

ผลของคลื่นเหนือเสียงต่อการกรองระดับอนุภาคในโมดูลแบบแผ่น

นาย จิตติภูมิ เพชรมณี



สถาบันวิทยบริการ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี

บัณฑิตวิทยาลัย จฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2541

ISBN 974-332-558-1

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย จฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

**EFFECTS OF THE ULTRASONIC WAVE ON MICROFILTRATION
IN A PLATE AND FRAME MODULE**



Mr. Jittiwut Petmune

**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering**

Department of Chemical Engineering

Graduate school

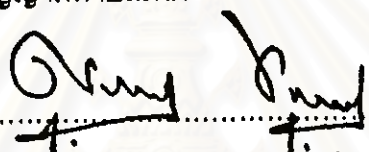
Chulalongkorn University

Academic Year 1998

ISBN 974-332-558-1

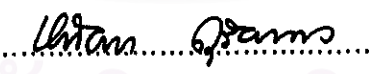
หัวข้อวิทยานิพนธ์ ผลของคลื่นเหนือเสียงต่อการกรองระดับอนุภาคในโมดูลแบบแผ่น
โดย นาย จิตติวุฒิ เพชรมณี
ภาควิชา วิศวกรรมเคมี
อาจารย์ที่ปรึกษา อาจารย์ ดร. หทัยชนก ดุริยะบรรเลง
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม รองศาสตราจารย์ ดร. จิรกานต์ เมืองนาโพธิ์

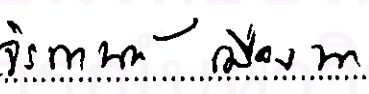
บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทมหาบัณฑิต

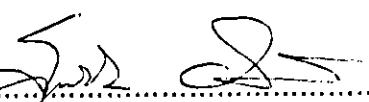

..... คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย
(ศาสตราจารย์ นายแพทย์ ศุภวัฒน์ ชูติวงศ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


..... ประธานกรรมการ
(ศาสตราจารย์ ดร. จิรกานต์ เมืองนาโพธิ์)


..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(อาจารย์ ดร. หทัยชนก ดุริยะบรรเลง)


..... อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม
(รองศาสตราจารย์ ดร. จิรกานต์ เมืองนาโพธิ์)


..... กรรมการ
(อาจารย์ ดร. สุทธิชัย อัสสะบำรุงรัตน์)

พิมพ์ต้นฉบับบทความวิจัยวิทยานิพนธ์ภายในกรอบสี่เหลี่ยมนี้เพียงแผ่นเดียว

จิตติวุฒิ เพชรภูมิ : ผลของคลื่นเหนือเสียงต่อการกรองระดับอนุภาคในโมดูลแบบแผ่น (Effects of the Ultrasonic Wave on Microfiltration in a Plate and Frame Module)

อ.ที่ปรึกษา : อ.ดร. หทัยชนก ตูริยบรรณแดง,

อ.ที่ปรึกษาร่วม : รศ.ดร. จิรกานต์ เมืองนาโพธิ์, 233 หน้า, ISBN 974-332-558-1.

กระบวนการกรองที่มีการใช้คลื่นเหนือเสียงถูกนำมาใช้เพื่อกำจัดอนุภาคที่สะสมอยู่บนผิวเยื่อแผ่น โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อเพิ่มสมรรถนะการกรอง สำหรับงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยได้ศึกษาการกรองระดับอนุภาคแบบไหลขนานในโมดูลแบบแผ่น เยื่อแผ่นที่ใช้คือ ไนลอน66 (Nylon66) มีช่องว่างระหว่างเยื่อแผ่นกับแหล่งกำเนิดเสียงที่ติดตั้งอยู่ภายนอกเครื่องกรอง สามารถปรับค่าได้ระหว่าง 1.5 – 4.7 เซนติเมตร ความเร็วในสายป้อน 0.1 – 0.53 เมตรต่อวินาที และความดันคร่อมเยื่อแผ่น 14.7 – 53.9 กิโลปาสกาล มีการติดตั้งแหล่งกำเนิดคลื่นเหนือเสียงความเข้มสูงจำนวน 2 ตัวบนผนังภายนอกของเครื่องกรองเพื่อส่งผ่านคลื่นเหนือเสียงไปในระบบได้ทั้งในทิศทางเดียวกันและตรงข้ามกับการกรอง ระบบที่ใช้กรองคือ สารละลายยีสต์ ซึ่งปรับเปลี่ยนค่าความเข้มข้นในการศึกษาระหว่าง 5 - 20 กรัมต่อลิตร อัตราคงที่ของการกรองได้ถูกวัดในการทดลองเพื่อเปรียบเทียบค่าระหว่างเมื่อมีการใช้และไม่ใช้คลื่นเหนือเสียง ตัวแปรที่มีผลต่อการเพิ่มของอัตราการกรองที่มีการใช้คลื่นเหนือเสียง คือ ความดันคร่อมเยื่อแผ่น, กำลังของคลื่นเหนือเสียง, ความเร็วในสายป้อน, ความเข้มข้นของสารละลายยีสต์, เวลาในการส่งผ่านคลื่น และระยะห่างระหว่างแหล่งกำเนิดคลื่นเหนือเสียงกับเยื่อแผ่น ซึ่งได้ทดลองและศึกษาในงานวิจัยนี้

จากการทดลองพบว่าในช่วงแรกของการเพิ่มความดันคร่อมเยื่อแผ่น อัตราการกรองที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากการใช้คลื่นเหนือเสียงจะมีมากขึ้น จนกระทั่งเมื่อเพิ่มไปถึงค่าหนึ่ง ผลของการอัดแน่นของเค้กเริ่มมีมากขึ้น รวมทั้งการเกิดคาวิเทชันจะยากขึ้น อัตราการกรองที่เพิ่มขึ้นเริ่มมีค่าน้อยลง ส่วนการเพิ่มกำลังของคลื่นเหนือเสียง พบว่า ถ้ากำลังของคลื่นมีค่ามากเกินไป จะส่งผลให้ความรุนแรงของการยุบตัวของคาวิเทชันมีค่าลดลง อัตราการกรองจึงมีค่าลดลงด้วย ส่วนความเร็วในสายป้อนและความเข้มข้นของสารละลายยีสต์ พบว่า การใช้คลื่นเหนือเสียงจะได้ผลดีที่ความเร็วในสายป้อนและความเข้มข้นของสารละลายยีสต์มีค่าต่ำ สำหรับระยะห่างระหว่างเยื่อแผ่นและแหล่งกำเนิดเสียงที่เหมาะสม คือระยะที่ทำให้มีพื้นที่ที่คลื่นเหนือเสียงตกกระทบและมีความเข้มของคลื่นเหนือเสียงสูงเพียงพอที่จะทำให้เกิดคาวิเทชันที่สามารถกำจัดอนุภาคที่สะสมได้ ในเครื่องกรองที่ใช้ในนี้ พบว่า ระยะห่างที่เหมาะสมคือ 3.7 เซนติเมตร และเมื่อมีการใช้คลื่นเหนือเสียงในสภาวะของการปฏิบัติการที่เหมาะสม อัตราการกรองสามารถเพิ่มขึ้นได้ประมาณ 3.0 เท่าเมื่อเปรียบเทียบกับการกรองแบบปกติ และพบว่ากำลังของคลื่นเหนือเสียงและทิศทางของการปล่อยคลื่นเหนือเสียง มีผลต่อความสามารถในการเก็บกักของเยื่อแผ่น สำหรับความเข้มเสียงสูงสุดที่ใช้ในการทดลอง คือ 3.6 วัตต์ต่อตารางเซนติเมตร ที่มีการควบคุมอุณหภูมิที่ 30 องศาเซลเซียส จะไม่ส่งผลต่อขนาดและการเจริญเติบโตของอนุภาคยีสต์ สุดท้าย ในงานวิจัยนี้ได้สรุปข้อคิดเห็นทางเศรษฐศาสตร์ของการนำคลื่นเหนือเสียงไปใช้ร่วมกับการกรองระดับอนุภาค

ภาควิชา วิศวกรรมเคมี
สาขาวิชา วิศวกรรมเคมี
ปีการศึกษา 2541

ลายมือชื่อนิติบัตร จิตติวุฒิ
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา *Uttana Tiammo*
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม *Uttana Tiammo*

3970275421 CHEMICAL ENGINEERING
: MAJOR

KEY WORD: ULTRASOUND / MICROFILTRATION / PLATE AND FRAME MODULE

JITTIWUT PETMUNEE : EFFECTS OF THE ULTRASONIC WAVE ON MICROFILTRATION IN A
PLATE AND FRAME MODULE.

THESIS ADIVISOR : HATHAICHANOK DURIYABUNLENG, Ph.D.

THESIS CO-ADVISOR : ASSOC. PROF. CHIRAKARN MUANGNAPOH, Dr. Ing.

233 pp. ISBN 974-332-558-1.

Ultrasonically induced cavitation has been found to be effective for loosening and detaching the cake deposited on the surface of the membrane during microfiltration, thus remarkably increasing the filtration flux. In the present research, cross-flow microfiltration in a plate and frame module with Nylon66 membrane is investigated. The gap between the ultrasonic source and the membrane can be varied from 1.5 to 4.7 cm, the feed velocity from 0.1 to 0.53 m/s and the transmembrane pressure difference from 14.7 to 53.9 kPa. Two identical ultrasonic sources are attached on the outside wall of the module to transmit high energy ultrasonic wave through the feed channel toward the membrane. In the experiments, baker's yeast solution (5 to 20 g/l) is filtered and the steady-state flux is measured. The factors affecting the filtration efficiency, i.e., the transmembrane pressure, the ultrasonic power, the feed velocity, the feed concentration, the sonication time and the distance between the membrane and each ultrasonic source, have been studied.

Experimentally, it is found under constant ultrasonic irradiation that an increase in the transmembrane pressure results in a remarkable increase in the steady-state flux. When the transmembrane pressure is further increased, the beneficial effect on the flux gradually disappears because of the more compaction of the cake at the higher pressure which raises the cavitation threshold. Similarly, if the ultrasonic power is too high, the intensity of the cavitation collapse becomes lessened and the removal of the cake by ultrasonic effect is reduced. In addition, it is shown that the ultrasonic effect is more pronounced at a lower feed velocity and a lower feed concentration. The appropriate distance between each ultrasonic source and the membrane may be defined as the distance which provides the maximum effective area exerted upon by cavitation. Finally, the experimental results have obviously shown that the suitable application of ultrasonic wave can enhance the flux upto 3 times that without ultrasonic wave. The side effects of ultrasonic on the membrane and yeast have also been investigated. In addition, a preliminary analysis of the ultrasonic application on the microfiltration system has been presented.

ภาควิชา..... วิศวกรรมเคมี
สาขาวิชา..... วิศวกรรมเคมี
ปีการศึกษา..... 2541

ลายมือชื่อนิสิต..... JITTIWUT
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา..... H. Duriyabunleng
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม..... Chirakarn Muangnapoh

กิตติกรรมประกาศ



วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความช่วยเหลืออย่างดียิ่งจากหลายๆ ท่าน ผู้วิจัยขอขอบพระคุณอย่างสูงสำหรับ อาจารย์ ดร.หทัยชนก ดุริยบรรเลง อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และ รองศาสตราจารย์ ดร.จิรกานต์ เมืองนาโพธิ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่ได้ให้คำแนะนำวิธีการทำงานวิจัยตลอดจนตรวจทานแก้ไขวิทยานิพนธ์จนเสร็จสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณ ศาสตราจารย์ ดร.วิวัฒน์ ตันทะพานิชกุล ประธานกรรมการ และ อาจารย์ ดร.สุทธิชัย อัสสะบำรุงรัตน์ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่ได้ให้ความสนใจและให้ข้อคิดเห็นที่เป็นประโยชน์ต่องานวิจัยขอขอบพระคุณ อาจารย์ ดร.ทองทศ วานิชศรี ที่ช่วยแนะนำแก้ไขข้อบกพร่อง เกี่ยวกับการสร้างตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียงที่มีความเข้มสูง รวมถึง อาจารย์ ดร.ชิตพงศ์ ประดิษฐสุวรรณ, อาจารย์ ดร.วีระเชษฐ์ ชันเงิน, อาจารย์ ดร.สุญานี นาชัยสิทธิ์, คุณฉัตรแสง ธนารักษ์โชค ที่ช่วยเหลือในด้านต่างๆ

เนื่องจากทุนการวิจัยครั้งนี้บางส่วนได้รับมาจากทุนอุดหนุนการวิจัยของบัณฑิตวิทยาลัย, ทุนวิจัยคณะวิศวกรรมศาสตร์ และทุนผู้ช่วยวิจัย โครงการเมธีวิจัยอาวุโสศาสตราจารย์ ดร.วิวัฒน์ ตันทะพานิชกุล - สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย จึงขอขอบคุณมา ณ ที่นี้ด้วย

ขอขอบคุณ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ที่อนุเคราะห์ให้ยืมเครื่องมือทางไฟฟ้า, ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล ที่อนุญาตให้ใช้เครื่องกัด เครื่องเจาะและเครื่องเจียรไน, ศูนย์เครื่องมือวิเคราะห์ภาควิชาวิศวกรรมเคมีและศูนย์วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่เอื้อเฟื้อเครื่องมือในการวิเคราะห์ข้อมูล

ขอบคุณเพื่อนๆ น้องๆ ห้องวิจัยวิศวกรรมชีวเคมี ที่ทำให้ชีวิตสนุกสนานรื่นรมย์และมีสีสัน

ขอขอบพระคุณ ภาควิชาวิศวกรรมเคมี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้โอกาสทางการศึกษา

กราบขอบพระคุณ บิดามารดา ที่สุดสำหรับเลี้ยงดูผู้วิจัยให้ได้ใช้ชีวิตอย่างคุ้มค่าและเป็นสุขตลอดมา

สถาบันวิจัยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ	ฉ
สารบัญ	ช
สารบัญตาราง	ญ
สารบัญรูป	ฎ
สัญลักษณ์	ด
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 แรงจูงใจ	1
1.2 วัตถุประสงค์	2
1.3 ขอบเขตการศึกษา	2
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	3
บทที่ 3 ทฤษฎีเกี่ยวกับการกรอง	7
3.1 กระบวนการกรองผ่านเยื่อแผ่น	7
3.2 รูปแบบการกรอง	8
3.3 การกรองระดับอนุภาคแบบไหลขนาน	9
3.4 อิทธิพลที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการกรอง	10
3.5 ความสามารถในการเก็บกักของเยื่อแผ่น	12
3.6 เครื่องกรองระดับอนุภาค	13
บทที่ 4 ทฤษฎีเกี่ยวกับคลื่นเหนือเสียง	15
4.1 ปรัชญาการเคลื่อนที่ของคลื่นเสียงในตัวกลาง	17
4.2 การประยุกต์ใช้คลื่นเหนือเสียง	23
4.3 อุปกรณ์ทดลองที่ใช้ร่วมกับคลื่นเหนือเสียง	24
4.4 ตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง	26
4.5 ตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียงความเข้มสูง	27
บทที่ 5 อุปกรณ์และวิธีดำเนินการวิจัย	31
5.1 อุปกรณ์	31

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
5.2 สารเคมี	32
5.3 เครื่องกรองแบบแผ่น	32
5.4 การทดลอง	33
5.4.1 การศึกษาผลของตัวแปรต่างๆที่มีต่ออัตราการกรอง	33
5.4.2 การศึกษาผลกระทบของคลื่นเหนือเสียงที่มีต่ออนุภาคยีสต์	37
5.4.3 การศึกษาผลกระทบของคลื่นเหนือเสียงต่อเยื่อแผ่น	39
5.5 ระบบจ่ายไฟฟ้าสำหรับแหล่งกำเนิดคลื่นเหนือเสียงความเข้มสูง	39
บทที่ 6 วิเคราะห์ผลการทดลอง	42
6.1 เปรียบเทียบอัตราการกรองที่ได้จากการกรองที่ใช้และไม่ใช้คลื่นเหนือเสียง	48
6.1.1 ทิศทางในการปล่อยคลื่นเหนือเสียง	48
6.1.2 ระยะห่างระหว่างตัวกำเนิดเสียงกับเยื่อแผ่น	56
6.1.3 ความเข้มของคลื่นเหนือเสียง	68
6.1.4 ความดันคร่อมเยื่อแผ่น	71
6.1.5 ความเข้มข้นของสายป้อน	73
6.1.6 ความเร็วของสายป้อน	77
6.1.7 ช่วงเวลาในการปล่อยคลื่น	80
6.2 ผลกระทบของคลื่นเหนือเสียงต่อยีสต์	86
6.2.1 การกระจายตัวของขนาดอนุภาคยีสต์ก่อนและหลังการใช้ คลื่นเหนือเสียง	86
6.2.2 ลักษณะของอนุภาคยีสต์ก่อนและหลังการใช้คลื่นเหนือเสียง	87
6.2.3 การเจริญเติบโตของยีสต์	87
6.3 ผลกระทบของคลื่นเหนือเสียงต่อเยื่อแผ่น	95
6.3.1 ค่าความต้านการกรอง	95
6.3.2 ลักษณะทางกายภาพ	95
6.4 วิเคราะห์ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์	106

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 7 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	110
7.1 สรุปผลการทดลอง	110
7.2 ปัญหาและข้อเสนอแนะ	112
รายการอ้างอิง	114
ภาคผนวก	116
ภาคผนวก ก แบบเครื่องกรอง (drawings) และภาพถ่ายเครื่องมือและ รูปกรรมวิธีการทดลอง	117
ภาคผนวก ข การคำนวณค่าความต้านทานและฟลักซ์การกรอง	134
ภาคผนวก ค กราฟมาตรฐานสำหรับหาความเข้มข้นของสารละลายยีสต์	137
ภาคผนวก ง สูตรอาหารเลี้ยงยีสต์	140
ภาคผนวก จ การคำนวณค่าแอมพลิจูดของความดัน (pressure amplitude) ของคลื่นเสียงที่เดินทางจากแหล่งกำเนิดตามแนวแกน z	142
ภาคผนวก ฉ ผลการวัดขนาดและการกระจายขนาดของอนุภาคยีสต์	146
ภาคผนวก ช ผลการวัดขนาดรูพรุนของเยื่อแผ่น	185
ภาคผนวก ซ ข้อมูลดิบจากการทดลอง	188
ประวัติผู้ทำการวิจัย	233

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 ข้อดี-ข้อเสียของเครื่องกรองแต่ละชนิด	14
5.1 ตารางแสดงรายละเอียดของตัวแปรที่ทำการศึกษา	34
6.1 ตารางแสดงค่าความต้านทานการกรองเมื่อมีการใช้คลื่นเหนือเสียงในทิศทางเดียว และตรงข้ามกับการกรองและเมื่อไม่มีการใช้คลื่นเหนือเสียง	54
6.2 ตารางแสดงค่าความต้านทานการกรองที่กำลังของคลื่นเหนือเสียงและระยะห่างมีค่า ต่างๆ	71
6.3 ตารางแสดงค่าความต้านทานที่ความดันคร่อมเยื่อแผ่นมีค่าต่างๆ	73
6.4 ตารางแสดงค่าความต้านทานที่ความเข้มข้นมีค่าต่างๆ	76
6.5 ตารางแสดงค่าความต่างศักย์ที่วัดได้เมื่อความเข้มข้นของตัวกลางมีค่าแตกต่างกัน ...	77
6.6 ตารางแสดงค่าความต้านทานการกรองที่ความเร็วของสายป้อนมีค่าต่างๆ	78
6.7 ตารางแสดงการเปรียบเทียบค่าใช้จ่ายในการปฏิบัติการของเครื่องกรองที่มีการใช้และ ไม่ใช้คลื่นเหนือเสียง	101

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
3.1 ขนาดรูปทรงของเยื่อแผ่นที่ใช้ในกระบวนการกรอง	7
3.2 หลักการของกระบวนการกรอง	8
3.3 กระบวนการกรองแบบไหลผ่าน	8
3.4 กระบวนการกรองแบบไหลขนาน	9
3.5 รูปแสดงความเข้มข้นที่ผิวเยื่อแผ่น	10
3.6 ความสัมพันธ์ระหว่างลอการิทึมของความเข้มข้นกับฟลักซ์	12
4.1 คลื่นเสียงที่ความถี่ต่างๆ	15
4.2 เปรียบเทียบลักษณะของคลื่นเสียงกับเส้นโค้งไซน์	16
4.3 ฟองก๊าซที่อยู่บนผิวของแข็ง (ก) เมื่อความดันภายในของเหลวมีค่าน้อย ข. เมื่อความดันภายในของเหลวมีค่ามาก	17
4.4 อ่างทำความสะอาดด้วยคลื่นเหนือเสียง (Ultrasonic cleaning bath)	24
4.5 อุปกรณ์ที่มีการใช้คลื่นเหนือเสียง ที่สามารถทำงานแบบต่อเนื่อง (ก) ระบบที่มีการจุ่มตัวกำเนิดเสียงให้สัมผัสกับสารละลายโดยตรง (ข) เครื่องมือที่มีการติดตั้งตัวกำเนิดเสียงภายนอกถังปฏิกรณ์.....	25
4.6 ตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียงความเข้มสูง	27
4.7 การสะท้อนของคลื่นเสียง	29
4.8 วงจรจ่ายไฟแก่ตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง	30
5.1 แผนผังแสดงไดอะแกรมของการทดลอง	36
5.2 แผนผังแสดงการจ่ายไฟฟ้าให้กับตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง	41
6.1 การเคลื่อนที่ของคาวิตีชันในตัวกลางของเหลวที่ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ต่างกัน ทำให้เกิดบริเวณปั่นป่วนด้านหลังของฟอง	43
6.2 คาวิตีชันในตัวกลางของเหลว (ก) ก่อนการยุบตัว (ข) หลังการยุบตัว	43
6.3 ภาพถ่ายแสดงลักษณะการยุบตัวของคาวิตีชันบริเวณใกล้ผิวของแข็ง (ด้านบน) ...	45
6.4 คาวิตีชันที่ยุบตัวทำให้เกิดแรงเจาะทะลุบนผิวของแข็ง	45
6.5 ภาพถ่ายและกราฟแสดงค่าความดันของการยุบตัวของคาวิตีชันใกล้ผิวของแข็ง	46

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
6.6	ภาพถ่ายแสดงลักษณะของเด็กเมือคาวีเทชันยุบตัวทำให้เกิดแรงเจาะทะลุบนเค็ก . 46
6.7	ภาพถ่ายแสดงการกำจัดอนุภาคดินเหนียวบนเยื่อแผ่นด้วยคาวีเทชัน ที่เวลาต่างๆ เป็นเวลาประมาณ 20 วินาที 47
6.8	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างพลังค์กับเวลา เมื่อปล่อยคลื่นเหนือเสียงในทิศทางตรงข้ามกับการกรองที่ความดันคร่อมเยื่อแผ่น 0.15 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร, ความเร็วของสายป้อน 0.2 เมตรต่อวินาที, ความเข้มข้นยีสต์ 5 กรัมต่อลิตร และกำลัง 20 วัตต์ต่อตัว 50
6.9	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การเก็บกักกับเวลา เมื่อปล่อยคลื่นเหนือเสียงในทิศทางตรงข้ามกับการกรอง ที่ความดันคร่อมเยื่อแผ่น 0.15 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร, ความเร็วของสายป้อน 0.2 เมตรต่อวินาที, ความเข้มข้นยีสต์ 5 กรัมต่อลิตร และกำลัง 20 วัตต์ต่อตัว 51
6.10	เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง เพื่อศึกษาผลของการปล่อยคลื่นเหนือเสียงในทิศทางตรงข้ามและทิศทางเดียวกับการกรอง..... 52
6.11	การหลุดออกของอนุภาคที่สะสมบนผิวเยื่อแผ่นเนื่องจากการยุบตัวของคาวีเทชัน เมื่อมีการปล่อยคลื่นเหนือเสียงในทิศทางตรงข้ามกับการกรองและมีผลให้เยื่อแผ่นเป็นรู 52
6.12	ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด กำลังขยาย 150 เท่า แสดงลักษณะของเยื่อแผ่นที่ด้านที่สัมผัสกับสายป้อนเกิดรูเนื่องจากการยุบตัวของคาวีเทชัน เมื่อมีการปล่อยคลื่นเหนือเสียงในทิศทางตรงข้ามกับการกรอง 53
6.13	ลักษณะของคาวีเทชันที่เกิดขึ้น เมื่อมีคลื่นเหนือเสียงเดินทางผ่านในทิศทางเดียวกับการกรอง 53
6.14	ภาพถ่ายแสดงลักษณะของเยื่อแผ่นที่ผ่านการกรองโดยไม่ใช้คลื่นเหนือเสียง 54
6.15	ภาพถ่ายแสดงลักษณะของเยื่อแผ่นที่ผ่านการกรองแบบใช้คลื่นเหนือเสียง เมื่อ (ก) ปล่อยคลื่นเหนือเสียงในทิศทางเดียวกับการกรอง (ข) ปล่อยคลื่นเหนือเสียงในทิศทางตรงข้ามกับการกรอง 55

สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
6.16	รูปแสดงการกำหนดแกนของการเดินทางของคลื่นเสียงจากแหล่งกำเนิด 57
6.17	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแอมพลิจูดของความดันกับระยะทางที่คลื่นเหนือเสียงเดินทางไป 58
6.18	การใช้กระดาษตะกั่วทดสอบความเข้มและบริเวณที่คลื่นเหนือเสียงเคลื่อนที่ผ่านที่ความถี่ 27.3 กิโลเฮิรซ, กำลัง 40 วัตต์ เป็นเวลา 30 วินาที โดยมีระยะห่างระหว่างตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียงกับกระดาษตะกั่วเท่ากับ (ก) 1.5 ซม. (ข) 2.0 ซม. (ค) 2.5 ซม. (ง) 3.0 ซม. 60
6.19	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างฟลักซ์คงที่กับระยะห่างระหว่างตัวกำเนิดเสียงกับเยื่อแผ่น เมื่อใช้กำลังแตกต่างกัน ที่ความดันคร่อมเยื่อแผ่น 0.35 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร, ความเร็วของสายป้อน 0.2 เมตรต่อวินาที และความเข้มข้นยีสต์ 5 กรัมต่อลิตร 63
6.20	ภาพถ่ายแสดงลักษณะของเยื่อแผ่นที่มีการส่งผ่านคลื่นเหนือเสียง ที่ระยะห่างระหว่างตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียงกับเยื่อแผ่นมีค่าต่างกัน (ก) 1.5 เซนติเมตร (ข) 2.6 เซนติเมตร (ค) 3.7 เซนติเมตร 65
6.21	ภาพถ่ายแสดงการเรืองแสงด้วยสารเคมี (chemiluminescence) เนื่องจากคลื่นเหนือเสียง ที่ระยะห่างระหว่างตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียงกับเยื่อแผ่นมีค่าต่างกัน (ก) 1.5 เซนติเมตร (ข) 2.6 เซนติเมตร (ค) 3.7 เซนติเมตร 66
6.22	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างฟลักซ์คงที่กับกำลังของคลื่นเหนือเสียง เมื่อระยะห่างระหว่างตัวกำเนิดเสียงกับเยื่อแผ่นมีค่าต่างๆ ที่ความดันคร่อมเยื่อแผ่น 0.35 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร, ความเร็วของสายป้อน 0.2 เมตรต่อวินาทีและความเข้มข้นยีสต์ 5 กรัมต่อลิตร..... 69
6.23	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างฟลักซ์คงที่กับความดันคร่อมเยื่อแผ่น ที่กำลัง 20 วัตต์ต่อตัว, ความเร็วของสายป้อน 0.2 เมตรต่อวินาที, ความเข้มข้นยีสต์ 5 กรัมต่อลิตรและระยะห่างระหว่างตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียงกับเยื่อแผ่น 2.6 เซนติเมตร 72
6.24	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างฟลักซ์กับเวลา เมื่อใช้ความเข้มข้นยีสต์มีค่าต่างๆ ที่กำลัง 20 วัตต์ต่อตัว, ความดันคร่อมเยื่อแผ่น 0.25 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร, ความเร็วของสายป้อน 0.2 เมตรต่อวินาทีและระยะห่างระหว่างตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียงกับเยื่อแผ่น 2.6 เซนติเมตร 74

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
6.25	รูปแสดงการเปรียบเทียบของการเดินทางของคลื่นเหนือเสียงผ่านตัวกลางที่มี (ก) ความเข้มข้นของอนุภาคต่ำ (ข) ความเข้มข้นของอนุภาคสูง 76
6.26	แผนผังแสดงวิธีการทดสอบผลของความเข้มข้นของอนุภาคในตัวกลางที่คลื่นเหนือเสียงเดินทางผ่าน 77
6.27	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างฟลักซ์กับเวลา เมื่อใช้ความเร็วของสายป้อนมีค่าต่างๆ ที่กำลัง 20 วัตต์ต่อตัว, ความดันคร่อมเยื่อแผ่น 0.25 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร, ความเข้มข้นยีสต์ 5 กรัมต่อลิตรและระยะห่างระหว่างตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียงกับเยื่อแผ่น 2.6 เซนติเมตร 79
6.28	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างฟลักซ์กับเวลา เมื่อเริ่มเปิดคลื่นเหนือเสียงที่เวลาต่างกัน เป็นระยะเวลา 4.5 นาที ที่กำลัง 20 วัตต์ต่อตัว, ความดันคร่อมเยื่อแผ่น 0.25 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร, ความเร็วของสายป้อน 0.2 เมตรต่อวินาที, ความเข้มข้นยีสต์ 5 กรัมต่อลิตรและระยะห่างระหว่างตัวกำเนิดเสียงกับเยื่อแผ่น 2.6 เซนติเมตร 82
6.29	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างฟลักซ์กับเวลา เมื่อเริ่มเปิดคลื่นเหนือเสียงที่เวลา 2 นาที เป็นระยะเวลาต่างๆ ที่กำลัง 20 วัตต์ต่อตัว, ความดันคร่อมเยื่อแผ่น 0.25 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร, ความเร็วของสายป้อน 0.2 เมตรต่อวินาที, ความเข้มข้นยีสต์ 5 กรัมต่อลิตรและระยะห่างระหว่างตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียงกับเยื่อแผ่น 2.6 เซนติเมตร 83
6.30	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างฟลักซ์กับเวลา เมื่อไม่เปิดและเปิด-ปิดคลื่นเหนือเสียงทุกๆ 30 วินาที ที่เวลา 2 นาที จนถึงนาทีที่ 12.5 ที่กำลัง 20 วัตต์ต่อตัว, ความดันคร่อมเยื่อแผ่น 0.25 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร, ความเร็วของสายป้อน 0.2 เมตรต่อวินาที, ความเข้มข้น 5 กรัมต่อลิตร และระยะห่างระหว่างตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียงกับเยื่อแผ่น 2.6 เซนติเมตร 84

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า	
6.31	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างพัลส์กับเวลา เมื่อไม่เปิดคลื่นเหนือเสียง, เมื่อเปิดคลื่นเหนือเสียงตั้งแต่เริ่มต้นและเมื่อเริ่มเปิดคลื่นเหนือเสียงเมื่ออัตราการกรองเข้าใกล้ภาวะคงที่ ที่กำลัง 20 วัตต์ต่อตัว, ความดันคร่อมเยื่อแผ่น 0.25 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร, ความเร็วของสายป้อน 0.2 เมตรต่อวินาที, ความเข้มข้นยีสต์ 5 กรัมต่อลิตร และระยะห่างระหว่างตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียงกับเยื่อแผ่น 2.6 เซนติเมตร.....	85
6.32	ภาพถ่ายสารละลายยีสต์จากกล้องจุลทรรศน์ที่กำลังขยาย 400 เท่า (ก) หลังผ่านบีมเป็นเวลา 30 นาที, (ข) หลังผ่านบีมเป็นเวลา 60 นาที, (ค) หลังผ่านบีมเป็นเวลา 90 นาที, (ง) หลังผ่านบีมเป็นเวลา 120 นาที	89
6.33	ภาพถ่ายสารละลายยีสต์จากกล้องจุลทรรศน์ที่กำลังขยาย 400 เท่า (ก) หลังผ่านคลื่นเหนือเสียงเป็นเวลา 30 นาที, (ข) หลังผ่านคลื่นเหนือเสียงเป็นเวลา 60 นาที, (ค) หลังผ่านคลื่นเหนือเสียงเป็นเวลา 90 นาที, (ง) หลังผ่านคลื่นเหนือเสียงเป็นเวลา 120 นาที	90
6.34	ภาพถ่ายสารละลายยีสต์จากกล้องจุลทรรศน์ที่กำลังขยาย 400 เท่า (ก) หลังผ่านคลื่นเหนือเสียงความเข้มสูงเป็นเวลา 5 นาที, (ข) หลังผ่านคลื่นเหนือเสียงความเข้มสูงเป็นเวลา 15 นาที, (ค) ต้มจนมีอุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส, (ง) สารละลายยีสต์ก่อนผ่านการทดลองใดๆ	91
6.35	ภาพถ่ายการเจริญเติบโตของยีสต์ที่เจือจาง 10^{-4} เท่า เมื่อ (ก) ยังไม่ผ่านคลื่นเหนือเสียง (ตัวอย่างที่ 1), (ข) หลังผ่านคลื่นเหนือเสียงความเข้มสูงและควบคุมอุณหภูมิ (ตัวอย่างที่ 3), (ค) หลังผ่านคลื่นเหนือเสียงความเข้มสูงและไม่ควบคุมอุณหภูมิ (ตัวอย่างที่ 4), (ง) ผ่านการต้มจนมีอุณหภูมิ 73 องศาเซลเซียส (ตัวอย่างที่ 5)	92
6.36	ภาพถ่ายการเจริญเติบโตของยีสต์ที่เจือจาง 10^{-5} เท่า เมื่อ (ก) ยังไม่ผ่านคลื่นเหนือเสียง (ตัวอย่างที่ 1), (ข) หลังผ่านคลื่นเหนือเสียงความเข้มต่ำและควบคุมอุณหภูมิ (ตัวอย่างที่ 2)	94

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
6.37	ลักษณะของเยื่อแผ่นที่ผ่านการกรองร่วมกับการใช้คลื่นเหนือเสียง (ก) ในทิศทางตรงข้ามกับการกรอง (ข) ในทิศทางเดียวกับการกรอง 96
6.38	ภาพถ่ายของเยื่อแผ่นจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ที่กำลังขยาย 350 เท่า (ก) เมื่อยังไม่ผ่านการกรอง, (ข) หลังผ่านการกรองและทำความสะอาดรูพรุนแล้ว, (ค) หลังผ่านการกรองร่วมกับการใช้คลื่นเหนือเสียงและยังไม่ได้ทำความสะอาดรูพรุน, (ง) หลังผ่านการกรองร่วมกับการใช้คลื่นเหนือเสียงและทำความสะอาดรูพรุนแล้ว (จ) หลังผ่านการกรอง และยังไม่ได้ทำความสะอาดรูพรุน 97
6.39	ภาพถ่ายของเยื่อแผ่นจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ที่กำลังขยาย 100 เท่า (ก) หลังผ่านการกรองและทำความสะอาดรูพรุนแล้ว, (ข) หลังผ่านการกรองร่วมกับการใช้คลื่นเหนือเสียงในทิศทางเดียวกับการกรอง, (ค) หลังผ่านการกรองร่วมกับการใช้คลื่นเหนือเสียงในทิศทางตรงข้ามกับการกรอง 99
6.40	ภาพถ่ายของเยื่อแผ่นจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ที่กำลังขยาย 100 เท่า (ก) หลังผ่านการกรองที่ไม่มีการใช้คลื่นเหนือเสียง, (ข) หลังผ่านการกรองร่วมกับการใช้คลื่นเหนือเสียงที่กำลัง 10 วัตต์ต่อตัว, (ค) หลังผ่านการกรองร่วมกับการใช้คลื่นเหนือเสียงที่กำลัง 20 วัตต์ต่อตัว, (ง) หลังผ่านการกรองร่วมกับการใช้คลื่นเหนือเสียงที่กำลัง 40 วัตต์ต่อตัว 101
6.41	ภาพถ่ายของเยื่อแผ่นจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ที่กำลังขยาย 100 เท่าซึ่งผ่านการกรองร่วมกับการใช้คลื่นเหนือเสียง โดยมีระยะห่างระหว่างตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียงกับเยื่อแผ่นเท่ากับ (ก) 1.5 เซนติเมตร (ข) 2.6 เซนติเมตร (ค) 3.7 เซนติเมตร 103
6.42	ภาพถ่ายของเยื่อแผ่นจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ที่กำลังขยาย 100 เท่า ซึ่งผ่านการกรองร่วมกับการใช้คลื่นเหนือเสียงในทิศทางตรงข้ามกับการกรอง (ก) ด้านที่สัมผัสกับสายป้อน, (ข) ด้านที่สัมผัสกับสายเพอมีเอท 105

สัญลักษณ์

- a รัศมีของตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง (เซนติเมตร)
- A พื้นที่หน้าตัดตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง (ตารางเซนติเมตร)
- c ความเร็วของคลื่นเสียงในตัวกลาง (เมตรต่อวินาที)
- C ตัวเก็บประจุ (ฟารัด)
- C ความเข้มข้นของอนุภาคแขวนลอยที่ผิวของเยื่อแผ่นที่ตำแหน่งใดๆ (กรัมต่อลิตร)
- C_b ความเข้มข้นของอนุภาคแขวนลอยด้านสายป้อน (กรัมต่อลิตร)
- C_o ความเข้มข้นของอนุภาคแขวนลอยที่ทำให้เกิดชั้นเจล (กรัมต่อลิตร)
- C_p ความเข้มข้นของอนุภาคแขวนลอยด้านเพอมีเอท (กรัมต่อลิตร)
- C_s ความเข้มข้นของอนุภาคแขวนลอยที่ผิวของเยื่อแผ่น (กรัมต่อลิตร)
- D สัมประสิทธิ์การแพร่ของอนุภาคแขวนลอย (ตารางเซนติเมตรต่อวินาที)
- f ความถี่คลื่นเสียง (เฮิรตซ์)
- I กระแสไฟฟ้าที่ไหลในวงจร (แอมแปร์)
- l ความเข้มของคลื่นเหนือเสียง (วัตต์ต่อตารางเซนติเมตร)
- J อัตราการกรองต่อพื้นที่ของเยื่อแผ่น (มิลลิลิตรต่อตารางเซนติเมตร-นาทีก)
- K ค่าโพลีโทรปิกอินเด็ก (polytropic index) ของก๊าซ (-)
- k เลขคลื่น (wave number) (เซนติเมตร⁻¹)
- k สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลของอนุภาคแขวนลอย (เซนติเมตรต่อวินาที)
- L ตัวเหนี่ยวนำ (ซีเมนส์)
- P กำลังไฟที่ป้อน (วัตต์)
- P ความดันภายในคาวีเทชัน ขณะที่คาวีเทชันมีขนาดใหญ่ที่สุด (กิโลปาสคาล)
- P_a ความดันของคลื่นเหนือเสียง (กิโลปาสคาล)
- P_A แอมพลิจูดของคลื่น (กิโลปาสคาล)
- P_i ความดัน ณ ตำแหน่งทางเข้า (กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร)
- P_r ความดันด้านเพอมีเอท (กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร)
- P_o ความดันของก๊าซ (กิโลปาสคาล)

สัญลักษณ์ (ต่อ)

P_h	ความดันภายในของเหลว เนื่องจากแรงกดของน้ำ (กิโลปาสคาล)
P_m	ความดันภายในฟองของเหลว ณ เวลาที่เกิดการยุบตัวของคาวิเทชัน (กิโลปาสคาล)
P_{max}	ความดันสูงสุดที่เกิดจากการยุบตัวของคาวิเทชันอย่างสมบูรณ์ (กิโลปาสคาล)
P_o	ความดัน ณ ตำแหน่งทางออก (กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร)
P_v	ความดันไอ (กิโลปาสคาล)
P_{v0}	ผลรวมของความดันไอและความดันของก๊าซ (กิโลปาสคาล)
p	ความดันของคลื่นเหนือเสียง (กิโลปาสคาล)
r	ระยะห่างตามแนวแกน (เซนติเมตร)
R	สัมประสิทธิ์การสะท้อน (-)
R_o	ความต้านทานเนื่องจากการสะสมของอนุภาคบนเยื่อแผ่น (เซนติเมตร ¹)
R_m	ความต้านทานการกรองของเยื่อแผ่น (เซนติเมตร ¹)
R_m	รัศมีของคาวิเทชันขณะเริ่มยุบตัว (เซนติเมตร)
R_{max}	รัศมีของคาวิเทชันที่ใหญ่ที่สุด (เซนติเมตร)
R_p	ความต้านทานเนื่องจากการอุดตันภายในรูพรุนของเยื่อแผ่น (เซนติเมตร ¹)
S	พลังงานในการดำเนินการกรอง (วัตต์)
t	เวลา (วินาที)
T_o	อุณหภูมิของของเหลว (องศาเซลเซียส)
T_{max}	อุณหภูมิสูงสุดที่ได้จากการยุบตัวของคาวิเทชันอย่างสมบูรณ์ (เคลวิน)
U_o	แอมพลิจูดความเร็วของอนุภาค (เมตรต่อวินาที)
v	ความเร็วของเหลว (เมตรต่อวินาที)
V	ความต่างศักย์ที่ตกคร่อมตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง (โวลต์)
X	ระยะห่าง (เซนติเมตร)
Z_{metal}	ค่าอะคูสติคิมพีแดนซ์ของโลหะ (กรัมต่อตารางเซนติเมตร-วินาที)
$Z_{ceramic}$	ค่าอะคูสติคิมพีแดนซ์ของเพียโซโซลิดทริกเซรามิกซ์ (กรัมต่อตารางเซนติเมตร-วินาที)
Z_{liquid}	ค่าอะคูสติคิมพีแดนซ์ของตัวกลางที่เสียงเคลื่อนที่ผ่าน (กรัมต่อตารางเซนติเมตร-วินาที)
Z	ค่าอะคูสติคิมพีแดนซ์ (กรัมต่อตารางเซนติเมตร-วินาที)

สัญลักษณ์ (ต่อ)

ρ	ความหนาแน่นของของเหลว (กรัมต่อลิตร)
μ	ความหนืดของของเหลว (กรัมต่อเซนติเมตร-นาที่)
σ	แรงตึงผิว (นิวตันต่อเมตร)
σ	สัมประสิทธิ์ในการเก็บกักของเยื่อแผ่น (-)
δ	ความหนาของชั้นขอบเขต (เซนติเมตร)
λ	ความยาวคลื่น (เซนติเมตร)
π	ค่าคงที่ (-)
θ	เฟสที่แตกต่างระหว่างความต่างศักย์กับกระแสที่ไหลในวงจร (องศา)
τ	เวลาที่ใช้ในการยุบตัวของฟอง (วินาที)
ω	ความถี่เชิงมุม (เฮิรตซ์)
ΔP_{TM}	ความดันคร่อมเยื่อแผ่น (กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย