การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการถ่ายโอนปุ๋ยยูเรีย ผ่านชั้นเคลือบยางธรรมชาติ

นางสาวกันต์กนิษฐ์ ธนศิริวัฒนา

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี
บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2540

ISBN 974-638-728-6

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

T17956692

MATHEMATICAL MODELING OF UREA FERTILIZER TRANSPORT THROUGH A NATURAL RUBBER COAT

Miss Kankanit Tanasiriwatana

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of Requirements

for the Degree of Master of Engineering in Chemical Engineering

Department of Chemical Engineering

Graduate School

Chulalongkorn University

Academic Year 1997

ISBN 974-638-728-6

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการถ่ายโอนปุ๋ยยูเรียผ่านชั้นเคลือบยางธรรมชาติ
โดย	นางสาวกันต์กนิษฐ์ ธนศิริวัฒนา
ภาควิชา	วิศวกรรมเคมี
อาจารย์ที่ปรึกษา	อาจารย์ ดร. วรัญ แต้ไพสิฐพงษ์

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

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

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(ศาสตราจารย์ ดร. วิวัฒน์ ตัณฑะพานิชกุล)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(อาจารย์ ดร. วรัญ แต้ไพสิฐพงษ์)

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

..... กรรมการ
(อาจารย์ ณัฐพร โทณานนท์)

พิมพ์ต้นฉบับบทคัดย่อวิทยานิพนธ์ภายในกรอบสีเขียวนี้เพียงแผ่นเดียว

กันต์กนิษฐ์ ธนศิริวัฒนา : การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการถ่ายโอนปุ๋ยยูเรียผ่านชั้นเคลือบยางธรรมชาติ (MATHEMATICAL MODELING OF UREA FERTILIZER TRANSPORT THROUGH A NATURAL RUBBER COAT) อ. ที่ปรึกษา : ดร. วรัญ แต้ไพสิฐพงษ์ ; 150 หน้า. ISBN 974-638-728-6.

กระบวนการถ่ายโอนปุ๋ยยูเรียผ่านชั้นเคลือบยางธรรมชาติจากไมโครแคปซูลแบบเซลล์และคอร์ของปุ๋ยยูเรียที่ถูกเคลือบด้วยยางธรรมชาติ ได้ถูกจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยกระบวนการแพร่ตามกฎข้อที่สองของฟิก โปรแกรมคอมพิวเตอร์ภาษาซีได้ถูกเขียนขึ้นเพื่อคำนวณแบบจำลองด้วยวิธีเชิงตัวเลขโดยใช้วิธี explicit finite difference method ปริมาณการปลดปล่อยสะสมของปุ๋ยยูเรียที่คำนวณได้จากแบบจำลองถูกเปรียบเทียบกับผลการทดลองที่รวบรวมได้ในเอกสารอ้างอิง นอกจากนั้นยังได้ศึกษาถึงผลกระทบของค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ ความหนาของชั้นเคลือบและขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของเม็ดยูเรียต่ออัตราการปลดปล่อยปุ๋ยยูเรียออกจากไมโครแคปซูล

จากการวิจัยพบว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการแพร่ผ่านของปุ๋ยยูเรียผ่านชั้นเคลือบยางที่ได้พัฒนาขึ้นสามารถทำนายปริมาณการปลดปล่อยสะสมของปุ๋ยยูเรียได้สอดคล้องกับผลการทดลอง ถ้าค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ถูกเพิ่มขึ้น จะทำให้ฟลักซ์ยูเรียที่ถูกปลดปล่อยเพิ่มขึ้นด้วย แต่อายุการใช้ปุ๋ยสั้นลง ถ้าความหนาของชั้นเคลือบถูกเพิ่มขึ้น จะทำให้ฟลักซ์ยูเรียที่ถูกปลดปล่อยลดลง แต่อายุการใช้ปุ๋ยยาวนานขึ้น ส่วนขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของเม็ดยูเรียไม่มีผลต่อฟลักซ์ยูเรียที่ถูกปลดปล่อยในช่วงแรก แต่จะทำให้อายุการใช้ปุ๋ยยาวนานขึ้น

ภาควิชา	วิศวกรรมเคมี	**ลายมือชื่อนิสิต**	กันต์กนิษฐ์ ธนศิริวัฒนา
สาขาวิชา	วิศวกรรมเคมี	**ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา**	
ปีการศึกษา	2540	**ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม**	

พิมพ์ต้นฉบับบทคัดย่อวิทยานิพนธ์ภายในกรอบสีเขียวนี้เพียงแผ่นเดียว

C716983 : MAJOR CHEMICAL ENGINEERING
KEY WORD:
MATHEMATICAL MODEL / CONTROLLED RELEASE / UREA FERTILIZER / NATURAL RUBBER / MICROCAPSULE

KANKANIT TANASIRIWATANA : MATHEMATICAL MODELING OF UREA FERTILIZER TRANSPORT THROUGH A NATURAL RUBBER COAT. THESIS ADVISOR ; VARUN TAEPISITPONG,Ph.D. 150 pp. ISBN 974-638-728-6.

The transport process of urea fertilizer through its rubber coat from the shell and core type microcapsule of rubber coated urea fertilizer was mathematically modelled by Fick's second law of diffusion. The computer program in C language was written to solve the model numerically using the explicit finite difference method. The accumulative released amount of urea fertilizer as obtained from the model were compared with experimental works available in the journals. Additionally, the effects of diffusion coefficient, the thickness of the rubber coat and the diameter of urea core on the release rate of urea fertilizer from the microcapsule were studied.

It was found that the developed mathematical model of diffusion of urea fertilizer through its rubber coat could predict the accumulative released amount of urea fertilizer in good agreement with the experimental works. Additionally, if the diffusion coefficient was increased, the urea flux was also increased but the urea fertilizer usage time was decreased. If the thickness of rubber coat was increased, the urea flux was decreased but the urea fertilizer usage time was increased. However, the diameter of urea core had no effect on the initial urea flux but the urea fertilizer usage time was increased.

ภาควิชา วิศวกรรมเคมี	ลายมือชื่อนิสิต กันต์กนิษฐ์ ธนศิริวัฒนา
สาขาวิชา วิศวกรรมเคมี	ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา
ปีการศึกษา 2540	ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความช่วยเหลือจากหลาย ๆ ท่าน ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ อาจารย์ ดร. วรัญ แต้ไพสิฐพงษ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ เป็นอย่างสูงที่ได้ให้คำปรึกษาและกำลังใจ ในการศึกษาและพัฒนางานวิจัย ตลอดจนตรวจทานแก้ไขวิทยานิพนธ์ จนเสร็จสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณ ศาสตราจารย์ ดร. วิวัฒน์ ตัณฑะพานิชกุล ประธานกรรมการ อาจารย์ ดร.เดชา ฉัตรศิริเวช และอาจารย์ ณัฐพร โทณานนท์ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ซึ่งได้เสนอข้อคิดเห็นที่เป็นประโยชน์ และแก้ไขเพิ่มเติมส่วนที่บกพร่องของงานวิจัยนี้

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วิจิตรา จงวิศาล ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ธราธร มงคลศรี และอาจารย์ ดร. เดชา ฉัตรศิริเวช สำหรับกำลังใจที่ผู้วิจัยได้รับตลอดการศึกษาที่ภาควิชาวิศวกรรมเคมี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

เนื่องจากงานวิจัยครั้งนี้ ได้รับการสนับสนุนเงินจากหน่วยงาน 3 แห่ง คือ บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ภาควิชาวิศวกรรมเคมี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และทุนโครงการผลิตและพัฒนาอาจารย์ (UDC) ทบวงมหาวิทยาลัย ผู้วิจัยขอขอบพระคุณมา ณ ที่นี้ด้วย

สำหรับความสำเร็จของงานวิจัยครั้งนี้ผู้วิจัยขอมอบแด่ พ่อและแม่ ผู้ให้ทุกสิ่งทุกอย่างเพื่อชีวิตที่ดีงาม และเป็นแรงบันดาลใจในการศึกษา ณ สถาบันแห่งนี้ ตลอดจนพี่ ๆ ทุกคนที่เป็นกำลังใจอย่างดีเยี่ยมเสมอมา

งานวิจัยชิ้นนี้คงไม่สามารถสำเร็จได้เลย ถ้าปราศจาก เพื่อน ๆ ที่คอยให้กำลังใจ ให้ความช่วยเหลืออย่างเต็มที่ โดยเฉพาะเพื่อน ๆ เลือดแดงขาว ที่ทุ่มเทแรงกาย แรงใจ ให้คำปรึกษา และคำแนะนำต่าง ๆ ที่เป็นประโยชน์ จนทำให้ผู้วิจัยทำงานชิ้นนี้ได้ลุล่วงไปด้วยดี

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย..... ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ..... จ
กิตติกรรมประกาศ..... ฉ
สารบัญ..... ช
สารบัญตาราง..... ญ
สารบัญรูป..... ฐ
บทที่
1 บทนำ 1
1.1 บทนำ 1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย 4
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย 4
2 ทฤษฎี 5
2.1 ปุ๋ยยูเรีย (urea fertilizer) 5
2.1.1 คุณสมบัติของยูเรีย 6
2.1.2 การผลิตและการสูญสลายปุ๋ยยูเรีย 8
2.1.3 ปุ๋ยที่มีการควบคุมการใช้ประโยชน์ 10
2.2 ยางธรรมชาติ (Natural rubber) 18
2.2.1 คุณสมบัติทั่วไปของยางธรรมชาติ 18
2.2.2 โครงสร้างทางเคมีของยางธรรมชาติ 19

สารบัญ (ต่อ)

บทที่

2.3 วิธีการเคลือบปุ๋ย 23
2.3.1 ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับไมโครเอนแคปซูเลชั่น 23
2.3.2 ไมโครแคปซูล 24
2.3.3 วิธีการเคลือบปุ๋ยยูเรียด้วยยางธรรมชาติ 28
2.4 การถ่ายโอนมวลสาร 32
2.4.1 กฎข้อที่หนึ่งและข้อที่สองของฟิก (Fick's first and second law).32
2.4.2 สัมประสิทธิ์การแพร่ (Diffusion coefficient) 38
2.4.3 สัมประสิทธิ์การแบ่งแยก (Partition coefficient) 39
3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 43
3.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาการควบคุมการปลดปล่อยปุ๋ยยูเรีย ... 43
3.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์
ของการถ่ายโอนมวลสาร 46
4 การพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ 61
4.1 ระบบและสมมติฐาน 61
4.2 การสร้างสมการการถ่ายโอนของระบบที่ศึกษา 63
4.3 สภาวะเริ่มต้นและสภาวะขอบเขต 64
4.4 การแก้ปัญหาเชิงตัวเลข 69
4.5 ขั้นตอนการศึกษาแบบจำลองคณิตศาสตร์ 75

สารบัญ (ต่อ)

บทที่

5 ผลการคำนวณและการวิเคราะห์ 80
5.1 ผลของ stepsize ที่ใช้ในแบบจำลอง 80
5.2 ผลการทดสอบความถูกต้องของแบบจำลองที่ได้ 82
5.3 การศึกษาลักษณะการปลดปล่อยปุ๋ยยูเรียในช่วงเริ่มต้น 96
5.4 ผลของค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ต่อการปลดปล่อยปุ๋ยยูเรียจากแคปซูล .. 98
5.5 ผลของความหนาของชั้นเคลือบต่อการปลดปล่อยปุ๋ยยูเรียจากแคปซูล..101
5.6 ผลของขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของเม็ดยูเรียต่อการปลดปล่อย
ปุ๋ยยูเรียจากแคปซูล 104
5.7 ผลของความหนาที่มีต่อแบบจำลองและสมการของ Lu และ Lee 107
5.8 การคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของยูเรียผ่านชั้นเคลือบ 111
6 สรุปผลและข้อเสนอแนะ 119
6.1 สรุปผล 119
6.2 ข้อเสนอแนะ 120
รายการอ้างอิง 121
ภาคผนวก 125
ภาคผนวก ก 126
ภาคผนวก ข 142
ภาคผนวก ค 145
ประวัติผู้วิจัย 150

สารบัญตาราง

ตารางที่ หน้า

2.1 ความสามารถในการละลายน้ำของยูเรียที่อุณหภูมิต่างๆ 7
2.2 ส่วนประกอบของน้ำยาง Hevea Latex 19
2.3 สัดส่วนของส่วนผสมหลักที่ใช้ผลิตเมทริกซ์ของยางธรรมชาติหุ้มยูเรีย 30
2.4 กฎข้อที่หนึ่งของฟิก 33
2.5 กฎข้อที่สองของฟิก..... 37
2.6 แนวโน้มของค่าสัมประสิทธิ์การแพร่เมื่อปัจจัยต่าง ๆ เพิ่มขึ้น..... 38
4.1 ค่า λ และ ค่า $\Delta\eta$ ที่ใช้ในการคำนวณ 75
4.2 ข้อมูลพื้นฐานของแคปซูลชนิดต่าง ๆ ที่ Lu และ Lee ใช้ในการทดลอง..... 77
5.1 ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจระหว่างผลการคำนวณจากแบบจำลองกับ
ผลการทดลอง..... 83
5.2 ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจระหว่างผลการคำนวณจากแบบจำลองกับ
ผลการทดลองเมื่อเปลี่ยนแปลงความหนา.....109
5.3 ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจระหว่างผลการคำนวณจากแบบจำลอง
ที่ใช้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ที่หาได้จากงานวิจัยนี้กับการทดลอง.....118

สารบัญรูป

รูปที่ หน้า

2.1 การควบคุมให้ปุ๋ยที่ละลายง่ายให้ละลายได้ช้าลงโดยใช้สารเคลือบแบบต่างๆ...15

2.2 รูปแบบของการเคลือบปุ๋ยยูเรียด้วยยางธรรมชาติ.....17

2.3 โครงสร้าง cis-1,4-polyisoprene.....20

2.4 โครงสร้างยางธรรมชาติจากการฉายรังสีเอกซ์เรย์.....21

2.5 ลักษณะต่างๆของไมโครแคปซูล 25

2.6 ขนาดของไมโครแคปซูลจากกระบวนการผลิตต่างๆ.....27

2.7 เครื่องบดสองลูกกลิ้ง..... 29

2.8 ปริมาตรควบคุม.....34

2.9 พิกัดทรงกระบอก และความสัมพันธ์กับพิกัดมุมฉาก.....36

2.10 พิกัดทรงกลม และความสัมพันธ์กับพิกัดมุมฉาก.....36

2.11 เมมเบรนความหนา h แบ่งสารละลายที่มีความเข้มข้น C_1 และ C_2 ออกจากกัน.....39

2.12 เมมเบรนความหนา h แบ่งสารละลายที่มีความเข้มข้น C_1 และ C_2 โดยความเข้มข้นภายในและภายนอกเมมเบรนมีค่าไม่เท่ากัน.....40

3.1 อัตราการปล่อยยูเรียออกจากเม็ดปุ๋ยยูเรียที่ถูกหุ้มด้วยยางธรรมชาติใน 60 วัน ที่สภาวะความเป็นกรดด่างที่ต่างกันของน้ำล้อมรอบเม็ดปุ๋ย.....44

3.2 ปริมาณยูเรียสะสมที่ถูกปล่อยออกมาใน 90 วัน ผ่านยางที่มีการเชื่อมโยงสายโซ่โมเลกุลและไม่มีการเชื่อมโยงสายโซ่โมเลกุล.....45

3.3 รูปแบบการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นที่ได้จากการคำนวณ โดยเส้นโค้ง A เป็นของเม็ดยาที่มีชั้นเคลือบหนา 15.8 ไมโครเมตร และเส้นโค้ง B เป็นของเม็ดยาที่มีชั้นเคลือบหนา 19.6 ไมโครเมตร.....49

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่

3.4 รูปแบบการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นเมื่อกำหนดสภาวะขอบเขตคือ ความเข้มข้นในแกนกลางมีการเปลี่ยนแปลงลดลง ขณะที่ความเข้มข้นของสารละลายภายนอกเพิ่มขึ้น..... 50

3.5 รูปแบบการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นเมื่อกำหนดสภาวะขอบเขตคือ ความเข้มข้นในแกนกลางมีการเปลี่ยนแปลงลดลง ขณะที่ความเข้มข้นของสารละลายภายนอกมีค่าเป็นศูนย์.....51

3.6 รูปแบบการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นเมื่อกำหนดสภาวะขอบเขตคือ ความเข้มข้นในแกนกลางมีค่าคงที่ ตราบเท่าที่ยายังละลายไม่หมด ขณะที่ความเข้มข้นของสารละลายภายนอกเพิ่มขึ้น.....52

3.7 รูปแบบการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นเมื่อกำหนดสภาวะขอบเขตคือ ความเข้มข้นในแกนกลางมีการเปลี่ยนแปลงลดลง ขณะที่ความเข้มข้นของสารละลายภายนอกเพิ่มขึ้น โดยเส้น curve 1 เป็นของเม็ดยาที่มีชั้นเคลือบหนา 15.8 ไมโครเมตร และเส้น curve 2 เป็นของเม็ดยาที่มีชั้นเคลือบหนา 19.6 ไมโครเมตร.....53

3.8 ผลการเปรียบเทียบระหว่างค่าที่ได้จากแบบจำลอง กับค่าจากผลการทดลอง.....59

4.1 ระบบการปลดปล่อยปุ๋ยยูเรียในน้ำ.....62

4.2 แผนภาพแสดงการทำงานของโปรแกรม UREA.....72

5.1 ปริมาณยูเรียสะสมที่ถูกปลดปล่อยจากแคปซูลตัวอย่าง D เมื่อใช้แบบจำลองเทียบกับผลการทดลองและสมการของ Lu และ Lee.....85

5.2 ปริมาณยูเรียสะสมที่ถูกปลดปล่อยจากแคปซูลตัวอย่าง F เมื่อใช้แบบจำลองเทียบกับผลการทดลองและสมการของ Lu และ Lee.....86

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่

5.3 ปริมาณยูเรียสะสมที่ถูกปลดปล่อยจากแคปซูลตัวอย่าง L
เมื่อใช้แบบจำลองเทียบกับผลการทดลองและสมการของ Lu และ Lee.....87
5.4 ปริมาณยูเรียสะสมที่ถูกปลดปล่อยจากแคปซูลตัวอย่าง M
เมื่อใช้แบบจำลองเทียบกับผลการทดลองและสมการของ Lu และ Lee.....88
5.5 ปริมาณยูเรียสะสมที่ถูกปลดปล่อยจากแคปซูลตัวอย่าง Q
เมื่อใช้แบบจำลองเทียบกับผลการทดลองและสมการของ Lu และ Lee.....89
5.6 ฟลักซ์ยูเรียที่ถูกปลดปล่อยในแต่ละวันจากแคปซูลตัวอย่าง D.....91
5.7 ฟลักซ์ยูเรียที่ถูกปลดปล่อยในแต่ละวันจากแคปซูลตัวอย่าง F 92
5.8 ฟลักซ์ยูเรียที่ถูกปลดปล่อยในแต่ละวันจากแคปซูลตัวอย่าง L.....93
5.9 ฟลักซ์ยูเรียที่ถูกปลดปล่อยในแต่ละวันจากแคปซูลตัวอย่าง M.....94
5.10 ฟลักซ์ยูเรียที่ถูกปลดปล่อยในแต่ละวันจากแคปซูลตัวอย่าง Q.....95
5.11 ฟลักซ์ยูเรียที่ถูกปลดปล่อยในแต่ละวันจากแคปซูลตัวอย่าง 97
5.12 ฟลักซ์ยูเรียที่ถูกปลดปล่อยในแต่ละวันจากแคปซูลตัวอย่างเมื่อ
เปลี่ยนแปลงค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ (กำหนดให้ความหนาของชั้นเคลือบ
และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเม็ดยูเรียคงที่) 100
5.13 ฟลักซ์ยูเรียที่ถูกปลดปล่อยในแต่ละวันจากแคปซูลตัวอย่าง
เมื่อเปลี่ยนแปลงความหนาของชั้นเคลือบ (กำหนดให้ค่าสัมประสิทธิ์
การแพร่ และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเม็ดยูเรียคงที่).....103
5.14 ฟลักซ์ยูเรียที่ถูกปลดปล่อยในแต่ละวันจากแคปซูลตัวอย่าง
เมื่อเปลี่ยนแปลงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเม็ดยูเรีย (กำหนดให้
ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ และความหนาของชั้นเคลือบคงที่) 106
5.15 ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจระหว่างผลการคำนวณจากแบบจำลองกับ
ผลการทดลองเมื่อเปลี่ยนแปลงความหนา.....110

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่

5.16 ปริมาณยูเรียสะสมที่ถูกปลดปล่อยจากแคปซูลตัวอย่าง D เมื่อใช้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ที่ได้จากการลองผิดลองถูก เปรียบเทียบกับผลการทดลองและค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของ Lu และ Lee 113

5.17 ปริมาณยูเรียสะสมที่ถูกปลดปล่อยจากแคปซูลตัวอย่าง F เมื่อใช้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ที่ได้จากการลองผิดลองถูก เปรียบเทียบกับผลการทดลองและค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของ Lu และ Lee 114

5.18 ปริมาณยูเรียสะสมที่ถูกปลดปล่อยจากแคปซูลตัวอย่าง L เมื่อใช้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ที่ได้จากการลองผิดลองถูก เปรียบเทียบกับผลการทดลองและค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของ Lu และ Lee 115

5.19 ปริมาณยูเรียสะสมที่ถูกปลดปล่อยจากแคปซูลตัวอย่าง M เมื่อใช้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ที่ได้จากการลองผิดลองถูก เปรียบเทียบกับผลการทดลองและค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของ Lu และ Lee 116

5.20 ปริมาณยูเรียสะสมที่ถูกปลดปล่อยจากแคปซูลตัวอย่าง Q เมื่อใช้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ที่ได้จากการลองผิดลองถูก เปรียบเทียบกับผลการทดลองและค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของ Lu และ Lee 117