

บทที่ 4

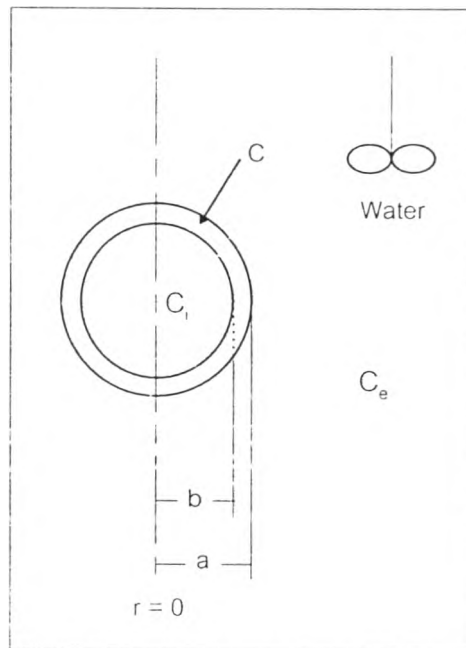
การพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

4.1 ระบบและสมมติฐาน

การพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการถ่ายโอนปุ๋ยยูเรียผ่านชั้นเคลือบ
ยางธรรมชาติ ใช้สมการการแพร่แบบฟิกเกียน (Fickian diffusion equations) โดย
กำหนดระบบและสมมติฐานดังนี้

1. ไมโครแคปซูลหรือเม็ดปุ๋ยยูเรียเคลือบด้วยยางธรรมชาติ มีรูปร่างทรงกลม
ขนาดสม่ำเสมอ รัศมีภายในขนาดเท่ากับ b รัศมีภายนอกขนาดเท่ากับ a ดัง
แสดงในรูปที่ 4.1
2. ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ในชั้นเคลือบมีค่าน้อยกว่าค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ใน
แกนกลางมาก ดังนั้นจึงสมมติว่าความเข้มข้นของยูเรียในแกนกลาง
สม่ำเสมอเท่ากันทั้งแกนกลาง
3. สารละลายภายนอกแคปซูลมีการผสมกันอย่างดี ดังนั้นถือว่าความเข้มข้น
ของสารละลายภายนอกแคปซูลมีความเข้มข้นเท่ากันทุกจุด คือไม่มีผลต่าง
ความเข้มข้นเกิดขึ้นที่ภายนอกแคปซูล
4. แคปซูลแต่ละอันมีขนาดและคุณสมบัติเหมือนกัน และเมื่อเวลาใด ๆ แต่ละ
แคปซูลจะมียูเรียอยู่เท่ากัน
5. แคปซูลมีขนาดไม่เปลี่ยนแปลง กล่าวคือยางธรรมชาติไม่เกิดการบวมพอง
เนื่องจากการแพร่ของสารละลาย
6. ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของยูเรียผ่านชั้นเคลือบยางธรรมชาติมีค่าคงที่

7. การแพร่เป็นไปตามกฎข้อที่หนึ่งของฟิก
8. ไม่เกิดปฏิกิริยาเคมีระหว่างนํ้ายูเรียกับชั้นเคลือบ



รูปที่ 4.1 ระบบการปลดปล่อยนํ้ายูเรียในน้ำ

4.2 การสร้างสมการการถ่ายโอนของระบบที่ศึกษา

จากระบบและสมมติฐานที่กำหนดในข้อ 4.1 จะสามารถทำสมดุลมวลในชั้นเคลือบยางหรืออธิบายปรากฏการณ์การถ่ายโอนมวลยูเรียผ่านชั้นเคลือบยางธรรมชาติได้ด้วยกฎข้อที่สองของฟิค (Fick's law) จากตารางที่ 2.5 ดังนี้ .

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \left(\frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial C}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2 \sin \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\sin \theta \frac{\partial C}{\partial \theta} \right) + \frac{1}{r^2 \sin^2 \theta} \frac{\partial^2 C}{\partial \phi^2} \right) \quad (4.1)$$

เนื่องจากแคปซูลมีรูปร่างทรงกลม ขนาดสม่ำเสมอ และถือว่าเกิดการแพร่ในทิศทางรัศมีเท่านั้น ดังนั้นสมการ (4.1) จะกลายเป็น

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \left(\frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial C}{\partial r} \right) \right) \quad b < r < a \quad (4.2)$$

เมื่อ $\frac{\partial C}{\partial t}$ = อัตราการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของยูเรียในชั้นเคลือบ

$\frac{\partial C}{\partial r}$ = ผลต่างความเข้มข้นของยูเรียในชั้นเคลือบ

D = ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของยูเรียในชั้นเคลือบ

r = ตำแหน่งในเชิงรัศมีตามทิศทางของการแพร่

t = เวลา

a = รัศมีภายนอกของแคปซูล

b = รัศมีภายในของแคปซูล

4.3 สภาวะเริ่มต้นและสภาวะขอบเขต

การพัฒนาแบบจำลอง กำหนดสภาวะเริ่มต้นและสภาวะขอบเขตดังนี้

สภาวะเริ่มต้น

เริ่มต้นไม่มียูเรียในชั้นเคลือบยางธรรมชาติ และในสารละลายภายนอก

สภาวะขอบเขต

แบ่งการวิเคราะห์เป็น 2 ช่วง

ช่วงแรกเริ่มจากปล่อยแคปซูลยูเรียในน้ำ จนกระทั่งยูเรียภายในแกนกลางละลายหมด トラบเท่าที่ยูเรียในแกนกลางยังละลายไม่หมด ความเข้มข้นในแกนกลางจะมีค่าคงที่ และเป็นความเข้มข้นอิ่มตัวที่อุณหภูมิ นั้น ตามความสัมพันธ์ $C_{sat} = (6.96 \times 10^{-3})T + 0.45$ โดย T มีหน่วยเป็น องศาเซลเซียส ขณะที่ความเข้มข้นของสารละลายภายนอกเพิ่มขึ้น โดยปริมาตรของสารละลายภายนอกมีปริมาณจำกัด (limited bulk solution)

ช่วงที่สองเริ่มหลังจากที่ยูเรียในแกนกลางละลายหมดแล้ว โดยความเข้มข้นในแกนกลางมีการเปลี่ยนแปลงลดลงจากความเข้มข้นอิ่มตัว ขณะที่ความเข้มข้นของสารละลายภายนอกเพิ่มขึ้น

การพัฒนาแบบจำลองในช่วงแรก

จากสภาวะขอบเขตช่วงแรก ตราบเท่าที่ยูเรียในแกนกลางยังละลายไม่หมด ความเข้มข้นในแกนกลางจะมีค่าคงที่ โดยเป็นความเข้มข้นอิ่มตัว ขณะที่ความเข้มข้นของสารละลายภายนอกเพิ่มขึ้น ดังนั้น

$$C_i(t) = C_{sat} \quad ; \quad 0 < t \leq t_s \quad (4.3)$$

$$C_i = \text{ความเข้มข้นของยูเรียในแกนกลาง}$$

$$C_{sat} = \text{ความเข้มข้นอิ่มตัวของยูเรียที่อุณหภูมิหนึ่ง}$$

$$t_s = \text{เวลาที่ความเข้มข้นในแกนกลางเริ่มลดลงจากความเข้มข้นอิ่มตัว}$$

อัตราการเปลี่ยนแปลงยูเรียภายนอกที่เปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้น อธิบายได้ดังสมการ

$$V_e \frac{\partial C_e(t)}{\partial t} = A_{outer} \cdot q_a \quad ; \quad t > 0 \quad (4.4)$$

โดยที่

$$q_a = -D \left(\frac{\partial C(t)}{\partial r} \right)_a \quad (4.5)$$

ดังนั้นสมการที่ (4.4) จะกลายเป็น

$$V_e \frac{\partial C_e(t)}{\partial t} = A_{outer} \left(-D \left(\frac{\partial C(t)}{\partial r} \right)_a \right) \quad (4.6)$$

เมื่อ $\frac{\partial C_e(t)}{\partial t}$ = อัตราการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของยูเรียในสารละลายภายนอก

A_{outer} = พื้นที่ผิวของชั้นเคลือบด้านนอก

$\left(\frac{\partial C(t)}{\partial r} \right)_a$ = ผลต่างความเข้มข้นของยูเรียที่รอยต่อระหว่างชั้นเคลือบกับสารละลายภายนอก (ที่ $r = a$)

$$V_e = \text{ปริมาตรของสารละลายภายนอก}$$

สำหรับแคปซูลทรงกลม

$$\text{แทนค่า } A_{outer} = 4\pi a^2$$

และจัดรูปสมการที่ 4.6 ใหม่จะได้

$$\frac{\partial C_c(t)}{\partial t} = -\frac{4\pi a^2 D}{V_c} \left(\frac{\partial C(t)}{\partial r} \right)_a \quad (4.7)$$

และกำหนดให้

$$C_i(t) = K_b C(b, t) \quad (4.8)$$

$$C_c(t) = K_a C(a, t) \quad (4.9)$$

เมื่อ $K_b =$ สัมประสิทธิ์การแบ่งแยกที่รอยต่อระหว่างชั้นเคลือบกับแกนกลาง

$K_a =$ สัมประสิทธิ์การแบ่งแยกที่รอยต่อระหว่างชั้นเคลือบกับสารละลายภายนอก

สมการที่ (4.3) และ (4.7) จะจัดใหม่ได้เป็น

$$C(b, t) = \frac{C_{sat}}{K_b} \quad ; 0 < t \leq t_0 \quad (4.10)$$

$$\frac{\partial C(a, t)}{\partial t} = -\frac{4\pi a^2 D}{V_c K_a} \left(\frac{\partial C(r, t)}{\partial r} \right)_a \quad ; t > 0 \quad (4.11)$$

สมการที่ (4.2) (4.10) และ (4.11) เป็นสมการสมดุลย์มวลยูเรียในชั้นเคลือบในสารละลายภายในแคปซูล และในสารละลายภายนอกแคปซูล ตามลำดับ ซึ่งสมการชุดนี้คือแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระบวนการปลดปล่อยยูเรียผ่านชั้นเคลือบข้างในช่วงแรกที่ศึกษาในงานวิจัยนี้

การพัฒนาแบบจำลองในช่วงที่สอง

จากสภาวะขอบเขตช่วงที่สอง หลังจากยูเรียในแกนกลางละลายหมดแล้ว ความเข้มข้นในแกนกลางมีการเปลี่ยนแปลงลดลงจากความเข้มข้นอิมิตัว ขณะที่ความเข้มข้นของสารละลายภายนอกเพิ่มขึ้น ดังนั้นอัตราการเปลี่ยนแปลงยูเรีย ในแกนกลางสัมพันธ์กับผลต่างความเข้มข้นของยูเรียที่รอยต่อระหว่างชั้นเคลือบกับแกนกลางตามกฎข้อที่ 1 ของฟิก ดังนี้

$$-V_i \frac{\partial C_i(t)}{\partial t} = A_{inner} \cdot q_b \quad ; t > t_s \quad (4.12)$$

ตามกฎข้อที่ 1 ของฟิก

$$q_b = -D \left(\frac{\partial C(t)}{\partial r} \right)_b \quad (4.13)$$

ดังนั้นสมการที่ 4.12 จะกลายเป็น

$$-V_i \frac{\partial C_i(t)}{\partial t} = A_{inner} \left(-D \left(\frac{\partial C(t)}{\partial r} \right)_b \right) \quad (4.14)$$

เมื่อ $\frac{\partial C_i(t)}{\partial t}$ = อัตราการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของยูเรียในแกนกลาง

$\left(\frac{\partial C(t)}{\partial r} \right)_b$ = ผลต่างความเข้มข้นของยูเรียที่รอยต่อระหว่างชั้นเคลือบกับแกนกลาง (ที่ $r = b$)

A_{inner} = พื้นที่ผิวของชั้นเคลือบด้านใน

V_i = ปริมาตรภายในของแกนกลาง

สำหรับแคปซูลทรงกลม

$$A_{inner} = 4\pi b^2$$

$$V_i = \frac{4}{3} \pi b^3$$

แทนค่าต่าง ๆ และจัดรูปสมการ (4.14) ใหม่จะได้

$$\frac{\partial C_i(t)}{\partial t} = \frac{3D}{b} \left(\frac{\partial C(t)}{\partial r} \right)_b \quad (4.15)$$

และจากสมการที่ (4.8) จัดรูปสมการที่ 4.15 ใหม่ จะได้สมการดังนี้

$$\frac{\partial C(b,t)}{\partial t} = \frac{3D}{bK_b} \left(\frac{\partial C(r,t)}{\partial r} \right)_b ; \quad t > t_s \quad (4.16)$$

อัตราการเปลี่ยนแปลงยูเรียภายนอกที่เปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้น อธิบายได้ดังสมการที่ (4.11)

$$\frac{\partial C(a,t)}{\partial t} = -\frac{4\pi a^2 D}{V_r K_a} \left(\frac{\partial C(r,t)}{\partial r} \right)_a ; \quad t > 0 \quad (4.11)$$

สมการ (4.2) (4.16) และ (4.11) เป็นสมการสมดุลย์มวลยูเรียในชั้นเคลือบ ในสารละลายภายในแคปซูล และในสารละลายภายนอกแคปซูล ตามลำดับ ซึ่งสมการชุดนี้คือแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระบวนการปลดปล่อยยูเรียผ่านชั้นเคลือบยางที่ศึกษาในช่วงที่สองในงานวิจัยนี้

4.4 การแก้ปัญหาเชิงตัวเลข (numerical solution)

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้ถูกพัฒนาขึ้นจะถูกคำนวณด้วยวิธีเชิงตัวเลข โดยเริ่มจากการจัดรูปสมการของแบบจำลองให้อยู่ในรูปของตัวแปรไร้มิติดังนี้

จากสมการ (4.2) แทน $U=Cr$ จะได้

$$\frac{\partial U}{\partial t} = D \frac{\partial^2 U}{\partial r^2} \quad (4.17)$$

กำหนดตัวแปรไร้มิติ (dimensionless variables) ดังนี้

$$\begin{aligned} \phi &= \frac{U - U_0}{U_{sat} - U_0} & \eta &= \frac{r - b}{a - b} & \tau &= \frac{Dt}{(a - b)^2} \\ L &= \frac{a}{b} & V_r &= \frac{V_c}{4\pi a^3 / 3} \end{aligned} \quad (4.18)$$

โดย $U_0 = C_0 r$ และ $U_{sat} = C_{sat} r$

C_0 = ความเข้มข้นเริ่มต้นของยูเรียในชั้นเคลือบ

C_{sat} = ความเข้มข้นอิ่มตัว

V - ปริมาตรสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรภายนอกกับปริมาตรของแคปซูล

หลังจากแทนตัวแปรไร้มิติเหล่านี้ ลงในสมการ (4.17) จะได้

$$\frac{\partial \phi}{\partial \tau} = \frac{\partial^2 \phi}{\partial \eta^2} \quad (4.19)$$

และสมการสภาวะขอบเขต สมการที่ (4.10) (4.16) และ (4.11) จะกลายเป็นสมการที่ (4.20) (4.21) และ (4.22) ตามลำดับ

$$\phi_b = \frac{I}{K_b} \quad ; \quad 0 < \tau \leq \tau_s \quad (4.20)$$

$$\frac{\partial \phi_b}{\partial \tau} = \frac{3(L-1)}{K_b} \left(\frac{\partial \phi}{\partial \eta} \right)_{\eta=0} ; \quad \tau > \tau_s \quad (4.21)$$

$$\frac{\partial \phi_a}{\partial \tau} = -\frac{3}{V_r K_a} \left(1 - \frac{1}{L} \right) \left(\frac{\partial \phi}{\partial \eta} \right)_{\eta=1} ; \quad \tau > 0 \quad (4.22)$$

ต่อจากนั้นโดยการใ้การประมาณเชิงตัวเลข (numerical approximations) ด้วยวิธี explicit finite difference

$$\frac{\partial \phi}{\partial \tau} = \frac{\phi(\eta, \tau + \Delta\tau) - \phi(\eta, \tau)}{\Delta\tau} \quad (4.23)$$

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial \eta^2} = \frac{\phi(\eta + \Delta\eta, \tau) - 2\phi(\eta, \tau) + \phi(\eta - \Delta\eta, \tau)}{(\Delta\eta)^2} \quad (4.24)$$

ดังนั้นสมการ (4.19) เขียนใหม่ได้ดังนี้

$$\phi(\eta, \tau + \Delta\tau) = \lambda \{ \phi(\eta - \Delta\eta, \tau) + \phi(\eta + \Delta\eta, \tau) \} + (1 - 2\lambda) \phi(\eta, \tau) \quad (4.25)$$

$$\text{เมื่อ } \lambda = \frac{\Delta\tau}{\Delta\eta^2}$$

ที่สภาวะขอบเขตชั้นเคลือบด้านใน $0 < \tau \leq \tau_s$ สมการ (4.20) จะได้

$$\phi_b(\tau) = \frac{1}{K_b} ; \quad 0 < \tau \leq \tau_s \quad (4.26)$$

และที่สภาวะขอบเขตชั้นเคลือบด้านในสมการ (4.21) จะได้

$$\frac{\partial \phi_b}{\partial \tau} = \frac{\phi_b(\tau + \Delta\tau) - \phi_b(\tau)}{\Delta\tau} \quad (4.27)$$

$$\left(\frac{\partial \phi}{\partial \eta} \right)_{\eta=0} = \frac{\phi(1) - \phi(0)}{\Delta\eta} \quad (4.28)$$

ดังนั้นสมการ (4.21) จะกลายเป็น

$$\phi_b(\tau + \Delta\tau) = \phi_b(\tau) + \frac{3}{K_b} \frac{\Delta\tau}{\Delta\eta} (L - I)(\phi_{(I)} - \phi_{(0)}) ; \tau > \tau_s \quad (4.29)$$

เมื่อ $\phi_{(0)}$ = ความเข้มข้นโร้มิติที่ผิวด้านในของชั้นเคลือบ

$\phi_{(I)}$ = ความเข้มข้นโร้มิติที่ตำแหน่ง $\Delta\eta$ จากผิวด้านในของชั้นเคลือบ

ที่สภาวะขอบเขตชั้นเคลือบด้านนอก จะได้

$$\frac{\partial\phi_u}{\partial\tau} = \frac{\phi_u(\tau + \Delta\tau) - \phi_u(\tau)}{\Delta\tau} \quad (4.30)$$

$$\left(\frac{\partial\phi}{\partial\eta}\right)_{\eta=I} = \frac{\phi_{(N)} - \phi_{(N-I)}}{\Delta\eta} \quad (4.31)$$

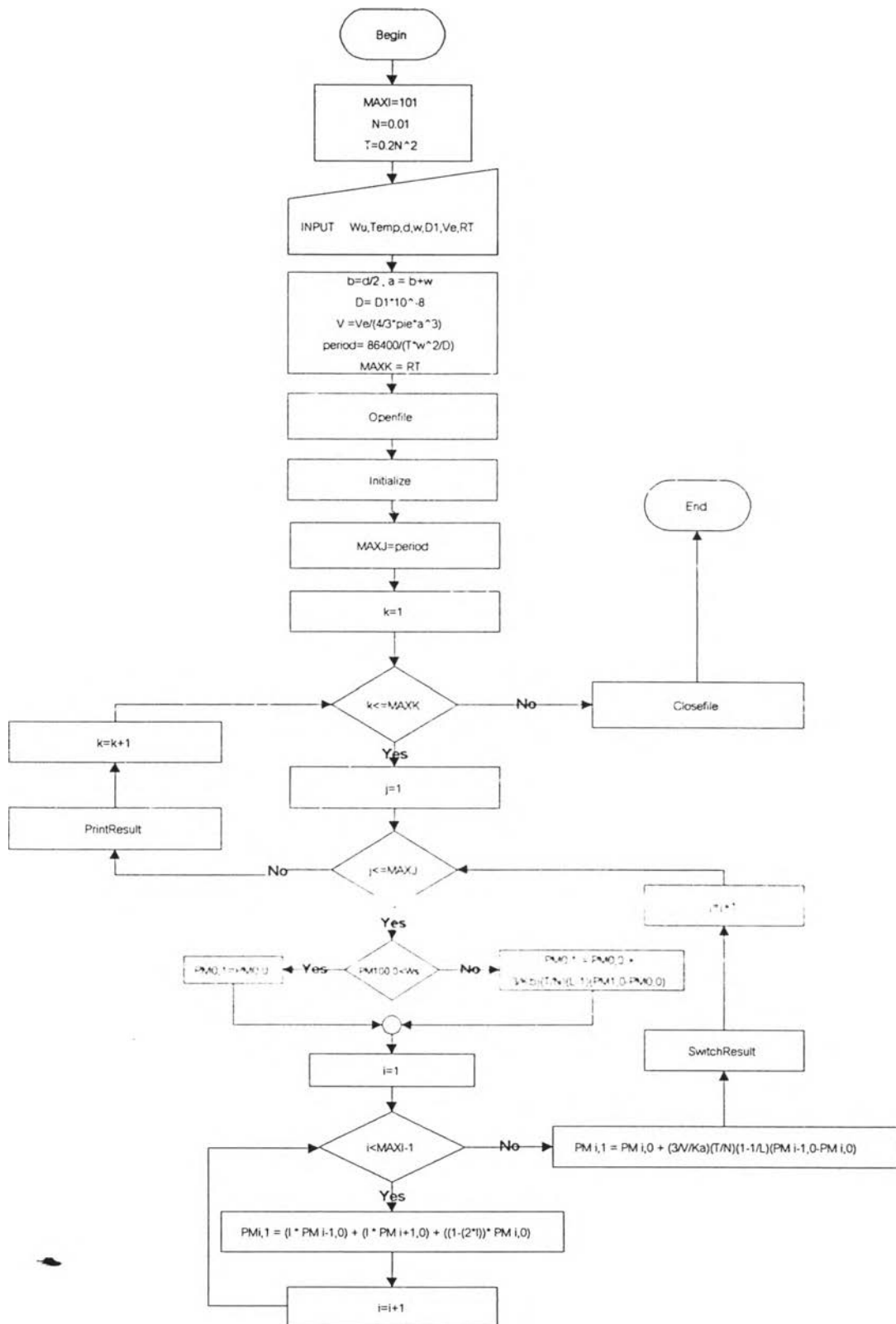
ดังนั้นสมการ (4.22) จะกลายเป็น

$$\phi_u(\tau + \Delta\tau) = \phi_u(\tau) + \frac{3}{V_r K_u} \frac{\Delta\tau}{\Delta\eta} \left(1 - \frac{I}{L}\right) (\phi_{(N-I)} - \phi_{(N)}) ; \tau > 0 \quad (4.32)$$

เมื่อ $\phi_{(N)}$ = ความเข้มข้นโร้มิติที่ผิวด้านนอกของชั้นเคลือบ

$\phi_{(N-I)}$ = ความเข้มข้นโร้มิติที่ตำแหน่ง $\Delta\eta$ จากผิวด้านนอก
ของชั้นเคลือบ

สมการที่ (4.25) (4.26) และ (4.32) ที่ได้จะเป็นสมการที่ใช้คำนวณหาความเข้มข้นของปุ๋ยยูเรียในชั้นเคลือบ ที่ผิวด้านในของชั้นเคลือบและที่ผิวด้านนอกของชั้นเคลือบ ณ เวลา $0 < \tau \leq \tau_s$ และสมการที่ (4.25) (4.29) และ (4.32) จะเป็นสมการที่ใช้คำนวณหาความเข้มข้นของปุ๋ยยูเรียในชั้นเคลือบ ที่ผิวด้านในของชั้นเคลือบและที่ผิวด้านนอกของชั้นเคลือบ ณ เวลา $\tau > \tau_s$ เพื่อความสะดวกในการคำนวณสมการที่ (4.25) (4.26) (4.29) และ (4.32) โปรแกรมคอมพิวเตอร์ UREA ได้ถูกเขียนขึ้นด้วยภาษาซี เพื่อใช้ในการคำนวณ โดยมีแผนภาพการคำนวณดังรูปที่ 4.2 รายละเอียดของโปรแกรมการคำนวณแสดงในภาคผนวก ข



รูปที่ 4.2 แผนภาพแสดงการทำงานของโปรแกรม UREA

โปรแกรม UREA นี้ เป็นโปรแกรมที่ใช้คำนวณหาปริมาณยูเรียสะสมที่ถูกปลดปล่อยจากแคปซูลที่เวลาต่าง ๆ โดยมีขั้นตอนการทำงานดังนี้

1. กำหนด $N = 0.01$ โดยการแบ่งระยะทางในชั้นเคลือบเป็น 100 ช่วง

กำหนดค่า λ , $l = 0.2$ เนื่องจากการแก้สมการด้วยวิธี explicit finite difference จะมีความเสถียร และวิ่งเข้าสู่คำตอบ เมื่อ $0 < \lambda \leq \frac{l}{2}$ [29]

$$T = 0.2 * N^2$$

2. รับค่าตัวแปรต่าง ๆ ทางหน้าจอ ดังนี้

- 1) อุณหภูมิ (Temp)
- 2) น้ำหนักยูเรียเริ่มต้น (Wu)
- 3) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเม็ดปุ๋ยยูเรียก่อนเคลือบ (d)
- 4) ความหนาของชั้นเคลือบ (w)
- 5) น้ำหนักยูเรียเริ่มต้น (Wu)
- 6) ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของยูเรียผ่านชั้นเคลือบ (D1)
- 7) ปริมาตรของสารละลายภายนอกแคปซูล (Ve)
- 8) ระยะเวลาที่ต้องการทราบถึงปริมาณยูเรียสะสมที่ถูกปลดปล่อยออกมา (RT)

3. กำหนดจำนวนครั้งที่ให้แสดงผลการคำนวณ

$$\text{MAXK} = \text{RT}$$

4. เปิดไฟล์ (OpenFile) สำหรับเขียนผลลัพธ์ลงในไฟล์
5. เรียกโปรแกรมย่อย Initialize สำหรับกำหนดค่าเริ่มต้น
6. กำหนดจำนวนครั้งที่ต้องการคำนวณ

$$\text{MAXJ} = \text{period}$$

7. เริ่มคำนวณเมื่อ $k = 1$
8. เริ่มคำนวณ เมื่อ $j = 1$
9. คำนวณค่าความเข้มข้น

เมื่อ $i = 0$,

ถ้าค่า $PM_{100,0} < W_s$ ให้คำนวณ

$$PM_{0,1} = PM_{0,0}$$

ถ้าค่า $PM_{100,0} \geq W_s$ ให้คำนวณ

$$PM_{0,1} = PM_{0,0} + \frac{3}{K_b} \frac{T}{N} (L-1) (PM_{1,0} - PM_{0,0})$$

เมื่อ $i < MAXI - 1$,

$$PM_{i,1} = lPM_{i-1,0} + lPM_{i+1,0} + (1-2l)PM_{i,0}$$

เมื่อ $i = MAXI - 1$,

$$PM_{i,1} = PM_{i,0} + \frac{3}{VK_u} \frac{T}{N} \left(1 - \frac{l}{L}\right) (PM_{i-1,0} - PM_{i,0})$$

10. สลับค่าให้ $PM_{i,1} = PM_{i,0}$ ทุกค่า i
11. เพิ่มค่า $j = j + 1$ กลับไปทำตั้งแต่ข้อ 9 ใหม่ จนกระทั่ง ค่า $j > MAXJ$
12. พิมพ์ผลลัพธ์ โดยผลลัพธ์ที่ได้เป็นไฟล์ข้อมูลที่แสดงความเข้มข้นของยูเรียที่ ถูกปลดปล่อยในสารละลายภายนอกในแต่ละวัน

$$c = PM_{i,0} * C_{sur}$$

13. เพิ่มค่า $k = k + 1$ กลับไปทำตั้งแต่ข้อ 8 ใหม่ จนกระทั่ง ค่า $k > MAXK$
14. ปิดไฟล์ (CloseFile)

4.5 ขั้นตอนการศึกษาแบบจำลองคณิตศาสตร์

1. ศึกษาผลของ stepsize ที่ใช้ในแบบจำลอง

ในการศึกษาถึงผลของ stepsize ต่อความถูกต้องในการคำนวณ ได้ทดลองเปลี่ยนแปลงค่า λ และ ค่า $\Delta\eta$ ดังแสดงในตารางที่ 4.1 และใช้ค่าต่าง ๆ เหล่านี้ คำนวณความเข้มข้นของยูเรียในชั้นเคลือบ จากนั้นทำการเปรียบเทียบผลต่างเปรียบเทียบสัมพัทธ์ (relative error) ตามสมการดังนี้

$$\%RE = (c_1 - c_2)/c_1 * 100$$

โดย c_1 = ค่าความเข้มข้นที่คำนวณได้จากการใช้ค่า $\Delta\tau$ ที่น้อยกว่า

c_2 = ค่าความเข้มข้นที่คำนวณได้จากการใช้ค่า $\Delta\tau$ ที่มากกว่า

ตารางที่ 4.1 ค่า λ และ ค่า $\Delta\eta$ ที่ใช้ในการคำนวณ

$\lambda \backslash \Delta\eta$	0.1	0.01
0.45	$\Delta\tau = 0.0045$	$\Delta\tau = 0.000045$
0.3	$\Delta\tau = 0.0030$	$\Delta\tau = 0.000030$
0.2	$\Delta\tau = 0.0020$	$\Delta\tau = 0.000020$

2. การทดสอบความถูกต้องของแบบจำลอง

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการแพร่ของยูเรียผ่านชั้นเคลือบยางธรรมชาติที่พัฒนาขึ้น (สมการ (4.2) (4.10) (4.16) และ (4.11)) ถูกนำมาคำนวณด้วยวิธีเชิงตัวเลขตามขั้นตอนที่ได้อธิบายในข้อ 4.4 ผลการคำนวณถูกเปรียบเทียบกับผลการทดลองจำนวน 5 ตัวอย่าง และผลการคำนวณจากสมการของ Lu และ Lee [27] โดยใช้ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (coefficient of determination, R^2) เป็นเกณฑ์ตัดสินความถูกต้องของแบบจำลอง ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจคำนวณได้จากสมการดังนี้

$$R^2 = 1 - \frac{\sum (Y_i - \hat{Y}_i)^2}{\sum Y_i^2 - \frac{(\sum Y_i)^2}{n}} \quad (4.33)$$

Y_i = ค่าที่ได้จากการทดลอง

\hat{Y}_i = ค่าที่คำนวณได้จากแบบจำลอง

n = จำนวนข้อมูล

ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจนี้เป็นเครื่องวัดความใกล้ชิดระหว่างผลการทดลองกับค่าที่คำนวณได้จากแบบจำลอง

ถ้าค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจมีค่าสูงแสดงว่าค่าที่คำนวณได้จากแบบจำลองจะอยู่ใกล้ชิดกับผลการทดลอง

ถ้าค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจมีค่าต่ำแสดงว่าค่าที่คำนวณได้จากแบบจำลองจะอยู่ห่างจากผลการทดลอง

ข้อมูลพื้นฐานของแคปซูลที่ Lu และ Lee [27] ใช้ในการทดลอง แสดงดังในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ข้อมูลพื้นฐานของแคปซูลชนิดต่าง ๆ ที่ Lu และ Lee ใช้ในการทดลอง

ตัวอย่าง	น้ำหนักยูเรียเริ่มต้น (กรัม)	ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ (ดร.ซม./วินาที)	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ของแกนกลาง(ซม.)	ความหนาของชั้นเคลือบ (ซม.)
D	2.263	2.21E-08	1.479	0.0312
F	2.074	1.72E-08	1.437	0.0370
L	1.973	9.50E-09	1.413	0.0353
M	1.885	2.47E-08	1.392	0.0291
Q	1.910	8.51E-09	1.398	0.0420

3. การศึกษาลักษณะการปลดปล่อยปุ๋ยเรียวในช่วงเริ่มต้น

เพื่อศึกษาเป็นกรณีตัวอย่างว่าจะต้องใช้เวลาเท่าไรจึงจะได้ฟลักซ์ของปุ๋ยเรียวที่ผิวนอกของชั้นเคลือบ แบบจำลองจะถูกใช้คำนวณฟลักซ์เรียวที่ถูกปลดปล่อยออกจากแคปซูล โดยกำหนดให้แคปซูลมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเม็ดปุ๋ยเรียว 1.5 ซม. (หรือกำหนดให้มีปุ๋ยเรียวเริ่มต้น 2.359 กรัม) ความหนาของชั้นเคลือบเท่ากับ 0.03 ซม. และให้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่มีค่าเท่ากับ 2×10^{-8} ตร.ซม./วินาที

4. การศึกษาผลของค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ต่อการปลดปล่อยปุ๋ยเรียวออกจากแคปซูล

เพื่อศึกษาเป็นกรณีตัวอย่างได้กำหนดให้แคปซูลมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเม็ดปุ๋ยเรียว 1.5 ซม. (หรือกำหนดให้มีปุ๋ยเรียวเริ่มต้น 2.359 กรัม) ความหนาของชั้นเคลือบเท่ากับ 0.03 ซม. และให้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่มีค่าเท่ากับ 2×10^{-8} ตร.ซม./วินาที การศึกษานี้จะศึกษาผลของค่าสัมประสิทธิ์การแพร่เมื่อค่าสัมประสิทธิ์การแพร่มีค่าเป็น 0.5 เท่า 1 เท่า และ 1.5 เท่าของค่าที่กำหนดตามลำดับ

5. การศึกษาผลของความหนาของชั้นเคลือบต่อการปลดปล่อยปุ๋ยเรียวออกจากแคปซูล

เพื่อศึกษาเป็นกรณีตัวอย่างได้กำหนดให้แคปซูลมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเม็ดปุ๋ยเรียว 1.5 ซม. (หรือกำหนดให้มีปุ๋ยเรียวเริ่มต้น 2.359 กรัม) ความหนาของชั้นเคลือบเท่ากับ 0.03 ซม. และให้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่มีค่าเท่ากับ 2×10^{-8} ตร.ซม./วินาที การศึกษานี้จะศึกษาผลของความหนาของชั้นเคลือบเมื่อความหนาของชั้นเคลือบมีค่าเป็น 0.5 เท่า 1 เท่า และ 1.5 เท่าของค่าที่กำหนดตามลำดับ

6. ผลของขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของเม็ดยูเรียต่อการปลดปล่อยยูเรียจากแคปซูล

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

7. ผลของความหนาที่มีต่อแบบจำลองและสมการของ Lu และ Lee

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

8. การคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของยูเรียผ่านชั้นเคลือบ

เพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ที่เหมาะสมกับระบบการปลดปล่อยยูเรียผ่านชั้นเคลือบ จะทำการคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของแคปซูลตัวอย่างทั้ง 5 ตัวอย่าง ด้วยวิธีการลองผิดลองถูก (trial & error) โดยเลือกค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ที่เหมาะสมแทนในแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้ คำนวณหาค่าความเข้มข้นของยูเรียที่ถูกปลดปล่อยออกจากแคปซูล และพิชผลการคำนวณเข้ากับผลการทดลองเปรียบเทียบความถูกต้องโดยใช้ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจเป็นเกณฑ์ตัดสิน