

เทคนิคอัลตราโซนิกสำหรับวัดค่าโพลีอัมไพโนคอลัมน์สกัดแบบจานหมุน



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาเคมีเทคนิค ภาควิชาเคมีเทคนิค

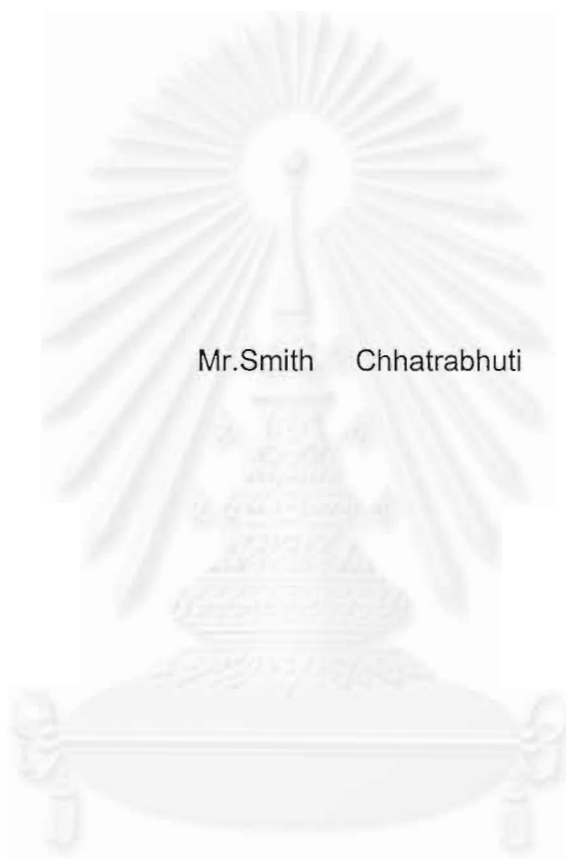
บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2542

ISBN 974-639-431-2

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ULTRASONIC TECHNIQUE FOR HOLD-UP MEASUREMENTS IN A ROTATING DISK
CONTACTOR EXTRACTION COLUMN



Mr. Smith Chhatrabhuti

สถาบันวิทยบริการ

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Science in Chemical Technology

Department of Chemical Technology

Graduate School

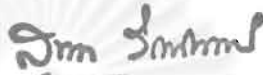
Chulalongkorn University

Academic Year 1999

ISBN 974-639-431-2

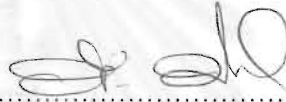
หัวข้อวิทยานิพนธ์ เทคนิคอัลตราโซนิกสำหรับวัดไฮลด์อัฟในคอลัมน์สกัดแบบจานหมุน
โดย นายสมิทธิ์ ฉัตรภูติ
ภาควิชา เคมีเทคนิค
อาจารย์ที่ปรึกษา ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สมเกียรติ งามประเสริฐสุลิตี
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เลอสรวง เมฆสุด

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบัณฑิต

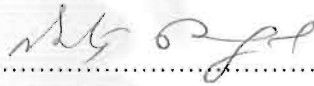


.....คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย
(รองศาสตราจารย์ ดร.สุชาดา กิระนันท์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



.....ประธานกรรมการ
(ศาสตราจารย์ ดร.กัทธรพรณ ประศาสน์สารกิจ)




.....อาจารย์ที่ปรึกษา
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมเกียรติ งามประเสริฐสุลิตี)



.....อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เลอสรวง เมฆสุด)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย 

.....กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธราพงษ์ วิทิตสานต์)



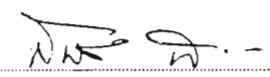
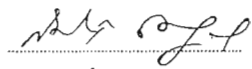
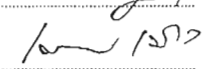
.....กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พรพจน์ เปี่ยมสมบูรณ์)

สมิทท์ จัตรภูติ : เทคนิคอัลตราโซนิกสำหรับวัดค่าไฮลด์อัฟในคอลัมน์สกัดแบบจานหมุน (ULTRASONIC TECHNIQUE FOR HOLD-UP MEASUREMENTS IN A ROTATING DISK CONTACTOR EXTRACTION COLUMN) อ. ที่ปรึกษา : ผศ. ดร. สมเกียรติ งามประเสริฐสิทธิ์, อ. ที่ปรึกษาร่วม : ผศ. ดร. เลอสรวง เมฆสุต , 96 หน้า. ISBN 974-639-431-2.

การวิจัยนี้เป็นการทดลองนำเทคนิคอัลตราโซนิกมาใช้กับคอลัมน์สกัดแบบจานหมุน (RDC) เพื่อศึกษาถึงความเป็นไปได้ในการนำเทคนิคนี้มาใช้ในการวัดค่าไฮลด์อัฟ โดยคอลัมน์สกัดแบบจานหมุนที่ใช้ศึกษามีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 5.05 เซนติเมตร ยาว 108 เซนติเมตร ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของจานหมุน และวงแหวนสวิต เท่ากับ 2.4 และ 3.0 เซนติเมตร ตามลำดับ จำนวนคอมพาร์ทเมนต์ เท่ากับ 43 ชั้น อัลตราโซนิกทรานสดิวเซอร์ที่ใช้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางผิวหน้า 1.5 เซนติเมตร ความถี่ 1 เมกะเฮิรตซ์ สำหรับระบบอิมัลชันที่ใช้คือ โทลูอิน(วัฏภาคกระจาย) -น้ำ และศึกษาตัวแปรที่มีผลต่อค่าไฮลด์อัฟ ได้แก่ อัตราการไหลของวัฏภาคกระจาย เท่ากับ 0.01 - 0.08 ลิตรต่อนาที อัตราการไหลของวัฏภาคต่อเนื่อง เท่ากับ 0.1 - 0.8 ลิตรต่อนาที และความเร็วยรอบจานหมุน เท่ากับ 300 - 800 รอบต่อนาที ตามลำดับ

พบว่าเมื่อให้อัตราการไหลของวัฏภาคต่อเนื่อง และความเร็วยรอบจานหมุนคงที่ อัตราการไหลของวัฏภาคกระจายมีผลต่อค่าไฮลด์อัฟ โดยไฮลด์อัฟมีค่าเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของอัตราการไหลของวัฏภาคกระจาย สำหรับอัตราการไหลของวัฏภาคต่อเนื่องต่อค่าไฮลด์อัฟ เมื่ออัตราการไหลของวัฏภาคกระจายและความเร็วยรอบจานหมุนมีค่าคงที่ ไฮลด์อัฟมีค่าลดลงเมื่ออัตราการไหลของวัฏภาคต่อเนื่องเพิ่มขึ้น และผลของความเร็วยรอบจานหมุนมีผลเพียงเล็กน้อยต่อค่าไฮลด์อัฟ จากการทดลองได้เปรียบเทียบไฮลด์อัฟที่วัดด้วยวิธีอัลตราโซนิก และวิธีวัดปริมาตรโดยตรงในคอลัมน์สกัดแบบจานหมุนขนาดย่อยส่วนที่มี geometry ของคอลัมน์ใกล้เคียงกันกับคอลัมน์สกัดแบบจานหมุน พบว่ามีค่าใกล้เคียงกันและน่าเชื่อถือโดยมีค่าเฉลี่ยของผลต่างของค่าไฮลด์อัฟเท่ากับ 0.019 และคิดเป็นร้อยละ 7.73 ค่าไฮลด์อัฟที่วัดได้ด้วยเทคนิคอัลตราโซนิกในคอลัมน์สกัดแบบจานหมุนนี้ มีค่าอยู่ระหว่าง 0.010 - 0.499 และความสัมพันธ์ของค่าไฮลด์อัฟกับตัวแปรที่ทำการศึกษาคือ $\phi = 0.7188(Q_c/Q_d)^{-0.7604}$

ภาควิชา เคมีเทคนิค
สาขาวิชา เคมีเทคนิค
ปีการศึกษา 2542

ลายมือชื่อนิสิต 
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา 
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม 

3972901023 : MAJOR CHEMICAL TECHNOLOGY

KEY WORD: ULTRASONIC TECHNIQUE / HOLD-UP / ROTATING DISK CONTACTOR /
EXTRACTION / DISPERSED-PHASE

SMITH CHHATRABHUTI : ULTRASONIC TECHNIQUE FOR HOLD-UP MEASUREMENTS
IN A ROTATING DISK CONTACTOR EXTRACTION COLUMN. THESIS ADVISOR: ASSIST.
PROF. SOMKIAT NGAMPRASERTSITH, Doctorat de l'INPT. THESIS COADVISOR :
ASSIST. PROF. LURSUANG MEKASUT, Dr.Ing. 96 pp. ISBN 974-639-431-2.

This study used ultrasonic technique with a rotating disk contactor extraction column (RDC) to study the feasibility of the technique for determining dispersed phase hold-up. The measurement was done in a 5.05 cm. inner diameter RDC column, 108 cm. length and diameter of rotating disks and stator rings were 2.4 and 3.0 cm., respectively. The column consists of 43 rotating disks, 44 stator rings and height between disk and stator ring, 2.0 cm. Active surface's ultrasonic transducer is 1.5 cm., with ultrasonic transducer of frequency 1 MHz. The toluene (dispersed)- water system was used throughout the study. The flow of dispersed phase and continuous phase were introduced, with the rate of 0.01-0.08 L/min and 0.1-0.8 L/min, respectively. The rotating disks were operated at 300-800 rpm.

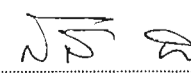
The results showed that when the flow rate of continuous phase and rotating speed are constant, the flow rate of dispersed phase have an effect on hold-up of dispersed phase. Hold-up has increased with the increasing of dispersed phase flow. When the dispersed phase flow and rotating speed are constant, the increasing of the continuous phase flow caused the hold-up to decrease. The increasing of rotor speed have a slight effect on the hold-up. The values of dispersed phase hold-up obtained from ultrasonic and direct volume measurement method were compared in miniaturized RDC that have column geometry similar to RDC. The study found that the values of hold-up from both methods were reliable and somewhat accuracy, the average of the difference of hold-up of 0.019. The hold-up values were measured by means of ultrasonic technique in RDC are between 0.010-0.499. The relation of hold-up expressed in term of dispersed phase flow rate and continuous phase flow rate can be represented as follows:

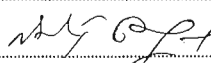
$$\phi = 0.7188(Q_c/Q_d)^{-0.7604}$$

ภาควิชา เคมีเทคนิค

สาขาวิชา เคมีเทคนิค

ปีการศึกษา 2542

ลายมือชื่อผู้ผลิต 

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา 

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม 

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



กิตติกรรมประกาศ

ขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมเกียรติ งามประเสริฐวิสิทธิ์ อาจารย์ที่ปรึกษา
งานวิจัย ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เลอสรวง เมฆสุด อาจารย์ที่ปรึกษาร่วมงานวิจัย ที่ได้กรุณาให้คำ
ปรึกษา และความช่วยเหลือให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี และอาจารย์สุวิทย์ พุทธิมนต์
อาจารย์ประจำภาควิชาฟิสิกส์ ตลอดจนคณาจารย์ภาควิชาเคมีเทคนิคทุกท่าน ที่ได้ให้คำแนะนำใน
งานวิจัยนี้

ขอขอบพระคุณ คุณสังข์ ชมชื่น คุณบุญญฤทธิ์ จูห้อง เจ้าหน้าที่ภาควิชาเคมีเทคนิค คุณ
สมพร เอี่ยมล้ำอาจค์ เจ้าหน้าที่ศูนย์พัฒนาเครื่องมือ คณะวิทยาศาสตร์ ที่กรุณาช่วยสร้างเครื่องสกัด
แบบจานหมุน และซ่อมแซมเครื่องมือต่างๆ ที่ใช้ในงานวิจัย และคุณปริษา วงษ์วิสัย หัวหน้าศูนย์
พัฒนาเครื่องมือ คณะวิทยาศาสตร์ ที่กรุณาให้ยืมอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้ในงานวิจัย ตลอดจนเจ้า
หน้าที่ภาควิชาเคมีเทคนิคทุกท่าน ที่ได้ให้ความช่วยเหลือ อำนวยความสะดวกตลอดการทำกรวิจัย

ขอขอบพระคุณ บริษัทเซลล์ (ประเทศไทย) จำกัด ที่ได้สนับสนุนทุนวิจัยส่วนใหญ่ให้กับงาน
วิจัยนี้ ขอขอบพระคุณ บัณฑิตวิทยาลัย ที่ได้สนับสนุนทุนวิจัยส่วนหนึ่งด้วย

ขอขอบพระคุณ พี่ๆ เพื่อนๆ และน้องๆ ภาควิชาเคมีเทคนิค ทุกท่านที่ได้ให้ความช่วยเหลือ จน
ทำให้งานวิจัยสำเร็จลุล่วง

สุดท้ายนี้ ขอกราบขอบพระคุณ มารดา บิดา น้ำ พี่ชาย และน้องสาว ที่เป็นกำลังใจที่สำคัญ
มาโดยตลอด ทั้งในด้านการเงิน และคำปรึกษาต่างๆ จนสำเร็จการศึกษา

สถาบันวิจัยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ณ
สารบัญรูป.....	ญ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ.....	ท
บทที่	
1. บทนำ.....	1
2. วารสารปริทัศน์.....	3
2.1 การวัดค่าโพลต์อัฟ.....	5
2.2 การวัดค่าโพลต์อัฟของภูมิภาคของเหลว.....	5
2.2.1 การวัดโพลต์อัฟของของเหลวโดยการวัดปริมาตร.....	5
2.2.2 การวัดค่าโพลต์อัฟของของเหลวโดยการวัดน้ำหนัก.....	7
2.2.3 การวัดค่าโพลต์อัฟของของเหลวโดยใช้ตัวตามรอยของเหลว.....	7
2.2.4 การวัดค่าโพลต์อัฟของของเหลวด้วยเทคนิคอัลตราโซนิก.....	8
2.2.5 การวัดค่าโพลต์อัฟของของเหลวโดยการใช้รังสีแกมมา.....	10
2.3 คลื่นอัลตราโซนิก.....	12
2.4 การเคลื่อนที่ของคลื่นอัลตราโซนิก.....	13
2.5 ชนิดของคลื่นอัลตราโซนิก.....	15
2.5.1 คลื่นตามยาว.....	15
2.5.2 คลื่นตามขวาง.....	16
2.6 ความเร็วของอัลตราโซนิก และความยาวคลื่น.....	17
2.7 อัลตราโซนิกทรานสดิวเซอร์.....	18
2.7.1 ชิ้นส่วนกัมมันต์.....	18
2.7.2 Backing.....	19
2.7.3 Ware plate.....	19

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
2.8 ทฤษฎีพื้นฐานสำหรับวิเคราะห์ไฮลด์อัฟ.....	20
2.9 เครื่องสกัดแบบจานหมุน.....	22
2.10 การออกแบบคอลัมน์สกัดแบบจานหมุน.....	24
3. อุปกรณ์และวิธีการทดลอง.....	26
4. ผลการทดลอง.....	37
5. อภิปรายและวิจารณ์ผลการทดลอง.....	53
6. สรุป และข้อเสนอแนะ.....	64
รายการอ้างอิง.....	67
ภาคผนวก.....	
ภาคผนวก ก.....	72
ภาคผนวก ข.....	74
ภาคผนวก ค.....	82
ภาคผนวก ง.....	94
ประวัติผู้เขียน.....	96

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1	ชุดของวิธีการวัดไฮลด์อัฟสำหรับระบบหลายภูมิภาค.....4
2.2	แสดงอัลตราโซนิกสเปกตรัม.....12
2.3	แสดงรูปคลื่นอัลตราโซนิก.....14
2.4	แสดงความเร็วของคลื่นตามยาวและคลื่นตามขวางของวัสดุต่างๆที่ทดสอบด้วยอัลตราโซนิก.....17
3.1	สมบัติของสารเคมีที่ใช้ในระบบ ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส.....31
4.1	เวลาเดินทางเฉลี่ยผ่านภาชนะของคลื่นอัลตราโซนิก.....37
4.2	เวลาเดินทางของคลื่นอัลตราโซนิกในสารบริสุทธิ์ ผ่านคอลัมน์สกัดแบบจานหมุนขนาดย่อส่วน..... 38
4.3	เวลาเดินทางของคลื่นอัลตราโซนิกผ่านสารบริสุทธิ์ที่บรรจุในคอลัมน์สกัดแบบจานหมุน..... 38
4.4	ความสัมพันธ์ระหว่างไฮลด์อัฟจากวิธีอัลตราโซนิกกับวิธีวัดปริมาตรโดยตรงเมื่ออัตราการไหลของภูมิภาคต่อเนื่องคงที่ต่าง ๆ กัน ตามลำดับ -เมื่ออัตราการไหลของภูมิภาคต่อเนื่องเท่ากับ 0.1 ลิตรต่อนาที.....39 -เมื่ออัตราการไหลของภูมิภาคต่อเนื่องเท่ากับ 0.2 ลิตรต่อนาที.....40 -เมื่ออัตราการไหลของภูมิภาคต่อเนื่องเท่ากับ 0.4 ลิตรต่อนาที.....41 -เมื่ออัตราการไหลของภูมิภาคต่อเนื่องเท่ากับ 0.8 ลิตรต่อนาที.....42
4.5	ผลของความเร็วยอบจานหมุนต่อค่าไฮลด์อัฟ เมื่ออัตราการไหลของภูมิภาคต่อเนื่องคงที่เท่ากับ 0.4 ลิตรต่อนาที และอัตราการไหลของภูมิภาคกระจายต่างกันที่ระดับความสูงติดตั้งทรานสดิวเซอร์เท่ากับ 20 เซนติเมตร..... 48
4.6	ผลของความเร็วยอบจานหมุนต่อค่าไฮลด์อัฟ เมื่ออัตราการไหลของภูมิภาคกระจายคงที่เท่ากับ 0.04 ลิตรต่อนาที และอัตราการไหลของภูมิภาคต่อเนื่องต่างๆกันที่ระดับความสูงติดตั้งทรานสดิวเซอร์เท่ากับ 20 เซนติเมตร..... 49

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
4.7	ค่าไฮลด์อัฟที่ระดับติดตั้งทรานสดิวเซอร์ต่าง ๆ ที่อัตราการไหลของวัฏภาคต่อเนื่อง คงที่เท่ากับ 0.1 ลิตรต่อนาที และความเร็วรอบจานหมุน 400 รอบต่อนาที.....	50
4.8	ค่าไฮลด์อัฟที่ระดับติดตั้งทรานสดิวเซอร์ต่าง ๆ ที่อัตราการไหลของวัฏภาคกระจาย คงที่เท่ากับ 0.08 ลิตรต่อนาที และความเร็วรอบจานหมุน 400 รอบต่อนาที.....	51
5.1	ความเร็วคลื่นอัลตราโซนิกผ่านสารบริสุทธิ์แต่ละชนิด.....	54



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญรูป

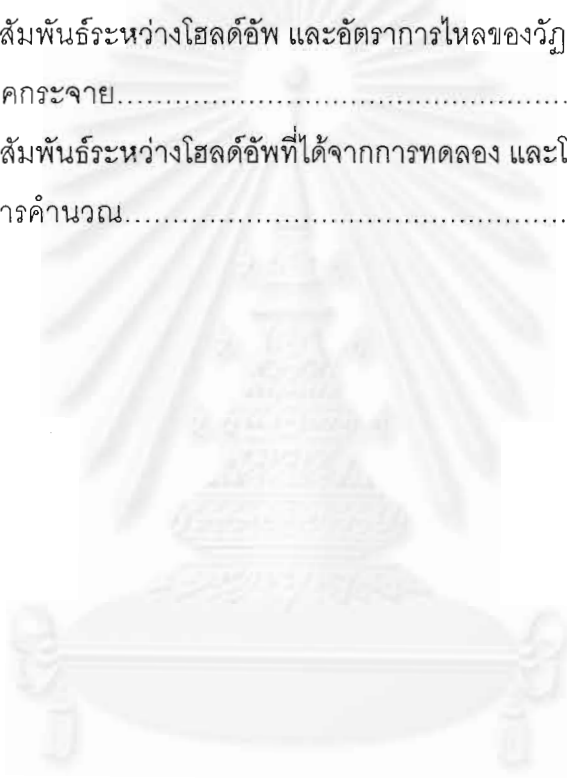
รูปที่	หน้า
2.1	การวัดโวลต์อัมป์ของของเหลวโดยการวัดปริมาตร..... 6
2.2	เทคนิคอัลตราโซนิกเพื่อใช้ในการวัดเวลาเดินทางของคลื่นอัลตราโซนิก ในคอลัมน์สกัด.....9
2.3	รูปคลื่นอัลตราโซนิก..... 13
2.4	คลื่นตามยาวกำลังเดินทางผ่านตัวกลาง..... 16
2.5	การเคลื่อนที่ของอนุภาค และทิศทางของคลื่นตามขวาง..... 16
2.6	แสดงส่วนประกอบต่างๆ ของอัลตราโซนิกทรานสดิวเซอร์..... 18
2.7	คลื่นที่มีลักษณะ in phase กับ matching layer ที่เกิดจากชั้นส่วนกัมมันต์..... 20
2.8	ลักษณะของระบบที่ทำการศึกษา (ก) ปราศจากการผสม (ข) มีการผสม..... 21
2.9	แสดงส่วนประกอบของเครื่องสกัดแบบจานหมุน..... 22
2.10	แสดงส่วนประกอบภายในคอลัมน์สกัดแบบจานหมุน..... 24
3.1	เครื่องมือสำหรับวัดความเร็วเสียงในระบบ batch..... 27
3.2	อัลตราโซนิกทรานสดิวเซอร์ตัวรับ และส่ง..... 27
3.3	อุปกรณ์และการต่ออุปกรณ์ต่างๆกับคอลัมน์สกัดแบบจานหมุน..... 29
3.4	เครื่องสกัดแบบจานหมุนขนาดย่อส่วน..... 30
3.5	เครื่องสกัดแบบจานหมุน..... 30
4.1	ความสัมพันธ์ค่าโวลต์อัมป์ที่วัดด้วยวิธีอัลตราโซนิก และวิธีวัดปริมาตรโดยตรง..... 43
4.2	ความสัมพันธ์ระหว่างโวลต์อัมป์กับอัตราการไหลของภูมิภาคกระจาย ที่อัตราการไหล ของภูมิภาคต่อเนื่องคงที่เท่ากับ 0.1 ลิตรต่อนาที และระดับความสูงติดตั้ง ทรานสดิวเซอร์เท่ากับ 20 เซนติเมตร..... 44
4.3	ความสัมพันธ์ระหว่างโวลต์อัมป์กับอัตราการไหลของภูมิภาคกระจาย ที่อัตราการไหล ของภูมิภาคต่อเนื่องคงที่เท่ากับ 0.1 ลิตรต่อนาที และระดับความสูงติดตั้ง ทรานสดิวเซอร์เท่ากับ 40 เซนติเมตร..... 44

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างไฮลด์อัฟกับอัตราการไหลของภูมิภาคกระจาย ที่อัตราการไหลของภูมิภาคต่อเนื่องคงที่เท่ากับ 0.1 ลิตรต่อนาที และระดับความสูงติดตั้งทรานสดิวเซอร์เท่ากับ 80 เซนติเมตร.....	45
4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างไฮลด์อัฟกับอัตราการไหลของภูมิภาคต่อเนื่อง ที่อัตราการไหลของภูมิภาคกระจายคงที่เท่ากับ 0.02 ลิตรต่อนาที และระดับความสูงติดตั้งทรานสดิวเซอร์เท่ากับ 20 เซนติเมตร.....	46
4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างไฮลด์อัฟกับอัตราการไหลของภูมิภาคต่อเนื่องที่อัตราการไหลของภูมิภาคกระจายคงที่เท่ากับ 0.04 ลิตรต่อนาที และระดับความสูงติดตั้งทรานสดิวเซอร์เท่ากับ 20 เซนติเมตร.....	46
4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างไฮลด์อัฟกับอัตราการไหลของภูมิภาคต่อเนื่อง ที่อัตราการไหลของภูมิภาคกระจายคงที่เท่ากับ 0.08 ลิตรต่อนาที และระดับความสูงติดตั้งทรานสดิวเซอร์เท่ากับ 20 เซนติเมตร.....	47
4.8 ความสัมพันธ์ของความเร็วรอบจานหมุนต่อค่าไฮลด์อัฟ เมื่ออัตราการไหลของภูมิภาคต่อเนื่องคงที่เท่ากับ 0.4 ลิตรต่อนาที และอัตราการไหลของภูมิภาคกระจายต่าง ๆ กัน ที่ระดับความสูงติดตั้งทรานสดิวเซอร์เท่ากับ 20 เซนติเมตร.....	48
4.9 ความสัมพันธ์ของความเร็วรอบจานหมุนต่อค่าไฮลด์อัฟ เมื่ออัตราการไหลของภูมิภาคกระจายคงที่เท่ากับ 0.04 ลิตรต่อนาที และอัตราการไหลของภูมิภาคต่อเนื่องต่าง ๆ กัน ที่ระดับความสูงติดตั้งทรานสดิวเซอร์เท่ากับ 20 เซนติเมตร.....	49
4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างระดับติดตั้งทรานสดิวเซอร์ และไฮลด์อัฟที่อัตราการไหลของภูมิภาคกระจายต่างๆ เมื่อให้อัตราการไหลของเฟสต่อเนื่องเท่ากับ 0.1 ลิตรต่อนาที และความเร็วรอบจานหมุนเท่ากับ 400 รอบต่อนาที.....	51
4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างระดับติดตั้งทรานสดิวเซอร์ และไฮลด์อัฟที่อัตราการไหลของภูมิภาคต่อเนื่องต่างๆกัน เมื่อให้อัตราการไหลของภูมิภาคกระจายคงที่เท่ากับ 0.08 ลิตรต่อนาที และความเร็วรอบจานหมุนเท่ากับ 400 รอบต่อนาที.....	52

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.1 ทิศทางการไหล และการสะสมตัวของหยดวิฎภาคกระจายบริเวณวงแหวนสถิต และจานหมุน.....	59
5.2 ทิศทางการไหล และการสะสมตัวของหยดวิฎภาคกระจายเมื่อเกิดสภาพความปั่นป่วนในคอลัมน์สกัดแบบจานหมุน.....	60
5.3 ความสัมพันธ์ระหว่างไฮลด์อัฟ และอัตราการไหลของวิฎภาคต่อเนื่องต่อวิฎภาคกระจาย.....	61
5.4 ความสัมพันธ์ระหว่างไฮลด์อัฟที่ได้จากการทดลอง และไฮลด์อัฟที่ได้จากการคำนวณ.....	62



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

- C_1 = ความเร็วเสียงในวัสดุภาควัสดุที่ 1 (เมตรต่อวินาที)
 C_2 = ความเร็วเสียงในวัสดุภาควัสดุที่ 2 (เมตรต่อวินาที)
 C^* = ความเร็วเสียงในวัสดุภาควัสดุกระจาย (เมตรต่อวินาที)
 r^2 = สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์
 t_1 = เวลาเดินทางของคลื่นในวัสดุที่ 1 (ไมโครวินาที)
 t_2 = เวลาเดินทางของคลื่นในวัสดุภาควัสดุที่ 2 (ไมโครวินาที)
 t^* = เวลาเดินทางของคลื่นในวัสดุภาควัสดุผสม (ไมโครวินาที)
 ϕ = โพลต์ออฟของวัสดุภาควัสดุกระจาย
 L = ระยะทางระหว่างทรานสดิวเซอร์ (เซนติเมตร)
 U_i = ความเร็วปลายของหยดวัสดุภาควัสดุกระจายในวัสดุภาควัสดุต่อเนื่อง
 D_p = เส้นผ่านศูนย์กลางกลางของหยดวัสดุภาควัสดุกระจาย
 Z_c = ความสูงของแต่ละคอมพาร์ทเมนต์ในคอลัมน์สกัดแบบจานหมุน
 dr = เส้นผ่านศูนย์กลางกลางของจานหมุน
 dc = เส้นผ่านศูนย์กลางกลางของคอลัมน์
 ds = เส้นผ่านศูนย์กลางกลางของวงแหวนสถิต
 ρ_p = ความหนาแน่นของหยดวัสดุภาควัสดุกระจาย
 ρ = ความหนาแน่นของวัสดุภาควัสดุต่อเนื่อง
 μ = ความหนืด (cP)
r.p.m. = ความเร็วรอบของจานหมุน (รอบต่อวินาที)
RDC = เครื่องสกัดแบบจานหมุน
dis = วัสดุภาควัสดุกระจาย
cont = วัสดุภาควัสดุต่อเนื่อง

บทที่ 1

บทนำ



การสกัดด้วยตัวทำละลายเป็นกระบวนการทางอุตสาหกรรมเคมี และอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องที่สำคัญอย่างหนึ่ง เพื่อแยกสารที่ต้องการออกจากของผสม ปัจจัยสำคัญในการควบคุมและวิเคราะห์กระบวนการสกัด คือความสามารถในการควบคุมสัดส่วนไฮลด์อัฟของวัฏภาคกระจายให้เหมาะสม การวิเคราะห์กระบวนการสกัดแบบของเหลว-ของเหลว มีความเกี่ยวข้องกับพื้นที่ระหว่างผิวในการถ่ายโอนมวลสารซึ่งเป็นข้อมูลที่ได้จากค่าไฮลด์อัฟของวัฏภาคกระจาย และการกระจายขนาดหยดของวัฏภาคกระจาย เทคนิคอัลตราโซนิกเป็นเทคนิคหนึ่งที่ถูกนำมาใช้เพื่อการประมาณค่าไฮลด์อัฟของวัฏภาคกระจาย ภายใต้ภาวะคงตัวและไม่คงตัว โดยการวัดเวลาเดินทางของกลุ่มคลื่นอัลตราโซนิก ที่มีความแตกต่างกันเมื่อส่งผ่านคอลัมน์สกัดที่มีปริมาณไฮลด์อัฟไม่เท่ากัน เทคนิคนี้ใช้อุปกรณ์ที่มีการตอบสนองอย่างรวดเร็ว และไม่เข้าไปสัมผัสกับสารในคอลัมน์ ดังนั้นวิธีการนี้จึงไม่เข้าไปรบกวนการทำงานของกระบวนการสกัด จากแนวความคิดในการที่จะปรับปรุงหรือเพิ่มประสิทธิภาพในกระบวนการสกัดนี้ นำไปสู่การเลือกเอาเทคโนโลยีทางด้านอัลตราโซนิกมาประยุกต์ในกระบวนการสกัด โดยเทคนิคนี้จะเป็นอีกวิธีการหนึ่งที่จะนำมาใช้เพื่อติดตามไฮลด์อัฟของวัฏภาคกระจายที่เกิดขึ้นภายในคอลัมน์สกัด เนื่องจากไฮลด์อัฟของวัฏภาคกระจายเป็นปัจจัยหนึ่งที่มีผลโดยตรงต่อประสิทธิภาพการสกัดสาร ที่จะบ่งชี้และเกี่ยวข้องกับพื้นที่ในการถ่ายโอนมวลสาร เพื่อจะได้นำมาพัฒนาประสิทธิภาพในการสกัดสารให้มีประสิทธิภาพสูงสุด ช่วยทำให้เกิดความคุ้มค่าในการใช้พลังงานได้อีกทางหนึ่งด้วย

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. ศึกษาวิธีการนำเอาเทคนิคอัลตราโซนิกมาใช้ เพื่อหาค่าไฮลด์อัฟภายในคอลัมน์สกัดแบบจานหมุนด้วยเทคนิคอัลตราโซนิก
2. ศึกษารูปแบบและการวัดค่าไฮลด์อัฟของวัฏภาคกระจายในคอลัมน์สกัดแบบจานหมุน เพื่อสร้างความสัมพันธ์ของค่าไฮลด์อัฟที่เกิดขึ้นภายในคอลัมน์สกัดแบบจานหมุน

ขอบเขตของการวิจัย

เป็นการศึกษาการนำเอาเทคนิคอัลตราโซนิกมาใช้ เพื่อหาค่าไฮลด์อัฟภายในคอลัมน์สีกัดแบบจานหมุนด้วยอัลตราโซนิกทรานสดิวเซอร์ ซึ่งได้มีการสอบเทียบความถูกต้องนำเชื้อถื้อของอุปกรณ์อัลตราโซนิกทรานสดิวเซอร์ ด้วยการวัดค่าความเร็วคลื่นอัลตราโซนิกของสารเคมีต่างๆ แล้วเทียบกับค่ามาตรฐานทั่วไป จากนั้นตรวจสอบค่าไฮลด์อัฟที่ได้ด้วยการทำวิธีวัดปริมาตรโดยตรงเทียบกับวิธีวัดค่าไฮลด์อัฟด้วยเทคนิคอัลตราโซนิกในคอลัมน์สีกัดแบบจานหมุนขนาดย่อยส่วน เพื่อตรวจสอบความถูกต้องและนำเชื้อถื้อของค่าไฮลด์อัฟที่วัดได้ เพื่อนำไปสู่การวัดค่าไฮลด์อัฟในคอลัมน์สีกัดแบบจานหมุนต่อไป

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัย

สามารถประมาณค่าไฮลด์อัฟของภูมิภาคกระจายในระบบการสีกัดต่างๆ ด้วยเทคนิคอัลตราโซนิกในคอลัมน์สีกัดแบบจานหมุน โดยไม่รบกวนระบบการสีกัดและนำเทคนิคที่ได้ไปประยุกต์สำหรับระบบควบคุมการทำงานของคอลัมน์สีกัดสาร

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2

วารสารปริทัศน์

2.1 การวัดค่าโฮลด์อัฟ (Hold-up Measurements) (Euzen J.P., et al, 1993)

โฮลด์อัฟ (ϕ) หมายถึง สัดส่วนปริมาตรที่เป็นของแต่ละวัฏภาคในภาชนะปิด เครื่องปฏิกรณ์ หรือในท่อ (line) ค่าของโฮลด์อัฟของวัฏภาคที่แตกต่างกันในปริมาตรที่กำหนดให้ มีความสัมพันธ์ตามสมการดังนี้

$$\phi_p + \phi_L + \phi_G = 1 \quad (1)$$

หรือในรูปทั่วไปคือ

$$\sum \phi_i = 1 \quad (2)$$

เมื่อ ϕ_p ϕ_L ϕ_G และ ϕ_i หมายถึง โฮลด์อัฟของอนุภาค วัฏภาคของเหลว วัฏภาคของแก๊ส และวัฏภาค i ตามลำดับ ตัวห้อย i สำหรับวัฏภาคที่เป็นแก๊ส ของเหลว และอนุภาคของแข็งที่ทำปฏิกิริยา อนุภาคของของแข็งเฉื่อย (inert solid) และอื่นๆ จากความสัมพันธ์ดังกล่าว ทำให้สามารถหาค่าโฮลด์อัฟของวัฏภาคที่ไม่ทราบได้ เมื่อทราบค่าโฮลด์อัฟของวัฏภาคที่เหลือ

โฮลด์อัฟเป็นสิ่งที่เป็ประโยชน์เพื่อทราบถึงสัดส่วนของแต่ละวัฏภาค เช่น สัดส่วนโดยปริมาตรของวัฏภาคที่ทำปฏิกิริยา หรืออนุภาคตัวเร่งปฏิกิริยาในเครื่องปฏิกรณ์ สัดส่วนช่องว่างของแพกกิง สัดส่วนของวัฏภาคแก๊สในระบบสองวัฏภาค และอื่นๆ นอกจากนี้ ยังเป็นประโยชน์ในการกำหนดลักษณะทางอากาศพลศาสตร์ ไฮโดรไดนามิกส์ พื้นที่รอยต่อระหว่างผิว ความดันลด การไหล สัมประสิทธิ์การถ่ายโอน และอื่นๆ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีวิธีที่น่าเชื่อถือได้สำหรับการวัดโฮลด์อัฟรวม (total or overall hold-up) และ โฮลด์อัฟเฉพาะตำแหน่ง (local hold-up) ซึ่งโฮลด์อัฟรวม หมายถึงสัดส่วนปริมาตรของวัฏภาคที่สนใจต่อปริมาตรทั้งหมด ส่วนโฮลด์อัฟเฉพาะตำแหน่ง หมายถึง สัดส่วนปริมาตรของวัฏภาคที่สนใจต่อปริมาตรรวมของทุกวัฏภาคเฉพาะตำแหน่งนั้นๆ

สังเกตว่าอัตราส่วนของอัตราการป้อนของวัฏภาคที่แตกต่างกันในภาชนะ โดยทั่วไปแล้วแตกต่างจากอัตราส่วนโดยปริมาตรที่ครอบครองไว้โดยวัฏภาคเหล่านี้ในภาชนะ ที่ภาวะคงตัว

(steady-state) อัตราส่วนทั้งสองนี้อาจมีค่าเท่ากันเมื่อทุกวัฏภาคมีความเร็วเชิงเส้นเหมือนกัน หรือ มีการกวนผสมอย่างสมบูรณ์ในเครื่องปฏิกรณ์

มีบางเทคนิคที่สามารถใช้วัดไฮลด์อัฟได้หลายวัฏภาค ทั้งการวัดไฮลด์อัฟของวัฏภาคของของเหลว (L) วัฏภาคของแก๊ส (G) หรือแม้แต่ในวัฏภาคของของแข็ง (S) ดังแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ชุดของวิธีการวัดไฮลด์อัฟสำหรับระบบหลายวัฏภาค

วิธี	ตัวกลาง →	S+G	S+L	L+L	L+G	S+L+G
วัดไฮลด์อัฟรวม	วัดความจุ	*	*	*	*	/
	ปริมาตรหรือน้ำหนัก	**	**	*	**	**
	ความดัน	**	*	*	**	/
	รังสีแกมมา	**	*	?	**	/
	วัดเชิงแสง	*	*	*	*	/
วัดไฮลด์อัฟเฉพาะตำแหน่ง	วัดเชิงแสง	**	*	**	**	?
	ไฟฟ้า	?	*	*	**	/

สัญลักษณ์ : ** อุดมคติ (ideal), * เป็นไปได้ (possible), ? ยังเป็นปัญหาอยู่, / วิธีการวัดเพียงวิธีเดียวยังไม่เพียงพอ S คือวัฏภาคของแข็ง L คือวัฏภาคของเหลว และ G คือวัฏภาคแก๊ส

จากตารางที่ 2.1 วิธีการวัดไฮลด์อัฟโดยการวัดปริมาตรหรือน้ำหนักเป็นวิธีที่สามารถใช้ได้กับตัวกลางหลายวัฏภาคได้ดี แต่วิธีทั้งสองนี้เป็นวิธีที่ทำได้ยากและไม่มีความสะดวกในทางปฏิบัติ อีกทั้งยังเป็นเทคนิคที่เข้าไปรบกวนระบบในขณะที่ทำการวัดอีกด้วย นอกจากนี้ยังมีปัจจัยอื่นๆที่มีความเกี่ยวข้องกับระบบ โดยวิธีในอุดมคติต้องเลือกให้เป็นไปตามพารามิเตอร์ต่างๆ เช่น ชนิดของวิธีการวัดว่าเป็นการวัดไฮลด์อัฟรวม หรือเฉพาะตำแหน่ง เป็นการวัดไฮลด์อัฟแบบต่อเนื่องหรือกึ่งต่อเนื่อง (intermittent) หรือว่าเป็นการวัดที่ภาวะคงตัวหรือภาวะในขณะใดขณะหนึ่ง รวมถึงอุณหภูมิและความดันในการปฏิบัติการ การบำรุงรักษาภายนอก และเงื่อนไขความปลอดภัย เป็นต้น

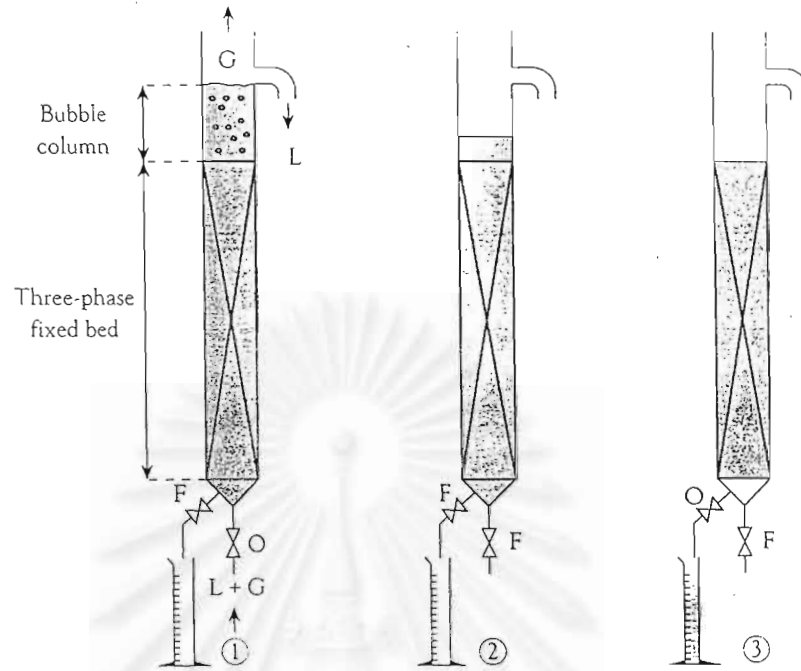
2.2 การวัดไฮลด์อัฟของวัฏภาคของเหลว

การวัดไฮลด์อัฟของวัฏภาคของเหลว ขึ้นอยู่กับสัดส่วน และสมบัติของวัฏภาคที่มีอยู่ รวมทั้งวัฏภาคแก๊ส ของแข็ง และภาวะในการปฏิบัติการ ของเหลวที่อยู่ในเครื่องปฏิกรณ์อาจมีการเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระ และเคลื่อนที่ได้ทุกแห่ง อาจถูกกักเก็บไว้ในโพรงของอนุภาคหรือขวางเอาไว้เนื่องมาจากความคดเคี้ยว ดังนั้นในกรณีนี้ไฮลด์อัฟของของเหลวอาจแสดงในรูปของไฮลด์อัฟรวม ไฮลด์อัฟแบบพลวัต (dynamics) และไฮลด์อัฟภายในอนุภาค

ประโยชน์ของไฮลด์อัฟของวัฏภาคของเหลว คือเพื่อกำหนดพฤติกรรมของตัวกลางและลักษณะการไหล (flow regimes) และเพื่อทำนายความดันลด และกลไกในการถ่ายโอนในเครื่องสกัดหลายๆชนิด ซึ่งมีวิธีในการกำหนดค่าไฮลด์อัฟของของเหลวโดยการทำการทดลอง วิธีหนึ่งที่น่ามาใช้ คือเทคนิคอัลตราโซนิกโดยการใช่มัลติเพล็กซ์เซอร์ (multiplexer) และชุดของตัวรับ-ตัวส่งคลื่นอัลตราโซนิก ที่วางในตำแหน่งที่ตรงกันคนละข้างของคอลัมน์สกัดเพื่อช่วยในการวัดหลายๆตำแหน่งตลอดคอลัมน์ วิธีนี้เป็นเทคนิคการวัดที่มีความรวดเร็วในการหาโพรไฟล์ของวัฏภาคของเหลว (Tsouris et al, 1990) วิธีการนี้ยังช่วยในการทำนาย และควบคุมการเกิดการท่วม (flooding) ของคอลัมน์สกัดในระดับห้องปฏิบัติการอีกด้วย ยังมีวิธีการวัดอีกหลายวิธีตั้งแต่ระดับที่ง่ายไปจนถึงระดับที่มีความซับซ้อนในการวัดไฮลด์อัฟของวัฏภาคของเหลว เช่นวิธีการวัดไฮลด์อัฟของของเหลวโดยการวัดปริมาตร การวัดไฮลด์อัฟของของเหลวโดยการวัดน้ำหนัก การวัดไฮลด์อัฟของของเหลวโดยใช้ตัวตามรอยของเหลว การวัดไฮลด์อัฟของของเหลวโดยเทคนิคอัลตราโซนิก และการวัด ไฮลด์อัฟของของเหลวโดยการใช่วัสดุสีแกมมา เป็นต้น

2.2.1 การวัดไฮลด์อัฟของของเหลวโดยการวัดปริมาตร

การวัดปริมาตรไฮลด์อัฟของของเหลวในคอลัมน์หรือเครื่องปฏิกรณ์ที่มีหลายวัฏภาคในการแยกของเหลวที่มีอยู่ในภาชนะที่ทดสอบ และในการวัดปริมาตรของของเหลว การวัดนี้เป็นวิธีที่มีหลักการที่ง่าย เนื่องจากเป็นการวัดในภาวะแบบคงตัว และทราบปริมาตรของของเหลวที่มี ตัวอย่างของการนำไปประยุกต์ เช่นใน bubble column ดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 การวัดโวลุ่มของของเหลวโดยการวัดปริมาตร (Euzen J.P., et al.,1993)

จากรูปที่ 2.1 ในขั้นตอนที่ 1 ปิดวาล์วเก็บตัวอย่างของเหลว แล้วเปิดวาล์วทางด้านล่าง เพื่อป้อนปริมาณของเหลวและแก๊สเข้าสู่คอลัมน์ ซึ่งปริมาณของเหลวและแก๊สนี้จะเคลื่อนที่ขึ้นไปทางด้านบนของคอลัมน์ โดยปริมาณแก๊สจะลอยออกไปจากคอลัมน์ทางด้านบน ส่วนปริมาณของเหลวจะถูกปล่อยไหลลงทางด้านข้างเหนือระดับผิวหน้าของ bubble column ในขั้นตอนที่ 2 ปิดวาล์วป้อนสารแล้วปล่อยให้ระบบเข้าสู่ภาวะคงตัว ในขั้นตอนที่ 3 เปิดวาล์วเพื่อปล่อยตัวอย่างของเหลวจนระดับของเหลวถึงผิวหน้าของเบดนิ่ง (fixed bed) ลงในกระบอกตวง แล้ววัดปริมาตรเพื่อนำไปหาโวลุ่มต่อไป

ข้อดีของวิธีการวัดโวลุ่มของของเหลวโดยการวัดปริมาตร

1. เป็นวิธีการวัดที่ง่าย ไม่ซับซ้อนเพื่อใช้ในการประมาณค่าโวลุ่มเบื้องต้น
2. สำหรับระบบขนาดใหญ่จะมีความถูกต้องดีพอสมควร ถ้าสามารถจัดปัจจัยรบกวนลงได้

ข้อเสียของวิธีการวัดโวลุ่มของของเหลวโดยการวัดปริมาตร

1. ไม่สามารถใช้กับระบบต่อเนื่อง หรือระบบที่มีความดันอากาศมาเกี่ยวข้อง
2. ใช้เวลาในการวัดค่อนข้างมาก

2.2.2 การวัดไฮลด์อัฟของของเหลวโดยการชั่งน้ำหนัก

วิธีการวัดไฮลด์อัฟโดยอาศัยการชั่งน้ำหนัก คือการชั่งน้ำหนักของคอลัมน์หรือเครื่องปฏิกรณ์อย่างต่อเนื่อง เพื่อชั่งน้ำหนักของของเหลวในขณะนั้น ทำให้ทราบปริมาณของของเหลวในขณะนั้น โดยไฮลด์อัฟของของเหลวสามารถหาได้จากความสัมพันธ์ ดังนี้

$$\phi_L = \frac{W - W_1}{W_2 - W_1} \quad (3)$$

เมื่อ W_1 คือน้ำหนักของคอลัมน์ในตอนที่ไม่มีของเหลวอยู่ในคอลัมน์

W_2 คือน้ำหนักของคอลัมน์เมื่อมีของเหลว

W คือน้ำหนักของคอลัมน์ในภาวะคงตัว

ข้อดีของวิธีการวัดไฮลด์อัฟของของเหลวโดยการชั่งน้ำหนัก

1. สามารถวัดน้ำหนักของของเหลวที่ป้อนเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์ได้อย่างต่อเนื่อง
2. ให้ความถูกต้องที่ดีเนื่องจากมีความผิดพลาดน้อยกว่าร้อยละ 1

ข้อเสียของวิธีการวัดไฮลด์อัฟของของเหลวโดยการวัดน้ำหนัก

1. ไม่สามารถวัดไฮลด์อัฟเฉพาะตำแหน่งได้
2. ความถูกต้องของวิธีนี้ขึ้นอยู่กับข้อจำกัดของการชั่งน้ำหนักของของเหลวในเครื่องปฏิกรณ์ การเปลี่ยนแปลงของน้ำหนักของของเหลวที่มีมาก ให้ความถูกต้องลดลง
3. ไม่เหมาะสมในการนำไปใช้งานในทางปฏิบัติ โดยเฉพาะระบบที่คอลัมน์มีขนาดใหญ่

2.2.3 การวัดไฮลด์อัฟของของเหลวโดยใช้ตัวตามรอยของเหลว (Liquid Tracer)

การวัดไฮลด์อัฟของของเหลวโดยใช้ตัวตามรอยของเหลวนี้ เป็นการวัดเวลาทั้งหมด (residence time distribution RTD) ของตัวตามรอยของเหลวที่ใช้เดินทางไปพร้อมกับของเหลวหรือระบบที่ต้องการวัดไฮลด์อัฟ และนำมาใช้ประโยชน์ในการกำหนด หรือหาลักษณะเฉพาะทางไฮโดรไดนามิกส์ของการไหลของของเหลว

หลังจากการฉีดตัวตามรอยของเหลว เช่น โพแทสเซียมคลอไรด์ (KCl) เข้าไปพร้อมกับระบบของเหลว ความเข้มข้นของตัวตามรอยของเหลวในกระแสของเหลวสามารถติดตามการ

เปลี่ยนแปลงของเวลาที่ทางเข้า (inlet) และทางออก (outlet) ของระบบของเหลวได้ ทำให้ทราบเวลาที่ใช้ (RTD) ของตัวตามรอยของเหลวเป็นเวลาที่ใช้เฉลี่ย (average residence time) ของของเหลว เพื่อนำไปใช้ในการประมาณไฮลด์อัฟพร้อมได้จากสมการ ดังนี้

$$\phi_L = \frac{t_m \cdot VSL}{H} \quad (4)$$

เมื่อ ϕ_L = ไฮลด์อัฟของของเหลว

t_m = เวลาที่ใช้ทั้งหมดโดยเฉลี่ยของของเหลว (วินาที)

H = ความสูงระหว่างจุดวัดทั้งสองจุด (เมตร)

VSL = superficial velocity of liquid (เมตรต่อวินาที)

$$= Q/S$$

Q = อัตราการไหลเชิงปริมาตรของของเหลว (ลบ.ม. ต่อวินาที)

S = พื้นที่ภาคตัดขวางของเครื่องปฏิกรณ์ (ตารางเมตร)

ข้อดีของวิธีการวัดไฮลด์อัฟของของเหลวโดยใช้ตัวตามรอยของเหลว

1. ทำได้ง่าย มีความยืดหยุ่น และมีความถูกต้องสูงพอสมควรตามการวัด residence time
2. สามารถใช้วิธีการนี้ภายใต้ภาวะที่มีความดัน

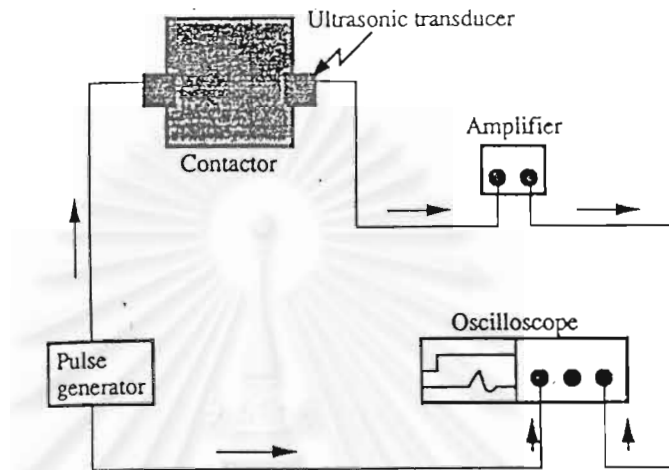
ข้อเสียของวิธีการวัดไฮลด์อัฟของของเหลวโดยใช้ตัวตามรอยของเหลว

1. ไม่สามารถวัดไฮลด์อัฟเฉพาะตำแหน่งได้
2. เป็นการวัดแบบไม่ต่อเนื่องจึงใช้เวลาค่อนข้างมากในการวัด
3. การฉีดตัวตามรอยเหลวที่ไม่สม่ำเสมอ ทำให้การวัด residence time และผลที่ได้มีความคลาดเคลื่อนจากความเป็นจริง
4. ตัวตามรอยของเหลวที่ต้องมีสมบัติคล้ายกับวัฏภาคที่ต้องการวัดไฮลด์อัฟค่อนข้างหาได้ยาก

2.2.4 การวัดไฮลด์อัฟของของเหลวด้วยเทคนิคอัลตราโซนิก (Bonnet J.C. and Tavlarides L.L., 1987)

การวัดไฮลด์อัฟของวัฏภาคของเหลวด้วยเทคนิคอัลตราโซนิก เป็นวิธีการนำคลื่นอัลตราโซนิกมาประยุกต์ในการวัดไฮลด์อัฟ โดยการวัดด้วยเทคนิคนี้เป็นการวัดเวลาที่คลื่นดล

(pulse) ใช้ในการเดินทาง (transit time) ผ่านสารผสมที่อยู่ในคอนดั้มนัสกัต (contactor) ดังแสดงในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 เทคนิคอัลตราโซนิกเพื่อใช้ในการวัดเวลาเดินทางของคลื่นอัลตราโซนิกในคอนดั้มนัสกัต (Tsouris C. and Tavlarides L.L., 1993)

จากรูปที่ 2.2 เทคนิคนี้เริ่มต้นจากเครื่องกำเนิดคลื่นดล (pulse generator) ให้กำเนิดคลื่นดลไฟฟ้า (electrical pulse) เพื่อส่งไปกระตุ้นให้อัลตราโซนิกทรานสดิวเซอร์ตัวส่ง (transmitter) ทำงานและคลื่นดลไฟฟ้าเดียวกันนี้ก็ถูกส่งไปที่ออสซิลโลสโคป (oscilloscope) ช่องที่ 1 โดยอัลตราโซนิกทรานสดิวเซอร์ตัวส่ง จะเปลี่ยนสัญญาณของคลื่นดลไฟฟ้าไปเป็นคลื่นกลหรือคลื่นอัลตราโซนิก แล้วเดินทางผ่านคอนดั้มนัสกัตและสารบริสุทธิ์หรือสารผสมที่อยู่ในคอนดั้มนัสกัต จากนั้นอัลตราโซนิกทรานสดิวเซอร์ตัวรับ (receiver) ที่ติดอยู่กับผนังคอนดั้มนัสกัตตรงข้ามในแนวเดียวกันกับอัลตราโซนิกทรานสดิวเซอร์ตัวส่งซึ่งจะทำหน้าที่เปลี่ยนคลื่นอัลตราโซนิกให้เป็นสัญญาณไฟฟ้า โดยสัญญาณไฟฟ้านี้จะถูกขยายก่อนส่งไปที่ออสซิลโลสโคปช่องที่ 2 จากนั้นเปรียบเทียบสัญญาณคลื่นที่ปรากฏในออสซิลโลสโคปทั้งสองช่อง จะได้เวลาที่คลื่นอัลตราโซนิกใช้เดินทางผ่านสารบริสุทธิ์หรือสารผสมที่มีวัฏภาคต่อเนื่อง และวัฏภาคกระจายในคอนดั้มนัสกัตที่ทำการวัดนั้น เวลาที่

ได้จากการวัดนี้สามารถนำมาสร้างเป็นความสัมพันธ์ที่เรียกว่า Time-average model (Bonnet J.C. and Tavlarides L.L., 1987) ดังนี้

$$\phi = \frac{t^* - t_1}{t_2 - t_1} \quad (5)$$

เมื่อ ϕ คือไฮลด์อัฟของภูมิภาคกระจาย

t_1 คือเวลาเดินทางของคลื่นอัลตราโซนิกในภูมิภาคบริสุทธิ์ที่ 1 (ไมโครวินาที)

t_2 คือเวลาเดินทางของคลื่นอัลตราโซนิกในภูมิภาคบริสุทธิ์ที่ 2 (ไมโครวินาที)

t คือเวลาเดินทางของคลื่นอัลตราโซนิกในภูมิภาคผสม (ไมโครวินาที)

ข้อดีของวิธีการวัดไฮลด์อัฟด้วยเทคนิคอัลตราโซนิก

1. สามารถวัดไฮลด์อัฟได้โดยไม่เข้าไปรบกวนกระบวนการสกัดภายในคอลัมน์สกัด
2. เป็นเทคนิคที่วัดไฮลด์อัฟได้รวดเร็ว และเป็นวิธีการที่ง่าย
3. สามารถวัดไฮลด์อัฟเฉพาะตำแหน่งได้

ข้อเสียของวิธีการวัดไฮลด์อัฟด้วยเทคนิคอัลตราโซนิก

1. ต้องใช้อัลตราโซนิกทรานสดิวเซอร์ที่มีความถี่สูงเพื่อขจัดปัจจัยที่มารบกวนคลื่นอัลตราโซนิก ซึ่งอัลตราโซนิกที่มีความถี่สูงขึ้นจะมีราคาแพงมากขึ้น

2.2.5 การวัดไฮลด์อัฟของของเหลวโดยการใช้อยูรีเนียมแกมมา (Gammametry)

วิธีการนี้เป็นการตรวจวัดยูรีเนียมแกมมาที่ภูมิภาคของเหลวดูดซับไว้ เพื่อสามารถนำไปใช้ในการหาสัดส่วนความเข้มข้นของการแผ่รังสีแกมมาที่ของเหลวดูดซับรังสีไว้ โดยทั่วไปจะใช้ธาตุซีเซียม ^{137}Cs เป็นธาตุที่ให้กำเนิดรังสีแกมมา ความเข้มข้นของการแผ่รังสีแกมมานี้สามารถนำมาสร้างเป็นความสัมพันธ์ตามสมการ ดังนี้

$$I = I_0 \cdot e^{-a \cdot l} \quad (6)$$

หรือ

$$\ln(I/I_0) = -a \cdot l \quad (7)$$

- เมื่อ I คือความเข้มข้นของการแผ่รังสีแกมมาที่ทางออกของตัวกลาง
 I_0 คือความเข้มข้นของการแผ่รังสีแกมมาที่ทางเข้าของตัวกลาง
 a คือสัมประสิทธิ์การดูดซับของตัวกลาง
 l คือระยะทางที่เดินทางได้ของรังสีแกมมาในตัวกลาง

เมื่อไม่มีภูมิภาคของแข็งอยู่ในเครื่องปฏิกรณ์ ไฮลด์อัฟของของเหลวจากการใช้รังสีแกมมาสามารถหาได้จากความสัมพันธ์ดังนี้

$$\phi_L = \frac{\ln(I_1 / I)}{\ln(I_1 / I_2)} \quad (8)$$

- เมื่อ I คือความเข้มข้นของการแผ่รังสีแกมมาที่ทางออกของภูมิภาคผสมที่มีสองภูมิภาค
 I_1 คือความเข้มข้นของการแผ่รังสีแกมมาที่ทางออกของภูมิภาคบริสุทธิ์ที่ 1
 I_2 คือความเข้มข้นของการแผ่รังสีแกมมาที่ทางออกของภูมิภาคบริสุทธิ์ที่ 2

ข้อดีของวิธีการวัดไฮลด์อัฟของของเหลวโดยการใช้รังสีแกมมา

1. เป็นวิธีการวัดที่ไม่เข้าไปรบกวนระบบของตัวกลางที่วัดอย่างแท้จริง
2. สามารถวัดไฮลด์อัฟของของเหลวได้อย่างต่อเนื่อง ในการปฏิบัติการที่ภาวะคงตัว

ข้อเสียของวิธีการวัดไฮลด์อัฟของของเหลวโดยการใช้รังสีแกมมา

1. เป็นวิธีที่ทำได้ยาก และต้องลงทุนสูง
2. ต้องคำนึงถึงความปลอดภัยในการทำการทดลองเนื่องมาจากการใช้รังสีแกมมา

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.3 คลื่นอัลตราโซนิก (Ultrasonics Wave) (Kuffruff, 1991)

คลื่นอัลตราโซนิกเป็นการสั่นของคลื่นที่มีความถี่เหนือกว่าช่วงของการได้ยินของหูปกติของมนุษย์ โดยทั่วไปแล้วหมายถึงคลื่นที่มีความถี่ตั้งแต่ 20 กิโลเฮิร์ตซ์ (kilohertz, kHz) แต่ถ้าคลื่นเสียงที่มีความถี่สูงกว่า 1 จิกะเฮิร์ตซ์ (gigahertz, GHz) จะเรียกว่าไฮเปอร์ซาวนด์ (hypersound) อย่างไรก็ตามช่วงความถี่ปกติที่ใช้กับการทดสอบแบบไม่มีความเสียหาย (non-destructive testing) ด้วยคลื่นอัลตราโซนิก และการวัดความหนาของวัสดุ (thickness gaging) คือช่วงความถี่ตั้งแต่ 100 กิโลเฮิร์ตซ์ ถึง 50 เมกะเฮิร์ตซ์ (megahertz, MHz)

ในบางครั้งคลื่นอัลตราโซนิกที่มีแอมพลิจูดสูงจะหมายถึง โซนิค (sonic) ซึ่งในช่วงความถี่ที่ต่ำที่สุดความยาวคลื่นของคลื่นอัลตราโซนิกในของแข็งมีค่าประมาณ 8 นิ้ว ในของเหลวประมาณ 2.4 นิ้ว และในอากาศมีค่า 0.63 นิ้ว สำหรับในช่วงที่มีความถี่สูงสุด ค่าความยาวคลื่นจะเข้าใกล้ค่าดังนี้ คือ สำหรับของแข็งมีค่าประมาณ 3.2×10^4 นิ้ว ในของเหลวมีค่าประมาณ 1×10^4 นิ้ว และในแก๊สมีค่าเป็น 0.24×10^4 นิ้ว เป็นไปได้ว่าคลื่นที่มีความถี่สูงกว่า และมีความยาวคลื่นสั้นกว่าจะสามารถทำขึ้นได้ในอนาคต (Benson C., 1960)

คลื่นอัลตราโซนิกได้กลายมาเป็นส่วนสำคัญในหลายสาขา (Benson C., 1960) ลักษณะของคลื่นชนิดนี้ได้ถูกนำมาประยุกต์กันอย่างกว้างขวางในอุตสาหกรรม ได้แก่การรับและส่งสัญญาณทางด้านการแพทย์หรือที่เรียกว่าการตรวจอัลตราซาวนด์ การควบคุมระบบแบบอัตโนมัติด้วยคลื่นอัลตราโซนิก และอีกหลายๆด้านที่มีการนำไปใช้ทางอุตสาหกรรมตั้งแต่ต้นทศวรรษ 1990 นี้ (Kuffruff, 1991)

คลื่นความถี่ 10 ถึง 100 กิโลเฮิร์ตซ์ ใช้สำหรับงานทางอุตสาหกรรม โดยนำไปใช้ในการวัดระยะทางที่เสียงเดินทาง การส่งสัญญาณ และการสื่อสาร คลื่นความถี่ 10 กิโลเฮิร์ตซ์ ถึง 20 เมกะเฮิร์ตซ์ นำมาใช้ในการทดสอบวัสดุที่มีจุดบกพร่องจากการผลิต การทดสอบสารเคมี การรักษาทางการแพทย์และอื่นๆ ความถี่ทั้งหมดมีความเหมาะสมสำหรับการตรวจสอบสมบัติทางกายภาพของวัสดุ สเปกตรัมที่สมบูรณ์กว่าของแต่ละช่วงความถี่ และปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นในช่วงความถี่นั้นๆ แสดงไว้ในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 แสดงอัลตราโซนิกสเปกตรัม

ความถี่ (กิโลเฮิรตซ์)	ปรากฏการณ์
ต่ำกว่า 1 กิโลเฮิรตซ์	โซนิคอัลติมิเตอร์ การนำร่องใต้น้ำ และใบพัดเรือ
16 – 20	เหนือกว่าขีดจำกัดการได้ยินโดยเฉลี่ยของมนุษย์ เป็นรอยต่อระหว่างเสียงและเหนือเสียง เป็นความถี่ทั่วไปของแมกนีโทสทริกชัน (magnetostriction) สำหรับการทำงานใต้น้ำ การส่งสัญญาณความถี่ต่ำใต้น้ำ รวมทั้งการเจาะ การทำความสะอาดในอุตสาหกรรม และนกหวีด
19.2	ระบบสัญญาณเตือนภัย สัญญาณป้องกันขโมย และอื่นๆ
25	ระบบอุปกรณ์ควบคุมอัลตราโซนิก การเปิดประตู และอื่นๆ
60	ขีดจำกัดในการปฏิบัติงานเนื่องจากแมกนีโทสทริกชัน, อุปกรณ์นำทางคนตาบอด
90	ขีดจำกัดสูงสุดสำหรับส้อมเสียง (turning fork)
120	ขีดจำกัดสำหรับนกหวีดแก๊สในอากาศ
500	ความถี่ปกติในอิมัลชัน และการกวน, ขีดจำกัดต่ำของการทดสอบการสั่นของวัสดุ และขีดจำกัดสูงของการส่งสัญญาณใต้น้ำ
1,000	ความถี่ปกติสำหรับทดสอบวัสดุที่มีโครงสร้างอย่างง่ายเป็นโลหะ
5,000 – 25,000	ความถี่ปกติสำหรับทดสอบวัสดุที่มีโครงสร้างอย่างละเอียด
15,000	เรดาร์ และการวัดการดูดกลืน (absorption measurements)
1,000,000	เป็นความถี่สูงสุดของคลื่นอัลตราโซนิกที่มีรายงานในปัจจุบัน

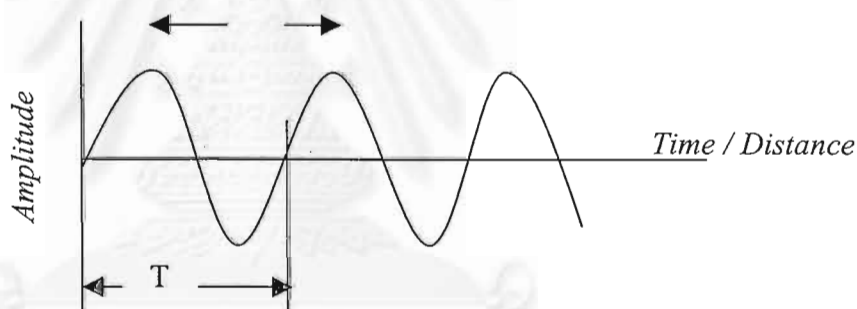
เนื่องจากคลื่นอัลตราโซนิกเป็นคลื่นที่มีความยาวคลื่นต่ำ จึงเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่ทำให้คลื่นอัลตราโซนิกนี้มีการนำไปใช้ในหลายๆ กรณี

2.4 การเคลื่อนที่ของคลื่นอัลตราโซนิก

คลื่นอัลตราโซนิกเป็นคลื่นรูปแบบหนึ่ง เกิดขึ้นได้จากการแทนที่ของอนุภาคของตัวกลางที่คลื่นเดินทางผ่าน (wave travels) คลื่นจะไม่สามารถเดินทางได้ถ้าปราศจากตัวกลาง ดังนั้นจึง

กล่าวได้ว่าตัวกลางเป็นสิ่งจำเป็นในการเดินทางหรือการส่งผ่านคลื่นอัลตราโซนิก วัสดุใดๆที่มีการสั่น (vibrate) จะใช้เป็นตัวกำเนิดคลื่นอัลตราโซนิกได้ รูปแบบของการเกิดนั้นเกิดได้โดยการแทนที่ของสารในตัวกลาง วัสดุยืดหยุ่นจะมีแรงดึงกลับ (restoring force) ซึ่งมีแนวโน้มที่จะนำวัสดุแต่ละชนิดกลับมาสู่ตำแหน่งเริ่มต้นของมัน เมื่อมีการเคลื่อนที่กลับไปกลับมาหรือเกิดการสั่นอย่างต่อเนื่อง จะทำให้คลื่นมีแอมพลิจูดลดลงตามลำดับด้วย แต่สมบัติของคลื่นอัลตราโซนิก เช่น ความถี่ยังคงไม่เปลี่ยนแปลง

การเคลื่อนที่ของสสารจากการสั่นของคลื่นอัลตราโซนิก (Panametrics, 1995) อยู่ในรูปของคลื่นเสียง แต่แตกต่างกับคลื่นแสงซึ่งสามารถเคลื่อนที่ในสุญญากาศได้ ในขณะที่อัลตราโซนิกต้องการตัวกลางที่มีความยืดหยุ่นได้ เช่นของเหลว หรือของแข็ง ดังรูป 2.3 แสดงความยาวคลื่น (λ) และคาบ (period, T) ของคลื่นต่อเนื่องที่ครบรอบ



รูปที่ 2.3 แสดงรูปคลื่นอัลตราโซนิก

จำนวนรอบที่คลื่นเคลื่อนที่ครบรอบในเวลา 1 วินาที เรียกว่า ความถี่ (frequency, f) และมีหน่วยเป็นเฮิรตซ์ (Hz) โดย 1 รอบต่อวินาทีหมายถึง 1 เฮิรตซ์ เวลาที่ต้องการเพื่อให้คลื่นเดินทางครบรอบเรียกว่า คาบ (period, T) มีหน่วยเป็นวินาที โดยความสัมพันธ์ระหว่างความถี่และคาบ ในคลื่น ต่อเนื่อง กำหนดได้ดังสมการ

$$f = 1/T \quad (9)$$

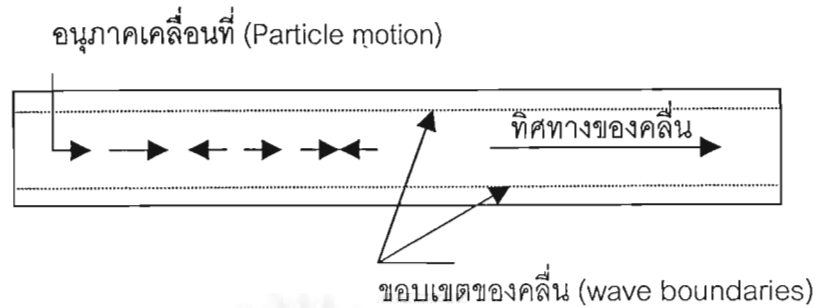
2.5 ชนิดของคลื่นอัลตราโซนิก (Types of ultrasonic waves)

คลื่นอัลตราโซนิกที่ส่งผ่านวัสดุต่างๆ มีหลายรูปแบบ แต่ละแบบเป็นเหตุให้เกิดการเคลื่อนที่จำเพาะในสสารของตัวกลาง และเส้นทางในการเคลื่อนที่ของสสารเหล่านี้เดินทางเหมือนกับเคลื่อนไปในทิศทางที่ตอบสนองกับคลื่น เรียกว่าเป็นวงโคจรของคลื่น วงโคจรเหล่านี้อาจจะขนานกับทิศทางของการเคลื่อนที่ของคลื่น ในกรณีนี้เรียกคลื่นนี้ว่า คลื่นตามยาว (longitudinal waves) ในทางกลับกันอาจตัดกับทิศทางของการเคลื่อนที่ของคลื่น เรียกคลื่นชนิดนี้ว่า คลื่นตามขวาง (transverse or shear waves) คลื่นเหล่านี้อาจเดินทางภายในระยะทางอันสั้นบนพื้นผิว เรียกคลื่นแบบนี้ว่า คลื่นพื้นผิว (surface waves) ในเยื่อบางๆ เช่นไดอะแฟรม (diaphragm) อาจเกิด flexural waves ปรากฏอยู่ด้วยเช่นเดียวกัน การเคลื่อนไหวของอนุภาคก็มีลักษณะคล้ายคลึงกับคลื่นตามขวาง หรือคลื่นพื้นผิว แต่ขยายผ่านทะลุตัวกลาง ในบางครั้งอธิบายเรื่องคลื่นบนพื้นฐานที่เกี่ยวข้อง และไม่เกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงปริมาตรของวัสดุที่มีการดำเนินไปของคลื่น ถ้ามีการเปลี่ยนแปลงปริมาตร อาจเรียกว่า คลื่นไดลาเทชัน (dilatation) และถ้าไม่มีการเปลี่ยนแปลงปริมาตร จะถูกจัดเป็น คลื่นบิดเบี้ยว (wave of distortion) คลื่นไดลาเทชัน ยังถูกจัดเป็นคลื่นที่ไม่มีการหมุน (irrotational) ในความหมายนี้จะหมายถึง ไม่มีสสารที่หมุน (element of rotational)

มีการใช้คลื่นตามยาวมาประยุกต์ในงานทางอัลตราโซนิก ดังนั้นคลื่นตามยาว คลื่นไดลาเทชัน และคลื่นที่ไม่มีการหมุน (irrotational waves) อาจหมายถึงเป็นคลื่นตามยาวธรรมดา ในขณะที่คลื่นตามขวาง คลื่นดิสทอร์ชันอาจถูกเรียกว่า คลื่นตามขวางธรรมดา

2.5.1 คลื่นตามยาว (Longitudinal waves)

คลื่นตามยาวยังคงมีอยู่เมื่อการเคลื่อนที่ของอนุภาคในตัวกลางขนานกับทิศทางของการดำเนินไปของคลื่น คลื่นชนิดนี้บ่อยครั้งจะหมายถึง คลื่น L (L waves) คลื่นชนิดนี้มักถูกนำมาใช้อยู่เสมอในงานทางอัลตราโซนิก จนกระทั่งปัจจุบัน เมื่อคลื่นอัลตราโซนิกตามยาวเดินทางในของเหลว ของแข็ง หรือแก๊ส จะง่ายต่อการตรวจจับ คลื่นตามยาวมีความเร็วสูงในการเดินทางในตัวกลางส่วนใหญ่ และความยาวคลื่นในวัสดุธรรมดาต่างๆ ไป มักจะสั้นมากเมื่อเทียบกับพื้นที่ภาคตัดขวางของตัวทรานสดิวเซอร์ ที่เป็นตัวสร้างคลื่น ด้วยสมบัติเหล่านี้ยอมให้พลังงานที่ปล่อยออกไปเป็นลำคลื่นที่มีความเข้ม และมีการแตกออกจากกัน (diverges) เพียงเล็กน้อยเท่านั้น คลื่นตามยาวแสดงดังรูปที่ 2.4

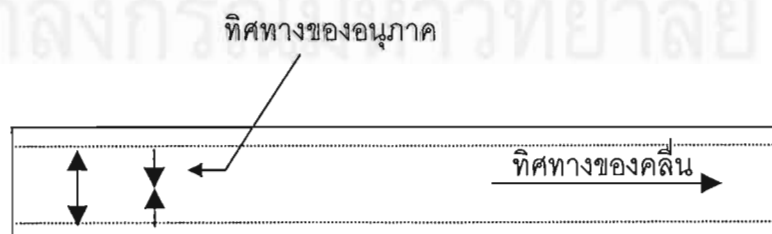


รูปที่ 2.4 คลื่นตามยาวที่กำลังเดินทางผ่านตัวกลาง (Benson C., 1960)

คลื่นตามยาวที่เกิดขึ้นภายในตัวกลาง โดยการสั่นของผิวหน้าใดๆ ในทุกทิศทาง ที่มีความถี่ ในช่วงคลื่นอัลตราโซนิก ถ้าพลังงานยังคงอยู่ในลำความถี่ (และเช่นเดียวกันกับความยาวคลื่น) ต้องเป็นอัตราส่วนที่เหมาะสมต่อพื้นที่ของพื้นผิวที่กำลังสั่นอยู่ เพื่อที่จะใช้พลังงานจากการสั่นเหล่านี้ เมื่อคลื่นเดินทางด้วยความเร็วที่สูงมาก และเมื่อความถี่โดยทั่วไปสูง ระบบที่นำคลื่นนี้มาใช้ ต้องมีความสามารถต่อการตอบสนองต่อความถี่ และการแปลงสัญญาณซึ่งกันและกันอย่างใกล้ชิด ชิดทันเวลา ในกรณีเหล่านี้ในช่วงเวลาจะถูกกำหนดไว้ วิธีการวัดจึงจำเป็นต้องมีค่าความละเอียด เป็นไมโครวินาที

2.5.2 คลื่นตามขวาง (Shear waves)

คลื่นตามขวางเป็นคลื่นที่เคลื่อนที่โดยมีการเคลื่อนที่ของอนุภาคในทิศทางตั้งฉาก กับคลื่นที่เคลื่อนที่ เรียกอีกอย่างว่า คลื่นเอส (S wave) เนื่องจากคลื่นตามขวางมีความเร็วที่ต่ำกว่าคลื่นตามยาวประมาณครึ่งหนึ่ง ทำให้ความยาวคลื่นของคลื่นตามขวางสั้นกว่าคลื่นตามยาวมาก รูป 2.5 แสดงการเคลื่อนที่ของอนุภาคในคลื่นตามขวาง



รูปที่ 2.5 การเคลื่อนที่ของอนุภาค และทิศทางของคลื่นตามขวาง (Benson C., 1960)

2.6 ความเร็วของอัลตราโซนิก และความยาวคลื่น

ในวัสดุที่มีความยืดหยุ่นได้สมบูรณ์ ณ อุณหภูมิและความดันที่กำหนดให้มีค่าคงที่ ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วเสียงอัลตราซาวนด์, ความถี่เสียง, ความยาวคลื่น และคาบ กำหนดได้ดังสมการต่อไปนี้

$$\lambda = c / f \quad (10)$$

$$\lambda = cT \quad (11)$$

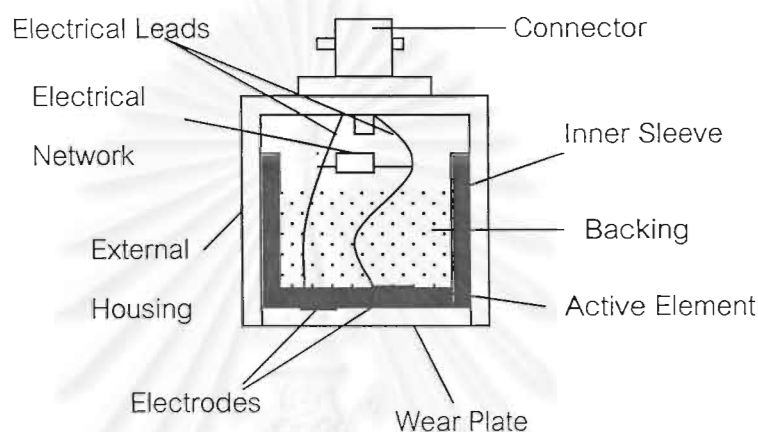
โดยตารางที่ 2.3 แสดงความเร็วของคลื่นตามยาว คลื่นตามขวางของวัสดุต่างๆ ที่มีการทดสอบด้วยอัลตราโซนิก (Panametrics, 1995)

ตารางที่ 2.3 แสดงความเร็วของคลื่นตามยาว และคลื่นตามขวาง ของวัสดุต่าง ๆ ที่ทดสอบด้วยอัลตราโซนิก (Panametrics, 1995)

วัสดุ	ความเร็วคลื่นตามยาว		ความเร็วคลื่นตามขวาง		อิมพีแดนส์ (kg/m ² sX 10 ⁶)
	(in/μs)	(m/s)	(in/μs)	(m/s)	
อะคริลิกเรซิน (Perspec)	0.107	2,730	0.056	1,430	3.22
อะลูมิเนียม	0.249	6,320	0.123	3,130	17.06
กลีเซอริน	0.076	1,920	-	-	2.42
เหล็ก	0.232	5,900	0.127	3,230	45.93
พอลิสไตรีน	0.092	2,340	-	-	2.47
พอลิไวนิลคลอไรด์	0.094	2,395	0.042	1,060	3.35
เงิน	0.142	3,600	0.063	1,590	37.76
สังกะสี	0.164	4,170	0.095	2,410	29.61

2.7 อัลตราโซนิกทรานสดิวเซอร์ (Ultrasonic Transducer)

อัลตราโซนิกทรานสดิวเซอร์ เป็นอุปกรณ์กำเนิดคลื่นอัลตราโซนิกและรับคลื่นอัลตราโซนิก องค์ประกอบหลักประกอบด้วยส่วนสำคัญสามส่วนคือ Active element, Backing และ Wear plate และมีรูปแสดงลักษณะโดยทั่วไปของทรานสดิวเซอร์ดังรูปที่ 2.6 (Panametrics, 1995)



รูปที่ 2.6 แสดงส่วนประกอบต่างๆ ของอัลตราโซนิกทรานสดิวเซอร์ (Panametrics, 1995)

อัลตราโซนิกทรานสดิวเซอร์แต่ละตัวมีความสามารถไม่เท่ากัน ค่าที่บ่งบอกถึงความสามารถหรือประสิทธิภาพนั้น เรียกว่ารีโซลูชัน (resolution) อัลตราโซนิกทรานสดิวเซอร์ที่มีรีโซลูชันสูงกว่าสามารถให้กำเนิดคลื่นอัลตราโซนิกที่มีความถี่ถูกต้องตามความต้องการมากกว่า

2.7.1 ชั้นส่วนกัมมันต์ (Active Element)

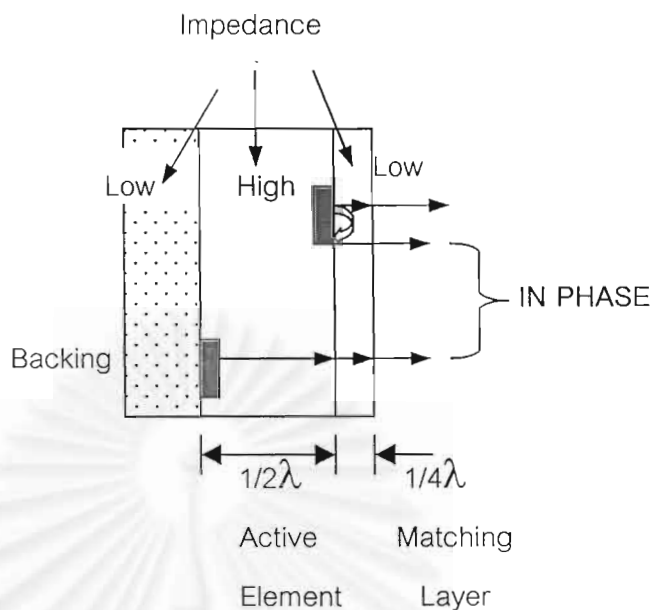
ชั้นส่วนกัมมันต์เป็นวัสดุพวกเพียโซ (piezo) หรือ ferroelectric material ทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานไฟฟ้า เช่น คลื่นดลกระตุ้นทางไฟฟ้า (excitation pulse) จากเครื่องวัดตำหนิ (flaw detection) ไปเป็นพลังงานอัลตราโซนิก (ultrasonic energy) นอกจากนั้นยังสามารถทำงานได้ในทางกลับกัน คือการเปลี่ยนจากพลังงานอัลตราโซนิกไปเป็นพลังงานไฟฟ้า วัสดุที่นิยมนำมาใช้กันมากที่สุด คือ โพลารไรซ์เซรามิกส์ (polarized ceramics) และวัสดุอื่นๆแล้วแต่รูปแบบของความต้องการในการผลิตคลื่น การประยุกต์ในงานการทดสอบอัลตราโซนิกโดยส่วนใหญ่แล้วต้องการผลิตคลื่นตามยาวแบบอัด (compressional) หรือคลื่นตามขวาง (transverse)

2.7.2 Backing

โดยปกติแล้ว backing เป็นตัวกลางทำหน้าที่ลดทอนสัญญาณ เป็นวัสดุที่มีความหนาแน่นสูง ใช้เพื่อควบคุมการสั่นของทรานสดิวเซอร์ โดยการดูดกลืนพลังงานที่กำลังแผ่ออกจากผิวหน้าของชิ้นส่วนกัมมันต์เมื่ออิมพีแดนซ์ของเสียง (ความเร็วเสียงของวัสดุ คูณด้วยความหนาแน่นของวัสดุ) ของ backing ตรงกับอิมพีแดนซ์ของเสียงของชิ้นส่วนกัมมันต์ทำให้ได้อัลตราโซนิกทรานสดิวเซอร์ที่ลดทอนเป็นอย่างมาก ซึ่งแสดงช่วงของรีโซแนนซ์ที่ดี แต่อาจจะมีแอมพลิจูดของสัญญาณต่ำกว่าถ้ามีอิมพีแดนซ์ของเสียงไม่ตรงกันระหว่างชิ้นส่วนกัมมันต์ และ backing พลังงานเสียงที่มากกว่าสามารถสะท้อนออกมาข้างหน้ากระทบกับวัสดุที่ทดสอบ ผลลัพธ์สุดท้ายเป็นทรานสดิวเซอร์ที่มีรีโซแนนซ์ต่ำกว่า เนื่องจากมีรูปแบบคลื่นที่ยาวกว่าแต่อาจมีสัญญาณแอมพลิจูดที่สูงกว่า

2.7.3 Wear Plate

เป็นวัสดุที่ทำหน้าที่ป้องกันชิ้นส่วนของทรานสดิวเซอร์ จากสภาวะแวดล้อม (environment) ในกรณีของทรานสดิวเซอร์แบบสัมผัส (contact transducer) นั้น wear plate ต้องทนทาน และทนต่อการกัดกร่อนเพื่อต้านทานการกัดกร่อน อันเป็นสาเหตุจากการใช้วัสดุพวกโลหะสำหรับทรานสดิวเซอร์แบบจุ่ม (immersion) wear plate จะมีหน้าที่เพิ่มอีกโดยเป็นตัวแปลงสัญญาณเสียง (acoustic transformer) ระหว่างชิ้นส่วนกัมมันต์ที่มีอิมพีแดนซ์ของเสียงสูง และการเลือกความหนาผิวหน้าของ wear plate ขึ้นอยู่กับการรบกวนที่เกิดจากการสร้าง ซึ่งยอมให้คลื่นที่ได้จากการกำเนิดโดยชิ้นส่วนกัมมันต์ ให้มีเฟส (in phase) กับการสะท้อนหรือก้องของคลื่นในชั้นของ matching layer ดังแสดงในรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 แสดงคลื่นที่มีลักษณะ in phase กับ matching layer ที่เกิดจากชั้นส่วนกัมมันต์

2.8 ทฤษฎีพื้นฐานสำหรับวิเคราะห์ไฮลด์อัฟ (Yi J. and Tavlarides L.L., 1990)

ทฤษฎีพื้นฐานสำหรับวิเคราะห์ไฮลด์อัฟได้พัฒนาขึ้นเพื่อวัดไฮลด์อัฟของวัฏภาคกระจาย โดยอยู่บนพื้นฐานความจริงเมื่อความเร็วของอัลตราซาวนด์ในการกระจายตอนแรกขึ้นอยู่กับทั้งความเร็วและความยาวคลื่นของอัลตราซาวนด์ในแต่ละวัฏภาค ได้นำสมการความสัมพันธ์ดังสมการที่ 12 มาใช้ ซึ่งมีความสัมพันธ์กับระยะทางในการเดินทาง (path length) หรือความยาวของเส้นทาง ของคลื่นอัลตราซาวนด์ และความเร็วของเสียงในแต่ละวัฏภาค

$$\frac{L}{V} = \frac{L_{dis}^i}{V_{dis}^i} + \frac{L_{com}^j}{V_{com}^j} \quad (12)$$

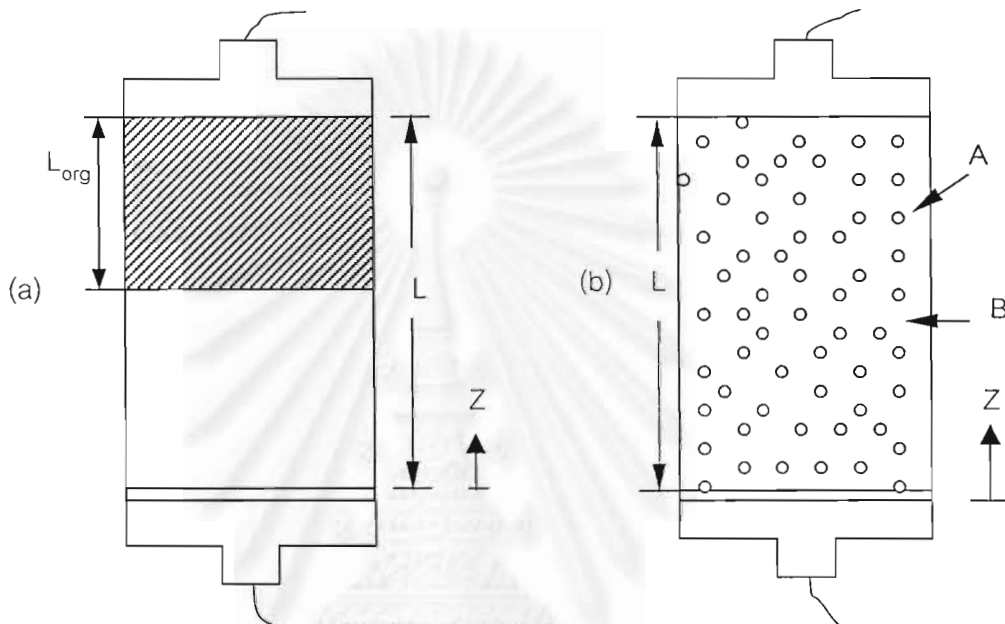
เมื่อ i และ j แทน วัฏภาค aqueous และสารอินทรีย์ตามลำดับ V เป็นความเร็วของอัลตราซาวนด์ในระบบกระจาย และ L เป็นความยาวเส้นทางของอัลตราซาวนด์ในระบบกระจาย

ค่าไฮลด์อัฟแท้จริง (ϕ) กำหนดเป็นอัตราส่วนของปริมาตรจริงของวัฏภาคกระจาย i แสดงได้ดังความสัมพันธ์ที่ 13

$$\phi_i = V_{dis}^i / V_T \quad (13)$$

เมื่อ

V_T และ V_{dis}^i เป็นปริมาตรทั้งหมด และปริมาตรของวัฏภาคกระจาย i ตามลำดับ



A: dispersed phase

B: continuous phase

D: transducer diameter

L: system length

L_{org} : organic phase length without mixing

รูปที่ 2.8 ลักษณะของระบบที่ทำการศึกษา (a) ปราศจากการผสม (b) มีการผสม

(Yi J. and Tavlarides L.L., 1990)

คลื่นเสียง (acoustic wave) เดินทางผ่านชั้นแบนราบสองชั้นของของเหลวเมื่อของไหลแยกตัวเป็นชั้นก่อนการคนผสม (ไม่มีการผสม) ดังแสดงในรูปที่ 2.8(a) ในกรณีนี้ อัตราส่วนปริมาตรของวัฏภาคกระจายต่อปริมาตรทั้งหมด เท่ากับอัตราส่วนของเส้นทางของคลื่นอัลตราโซนิกในวัฏภาคกระจายต่อระยะทางระหว่างทรานสดิวเซอร์ สามารถแสดงความสัมพันธ์ ได้ดังนี้

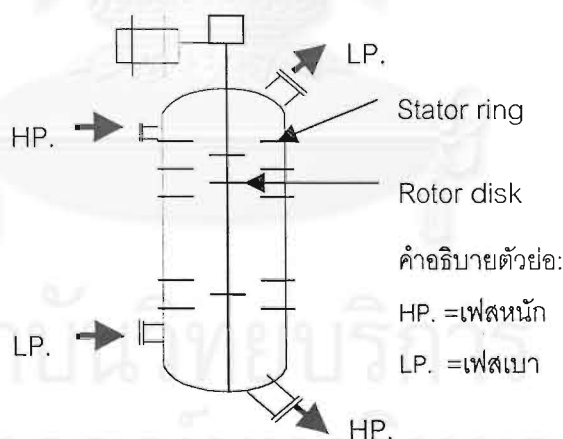
$$V_{dis}^i / V_T = L_{dis}^i / L \quad (14)$$

เมื่อ L และ L_{dis}^i เป็นระยะห่างระหว่างทรานสดิวเซอร์ และระยะทางที่คลื่นอัลตราโซนิกในภูมิภาคกระจายตามลำดับ สังเกตว่าระยะทางของชั้น (layered length) ของภูมิภาคกระจายเท่ากับระยะทางเดินของคลื่นอัลตราโซนิกในภูมิภาคกระจาย ดังแสดงในรูปที่ 2.8(a) สัดส่วนปริมาตรของภูมิภาค i คำนวณได้จากสมการ (12) และ (14) ซึ่งเรียกว่าแบบจำลองเวลาเฉลี่ย (Time-average (TA) model) หรือ ϕ_{TA}^i คือ

$$\phi_{TA}^i = \frac{t^* - t_j}{t_i - t_j} \quad (15)$$

เมื่อ $i \neq j$, t^* เป็นเวลาที่อัลตราโซนิกเดินทางในระบบกระจาย t_i เป็นเวลาที่อัลตราโซนิกใช้ในการเดินทางในภูมิภาคบริสุทธิ์ i และ t_j เป็นเวลาที่อัลตราโซนิกใช้ในการเดินทางในภูมิภาคบริสุทธิ์ j สมการที่ (15) ซึ่งเห็นว่าค่าไฮลด์ออฟจริงเมื่อไม่มีการผสม สามารถวัดได้ด้วยเทคนิคอัลตราโซนิก โดยใช้แบบจำลองเวลาเฉลี่ยข้างต้น (Bonnet J.C. and Tavlarides L.L., 1987)

2.9 เครื่องสกัดแบบจานหมุน (Rotating disk contactor RDC)



รูปที่ 2.9 แสดงส่วนประกอบของเครื่องสกัดแบบจานหมุน (Reman G.H. and Olney R.B., 1955)

เครื่องสกัดแบบจานหมุน (RDC) ได้มีการนำมาใช้เป็นเวลานานมาแล้ว (Reman G.H. and Olney R.B., 1955) จัดอยู่ในประเภทเครื่องมือสกัดที่มีการกวนผสม (agitated extractors) ดังรูปที่ 2.9 เครื่องสกัดแบบจานหมุนแบ่งออกเป็นห้องๆ หรือคอมพาร์ตเมนต์ (compartments) โดยวงแหวนในแนวนอนที่ขนานกัน (stator rings) ทำหน้าที่เป็นตัวกีดขวางการ

ไหลในแนวนอน (annular baffle) และภายในแต่ละคอมพาร์ทเมนต์จะมีการผสมเกิดขึ้นโดยการหมุนของตัวจานหมุนที่เรียงตัวเป็นชั้นๆ ในแนวขนานและมีตำแหน่งอยู่ตรงกลางของคอลัมน์ซึ่งต่อกับแกนมอเตอร์ แผ่นจานหมุน (rotor disk) นี้มีลักษณะเป็นแผ่นแบนและเรียบ มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางน้อยกว่าตัววงแหวนทำให้การประกอบทำได้ง่าย และเครื่องสกัดแบบจานหมุนสามารถเพิ่มอัตราการสกัดได้มากขึ้น เนื่องจากการหมุนของจานเป็นการเพิ่มความปั่นป่วนระหว่างสารป้อนกับตัวทำละลายทำให้มีการถ่ายโอนมวลสารดีขึ้น โดยทำให้ของเหลวชนิดหนึ่งกระจายเป็นหยดเล็กๆ เรียกว่า วัฏภาคกระจาย (dispersed phase) เคลื่อนที่ในอีกของเหลวหนึ่งที่ไม่กระจายตัวเรียกว่า วัฏภาคต่อเนื่อง (continuous phase) ได้อย่างสะดวก ถ้าปราศจากการหมุนของจานหมุน หยดของเหลวจะถูกกักค้างอยู่ในคอมพาร์ทเมนต์ได้ การหมุนของจานทำให้หยดของเหลวถูกเฉือนเป็นหยดเล็ก (rupture) ส่งผลให้มีพื้นที่การถ่ายโอนมวลสารระหว่างวัฏภาคสูงขึ้น อย่างไรก็ตามเมื่อหยดของเหลวแต่ละหยดเข้าใกล้กันและรวมตัวกันเป็นหยดใหญ่ขึ้น (coalescence) ทำให้มีพื้นที่ในการถ่ายโอนมวลสารลดลงไปด้วยเช่นเดียวกัน

เครื่องสกัดแบบจานหมุนนี้พัฒนาโดย Reman ในปีค.ศ. 1955 มีการป้อนสารป้อนและตัวทำละลายแบบไหลสวนทางกันในคอลัมน์ โดยวัฏภาคหนัก (heavy phase) มีความหนาแน่นมากกว่าจะป้อนเข้าทางด้านบนของคอลัมน์ ส่วนวัฏภาคเบา (light phase) ถูกป้อนเข้าทางด้านล่าง

สำหรับเครื่องสกัดแบบจานหมุนชนิดนี้ การเกิดการกระจายต้องการพลังงานกล (mechanical energy) จากภายนอกเข้ามาเพื่อช่วยทำให้เกิดอัตราการถ่ายโอนมวลที่สูง ในปัจจุบันมีการออกแบบเครื่องสกัดแบบจานหมุนที่มีขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางตั้งแต่ 1- 4.5 เมตร และได้มีการพัฒนาอย่างต่อเนื่องทั้งจากมหาวิทยาลัยและสถาบันวิจัยต่างๆ เพื่อจุดประสงค์ในการเพิ่มความจุและประสิทธิภาพในการสกัดโดยอยู่บนพื้นฐานของสมบัติทางกายภาพและรูปแบบของเครื่องสกัดแบบจานหมุนนั้น ๆ อย่างไรก็ตาม ทฤษฎีและความสัมพันธ์ที่มีนั้นยังไม่สามารถที่จะพยากรณ์ปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นภายในคอลัมน์สกัดแบบจานหมุนได้อย่างถูกต้องเพียงพอ

2.10 การออกแบบคอลัมน์สกัดแบบจานหมุน

การออกแบบคอลัมน์สกัดแบบจานหมุนนี้สามารถแบ่งการออกแบบได้เป็น 2 ประเภทตามผู้ออกแบบ ดังนี้

1. Ladda G.S., Degaleesan, and Kannapan R., 1978 ได้เสนอการคำนวณมิติภายในคอลัมน์โดยใช้ความสัมพันธ์ในเงื่อนไขของเส้นผ่านศูนย์กลางของคอลัมน์ (dc) โดยมีหน่วยเป็นเซนติเมตร

ความสูงของแต่ละคอมพาร์ทเมนต์ (Zc)

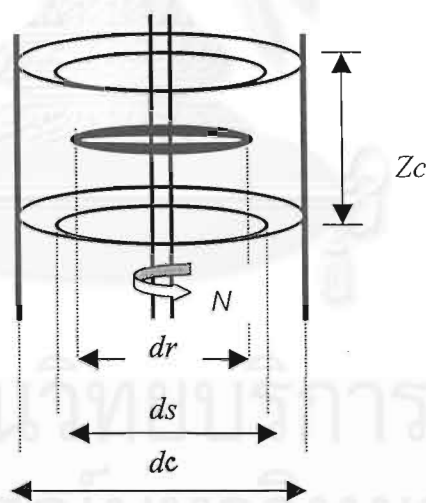
$$Zc = 0.62(dc)^{0.68} \quad (16)$$

เส้นผ่านศูนย์กลางของจานหมุน (dr)

$$dr = 0.5dc \quad (17)$$

ช่องเปิดของวงแหวนสติกิต (ds)

$$ds = 0.67dc \quad (18)$$



รูปที่ 2.10 แสดงส่วนประกอบภายในคอลัมน์สกัดแบบจานหมุน

โดยทั่วไปเส้นผ่านศูนย์กลางของจานหมุนมีค่าน้อยกว่าช่องเปิดของวงแหวนสติกิต ทำให้สะดวกในการถอดชิ้นส่วนต่างๆ ของจานหมุนเพื่อทำความสะอาดและซ่อมแซม อัตราส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางของจานหมุนต่อเส้นผ่านศูนย์กลางของคอลัมน์ (dr/dc) โดยปกติมีค่าอยู่

ระหว่าง 0.3 – 0.7 และความสูงของคอมพาร์ทเมนต์ต่อเส้นผ่านศูนย์กลางของคอลัมน์ (Zc/dc) อยู่ในช่วงระหว่าง 0.12 – 0.50

2. Casamatta G., 1985 ได้กำหนดสัดส่วนมาตรฐานสำหรับเครื่องสกัดแบบจานหมุน ที่มีขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของแผ่นจานหมุน วงแหวนสถิติ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของคอลัมน์ ดังนี้

$$ds/dc = 0.7$$

$$dr/dc = 0.6$$

$Zc/dc = 0.1 - 0.2$ (0.2 สำหรับเส้นผ่านศูนย์กลางน้อยกว่า 0.1 เมตร และเท่ากับ 0.1 เมื่อเส้นผ่านศูนย์กลางมากกว่า 0.1 เมตร)

ภายใต้การกวนอย่างแรง ($Re = N \cdot di^2 / \nu > 10^5$) เมื่อความเร็วรอบการหมุนมีค่าคงที่ ในกรณีนี้ค่าพลังงานจำเพาะมีสมการเป็น

$$P = 0.08 \cdot N^3 \cdot ds^2 \quad (19)$$

หรือ
$$P = 0.00288 \cdot N^3 \cdot dc^2 \quad (20)$$

เมื่อ P เป็นค่าพลังงานจำเพาะ (ตร.ม./ลบ.ม.)

N คือความเร็วรอบจานหมุน (1/วินาที)

ds และ dc คือเส้นผ่านศูนย์กลางของจานหมุนและ คอลัมน์สกัดแบบจานหมุน (เมตร)

เครื่องสกัดแบบจานหมุนสามารถทำงานได้อย่างต่อเนื่อง และมีความยืดหยุ่นในขนาดการทำงานและการควบคุม สามารถปรับความเร็วของจานหมุนเพื่อให้ได้การกระจายตามความต้องการ เครื่องสกัดแบบจานหมุนมีการใช้งานกันอย่างกว้างขวางโดยเฉพาะในอุตสาหกรรมปิโตรเคมี เช่นในกระบวนการสกัดน้ำมันหล่อลื่นด้วยฟิวเฟอร์อล (Fuferal) และน้ำมันดีเซล การกำจัดแอสฟัลต์ออกจากโพรเพน การสกัดซัลเฟอร์ไดออกไซด์ออกจากร้ำมันก๊าด การแยกฟีนอลออกจากของเสียเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ การสกัดรีฟอร์มเมตโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา (Strand, C.P. Olney R.B. and Ackerman G.H., 1962) กระบวนการสกัดแยกสารอะโรมาติกส์ และกระบวนการทำคาร์โบรแลกทัมบริสุทธิ์ (Lo, 1979; Logadail and Lowes, 1975; Reissinger and Schroter, 1978,1979)

บทที่ 3

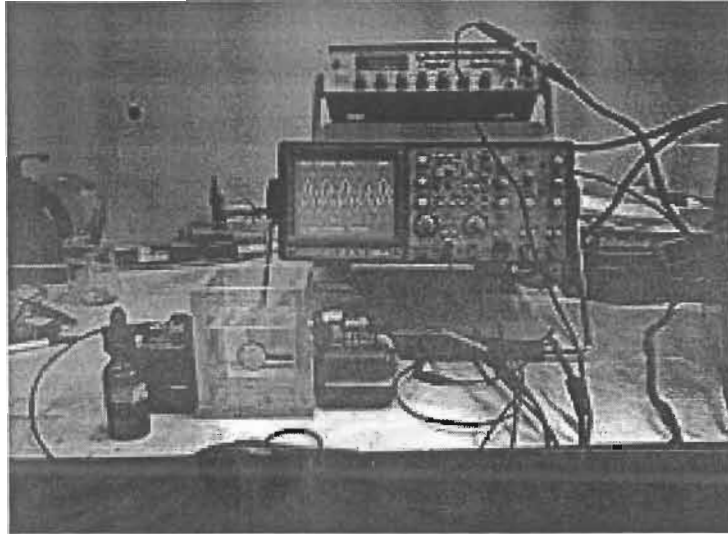
อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

อุปกรณ์การทดลอง

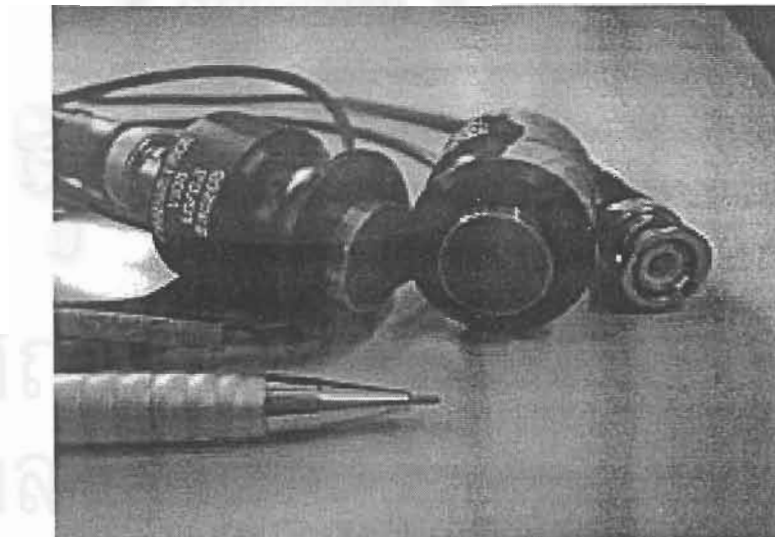
อุปกรณ์การทดลองในขั้นตอนหลักของการดำเนินการทดลองนั้น แบ่งเป็นอุปกรณ์ที่ใช้ใน 3 ขั้นตอน ตามลำดับ ดังนี้

1. ขั้นตอนการวัดความเร็วอัลตราโซนิกของสารบริสุทธิ์แต่ละชนิดในระบบ batch เพื่อเป็นการทดสอบความถูกต้องและประสิทธิภาพของการนำเอาเทคนิคอัลตราโซนิกมาใช้จริงกับเครื่องสกัดแบบจานหมุน จึงได้มีการทดสอบด้วยการวัดความเร็วเสียงอัลตราโซนิกที่ใช้เดินทางผ่านสารบริสุทธิ์ต่างๆ แล้วเปรียบเทียบกับค่าที่ได้มีการศึกษาและแสดงในคู่มือ โดยการวัดความเร็วเสียงทำในภาชนะ ดังแสดงในรูปที่ 3.1 โดยใช้เทคนิคการแผ่กระจายของคลื่น (pulse propagation technique) ภาชนะที่ใช้ ทำจากพลาสติกอะคริลิก (acrylic plastic sheet) กว้าง 7.5 ซม. ยาว 10 ซม. และหนา 1 ซม. โดยด้านของภาชนะทั้งสองด้านที่ตรงข้ามกันในแนวเดียวกัน ประกอบด้วยทรานสดิวเซอร์ตัวส่ง และตัวรับ เส้นผ่านศูนย์กลางของทรานสดิวเซอร์คือ 1.27 ซม. ความถี่เรโซแนนซ์ 1 เมกะเฮิรตซ์ และระยะห่างระหว่างทรานสดิวเซอร์ทั้งสอง 9.5 ซม. ดังแสดงในรูปที่ 3.2

ดังแสดงในรูปที่ 3.1 สัญญาณที่ป้อนให้กับภาชนะ สร้างจากเครื่องกำเนิดคลื่นแบบต่างๆ เป็นเครื่องผลิตคลื่นดลรูปเหลี่ยม หรือรูปไซน์ (train of rectangular voltage pulse) ที่สามารถปรับความกว้าง ความถี่ และพารามิเตอร์อื่นๆ ได้ สัญญาณคลื่นจากเครื่องกำเนิดคลื่นนี้ถูกส่งไปกระตุ้นทรานสดิวเซอร์ตัวส่ง ซึ่งเปลี่ยนสัญญาณไฟฟ้าให้เป็นสัญญาณคลื่นอัลตราโซนิกคลื่นดลที่อัดตัวกัน (pressure pulse) เดินทางผ่านสารที่ใช้ในการทดลอง และรับคลื่นแล้วจะเปลี่ยนให้เป็นสัญญาณไฟฟ้าด้วยทรานสดิวเซอร์ตัวรับ และสัญญาณนี้ส่งต่อไปยังออสซิลโลสโคป สัญญาณจะถูกขยายพร้อมทั้งแสดงผลบนหน้าจอออสซิลโลสโคป และสามารถบันทึกตำแหน่งของรูปคลื่นบนหน้าจอ แล้วนำมาวาดรูปกราฟในภายหลังได้ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์วาดรูป ในขณะที่เดียวกันเครื่องกำเนิดคลื่นดลกระตุ้น (trig) ให้เกิดการกวาดของสัญญาณในแกนแนวนอนของออสซิลโลสโคป ดังนั้นจึงสามารถแสดงสัญญาณของอัลตราโซนิกทรานสดิวเซอร์ตัวส่งและสัญญาณจากอัลตราโซนิกทรานสดิวเซอร์ตัวรับ บนหน้าจอออสซิลโลสโคปพร้อมกันได้ และวัดช่วงเวลาโดยใช้ดีเลย์สวீป (delay sweep) (กฤษดา และประยูร, 2538)



รูปที่ 3.1 เครื่องมือสำหรับวัดความเร็วเสียงในระบบ batch



รูปที่ 3.2 อัลตราโซนิกทรานสดิวเซอร์ตัวรับ และส่ง

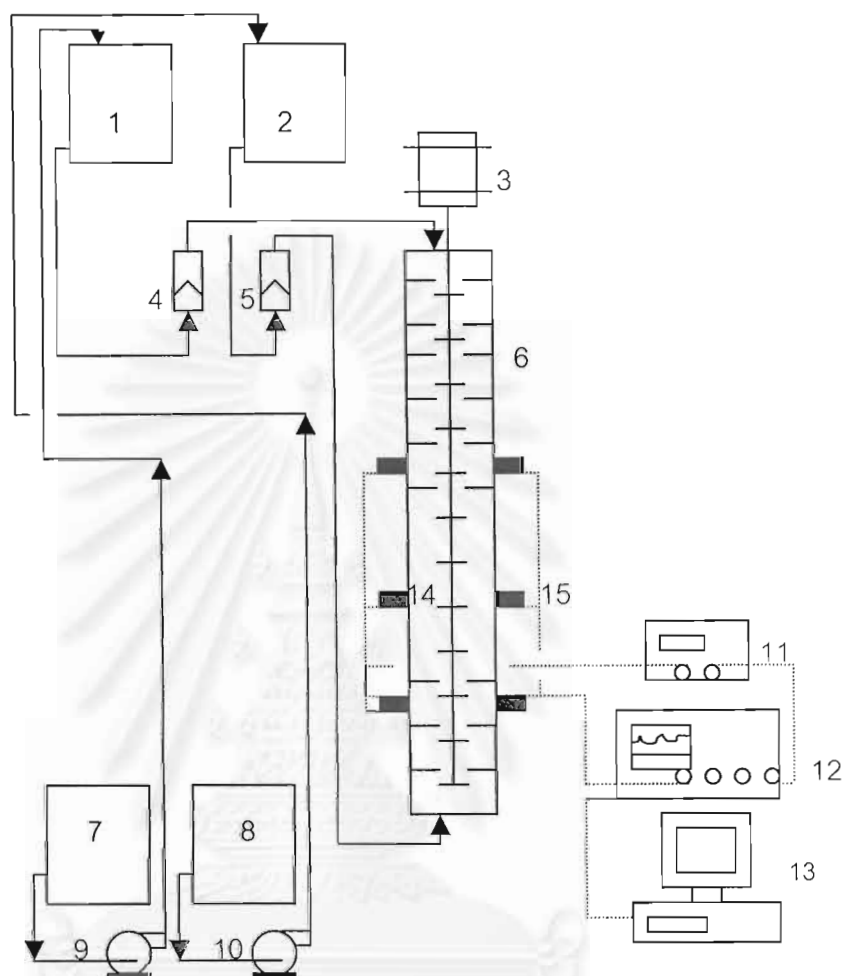
ในการวัดนั้นสิ่งที่มีความจำเป็นคือคลื่นที่ออกมาขึ้นสูงและมีความแหลม (rise sharply) ดังนั้นการขยายสัญญาณเต็มทีของออสซิลโลสโคปจึงเป็นสิ่งจำเป็น การวัดโดยใช้เครื่องวัดความเร็วเสียง ดังแสดงในรูปที่ 3.1 อัตราส่วนระหว่างระยะทางที่เสียงใช้เดินทาง (acoustic length, L) และเวลาเดินทางของคลื่นที่ได้แก้ไขแล้ว นำมาคำนวณความเร็วเสียงที่ต้องการวัดออกมาได้

2. ขั้นตอนการวัดเวลาที่คลื่นใช้เดินทางภายในสารผสมในคอลัมน์สกัดแบบจานหมุน ทำในคอลัมน์สกัดแบบจานหมุน (RDC) ที่ทำจากแก้ว สูง 108 ซม. เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 5.05 ซม. ผนังแก้วหนา 4.55 มม. จำนวนวงแหวนสถิต (stator ring) 44 อัน มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน หรือช่องเปิดของวงแหวนสถิต (ds) 3.0 ซม. จำนวนจานหมุน (rotor disk) 43 อัน มีเส้นผ่านศูนย์กลาง (dr) 2.4 ซม. ติดกับแกนหมุนเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.32 ซม. ที่ขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ขนาด $\frac{1}{2}$ แรงม้า และความสูงของแต่ละคอมพาร์ทเมนต์ (Z_c) 2.5 ซม. (Misek, 1964) ดังแสดงในรูปที่ 3.3 ต่ออุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่างๆ เข้ากับคอลัมน์สกัดแบบจานหมุน โดยทดลองกับระบบสองวัฏภาค (two-phase experiment)

สำหรับเวลาทั้งหมดในการเดินทาง (overall travel time) ถูกวัดในวัฏภาคเดียว (single phase) และวัฏภาคกระจายที่ค่าไฮลด์อัพแต่ละวัฏภาคกระจายแตกต่างกัน (Bonnet J.C. and Tavlarides L.L., 1987) ส่วนการวางตำแหน่งแกนจานหมุนกลางคอลัมน์ซึ่งเป็นเส้นทางเดินของเสียง ทำให้เกิดความล่าช้าของเวลา (time delay) มากยิ่งขึ้น และเป็นส่วนสำคัญที่ทำให้เกิดการบิดเบี้ยวของสัญญาณซึ่งทำให้เป็นไปได้ยากในการระบุตำแหน่งที่ถูกต้องของจุดที่สูงขึ้นของสัญญาณ (rising point) ที่ได้รับ ดังนั้นเวลาที่ใช้เดินทางผ่านทั้งหมดจึงสามารถวัดโดยเปรียบเทียบเท่ากับพีคแรก (first peak) ของสัญญาณที่ได้รับ

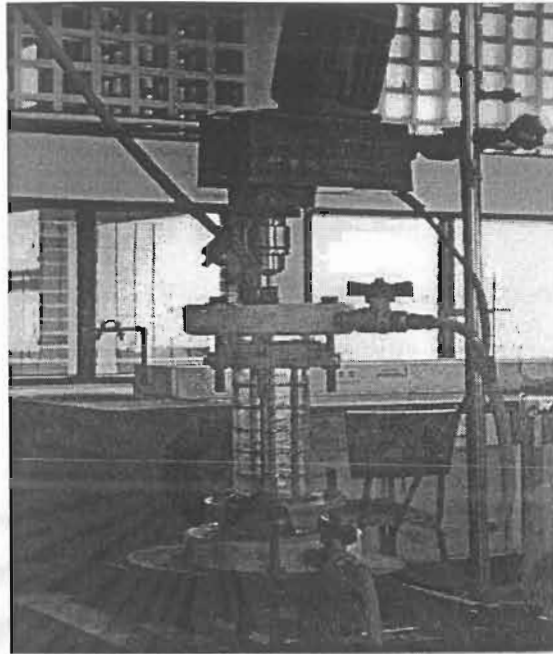
3. ขั้นตอนการวัดเวลาที่คลื่นใช้เดินทางภายในสารผสมในคอลัมน์สกัดแบบจานหมุนขนาดย่อส่วน

ทำในคอลัมน์สกัดแบบจานหมุนขนาดย่อส่วน ที่ทำจากแก้ว ยาว 25 ซม. เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 4.90 ซม. ผนังคอลัมน์แก้วหนา 5.45 มม. จำนวนวงแหวนสถิต 15 อัน มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน หรือช่องเปิดของวงแหวนสถิต (ds) 3.0 ซม. จำนวนจานหมุน 14 อัน มีเส้นผ่านศูนย์กลาง (dr) 2.4 ซม. ติดกับแกนหมุนเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.32 ซม. ที่ขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ขนาด $\frac{1}{4}$ แรงม้า และความสูงของแต่ละคอมพาร์ทเมนต์ (Z_c) 2.5 ซม. (Misek, 1964) ดังแสดงในรูปที่ 3.4 ต่ออุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่างๆ เข้ากับคอลัมน์สกัดแบบจานหมุนขนาดย่อส่วน และใช้ท่อเดียวกันกับท่อต่างๆ ที่ต่อเข้ากับเครื่องสกัดแบบจานหมุน แต่ใช้มอเตอร์ขนาดต่างกัน โดยทดลองกับระบบสองวัฏภาค

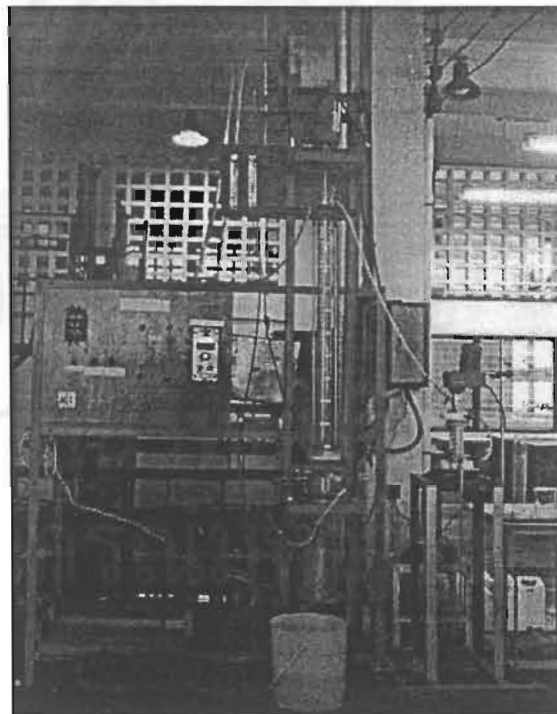


- | | |
|---|----------------------------|
| 1. ถังป้อนวัตถุดิบต่อเนื่อง ปริมาตร 8 ลิตร | 9. บั้มันวัตถุดิบต่อเนื่อง |
| 2. ถังป้อนวัตถุดิบกระจาย ปริมาตร 8 ลิตร | 10. บั้มันวัตถุดิบกระจาย |
| 3. มอเตอร์กระแสตรง ขนาด $\frac{1}{2}$ แรงม้าปรับความเร็วรอบได้ | 11. ฟังก์ชันเซนเซอร์ |
| 4. โรตاميเตอร์วัดอัตราการไหลวัตถุดิบต่อเนื่อง (0.0-1.0 ลิตร/นาที) | 12. ออสซิลโลสโคป |
| 5. โรตاميเตอร์วัดอัตราการไหลวัตถุดิบกระจาย (0.01-0.10 ลิตร/นาที) | 13. คอมพิวเตอร์แสดงผล |
| 6. คอลัมน์สกัดแบบจานหมุน (RDC) | 14. ทรานสดิวเซอร์ตัวส่ง |
| 7. ถังเก็บวัตถุดิบต่อเนื่อง | 15. ทรานสดิวเซอร์ตัวรับ |
| 8. ถังเก็บวัตถุดิบกระจาย | |

รูปที่ 3.3 อุปกรณ์และการต่ออุปกรณ์ต่างๆ กับคอลัมน์สกัดแบบจานหมุน



รูปที่ 3.4 เครื่องสกัดแบบงานหมุนขนาดย่อส่วน



รูปที่ 3.5 เครื่องสกัดแบบงานหมุน

สารเคมี

1. คาร์บอนเตตระคลอไรด์ (CCl₄) A.R. grade บริษัท Carlo Erba Reagenti
ความหนาแน่น 1.594 กรัมต่อลบ.ซม. ที่ 20 องศาเซลเซียส
2. เมทิลแอลกอฮอล์ (CH₃OH) A.R. grade บริษัท Carlo Erba Reagenti
ความหนาแน่น 0.791 กรัมต่อลบ.ซม. ที่ 20 องศาเซลเซียส
3. โทลูอีน (C₆H₅CH₃) Commercial grade บริษัท Exxon (Thailand) Co.,Ltd
ความหนาแน่น 0.870 กรัมต่อลบ.ซม. ที่ 20 องศาเซลเซียส
4. เบนซีน (C₆H₆) A.R. grade บริษัท Univar
ความหนาแน่น 0.880 กรัมต่อลบ.ซม. ที่ 20 องศาเซลเซียส
5. โพรพิลีนไกลคอล (ultrasonic couplant reagent)
6. น้ำ

และมีสมบัติที่สำคัญต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 สมบัติของสารเคมีที่ใช้ในระบบ ที่อุณหภูมิ 20 °C (Perry, 1984)

สมบัติของสารเคมี	น้ำ	เบนซีน	โทลูอีน	คาร์บอน- เตตระคลอไรด์	เมทานอล
ความหนาแน่น (g/cm ³)	0.998	0.879	0.868	1.594	0.792
ความหนืด (mPa.s), cP	0.887	0.65	0.587	1.05	0.60
แรงตึงผิว (N/m)	345x10 ⁻⁴	-	295x10 ⁻⁴	-	-
ความเร็วเสียง (m/s)	1490.4	1318.3	1330.3	939.50	1122.0
ความจุความร้อนจำเพาะ (C _p) (Cal/g.°C) ที่ 20 °C	0.998	0.419	0.440	0.201	0.60
สัมประสิทธิ์การนำความร้อน (cal/cm.s.°C)	1.43x10 ⁻³	3.806x10 ⁻³	3.56x10 ⁻⁴	4.14x10 ⁻⁴	4.55x10 ⁻⁴

วิธีการทดลอง

1. ขั้นตอนการวัดความเร็วอัลตราโซนิกของสารบริสุทธิ์แต่ละชนิดในระบบ batch

1.1 จัดระบบของอุปกรณ์ต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 3.1 โดยเปิดสวิตช์อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ทิ้งไว้ก่อนประมาณ 5-10 นาที เพื่อให้อุปกรณ์พร้อมใช้งาน นำสายนำสัญญาณที่มาจากฟังก์ชันเยนเนอเรเตอร์ (main output 50 ohms) มาต่อเข้ากับออกสซิลโลสโคปที่ช่องอินพุต (input) ที่ 1 และสัญญาณที่มาจากทรานสดิวเซอร์ตัวรับ ต่อเข้าที่ช่องอินพุตที่ 2 ตั้งค่าให้แสดงผลพร้อมกันสองช่อง (dual channel) บนหน้าจอออสซิลโลสโคป

1.2 เติมสารบริสุทธิ์ที่ต้องการวัด ปริมาตร 50 มม.ลงในกล่องพลาสติก (อะคริลิก) ใส โดยเทลงอย่างช้าๆ เพื่อป้องกันการเกิดฟองอากาศ

1.3 ตั้งค่าพารามิเตอร์ที่ออสซิลโลสโคป เป็นดังนี้ ช่องต่อโวลต์ (div./volt) เท่ากับ 10 ช่องต่อโวลต์ ความกว้างของคลื่น (pulse width) เท่ากับ 0.20 ไมโครวินาทีต่อช่อง

1.4 เคลือบผิวหน้าสัมผัสของอัลตราโซนิกทรานสดิวเซอร์ทั้งตัวรับและตัวส่ง ด้วยสารอัลตราโซนิกคัปเพลนต์ (โพรพิลีนไกลคอล) ลงบนผิวหน้าโดยทาบางๆ ทั่วพื้นที่ผิวของอัลตราโซนิกทรานสดิวเซอร์ แล้วประกบให้แนบสนิทกับผนังภายนอก(เพื่อป้องกันอากาศเข้าไปแทรกอยู่ระหว่างทรานสดิวเซอร์และผนัง) ทั้งสองด้านที่ตรงข้ามกันและจัดให้อยู่ในแนวเส้นตรงเดียวกัน

1.5 กดปุ่มทริก (trig) เพื่อกำเนิดสัญญาณคลื่นที่เครื่องฟังก์ชันเยนเนอเรเตอร์ โดยเลือกให้เป็นสัญญาณคลื่นแบบไซน์ (sine wave) เพื่อทำให้อัลตราโซนิกทรานสดิวเซอร์ตัวส่งกำเนิดคลื่นอัลตราโซนิกออกมา แล้วปรับความถี่ให้ตรงกันที่ 1 เมกะเฮิรตซ์ (1,000 kHz)

1.6 จะปรากฏคลื่นสัญญาณที่ส่งคลื่นมาจากเครื่องฟังก์ชันเยนเนอเรเตอร์ และคลื่นจากสัญญาณอัลตราโซนิกที่เดินทางผ่านสารบริสุทธิ์ ซึ่งจะเกิดการเหลื่อมล้ำ (lack) กันของเวลา สามารถวัดเวลาที่คลื่นอัลตราโซนิกใช้เดินทางผ่านสารบริสุทธิ์นั้นๆ ได้จากดีเลย์ฟังก์ชันของออสซิลโลสโคป

1.7 สามารถคำนวณความเร็วของคลื่นอัลตราโซนิกที่เคลื่อนผ่านสารบริสุทธิ์นั้นๆ ได้ เมื่อทราบระยะทางที่คลื่นใช้เดินทาง (ระยะความกว้างของกล่องพลาสติก) และเวลาที่ใช้ในการเดินทางที่ได้จากข้อ 1.6

1.8 ทำซ้ำสำหรับแต่ละสารบริสุทธิ์แต่ละชนิดที่นำมาใช้วัดในการทดลอง 3 ครั้ง โดยเริ่มต้นตามขั้นตอนที่ 1.2 ถึง 1.5

2. ขั้นตอนการวัดเวลาเดินทางของคลื่นอัลตราโซนิคในสารบริสุทธิ์ชนิดเดียวในคอลัมน์สกัดแบบจานหมุนขนาดย่อส่วน และคอลัมน์สกัดแบบจานหมุน

2.1 ขั้นตอนการวัดเวลาเดินทางของคลื่นอัลตราโซนิคในสารบริสุทธิ์ชนิดเดียว ในคอลัมน์สกัดแบบจานหมุนขนาดย่อส่วน

2.1.1 ป้อนสารใช้เป็นวัฏภาคต่อเนื่อง (น้ำ) เข้าไปภายใน ทางด้านบนของคอลัมน์สกัดแบบจานหมุนขนาดย่อส่วน ดังรูปที่ 3.4 โดยให้มีอัตราการไหลเท่ากับ 0.5 ลิตรต่อนาที จนเต็มคอลัมน์จึงหยุดป้อน จากนั้นจึงทำการวัดเวลาที่อัลตราโซนิคใช้ในการเดินทาง โดยทำตามขั้นตอนที่ 1.2 ถึง 1.5 บันทึกผลเวลาที่ได้เป็น t_1 แล้วจึงเปิดวาล์วทางด้านล่างของคอลัมน์เพื่อระบายเอา วัฏภาคต่อเนื่อง (น้ำ) ออกจากคอลัมน์ก่อนที่จะทำการทดลองต่อไป

2.1.2 ป้อนสารใช้เป็นวัฏภาคกระจาย (โทลูอีน) เข้าไปภายในทางด้านล่างของคอลัมน์สกัดแบบจานหมุนขนาดย่อส่วน โดยให้มีอัตราการไหลเท่ากับ 0.05 ลิตรต่อนาที จนเต็มคอลัมน์จึงหยุดป้อน จากนั้นจึงทำการวัดเวลาที่อัลตราโซนิคใช้ในการเดินทาง โดยทำตามขั้นตอนที่ 1.2 ถึง 1.5 บันทึกผลเวลาที่ได้เป็น t_2

2.2. ขั้นตอนการวัดเวลาเดินทางของคลื่นอัลตราโซนิคในสารบริสุทธิ์ชนิดเดียว ในคอลัมน์สกัดแบบจานหมุน

2.2.1 ป้อนสารใช้เป็นวัฏภาคต่อเนื่อง (น้ำ) เข้าไปภายในทางด้านบนของคอลัมน์สกัดแบบจานหมุน ดังรูปที่ 3.5 โดยให้มีอัตราการไหลเท่ากับ 0.5 ลิตรต่อนาที จนเต็มคอลัมน์จึงหยุดป้อน จากนั้นจึงทำการวัดเวลาที่อัลตราโซนิคใช้ในการเดินทาง โดยทำตามขั้นตอนที่ 1.2 ถึง 1.5 บันทึกผลเวลาที่ได้เป็น t_1 แล้วจึงเปิดวาล์วทางด้านล่างของคอลัมน์เพื่อระบายเอาวัฏภาคต่อเนื่องออกก่อนที่จะทำการทดลองต่อไป

2.2.2 ป้อนสารใช้เป็นวัฏภาคกระจาย (โทลูอีน) เข้าไปภายในทางด้านล่างของคอลัมน์สกัดแบบจานหมุน โดยให้มีอัตราการไหลเท่ากับ 0.05 ลิตรต่อนาที จนเต็มคอลัมน์จึงหยุดป้อน จากนั้นจึงทำการวัดเวลาที่อัลตราโซนิคใช้ในการเดินทาง โดยทำตามขั้นตอนที่ 1.2 ถึง 1.5 บันทึกผลเวลาที่ได้เป็น t_2

3. ขั้นตอนการวัดเวลาเดินทางของคลื่นอัลตราโซนิกในสารผสม ในคอลัมน์สกัดแบบจานหมุนขนาดย่อย ส่วน ด้วยเทคนิคอัลตราโซนิกและการวัดปริมาตรโดยวิธีวัดปริมาตรโดยตรง ที่อัตราการไหลของวัฏภาคต่อเนื่องคงที่

3.1 ป้อนสารใช้เป็นวัฏภาคกระจายให้มีอัตราการไหล 0.01 ลิตรต่อนาที ทางด้านล่างของคอลัมน์สกัด แล้วป้อนวัฏภาคต่อเนื่องที่ปรับให้มีอัตราการไหลคงที่ 0.1 ลิตรต่อนาที ผ่านเข้ามาทางด้านบนของคอลัมน์ ตามรูปที่ 3.4 ปรับโรตารีเตอร์ควบคุมวัฏภาคกระจาย (หมายเลข 5 ในรูป 3.3) ให้มีอัตราการไหลเริ่มต้น 0.01 ลิตรต่อนาที และอัตราการหมุนของจานหมุนเป็น 300 รอบต่อนาที

3.2 ปลอ่ยให้ระบบเข้าสู่ภาวะสมดุลเป็นเวลา 25-30 นาที โดยระหว่างนี้มีการปลอ่ยให้สารผสมที่ป้อนเข้าและระบายออกตลอดเวลา (วัฏภาคต่อเนื่องปลอ่ยออกทางวาล์วด้านล่าง ส่วนวัฏภาคกระจายปลอ่ยออกทางวาล์วด้านบนของคอลัมน์ ซึ่งจะแยกชั้นออกจากกัน แล้วนำไปเก็บในถังเก็บแต่ละวัฏภาค จากนั้นจึงนำกลับมาเป็นสารป้อนให้กับระบบอีกครั้งหนึ่ง) โดยรักษาระดับรอยต่อระหว่างผิวหน้าให้คงที่ หลังจากนั้นวัดเวลาเดินทางของคลื่นอัลตราโซนิกด้วยเทคนิคอัลตราโซนิกซึ่งเกิดการเหลื่อมล้ำกันของสัญญาณคลื่นทั้งสองที่เกิดขึ้นในออสซิลโลสโคป บันทึกเวลาที่ได้จากการวัดเวลาที่แตกต่างกันเป็น t แล้วจึงปิดวาล์วทั้งด้านบนและด้านล่างของคอลัมน์ เพื่อวัดปริมาตรสารทั้งสองวัฏภาคนั้น

3.3 ทำการทดลองซ้ำโดยเปลี่ยนอัตราการไหลของวัฏภาคกระจายเป็น 0.02 0.04 และ 0.08 ลิตรต่อนาทีตามลำดับ โดยแต่ละอัตราการไหลของวัฏภาคกระจายที่เปลี่ยนให้ปรับรอบการหมุนเป็น 300 400 600 และ 800 รอบต่อนาที ตามลำดับ

4. ขั้นตอนการวัดเวลาเดินทางของคลื่นอัลตราโซนิกในสารผสม ในคอลัมน์สกัดแบบจานหมุนขนาดย่อย ส่วน ด้วยเทคนิคอัลตราโซนิกและการวัดปริมาตรโดยวิธีวัดปริมาตรโดยตรง ที่อัตราการไหลของวัฏภาคกระจายคงที่

4.1 ป้อนสารใช้เป็นวัฏภาคต่อเนื่องให้มีอัตราการไหล 0.1 ลิตรต่อนาที แล้วป้อนวัฏภาคกระจาย ที่ปรับให้มีอัตราการไหลคงที่ 0.01 ลิตรต่อนาที ผ่านเข้ามาทางด้านบนของคอลัมน์ ปรับโรตารีเตอร์ควบคุมวัฏภาคกระจาย (หมายเลข 4 ในรูป 3.3) ให้มีอัตราการไหลเริ่มต้น 0.1 ลิตรต่อนาที และอัตราการหมุนของจานหมุนเป็น 300 รอบต่อนาที

4.2 ปล่อยให้ระบบเข้าสู่ภาวะสมดุลเป็นเวลา 25-30 นาที โดยระหว่างนี้ มีการปล่อยให้สารผสมที่ป้อนเข้าและระบายออกตลอดเวลา (วัฏภาคต่อเนื่องปล่อยออกทางวาล์ว ด้านล่าง ส่วนวัฏภาคกระจายปล่อยออกทางวาล์วด้านบนของคอลัมน์ ซึ่งจะแยกชั้นออกจากกัน แล้วนำไปเก็บในถังเก็บแต่ละวัฏภาค จากนั้นจึงนำกลับมาเป็นสารป้อนให้กับระบบอีกครั้งหนึ่ง) โดยรักษาระดับรอยต่อระหว่างผิวหน้าให้คงที่ หลังจากนั้นวัดเวลาเดินทางของคลื่นอัลตราโซนิก ด้วยเทคนิคอัลตราโซนิกซึ่งเกิดการเหลื่อมล้ำกันของสัญญาณคลื่นทั้งสองที่เกิดขึ้นในออสซิลโลสโคป บันทึกเวลาที่ได้จากการวัดเวลาที่แตกต่างกันเป็น t แล้วจึงปิดวาล์วทั้งด้านบนและด้านล่างของ คอลัมน์ เพื่อวัดปริมาตรสารทั้งสองวัฏภาคนั้น

4.3 ทำการทดลองซ้ำโดยเปลี่ยนอัตราการไหลของวัฏภาคต่อเนื่องเป็น 0.2 0.4 และ 0.8 ลิตรต่อนาที ตามลำดับ โดยแต่ละอัตราการไหลของวัฏภาคต่อเนื่องที่เปลี่ยน ให้ ปรับรอบการหมุนเป็น 300 400 600 และ 800 รอบต่อนาที ตามลำดับ

5. ขั้นตอนการวัดเวลาเดินทางของคลื่นอัลตราโซนิกในสารผสม ในคอลัมน์สกัด แบบจานหมุน ด้วยเทคนิคอัลตราโซนิก ที่อัตราการไหลของวัฏภาคต่อเนื่องคงที่

5.1 ป้อนสารใช้เป็นวัฏภาคกระจายให้มีอัตราการไหล 0.01 ลิตรต่อนาที แล้วป้อนวัฏภาคต่อเนื่อง ที่ปรับให้มีอัตราการไหลคงที่ 0.1 ลิตรต่อนาที ผ่านเข้ามาทางด้านบน ของคอลัมน์ ปรับโรตารีควบคุมวัฏภาคกระจาย (หมายเลข 5 ในรูป 3.3) ให้มีอัตราการไหล เริ่มต้น 0.01 ลิตรต่อนาที และอัตราการหมุนของจานหมุนเป็น 300 รอบต่อนาที ระยะติดตั้งอัลตรา โซนิกรานสวิตเซอร์ สูงจากด้านล่างของคอลัมน์สกัดแบบจานหมุน 20 เซนติเมตร

5.2 ปล่อยให้ระบบเข้าสู่ภาวะสมดุลเป็นเวลา 25-30 นาที โดยระหว่างนี้ มีการปล่อยให้สารผสมที่ป้อนเข้าและระบายออกตลอดเวลา (วัฏภาคต่อเนื่องปล่อยออกทางวาล์ว ด้านล่าง ส่วนวัฏภาคกระจายปล่อยออกทางวาล์วด้านบนของคอลัมน์ ซึ่งจะแยกชั้นออกจากกัน แล้วนำไปเก็บในถังเก็บแต่ละวัฏภาค จากนั้นจึงนำกลับมาเป็นสารป้อนให้กับระบบอีกครั้งหนึ่ง) โดยรักษาระดับรอยต่อระหว่างผิวหน้าให้คงที่ หลังจากนั้นวัดเวลาเดินทางของคลื่นอัลตราโซนิก ด้วยเทคนิคอัลตราโซนิกซึ่งเกิดการเหลื่อมล้ำกันของสัญญาณคลื่นทั้งสองที่เกิดขึ้นในออสซิลโลสโคป บันทึกเวลาที่ได้จากการวัดเวลาที่แตกต่างกันเป็น t แล้วจึงปิดวาล์วทั้งด้านบนและด้านล่างของ คอลัมน์ เพื่อวัดปริมาตรสารทั้งสองวัฏภาคนั้น

5.3 ทำการทดลองซ้ำโดยเปลี่ยนอัตราการไหลของภูมิภาคกระจายเป็น 0.02 0.04 และ 0.08 ลิตรต่อนาทีตามลำดับ โดยแต่ละอัตราการไหลของภูมิภาคกระจายที่เปลี่ยน ให้ปรับรอบการหมุนเป็น 300 400 600 และ 800 รอบต่อนาที ตามลำดับ

6. ขั้นตอนการวัดเวลาเดินทางของคลื่นอัลตราโซนิคในสารผสม ในคอลัมน์ สกัดแบบจานหมุน ด้วยเทคนิคอัลตราโซนิค ที่อัตราการไหลของภูมิภาคกระจายคงที่

6.1 ป้อนสารใช้เป็นภูมิภาคต่อเนื่องให้มีอัตราการไหล 0.1 ลิตรต่อนาที แล้วป้อนภูมิภาคกระจายที่ปรับให้มีอัตราการไหลคงที่ 0.01 ลิตรต่อนาที ผ่านเข้ามาทางด้านบน ของคอลัมน์ตามรูป 3.5 ปรับโรตารีมิเตอร์ควบคุมภูมิภาคกระจาย (หมายเลข 4 ในรูป 3.3) ให้มี อัตราการไหลเริ่มต้น 0.1 ลิตรต่อนาที และอัตราการหมุนของจานหมุนเป็น 300 รอบต่อนาที โดยมีระยะติดตั้งเริ่มแรกของอัลตราโซนิคทรานสดิวเซอร์สูงจากด้านล่างคอลัมน์สกัดแบบจานหมุน 20 เซนติเมตร

6.2 ปล่อยให้ระบบเข้าสู่ภาวะสมดุลเป็นเวลา 25-30 นาที โดยระหว่างนี้ มีการปล่อยให้สารผสมที่ป้อนเข้าและระบายออกตลอดเวลา (ภูมิภาคต่อเนื่องปล่อยออกทางวาล์ว ด้านล่าง ส่วนภูมิภาคกระจายปล่อยออกทางวาล์วด้านบนของคอลัมน์ ซึ่งจะแยกชั้นออกจากกัน แล้วนำไปเก็บในถังเก็บแต่ละภูมิภาค จากนั้นจึงนำกลับมาเป็นสารป้อนให้กับระบบอีกครั้งหนึ่ง) โดยรักษาระดับรอยต่อระหว่างผิวหน้าให้คงที่ หลังจากนั้นวัดเวลาเดินทางของคลื่นอัลตราโซนิค ด้วยเทคนิคอัลตราโซนิคซึ่งเกิดการห่อหุ้มลำกันของสัญญาณคลื่นทั้งสองที่เกิดขึ้นในออกซิลโลสโคป บันทึกเวลาที่ได้จากการวัดเวลาที่แตกต่างกันเป็น t_i แล้วจึงปิดวาล์วทั้งด้านบนและด้านล่างของ คอลัมน์ เพื่อวัดปริมาตรสารทั้งสองภูมิภาคนั้น

6.3 ทำการทดลองซ้ำโดยเปลี่ยนอัตราการไหลของภูมิภาคต่อเนื่องเป็น 0.2 0.4 และ 0.8 ลิตรต่อนาที ตามลำดับ โดยแต่ละอัตราการไหลของภูมิภาคต่อเนื่องที่เปลี่ยน ให้ ปรับรอบการหมุนเป็น 300 400 600 และ 800 รอบต่อนาที ตามลำดับ และปรับเลื่อนระดับความ สูงในการติดตั้งอัลตราโซนิคทรานสดิวเซอร์ เป็น 40 และ 80 เซนติเมตร จากปลายทางด้านล่าง ของคอลัมน์ตามลำดับ การที่เลือกทำการวัดที่ระยะ 80 เซนติเมตร ซึ่งห่างจากจุดที่สองเป็นสองเท่า ของระยะห่างระหว่างจุดที่ 1 และ 2 เพราะต้องการที่จะศึกษาผลของระยะที่แตกต่างกันด้วย

บทที่ 4

ผลการทดลอง

จากขั้นตอนการดำเนินการทดลองตามที่ได้แสดงไว้แล้วในบทที่ 3 สามารถแสดงผลการทดลองในแต่ละขั้นตอนดังต่อไปนี้

ขั้นตอนที่ 1 การวัดเวลาเดินทางของคลื่นอัลตราโซนิกผ่านสารบริสุทธิ์แต่ละชนิดในระบบ batch
เวลาที่ใช้ในการเดินทางของคลื่นอัลตราโซนิกผ่านสารเคมีต่าง ๆ แสดงในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 เวลาเดินทางเฉลี่ยผ่านภาชนะของคลื่นอัลตราโซนิก

สารเคมี	เวลาเดินทางเฉลี่ยผ่าน ภาชนะของคลื่นอัลตราโซนิก (ไมโครวินาที)	ความเร็วคลื่นอัลตราโซนิกผ่าน สารเคมีที่บรรจุในภาชนะ (เมตรต่อวินาที)
น้ำ	58.02	1,482.65
เบนซีน	64.61	1,311.76
โทลูอีน	65.46	1,292.54
เมทานอล	77.26	1,074.11
คาร์บอนเตตระคลอไรด์	87.13	941.09

ขั้นตอนที่ 2 การวัดเวลาเดินทางของคลื่นอัลตราโซนิกผ่านสารบริสุทธิ์ ที่บรรจุในคอลัมน์ สกัดแบบจานหมุนขนาดย่อยส่วน และคอลัมน์สกัดแบบจานหมุน

2.1 การวัดเวลาเดินทางของคลื่นอัลตราโซนิกผ่านสารบริสุทธิ์ ที่บรรจุในคอลัมน์ สกัดแบบจานหมุนขนาดย่อยส่วน

สำหรับระบบที่เลือกใช้คือ น้ำ-โทลูอีน เนื่องจากเป็นระบบที่นิยมใช้ในการศึกษาการสกัด โดยเวลาเดินทางของคลื่นอัลตราโซนิกในสารบริสุทธิ์ ความเร็วคลื่นอัลตราโซนิกผ่านสารเคมีที่บรรจุในคอลัมน์สกัดแบบจานหมุนขนาดย่อยส่วน แสดงในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 เวลาเดินทางของคลื่นอัลตราโซนิกในสารบริสุทธิ์ ผ่านคอลัมน์สกัดแบบจานหมุนขนาดย่อย

สารเคมี	เวลาเดินทางของคลื่นอัลตราโซนิก (ไมโครวินาที)	ความเร็วคลื่นอัลตราโซนิกผ่านภาชนะ (เมตรต่อวินาที)
น้ำ	35.01	1,481.39
โทลูอีน	39.12	1,317.65

2.2 การวัดเวลาเดินทางของคลื่นอัลตราโซนิกผ่านสารบริสุทธิ์ ที่บรรจุในคอลัมน์สกัดแบบจานหมุน

เวลาเดินทางของคลื่นอัลตราโซนิกผ่านสารบริสุทธิ์ และความเร็วคลื่นอัลตราโซนิกผ่านสารเคมีที่บรรจุในคอลัมน์สกัดแบบจานหมุน มีค่าแตกต่างจากเวลาเดินทางของคลื่นอัลตราโซนิกผ่านสารบริสุทธิ์ และความเร็วคลื่นอัลตราโซนิกผ่านสารเคมีที่บรรจุในคอลัมน์สกัดแบบจานหมุนขนาดย่อย โดยคลื่นอัลตราโซนิกจะใช้เวลาในการเดินทางน้อยกว่าในสารบริสุทธิ์ที่มีความหนาแน่นมากกว่า (Lynnworth L.C., 1989) ดังแสดงในตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 เวลาเดินทางของคลื่นอัลตราโซนิกผ่านสารบริสุทธิ์ ที่บรรจุในคอลัมน์สกัดแบบจานหมุน

สารเคมี	เวลาเดินทางของคลื่นอัลตราโซนิก (ไมโครวินาที)	ความเร็วคลื่นอัลตราโซนิกผ่านภาชนะ (เมตรต่อวินาที)
น้ำ	34.47	1,536.98
โทลูอีน	38.58	1,366.09

ขั้นตอนที่ 3 การเปรียบเทียบไฮลด์อัพที่วัดด้วยเทคนิคอัลตราโซนิก และการวัดปริมาตรโดยตรงในคอลัมน์สกัดแบบจานหมุนขนาดย่อย เมื่ออัตราการไหลของวัฏภาคต่อเนืองคงที่ และอัตราการไหลของวัฏภาคกระจายคงที่ ตามลำดับ

ขั้นตอนนี้เป็นการศึกษาความถูกต้อง และน่าเชื่อถือของค่าไฮลด์อัพที่ได้จากเทคนิคอัลตราโซนิก ด้วยการเปรียบเทียบค่าไฮลด์อัพที่วัดได้จากวิธีวัดปริมาตรโดยตรง โดยมีการเปลี่ยนแปลงภาวะในการทดลอง คือความเร็วรอบในการหมุนของจานหมุนเป็น 300 400 600 และ 800

รอบต่อนาที อัตราการไหลของภูมิภาคกระจายเป็น 0.01 0.02 0.04 และ 0.08 ลิตรต่อนาที เมื่อ อัตราการไหลของภูมิภาคต่อเนื่องคงที่ เท่ากับ 0.1 0.2 0.4 และ 0.8 ตามลำดับ

พิจารณาความสัมพันธ์ของค่าไฮลด์อัฟจากการวัดด้วยวิธีวัดปริมาตรโดยตรงกับค่าไฮลด์อัฟ ด้วยวิธีอัลตราโซนิกที่ภาวะต่างๆกัน ดังแสดงในตารางที่ 4.4 และรูปที่ 4.1

ตารางที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างไฮลด์อัฟจากวิธีอัลตราโซนิกกับวิธีวัดปริมาตรโดยตรง เมื่อ อัตราการไหลของภูมิภาคต่อเนื่องคงที่ต่าง ๆ กัน ตามลำดับ

-เมื่ออัตราการไหลของภูมิภาคต่อเนื่องเท่ากับ 0.1 ลิตรต่อนาที

ชุดการทดลองที่	การทดลองที่	ภาวะการทดลอง		ไฮลด์อัฟ		ความผิดพลาดสัมพันธ์
		ความเร็วรอบจานหมุน (รอบต่อนาที)	อัตราการไหลของภูมิภาคกระจาย (ลิตรต่อนาที)	วิธีวัดปริมาตรโดยตรง	อัลตราโซนิก	ร้อยละ
ชุดที่ 1.1	1	300	0.01	0.064	0.071	10.94
	2	300	0.02	0.171	0.187	9.36
	3	300	0.04	0.379	0.410	8.18
	4	300	0.08	0.479	0.494	3.13
ชุดที่ 1.2	1	400	0.01	0.100	0.115	15.00
	2	400	0.02	0.193	0.215	11.40
	3	400	0.04	0.336	0.365	8.63
	4	400	0.08	0.479	0.495	3.34
ชุดที่ 1.3	1	600	0.01	0.114	0.130	14.04
	2	600	0.02	0.214	0.231	7.94
	3	600	0.04	0.350	0.372	6.29
	4	600	0.08	0.486	0.500	2.88
ชุดที่ 1.4	1	800	0.01	0.100	0.120	20.00
	2	800	0.02	0.207	0.221	6.76
	3	800	0.04	0.357	0.377	5.60
	4	800	0.08	0.479	0.495	3.34

ตารางที่ 4.4 (ต่อ)

-เมื่ออัตราการไหลของภูมิภาคต่อเนื่องเท่ากับ 0.2 ลิตรต่อนาที

ชุดการทดลองที่	การทดลองที่	ภาวะการทดลอง		ไฮลด์อัฟ		ความผิดพลาดสัมพัทธ์
		ความเร็วรอบจานหมุน (รอบต่อนาที)	อัตราการไหลของภูมิภาคกระจาย (ลิตรต่อนาที)	วิธีวัดปริมาตรโดยตรง	อัลตราโซนิก	ร้อยละ
ชุดที่ 2.1	1	300	0.01	0.057	0.068	19.30
	2	300	0.02	0.121	0.144	19.01
	3	300	0.04	0.186	0.215	15.59
	4	300	0.08	0.336	0.358	6.55
ชุดที่ 2.2	1	400	0.01	0.064	0.076	18.75
	2	400	0.02	0.136	0.152	11.76
	3	400	0.04	0.186	0.202	8.60
	4	400	0.08	0.329	0.341	3.65
ชุดที่ 2.3	1	600	0.01	0.071	0.089	25.35
	2	600	0.02	0.136	0.153	12.50
	3	600	0.04	0.179	0.200	11.73
	4	600	0.08	0.350	0.374	6.86
ชุดที่ 2.4	1	800	0.01	0.071	0.090	26.76
	2	800	0.02	0.143	0.165	15.38
	3	800	0.04	0.207	0.231	11.59
	4	800	0.08	0.350	0.383	9.43

ตารางที่ 4.4 (ต่อ)

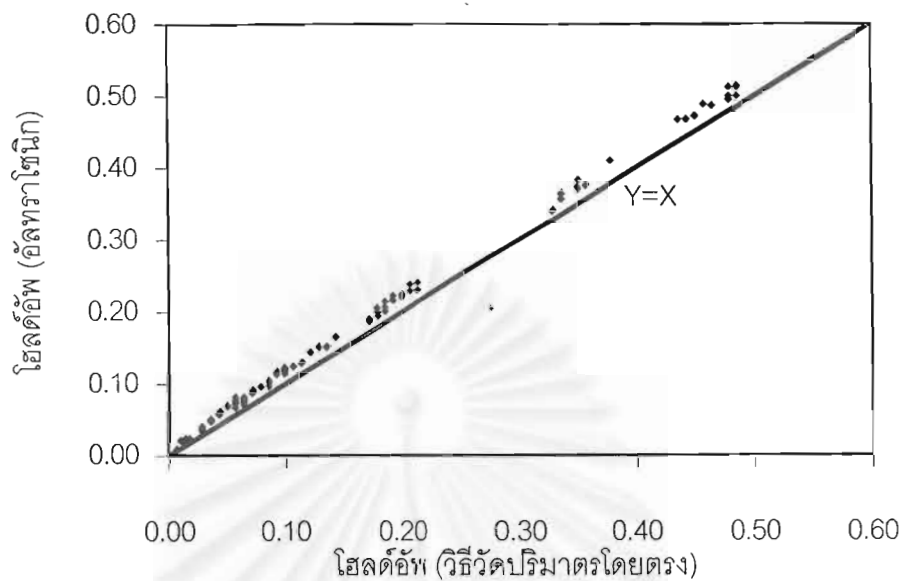
-เมื่ออัตราการไหลของภูมิภาคต่อเนื่องเท่ากับ 0.4 ลิตรต่อนาที

ชุดการทดลองที่	การทดลองที่	ภาวะการทดลอง		ไฮลด์อัฟ		ความผิดพลาดสัมพัทธ์
		ความเร็วรอบจานหมุน (รอบต่อนาที)	อัตราการไหลของภูมิภาคกระจาย (ลิตรต่อนาที)	วิธีวัดปริมาตรโดยตรง	อัลตราโซนิก	ร้อยละ
ชุดที่ 3.1	1	300	0.01	0.029	0.041	41.38
	2	300	0.02	0.064	0.080	25.00
	3	300	0.04	0.100	0.122	22.00
	4	300	0.08	0.193	0.218	12.95
ชุดที่ 3.2	1	400	0.01	0.036	0.048	33.33
	2	400	0.02	0.064	0.082	28.13
	3	400	0.04	0.100	0.123	23.00
	4	400	0.08	0.207	0.229	10.63
ชุดที่ 3.3	1	600	0.01	0.043	0.058	34.88
	2	600	0.02	0.071	0.090	26.76
	3	600	0.04	0.107	0.125	16.82
	4	600	0.08	0.193	0.217	12.44
ชุดที่ 3.4	1	800	0.01	0.036	0.048	33.33
	2	800	0.02	0.064	0.078	21.88
	3	800	0.04	0.100	0.124	24.00
	4	800	0.08	0.200	0.221	10.50

ตารางที่ 4.4 (ต่อ)

-เมื่ออัตราการไหลของภูมิภาคต่อเนื่องเท่ากับ 0.8 ลิตรต่อนาที

ชุดการทดลองที่	การทดลองที่	ภาวะการทดลอง		ไฮลด์อัฟ		ความผิดพลาดสัมพัทธ์
		ความเร็วรอบจานหมุน (รอบต่อนาที)	อัตราการไหลของภูมิภาคกระจาย (ลิตรต่อนาที)	วิธีวัดปริมาตรโดยตรง	อัลตราโซนิก	ร้อยละ
ชุดที่ 4.1	1	300	0.01	0.011	0.021	90.91
	2	300	0.02	0.029	0.035	20.69
	3	300	0.04	0.050	0.069	38.00
	4	300	0.08	0.086	0.097	12.79
ชุดที่ 4.2	1	400	0.01	0.010	0.021	110.00
	2	400	0.02	0.029	0.041	41.38
	3	400	0.04	0.064	0.074	15.63
	4	400	0.08	0.100	0.121	21.00
ชุดที่ 4.3	1	600	0.01	0.007	0.010	42.86
	2	600	0.02	0.043	0.061	41.86
	3	600	0.04	0.057	0.082	43.86
	4	600	0.08	0.100	0.122	22.00
ชุดที่ 4.4	1	800	0.01	0.018	0.024	33.33
	2	800	0.02	0.043	0.059	37.21
	3	800	0.04	0.064	0.077	20.31
	4	800	0.08	0.100	0.120	20.00



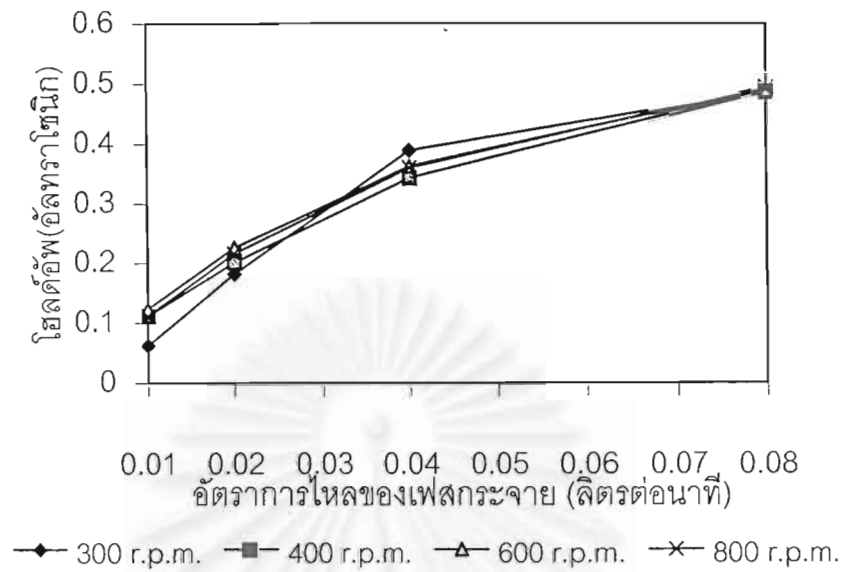
รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ค่าไฮลด์อัฟที่วัดด้วยวิธีอัลทราไซนิค และวิธีวัดปริมาตรโดยตรง

ขั้นตอนที่ 4 การวัดค่าไฮลด์อัฟในคอลัมน์สกัดแบบจานหมุน

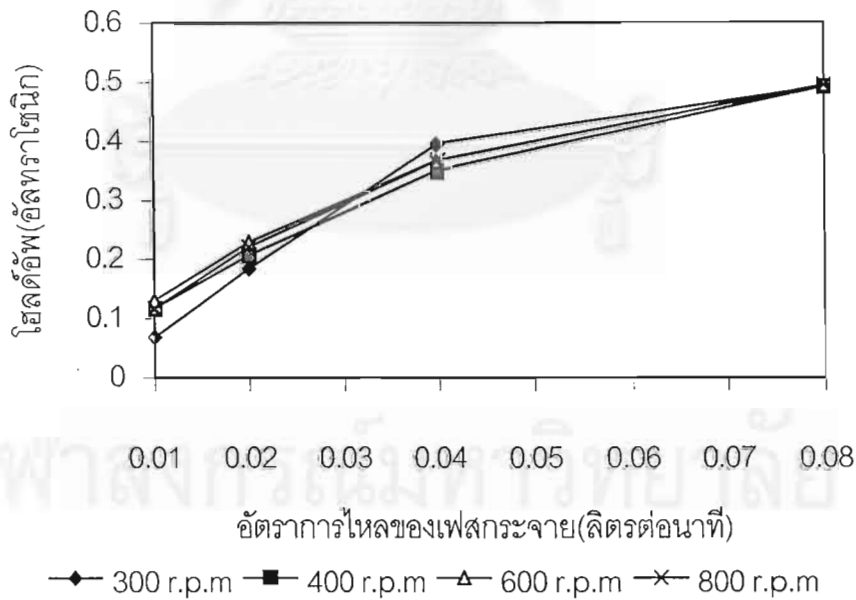
ในการศึกษานี้ได้ศึกษาปัจจัยต่างๆที่มีผลต่อค่าไฮลด์อัฟที่เกิดขึ้นในคอลัมน์สกัดแบบจานหมุน โดยปัจจัยที่ศึกษาได้แก่ อัตราการไหลของวัฏภาคกระจาย อัตราการไหลของวัฏภาคต่อเนื่อง ความเร็วรอบจานหมุน และระดับความสูงติดตั้งทรานสดิวเซอร์ แต่ละปัจจัยได้ผลการศึกษาดังนี้

ขั้นตอนที่ 4.1 ผลของอัตราการไหลของวัฏภาคกระจายต่อค่าไฮลด์อัฟ

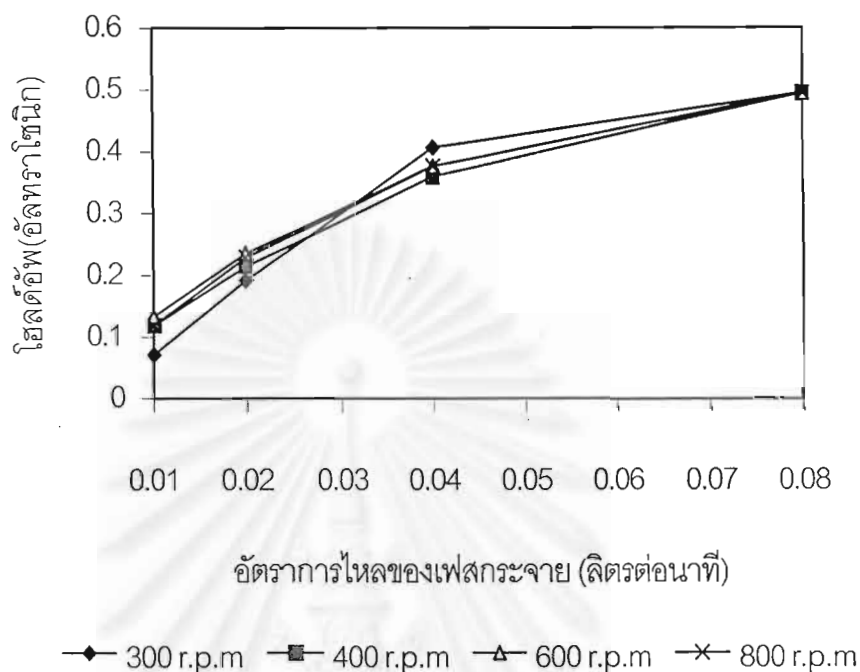
จากการศึกษาผลของอัตราการไหลของวัฏภาคกระจาย มีผลต่อค่าไฮลด์อัฟ พบว่า เมื่ออัตราการไหลของวัฏภาคกระจายเพิ่มขึ้น และให้อัตราการไหลของวัฏภาคต่อเนื่องคงที่ ค่าไฮลด์อัฟจะมีค่าเพิ่มมากขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงแรกที่อัตราการไหลของวัฏภาคกระจายตั้งแต่ 0.02 ถึง 0.04 ลิตรต่อนาที แล้วค่ายังคงเพิ่มขึ้นแต่ไม่มากเหมือนการเพิ่มในช่วงแรกดังกล่าว สอดคล้องกับความสัมพันธ์ของค่าไฮลด์อัฟซึ่งให้อัตราส่วนระหว่างวัฏภาคกระจายต่อวัฏภาคต่อเนื่องมีค่าเพิ่มมากขึ้น และเมื่อให้อัตราการไหลของวัฏภาคต่อเนื่องมีค่าคงที่ แต่เปลี่ยนระดับความสูงติดตั้งทรานสดิวเซอร์ และเปลี่ยนอัตราการไหลของวัฏภาคกระจาย แต่ที่ระดับความสูงติดตั้งทรานสดิวเซอร์กับความเร็วรอบจานหมุน ต่างๆ กัน พบว่าค่าไฮลด์อัฟมีค่าแตกต่างกันเพียงเล็กน้อยเท่านั้น ทั้งสามระดับ โดยมีค่าไฮลด์อัฟอยู่ในช่วง 0.063 ถึง 0.4939 และที่ระดับความสูง และความเร็วรอบจานหมุนมากขึ้น จะมีค่าไฮลด์อัฟมากกว่าเพียงเล็กน้อย ดังแสดงในรูปที่ 4.2 – 4.4



รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างไฮลด์อัฟกับอัตราการไหลของวัฏภาคกระจาย ที่อัตราการไหลของวัฏภาคต่อเนื้อคงที่เท่ากับ 0.1 ลิตรต่อนาทีก และระดับความสูงติดตั้งทรานสดิวเซอร์เท่ากับ 20 เซนติเมตร



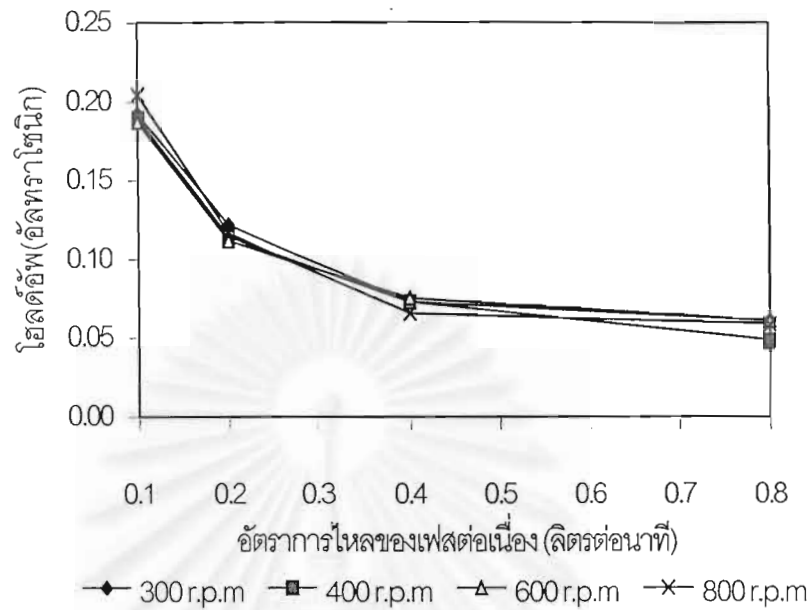
รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างไฮลด์อัฟกับอัตราการไหลของวัฏภาคกระจาย ที่อัตราการไหลของวัฏภาคต่อเนื้อคงที่เท่ากับ 0.1 ลิตรต่อนาทีก และระดับความสูงติดตั้งทรานสดิวเซอร์เท่ากับ 40 เซนติเมตร



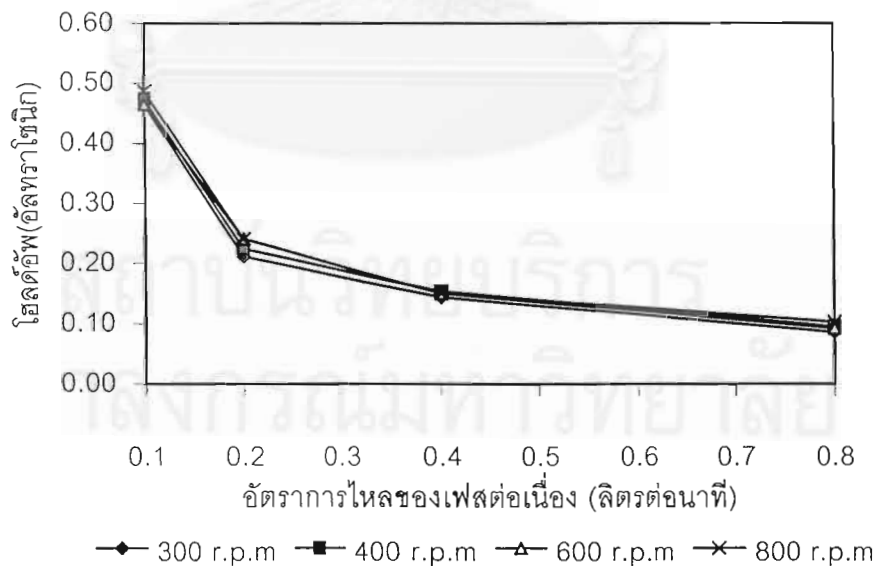
รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างไฮลด์อัฟกับอัตราการไหลของวัฏภาคกระจาย ที่อัตราการไหลของวัฏภาคต่อเนื้อคองที่เท่ากับ 0.1 ลิตรต่อนาที่ และระดับความสูงติดตั้งทรานสดิวเซอร์เท่ากับ 80 เซนติเมตร

ขั้นตอนที่ 4.2 ผลของอัตราการไหลของวัฏภาคต่อเนื้อต่อค่าไฮลด์อัฟ

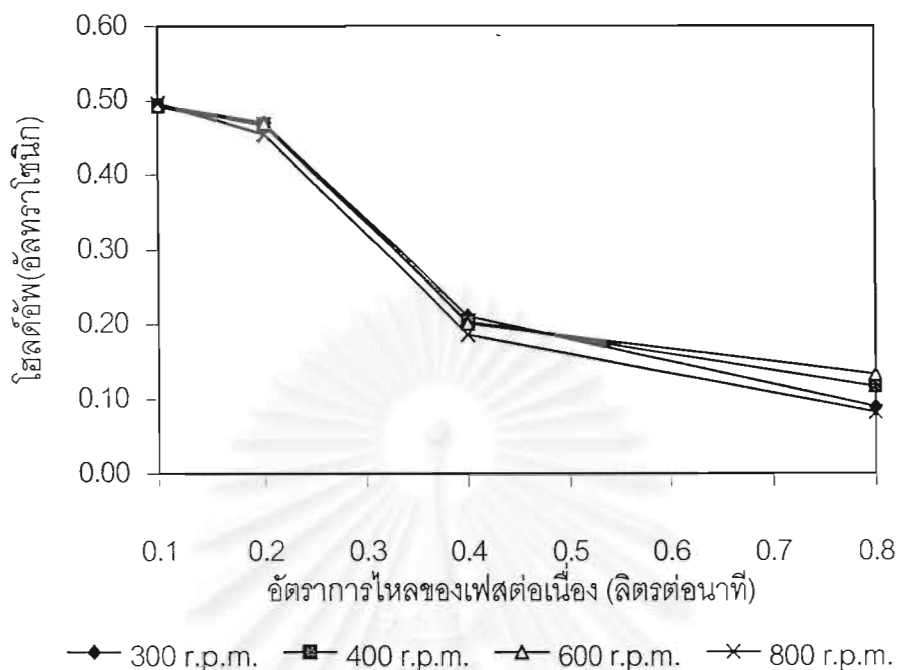
ผลของอัตราการไหลของวัฏภาคต่อเนื้อที่มีต่อค่าไฮลด์อัฟจะมีลักษณะตรงข้ามกับผลที่เกิดขึ้นเนื่องมาจากผลของอัตราการไหลของวัฏภาคกระจาย จากการศึกษพบว่าเมื่อเพิ่มอัตราการไหลของวัฏภาคต่อเนื้อ ค่าไฮลด์อัฟจะมีค่าลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงอัตราการไหลของวัฏภาคต่อเนื้อเท่ากับ 0.1 ถึง 0.4 ลิตรต่อนาที่ แล้วจะลดลงน้อยมากจนเกือบคงที่ โดยที่เมื่ออัตราการไหลของวัฏภาคกระจายที่กำหนดให้คงที่มีค่ามากกว่า ค่าไฮลด์อัฟก็จะมีค่ามากกว่าไฮลด์อัฟที่เมื่ออัตราการไหลของวัฏภาคกระจายน้อยกว่า ดังตารางแสดงในภาคผนวก ค



รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างไฮลด์อัฟกับอัตราการใช้ของวัสดุต่อเนื้อ ที่อัตราการใช้ของวัสดุกระจายคงที่เท่ากับ 0.02 ลิตรต่อนาที และระดับความสูงติดตั้งทรานสดิวเซอร์เท่ากับ 20 เซนติเมตร



รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างไฮลด์อัฟกับอัตราการใช้ของวัสดุต่อเนื้อ ที่อัตราการใช้ของวัสดุกระจายคงที่เท่ากับ 0.04 ลิตรต่อนาที และระดับความสูงติดตั้งทรานสดิวเซอร์เท่ากับ 20 เซนติเมตร



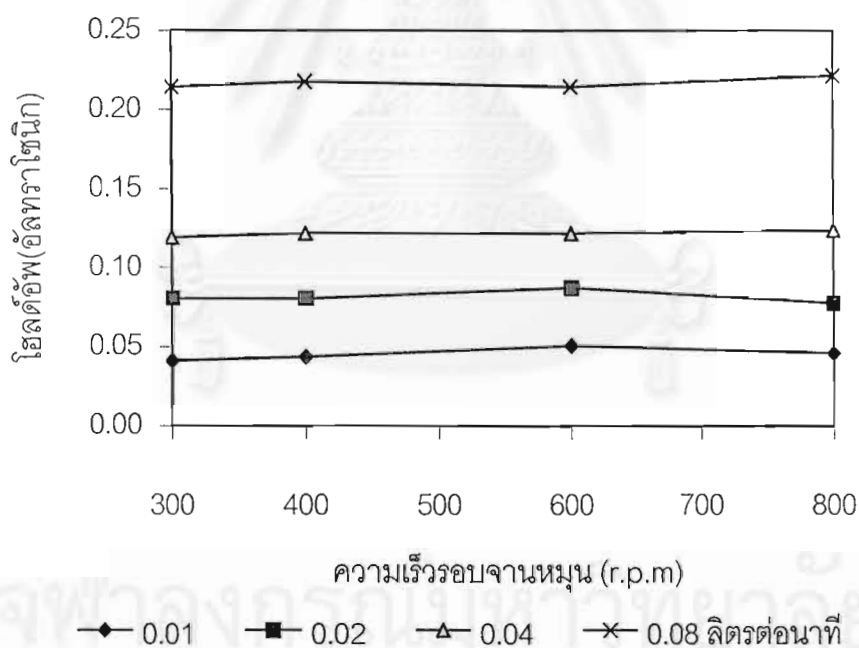
รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างไฮลด์อัฟกับอัตราการไหลของวัฏภาคต่อเนื่อง ที่อัตราการไหลของวัฏภาคกระจายคงที่เท่ากับ 0.08 ลิตรต่อนาที และระดับความสูงติดตั้งทรานสดิวเซอร์เท่ากับ 20 เซนติเมตร

ขั้นตอนที่ 4.3 ผลของความเร็รรอบจานหมุนต่อค่าไฮลด์อัฟ

จากการทดลองศึกษาผลของความเร็รรอบการหมุนของจานหมุนต่อค่าไฮลด์อัฟ ที่ความเร็รรอบต่าง ๆ กัน เมื่ออัตราการไหลของวัฏภาคกระจายหรืออัตราการไหลของวัฏภาคต่อเนื่องคงที่ ที่ระดับความสูงติดตั้งทรานสดิวเซอร์ต่างกัน ผลการทดลองดังตารางแสดงในภาคผนวก และพิจารณาผลการทดลองดังตารางที่ 4.5 ถึง 4.6 และรูปกราฟที่ 4.8 ถึง 4.9 ตามลำดับ

ตารางที่ 4.5 ผลของความเร็วยรอบงานหมุนต่อค่าไฮลด์อัฟ เมื่ออัตราการไหลของวัสดุต่อเนื้อ
คงที่เท่ากับ 0.4 ลิตรต่อนาที และอัตราการไหลของวัสดุกระจายต่างๆกัน ที่ระดับ
ความสูงติดตั้งทรานสดิวเซอร์เท่ากับ 20 เซนติเมตร

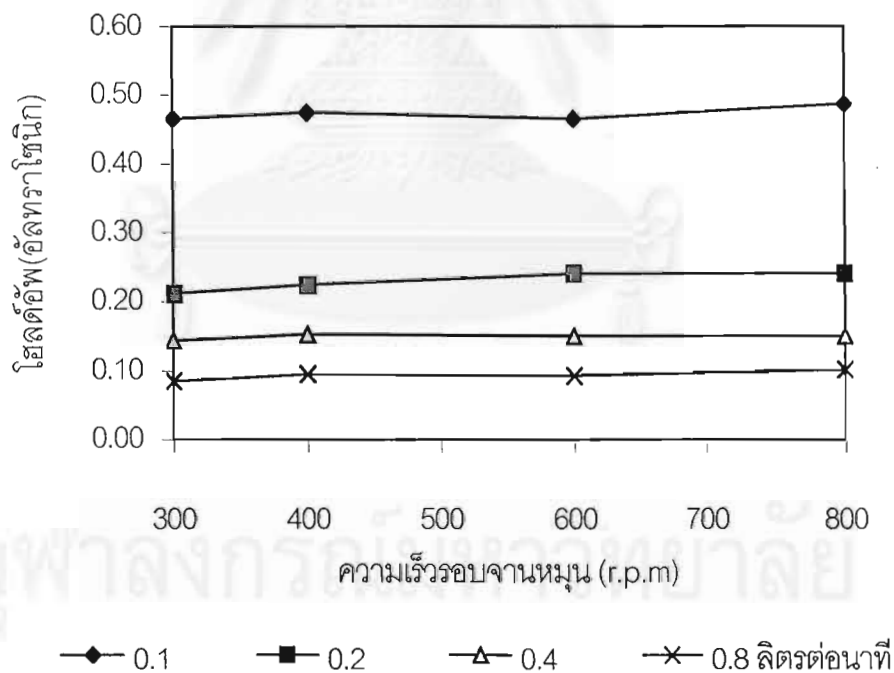
ความเร็วยรอบงานหมุน (รอบต่อนาที)	อัตราการไหลของวัสดุกระจาย (ลิตรต่อนาที)			
	0.01	0.02	0.04	0.08
300	0.041	0.080	0.119	0.214
400	0.044	0.080	0.121	0.218
600	0.051	0.087	0.121	0.214
800	0.046	0.077	0.124	0.217



รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ของความเร็วยรอบงานหมุนต่อค่าไฮลด์อัฟ เมื่ออัตราการไหลของวัสดุ
ต่อเนื้อ คงที่เท่ากับ 0.4 ลิตรต่อนาที และอัตราการไหลของวัสดุกระจายต่างๆกัน ที่
ระดับความสูงติดตั้งทรานสดิวเซอร์เท่ากับ 20 เซนติเมตร

ตารางที่ 4.6 ผลของความเร็วยรอบงานหมุนต่อค่าไฮลด์อัฟ เมื่ออัตราการไหลของวัสดุกระจาย
คงที่เท่ากับ 0.04 ลิตรต่อนาที และอัตราการไหลของวัสดุต่อเนื้อต่าง ๆ กัน ที่
ระดับความสูงติดตั้งทรานสดิวเซอร์เท่ากับ 20 เซนติเมตร

ความเร็วรอบงานหมุน (รอบต่อนาที)	อัตราการไหลของวัสดุต่อเนื้อ (ลิตรต่อนาที)			
	0.1	0.2	0.4	0.8
300	0.465	0.211	0.143	0.085
400	0.474	0.224	0.153	0.095
600	0.464	0.241	0.150	0.092
800	0.486	0.241	0.150	0.102



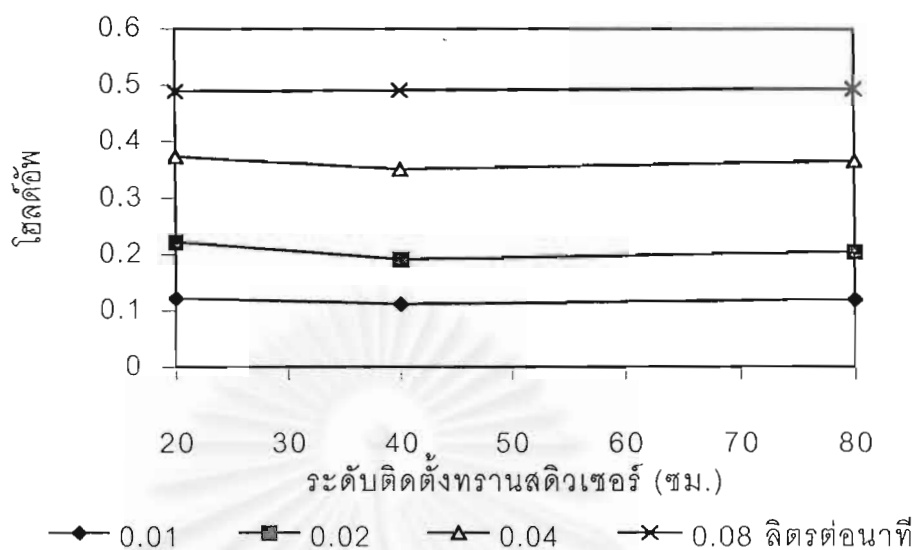
รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ของความเร็วรอบงานหมุนต่อค่าไฮลด์อัฟ เมื่ออัตราการไหลของวัสดุ
กระจายคงที่เท่ากับ 0.04 ลิตรต่อนาที และอัตราการไหลของวัสดุต่อเนื้อต่าง ๆ กัน
ที่ระดับความสูงติดตั้งทรานสดิวเซอร์เท่ากับ 20 เซนติเมตร

ขั้นตอนที่ 4.4 ค่าโพลด์ัฟที่ระดับติดตั้งทรานสดิวเซอร์ต่างๆ

ค่าโพลด์ัฟที่ระดับติดตั้งทรานสดิวเซอร์ต่างๆ กัน ที่มีความสูงในการติดตั้งเท่ากับ 20 40 และ 80 เซนติเมตรตามลำดับนั้น มีค่าแตกต่างกันเพียงเล็กน้อยที่อัตราการไหลของภูมิภาคกระจายเดียวกันดังแสดงในตารางที่ 4.7 ถึง 4.8 และรูปที่ 4.10 ถึง 4.11 ตามลำดับ

ตารางที่ 4.7 ค่าโพลด์ัฟที่ระดับติดตั้งทรานสดิวเซอร์ต่างๆ ที่อัตราการไหลของภูมิภาคต่อเนื้อคองที่เท่ากับ 0.1 ลิตรต่อนาที และความเร็วรอบจานหมุนเท่ากับ 400 รอบต่อนาที

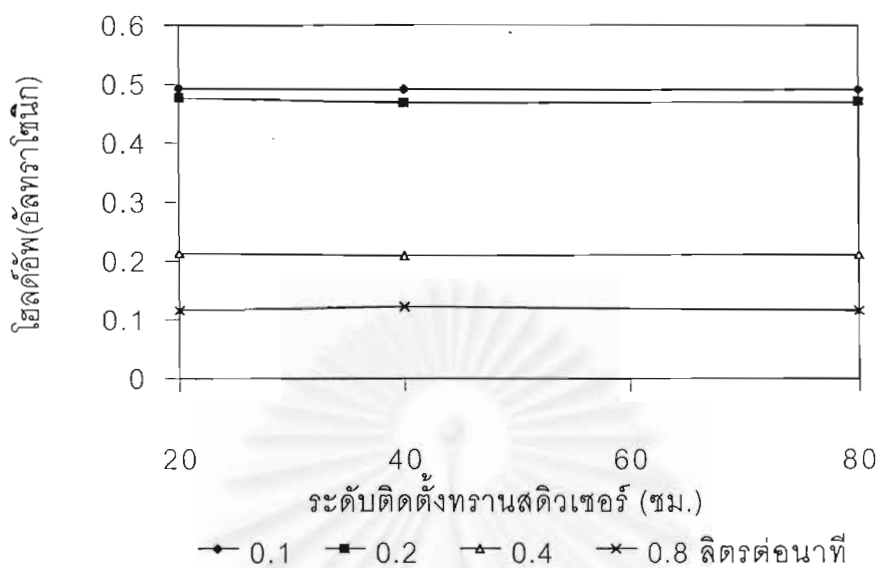
ระดับความสูง ติดตั้งทรานสดิวเซอร์ (เซนติเมตร)	อัตราการไหลของภูมิภาคกระจาย (ลิตรต่อนาที)			
	0.01	0.02	0.04	0.08
20	0.122	0.221	0.373	0.498
40	0.110	0.190	0.350	0.491
80	0.119	0.204	0.365	0.493



รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างระดับติดตั้งทรวงานสตีวเซอร์ และไฮลด์อัฟที่อัตราการไหลของ ภูมิภาคกระจายต่างๆ เมื่อให้อัตราการไหลของภูมิภาคต่อเนื่องเท่ากับ 0.1 ลิตรต่อนาทีและความเร็วรอบจานหมุนเท่ากับ 400 รอบต่อนาที

ตารางที่ 4.8 ค่าไฮลด์อัฟที่ระดับติดตั้งทรวงานสตีวเซอร์ต่างๆ ที่อัตราการไหลของภูมิภาคกระจายคงที่เท่ากับ 0.08 ลิตรต่อนาที และความเร็วรอบจานหมุนเท่ากับ 400 รอบต่อนาที

ระดับความสูง ติดตั้งทรวงานสตีวเซอร์ (เซนติเมตร)	อัตราการไหลของภูมิภาคต่อเนื่อง (ลิตรต่อนาที)			
	0.1	0.2	0.4	0.8
20	0.494	0.476	0.214	0.116
40	0.489	0.467	0.209	0.121
80	0.491	0.470	0.211	0.116



รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างระดับติดตั้งทรานสดิวเซอร์ และโวลต์จัพที่อัตราการไหลของ ภูมิภาคต่อเนื้อต่างๆ โดยอัตราการไหลของภูมิภาคกระจายคงที่เท่ากับ 0.08 ลิตร ต่อนาทีและความเร็วรอบจานหมุนเท่ากับ 400 รอบต่อนาที

บทที่ 5

อภิปรายและวิจารณ์ผลการทดลอง

จากผลการทดลองในบทที่ 4 ที่ได้แสดงแล้วนั้น สามารถอภิปรายและวิจารณ์ผลการทดลองในแต่ละขั้นตอน โดยมีสมมติฐานในการวิจัยดังต่อไปนี้

- 1) สมมติให้ค่าไฮลด์อัฟที่วัดด้วยวิธีวัดปริมาตรโดยตรง มีความถูกต้องและน่าเชื่อถือ เป็นวิธีที่นิยมใช้เป็นพื้นฐานในการเปรียบเทียบไฮลด์อัฟจากการวัดด้วยวิธีการอื่นๆ (Bonnet J.C. & Tavlarides L.L., 1987)
- 2) เวลาที่คลื่นอัลตราโซนิกใช้ในการเดินทางผ่านสารบริสุทธิ์สำหรับระบบ (น้ำ และ โทลูอีน) มีค่าคงที่ทั้งในคอลัมน์สกัดแบบจานหมุนขนาดย่อส่วน และคอลัมน์สกัดแบบจานหมุน
- 3) ใช้ความสัมพันธ์ของ Bonnet J.C. & Tavlarides L.L., 1987 ในการคำนวณค่าไฮลด์อัฟจากเวลาเดินทางผ่านสารผสม ด้วยเทคนิคอัลตราโซนิกในคอลัมน์สกัดแบบจานหมุนขนาดย่อส่วน และคอลัมน์สกัดแบบจานหมุน
- 4) เนื่องจากมีข้อจำกัดของคอลัมน์สกัดแบบจานหมุนที่ใช้ ไม่ได้ออกแบบให้สำหรับวัดไฮลด์อัฟด้วยวิธีวัดปริมาตรโดยตรง จึงต้องทำวิธีดังกล่าวในคอลัมน์สกัดแบบจานหมุนขนาดย่อส่วนซึ่งมีปริมาตรขนาดเล็ก

ขั้นตอนที่ 1 การวัดความเร็วเสียงอัลตราโซนิกของสารบริสุทธิ์แต่ละชนิดในระบบ batch

จากการทดลองวัดเวลาเดินทางของคลื่นอัลตราโซนิกผ่านสารบริสุทธิ์แต่ละชนิด ที่บรรจุในภาชนะอะคริลิกพลาสติก สามารถนำไปคำนวณหาความเร็วเสียงอัลตราโซนิกของสารบริสุทธิ์แต่ละชนิดได้ แสดงในตารางที่ 5.1 และได้เปรียบเทียบค่าความเร็วที่ได้จากการทดลอง กับข้อมูลจากคู่มือ (Lynnworth L.C., 1992) โดยได้แสดงการคำนวณไว้ในภาคผนวก ก

ตารางที่ 5.1 ความเร็วคลื่นอัลตราโซนิกผ่านสารบริสุทธิ์แต่ละชนิด

สารบริสุทธิ์	เวลาเดินทาง ผ่านภาชนะ และสาร บริสุทธิ์ (ไมโครวินาที)	เวลาเดินทาง ผ่านภาชนะ (ไมโครวินาที)	เวลาเดินทาง ผ่านสาร บริสุทธิ์ (ไมโครวินาที)	ความเร็วคลื่น อัลตราโซนิกผ่าน สารบริสุทธิ์ จากการทดลอง (เมตรต่อวินาที)	ความเร็วคลื่น อัลตราโซนิกผ่านสาร บริสุทธิ์ (20°C) (Lynnworth L.C, 1992) (เมตรต่อวินาที)	ร้อยละความ ผิดพลาด สัมพัทธ์
	1	2	3 = 1-2	4	5	6 $= \frac{ (5-4) }{4} \times 100$
น้ำ	58.02	7.4349	50.59	1,482.65	1,482	0.044
เบนซีน	64.61	7.4349	57.18	1,311.76	1,326	1.09
โทลูอิน	65.46	7.4349	58.03	1,292.54	1,328	2.74
เมทานอล	77.26	7.4349	69.83	1,074.11	1,123	4.55
คาร์บอนเตตระ- คลอไรด์	87.13	7.4349	79.70	941.09	938	0.32

ในขั้นตอนนี้เป็นการทดลองเพื่อตรวจสอบความถูกต้อง และนำเช็ถือของอัลตราโซนิกทรานสดิวเซอร์ที่นำมาใช้กำเนิดคลื่นอัลตราโซนิกในการทดลอง โดยทำการวัดเวลาที่ใช้เดินทางของคลื่นอัลตราโซนิกผ่านสารบริสุทธิ์แต่ละชนิด แล้วนำมาคำนวณค่าความเร็วคลื่นผ่านสารบริสุทธิ์ เมื่อนำค่าความเร็วคลื่นผ่านสารบริสุทธิ์ที่คำนวณได้ (ช่องที่ 4) มาเปรียบเทียบกับค่าความเร็วคลื่นผ่านสารบริสุทธิ์ต่างๆ นี้ ที่มีผู้ได้ทำการศึกษาไว้แล้ว (ช่องที่ 5) จากการเปรียบเทียบค่าความเร็วคลื่นในรูปของร้อยละความผิดพลาดสัมพัทธ์ (ช่องที่ 6) จะเห็นได้ว่ามีค่าน้อยมากคือมีค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 0.32 ถึง 4.55

จากการทดลองพบว่าค่าความเร็วคลื่นอัลตราโซนิกเมื่อผ่านสารบริสุทธิ์ มีความสัมพันธ์กับความหนาแน่นของสารบริสุทธิ์นั้น คือสารบริสุทธิ์ที่มีความหนาแน่นสูงกว่า คลื่นอัลตราโซนิกสามารถเดินทางผ่านสารบริสุทธิ์ได้เร็วกว่า และใช้เวลาน้อยกว่าสารบริสุทธิ์ที่มีความหนาแน่นต่ำกว่า แต่จากการทดลองพบว่าคาร์บอนเตตระคลอไรด์ซึ่งเป็นสารที่มีความหนาแน่นมากที่สุด แต่

กลับใช้เวลาในการเดินทางมากที่สุด หรือเคลื่อนที่ผ่านสารบริสุทธิ์ได้ช้าที่สุด สาเหตุที่เป็นเช่นนี้ยังไม่มีข้อมูลใดยืนยันปรากฏการณ์นี้ ซึ่งจากการวัดเวลาเดินทางของคลื่นอัลตราโซนิกผ่านคาร์บอน-เตตระคลอไรด์ที่ได้จากการทำการทดลอง เพื่อเปรียบเทียบเวลาเดินทางของคลื่นอัลตราโซนิกผ่านคาร์บอน-เตตระคลอไรด์ที่ได้จากการทดลองกับข้อมูลจากผู้ที่ได้ทำการศึกษาไว้แล้ว

จึงสามารถกล่าวได้ว่าอัลตราโซนิกทรานสดิวเซอร์ที่นำมาใช้ในการทดลอง มีความถูกต้องและน่าเชื่อถือเพียงพอสำหรับนำไปใช้กับระบบน้ำ-โทลูอีน ในการทดลองขั้นตอนอื่น ๆ ต่อไป

ขั้นตอนที่ 2 การวัดเวลาเดินทางของคลื่นอัลตราโซนิกผ่านสารบริสุทธิ์ ที่บรรจุในคอลัมน์ สกัดแบบจานหมุนขนาดย่อส่วน และคอลัมน์สกัดแบบจานหมุน

การศึกษาในขั้นตอนนี้ เป็นการวัดเวลาที่คลื่นอัลตราโซนิกใช้เดินทางในระบบที่ทำการศึกษาคือ น้ำ-โทลูอีน ในคอลัมน์สกัดแบบจานหมุนขนาดย่อส่วน และคอลัมน์สกัดแบบจานหมุนตามลำดับ จากการทดลองสามารถวัดเวลาเดินทางของคลื่นอัลตราโซนิกในน้ำ (t_1) และโทลูอีน (t_2) ซึ่งจะเป็นค่าคงที่ ที่จะนำไปใช้ในการคำนวณค่าโฮลด์อัฟ (ϕ) จากความสัมพันธ์ของ Bonnet J.C. and Tavlarides L.L., 1987 .ดังนี้

$$\phi = \frac{t^* - t_1}{t_2 - t_1} \quad (15)$$

โดยเวลาที่ใช้ในการเดินทางของน้ำและโทลูอีนในคอลัมน์สกัดแบบจานหมุนขนาดย่อส่วน และคอลัมน์สกัดแบบจานหมุนมีค่าที่แตกต่างกัน ซึ่งมีค่าน้อยกว่าเวลาที่ใช้เดินทางในภาชนะอะคริลิก เนื่องจากผนังคอลัมน์แก้วเป็นตัวกลางที่มีความหนาแน่นสูง มีความเร็วในการเดินทางของคลื่นอัลตราโซนิกผ่านตัวกลางเร็วกว่า จึงใช้เวลาน้อยกว่าในการเดินทางจากอัลตราโซนิกทรานสดิวเซอร์ตัวส่งจนถึงอัลตราโซนิกทรานสดิวเซอร์ตัวรับสำหรับคอลัมน์ทั้งสองขนาด และเมื่อเปรียบเทียบเวลาเดินทางของคลื่นอัลตราโซนิกผ่านสารบริสุทธิ์ทั้งสองในคอลัมน์สกัดทั้งสองนั้น พบว่าสำหรับน้ำและโทลูอีนมีความแตกต่างของความเร็วคลื่นอัลตราโซนิกผ่านคอลัมน์สกัดแบบจานหมุนขนาดย่อส่วน และคอลัมน์สกัดแบบจานหมุน เท่ากับร้อยละ 3.75 และ 3.68 ตามลำดับ ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกัน

จากตารางที่ 4.2 และ 4.3 เมื่อพิจารณาความเร็วคลื่นอัลตราโซนิกที่ได้จากการคำนวณด้วยเวลาเดินทางของคลื่นอัลตราโซนิกผ่านสารบริสุทธิ์ที่บรรจุในคอลัมน์สกัดแบบจานหมุนขนาดย่อส่วน ที่ได้จากการทดลอง พบว่ามีค่าใกล้เคียงกับความเร็วคลื่นอัลตราโซนิกที่ได้จากการทดลอง

ในขั้นตอนที่ 1 ในตารางที่ 4.1 แต่เมื่อพิจารณาความเร็วคลื่นอัลตราโซนิกที่ได้จากการคำนวณด้วยเวลาเดินทางของคลื่นอัลตราโซนิกผ่านสารบริสุทธิ์ที่บรรจุในคอลัมน์สกัดแบบจานหมุน กลับมีค่าแตกต่างจากความเร็วคลื่นอัลตราโซนิก สาเหตุที่เป็นเช่นนี้เนื่องมาจากค่าความเร็วคลื่นอัลตราโซนิกผ่านแก้วไพเร็กซ์ (pyrex) มาตรฐาน (David R.L., 1992-1993) ที่นำมาใช้ในการคำนวณ ไม่สามารถนำมาใช้คำนวณกับคอลัมน์สกัดแบบจานหมุน เนื่องจากคอลัมน์สกัดแบบจานหมุนที่ใช้ไม่ได้ทำจากแก้วไพเร็กซ์ อีกประการหนึ่งที่ทำให้ต้องใช้ค่าความเร็วคลื่นอัลตราโซนิกผ่านแก้วไพเร็กซ์ มาตรฐานคือไม่สามารถทำการวัดความเร็วคลื่นอัลตราโซนิกผ่านคอลัมน์แก้วโดยตรงได้ ทำให้ความเร็วที่คำนวณได้มีค่าแตกต่างจากความเร็วคลื่นอัลตราโซนิกที่เดินทางผ่านคอลัมน์สกัดแบบจานหมุนขนาดย่อยส่วน ซึ่งทำมาจากแก้วไพเร็กซ์

ขั้นตอนที่ 3 การเปรียบเทียบไฮลด์อัฟที่วัดด้วยเทคนิคอัลตราโซนิก และการวัดปริมาตรโดยตรง ในคอลัมน์สกัดแบบจานหมุนขนาดย่อยส่วน เมื่ออัตราการไหลของวัฏภาคต่อเนื่องคงที่ต่างๆ กัน

การศึกษาในขั้นตอนนี้เป็นการเปรียบเทียบค่าไฮลด์อัฟที่ได้จากการทดลองด้วยวิธีการวัดปริมาตรโดยตรง และเทคนิคอัลตราโซนิกตามที่ได้อธิบายในวิธีการดำเนินการทดลอง โดยทำการศึกษาในคอลัมน์สกัดแบบจานหมุนขนาดย่อยส่วนก่อนที่จะทำการทดลองกับคอลัมน์แบบจานหมุน เนื่องจากคอลัมน์สกัดแบบจานหมุนไม่ได้ออกแบบไว้สำหรับการดึงตัวอย่างออกมาวัดปริมาตร และหาไฮลด์อัฟที่ตำแหน่งต่างๆ โดยตรง จึงใช้คอลัมน์สกัดแบบจานหมุนขนาดย่อยส่วนเป็นตัวแทนเปรียบเทียบเทคนิคอัลตราโซนิกกับการวัดปริมาตรโดยตรง โดยสมมติว่าไฮลด์อัฟที่วัดได้เป็นค่าเฉพาะตำแหน่ง (local hold-up) เนื่องจากคอลัมน์ขนาดย่อยส่วนที่ใช้มีความสูงไม่มากนัก การวัดปริมาตรของวัฏภาคกระจายที่อยู่ในคอลัมน์สกัดแบบจานหมุนขนาดย่อยส่วนสามารถทำได้อย่างรวดเร็วในเวลาใกล้เคียงกับการวัดเวลาเดินทางของคลื่นอัลตราโซนิกของวัฏภาคกระจายในสารผสม ภายในคอลัมน์สกัดแบบจานหมุนขนาดย่อยส่วน

การทดลองวัดค่าไฮลด์อัฟด้วยวิธีวัดปริมาตรโดยตรงในคอลัมน์สกัดแบบจานหมุนขนาดย่อยส่วนนี้เป็นการวัดปริมาตรของวัฏภาคกระจายที่มีอยู่จริงในคอลัมน์ ณ ภาวะการทดลองนั้น ซึ่งค่าไฮลด์อัฟสามารถคำนวณหาได้จากอัตราส่วนระหว่างปริมาตรของวัฏภาคกระจายและปริมาตรทั้งหมดของสารผสมในคอลัมน์สกัดแบบจานหมุนขนาดย่อยส่วน สำหรับค่าไฮลด์อัฟที่วัดด้วยเทคนิคอัลตราโซนิกได้จากการคำนวณจากความสัมพันธ์ของ Bonnet J.C. and Tavlarides L.L., 1987 ข้างต้น เมื่อทราบเวลาเดินทางของคลื่นอัลตราโซนิกที่เดินทางผ่านคอลัมน์สกัดแบบ

งานหมุนที่มีสารบริสุทธิ์บรรจุอยู่ภายในจากการทดลองในขั้นตอนที่ 2 และเวลาที่เดินทางผ่านสารผสมที่บรรจุในคอลัมน์ที่ทำการวัดในขั้นตอนที่ 3 นี้ ที่ภาวะเดียวกันค่าไฮลด์อัฟในขณะนั้นจะถูกวัดด้วยวิธีวัดปริมาตรโดยตรง และวัดเวลาเดินทางของคลื่นอัลตราโซนิกพร้อม ๆ กัน ดังผลการทดลองแสดงในภาคผนวก ข

เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ของค่าไฮลด์อัฟจากทั้งสองวิธี ที่ความเร็วรอบ อัตราการไหล ภูมิภาคต่อเนื่อง อัตราการไหลภูมิภาคกระจายมีค่าต่างๆ กัน ความสัมพันธ์เป็นดังรูปที่ 4.1 แสดงให้เห็นว่าค่าไฮลด์อัฟที่ได้จากการวัดด้วยเทคนิคอัลตราโซนิกจะมีค่ามากกว่าค่าที่วัดได้จากวิธีวัดปริมาตรโดยตรงเล็กน้อย คือมีค่าเฉลี่ยของผลต่างของค่าไฮลด์อัฟแบบเส้นตรงจากทั้งสองวิธีมีค่าเท่ากับ 0.019 แต่ในบางการทดลองในตารางที่ 4.4 อาจมีร้อยละความผิดพลาดสัมพัทธ์ที่สูงเนื่องมาจากผลของการหารด้วยค่าไฮลด์อัฟจากวิธีวัดปริมาตรโดยตรงซึ่งมีค่าน้อย ทำให้ร้อยละความผิดพลาดสัมพัทธ์มีค่าสูงตามไปด้วย

จากตารางที่ 4.4 พบว่าค่าไฮลด์อัฟมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มอัตราการไหลของภูมิภาคกระจายหรือในทางกลับกัน ค่าไฮลด์อัฟมีค่าลดลงเมื่ออัตราการไหลของภูมิภาคต่อเนื่องเพิ่มขึ้น และเมื่ออัตราการไหลของภูมิภาคกระจายเพิ่มขึ้น โดยที่อัตราการไหลของภูมิภาคต่อเนื่องคงที่ พบว่าค่าไฮลด์อัฟจะมีค่าเพิ่มขึ้น แต่มีความคลาดเคลื่อนลดลง ดังรูปที่ 4.2 ถึง 4.4 เห็นได้ว่าที่อัตราการไหลของภูมิภาคกระจายสูงสุด ค่าไฮลด์อัฟเกือบมีค่าเท่ากันหรือเกือบเป็นจุดเดียวกัน ก็เนื่องมาจากอัตราการไหลของภูมิภาคกระจายที่สูงขึ้นนั้นตอบสนองต่อเทคนิคอัลตราโซนิกได้ดีกว่า แสดงให้เห็นว่าการทำการทดลองที่อัตราการไหลของภูมิภาคกระจายสูงๆ สามารถลดความคลาดเคลื่อนของค่าไฮลด์อัฟลงได้

ในขั้นตอนนี้จึงสามารถสรุปได้ว่า สามารถนำเทคนิคอัลตราโซนิกมาใช้กับคอลัมน์สกัดแบบงานหมุนเพื่อหาค่าไฮลด์อัฟได้ เนื่องจากเมื่อเปรียบเทียบค่าไฮลด์อัฟทั้งสองวิธีแล้ว พบว่ามีความใกล้เคียงกัน โดยดูจากรูปที่ 4.1 ซึ่งจะมีค่าเบี่ยงเบนจากเส้นตรง $Y=X$ (ไฮลด์อัฟที่วัดด้วยเทคนิคอัลตราโซนิกมีค่าเท่ากับไฮลด์อัฟที่วัดด้วยวิธีวัดปริมาตรโดยตรง) เทคนิคอัลตราโซนิกจึงมีความน่าเชื่อถือเพียงพอที่จะนำไปใช้หาไฮลด์อัฟของระบบน้ำ-โทลูอีน ในคอลัมน์สกัดแบบงานหมุนเพื่อทำการทดลองในขั้นตอนที่ 4 ต่อไป

ขั้นตอนที่ 4 การวัดค่าไฮลด์อัฟในคอลัมน์สกัดแบบจานหมุน

ในขั้นตอนนี้มีตัวแปรที่ทำการศึกษา ได้แก่ อัตราการไหลของวัฏภาคกระจาย อัตราการไหลของวัฏภาคต่อเนื่อง และความเร็วรอบจานหมุน โดยแต่ละตัวแปรนี้มีผลต่อค่าไฮลด์อัฟดังนี้

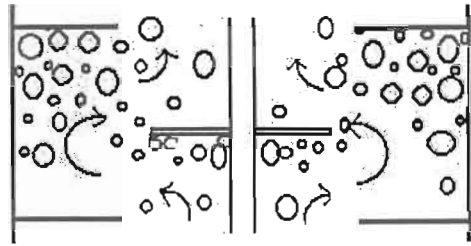
-ผลของอัตราการไหลของวัฏภาคกระจายต่อค่าไฮลด์อัฟ

จากรูปที่ 4.2 ถึง 4.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างไฮลด์อัฟกับอัตราการไหลของวัฏภาคกระจาย ที่อัตราการไหลของวัฏภาคต่อเนื่องคงที่ พบว่าที่อัตราการไหลของวัฏภาคกระจายเพิ่มมากขึ้น ค่าไฮลด์อัฟจะมีค่าเพิ่มมากขึ้น และจะมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงแรกที่มีอัตราการไหลของ วัฏภาคกระจายต่ำ คือในช่วงอัตราการไหลของวัฏภาคกระจายระหว่าง 0.02-0.04 ลิตรต่อนาที สังเกตได้จากในช่วงอัตราการไหลดังกล่าวนี้ จะมีความชันมากกว่าที่อัตราการไหลของวัฏภาคกระจายที่สูงขึ้น ซึ่งจะมีค่าไฮลด์อัฟเพิ่มมากขึ้นแต่จะไม่เพิ่มมากเหมือนในช่วงแรก สาเหตุดังกล่าวข้างต้นอธิบายได้ว่าอาจเกิดขึ้นมาจาก เมื่อปริมาณของวัฏภาคกระจายน้อย หยดของวัฏภาคกระจายสามารถลอยขึ้นไปได้อย่างอิสระ แต่เมื่ออัตราการไหลของวัฏภาคกระจายเพิ่มมากขึ้น การลอยขึ้นของหยดวัฏภาคกระจายจะมีความอิสระลดลง โดยพบว่าจะเกิดการสะสมที่บริเวณวงแหวนสถิติ และจานหมุน ซึ่งจะมีการสะสมตัวของหยดวัฏภาคกระจายได้มากขึ้นอีก ทำให้มีไฮลด์อัฟที่เพิ่มขึ้นอย่างมากในตอนแรก รวมทั้งหยดของวัฏภาคกระจายมีโอกาสถูกจานหมุนเฉือนให้มีขนาดเล็กลงจึงลอยตัวขึ้นได้ช้าลง เป็นไปตามกฎของ Stoke (Stokes' Law) ที่อธิบายถึงปรากฏการณ์ของการเคลื่อนที่ของของไหล ซึ่งได้ให้ความสัมพันธ์ของความเร็วปลาย (terminal velocity) ดังนี้

$$u_t = \frac{gD_p^2(\rho_p - \rho)}{18\mu} \quad (21)$$

จะเห็นว่า เมื่อขนาดหยดของของไหล (D_p) (วัฏภาคกระจาย) มีขนาดใหญ่ขึ้น ก็จะมีความเร็วปลายสูงขึ้น และในทางตรงกันข้าม เมื่อขนาดหยดของของไหลเล็กลง จะมีความเร็วปลายลดลงหรือลอยตัวได้ช้าลงนั่นเอง ส่งผลให้เกิดการสะสมมากขึ้น ไฮลด์อัฟจึงมีค่าเพิ่มขึ้น

แต่เมื่อเพิ่มอัตราการไหลของวัฏภาคกระจายจนถึงระดับหนึ่ง ตั้งแต่ 0.04 ลิตรต่อนาทีขึ้นไปแล้วหยดของวัฏภาคกระจายจะไม่สะสมตัวเพิ่มขึ้นอีก เนื่องจากหยดของวัฏภาคกระจายพยายามรักษาสสมดุล โดยพยายามหาช่องทางออกเกิดการเคลื่อนที่หลุดออกไปตามช่องว่างรอบๆ วงแหวนสถิติ และช่องว่างระหว่างวงแหวนสถิติกับแกนยึดจานหมุน ตามทิศทางการไหล ดังรูปที่ 5.1

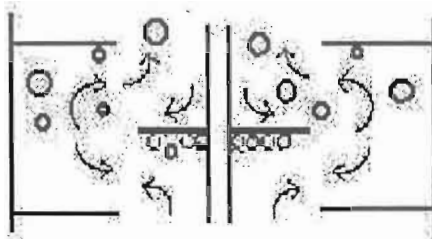


รูปที่ 5.1 ทิศทางการไหล และการสะสมตัวของหยดวิฎภาคกระจายบริเวณวงแหวนสถิต และจานหมุน

นอกจากนั้นยังมีโอกาสที่หยดของวิฎภาคกระจายจะรวมตัวกันเป็นหยดที่มีขนาดใหญ่ขึ้น การลอยตัวจึงเป็นไปได้เร็วขึ้น การสะสมตัวของหยดวิฎภาคกระจายมีอัตราเพิ่มลดลง ค่าไฮลด์อัฟจึงเพิ่มขึ้นในอัตราที่ลดลงดังแสดงในรูปกราฟ 4.2 ถึง 4.4 ดังกล่าว

-ผลของอัตราการไหลของวิฎภาคต่อเนื่องต่อค่าไฮลด์อัฟ

ผลจากการศึกษาอัตราการไหลของวิฎภาคต่อเนื่องต่อค่าไฮลด์อัฟนั้น เป็นไปตามรูปที่ได้แสดงในรูปที่ 4.5 ถึง 4.7 ซึ่งจะมีลักษณะตรงกันข้ามกับผลของอัตราการไหลของวิฎภาคกระจายจากการทดลองพบว่าเมื่อเพิ่มอัตราการไหลของวิฎภาคต่อเนื่อง ค่าไฮลด์อัฟจะมีค่าลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงอัตราการไหลของวิฎภาคต่อเนื่องเท่ากับ 0.1 ถึง 0.4 ลิตรต่อนาที แล้วจะลดลงอย่างต่อเนื่องในอัตราที่ลดลงเมื่ออัตราการไหลของวิฎภาคต่อเนื่องเพิ่มขึ้นจนค่าไฮลด์อัฟเกือบคงที่ประมาณ 0.05 เมื่ออัตราการไหลของวิฎภาคต่อเนื่องเป็น 0.8 ลิตรต่อนาที ที่อัตราการไหลของวิฎภาคกระจายคงที่ต่างๆกัน ผลการทดลองและการสังเกตพบว่า เมื่ออัตราการไหลของวิฎภาคต่อเนื่องเพิ่มขึ้น เป็นสาเหตุให้เกิดความปั่นป่วน (turbulent) ของหยดวิฎภาคกระจายภายในคอลัมน์ สกัดแบบจานหมุนเพิ่มมากขึ้น และด้วยแรงของวิฎภาคต่อเนื่องที่มาจากสภาพความปั่นป่วนของวิฎภาคต่อเนื่องที่เกิดขึ้นนี้ มีผลทำให้หยดของวิฎภาคกระจายหลุดตัวออกจากบริเวณวงแหวนสถิต และแกนนืดจานหมุนได้มากขึ้น การสะสมตัวของหยดวิฎภาคกระจายที่บริเวณดังกล่าวข้างต้นมีอัตราลดลง ดังรูปที่ 5.2



รูปที่ 5.2 ทิศทางการไหล และการสะสมตัวของหยดวิภาคกระจายเมื่อมีสภาพความปั่นป่วนในคอลัมน์สกัดแบบจานหมุน

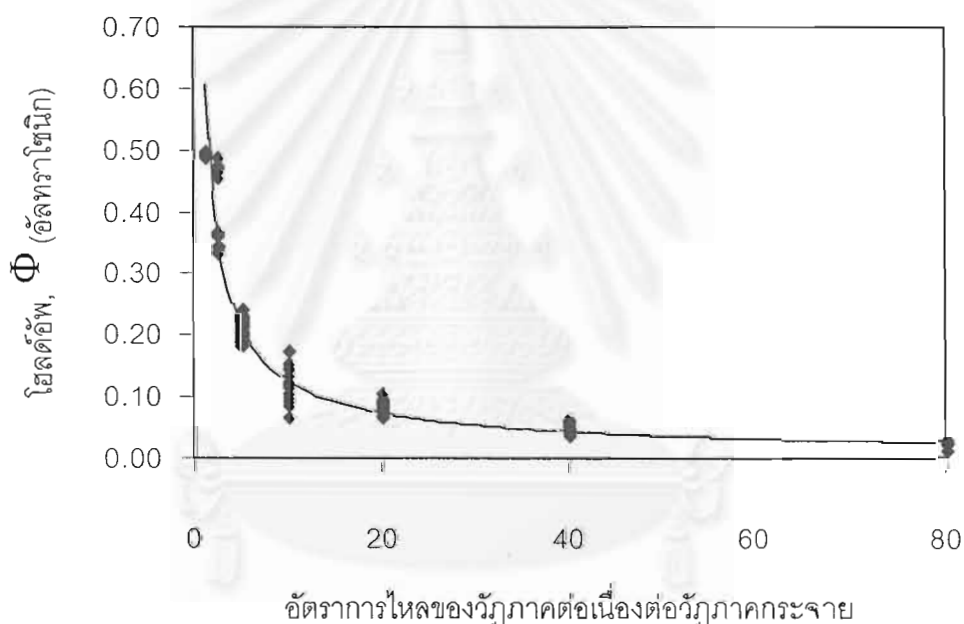
-ผลของความเร็วรอบจานหมุนต่อค่าไฮลด์อัฟ

จากรูป 4.8 และ 4.9 เป็นการแสดงผลของความเร็วรอบต่อค่าไฮลด์อัฟ เมื่ออัตราการไหลของวิภาคกระจาย และวิภาคต่อเนื่องต่างๆกันตามลำดับ ที่ระดับติดตั้งทรานสดิวเซอร์เท่ากับ 20 ซม. จากการทดลองแสดงให้เห็นว่าแต่ละอัตราการไหลของวิภาคกระจาย หรือวิภาคต่อเนื่องในแต่ละการทดลอง เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความเร็วรอบจานหมุนเพิ่มขึ้น พบว่ามีผลต่อค่าไฮลด์อัฟเพียงเล็กน้อย โดยค่าไฮลด์อัฟมีค่าใกล้เคียงกันมาก คือมีความสัมพันธ์ระหว่างค่าไฮลด์อัฟกับความเร็วรอบจานหมุนเกือบเป็นเส้นตรง ถึงแม้ว่าจะมีการเพิ่มความเร็วรอบจานหมุนจากความเร็วรอบ 300 ถึง 800 รอบต่อนาทีก็ตาม สอดคล้องกับผลการทดลองของ Kung E.Y and Beckmann R.B., 1961 เมื่อเพิ่มความเร็วรอบจานหมุนเพิ่มขึ้นพบว่าค่าไฮลด์อัฟเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยเท่านั้น

จากทฤษฎีการเพิ่มความเร็วรอบของจานหมุน จะมีผล 2 ประการที่เกิดขึ้นภายในคอลัมน์สกัด คือ ประการแรกเกิดความปั่นป่วนเพิ่มขึ้นทำให้หยดของวิภาคกระจายไม่สะสมหรือค้างตัวที่บริเวณวงแหวนสถิต และประการที่สอง ความเร็วรอบของจานหมุนเมื่อสูงถึงระดับหนึ่ง จะทำให้เกิดการเฉือนของหยดวิภาคกระจายให้มีขนาดหยดเล็กลง ทำให้การเคลื่อนที่ช้าลงและค่าไฮลด์อัฟเพิ่มขึ้น แต่จากการทดลองแปรภาวะของความเร็วรอบจานหมุนตั้งแต่ 300 ถึง 800 รอบต่อนาที พบว่าค่าไฮลด์อัฟค่อนข้างคงที่ แสดงว่าความเร็วรอบจานหมุนดังกล่าว ยังไม่เพียงพอที่จะทำให้เกิดการแตกตัว (breakage) ได้อย่างเพียงพอที่จะทำให้เกิดไฮลด์อัฟที่สูง

ขั้นตอนที่ 5 การสร้างความสัมพันธ์ระหว่างไฮลด์อัฟ อัตราการไหลของภูมิภาคกระจาย และอัตราการไหลของภูมิภาคต่อเนื่อง

จากผลการทดลองที่ผ่านมาดังอธิบายในขั้นตอนที่ 4 พบว่าค่าไฮลด์อัฟไม่ขึ้นกับความเร็วรอบจานหมุน จึงได้นำข้อมูลที่ได้จากการทดลองทั้งหมดจำนวน 128 การทดลอง ที่กระทำที่ระดับความสูงในการติดตั้งทรานสดิวเซอร์เท่ากับ 20 เซนติเมตรมาแสดงในรูปเดียวกัน โดยแกนตั้งแสดงไฮลด์อัฟที่ได้จากการวัดด้วยเทคนิคอัลตราโซนิก และแกนนอนแสดงอัตราการไหลของภูมิภาคต่อเนื่องต่อภูมิภาคกระจาย ได้ผลดังรูปที่ 5.3



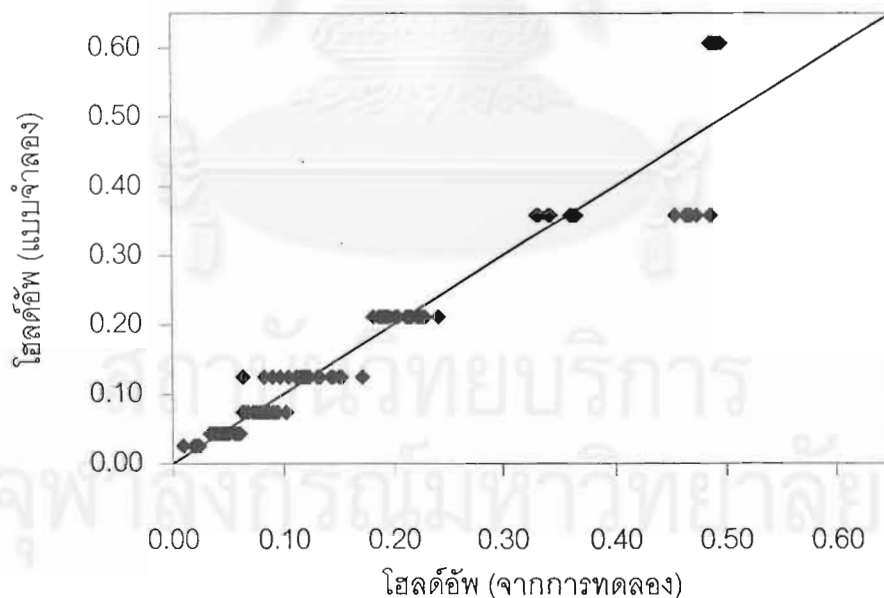
รูปที่ 5.3 ความสัมพันธ์ระหว่างไฮลด์อัฟและอัตราการไหลของภูมิภาคต่อเนื่องต่อภูมิภาคกระจาย

จากรูปที่ 5.3 ข้างต้น การกระจายของข้อมูลมีแนวโน้มอยู่ในกลุ่มเดียวกัน แสดงให้เห็นว่าทั้งความเร็วรอบจานหมุนในช่วงที่ได้ทำการทดลองตั้งแต่ 300 ถึง 800 รอบต่อนาที และระดับในการติดตั้งทรานสดิวเซอร์เท่ากับ 20 เซนติเมตร สามารถสร้างความสัมพันธ์ระหว่างไฮลด์อัฟและอัตราการไหลของภูมิภาคต่อเนื่องต่ออัตราการไหลของภูมิภาคกระจาย โดยใช้ข้อมูลทั้งหมด 128 การทดลอง ได้ถึงความสัมพันธ์ที่ 22 ดังต่อไปนี้

$$\phi = 0.7188\left(\frac{Q_c}{Q_d}\right)^{-0.7604} \quad (22)$$

เมื่อ ϕ คือไฮลด์อัฟ, Q_c คืออัตราการไหลของวัฏภาคต่อเนื่อง (ลิตรต่อนาที) และ Q_d คืออัตราการไหลของวัฏภาคกระจาย (ลิตรต่อนาที) โดยมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (r^2) เท่ากับ 0.9482

จากความสัมพันธ์ที่ได้ข้างต้นนี้สามารถนำมาใช้ในการทำนายค่าไฮลด์อัฟที่ภาวะการทดลองต่างๆ สำหรับระบบน้ำ-ทูลูอิน (วัฏภาคกระจาย) ความเร็วรอบจานหมุน 300 ถึง 800 รอบต่อนาที อัตราการไหลของวัฏภาคต่อเนื่อง และอัตราการไหลของวัฏภาคกระจายเท่ากับ 0.1 ถึง 0.8 และ 0.01 ถึง 0.08 ลิตรต่อนาที ตามลำดับ เมื่อนำมาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างไฮลด์อัฟที่ได้จากการทดลอง และไฮลด์อัฟที่ได้จากการคำนวณด้วยความสัมพันธ์ที่สร้างขึ้นข้างต้น ได้ผลเป็นดังรูปที่ 5.4 ดังนี้



รูปที่ 5.4 ความสัมพันธ์ระหว่างไฮลด์อัฟที่ได้จากการทดลอง และไฮลด์อัฟที่ได้จากการคำนวณ

จากรูปที่ 5.4 เป็นการเปรียบเทียบระหว่างค่าไฮลด์อัฟที่ได้จากการทำการทดลอง กับค่าไฮลด์อัฟจากความสัมพันธ์ที่สร้างขึ้น พบว่ามีค่าการเบี่ยงเบนมากที่สุดคิดเป็นร้อยละ 33.42 เมื่อไฮลด์อัฟจากการทดลองเท่ากับ 0.487 และไฮลด์อัฟจากการคำนวณด้วยแบบจำลองเท่ากับ 0.365 จากรูปแสดงให้เห็นว่าค่าไฮลด์อัฟที่ได้จากการคำนวณด้วยความสัมพันธ์ที่สร้างขึ้นสามารถเป็นตัวแทนหรือใช้ในการพยากรณ์ได้ดีที่ค่าไฮลด์อัฟมีค่าต่ำๆ คือจะได้ค่าไฮลด์อัฟที่ใกล้เคียงกัน และจะมีความเบี่ยงเบนมากขึ้นที่ภาวะที่มีค่าไฮลด์อัฟสูงขึ้น จึงสามารถสรุปได้ว่าสามารถใช้ความสัมพันธ์นี้เพื่อใช้ทำนายค่าไฮลด์อัฟเมื่อทราบภาวะที่อยู่ในช่วงของการทดลอง คือ อัตราการไหลของวัฏภาคกระจายเท่ากับ 0.01-0.08 ลิตรต่อนาที อัตราการไหลของวัฏภาคต่อเนื่องเท่ากับ 0.1-0.8 ลิตรต่อนาที และความเร็วรอบจานหมุนเท่ากับ 300-800 รอบต่อนาที ตามลำดับ



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 6

สรุป และข้อเสนอแนะ

ในงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการใช้เทคนิคอัลตราโซนิกในการวัดค่าไฮลด์อัฟในคอลัมน์สกัดแบบจานหมุน โดยอัลตราโซนิกทรานสดิวเซอร์ที่นำมาใช้ในการทดลองนั้นได้รับการทดสอบความถูกต้อง และมีความน่าเชื่อถือเพียงพอในการวัดค่าไฮลด์อัฟของภูมิภาคกระจายภายในคอลัมน์สกัดแบบจานหมุนที่สร้างขึ้น โดยเทคนิคอัลตราโซนิกดังกล่าวนี้มีข้อดีคือ เป็นเทคนิคที่สามารถวัดไฮลด์อัฟได้โดยไม่จำเป็นต้องขั้วตัวอย่างออกมาวัดปริมาตรของภูมิภาคกระจายที่มีอยู่ในคอลัมน์สกัด จึงไม่เป็นการเข้าไปรบกวนสมดุลของระบบแต่อย่างใด นอกจากนี้ยังสามารถวัดค่าไฮลด์อัฟได้รวดเร็ว และสะดวกมากยิ่งขึ้นอีกด้วย

ปัจจัยที่มีผลต่อค่าไฮลด์อัฟในคอลัมน์สกัดแบบจานหมุนนี้ ได้แก่ อัตราการไหลของภูมิภาคกระจาย อัตราการไหลของภูมิภาคต่อเนื่อง และความเร็วรอบจานหมุน ปัจจัยต่าง ๆ ที่กล่าวมามีผลต่อค่าไฮลด์อัฟดังนี้คือ

1. เวลาที่คลื่นอัลตราโซนิกใช้ในการเดินทางผ่านระบบสารผสมจะมีค่าอยู่ระหว่างเวลาที่คลื่นอัลตราโซนิกใช้เดินทางในสารบริสุทธิ์แต่ละชนิด
2. อัตราการไหลของภูมิภาคกระจายที่ป้อนเข้าสู่คอลัมน์สกัดแบบจานหมุน เมื่ออัตราการไหลของภูมิภาคกระจายเพิ่มขึ้น จะเกิดการสะสมของหยดภูมิภาคกระจายที่บริเวณจานหมุนและวงแหวนสถิติมากขึ้น และความหนาแน่นของระบบลดลง คลื่นอัลตราโซนิกจะใช้เวลาในการเดินทางผ่านสารผสมเพิ่มมากขึ้น ค่าไฮลด์อัฟจะมีค่าเพิ่มมากขึ้น
3. อัตราการไหลของภูมิภาคต่อเนื่องที่ป้อนเข้าสู่คอลัมน์สกัดแบบจานหมุน เมื่ออัตราการไหลของภูมิภาคต่อเนื่องเพิ่มขึ้น จะมีการสะสมตัวของหยดภูมิภาคกระจายมากในช่วงแรก แต่เมื่อเพิ่มอัตราการไหลของภูมิภาคต่อเนื่องต่อไปอีก เป็นการเพิ่มสภาพความปั่นป่วนภายในคอลัมน์สกัดแบบจานหมุนมากขึ้น ส่งผลให้หยดของภูมิภาคกระจายหลุดลอยได้ง่ายและเร็วขึ้น พบว่าการสะสมตัวของหยดภูมิภาคกระจายจะลดลง ค่าไฮลด์อัฟจะมีค่าลดลง
4. ความเร็วรอบจานหมุน ที่ความเร็วรอบจานหมุนเพิ่มขึ้นตั้งแต่ 300 ถึง 800 รอบต่อนาทีนั้น ความเร็วรอบจานหมุนยังไม่เร็วพอที่จะทำให้หยดของภูมิภาคกระจายเกิดการแตกตัวได้มากขึ้น ค่าไฮลด์อัฟจึงมีค่าเกือบคงที่

5. ค่าไฮลด์อัฟที่วัดด้วยเทคนิคอัลตราโซนิก ในคอลัมน์สกัดแบบจานหมุนนี้ เมื่อแปรภาวะต่างๆ ข้างต้น จากการทดลองมีค่าอยู่ระหว่าง 0.010 – 0.499

6. สามารถสร้างความสัมพันธ์เพื่อแสดงผลของตัวแปรต่างๆที่มีผลต่อค่าไฮลด์อัฟ ซึ่งได้แก่อัตราการไหลของวัฏภาคกระจาย (Q_d) อัตราการไหลของวัฏภาคต่อเนื่อง (Q_c) ดังความสัมพันธ์ต่อไปนี้

$$\phi = 0.7188\left(\frac{Q_c}{Q_d}\right)^{-0.7604}$$

โดยสามารถใช้ได้ในช่วงอัตราการไหลของวัฏภาคกระจายเท่ากับ 0.01-0.08 ลิตรต่อนาที อัตราการไหลของวัฏภาคต่อเนื่องเท่ากับ 0.1-0.8 ลิตรต่อนาที และความเร็วรอบจานหมุนเท่ากับ 300 ถึง 800 รอบต่อนาที ตามลำดับ

7. คอลัมน์สกัดแบบจานหมุนที่สร้างขึ้นนี้ สามารถนำเทคนิคอัลตราโซนิกมาใช้เพื่อหาค่าไฮลด์อัฟได้ และมีความน่าเชื่อถือสูงพอสมควร

ข้อเสนอแนะ

หลังจากการสรุปผลการทดลอง และวิจารณ์ผลการทดลองแล้ว มีข้อเสนอแนะดังต่อไปนี้

1. ควรเลือกตำแหน่งวัดหรือติดตั้งอัลตราโซนิกทรานสดิวเซอร์ให้เหมาะสม คือให้อยู่ในตำแหน่งที่สามารถวัดสัญญาณคลื่นอัลตราโซนิกได้อย่างชัดเจน โดยสัญญาณคลื่นอัลตราโซนิกที่ปรากฏบนจอออกสซิลโลสโคปควรมีพีคของสัญญาณที่สูง และเข้มชัดเจน

2. ในการศึกษาการวัดค่าไฮลด์อัฟในคอลัมน์สกัดแบบจานหมุนนี้ เป็นการวัดค่าไฮลด์อัฟที่เวลาต่างกัน อาจทำให้เกิดความผิดพลาดได้ จึงควรมีอัลตราโซนิกทรานสดิวเซอร์อย่างน้อย 3 ชุด เพื่อวัดค่าไฮลด์อัฟที่ระดับต่างกันในเวลาเดียวกันตลอดความยาวคอลัมน์สกัดแบบจานหมุนนี้ ซึ่งจะได้ไฮลด์อัฟโพรไฟล์ตลอดคอลัมน์ฯ ผลที่ได้นี้จะมีความน่าเชื่อถือมากขึ้น เพื่อนำไปสู่การรักษาไฮลด์อัฟที่เหมาะสมให้มีค่าคงที่ตลอดคอลัมน์ฯ อันเป็นจุดมุ่งหมายที่สำคัญประการหนึ่งในกระบวนการสกัด

3. ในการศึกษาที่จะเกิดขึ้นต่อไป ควรที่จะได้มีการศึกษาผลของตัวถูกละลาย ว่ามีผลอย่างไรต่อเวลาที่ใช้ในการเดินทางของคลื่นผ่านสารผสมในระบบ และค่าไฮลด์อัฟในคอลัมน์สกัดแบบจานหมุนนี้ เพื่อศึกษาถึงความเหมาะสมที่จะนำความสัมพันธ์ของ J.C. Bonnet and L.L. Tavlarides, 1987 มาใช้ในการคำนวณค่าไฮลด์อัฟต่อไป

4. ในการวิจัยที่จะเกิดขึ้นต่อไปควรทำการทดลองให้ใกล้กับจุดเกิดการท่วม (flooding) มากที่สุด เนื่องมาจากการที่คอลัมน์ไม่สามารถเพิ่มความเร็วรอบมากกว่า 800 รอบต่อนาทีได้ และข้อจำกัดของอุปกรณ์ควบคุมอัตราการไหลของวัฏภาคกระจายและวัฏภาคต่อเนื่องที่มีอัตราการไหลที่ต่ำ ทำให้การวิจัยนี้ไม่สามารถทำให้ใกล้จุดเกิดการท่วมได้ ซึ่งถ้าสามารถทำการปรับปรุงให้สามารถทำการทดลองใกล้จุดเกิดการท่วมได้ ประสิทธิภาพในการสกัดจะดียิ่งขึ้น เนื่องจากสามารถเพิ่มค่าไฮลด์อัฟให้สูงขึ้นได้เมื่อทำการทดลองใกล้กับจุดเกิดการท่วม



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

กฤษดา วิศวธีรานนท์ และประยูร เขียววัฒนา. หลักการทํางานและเทคนิคการใ้ใช้งาน
ออสทิลโลสโคป. ซีเอ็ดยูเคชั่น จำกัด. 2538

ภาษาอังกฤษ

Basic, A.; and Dudukonic, M.P. Liquid holdup in rotating packed beds: examination of the film flow assumption. AIChE.J. 41 (1995): 301-316.

Bonnet, J.C.; and Jeffreys, G.V. Hydrodynamics and mass transfer characteristic of a Scheibel extractor (part I: drop size distribution, holdup, and flooding). AIChE.J. 8 (1985): 789-794.

Bonnet, J.C.; and Sorrentino, J.A. Holdup Measurements in a Scheibel column by means of an ultrasonic technique. J.Chem.Tech.Biotechnology. 61 (1994): 201-207.

Bonnet, J.C.; and Tavlarides, L.L. Ultrasonic technique for dispersed-phase holdup measurements. NewYork: Ind.Eng.Chem.Res. 26 (1987): 811-815.

Benson C.; Ultrasonics. New York, McGraw Hill International edn. 2 nd edn. (1960).

Casamatta, G.and Gourdon, C.,Liquid-Liquid Extraction.Process Modeling and Control in Chemical Engineering. NewYork:(1989)

David, R.L.; Handbook of chemistry and physics.CRC:73 rd edn. (1992-1993):14-31

Euzen, J.P.; Trambouze, P.; and Wauquier, J.P.; Scale-up methodology for chemical processes. Paris:Editions Technip, (1993).

Kirou, V.I.; Tavlarides, L.L.; and Bonnet, J.C. An ultrasonic technique for control of holdup profiles in multistage extraction columns. Ind.Eng.Chem.Res. 27 (1988): 1084-1086.

Kirou, V.I.; Tavlarides, L.L.; Bonnet, J.C.; and Tsouris, C. Flooding, holdup, and drop size measurements in a multistage column extractor. AIChE.J. 34 (1988): 283-292.

- Komosawa, I.; and Ingham, J. Effect of system properties on the performance of liquid-liquid extraction columns-I (Packed column). Chem.Eng.Sci. 33 (1978): 341-347.
- Kosic, S.; and Figura, Z. Ultrasonic measurements and technologies. Chapman&Hall (1996).
- Kung, E.Y.; and Beckmann, R.B. Dispersed-phase holdup in a rotating disk extraction column. AIChE.J. 7 (1961): 319-325.
- Kuttruff, H.; Ultrasonics fundamentals and applications. Elsevier Applied Science.(1991).
- Ladda, G.S.; degaleesan; and Kannappan, R. Hydrodynamics and mass transport in RDCs. Can.J. of Chem.Eng. 56 (1978): 137-150.
- Lo, T.C.; Commercial Liquid-Liquid Extraction Equipment. Handbook of Separation Techniques for Chemical Engineers. NewYork, McGraw Hill.(1979)
- Logsdail, D.H.,and Lower, L.; Industrial Contacting Equipment. NewYork; Pergamon Press:(1975)
- Lynnworth, L.C. Ultrasonic measurements for process control (Theory, Techniques, Applications). Academic Press, Inc. (1992).
- Mark, E.J.; Physical properties of polymers handbook. New York:(1996).
- Misek, T. Collect. Czech. Chem. Commun.28 (1963): 426
- Okamura, S. Measurement of solids holdup in a three-phase fluidized bed by an ultrasonic technique: Shorter communications; Chem.Eng.Sci. 44 (1989): 196-197.
- Panametrics. Ultrasonic Transducers for Nondestructive Testing. Massachusetts:(1995)
- Perry, R.H.; and Green, Don W. Perry's Chemical Engineering's Handbook. McGraw Hill International: edn. 6 Th. edn. (1984).
- Rajinder Pal. Comments on hold-up (volume fraction) measurements in liquid/liquid dispersions using an ultrasonic technique. Ind.Eng.Chem.Res. 33 (1994): 744-747.
- Reissinger, K.H.,and Schroter, J. Selection Criteria for Liquid-Liquid Extractors. Chem.Eng.Sci. 33 (1978): 109-118

- Soong, Y. et al. Ultrasonic characterization of slurries in an autoclave reactor at elevated temperature. Ind.Eng.Chem.Res. 35 (1996): 1807-1812.
- Sovova, H.; and Havlicek, A. Transient behavior of holdup in a reciprocating plate extraction column. Chem.Eng.Sci. 41 (1986): 2579-2583.
- Sovova, H.; and Havlicek, A. Comments on ultrasonic technique for dispersed-phase holdup measurements. Ind.Eng.Chem.Res. 27 (1988): 1743-1744.
- Strand, C.P.; Olney, R.B.; and Ackerman, G.H. Fundamental aspects of RDC performance. AIChE.J. 8 (1962): 252-255.
- Tavlarides, L.L.; et al. Self-calibration ultrasonic measurement of dispersed phase volumetric holdup in liquid/liquid dispersions. U.S. Patent 4,852,396 (1989).
- Tavlarides, L.L.; et al. Ultrasonic measurement of dispersed phase volumetric holdup in liquid/liquid dispersions. U.S. Patent 4,726,221 (1988).
- Tsouris, C.; and Tavlarides, L.L. Control of holdup and solute concentration in an Oldshue-Rushton extraction column. Chem.Eng.Sci. 48 (1993): 4097-4104.
- Tsouris, C.; and Tavlarides, L.L. Mass transfer effects on droplet phenomena and extraction column hydrodynamics revisited. Chem.Eng.Sci. 48 (1993): 1503-1515.
- Tsouris, C.; and Tavlarides, L.L. Volume fraction measurements of water in oil by an ultrasonic technique. Ind.Eng.Chem.Res. 32 (1993): 998-1002.
- Tsouris, C.; and Tavlarides, L.L. Response to comments on hold-up (volume fraction) measurements in liquid/liquid dispersions using an ultrasonic technique. Ind.Eng.Chem.Res. 33 (1994): 748-749.
- Tsouris, C.; Tavlarides, L.L.; and Bonnet, J.C. Application of the ultrasonic technique for real-time holdup monitoring for the control of extraction columns. Chem.Eng.Sci. 45 (1990): 3055-3062.
- Tsouris, C.; Tavlarides, L.L.; and Norato, M.A. Research notes A pulse ultrasonic probe for local volume fraction measurements in liquid-liquid dispersions. Ind.Eng.Chem.Res. 34 (1995): 3154-3158.

Urrutia, G. et al. On dynamic liquid holdup determination by the drainage method. Chem.Eng.Sci. 51 (1996): 3721-3726.

Yi, J.; and Tavlarides, L.L. Model for hold-up measurements in liquid dispersions using an ultrasonic technique. Ind.Eng.Chem.Res. 29 (1990): 475-482.

Yo, Y.H.; and Kim, S.D. Axial dispersion, holdup and flooding characteristics in pulsed extraction columns. Can.J.of Chem.Eng. 65 (1987).



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก

ตัวอย่างการคำนวณ

ก1. การหาความเร็วคลื่นอัลตราโซนิกของสารบริสุทธิ์

ในขั้นตอนการหาความเร็วคลื่นอัลตราโซนิกนั้น ข้อมูลที่ต้องทราบ มีดังนี้

- | | |
|--|-----------------------|
| 1) ระยะทางระหว่างผนังของเวสเซลอะคริลิก | 7.5 เซนติเมตร |
| 2) ความหนาของผนังเวสเซลอะคริลิก | 2 เซนติเมตร (สองด้าน) |
| 3) ความเร็วคลื่นอัลตราโซนิกผ่านอะคริลิกพลาสติก | 2,690 เมตรต่อวินาที |

ที่ความถี่ 1 เมกะเฮิรตซ์ (Physical properties of Polymers Handbook, James E. Mark, 1996)

- | | |
|---|---------------------|
| 4) ความเร็วคลื่นอัลตราโซนิกผ่านผนังแก้ว (Pyrex) | 5,640 เมตรต่อวินาที |
|---|---------------------|

(Handbook of Chemistry and Physics, David R. Lide, 1992-1993)

การคำนวณความเร็วคลื่นอัลตราโซนิกของสารบริสุทธิ์จากเวลาเดินทางที่วัดได้

คำนวณเวลาที่ใช้เดินทางผ่านผนังอะคริลิกทั้งสองด้านที่มีความหนา 2 เซนติเมตร

$$\begin{aligned} \text{เวลาที่ใช้เดินทาง (t)} &= \frac{\text{ความหนาของผนังอะคริลิก (S)}}{\text{ความเร็วคลื่นอัลตราโซนิกผ่านผนังอะคริลิก (V)}} \\ &= \frac{2 \times 10^{-2} \text{ เมตร}}{2,690 \text{ เมตรต่อวินาที}} \\ &= 7.4349 \text{ ไมโครวินาที} \end{aligned}$$

ดังนั้นเมื่อหักเวลาที่ใช้เดินทางในอะคริลิกพลาสติกออกแล้ว จะได้เวลาที่คลื่นอัลตราโซนิกใช้เดินทางในสารที่ทำการวัดค่าความเร็วเสียงของสารบริสุทธิ์

$$\begin{aligned} \text{น้ำ: } & 58.02 - 7.4349 = 50.585 \text{ ไมโครวินาที} \\ \text{โทลูอีน: } & 65.46 - 7.4349 = 58.025 \text{ ไมโครวินาที} \end{aligned}$$

นำมาคำนวณหาความเร็วคลื่นอัลตราโซนิกผ่านสารที่วัดได้ ดังนี้

$$\begin{aligned} \text{น้ำ: } & \text{ความเร็วคลื่นอัลตราโซนิก (V)} = \frac{\text{ระยะทางระหว่างผนังเวสเซล (S)}}{\text{เวลาที่ใช้เดินทางในน้ำ (t)}} \\ &= \frac{7.5 \times 10^{-2} \text{ เมตร}}{50.585 \times 10^{-6} \text{ วินาที}} \\ &= 1,482.7 \text{ เมตรต่อวินาที} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{โทลูอีน: ความเร็วคลื่นอัลตราโซนิก (V)} &= \frac{\text{ระยะทางระหว่างผนังเวสเซล (S)}}{\text{เวลาที่ใช้เดินทางในโทลูอีน (t)}} \\
 &= \frac{7.5 \times 10^{-2} \text{ เมตร}}{58.025 \times 10^{-6} \text{ วินาที}} \\
 &= 1,292.5 \text{ เมตรต่อวินาที}
 \end{aligned}$$

ก2. การคำนวณโพลด์ัฟจากเวลาที่วัดได้จากการทดลอง

การคำนวณโพลด์ัฟที่วัดได้จากการทดลองในระบบน้ำ-โทลูอีน แสดงการคำนวณได้ดังนี้
 เมื่อกำหนดให้ เวลาที่คลื่นอัลตราโซนิกเดินทางในน้ำ (t_1)
 เวลาที่คลื่นอัลตราโซนิกเดินทางในโทลูอีน (t_2)
 เวลาที่คลื่นอัลตราโซนิกเดินทางในสารผสมของระบบ (t^*)

คำนวณโพลด์ัฟโดยใช้สมการ Time average model (J.C. Bonnet and L.L. Tavlarides, 1987)

$$\phi = \frac{t^* - t_1}{t_2 - t_1}$$

ตัวอย่างการคำนวณ

ที่อัตราการไหลของเฟสต่อเนื่อง 0.1 ลิตรต่อนาที

อัตราการไหลของเฟสกระจาย 0.014 ลิตรต่อนาที

ความเร็วรอบจานหมุน 300 รอบต่อนาที

ระดับความสูงติดตั้งทรานสดิวเซอร์ 20 เซนติเมตร

เวลาที่คลื่นอัลตราโซนิกเดินทางในน้ำ (t_1) 34.47 ไมโครวินาที

เวลาที่คลื่นอัลตราโซนิกเดินทางในโทลูอีน (t_2) 38.58 ไมโครวินาที

เวลาที่คลื่นอัลตราโซนิกเดินทางในสารผสมของระบบ (t^*) 34.73 ไมโครวินาที

แทนค่าลงในความสัมพันธ์:

$$\begin{aligned}
 \phi &= \frac{34.73 - 34.47}{38.58 - 34.47} \\
 &= 0.0633
 \end{aligned}$$

ได้ผลลัพธ์คือโพลด์ัฟ เท่ากับ 0.0633 ที่ภาวะข้างต้น

ภาคผนวก ข

ตารางแสดงผลการทดลองวัดค่าไฮลด์อัฟโดยวิธีอัลตราโซนิก และวัดปริมาตรโดยตรง ที่
ภาวะต่างๆ ในคอลัมน์สกัดแบบจานหมุนขนาดย่อยส่วน

-เมื่ออัตราการไหลของวัฏภาคต่อเนื่อง เท่ากับ 0.1 ลิตรต่อนาที

การทดลองที่	ภาวะการทดลอง		ไฮลด์อัฟ (วิธีวัดปริมาตรโดยตรง)			ไฮลด์อัฟ (เทคนิคอัลตราโซนิก)				ร้อยละความ ผิดพลาด สัมพัทธ์
			ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	เฉลี่ย	t_1 (μs)	t_2 (μs)	t^* (μs)	ϕ	
ชุดที่ 1.1	r.p.m	อัตราไหล ของวัฏภาค กระจาย (ลิตรต่อนาที)								
1	300	0.01	0.057	0.071	0.064	35.01	39.12	35.30	0.071	10.44
2	300	0.02	0.157	0.186	0.171	35.01	39.12	35.78	0.187	9.08
3	300	0.04	0.371	0.386	0.379	35.01	39.12	36.70	0.410	8.30
4	300	0.08	0.471	0.486	0.479	35.01	39.12	37.04	0.494	3.22
ชุดที่ 1.2										
1	400	0.01	0.100	0.100	0.100	35.01	39.12	35.48	0.115	15.00
2	400	0.02	0.200	0.186	0.193	35.01	39.12	35.89	0.215	11.48
3	400	0.04	0.343	0.329	0.336	35.01	39.12	36.51	0.365	8.72
4	400	0.08	0.471	0.486	0.479	35.01	39.12	37.04	0.495	3.43
ชุดที่ 1.3										
1	600	0.01	0.114	0.114	0.114	35.01	39.12	35.54	0.130	13.75
2	600	0.02	0.214	0.214	0.214	35.01	39.12	35.96	0.231	7.80
3	600	0.04	0.343	0.357	0.350	35.01	39.12	36.54	0.372	6.29
4	600	0.08	0.486	0.486	0.486	35.01	39.12	37.07	0.500	2.94
ชุดที่ 1.4										
1	800	0.01	0.100	0.100	0.100	35.01	39.12	35.50	0.120	20.00
2	800	0.02	0.214	0.200	0.207	35.01	39.12	35.92	0.221	6.69
3	800	0.04	0.357	0.357	0.357	35.01	39.12	36.56	0.377	5.56
4	800	0.08	0.471	0.486	0.479	35.01	39.12	37.04	0.495	3.43

ภาคผนวก ข (ต่อ)

-เมื่ออัตราการไหลของวัสดุภาคต่อเนื่อง เท่ากับ 0.2 ลิตรต่อนาที

การทดลองที่	ภาวะการทดลอง		ไฮลด์อัฟ (วิธีวัดปริมาตรโดยตรง)			ไฮลด์อัฟ (เทคนิคอัลตราโซนิก)				ร้อยละความผิดพลาดสัมพัทธ์
			ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	เฉลี่ย	t_1 (μ S)	t_2 (μ S)	t^* (μ S)	ϕ	
ชุดที่ 2.1	r.p.m	อัตราไหลของวัสดุกระจาย (ลิตรต่อนาที)								
1	300	0.01	0.057	0.057	0.057	35.01	39.12	35.29	0.068	19.00
2	300	0.02	0.114	0.129	0.121	35.01	39.12	35.60	0.144	18.59
3	300	0.04	0.186	0.186	0.186	35.01	39.12	35.89	0.215	15.77
4	300	0.08	0.343	0.329	0.336	35.01	39.12	36.48	0.358	6.64
ชุดที่ 2.2										
1	400	0.01	0.057	0.071	0.064	35.01	39.12	35.32	0.076	18.22
2	400	0.02	0.129	0.143	0.136	35.01	39.12	35.63	0.152	12.00
3	400	0.04	0.186	0.186	0.186	35.01	39.12	35.84	0.202	8.77
4	400	0.08	0.329	0.329	0.329	35.01	39.12	36.41	0.341	3.78
ชุดที่ 2.3										
1	600	0.01	0.071	0.071	0.071	35.01	39.12	35.38	0.089	24.60
2	600	0.02	0.129	0.143	0.136	35.01	39.12	35.64	0.153	12.74
3	600	0.04	0.186	0.171	0.179	35.01	39.12	35.83	0.200	12.00
4	600	0.08	0.343	0.357	0.350	35.01	39.12	36.55	0.374	6.86
ชุดที่ 2.4										
1	800	0.01	0.071	0.071	0.071	35.01	39.12	35.38	0.090	26.00
2	800	0.02	0.143	0.143	0.143	35.01	39.12	35.69	0.165	15.50
3	800	0.04	0.200	0.214	0.207	35.01	39.12	35.96	0.231	11.52
4	800	0.08	0.357	0.343	0.350	35.01	39.12	36.58	0.383	9.43

ภาคผนวก ข (ต่อ)

-เมื่ออัตราการไหลของวัสดุภาคต่อเนื่อง เท่ากับ 0.4 ลิตรต่อนาที

การทดลองที่	ภาวะการทดลอง		ไฮลด์อัฟ (วิธีวัดปริมาตรโดยตรง)			ไฮลด์อัฟ (เทคนิคอัลตราโซนิก)				ร้อยละความผิดพลาดสัมพัทธ์
			ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	เฉลี่ย	t_1 (μs)	t_2 (μs)	t^* (μs)	ϕ	
ชุดที่ 3.1	r.p.m	อัตราไหลของวัสดุกระจาย (ลิตรต่อนาที)								
1	300	0.01	0.029	0.029	0.029	35.01	39.12	35.18	0.041	43.50
2	300	0.02	0.057	0.071	0.064	35.01	39.12	35.34	0.080	24.44
3	300	0.04	0.100	0.100	0.100	35.01	39.12	35.51	0.122	22.00
4	300	0.08	0.186	0.200	0.193	35.01	39.12	35.91	0.218	13.04
ชุดที่ 3.2										
1	400	0.01	0.029	0.043	0.036	35.01	39.12	35.21	0.048	34.40
2	400	0.02	0.057	0.071	0.064	35.01	39.12	35.35	0.082	27.56
3	400	0.04	0.100	0.100	0.100	35.01	39.12	35.52	0.123	23.00
4	400	0.08	0.200	0.214	0.207	35.01	39.12	35.95	0.229	10.55
ชุดที่ 3.3										
1	600	0.01	0.043	0.043	0.043	35.01	39.12	35.25	0.058	35.33
2	600	0.02	0.071	0.071	0.071	35.01	39.12	35.38	0.090	26.00
3	600	0.04	0.100	0.114	0.107	35.01	39.12	35.52	0.125	16.67
4	600	0.08	0.200	0.186	0.193	35.01	39.12	35.90	0.217	12.52
ชุดที่ 3.4										
1	800	0.01	0.029	0.043	0.036	35.01	39.12	35.21	0.048	34.40
2	800	0.02	0.071	0.057	0.064	35.01	39.12	35.33	0.078	21.33
3	800	0.04	0.100	0.100	0.100	35.01	39.12	35.52	0.124	24.00
4	800	0.08	0.200	0.200	0.200	35.01	39.12	35.92	0.221	10.50

ภาคผนวก ข (ต่อ)

-เมื่ออัตราการไหลของวัสดุภาคต่อเนื่อง เท่ากับ 0.8 ลิตรต่อนาที

การทดลองที่	ภาวะการทดลอง		ไฮลด์อัฟ (วิธีวัดปริมาตรโดยตรง)			ไฮลด์อัฟ (เทคนิคอัลตราโซนิก)				ร้อยละความผิดพลาดสัมพัทธ์
			ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	เฉลี่ย	t_1 (μ s)	t_2 (μ s)	t^* (μ s)	ϕ	
ชุดที่ 4.1	r.p.m	อัตราไหลของวัสดุกระจาย (ลิตรต่อนาที)								
1	300	0.01	0.011	0.011	0.011	35.01	39.12	35.10	0.021	90.91
2	300	0.02	0.029	0.029	0.029	35.01	39.12	35.15	0.035	22.50
3	300	0.04	0.043	0.057	0.050	35.01	39.12	35.29	0.069	38.00
4	300	0.08	0.086	0.086	0.086	35.01	39.12	35.41	0.097	13.17
ชุดที่ 4.2										
1	400	0.01	0.010	0.010	0.010	35.01	39.12	35.10	0.021	110.00
2	400	0.02	0.029	0.029	0.029	35.01	39.12	35.18	0.041	43.50
3	400	0.04	0.057	0.071	0.064	35.01	39.12	35.31	0.074	15.11
4	400	0.08	0.100	0.100	0.100	35.01	39.12	35.51	0.121	21.00
ชุดที่ 4.3										
1	600	0.01	0.014	0.000	0.007	35.01	39.12	35.05	0.010	40.00
2	600	0.02	0.043	0.043	0.043	35.01	39.12	35.26	0.061	42.33
3	600	0.04	0.057	0.057	0.057	35.01	39.12	35.35	0.082	43.50
4	600	0.08	0.100	0.100	0.100	35.01	39.12	35.51	0.122	22.00
ชุดที่ 4.4										
1	800	0.01	0.015	0.018	0.018	35.01	39.12	35.11	0.024	37.14
2	800	0.02	0.043	0.043	0.043	35.01	39.12	35.25	0.059	37.67
3	800	0.04	0.071	0.057	0.064	35.01	39.12	35.33	0.077	19.78
4	800	0.08	0.100	0.100	0.100	35.01	39.12	35.50	0.120	20.00

ภาคผนวก ข (ต่อ)

-เมื่ออัตราการไหลของภูมิภาคกระจาย เท่ากับ 0.01 ลิตรต่อนาที

การทดลองที่	ภาวะการทดลอง		ไฮลด์อัฟ (วิธีวัดปริมาตรโดยตรง)			ไฮลด์อัฟ (เทคนิคอัลตราโซนิก)				ร้อยละความผิดพลาดสัมพัทธ์
			ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	เฉลี่ย	t_1 (μ S)	t_2 (μ S)	t^* (μ S)	ϕ	
ชุดที่ 5.1	r.p.m	อัตราไหลของภูมิภาคต่อเนื่อง (ลิตรต่อนาที)								
1	300	0.1	0.100	0.100	0.100	35.01	39.12	35.49	0.118	18.00
2	300	0.2	0.057	0.057	0.057	35.01	39.12	35.29	0.068	19.00
3	300	0.4	0.029	0.029	0.029	35.01	39.12	35.17	0.038	33.00
4	300	0.8	0.014	0.014	0.014	35.01	39.12	35.10	0.021	47.00
ชุดที่ 5.2										
1	400	0.1	0.086	0.100	0.093	35.01	39.12	35.48	0.114	22.77
2	400	0.2	0.071	0.071	0.071	35.01	39.12	35.38	0.090	26.00
3	400	0.4	0.029	0.029	0.029	35.01	39.12	35.18	0.041	43.50
4	400	0.8	0.014	0.014	0.014	35.01	39.12	35.10	0.021	47.00
ชุดที่ 5.3										
1	600	0.1	0.100	0.086	0.093	35.01	39.12	35.49	0.117	26.00
2	600	0.2	0.071	0.071	0.071	35.01	39.12	35.39	0.092	28.80
3	600	0.4	0.029	0.043	0.036	35.01	39.12	35.22	0.050	40.00
4	600	0.8	0.014	0.014	0.014	35.01	39.12	35.10	0.022	54.00
ชุดที่ 5.4										
1	800	0.1	0.100	0.071	0.086	35.01	39.12	35.43	0.102	19.00
2	800	0.2	0.086	0.086	0.086	35.01	39.12	35.43	0.102	19.00
3	800	0.4	0.043	0.029	0.036	35.01	39.12	35.22	0.051	42.80
4	800	0.8	0.014	0.014	0.014	35.01	39.12	35.11	0.024	68.00

ภาคผนวก ข (ต่อ)

-เมื่ออัตราการไหลของภูมิภาคกระจาย เท่ากับ 0.02 ลิตรต่อนาที

การทดลองที่	ภาวะการทดลอง		ไฮลด์อัฟ (วิธีวัดปริมาตรโดยตรง)			ไฮลด์อัฟ (เทคนิคอัลตราโซนิก)				ร้อยละความผิดพลาดสัมพัทธ์
			ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	เฉลี่ย	t_1 (μ s)	t_2 (μ s)	t^* (μ s)	ϕ	
ชุดที่ 6.1	r.p.m	อัตราไหลของภูมิภาคต่อเนื่อง (ลิตรต่อนาที)								
1	300	0.1	0.186	0.171	0.179	35.01	39.12	35.81	0.195	9.20
2	300	0.2	0.100	0.100	0.100	35.01	39.12	35.50	0.120	20.00
3	300	0.4	0.057	0.057	0.057	35.01	39.12	35.33	0.077	34.75
4	300	0.8	0.043	0.043	0.043	35.01	39.12	35.26	0.061	42.33
ชุดที่ 6.2										
1	400	0.1	0.171	0.171	0.171	35.01	39.12	35.79	0.190	10.83
2	400	0.2	0.100	0.086	0.093	35.01	39.12	35.48	0.115	23.85
3	400	0.4	0.057	0.057	0.057	35.01	39.12	35.31	0.073	27.75
4	400	0.8	0.043	0.029	0.036	35.01	39.12	35.22	0.051	42.80
ชุดที่ 6.3										
1	600	0.1	0.171	0.171	0.171	35.01	39.12	35.79	0.189	10.25
2	600	0.2	0.086	0.100	0.093	35.01	39.12	35.48	0.115	23.85
3	600	0.4	0.057	0.057	0.057	35.01	39.12	35.32	0.075	31.25
4	600	0.8	0.043	0.043	0.043	35.01	39.12	35.26	0.060	40.00
ชุดที่ 6.4										
1	800	0.1	0.186	0.186	0.186	35.01	39.12	35.84	0.203	9.31
2	800	0.2	0.086	0.100	0.093	35.01	39.12	35.48	0.115	23.85
3	800	0.4	0.043	0.057	0.050	35.01	39.12	35.30	0.070	40.00
4	800	0.8	0.043	0.043	0.043	35.01	39.12	35.25	0.059	37.67

ภาคผนวก ข (ต่อ)

-เมื่ออัตราการไหลของภูมิภาคกระจาย เท่ากับ 0.04 ลิตรต่อนาที

การทดลองที่	ภาวะการทดลอง		ไฮลด์อัฟ (วิธีวัดปริมาตรโดยตรง)			ไฮลด์อัฟ (เทคนิคอัลตราโซนิก)				ร้อยละความผิดพลาดสัมพัทธ์
			ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	เฉลี่ย	t_1 (μ s)	t_2 (μ s)	t^* (μ s)	ϕ	
ชุดที่ 7.1	r.p.m	อัตราไหลของภูมิภาคต่อเนื่อง (ลิตรต่อนาที)								
1	300	0.1	0.443	0.443	0.443	35.01	39.12	36.93	0.468	5.68
2	300	0.2	0.200	0.200	0.200	35.01	39.12	35.93	0.224	12.00
3	300	0.4	0.114	0.129	0.121	35.01	39.12	35.60	0.144	18.59
4	300	0.8	0.071	0.071	0.071	35.01	39.12	35.37	0.088	23.20
ชุดที่ 7.2										
1	400	0.1	0.457	0.443	0.450	35.01	39.12	36.95	0.471	4.67
2	400	0.2	0.200	0.200	0.200	35.01	39.12	35.93	0.225	12.50
3	400	0.4	0.129	0.114	0.121	35.01	39.12	35.63	0.152	25.18
4	400	0.8	0.086	0.086	0.086	35.01	39.12	35.41	0.098	14.33
ชุดที่ 7.3										
1	600	0.1	0.443	0.443	0.443	35.01	39.12	36.93	0.468	5.68
2	600	0.2	0.214	0.214	0.214	35.01	39.12	36.00	0.241	12.47
3	600	0.4	0.129	0.129	0.129	35.01	39.12	35.63	0.152	18.22
4	600	0.8	0.071	0.071	0.071	35.01	39.12	35.39	0.092	28.80
ชุดที่ 7.4										
1	800	0.1	0.471	0.457	0.464	35.01	39.12	37.01	0.486	4.68
2	800	0.2	0.214	0.214	0.214	35.01	39.12	36.00	0.241	12.47
3	800	0.4	0.129	0.129	0.129	35.01	39.12	35.63	0.151	17.44
4	800	0.8	0.086	0.086	0.086	35.01	39.12	35.44	0.104	21.33

ภาคผนวก ข (ต่อ)

-เมื่ออัตราการไหลของภูมิภาคกระจาย เท่ากับ 0.08 ลิตรต่อนาที

การทดลองที่	ภาวะการทดลอง		ไฮลด์อัฟ (วิธีวัดปริมาตรโดยตรง)			ไฮลด์อัฟ (เทคนิคอัลตราโซนิก)				ร้อยละความผิดพลาดสัมพัทธ์
			ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	เฉลี่ย	t_1 (μ S)	t_2 (μ S)	t^* (μ S)	ϕ	
ชุดที่ 8.1	r.p.m	อัตราไหลของภูมิภาคต่อเนื่อง (ลิตรต่อนาที)								
1	300	0.1	0.486	0.486	0.486	35.01	39.12	37.11	0.512	5.41
2	300	0.2	0.443	0.457	0.450	35.01	39.12	36.95	0.472	4.89
3	300	0.4	0.186	0.186	0.186	35.01	39.12	35.89	0.215	15.77
4	300	0.8	0.071	0.086	0.079	35.01	39.12	35.40	0.096	22.18
ชุดที่ 8.2										
1	400	0.1	0.486	0.486	0.486	35.01	39.12	37.12	0.514	5.82
2	400	0.2	0.443	0.443	0.443	35.01	39.12	36.93	0.467	5.45
3	400	0.4	0.186	0.171	0.179	35.01	39.12	35.86	0.206	15.36
4	400	0.8	0.086	0.100	0.093	35.01	39.12	35.48	0.114	22.77
ชุดที่ 8.3										
1	600	0.1	0.471	0.486	0.479	35.01	39.12	37.11	0.512	6.99
2	600	0.2	0.443	0.429	0.436	35.01	39.12	36.93	0.467	7.18
3	600	0.4	0.171	0.186	0.179	35.01	39.12	35.83	0.200	12.00
4	600	0.8	0.100	0.100	0.100	35.01	39.12	35.56	0.133	33.00
ชุดที่ 8.4										
1	800	0.1	0.486	0.471	0.479	35.01	39.12	37.07	0.500	4.48
2	800	0.2	0.457	0.457	0.457	35.01	39.12	37.02	0.488	6.75
3	800	0.4	0.186	0.186	0.186	35.01	39.12	35.86	0.208	12.00
4	800	0.8	0.086	0.086	0.086	35.01	39.12	35.45	0.106	23.67

ภาคผนวก ค

ตารางแสดงผลการทดลองการวัดค่าไฮลด์อัปด้วยเทคนิคอัลตราโซนิก ในคอลัมน์สกัดแบบจานหมุน

อัตราการใช้ของ ภูมิภาคต่อเนื่อง (ลิตรต่อนาที)	อัตราการใช้ ของภูมิภาค กระจาย (ลิตรต่อนาที)	ความเร็วรอบ งานหมุน (รอบต่อนาที)	ระดับความสูงติดตั้ง ทรานสดิวเซอร์ (เซนติเมตร)	เวลาเดินทาง ในน้ำ t_1 (ไมโครวินาที)	เวลาเดินทาง ในโหลอื่น t_2 (ไมโครวินาที)	เวลาเดินทาง ในสารผสม t^* (ไมโครวินาที)	$\phi = \frac{(t^* - t_1)}{(t_2 - t_1)}$
0.1	0.01	300	20	34.47	38.58	34.73	0.063
	0.02	300	20	34.47	38.58	35.22	0.182
	0.04	300	20	34.47	38.58	35.83	0.331
	0.08	300	20	34.47	38.58	36.47	0.487
	0.01	400	20	34.47	38.58	34.93	0.112
	0.02	400	20	34.47	38.58	35.30	0.202
	0.04	400	20	34.47	38.58	35.88	0.343
	0.08	400	20	34.47	38.58	36.48	0.489
	0.01	600	20	34.47	38.58	34.98	0.124
	0.02	600	20	34.47	38.58	35.40	0.226
	0.04	600	20	34.47	38.58	35.96	0.363
	0.08	600	20	34.47	38.58	36.49	0.491
	0.01	800	20	34.47	38.58	34.93	0.112
	0.02	800	20	34.47	38.58	35.36	0.217
	0.04	800	20	34.47	38.58	35.95	0.360
	0.08	800	20	34.47	38.58	36.50	0.494
0.2	0.01	300	20	34.47	38.58	34.75	0.068
	0.02	300	20	34.47	38.58	35.01	0.131
	0.04	300	20	34.47	38.58	35.28	0.197
	0.08	300	20	34.47	38.58	35.87	0.341
	0.01	400	20	34.47	38.58	34.78	0.075
	0.02	400	20	34.47	38.58	35.07	0.146
	0.04	400	20	34.47	38.58	35.27	0.195
	0.08	400	20	34.47	38.58	35.84	0.333
	0.01	600	20	34.47	38.58	34.81	0.083
	0.02	600	20	34.47	38.58	35.07	0.146
	0.04	600	20	34.47	38.58	35.25	0.190
	0.08	600	20	34.47	38.58	35.95	0.360
	0.01	800	20	34.47	38.58	34.83	0.088
	0.02	800	20	34.47	38.58	35.18	0.173
	0.04	800	20	34.47	38.58	35.39	0.224
	0.08	800	20	34.47	38.58	35.97	0.365

ภาคผนวก ค (ต่อ)

อัตราการไหล ของภูมิภาค ต่อเนื่อง (ลิตรต่อนาที)	อัตราการไหล ของภูมิภาค กระจาย (ลิตรต่อนาที)	ความเร็วรอบ จานหมุน (รอบต่อนาที)	ระดับความสูงติดตั้ง ทรานสดิวเซอร์ (เซนติเมตร)	เวลาเดินทาง ในน้ำ t_1 (ไมโครวินาที)	เวลาเดินทาง ในโพลีเอทิลีน t_2 (ไมโครวินาที)	เวลาเดินทาง ในสารผสม t' (ไมโครวินาที)	$\phi = \frac{(t' - t_1)}{(t_2 - t_1)}$
0.4	0.01	300	20	34.47	38.58	34.64	0.041
	0.02	300	20	34.47	38.58	34.80	0.080
	0.04	300	20	34.47	38.58	34.96	0.119
	0.08	300	20	34.47	38.58	35.35	0.214
	0.01	400	20	34.47	38.58	34.65	0.044
	0.02	400	20	34.47	38.58	34.80	0.080
	0.04	400	20	34.47	38.58	34.97	0.122
	0.08	400	20	34.47	38.58	35.41	0.229
	0.01	600	20	34.47	38.58	34.70	0.056
	0.02	600	20	34.47	38.58	34.83	0.088
	0.04	600	20	34.47	38.58	34.97	0.122
	0.08	600	20	34.47	38.58	35.35	0.214
	0.01	800	20	34.47	38.58	34.66	0.046
	0.02	800	20	34.47	38.58	34.79	0.078
	0.04	800	20	34.47	38.58	34.98	0.124
	0.08	800	20	34.47	38.58	35.38	0.221
0.8	0.01	300	20	34.47	38.58	34.55	0.019
	0.02	300	20	34.47	38.58	34.61	0.034
	0.04	300	20	34.47	38.58	34.74	0.066
	0.08	300	20	34.47	38.58	34.87	0.097
	0.01	400	20	34.47	38.58	34.55	0.019
	0.02	400	20	34.47	38.58	34.63	0.039
	0.04	400	20	34.47	38.58	34.77	0.073
	0.08	400	20	34.47	38.58	34.97	0.122
	0.01	600	20	34.47	38.58	34.51	0.010
	0.02	600	20	34.47	38.58	34.71	0.058
	0.04	600	20	34.47	38.58	34.80	0.080
	0.08	600	20	34.47	38.58	34.97	0.122
	0.01	800	20	34.47	38.58	34.56	0.022
	0.02	800	20	34.47	38.58	34.70	0.056
	0.04	800	20	34.47	38.58	34.79	0.078
	0.08	800	20	34.47	38.58	34.97	0.122

ภาคผนวก ค (ต่อ)

อัตราการใช้ ของวิทยภาค ต่อเนื่อง (ลิตรต่อนาที)	อัตราการใช้ ของวิทยภาค กระจาย (ลิตรต่อนาที)	ความเร็วรอบ จานหมุน (รอบต่อนาที)	ระดับความสูงติดตั้ง ทรานสดิวเซอร์ (เซนติเมตร)	เวลาเดินทาง ในน้ำ t_1 (ไมโครวินาที)	เวลาเดินทาง ในโหลอื่น t_2 (ไมโครวินาที)	เวลาเดินทาง ในสารผสม t' (ไมโครวินาที)	$\phi = \frac{(t' - t_1)}{(t_2 - t_1)}$
0.1	0.01	300	40	34.47	38.58	34.75	0.068
	0.02	300	40	34.47	38.58	35.23	0.185
	0.04	300	40	34.47	38.58	36.10	0.397
	0.08	300	40	34.47	38.58	36.49	0.491
	0.01	400	40	34.47	38.58	34.95	0.117
	0.02	400	40	34.47	38.58	35.32	0.207
	0.04	400	40	34.47	38.58	35.91	0.350
	0.08	400	40	34.47	38.58	36.49	0.491
	0.01	600	40	34.47	38.58	35.01	0.131
	0.02	600	40	34.47	38.58	35.41	0.229
	0.04	600	40	34.47	38.58	35.98	0.367
	0.08	600	40	34.47	38.58	36.50	0.494
	0.01	800	40	34.47	38.58	34.95	0.117
	0.02	800	40	34.47	38.58	35.38	0.221
	0.04	800	40	34.47	38.58	35.98	0.367
	0.08	800	40	34.47	38.58	36.50	0.494
0.2	0.01	300	40	34.47	38.58	34.78	0.075
	0.02	300	40	34.47	38.58	35.03	0.136
	0.04	300	40	34.47	38.58	35.30	0.202
	0.08	300	40	34.47	38.58	35.90	0.348
	0.01	400	40	34.47	38.58	34.80	0.080
	0.02	400	40	34.47	38.58	35.09	0.151
	0.04	400	40	34.47	38.58	35.29	0.200
	0.08	400	40	34.47	38.58	35.85	0.336
	0.01	600	40	34.47	38.58	34.84	0.090
	0.02	600	40	34.47	38.58	35.10	0.153
	0.04	600	40	34.47	38.58	35.29	0.200
	0.08	600	40	34.47	38.58	35.97	0.365
	0.01	800	40	34.47	38.58	34.84	0.090
	0.02	800	40	34.47	38.58	35.30	0.202
	0.04	800	40	34.47	38.58	35.41	0.229
	0.08	800	40	34.47	38.58	35.99	0.370

ภาคผนวก ค (ต่อ)

อัตราการใช้ ของภูมิภาค ต่อเนื่อง (ลิตรต่อนาที)	อัตราการใช้ ของภูมิภาค กระจาย (ลิตรต่อนาที)	ความเร็วรอบ จานหมุน (รอบต่อนาที)	ระดับความสูงติดตั้ง ทรานสดิวเซอร์ (เซนติเมตร)	เวลาเดินทาง ในน้ำ t_1 (ไมโครวินาที)	เวลาเดินทาง ในโทลูอีน t_2 (ไมโครวินาที)	เวลาเดินทาง ในสารผสม t' (ไมโครวินาที)	$\phi = \frac{(t' - t_1)}{(t_2 - t_1)}$
0.4	0.01	300	40	34.47	38.58	34.67	0.049
	0.02	300	40	34.47	38.58	34.82	0.085
	0.04	300	40	34.47	38.58	34.99	0.127
	0.08	300	40	34.47	38.58	35.38	0.221
	0.01	400	40	34.47	38.58	34.67	0.049
	0.02	400	40	34.47	38.58	34.82	0.085
	0.04	400	40	34.47	38.58	35.00	0.129
	0.08	400	40	34.47	38.58	35.43	0.234
	0.01	600	40	34.47	38.58	34.72	0.061
	0.02	600	40	34.47	38.58	34.86	0.095
	0.04	600	40	34.47	38.58	34.99	0.127
	0.08	600	40	34.47	38.58	35.37	0.219
	0.01	800	40	34.47	38.58	34.70	0.056
	0.02	800	40	34.47	38.58	34.82	0.085
	0.04	800	40	34.47	38.58	35.01	0.131
	0.08	800	40	34.47	38.58	35.40	0.226
0.8	0.01	300	40	34.47	38.58	34.58	0.027
	0.02	300	40	34.47	38.58	34.63	0.039
	0.04	300	40	34.47	38.58	34.77	0.073
	0.08	300	40	34.47	38.58	34.89	0.102
	0.01	400	40	34.47	38.58	34.58	0.027
	0.02	400	40	34.47	38.58	34.69	0.054
	0.04	400	40	34.47	38.58	34.81	0.083
	0.08	400	40	34.47	38.58	34.99	0.127
	0.01	600	40	34.47	38.58	34.54	0.017
	0.02	600	40	34.47	38.58	34.74	0.066
	0.04	600	40	34.47	38.58	34.86	0.095
	0.08	600	40	34.47	38.58	35.00	0.129
	0.01	800	40	34.47	38.58	34.58	0.027
	0.02	800	40	34.47	38.58	34.74	0.066
	0.04	800	40	34.47	38.58	34.81	0.083
	0.08	800	40	34.47	38.58	34.99	0.127

ภาคผนวก ค (ต่อ)

อัตราการไหล ของวัฏภาค ต่อเนื่อง (ลิตรต่อนาที)	อัตราการไหล ของวัฏภาค กระจาย (ลิตรต่อนาที)	ความเร็วรอบ จานหมุน (รอบต่อนาที)	ระดับความสูงติดตั้ง ทรานสดิวเซอร์ (เซนติเมตร)	เวลาเดินทาง ในน้ำ t_1 (ไมโครวินาที)	เวลาเดินทาง ในโหลอื่น t_2 (ไมโครวินาที)	เวลาเดินทาง ในสารผสม t' (ไมโครวินาที)	$\phi = \frac{(t' - t_1)}{(t_2 - t_1)}$
0.1	0.01	300	80	34.47	38.58	34.76	0.071
	0.02	300	80	34.47	38.58	35.26	0.192
	0.04	300	80	34.47	38.58	36.14	0.406
	0.08	300	80	34.47	38.58	36.50	0.494
	0.01	400	80	34.47	38.58	34.96	0.119
	0.02	400	80	34.47	38.58	35.35	0.214
	0.04	400	80	34.47	38.58	35.95	0.360
	0.08	400	80	34.47	38.58	36.50	0.494
	0.01	600	80	34.47	38.58	35.02	0.134
	0.02	600	80	34.47	38.58	35.44	0.236
	0.04	600	80	34.47	38.58	36.02	0.377
	0.08	600	80	34.47	38.58	36.50	0.494
	0.01	800	80	34.47	38.58	34.96	0.119
	0.02	800	80	34.47	38.58	35.41	0.229
	0.04	800	80	34.47	38.58	36.02	0.377
	0.08	800	80	34.47	38.58	36.50	0.494
0.2	0.01	300	80	34.47	38.58	34.79	0.078
	0.02	300	80	34.47	38.58	35.06	0.144
	0.04	300	80	34.47	38.58	35.34	0.212
	0.08	300	80	34.47	38.58	35.97	0.365
	0.01	400	80	34.47	38.58	34.81	0.083
	0.02	400	80	34.47	38.58	35.12	0.158
	0.04	400	80	34.47	38.58	35.33	0.209
	0.08	400	80	34.47	38.58	35.91	0.350
	0.01	600	80	34.47	38.58	34.86	0.095
	0.02	600	80	34.47	38.58	35.13	0.161
	0.04	600	80	34.47	38.58	35.33	0.209
	0.08	600	80	34.47	38.58	36.04	0.382
	0.01	800	80	34.47	38.58	34.86	0.095
	0.02	800	80	34.47	38.58	35.33	0.209

ภาคผนวก ค (ต่อ)

อัตราการใช้ ของวิทยุภาค ต่อเนื่อง (ลิตรต่อนาที)	อัตราการใช้ ของวิทยุภาค กระจาย (ลิตรต่อนาที)	ความเร็วรอบ งานหมุน (รอบต่อนาที)	ระดับความสูงติดตั้ง ทรานสดิวเซอร์ (เซนติเมตร)	เวลาเดินทาง ในน้ำ t_1 (ไมโครวินาที)	เวลาเดินทาง ในโกลูอื่น t_2 (ไมโครวินาที)	เวลาเดินทาง ในสารผสม t' (ไมโครวินาที)	$\phi = \frac{(t' - t_1)}{(t_2 - t_1)}$
0.4	0.01	300	80	34.47	38.58	34.68	0.051
	0.02	300	80	34.47	38.58	34.85	0.092
	0.04	300	80	34.47	38.58	35.03	0.136
	0.08	300	80	34.47	38.58	35.44	0.236
	0.01	400	80	34.47	38.58	34.69	0.054
	0.02	400	80	34.47	38.58	34.85	0.092
	0.04	400	80	34.47	38.58	35.04	0.139
	0.08	400	80	34.47	38.58	35.49	0.248
	0.01	600	80	34.47	38.58	34.73	0.063
	0.02	600	80	34.47	38.58	34.88	0.100
	0.04	600	80	34.47	38.58	35.03	0.136
	0.08	600	80	34.47	38.58	35.43	0.234
	0.01	800	80	34.47	38.58	34.71	0.058
	0.02	800	80	34.47	38.58	34.85	0.092
	0.04	800	80	34.47	38.58	35.05	0.141
	0.08	800	80	34.47	38.58	35.46	0.241
0.8	0.01	300	80	34.47	38.58	34.59	0.029
	0.02	300	80	34.47	38.58	34.66	0.046
	0.04	300	80	34.47	38.58	34.81	0.083
	0.08	300	80	34.47	38.58	34.95	0.117
	0.01	400	80	34.47	38.58	34.59	0.029
	0.02	400	80	34.47	38.58	34.72	0.061
	0.04	400	80	34.47	38.58	34.85	0.092
	0.08	400	80	34.47	38.58	35.05	0.141
	0.01	600	80	34.47	38.58	34.56	0.022
	0.02	600	80	34.47	38.58	34.77	0.073
	0.04	600	80	34.47	38.58	34.90	0.105
	0.08	600	80	34.47	38.58	35.07	0.146
	0.01	800	80	34.47	38.58	34.60	0.032
	0.02	800	80	34.47	38.58	34.77	0.073

ภาคผนวก ค (ต่อ)

อัตราการใช้ ของวัสดุภาค ต่อเนื้อ (ลิตรต่อนาที่)	อัตราการใช้ ของวัสดุภาคต่อ เนื้อ (ลิตรต่อนาที่)	ความเร็วรอบ งานหมุน (รอบต่อนาที่)	ระดับความสูงติดตั้ง ทรานสดิวเซอร์ (เซนติเมตร)	เวลาเดินทาง ในน้ำ t_1 (ไมโครวินาที)	เวลาเดินทาง ในโกลูอิน t_2 (ไมโครวินาที)	เวลาเดินทาง ในสารผสม t_i (ไมโครวินาที)	$\phi = \frac{(t^* - t_1)}{(t_2 - t_1)}$
0.01	0.1	300	20	34.47	38.58	34.94	0.114
	0.2	300	20	34.47	38.58	34.73	0.063
	0.4	300	20	34.47	38.58	34.62	0.036
	0.8	300	20	34.47	38.58	34.55	0.019
	0.1	400	20	34.47	38.58	34.94	0.114
	0.2	400	20	34.47	38.58	34.84	0.090
	0.4	400	20	34.47	38.58	34.65	0.044
	0.8	400	20	34.47	38.58	34.56	0.022
	0.1	600	20	34.47	38.58	34.95	0.117
	0.2	600	20	34.47	38.58	34.85	0.092
	0.4	600	20	34.47	38.58	34.68	0.051
	0.8	600	20	34.47	38.58	34.56	0.022
	0.1	800	20	34.47	38.58	34.90	0.105
	0.2	800	20	34.47	38.58	34.89	0.102
	0.4	800	20	34.47	38.58	34.68	0.051
	0.8	800	20	34.47	38.58	34.57	0.024
0.02	0.1	300	20	34.47	38.58	35.26	0.192
	0.2	300	20	34.47	38.58	34.97	0.122
	0.4	300	20	34.47	38.58	34.77	0.073
	0.8	300	20	34.47	38.58	34.72	0.061
	0.1	400	20	34.47	38.58	35.25	0.190
	0.2	400	20	34.47	38.58	34.94	0.114
	0.4	400	20	34.47	38.58	34.77	0.073
	0.8	400	20	34.47	38.58	34.67	0.049
	0.1	600	20	34.47	38.58	35.24	0.187
	0.2	600	20	34.47	38.58	34.93	0.112
	0.4	600	20	34.47	38.58	34.78	0.075
	0.8	600	20	34.47	38.58	34.72	0.061
	0.1	800	20	34.47	38.58	35.31	0.204
	0.2	800	20	34.47	38.58	34.95	0.117
	0.4	800	20	34.47	38.58	34.74	0.066
	0.8	800	20	34.47	38.58	34.71	0.058

ภาคผนวก ค (ต่อ)

อัตราการไหล ของวัฏภาค ต่อเนื่อง (ลิตรต่อนาที)	อัตราการไหล ของวัฏภาคต่อ เนื่อง (ลิตรต่อนาที)	ความเร็วรอบ จานหมุน (รอบต่อนาที)	ระดับความสูงติดตั้ง ทรวงสวิงเซอร์ (เซนติเมตร)	เวลาเดินทาง ในน้ำ t_1 (ไมโครวินาที)	เวลาเดินทาง ในโกลูอื่น t_2 (ไมโครวินาที)	เวลาเดินทาง ในสารผสม t' (ไมโครวินาที)	$\phi = \frac{(t' - t_1)}{(t_2 - t_1)}$
0.04	0.1	300	20	34.47	38.58	36.38	0.465
	0.2	300	20	34.47	38.58	35.34	0.212
	0.4	300	20	34.47	38.58	35.06	0.144
	0.8	300	20	34.47	38.58	34.82	0.085
	0.1	400	20	34.47	38.58	36.42	0.474
	0.2	400	20	34.47	38.58	35.39	0.224
	0.4	400	20	34.47	38.58	35.10	0.153
	0.8	400	20	34.47	38.58	34.86	0.095
	0.1	600	20	34.47	38.58	36.38	0.465
	0.2	600	20	34.47	38.58	35.46	0.241
	0.4	600	20	34.47	38.58	35.09	0.151
	0.8	600	20	34.47	38.58	34.85	0.092
	0.1	800	20	34.47	38.58	36.47	0.487
	0.2	800	20	34.47	38.58	35.46	0.241
	0.4	800	20	34.47	38.58	35.09	0.151
	0.8	800	20	34.47	38.58	34.89	0.102
0.08	0.1	300	20	34.47	38.58	36.49	0.491
	0.2	300	20	34.47	38.58	36.40	0.470
	0.4	300	20	34.47	38.58	35.34	0.212
	0.8	300	20	34.47	38.58	34.84	0.090
	0.1	400	20	34.47	38.58	36.50	0.494
	0.2	400	20	34.47	38.58	36.39	0.467
	0.4	400	20	34.47	38.58	35.31	0.204
	0.8	400	20	34.47	38.58	34.95	0.117
	0.1	600	20	34.47	38.58	36.50	0.494
	0.2	600	20	34.47	38.58	36.40	0.470
	0.4	600	20	34.47	38.58	35.30	0.202
	0.8	600	20	34.47	38.58	35.02	0.134
	0.1	800	20	34.47	38.58	36.51	0.496
	0.2	800	20	34.47	38.58	36.34	0.455
	0.4	800	20	34.47	38.58	35.24	0.187
	0.8	800	20	34.47	38.58	34.81	0.083

ภาคผนวก ค (ต่อ)

อัตราการไหล ของภูมิภาค ต่อเนื่อง (ลิตรต่อนาที)	อัตราการไหล ของภูมิภาคต่อ เนื่อง (ลิตรต่อนาที)	ความเร็วรอบ จานหมุน (รอบต่อนาที)	ระดับความสูงติดตั้ง ทรานสดิวเซอร์ (เซนติเมตร)	เวลาเดินทาง ในน้ำ t_1 (ไมโครวินาที)	เวลาเดินทาง ในโกลูอื่น t_2 (ไมโครวินาที)	เวลาเดินทาง ในสารผสม t_i (ไมโครวินาที)	$\phi = \frac{(t^* - t_1)}{(t_2 - t_1)}$
0.01	0.1	300	40	34.47	38.58	34.96	0.119
	0.2	300	40	34.47	38.58	34.77	0.073
	0.4	300	40	34.47	38.58	34.64	0.041
	0.8	300	40	34.47	38.58	34.57	0.024
	0.1	400	40	34.47	38.58	34.97	0.122
	0.2	400	40	34.47	38.58	34.88	0.100
	0.4	400	40	34.47	38.58	34.67	0.049
	0.8	400	40	34.47	38.58	34.58	0.027
	0.1	600	40	34.47	38.58	34.97	0.122
	0.2	600	40	34.47	38.58	34.88	0.100
	0.4	600	40	34.47	38.58	34.70	0.056
	0.8	600	40	34.47	38.58	34.58	0.027
	0.1	800	40	34.47	38.58	34.92	0.109
	0.2	800	40	34.47	38.58	34.93	0.112
	0.4	800	40	34.47	38.58	34.71	0.058
	0.8	800	40	34.47	38.58	34.60	0.032
0.02	0.1	300	40	34.47	38.58	35.29	0.200
	0.2	300	40	34.47	38.58	35.00	0.129
	0.4	300	40	34.47	38.58	34.80	0.080
	0.8	300	40	34.47	38.58	34.74	0.066
	0.1	400	40	34.47	38.58	35.27	0.195
	0.2	400	40	34.47	38.58	34.97	0.122
	0.4	400	40	34.47	38.58	34.79	0.078
	0.8	400	40	34.47	38.58	34.70	0.056
	0.1	600	40	34.47	38.58	35.26	0.192
	0.2	600	40	34.47	38.58	34.97	0.122
	0.4	600	40	34.47	38.58	34.80	0.080
	0.8	600	40	34.47	38.58	34.74	0.066
	0.1	800	40	34.47	38.58	35.33	0.209
	0.2	800	40	34.47	38.58	34.98	0.124
	0.4	800	40	34.47	38.58	34.77	0.073
	0.8	800	40	34.47	38.58	34.74	0.066

ภาคผนวก ค (ต่อ)

อัตราการไหล ของวัฏภาค ต่อเนื่อง (ลิตรต่อนาที)	อัตราการไหล ของวัฏภาคต่อ เนื่อง (ลิตรต่อนาที)	ความเร็วรอบ จานหมุน (รอบต่อนาที)	ระดับความสูงติดตั้ง ทรานสดิวเซอร์ (เซนติเมตร)	เวลาเดินทาง ในน้ำ t_1 (ไมโครวินาที)	เวลาเดินทาง ในโพลีเอทิลีน t_2 (ไมโครวินาที)	เวลาเดินทาง ในสารผสม t' (ไมโครวินาที)	$\phi = \frac{(t' - t_1)}{(t_2 - t_1)}$
0.04	0.1	300	40	34.47	38.58	36.40	0.470
	0.2	300	40	34.47	38.58	35.38	0.221
	0.4	300	40	34.47	38.58	35.08	0.148
	0.8	300	40	34.47	38.58	34.85	0.092
	0.1	400	40	34.47	38.58	36.44	0.479
	0.2	400	40	34.47	38.58	35.42	0.231
	0.4	400	40	34.47	38.58	35.13	0.161
	0.8	400	40	34.47	38.58	34.89	0.102
	0.1	600	40	34.47	38.58	36.40	0.470
	0.2	600	40	34.47	38.58	35.50	0.251
	0.4	600	40	34.47	38.58	35.11	0.156
	0.8	600	40	34.47	38.58	34.87	0.097
	0.1	800	40	34.47	38.58	36.50	0.494
	0.2	800	40	34.47	38.58	35.49	0.248
	0.4	800	40	34.47	38.58	35.11	0.156
	0.8	800	40	34.47	38.58	34.92	0.109
0.08	0.1	300	40	34.47	38.58	36.51	0.496
	0.2	300	40	34.47	38.58	36.43	0.477
	0.4	300	40	34.47	38.58	35.37	0.219
	0.8	300	40	34.47	38.58	34.87	0.097
	0.1	400	40	34.47	38.58	36.52	0.499
	0.2	400	40	34.47	38.58	36.43	0.477
	0.4	400	40	34.47	38.58	35.33	0.209
	0.8	400	40	34.47	38.58	34.97	0.122
	0.1	600	40	34.47	38.58	36.52	0.499
	0.2	600	40	34.47	38.58	36.43	0.477
	0.4	600	40	34.47	38.58	35.32	0.207
	0.8	600	40	34.47	38.58	35.05	0.141
	0.1	800	40	34.47	38.58	36.53	0.501
	0.2	800	40	34.47	38.58	36.38	0.465
	0.4	800	40	34.47	38.58	35.26	0.192
	0.8	800	40	34.47	38.58	34.83	0.088

ภาคผนวก ค (ต่อ)

อัตราการผลิต ของภูมิภาค ต่อเนื่อง (ลิตรต่อนาที)	อัตราการผลิต ของภูมิภาคต่อ เนื่อง (ลิตรต่อนาที)	ความเร็วรอบ จานหมุน (รอบต่อนาที)	ระดับความสูงติดตั้ง ทวานสดิวเซอร์ (เซนติเมตร)	เวลาเดินทาง ในน้ำ t_1 (ไมโครวินาที)	เวลาเดินทาง ในโพลีเอทิลีน t_2 (ไมโครวินาที)	เวลาเดินทาง ในสารผสม t' (ไมโครวินาที)	$\phi = \frac{(t' - t_1)}{(t_2 - t_1)}$
0.01	0.1	300	80	34.47	38.58	34.94	0.114
	0.2	300	80	34.47	38.58	34.75	0.068
	0.4	300	80	34.47	38.58	34.62	0.036
	0.8	300	80	34.47	38.58	34.55	0.019
	0.1	400	80	34.47	38.58	34.95	0.117
	0.2	400	80	34.47	38.58	34.85	0.092
	0.4	400	80	34.47	38.58	34.65	0.044
	0.8	400	80	34.47	38.58	34.56	0.022
	0.1	600	80	34.47	38.58	34.95	0.117
	0.2	600	80	34.47	38.58	34.86	0.095
	0.4	600	80	34.47	38.58	34.68	0.051
	0.8	600	80	34.47	38.58	34.56	0.022
	0.1	800	80	34.47	38.58	34.90	0.105
	0.2	800	80	34.47	38.58	34.90	0.105
	0.4	800	80	34.47	38.58	34.69	0.054
	0.8	800	80	34.47	38.58	34.58	0.027
0.02	0.1	300	80	34.47	38.58	35.27	0.195
	0.2	300	80	34.47	38.58	34.98	0.124
	0.4	300	80	34.47	38.58	34.78	0.075
	0.8	300	80	34.47	38.58	34.72	0.061
	0.1	400	80	34.47	38.58	35.25	0.190
	0.2	400	80	34.47	38.58	34.95	0.117
	0.4	400	80	34.47	38.58	34.77	0.073
	0.8	400	80	34.47	38.58	34.68	0.051
	0.1	600	80	34.47	38.58	35.24	0.187
	0.2	600	80	34.47	38.58	34.95	0.117
	0.4	600	80	34.47	38.58	34.78	0.075
	0.8	600	80	34.47	38.58	34.72	0.061
	0.1	800	80	34.47	38.58	35.31	0.204
	0.2	800	80	34.47	38.58	34.96	0.119
	0.4	800	80	34.47	38.58	34.75	0.068
	0.8	800	80	34.47	38.58	34.72	0.061

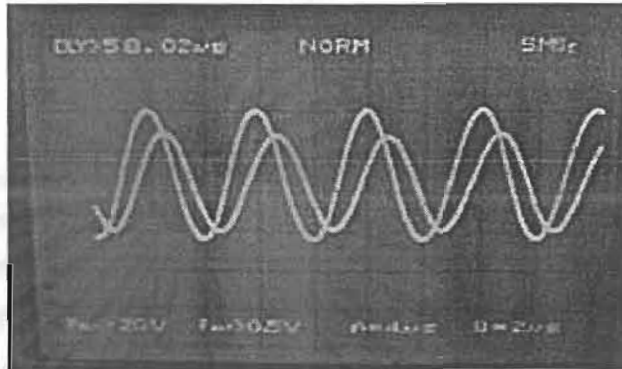
ภาคผนวก ค (ต่อ)

อัตราการไหล ของวัฏภาค ต่อเนื่อง (ลิตรต่อนาที)	อัตราการไหล ของวัฏภาค ต่อเนื่อง (ลิตรต่อนาที)	ความเร็วรอบ จานหมุน (รอบต่อนาที)	ระดับความสูงติดตั้ง ทรานสดิวเซอร์ (เซนติเมตร)	เวลาเดินทาง ในน้ำ t_1 (ไมโครวินาที)	เวลาเดินทาง ในโกลูอิน t_2 (ไมโครวินาที)	เวลาเดินทาง ในสารผสม t_i (ไมโครวินาที)	$\phi = \frac{(t^* - t_1)}{(t_2 - t_1)}$
0.04	0.1	300	80	34.47	38.58	36.38	0.465
	0.2	300	80	34.47	38.58	35.34	0.212
	0.4	300	80	34.47	38.58	35.06	0.144
	0.8	300	80	34.47	38.58	34.83	0.088
	0.1	400	80	34.47	38.58	36.42	0.474
	0.2	400	80	34.47	38.58	35.40	0.226
	0.4	400	80	34.47	38.58	35.11	0.156
	0.8	400	80	34.47	38.58	34.87	0.097
	0.1	600	80	34.47	38.58	36.38	0.465
	0.2	600	80	34.47	38.58	35.48	0.246
	0.4	600	80	34.47	38.58	35.09	0.151
	0.8	600	80	34.47	38.58	34.85	0.092
	0.1	800	80	34.47	38.58	36.48	0.489
	0.2	800	80	34.47	38.58	35.47	0.243
	0.4	800	80	34.47	38.58	35.09	0.151
	0.8	800	80	34.47	38.58	34.90	0.105
0.08	0.1	300	80	34.47	38.58	36.49	0.491
	0.2	300	80	34.47	38.58	36.41	0.472
	0.4	300	80	34.47	38.58	35.35	0.214
	0.8	300	80	34.47	38.58	34.85	0.092
	0.1	400	80	34.47	38.58	36.50	0.494
	0.2	400	80	34.47	38.58	36.40	0.470
	0.4	400	80	34.47	38.58	35.31	0.204
	0.8	400	80	34.47	38.58	34.95	0.117
	0.1	600	80	34.47	38.58	36.50	0.494
	0.2	600	80	34.47	38.58	36.41	0.472
	0.4	600	80	34.47	38.58	35.30	0.202
	0.8	600	80	34.47	38.58	35.03	0.136
	0.1	800	80	34.47	38.58	36.51	0.496
	0.2	800	80	34.47	38.58	36.36	0.460
	0.4	800	80	34.47	38.58	35.24	0.187
	0.8	800	80	34.47	38.58	34.81	0.083

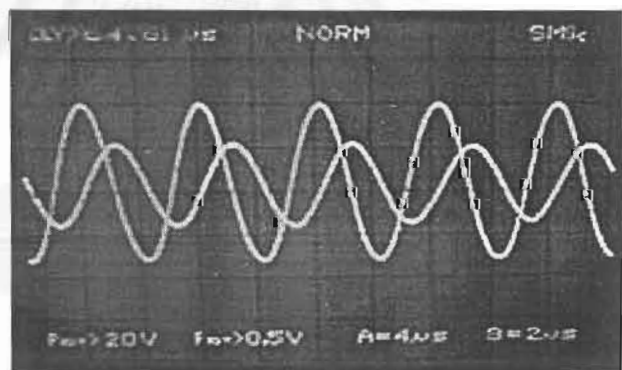
ภาคผนวก ง

แสดงเวลา และรูปคลื่นอัลตราโซนิกของสารบริสุทธิ์แต่ละชนิด ที่วัดด้วยเทคนิคอัลตราโซนิก

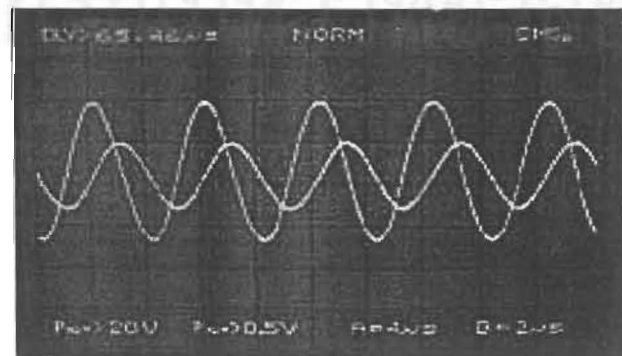
น้ำ : 58.02 ไมโครวินาที



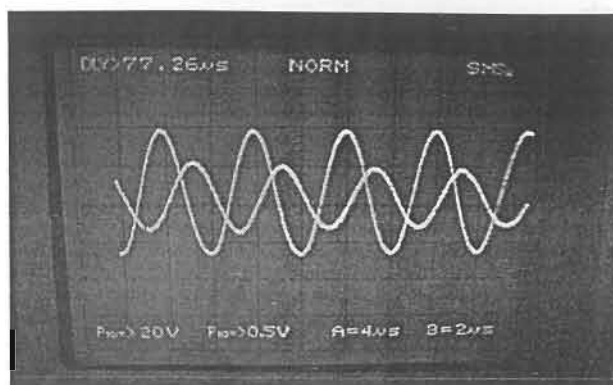
เบนซีน : 64.61 ไมโครวินาที



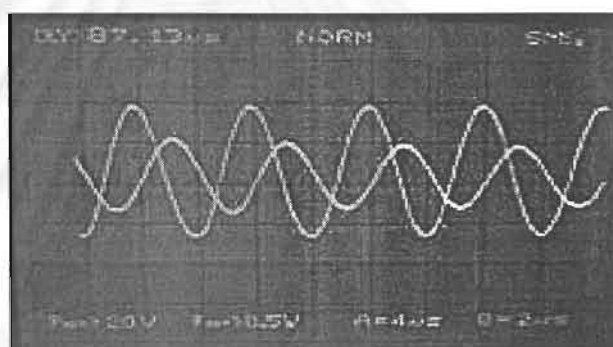
โทลูอีน : 65.46 ไมโครวินาที



เมทานอล : 77.26 ไมโครวินาที



คาร์บอนเตตระคลอไรด์ : 87.13 ไมโครวินาที



ส
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ประวัติผู้เขียน

นายสมิทธิ์ ฉัตรภูติ เกิดเมื่อวันที่ 10 สิงหาคม พ.ศ. 2517 ที่จังหวัดกรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาปริญญาตรีวิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาเคมีอุตสาหกรรม ภาควิชาเคมีอุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ในปีการศึกษา 2538 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเคมีเทคนิค ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อ พ.ศ. 2539



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย