

ตัวกรองเซรามิกชนิดไฮอะลูมินาสำหรับการแยกทางชีวภาพ

นายสิทธิพันธ์ ท่อแก้ว

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมเคมี

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

พ.ศ. 2539

ISBN 974-633-908-7

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

120609793

**A HIGH ALUMINA CERAMIC FILTER FOR BIOSEPARATION**

**Mr. Sittinun Tawkaew**

**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements**

**for the Degree of Master of Engineering**

**Department of Chemical Engineering**

**Graduate School**

**Chulalongkorn University**

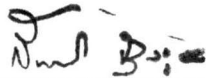
**1996**

**ISBN 974-633-908-7**

หัวข้อวิทยานิพนธ์      ตัวกรองเซรามิกชนิดไฮอะลูมินาสำหรับการแยกทางชีวภาพ  
โดย                              นายสิทธิพันธ์ ท่อแก้ว  
ภาควิชา                              วิศวกรรมเคมี  
อาจารย์ที่ปรึกษา              รองศาสตราจารย์ ดร. จิรกานต์ เมืองนาโพธิ์  
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม      ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สุรศักดิ์ โกสิยพันธ์

---

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง  
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต



คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

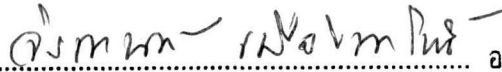
( รองศาสตราจารย์ ดร. สันติ      ณัฐสุวรรณ )

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



ประธานกรรมการ

( ศาสตราจารย์ ดร. ปิยะสาร      ประเสริฐธรรม )



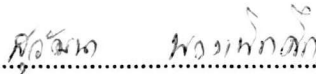
อาจารย์ที่ปรึกษา

( รองศาสตราจารย์ ดร. จิรกานต์      เมืองนาโพธิ์ )



อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

( ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สุรศักดิ์      โกสิยพันธ์ )



กรรมการ

( รองศาสตราจารย์ สุวัฒนา      พวงเพิกศีก )



กรรมการ

( อาจารย์ นุชนภา      ตั้งบริบูรณ์ )

พิมพ์ต้นฉบับบทคัดย่อวิทยานิพนธ์ภายในกรอบสี่เหลี่ยมนี้เพียงแผ่นเดียว

สิทธิพันธ์ ท่อแก้ว : ตัวกรองเซรามิกชนิดไฮอะลูมินาสำหรับการแยกทางชีวภาพ ( A HIGH ALUMINA CERAMIC FILTER FOR BIOSEPARATION ) อ. ที่ปรึกษา : รศ.ดร. จิรกานต์ เมืองนาโพธิ์ อ.ที่ปรึกษาร่วม : ผศ. สุรศักดิ์ โกสิยพันธ์ , 145 หน้า . ISBN 974-633-908-7

ได้ศึกษาการเตรียมไมโครฟิลเตอร์ชนิดไฮอะลูมินาเพื่อประยุกต์ใช้ในการแยกเซลล์ออกจากน้ำหมัก ตัวกรองประกอบด้วยชั้นต่างๆ สามชั้นคือ ชั้นรองรับ, ชั้นมัลติเยอร์และชั้นเยื่อแผ่น ภาวะและองค์ประกอบที่เหมาะสมในการเตรียมชั้นรองรับคือ อะลูมินา 55.55 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก, ตัวประสาน 0.1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของของแข็ง และสารช่วยซินเทอร์ 0.683 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของของแข็ง (  $CuO : TiO_2 : MgO$  1.00:1.00:0.05 โดยน้ำหนัก ) ชั้นรองรับซินเทอร์ที่อุณหภูมิ 1300 °ซ เป็นเวลา 2 ชั่วโมง หลังจากนั้นชั้นรองรับจะถูกเคลือบด้วยอะลูมินาชนิดพิเศษเพื่อสร้างชั้นมัลติเยอร์ ชั้นมัลติเยอร์ที่เคลือบตัวรองรับซินเทอร์ที่อุณหภูมิ 1200 °ซ เป็นเวลา 30 นาที ได้ประยุกต์ใช้เทคนิคโซล-เจลในการเคลือบโซลโบรไมด์บนชั้นมัลติเยอร์ โซลโบรไมด์เกิดจากการทำปฏิกิริยาระหว่างอะลูมิเนียมเซคคันดารีบิวทอกไซด์, น้ำและกรดไนตริก (ในอัตราส่วน 1 : 100 : 0.07 โดยโมลตามลำดับ) ที่อุณหภูมิ 80 -85 °ซ ชั้นเยื่อแผ่นซินเทอร์ที่อุณหภูมิ 600 °ซ เป็นเวลา 30 นาทีเพื่อเปลี่ยนโบรไมด์ให้เป็นเยื่อแผ่นแกรมมาอะลูมินา

จากการวิเคราะห์ลักษณะของชั้นมัลติเยอร์พบว่า ขนาดรูพรุนของตัวรองรับคือ 0.9 ไมโครเมตร, ชั้นมัลติเยอร์ 0.12 ไมโครเมตร และชั้นเยื่อแผ่น 0.01 ไมโครเมตร ไมโครฟิลเตอร์ที่ผลิตขึ้นนี้ถูกนำไปใช้แยกเซลล์ยีสต์ (*Saccharomyces cerevisiae*) พบว่าชั้นรองรับสามารถกรองยีสต์ได้ถึง 100 เปอร์เซ็นต์ แต่เมื่อใช้กรองเชื้อแบคทีเรีย (*Alcaligenes eutrophus* ATCC17697) จำเป็นต้องใช้เยื่อแผ่นจึงจะสามารถกรองเชื้อชนิดนี้ได้หมด

ภาควิชา ..... วิศวกรรมเคมี  
สาขาวิชา ..... วิศวกรรมเคมี  
ปีการศึกษา ..... 2538

ลายมือชื่อนิสิต ..... สิทธิพันธ์ ท่อแก้ว  
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา ..... จิรกานต์ เมืองนาโพธิ์  
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ..... สุรศักดิ์ โกสิยพันธ์



## C516932 : MAJOR CHEMICAL ENGINEERING  
 KEY WORD: CERAMIC FILTER/ALUMINA/SOL-GEL/SLIP CASTING/MEMBRANE  
 SITTINUN TAWKAEW: A HIGH ALUMINA CERAMIC FILTER FOR  
 BIOSEPARATION THESIS ADVISOR: ASSO.PROF.CHIRAKARN MUANGNAPOH,  
 Dr.Eng. THESIS CO-ADVISOR: ASSIST.PROF.SURASAK GOSIYAPUN, M.Sc.  
 145 pp. ISBN 974-633-908-7

Preparation of high alumina microfilter was studied for applying in cell separation from fermentation broth. This filter consisted of three layers, i.e., supported, intermediate and membrane layers. The suitable conditions and composition for the preparation of supported multilayer were: alumina 55.55 percent by weight, binder 0.1 percent by weight of solid and sintering flux 0.683 percent by weight ( CuO : TiO<sub>2</sub> : MgO 1.00:1.00:0.05 by weight ). The supported layer was sintered at 1300 °C for 2 hours. Then the supported layer was coated by special alumina in order to form an intermediate layer. The intermediate-supported filter was sintered at 1200 °C for 30 minutes. Sol-gel technique was applied to coat boehmite sol on the intermediate-supported filter. Boehmite sol was obtained by the reaction of aluminium sec-butoxide, water and nitric acid ( 1 :100 : 0.07 by mole respectively ) at 80 -85 °C. The membrane was calcined at 600 °C in order to change boehmite to gamma-alumina membrane.

From the characterization of this multilayer filter, the pore size of supported, intermediate and membrane layers were about 0.9, 0.12 and 0.01 micron, respectively. This fabricated multilayer microfilter was applied to separate yeast (*Saccharomyces cerevisiae*) and bacteria (*Alcaligenes eutrophus* ATCC17697) from fermentation broth. The experimental results showed that the supported layer could separate yeast with 100 percent rejection. But for bacteria separation, it needed to incorporate the membrane layer for complete rejection.

ภาควิชา.....	วิศวกรรมเคมี	ลายมือชื่อนิสิต.....	Sittinun Tawkaew
สาขาวิชา.....	วิศวกรรมเคมี	ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....	Chirakarn Muangnapoh
ปีการศึกษา.....	2538	ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....	Surasak Gosiyapun

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้ได้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความช่วยเหลือของรองศาสตราจารย์ ดร. จิรกานต์ เมืองนาโพธิ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์สุรศักดิ์ โกสิยพันธ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม รองศาสตราจารย์สุวัฒนา พวงเพิกคิก อาจารย์นุชนภา ตั้งบริบูรณ์ และอาจารย์ท่านอื่น ๆ ที่ได้ให้คำปรึกษา แนะนำและข้อคิดเห็นต่าง ๆ ในการทำวิทยานิพนธ์ ด้วยดีตลอดมา จึงขอกราบขอบพระคุณมา ณ ที่นี้

ขอขอบคุณสถาบันพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติและภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ได้สนับสนุนทุนการวิจัย บริษัทปูนซิเมนต์ไทยจำกัด(มหาชน) และบริษัทล็อกซ์เลย์จำกัด(มหาชน) ที่ได้สนับสนุนวัสดุอุปกรณ์ในการวิจัย

ขอขอบคุณสถาบันวิจัยโลหะและวัสดุ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่เอื้อเฟื้อสถานที่และอุปกรณ์ในการวิจัย และเจ้าหน้าที่ทุกท่านที่ให้ความช่วยเหลือตลอดจนคำแนะนำต่าง ๆ ในการทำวิจัยทุกท่าน

ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่เอื้อเฟื้ออุปกรณ์ในการวิจัย และขอขอบคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. ศิริกัลยา สุวจิตตานนท์, อาจารย์จรัญ ฉัตรมานพ, นางสาวสลิล โมรากุล และ นางสาวอาริสรา สุชาสุทธิ์ ตลอดจนเจ้าหน้าที่ทุกท่าน ที่ได้คำแนะนำและช่วยเหลือในการใช้วิเคราะห์การกระจายของรูพรุนด้วยปรอท

ขอขอบคุณภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่เอื้อเฟื้อสถานที่และอุปกรณ์ในการวิจัย ตลอดจนนักศึกษาปริญญาโทสาขาเซรามิกและคุณแทพิววรรณ จิตวัชรโกมล ที่ได้คำแนะนำและความช่วยเหลือด้วยดีตลอดมา

ขอขอบคุณคุณसानิต พรหมเพชร ที่ให้ความช่วยเหลือในการต่ออุปกรณ์, คุณอภิชาติ แสงรุ่งเรือง กิจและคุณศิริพงษ์ วิงวอน ที่ให้ความช่วยเหลือในการเตรียมเชื้อจุลินทรีย์

ท้ายนี้ผู้วิจัยใคร่ขอกราบขอบพระคุณบิดามารดา ซึ่งคอยให้กำลังใจและสนับสนุนผู้วิจัยเสมอมาจนสำเร็จการศึกษา

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ ( ภาษาไทย ).....	ง
บทคัดย่อ ( ภาษาอังกฤษ ).....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญภาพ.....	ฉ
คำอธิบายสัญลักษณ์.....	น
บทที่	
1    บทนำ.....	1
วัตถุประสงค์.....	2
ขอบเขตการวิจัย.....	2
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
2    การสำรวจเอกสาร.....	3
กระบวนการแยกสาร.....	3
เยื่อแผ่น.....	6
การเตรียมตัวรองรับ.....	9
เอกสารการวิจัยเกี่ยวกับการเตรียมตัวรองรับ.....	15
การเตรียมเยื่อแผ่น.....	20
เอกสารการวิจัยเกี่ยวกับการเตรียมเยื่อแผ่น.....	24
เอกสารการวิจัยเกี่ยวกับการกรอง.....	28

บทที่	หน้า
3	ทฤษฎี..... 29
	ทฤษฎีการกระจายตัวของอนุภาคในน้ำสลิป..... 29
	ทฤษฎีการเทแบบ..... 31
	ทฤษฎีการซินเทอร์..... 32
	ทฤษฎีโซล-เจล..... 38
	ทฤษฎีการกรอง..... 41
4	อุปกรณ์และวิธีการทดลอง..... 48
	วัตถุดิบและสารเคมี..... 48
	อุปกรณ์ในการทดลอง..... 49
	วิธีทดลอง..... 49
	ศึกษาสมบัติทางกายภาพของผงอะลูมินา..... 49
	ศึกษาการเตรียมและสมบัติของตัวรองรับ..... 50
	ศึกษาการเตรียมและเคลือบชั้นมัธยันตร์บนตัวรองรับ..... 55
	ศึกษาการเตรียมสารละลายโซล-เจลและเคลือบเยื่อแผ่น..... 55
	ศึกษาการสมบัติการกรองสารชีวภาพ..... 58
5	ผลการทดลอง วิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง..... 59
	การศึกษาสมบัติทางกายภาพของผงอะลูมินา..... 59
	การศึกษาการเตรียมและสมบัติของตัวรองรับ..... 63
	การศึกษาการเตรียมและเคลือบชั้นมัธยันตร์บนตัวรองรับ..... 106
	การศึกษาการเตรียมสารละลายโซล-เจลและเคลือบเยื่อแผ่น..... 110

บทที่	หน้า
การศึกษาการกรองสารชีวภาพ .....	116
สรุปผลการทดลอง.....	120
ข้อเสนอแนะ .....	121
เอกสารอ้างอิง .....	123
ภาคผนวก .....	126
ประวัติผู้เขียน.....	145

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 แสดงการประยุกต์ใช้กระบวนการกรองในอุตสาหกรรมอาหาร.....	5
2.2 แสดงชนิดเยื่อแผ่นพอลิเมอร์.....	7
2.3 แสดงชนิดเยื่อแผ่นเซรามิก.....	8
2.4 แสดงหน้าที่ของสารเติมแต่ง.....	11
2.5 แสดงตัวประสานที่นิยมใช้ในงานเซรามิก.....	12
2.6 แสดงสารเพิ่มความเหนียวที่นิยมใช้ในงานเซรามิก.....	13
2.7 แสดงสารช่วยกระจายตัวที่นิยมใช้ในตัวกลางที่เป็นน้ำ.....	14
2.8 แสดงองค์ประกอบของน้ำสลิป.....	18
2.9 แสดงโลหะอัลลอยด์ที่ใช้ในการเตรียมสารละลายไฮล-เจล.....	23
3.1 แสดงจุดที่มีค่าประจุเป็นศูนย์ของผลิตภัณฑ์เซรามิกชนิดต่าง ๆ .....	30
3.2 แสดงชนิดและกลไกในการซินเทอร์.....	33
3.3 แสดงการเปลี่ยนแปลงจุดโครงสร้างในแต่ละขั้นตอนของการซินเทอร์.....	35
3.4 แสดงกลไกการถ่ายเทมวลที่เกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการซินเทอร์.....	37
4.1 แสดงวัตถุสืบและสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง.....	48
4.2 แสดงอัตราส่วนระหว่างอะลูมินาแอลคอดและอะลูมินาซีที่ใช้ในการทดลอง.....	50
4.3 แสดงอัตราส่วนสารช่วยซินเทอร์ระหว่างคอปเปอร์ออกไซด์และไทเทเนียมไดออกไซด์ ( โดยน้ำหนัก ).....	52
5.1 แสดงสมบัติของอะลูมินาทั้งสามชนิด.....	59

ตารางที่	หน้า
5.2	แสดงอัตราส่วนผสมระหว่างอะลูมินาแอลคอกอลและอะลูมินาซี.....65
5.3	แสดงสมบัติต่าง ๆ ของการกรองเชื้อแบคทีเรียที่ความเข้มข้นประมาณ 2 กรัมต่อลิตร ( มีปริมาณเซลล์ $1 \times 10^{11}$ เซลล์ต่อลิตร ) .....117
5.4	แสดงสมบัติต่าง ๆ ของการกรองเชื้อยีสต์ที่ความเข้มข้นประมาณ 24 กรัมต่อลิตร ( มีปริมาณเซลล์ $300 \times 10^{11}$ เซลล์ต่อลิตร ) .....118
5.5	แสดงภาวะในการเตรียมตัวรองรับ , ชั้นมัธยันตร์และชั้นเยื่อแผ่น.....122

## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1	แสดงกระบวนการแยกสารด้วยวิธีการต่าง ๆ ..... 4
2.2	แสดงราคาของสารชีวโมเลกุลชนิดต่าง ๆ..... 4
2.3	แสดงลักษณะของเยื่อแผ่นชนิดสมมาตรและเยื่อแผ่นอสมมาตร..... 6
2.4	แสดงการขึ้นรูปด้วยวิธีการเทแบบโดยมีการเหน้าสลิปที่เหลือทิ้ง ..... 14
2.5	แสดงโครงสร้างของไซเตียมคาร์บอกซิลเมทิลเซลลูโลส..... 16
2.6	แสดงการเปลี่ยนแปลงของโบรไมด์ที่อุณหภูมิต่าง ๆ ..... 21
2.7	แสดงโครงสร้างของโบรไมด์..... 21
2.8	แสดงกระบวนการเตรียมไซลอนภาค..... 22
2.9	แสดงกระบวนการเตรียมไซลของ Yoldas..... 25
2.10	แสดงกระบวนการเตรียมเยื่อแผ่นไทเทเนียและเยื่อแผ่นอะลูมินา..... 26
2.11	แสดงการเตรียมเยื่อแผ่น ..... 27
3.1	แสดงการเกิดประจุที่ผิวอะลูมินาที่ค่าความเป็นกรด-ด่างต่าง ๆ กัน..... 30
3.2	แสดงการดูดซับอ็อกซิเจนของโพลิเมอร์ชนิดลบบนผิวเซวามิก..... 31
3.3	แสดงปริมาณน้ำในส่วนต่างในขณะเทแบบ..... 32
3.4	การเปลี่ยนรูปร่างของรูพรุนในระหว่างการซินเทอร์..... 33
3.5	แสดงการถ่ายเทมวลในการซินเทอร์เฟสไอ..... 34
3.6	แสดงกลไกการถ่ายเทมวลที่เกิดขึ้นในระหว่างการซินเทอร์..... 36
3.7	แสดงความแตกต่างของความเข้มข้นที่บริเวณต่าง ๆ..... 41
3.8	แสดงการเกิดเจลโพลีไวเซชัน ..... 43



รูปที่	หน้า
3.9	แสดงการเปรียบเทียบการกรองแบบตั้งฉาก และการกรองแบบทั่วไป..... 44
4.1	แสดงภาวะในการซินเทอร์ของตัวรองรับที่ 1300 °ซ เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ..... 52
4.2	แสดงแผนภาพชุดทดสอบการกรอง..... 54
4.3	แสดงภาวะในการซินเทอร์ของชั้นมัธยันตร์ที่ 1200 °ซ เป็นเวลา 30 นาที..... 56
4.4	แสดงอุปกรณ์ในการเตรียมสารละลายไซล..... 57
4.5	แสดงภาวะในการซินเทอร์ชั้นเยื่อแผ่นที่ 600 °ซ เป็นเวลา 30 นาที..... 58
5.1	แสดงการกระจายตัวของขนาดอนุภาคของอะลูมินาทั้ง 3 ชนิด..... 60
5.2	แสดงลักษณะจุดโครงสร้างของอะลูมินาทั้ง 3 ชนิด ..... 61-62
5.3	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณอะลูมินาซีในน้ำสลิปและเปอร์เซ็นต์การหดตัวของชิ้นงานหลังการเทแบบ..... 64
5.4	แสดงการการหดตัวของชิ้นงานในระหว่างการระเหยของน้ำจากชิ้นงาน..... 65
5.5	แสดงการกระจายตัวของขนาดอนุภาคในน้ำสลิปก่อนเติมและหลังเติมอะลูมินาซี 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของของแข็ง..... 66
5.6	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณตัวช่วยกระจายตัวและค่าความหนืดของน้ำสลิปก่อนเติมตัวประสานและหลังจากเติมตัวประสาน..... 68
5.7	แสดงการดูดซับของตัวช่วยกระจายตัวบนผิวของอะลูมินา..... 68
5.8	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของสารช่วยซินเทอร์และเปอร์เซ็นต์ความหนาแน่นทางทฤษฎีหลังการซินเทอร์ที่ 1300 °ซ เป็นเวลา 2 ชั่วโมง..... 71
5.9	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของตัวช่วยในการซินเทอร์และเปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำของชิ้นงานหลังการซินเทอร์ที่ 1300 °ซ เป็นเวลา 2 ชั่วโมง..... 72

รูปที่	หน้า
5.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของสารช่วยซินเทอร์และเปอร์เซนต์ ความพรุนของชิ้นงานหลังการซินเทอร์ที่ 1300 °ซ เป็นเวลา 2 ชั่วโมง.....	73
5.11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของสารช่วยซินเทอร์และเปอร์เซนต์ การหดตัวของชิ้นงานหลังการซินเทอร์ที่ 1300 °ซ เป็นเวลา 2 ชั่วโมง.....	74
5.12 แสดงสีของชิ้นงานเมื่อเติมสารช่วยซินเทอร์ที่อัตราส่วนต่าง ๆ หลังการซินเทอร์ที่ 1300 °ซ เป็นเวลา 2 ชั่วโมง.....	75
5.13 แสดงภาพถ่ายจุลโครงสร้างจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของ ชิ้นงานที่ไม่ได้เติมสารช่วยซินเทอร์ในอัตราส่วนต่าง ๆ ก่อนการซินเทอร์ที่ อุณหภูมิ 1300 °ซ เป็นเวลา 2 ชั่วโมง .....	76
5.14 แสดงภาพถ่ายจุลโครงสร้างจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของ ชิ้นงานหลังซินเทอร์ที่อุณหภูมิ 1300 °ซ เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ที่กำลังขยาย 5000 เท่า .....	77-79
5.15 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิในการซินเทอร์และความหนาแน่นหลังการ ซินเทอร์เป็นเวลา 2 ชั่วโมง เมื่ออัตราส่วนระหว่างไทเทเนียมไดออกไซด์ ต่อคอปเปอร์ออกไซด์เป็น 1:1 และปริมาณปริมาณสารช่วยซินเทอร์รวม 2 เปอร์เซนต์ .....	81
5.16 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิในการซินเทอร์และเปอร์เซนต์การดูดซึมน้ำ ของชิ้นงานหลังการซินเทอร์เป็นเวลา 2 ชั่วโมง เมื่ออัตราส่วนระหว่าง ไทเทเนียมไดออกไซด์ต่อคอปเปอร์ออกไซด์เป็น 1:1 และปริมาณปริมาณ สารช่วยซินเทอร์รวม 2 เปอร์เซนต์ .....	82

รูปที่	หน้า
5.17 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิในการซินเทอร์และเปอร์เซ็นต์ความพรุนของ ชิ้นงานหลังการซินเทอร์เป็นเวลา 2 ชั่วโมง เมื่ออัตราส่วนระหว่างไทเทเนียม ไดออกไซด์ต่อคอปเปอร์ออกไซด์เป็น 1:1 และปริมาณปริมาณตัวช่วยซินเทอร์ รวม 2 เปอร์เซ็นต์ .....	83
5.18 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิในการซินเทอร์และเปอร์เซ็นต์การหดตัวของ ชิ้นงานหลังการซินเทอร์เป็นเวลา 2 ชั่วโมง เมื่ออัตราส่วนระหว่างไทเทเนียม ไดออกไซด์ต่อคอปเปอร์ออกไซด์เป็น 1:1 และปริมาณปริมาณสารช่วยซินเทอร์ รวม 2 เปอร์เซ็นต์ .....	84
5.19 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิในการซินเทอร์และขนาดของรูพรุนภายในของ ชิ้นงานหลังการซินเทอร์เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ที่ปริมาณสารช่วยซินเทอร์ รวม 2 เปอร์เซ็นต์ .....	85
5.20 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิในการซินเทอร์และความแข็งของชิ้นงาน หลังการซินเทอร์เป็นเวลา 2 ชั่วโมง เมื่ออัตราส่วนระหว่างไทเทเนียมไดออกไซด์ ต่อคอปเปอร์ออกไซด์เป็น 1:1 และปริมาณปริมาณตัวช่วยในการซินเทอร์รวม 2 เปอร์เซ็นต์ .....	86
5.21 แสดงสีของชิ้นงานหลังจากการซินเทอร์ที่อุณหภูมิต่าง ๆ เป็นเวลา 2 ชั่วโมง เมื่ออัตราส่วนระหว่างไทเทเนียม ไดออกไซด์ต่อคอปเปอร์ออกไซด์เป็น 1:1 และปริมาณปริมาณตัวช่วยในการซินเทอร์รวม 2 เปอร์เซ็นต์.....	86

รูปที่	หน้า
5.22 แสดงภาพถ่ายจุลโครงสร้างจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ของชิ้นงานที่เติมสารช่วยขึ้นเทอร์ในปริมาณ 2 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักใน อัตราส่วนคอปเปอร์ออกไซด์ต่อไทเทเนียมไดออกไซด์เป็น 1 : 1 หลังการ ขึ้นเทอร์ที่อุณหภูมิต่าง ๆ เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ที่กำลังขยาย 5000 เท่า.....	88-90
5.23 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสารช่วยขึ้นเทอร์และความหนาแน่นของชิ้นงาน หลังการขึ้นเทอร์ที่อุณหภูมิ 1300 °ซ เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ที่อัตราส่วนคอปเปอร์ ออกไซด์ต่อไทเทเนียมไดออกไซด์เป็น 1 : 1 .....	93
5.24 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสารช่วยขึ้นเทอร์และเปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำ หลังการขึ้นเทอร์ที่อุณหภูมิ 1300 °ซ เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ที่อัตราส่วน คอปเปอร์ออกไซด์ต่อไทเทเนียมไดออกไซด์เป็น 1 : 1 .....	94
5.25 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสารช่วยขึ้นเทอร์และความพรุนของชิ้นงาน หลังการขึ้นเทอร์ที่อุณหภูมิ 1300 °ซ เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ที่อัตราส่วน คอปเปอร์ออกไซด์ต่อไทเทเนียมไดออกไซด์เป็น 1 : 1 .....	95
5.26 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสารช่วยขึ้นเทอร์และเปอร์เซ็นต์การหดตัว ของชิ้นงานหลังการขึ้นเทอร์ที่อุณหภูมิ 1300 °ซ เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ที่อัตราส่วน คอปเปอร์ออกไซด์ต่อไทเทเนียมไดออกไซด์เป็น 1 : 1 .....	96
5.27 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสารช่วยขึ้นเทอร์และขนาดของรัศมีรูพรุน ภายในชิ้นงานหลังการขึ้นเทอร์ที่อุณหภูมิ 1300 °ซ เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ที่ อัตราส่วนคอปเปอร์ออกไซด์ต่อไทเทเนียมไดออกไซด์เป็น 1 : 1 .....	97

รูปที่	หน้า
5.28 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสารช่วยซินเทอร์และความแข็งแรงของชิ้นงาน หลังการซินเทอร์ที่อุณหภูมิ 1300 °ซ เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ที่อัตราส่วน คอปเปอร์ออกไซด์ต่อไทเทเนียมไดออกไซด์เป็น 1 : 1 .....	98
5.29 แสดงสีของชิ้นงานที่เติมสารช่วยซินเทอร์ในปริมาณต่าง ๆ หลังจากการซินเทอร์ที่ อุณหภูมิ 1300 °ซ เป็นเวลา 2 ชั่วโมง อัตราส่วนคอปเปอร์ออกไซด์ต่อ ไทเทเนียมไดออกไซด์เป็น 1 : 1 .....	99
5.30 แสดงภาพถ่ายจุลโครงสร้างจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของ ชิ้นงานเมื่อเติมสารช่วยซินเทอร์ในปริมาณต่าง ๆ ที่อัตราส่วนคอปเปอร์ออกไซด์ ต่อไทเทเนียมไดออกไซด์เป็น 1 : 1 หลังการซินเทอร์ที่อุณหภูมิ 1300 °ซ เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ที่กำลังขยาย 5000 เท่า .....	100-102
5.31 แสดงภาพถ่ายจุลโครงสร้างจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของ ชิ้นงานที่เติมสารช่วยซินเทอร์ในปริมาณ 0.683 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักใน อัตราส่วนคอปเปอร์ออกไซด์ต่อไทเทเนียมไดออกไซด์ต่อแมกนีเซียมออกไซด์เป็น 1 : 1 : 0.05 หลังการซินเทอร์ที่อุณหภูมิ 1300 °ซ เป็นเวลา 2 ชั่วโมง .....	103
5.32 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้ในการหล่อและความหนาของชิ้นงาน.....	104
5.33 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างฟลักซ์และความดันผ่านเยื่อแผ่นของตัวรองรับ.....	105
5.34 แสดงภาพถ่ายจุลโครงสร้างจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ของชิ้นมัลติเยอร์หลังการซินเทอร์ที่อุณหภูมิ 1200 °ซ เป็นเวลา 30 นาที ที่กำลังขยาย 10,000 เท่า .....	107
5.35 แสดงการกระจายตัวของวัตุพูนก่อนและหลังการเคลือบชิ้นมัลติเยอร์บน ตัวรองรับหลังการซินเทอร์ที่อุณหภูมิ 1200 °ซ เป็นเวลา 30 นาที.....	108

รูปที่	หน้า
5.36 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างฟลักซ์และความดันผ่านเยื่อแผ่นของเมือซินเทอร์ ชั้นมัลติเยอร์ที่อุณหภูมิ 1100 และ 1200 °ซ เป็นเวลา 30 นาที.....	109
5.37 แสดงการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักและปริมาณความร้อนของโบรไมด์เมื่อ เพิ่มอุณหภูมิ.....	111
5.38 แสดงการเปลี่ยนแปลงเฟสของโบรไมด์หลังการเผาที่อุณหภูมิต่าง ๆ เป็น เวลา 30 นาที.....	112
5.39 แสดงภาพถ่ายจุลโครงสร้างจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของ ชั้นเยื่อแผ่นหลังการเผาที่อุณหภูมิ 600 °ซ เป็นเวลา 30 นาที ที่กำลังขยาย 10,000 เท่า.....	113
5.40 แสดงการกระจายตัวของรูพรุนหลังการเคลือบโซลบนชั้นมัลติเยอร์.....	114
5.41 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าฟลักซ์และความดันผ่านเยื่อแผ่นเมือเผาเยื่อแผ่น ที่อุณหภูมิ 600 °ซ เป็นเวลา 30 นาที .....	115
5.42 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเปอร์เซ็นต์วีเจคชันและขนาดรูพรุนของตัวกรอง ในการกรองเชื้อยีสต์และแบคทีเรีย.....	119

## คำอธิบายสัญลักษณ์

C	ความเข้มข้นของสารละลาย
$C_B$	ความเข้มข้นของตัวถูกละลายในสารละลาย
$C_G$	ความเข้มข้นของตัวถูกละลายในชั้นเจล
$C_p$	ความเข้มข้นของสารในสายเพอร์มิเอต
$C_w$	ความเข้มข้นของตัวถูกละลายที่ผิวหน้าเยื่อแผ่น
$D_V$	ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของตัวถูกละลาย
J	ฟลักซ์หรืออัตราการกรอง
K	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวล
$K_f$	ค่าคงที่
$R_G$	ความต้านทานการไหลของชั้นเจล
$R_M$	ความต้านทานการไหลของชั้นเยื่อแผ่น
t	ระยะเวลาในการทดสอบ
x	ความหนาของชั้นงาน
$\delta$	ความหนาของชั้นขอบเขต
$\sigma$	รีเจคชัน
$\mu$	ความหนืด
$\Delta P$	ความดันผ่านเยื่อแผ่น