

บทที่ 5

ผลการคำนวณและการวิเคราะห์

5.1 ผลของ stepsize ที่ใช้ในแบบจำลอง

ในการศึกษาถึงผลของ stepsize ต่อความถูกต้องในการคำนวณ ได้ทดลองเปลี่ยนแปลงค่า λ และ ค่า $\Delta\eta$ ดังแสดงในตารางที่ 4.1 ซึ่งผลที่ได้เป็นดังนี้

1. เมื่อเปลี่ยนแปลง $\Delta\eta$ และกำหนดให้ λ มีค่าคงที่ ผลการคำนวณพบว่า ค่าความเข้มข้นของปุ๋ยยูเรียในชั้นเคลือบที่ได้จาก $\Delta\eta = 0.1$ และ $\Delta\eta = 0.01$ มีผลต่างเปรียบเทียบสัมพัทธ์ (relative error) ต่างกันประมาณ 1 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้นในการคำนวณจะเลือกค่า $\Delta\eta = 0.01$ (คือแบ่งความหนาออกเป็น 100 ช่อง) เพื่อความถูกต้องมากกว่า

2. เมื่อเปลี่ยนแปลง λ และกำหนดให้ $\Delta\eta = 0.01$ ผลการคำนวณพบว่า ค่าความเข้มข้นของปุ๋ยยูเรียในชั้นเคลือบที่ได้จาก $\lambda = 0.45$ กับ $\lambda = 0.3$ มีผลต่างเปรียบเทียบสัมพัทธ์ (relative error) ต่างกันประมาณ 0.4 เปอร์เซ็นต์ และค่าความเข้มข้นของปุ๋ยยูเรียในชั้นเคลือบที่ได้จาก $\lambda = 0.3$ กับ $\lambda = 0.2$ มีผลต่างเปรียบเทียบสัมพัทธ์ (relative error) ต่างกันประมาณ 0.4 เปอร์เซ็นต์ เช่นกัน ดังนั้นในการคำนวณจะเลือกค่า $\lambda = 0.2$ เพื่อความถูกต้องในการคำนวณมากกว่า

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้ค่า $\Delta\eta = 0.01$ และ $\lambda = 0.2$ ในการคำนวณแบบจำลองต่อไป จากค่า $\Delta\eta$ และ λ ที่เลือกใช้นี้สำหรับแคปซูลตัวอย่างต้องคำนวณ step เวลาถึง 96,000 ครั้ง เพื่อให้ได้เวลาคำนวณเท่ากับ 1 วัน (หรือคือใช้ stepsize ของเวลาไร้มิติเท่ากับ 2×10^{-5})

อย่างไรก็ตาม ยังสามารถที่จะเลือกใช้ $\Delta\eta$ และ λ ที่เล็กกว่านี้ได้ แต่ก็ทำให้ต้องใช้เวลาการคำนวณของคอมพิวเตอร์เพิ่มมากขึ้นเกินความจำเป็น และจะไม่ได้ผลการคำนวณที่ถูกต้องเพิ่มขึ้นมากนัก

5.2 ผลการทดสอบความถูกต้องของแบบจำลองที่ได้

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการแพร่ของยูเรียผ่านชั้นเคลือบยางธรรมชาติที่พัฒนาขึ้น (สมการ (4.2) (4.10) (4.16) และ (4.11)) ถูกนำมาคำนวณด้วยวิธีเชิงตัวเลขตามขั้นตอนที่ได้อธิบายในข้อ 4.4 ผลการคำนวณถูกเปรียบเทียบกับผลการทดลองจำนวน 5 ตัวอย่าง และผลการคำนวณจากสมการของ Lu และ Lee [27] ซึ่งสมการของ Lu และ Lee ถูกคำนวณด้วยวิธีเชิงวิเคราะห์ (analytical solution) และใช้สมมติฐานว่าการแพร่เกิดขึ้นที่สภาวะการแพร่ผ่านคงที่เทียม (pseudo-steady state)

ผลการคำนวณจากแบบจำลองถูกวาดเป็นกราฟเปรียบเทียบกับผลการทดลองของ Lu และ Lee ดังแสดงในรูปที่ 5.1 - 5.5 ซึ่งเป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณยูเรียสะสมที่ถูกปลดปล่อยออกจากแคปซูลเทียบกับเวลา โดยสัญลักษณ์ ● แทนผลการทดลอง * แทนผลการคำนวณที่ได้จากแบบจำลอง ในการคำนวณนี้ใช้ค่าตัวแปรต่าง ๆ กล่าวคือ ปริมาณยูเรียเริ่มต้น ความหนาของชั้นเคลือบ รัศมีของเม็ดปุ๋ย และค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของตัวอย่างนั้น ๆ (ดังแสดงในตารางที่ 4.1) ในการคำนวณ ส่วนสัญลักษณ์ Δ แทนผลการคำนวณที่ได้จากสมการของ Lu และ Lee และใช้ค่าตัวแปรต่าง ๆ ชุดเดียวกันในการคำนวณ พบว่าแบบจำลองสามารถทำนายปริมาณยูเรียสะสมที่ถูกปลดปล่อยออกจากแคปซูลที่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเป็นไปในทิศทางเดียวกันกับผลการทดลองและมีค่าใกล้เคียงกัน เมื่อนำผลการคำนวณที่ได้และผลการทดลองมาคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) ตามสมการที่ (4.33) จะได้ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ ดังแสดงในตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจระหว่างผลการคำนวณจากแบบจำลองกับผลการทดลอง
แบบจำลองกับสมการของ Lu และ Lee และ สมการของ Lu และ Lee กับผลการทดลอง

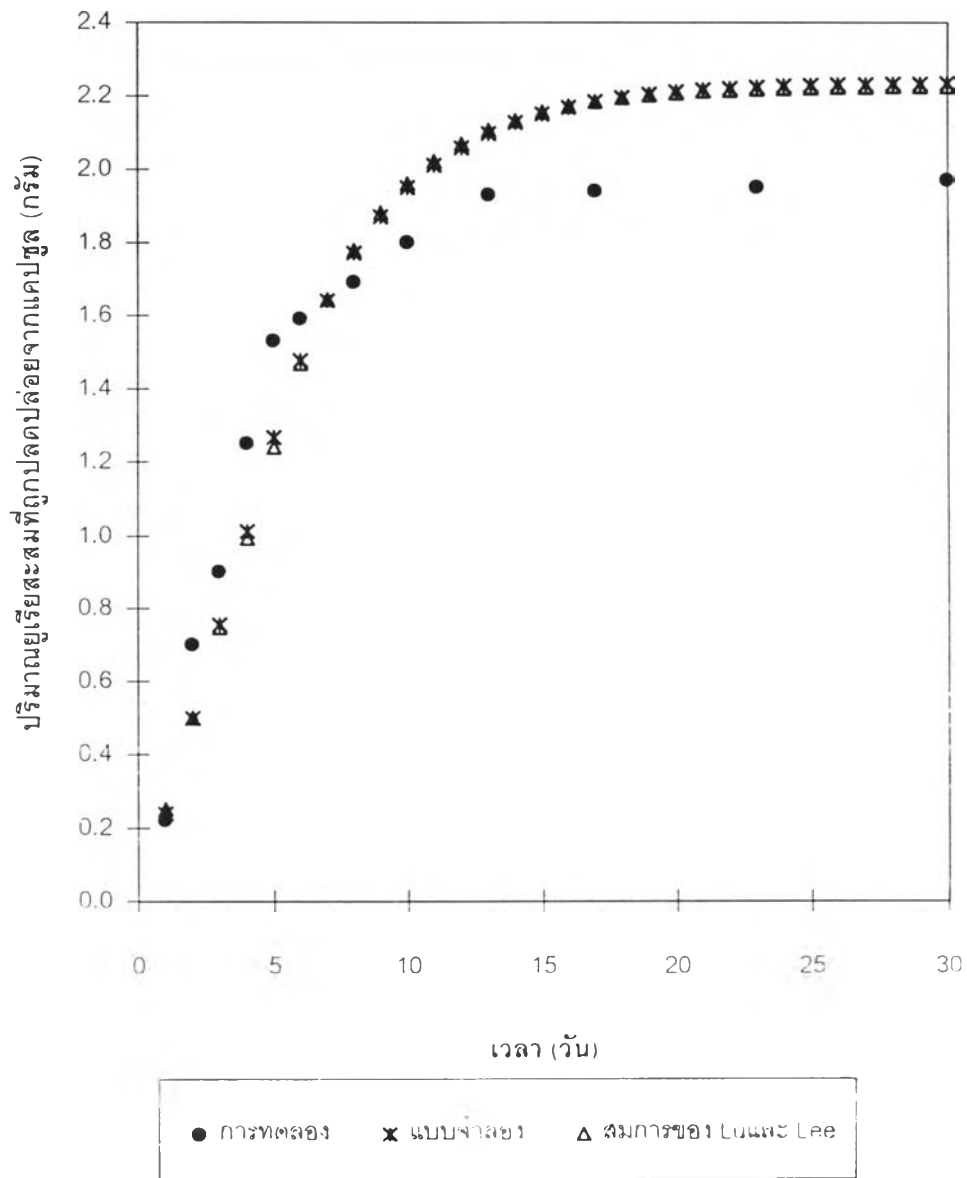
ตัวอย่าง	ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2)		
	แบบจำลองกับผลการทดลอง	แบบจำลองกับสมการของ Lu และ Lee	สมการของ Lu และ Lee กับผลการทดลอง
D	0.8726	0.9997	0.8643
F	0.5224	0.9996	0.5074
L	0.5490	0.9996	0.5592
M	0.8558	0.9995	0.8589
Q	0.8515	0.9996	0.8573

จากคอลัมน์ที่ 2 ของตารางที่ 5.1 จะเห็นได้ว่าค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจของ ตัวอย่าง D M และ Q มีค่ามากกว่า 0.85 จึงสรุปได้ว่าผลการคำนวณให้ผลใกล้เคียงกับผลการทดลองเป็นที่น่าพอใจ

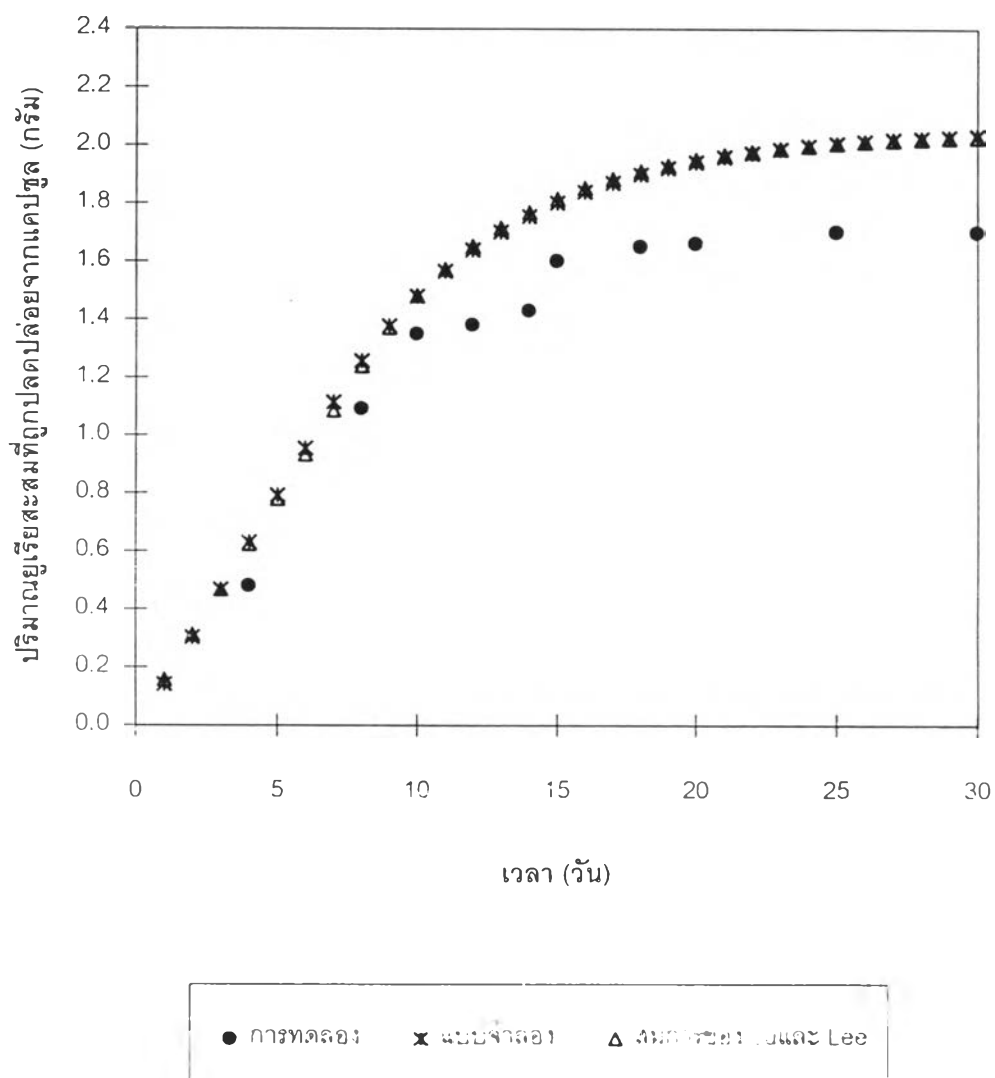
สำหรับรูปที่ 5.2 (ตัวอย่าง F) แม้ว่าผลการคำนวณจากแบบจำลองและจาก สมการของ Lu และ Lee จะมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกับผลการทดลอง แต่จะ สังเกตได้ว่าค่าจากการคำนวณจะสูงกว่าค่าจากการทดลองแทบทุกจุด จึงทำให้ได้ค่า สัมประสิทธิ์การตัดสินใจค่อนข้างต่ำ

สำหรับรูปที่ 5.3 (ตัวอย่าง L) นั้น แม้ว่าผลการคำนวณจากแบบจำลองและจาก สมการของ Lu และ Lee จะมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกับผลการทดลอง แต่ก็ให้ค่า แตกต่างจากผลการทดลองมากกว่าตัวอย่างอื่น ๆ (หรือจะเห็นได้ว่าค่าสัมประสิทธิ์การ ตัดสินใจมีค่าต่ำ) ซึ่งน่าจะมีสาเหตุมาจากความหนาของชั้นเคลือบไม่สม่ำเสมอและ ความหนาของชั้นเคลือบอาจมีผลต่อคุณสมบัติของชั้นเคลือบ ดังที่ Lu และ Lee ได้ อธิบายไว้แล้ว [27]

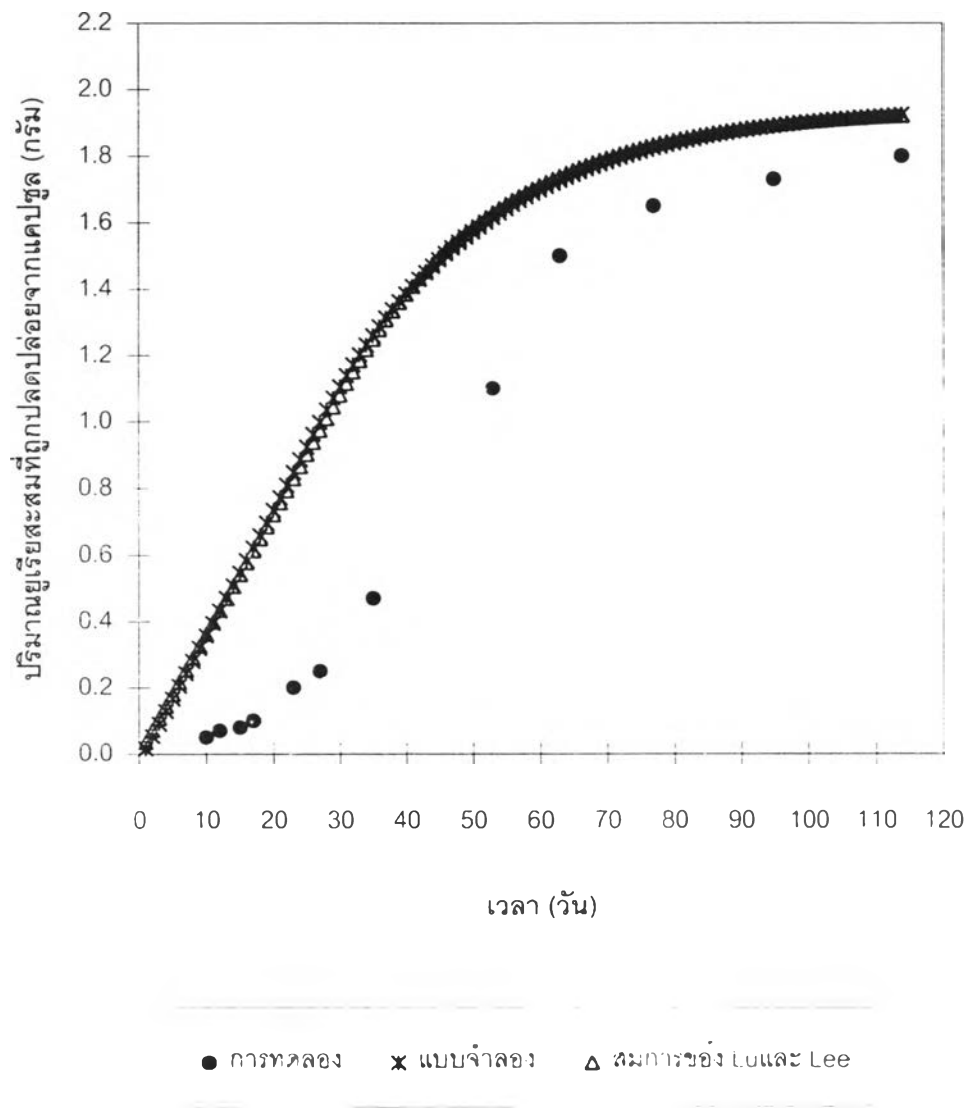
นอกจากนั้น จากรูปที่ 5.1 - 5.5 จะเห็นได้ว่าผลการคำนวณจากแบบจำลองให้ ผลที่ใกล้เคียงมากกับผลการคำนวณจากสมการของ Lu และ Lee และจะเห็นได้จาก ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจตรงคอลัมน์ที่ 3 ของตารางที่ 5.1 ว่ามีค่าสัมประสิทธิ์การ ตัดสินใจอยู่ในช่วง 0.99



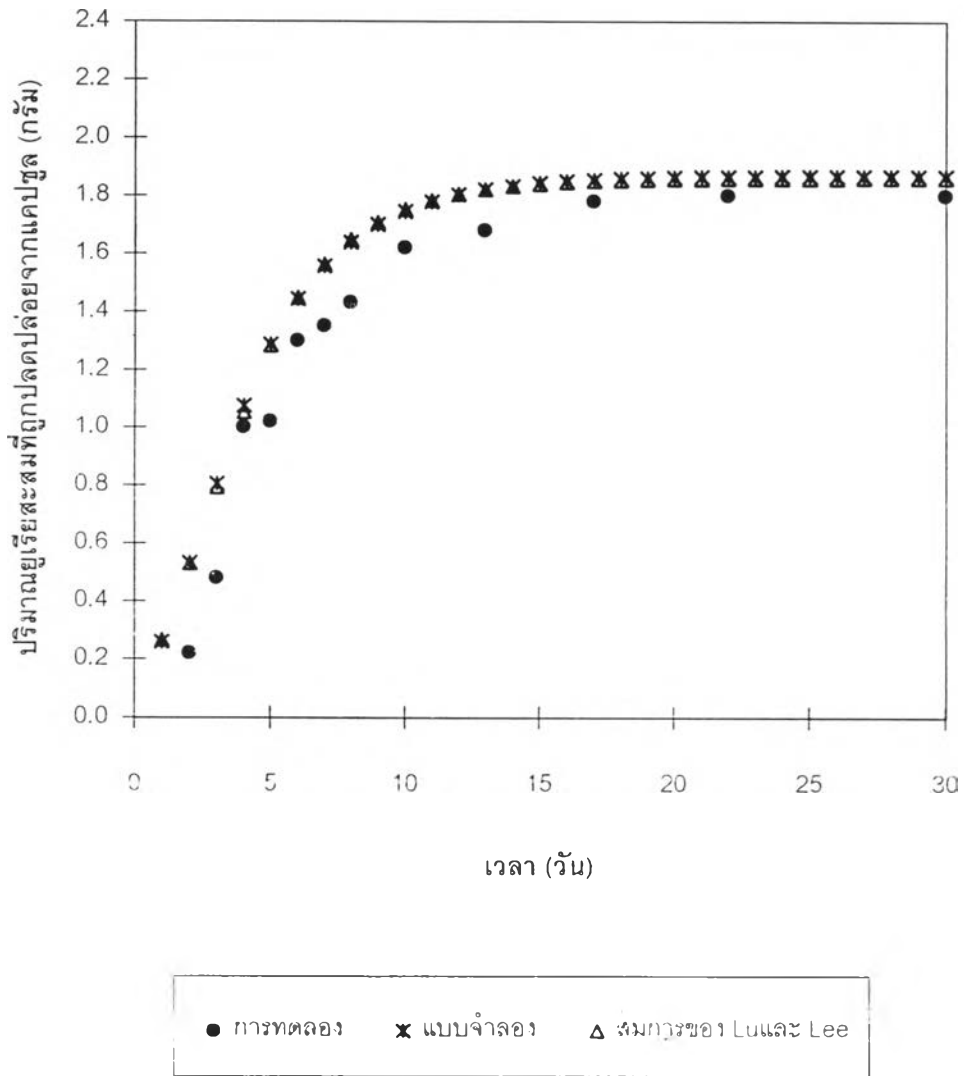
รูปที่ 5.1 ปริมาณยูเรียมที่ถูกลดปล่อยจากแคปซูลตัวอย่าง D เมื่อใช้แบบจำลองเทียบกับผลการทดลองและสมการของ Lu และ Lee



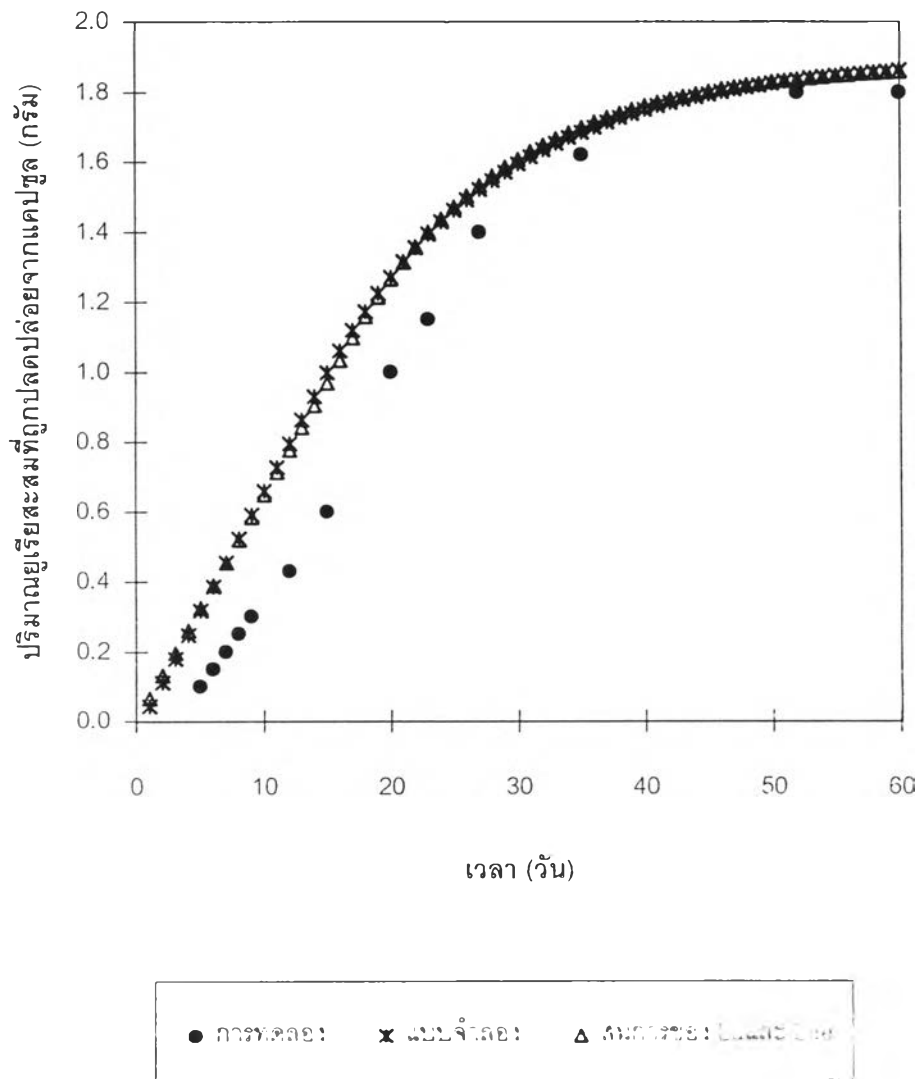
รูปที่ 5.2 ปริมาณยูเรียสะสมที่ถูกปลดปล่อยจากแคปซูลตัวอย่าง F เมื่อใช้แบบจำลองเทียบกับผลการทดลองและสมการของ Lu และ Lee



รูปที่ 5.3 ปริมาณยูเรียสะสมที่ถูกปลดปล่อยจากแคปซูลตัวอย่าง L เมื่อใช้แบบจำลองเทียบกับผลการทดลองและสมการของ Lu และ Lee



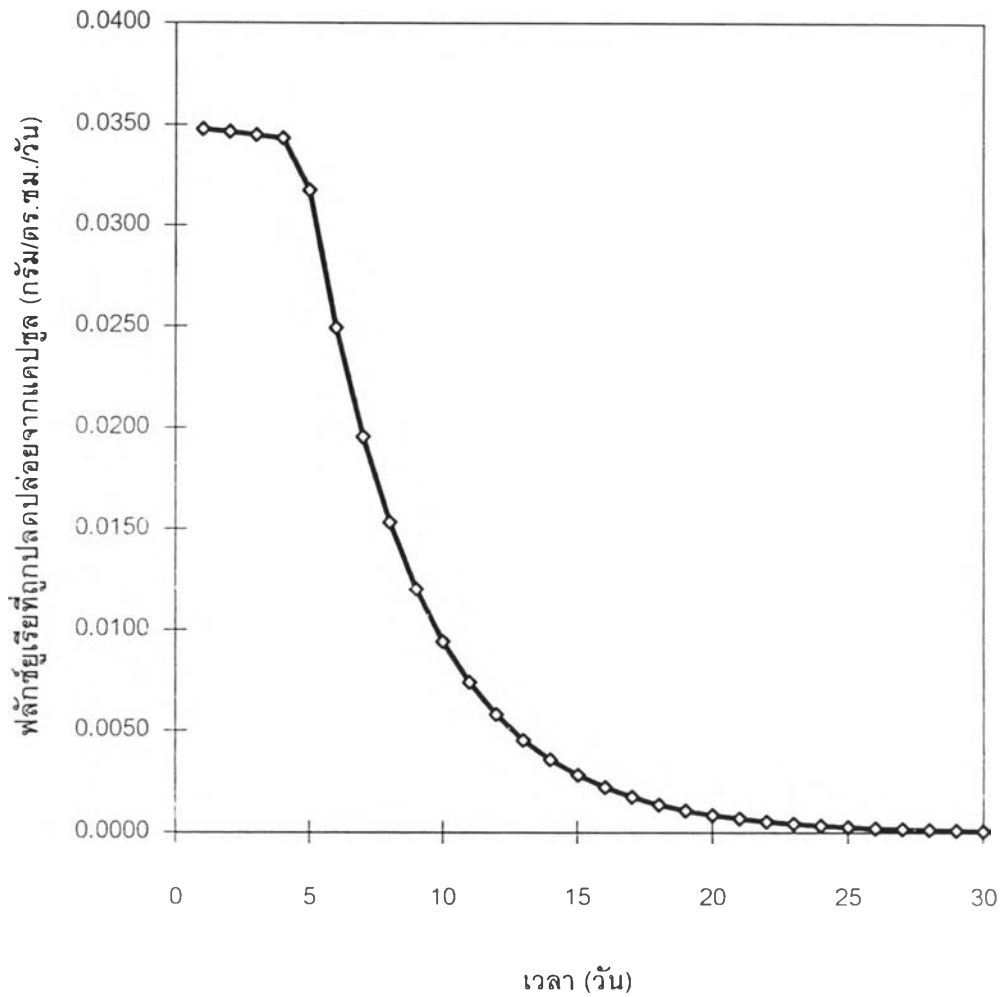
รูปที่ 5.4 ปริมาณยูเรียสะสมที่ถูกปลดปล่อยจากแคปซูลตัวอย่าง M เมื่อใช้แบบจำลองเทียบกับผลการทดลองและสมการของ Lu และ Lee



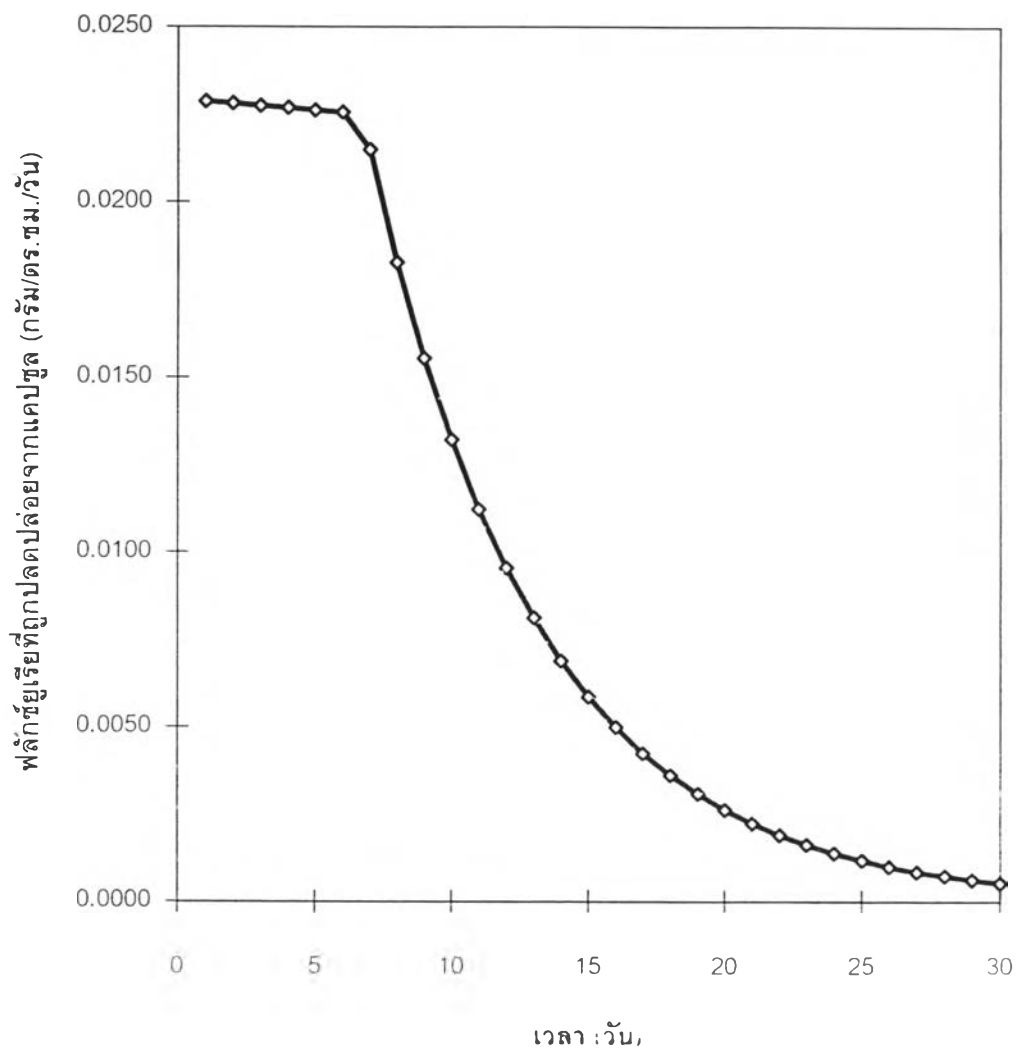
รูปที่ 5.5 ปริมาณยูเรียสะสมที่ถูกปลดปล่อยจากแคปซูลตัวอย่าง Q เมื่อใช้

แบบจำลองเทียบกับผลการทดลองและสมการของ Lu และ Lee

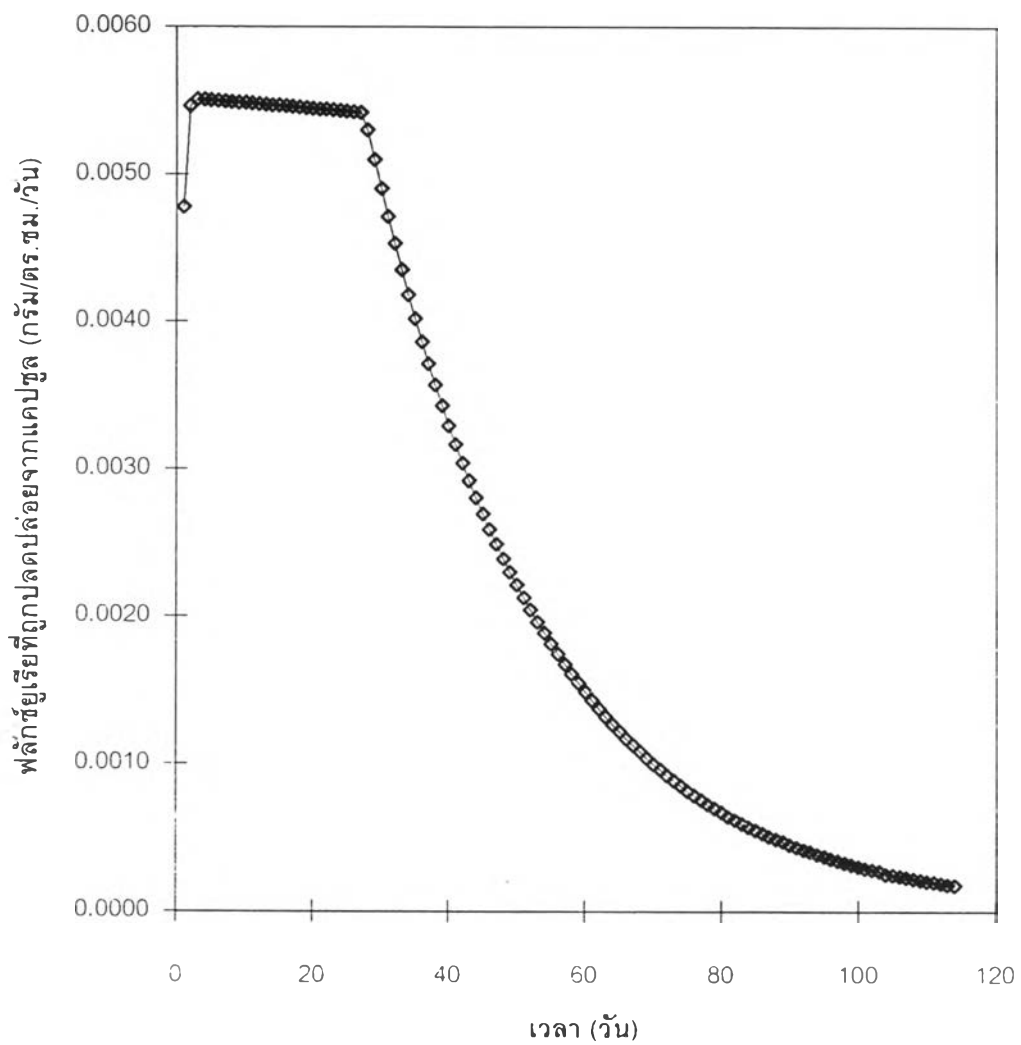
เมื่อแสดงผลการคำนวณในรูปของฟลักซ์ยูเรียดังรูปที่ 5.6 - 5.10 จะเห็นได้ว่า
 ทุกรูปมีลักษณะของกราฟแบบเดียวกัน กล่าวคือในช่วงแรก (หรือช่วง $0 < t \leq t_s$)
 ฟลักซ์ยูเรียจะมีค่าสูงและลดลงช้า ๆ เมื่อเข้าในช่วงที่สอง (หรือช่วง $t > t_s$) ฟลักซ์ยูเรีย
 จะลดลงอย่างรวดเร็ว ทั้งนี้เป็นเพราะว่าในช่วงแรก ความเข้มข้นในแคปซูลยังเป็นความ
 เข้มข้นอิมิตัวของปุ๋ยยูเรียในสารละลาย จึงทำให้มีค่าความแตกต่างของความเข้มข้น
 ระหว่างภายในแคปซูลกับสารละลายภายนอกสูง จึงทำให้มีฟลักซ์สูง แต่เมื่อเลยเวลา t_s
 ไปแล้ว ค่าความแตกต่างนี้ลดลงมากเพราะความเข้มข้นภายในแคปซูลลดลงพร้อมกับ
 ที่ความเข้มข้นในสารละลายภายนอกเพิ่มขึ้น จึงทำให้ฟลักซ์มีค่าน้อยลง แต่อย่างไร
 ก็ตามจากตัวอย่างทั้ง 5 นี้ ค่าฟลักซ์ช่วงแรกและเวลา t_s จะไม่เท่ากัน ขึ้นอยู่กับปริมาณ
 ยูเรียเริ่มต้น ความหนาของชั้นเคลือบ และค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของแต่ละตัวอย่าง



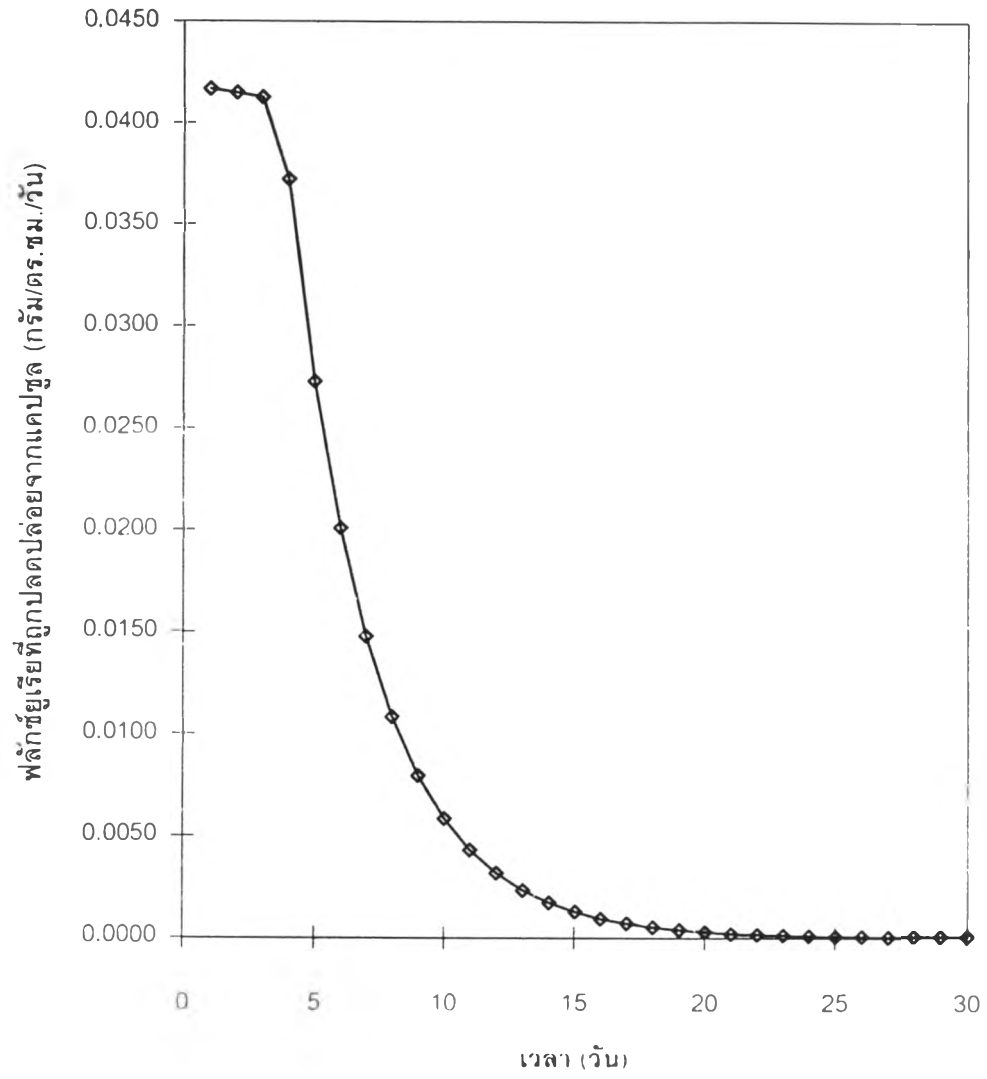
รูปที่ 5.6 ฟลักซ์ยูเรียมที่ถูกปลดปล่อยจากแคปซูลตัวอย่าง D



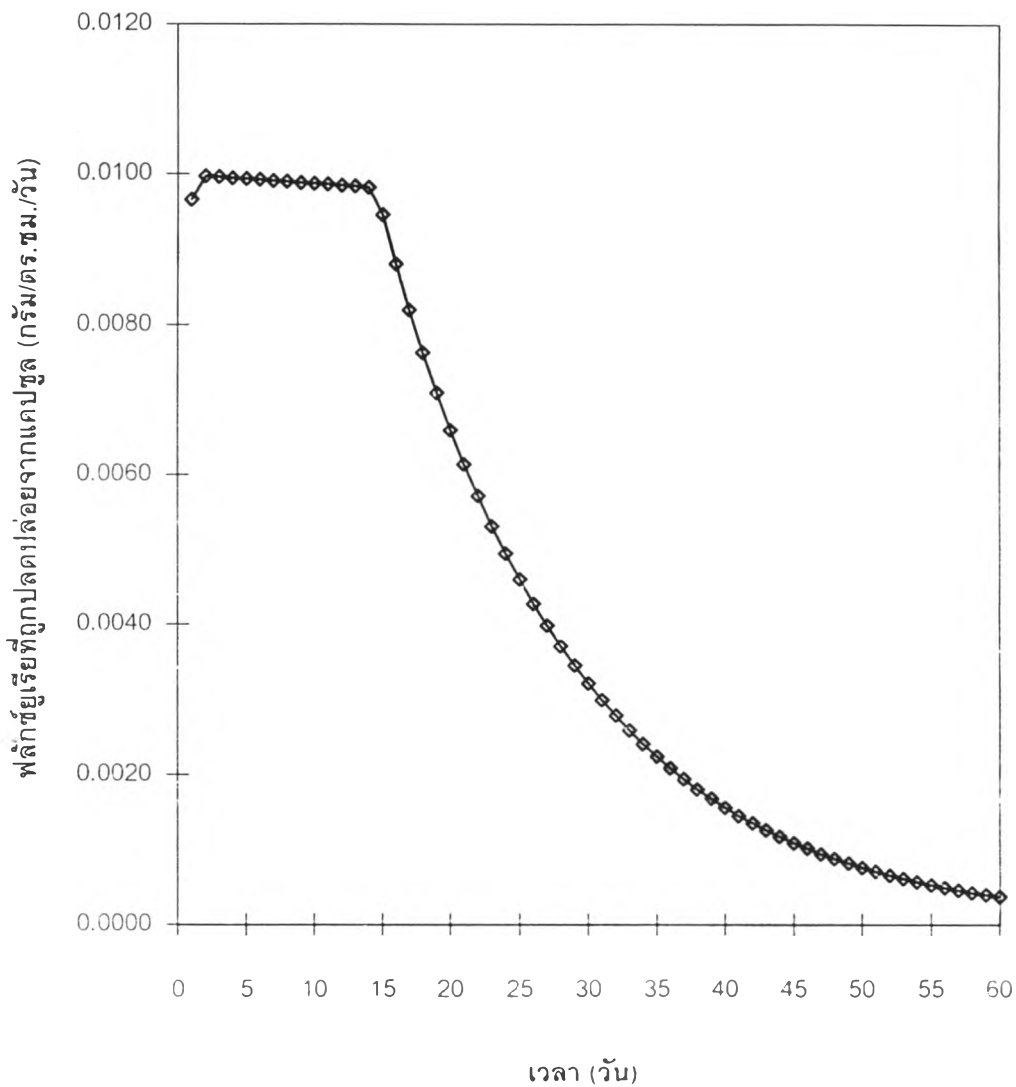
รูปที่ 5.7 ฟลักซ์ยูเรียมที่ถูกปลดปล่อยจากแคปซูลตัวอย่าง F



รูปที่ 5.8 ฟลักซ์ยูเรียที่ถูกปลดปล่อยจากแคปซูลตัวอย่าง L



รูปที่ 5.9 ฟลักซ์ยูเรียมที่ถูกปลดปล่อยจากแคปซูลตัวอย่าง M



รูปที่ 5.10 ฟลักซ์ยูเรียที่ถูกปลดปล่อยจากแคปซูลตัวอย่าง Q

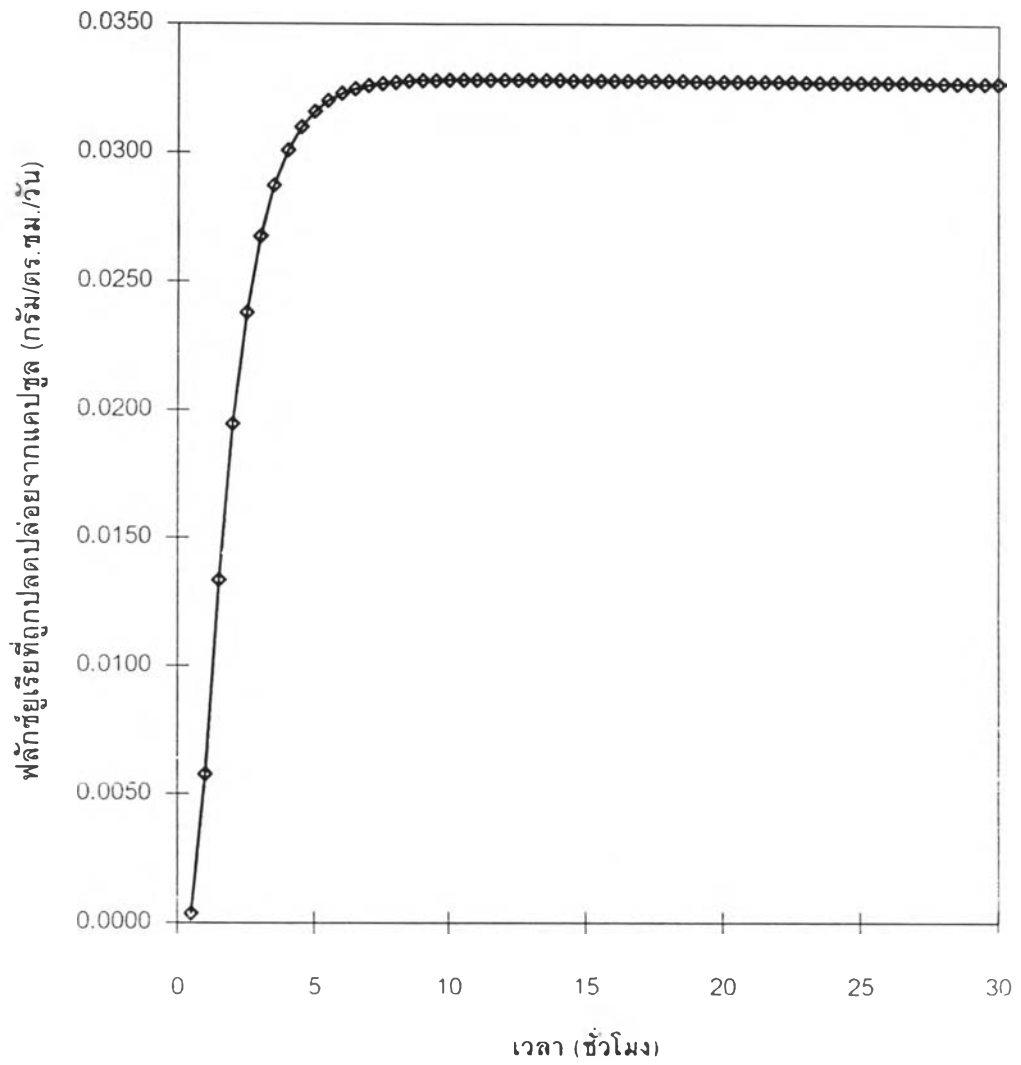
5.3 การศึกษาลักษณะการปลดปล่อยปุ๋ยยูเรียในช่วงเริ่มต้น

เพื่อศึกษาเป็นกรณีตัวอย่างว่าจะต้องใช้เวลาเท่าไรจึงจะได้ฟลักซ์ของปุ๋ยยูเรียที่ผิวนอกของชั้นเคลือบ ได้กำหนดให้แคปซูลมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเม็ดยูเรีย 1.5 ซม. (หรือกำหนดให้มีปุ๋ยยูเรียเริ่มต้น 2.359 กรัม) ความหนาของชั้นเคลือบเท่ากับ 0.03 ซม. และให้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่มีค่าเท่ากับ 2×10^{-8} ตร.ซม./วินาที

ผลการคำนวณจากแบบจำลองในรูปของฟลักซ์ยูเรียเทียบกับเวลาในช่วงเริ่มต้น แสดงได้ดังรูปที่ 5.11

จากรูปที่ 5.11 จะเห็นได้ว่าในช่วงเวลาสั้น ๆ (ในกรณีตัวอย่างประมาณครึ่ง ชั่วโมง) จะได้ฟลักซ์ยูเรียที่ผิวนอกของชั้นเคลือบแล้ว และฟลักซ์ยูเรียนี้จะมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจนถึงค่าสูงสุดในเวลาไม่นานนัก (ในกรณีตัวอย่างได้ค่าฟลักซ์ยูเรียที่ 0.033 กรัม/ตร.ซม./วัน ใน 5 ชั่วโมง) หลังจากนั้นฟลักซ์ยูเรียจะลดลงอย่างช้า ๆ และเมื่อเลยเวลา t_0 ฟลักซ์ยูเรียจะลดลงอย่างรวดเร็ว

ดังนั้นจึงแสดงให้เห็นว่าถ้าชั้นเคลือบไม่หนามากเกินไป ปุ๋ยจะถูกปลดปล่อยออกมาและใช้งานได้ภายในเวลาที่สั้นมาก



รูปที่ 5.11 ผลิตภัณฑ์เฉลี่ยที่ถูกปลดปล่อยจากแคปซูลตัวอย่าง

5.4 ผลของค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ต่อการปลดปล่อยปุ๋ยยูเรียจากแคปซูล

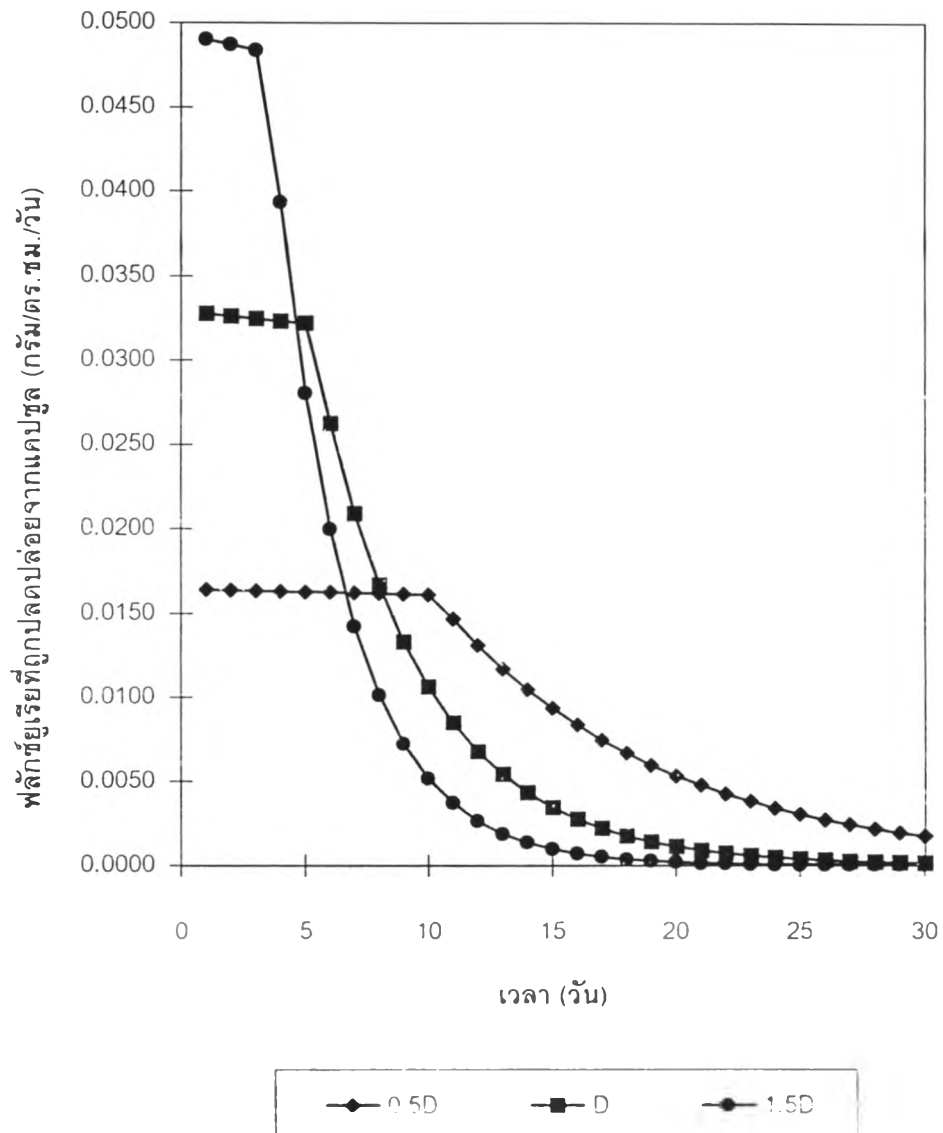
เพื่อศึกษาเป็นกรณีตัวอย่างได้กำหนดให้แคปซูลมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเม็ดยูเรีย 1.5 ซม. (หรือกำหนดให้มีปุ๋ยยูเรียเริ่มต้น 2.359 กรัม) ความหนาของชั้นเคลือบเท่ากับ 0.03 ซม. และให้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่มีค่าเท่ากับ 2×10^{-8} ตร.ซม./วินาที

การศึกษานี้จะศึกษาผลของค่าสัมประสิทธิ์การแพร่เมื่อค่าสัมประสิทธิ์การแพร่มีค่าเป็น 0.5 เท่า 1 เท่า และ 1.5 เท่าของค่าที่กำหนดตามลำดับ และผลการคำนวณที่ได้จากแบบจำลอง เมื่อวาดเป็นกราฟระหว่างฟลักซ์ยูเรียที่ถูกปลดปล่อยจากแคปซูลกับเวลา จะแสดงได้ดังรูปที่ 5.12

จากรูปที่ 5.12 จะพบว่าเมื่อค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของยูเรียผ่านชั้นเคลือบมีค่าเพิ่มขึ้น ฟลักซ์ยูเรียในช่วงแรก (คือระหว่างช่วงเวลา $0 < t \leq t_s$) จะมีค่าเพิ่มขึ้นด้วย ซึ่งสอดคล้องกับกฎข้อที่หนึ่งของฟิก (สำหรับในกรณีตัวอย่างนี้ เมื่อค่าสัมประสิทธิ์การแพร่เพิ่มจาก 0.5 เท่า ไปเป็น 1.5 เท่า ค่าฟลักซ์ยูเรียเปลี่ยนจากประมาณ 0.016 กรัม/ตร.ซม./วัน ไปเป็นประมาณ 0.048 กรัม/ตร.ซม./วัน) และในช่วงแรกนี้ฟลักซ์ยูเรียมีค่าลดลงอย่างช้า ๆ เพราะความเข้มข้นในแคปซูลยังเป็นความเข้มข้นอิมิตัวของปุ๋ยยูเรียในสารละลาย

สำหรับในช่วงที่สอง (คือช่วง $t > t_s$) ฟลักซ์ยูเรียจะลดลงอย่างรวดเร็ว และจะเห็นได้ว่า เมื่อค่าสัมประสิทธิ์การแพร่เพิ่มขึ้น ค่า t_s จะลดลง (สำหรับกรณีตัวอย่างเมื่อค่าสัมประสิทธิ์การแพร่เปลี่ยนจาก 0.5 เท่า ไปเป็น 1.5 เท่า เวลา t_s จะลดลงจาก 9 วันไปเป็น 3 วัน) ซึ่งเกิดจากการที่ในช่วงแรกปุ๋ยถูกปลดปล่อยออกมามากกว่าเมื่อค่าสัมประสิทธิ์การแพร่มากกว่า ทำให้ปริมาณปุ๋ยในแคปซูลลดลงเร็วกว่า จึงทำให้เวลา t_s ซึ่งเป็นเวลาที่ความเข้มข้นของปุ๋ยยูเรียในแคปซูลมีค่าน้อยกว่าความเข้มข้นอิมิตัวมาถึงเร็วขึ้น

ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าค่าสัมประสิทธิ์การแพร่มีผลต่อการปลดปล่อยปุ๋ยยูเรียออกจากแคปซูล โดยเมื่อค่าสัมประสิทธิ์การแพร่เพิ่มขึ้น ฟลักซ์ยูเรียจะเพิ่มขึ้น แต่จะลดเวลา t_0 ลง และทำให้ระยะเวลาการใช้งานของปุ๋ยยูเรียทั้งหมดลดลง



รูปที่ 5.12 ฟลักซ์ยูเรียมที่ถูกปลดปล่อยจากแคปซูลตัวอย่างเมื่อเปลี่ยนแปลงค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ (กำหนดให้ความหนาของชั้นเคลือบและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเม็ดยูเรียมคงที่)

5.5 ผลของความหนาของชั้นเคลือบต่อการปลดปล่อยปุ๋ยยูเรียจากแคปซูล

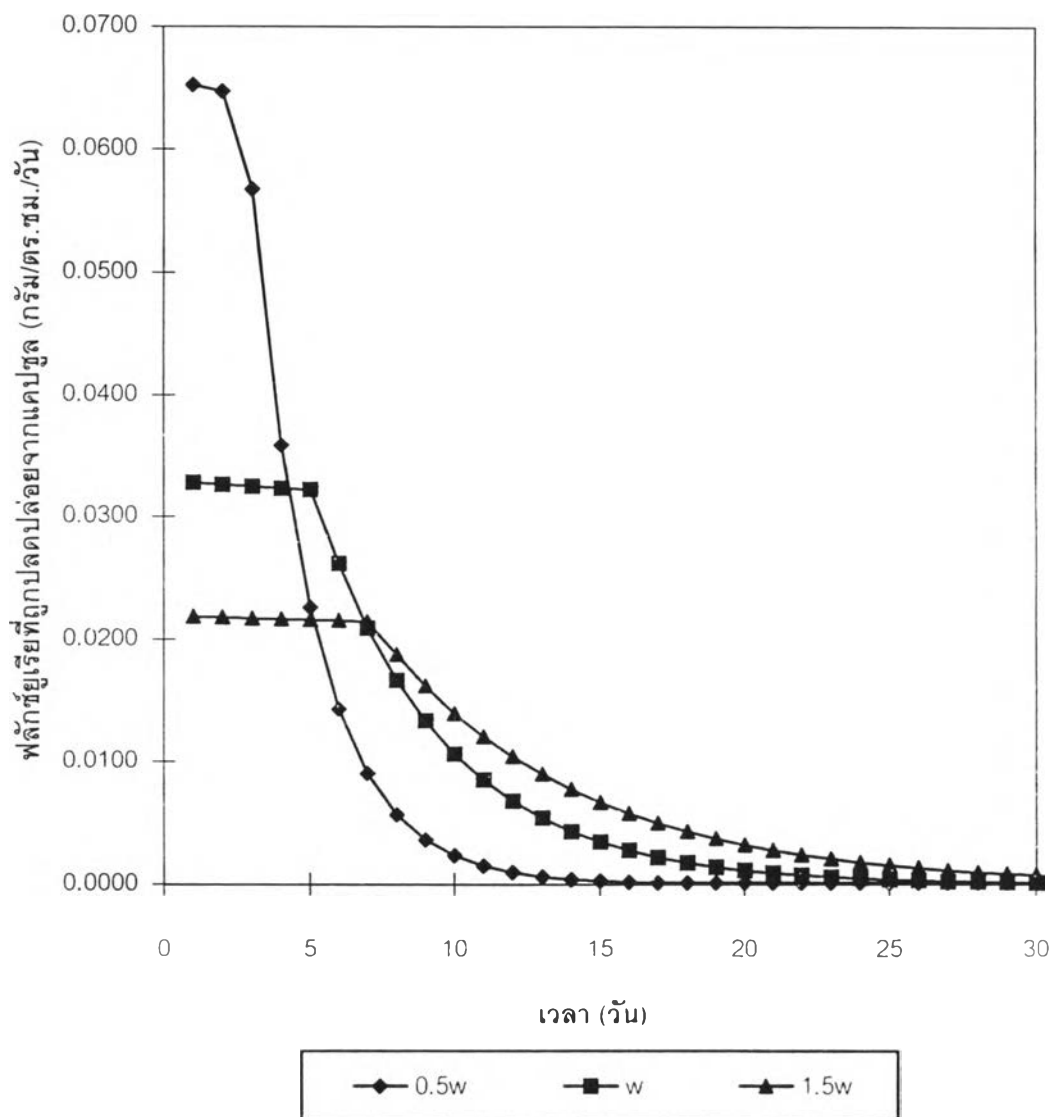
เพื่อศึกษาเป็นกรณีตัวอย่างได้กำหนดให้แคปซูลมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเม็ดยูเรีย 1.5 ซม. (หรือกำหนดให้มีปุ๋ยยูเรียเริ่มต้น 2.359 กรัม) ความหนาของชั้นเคลือบเท่ากับ 0.03 ซม. และให้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่มีค่าเท่ากับ 2×10^{-8} ตร.ซม./วินาที

การศึกษานี้จะศึกษาผลของความหนาของชั้นเคลือบเมื่อความหนาของชั้นเคลือบมีค่าเป็น 0.5 เท่า 1 เท่า และ 1.5 เท่าของค่าที่กำหนดตามลำดับ และผลการคำนวณที่ได้จากแบบจำลอง เมื่อวาดเป็นกราฟระหว่างฟลักซ์ยูเรียที่ถูกปลดปล่อยจากแคปซูลกับเวลา จะแสดงได้ดังรูปที่ 5.13

จากรูปที่ 5.13 จะพบว่าเมื่อความหนาของชั้นเคลือบมีค่าเพิ่มขึ้น ฟลักซ์ยูเรียในช่วงแรก (คือระหว่างช่วงเวลา $0 < t \leq t_s$) จะมีค่าลดลง (สำหรับในกรณีตัวอย่างนี้ เมื่อความหนาของชั้นเคลือบเพิ่มจาก 0.5 เท่า ไปเป็น 1.5 เท่า ค่าฟลักซ์ยูเรียเปลี่ยนจากประมาณ 0.065 กรัม/ตร.ซม./วัน ไปเป็นประมาณ 0.022 กรัม/ตร.ซม./วัน) และในช่วงแรกนี้ฟลักซ์ยูเรีย มีค่าลดลงอย่างช้า ๆ เพราะความเข้มข้นในแคปซูลยังเป็นความเข้มข้นอิมิตัวของปุ๋ยยูเรียในสารละลาย

สำหรับในช่วงที่สอง (คือช่วง $t > t_s$) ฟลักซ์ยูเรียจะลดลงอย่างรวดเร็ว และจะเห็นได้ว่า เมื่อความหนาของชั้นเคลือบเพิ่มขึ้น ค่า t_s จะเพิ่มขึ้น (สำหรับกรณีตัวอย่างนี้ เมื่อความหนาของชั้นเคลือบเปลี่ยนจาก 0.5 เท่า ไปเป็น 1.5 เท่า เวลา t_s จะเพิ่มขึ้นจาก 2 วันไปเป็น 7 วัน) ซึ่งเกิดจากการที่ในช่วงแรกปุ๋ยถูกปลดปล่อยออกมาน้อยกว่าเมื่อความหนาของชั้นเคลือบมากกว่า ทำให้ปริมาณปุ๋ยในแคปซูลลดลงช้ากว่า จึงทำให้เวลา t_s ซึ่งเป็นเวลาที่ความเข้มข้นของปุ๋ยยูเรียในแคปซูลมีค่าน้อยกว่าความเข้มข้นอิมิตัวมีเวลานานขึ้น

ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าความหนาของชั้นเคลือบมีผลต่อการปลดปล่อยปุ๋ยยูเรียออกจากแคปซูล โดยเมื่อความหนาของชั้นเคลือบเพิ่มขึ้น ฟลักซ์ยูเรียจะลดลง แต่จะเพิ่มเวลา t_s มากขึ้น และทำให้ระยะเวลาการใช้งานของปุ๋ยยูเรียทั้งหมดนานขึ้น



รูปที่ 5.13 พลักซ์ยูเรียที่ถูกปลดปล่อยจากแคปซูลตัวอย่างเมื่อเปลี่ยนแปลงความหนาของชั้นเคลือบ (กำหนดให้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเม็ดยูเรียคงที่)

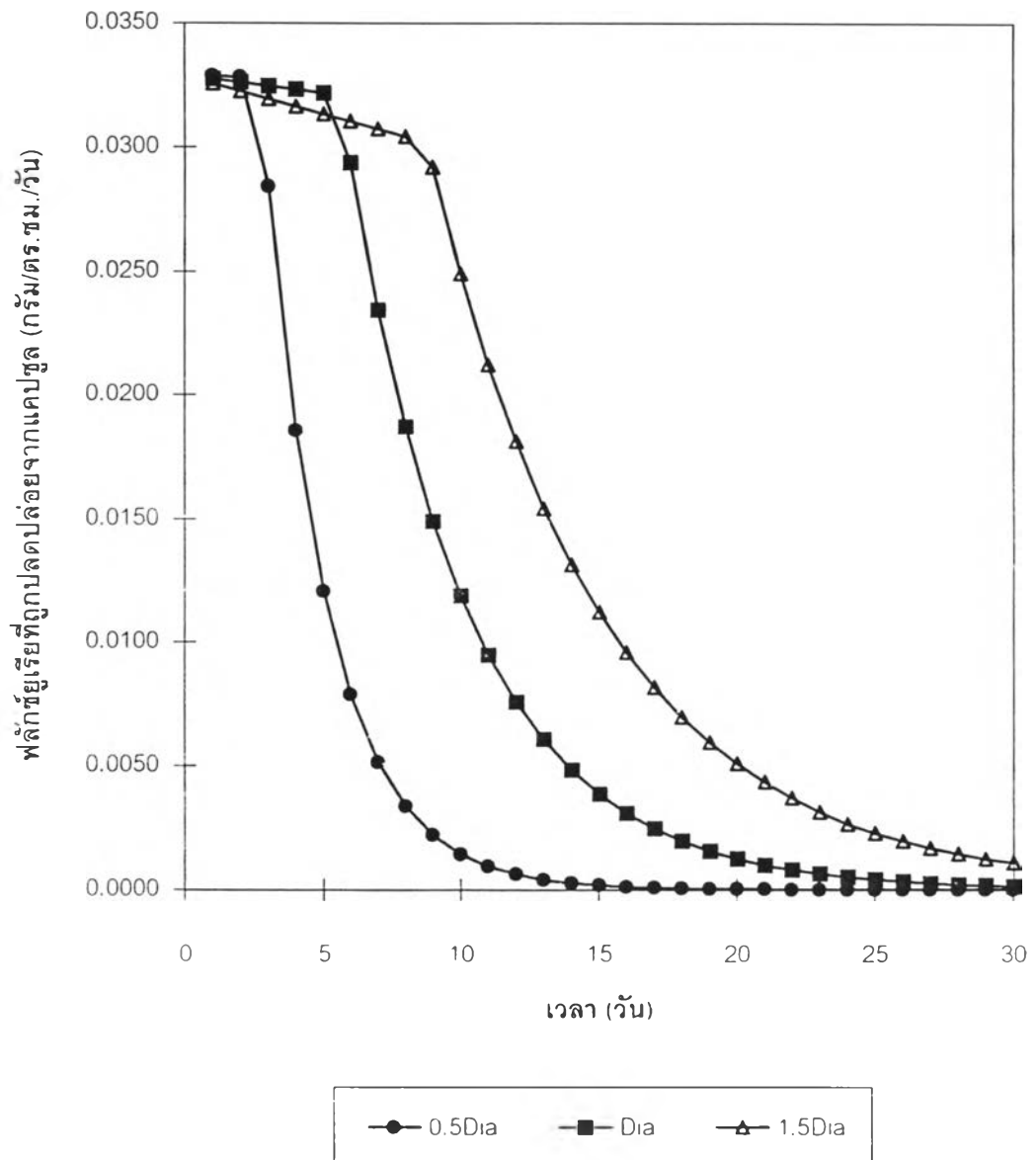
5.6 ผลของขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของเม็ดยูเรียต่อการปลดปล่อยปุ๋ยยูเรียจากแคปซูล

เพื่อศึกษาเป็นกรณีตัวอย่างได้กำหนดให้แคปซูลมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเม็ดยูเรีย 1.5 ซม. (หรือกำหนดให้มีปุ๋ยยูเรียเริ่มต้น 2.359 กรัม) ความหนาของชั้นเคลือบเท่ากับ 0.03 ซม. และให้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่มีค่าเท่ากับ 2×10^{-8} ตร.ซม./วินาที การศึกษานี้จะศึกษาผลของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเม็ดยูเรียเมื่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเม็ดยูเรียมีค่าเป็น 0.5 เท่า 1 เท่า และ 1.5 เท่าของค่าที่กำหนดตามลำดับ และผลการคำนวณที่ได้จากแบบจำลอง เมื่อวาดเป็นกราฟระหว่างฟลักซ์ยูเรียที่ถูกปลดปล่อยจากแคปซูลกับเวลา จะแสดงได้ดังรูปที่ 5.14

จากรูปที่ 5.14 จะพบว่าเมื่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเม็ดยูเรียมีค่าเพิ่มขึ้น ฟลักซ์ยูเรียในช่วงแรก (คือระหว่างช่วงเวลา $0 < t \leq t_s$) จะมีค่าเปลี่ยนแปลงไม่มาก (สำหรับในกรณีตัวอย่างนี้ เมื่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเม็ดยูเรียเพิ่มจาก 0.5 เท่า ไปเป็น 1.5 เท่า ค่าฟลักซ์ยูเรียเปลี่ยนจากประมาณ 0.0328 กรัม/ตร.ซม./วัน ไปเป็นประมาณ 0.0325 กรัม/ตร.ซม./วัน) และในช่วงแรกนี้ฟลักซ์ยูเรีย มีค่าลดลงอย่างช้า ๆ เพราะความเข้มข้นในแคปซูลยังเป็นความเข้มข้นอิมิตัวของปุ๋ยยูเรียในสารละลาย

สำหรับในช่วงที่สอง (คือช่วง $t > t_s$) ฟลักซ์ยูเรียจะลดลงอย่างรวดเร็ว และจะเห็นได้ว่า เมื่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเม็ดยูเรียเพิ่มขึ้น ค่า t_s จะเพิ่มขึ้น (สำหรับกรณีตัวอย่าง เมื่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเม็ดยูเรียเปลี่ยนจาก 0.5 เท่า ไปเป็น 1.5 เท่า เวลา t_s จะเพิ่มขึ้นจาก 2 วันไปเป็น 8 วัน) ซึ่งเกิดจากขนาดเม็ดปุ๋ยยูเรียที่เพิ่มขึ้นจะมีปริมาณยูเรียเริ่มต้นมากขึ้น จึงทำให้มีเวลานานขึ้นกว่าจะมาถึงเวลา t_s ซึ่งเป็นเวลาที่ความเข้มข้นของปุ๋ยยูเรียในแคปซูลมีค่าน้อยกว่าความเข้มข้นอิมิตัว

ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเม็ดยูเรียไม่มีผลต่อการปลดปล่อยยูเรียออกจากแคปซูลในช่วงแรก แต่จะเพิ่มเวลา t_s มากขึ้น และทำให้ระยะเวลาการใช้งานของยูเรียทั้งหมดนานขึ้น



รูปที่ 5.14 ฟลักซ์ยูเรเนียมที่ถูกปลดปล่อยจากแคปซูลมาตรฐานเมื่อเปลี่ยนแปลงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเม็ดยูเรเนียม (กำหนดให้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ และความหนาของชั้นเคลือบคงที่)

5.7 ผลของความหนาที่มีต่อแบบจำลองและสมการของ Lu และ Lee

จากการศึกษาในหัวข้อ 5.2 จะเห็นว่าแบบจำลองกับสมการของ Lu และ Lee [27] ให้ผลการคำนวณที่ใกล้เคียงกัน แม้ว่าแบบจำลองจะแก้สมการแบบสภาวะไม่คงที่ (unsteady state) และสมการของ Lu และ Lee ใช้สมมติฐานว่าการแพร่เกิดขึ้นที่สภาวะการแพร่ผ่านคงที่เทียม (pseudo-steady state) และเนื่องจากตัวอย่างแคปซูลมีความหนาไม่มากทำให้การใช้สมมติฐานสภาวะการแพร่ผ่านคงที่เทียมเหมาะสม ดังนั้นจะศึกษาดูว่าแบบจำลองกับสมการของ Lu และ Lee จะแตกต่างกันเมื่อความหนาของชั้นเคลือบเป็นเท่าใด

เพื่อศึกษาเป็นกรณีตัวอย่างได้กำหนดให้แคปซูลมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเม็ดยูเรีย 1.5 ซม. (หรือกำหนดให้มีปฏิกิริยาเริ่มต้น 2.359 กรัม) ความหนาของชั้นเคลือบเท่ากับ 0.03 ซม. และให้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่มีค่าเท่ากับ 2×10^{-8} ตร. ซม./วินาที ทดลองเปลี่ยนความหนาดั้งเดิม 1 เท่า ถึง 10 เท่าของความหนาของชั้นเคลือบที่กำหนด ดังแสดงได้ดังตารางที่ 5.2 และเปรียบเทียบความถูกต้องโดยใช้ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจเป็นเกณฑ์ตัดสิน

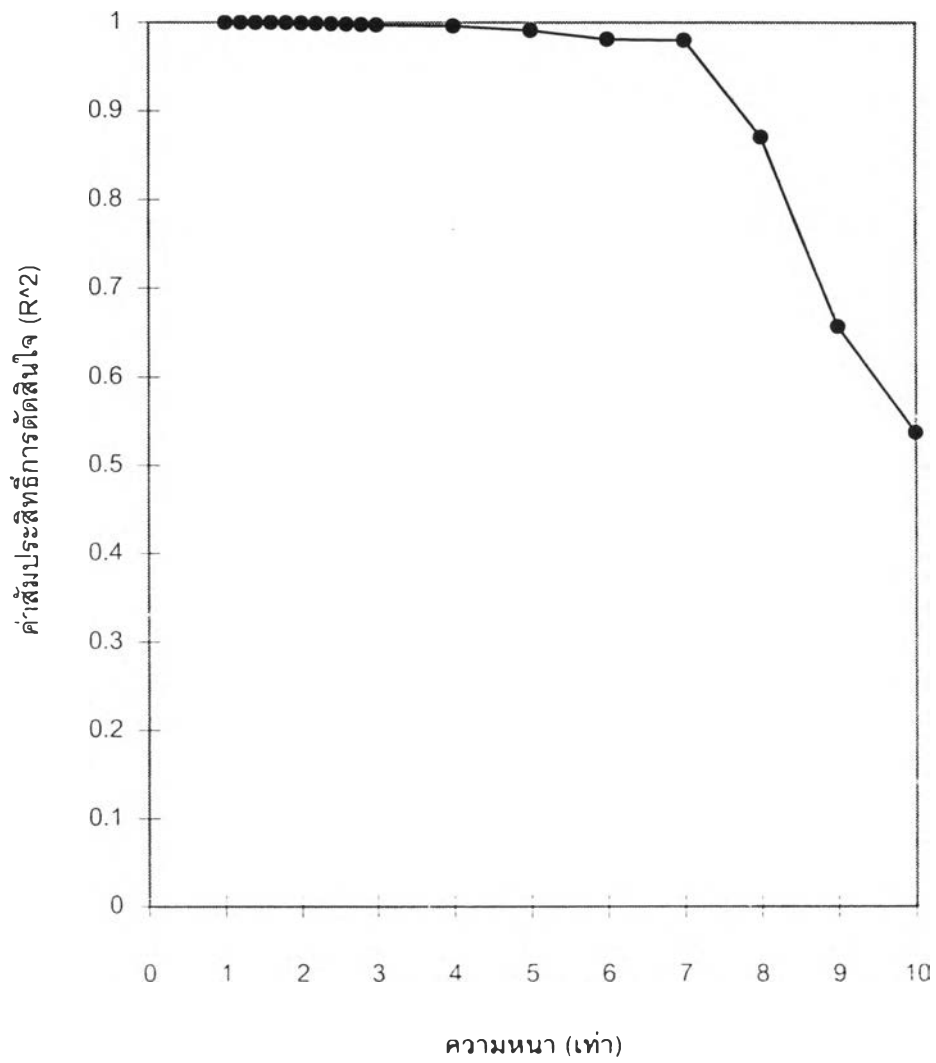
ผลการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจจากการเปรียบเทียบผลการคำนวณจากแบบจำลองและสมการของ Lu และ Lee ที่ความหนาด่าง ๆ กัน แสดงได้ดังรูปที่ 5.15 และตารางที่ 5.2

จากรูปที่ 5.15 จะเห็นได้ว่าในช่วงแรกเมื่อความหนาเพิ่มขึ้น ผลการคำนวณไม่แตกต่างกัน แต่เมื่อความหนาเพิ่มขึ้นถึงค่าค่าหนึ่ง ผลการคำนวณจากสมการของ Lu และ Lee จะแตกต่างจากแบบจำลองมาก ในกรณีตัวอย่างนี้เมื่อความหนาเพิ่มถึง 7 เท่า ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจอยู่ในช่วง 0.98 แต่เมื่อความหนาดั้งเดิม 8 เท่า ถึง 10 เท่า ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจลดลงอยู่ในช่วง 0.87 - 0.54

ดังนั้นพอสรุปได้ว่าถ้าความหนาของชั้นเคลือบไม่มากเกินไป ทั้งแบบจำลองและสมการของ Lu และ Lee ใช้ได้ดีเช่นเดียวกัน แต่ถ้าชั้นเคลือบมีความหนามาก การแก้สมการแบบสถานะไม่คงที่ (unsteady state) จะเหมาะสมกว่าวิธีการแก้แบบสถานะการแพร่ผ่านคงที่เทียม (pseudo-steady state)

ตารางที่ 5.2 ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจระหว่างผลการคำนวณจากแบบจำลอง
กับสมการของ Lu และ Lee เมื่อเปลี่ยนแปลงความหนา

ความหนา (เท่า)	ความหนาของชั้นเคลือบ (ซม.)	ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R ²)
1.0	0.030	0.9997
1.2	0.036	0.9997
1.4	0.042	0.9996
1.6	0.048	0.9995
1.8	0.054	0.9993
2.0	0.060	0.9990
2.2	0.066	0.9987
2.4	0.072	0.9983
2.6	0.078	0.9979
2.8	0.084	0.9975
3.0	0.090	0.9970
4.0	0.120	0.9961
5.0	0.150	0.9909
6.0	0.180	0.9809
7.0	0.210	0.9799
8.0	0.240	0.8704
9.0	0.270	0.6565
10.0	0.300	0.5369



รูปที่ 5.15 ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจจากการเปรียบเทียบผลการคำนวณจากแบบจำลองกับสมการ Lu และ Lee [27] โดยเปลี่ยนแปลงความหนา

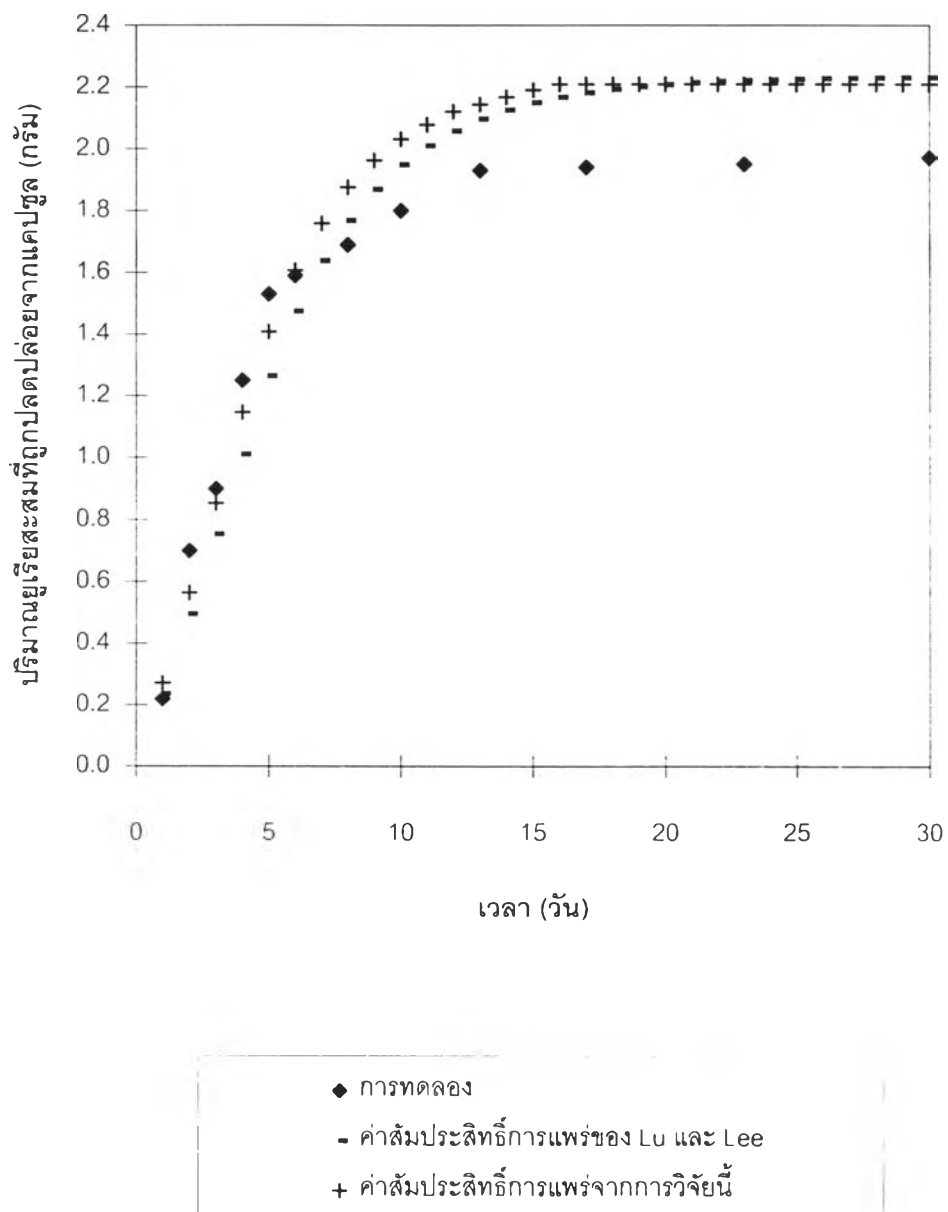
5.8 การคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของยูเรียผ่านชั้นเคลือบ

จากการศึกษาในหัวข้อ 5.2 ในการคำนวณปริมาณยูเรียสะสมที่ถูกปลดปล่อยออกจากแคปซูล ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ที่ใช้เป็นค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ที่ได้จากงานวิจัยของ Lu และ Lee ซึ่ง Lu และ Lee [27] ได้ค่าเหล่านี้จากการพิตสมการที่แก้แบบสภาวะการแพร่ผ่านคงที่เทียม (pseudo-steady state) ที่เขานำเสนอเข้ากับผลการทดลอง ดังนั้นในส่วนนี้จะทำการคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของแคปซูลตัวอย่างทั้ง 5 ตัวอย่าง ด้วยวิธีการลองผิดลองถูก (trial & error) โดยเลือกค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ที่เหมาะสมแทนในแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้ คำนวณหาค่าความเข้มข้นของยูเรียที่ถูกปลดปล่อยออกจากแคปซูล และพิตผลการคำนวณเข้ากับผลการทดลองเปรียบเทียบความถูกต้องโดยใช้ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจเป็นเกณฑ์ตัดสิน

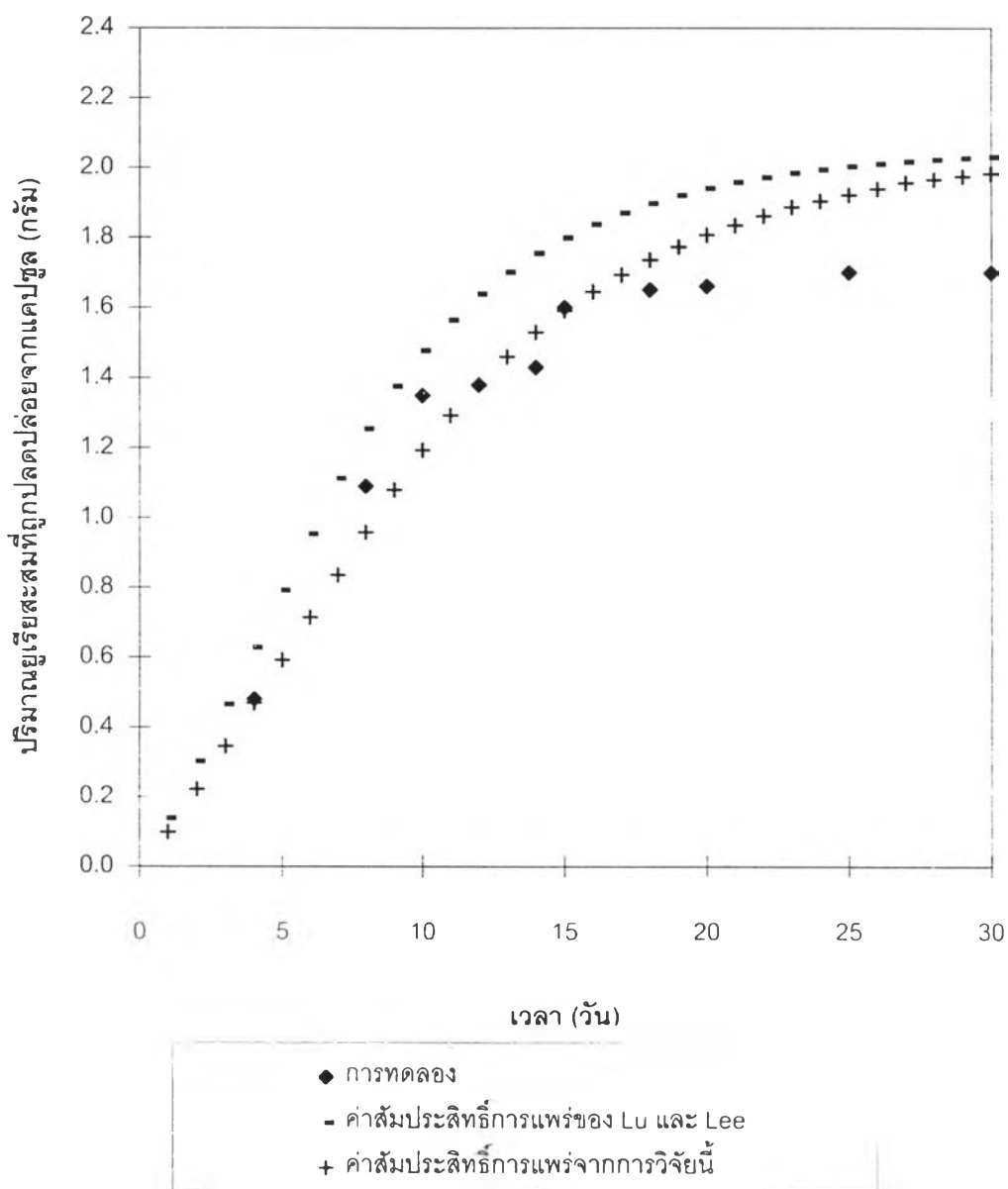
ผลการคำนวณปริมาณยูเรียสะสมที่ถูกปลดปล่อยจากแคปซูลทั้ง 5 ตัวอย่าง เมื่อใช้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ที่ได้จากการลองผิดลองถูกได้แสดงดังรูปที่ 5.16 - 5.20

จากรูปที่ 5.16 - 5.20 โดยในแต่ละรูปสัญลักษณ์ ◆ แทนผลการทดลอง - แทนผลการคำนวณที่ใช้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของ Lu และ Lee [27] + แทนผลการคำนวณที่ได้จากค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ที่ดีที่สุดที่ได้จากการลองผิดลองถูก จะเห็นได้ว่าผลการคำนวณที่ได้จากการใช้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ที่ได้จากการลองผิดลองถูกจะให้กราฟที่ใกล้เคียงกับผลการทดลองมากขึ้นกว่าการใช้ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจของ Lu และ Lee ทุกตัวอย่าง ซึ่งจะเห็นได้จากค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจที่คำนวณได้ดังแสดงในตารางที่ 5.3 โดยค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจเมื่อใช้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ที่ได้จากงานวิจัยนี้อยู่ในช่วง 0.84 - 0.96 ซึ่งมากกว่าค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจเมื่อใช้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของ Lu และ Lee

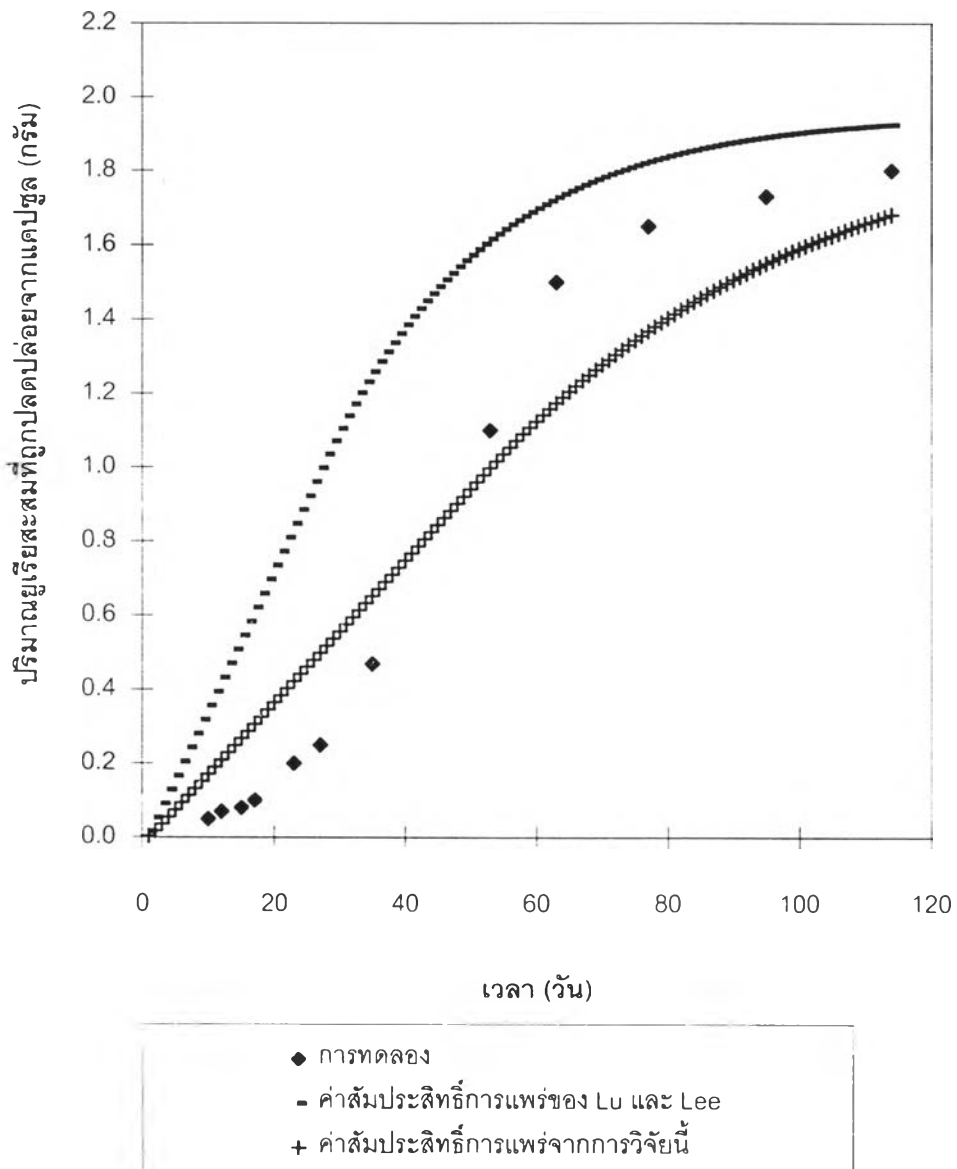
ดังนั้นสรุปได้ว่าเมื่อใช้แบบจำลองที่พัฒนาขึ้นคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่
จะได้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ที่แตกต่างจากค่าที่ Lu และ Lee [27] เสนอ



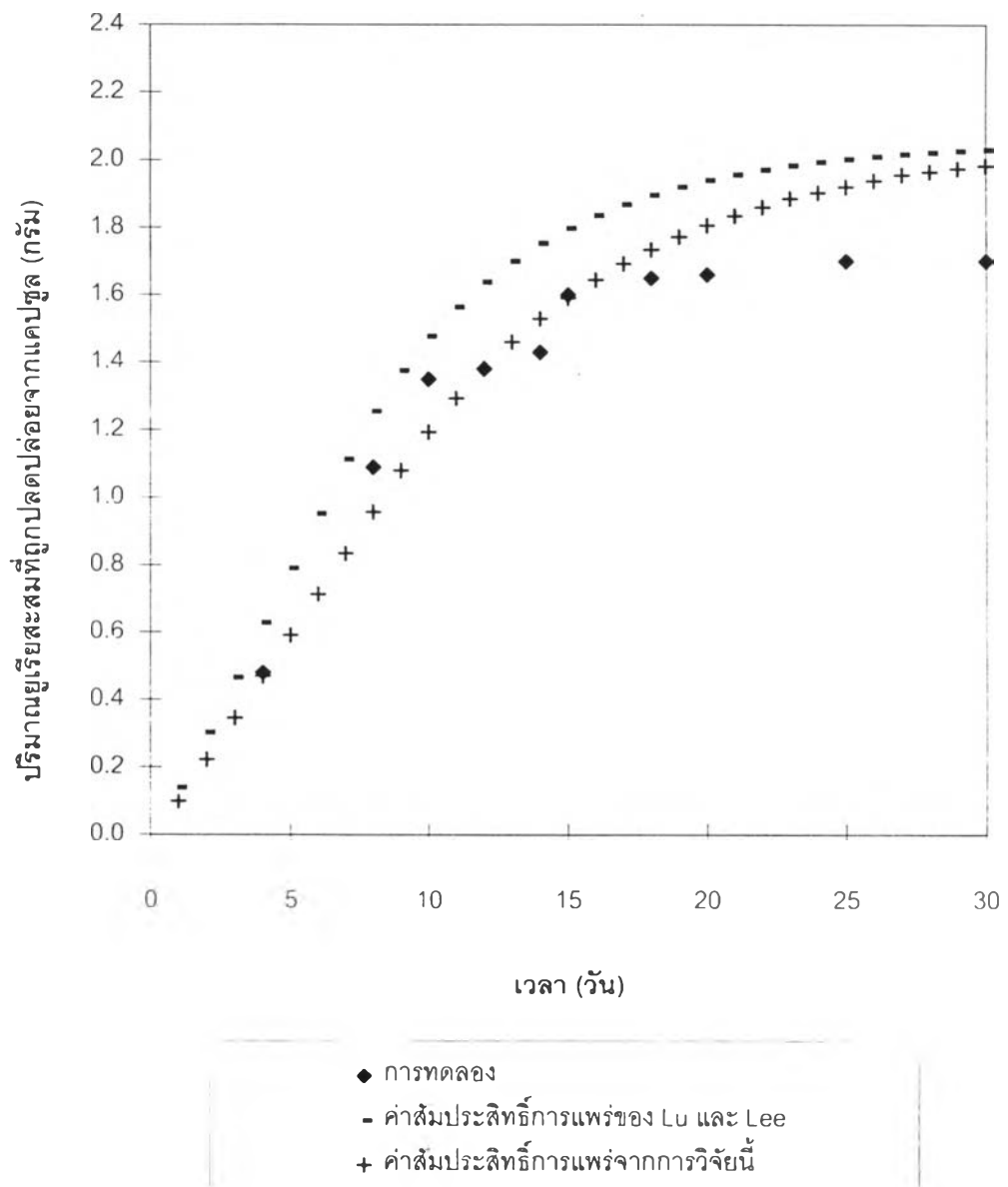
รูปที่ 5.16 ปริมาณยูเรียสะสมที่ถูกปลดปล่อยจากแคปซูลตัวอย่าง D
เมื่อใช้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ที่ได้จากการลองผิดลองถูก เปรียบ
เทียบกับผลการทดลองและค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของ Lu และ Lee



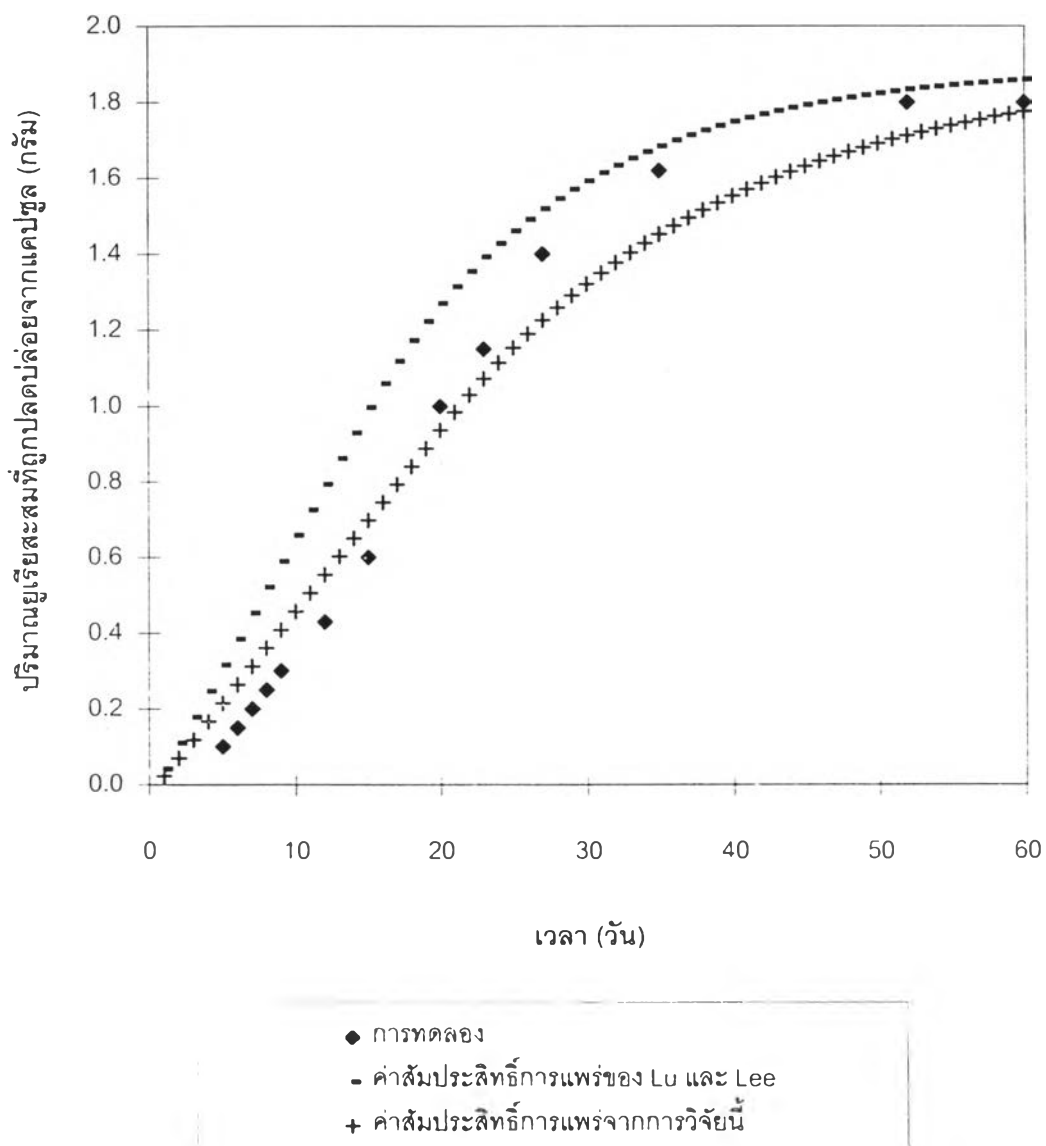
รูปที่ 5.17 ปริมาณยูเรียสะสมที่ถูกปลดปล่อยจากแคปซูลตัวอย่าง F เมื่อใช้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ที่ได้จากการลองผิดลองถูก เปรียบเทียบกับผลการทดลองและค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของ Lu และ Lee



รูปที่ 5.18 ปริมาณยูเรียสะสมที่ถูกปลดปล่อยจากแคปซูลตัวอย่าง L เมื่อใช้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ที่ได้จากการลองผิดลองถูกเปรียบเทียบเทียบกับผลการทดลองและค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของ Lu และ Lee



รูปที่ 5.19 ปริมาณยูเรียสะสมที่ถูกปลดปล่อยจากแคปซูลตัวอย่าง M เมื่อใช้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ที่ได้จากการลองผิดลองถูก เปรียบเทียบกับผลการทดลองและค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของ Lu และ Lee



รูปที่ 5.20 ปริมาณยูเรียสะสมที่ถูกปลดปล่อยจากแคปซูลตัวอย่าง Q
เมื่อใช้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ที่ได้จากการทดลองฝังลองถูก เปรียบ
เทียบกับผลการทดลองและค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของ Lu และ Lee

ตารางที่ 5.8 ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจระหว่างผลการคำนวณจากแบบจำลองที่ใช้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่
ที่หาได้จากงานวิจัยนี้กับผลการทดลอง

ตัวอย่าง	ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ ของ Lu และ Lee	ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ	ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ ที่ได้จากการวิจัยนี้	ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ
D	2.21E-08	0.8726	2.50E-08	0.8950
F	1.72E-08	0.5224	1.30E-08	0.8379
L	3.95E-09	0.5490	2.00E-09	0.9169
M	2.47E-08	0.8558	1.80E-08	0.9623
Q	8.52E-09	0.8515	6.00E-09	0.9683