การเรโซลูชั่นของเมนทอลเรซิมิกด้วยเอนไซม์ไลเปสตรึงรูปบนเรซินแลกเปลี่ยนไอออน

นาย อดิสรณ์ มะซอ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี
บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2541

ISBN 974-331-994-8

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

I19901609

RESOLUTION OF RACEMIC MENTHOL BY IMMOBILIZED LIPASE ON ION-EXCHANGE RESINS

Mr. Adisorn Masaw

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 974-331-994-8

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การเรโซลูชั่นของเมนทอลเรซิมิกด้วยเอนไซม์ไลเปสตรึงรูปบนเรซินแลกเปลี่ยนไอออน
โดย	นาย อดิสรณ์ มะชอ
ภาควิชา	วิศวกรรมเคมี
อาจารย์ที่ปรึกษา	อาจารย์ ดร. สีรุ้ง ปรีชานนท์

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

.....คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย
(ศาสตราจารย์ นายแพทย์ ศุภวัฒน์ ชุติวงศ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. เกริกชัย สุกาญจนัจที)

.....อาจารย์ที่ปรึกษา
(อาจารย์ ดร. สีรุ้ง ปรีชานนท์)

.....กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. จิรกานต์ เมืองนาโพธิ์)

.....กรรมการ
(อาจารย์ ดร. เดชา ฉัตรศิริเวช)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

พิมพ์ต้นฉบับบทคัดย่อวิทยานิพนธ์ภายในกรอบสีเขียวนี้เพียงแผ่นเดียว

อดิสรณ์ มะขอ : การเรโซลูชั่นของเมนทอลเรซิมิกด้วยเอนไซม์ไลเปสตรึงรูปบนเรซินแลกเปลี่ยนไอออน (RESOLUTION OF RACEMIC MENTHOL BY IMMOBLIZED LIPASE ON ION-EXCHANGE RESINS) อ. ที่ปรึกษา: อ.ดร. สีรุ้ง ปรีชานนท์, 121 หน้า. ISBN 974-331-994-8.

วัตถุประสงค์สูงสุดของโครงการวิจัยนี้แบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอนคือ หนึ่ง ศึกษาปัจจัยที่เหมาะสมในการตรึงรูปเอนไซม์ไลเปสจาก Candida cylindracea บนเรซินแลกเปลี่ยนไอออน เพื่อใช้เป็นตัวเร่งในปฏิกิริยาทรานเอสเทอริฟิเคชั่นของเรซิมิกเมนทอลและเฮกซิลอะซิเตตเป็นปฏิกิริยาต้นแบบ สอง ศึกษาหาค่าตัวแปรทางจลนพลศาสตร์ของเอนไซม์ตรึงรูป และ สาม ศึกษาถึงผลกระทบของอัตราการไหลในการป้อนสับเสตรทเข้าสู่หอปฏิกรณ์แบบแพคเบด ดังนั้นการทดลองจึงถูกแบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอนคือหนึ่ง การหาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการตรึงเอนไซม์ พบว่าสภาวะที่เหมาะสมคือ เวลาที่ใช้ในการตรึงรูปเท่ากับ 5 ชั่วโมง, ความเข้มข้นของเอนไซม์ ไลเปสเริ่มต้นในสารละลายบัฟเฟอร์เท่ากับ 15 กรัมต่อลิตร และค่าความเป็นกรด – ด่าง เท่ากับ 7.0 สอง การหาตัวแปรทางจลนพลศาสตร์ของเอนไซม์ตรึงรูป พบว่ากลไกการเกิดปฏิกิริยาเป็นกลไกแบบปิงปอง ไบ-ไบ ซึ่งสามารถคำนวณค่าตัวแปรทางจลนพลศาสตร์ได้คือ V_{max} = 83.33 $\mu mol.hr^{-1}g\text{-}enz^{-1}$, k_A = 85.58 mM , k_B = 480 mM ซึ่งสามารถเขียนเป็นสมการอัตราการเกิดปฏิกิริยาได้ดังนี้

$$V = \frac{83.33\,[A]\,[B]}{480[A]+85.58[B]+[A]\,[B]}$$

และสาม การหาอัตราการไหลที่เหมาะสมในการป้อนสับเสตรทเข้าสู่หอปฏิกรณ์แบบแพคเบด และเสถียรภาพในการทำงานของเอนไซม์ตรึงรูป พบว่าอัตราการไหลเวียนที่เหมาะสมคือ 70 มิลลิลิตรต่อนาที และเอนไซม์ตรึงรูปมีเสถียรภาพที่ดีโดยสูญเสียอัตราการเกิดปฏิกิริยาจำเพาะเพียงร้อยละ 24 หลังจากเร่งปฏิกิริยาอย่างต่อเนื่องในหอปฏิกรณ์แบบแพคเบดเป็นเวลา 10 วันโดยมีค่าครึ่งชีวิตเท่ากับ 25 วัน

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา วิศวกรรมเคมี ลายมือชื่อนิสิต อดิสรณ์ มะขอ

สาขาวิชา วิศวกรรมเคมี ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา

ปีการศึกษา 2541 ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

พิมพ์ต้นฉบับบทคัดย่อวิทยานิพนธ์ภายในกรอบสีเขียวนี้เพียงแผ่นเดียว

3972328421 : MAJOR CHEMICAL ENGINEERING DEPARTMENT
KEY WORD: RACEMIC MENTHOL / IMMOBILIZED ENZYME / ION ENCHANGE RESINS
ADISORN MASAW : RESOLUTION OF RACEMIC MENTHOL BY IMMOBLIZED LIPASE ON-EXCHANGE RESINS.THESIS ADVISOR:DR. SEERONG PRICHANONT , Ph.D.121 pp .ISBN 974-331-994-8

The ultimate aim of this research project were divided into three parts. The first part concentrated on appropriate condition for fixing immobilized lipase from Candida cylindracea on ion-exchange resins. Immobilized enzyme catalysted reaction for the transesterification of racemic menthol with hexyl acetate was, therefore, used as a model reaction. The second part investigated the kinetic reaction parameters for immobilized enzyme. The effects of substrate flow rate to packed bed reactor and operation stability of immobilized enzyme were studied in the final part. The experiments were as a result , divided into three parts. The first part was to find appropriate conditions for enzyme immobilization . It was found that appropriate conditions time for immobilization were 5 hrs ,concentration of lipase in buffer solution were 15 g/l and pH 7.0. The second part, the reaction mechanism was found to follow Ping Pong bi-bi type. The kinetic reaction parameters were V_{max} = 83.33 $\mu mol.hr^{-1}g\text{-}enz^{-1}$, k_A = 85.58 mM , k_B = 480 mM. When the reaction could be demonstrated as

$$V = \frac{83.33\,[A]\,[B]}{480\,[A] + 85.58\,[B] + [A]\,[B]}$$

In the final part it was found that the effective flow rate of substrate to packed bed was 70 ml/min . The operation stability of immobilized enzyme appeared to be very good., ie. loss of specific rate was only 24% after 10 days of operation , and the immobilized enzyme half life found was 25 days.

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา วิศวกรรมเคมี ลายมือชื่อนิสิต .....

สาขาวิชา วิศวกรรมเคมี ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา .....

ปีการศึกษา 2541 ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม .....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความช่วยเหลืออย่างดียิ่งจากหลายๆ ท่าน ผู้วิจัยขอขอบพระคุณอย่างสูงสำหรับ อาจารย์ ดร. สีรุ้ง ปรีชานนท์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้ซึ่งให้ความรู้ คำแนะนำ คำปรึกษาและตรวจทานแก้ไขวิทยานิพนธ์จนเสร็จสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. เกริกชัย สุกาญจนัจที ประธานกรรมการ รองศาสตราจารย์ ดร. จิรกานต์ เมืองนาโพธ์ และอาจารย์ ดร. เดชา ฉัตรศิริเวช กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่ได้ให้ความสนใจและให้ข้อคิดเห็นที่เป็นประโยชน์อย่างดียิ่งต่องานวิจัย

เนื่องจากทุนการวิจัยครั้งนี้บางส่วนได้รับมาจากทุนอุดหนุนการวิจัยของบัณฑิตวิทยาลัย จึงขอขอบคุณมา ณ ที่นี้ด้วย

ขอขอบคุณ คุณสุณี, คุณสุนันท์,คุณนันทนา จากศูนย์เครื่องมือวิเคราะห์ ที่ให้ความกรุณาในการให้คำปรึกษาและการใช้เครื่องมือวิเคราะห์เกี่ยวกับการทำวิจัยครั้งนี้

ขอบคุณ คุณจิตติวุฒิที่ให้คำแนะนำที่ดี ขอบคุณ พี่ๆ เพื่อนๆ น้องๆ ห้องวิจัยวิศวกรรมชีวเคมี ที่ให้กำลังใจและความรู้สึกที่ดีตลอดมา

ขอเอกองค์อัลลอฮ์ (ซบ) ทรงตอบแทนความดีแด่ คุณพ่อสมานและคุณแม่มาเรียม ตลอดจนทุกคนในครอบครัว รวมทั้งพี่น้องมุสลิมทุกท่านที่เป็นกำลังใจและช่วยเหลือให้ผู้เขียนได้ทำการศึกษาสำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี

ท้ายสุดนี้ผู้เขียนหวังเป็นอย่างยิ่งว่าวิทยานิพนธ์นี้คงมีประโยชน์บ้างไม่มากก็น้อย สำหรับผู้มีความสนใจเกี่ยวกับการเรโซลูชั่นเมนทอลเรซิมิกเมนทอล หากมีสิ่งขาดตกบกพร่องประการใดในวิทยานิพนธ์นี้ผู้เขียนขออภัยเป็นอย่างสูงในขอบกพร่องและความผิดผลาดนั้น

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย..... ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ..... จ
กิตติกรรมประกาศ..... ฉ
สารบัญ..... ช
สารบัญตาราง..... ฌ
สารบัญรูป..... ญ
สัญลักษณ์..... ฐ
บทที่
1. บทนำ..... 1
1.1 จุดประสงค์ของการวิจัย..... 3
1.2 ขอบเขตงานวิจัย..... 3
2. ตรวจเอกสาร..... 5
2.1 บทนำ..... 5
2.2 ลักษณะของไลเปส..... 5
2.3 การตรึงเอนไซม์..... 16
2.4 ถังปฏิกรณ์แบบแพคเบด..... 20
2.5 ปฏิกิริยาการแยกเมนทอลเรซิมิกโดยใช้เอนไซม์ไลเปส..... 21
3. ทฤษฎี..... 24
3.1 บทนำ..... 24
3.2 เอนไซม์ตรึงรูป..... 24
3.3 ตัวพยุงสำหรับตรึงเอนไซม์..... 24
3.4 วิธีการตรึงเอนไซม์..... 29
3.5 จลนพลศาสตร์ของเอนไซม์..... 35
3.6 ปัจจัยที่มีอิทธิผลต่อการเร่งปฏิกิริยาของเอนไซม์ตรึงรูป..... 42

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.7 ผลกระทบการถ่ายเทมวลสาร..... 44
3.8 เครื่องปฏิกรณ์แบบแพคเบด..... 48
4. อุปกรณ์และวิธีดำเนินงานวิจัย..... 50
4.1 เคมีภัณฑ์..... 50
4.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง..... 50
4.3 วิธีการทดลอง..... 52
4.4 การศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการตรึงรูปเอนไซม์ไลเปส
บนเรซินแลกเปลี่ยนไอออน..... 53
4.5 การศึกษาทางจลนพลศาตร์ของเอนไซม์ไลเปสตรึงรูป..... 54
4.6 การศึกษาการเรโซลูชั่นเมนทอลเรซิมิกในหอปฏิกรณ์แบบแพคเบด..... 55
4.4 การวิเคราะห์..... 57
5. ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง..... 59
5.1 สภาวะที่เหมาะสมในการตรึงรูปเอนไซม์..... 59
5.2 การศึกษาทางจลนพลศาสตร์ของเอนไซม์ตรึงรูป..... 67
5.3 การศึกษาการทำปฏิกิริยาในหอปฏิกรณ์แบบแพคเบด..... 83
6. สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ..... 95
6.1 สรุปผลการทดลอง..... 95
6.2 ข้อเสนอแนะ..... 96
รายการอ้างอิง..... 97
ภาคผนวก..... 101
ภาคผนวก ก..... 102
ภาคผนวก ข..... 105
ภาคผนวก ค..... 111
ภาคผนวก ง..... 115
ประวัติผู้แต่ง..... 121

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	ชนิดของเอนไซม์ไลเปสต่อค่ากิจกรรมในการเร่งปฏิกิริยา.....	10
2.2	ผลของปริมาณน้ำที่เหมาะสมในระบบต่อปฏิกิริยาที่มีเอนไซม์ไลเปสเป็นตัวเร่ง.....	12
2.3	ผลของชนิดตัวทำละลายอินทรีย์ต่อค่ากิจกรรมของเอนไซม์.....	14
2.4	วิธีการตรึงรูปและแอคติวิตีของเอนไซม์ตรึงรูป.....	16
2.5	ข้อเปรียบเทียบของเอนไซม์ที่ตรึงรูปด้วยเทคนิคต่าง ๆ.....	19
3.1	เปรียบเทียบข้อดีและข้อบกพร่องของตัวพยุงที่ไม่มีรูพรุนและมีรูพรุน.....	26
3.2	การจัดประเภทของตัวพยุงโดยใช้สมบัติทางเคมี.....	28
3.3	ตัวพยุงที่แลกเปลี่ยนประจุสำหรับตรึงเอนไซม์.....	30
5.1	ปริมาณเอนไซม์ที่เกาะติดบนตัวพยุงหลังการตรึงรูป.....	59
5.2	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลที่ความเร็วรอบในการกวนต่างๆ.....	69
5.3	เปรียบเทียบค่าคงที่จลนพลศาสตร์ของงานวิจัยนี้กับงานวิจัยอื่น ๆ ที่ใกล้เคียง.....	81
5.4	ค่า Effectiveness factor และ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวล ที่อัตราการไหล 40 – 70 มิลลิลิตรต่อนาที	84
5.5	เสถียรภาพในการทำงาน (operation stability) ของเอนไซม์ตรึงรูป.....	89
ก 1	ค่ามาตรฐานของการดูดกลืนแสงของไลเปสที่ความเข้มข้นต่างๆกัน.....	103
ก 2	ค่ามาตรฐานของเมนทิลอะซิเตตจากการวิเคราะห์ด้วยแกสโครมาโตกราฟี...	104

สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
3.1	ลักษณะของเอนไซม์ที่ตรึงรูปด้วยวิธีต่าง ๆ.....	34
3.2	ผลของความเข้มข้นของสับเสตรทและอัตราการเกิดปฏิกิริยาเริ่มต้น.....	36
3.3	เส้นทางการเคลื่อนที่ของสับเสตรทเพื่อเข้าทำปฏิกิริยากับเอนไซม์ตรึงรูป.....	44
3.4	แสดงการถ่ายเทมวลสารภายนอก.....	45
3.5	เครื่องปฏิกรณ์แบบแพคเบดสำหรับเอนไซม์ตรึงรูป.....	48
4.1	แสดงภาพถ่ายลักษณะรูปร่างของเรซินแลกเปลี่ยนประจุลบ Dowex MWA-1.....	51
4.2	แสดงภาพถ่ายการตรึงเอนไซม์โดยทำการกวนในเครื่องกวนแบบแม่เหล็ก (magnetic stirrer).....	51
4.3	แสดงภาพถ่ายของหอปฏิกรณ์แบบแพคเบด ที่บรรจุเรซินที่ตรึงรูปด้วยเอนไซม์ไลเปสจาก Candida cylindracea ในระหว่างกระบวนการทำปฏิกิริยา.....	56
4.4	แผนภาพแสดงส่วนประกอบของหอปฏิกรณ์แบบแพคเบด และทิศทางการไหลของสารละลายสับเสตรท.....	56
5.1	ผลของเวลาที่ใช้ในการตรึงรูป.....	61
5.2	ผลความเข้มข้นเริ่มต้นของเอนไซม์ไลเปสจาก Candida cylindracea ในสารละลายบัฟเฟอร์.....	63
5.3	ผลของค่าความเป็นกรด-ด่างที่ใช้ในการตรึงรูปเอนไซม์.....	66
5.4	ผลของความเร็วรอบในการกวนต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาจำเพาะของเอนไซม์ตรึงรูป.....	68
5.5	ผลของความเข้มข้นของเรซิมิกเมนทอลและเฮกซิลอะซิเตตต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยา.....	70

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
5.6	กราฟส่วนกลับความเร็วเริ่มต้นของการเกิดปฏิกิริยากับความเข้มข้นของเรซิมิกเมนทอล (Line – weaver Burk)	71
5.7	กราฟส่วนกลับความเร็วเริ่มต้นของการเกิดปฏิกิริยากับความเข้มข้นของเรซิมิกเมนทอล (Line – weaver Burk)	72
5.8	กราฟส่วนกลับอัตรการเกิดปฏิกิริยาจำเพาะกับความเข้มข้นของเรซิมิกเมนทอล (Line – weaver Burk)	75
5.9	กราฟระหว่างจุดตัดแกน Y กับส่วนกลับความเข้มข้นของเฮกซิลอะซิเตต	76
5.10	กราฟส่วนกลับระหว่างอตราการเกิดปฏิกิริยาจำเพาะกับส่วนกลับความเข้มข้นเฮกซิลอะซิเตต	78
5.11	กราฟจุดตัดแกน Y กับส่วนกลับความเข้มข้นเฮกซิลอะซิเตต	79
5.12	ผลของอัตราการไหลในการป้อรสารละลายสับเสตรทเข้าสู่หอปฏิกรณ์แบบแพคเบดต่ออัตรการเกิดปฏิกิริยาจำเพาะ	85
5.13	ผลการทำปฏิกิริยาของสารตัวอย่างที่ผ่านหอปฏิกรณ์แบบแพคเบดที่อัตราการไหล 40 มิลลิลิตรต่อนาที	86
5.14	ผลการทำปฏิกิริยาของสารตัวอย่างที่ผ่านหอปฏิกรณ์แบบแพคเบดที่อัตราการไหล 70 มิลลิลิตรต่อนาที	86
5.15	ผลการทำปฏิกิริยาของสารตัวอย่างที่ผ่านหอปฏิกรณ์แบบแพคเบดที่อัตราการไหล 100 มิลลิลิตรต่อนาที	87
5.16	ผลการทำปฏิกิริยาของสารตัวอย่างที่ผ่านหอปฏิกรณ์แบบแพคเบดที่อัตราการไหล 130 มิลลิลิตรต่อนาที	87
5.17	เสถียรภาพของเอนไซม์ตรึงรูป	90
5.18	ผลการทำปฏิกิริยาของสารตัวอย่างที่ผ่านหอปฏิกรณ์แบบแพคเบดที่อัตราการไหล 70 มิลลิลิตรต่อนาทีเมื่อเริ่มทำปฏิกิริยา	92

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
5.19	ผลการทำปฏิกิริยาของสารตัวอย่างที่ผ่านหอปฏิกรณ์แบบแพคเบดที่อัตราการไหล 70 มิลลิลิตรต่อนาทีเมื่อทำปฏิกิริยาผ่านไปเป็นเวลา 2วัน	92
5.20	ผลการทำปฏิกิริยาของสารตัวอย่างที่ผ่านหอปฏิกรณ์แบบแพคเบดที่อัตราการไหล 70 มิลลิลิตรต่อนาทีเมื่อทำปฏิกิริยาผ่านไปเป็นเวลา 4 วัน	93
5.21	ผลการทำปฏิกิริยาของสารตัวอย่างที่ผ่านหอปฏิกรณ์แบบแพคเบดที่อัตราการไหล 70 มิลลิลิตรต่อนาทีเมื่อทำปฏิกิริยาผ่านไปเป็นเวลา 6วัน	93
5.22	ผลการทำปฏิกิริยาของสารตัวอย่างที่ผ่านหอปฏิกรณ์แบบแพคเบดที่อัตราการไหล 70 มิลลิลิตรต่อนาทีเมื่อทำปฏิกิริยาผ่านไปเป็นเวลา 8วัน	94
5.23	ผลการทำปฏิกิริยาของสารตัวอย่างที่ผ่านหอปฏิกรณ์แบบแพคเบดที่อัตราการไหล 70 มิลลิลิตรต่อนาทีเมื่อทำปฏิกิริยาผ่านไปเป็นเวลา 10วัน	94
ก 1	ค่ามาตรฐานของการดูดซับแสงของไลเปสที่ความเข้มข้นต่างๆ	103
ก 2	ค่ามาตรฐานของเมนทิลอะซิเตตจากการวิเคราะห์ด้วย แกสโครมาโตกราฟี	104
ค 1	พื้นที่ผิวของเรซินโดยการทำScanning Electron Microscopeกำลังขยาย 10,000 เท่า	112
ค 2	พื้นที่ผิวของเรซินที่ถูกตรึงรูปด้วยเอนไซม์ไลเปสจากCandida cylindracea ที่สภาวะที่เหมาะสมโดยการทำScanning Electron Microscopeกำลังขยาย 15,000 เท่า	113
ค 3	เอนไซม์ไลเปสจากCandida cylindraceaที่สภาวะที่เหมาะสมโดยการทำ Scanning Electron Microscope กำลังขยาย 15,000 เท่า	114

สัญลักษณ์

A แทน สับเสตรทตัวที่ 1

B แทน สับเสตรทตัวที่ 2

C_{sb} แทน ความเข้มข้นของสับเสตรทภายนอก(mol)

C_s แทน ความเข้มข้นของสับเสตรทที่ผิวของตัวพยุง (mol)

D_{AB} แทน สัมประสิทธิ์การแพร่ของสาร A ในตัวทำละลาย B

E แทน เอนไซม์

E_0 แทน แอคติวิตีของเอนไซม์เริ่มต้น

E_θ แทน แอคติวิตีของเอนไซม์หลังทำปฏิกิริยาเป็นเวลา θ

F แทน เอนไซม์ในอีกหนึ่งรูปแบบ

J_D แทน อัตราการถ่ายเทมวล

K_m แทน ค่าคงที่มิเคลิส-เมนเทน

M_B แทน น้ำหนักโมเลกุลของสาร B (kg mass. Kg mol^{-1})

N_s แทน อัตราการถ่ายเทมวลสาร ($mol.s^{-1}m^{-3}$)

N_{Da} แทน Damkohler number

P แทน ผลิตภัณฑ์ตัวที่ 1

Q แทน ผลิตภัณฑ์ตัวที่ 2

Re แทน Renold number

S แทน สับเสตรท

Sc แทน Schmidt number

Sh แทน Sherwood number

T แทน อุณหภูมิสัมบูรณ์ (K)

U แทน ความเร็วของๆไหล ($m.s^{-1}$)

V_A แทน ปริมาตรเชิงโมลของ (m^3. kg mol^{-1})

V_{max} แทน ความเร็วสูงสุดของงปฏิกิริยา

EA แทน สารประกอบเชิงซ้อนของเอนไซม์กับสาร A

EB แทน สารประกอบเชิงซ้อนของเอนไซม์กับสาร B

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สัญลักษณ์ (ต่อ)

EQ แทน สารประกอบเชิงซ้อนของเอนไซม์กับสาร Q

ES แทน สารประกอบเชิงซ้อนของเอนไซม์กับสับเสตรท

FQ แทน สารประกอบเชิงซ้อนของเอนไซม์กับสาร Q

EAB แทน สารประกอบเชิงซ้อนของเอนไซม์กับสาร A และ สาร B

EPQ แทน สารประกอบเชิงซ้อนของเอนไซม์กับสาร P และสาร Q

a แทน พื้นที่ผิวการถ่ายเทมวลสารต่อปริมาตรของสารละลาย (m^{-1})

d แทน เส้นผ่านศูนย์กลางของหอปฏิกรณ์แบบแพคเบด (m)

d_p แทน เส้นผ่านศูนย์กลางวัตถุทรงกลม (m)

k_1 แทน ค่าคงที่การแตกตัวของปฏิกิริยา $E + S \longrightarrow ES$

k_{-1} แทน ค่าคงที่การเกิดปฏิกิริยา $ES \longrightarrow E + S$

k_2 แทน ค่าคงที่การเกิดปฏิกิริยา $ES \longrightarrow E + P$

k_A แทน ค่าคงที่การแตกตัวของปฏิกิริยา $E + A \longrightarrow EA$

k_B แทน ค่าคงที่การแตกตัวของปฏิกิริยา $E + B \longrightarrow EB$

k_c แทน สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวล ($m.s^{-1}$)

k_d แทน ค่าคงที่ของการสลายแอคติวิตีของเอนไซม์

$t_{1/2}$ แทน ค่าครึ่งชีวิต

η แทน effectiveness factor

θ แทน เวลาในการเกิดปฏิกิริยา

φ แทน ตัวแปร assoication ของตัวทำละลาย

μ_B แทน ความหนืดของสารB (Pa.s)

ν แทน kinematic viscosity ($m^2.s^{-1}$)

ρ แทน ความหนาแน่น ($kg . m^{-3}$)

ε แทน สัดส่วนช่องว่าง (void fraction)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย