

ผลของคลื่นเหนือเสียงต่อการกรองระดับอนุภาคในโมดูลแบบท่อ

นางสาว บงกช งามสม



สถาบันวิทยบริการ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2541

ISBN 974-332-395-3

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

EFFECTS OF THE ULTRASONIC WAVE ON MICROFILTRATION  
IN A TUBULAR MODULE



Miss Bongkot Ngamsorn

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

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

Department of Chemical Engineering

Graduate School

Chulalongkorn University

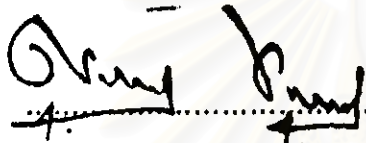
Academic Year 1998

ISBN 974-332-395-3

Thesis Title                    Effects of the Ultrasonic Wave on Microfiltration  
    in Tubular Module  
By                                    Miss Bongkot Ngamsom  
Department                    Chemical Engineering  
Thesis Advisor                Hathaichanok Duriyabunleng, Ph.D.  
Thesis Co-advisor            Associate Professor Chirakam Muangnapoh, Dr. Ing.

---

Accepted by the Graduate School, Chulalongkorn University in Partial Fulfillment  
of the Requirements for the Master's degree


  
..... Dean of Graduate School  
(Professor Supawat Chutivongse, M.D.)

Thesis Committee

  
..... Chairman  
(Professor Wiwut Tanthapanichakoon, Ph.D.)

  
..... Advisor  
(Hathaichanok Duriyabunleng, Ph.D.)

  
..... Co-advisor  
(Associate Professor Chirakam Muangnapoh, Dr. Ing.)

  
..... Member  
(Suttichai Assabumrungrat, Ph.D.)

ฉบับนี้จัดทำขึ้นเพื่อแจกจ่ายฟรีแก่คณาจารย์ในกรอบสี่เหลี่ยมนี้เพียงเล่มเดียว

บงกช งามสม: ผลของคลื่นเหนือเสียงต่อการกรองระดับอนุภาคใน โมดูลแบบท่อ (EFFECTS OF THE ULTRASONIC WAVE ON MICROFILTRATION IN TUBULAR MODULE).

อาจารย์ที่ปรึกษา: อ.ดร. หทัยชนก คุริยะบรรเทง, อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม: รศ.ดร. จิรกานต์ เมืองนาโพธิ์,  
162 หน้า. ISBN 974-332-395-3

การศึกษาผลของคลื่นเหนือเสียงต่อสมรรถนะการกรองสารละลายยีสต์โดยใช้การกรองระดับอนุภาคใน โมดูลแบบท่อที่ใช้เยื่อแผ่นเซรามิกในการกรองที่ภาวะการกรองต่างๆ คือ ที่ความดันคร่อมเยื่อแผ่นระหว่าง 11.27-46.06 กิโลปาสกาล ความเร็วสายป้อนระหว่าง 0.02 ถึง 0.48 เมตรต่อวินาที ความเข้มข้นของสายป้อน 5, 10 และ 20 กรัมต่อ ลูกบาศก์เซนติเมตร คลื่นเหนือเสียงถูกป้อนเข้าสู่ระบบที่ความเข้มเสียงระหว่าง 0.91-3.53 วัตต์ต่อตารางเซนติเมตร ที่ ความถี่คลื่น 23.8 กิโลเฮิร์ตซ์ อัตราการกรองต่อหน่วยพื้นที่ในระบบการกรองร่วมกับคลื่นเหนือเสียง ขึ้นกับความดัน คร่อมเยื่อแผ่น ความเร็วและความเข้มข้นของสายป้อน การกำจัดเค้กเนื่องจากคลื่นเหนือเสียงเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มค่าความดัน คร่อมเยื่อแผ่นในช่วงแรก แต่ต่อมาจะตกลงเมื่อความดันคร่อมเยื่อแผ่นมีค่าสูงขึ้นเนื่องจากการอัดตัวของชั้นเค้กที่เยื่อ แผ่นมีค่ามากขึ้น และพบว่าผลของคลื่นเหนือเสียงต่อการเพิ่มของอัตราการกรองต่อหน่วยพื้นที่มีค่าสูงเมื่อความเร็วสาย ป้อนต่ำ ๆ การเพิ่มความเข้มเสียงและความถี่ของคลื่นเหนือเสียงสามารถเพิ่มสมรรถนะของคลื่นเหนือเสียงในการกำจัด อนุภาคได้ในระดับหนึ่ง นอกจากนั้นการใช้คลื่นเหนือเสียงความเข้มสูงติดต่อกันเป็นเวลานานจะส่งผลต่อคุณสมบัติ การเก็บกักของเยื่อแผ่น ส่วนสำหรับระดับกำลังเสียงสูงสุด 40 วัตต์ที่ใช้ในการทดลองและมีการควบคุมอุณหภูมิไม่ให้ สูงเกินไป (ในการทดลองเท่ากับ 30 องศาเซลเซียส) จะไม่พบการเปลี่ยนแปลงสีฐาน การกระจายขนาดของอนุภาค และความสามารถในการเจริญเติบโตของยีสต์ที่ผ่านการกรองร่วมกับคลื่นเหนือเสียง นอกจากนี้ยังได้ทำการวิเคราะห์ ในเชิงเศรษฐศาสตร์ของการใช้คลื่นเหนือเสียงร่วมกับการกรองระดับอนุภาค หากมีการเลือกภาวะการปฏิบัติการที่ เหมาะสม พบว่าเมื่อมีการใช้คลื่นเหนือเสียง การสะสมของอนุภาคบนผิวเยื่อแผ่นลดลงและอัตราการกรองต่อหน่วย พื้นที่เพิ่มขึ้น 1.5 - 2.9 เท่า เมื่อเปรียบเทียบกับอัตราการกรองต่อหน่วยพื้นที่เมื่อไม่ใช้คลื่นเหนือเสียง

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

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

ลายมือชื่อนิติกร ..... *20/02/01* .....  
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา ..... *ศิริกานต์* .....  
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ..... *ศิริกานต์* .....  
*15/02/01*

# 970865721 : MAJOR CHEMICAL ENGINEERING

KEY WORD: ULTRASOUND / MICROFILTRATION / TUBULAR MODULE

BONGKOT NGAMSOM: EFFECTS OF THE ULTRASONIC WAVE ON MICROFILTRATION IN TUBULAR MODULE. THESIS ADVISOR: HATHAICHANOK DURIYABUNLENG, Ph.D.

THESIS CO-ADVISOR: ASSOC. PROF. CHIRAKARN MUANGNAPOH, Dr. Ing. 162 pp.

ISBN 974-332-395-3.

Effects of the ultrasonic wave on microfiltration of yeast suspension was examined using a tubular ceramic module operated in cross-flow mode. Applied pressures (transmembrane pressure) were varied between 11.27-46.06 kPa. Feed flow velocities were studied in the range between 0.02-0.48 m/s. Feed concentrations were varied as 0.005, 0.010 and 0.020 g/cm<sup>3</sup>. Acoustic intensities were studied between 0.91-3.53 W/cm<sup>2</sup> at the frequency of 23.8 kHz. From the experiments, it is found that permeate flux of microfiltration coupling with ultrasonic irradiation was dependent with the feed flow velocity, the transmembrane pressure and the feed concentration. Cake removal induced by ultrasonic cleaning increased with increasing transmembrane pressure in the prior stage, and then decreased with the increase in applied pressure in the later stage due to the strong compaction of cake layer. Besides, it is shown that ultrasound has affected the increase of permeate flux at the lower feed flow velocity. Increase in sound intensity and sound frequency gave rise to the increase in ultrasonic cleaning performance. However, for a long period of sonication with high intensity, effect on the characteristics of the membrane was demonstrated. Observation of yeast cells after being irradiated at the highest acoustic power (40 W) at the controlled temperature of 30 °C found no change in morphology, particle size distribution and cultivation capability. The economic analysis of the application of ultrasound into the conventional cross-flow microfiltration was also discussed. In the case that ultrasonic wave was introduced to microfiltration, the decrease in cake buildup over the membrane and the increase in permeate flux in the ratio of 1.5 to 3.0 were expressed compared to those obtained from microfiltration without ultrasound.

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา.....วิศวกรรมเคมี.....

สาขาวิชา.....วิศวกรรมเคมี.....

ปีการศึกษา..... 2541.....

ลายมือชื่อผู้จัดทำ..... Bongkot Ngamsom.....

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา..... Hathachanok Duriyabunleng.....

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม..... Chirakarn Muangnapoh.....



## ACKNOWLEDGEMENTS

The author has received research assistantship from Senior Research Scholar Project of Thailand Research Fund (Dr. Wiwut Tanthapanichakoon) in Particle Technology Field.

The author would like to express her gratitude to Dr. Hathaichanok Duriyabunleng, her advisor, and Associate Professor Dr. Chirakam Muangnapoh, her co-advisor, for their perceptive questions, continuous guidance, kind suggestions and warm encouragement. She is grateful to Professor Dr. Wiwut Tanthapanichakoon who serves as the chairman of the thesis committee. In addition, she is also grateful to Dr. Suttichai Assabumrungrat for serving as warm member whose comments are especially helpful.

The author would like to acknowledge with appreciation to Mr. Boonna Pungphak for his enormous number of suggestions and assistance.

Sincere thanks are made to all members of Biochemical Engineering Research Laboratory for their warm collaborations.

Finally, the author would like to dedicate to her parents, everyone in her family, and all of her friends for their unfailing understandings and affectionate encouragement, in spite of the pressures of the thesis.

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

# CONTENTS

	Page
ABSTRACT IN THAI.....	iv
ABSTRACT IN ENGLISH.....	v
ACKNOWLEDGEMENTS.....	vi
CONTENTS.....	vii
LIST OF TABLES.....	x
LIST OF FIGURES.....	xii
NOMENCLATURES.....	xv
CHAPTERS	
I INTRODUCTION.....	1
1.1 Thesis objectives.....	2
1.2 Scopes of study.....	2
II LITERATURE REVIEW.....	3
III THEORY.....	5
3.1 Principles of microfiltration.....	5
3.1.1 Mass transfer and gel polarization.....	7
3.1.2 Cross-flow microfiltration principle.....	10
3.1.3 Membrane rejection.....	12
3.1.4 Membrane configurations.....	13
3.2 Sonochemistry, ultrasound and its applications.....	15
3.2.1 Cavitation and its effects.....	16
3.2.2 Transducer: The generation of ultrasound.....	23
3.2.3 The waveform generated from a plane circular piston.....	25
IV EXPERIMENTS.....	29
4.1 Apparatus.....	29
4.2 Microfiltration unit.....	29
4.3 Study of microfiltration characteristics.....	32
4.3.1 Study of the effect of the sound frequency.....	33

	Page
4.3.2 Study of the effect of the sound intensity.....	34
4.3.3 Study of the effect of irradiation time.....	34
4.4 Study of the effect of the ultrasonic irradiation on the membrane.....	34
4.4.1 Scanning Electron Microscope (SEM) test.....	34
4.4.2 Mercury Porosimetry.....	35
4.5 Study of the effect of ultrasonic irradiation on the yeast.....	35
4.5.1 Microscope observation.....	35
4.5.2 Particle Size Analyzer.....	35
4.5.3 Cultivation in agar-based medium.....	36
4.6 Cell concentration analysis.....	37
V RESULTS AND DISCUSSION.....	38
5.1 Effect of the applied pressure on permeation performance.....	38
5.2 Effect of the feed flow velocity on permeation performance.....	43
5.3 Effect of the feed concentration on permeation performance.....	46
5.4 Effect of the sound frequency on permeation performance.....	48
5.5 Effect of the sound intensity on permeation performance.....	52
5.6 Effect of the irradiation time.....	55
5.7 Effect of the ultrasonic irradiation on the membrane.....	59
5.7.1 Scanning Electron Microscope.....	59
5.7.2 Mercury Porosimetry.....	59
5.8 Effect of the ultrasonic irradiation on the yeast.....	63
5.8.1 Microscope observation.....	63
5.8.2 Particle size analysis.....	65
5.8.3 Cultivation in agar-based medium.....	66
5.9 Rejection of the membrane.....	67
5.10 Economic analysis.....	74
VI CONCLUSIONS AND RECOMMENDATIONS.....	76
6.1 Conclusions.....	76
6.2 Problems and recommendations.....	78



REFERENCES.....	79
APPENDIX.....	81
Appendix A: Theory of cavitation bubbles.....	82
Appendix B: Examples of calculation.....	92
Appendix C: Experimental data.....	96
BIOGRAPHY.....	162



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## LIST OF TABLES

	Page
Table 2-1 Advantages and disadvantages of methods used to improve permeation performance in microfiltration.....	3
Table 3-1 Comparison of MF membrane configurations.....	13
Table 3-2 Some industrial uses of ultrasound.....	16
Table 4-1 Operating conditions of microfiltration system for the study of the effects of pressure, feed flow velocity and feed concentration on permeation performance.....	33
Table 4-2 Samples taken to study the particle size distribution of yeast cells.....	36
Table 4-3 Samples taken to study the cultivation capability of yeast cells.....	37
Table 5-1 Steady-state permeate fluxes at various applied pressures.....	40
Table 5-2 Comparison of various resistance in filtration with and without ultrasound (effect of applied pressure).....	40
Table 5-3 Steady-state permeate fluxes at various feed flow velocities.....	44
Table 5-4 Comparison of various resistance in filtration with and without ultrasound (effect of feed flow velocity).....	44
Table 5-5 Steady-state permeate fluxes at various feed concentrations.....	46
Table 5-6 Comparison of various resistance in filtration with and without ultrasound (effect of feed concentration).....	46
Table 5-7 Effect of the sound frequency on permeate flux and permeation resistance.....	49
Table 5-8 Effect of the sound intensity on permeate flux and permeation resistance.....	53
Table 5-9 Samples taken to study the particle size distribution of yeast cells.....	65
Table 5-10 The cultivation capability of the yeast cells taken from various conditions.....	67
Table 5-11 Operating costs of conventional and ultrasound systems.....	75
Table 5-12 Estimation of capital requirements.....	75

Table C-1	Permeate flux of demineralized water at various applied pressures: membrane No. 1.....	97
Table C-2	Permeate flux of demineralized water at various applied pressures: membrane No. 2.....	97
Table C-3	Experimental data of effect of the applied pressure, without ultrasound.....	100
Table C-4	Experimental data of effect of the applied pressure, with ultrasound.....	104
Table C-5	Experimental data of effect of the feed flow velocity, without ultrasound.....	108
Table C-6	Experimental data of effect of the feed flow velocity, with ultrasound.....	113
Table C-7	Experimental data of effect of the feed concentration, without ultrasound.....	118
Table C-8	Experimental data of effect of the feed concentration, with ultrasound.....	123
Table C-9	Experimental data of effect of the sound frequency.....	126
Table C-10	Pressure amplitude decreases along the distance.....	129
Table C-11	Experimental data of effect of the sound intensity.....	130
Table C-12	Experimental data of irradiation time, ultrasonic irradiated at 2 <sup>nd</sup> minute for 4 minutes.....	136
Table C-13	Experimental data of irradiation time, ultrasonic irradiated at 6 <sup>th</sup> minute for 4 minutes.....	139
Table C-14	Experimental data of irradiation time, ultrasonic irradiated at 10 <sup>th</sup> minute for 4 minutes.....	142
Table C-15	Experimental data of irradiation time, ultrasonic irradiated at 20 <sup>th</sup> minute for 4 minutes.....	145
Table C-16	Experimental data of irradiation time, ultrasound was applied after steady state flux reached.....	148

## LIST OF FIGURES

		Page
Figure 3-1	The schematics of dead-end filtration and cross-flow filtration.....	6
Figure 3-2	Concentration gradient in microfiltration.....	9
Figure 3-4	The examples of different membrane configurations.....	14
Figure 3-5	Sound frequencies.....	15
Figure 3-6	Cavitation effects in a homogeneous liquid.....	21
Figure 3-7	Cavitation effects at a solid/liquid interface.....	22
Figure 3-8	Cavitation effects at a liquid/liquid interface.....	23
Figure 3-9	A composite transducer.....	24
Figure 3-10	The equivalent circuit of the piezoelectric transducer.....	25
Figure 3-11	Geometry used in deriving the irradiation characteristics of a flat piston.....	26
Figure 3-12	On-axis response of a circular plane piston with $a/\lambda = 4$ .....	28
Figure 4-1	Photograph of microfiltration unit.....	30
Figure 4-2	Ceramic filter.....	30
Figure 4-3	Acoustic power supplied system.....	31
Figure 4-4	The schematic of microfiltration system.....	31
Figure 5-1	The effect of applied pressure on permeate flux of demineralized water.....	41
Figure 5-2	The effect of applied pressure on permeate flux of yeast suspension.....	42
Figure 5-3	Permeate flux of yeast suspension as a function of feed flow velocity.....	45
Figure 5-4	Permeate flux of yeast suspension as a function of feed concentration.....	47
Figure 5-5	Effect of sound frequency on permeate flux.....	50
Figure 5-6	On-axis response of transducers of various frequencies.....	51
Figure 5-7	Effect of sound intensity on permeate flux.....	54

	Page
Figure 5-8 Relationship between permeate flux and time at various time of ultrasonic application.....	57
Figure 5-9 Permeate flux of microfiltration with and without ultrasound.....	58
Figure 5-10 The surface of the membrane before and after being sonicated.....	61
Figure 5-11 SEM study of cross-sectional structure of the membrane before and after being sonicated.....	62
Figure 5-12 Yeast cells at the magnification of 400.....	64
Figure 5-13 Particle size distribution of yeast cells without processing.....	68
Figure 5-14 Particle size distribution of yeast cells after being sonicated.....	69
Figure 5-15 Particle size distribution of yeast cells after being pumped.....	70
Figure 5-16 Colonies of <i>Saccharomyces cerevisiae</i> .....	71
Figure 5-17 Yeast cells cultivated in agar-based medium.....	73
Figure C-1 Permeate flux of demineralized water (Membrane No.1).....	98
Figure C-2 Permeate flux of demineralized water (Membrane No.2).....	99
Figure C-3 Effect of applied pressure on permeate flux, without ultrasound.....	103
Figure C-4 Effect of applied pressure on permeate flux, with ultrasound.....	107
Figure C-5 Effect of feed flow velocity on permeate flux, without ultrasound.....	112
Figure C-6 Effect of feed flow velocity on permeate flux, with ultrasound.....	117
Figure C-7 Effect of feed concentration on permeate flux, without ultrasound.....	122
Figure C-8 Effect of feed concentration on permeate flux, with ultrasound.....	125
Figure C-9 Effect of sound frequency on permeate flux.....	128
Figure C-11 Effect of sound intensity on permeate flux.....	135
Figure C-12 Effect of irradiation time, ultrasound was irradiated in 2 <sup>nd</sup> minute.....	138
Figure C-13 Effect of irradiation time, ultrasound was irradiated in 6 <sup>th</sup> minute.....	141
Figure C-14 Effect of irradiation time, ultrasound was irradiated in 10 <sup>th</sup> minute.....	144
Figure C-15 Effect of irradiation time, ultrasound was irradiated in 20 <sup>th</sup> minute.....	147
Figure C-16 Effect of irradiation time, ultrasound was irradiated from the beginning of filtration.....	150

## NOMENCLATURES

$A$	: Constant number (-)
$A$	: area of irradiation surface ( $\text{cm}^2$ )
$B$	: constant number (-)
$C$	: concentration of macromolecule at $x$ position ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )
$C_b$	: concentration of macromolecule in bulk fluid ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )
$C_g$	: concentration of macromolecule in gel layer ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )
$C_p$	: concentration of macromolecule at permeate side ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )
$C_w$	: concentration of macromolecule at the surface ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )
$D$	: macromolecule diffusivity ( $\text{cm}^2/\text{s}$ )
$d$	: fluid channel height over the membrane (cm)
$f$	: sound frequency (kHz)
$I$	: current (amp.)
$J$	: permeate flux ( $\text{cm}^3/\text{cm}^2 \cdot \text{s}$ )
$k$	: mass transfer coefficient (cm/s)
$P$	: input power (W)
$P_a$	: acoustic pressure (kPa)
$P_A$	: pressure amplitude (kPa)
$P_{\text{bub}}$	: pressure in the bubble (kPa)
$P_c$	: pressure contracting the liquid medium (kPa)
$P_h$	: hydrostatic pressure (kPa)
$P_t$	: pressure at the permeate side (kPa)
$P_g$	: gas pressure (kPa)
$P_i$	: pressure inlet the membrane (kPa)
$P_K$	: critical pressure of cavitation bubble (kPa)
$P_{\text{max}}$	: maximum bubble pressure (kPa)
$P_o$	: pressure outlet the membrane (kPa)
$P_v$	: vapour pressure of a liquid medium (kPa)
$\Delta P_{\text{TM}}$	: transmembrane pressure drop (kPa)
$R_c$	: cake layer resistance (1/cm)

$Re$	: Reynold number (-)
$R_K$	: critical radius of bubble (cm)
$R_m$	: membrane resistance (1/cm)
$R_p$	: plugging resistance (1/cm)
$Sc$	: Schmidt number (-)
$Sh$	: Sherwood number (-)
$t$	: time (s)
$T_{max}$	: maximum bubble temperature ( $^{\circ}C$ )
$u$	: feed flow velocity (cm/s)
$V$	: voltage across the piezoelectric transducer (V)
$x$	: fluid boundary layer thickness (cm)
$\beta$	: viscosity of feed fluid (g/cm.s)
$\delta$	: film thickness (cm)
$\rho$	: density of feed fluid ( $g/cm^3$ )
$\rho_0$	: volume density of a liquid medium ( $g/cm^3$ )
$\varphi$	: the angle between the voltage and the current in the circuit ( $^{\circ}$ )
$\tau$	: time of bubble collapse (s)
$\sigma$	: surface tension of the liquid medium (N/m)
$\lambda$	: acoustic wavelength (cm)
$\omega$	: acoustic circular frequency (radian)