


การถ่ายเทไอโซนจากภูมิภาคก๊าซไปยังภูมิภาคน้ำในท่อแนวระนาบ



นายกฤษฎี ลิลิตการตกุล

ศูนย์วิทยทรัพยากร

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย


ปีการศึกษา 2546

ISBN 974-17-4642-3

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

I21336684

OZONE TRANSFER FROM GAS PHASE TO AQUEOUS PHASE IN HORIZONTAL PIPE



Mr.Krit Lilitkarntakul

ศูนย์วิทยทรัพยากร

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements

For the Degree of Master of Engineering in Chemical Engineering

Department of Chemical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2003

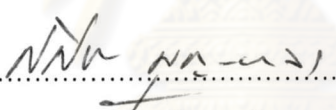
ISBN 974-17-4642-3

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การถ่ายเทไอโซนจากภูมิภาคก้ำซไปยังภูมิภาคน้ำในท่อแนวระนาบ
โดย นาย กฤษฎ์ ลิลิตการตกุล
สาขาวิชา วิศวกรรมเคมี
อาจารย์ที่ปรึกษา อาจารย์ ดร. วิทย์ สุนทรนันท์
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม อาจารย์ ดร. สมประสงค์ ศรีชัย

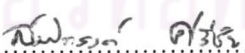
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบริหารบัณฑิต

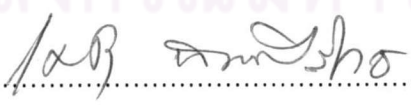

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร. ดิเรก ลาวัญศิริ)


คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


..... ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ศศิธร บุญ-หลง)


..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(อาจารย์ ดร. วิทย์ สุนทรนันท์)


..... อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม
(อาจารย์ ดร. สมประสงค์ ศรีชัย)


..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เดชา ฉัตรศิริเวช)


..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ประเสริฐ ภวสันต์)

กฤษฎี ลิลิตการตกุล : การถ่ายเทโอโซนจากวัฏภาคก๊าซไปยังวัฏภาคน้ำในท่อแนวระนาบ (OZONE TRANSFER FROM GAS PHASE TO AQUEOUS PHASE IN HORIZONTAL PIPE) อ.ที่ปรึกษา : อาจารย์ ดร. วิทย์ สุนทรนันท์, อ.ที่ปรึกษาร่วม : อาจารย์ ดร. สมประสงค์ ศรีชัย, 131 หน้า. ISBN 974-17-4642-3.

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาถึงระบบการถ่ายเทโอโซนจากวัฏภาคก๊าซไปยังวัฏภาคน้ำที่ไหลใน ทิศเดียวกันในระบบของไหล 2 วัฏภาคในท่อแนวระนาบ โดยการปรับเปลี่ยนอัตราส่วนการไหล ก๊าซต่อของเหลวรวมถึงความเข้มข้นของออกซิเจนในก๊าซตั้งต้นที่ป้อนให้เครื่องผลิตโอโซนเพื่อ เปลี่ยนแปลงรูปแบบการไหลและค่าความเข้มข้นเริ่มต้นของโอโซนในก๊าซ ผลการศึกษาพบว่าเมื่อ ใช้ก๊าซออกซิเจนเป็นก๊าซตั้งต้น รูปแบบการไหลมีผลโดยตรงต่อประสิทธิภาพในการถ่ายเทมวล ของโอโซน โดยรูปแบบการไหลแบบ plug-slug ให้ประสิทธิภาพในการถ่ายเทมวลสูงเนื่องจากมี พื้นที่ผิวสัมผัสต่อปริมาตรซึ่งช่วยส่งเสริมอัตราการถ่ายเทมวลสูงกว่ารูปแบบการไหลอื่นๆ

การเปลี่ยนก๊าซตั้งต้นที่ป้อนเข้าเครื่องผลิตโอโซนจากก๊าซออกซิเจนไปเป็นอากาศพบว่า การใช้อากาศเป็นก๊าซตั้งต้นให้ประสิทธิภาพในการถ่ายเทมวลที่ลดลงอย่างเห็นได้ชัดและไม่พบ การเปลี่ยนแปลงของอัตราการถ่ายเทมวลสารอย่างมีนัยสำคัญเมื่ออัตราส่วนก๊าซต่อของเหลว เปลี่ยนไป

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา.....วิศวกรรมเคมี.....ลายมือชื่อ นิสิต..... กฤษฎี ลิลิตการตกุล
สาขาวิชา.....วิศวกรรมเคมี.....ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....
ปีการศึกษา.....2546.....ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....

4370212621 :MAJOR CHEMICAL ENGINEERING

KEYWORD: OZONE / HORIZONTAL PIPE / TRANSFER / GAS / AQUEOUS

KRIT LILITKARNTAKUL : OZONE TRANSFER FROM GAS PHASE TO AQUEOUS PHASE IN HORIZONTAL PIPE. THESIS ADVISOR : WIT SOONTARANUN, Ph.D., THESIS COADVISOR : SOMPRASONG SRICHAJ, Ph.D., 131 pp. ISBN 974-17-4642-3.

Ozone transfer from gas to water in the co-current, horizontal, two-phase flow in pipe was investigated by varying the ratio of gas/water flow rate and oxygen concentration of input gas to obtain various flow patterns and initial ozone concentration. It was found that flow pattern clearly affected the characteristic of ozone transfer when using oxygen as input gas. High ozone transfer could be achieved from plug-slug flow because of high interfacial area per volume. It was found that the transfer efficiency became markedly decrease when air was used as source of ozone. This also resulted in small correlation between ozone transfer rate and gas/water ratio.



Department...Chemical Engineering... Student's signature..... Krit Lilitkamtakul
Field of study..Chemical Engineering.. Advisor's signature..... WIT Soontaranun
Academic year.....2003..... Co-advisor's signature Somprasong Srichai

กิตติกรรมประกาศ

ผู้ทำวิจัยขอกราบขอบพระคุณ อาจารย์ ดร.วิทย์ สุนทรนันท์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้ให้คำปรึกษาแนะแนวทางในการทำวิจัย แนวทางในการแก้ปัญหาต่างๆระหว่างการทำวิจัย ตลอดจนช่วยปรับปรุงแก้ไขวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จนเสร็จสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ศศิธร บุญ-หลง ประธานในการสอบวิทยานิพนธ์ ดร. สมประสงค์ ศรีชัย อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เดชา ฉัตรศิริเวชและผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ประเสริฐ ภวสันต์ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาให้ข้อคิดเห็นที่มีคุณค่า ทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณศูนย์เครื่องมือวิเคราะห์และห้องปฏิบัติการเคมีที่เอื้อเพื่อนำกลิ่นจำนวนมากที่ใช้ในการทดลอง

ขอบคุณพี่ๆเพื่อนๆและน้องๆ ห้องปฏิบัติการวิจัยวิศวกรรมเคมีสิ่งแวดล้อมและความปลอดภัย รวมถึงห้องปฏิบัติการวิจัยเคมีชีวะสำหรับคำแนะนำในการทำวิจัยและเพื่อนร่วมห้องเที่ยวในช่วงวันหยุดพักผ่อน

สุดท้ายนี้ ผู้ทำวิจัยขอกราบขอบพระคุณบิดาและมารดาที่เป็นกำลังใจจนกระทั่งงานวิจัยสำเร็จลุล่วงด้วยดี

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญรูป.....	ฎ
สัญลักษณ์.....	ด
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 ไอโซน.....	4
2.1.1 คุณลักษณะของไอโซน.....	4
2.1.2 เสถียรภาพของไอโซน.....	5
2.1.3 การผลิตไอโซน.....	7
2.1.4 การใช้ประโยชน์จากไอโซน.....	8
2.1.5 ปฏิกริยาที่เกี่ยวข้องกับไอโซน.....	9
2.1.6 ข้อจำกัดและอุปสรรคในการทำงานไอโซน.....	13
2.1.7 การตรวจวัดไอโซน.....	13
2.2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการถ่ายเทมวลสารระหว่างภูมิภาค.....	17
2.3 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับระบบการไหลของของไหล 2 ภูมิภาคในท่อแนวระนาบ.....	22
2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	24
2.4.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับไอโซน.....	24
2.4.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับรูปแบบการไหลของของไหล 2 ภูมิภาค ในท่อแนวระนาบ.....	28

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3 อุปกรณ์และวิธีการดำเนินการวิจัย.....	33
3.1 สารตัวอย่างที่ใช้ในการทดลอง.....	33
3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง.....	33
3.3 สารเคมี.....	34
3.4 ขั้นตอนการทดลอง.....	36
3.5 สภาวะการทดลอง.....	36
3.6 การวิเคราะห์ปริมาณไอโซน.....	37
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง.....	38
4.1 รูปแบบการไหลของของไหลในท่อ.....	38
4.2 ผลของอัตราการไหลที่มีต่อรูปแบบการไหลของของไหลในท่อ.....	42
4.3 การถ่ายเทไอโซนในระบบการไหล 2 ภูมิภาคในท่อแนวระนาบ.....	44
4.3.1 การถ่ายเทไอโซนในระบบการไหล 2 ภูมิภาคในท่อแนวระนาบ เมื่อใช้ก๊าซออกซิเจนเป็นก๊าซตั้งต้น.....	59
4.3.2 การถ่ายเทไอโซนในระบบการไหล 2 ภูมิภาคในท่อแนวระนาบ เมื่อใช้อากาศเป็นก๊าซตั้งต้น.....	65
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....	70
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	70
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	71
รายการอ้างอิง.....	72
ภาคผนวก.....	76
ภาคผนวก ก. การเตรียมสารตัวอย่างที่ใช้ในการทดลอง.....	77
ภาคผนวก ข. การวิเคราะห์ปริมาณไอโซน.....	79
ภาคผนวก ข.1 การวิเคราะห์ปริมาณไอโซนในก๊าซ.....	80
ภาคผนวก ข.2 การวิเคราะห์ปริมาณไอโซนในน้ำ.....	84
ภาคผนวก ค. ตัวอย่างการคำนวณ.....	89
ภาคผนวก ง. การศึกษาสมรรถนะของเครื่องผลิตไอโซน.....	100
ภาคผนวก จ. ผลการทดลอง.....	108
ภาคผนวก ฉ. ภาพอุปกรณ์ทดลอง.....	118

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
ภาคผนวก ข. ภาพรูปแบบการไหล.....	122
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	131



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 คุณลักษณะเด่นและลักษณะด้อยของกระบวนการผลิตโอโซนวิธีต่างๆ.....	8
2.2 ตัวอย่างตัวเริ่มปฏิกิริยา ตัวส่งเสริมปฏิกิริยา และตัวยับยั้งการเกิดปฏิกิริยาสำหรับ ปฏิกิริยาสลายตัวของโอโซนในน้ำ.....	12
2.3 สารเคมีที่นำมาใช้วิเคราะห์หาปริมาณโอโซนด้วยวิธีเคมีลูมิเนสเซนซ์.....	16
2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการดูดซับของโอโซนในน้ำ.....	25
2.5 ความสามารถในการละลายน้ำของออกซิเจนและโอโซนตามกฎของเฮนรี.....	25
3.1 สภาวะการทดลองในการศึกษาการถ่ายเทโอโซนในระบบการไหลแบบแนวระนาบ.....	37
4.1 รูปแบบการไหลของของไหลในระบบ.....	40
4.2 คุณลักษณะของก๊าซขาเข้าที่อัตราส่วนการไหลก๊าซต่อของเหลวต่างๆเมื่อใช้ก๊าซ ออกซิเจนเป็นก๊าซตั้งต้น.....	46
4.3 ความเข้มข้นของโอโซนในสายขาเข้าและขาออกและความแตกต่างของความเข้มข้น โอโซนที่อัตราส่วนการไหลก๊าซต่อของเหลวต่างๆเมื่อใช้ก๊าซออกซิเจนเป็นก๊าซตั้งต้น.....	49
4.4 พื้นที่หน้าตัดของของไหลในระบบท่อที่ทำการศึกษาที่อัตราส่วนการไหลก๊าซต่อของเหลว ต่างๆ เมื่อใช้ก๊าซออกซิเจนเป็นก๊าซตั้งต้น.....	52
4.5 ความเร็วของของไหลและเวลาที่ของไหลอยู่ภายในระบบท่อที่ทำการศึกษาที่อัตราส่วน ก๊าซต่อของเหลวต่างๆ เมื่อใช้ก๊าซออกซิเจนเป็นก๊าซตั้งต้น.....	52
4.6 คุณลักษณะของก๊าซขาเข้าที่อัตราส่วนการไหลก๊าซต่อของเหลวต่างๆเมื่อใช้ อากาศเป็นก๊าซตั้งต้น.....	65
4.7 ความเข้มข้นของโอโซนในสายขาเข้าและขาออกและความแตกต่างของความเข้มข้น โอโซนที่อัตราส่วนการไหลก๊าซต่อของเหลวต่างๆเมื่อใช้อากาศเป็นก๊าซตั้งต้น.....	66
ค.1 ตัวอย่างผลการทดลองการทำการเทียบวัดความเข้มข้นสารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟต ด้วยสารละลายโปแทสเซียมไดโครเมต.....	90
ง.1 ผลการวิเคราะห์ปริมาณโอโซนด้วยวิธีอัตราไวโอเลตโฟโตเมตริกที่ขวดเก็บตัวอย่าง แต่ละขวดเก็บได้ที่อัตราการไหลก๊าซ 33.61 ลิตรต่อนาที.....	102
ง.2 ผลการวิเคราะห์ปริมาณโอโซนด้วยวิธีหาปริมาณความต้องการโอโซนที่ขวดเก็บตัวอย่าง แต่ละขวดเก็บได้ที่อัตราการไหลก๊าซ 33.61 ลิตรต่อนาที.....	102
ง.3 ผลการวิเคราะห์ปริมาณโอโซนด้วยวิธีหาปริมาณความต้องการโอโซนที่ขวดเก็บตัวอย่าง แต่ละขวดเก็บได้ ณ อัตราการไหลก๊าซ 28.63 และ 33.61 ลิตรต่อนาที.....	103

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
๑.1 ความเข้มข้นของไอโซนในน้ำ ณ จุดเก็บตัวอย่างตำแหน่งต่างๆเมื่อใช้ก๊าซออกซิเจนเป็นก๊าซตั้งต้น.....	109
๑.2 ความเข้มข้นของไอโซนในน้ำ ณ จุดเก็บตัวอย่างตำแหน่งต่างๆเมื่อใช้อากาศเป็นก๊าซตั้งต้น.....	110
๑.3 ร้อยละความเข้มข้นของไอโซนสัมพัทธ์ในน้ำ ณ จุดเก็บตัวอย่างตำแหน่งต่างๆเมื่อใช้ก๊าซออกซิเจนเป็นก๊าซตั้งต้น.....	111
๑.4 ร้อยละความเข้มข้นของไอโซนสัมพัทธ์ในน้ำ ณ จุดเก็บตัวอย่างตำแหน่งต่างๆเมื่อใช้อากาศเป็นก๊าซตั้งต้น.....	112
๑.5 ความเข้มข้นของไอโซน เมื่อใช้ก๊าซออกซิเจนเป็นก๊าซตั้งต้น.....	113
๑.6 ความเข้มข้นของไอโซน เมื่อใช้อากาศเป็นก๊าซตั้งต้น.....	113
๑.7 พื้นที่หน้าตัด ความเร็วและเวลาที่อยู่ในระบบของของไหลแต่ละวัฏภาค.....	114
๑.8 ค่าเรย์โนลส์นัมเบอร์ของของไหลแต่ละวัฏภาค.....	114
๑.9 อัตราการถ่ายเทไอโซนและสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวมต่อปริมาตร เมื่อใช้ก๊าซออกซิเจนเป็นก๊าซตั้งต้น.....	115
๑.10 อัตราการถ่ายเทไอโซนและสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวมต่อปริมาตร เมื่อใช้อากาศเป็นก๊าซตั้งต้น.....	115

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 โมเลกุลไอโซน.....	4
2.2 ปฏิกิริยาการสลายตัวของไอโซนในน้ำชนิดต่างๆที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส.....	4
2.3 โครงสร้างอย่างง่ายของโมเลกุลไอโซน.....	5
2.4 อัตราการสลายตัวของไอโซนในน้ำชนิดต่างๆที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส.....	6
2.5 กลไกการเข้าทำปฏิกิริยากับสารประกอบต่างๆของไอโซน.....	9
2.6 ปฏิกิริยาทางตรงของไอโซน.....	10
2.7 ปฏิกิริยาออกซิเดชันของอินดิโกไทโรซัลเฟตด้วยไอโซน.....	15
2.8 ชั้นของความเข้มข้นบริเวณใกล้ผิวสัมผัสระหว่างวัฏภาคก๊าซกับวัฏภาคของเหลว.....	17
2.9 ทฤษฎีฟิล์ม.....	18
2.10 รูปแบบการไหลของการไหลในท่อแนวระนาบสำหรับระบบ 2 วัฏภาค.....	23
2.11 รูปแบบการไหลของการไหลในท่อแนวระนาบสำหรับระบบไอ น้ำ-น้ำ.....	28
2.12 แผนผังแสดงรูปแบบการไหลตามการศึกษาของ Baker	29
2.13 แผนผังแสดงรูปแบบการไหลตามการศึกษาของ Schicht	30
2.14 แผนผังแสดงรูปแบบการไหลตามการศึกษาของ Taitel และ Duckler.....	30
2.15 แผนผังแสดงขอบเขตรูปแบบการไหลตามการศึกษาของ Wong และ Yau.....	31
2.16 ภาพแสดงลักษณะของรูปแบบการไหลตามการศึกษาของ Wong และ Yau.....	31
3.1 แผนผังแสดงระบบที่ทำการทดลอง.....	34
4.1 รูปแบบการไหลของของไหลในระบบที่ทำการศึกษา.....	42
4.2 การเปลี่ยนแปลงรูปแบบการไหลของของไหล	43
4.3 ความเข้มข้นของไอโซนในของเหลวที่ผ่านระบบท่อที่ทำการศึกษา ที่อัตราส่วน ก๊าซต่อของเหลว 0.075, 0.219, 0.520, 0.821, 1.032, 1.236, 1.576 และ 1.916 เมื่อใช้ก๊าซออกซิเจนเป็นก๊าซตั้งต้น โดยตัวเลขในวงเล็บแสดงถึงอัตราการไหล เชิงมวลต่อพื้นที่หน้าตัดของของไหลในระบบ (mass flux, kg/min.cm ²).....	44
4.4 ความเข้มข้นของไอโซนในของเหลวที่เปลี่ยนแปลงไปตามปริมาตร ที่อัตราส่วน ก๊าซต่อของเหลว 0.075, 0.219, 0.520, 0.821, 1.032, 1.236, 1.576 และ 1.976 เมื่อใช้ก๊าซออกซิเจนเป็นก๊าซตั้งต้น.....	45
4.5 อัตราการสลายตัวของไอโซนในน้ำชนิดต่างๆที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส.....	47

สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.6 ความเข้มข้นของไอโซนในก๊าซและในของเหลวภายหลังผ่านระบบท่อที่ทำการทดลอง เมื่อใช้ก๊าซออกซิเจนเป็นก๊าซตั้งต้น.....	48
4.7 ค่าเรย์โนลส์นัมเบอร์ของก๊าซที่ไหลในท่อที่ทำการทดลอง ที่เปลี่ยนแปลงตาม อัตราการไหลของก๊าซ.....	51
4.8 ค่าเรย์โนลส์นัมเบอร์ของของเหลวที่ไหลในท่อที่ทำการทดลอง ที่เปลี่ยนแปลงตาม อัตราการไหลของของเหลว.....	51
4.9 ค่าเรย์โนลส์นัมเบอร์ของของเหลวและก๊าซที่ไหลในท่อแนวระนาบ โดยตัวเลขใน วงเล็บแสดงถึงอัตราการไหลเชิงมวลต่อพื้นที่หน้าตัดของของไหลในระบบ (mass flux, kg/min.cm ²).....	53
4.10 ร้อยละความเข้มข้นไอโซนสัมพัทธ์ในของเหลวที่ผ่านระบบท่อที่ทำการทดลอง ที่อัตราส่วนก๊าซต่อของเหลว 0.075, 0.219, 0.520, 0.821, 1.032, 1.236, 1.576 และ 1.916 เมื่อใช้ก๊าซออกซิเจนเป็นก๊าซตั้งต้น โดยตัวเลขในวงเล็บแสดงถึงอัตรา การไหลเชิงมวลต่อพื้นที่หน้าตัดของของไหลในระบบ (mass flux, kg/min.cm ²).....	55
4.11 อัตราการถ่ายเทมวลไอโซนของระบบท่อที่ทำการทดลอง ที่อัตราส่วนก๊าซต่อ ของเหลว 0.075, 0.219, 0.520, 0.821, 1.032, 1.236, 1.576 และ 1.916 เมื่อใช้ก๊าซออกซิเจนเป็นก๊าซตั้งต้น โดยตัวเลขในวงเล็บแสดงถึงอัตราการไหล เชิงมวลต่อพื้นที่หน้าตัดของของไหลในระบบ (mass flux, kg/min.cm ²).....	56
4.12 สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวมต่อหน่วยปริมาตรของระบบท่อที่ทำการทดลอง ที่อัตราส่วนก๊าซต่อของเหลว 0.075, 0.219, 0.520, 0.821, 1.032, 1.236, 1.576 และ 1.916 เมื่อใช้ก๊าซออกซิเจนเป็นก๊าซตั้งต้น โดยตัวเลขในวงเล็บแสดงถึงอัตรา การไหลเชิงมวลต่อพื้นที่หน้าตัดของของไหลในระบบ (mass flux, kg/min.cm ²).....	57
4.13 อัตราการถ่ายเทมวลไอโซนของระบบท่อที่ทำการทดลอง ที่อัตราส่วนก๊าซต่อ ของเหลว 0.075, 0.219, 0.520, 0.821, 1.032, 1.236, 1.576 และ 1.916 เมื่อใช้ก๊าซออกซิเจนเป็นก๊าซตั้งต้น โดยตัวเลขในวงเล็บแสดงถึงอัตราการไหล เชิงมวลต่อพื้นที่หน้าตัดของของไหลในระบบ (mass flux, kg/min.cm ²).....	59

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า	
4.14	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวมต่อหน่วยปริมาตรของระบบท่อที่ทำการทดลอง ที่อัตราส่วนก๊าซต่อของเหลว 0.075, 0.219, 0.520, 0.821, 1.032, 1.236, 1.576 และ 1.916 เมื่อใช้ก๊าซออกซิเจนเป็นก๊าซตั้งต้น โดยตัวเลขในวงเล็บแสดงถึงอัตรา การไหลเชิงมวลต่อพื้นที่หน้าตัดของของไหลในระบบ (mass flux, kg/min.cm ²).....	60
4.15	ร้อยละความเข้มข้นไอโซนสัมพัทธ์ของของเหลว ณ จุดเก็บตัวอย่าง ที่อัตราส่วน ก๊าซต่อของเหลว 0.075, 0.219 และ 0.520 เมื่อใช้ก๊าซออกซิเจนเป็นก๊าซตั้งต้น.....	61
4.16	ร้อยละความเข้มข้นไอโซนสัมพัทธ์ของของเหลว ณ จุดเก็บตัวอย่าง ที่อัตราส่วน ก๊าซต่อของเหลว 0.520 และ 0.821 เมื่อใช้ก๊าซออกซิเจนเป็นก๊าซตั้งต้น.....	62
4.17	ร้อยละความเข้มข้นไอโซนสัมพัทธ์ของของเหลว ณ จุดเก็บตัวอย่าง ที่อัตราส่วน ก๊าซต่อของเหลว 1.032 และ 1.236 เมื่อใช้ก๊าซออกซิเจนเป็นก๊าซตั้งต้น.....	63
4.18	ร้อยละความเข้มข้นไอโซนสัมพัทธ์ของของเหลว ณ จุดเก็บตัวอย่าง ที่อัตราส่วน ก๊าซต่อของเหลว 0.075 และ 1.916 เมื่อใช้ก๊าซออกซิเจนเป็นก๊าซตั้งต้น.....	64
4.19	ร้อยละความเข้มข้นไอโซนสัมพัทธ์ในของเหลวที่ผ่านระบบท่อที่ทำการศึกษา ที่อัตราส่วนก๊าซต่อของเหลว 0.075, 0.219, 0.520, 0.821, 1.032, 1.236, 1.576 และ 1.916 เปรียบเทียบระหว่างการใช้อากาศกับการใช้ก๊าซออกซิเจนเป็นก๊าซตั้งต้น...	66
4.20	อัตราการถ่ายเทมวลไอโซนของระบบท่อที่ทำการศึกษา ที่อัตราส่วนก๊าซต่อ ของเหลว 0.075, 0.219, 0.520, 0.821, 1.032, 1.236, 1.576 และ 1.916 เปรียบเทียบระหว่างการใช้อากาศกับการใช้ก๊าซออกซิเจนเป็นก๊าซตั้งต้น.....	67
4.21	ร้อยละความเข้มข้นไอโซนสัมพัทธ์ในของเหลว ณ จุดเก็บตัวอย่าง ที่อัตราส่วน ก๊าซต่อของเหลว 0.520 เปรียบเทียบระหว่างการใช้อากาศกับการใช้ก๊าซออกซิเจน เป็นก๊าซตั้งต้น.....	68
4.22	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวมต่อหน่วยปริมาตรของระบบท่อที่ทำการทดลอง ที่อัตราส่วนก๊าซต่อของเหลว 0.075, 0.219, 0.520, 0.821, 1.032, 1.236, 1.576 และ 1.916 เปรียบเทียบระหว่างการใช้อากาศกับการใช้ก๊าซออกซิเจนเป็นก๊าซตั้งต้น...	69
ก.1	แผนผังเครื่องผลิตไอโซนที่ใช้ในการทดลอง.....	78
ง.1	ขวดเก็บตัวอย่างสี่ขวดต่ออนุกรมกัน.....	101
ง.2	ร้อยละปริมาณไอโซนที่ดักจับได้สะสมที่ขวดเก็บตัวอย่างแต่ละขวดเก็บได้ ณ อัตราการไหลก๊าซ 28.63 และ 33.61 ลิตรต่อนาที.....	103

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
ง.3 ปริมาณไอโซนที่ผลิตได้ต่อหน่วยเวลา ที่อัตราการไหลของก๊าซต่างๆ เมื่อใช้ อากาศเป็นวัตถุดิบ.....	104
ง.4 ความเข้มข้นของไอโซนที่อัตราการไหลของก๊าซต่างๆ เมื่อใช้อากาศเป็นวัตถุดิบ.....	104
ง.5 ความเข้มข้นของก๊าซไอโซนที่ผลิตได้ ณ ปริมาณไอโซนที่ผลิตได้ต่อหน่วยเวลาต่างๆ เมื่อใช้อากาศเป็นวัตถุดิบ.....	105
ง.6 เปอร์เซนต์ conversion ของก๊าซออกซิเจนที่อัตราการไหลของก๊าซต่างๆ.....	105
ง.7 ปริมาณไอโซนที่ผลิตได้ต่อหน่วยเวลา ที่อัตราการไหลของก๊าซต่างๆ เมื่อใช้ ก๊าซออกซิเจนเป็นวัตถุดิบ.....	106
ง.8 ความเข้มข้นของไอโซนที่อัตราการไหลของก๊าซต่างๆ เมื่อใช้ก๊าซออกซิเจนเป็นวัตถุดิบ..	106
ง.9 ความเข้มข้นของก๊าซไอโซนที่ผลิตได้ ณ ปริมาณไอโซนที่ผลิตได้ต่อหน่วยเวลาต่างๆ เมื่อใช้ก๊าซออกซิเจนเป็นวัตถุดิบ.....	107
ง.10 เปอร์เซนต์ conversion ของก๊าซออกซิเจนที่อัตราการไหลของก๊าซต่างๆ เมื่อใช้ก๊าซออกซิเจนเป็นวัตถุดิบ.....	107
จ.1 ผลการทดลองในหน่วยร้อยละความเข้มข้นของไอโซนสัมพัทธ์ในน้ำ ณ จุดเก็บตัวอย่างตำแหน่งต่างๆ เมื่อใช้ก๊าซออกซิเจนเป็นก๊าซตั้งต้น.....	116
จ.2 ผลการทดลองร้อยละความเข้มข้นของไอโซนสัมพัทธ์ในน้ำ ณ จุดเก็บ ตัวอย่างตำแหน่งต่างๆเมื่อใช้อากาศเป็นก๊าซตั้งต้น.....	117
ฉ.1 ท่อที่ใช้ในการทดลอง.....	119
ฉ.2 เครื่องผลิตไอโซนที่ใช้ในการทดลอง.....	119
ฉ.3 อุปกรณ์วัดอัตราการไหลของก๊าซ.....	120
ฉ.4 อุปกรณ์วัดอัตราการไหลของของเหลว.....	120
ฉ.5 แผนผังท่อที่ใช้ทดลอง.....	121
ช.1 ภาพแสดงรูปแบบการไหลสำหรับอัตราส่วนก๊าซต่อของเหลว 0.075.....	123
ช.2 ภาพแสดงรูปแบบการไหลสำหรับอัตราส่วนก๊าซต่อของเหลว 0.219.....	124
ช.3 ภาพแสดงรูปแบบการไหลสำหรับอัตราส่วนก๊าซต่อของเหลว 0.520.....	125
ช.4 ภาพแสดงรูปแบบการไหลสำหรับอัตราส่วนก๊าซต่อของเหลว 0.821.....	126
ช.5 ภาพแสดงรูปแบบการไหลสำหรับอัตราส่วนก๊าซต่อของเหลว 1.032.....	127
ช.6 ภาพแสดงรูปแบบการไหลสำหรับอัตราส่วนก๊าซต่อของเหลว 1.236.....	128

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
ช.7 ภาพแสดงรูปแบบการไหลสำหรับอัตราส่วนก๊าซต่อของเหลว 1.576.....	129
ช.8 ภาพแสดงรูปแบบการไหลสำหรับอัตราส่วนก๊าซต่อของเหลว 1.916.....	130



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สัญลักษณ์

ε	molar extinction coefficient
ρ_g	ความหนาแน่นของของก๊าซ
ρ_l	ความหนาแน่นของของเหลว
v_g	ความเร็วในการไหลของก๊าซ
v_l	ความเร็วในการไหลของของเหลว
μ_g	ความหนืดของก๊าซ
μ_l	ความหนืดของของเหลว
a	พื้นที่ผิวจำเพาะ
A	พื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างวัฏภาคก๊าซและของเหลว
A_g	พื้นที่หน้าตัดในการไหลของก๊าซ
A_l	พื้นที่หน้าตัดในการไหลของของเหลว
$c(M)$	ความเข้มข้นในหน่วยโมลาร์
C_G	ความเข้มข้นของสารในวัฏภาคก๊าซ
C_{Gi}	ความเข้มข้นของสารในวัฏภาคก๊าซที่ผิวสัมผัส
C_L	ความเข้มข้นของสารในวัฏภาคของเหลว
C_{Li}	ความเข้มข้นของสารในวัฏภาคของเหลวที่ผิวสัมผัส
C	ความเข้มข้นของก๊าซเหนือของเหลวที่สภาวะสมดุลกับก๊าซที่ละลายอยู่ในของเหลว
C_{in}	ความเข้มข้นของไอโซนในน้ำ ณ ตำแหน่งก่อนเข้าสู่ระบบท่อ
C_{out}	ความเข้มข้นของไอโซนในน้ำ ณ ตำแหน่งหลังออกจากระบบท่อ
C^*	ความเข้มข้นของก๊าซที่ละลายอยู่ในของเหลวที่สภาวะสมดุลกับก๊าซเหนือของเหลว
C_{in}^*	ความเข้มข้นของไอโซนในน้ำที่สภาวะสมดุลกับความเข้มข้นไอโซนในก๊าซ ณ ตำแหน่งก่อนเข้าสู่ระบบท่อ
C_{out}^*	ความเข้มข้นของไอโซนในน้ำที่สภาวะสมดุลกับความเข้มข้นไอโซนในก๊าซ ณ ตำแหน่งหลังออกจากระบบท่อ
ΔC_{ln}	ความแตกต่างเฉลี่ยเชิง logarithmic ของความเข้มข้นไอโซน
D	เส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ
f	Friction factor
G_g	อัตราการไหลเชิงมวลของก๊าซ
G_l	อัตราการไหลเชิงมวลของของเหลว

สัญลักษณ์ (ต่อ)

H	ค่าคงที่ของเฮนรี
I_1	Intensity passing through the absorption cell containing the sample
I_0	Intensity passing through the absorption cell containing the reference
k	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวล
k_G	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลในวัฏภาคก๊าซ
k_L	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลในวัฏภาคของเหลว
k_{La}	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวมระหว่างก๊าซกับของเหลวต่อหน่วยปริมาตร
l	ความกว้างภายในของเซลล์วัดค่าการดูดกลืนแสง
L	ความยาวของท่อ
N	อัตราการถ่ายเทมวลต่อหน่วยพื้นที่
ΔP	Pressure drop
Q	อัตราการถ่ายเทมวล
Re	ค่าเรย์โนลด์ส์นัมเบอร์
V	ปริมาตรของของเหลว
X	ความเข้มข้นของก๊าซในของเหลวที่สภาวะสมดุล
Y	แรงดันไอ (partial pressure) ของก๊าซเหนือของเหลว

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย