

วัสดุซิลิกา-เจลาตินนาโนคอมโพสิตเพื่อเป็นพาหะสำหรับตัวเร่งปฏิกิริยาชีวภาพ

นางสาว วาทีณี จุลการพิมพ์



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2543

ISBN 974-346-360-7

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

I19451027

A SILICA-GELATIN NANOCOMPOSITE MATERIAL AS A BIOCATALYST CARRIER

Miss Watinee Julpharpimon

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

Department of Chemical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic year 2000


ISBN 974-346-360-7

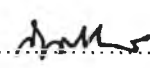
หัวข้อวิทยานิพนธ์ วัสดุซิลิกา-เจลาตินนาโนคอมโพสิตเพื่อเป็นพาหะสำหรับตัวเร่งปฏิกิริยา
ชีวภาพ
โดย นางสาว วาทีณี จุลภากรพิมล
ภาควิชา วิศวกรรมเคมี
อาจารย์ที่ปรึกษา ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สีรุ้ง ปรีชานนท์
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ภาวี ศรีกุลกิจ

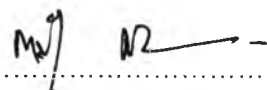
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

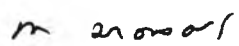
.....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.สมศักดิ์ ปัญญาแก้ว)

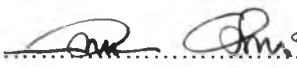
คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.เกริกชัย สุภาบุญจันทิ)

.....อาจารย์ที่ปรึกษา
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สีรุ้ง ปรีชานนท์)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ภาวี ศรีกุลกิจ)

.....กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธราธร มงคลศรี)

.....กรรมการ
(ดร.ภาวดี อังค์วัฒน์)

วาทีณี จุลสารพิมพ์ : วัสดุซิลิกา-เจลาตินนาโนคอมโพสิตเพื่อเป็นพาหะสำหรับตัวเร่งปฏิกิริยาชีวภาพ
(A SILICA-GELATIN NANOCOMPOSITE MATERIAL AS A BIOCATALYST CARRIER)

อ. ที่ปรึกษา : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สิริรุ่ง ปรีชานนท์,

อ. ที่ปรึกษาร่วม : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. กาวี ศรีกุลกิจ, 141 หน้า. ISBN 974-346-360-7.

งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อสังเคราะห์วัสดุชนิดใหม่ที่เรียกว่า "วัสดุซิลิกา-เจลาตินนาโนคอมโพสิต" เพื่อใช้เป็นพาหะสำหรับตัวเร่งปฏิกิริยาชีวภาพ การศึกษาแบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอน โดยในขั้นตอนแรกเป็นการศึกษาภาวะที่เหมาะสมต่อการสังเคราะห์วัสดุซิลิกา-เจลาตินนาโนคอมโพสิตโดยศึกษาครอบคลุมถึงปัจจัยสำคัญต่างๆที่มีผลต่อวัสดุที่สังเคราะห์ ได้แก่ ภาวะความเป็นกรด-ด่างของสารละลายน้ำ อัตราส่วนเชิงโมลของน้ำต่อเตตระเอทอกซีซิลีน (TEOS) (ค่า r) และปริมาณเจลาติน รวมทั้งการทดสอบความเสถียรของวัสดุต่อการละลายในน้ำ ตัวทำละลายอินทรีย์และความร้อน พบว่าการใช้สารละลายกรดไฮโดรคลอริก 0.1 โมลาร์ เพื่อเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการโซล-เจลจะทำให้ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสและคอนเดนเซชันเกิดขึ้นเร็ว ผลึกที่เกิดขึ้นมีลักษณะเป็นซิลิกาเจลที่เป็นก้อน เลือกใช้ค่า r เท่ากับ 4 เนื่องจากความเข้มข้นของ TEOS ยังไม่มีผลจากการเจือจางของน้ำที่ใช้และยังคงมีปริมาณน้ำพอสำหรับการละลายเจลาตินและสามารถบรรจุเอนไซม์ได้มาก และใช้เจลาติน 8% โดยน้ำหนักต่อปริมาตรเพื่อไม่ให้เกิดการแยกวัฏภาคในระหว่างเกิดกระบวนการโซล-เจล วัสดุที่สังเคราะห์ได้จากภาวะสารละลายกรดไฮโดรคลอริก 0.1 โมลาร์ ที่ค่า $r = 4$ และเจลาติน 8% โดยน้ำหนักต่อปริมาตรจะได้วัสดุที่มีโครงข่ายของเจลาตินเด่น เจลมีลักษณะใส เหนียวไม่หักง่าย จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค SEM พบว่าพื้นผิวค่อนข้างเป็นเนื้อเดียวกัน มีพื้นที่ผิว $0.29 \text{ m}^2/\text{g}$ (จากสมการ BET) และโครงสร้างของซิลิกาจากสเปกตรัม $^{29}\text{Si-NMR}$ พบว่าประกอบด้วยโครงสร้างหลักของอะตอมซิลิกอนที่ประกอบด้วยหมู่ไฮโลเซน 3 หมู่และซิลานอล 1 หมู่แสดงด้วยสัญลักษณ์ Q^3 เจลจะพองตัว 2 เท่าแล้วคงที่เมื่อถูกแช่ในน้ำนาน 1 สัปดาห์ เมื่อถูกแช่ในตัวทำละลายอินทรีย์หลายชนิด (อะซิโตน เฮกเซน ไโซโคลเฮกเซน เฮปแทน และไอโซออกเทน) จะพองตัวประมาณ 2 เท่า ทั้งให้แห้งในบรรยากาศเจลจะหดตัวลงและมีลักษณะคล้ายกับก่อนที่จะแช่

ในขั้นตอนที่ 2 เป็นการประยุกต์ใช้วัสดุประเภทซิลิกา-เจลาตินนาโนคอมโพสิตเพื่อเป็นพาหะสำหรับเอนไซม์ไลเปสจาก *Candida cylindracea* เพื่อใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาทรานเอส-เทอริฟิเคชันระหว่างเรซิมีกเมนทอลและเฮกซิล-อะซิเตตพบว่า มีอัตราการเร่งปฏิกิริยาเริ่มต้น ($100 \mu\text{mol} / \text{l} - \text{hr} - \text{g enz.}$) ประมาณ 1.5 เท่าของเอนไซม์อิสระ เอนไซม์ตรึงรูปภายหลังจากการเก็บไว้ในบรรยากาศนาน 15 และ 35 วัน พบว่าแอกทิวิตีสูงขึ้นไปถึง 134 และ 70% ตามลำดับ แต่เอนไซม์อิสระจะสูญเสียแอกทิวิตีไปถึงประมาณ 50%

ภาควิชา.....วิศวกรรมเคมี..... ลายมือชื่อนิสิต.....
สาขาวิชา.....วิศวกรรมเคมี..... ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....
ปีการศึกษา...2543..... ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....

4070415421 : MAJOR CHEMICAL ENGINEERING DEPARTMENT

KEY WORD : SILICA-GELATIN NANOCOMPOSITE / SOL-GEL / IMMOBILIZED ENZYME

WATINEE JULPHARPIMON : A SILICA-GELATIN NANOCOMPOSITE MATERIAL AS A BIOCATALYST

CARRIER. THESIS ADVISOR : ASSISTANT PROFESSOR SEEROONG RICHANONT, Ph.D.

THESIS CO-ADVISOR : ASSISTANT PROFESSOR KAWEE SRIKULKIT, Ph.D. pp. 141 ISBN 974-346-360-7

The overall aim of this project was to synthesise new material called "silica-gelatin nanocomposite" to be used as a carrier for immobilized enzyme in bioprocesses. The study consists of two main experimental parts. The first part was to investigate suitable conditions for the synthesis of silica-gelatin nanocomposite material. The study covered investigations of effects of influential parameters, namely; pH of solutions, water to tetraethoxysilane (TEOS) concentration (r value), and gelatin concentration on the synthesised material. The material dissolution stabilities in water, various kinds of organic solvents and heat was tested. It was found that the use of 0.1 M HCl as a catalyst in sol-gel process increased the rate of hydrolysis and condensation reactions and the product obtained was bulk silica gel. $r = 4$ was chosen because at this value TEOS was not that much diluted and there was still enough water for gelation and enzyme solubilisation. The use of 8%w/v gelatin concentration prevented phase separation during the gelation. The synthesised material obtained under 0.1 M HCl, $r=4$, and 8%w/v gelatin concentration was transparent and tough due to dominant nanogel network. From the SEM analysis, the material was to be quite homogeneous with smooth surface and the area was 0.29 m^2/g (BET equation). Results from ^{29}Si -NMR analysis revealed that the silica network produced contained dominant silicon atoms which beared 3 siloxane bonds and 1 silanol group designated as Q^3 species. The material synthesised was found to swell two folds when immersed in either water or various organic solvents(acetone, hexane, cyclohexane, heptane, and isooctane)for a week. Air drying of the solvents swollen samples led to original dense bodies.

The second part investigated the initial rate of reaction enhancedly immobilized enzyme. The material synthesised was used as a carrier for lipase from Candida cylindracea to catalyse the tranesterification reaction of racemic menthol with hexyl acetate. The initial rate for resolution of racemic menthol by immobilized lipase was found to be 1.5 times higher than that of free enzyme.(100 μ mol/ l-hr- g enz.) The immobilized lypase exhibited good storage stability with surprisingly 134% and 70% increase in transesterification activity after 15 and 35 days of storage respectively. In contrast, free enzyme was found to lose its activity up to approximately 50% of it original activity.

Department.....Chemical engineering..... Student's signature.....*Watinee Julpharpimon*.....

Field of study.....Chemical engineering..... Advisor's signature.....*Seeroong Richanont*.....

Academic year.....2000..... Co-advisor's signature.....*K. Srikulkit*.....

กิตติกรรมประกาศ



วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความช่วยเหลือจากหลาย ๆ ท่าน ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สิริรุ่ง ปรีชานนท์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. กาวี ศรีภูลกิจ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม เป็นอย่างสูงสำหรับการให้คำปรึกษาที่มีคุณค่าต่อการพัฒนางานวิจัย การตรวจทานแก้ไขวิทยานิพนธ์ ตลอดจนเป็นต้นแบบของการพัฒนาความคิด และการเป็นนักวิจัยที่ดี

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. เกริกชัย สุกาญจน์จิที่ ประธานกรรมการ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธรรธร มงคลศรี ดร.ภาวดี อังค์วัฒน์และ ดร.ตรุณี วัฒนศิริเวช กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ซึ่งได้เสนอข้อคิดเห็นที่เป็นประโยชน์และแก้ไข เพิ่มเติมส่วนที่บกพร่องของงานวิจัยนี้

ขอขอบพระคุณ บัณฑิตวิทยาลัย และภาควิชาวิศวกรรมเคมี และสำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ ที่ได้สนับสนุนให้ทุนอุดหนุนการวิจัยในครั้งนี้

ขอขอบพระคุณ งานบริการทางเทคนิค ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ ที่ได้สนับสนุนให้บริการการใช้เครื่องมือวิเคราะห์เกี่ยวกับการทำวิจัยในครั้งนี้

ขอขอบพระคุณ คุณภัทรารวรรณ, คุณชิตสภนธ์ และคุณธนวิทย์ จากศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ ที่ให้ความกรุณาในการให้คำปรึกษาและการใช้เครื่องมือวิเคราะห์เกี่ยวกับการทำวิจัย

งานวิจัยชิ้นนี้คงไม่สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้เลย ถ้าปราศจากความสนับสนุนทางการศึกษาจากคุณพ่อผู้ซึ่งล่วงลับไปแล้ว คุณแม่ซึ่งเป็นกำลังใจที่สำคัญตลอดมา อีกทั้งพี่ ๆ เพื่อน ๆ และน้อง ๆ ที่คอยให้กำลังใจ ให้ความช่วยเหลือบางอย่างที่เป็นประโยชน์ จนทำให้ผู้วิจัยทำงานวิจัยสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฌ
สารบัญรูป.....	ญ
บทที่	
1. บทนำ.....	1
1.1 จุดประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.2 ขอบเขตงานวิจัย.....	2
2. ทฤษฎี.....	4
2.1 บทนำ.....	4
2.2 กระบวนการโซล-เจลของซิลิกอนอัลคอกไซด์.....	4
2.3 ไมโครอิมัลชัน-เบสค์ออร์แกโนเจล.....	17
2.4 ซิลิกา-เจลาตินนาโนคอมโพสิต.....	20
3. ตรวจเอกสาร.....	22
3.1 บทนำ.....	22
3.2 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อสมบัติของซิลิกา-เจลาตินนาโนคอมโพสิต.....	22
3.2.1 ไมโครอิมัลชัน.....	23
3.2.2 ไมโครอิมัลชัน-เบสค์ออร์แกโนเจล.....	27
3.2.3 การสังเคราะห์อนุภาคซิลิกาในไมโครอิมัลชันชนิดน้ำในน้ำมัน.....	29
3.2.4 ซิลิกา-เจลาตินนาโนคอมโพสิต.....	35
3.3 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อเอนไซม์ตรีงรูป.....	38
3.3.1 ไมโครอิมัลชันชนิดน้ำในน้ำมัน.....	38
3.3.2 เอนไซม์ตรีงรูปในวัสดุโซล-เจล.....	44
3.3.3 ไมโครอิมัลชัน-เบสค์ออร์แกโนเจล.....	49
4. อุปกรณ์และวิธีดำเนินงานวิจัย.....	55

4.1 สารเคมี.....	55
4.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง.....	55
4.3 การศึกษาหาภาวะที่เหมาะสมในการสังเคราะห์ซิลิกา-เจลาตินนาในคอมโพสิต.....	56
4.4 การศึกษาความเป็นไปได้ในการประยุกต์ใช้ซิลิกา-เจลาตินนาในคอมโพสิตเพื่อเป็นพาหะสำหรับตัวเร่งปฏิกิริยาชีวภาพ.....	58
4.5 การวิเคราะห์.....	60
5. ผลการทดลองและสรุปผลการทดลอง.....	62
5.1 ผลภาวะที่เหมาะสมในการสังเคราะห์ซิลิกา-เจลาตินนาในคอมโพสิต...	62
5.2 ผลการศึกษาความเป็นไปได้ในการประยุกต์ใช้ซิลิกา-เจลาตินนาในคอมโพสิตเพื่อเป็นพาหะสำหรับตัวเร่งปฏิกิริยาชีวภาพ.....	97
6. สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....	109
รายการอ้างอิง.....	113
ภาคผนวก.....	118
ภาคผนวก ก.....	119
ภาคผนวก ข.....	125
ภาคผนวก ค.....	128
ประวัติผู้แต่ง.....	141

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 การละลายของซิลิกาที่ 25 องศาเซลเซียส ในสารละลายน้ำ-เมทานอล.....	7
2.2 เวลาในการเกิดเจลและค่าความเป็นกรด-ด่างสำหรับระบบ TEOS ในตัวเร่ง ปฏิกิริยาต่างๆ.....	11
2.3 ผลของค่า r ต่อลักษณะรูปร่างผลิตภัณฑ์โพลีซิลิเกต.....	12
3.1 เปรียบเทียบสมบัติของไมโครอิมัลชัน-เบสด์ออร์แกโนเจลและซิลิกา-เจลลาดิน นาโนคอมโพสิต.....	35
5.1 ผลของค่าความเป็นกรด-ด่างต่อลักษณะของตัวอย่างที่สังเกตเห็นจากตาเปล่า ผลการ วิเคราะห์พื้นที่ผิวของตัวอย่างด้วยเทคนิค BET และโครงสร้างของซิลิกาด้วยเทคนิค MAS ²⁹ SiNMR.....	68
5.2 ผลของค่า r ต่อลักษณะของตัวอย่างที่สังเกตเห็นจากตาเปล่า ผลการวิเคราะห์พื้นที่ผิว ของตัวอย่างด้วยเทคนิค BET และโครงสร้างของซิลิกาด้วยเทคนิค MAS ²⁹ SiNMR.....	74
5.3 ปริมาณเจลลาดินที่มีผลต่อการแยกวัฏภาคของเจลและของเหลว.....	81
5.4 ผลของปริมาณเจลลาดินจากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค BET และเทคนิค MAS ²⁹ SiNMR.	86
5.5 ผลของค่าความเป็นกรด-ด่าง 2 ชนิดจากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค BET และเทคนิค MAS ²⁹ SiNMR.....	88
5.6 อัตราการเกิดปฏิกิริยาเบื้องต้นของเฮนไซม์ในปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ริฟิเคชัน.....	108

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 แสดงพฤติกรรมกการเกิดฟิล์มออร์ของอนุภาคซิลิกาในสารละลายน้ำ.....	6
2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการละลายของซิลิกาในน้ำและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาค.....	8
2.3 ความสัมพันธ์ระหว่างการละลายของซิลิกาและค่าความเป็นกรด-ด่างที่อุณหภูมิต่างๆ.....	8
2.4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ของอัตราการเกิดปฏิกิริยาและค่าความเป็นกรด-ด่าง.....	10
2.5 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้ในการเกิดเจลและค่า r ที่อัตราส่วนเชิงโมลของเอทานอลและ TEOS คงที่.....	13
2.6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเป็นกรด-ด่างต่ออัตราเร็วเฉลี่ยของปฏิกิริยาคอนเดนเซชันของกระบวนการไซล-เจลในสารละลายกรดต่างๆ.....	15
2.7 ค่าความเป็นกรด-ด่างที่สัมพันธ์กับอัตราการละลายของซิลิกาและเวลาในการเกิดเจลในระบบสารละลายน้ำ.....	16
2.8 สูตรโครงสร้างและลักษณะที่เป็นเกลียวของเจลาติน.....	17
2.9 แบบจำลองซูเปอร์-โพลีเมอร์และ แบบจำลองอื่นสำหรับ MBGs.....	19
2.10 แสดงโครงสร้างของวัสดุซิลิกา-เจลาตินนาโนคอมโพสิต	20
2.11 การเตรียมวัสดุซิลิกา-เจลาตินนาโนคอมโพสิต.....	21
3.1 แผนภาพเฟสไดอะแกรม.....	24
3.2 แผนภาพแสดง (ก) นอร์มอลไมเซลล์ (ข) สองเฟสต่อเนื่อง และ (ค) รีเวอร์สไมเซลล์	25
3.3 ไดอะแกรมวิภภาคของระบบไมโครอิมัลชัน น้ำ/ AOT/ ไอโซออกเทน.....	26
3.4 แบบจำลองโครงสร้างของไมโครอิมัลชันชนิดน้ำในน้ำมันและที่ภาวะการไหลซึม.....	26
3.5 ขอบเขตออร์แกนเจลที่เสถียรของระบบ AOT/ไอโซออกเทน AOT.....	27
3.6 การรวมตัวของอนุภาคซิลิกาที่ถูกไฮโดรไลซ์แล้วเคลื่อนผ่านไมเซลล์ การชนของไมเซลล์ทำให้เกิดช่องเปิดของสารลดแรงตึงผิว.....	31
3.7 เจลของซิลิกาจากระบบไมโครอิมัลชันของ AOT/ ไอโซออกเทน ภายใต้ภาวะที่เป็นกลาง (ก) ภาพถ่ายจากเทคนิค SEM (ข) สเปกตรัมของ MAS ²⁹ SiNM.....	33
3.8 เจลของซิลิกาจากระบบไมโครอิมัลชันของ AOT/ ไอโซออกเทน ภายใต้ภาวะที่เป็นกรด (ก) ภาพถ่ายจากเทคนิค SEM (ข) สเปกตรัมของ MAS ²⁹ SiNMR.....	34
3.9 วัสดุซิลิกา-เจลาตินนาโนคอมโพสิตถ่ายจากเทคนิค SEM (ก) ภายใต้ภาวะที่เป็นกลาง	

(ข) ภายใต้อาหารที่เป็นกรด.....	37
3.10 แบบจำลองสำหรับโปรตีนที่ถูกตรึงอยู่ในรีเวอร์สไมเซลล์.....	40
3.11 อิทธิพลของขนาดไมเซลล์ (W_0) ต่อแอกทิวิตีของเอนไซม์ในรีเวอร์สไมเซลล์.....	43
3.12 กระบวนการตรึงเอนไซม์ในวัสดุซิล-เจลที่สังเคราะห์ขึ้นในสารละลายน้ำ.....	45
3.13 อิทธิพลของค่า r ต่อแอกทิวิตีของไลเปส (<i>Ps. Cepacia</i>) ตรึงรูปในเมตริกซ์ที่เตรียมจากเมทิลไตรเมทอกซีซิเลน.....	47
3.14 อิทธิพลของปริมาณเอนไซม์ (enzyme loading) ต่อแอกทิวิตี สำหรับไลเปส (<i>Ps. Cepacia</i>) ตรึงรูปที่เตรียมจากMTMS ที่ $r = 8$	48
3.15 วิธีการนำไลเปสที่บรรจุใน MBGs ไปใช้งานในการสังเคราะห์ในคอลัมน์และการสังเคราะห์แบบกะ	49
3.16 อิทธิพลของความเข้มข้นของเจลาตินต่อแอกทิวิตีของไลเปสตรึงรูปใน MBGs.....	51
3.17 อิทธิพลของค่า W_0 ต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาเริ่มต้นในการสังเคราะห์ออกทิลเดคานอเอทด้วยไลเปสตรึงรูปใน MBGs.....	53
4.1 เครื่องปฏิกรณ์แบบดังกวน.....	59
5.1 ระบบของการสังเคราะห์ซิลิกา-เจลาตินนาโนคอมโพสิตภายหลังจากการเกิดปฏิกิริยาของสารละลายน้ำ (น้ำบริสุทธิ์, กรดไฮโดรคลอริก 0.1 โมลาร์และแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ 1 โมลาร์) กับ TEOS.....	64
5.2 ภาพถ่ายด้วยเทคนิค SEM ของวัสดุซิลิกา-เจลาตินนาโนคอมโพสิตใน (ก)ภาวะที่ไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยา (ข) ภาวะกรด (ค) ภาวะเบส.....	66
5.3 สเปกตรัม MAS ²⁹ SiNMR ของวัสดุซิลิกา-เจลาตินนาโนคอมโพสิต ระบบ AOT/ไอโซออกเทน,เจลาติน 1.7%โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ที่ $r=4$ (ก) น้ำบริสุทธิ์ (ข) กรดไฮโดรคลอริก 0.1 โมลาร์ (ค) สารละลายแอมโมเนีย 1.0 โมลาร์.....	70
5.4 เปรียบเทียบภาพจาก SEM ของซิลิกา-เจลาตินนาโนคอมโพสิตระหว่าง TEOSและTMOS	72
5.5 ผลของค่า r ต่อระบบของซิลิกา-เจลาตินนาโนคอมโพสิต.....	74
5.6 ภาพถ่ายด้วยเทคนิค SEM ของวัสดุซิลิกา-เจลาตินนาโนคอมโพสิต ระบบ AOT/ไอโซออกเทน ,เจลาติน 1.7%โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ที่ r ในช่วง 2-20.....	76
5.7 สเปกตรัม MAS ²⁹ SiNMR ของวัสดุซิลิกา-เจลาตินนาโนคอมโพสิต ระบบ AOT/ไอโซออกเทน ,เจลาติน 1.7%โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ที่ r ในช่วง 2-20.....	79
5.8 ผลของปริมาณเจลาตินต่อระบบของซิลิกา-เจลาตินนาโนคอมโพสิต.....	83

รูปที่	หน้า
5.9 ภาพถ่ายด้วยเทคนิค SEM ของวัสดุซิลิกา-เจลลาตินนาโนคอมโพสิตเปรียบเทียบที่ปริมาณ เจลลาตินต่างๆ.....	84
5.10 ภาพถ่ายด้วยเทคนิค SEM ของวัสดุซิลิกา-เจลลาตินนาโนคอมโพสิต เจลลาติน 8 % เปรียบเทียบวัสดุเมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 2 ชนิด.....	88
5.11 ภาพถ่ายด้วยเทคนิค SEM ของวัสดุซิลิกา-เจลลาตินนาโนคอมโพสิต เจลลาติน 14 % เปรียบเทียบวัสดุเมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 2 ชนิด.....	90
5.12 ภาพถ่ายด้วยเทคนิค SEM ของวัสดุซิลิกา-เจลลาตินนาโนคอมโพสิต เจลลาติน 8 % ภายหลังการเผาและไม่มีเจลลาติน.....	94
5.13 ภาพถ่ายด้วยเทคนิค SEM ของวัสดุซิลิกา-เจลลาตินนาโนคอมโพสิต เจลลาติน 14 % ภายหลังการเผา.....	96
5.14 แบบจำลองซิลิกา-เจลลาตินนาโนคอมโพสิตที่คาดว่าเอนไซม์จะถูกตรึงอยู่.....	98
5.15 เส้นทางการเคลื่อนที่ของสารตั้งต้นเพื่อเข้าทำปฏิกิริยากับเอนไซม์ตรึงรูป.....	99
5.16 การเปรียบเทียบการเร่งปฏิกิริยาด้วยเอนไซม์อิสระและเอนไซม์ตรึงรูปที่ 0 วัน.....	102
5.17 ทดสอบความสามารถในการกักเก็บเอนไซม์ตรึงรูปที่ 0 วัน.....	102
5.18 การเร่งปฏิกิริยาด้วยเอนไซม์ตรึงรูปและเอนไซม์อิสระเมื่อเก็บไว้ 15 วัน.....	104
5.19 การทดสอบความสามารถในการกักเก็บเอนไซม์ตรึงรูปที่ 15 วัน.....	105
5.20 การเร่งปฏิกิริยาด้วยเอนไซม์ตรึงรูปและเอนไซม์อิสระเมื่อเก็บไว้ 35 วัน.....	106
5.21 การทดสอบความสามารถในการกักเก็บเอนไซม์ตรึงรูปที่ 35 วัน.....	107
5.22 การเปรียบเทียบการเร่งปฏิกิริยาด้วยเอนไซม์ตรึงรูปและเอนไซม์อิสระ.....	108
ข ภาพถ่ายด้วยเทคนิค SEM ของวัสดุซิลิกา-เจลลาตินนาโนคอมโพสิตใน (ข1) ภาวะที่ ไม่มีตัวเร่ง (ข2) ภาวะกรด (ข3) ภาวะเบส (ข4) MBGs.....	125
ค1 ค่ามาตรฐานของแมนทิลอะซีเตตจากการวิเคราะห์ด้วยแก๊ส-โครมาโตกราฟี.....	129
ค2 ผลการวิเคราะห์พื้นที่ผิวของวัสดุซิลิกา-เจลลาตินนาโนคอมโพสิตด้วยเทคนิค BET.....	130