันต์เกี่ยวข้อง	ไม่มีพลังงานก่อกัมมันต์ในกระบวนการ
แรงดึงดูดของสารดูดซับกับสารถูกดูดซับเป็นแรงดึงดูดอย่างแข็งแรง	แรงดึงดูดของสารดูดซับกับสารถูกดูดซับเป็นแรงดึงดูดอย่างอ่อนๆ

ที่มา; สุรัชยา น้อยสกุล, 2551

## 2.3 ชนิดไอโซเทอร์ม

ไอโซเทอร์มของการดูดซับ (Adsorption isotherm) เป็นความสัมพันธ์ของปริมาณสารที่ถูกดูดซับที่พื้นผิวกับความดันของก๊าซหรือความเข้มข้นของสารละลายที่อุณหภูมิคงที่ สำหรับการดูดซับตัวถูกละลายบนผิวแข็งจะเป็นความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการดูดซับกับความเข้มข้นของสารละลายที่ภาวะสมดุลที่อุณหภูมิใดๆ ไอโซเทอร์มการดูดซับแบ่งออกได้เป็น ดังนี้

### 2.3.1 ไอโซเทอร์มแบบแลงเมียร์ (Langmuir isotherm)

ในปี ค.ศ.1916 เออร์วิง แลงเมียร์ (Irving Langmuir) ได้เสนอไอโซเทอร์มแบบง่ายที่สุดโดยมีสมมติฐาน คือ 1) ใช้สำหรับการดูดซับแบบชั้นเดียว (Monolayer adsorption) 2) โมเลกุลที่ถูกดูดซับมีจำนวนที่แน่นอน และมีตำแหน่งของการดูดซับที่แน่นอน 3) ในแต่ละโมเลกุลของสารดูดซับจะดูดซับโมเลกุลของสารถูกดูดซับได้เพียงหนึ่งโมเลกุลเท่านั้น ในแต่ละตำแหน่งค่าความร้อนของการดูดซับเท่ากันและคงที่ ไม่มีแรงกระทำระหว่างโมเลกุลที่อยู่ในตำแหน่งใกล้เคียงกันจากการศึกษาไอโซเทอร์มของแลงเมียร์ที่สภาวะสมดุล สามารถแสดงความสัมพันธ์ของการดูดซับสารละลายได้ดังสมการ (2.16)

$$q_e = \frac{Q^{\circ} b C_e}{1 + b C_e} \quad (2.16)$$

เมื่อ  $q_e$  = ปริมาณของสารที่ถูกดูดซับบนสารดูดซับหนักหนึ่งกรัม

$C_e$  = ความเข้มข้นของสารละลายที่สภาวะสมดุล

$Q^{\circ}$  = ปริมาณของสารที่ถูกดูดซับอิ่มตัวแบบชั้นเดียว

$b$  = ค่าคงที่แลงเมียร์ที่อุณหภูมิหนึ่งๆ

$$\frac{C_e}{q_e} = \frac{1}{b Q^{\circ}} + \frac{C_e}{Q^{\circ}} \quad (2.17)$$

เมื่อพล็อตกราฟระหว่าง  $\frac{C_e}{q_e}$  กับ  $C_e$  ได้กราฟเส้นตรง มีจุดตัดแกน  $\frac{C_e}{q_e}$  เป็น  $\frac{1}{b Q^{\circ}}$  และมี  
ความชันเท่ากับ  $\frac{1}{Q^{\circ}}$

### 2.3.2 ไอโซเทอร์มแบบฟรอนด์ลิค (Freundlich isotherm)

ในปี ค.ศ. 1880-1941 นักฟิสิกส์-เคมี ชาวเยอรมัน Herbert Max Finlay Freundlich ได้เสนอสมการแสดงความสัมพันธ์ปริมาณของสารที่ถูกดูดซับกับความเข้มข้นของสารละลายดังสมการ (2.18)

$$q_e = \frac{X}{m} = k f C_e^{\frac{1}{n}} \quad (2.18)$$

เมื่อ  $C_e$  = ความเข้มข้นของสารละลายที่เหลือหลังการดูดซับที่สมดุล

$X/m$  = ปริมาณของตัวถูกละลายที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักของสารดูดซับ

$k f$  และ  $n$  = ค่าคงที่ที่อุณหภูมิหนึ่งๆ

จากสมการฟรอนด์ลิค เมื่อใส่ลอการิทึม (logarithm) จะได้สมการ

$$\log q_e = \log \frac{X}{m} = \log k f + \frac{1}{n} \log C_e \quad (2.19)$$

เมื่อพล็อตกราฟระหว่าง  $\log \frac{X}{m}$  กับ  $\log C_e$  ที่อุณหภูมิคงที่ จะได้กราฟเส้นตรงจุดตัดแกนสามารถนำมาหาค่า  $k f$  ได้ และความชันของกราฟเป็น  $1/n$  บางกรณีที่พล็อตกราฟระหว่าง  $\log \frac{X}{m}$  กับ  $\log C_e$  แล้วไม่ได้เส้นตรงแสดงว่าเกิดการเบี่ยงเบน ไปจากสมการของฟรอนด์ลิค เช่น การดูดซับสารละลายที่ไม่ได้วัดจากน้ำหนักจริงของสารดูดซับ แต่ค่าจากสารที่ถูกดูดซับในตัวทำละลายปริมาณมาก ทำให้สารที่ถูกดูดซับที่เหลือที่ความเข้มข้นสูงจึงมีปริมาณลดลง

### 2.3.3 ไอโซเทอร์มแบบบรูเนาเออร์-เอมเมทท์-เทลเลอร์ (Brunauer-Emmett-Teller Isotherm)

ในปี ค.ศ. 1903-1986 นักวิทยาศาสตร์ชาวอเมริกัน Stephen Brunauer และในปี ค.ศ.1900-1985 Paul Emmett และ Edward Teller ได้ศึกษาการดูดซับหลายชั้น และเสนอตั้งสมการ (2.20)

$$\frac{P.P_o}{V(P_o-P)} = \frac{1}{V_o k} + \frac{P}{P_o} \quad (2.20)$$

- เมื่อ
- P = ความดันสมดุลของสารถูกดูดซับ
  - V = ปริมาตรที่ถูกดูดซับที่ความดัน
  - V<sub>o</sub> = ปริมาตรที่ถูกดูดซับเพื่อให้เกิดเป็นชั้นเดียว
  - P<sub>o</sub> = ความดันไออิ่มตัวของโมเลกุลที่ถูกดูดซับ
  - k = ค่าคงที่

Brunauer-Emmett-Teller ได้แบ่งลักษณะไอโซเทอร์มออกเป็น 5 แบบ ซึ่งอธิบายการดูดซับแต่ละแบบดังนี้

ไอโซเทอร์มของการดูดซับแบบต่างๆ ของ Brunauer-Emmett-Teller ในระบบก๊าซ

**แบบ I** เป็นไอโซเทอร์มของการดูดซับที่สารดูดซับมีขนาดใหญ่กว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของโมเลกุลที่ถูกดูดซับไม่มาก การบรรจุโมเลกุลลงในรูขนาดเล็กของสารดูดซับนี้อย่างสมบูรณ์ และมีการอิ่มตัวที่แน่นอนโดยเกิดการเรียงเป็นชั้นเดียว

**แบบ II และ III** เป็นไอโซเทอร์มที่สารดูดซับที่การกระจายขนาดรูพรุนในช่วงกว้างในระบบนี้เกิดการดูดซับที่ต่อเนื่องจากการเรียงตัวโมเลกุลเพียงชั้นเดียว จนถึงโมเลกุลหลายชั้น โดยในแบบที่ III จะมีแรงกระทำระหว่างโมเลกุลที่ถูกดูดซับกับผิวสารดูดซับมากกว่าแบบ II

**แบบ IV** เป็นไอโซเทอร์มของการดูดซับ ที่มีรูพรุนใหญ่กว่าขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของโมเลกุลที่ถูกดูดซับมาก จึงเกิดการเรียงตัวของโมเลกุลที่ผิวของสารดูดซับเป็นสองชั้น (bilayer)

**แบบ V** เป็นไอโซเทอร์มที่เกิดขึ้น เมื่อแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลที่ถูกดูดซับกับผิวของสารดูดซับมีความแรงมากขึ้น

ที่มา; MO Memoir (นามปากกา), 2012

## 2.4 การเก็บตัวอย่างอากาศ

### 2.4.1 ฝุ่น

ฝุ่น ประเภทอนุภาคสารแขวนลอยทั้งหมด (Total Suspended Particulate, TSP) และฝุ่นที่มีขนาดเล็กกว่า 10 ไมครอน (PM - 10) มีวิธีการเฉพาะเป็นวิธี manual เป็นวิธีอ้างอิง มีอุปกรณ์เก็บเรียกว่า High volume air samplers เป็นการนำฝุ่นมาสกัดด้วยน้ำบริสุทธิ์สูง วัดค่า pH และหาปริมาณไอออนที่ละลายน้ำได้ ที่มีฤทธิ์เป็นกรด เช่น อนุมูลซัลเฟตและไนเตรต อุปกรณ์เก็บตัวอย่างจะมีองค์ประกอบสำคัญ คือ บั๊มดูดอากาศ และอุปกรณ์บันทึกอัตราการไหล หรืออุปกรณ์ควบคุมอัตรา

การไหลอย่างใดอย่างหนึ่ง การเก็บตัวอย่างฝุ่น TSP ดูดอากาศผ่านแผ่นกรอง ในอัตราการไหล 40-60 ลูกบาศก์ฟุตต่อนาที ให้ฝุ่นที่มีขนาด 0.3 - 100 ไมครอน ถูกดักไว้ที่แผ่นกรองชนิด glass fiber filter หรือ membrane filter ความเข้มข้นของฝุ่นในบรรยากาศ (ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร) คำนวณได้จากปริมาณของฝุ่นบนกระดาษกรองที่ซั่งได้กับปริมาตรของอากาศที่ผ่านแผ่นกรองดังกล่าว โดยปกติเก็บตัวอย่างต่อเนื่องตลอดเวลา 24 ชั่วโมง ทำให้ได้ตัวอย่างฝุ่นที่พอเพียงในการวิเคราะห์โดยใช้ High volume air samplers



รูปที่ 2.3 High volume

#### 2.4.2 ก๊าซที่มีฤทธิ์เป็นกรด

##### การตรวจวัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ในบรรยากาศ

วิธีการตรวจวัดค่าซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ( $\text{SO}_2$ ) ที่ใช้อยู่ในปัจจุบัน ใช้วิธีการตรวจวัดตามวิธีการมาตรฐาน และวิธีการเทียบเท่าที่กำหนดโดยองค์การพิทักษ์สิ่งแวดล้อมของประเทศสหรัฐอเมริกา (US.EPA) ซึ่งกำหนดวิธีการวัดซัลเฟอร์ไดออกไซด์ โดยวิธีพาราโรซานิลิน (Pararosaniline) เป็นวิธีการมาตรฐาน และวิธียูวี ฟลูออเรสเซนซ์ (UV-Fluorescence) เป็นวิธีเทียบเท่า

##### วิธีพาราโรซานิลิน

หลักการของวิธีพาราโรซานิลิน เป็นการวัดค่าก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ โดยการดูดตัวอย่างอากาศผ่านสารละลายโพแทสเซียม เตตราคลอโรซัลไฟโตเมอควิเรท (Potassium tetrachlorosulfiteomercurate ; TCM) ซึ่งจะเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนไดคลอโรซัลไฟโตเมอควิเรท (Dichorosulfiteomercurate complex) และเมื่อทำปฏิกิริยากันสารพาราโรซานิลิน และฟอร์มัลดีไฮด์ (Formaldehyde) จะเกิดเป็นสีของกรดพาราโรซานิลิน เมทิล ซัลโฟนิก (Pararosaniline Methyl Sulfonic Acid) และทำการวัดความสามารถในการดูดกลืนแสงแสดงที่ความยาวคลื่น 548 นาโนเมตร

### วิธียวี่ ฟลูออเรสเซนซ์

วิธียวี่ ฟลูออเรสเซนซ์ มีหลักการว่าซัลเฟอร์ไดออกไซด์ เมื่อถูกกระตุ้นโดยแสงอัลตราไวโอเล็ตจะมีพลังงานเพิ่มขึ้นในสภาพถูกกระตุ้น (Excited state) แล้วจะกลับสู่ภาวะปกติ (Ground state) อย่างรวดเร็วพร้อมกับคายพลังงานแสงออกมาอีกช่วงความถี่หนึ่ง แสงนั้นเรียกว่าฟลูออเรสเซนซ์ แล้วจึงใช้ Photomultiplier tube ตรวจวัดและแปลงสัญญาณเป็นความเข้มข้น

### การตรวจวัดก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์

วิธีการตรวจวัดก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์ ( $\text{NO}_2$ ) ที่ใช้กันอยู่ในประเทศไทยและประเทศต่างๆ ใช้วิธีการตรวจวัดตามวิธีการมาตรฐาน และวิธีการเทียบเท่าซึ่งกำหนดโดยองค์การพิทักษ์สิ่งแวดล้อม ของประเทศสหรัฐอเมริกา (US.EPA) ซึ่งกำหนดวิธีการวัด  $\text{NO}_2$  ด้วยระบบเคมีลูมิเนสเซนส์ (Chemiluminescence) เป็นวิธีการมาตรฐาน และวิธีการทางเคมีวิธีโซเดียม อาร์ซีไนต์ (Sodium - Arsenite) และวิธี Thermogravimetric Analysis (TGA - ANSA) เป็นวิธีการเทียบเท่า

### หลักการเคมีลูมิเนสเซนส์ (Chemi-luminescence)

หลักการเคมีลูมิเนสเซนส์ อาศัยให้เครื่องตรวจวัดออกไซด์ของไนโตรเจนรวม ( $\text{NO}_x$ ) และไนตริกออกไซด์ ( $\text{NO}$ ) ก่อน แล้วจึงนำค่าทั้งสองมาหักออกจากกันจะได้ค่า  $\text{NO}_2$  ในขั้นแรกจะตรวจวัด  $\text{NO}$  ก่อนโดยอาศัยหลักการที่  $\text{NO}$  ทำปฏิกิริยากับ  $\text{O}_3$  แล้วให้  $\text{NO} + \text{O}_2$  โดยที่  $\text{NO}_2$  ที่เกิดขึ้นส่วนหนึ่งจะอยู่ในรูป electronically - excited state ( $\text{NO}^*$ ) และกลับสู่ ground state ทันทีพร้อมกับคายพลังงานแสง (photon) ออกมา พลังงานแสงที่ออกมานี้เป็นสัดส่วนโดยตรงกับปริมาณ  $\text{NO}$  ที่สามารถตรวจวัดปริมาณได้โดย photomultiplier tube สำหรับการตรวจวัด  $\text{NO}_x$  ก็ทำได้โดยการเปลี่ยนออกไซด์ของไนโตรเจนตัวอื่น ๆ ให้กลายเป็น  $\text{NO}$  แล้ววัดปริมาณ  $\text{NO}$  ทั้งหมด ซึ่งจะมีค่าเท่ากับค่าออกไซด์ของไนโตรเจนทั้งหมด จากนั้นวงจรอิเล็กทรอนิกส์ในเครื่องมือวัดก็จะคำนวณค่า  $\text{NO}_2$  ได้โดยนำค่า  $\text{NO}_x$  หักออกจากค่า  $\text{NO}_x$

### หลักการโซเดียม อาร์ซีไนต์ (Sodium Arsenite)

การวิเคราะห์หาปริมาณของก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์โดยวิธี Sodium Arsenite หลักการคือ เมื่อดูดตัวอย่างอากาศที่ต้องการตรวจวัด  $\text{NO}_2$  ผ่านเข้ามาในสารละลาย Sodium hydroxide กับ Sodium arsenite แล้วจะเกิดเป็น nitrite ion ( $\text{NO}_2^-$ ) ขึ้น โดยปริมาณที่เกิดขึ้นนี้สามารถตรวจวัดได้โดยวัดการดูดกลืนคลื่นแสงที่ความยาวคลื่นแสง 540 นาโนเมตร หลังทำปฏิกิริยากับ Phosphoric acid, Sulfanilamide และ N - (1 - naphthyl) ethylene diamine dichydrochloride แล้ว

### หลักการ Thermogravimetric Analysis (TGA-ANSA)

การวิเคราะห์หาปริมาณของก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์โดยวิธี TGA-ANSA เป็นวิธีการตรวจวัดก๊าซโดยใช้สารเคมี หลักการคือดูดอากาศผ่านสารละลาย Triethanolamine และ Sodium metabisulfite ก๊าซ  $\text{NO}_2$  จะทำปฏิกิริยากับสารเคมีเกิด nitrate ion ซึ่งสามารถตรวจวัดได้โดยให้ ion ทำปฏิกิริยากับสาร Sulfanilamide และ 8 - Anilino - 1 - naphthalenesulfonic Acid Ammonium

Salt (ANSA) ซึ่งเกิดเป็นสารละลายที่มีสีและสามารถดูดกลืนคลื่นแสงได้ที่ความยาวคลื่น 550 นาโนเมตร

### การตรวจวัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

วิธีการตรวจวัดความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ที่ใช้กันอยู่ในประเทศไทยและต่างประเทศ ใช้วิธีการตรวจวัดตามมาตรฐาน และวิธีการเทียบเท่าเป็นการวัดด้วยเครื่องมือตรวจวัดอัตโนมัติ (automatic) ซึ่งกำหนดวิธีการวัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) โดยระบบเอนดีโออาร์ (Non Dispersive Infrared Detection: NDIR) เป็นวิธีมาตรฐาน

#### หลักการ Non-Dispersive Infra Red (NDIR)

หลักการทำงานของเครื่อง NDIR ใช้หลักการที่ว่า รังสีอินฟราเรด (IR) ถูกดูดกลืนด้วยสารต่างชนิดไม่เท่ากัน สารต่างชนิดกันจะดูดกลืนรังสีอินฟราเรดที่ความยาวคลื่นต่างกัน ดังเช่น คาร์บอนไดออกไซด์ (CO<sub>2</sub>) จะดูดกลืนรังสีอินฟราเรดที่ความยาวคลื่น 4 ถึง 4.5 ไมครอน และคาร์บอนมอนอกไซด์ ดูดกลืนรังสีอินฟราเรดที่ความยาวคลื่น 4.5 ถึง 5 ไมครอน การตรวจวัดจะทำการดูดก๊าซที่ต้องการวัดผ่านเข้าไปในหลอด ซึ่งฉายแสง IR ตลอดเวลา ถ้าก๊าซมี CO อยู่ จะทำการดูดกลืนรังสี IR ซึ่งรังสี IR สุดท้ายจะลดลงแปรตามปริมาณของ CO

#### วิธีการวิเคราะห์สารประกอบตะกั่วในอนุภาคสารในบรรยากาศ โดยวิธี Atomic Absorption Spectrometry (AAS)

การตรวจวัดหาปริมาณสารในบรรยากาศตะกั่ว (Pb) มีเฉพาะวิธี manual มีทั้งวิธีอ้างอิงและเทียบเท่า วิธีอ้างอิงมีหลักการโดย เก็บอากาศผ่านแผ่นกรองในเครื่องเก็บตัวอย่าง High Volume เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วนำแผ่นกรองที่เก็บฝุ่นนั้นมาสกัดตะกั่วออกโดยใช้กรดไนตริก (หรือกรด HNO<sub>3</sub> ผสมกับ HCl) แล้วนำไปวิเคราะห์ความเข้มข้นตะกั่ว โดยวิธีเครื่องวัด AAS โดยใช้ Air-acetylene flame ที่ความยาวคลื่น 283.3 หรือ 217.0 nm ส่วนวิธีเทียบเท่านั้นก็ยังใช้ฝุ่นจากเครื่องเก็บฝุ่นชนิด High volume เช่นเดิม แต่เครื่องวิเคราะห์อาจจะเป็น X-ray, Flameless Spectro หรืออื่นๆ ตามที่ระบุไว้ก็ได้

## 2.5 สารเคมีที่ใช้ในการดูดซับ

### 2.5.1 ซิลิกาเจล (Silica Gel)



รูปที่ 2.4 ซิลิกาเจล (Silica Gel)

ซิลิกาเจล คือ สารสังเคราะห์ที่สกัดจากทรายขาวผสมกรดกำมะถัน มีชื่อทางวิทยาศาสตร์คือ ซิลิกอนไดออกไซด์ (Silicon Dioxide) มีลักษณะเป็นเม็ดกลม โดยทั่วไป ซิลิกาเจล มีลักษณะเป็นโพรง มีรูพรุน ทำให้มีพื้นผิวที่ใช้ในการดูดความชื้นเป็นจำนวนมาก ประมาณ 800 ตารางเมตรต่อน้ำหนัก 1 กรัม หรือประมาณ 35-40 % ของน้ำหนักตัวเอง

ซิลิกาเจล (Silica Gel) มี 4 ชนิด คือ ชนิดเม็ดสีขาว (White Silica Gel) มีสมบัติในการดูดความชื้นประมาณ 35-40% ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางแต่ละเม็ดประมาณ 2-5 มิลลิเมตร ชนิดเม็ดสีน้ำเงิน (Blue Silica Gel) มีคุณสมบัติในการดูดความชื้นเหมือนกับเม็ดใสทุกประการ เพียงแต่มีการเพิ่มสารพิเศษเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพ ในการตรวจวัดปริมาณความชื้นที่กักเก็บไว้ ทำให้ผู้ใช้รู้ว่ามีการเก็บความชื้นไว้ในปริมาณเท่าไร โดยแสดงเป็นสีน้ำเงินและสีชมพู เม็ดเป็นสีน้ำเงิน หมายความว่า สารดูดความชื้นนั้นยังไม่ได้ใช้งาน ส่วนเม็ด ที่เป็นสีชมพูหรือสีม่วงอ่อน แสดงว่าหมดอายุในการใช้งาน ควรเปลี่ยน สารดูดความชื้นใหม่ ชนิดเม็ดสีส้ม (Orange Silica Gel) มีสมบัติเหมือนกับชนิดสีน้ำเงินทุกประการ การทำงานเปลี่ยนจากสีส้มเป็นสีเขียวอ่อน ซิลิกาเจลชนิดนี้ ยังไม่ได้รับความนิยมในเมืองไทย เนื่องจากมีราคาค่อนข้างสูง ชนิดเม็ดทราย (Silica Sand) มีสมบัติในการดูดความชื้นเหมือนกับเม็ดใสทุกประการแตกต่างกันที่ ขนาดของเม็ดของสาร ซึ่งสารดูดความชื้น ชนิดเม็ดทราย จะมีขนาดประมาณ 1 มิลลิเมตร

## สมบัติทางเคมีของซิลิกาเจล (Chemical Properties)

### ตารางที่ 2.5 สมบัติทางเคมี

ส่วนประกอบ (Composition)	ปริมาณ (Content) (%)
SiO <sub>2</sub>	99.71
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.1
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.03
CaO	0.01
Na <sub>2</sub> O	0.02
TiO <sub>2</sub>	0.09
ZnO <sub>2</sub>	0.02

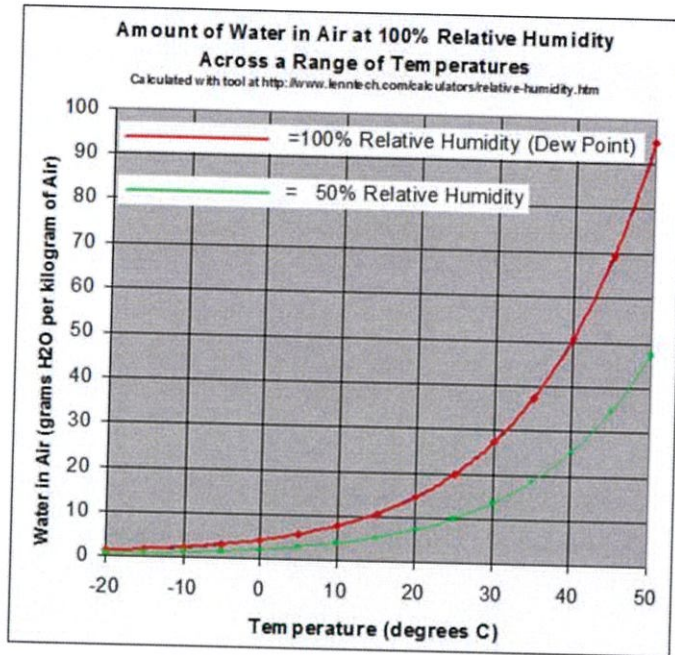
ที่มา; บริษัท รุ่งพัฒนา อิมพอร์ต เอ็กซ์พอร์ต จำกัด, 2550

## ความสามารถในการดูดความชื้น (Absorbing Ability)

### ตารางที่ 2.6 ความสามารถในการดูดความชื้น

ความสามารถในการดูดความชื้นที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส Absorbing Ability @ 30°C	
ความชื้นสัมพัทธ์ (Relative humidity)	ความสามารถในการดูดชื้น (Absorbing Ability )
20%	ต่ำสุด 11%
50%	ต่ำสุด 22%
90%	ต่ำสุด 34%

ที่มา; บริษัท รุ่งพัฒนา อิมพอร์ต เอ็กซ์พอร์ต จำกัด, 2550



รูปที่ 2.5 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำในอากาศที่อุณหภูมิต่างๆ ณ ความชื้นสัมพัทธ์ 50% และ 100%

#### ประโยชน์ของ ซิลิกา เจล ( Silica Gel )

ซิลิกาเจล สามารถดูดความชื้นได้ถึง 30 % ของน้ำหนักตัวเอง ไม่มีวันหมดอายุ หากเก็บในที่ที่ไม่มีอากาศ หรือความชื้น ไม่ใช่วัตถุไวไฟ บรรจุได้หลากหลายขนาด สะดวกในการเลือกใช้ สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้โดยวิธีการอบที่ อุณหภูมิ 180 °C เป็นเวลา 2 ชม.

#### กลุ่มอุตสาหกรรมที่ใช้

อุตสาหกรรมเครื่องหนัง อุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ อุตสาหกรรมบรรจุภัณฑ์ อุตสาหกรรมอาหารแห้ง และอุตสาหกรรมเพื่อการส่งออก

#### 2.5.2 ถ่านกัมมันต์ (Activated Carbon)



รูปที่ 2.6 ถ่านกัมมันต์

ถ่านกัมมันต์ เป็นถ่านที่ต้องนำไปผ่านกระบวนการกระตุ้นด้วยสารเคมี หรือกระตุ้นด้วยวิธีทางกายภาพก่อน เพื่อให้โครงสร้างทางกายภาพของถ่านเกิดรูพรุน หรือรอยแตกขนาดเล็กในระดับนาโนเมตรจำนวนมาก ซึ่งพื้นที่ผิวภายในผนังรูพรุนหรือรอยแตกเหล่านั้น ทำให้เกิดพื้นที่ว่างขนาดใหญ่ที่อนุภาคสาร และโมเลกุลก๊าซจำนวนมากสามารถเกิดปฏิกิริยาหรือถูกกักอยู่ในถ่าน (ถ่านกัมมันต์น้ำหนักเพียง 1 กรัม มีพื้นที่ผิวภายในโดยรวมระหว่าง 500-1,500 ตารางเมตร ขึ้นอยู่กับเกรดของถ่าน ชนิดวัตถุดิบ และกระบวนการผลิต) โดยทั่วไปคนส่วนใหญ่รู้จักและคุ้นเคยกับการใช้ถ่านนี้ในการกรองน้ำ แต่นอกเหนือจากการกรองน้ำแล้ว ถ่านชนิดนี้ยังนิยมใช้กรองสาร และเป็นวัสดุดูดซับในหลายอุตสาหกรรม

การดูดซับอนุภาคหรือโมเลกุลก๊าซของถ่านกัมมันต์เป็นปฏิกิริยาทางกายภาพโดยแรงแวนเดอร์วาลส์ (van der Waals force) เมื่อใช้งานไประยะหนึ่งประสิทธิภาพในการกรองหรือดูดซับสารจะต่ำลง เนื่องจากที่ว่างภายในโครงสร้างถ่านมีน้อยลง ผู้ใช้งานจึงต้องทำการเปลี่ยนถ่ายถ่านเก่าออก และใส่ถ่านใหม่เข้าไปทดแทน โดยถ่านที่ถูกใช้งานแล้วสามารถนำกลับมาใช้งานใหม่ได้ด้วยการนำไปผ่านกระบวนการกระตุ้นซ้ำ (re-activated) เพื่อกำจัดสารต่างๆ ที่ถ่านดูดซับไว้ทั้งหมดก่อน

ถ่านสามารถดูดซับหรือกรองสารได้บางชนิด เช่น สารอินทรีย์มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบ ทั้งนี้ถ่านไม่สามารถดูดซับหรือกรองสารจำพวกแอลกอฮอล์ (Alcohol) และไกลคอล (glycol) ได้นอกจากนี้สารเคมีประเภทแอมโมเนีย กรดแก่ เบสแก่ โลหะ และสารอนินทรีย์อย่างโซเดียม เหล็ก ตะกั่ว ฯลฯ ไม่สามารถดูดซับหรือกรองด้วยถ่านกัมมันต์ได้เช่นกัน

### 2.5.2.1 สมบัติของถ่านกัมมันต์

การนำถ่านกัมมันต์ไปใช้สามารถพิจารณาจากสมบัติต่างๆ ได้ดังนี้

1. ไอโอดีนัมเบอร์ (Iodine Number) เป็นค่าสำคัญที่ใช้บอกถึงประสิทธิภาพของถ่านกัมมันต์ เนื่องจากไอโอดีนถูกถ่านดูดซับได้ดี ดังนั้นค่าการดูดซับไอโอดีนจึงถูกใช้เป็นตัววัดประสิทธิภาพของถ่าน โดยวัดเป็นมิลลิกรัม (ของไอโอดีน) / น้ำหนักถ่าน 1 กรัม การประเมินค่าความพรุนของรูขนาดเล็ก (Microporosity) นั้นจะดูที่ Iodine Number (คนละความหมายกับค่าความไม่อิ่มตัวของไขมัน) ค่า iodine number ที่มากกว่า 1000 ชี้ให้เห็นว่า ถ่านกัมมันต์มีรูพรุนขนาดเล็ก (Microporous) จำนวนมาก ซึ่งรูพรุนขนาดเล็กจำนวนมากส่งผลให้ปริมาณพื้นที่ทั้งหมด (TSA) สูงเช่นกัน ส่วนค่า Molasses Number ใช้ในการประเมินว่ารูขนาดใหญ่มีน้อยมากน้อยแค่ไหน

2. โมลาสันัมเบอร์ (Molass Number) เป็นค่าที่บอกปริมาณของรูขนาดใหญ่ (Macropore) รูที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางมากกว่า 20 อังสตรอม หรือมากกว่า 2 นาโนเมตร ที่มีอยู่ใน

ถ่านกัมมันต์ โดยถ่านที่มีรูขนาดใหญ่จำนวนมากหรือมีค่าโมลาสันัมเบอร์สูง จะดูดซับสารที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่อย่างโมเลกุลสีได้ดีกว่าถ่านที่มีรูพรุนเล็กที่มีค่าโมลาสันัมเบอร์ต่ำ

3. แทนนิน (Tannin) แทนนินเป็นสารผสมประกอบด้วยสารโมเลกุลขนาดใหญ่ และสารโมเลกุลขนาดกลาง เช่นเดียวกับผิวของถ่านกัมมันต์ก็มีทั้งรูขนาดใหญ่ และรูขนาดกลาง ดังนั้นค่าแทนนินจึงใช้บอกความสามารถในการดูดซับสารแทนนินหรือสารโมเลกุลขนาดใหญ่และขนาดกลางของถ่าน และระบุในหน่วยพีพีเอ็ม (ppm, part per million = ส่วนในล้านส่วน) ซึ่งถ่านกัมมันต์ควรมีค่านี้อยู่ในช่วง 200-362 พีพีเอ็ม

4. เมทิลีนบลู (Methylene Blue) ในถ่านกัมมันต์บางชนิดมีรูขนาดไม่ใหญ่มากเหมาะกับการดูดซับสารที่มีโมเลกุลขนาดกลาง เช่น สารเมทิลีนบลู ทำให้สารเกิดสีชนิดนี้เป็นตัวแทนของสารที่มีโมเลกุลขนาดกลาง ค่าเมทิลีนบลูจะระบุในหน่วยน้ำหนักกรัม/100 กรัม (g/100 g)

5. ความหนาแน่น (Apparent Density) ถ่านกัมมันต์ที่มีความหนาแน่นสูงกว่ามักบ่งว่าเป็นถ่านที่มีคุณภาพดีกว่า เนื่องจากสามารถดูดซับสารได้ในปริมาณมากกว่า

6. ค่าความแข็ง/ค่าการขัดถู (Hardness/ Abrasion Number) เป็นค่าความต้านทานการสึกกร่อนของถ่านกัมมันต์ บอกถึงความสามารถในการทนต่อแรงเสียดสี และความสามารถในการคงสภาพของถ่านกัมมันต์ที่มีต่อกระบวนการล้างวัสดุกรอง (backwashing) ซึ่งค่านี้จะแตกต่างกันชัดเจนตามชนิดวัสดุและระดับที่ถ่านถูกกระตุ้น

7. ปริมาณเถ้า (Ash Content) ถ่านกัมมันต์ที่มีปริมาณเถ้ามากสามารถลดประสิทธิภาพของถ่านกัมมันต์ และลดประสิทธิภาพการนำถ่านไปกระตุ้นซ้ำ

8. ระดับคาร์บอนเตตระคลอไรด์ (Carbon Tetrachloride Activity) เป็นการหาความพรุนของถ่านกัมมันต์โดยดูจากค่าการดูดซับไออ้อมตัวของสารคาร์บอนเตตระคลอไรด์

9. ค่าการกระจายตัวของขนาดอนุภาคถ่าน (Particle Size Distribution) เกี่ยวข้องกับความละเอียดของผงถ่าน ยิ่งถ่านมีขนาดอนุภาคละเอียดมากเท่าใดก็จะยิ่งเพิ่มพื้นที่ผิวของถ่านให้มากขึ้น ซึ่งมีผลให้โมเลกุลก๊าซถูกดูดซับเข้าไปในโครงสร้างถ่านได้เร็วขึ้น และทำให้ความดันก๊าซของระบบไม่ลดลงมาก ดังนั้นอุตสาหกรรมจะไม่ต้องเสียค่าใช้จ่ายด้านพลังงานมาก เพื่อสร้างแรงดันก๊าซให้ไหลผ่านถ่านกรองด้วยอัตราเร็วที่กำหนด

### 2.5.2.2 ประเภทถ่านกัมมันต์

ปัจจุบันมีความก้าวหน้าทางเทคโนโลยีทำให้ผู้ผลิตสามารถผลิตถ่านออกมาได้หลากหลายรูปแบบ ดังนั้นจึงมีวิธีการแบ่งประเภทถ่านกัมมันต์หลายแบบ แต่วิธีที่นิยมใช้ คือ การแบ่งตามลักษณะทางกายภาพของถ่าน และการนำถ่านกัมมันต์มาใช้งานนั้นมีหลายปัจจัยที่ควรพิจารณาเนื่องจากความหลากหลายของถ่าน และเพื่อให้ได้ประโยชน์จากถ่านกัมมันต์ ดังนี้

1. ถ่านกัมมันต์แบบผง (Powdered Activated Carbon, PAC) ถ่านกัมมันต์ผงเป็นรูปแบบดั้งเดิมของถ่านที่ยังนิยมใช้ในทุกวันนี้ โดยทั่วไปขนาดของผงถ่านจะมีเส้นผ่านศูนย์กลางระหว่าง 0.15-0.25 มิลลิเมตร ถ่านในรูปแบบผงมีจุดเด่นตรงตัวถ่านมีสัดส่วนของพื้นที่ผิว (นอก) ต่อปริมาตรมาก ถ่านผงเหมาะกับการใช้งานแบบเติมลงในภาชนะของเหลวโดยตรงมากกว่าการบรรจุในท่อและปล่อยของเหลวไหลผ่านผงถ่าน เนื่องจากวิธีหลังจะสูญเสียผงถ่านได้ง่ายกว่า

2. ถ่านกัมมันต์แบบเกล็ด (Granular Activated Carbon, GAC) ถ่านกัมมันต์ในรูปแบบเกล็ดนิยมใช้ในการดูดซับก๊าซหรือไอของสาร เนื่องจากขนาดเกล็ดใหญ่กว่าผงทำให้ก๊าซไหลผ่านได้ง่ายกว่า

3. ถ่านกัมมันต์อัดแท่ง (Extruded Activated Carbon, EAC) เป็นถ่านกัมมันต์ที่นำไปขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดรีด (Extruder) ทำให้ได้ถ่านลักษณะทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 0.8-4.5 มิลลิเมตร ถ่านประเภทนี้เหมาะกับการกรองหรือดูดซับก๊าซ เนื่องจากทำให้ความดันก๊าซตก (Pressure drop) น้อยกว่าถ่านกัมมันต์ประเภทอื่น นอกจากนี้ถ่านอัดแท่งยังมีความแข็งแรงเชิงกลสูง อีกทั้งทำให้เกิดละอองฝุ่นน้อยด้วย

4. ถ่านกัมมันต์เคลือบอนุภาค (Impregnated Carbon) เป็นถ่านกัมมันต์ชนิดพิเศษที่ได้เติมโมเลกุลสารอินทรีย์ลงไปโครงสร้างเช่น อนุภาคโลหะเงิน ทำให้ถ่านสามารถฆ่าเชื้อโรคได้นอกเหนือจากสมบัติในการกรองสาร ดังนั้นจึงมีการนำถ่านชนิดนี้มาใช้กับระบบกรองน้ำของเครื่องกรองน้ำ แต่ยังมีข้อขัดแย้งว่า การใส่อนุภาคเงินเข้าไปในโครงสร้างถ่านจะทำให้ถ่านกัมมันต์มีประสิทธิภาพในการกรองลดลง และยังมีอีกหลายประเด็นของถ่านชนิดนี้ที่ถูกแย้ง เช่น ประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อของถ่านเมื่อใช้งานไประยะหนึ่ง ฯลฯ

5. ถ่านกัมมันต์เคลือบโพลิเมอร์ (Polymers Coated Carbon) เป็นถ่านกัมมันต์ชนิดพิเศษที่ถูกเคลือบด้วยสารโพลิเมอร์บางชนิดที่มีความเข้ากันได้ทางชีวภาพ (biocompatible polymer) โดยใช้เทคนิคพิเศษ ซึ่งชั้นเคลือบโพลิเมอร์มีสมบัติยอมให้สารบางอย่างผ่านไปได้ ถ่านชนิดนี้ถูกใช้เป็นตัวดูดซับสารพิษหรือยาสำหรับกระบวนการฟอกเลือดที่เรียกว่า ฮีโมเพอร์ฟิวชัน (Hemoperfusion)

### 2.5.2.3 การดูดซับด้วยผงถ่านกัมมันต์ (Adsorption by Activated Carbon)

ระบบดูดซับด้วยผงถ่านกัมมันต์ (Activated Carbon - Adsorption Process) มีกระบวนการบำบัดกลิ่น โดยสารที่ก่อให้เกิดกลิ่นถูกดูดซับด้วยผงถ่านกัมมันต์ (Activated Carbon) ระบบนี้ใช้เสริมการบำบัดกลิ่นร่วมกับระบบอื่น ๆ มีข้อดี คือเป็นระบบพื้นฐาน ง่ายต่อการควบคุมและบำรุงรักษา มีประสิทธิผลสูงในการบำบัดสารอินทรีย์ และสามารถดูดซับสารที่ก่อให้เกิดกลิ่นได้มาก เหมาะสมในการบำบัดอากาศเสียที่มีปริมาณมาก และความเข้มข้นของกลิ่นต่ำ ส่วนข้อเสีย มีประสิทธิผลต่ำสำหรับการบำบัดสารแอมโมเนีย (Ammonia) เอมีน (Amine) และ อัลดีไฮด์

(Aldehydes) แก๊สที่มีกลิ่นความเข้มข้นสูง ต้องทำการเปลี่ยนผงถ่านกัมมันต์บ่อย หรือต้องทำการปรับสภาพ (Regeneration) บ่อยครั้ง และอาจทำให้ถ่านกัมมันต์ร้อนจัด เพราะการดูดซับเป็นปฏิกิริยาที่คายความร้อน ช่วงเวลาที่ใช้สัมผัส ต้องปรับตามสภาพของอัตราการดูดซับกลิ่น ประสิทธิภาพลดลงหากอากาศที่เข้ามามีความร้อนสูงไม่ควรเกิน 50°C

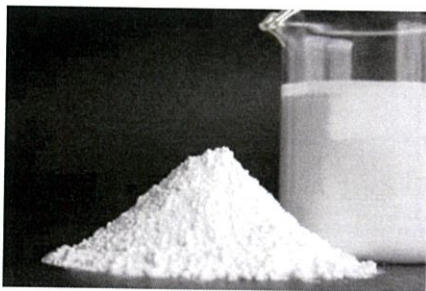
สารเคมีที่มีกลิ่นที่เป็นประเภทไฮโดรคาร์บอนจะถูกจับติดอยู่บนผิวของถ่านกัมมันต์ซึ่งมีรูเล็กๆและมีพื้นที่ผิวจำนวนมาก เมื่อสารถูกจับจนถ่านอิ่มตัวก็ต้องไล่สารเคมีออกไปเพื่อให้ถ่านกลับมาใช้งานได้ใหม่ (Regeneration) จากข้อมูลที่มีการใช้งานในประเทศไทย ระบบดูดซับด้วยผงถ่านกัมมันต์เหมาะสมที่จะใช้กำจัดกลิ่นจากบริเวณที่เก็บวัตถุดิบ (กองวัตถุดิบ) ระบบบำบัดน้ำเสีย ที่ทำงานที่มีกลิ่นจากการใช้ตัวทำละลาย เพราะสารมีกลิ่นมีความเข้มข้นไม่สูงมากจึงไม่ต้องเปลี่ยนถ่านบ่อยๆ

#### 2.5.2.4 การดูดซับด้วยผงถ่านกัมมันต์ที่เคลือบสารเคมี (Adsorption by Impregnated Activated Carbon)

ระบบดูดซับด้วยผงถ่านกัมมันต์ที่เคลือบสารเคมี (Impregnated Activated Carbon (A/C) - Adsorption Process) มีกระบวนการบำบัดกลิ่นโดยใช้ Activated Carbon ที่ถูกเคลือบด้วยสารเคมีบางชนิด เช่น กรดหรือด่างอย่างใดอย่างหนึ่ง เพื่อให้ความสามารถในการดูดซับมีประสิทธิภาพสูงขึ้นเป็นหลายสิบเท่าของผงถ่านกัมมันต์ (Activated Carbon) ธรรมดา

Impregnated A/C สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ โดยการบำบัดสารที่ดูดซับไว้ และทำการปรับสภาพใหม่ ข้อดี มีประสิทธิภาพสูงมากในการบำบัดสารที่ก่อให้เกิดกลิ่นหลายชนิด ง่ายต่อการควบคุม และบำรุงรักษา สามารถนำ Impregnated A/C กลับมาใช้ใหม่ได้เมื่อผ่านการปรับสภาพ (Regeneration) ข้อเสีย มีการเปลี่ยน หรือการปรับสภาพของ Impregnated A/C จำเป็นต้องเป็นไปตามเวลาที่กำหนดไว้

#### 2.5.3 แคลเซียมคาร์บอเนต (Calcium Carbonate)



รูปที่ 2.7 ผงแคลเซียมคาร์บอเนต

แคลเซียมคาร์บอเนต (Calcium Carbonate) หรือหินปูน เป็นสารธรรมชาติที่เกิดจากการตกตะกอน และสะสมตัวของหินในทะเล เปลือกหอย ปะการัง กระดูกสัตว์กลายเป็นหินปูนหรือแคลเซียมคาร์บอเนต ถือเป็นสารตั้งต้นสำคัญในกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมต่างๆ รวมถึงการนำมาใช้ในภาคครัวเรือน และภาคการเกษตร รวมถึงประโยชน์ในด้านต่างๆ มากมาย แคลเซียมคาร์บอเนตสามารถพบได้ทั่วไปตามธรรมชาติ พบในสัตว์ เช่น เปลือกหอย กระดูก พบมากตามธรรมชาติในรูปของหินปูน และ แร่แคลไซต์ (Calcite) หรือ แคลสปาร์ (Calspar) การเกิดสารประกอบคาร์บอเนต (Lime Carbonation) เกิดจากแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) หรือแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต ( $3\text{CaO} \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ ) ในสารเพิ่มเสถียรภาพจะทำปฏิกิริยากับคาร์บอนไดออกไซด์ในอากาศ เกิดเป็นสารประกอบของแคลเซียมคาร์บอเนต ( $\text{CaCO}_3$  หรือ  $3\text{CaCO}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ ) กับน้ำ ดังสมการ



### 2.5.3.1 สมบัติเฉพาะ

- สูตรโมเลกุล  $\text{CaCO}_3$  ประกอบด้วย CaO ร้อยละ 56 และ  $\text{CO}_2$  ร้อยละ 44
- น้ำหนักโมเลกุล 100.09
- สถานะเป็นผงสีขาว มีความสว่างสูง ไม่มีกลิ่น ไม่มีรส และคงสภาพได้ดี
- ค่าความถ่วงจำเพาะ (Specific Gravity) ประมาณ 2.72
- ความแข็งระดับ 3
- สลายตัวเมื่อเผาโดยใช้อุณหภูมิประมาณ 825 องศาเซลเซียส
- ไม่ละลายน้ำ และแอลกอฮอล์ แต่สามารถละลายได้เมื่อมีก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ( $\text{CO}_2$ ) และเกลือแอมโมเนียม และละลายในน้ำได้น้อยลงเมื่อมีแอลคาไลไฮดรอกไซด์ สำหรับน้ำที่มีแคลเซียมคาร์บอเนตละลายอยู่จะทำให้ น้ำมีสภาพเป็นด่างหรือเรียกน้ำกระด้าง และจะตกตะกอนเมื่อ  $\text{CO}_2$  แยกตัว

### 2.5.3.2 สมบัติแคลเซียมคาร์บอเนตที่นำมาใช้ประโยชน์

- มีความบริสุทธิ์สูง ไม่มีการปนเปื้อนของโลหะหนัก
- มีพื้นที่ผิวสูง ไม่ทำปฏิกิริยากับสารอื่นที่เติมในกระบวนการผลิต
- มีองค์ประกอบความขาวสูง
- มีการกระจายตัวดี
- ไม่เป็นพิษ ไม่มีกลิ่น ไม่ติดไฟ ไม่เกิดปฏิกิริยาทำให้เกิดความร้อนหรือการระเบิดได้ง่าย

## 2.6 ระบบสครับบิง (Scrubbing)

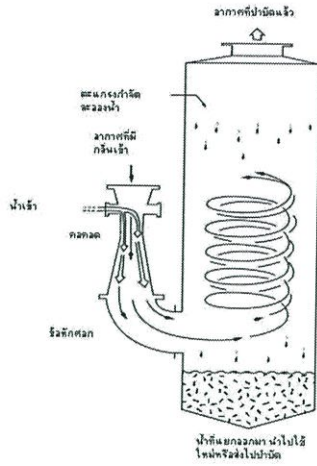
### 2.6.1 การออกแบบระบบสครับบิง (Scrubbing)

ระบบสครับบิง (Chemical Scrubbing Process) เป็นกระบวนการบำบัดสารมลพิษในอากาศโดยใช้สารละลายช่วยในการดูดซับในกรณีกลิ่นที่มีสมบัติเป็นด่าง เช่น แอมโมเนีย (Ammonia) ไตรเมทิลลามีน (Trimethylamine) โดยนำมาทำปฏิกิริยากับสารละลายกรด (Acid Solution) เพื่อให้ได้สารประกอบที่ไม่มีกลิ่น ส่วนในกรณีที่สารที่ก่อให้เกิดกลิ่นมีสมบัติเป็นกรด เช่น ไฮโดรเจนซัลไฟด์ (Hydrogen Sulfide) เมทิล เมอร์แคปแทน (Methyl Mercaptan) ทำให้ปฏิกิริยากับสารละลายด่าง (Alkaline Solution) ได้เป็นสารประกอบที่ไม่มีกลิ่นหรือมีกลิ่นน้อยลง

ระบบสครับบิง ที่ใช้โดยทั่วไปมีสองแบบ คือ ระบบในแนวตั้งใช้อากาศไหลเข้าด้านล่างและออกด้านบน ส่วนอีกแบบหนึ่งคือ อากาศไหลเข้าและออกในแนวนอน (Cross-Flow) ปัจจุบันระบบแนวนอนได้รับความนิยมมากขึ้น เพราะมีปัญหาการอุดตันน้อยและความสูงไม่มากนัก สามารถวางไว้ในห้องที่มีเพดานต่ำๆ ได้ ระบบมีทั้งชนิดที่ใส่ตัวกลาง (Packings) ไว้ภายในเพื่อเพิ่มผิวของการสัมผัสระหว่างก๊าซและของเหลว บางระบบที่ไม่มีตัวกลางก็ใช้การสเปรย์น้ำเป็นฝอยเล็กๆ เป็นม่านน้ำ หรือใช้การอัดฉีดน้ำกับอากาศที่ความดันสูง (Venturi) ดังรูป 2.8 สรุปคือทำให้อากาศกับน้ำมีการสัมผัสและสารที่มีกลิ่นในอากาศเข้าไปละลายในน้ำ ข้อควรระวังในการใช้งานระบบคือ ต้องระวังไม่ให้อุณหภูมิของอากาศที่จะบำบัดก่อนเข้าระบบสูงเกินไปเพราะจะทำให้เกิดไอน้ำและลดประสิทธิภาพของการดูดซับลง ในกรณีที่จำเป็นอาจต้องมีอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนของอากาศก่อนเข้าระบบและควรระวังเรื่องฝุ่นละอองเพราะอาจทำให้อุดตันได้

1. สารมลพิษที่มีกลิ่นในอากาศต้องมีสมบัติละลายน้ำได้ หรือทำปฏิกิริยากับสารดูดซับที่เติมลงไป在水里 ตัวอย่างเช่น แอมโมเนียละลายในน้ำได้ดี หรือเอมีนละลายได้ไม่ดี แต่หากเติมไฮโปคลอไรต์ที่ความเข้มข้น 5% ก็จะทำให้เอมีนถูกออกซิไดซ์ในน้ำได้เป็นอย่างดี
2. ความเร็วของอากาศที่ผ่านตัวกลางประมาณ 0.9-1.22 เมตรต่อวินาที สำหรับตัวกลางเซรามิก ควรใช้ความเร็วต่ำ สำหรับตัวกลางที่เป็นพลาสติกควรใช้ความเร็วสูงกว่า ความดันลดประมาณ 0.2-0.25 นิ้วน้ำต่อความลึกของตัวกลาง 1 เมตร
3. อัตราการไหลของของเหลวที่ผ่านตัวกลางเซรามิกประมาณ 21.1-42.2 กิโลกรัม/ชั่วโมงต่อตารางเมตร อัตราการไหลของของเหลวที่ผ่านตัวกลางพลาสติกประมาณ 63.34-84.46 กิโลกรัม/ชั่วโมงต่อตารางเมตร

ที่มา; สถาบันวิจัยสิ่งแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2549

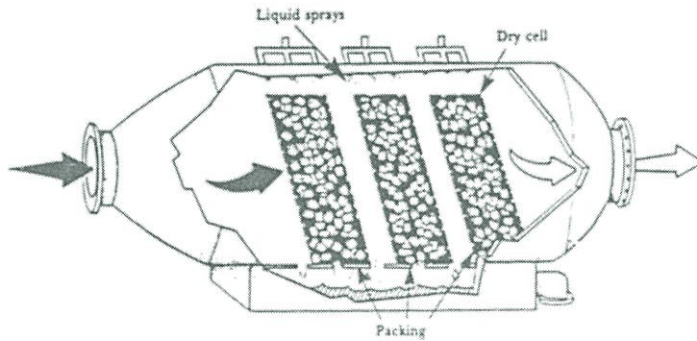


ภาพแสดงการใช้การผสมอากาศกับน้ำโดยใช้คอขวดและแรงดันสูงแบบเวนจูรี

จาก US EPA (EPA Air Pollution Cost Control Manual, 6th Ed, US EPA, Research Triangle Park, NC, USA, January 2002

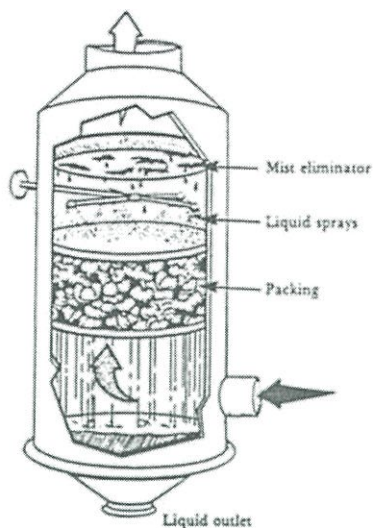
รูปที่ 2.8 การใช้การผสมอากาศกับน้ำโดยใช้คอขวดและแรงดันสูงแบบเวนจูรี

ที่มา; US EPA, EPA Air Pollution Cost Control Manual, 6th Ed US EPA, Research Triangle Park, NC, USA, January 2002



รูปที่ 2.9 ระบบสครับบิงแบบ Three Bed Cross Flow Packed Tower

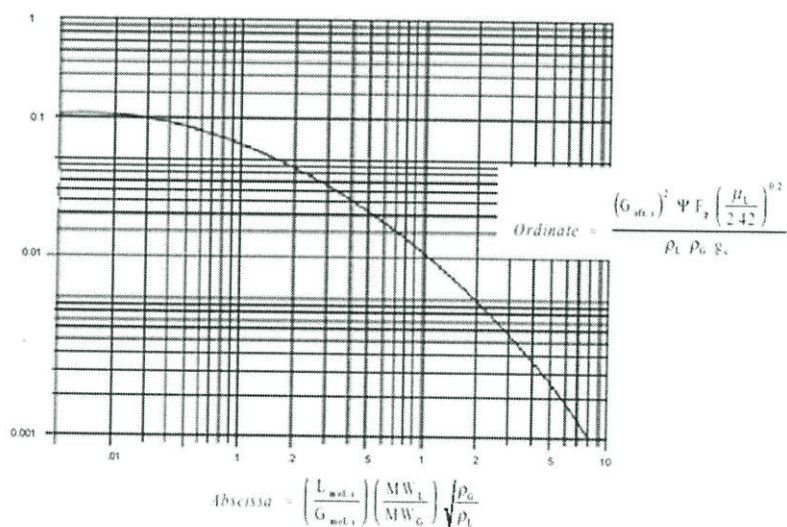
ที่มา; กรมควบคุมมลพิษ กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม, 2549



รูปที่ 2.10 ระบบสครับบิงแบบ Countercurrent Packed Tower

### 2.6.2 เส้นผ่านศูนย์กลางของหอบรรจุกว้างกลาง

หอบรรจุกว้างกลางจะมีผลต่อความเร็วของอากาศที่ไหลผ่าน หากหอกว้างมากไปอากาศจะไหลผ่านที่ความเร็วต่ำแม้จะบำบัดได้ดี แต่บำบัดมวลของสารที่ทำให้เกิดกลิ่นได้น้อยไม่คุ้มกับค่าที่ก่อสร้าง หากหอบแคบเกินไปความเร็วของอากาศจะสูง และดันน้ำที่ตกลงมาให้ย้อนขึ้นข้างบน ปกติแล้วค่าของเส้นผ่านศูนย์กลางหาได้จากกราฟข้างล่าง



รูปที่ 2.11 เส้นผ่านศูนย์กลาง

- เมื่อ  $F_p$  = Packing Factor ข้อมูลดูในตารางหรือได้ข้อมูลจากผู้ขายตัวกลาง  
 $MW$  = น้ำหนักโมเลกุลของของเหลว หรืออากาศ  
 ค่า  $g$  = ค่าแรงโน้มถ่วงของโลก = 32.2 ฟุต/วินาที<sup>2</sup>  
 ค่า  $u$  = ความหนืดของของเหลว หน่วยเป็นปอนด์/ฟุต-ชั่วโมง

โดยปกติคำนวณค่าของแกนนอน (Abscissa) ดังสูตรในกราฟนี้ก่อน แล้วลากเส้นจากค่าที่ได้ขึ้นไปบนเส้นกราฟ และหาค่าของแนวตั้ง (Ordinate) จะเห็นได้ว่าเราสามารถแทนค่าหา  $G$  ซึ่งเป็นอัตราการไหลของอากาศที่ผ่านสกรับเบอร์ (หน่วยเป็นปอนด์ของอากาศ/วินาที-ตารางฟุตของผิวหน้าตัดของตัวกลางที่ปูวางในนั้น) จากนั้นหาพื้นที่หน้าตัดของถัง (A) ได้จาก

$$A = \frac{G_{mol,i} MW_G}{3,600 G_{str,if}} \quad (2.22)$$

เมื่อ  $G_{mol,i}$  เป็น Molecular Flow Rate หรืออัตราการไหลของอากาศที่เข้าระบบเป็นโมล/ชั่วโมง และ  $G_{str,if}$  คือค่า  $G$  ที่คำนวณได้ข้างบน  $f$  เป็น Flooding Factor มีค่า 0.60-0.75 ส่วน 3600 คือแปลงชั่วโมงกับวินาที

### 2.6.3 ความสูงของหอบรรจุตัวกลาง

เมื่อได้เส้นผ่านศูนย์กลางของหอบรรจุตัวกลางแล้วจะต้องคำนวณความสูงของตัวกลางที่เหมาะสม โดยต้องทราบข้อมูลว่าความสูงสำหรับตัวกลางประเภทต่างๆควรเป็นเท่าใด เพราะเป็นข้อมูลที่ได้จากการทดลอง ดังนี้

ความสูงที่ก่อกันและสารละลายสามารถดูดซับ

- 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 0.90-0.16 เมตร

ความสูงข้างบนเป็นความสูง 1 หน่วย ของที่เรียกกันว่า Transfer Unit เท่านั้น ระบบจะทำงานได้ดี ต้องมีหลาย Transfer Unit ซึ่งเรียกว่าจำนวน Transfer Unit นี้ว่า NTU ค่า NTU นี้หาจาก

$$NTU = \frac{\ln \left[ \left( \frac{y_t - m x_i}{y_0 - m x_i} \right) \left( 1 - \frac{1}{AF} \right) + \frac{1}{AF} \right]}{1 - \frac{1}{AF}} \quad (2.23)$$

$y_1$  = ความเข้มข้นของสารที่มีกลิ่นในก๊าซ  
 $y_0$  = ความเข้มข้นของสารที่มีกลิ่นในก๊าซขาออก

$$AF = \frac{L_{\text{mol},i}}{mG_{\text{mol},i}} \quad (2.24)$$

เมื่อ  $L_{\text{mol},i}$  และ  $G_{\text{mol},i}$  เป็น Molecular Flow Rate หรืออัตราการไหลของของเหลวและอากาศที่เข้าระบบเป็นโมล/ชั่วโมง ตามลำดับ ซึ่งค่า  $m$  ที่ใกล้จุดสมดุลมีค่าใกล้ 0 ดังนั้น จะเห็นได้ว่า ค่า NTU มีค่า  $\ln y_1/y_0$  โดยประมาณ

## 2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

**ศูนย์วิจัยและอบรมด้านสิ่งแวดล้อม (2551)** การศึกษาสถานการณ์สารประกอบอินทรีย์ระเหยง่ายในบรรยากาศ บริเวณพื้นที่กรุงเทพมหานคร ดำเนินการเมื่อเดือนพฤศจิกายน 2549 – กันยายน 2550 โดยเก็บอากาศตัวอย่างริมถนน บริเวณที่อยู่อาศัย และบริเวณทั่วไป ด้วยถังคาร์นิสเตอร์ ระยะเวลาเก็บตัวอย่างอากาศ 24 ชั่วโมง และทำการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Preconcentrator-Gas Chromatograph/Mass Spectrometer ผลการศึกษาพบว่าทั้ง 3 บริเวณ มีสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่ายในบรรยากาศจำนวน 5 กลุ่ม ได้แก่ กลุ่มอะลิฟาติกไฮโดรคาร์บอน อะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน อะลิฟาติกไฮโรจิเนตไฮโดรคาร์บอน อะโรมาติกฮาจิเนตไฮโดรคาร์บอน และออกซิเจนเตไฮโดรคาร์บอน นอกจากนี้ เมื่อเปรียบเทียบค่าความเข้มข้นของสาร Benzene ที่ตรวจพบบริเวณริมถนนกับค่ามาตรฐานสารประกอบอินทรีย์ระเหยสำหรับ 1 ปี ที่กำหนดไว้ในประเทศไทย พบว่ามีค่าสูงกว่าค่ามาตรฐานประมาณ 5 เท่า อย่างไรก็ตามเนื่องจากสารประกอบอินทรีย์ระเหยที่ตรวจพบในจำนวน 5 กลุ่มนี้ บางตัวก่อให้เกิดโรคมะเร็ง บางตัวมีผลต่อระบบทางเดินหายใจ ระบบประสาท ระบบตับ และระบบไต บางตัวเป็นสารที่ก่อให้เกิดโฟโตเคมีคัลออกซิแดนซ์ ได้แก่ โอโซน (Ozone) ดังนั้นควรมีการติดตามตรวจสอบเพื่อเฝ้าระวังระดับของสารดังกล่าวในบรรยากาศ และเพื่อจัดการและควบคุมสารดังกล่าวจากแหล่งต่อไป

**สมเกียรติ และคณะ (2553)** ศึกษาการเปรียบเทียบค่าที่เป็นกรดของน้ำฝนในบริเวณตำบลเนินพระ ตำบลตำบลเนินเชิง และตำบลปากน้ำ จังหวัดระยอง ในการปล่อยแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ และออกไซด์ของไนโตรเจน ซึ่งแก๊สทั้งสองนี้เป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้ เกิดฝนกรด ประกอบกับบริเวณดังกล่าวในฤดูฝนมีลมมรสุมตะวันตกเฉียงเหนือพัดจากทะเลเข้าสู่แผ่นดิน ในแต่ละจุดศึกษาพบว่าทุกจุดศึกษาปริมาณน้ำฝน ค่าความเป็นกรด-เบสของน้ำฝน และทิศทางของลมมรสุมมีความสัมพันธ์กัน โดยในเดือนกันยายน 2553 มีปริมาณน้ำฝนน้อย มีค่าความเป็นกรด-เบสของน้ำฝนต่ำกว่าเดือนกรกฎาคม และสิงหาคม โดยเฉพาะตำบลเนินพระ และตำบลเชิง เนินเกิดฝนกรดที่มีค่า pH ของน้ำฝนน้อยกว่า 5.6 สัมพันธ์กับข้อมูลที่น่าจะเป็นสาเหตุ คือ การที่ปริมาณน้ำฝนน้อย ทำให้

ค่าความเป็นกรด-เบสน้อย และการที่มีลมมรสุมตะวันตกเฉียงเหนือที่พัดจากทะเลเข้าสู่ แผ่นดิน อาจ พัดพาแก๊สที่เป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดฝนกรดเข้ามาเสริมให้เกิดฝนกรดได้มากยิ่งขึ้น

Meikap *et. al* (2001) ศึกษาการบำบัดซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่ปล่อยออกมาจากปล่องโดยใช้ระบบ modified multi-stage bubble column scrubber (MMSBCS) โดยเสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ในการทำนายการดูดซับ  $\text{SO}_2$  และมีทฤษฎีการดูดซับก๊าซบนฟิล์ม สมดุลของปฏิกิริยาเคมีเป็นทฤษฎีพื้นฐาน (The film theory of gas absorption and chemical-equilibrium of reaction) ให้สมมติฐานที่เกี่ยวข้อง คือ

1. ไม่มีการเกิดปฏิกิริยาในสถานะก๊าซ
2. การไหลของระบบภายในคอลัมน์ที่ใช้บำบัด  $\text{SO}_2$  ถือว่าเป็นการไหลแบบทางเดียว (one-dimensional)
3. ถือว่าไม่มีการเปลี่ยนแปลงในแนวรัศมีของคอลัมน์
4. สภาวะคงที่
5. ค่อนข้างน้อยหลังจากผสมกับก๊าซ
6. ค่อนข้างน้อยหลังจากผสมกับของเหลว
7. อัตราส่วนความสูงต่อเส้นผ่านศูนย์กลางของคอลัมน์มีขนาดเล็ก
8. สภาพไอโซเทอร์มที่ผ่านคอลัมน์ (การดูดซับแก๊ส เปลี่ยนในอุณหภูมิที่น้อยมาก)
9. ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่กระจายของก๊าซและของเหลวไม่ได้เป็นฟังก์ชันของความเข้มข้น
10. ความจุความร้อนของของเหลวในระบบที่ความร้อนสูงมากๆ ที่เกิดจากแรงเสียดทานของก๊าซ และการบีบอัด ไม่ได้มีผลกระทบใดๆ

จากผลการทดลอง

4.1 ผลของอัตราการไหลของก๊าซ ต่อเปอร์เซ็นต์การกำจัดซัลเฟอร์ไดออกไซด์

การเพิ่มขึ้นของอัตราการไหลก๊าซที่อัตราการไหลของก๊าซ  $4.5 \times 10^{-3} \text{ Nm}^3/\text{s}$  เปอร์เซ็นต์การกำจัดซัลเฟอร์ไดออกไซด์เป็นค่าคงที่ จึงกล่าวได้ว่าผลของอัตราการไหลไม่มีผลกระทบต่อ การกำจัดซัลเฟอร์ไดออกไซด์

4.2 ผลของอัตราการไหลของของเหลวต่อเปอร์เซ็นต์การกำจัดซัลเฟอร์ไดออกไซด์

อัตราการไหลของของเหลวมีผลต่อเปอร์เซ็นต์การกำจัดซัลเฟอร์ไดออกไซด์ เนื่องจากที่อัตราการไหลของของเหลว  $170 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$  ที่ความเข้มข้น 1500 ppm มีประสิทธิภาพเปอร์เซ็นต์การกำจัดซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่ดีที่สุด

4.3 ความสูงของคอลัมน์ส่งผลต่อซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่ออกมา

เป็นการสร้างกราฟระหว่างซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่ออกมา กับความสูงของคอลัมน์ โดยทำให้ อัตราการไหลของก๊าซ และอัตราการไหลของของเหลวคงที่ ค่าซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่ออกจากคอลัมน์

หลังจากที่ความสูงของคอลัมน์เท่ากับ 1.30 เมตร ค่าซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่ออกจากคอลัมน์จะเริ่มคงที่ที่ระดับความสูงของคอลัมน์ที่ 1.30 เมตร ค่าซัลเฟอร์ไดออกไซด์ออกมีค่ามากกว่าซัลเฟอร์ไดออกไซด์เข้า

สรุปผลการทดลอง จากการทดลองชุดคอลัมน์มีประสิทธิภาพการกำจัดซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่สูง เกือบ 100% เนื่องจากผ่านกระบวนการกำจัดหลายขั้นตอนในคอลัมน์ ดังนั้นแบบจำลองคอลัมน์นี้จึงเหมาะแก่การใช้บำบัดซัลเฟอร์ไดออกไซด์

Pao-Chi Chen *et. al* (2014) ศึกษาจลนศาสตร์การตกผลึกของแบเรียมคาร์บอเนตของคอลัมน์ในห้องปฏิบัติการ โดยการดูดกลืนก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในสารละลายต่างด้วยปฏิกิริยาตกผลึก การตกผลึกของแบเรียมคลอไรด์ pH ที่อยู่ช่วง 12-13 โดยศึกษาคอลัมน์อย่างต่อเนื่อง ภายใต้สภาพแวดล้อมที่มี pH คงที่ โดยแบเรียมคาร์บอเนตมีรวมตัวกันของผลึกที่พร้อมกัน ศึกษาปฏิกิริยาของ  $\text{CO}_2/\text{BaCl}_2/\text{H}_2\text{O}$  มีพารามิเตอร์ คือ pH ของสารละลาย ความเข้มข้นของของเหลว อัตราการไหลของของเหลว ความเข้มข้นของก๊าซ และอัตราการไหลของก๊าซ จากการศึกษาพารามิเตอร์ข้างต้น ความเข้มข้นของของเหลว และอัตราการไหลของของเหลว เป็นปัจจัยที่ส่งผลต่อการดูดซึมของก๊าซ  $\text{CO}_2$  มากที่สุด รองลงมา คือ pH ของสารละลาย

## บทที่ 3

### วิธีการดำเนินการวิจัย

#### 3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์

1. เครื่องไอออนโครมาโทกราฟ (Ion Chromatograph) บริษัท Metrohm Ltd., ประเทศสวิสเซอร์แลนด์
2. เครื่องเก็บอากาศส่วนบุคคลรุ่น Universal PCXR8, บริษัท SKC, ประเทศสหรัฐอเมริกา
3. บั๊มดูดอากาศรุ่น DOA-P504-BN, บริษัท Gast Manufacturing Inc., ประเทศสหรัฐอเมริกา
4. เครื่องวัดอัตราการไหลของอากาศ ยี่ห้อ BIOS รุ่น Defender 520, บริษัท Brandt Instruments, ประเทศสหรัฐอเมริกา
5. เครื่องวัดพีเอช รุ่น pH/Ion meter S220, บริษัท Mettler-Toledo AG ประเทศสวิสเซอร์แลนด์
6. เครื่องชั่ง (ทศนิยม 4 ตำแหน่ง) รุ่น TC-254, บริษัท Denver Instrument Company, ประเทศเยอรมนี
7. เครื่องให้ความร้อนและปั่นกวน รุ่น CB162, บริษัท Braloworld Scientific Ltd., ประเทศอังกฤษ
8. ขวดแก้วขนาด 1 ลิตรเพื่อใส่สารดูดซึมและทนต่อความดัน ยี่ห้อ Duran, บริษัท Schott, ประเทศเยอรมัน
9. สายยาง ยี่ห้อ Tygon, บริษัท Saint Gobain, ประเทศสหรัฐอเมริกา
10. ไยสังเคราะห์
11. แผ่นกรองที่มีรูพรุน 0.45 ไมโครเมตร
12. หัวฟ่นอากาศ
13. ท่อนำก๊าซ
14. กล่องใส่ทำจากอะคริลิกขนาด กว้าง x ยาว x สูง เท่ากับ 53 x 33 x 36 cm.
15. คอลัมน์สารดูดซับ(ขวดน้ำพลาสติก) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5.5 cm. ยาว 25 cm.
16. เครื่องแก้วต่างๆ

#### 3.2 สารเคมี

1. กรดซัลฟิวริก 96% เกรดวิเคราะห์ บริษัท Carlo Erba Reagents , ประเทศเยอรมนี
2. กรดไนตริก 65% เกรดวิเคราะห์ บริษัท Carlo Erba Reagents , ประเทศเยอรมนี
3. โซเดียมคาร์บอเนตเกรดวิเคราะห์ บริษัท Carlo Erba Reagents , ประเทศเยอรมนี

4. โซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนตเกรดวิเคราะห์บริษัท Carlo Erba Reagents , ประเทศเยอรมนี
5. กรดไฮโดรคลอริก 38% เกรดวิเคราะห์บริษัท Carlo Erba Reagents , ประเทศเยอรมนี
6. ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เกรดวิเคราะห์ บริษัท Carlo Erba Reagents , ประเทศเยอรมนี
7. กระดาษใยแก้ว
8. ฟีนอล์ฟทาไลน์อินดิเคเตอร์ ช่วงพีเอชของการเปลี่ยนสี 8.3 – 10.0 จากสีใสเป็นสีชมพู
9. เมธิลออเรนทีอินดิเคเตอร์ ช่วงพีเอชของการเปลี่ยนสี 3.2 – 4.4 จากสีส้มเป็นสีเหลือง
10. บรอมไทมอลบลูอินดิเคเตอร์ ช่วงพีเอชของการเปลี่ยนสี 6.0– 7.6 จากสีเหลืองเป็นสีน้ำเงิน
11. ซิลิกาเจล เกรดวิเคราะห์ บริษัท HI DRI, ประเทศสหรัฐอเมริกา
12. ในการทดลองที่เกี่ยวข้องกับเครื่องไอออนโครมาโทกราฟี ใช้น้ำความบริสุทธิ์สูง Ultra-pure water

### 3.3 การทดสอบสมบัติเบื้องต้น

การทดสอบสมบัติที่เกี่ยวข้องเบื้องต้นของสารละลายและอุปกรณ์ที่ใช้ในการเก็บอากาศก่อนการนำสารละลายและอุปกรณ์มาใช้งานนั้น จำเป็นต้องมีการวิเคราะห์สมบัติบางประการ เพื่อให้ทราบถึงความเหมาะสมต่อการนำมาใช้งาน โดยวิเคราะห์ตามพารามิเตอร์ต่างๆ ดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 การวิเคราะห์สมบัติเบื้องต้นของการดักจับไอกรด

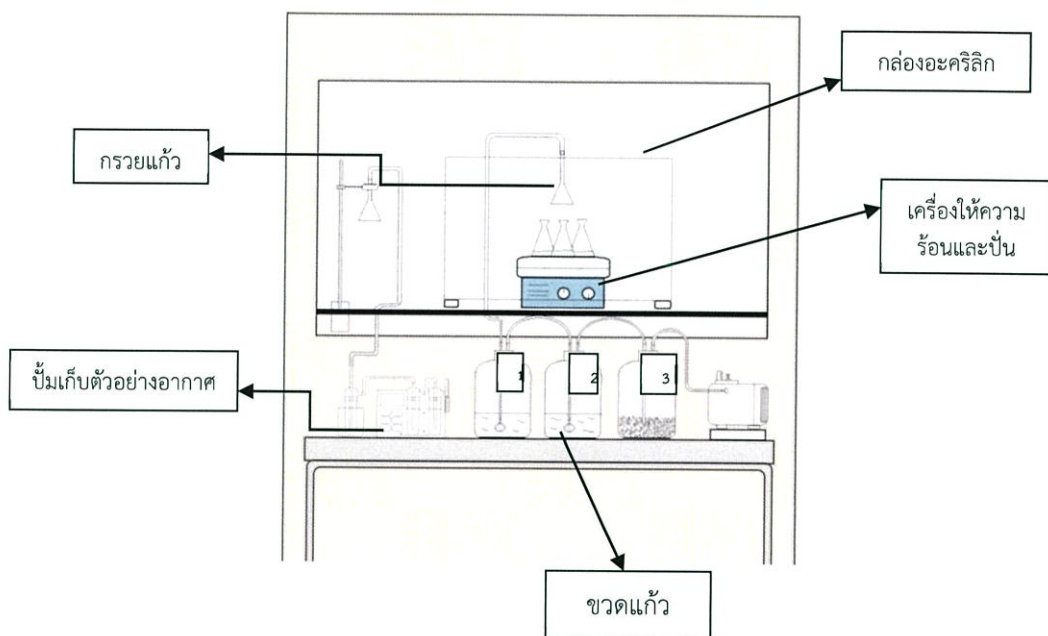
พารามิเตอร์ที่วิเคราะห์	สารละลาย	อุปกรณ์	เครื่องมือ/สารละลาย
1. พีเอช (pH)	√	-	เครื่องวัดพีเอช
2. การนำไฟฟ้า (Conductivity)	√	-	เครื่องวัดค่าการนำไฟฟ้า
3. อัตราการไหล (Flow rate)	-	√	เครื่องวัดอัตราการไหลของอากาศ
4. อุณหภูมิ (Temperature)	-	√	เทอร์โมมิเตอร์
5. ความดัน (Pressure)	√	√	มิเตอร์วัดความดันบรรยากาศ
6. การกัดกร่อน (Erode)	-	√	นำหัวฟูไปแช่ในกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 96 % เวลา 1 ชั่วโมง

#### 3.3.1 การเตรียมอุปกรณ์สำหรับการเก็บอากาศ

1. ตรวจสอบอัตราการไหลของปั๊มดูดอากาศ โดยใช้เครื่องเก็บอากาศที่อัตราการไหล 0.2 L/min (อัตราการไหลอ้างอิงตาม Method No.ID-165SG ของ Occupational Safety and Health Administration, OSHA) ขณะทำการเทียบอัตราการไหลให้ต่ออุปกรณ์เข้ากับขวดแก้วขนาด 1L โดยขวดที่ 1 บรรจุสารดูดซึ่มทำหน้าที่ดักจับไอกรด ขวดที่ 2 บรรจุสารดูดซึ่มป้องกันไอกรดที่อาจดักจับไม่หมดจากขวดที่ 1 โดยทั้ง 2 ขวดมีการเติมอินดิเคเตอร์บรอมไทมอลบลูเป็นการตรวจสอบการดักจับไอ

กรดเบื้องต้น และขวดที่ 3 บรรจุซิลิกาเจลเพื่อป้องกันไอน้ำที่อาจเข้าสู่ปั๊มได้ให้เรียบร้อย โดยใช้น้ำกลั่นใส่ลงในอุปกรณ์ดักจับไอกรดแทนสารละลายดูดซึม

2. การตรวจสอบอัตราการไหลของเครื่องเก็บอากาศส่วนบุคคล โดยใช้เครื่องเก็บอากาศที่อัตราการไหลประมาณ 0.4 L/min (ในปั๊มเก็บอากาศส่วนบุคคลหากใช้อัตราการไหลที่ต่ำกว่า 0.4 L/min ต้องมีการควบคุม flow) ขณะทำการเทียบอัตราให้ต่ออุปกรณ์เข้ากับอิมพิงเจอร์ให้เรียบร้อย โดยใช้น้ำกลั่นใส่ลงไปในแทนสารละลาย

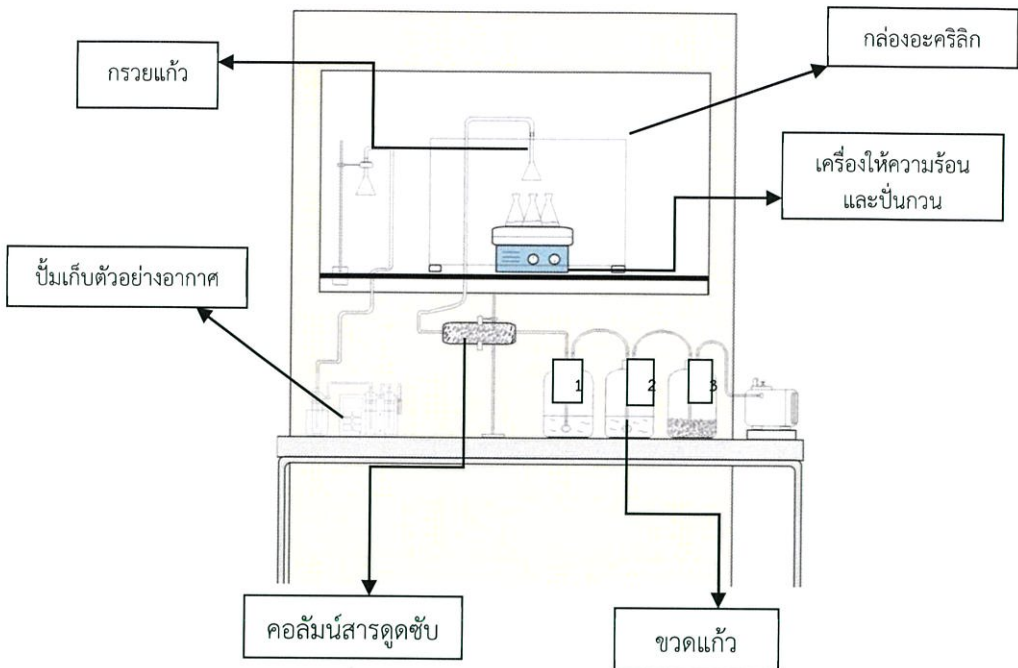


รูปที่ 3.1 ชุดอุปกรณ์ดักจับไอกรดด้วยสารดูดซึม

หมายเลข 1 คือ  $\text{Na}_2\text{CO}_3$

หมายเลข 2 คือ Buffer

หมายเลข 3 คือ ซิลิกาเจล



รูปที่ 3.2 ชุดอุปกรณ์ดักจับไอกรดด้วยสารดูดซึ่มและคอลัมน์ดูดซับ

หมายเลข 1 คือ  $\text{Na}_2\text{CO}_3$

หมายเลข 2 คือ Buffer

หมายเลข 3 คือ ซิลิกาเจล

### 3.3.2 การเตรียมสารเคมีสำหรับการเก็บอากาศ

#### 1. สารละลายสต็อกกรดซัลฟิวริก 1 นอร์มัล

ปิเปตกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 96 % มา 14 mL ในน้ำกลั่นแล้วเจือจางให้เป็น 500 mL

#### 2. สารละลายกรดซัลฟิวริก 0.02 นอร์มัล

ปิเปตสารละลายสต็อกซัลฟิวริก 20 mL เจือจางด้วยน้ำกลั่นจนได้ปริมาตร 1000 mL จากนั้นก่อนใช้ต้องหาค่าความเข้มข้นที่แน่นอนกับสารมาตรฐานปฐมภูมิโซเดียมคาร์บอเนต ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) มวลโมเลกุลเท่ากับ 106 g/mo หรือน้ำหนักสมมูล 53 g/eq ที่อบแห้ง 105 °C ไล่ความชื้นแล้วทำให้เย็นในเดซิเคเตอร์ ซึ่งน้ำหนักสารให้ใกล้เคียง 0.0500 g ละลายในน้ำกลั่นที่ปราศจาก  $\text{CO}_2$  ปริมาณน้อยๆ แล้วนำไปไทเทรตกับกรดซัลฟิวริก โดยใช้ฟีนอล์ฟทาลีนและเมทิลออเรนจ์เป็นอินดิเคเตอร์จนได้จุดยุติ เปลี่ยนเป็นสีส้มอ่อน

#### 3. สารละลายบัฟเฟอร์ pH=10.5

เตรียมจากโซเดียมคาร์บอเนต ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) 42.74 g และโซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนต ( $\text{NaHCO}_3$ ) 50.12 g ละลายในน้ำกลั่นที่ปราศจากคาร์บอนไดออกไซด์ โดยต้มให้เดือดและทิ้งให้เย็นในภาชนะปิดสนิท ใช้การปั่นกวนเพื่อช่วยในการละลาย เมื่อสารละลายใสนำมาปรับปริมาตรจนถึง 1000 mL ในขวดวัดปริมาตรจะได้สารละลายบัฟเฟอร์เข้มข้นที่มี  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  0.4003 M และ  $\text{NaHCO}_3$  0.5967 M เก็บในภาชนะปิดสนิทไม่สัมผัสกับอากาศโดยตรง

4. โซเดียมคาร์บอเนต 1 โมลาร์

ซิงโซเดียมคาร์บอเนต ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) 106 g ละลายในน้ำกลั่นปรับปริมาตร 1000 mL

5. โซเดียมคาร์บอเนต 0.1 M

ปิเปตสารละลายโซเดียมคาร์บอเนต 1 มา 100 mL ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่น 1000 mL

6. สารละลายสต็อกกรดไฮโดรคลอริก 1 นอร์มัล

ปิเปตกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 38 % มา 83 mL ในน้ำกลั่นแล้วเจือจางให้เป็น 1000 mL

7. สารละลายกรดไฮโดรคลอริก 0.1 โมลาร์

ปิเปตสารละลายสต็อกกรดไฮโดรคลอริก 100 mL เจือจางด้วยน้ำกลั่นจนได้ปริมาตร 1000 mL จากนั้นก่อนใช้ ต้องหาค่าความเข้มข้นที่แน่นอนกับสารมาตรฐานปฐมภูมิโซเดียมคาร์บอเนต ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) มวลโมเลกุลเท่ากับ 106 g/mol หรือน้ำหนักสมมูล 53 g/eq ที่อบแห้ง 105 °C ไล่ความชื้นแล้วทำให้เย็นในเดซิเคเตอร์ ซั่งน้ำหนักสารให้ใกล้เคียง 0.0500 g ละลายในน้ำกลั่นที่ปราศจาก  $\text{CO}_2$  ปริมาณน้อยๆ แล้วนำไปไทเทรตกับกรดไฮโดรคลอริก โดยใช้ฟีนอล์ฟทาลีน และเมทิลออเรนจ์เป็นอินดิเคเตอร์จนได้จุดยุติ เปลี่ยนเป็นสีส้มอ่อน

### 3.3.3 การจำลองสถานการณ์ไอกรด

ไอกรดที่เกิดขึ้นในห้องปฏิบัติการ ได้ถูกจำลองสถานการณ์ขึ้นโดยทำการย่อยน้ำเสียสังเคราะห์ ซึ่งย่อยตามวิธี USEPA 3050B ดังรายละเอียดในภาคผนวก โดยทำการเก็บไอกรดในตู้ดูดควันโดยที่ปิดเครื่องดูดควัน

การเก็บอากาศที่เกิดจากการจำลองสถานการณ์ไอกรดที่เกิดขึ้นในห้องปฏิบัติการ

1. ต่อชุดอุปกรณ์ดักจับไอกรดสำหรับเก็บไอกรดที่เกิดขึ้นโดยเป็นอากาศภายในบริเวณกล่องอะคริลิก และอากาศภายนอกกล่องอะคริลิก เพื่อตรวจสอบว่ามีปริมาณไอกรดแพร่กระจายออกมาได้หรือไม่ เป็นปริมาณมากน้อยเพียงใด ดังรูปที่ 3.1

2. ทำการปรับอัตราการไหลของปั๊มที่ 0.2 L/min ของชุดอุปกรณ์ดักจับไอกรด และอิมพิงเจอร์ที่ 0.4 L/min

3. ใส่สารละลายโซเดียมคาร์บอเนต ที่ความเข้มข้น 1 M และสารละลายบัฟเฟอร์ที่ค่า pH= 10.5 ในขวดแก้วขนาด 1 L ที่ 1 และ 2 ตามลำดับ ปริมาตรสารละลายจำนวน 300 mL ส่วนอิมพิงเจอร์ที่ 1 และ 2 ใส่สารละลายโซเดียมคาร์บอเนต และสารละลายบัฟเฟอร์ปริมาตร 15 mL ตามลำดับ

4. วัดค่าพีเอช และการนำไฟฟ้าของสารละลายโซเดียมคาร์บอเนต และสารละลายบัฟเฟอร์ ทั้งขวดแก้วและอิมพิงเจอร์ ก่อนการทดลอง และหลังการทดลอง

5. นำชุดอุปกรณ์ทั้งสองไปวางไว้นอกตู้ดูดควันเพื่อทำการทดลองเก็บอากาศ แต่มีท่อเก็บตัวอย่างอากาศ ณ จุดที่ต้องการ โดยชุดของขวดแก้วเป็นการเก็บอากาศการย่อยที่เกิดจากการย่อยน้ำ

เสี่ยภายในกล่องอะคริลิก ชุดของอิมพิงเจอร์ที่เก็บ เป็นการเปรียบเทียบไอกรด ที่อาจหลงเหลือและแพร่มาจากอุปกรณ์ดักจับไอกรด

6. จำลองสถานการณ์ไอกรดในตู้ดูดควันโดยทำการย่อยตัวอย่างน้ำเสียจริงจากห้องปฏิบัติการ 50 mL ในขวดรูปชมพู่ โดยแปรจำนวนตัวอย่างตั้งแต่ 1 ขวดจนถึง 3 ขวด ที่วางอยู่บนเตาให้ความร้อนในตู้ดูดควัน ใส่กรดไนตริก 5 mL และกรดซัลฟิวริก 1 mL ลงในขวดรูปชมพู่ที่มีน้ำเสียอยู่ นำกรวยวางบนขวดรูปชมพู่ (ดังรูปที่ 3.1) เพื่อให้เกิดการควบแน่นทำให้เกิดการย่อยที่สมบูรณ์

7. ทำการย่อยให้ตัวอย่างน้ำเสียมีอุณหภูมิประมาณ 95 องศาเซลเซียส

8. วัดอุณหภูมิของอากาศที่อยู่บริเวณเหนือขวดรูปชมพู่ ทั้งอุณหภูมิเริ่มต้นตลอดระยะเวลาทุก 30 นาที และหลังการทดลอง

9. สังเกตสีที่เปลี่ยนไปในขวดแก้วที่ 2 ถ้ามีการเปลี่ยนสีของอินดิเคเตอร์ให้หยุดการเก็บอากาศพร้อมจดบันทึกผล

10. นำสารละลายโซเดียมคาร์บอเนต และสารละลายบัพเฟอร์ วัดพีเอชหลังการทดลอง ทั้งในขวดแก้ว และอิมพิงเจอร์

11. ทำการทดลอง 3 ครั้ง หลังจากนั้น เปลี่ยนอัตราการไหลเป็น 0.1 และ 0.3 L/min

**การเตรียมสารตัวอย่างก่อนนำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่องไอออนโครมาโทกราฟี**

1. นำสารดูดซึมหลังจากการเก็บอากาศ ทั้งในชุดอุปกรณ์ดักจับไอกรด และชุดเทียบอากาศ ใส่แต่ละขวดรูปชมพู่ อย่างละ 15 mL

2. มาไทเทรตด้วยกรด HCl โดยเติมอินดิเคเตอร์ด้วยฟีนอล์ฟทาลีน และ เมทิลออเรนจ์

3. เก็บสารตัวอย่างที่ไทเทรตแล้ว ใส่ขวดพลาสติก นำไปเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 °C

### 3.3.4 การวิเคราะห์หาปริมาณกรดในสารดูดซึม

**การวิเคราะห์หาปริมาณไอออนของสารดูดซึมด้วยเครื่องไอออนโครมาโทกราฟี**

1. นำสารละลายตัวอย่างจากขวดพลาสติกมาตั้งไว้ในอุณหภูมิห้อง

2. นำสารละลายตัวอย่าง ผ่านการกรองโดยใช้แผ่นกรองเมมเบรน ขนาดรูพรุน 0.2 หรือ 0.45 ไมโครเมตร ให้เหมาะสม เพื่อป้องกันการอุดตันภายในคอลัมน์เครื่องไอออนโครมาโทกราฟี

3. นำสารละลายตัวอย่างที่ผ่านการกรองแล้ว นำมาเจือจางให้เหมาะสม ปรับปริมาตรด้วย 3% H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> ที่ผ่านการกรองแล้ว ทิ้งไว้สักครู่

4. นำมาวิเคราะห์ด้วยเครื่องไอออนโครมาโทกราฟีที่สถานะแสดงในตารางที่ 3.2

5. คำนวณหาปริมาณของไอออน (รายละเอียดวิธีการคำนวณแสดงในภาคผนวก ค)

### การเตรียมอนุกรมสารละลายมาตรฐานผสม

1. เจือจางสารละลายมาตรฐานที่ใช้งาน ซึ่งมีไอออนเดี่ยว (Single standard) 100 ppm ให้เป็น 10, 50 ppm อย่างละ 25 mL
2. เตรียมอนุกรมของสารละลายมาตรฐาน (Mix standard) ของประจุลบที่มีทั้งซัลเฟต และ ไนเตรต อยู่ในขวดวัดปริมาตรเดียวกัน ใช้ขวดวัดปริมาตร 10 mL ใน 1 ชุดสำหรับมีความเข้มข้น 5 ระดับ โดยให้ไอออน  $\text{NO}_3^-$  อยู่ในช่วง 1.5 – 25 mg/L และ  $\text{SO}_4^{2-}$  อยู่ในช่วง 1.5 – 2.5 mg/L

### ตารางที่ 3.2 สภาวะที่ใช้ในการวิเคราะห์ด้วยเครื่องไอออนโครมาโทกราฟี

ข้อมูลทางเทคนิค	แอนไอออน (Anion)
คอลัมน์ที่ใช้แลกเปลี่ยนประจุลบ	Metrosep A Supp 5-150 (6.1006.220)
อัตราการไหล	0.7 mL/min
ความดันที่คอลัมน์รองรับได้	15 MPa
ตัวชะ (Mobile phase)	สารละลายวัฏภาคเคลื่อนที่สำหรับประจุลบ โดยเตรียมสารละลายโซเดียมคาร์บอเนต ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) กับ โซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนต ( $\text{NaHCO}_3$ ) ที่มีความเข้มข้น 3.2 และ 1.0 mM
วัสดุที่ใช้เป็นตัวแลกเปลี่ยนประจุ	พอลิไวเนลแอลกอฮอล์กับหมู่ควอเทอนารีแอมโมเนีย
ค่าการนำไฟฟ้า	13-15 uS/cm.

## 3.4 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

### 3.4.1 การศึกษาผลของความเข้มข้นของสารดูดซึมต่อประสิทธิภาพของอุปกรณ์ดักจับไอกรด

1. เตรียมสารดูดซึมสำหรับการเก็บตัวอย่างอากาศ ใส่ลงในอิมพิงเจอร์ และขวดแก้วขนาด 1 L อย่างละ 15 และ 300 mL ตามลำดับ โดยเตรียมจาก  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  เข้มข้น 0.1 M และ Buffer
2. ต่อชุดอุปกรณ์ดักจับไอกรด ดังรูปที่ 3.1 โดยให้อัตราการไหล 0.2 L/min
3. จำลองสถานการณ์ไอกรดในตู้ดูดควัน โดยทำการย่อยตามวิธี USEPA 3050B (รายละเอียดแสดงในหัวข้อ 3.3.3)
4. เก็บอากาศในตู้ดูดควันที่ปิดดูดควัน ขณะมีการย่อยกำหนดให้มีการย่อยตัวอย่างน้ำเสียที่ 1 ฟลาสก์ บันทึกอุณหภูมิ ความดันบรรยากาศและเวลา ก่อนและหลังเก็บตัวอย่างอากาศ
5. หลังจากเก็บอากาศ นำสารดูดซึมทั้งในขวดแก้ว และอิมพิงเจอร์ ไทเทรตด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริกที่ทราบความเข้มข้นที่แน่นอน บันทึกผล คำนวณหาปริมาณไอกรด
6. นำสารละลายตัวอย่าง ที่ไทเทรตเสร็จแล้วไปใส่ขวดพลาสติก แช่เย็นที่อุณหภูมิ 4 °C เพื่อเตรียมไปวิเคราะห์ด้วยเครื่องไอออนโครมาโทกราฟี

7. ทำซ้ำตามขั้นตอน 1-6 โดยเปลี่ยนความเข้มข้นของสารดูดซึมจาก 0.1 M เป็น 0.5 M และ 1 M ตามลำดับ

### 3.4.2 การศึกษาผลของปริมาณไอกรดจากแหล่งกำเนิด

ทำเหมือนการทดลองหัวข้อ 3.4.1 แต่แปรค่าที่จำนวนแหล่งกำเนิด การเกิดไอกรดโดยเพิ่มการย่อยตัวอย่างจาก 1 ฟลาสก์ เป็น 2 และ 3 ฟลาสก์ตามลำดับ โดยจะใช้สารดูดซึมที่มีความเข้มข้นที่ 1 M และอัตราการไหลที่ 0.2 L/min

### 3.4.3 การศึกษาอัตราการไหลของปั๊มที่มีผลต่ออุปกรณ์ดักจับไอกรด

ทำเหมือนการทดลองหัวข้อ 3.4.2 แต่แปรค่าที่อัตราการไหลของปั๊มในชุดอุปกรณ์ดักจับไอกรดที่ 0.1 L/min และ 0.3 L/min โดยจะใช้สารดูดซึมที่มีความเข้มข้นที่ 1M และให้มีแหล่งกำเนิดไอกรดมีการย่อยตัวอย่าง 3 ฟลาสก์

### 3.4.4 การศึกษาการเปิดที่ดูดควันควบคู่กับการทำงานของอุปกรณ์ดักจับไอกรด

ทำเหมือนการทดลองหัวข้อ 3.4.2 โดยให้มีแหล่งกำเนิดไอกรด มีการย่อย 3 ฟลาสก์ สารดูดซึม ที่มีความเข้มข้น 1 M และอัตราการไหล 0.2 L/min แต่ขณะทำการเก็บตัวอย่างอากาศ ให้เปิดดูดควันควบคู่ไปกับการทำงานของชุดอุปกรณ์ดักจับไอกรด

### 3.4.5 การศึกษาการเพิ่มคอลัมน์สารดูดซับเข้ามาในชุดอุปกรณ์ดักจับไอกรด

ทำเหมือนการทดลองหัวข้อ 3.4.2 พร้อมติดตั้งชุดอุปกรณ์ดักจับไอกรด และคอลัมน์สารดูดซับ ดังรูปที่ 3.2 โดยในคอลัมน์สารดูดซับได้บรรจุเม็ดหิน ( $\text{CaCO}_3$ ) จำนวน 2 ใน 3 ของคอลัมน์ หรือประมาณ 16 เซนติเมตร ของความยาวคอลัมน์ และใส่ใยสังเคราะห์ตรงหัวและท้ายของคอลัมน์ ให้มีความหนา 2 นิ้ว ได้กำหนดให้มีแหล่งกำเนิดไอกรดมีการย่อยตัวอย่าง 3 ฟลาสก์ สารดูดซึมที่มีความเข้มข้นที่ 1 M และอัตราการไหล 0.2 L/min

### 3.4.6 การควบคุมคุณภาพในการวิเคราะห์

1. น้ำที่ใช้ในการวิเคราะห์ ต้องเป็นน้ำมีความบริสุทธิ์สูงตามมาตรฐานของ ASTM type I เมื่อฉีดเข้าเครื่องไอออนโครมาโทกราฟี เพื่อทดสอบก่อนทำการพามาตรฐาน และการใช้สกัดตัวอย่างโครมาโทแกรมที่ได้ต้องไม่มีพีคอื่นแปลกปลอม
2. ในการวิเคราะห์กราฟมาตรฐานที่ได้ต้องมีระดับของสารไม่น้อยกว่า 5 ระดับและมีค่าสหสัมพันธ์เชิงเส้น (Linear correlation coefficient,  $R^2$ ) เข้าใกล้ 1 และค่า  $R_f$  ของสารมาตรฐานคงที่
3. คอลัมน์มีความสามารถในการแยกพีคของสารได้ดี
4. ฉีดน้ำที่ความบริสุทธิ์สูง ล้างสารที่อาจตกค้างในคอลัมน์ เพื่อให้แน่ใจว่าไม่มีไอออนค้างอยู่ในคอลัมน์ ก่อนทำการวิเคราะห์ตัวอย่างครั้งต่อไป

5. การไทเทรตหาวิเคราะห์ซ้ำในตัวอย่างเดียวกัน เพื่อทดสอบความแม่นยำของผู้ทดสอบ โดยทำการวิเคราะห์ตัวอย่างเดียวกัน 2-3 ซ้ำ ผลที่ได้ควรต่างกันไม่เกิน  $\pm 0.1$

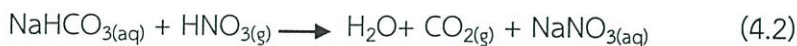
6. อัตราการไหลของเครื่องเก็บอากาศส่วนบุคคล ช่วงการวัดอัตราการดูด 1000 ถึง 5000 mL/min (5 ถึง 500 mL/min ต้องใช้ตัวปรับ flow) ช่วง 5 ถึง 3000 mL/min ได้รับการรับรองมาตรฐาน MSHA ค่าความถูกต้อง ความแม่นยำในการตรวจวัดเพื่อวิเคราะห์ผลไม่เกิน  $\pm 0.05\%$

## บทที่ 4

### ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

จากการศึกษาอุปกรณ์ดักจับไอกรดเบื้องต้นในห้องปฏิบัติการ โดยทำการย่อยตัวอย่างน้ำเสียที่ใช้กรดในการย่อย ทำการย่อยในตู้ดูดควัน โดยเปรียบเทียบความเป็นไฮโมจีเนียสและเฮเทอโรจีเนียส การทดสอบของอุปกรณ์กำจัดไอกรดเบื้องต้น ทำการศึกษาตัวแปร คือ ความเข้มข้นกรดโดยการเพิ่มจำนวนตัวอย่างจากแหล่งกำเนิด ความเข้มข้นของสารดูดซึม และอัตราการไหล ได้ผลการทดสอบดังนี้

จากการย่อยตัวอย่างน้ำ ทำให้เกิดไอกรดในบรรยากาศ ซึ่งในการดักจับไอกรดด้วยสารละลาย ต้องใช้สารละลายที่มีฤทธิ์เป็นเบสเพื่อบำบัดไอกรด อาจเปลี่ยนเป็นสารประกอบอื่นหรือเกิดเพียงการละลายลงสารละลาย ในโครงการนี้จึงเลือกสารดูดซึมต่างๆเพื่อดูดไอกรดผ่านเข้าสารดูดซึม วิเคราะห์หาปริมาณกรดที่สารดูดซึมที่มีฤทธิ์เป็นเบส ก่อนและหลังการเก็บตัวอย่างอากาศที่สามารถรองรับได้ด้วยการไทเทรตกับ HCl คำนวณมาเทียบเท่าความเข้มข้นไอกรดในบรรยากาศ การใช้เบสแก่ในการดูดซึมไอกรด เช่น NaOH, KOH หรือ  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  ไม่เหมาะสม เนื่องจากทำให้เกิดขวดแก้วหรือ Impinger ที่บรรจุสารละลายดังกล่าว ถูกกัดกร่อนจากเบสแก่ที่มีฤทธิ์กัดกร่อนแก้วได้ ดังนั้นจึงเลือกสารละลาย  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  และ Buffer ( $\text{Na}_2\text{CO}_3/\text{NaHCO}_3$ ) ซึ่งเป็นเบส ในการดูดซึมสำหรับสารละลายขวดที่ 1 ใช้  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  ซึ่งเมื่อดูดซึมไอกรดระยะหนึ่งสามารถเกิดเกลือ  $\text{NaHCO}_3$  ผสมกับ  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  ที่เหลือสารละลายในขวดที่ 1 จึงมีสถานะเป็นสารละลายบัฟเฟอร์ ( $\text{Na}_2\text{CO}_3/\text{NaHCO}_3$ ) รองรับการเปลี่ยนแปลงของพีเอชได้ ทำให้อินดิเคเตอร์เปลี่ยนสีได้ยาก การเกิดปฏิกิริยาในสารดูดซึมขวดที่ 1 อาจไม่สมบูรณ์ ทำให้ไอกรดเล็ดลอดไปยังขวดที่ 2 ได้ เมื่อมีไอกรดเล็ดลอดไปยังสารละลายขวดที่ 2 ซึ่งเป็น Buffer อยู่ก่อนแล้ว จะสามารถรองรับปริมาณไอกรดได้เล็กน้อย จึงทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลง pH ได้ทันทีเห็นการเปลี่ยนแปลงของอินดิเคเตอร์ และเกิดปฏิกิริยา เช่น เป็นกรดไนตริกหรือกรดซัลฟิวริก



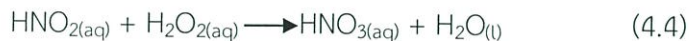
จุดตรวจสอบการ Breakthrough เนื่องจากไอกรดเข้าทำปฏิกิริยา จนถึงสารละลายขวดที่ 2 จน  $\text{NaHCO}_3$  กลายเป็น  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  ทั้งหมด ขึ้นกับชนิดของไอกรดที่เกิดจาก  $\text{HNO}_3$  หรือ  $\text{H}_2\text{SO}_4$  โดยจะมีค่า pH ต่ำกว่า 7 เป็นผลทำให้อินดิเคเตอร์ คือ บรอมไทมอลบลู อยู่ในช่วง 6.0 – 7.6 เกิดการเปลี่ยนแปลงสีได้จากสีน้ำเงิน เป็นสีเหลือง จะทำให้เห็นว่าสารละลายขวดที่ 2 หมดแล้ว หากขวดที่ 2

ใช้สารละลาย  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  เมื่อไอกรดที่เล็ดลอดจากจากขวดที่ 1 เข้ามา จะทำให้สารละลายในขวดที่ 2 เกิดเป็น Buffer ใหม่ ซึ่ง Buffer ดังกล่าว อาจจะสามารถรับปริมาณไอกรดได้ดี จนไม่สามารถสังเกตเห็นการเปลี่ยนแปลงสีของอินดิเคเตอร์ ทำให้ไอกรดที่เหลือ อาจเล็ดลอดตามยั้งปั้ม ส่งผลอันตรายต่อปั้มได้ ส่วนปริมาณกรดที่เกิดจากการดูดซึมลงในขวดแก้วของชุดอุปกรณ์ ถือว่าเป็นปริมาณกรดที่ดักจับไว้ได้ / บำบัดไว้ได้ (Quantity of acid,  $Q_{\text{acid}}$ )

สารละลาย Buffer ( $\text{Na}_2\text{CO}_3/\text{NaHCO}_3$ ) สามารถทำปฏิกิริยาไอกรดได้น้อยกว่า  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  ส่วน  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  มีราคาถูก ง่าย สามารถดักจับไอกรดได้ดีเช่นกัน เกิดปฏิกิริยาได้ง่ายจึงใช้เป็นสารดูดซึมในขวดที่ 1

ในทำนองเดียวกันสารละลาย หรือสารดูดซึมที่เลือกใช้ใน Impinger ที่ 1 จึงเป็น  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  และ Impinger ที่ 2 เป็น Buffer ( $\text{Na}_2\text{CO}_3/\text{NaHCO}_3$ ) ซึ่งไม่เหมาะสม เนื่องจาก ชุดเทียบอากาศที่ใช้ Impinger เก็บอากาศเป็นการเก็บตัวอย่างอากาศที่ถือว่าผ่านชุดอุปกรณ์ดักจับไอกรดแล้ว เสมือนเป็นอากาศในห้องปฏิบัติการ ซึ่งมีความเข้มข้นของกรดในบรรยากาศ (Concentration of acid in the air,  $C_{\text{air}}$ ) ควรทำตามวิธีมาตรฐานของ OSHA ID-200 ซึ่งใช้  $\text{H}_2\text{O}_2$  ในการเก็บอากาศที่มีความเป็นกรด

ผลปริมาณไอกรดต่อจากนี้ วิเคราะห์โดยเครื่องไอออนโครมาโทกราฟี เนื่องจากเป็นเครื่องมือที่ใช้สำหรับวิเคราะห์ไอออนประจุบวก (Cation) เช่น  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$  และไอออนประจุลบ (Anion) เช่น  $\text{F}^-$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Br}^-$ ,  $\text{NO}_3^-$  และ  $\text{SO}_4^{2-}$  เป็นต้น และสารตัวอย่างที่นำมาวิเคราะห์คือประจุลบ  $\text{SO}_4^{2-}$  และ  $\text{NO}_3^-$  ที่อยู่ในสารดูดซึมหลังจากการเก็บอากาศการวิเคราะห์ด้วยเครื่องไอออนโครมาโทกราฟี จึงเหมาะสมในการหาปริมาณไอกรด ในระหว่างที่เก็บตัวอย่างไว้รอวิเคราะห์ด้วยเครื่องไอออนโครมาโทกราฟีโดยเก็บสารละลายตัวอย่างไว้นานเกิน 48 ชั่วโมง ซึ่งสามารถทำให้  $\text{NO}_2^-$  และ  $\text{NO}_3^-$  ที่อยู่ในสารละลายอาจสลายตัวได้ เนื่องจาก  $\text{NO}_2^-$  ไม่เสถียร ส่วน  $\text{NO}_3^-$  อาจมีจุลินทรีย์อื่นนำไปใช้ จึงไม่ควรที่จะเก็บตัวอย่างสำหรับวิเคราะห์ด้วยเครื่องไอออนโครมาโทกราฟีนานเกิน 48 ชั่วโมงโดยมีทางแก้ปัญหาคือ การเติม  $\text{H}_2\text{O}_2$  ก่อนการนำสารตัวอย่างไปวิเคราะห์ จากสมการ 4.4 พบว่า  $\text{H}_2\text{O}_2$  ช่วยเปลี่ยนรูปแบบการเกิดปฏิกิริยาของไนโตรเจนกลายเป็นกรดไนตริกได้ ซึ่งเมื่อนำไปวิเคราะห์สารตัวอย่างด้วยเครื่องไอออนโครมาโทกราฟีจะสามารถเห็นได้ชัดเจนยิ่งขึ้น



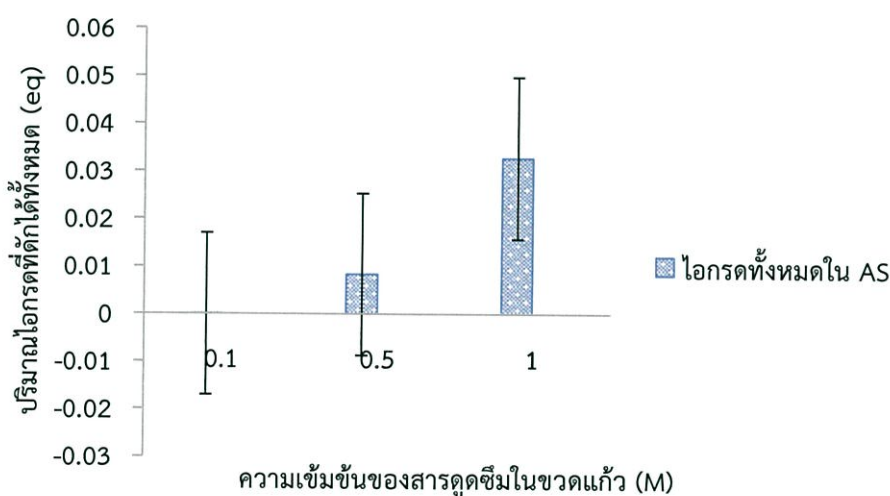
การเกิดการรบกวนของพีคของตัวชะในผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่องไอออนโครมาโทกราฟี อันเนื่องมาจาก สารดูดซึมที่ใช้เก็บตัวอย่างอากาศ เป็นชนิดเดียวกับตัวชะในเครื่องไอออนโครมาโทกราฟี และในสารดูดซึมที่ผ่านการเก็บอากาศยังมีคาร์บอนตลวงเหลืออยู่ จึงทำให้หลังจากเก็บอากาศควรนำสารดูดซึมทั้งในขวดแก้ว และ Impinger มาไทเทรตด้วยกรด  $\text{HCl}$  จากสมการ (4.5) และ (4.6) พบว่าการไทเทรตด้วยกรดจะสามารถช่วยไล่ คาร์บอนตลวง ไบคาร์บอนตลวงหายไปตามหมด ไม่ทำให้เกิดการรบกวนในการวิเคราะห์



ในขณะที่ทำการเก็บอากาศไม่ได้กำหนดระยะเวลาในการเก็บอากาศให้เท่ากัน อาศัยเพียงแค่การสังเกตการณ์เปลี่ยนสีของอินดิเคเตอร์ในขวดแก้วที่ 2 ซึ่งไม่เหมาะสม จึงส่งผลให้ไม่สามารถทราบได้ว่าที่ความเข้มข้นไหนของสารดูดซึ่มสามารถดักจับไอกรดไว้ได้มากกว่า ที่ความเข้มข้นไหนสามารถรองรับปริมาณไอกรดได้เยอะกว่ากัน ทราบเพียงประสิทธิภาพของชุดอุปกรณ์ดักจับไอกรดที่ระยะเวลานั้นๆที่สีของอินดิเคเตอร์เปลี่ยน เนื่องจากหากเราทราบความเข้มข้นของสารดูดซึ่มก็จะสามารถเตรียมสารดูดซึ่ม ให้มีความเข้มข้นน้อยลงกว่าเดิม จะช่วยประหยัดในการใช้สารเคมี

#### 4.1 ผลการศึกษาความเข้มข้นของสารดูดซึ่มต่อประสิทธิภาพของอุปกรณ์ดักจับไอกรด

การวิเคราะห์หาปริมาณไอกรด จากความเข้มข้นของสารดูดซึ่มต่อประสิทธิภาพอุปกรณ์ดักจับไอกรดมีผลต่อชุดอุปกรณ์ดักจับไอกรด ดังรูปที่ 4.1 ที่ความเข้มข้นของสารดูดซึ่ม 1 M สามารถดักจับไอกรดไว้ในขวดแก้วได้มากที่สุด รองลงมาคือ สารดูดซึ่มความเข้มข้นที่ 0.5 และ 0.1 M ตามลำดับ โดยเทียบจากการย่อยตัวอย่างน้ำเสียแหล่งกำเนิดไอกรด ที่ 1 ฟลอสก์ ความเข้มข้นที่มากขึ้นของสารดูดซึ่ม หรือสารละลายแต่ละความเข้มข้น สามารถรองรับปริมาณไอกรดที่เข้ามาจากอากาศได้มากขึ้น จึงทำให้ปริมาณไอกรดที่วิเคราะห์ในขวดแก้วมีมากขึ้น

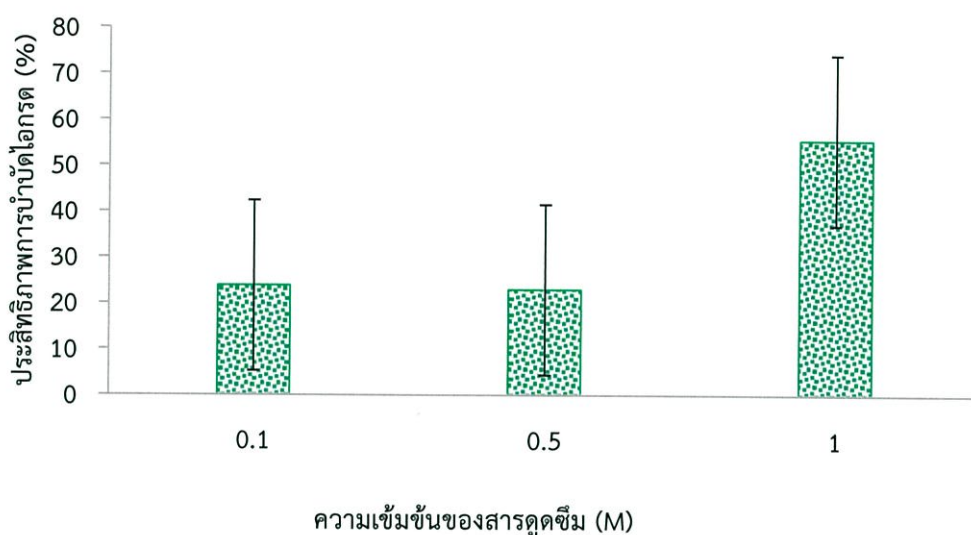


รูปที่ 4.1 ปริมาณไอกรดที่ดักได้ทั้งหมด(AS) ต่อความเข้มข้นของสารดูดซึ่ม

จากรูปที่ 4.1 พบว่า ค่า SD ของปริมาณไอกรดมีค่าต่างกันมากเพราะมีความผันผวนของไอกรดที่ถูกจับไว้โดยที่แต่ละความเข้มข้นที่ 0.1, 0.5 และ 1 M ใช้เวลาในการเก็บอากาศ 19, 146 และ 21 นาทีตามลำดับ เนื่องจากในขณะที่ทำการทดลองเก็บอากาศ ไม่กำหนดระยะเวลาในการเก็บที่คงที่สังเกตจากการเปลี่ยนสีอินดิเคเตอร์จึงทำในระยะเวลาในการเก็บมีระยะเวลาที่นานไม่เท่ากัน ดังนั้น

กำหนดเวลาที่ไม่ง่ที่ ไม่สามารถนำผลมาเปรียบเทียบผลของความเข้มข้นต่อการดักไ้กรดได้ ทำได้เพียงตรวจสอบหาประสิทธิภาพของชุดอุปกรณ์เพียงอย่างเดียว

ส่วนปริมาณไ้กรดที่ดักได้ทั้งหมดในอิมฟิงเจอร์ หรือ ชุด IM ทำการทดลองโดยทำการแปรค่าความเข้มข้นของสารดูดซึ้ในชุด IM และ ชุดอุปกรณ์ดักจับไ้กรด ของความเข้มข้น 0.1 M ซึ่งผลการทดลองค่าปริมาณไ้กรดไม่เกินมาตรฐานที่  $1 \text{ mg/m}^3$  ขณะที่ 0.5 และ 1 M มีค่าปริมาณไ้กรดเกินมาตรฐานที่เยอะเกิน เนื่องจากมาจากความเข้มข้นของสารละลาย สารดูดซึ้ในชุดเทียบอากาศควรเป็นค่าความเข้มข้นที่แน่นอนโดยกำหนดให้เป็นตัวแปรที่คงที่ตลอดการทดลอง

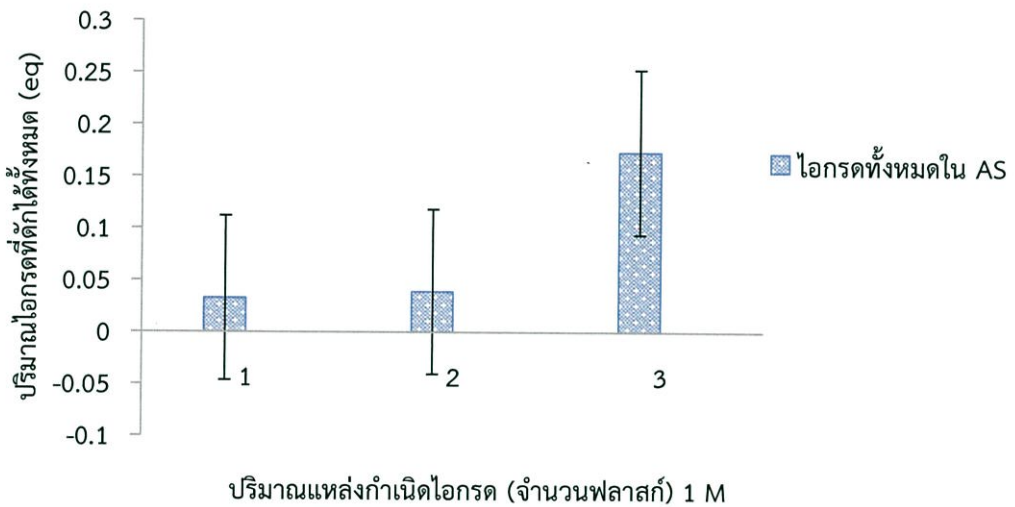


รูปที่ 4.2 ประสิทธิภาพการบำบัดไ้กรดต่อความเข้มข้นของสารดูดซึ้

จากรูปที่ 4.2 แสดงเปอร์เซ็นต์ประสิทธิภาพของชุดอุปกรณ์ดักจับไ้กรด ที่ความเข้มข้นที่ 0.1 M ใช้ระยะเวลาในการเก็บ 19 นาที แต่มีประสิทธิภาพของชุดอุปกรณ์เป็น 23.82 % (ดูรายละเอียดการคำนวณในภาคผนวก ค ตารางที่ ค-1) ที่ความเข้มข้น 0.5 M ใช้ระยะเวลาในการเก็บ 146 นาที ซึ่งนานกว่าถึง 7 เท่า แต่ประสิทธิภาพของชุดอุปกรณ์เพียง 22.93 % (ดูรายละเอียดการคำนวณในภาคผนวก ค ตารางที่ ค-2) ส่วนที่ความเข้มข้น 1 M ใช้ระยะเวลาในการเก็บ 21 นาที มีประสิทธิภาพของชุดอุปกรณ์ 55.52 % (ดูรายละเอียดการคำนวณในภาคผนวก ค ตารางที่ ค-3) ซึ่งชุดอุปกรณ์ดักจับไ้กรดไม่สามารถจับได้หมดเพราะ ที่ความเข้มข้น 0.5 M และ 1 M (จากรูปที่ 4.2) พบว่ามีค่าเกินมาตรฐานในบรรยากาศแม้ว่าความเข้มข้นสารดูดซึ้ที่ 0.5 และ 1 M ในชุดอุปกรณ์ดักจับไ้กรด จะสามารถจับไ้กรดได้ แต่ไม่สามารถดักจับไ้กรดไว้ได้หมดจึงเล็ดลอดมายังบรรยากาศ ทำให้ชุด IM สามารถดักจับไ้กรดได้เช่นกัน แสดงว่าชุดอุปกรณ์ดักจับไ้กรดนี้ ไม่มีประสิทธิภาพมากพอที่จะบำบัดไ้กรดได้

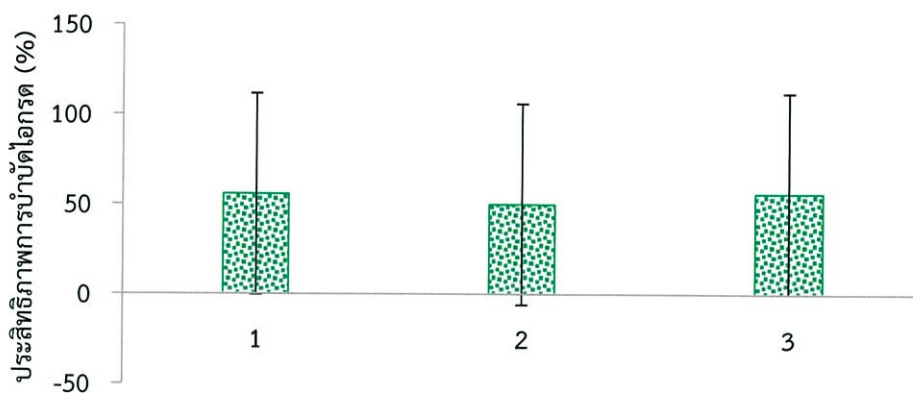
## 4.2 ผลการศึกษาแหล่งกำเนิดไอกรดต่อประสิทธิภาพของอุปกรณ์ดักจับไอกรด

จากการย่อยตัวอย่างน้ำเสีย ที่แหล่งกำเนิดไอกรดจำนวน 1, 2 และ 3 ฟลาस्क โดยจุดประสงค์ คือ การแปรค่าไอกรดจากแหล่งกำเนิดไอกรด โดยทำการทดลองที่มีความเข้มข้นของสารดูดซึ่มที่ 1 M ซึ่งมีผลต่อประสิทธิภาพของอุปกรณ์ดักจับไอกรดหรือไม่ ผลการทดลองพบว่า หากแหล่งกำเนิดไอกรดมีจำนวนฟลาस्कในการย่อยกรดมากขึ้น ความเข้มข้นกรดในชุดอุปกรณ์ดักจับไอกรดสามารถจับไอกรดได้มากขึ้นเช่นกัน ดังรูปที่ 4.3 พบว่า ที่แต่ละแหล่งกำเนิดไอกรด แม้ว่าสารดูดซึ่มจะสามารถจับไอกรดไว้ได้มากแต่เมื่อเทียบกับปริมาณไอกรดในบรรยากาศก็เก็บไว้ได้มาก อาจเป็นเพราะว่า ขณะทำการย่อยน้ำเสียได้ย่อยภายในกล่องอะคริลิก ซึ่งไม่ได้เป็นระบบปิดอย่างสมบูรณ์ อาจทำให้เกิดการแพร่ของไอกรดออกไปด้านนอกกล่องอะคริลิก เนื่องจากอุณหภูมิขณะการย่อย มีอุณหภูมิภายในกล่องอะคริลิกสูงกว่าอุณหภูมิภายในตู้ดูดควัน และเมื่อเพิ่มจำนวนฟลาस्कที่มากขึ้นทำให้เกิดการระเหยมากขึ้นอุณหภูมิภายในกล่องอะคริลิกจึงสูงขึ้น การทำการย่อยพร้อมกันทีเดียว ทำให้เกิดความเข้มข้นในบรรยากาศภายในกล่องอะคริลิกมีมากขึ้น ในขณะที่อัตราการไหลของชุดอุปกรณ์มีเท่าเดิม จึงไม่สามารถดูดไอกรดได้ทัน จึงเกิดจากแพร่ความเข้มข้นของไอกรดที่ความเข้มข้นมากสู่ความเข้มข้นน้อยที่อยู่ภายนอกกล่องอะคริลิก ฉะนั้นจึงทำชุด IM สามารถจับไอกรดไว้ได้มาก จึงทำให้เกินค่ามาตรฐานกรดในสถานที่ปฏิบัติงานที่  $1 \text{ mg/m}^3$



รูปที่ 4.3 ปริมาณไอกรดที่ดักได้ทั้งหมด (AS) ต่อแหล่งกำเนิด

จากรูปที่ 4.3 แต่ละการทดลองใช้ระยะเวลาในการเก็บอากาศไม่เท่ากัน ที่แหล่งกำเนิดที่ 1 และ 3 ฟลาस्क ใช้ระยะเวลาในการเก็บ 21, 22 และ 23 นาทีตามลำดับ ซึ่งเป็นการทดลองที่ไม่สมควร โดยที่ขณะการเก็บอากาศไม่ได้กำหนดระยะเวลาที่เท่ากันในการเก็บ เพราะที่แหล่งกำเนิดไอกรด 1 และ 2 ฟลาस्क มีปริมาณไอกรดที่ดักได้ใกล้เคียงกัน แต่ที่ 3 ฟลาस्क มีปริมาณไอกรดที่ดักได้มากกว่าประมาณ 4 เท่า (ดูรายละเอียดการคำนวณในภาคผนวก ค ตารางที่ ค-1, ค-4 และ ค-7)



ปริมาณแหล่งกำเนิดไอกรด (จำนวนพลาสติก) 1 M

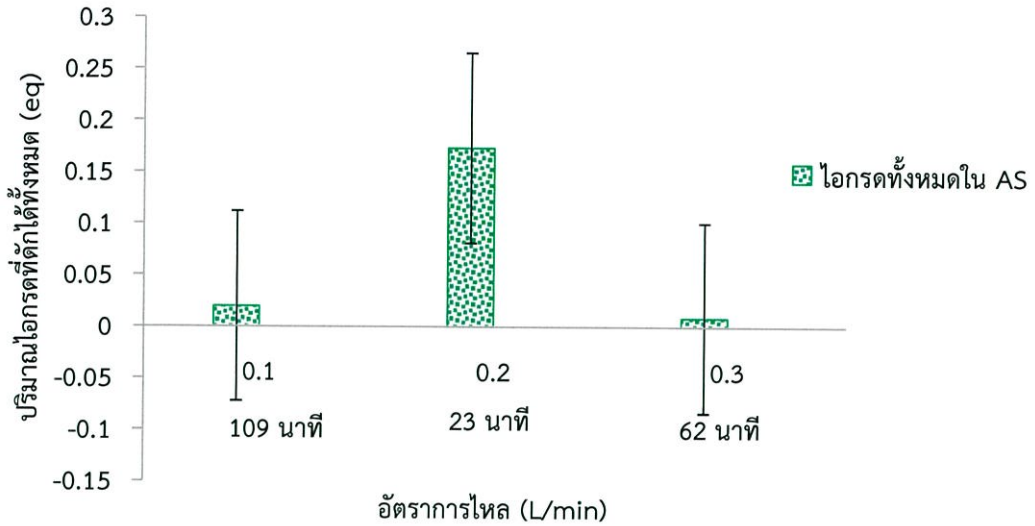
#### รูปที่ 4.4 ประสิทธิภาพการบำบัดไอกรดต่อแหล่งกำเนิด

จากรูปที่ 4.4 ประสิทธิภาพการบำบัดไอกรดทั้งแหล่งกำเนิดไอกรดที่ 1, 2 และ 3 พลาสติก มีค่าเปอร์เซ็นต์ประสิทธิภาพที่ใกล้เคียงกัน แสดงว่าการเพิ่มแหล่งกำเนิดไอกรดไม่มีผลต่อการทำงาน ชุดอุปกรณ์ดักจับไอกรดอีกทั้งยังสามารถดักจับไอกรดได้อย่างมีประสิทธิภาพที่ใกล้เคียงกัน

จากการทดสอบความแตกต่างทางสถิติด้วยการวิเคราะห์ ANOVA ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% และเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยโดยใช้ Multiple Comparison ด้วยวิธี Tukey ผลการวิเคราะห์ค่าเฉลี่ยพบว่า ปริมาณแหล่งกำเนิดไอกรดที่ 3 พลาสติก มีผลต่อประสิทธิภาพของชุด อุปกรณ์ดักจับไอกรดดีสุด และในการวิเคราะห์ทางสถิติพบว่าที่แหล่งกำเนิดไอกรดทั้งสาม ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ (ดูรายละเอียดในภาคผนวก ง ตารางที่ ง-1)

#### 4.3 การศึกษาอัตราการไหลของปั๊มที่มีผลต่ออุปกรณ์ดักจับไอกรด

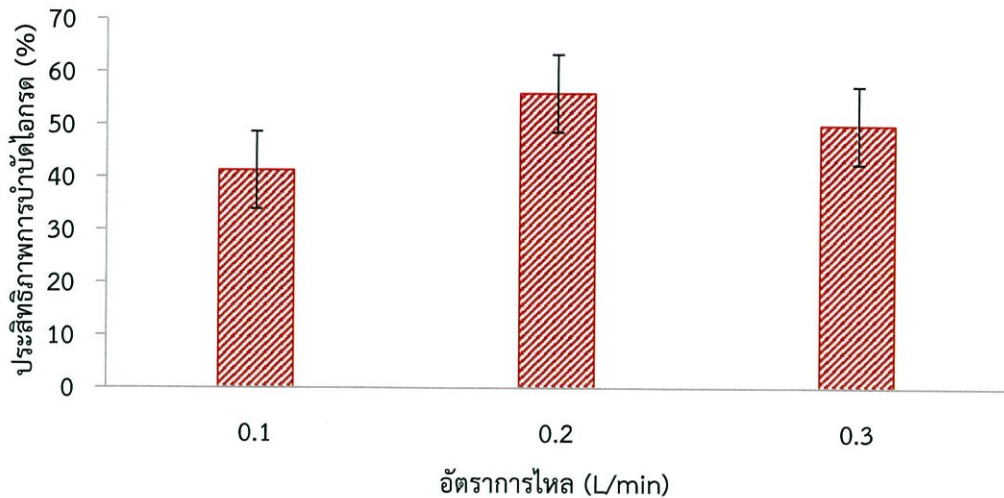
อัตราการไหลของชุดอุปกรณ์ดักจับไอกรดมีผลต่อการดักจับไอกรดของชุดอุปกรณ์หรือไม่ จุดประสงค์คือการหาอัตราการไหลที่เหมาะสมสำหรับชุดอุปกรณ์ดักจับไอกรด จึงทำการศึกษาเกี่ยวกับอัตราการไหล โดยแปรค่าอัตราการไหลของชุดอุปกรณ์ที่ 0.1, 0.2 และ 0.3 L/min โดยกำหนดความเข้มข้นของสารดูดซึมน้ำที่ 1 M และให้แหล่งกำเนิดไอกรดมีจำนวน 3 พลาสติก จากการทดลองจะสังเกตการณ์เปลี่ยนสีของอินดิเคเตอร์ในขวดแก้วที่ 2 เมื่อมีสีของอินดิเคเตอร์ที่จางลงให้หยุดการเก็บอากาศทันที



รูปที่ 4.5 ปริมาณไอกรดที่ดักได้ทั้งหมด (AS) ต่ออัตราการไหล

จากรูปที่ 4.5 ที่อัตราการไหล 0.1 L/min เป็นอัตราการไหลที่น้อยที่สุดในการเลือกทำการทดลอง มีปริมาณไอกรดที่ดักได้ทั้งหมด ที่อัตราการไหล 0.3 L/min เนื่องจากที่อัตราการไหล 0.1 L/min ไอกรดที่เข้ามายังชุดอุปกรณ์ดักจับไอกรด มีระยะเวลาให้ไอกรดที่เข้ามาเกิดปฏิกิริยากับสารดูดซึ่มในขวดแก้วที่ 1 จึงทำให้ในขวดแก้วที่ 1 เก็บไอกรดได้เยอะกว่าที่อัตราการไหล 0.3 L/min (ดูรายละเอียดการคำนวณในภาคผนวก ค ตารางที่ ค-10 และ ค-12) เมื่ออัตราการไหลของชุดอุปกรณ์ดักจับไอกรดลดลง ทำให้ชุดอุปกรณ์ดูดไอกรดได้ไม่มากพอ ส่วนระยะเวลาของการใช้อัตราการไหล 0.2 L/min พบว่ามีการดักจับไอกรดไว้ในอุปกรณ์ดักจับไอกรดได้เวลาต่ำสุด (23 นาที) ในขณะที่อัตราการไหล 0.1 L/min ต้องใช้เวลานาน (109 นาที) จึงทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสีของอินดิเคเตอร์บลอมโทมอลบลู ได้ ส่วนอัตราการไหลที่เพิ่มขึ้น 0.3 L/min ทำให้การเกิดปฏิกิริยาไม่สมบูรณ์ ต้องใช้เวลานานกว่าจึงเกิดการเปลี่ยนแปลงสีของอินดิเคเตอร์ได้

แต่ละอัตราการไหลของชุด IM สามารถดักจับไอกรดได้ แสดงว่า ที่ชุดอุปกรณ์ดักจับไอกรดไม่สามารถจับไอกรดภายในกล่องอะคริลิกได้หมด ไอกรดจึงเล็ดลอดออกมาภายนอกกล่อง แต่ที่อัตราการไหล 0.2 L/min มีค่ามากที่สุดเนื่องจากในชุดอุปกรณ์ดักจับไอกรด สามารถดักจับไอกรดได้เยอะ จึงทำให้ในชุด IM เก็บได้เยอะมากไปด้วย แต่ว่าปริมาณไอกรดที่ดักจับได้ของทุกอัตราการไหลนั้นมีค่าเกินมาตรฐานที่มากเกินไป



รูปที่ 4.6 ประสิทธิภาพการบำบัดโอโซนของอัตราการไหล

จากรูปที่ 4.6 ประสิทธิภาพของอุปกรณ์ดักจับโอโซน ที่อัตราการไหล 0.2 L/min มีประสิทธิภาพดีที่สุดเนื่องจากคิดจากชุดอุปกรณ์ดักจับโอโซนสามารถดักจับโอโซนได้เยอะ รองลงมาที่อัตราการไหล 0.3 และ 0.1 L/min ตามลำดับ

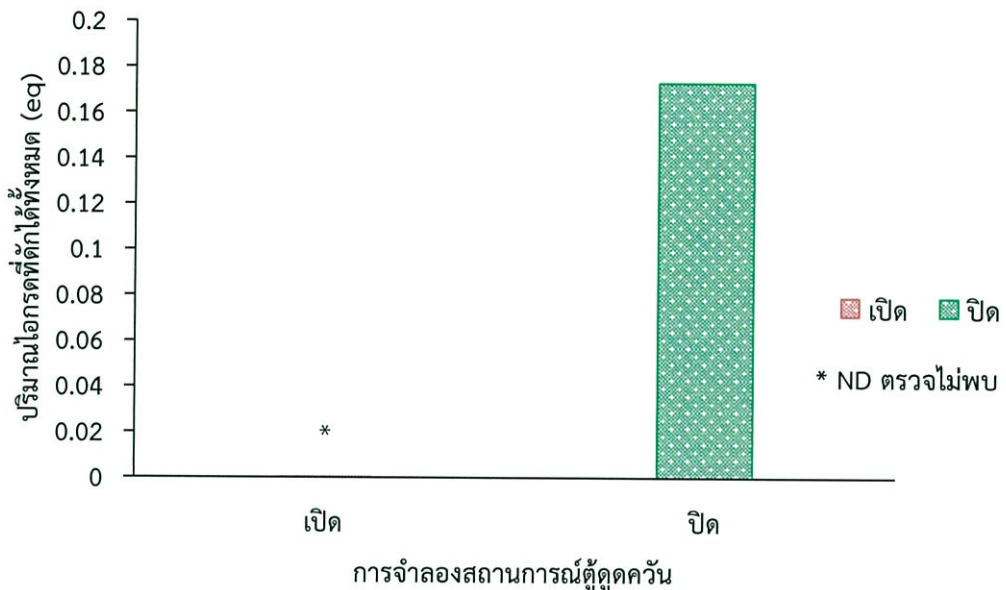
จากการทดสอบความแตกต่างทางสถิติด้วยการวิเคราะห์ ANOVA ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% และเปรียบเทียบหาความแตกต่างของค่าเฉลี่ยโดยใช้ Multiple Comparison ด้วยวิธี Tukey ผลการวิเคราะห์ค่าเฉลี่ยพบว่า ที่อัตราการไหล 0.2 L/min ดีที่สุด และในการวิเคราะห์ทางสถิติพบว่าที่อัตราการไหล 0.1 และ 0.3 L/min ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ แต่ทั้งสองแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญกับที่อัตราการไหล 0.2 L/min (ดูรายละเอียดในภาคผนวก ง ตารางที่ ง-2)

#### 4.4 ผลการศึกษาใช้ตู้ดูดควันควบคู่กับการทำงานของอุปกรณ์ดักจับโอโซน

จากการทดลองในหัวข้อ 4.1-4.3 พบว่าปริมาณโอโซนที่หลงเหลือสู่บรรยากาศในห้องปฏิบัติการมีค่าเกินมาตรฐานที่  $1 \text{ mg/m}^3$  เพื่อเป็นการป้องกันอันตรายต่อสุขภาพ และสิ่งแวดล้อม จึงควรกำจัดโอโซนจากแหล่งกำเนิดตามมาตรฐานเพื่อไม่ให้กระจายในบรรยากาศ และเกิดเป็นฝนกรด ดังนั้น จึงได้ทำการทดลองการใช้ตู้ดูดควันควบคู่กับอุปกรณ์ดักจับโอโซน แม้ว่าเปิดตู้ดูดควันในขณะที่เก็บอากาศ ปริมาณโอโซนยังสามารถเข้าสู่อุปกรณ์ได้ เนื่องจากโอโซนหลงเหลือภายในกล่องอะคริลิกไม่ได้ออกไปกับการเปิดตู้ดูดควันหมด ดังนั้น การที่มีชุดอุปกรณ์ดักจับโอโซน และเปิดตู้ดูดควันควบคู่ไปด้วย เพื่อที่ตู้ดูดควันดูดอากาศขึ้นไปเจือจางในบรรยากาศ และการอุปกรณ์ดักจับโอโซนที่ดักจับโอโซนจากแหล่งกำเนิดโดยตรง เป็นหนทางที่ดีในการบำบัดโอโซนได้ตรงจุด

จากการทดลอง ในสถานะที่แหล่งกำเนิดโอโซนจำนวน 3 ฟลasks และความเข้มข้นของสารดูดซับที่ 1 M ในสถานการณ์เปิดตู้ดูดควัน ดังรูปที่ 4.7 พบว่ามีปริมาณโอโซนเข้ามาในชุดอุปกรณ์ดักจับโอโซน เท่ากับ  $2.82 \times 10^{-4} \text{ eq}$  (ดูรายละเอียดการคำนวณในภาคผนวก ค ตารางที่ ค-13) เป็น

จำนวนที่น้อยมากๆ เนื่องจากปริมาณไอรตอาจถูกดูดไปกับตู้ดูดควัน แต่ไม่ได้ถูกดูดไปจนหมด เพราะในการย่อยน้ำเสียตัวอย่างทำภายในกล่องอะคริลิก ไอรตก็จะระเหยภายในกล่อง ส่วนในสถานการณ์ปิดตู้ดูดควันพบไอรตทั้งในชุดอุปกรณ์ดักจับไอรต และในชุด IM เป็นจำนวนมาก เนื่องจากในขณะที่มีการย่อยเกิดขึ้น ชุดอุปกรณ์ดักจับไอรตไม่สามารถจับไอรตไว้ได้หมด ไอรตที่มีความเข้มข้นสูงภายในกล่องอะคริลิกจึงแพร่ออกจากกล่องอะคริลิก เข้ามายังชุด IM ปริมาณไอรตในอากาศจึงมาก และเกินค่ามาตรฐานกรดในสถานที่ปฏิบัติงาน



รูปที่ 4.7 ปริมาณไอรตที่ดักได้ทั้งหมด (AS) ต่อการจำลองสถานการณ์ตู้ดูดควัน

ปริมาณไอรตในอากาศจากชุด IM ที่สามารถดักจับได้ที่สถานการณ์การจำลองเปิดตู้ดูดควัน ในชุด IM ไม่พบไอรตเนื่องจากขณะเปิดตู้ดูดควัน เมื่อไอรตที่เล็ดลอดออกจากกล่องอะคริลิกก็จะถูกดูดโดยตู้ดูดควันทันที จึงไม่สามารถที่จะดักจับไอรตไว้ได้ จึงไม่พบไอรตในชุด IM ที่สถานการณ์เปิดตู้ดูดควัน ในทางกลับกันที่สถานการณ์ปิดตู้ดูดควันกลับพบว่า มีปริมาณไอรตภายในชุดเทียบอากาศ เป็นจำนวนมาก เนื่องจากขณะทำการย่อย มีการระเหยของไอรตอยู่ภายในกล่องอะคริลิกที่ไม่เป็นระบบปิด จึงทำให้ไอรตเล็ดลอดออกจากกล่องอะคริลิก ชุดเทียบอากาศ จึงสามารถดักจับไอรตได้เยอะ บ่งบอกว่าชุดอุปกรณ์ดักจับไอรตไม่สามารถดักจับไอรตที่ระเหยออกมาได้หมด

ประสิทธิภาพของการจำลองสถานการณ์ตู้ดูดควันที่เปิดตู้ดูดควันที่ประสิทธิภาพดีกว่า เนื่องจากในชุดอุปกรณ์ดักจับไอรต จับไอรตในปริมาณที่น้อยมากๆ อีกทั้งในชุดชุด IM ก็ไม่พบไอรต และยังใช้ระยะเวลาในการเก็บอากาศถึง 231 นาที ส่วนที่สถานการณ์ปิดตู้ดูดควันมีประสิทธิภาพมากกว่า เนื่องจากไอรตไม่ได้ฟุ้งกระจายไปสู่บรรยากาศภายนอก

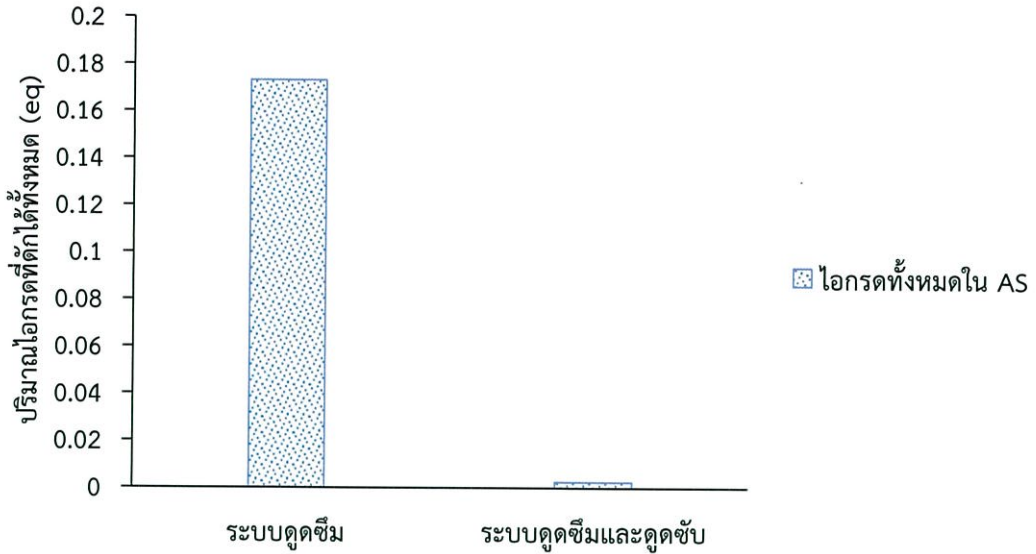
#### 4.5 ผลการดักจับไอกรดด้วยการดูดซึมและดูดซับ

จากการทดลองใช้อุปกรณ์ดักจับไอกรดควบคู่กับการเปิดตู้ดูดควันผลปรากฏว่าปริมาณไอกรดที่เหลือมีค่าน้อยกว่า ค่ามาตรฐานกรดในสถานที่ปฏิบัติงาน ซึ่งเป็นผลที่ดี แต่เนื่องจากการเปิดตู้ดูดควันทำให้ไอกรดถูกดูดออก และเจือจางกับบรรยากาศแทน อาจเกิดฝนกรดได้ จึงได้ทำการประดิษฐ์คอลัมน์ดูดซับข้างในประกอบด้วยเม็ดหินปูน ( $\text{Ca}_2\text{CO}_3$ ) ที่ได้ทำการแช่น้ำไว้เพื่อเพิ่มการเกิดปฏิกิริยาให้เป็นทั้งการดูดซับและดูดซึม เมื่อเจอกับปริมาณไอกรดที่เข้ามาจะเกิดปฏิกิริยา ดังสมการที่ 4.4 ส่วนใยสังเคราะห์ที่ชุ่มน้ำ ช่วยในการลดอุณหภูมิไอกรดที่เข้ามาจากการย่อยตัวอย่างน้ำเสียและยังเสมือนกับการเพิ่มพื้นที่ผิวในการสัมผัสกับไอกรด



ข้อดีของคอลัมน์ คือ การเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสในการเกิดปฏิกิริยากับไอกรดด้วยหินปูน ( $\text{Ca}_2\text{CO}_3$ ) ทำให้เพิ่มระบบการบำบัดไอกรดมากขึ้น แต่ข้อเสียของคอลัมน์ที่มีวัสดุหลายชนิดในนี้ส่งผลให้อัตราการไหลของชุดอุปกรณ์ดักจับไอกรดมีการเปลี่ยนแปลงและคลาดเคลื่อนได้ อาจเกิดการอุดตัน

จากการทดลอง ในสภาวะที่แหล่งกำเนิดไอกรดจำนวน 3 ฟลasks และความเข้มข้นของสารดูดซึมที่ 1 M ในสถานการณ์ปิดตู้ดูดควัน ที่มีเพียงระบบดูดซึมในชุดอุปกรณ์ดักจับไอกรด ดังรูปที่ 4.9 ที่ระบบดูดซึม ไอกรดสามารถเข้ามายังชุดอุปกรณ์ดักจับไอกรดได้ โดยไม่มีสิ่งกีดขวางได้ถึง  $1.73 \times 10^{-1}$  eq ระยะเวลาที่ใช้ในการเก็บอากาศ 23 นาที (ดูรายละเอียดการคำนวณในภาคผนวก ค ตารางที่ ค-9) ส่วนที่ระบบดูดซึมและระบบดูดซับ ในชุดอุปกรณ์ดักจับไอกรดสามารถดักจับไอกรดไว้ได้  $2.4 \times 10^{-3}$  eq (ดูรายละเอียดการคำนวณในภาคผนวก ค ตารางที่ ค-14) ซึ่งถือว่าน้อย เนื่องจากก่อนที่ไอกรดจะเข้าสู่อุปกรณ์ดักจับไอกรดได้มีคอลัมน์ที่บรรจุด้วยเม็ดหินปูนแคลเซียมคาร์บอเนต และใยสังเคราะห์ที่ชุ่มน้ำไว้ จึงทำให้ขณะที่ไอกรดเข้ามาได้เข้ามาทำปฏิกิริยากับเม็ดหินแคลเซียมคาร์บอเนตก่อนหน้านั้นแล้ว อีกทั้งใช้ระยะเวลาในการเก็บอากาศ 182 นาที ซึ่งนานกว่าระบบดูดซึมเพียงอย่างเดียวถึง 8 เท่า แต่ข้อเสียของระบบนี้ขณะที่ทำการทดลองนี้ คือ คอลัมน์ที่ใช้ไม่มีความแข็งแรง เนื่องจากทำจากขวดพลาสติกสองขวดนำมาประกอบกัน ควรจะใช้คอลัมน์ที่ทำจากแก้ว หรือพลาสติกที่ทนต่อกรด เพื่อความแข็งแรง และป้องกันไอกรดเล็ดลอดออกจากคอลัมน์ และการที่ภายในคอลัมน์บรรจุด้วยวัสดุหลายชนิด อาจทำให้เกิดการอุดตันทำให้มีผลกระทบต่ออัตราการไหลของตัวปัม



รูปที่ 4.9 ปริมาณไอกรดที่ดักได้ทั้งหมด (AS) ต่อระบบของชุดอุปกรณ์ดักจับไอกรด

ระบบดูดซึมและดูดซับของชุดเทียบอากาศ สามารถดักจับไอกรดไว้ได้ แสดงว่าไอกรดได้เคลื่อนหลุดออกจากกล่องอะคริลิก คอลัมน์และชุดอุปกรณ์ไม่สามารถดักจับไว้ได้หมด อาจเป็นเพราะขณะทำการทดลองคอลัมน์อาจเกิดการอุดตัน ทำให้ส่งผลต่ออัตราการไหลของป้อนอุปกรณ์ดักจับไอกรด ที่ไม่สามารถดูดไอกรดเข้ามายังคอลัมน์และชุดอุปกรณ์ดักจับไอกรดอย่างสม่ำเสมอ ที่ระบบดูดซึมเพียงอย่างเดียวในชุดอุปกรณ์ดักจับไอกรด พบว่าในชุด IM มีไอกรดเข้ามาเป็นจำนวนมาก เนื่องจากชุดอุปกรณ์ดักจับไอกรดไม่สามารถจับไอกรดไว้ได้หมด ไอกรดที่มีความเข้มข้นสูงภายในกล่องอะคริลิกสามารถแพร่ออกจากกล่องอะคริลิก เข้ามายังชุด IM ปริมาณไอกรดในอากาศจึงมากและเกินค่ามาตรฐานกรดในสถานที่ปฏิบัติงาน แต่ก็ถือว่าคอลัมน์ดูดซับนี้สามารถช่วยแบ่งเบาภาระของชุดอุปกรณ์ดักจับไอกรดได้เป็นอย่างดี แต่อย่างไรก็ตาม ความเข้มข้นของกรดที่เราใช้ IM ตรวจวัดพบว่ายังไม่ผ่านมาตรฐานคุณภาพอากาศความปลอดภัยในการทำงานเกี่ยวกับภาวะแวดล้อม (สารเคมี) ของประกาศกระทรวงมหาดไทย

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการวิจัย

จากการศึกษาการประดิษฐ์ชุดอุปกรณ์ดักจับไอกรด โดยจำลองการย่อยตัวอย่างน้ำเสียในห้องปฏิบัติการ พบว่าอุปกรณ์ดักจับไอกรดสามารถดักจับไอกรดในอากาศได้ สารดูดซับที่ใช้ในอุปกรณ์ดักจับไอกรด คือ สารละลาย  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  และ สารละลาย Buffer ( $\text{Na}_2\text{CO}_3 / \text{NaHCO}_3$ ) ที่ความเข้มข้น 0.1, 0.5 และ 1 M ในการย่อยน้ำตัวอย่าง ทำการย่อยน้ำเสียที่ 1, 2 และ 3 ฟลasks ย่อยที่อัตราการไหลที่ 0.1, 0.2 และ 0.3 L/min สังเกตการเปลี่ยนแปลงสีของสารละลาย จากสีน้ำเงินเป็นสีเหลืองโดยอินดิเคเตอร์ บรอมไทมอลบลู ในการหาประสิทธิภาพของอุปกรณ์ดักจับไอกรด ได้แบ่งการศึกษาออก 5 ส่วน สรุปผลการทดลองได้ดังนี้

5.1.1 การศึกษาความเข้มข้นของสารดูดซับต่อปริมาณของไอกรดในอากาศ พบว่าที่ความเข้มข้นของสารดูดซับที่ 1 M สามารถดักจับไอกรดในอากาศมากที่สุด และประสิทธิภาพการดักจับไอกรดของความเข้มข้นของสารดูดซับ 1 M มากที่สุด

5.1.2 การศึกษาแหล่งกำเนิดไอกรดต่อปริมาณของไอกรดในอากาศ พบว่า ที่การย่อยน้ำตัวอย่างจำนวน 3 ฟลasks มีปริมาณไอกรดมากที่สุด ซึ่งการย่อยน้ำตัวอย่าง 1 และ 2 ฟลasks มีค่าปริมาณไอกรดไม่แตกต่างกัน และประสิทธิภาพการดักจับไอกรดของแหล่งกำเนิดไอกรด 3 ฟลasks มากที่สุด รองลงมาคือ 2 และ 1 ฟลasks ตามลำดับ

5.1.3 การศึกษาอัตราการไหลของบับที่มีผลต่ออุปกรณ์ดักจับไอกรด พบว่าที่สภาวะเดียวกัน อัตราการไหล 0.2 L/min เป็นอัตราการไหลที่เหมาะสมของอุปกรณ์ดักจับไอกรด

5.1.4 การศึกษาใช้ที่ดูดดูดควันควบคู่กับการทำงานของอุปกรณ์ดักจับไอกรด พบว่า ที่สภาวะเดียวกันปริมาณไอกรดในอุปกรณ์ดักจับไอกรดมีไม่หลงเหลืออยู่ในชุดอุปกรณ์ เมื่อเทียบกับการไม่เปิดดูดดูดควัน

5.1.5 การดักจับไอกรดทั้งระบบดูดซับและดูดซับ ประสิทธิภาพดีกว่าระบบดูดซับอย่างเดียว แต่ยังไม่ผ่านมาตรฐานคุณภาพอากาศความปลอดภัยในการทำงาน  $1 \text{ mg/m}^3$

#### 5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 วัสดุในการทำคอลัมน์ดูดซับ ควรประดิษฐ์โดยใช้วัสดุที่มีคุณภาพดี เช่น หลอดแก้ว หลอดพลาสติกที่แข็งแรง

5.2.2 ควรตรวจสอบปริมาณไอกรดที่อยู่ในชุดของคอลัมน์ดูดซับ

5.2.3 ต้องกำหนดเวลาการบำบัดในการเปรียบเทียบให้คงที่

## เอกสารอ้างอิง

กรมควบคุมมลพิษ กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม. 2549. การดูดซับด้วยผงถ่านกัมมันต์.

[Online]. Available : <http://tamagozilla.blogspot.com/2012/04/freundlich-mo-memoir-monday-16-april.html> เข้าถึงเมื่อ 22 มีนาคม 2559

กรมควบคุมมลพิษ กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม. 2549. การออกแบบระบบสครับบิง.

[Online]. Available : [http://www.pcd.go.th/info\\_serv/Datasmell/design\\_scrubing.htm](http://www.pcd.go.th/info_serv/Datasmell/design_scrubing.htm) เข้าถึงเมื่อ 12 มีนาคม 2559

เกศรินทร์ เพ็ชรรัตน์ ดวงรัตน์ แซ่ตั้ง และ ดวงกลม ตั้งสถิตพร. 2557. กรดซิตริก.

[Online]. Available : [repository.rmutp.ac.th/bitstream/handle/123456789/1513/](http://repository.rmutp.ac.th/bitstream/handle/123456789/1513/) เข้าถึงเมื่อ 12 มีนาคม 2559

บริษัท ไทยโพลีเคมีคอล จำกัด. 2554. กรดอะซิติก.

[Online]. Available : <http://thaipolychemicals.weebly.com/acetic-acid.html> เข้าถึงเมื่อ 4 พฤษภาคม 2559

บริษัท รุ่งพัฒนา อิมพอร์ต เอ็กซ์พอร์ต จำกัด. 2557. ซิลิกาเจล.

[Online]. Available : <http://tamagozilla.blogspot.com/2012/04/freundlich-mo-memoir-monday-16-april.html> เข้าถึงเมื่อ 8 พฤษภาคม 2559

ปิยาพร น้อยพล. 2555. สารชีวโมเลกุล.

[Online]. Available : <http://cheevamolecules.blogspot.com/> เข้าถึงเมื่อ 8 พฤษภาคม 2559

ประกาศกระทรวงมหาดไทย. 2520. ความปลอดภัยในการทำงานเกี่ยวกับภาวะแวดล้อม (สารเคมี).

[Online]. Available : <http://203.157.80.2/replyImages/20131218133746181.pdf> เข้าถึงเมื่อ 1 พฤษภาคม 2559

พิมพ์เพ็ญ พรเฉลิมพงศ์ เกียรติคุณ รัตนาปนนท์ และ นิธิยา รัตนาปนนท์. 2555. กรดคาร์บอนิก.

[Online]. Available : <http://www.foodnetworksolution.com/wiki/word/2235/> เข้าถึง เมื่อ 8 พฤษภาคม 2559

วาดศิลป์ ดินปั้น อคะเดมี. 2555. กรดไนตริก.

[Online]. Available : <http://www.wadsin.webuda.com/nitric.htm> เข้าถึงเมื่อ 10 กุมภาพันธ์ 2559

วิกิพีเดีย สารานุกรมเสรี. 2557. กรดคลอริก.

[Online]. Available : <https://th.wikipedia.org/wiki/> เข้าถึงเมื่อ 10 กุมภาพันธ์ 2559

วิกิพีเดีย สารานุกรมเสรี. 2557. กรดไฮโดรฟลูออริก.

[Online]. Available : <https://th.wikipedia.org/wiki/> เข้าถึงเมื่อ 10 กุมภาพันธ์ 2559

วิกิพีเดีย สารานุกรมเสรี. 2558. กรดซัลฟิวริก.

[Online]. Available : <https://th.wikipedia.org/wiki/> เข้าถึงเมื่อ 10 กุมภาพันธ์ 2559

วิกิพีเดีย สารานุกรมเสรี. 2558. กรดไฮโดรคลอริก.

[Online]. Available : <https://th.wikipedia.org/wiki/> เข้าถึงเมื่อ 10 กุมภาพันธ์ 2559

วิกิพีเดีย สารานุกรมเสรี. 2559. กรดไฮโดรไซยานิก.

[Online]. Available :

<https://th.wikipedia.org/wiki/%E0%B9%84%E0%B8%8B%E0%B8%A2%E0%B8%B2%E0%B9%84%E0%B8%99%E0%B8%94%E0%B9%8C> เข้าถึงเมื่อ 10 กุมภาพันธ์ 2559

วิกิพีเดีย สารานุกรมเสรี. 2559. วิตามินซี.

[Online]. Available : <https://th.wikipedia.org/wiki/> เข้าถึงเมื่อ 10 กุมภาพันธ์ 2559

วิชัย พริ้งมาตี. 2551. นิยามของกรดและเบส.

[Online]. Available : <http://vichakarn.triamudom.ac.th/comtech/studentproject> เข้าถึงเมื่อ เข้าถึงเมื่อ 10 กุมภาพันธ์ 2559

ศูนย์วิจัยและอบรมด้านสิ่งแวดล้อม 2551. สถานการณ์สารประกอบอินทรีย์ระเหยง่ายในบรรยากาศ บริเวณพื้นที่กรุงเทพมหานคร.

[Online]. Available :

[http://www.ertc.deqp.go.th/ertc/index.php?option=com\\_content&task=view&id=810&Itemid=77](http://www.ertc.deqp.go.th/ertc/index.php?option=com_content&task=view&id=810&Itemid=77) เข้าถึงเมื่อ 17 มีนาคม 2559

สมเกียรติ มณีรัตน์พันธ์ และ ธนันพร เกตุสุริยา. 2553. การเปรียบเทียบค่าที่เป็นกรดของน้ำฝนในบริเวณ ตำบลเนินพระ ตำบลตำบลเนินเชิง และตำบลปากน้ำ จังหวัดระยอง.

[Online]. Available : <http://globethailand.ipst.ac.th/> เข้าถึงเมื่อ 1 พฤษภาคม 2559

โอบใจดี. 2554. ประเภทของสารละลายกรด.

[Online]. Available : [http://wajeenant.blogspot.com/2011/04/blog-post\\_529.html](http://wajeenant.blogspot.com/2011/04/blog-post_529.html) เข้าถึงเมื่อ 8 เข้าถึงเมื่อ 17 กุมภาพันธ์ 2559

ทฤษฎีการดูดซับ.

[Online]. Available : <http://www.siamchemi.com/> เข้าถึงเมื่อ 10 กุมภาพันธ์ 2559

Aquatoyou. 2557. การหาออกซิเจนที่ละลายในน้ำ.

[Online]. Available : <http://www.aquatoyou.com/index.php/2013-05-16-04-06-08/865-dissolved-oxygen> เข้าถึงเมื่อ 26 มิถุนายน 2559

B.C. Meikep, G. Kundu, M.N. Biswas. 2001. "Modeling of a novel multi-stage bubble column scrubber for flue gas desulfurization." *Chemical Engineering Journal* 86. 2002 : 331-342 เข้าถึงเมื่อ 26 เมษายน 2559

James P. Lodge, Jr. 1998. *Method of Air Sampling and Analysis*. United States of America : CRC Press LLC. เข้าถึงเมื่อ 26 เมษายน 2559

IL Mahidol. 2550. การเปลี่ยนสีของอินดิเคเตอร์.

[Online]. Available : <http://www.il.mahidol.ac.th/e-media/acid-base/C8.HTM> เข้าถึงเมื่อ 23 มีนาคม 2559

Mo Memori. 2555. ทฤษฎีการดูดซับ.

[Online]. Available : <http://tamagozilla.blogspot.com/2012/04/freundlich-mo-memoir-monday-16-april.html> เข้าถึงเมื่อ 23 มีนาคม 2559

Pao-Chi Chen, Welly Shi, Ruby Du, Vanessa Chen. 2013. "Crystallization kinetics of barium carbonate ceystals in a lab-scale bibble-columm scrubber." *Journal of the Taiwan Institute of chemical Engineers*. 2014 : 2418-2426. เข้าถึงเมื่อ 29 มีนาคม 2559

Robert J. Chironna. 2011. *Wet scrubbing of acidic gases*.

[Online]. Available : [www.apcmag.net](http://www.apcmag.net) เข้าถึงเมื่อ 4 เมษายน 2559

Robert J. Chironna. 2011. Wet scrubbing of acidic gases.

[Online]. Available : [www.apcmag.net](http://www.apcmag.net) เข้าถึงเมื่อ 4 เมษายน 2559

ภาคผนวก

## ภาคผนวก ก

### ตัวอย่างการคำนวณ

การคำนวณหาประสิทธิภาพการบำบัดไอกรดของความเข้มข้น 0.1 M แหล่งกำเนิด 1 ฟลากลัก

#### 1. การหาอัตราการไหลของป้อนเก็บอากาศ (mL/min)

กำหนด A : ปริมาตรวัดที่จับเวลาสุดท้าย 450 mL

B : ปริมาตรวัดที่จับเวลาเริ่มต้น 50 mL

C : เวลาที่จับ (sec) = 115.53 sec.

$$= \frac{A-B}{C} \times 60$$

$$= \frac{450 \text{ (mL)} - 50 \text{ (mL)}}{115.53 \text{ (sec)}} \times \frac{60 \text{ (sec)}}{1 \text{ (min)}}$$

$$= 207.74 \text{ mL/min}$$

#### 2. การหาอุณหภูมิ (K)

T : อุณหภูมิที่วัดได้ 35°C

$$K = 273.15 + ^\circ\text{C}$$

$$= 273.15 + T \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$= 273.15 + 35 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$= 308.15 \text{ K}$$

### 3. การหาความดัน (P)

$$P : \text{ความดันที่วัดได้ (hPa)} = 1012.7 \text{ hPa}$$

$$= P(\text{hPa}) \times \frac{1 \text{ (atm)}}{1013.25 \text{ (hPa)}} = 1012.7 \text{ hPa} \times \frac{1 \text{ (atm)}}{1013.25 \text{ (hPa)}}$$

$$= 0.9995 \text{ atm}$$

### 4. การหาปริมาตรอากาศที่อุณหภูมิและความดันมาตรฐาน (Vair STP)

$$P : \text{ความดัน (atm)} = 0.9995 \text{ atm}$$

$$F : \text{อัตราการไหล (mL/min)} = 207.74 \text{ mL/min}$$

$$\text{Time} : \text{เวลาที่ดักจับไอกรดได้จากการทดลอง (min)} = 19 \text{ min}$$

$$T : \text{อุณหภูมิ (K)} = 308.15 \text{ K}$$

$$T_{\text{stp}} : \text{อุณหภูมิที่มาตรฐาน (K)} = 298.15 \text{ K}$$

$$= \left( \frac{P \times F \times \text{Time}}{T} \right) \times \left( \frac{T_{\text{stp}}}{1} \right)$$

$$= \left( \frac{0.9995 \text{ (atm)} \times 207.72 \left( \frac{\text{mL}}{\text{min}} \right) \times 19 \text{ (min)}}{308.15 \text{ (K)}} \right) \times \left( \frac{298.15 \text{ (K)}}{1 \text{ (atm)}} \right) \times$$

$$\left( \frac{1 \text{ (L)}}{1000 \text{ (mL)}} \right)$$

$$= 3.82 \text{ L}$$

5. ความเข้มข้นของ  $\text{SO}_4^{2-}$  จากการตรวจวัดโดยเครื่องไอออนโครมาโตกราฟ (IC) (eq/L)

$$A : \text{ปริมาณซัลเฟตที่วัดได้จาก IC (mg/L)} = 1.620 \text{ mg/L}$$

$$B : \text{ปริมาณซัลเฟตจากการวัด IC ของสารดูดซึมก่อนทำการทดลอง (mg/L)} = 1.56 \text{ mg/L}$$

$$C : \text{น้ำหนักสมมูลของ } \text{SO}_4^{2-} = 48 \text{ g/eq}$$

$$= \frac{A-B}{C}$$

$$= \left( \frac{1.620 \left( \frac{\text{mg}}{\text{L}} \right) - 1.56 \left( \frac{\text{mg}}{\text{L}} \right)}{48 \left( \frac{\text{g}}{\text{eq}} \right)} \right) \times \left( \frac{1 \text{ (g)}}{1000 \text{ (mg)}} \right)$$

$$= 1.25 \times 10^{-6} \text{ eq/L}$$

6. การหาปริมาณไอกรดที่ตกได้ทั้งหมด (eq)

$$A : \text{ความเข้มข้นของ } \text{SO}_4^{2-} \text{ จากการวัด IC (eq/L)} = 1.25 \times 10^{-6} \text{ eq/L}$$

$$B : \text{ปริมาตรของสารดูดซึม (mL)} = 300 \text{ mL}$$

$$= \frac{A \times B}{1000}$$

$$= \left( \frac{1.25 \times 10^{-6} \left( \frac{\text{eq}}{\text{L}} \right) \times 300 \text{ (mL)}}{1000 \text{ (mL)}} \right)$$

$$= 3.75 \times 10^{-7} \text{ eq}$$

7. การหาความปริมาณไอกรดในอากาศ (eq/m<sup>3</sup>)

$$A : \text{ปริมาณไอกรดที่ตกได้ (eq)} = 3.75 \times 10^{-7} \text{ eq}$$

$$B : \text{ปริมาตรอากาศที่อุณหภูมิและความดันมาตรฐาน (L)} = 3.82 \text{ L}$$

$$= \frac{A}{B}$$

$$= \left( \frac{3.75 \times 10^{-7} \text{ (eq)}}{3.82 \text{ (L)}} \right) \times \left( \frac{1000 \text{ (L)}}{1 \text{ (m}^3\text{)}} \right)$$

$$= 9.82 \times 10^{-5} \text{ eq/m}^3$$

## 8. การหาประสิทธิภาพการบำบัดไอกรด (%)

ตัวอย่างการคำนวณ

$$A : \text{ปริมาณไอกรดที่ตกได้ทั้งหมดของ Na}_2\text{CO}_3 \text{ และ Buffer ใน AS (eq)} = 3.75 \times 10^{-7} \text{ eq}$$

$$B : \text{ปริมาตรไอกรดต่อพื้นที่เก็บอากาศของ Na}_2\text{CO}_3 \text{ และ Buffer ใน IM (eq)} = 6.14 \times 10^{-7} \text{ eq}$$

$$= \left( \frac{A}{(A+B)} \right) \times 100$$

$$= \left( \frac{3.75 \times 10^{-7} \text{ (eq)}}{(3.75 \times 10^{-7} \text{ (eq)} + 6.14 \times 10^{-7} \text{ (eq)})} \right) \times 100$$

$$= 37.89 \%$$

9. การหาค่าปริมาณ  $\text{H}_2\text{SO}_4$  โดยเสมือนเป็นไอกรดของ  $\text{H}_2\text{SO}_4$

$$A : \text{ปริมาตรไอกรดต่อพื้นที่เก็บอากาศของ } \text{Na}_2\text{CO}_3 \text{ และ Buffer ใน IM (eq/m}^3\text{)} = 1.16 \times 10^{-6}$$

$$B : \text{น้ำหนักสมมูล ของ } \text{H}_2\text{SO}_4 = 49 \text{ eq}$$

$$= (1.16 \times 10^{-6} \text{ eq/m}^3 \times 49) \times 1000$$

$$= 5.69 \times 10^{-2} \text{ mg/m}^3$$

10. การหาค่าปริมาณ  $\text{HNO}_3$  โดยเสมือนเป็นไอกรดของ  $\text{HNO}_3$

$$A : \text{ปริมาตรไอกรดต่อพื้นที่เก็บอากาศของ } \text{Na}_2\text{CO}_3 \text{ และ Buffer ใน IM (eq/m}^3\text{)} = 1.16 \times 10^{-6}$$

$$\text{eq/m}^3$$

$$B : \text{น้ำหนักสมมูล ของ } \text{HNO}_3 = 63.012 \text{ g}$$

$$= (1.16 \times 10^{-6} \text{ eq/m}^3 \times 63.012) \times 1000$$

$$= 7.32 \times 10^{-2} \text{ mg/m}^3$$

## ภาคผนวก ข

### ตารางแสดงมาตรฐานคุณภาพอากาศ

ตารางที่ ข-1 ความปลอดภัยในการทำงานเกี่ยวกับภาวะแวดล้อม (สารเคมี)

ลำดับที่	ชื่อสารเคมี	ปริมาณสารเคมี (mg/m <sup>3</sup> )	อ้างอิง
1	กรดกำมะถัน (Sulfuric acid)	1	ลำดับที่ 57 ตารางที่ 1 <sup>[1]</sup> ประกาศกระทรวงมหาดไทย
		1	OSHA
2	กรดไนตริก (Nitric acid)	5	ลำดับที่ 51 ตารางที่ 1 <sup>[1]</sup> ประกาศกระทรวงมหาดไทย
3	กรดน้ำส้ม (Acetic acid)	25	ลำดับที่ 25 ตารางที่ 1 <sup>[1]</sup> ประกาศกระทรวงมหาดไทย
4	คาร์บอนมอนอกไซด์ (Carbon monoxide)	55	ลำดับที่ 35 ตารางที่ 1 <sup>[1]</sup> ประกาศกระทรวงมหาดไทย
5	โซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium hydroxide)	2	ลำดับที่ 55 ตารางที่ 1 <sup>[1]</sup> ประกาศกระทรวงมหาดไทย
6	ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (Sulfur dioxide)	13	ลำดับที่ 56 ตารางที่ 1 <sup>[1]</sup> ประกาศกระทรวงมหาดไทย
7	กรดฟอสฟอริก (phosphoric acid)	1	ลำดับที่ 65 ตารางที่ 1 <sup>[1]</sup> ประกาศกระทรวงมหาดไทย
8	ไฮโดรเจนคลอไรด์ (Hydrogen chloride)	7	ลำดับที่ 14 ตารางที่ 2 ประกาศกระทรวงมหาดไทย
9	กรดโครมิก (Chromic acid)	0.1	ลำดับที่ 21 ตารางที่ 3 ประกาศกระทรวงมหาดไทย

[1] ประกาศในราชกิจจานุเบกษา เล่ม 94 ตอนที่ 64 วันที่ 12 กรกฎาคม 2520

ภาคผนวก ค  
ข้อมูลจากการวัดโดยเครื่องไอออนโครมาโทกราฟ

ตารางที่ ค-1 ข้อมูลแหล่งกำเนิด 1 ฟลาสก์ ความเข้มข้น 0.1 M

Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> (ก่อน) 0.1 M 1 ฟลาสก์ มี SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	1.560	mg/L <sup>[1]</sup>
Buffer (ก่อน) 0.1 M 1 ฟลาสก์ มี SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	2.320	mg/L
อัตราการไหลของปั๊ม AS	207.74	mL/min
อัตราการไหลของปั๊ม IM	483.37	mL/min
ปริมาตรตู้ดูดควัน	0.5292	m <sup>3</sup>
ความดัน	0.9995	atm
อุณหภูมิ	308.15	K
เวลาที่ดัก	19	min
V <sub>air</sub> (AS)	300	mL
V <sub>air</sub> (IM)	15	mL

	ครั้งที่	V <sub>air</sub> STP (L)	[SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> ] จาก IC (mg/L)	[SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> ] จาก IC (eq/L) x 10 <sup>-6</sup>
Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> (หลัง) หลัง AS 1 ฟลาสก์	1	3.82	1.62	1.25
	2	3.82	1.61	1.13
	3	3.82	1.71	3.15
Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> (หลัง) หลัง IM 1 ฟลาสก์	1	8.88	1.59	0.62
	2	8.88	1.72	3.50
	3	8.88	1.15	-
Buffer (หลัง) หลัง AS 1 ฟลาสก์	1	3.82	2.59	5.71
	2	3.82	0.00	0.00
	3	3.82	0.00	-
Buffer (หลัง) หลัง IM 1 ฟลาสก์	1	8.88	2.32	0.06
	2	8.88	2.30	-
	3	8.88	7.30	-

[1] การหาปริมาณของ SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> จาก IC

	ครั้งที่	ปริมาณไอกรด ทั้ง 2 ขวด (eq/L) $\times 10^{-6}$	ปริมาณไอกรด ที่ตกได้ทั้งหมด (eq) $\times 10^{-7}$	ปริมาตรไอกรด ในอากาศ (eq/m <sup>3</sup> ) $\times 10^{-5}$	ปริมาตรไอกรดต่อ พื้นที่เก็บอากาศ (eq) $\times 10^{-6}$	ประสิทธิภาพ การบำบัดไอกรด (%)	เสมือนว่าเป็นไอกรดของ H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (mg/m <sup>3</sup> ) $\times 10^{-1}$
AS	1	1.25	3.75	9.82		37.90	-
	2	1.13	3.38	8.84	-	9.73	-
	3	3.15	9.44	0.24	-	-	-
	เฉลี่ย		5.52	0.15	-	28.81	-
IM	1	0.68	0.10	0.01	0.06	-	0.57
	2	3.50	0.53	0.06	3.13	-	2.90
	3	-	-	-	-	-	-
	เฉลี่ย	-	0.31	0.04	1.87	-	1.73

ตารางที่ ค-2 ข้อมูลแหล่งกำเนิด 1 ฟลasks ความเข้มข้น 0.5 M

Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> (ก่อน) 0.5 M 1 ฟลask มี SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	36886.50	mg/L <sup>[1]</sup>
Buffer (ก่อน) 0.5 M 1 ฟลask มี SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	36735.50	mg/L
อัตราการไหลของปั๊ม AS	207.74	mL/min
อัตราการไหลของปั๊ม IM	429.82	mL/min
ปริมาตรตู้ดูดควัน	0.5292	m <sup>3</sup>
ความดัน	0.9970	atm
อุณหภูมิ	308.15	K
เวลาที่ตัด	146	min
V <sub>air</sub> (AS)	300	mL
V <sub>air</sub> (IM)	15	mL

	ครั้งที่	V <sub>air</sub> STP (L)	[SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> ] จาก IC (mg/L)	[SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> ] จาก IC (eq/L) x 10 <sup>-2</sup>
Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> (หลัง) หลัง AS 1 ฟลask	1	28.63	39676.36	5.81
	2	28.63	37072.59	0.39
	3	28.63	35988.70	-
Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> (หลัง) หลัง IM 1 ฟลask	1	15.36	36223.49	-
	2	15.36	37758.35	1.82
	3	15.36	35851.78	-
Buffer (หลัง) หลัง AS 1 ฟลask	1	28.63	18688.085	-
	2	28.63	36894.262	0.33
	3	28.63	37569.547	1.74
Buffer (หลัง) หลัง IM 1 ฟลask	1	15.36	41072.625	9.04
	2	15.36	17255.613	-
	3	15.36	35950.381	-

[1] การหาปริมาณของ SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> จาก IC

	ครั้งที่	ปริมาณไอกรดทั้ง 2 ขวด (eq/L) × 10 <sup>-2</sup>	ปริมาณไอกรดที่ตก ได้ทั้งหมด (eq) × 10 <sup>-3</sup>	ปริมาตรไอกรด ในอากาศ (eq/m <sup>3</sup> ) × 10 <sup>-2</sup>	ปริมาตรไอกรดต่อ พื้นที่เก็บอากาศ (eq) × 10 <sup>-2</sup>	ประสิทธิภาพ การบำบัดไอกรด (%)	เสมือนว่าเป็นไอกรดของ H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (mg/m <sup>3</sup> ) × 10 <sup>+3</sup>
AS	1	5.81	17.43	60.91	-	27.18	-
	2	0.72	2.16	7.53	-	18.67	-
	3	1.74	5.21	18.21	-	-	-
	เฉลี่ย	-	8.27	28.88	-	22.93	-
IM	1	9.04	1.36	8.83	4.67	-	4.32
	2	1.82	0.27	1.77	0.94	-	0.87
	3	-	-	-	-	-	-
	เฉลี่ย	-	0.81	5.33	2.80	-	2.60

ตารางที่ ค-3 ข้อมูลแหล่งกำเนิด 1 ฟลาสก์ ความเข้มข้น 1.0 M

Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> (ก่อน) 1 M 1 ฟลาสก์ มี SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	39683.47	mg/L <sup>[1]</sup>
Buffer (ก่อน) 1 M 1 ฟลาสก์ มี SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	38739.59	mg/L
อัตราการไหลของปั๊ม AS	207.74	mL/min
อัตราการไหลของปั๊ม IM	483.37	mL/min
ปริมาตรตู้ดูดควัน	0.5292	m <sup>3</sup>
ความดัน	0.9980	atm
อุณหภูมิ	307.15	K
เวลาที่ตก	21	min
V <sub>air</sub> (AS)	300	mL
V <sub>air</sub> (IM)	15	mL

	ครั้งที่	V <sub>air</sub> STP (L)	[SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> ] จาก IC (mg/L)	[SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> ] จาก IC (eq/L) × 10 <sup>-2</sup>
Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> (หลัง) หลัง AS 1 ฟลาสก์	1	4.23	42335.35	5.52
	2	4.23	44227.72	9.47
	3	4.23	43837.86	8.65
Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> (หลัง) หลัง IM 1 ฟลาสก์	1	9.83	39573.91	-
	2	9.83	40361.53	1.41
	3	9.83	40617.41	1.95
Buffer (หลัง) หลัง AS 1 ฟลาสก์	1	4.23	38749.91	0.02
	2	4.23	42361.82	7.55
	3	4.23	39453.36	1.49
Buffer (หลัง) หลัง IM 1 ฟลาสก์	1	9.83	38903.18	-
	2	9.83	41757.59	6.29
	3	9.83	43602.78	10.13

[1] การหาปริมาณของ SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> จาก IC

	ครั้งที่	ปริมาณไอกรด ทั้ง 2 ขวด (eq/L) $\times 10^{-2}$	ปริมาณไอกรดที่ตกได้ ทั้งหมด (eq) $\times 10^{-2}$	ปริมาตรไอกรด ในอากาศ (eq/m <sup>3</sup> )	ปริมาตรไอกรดต่อ พื้นที่เก็บอากาศ (eq) $\times 10^{-2}$	ประสิทธิภาพ การบำบัดไอกรด (%)	เสมือนว่าเป็นไอกรดของ H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (mg/m <sup>3</sup> ) $\times 10^{+3}$
AS	1	5.55	1.66	3.94	-	-	-
	2	17.01	5.10	12.08	-	45.10	-
	3	10.14	3.04	7.20	-	65.95	-
	เฉลี่ย	-	3.27	7.74	-	55.55	-
IM	1	-	-	-	-	-	-
	2	7.70	0.12	0.11	6.22	-	5.76
	3	1.95	0.03	0.03	1.57	-	1.45
	เฉลี่ย	-	0.07	0.07	2.60	-	3.60

ตารางที่ ค-4 ข้อมูลแหล่งกำเนิด 2 ฟลask ความเข้มข้น 0.1 M

Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> (ก่อน) 0.1 M·2 ฟลask มี SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	1.56	mg/L <sup>[1]</sup>
Buffer (ก่อน) 0.1 M 2 ฟลask มี SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	2.32	mg/L
อัตราการไหลของปั๊ม AS	207.74	mL/min
อัตราการไหลของปั๊ม IM	483.37	mL/min
ปริมาตรตู้ดูดควัน	0.5292	m <sup>3</sup>
ความดัน	0.9995	atm
อุณหภูมิ	310.15	K
เวลาที่ตัก	156	min
V <sub>air</sub> (AS)	300	mL
V <sub>air</sub> (IM)	15	mL

	ครั้งที่	V <sub>air</sub> STP (L)	[SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> ] จาก IC (mg/L)	[SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> ] จาก IC (eq/L) x10 <sup>-6</sup>
Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> (หลัง) หลัง AS 2 ฟลask	1	31.07	1.64	1.69
	2	31.07	0.00	0.00
	3	31.07	1.73	3.60
Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> (หลัง) หลัง IM 2 ฟลask	1	72.30	1.77	4.40
	2	72.30	0.00	0.00
	3	72.30	1.85	6.13
Buffer (หลัง) หลัง AS 2 ฟลask	1	31.07	2.33	1.25
	2	31.07	0.00	0.00
	3	31.07	2.53	4.42
Buffer (หลัง) หลัง IM 2 ฟลask	1	72.30	2.33	2.50
	2	72.30	0.00	0.00
	3	72.30	2.43	2.33

[1] การหาปริมาณของ SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> จาก IC

	ครั้งที่	ปริมาณไอกรด ทั้ง 2 ชนิด (eq/L) $\times 10^{-6}$	ปริมาณไอกรดที่ตก ได้ทั้งหมด (eq) $\times 10^{-6}$	ปริมาตรไอกรดใน อากาศ (eq/m <sup>3</sup> ) $\times 10^{-6}$	ปริมาตรไอกรดต่อ พื้นที่เกิดอากาศ (eq) $\times 10^{-7}$	ประสิทธิภาพ การบำบัดไอกรด (%)	เสมือนว่าเป็นไอกรดของ H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (mg/m <sup>3</sup> ) $\times 10^{-2}$
AS	1	1.81	5.43	17.41	-	51.60	-
	2	-	-	-	-	-	-
	3	8.02	2.41	77.40	-	72.15	-
	เฉลี่ย	-	1.48	47.50	-	61.87	-
IM	1	4.65	0.07	0.96	5.10	-	4.72
	2	-	-	-	-	-	-
	3	8.46	0.13	1.75	9.29	--	8.60
	เฉลี่ย	-	0.10	1.36	7.19	-	55.50

ตารางที่ ค-5 ข้อมูลแหล่งกำเนิด 2 ฟลาสก์ ความเข้มข้น 0.5 M

Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> (ก่อน) 0.5 M 2 ฟลาสก์ มี SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	13,198.64	mg/L <sup>[1]</sup>
Buffer (ก่อน) 0.5 M 2 ฟลาสก์ มี SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	17,269.02	mg/L
อัตราการไหลของปั๊ม AS	207.74	mL/min
อัตราการไหลของปั๊ม IM	483.37	mL/min
ปริมาตรตู้ดูดควัน	0.5292	m <sup>3</sup>
ความดัน	0.9995	atm
อุณหภูมิ	310.15	K
เวลาที่ตัด	58	min
V <sub>air</sub> (AS)	300	mL
V <sub>air</sub> (IM)	15	mL

	ครั้งที่	V <sub>air</sub> STP (L)	[SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> ] จาก IC (mg/L)	[SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> ] จาก IC (eq/L) x 10 <sup>-1</sup>
Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> (หลัง) หลัง AS 2 ฟลาสก์	1	11.58	26301.45	2.73
	2	11.58	27414.85	2.96
	3	11.58	25268.37	2.51
Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> (หลัง) หลัง IM 2 ฟลาสก์	1	26.94	28670.74	3.22
	2	26.94	27361.32	2.95
	3	26.94	28455.38	3.17
Buffer (หลัง) หลัง AS 2 ฟลาสก์	1	11.58	22042.37	0.99
	2	11.58	24787.26	1.57
	3	11.58	28335.56	2.31
Buffer (หลัง) หลัง IM 2 ฟลาสก์	1	26.94	23711.47	1.34
	2	26.94	22634.44	1.12
	3	26.94	29250.66	2.50

[1] การหาปริมาณของ SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> จาก IC

	ครั้งที่	ปริมาณไอกรด ทั้ง 2 ขวด (eq/L) x 10 <sup>-1</sup>	ปริมาณไอกรดที่ตก ได้ทั้งหมด (eq) x 10 <sup>-1</sup>	ปริมาตรไอกรดใน อากาศ (eq/m <sup>3</sup> )	ปริมาตรไอกรดต่อ พื้นที่เก็บอากาศ (eq) x 10 <sup>-1</sup>	ประสิทธิภาพ การบำบัดไอกรด (%)	เสมือนว่าเป็นไอกรดของ H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (mg/m <sup>3</sup> ) x 10 <sup>-4</sup>
AS	1	3.72	1.12	9.65		45.36	-
	2	4.53	1.36	11.73	-	53.12	-
	3	4.82	1.45	12.49	-	46.37	-
	เฉลี่ย	-	1.31	11.29	-	48.28	-
IM	1	4.57	0.07	0.25	1.35	-	1.25
	2	4.07	0.06	0.22	1.20	-	1.11
	3	5.67	0.09	0.32	1.67	-	1.55
	เฉลี่ย	-	0.07	0.27	0.85	-	1.30

ตารางที่ ค-6 ข้อมูลแหล่งกำเนิด 2 ฟลาสก์ ความเข้มข้น 1 M

Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> (ก่อน) 1 M 2 ฟลาสก์ มี SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	40,952.40	mg/L <sup>[1]</sup>
Buffer (ก่อน) 1 M 2 ฟลาสก์ มี SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	43,030.90	mg/L
อัตราการไหลของปั๊ม AS	207.74	mL/min
อัตราการไหลของปั๊ม IM	483.37	mL/min
ปริมาตรตู้ดูดควัน	0.5292	m <sup>3</sup>
ความดัน	0.9960	atm
อุณหภูมิ	308.15	K
เวลาที่ดัก	22	min
V <sub>air</sub> (AS)	300	mL
V <sub>air</sub> (IM)	15	mL

	ครั้งที่	V <sub>air</sub> STP (L)	[SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> ] จาก IC (mg/L)	[SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> ] จาก IC (eq/L) ×10 <sup>-2</sup>
Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> (หลัง) หลัง AS 2 ฟลาสก์	1	4.30	45262.08	8.98
	2	4.30	46511.41	11.58
	3	4.30	45913.56	10.34
Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> (หลัง) หลัง IM 2 ฟลาสก์	1	10.02	42244.13	2.69
	2	10.02	41104.94	0.32
	3	10.02	42458.88	03.14
Buffer (หลัง) หลัง AS 2 ฟลาสก์	1	4.30	44454.34	-
	2	4.30	44810.03	03.71
	3	4.30	45053.00	4.21
Buffer (หลัง) หลัง IM 2 ฟลาสก์	1	10.02	43299.28	0.56
	2	10.02	46705.34	7.66
	3	10.02	43561.38	1.11

[1] การหาปริมาณของ SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> จาก IC

	ครั้งที่	ปริมาณไอกรด ทั้ง 2 ชนิด (eq/L) x 10 <sup>-2</sup>	ปริมาณไอกรดที่ตก ได้ทั้งหมด (eq) x 10 <sup>-2</sup>	ปริมาตรไอกรดใน อากาศ (eq/m <sup>3</sup> )	ปริมาตรไอกรดต่อ พื้นที่เก็บอากาศ (eq) x 10 <sup>-2</sup>	ประสิทธิภาพ การบำบัดไอกรด (%)	เสมือนว่าเป็นไอกรดของ H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (mg/m <sup>3</sup> ) x 10 <sup>+3</sup>
AS	1	8.98	2.69	6.26	-	51.11	-
	2	15.29	4.59	10.66	-	42.05	-
	3	14.55	4.36	10.15	-	56.47	-
	เฉลี่ย		3.88	9.02	-	49.88	-
IM	1	3.25	0.05	0.05	2.58	-	2.39
	2	7.97	0.12	0.12	6.32	-	5.85
	3	4.24	0.06	0.06	3.36	-	3.11
	เฉลี่ย	-	0.08	0.08	2.97	-	3.78

ตารางที่ ค-7 ข้อมูลแหล่งกำเนิด 3 ฟลาสก์ ความเข้มข้น 0.1 M

Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> (ก่อน) 0.1 M 3 ฟลาสก์ มี SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	1.56	mg/L <sup>[1]</sup>
Buffer (ก่อน) 0.1 M 3 ฟลาสก์ มี SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	2.32	mg/L
อัตราการไหลของปั๊ม AS	207.74	mL/min
อัตราการไหลของปั๊ม IM	483.37	mL/min
ปริมาตรตู้ดูดควัน	0.5292	m <sup>3</sup>
ความดัน	0.9995	atm
อุณหภูมิ	308.15	K
เวลาที่ตัด	104	min
V <sub>air</sub> (AS)	300	mL
V <sub>air</sub> (IM)	15	mL

	ครั้งที่	V <sub>air</sub> STP (L)	[SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> ] จาก IC (mg/L)	[SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> ] จาก IC (eq/L) × 10 <sup>-3</sup>
Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> (หลัง) หลัง AS 3 ฟลาสก์	1	20.09	0.00	0.00
	2	20.09	427.46	8.87
	3	20.09	231.11	4.78
Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> (หลัง) หลัง IM 3 ฟลาสก์	1	48.77	136.43	-
	2	48.77	365.92	7.59
	3	48.77	37.04	0.74
Buffer (หลัง) หลัง AS 3 ฟลาสก์	1	20.09	1.54	-
	2	20.09	801.11	12.36
	3	20.09	30.882	0
Buffer (หลัง) หลัง IM 3 ฟลาสก์	1	48.77	0.97	-
	2	48.77	855.67	13.50
	3	48.77	29.13	-

[1] การหาปริมาณของ SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> จาก IC

	ครั้งที่	ปริมาณไอกรด ทั้ง 2 ชนิด (eq/L) $\times 10^{-2}$	ปริมาณไอกรดที่ตก ได้ทั้งหมด (eq) $\times 10^{-3}$	ปริมาตรไอกรด ในอากาศ (eq/m <sup>3</sup> ) $\times 10^{-3}$	ปริมาตรไอกรดต่อ พื้นที่เก็บอากาศ (eq) $\times 10^{-4}$	ประสิทธิภาพ การบำบัดไอกรด (%)	เสมือนว่าเป็นไอกรดของ H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (mg/m <sup>3</sup> ) $\times 10^{+1}$
AS	1	-	-	-	-	-	-
	2	2.12	6.37	303.93	-	83.75	-
	3	0.48	1.43	68.45	-	92.26	-
	เฉลี่ย		3.90	124.13	-	88.01	-
IM	1	-	-	-	-	-	-
	2	2.11	0.11	2.33	12.35	-	114.40
	3	0.07	0.01	0.23	1.20	-	1.11
	เฉลี่ย	-	0.06	1.28	6.78	-	6.28

ตารางที่ ค-8 ข้อมูลแหล่งกำเนิด 3 ฟลาสก์ ความเข้มข้น 0.5 M

Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> (ก่อน) 0.5 M 3 ฟลาสก์ มี SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	13,198.634	mg/L <sup>[1]</sup>
Buffer (ก่อน) 0.5 M 3 ฟลาสก์ มี SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	17,269.02	mg/L
อัตราการไหลของปั๊ม AS	207.74	mL/min
อัตราการไหลของปั๊ม IM	483.37	mL/min
ปริมาตรตู้ดูดควัน	0.5292	m <sup>3</sup>
ความดัน	0.9960	atm
อุณหภูมิ	308.15	K
เวลาที่ดัก	60	min
V <sub>air</sub> (AS)	300	mL
V <sub>air</sub> (IM)	15	mL

	ครั้งที่	V <sub>air</sub> STP (L)	[SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> ] จาก IC (mg/L)	[SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> ] จาก IC (eq/L) x 10 <sup>-1</sup>
Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> (หลัง) หลัง AS 3 ฟลาสก์	1	12	22284.78	1.89
	2	12	23998.56	2.25
	3	12	23154.44	2.07
Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> (หลัง) หลัง IM 3 ฟลาสก์	1	27.92	24790.36	2.41
	2	27.92	25680.00	2.60
	3	27.92	25327.93	2.53
Buffer (หลัง) หลัง AS 3 ฟลาสก์	1	12	22692.26	1.13
	2	12	21304.09	0.84
	3	12	24003.72	1.40
Buffer (หลัง) หลัง IM 3 ฟลาสก์	1	27.92	21686.05	0.92
	2	27.92	22673.36	1.126
	3	27.92	21622.34	0.91

[1] การหาปริมาณของ SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> จาก IC

	ครั้งที่	ปริมาณไอกรด ทั้ง 2 ขวด (eq/L) $\times 10^{-1}$	ปริมาณไอกรดที่ตก ได้ทั้งหมด (eq) $\times 10^{-3}$	ปริมาตรไอกรด ในอากาศ (eq/m <sup>3</sup> )	ปริมาตรไอกรดต่อ พื้นที่เก็บอากาศ (eq) $\times 10^{-2}$	ประสิทธิภาพ การบำบัดไอกรด (%)	เสมือนว่าเป็นไอกรดของ H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (mg/m <sup>3</sup> ) $\times 10^{+3}$
AS	1	3.02	90.68	7.56	-	48.88	-
	2	3.09	92.72	7.73	-	46.67	-
	3	3.48	104.32	8.70	-	51.65	-
	เฉลี่ย		95.91	7.99	-	49.07	-
IM	1	0.333515	5.00	0.18	9.48	-	8.78
	2	0.372618	5.59	0.20	10.59	-	9.81
	3	0.343387	5.15	0.18	9.76	-	9.04
	เฉลี่ย	-	5.25	0.19	9.95	-	9.21

ตารางที่ ค-9 ข้อมูลแหล่งกำเนิด 3 ฟลาสก์ ความเข้มข้น 1 M

Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> (ก่อน) 1 M 3 ฟลาสก์ มี SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	40,952.40	mg/L <sup>[1]</sup>
Buffer (ก่อน) 1 M 3 ฟลาสก์ มี SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	43,030.90	mg/L
อัตราการไหลของปั๊ม AS	207.74	mL/min
อัตราการไหลของปั๊ม IM	483.37	mL/min
ปริมาตรตู้ดูดควัน	0.5292	m <sup>3</sup>
ความดัน	0.9960	atm
อุณหภูมิ	308.8	K
เวลาที่ดัก	23	min
V <sub>air</sub> (AS)	300	mL
V <sub>air</sub> (IM)	15	mL

	ครั้งที่	V <sub>air</sub> STP (L)	[SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> ] จาก IC (mg/L)	[SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> ] จาก IC (eq/L) x 10 <sup>-1</sup>
Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> (หลัง) หลัง AS 3 ฟลาสก์	1	4.53	59396.14	3.84
	2	4.53	57448.70	3.44
	3	4.53	58422.81	3.64
Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> (หลัง) หลัง IM 3 ฟลาสก์	1	10.54	48524.27	1.58
	2	10.54	49976.70	1.88
	3	10.54	48769.17	1.63
Buffer (หลัง) หลัง AS 3 ฟลาสก์	1	4.53	52892.64	2.05
	2	4.53	52702.81	2.01
	3	4.53	54105.05	2.31
Buffer (หลัง) หลัง IM 3 ฟลาสก์	1	10.54	43740.00	0.15
	2	10.54	43754.08	0.15
	3	10.54	43313.96	0.06

[1] การหาปริมาณของ SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> จาก IC

	ครั้งที่	ปริมาณไอกรด ทั้ง 2 ขวด (eq/L) $\times 10^{-1}$	ปริมาณไอกรดที่ตก ได้ทั้งหมด (eq) $\times 10^{-3}$	ปริมาตรไอกรดใน อากาศ (eq/m <sup>3</sup> )	ปริมาตรไอกรดต่อ พื้นที่เก็บอากาศ (eq) $\times 10^{-1}$	ประสิทธิภาพ การบำบัดไอกรด (%)	เสมือนว่าเป็นไอกรดของ H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (mg/m <sup>3</sup> ) $\times 10^{+4}$
AS	1	5.90	176.91	39.07	-	57.64	-
	2	5.45	163.55	36.12	-	51.66	-
	3	5.95	178.40	39.40	-	58.38	-
	เฉลี่ย	-	172.95	38.20	-	55.90	-
IM	1	1.73	2.59	0.25	1.30	-	1.20
	2	2.03	3.05	0.29	1.53	-	1.42
	3	1.69	2.53	0.24	1.27	-	1.18
	เฉลี่ย	-	2.72	0.26	1.37	-	1.27

ตารางที่ ค-10 ข้อมูลอัตราการไหล 0.1 L/min 3 ฟลasks ความเข้มข้น 1 M

Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> (ก่อน) 1 M 3 ฟลasks มี SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	38,519.37	mg/L <sup>[1]</sup>
Buffer (ก่อน) 1 M 3 ฟลasks มี SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	39,986.98	mg/L
อัตราการไหลของปั๊ม AS	110.97	mL/min
อัตราการไหลของปั๊ม IM	483.37	mL/min
ปริมาตรตู้ดูดควัน	0.5292	m <sup>3</sup>
ความดัน	0.9960	atm
อุณหภูมิ	309.5	K
เวลาที่ดัก	109	min
V <sub>air</sub> (AS)	300	mL
V <sub>air</sub> (IM)	15	mL

	ครั้งที่	V <sub>air</sub> STP (L)	[SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> ] จาก IC (mg/L)	[SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> ] จาก IC (eq/L) x 10 <sup>-2</sup>
Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> (หลัง) หลัง AS 3 ฟลasks	1	11.64	42147.59	7.56
	2	11.64	36941.29	-
	3	11.64	41130.00	5.44
Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> (หลัง) หลัง IM 3 ฟลasks	1	50.71	42486.06	8.26
	2	50.71	37175.93	-
	3	50.71	43660.00	10.71
Buffer (หลัง) หลัง AS 3 ฟลasks	1	11.64	39987.63	0.00
	2	11.64	36722.74	-
	3	11.64	40879.32	1.86
Buffer (หลัง) หลัง IM 3 ฟลasks	1	50.71	45735.29	11.98
	2	50.71	40120.89	-
	3	50.71	42154.00	4.51

[1] การหาปริมาณของ SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> จาก IC

	ครั้งที่	ปริมาณไอกรด ทั้ง 2 ชนิด (eq/L) x 10 <sup>-2</sup>	ปริมาณไอกรด ที่ตกได้ทั้งหมด (eq) x 10 <sup>-3</sup>	ปริมาตรไอกรด ในอากาศ (eq/m <sup>3</sup> )	ปริมาตรไอกรดต่อ พื้นที่เกิดอากาศ (eq) x 10 <sup>-2</sup>	ประสิทธิภาพ การบำบัดไอกรด (%)	เสมือนว่าเป็นไอกรดของ H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (mg/m <sup>3</sup> ) x 10 <sup>+3</sup>
AS	1	7.56	22.68	1.95	-	41.72	-
	2	-	-	-	-	-	-
	3	5.46	16.49	1.41	-	40.75	-
	เฉลี่ย		19.50	1.68	-	41.23	-
IM	1	20.24	3.04	0.06	3.17	-	2.93
	2	-	-	-	-	-	-
	3	15.22	2.28	0.05	2.38	-	2.21
	เฉลี่ย	-	2.66	0.05	2.78	-	2.57

ตารางที่ ค-11 ข้อมูลอัตราการไหล 0.2 L/min 3 ฟลasks ความเข้มข้น 1 M

Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> (ก่อน) 1 M 3 ฟลasks มี SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	40,952.40	mg/L <sup>[1]</sup>
Buffer (ก่อน) 1 M 3 ฟลasks มี SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	43,030.90	mg/L
อัตราการไหลของปั๊ม AS	207.74	mL/min
อัตราการไหลของปั๊ม IM	483.37	mL/min
ปริมาตรตู้ดูดควัน	0.5292	m <sup>3</sup>
ความดัน	0.9960	atm
อุณหภูมิ	308.8	K
เวลาที่ติด	23	min
V <sub>air</sub> (AS)	300	mL
V <sub>air</sub> (IM)	15	mL

	ครั้งที่	V <sub>air</sub> STP (L)	[SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> ] จาก IC (mg/L)	[SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> ] จาก IC (eq/L) × 10 <sup>-1</sup>
Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> (หลัง) หลัง AS 3 ฟลasks	1	4.53	59396.14	3.84
	2	4.53	57448.70	3.44
	3	4.53	58422.81	3.64
Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> (หลัง) หลัง IM 3 ฟลasks	1	10.54	48524.27	1.58
	2	10.54	49976.70	1.88
	3	10.54	48769.17	1.63
Buffer (หลัง) หลัง AS 3 ฟลasks	1	4.53	52892.64	2.05
	2	4.53	52702.81	2.01
	3	4.53	54105.05	2.31
Buffer (หลัง) หลัง IM 3 ฟลasks	1	10.54	43740.00	0.15
	2	10.54	43754.08	0.15
	3	10.54	43313.96	0.06

[1] การหาปริมาณของ SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> จาก IC

	ครั้งที่	ปริมาณไอกรด ทั้ง 2 ชนิด (eq/L) x 10 <sup>-1</sup>	ปริมาณไอกรดที่ตก ได้ทั้งหมด (eq) x 10 <sup>-3</sup>	ปริมาตรไอกรด ในอากาศ (eq/m <sup>3</sup> )	ปริมาตรไอกรดต่อ พื้นที่เกิดอากาศ (eq) x 10 <sup>-1</sup>	ประสิทธิภาพ การบำบัดไอกรด (%)	เสมือนว่าเป็นไอกรดของ H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (mg/m <sup>3</sup> ) x 10 <sup>+4</sup>
AS	1	5.90	176.91	39.07	-	57.64	-
	2	5.45	163.55	36.12	-	51.66	-
	3	5.95	178.40	39.40	-	58.38	-
	เฉลี่ย	-	172.95	38.20	-	55.90	-
IM	1	1.73	2.59	0.25	1.30	-	1.20
	2	2.03	3.05	0.29	1.53	-	1.42
	3	1.69	2.53	0.24	1.27	-	1.18
	เฉลี่ย	-	2.72	0.26	1.37	-	1.27

ตารางที่ ค-12 ข้อมูลอัตราการไหล 0.3 L/min 3 ฟลasks ความเข้มข้น 1 M

Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> (ก่อน) 1 M 3 ฟลasks มี SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	38519.37	mg/L <sup>[1]</sup>
Buffer (ก่อน) 1 M 3 ฟลasks มี SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	39986.98	mg/L
อัตราการไหลของปั๊ม AS	331.02	mL/min
อัตราการไหลของปั๊ม IM	483.37	mL/min
ปริมาตรตู้ดูดควัน	0.5292	m <sup>3</sup>
ความดัน	0.9960	atm
อุณหภูมิ	309.5	K
เวลาที่ดัก	62	min
V <sub>air</sub> (AS)	300	mL
V <sub>air</sub> (IM)	15	mL

	ครั้งที่	V <sub>air</sub> STP (L)	[SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> ] จาก IC (mg/L)	[SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> ] จาก IC (eq/L) × 10 <sup>-2</sup>
Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> (หลัง) หลัง AS 3 ฟลasks	1	19.80	39450.00	1.94
	2	19.80	38269.70	-
	3	19.80	38625.99	0.22
Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> (หลัง) หลัง IM 3 ฟลasks	1	28.91	38650.00	0.27
	2	28.91	39194.29	1.41
	3	28.91	37345.77	-
Buffer (หลัง) หลัง AS 3 ฟลasks	1	19.80	38630.00	-
	2	19.80	40984.45	2.08
	3	19.80	41908.75	4.00
Buffer (หลัง) หลัง IM 3 ฟลasks	1	28.91	40954.12	2.01
	2	28.91	40092.41	0.22
	3	28.91	42905.25	6.08

[1] การหาปริมาณของ SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> จาก IC

	ครั้งที่	ปริมาณไอกรด ทั้ง 2 ชนิด (eq/L) $\times 10^{-2}$	ปริมาณไอกรดที่ตก ได้ทั้งหมด (eq) $\times 10^{-4}$	ปริมาตรไอกรด ในอากาศ (eq/m <sup>3</sup> ) $\times 10^{-2}$	ปริมาตรไอกรดต่อ พื้นที่เก็บอากาศ (eq) $\times 10^{-3}$	ประสิทธิภาพ การบำบัดไอกรด (%)	เสมือนว่าเป็นไอกรดของ H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (mg/m <sup>3</sup> ) $\times 10^{+2}$
AS	1	1.94	58.16	29.38	-	48.08	-
	2	2.08	62.34	31.49	-	58.27	-
	3	4.23	126.77	64.03	-	43.16	-
	เฉลี่ย	-	82.42	41.63	-	49.84	-
IM	1	2.29	3.43	01.19	6.28	-	5.81
	2	1.63	2.43	0.84	4.46	-	4.31
	3	6.08	9.11	3.15	16.70	-	15.45
	เฉลี่ย	-	4.99	1.73	9.15	-	8.47

ตารางที่ ค-13 ข้อมูลการใช้ตู้ดูดควันร่วมกับอุปกรณ์ดักจับไอกรด ที่ 3 ฟลอสก์ ความเข้มข้น 1 M

Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> (ก่อน) 1 M 3 ฟลอสก์ มี SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	40,952.40	mg/L <sup>[1]</sup>
Buffer (ก่อน) 1 M 3 ฟลอสก์ มี SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	43,030.90	mg/L
อัตราการไหลของปั๊ม AS	207.74	mL/min
อัตราการไหลของปั๊ม IM	483.37	mL/min
ปริมาตรตู้ดูดควัน	0.5292	m <sup>3</sup>
ความดัน	0.9980	atm
อุณหภูมิ	230.7	K
เวลาที่ดัก	231	min
V <sub>air</sub> (AS)	300	mL
V <sub>air</sub> (IM)	15	mL

	ครั้งที่	V <sub>air</sub> STP (L)	[SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> ] จาก IC (mg/L)	[SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> ] จาก IC (eq/L) x 10 <sup>-3</sup>
Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> (หลัง) หลัง AS 3 ฟลอสก์	1	61.82	39649.45	0.00
	2	61.82	41087.56	2.86
	3	61.82	35918.201	0.00
Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> (หลัง) หลัง IM 3 ฟลอสก์	1	143.83	37651.94	0.00
	2	143.83	37446.83	0.00
	3	143.83	35458.98	0.00
Buffer (หลัง) หลัง AS 3 ฟลอสก์	1	61.82	38291.30	0.00
	2	61.82	38363.79	0.00
	3	61.82	37763.86	0.00
Buffer (หลัง) หลัง IM 3 ฟลอสก์	1	143.83	38902.66	0.00
	2	143.83	37809.39	0.00
	3	143.83	39874.99	0.00

[1] การหาปริมาณของ SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> จาก IC

	ครั้งที่	ปริมาณไอกรด ทั้ง 2 ขวด (eq/L) $\times 10^{-3}$	ปริมาณไอกรดที่ตก ได้ทั้งหมด (eq)	ปริมาตรไอกรด ในอากาศ (eq/m <sup>3</sup> ) $\times 10^{-3}$	ปริมาตรไอกรดต่อ พื้นที่เก็บอากาศ (eq)	ประสิทธิภาพ การบำบัดไอกรด (%)	เสมือนว่าเป็นไอกรดของ H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (mg/m <sup>3</sup> )
AS	1	0.00	0.00	0.00	-	0.00	-
	2	2.86	0.00	13.67	-	100.00	-
	3	0.00	0.00	0.00	-	0.00	-
	เฉลี่ย		0.00	4.50	-	33.33	-
IM	1	0.00	0.00	0.00	0.00	-	0.00
	2	0.00	0.00	0.00	0.00	-	0.00
	3	0.00	0.00	0.00	0.00	-	0.00
	เฉลี่ย		0.00	0.00	0.00	-	0.00

ตารางที่ ค-14 ข้อมูลการใช้ระบบดูดซับร่วมกับระดุดซึม ที่ 3 ฟลาสก์ ความเข้มข้น 1 M

Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> (ก่อน) 1 M 3 ฟลาสก์ มี SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	40,952.40	mg/L <sup>[1]</sup>
Buffer (ก่อน) 1 M 3 ฟลาสก์ มี SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	43,030.90	mg/L
อัตราการไหลของปั๊ม AS	207.74	mL/min
อัตราการไหลของปั๊ม IM	483.37	mL/min
ปริมาตรตู้ดูดควัน	0.5292	m <sup>3</sup>
ความดัน	0.9980	atm
อุณหภูมิ	308.82	K
เวลาที่ดัก	182	min
V <sub>air</sub> (AS)	300	mL
V <sub>air</sub> (IM)	15	mL

	ครั้งที่	V <sub>air</sub> STP (L)	[SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> ] จาก IC (mg/L)	[SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> ] จาก IC (eq/L) × 10 <sup>-4</sup>
Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> (หลัง) หลัง AS 3 ฟลาสก์	1	36.43	40968.10	3.27
	2	36.43	0.00	-
	3	36.43	40998.87	9.68
Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> (หลัง) หลัง IM 3 ฟลาสก์	1	84.77	44865.09	815.14
	2	84.77	0.00	-
	3	84.77	41765.10	169.31
Buffer (หลัง) หลัง AS 3 ฟลาสก์	1	36.43	43685.99	136.48
	2	36.43	0.00	-
	3	36.43	43086.10	11.68
Buffer (หลัง) หลัง IM 3 ฟลาสก์	1	84.77	44977.09	405.46
	2	84.77	0.00	-
	3	84.77	43086.24	11.53

[1] การหาปริมาณของ SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> จาก IC

	ครั้งที่	ปริมาณไอกรด ทั้ง 2 ชนิด (eq/L) $\times 10^{-3}$	ปริมาณไอกรด ที่ตกได้ทั้งหมด (eq) $\times 10^{-4}$	ปริมาตรไอกรด ในอากาศ (eq/m <sup>3</sup> ) $\times 10^{-3}$	ปริมาตรไอกรดต่อ พื้นที่เก็บอากาศ (eq) $\times 10^{-3}$	ประสิทธิภาพ การบำบัดไอกรด (%)	เสมือนว่าเป็นไอกรดของ H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (mg/m <sup>3</sup> ) $\times 10^{+3}$
AS	1	139.75	41.92	115.08	-	26.83	-
	2	-	-	-	-	-	-
	3	21.36	6.41	17.59	-	27.45	-
	เฉลี่ย	-	24.16	66.34	-	43.46	-
IM	1	122.06	18.31	0.02159951	11.43		1.06
	2	-	-	-	-		-
	3	18.08	2.71	0.00320013	1.69		0.17
	เฉลี่ย	-	10.51	0.012399	6.56		6.08

## ภาคผนวก ง

## การทดสอบทางสถิติ

ตารางที่ ง-1 ตารางเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าแต่ละซ้ำ โดยใช้ Multiple Comparison ด้วยวิธี Tukey's ของแหล่งกำเนิดไอกรด

จำนวนแหล่งกำเนิด (พลาสติก)	N	Mean	Grouping
3	3	0.17295	A
2	3	0.03881	B
1	3	0.0327	B

ระดับนัยสำคัญ 0.05

ตาราง ง-2 ตารางเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าแต่ละซ้ำ โดยใช้ Multiple Comparison ด้วยวิธี Tukey's ของอัตราการไหลชุดอุปกรณ์

อัตราการไหล (L/min)	N	Mean	Grouping
0.2	3	0.17295	A
0.1	3	0.01302	B
0.3	3	0.00824	B

ระดับนัยสำคัญ 0.05