



รายการอ้างอิง

1. สันติภาพ ปัญพวรรค์. วิทยาการทางปุ๋ย (Fertilizer Technology). ขอนแก่น : ภาควิชาปฐพีศาสตร์ คณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น , 2527.
2. Hepburn, C. and R. Arizal. A controlled release urea fertiliser.Part 1 :
The encapsulation of urea fertiliser by rubber : processing and
vulcanisation procedures", Plast. & Rubber Process. Appl. 12
(1989): 129-134.
3. ประชญา ธัญญาดี. ปุ๋ยไนโตรเจน. วารสารพัฒนาที่ดิน 16(171) (สิงหาคม 2522):
9.
4. ยงยุทธ ไอสถสภา. หลักการผลิตและการใช้ปุ๋ย. กรุงเทพฯ: บริษัทโรงพิมพ์
ไทยวัฒนาพานิช จำกัด, 2528.
5. Hester, R.D. and P. Hester. Developing a biodegradable film for
controlled release of fertilizer. Plastics Engineering 50(1) (1994):
19-21.
6. วราภรณ์ ขจรไชยกูล. มาตรฐานยางไทย. วารสาร MTEC 1 (2538).
7. Cussler, E.L. Diffusion, mass transfer in fluid systems . Cambridge
University Press: 1984.
8. Finck, A. Fertilizer and Fertilization. Florida: Verlag Chemie Weinheim,
1982.

9. Bary, E.M., et al. Sustained release natural rubber formulations for Urea. Plastics, Rubber and Composites Processing and Application 17(2), 1992.
10. Baxter, G. Microencapsulation process in modern business forms. American Chemical Society Symposium on Microencapsulation: Process and Application, Chicago, 1973.
11. Hepburn, C. and R. Arizal. A controlled release urea fertiliser. Part 2 : preparation of the rubber-urea matrix and the split-feeding mixing technique. Plast. & Rubber Process. Appl. 12 (1989): 135-140.
12. Byrdson, J.A. Rubber Chemistry. London: Applied Science, 1985.
13. Charrier, J.M. Polymer Materials and Processing. Munich: Hanser Publishers, 1991.
14. วราภรณ์ ขจรไชยกูล. กระบวนการผลิตภัณฑ์ยาง. เอกสารวิชาการ ฉบับที่ 135 . (พฤศจิกายน 2530)
15. Hawkins, W.L. Polymer Stabilisation. Wiley-Interscience, 1972, p.377. in Hepburn, C., S. Young. and R. Arizal. A controlled release urea fertiliser. part 3 : soil leachinh and growth trials, Plast. & Bubber Process. Appl. 12 (1989) : 141-145.
16. Luckham, P.F. Controlled particle, droplet and bubble formation. Butterworth: Heinemann, 1994.
17. Maketta, J. Encyclopedia of processing and design. 30. New York: Dekker, 1976.

18. Vandegaer, Jan E. Microencapsulation : Process and application.
New York: Plenum Press, 1973.
19. Cussler, E.L. Diffusion Mass Transfer in Fluid Systems 2ndEd. Cambridge
University Press, 1997.
21. Bird, R.B., W.E. Stewart, and E.N. Lightfoot. Transport Phenomena.
New York: John Wiley&Sons,Inc.,1960.
20. Crank, J. The Mathematics of Diffusion. 2ndEd. London: Oxford Press,
1975.
22. Jacob, I.C. and N.S. Mason. Polymer Delivery Systems Concepts in
Polymer Delivery Systems Megda, A.E. et.al. Ed. ACS
Symposium Series, No.520 , Washington,D.C., 1993.
23. Burnette, R.R. Theory of Mass Transfer in Robinson, J.R. and Lee,
Vincent H.L. Ed. 2nd Ed. New York: Marcel Dekker,Inc., 1987.
24. Langenbucher, F. Ibid. 38(1976):472-477 in Christensen, F.N., F.Y.
Hansen and H. Bechgaard. Physical interpretation
of parameters in the Rosin-Rammler-Spulerling-Weibull
distribution for drug release from controlled release dosage
forms. J. Pharm. Pharmacol. 32(1980): 580-582.
25. Christensen, F.N., F.Y. Hansen and H. Bechgaard. Physical interpretation
of parameters in the Rosin-Rammler-Spulerling- Weibull
distribution for drug release from controlled release dosage
forms. J. Pharm. Pharmacol. 32(1980): 580-582.

26. Christensen, F.N., F.Y. Hansen and H. Bechgaard. Mathematical model for in vitro drug release from controlled release dosage forms applied to dextropropoxyphene hydrochloride pellets. J. Pharm. Sci. 71 (1982): 694-699.
27. Lu, S.M. and S.F. Lee. Slow release of urea through latex film. Journal of Controlled Release 18 (1992): 171-180.
28. Kwok, W.Y., C. Kiparissides, P. Yuet, T.J. Harris and F.A. Goosen. Mathematical modelling of protein diffusion in microcapsules: A comparison with experimental results. Can. J. Chem. Eng. 69(1991): 361-370.
29. Carnahan, B., H.A. Luther and J.O. Wilkes. Applied Numerical Methods. New York : John Wiley & Sons, 1969.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

กระบวนการผลิตไมโครแคปซูล [17]

ปัจจุบันกระบวนการเตรียมไมโครแคปซูลมีมากมาย และกำลังพัฒนาให้ดีขึ้นต่อไปในอนาคต เทคนิคต่างๆ ขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ เช่น ความสามารถในการละลายของสารที่ใช้เป็นผนังซึ่งเป็นพอลิเมอร์ ความสามารถในการละลายของสารที่เป็นแกน ขนาดของอนุภาค ความสามารถในการแพร่ผ่านผนัง พลังงานอิสระของผิวหน้า รูปแบบของการปลดปล่อยสารที่ต้องการ และสมบัติทางกายภาพของไมโครแคปซูล กระบวนการเตรียมไมโครแคปซูลแบ่งออกเป็น 3 ประการใหญ่ ๆ คือ

1. กระบวนการทางกายภาพ
2. กระบวนการทางเชิงกล
3. กระบวนการทางเคมี

1. กระบวนการทางกายภาพ

1.1 เทคนิคการเตรียมไมโครแคปซูลแบบโคอะเซอเวชัน (coacervation microencapsulation)

โคอะเซอเวชัน หมายถึง ปรากฏการณ์ในการเกิดวัฏภาคสองชั้นที่มีตัวทำละลายชนิดเดียวกัน โดยเกิดเป็นชั้นที่มีคอลลอยด์มาก และชั้นที่มีคอลลอยด์น้อย สารที่สามารถเกิดโคอะเซอเวชันนี้ จะต้องสามารถละลายหรือกระจายตัวในน้ำได้ ได้แก่ สารคอลลอยด์ไฮโดรฟิลลิก (hydrophillic colloid) เช่น เจลาติน (gelatin) อัลจีเนต (alginate) อัลบูมิน (albumin) เคซีน (casein) กัมอาราบิก (gum arabic) แป้ง (starch) พอลิอะคริลิก (polyacrylic) และพอลิอะคริลาไมด์ (polyacrelamide) เป็นต้น สารคอลลอยด์ไฮโดรฟิลลิกเหล่านี้เมื่ออยู่ในน้ำจะอยู่ในลักษณะโซที่พันกันอย่างไม่ระเบียบ

สารคอลลอยด์นี้ จะมีหมู่ที่สามารถแตกตัวเป็นไอออนได้หลายหมู่ตามสายโซ่โมเลกุล ทำให้เกิดประจุไฟฟ้าขึ้นซึ่งมีความสัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงความเป็นกรดต่างของสารละลาย

1.1.1 การเตรียมไมโครแคปซูลแบบโคอะเซอเวชันอย่างง่าย

การเตรียมไมโครแคปซูลแบบโคอะเซอเวชันอย่างง่าย ทำได้โดยการแยกน้ำที่อยู่รอบ ๆ พอลิเมอร์ออกโดยการเติมของเหลวที่ไม่ใช่ตัวทำละลายที่ดีของพอลิเมอร์นั้น ลดอุณหภูมิลง เติมสารที่ทำให้เกิดการแยกวัฏภาค หรือเติมพอลิเมอร์อื่นซึ่งมีค่าการละลายสูงกว่าพอลิเมอร์ที่เป็นผนัง การเกิดการแยกตัวออกของวัฏภาคของเหลวที่มีพอลิเมอร์มาก พอลิเมอร์ต้องสามารถเปียกหมด หรืออนุภาคของสารที่เป็นแกนจะต้องแขวนลอยอยู่ได้ดี และมีการหุ้มอย่างต่อเนื่อง จากนั้นเป็นขั้นตอนการทำให้แข็งตัว และเกิดการแยกของไมโครแคปซูล ซึ่งเป็นขั้นที่ยากที่สุดของกระบวนการนี้

เทคนิคการเตรียมไมโครแคปซูลแบบโคอะเซอเวชันโดยอาศัยอุณหภูมิ โดยทั่วไปอุณหภูมิมีผลต่อการละลายมาก จึงอาศัยหลักการเรื่องการละลายของพอลิเมอร์มาใช้ในการเตรียม โดยการทำให้พอลิเมอร์ที่ละลายอยู่เกิดการแยกตัวออกเมื่อลดอุณหภูมิลง อย่างไรก็ตามผลของอุณหภูมิส่วนใหญ่จะใช้ร่วมกับวิธีการอื่น ๆ

เทคนิคการเตรียมไมโครแคปซูลแบบโคอะเซอเวชันโดยอาศัยความสามารถในการละลายที่ต่างกันของพอลิเมอร์สองชนิด ทำได้โดยเติมพอลิเมอร์ชนิดหนึ่งซึ่งสามารถละลายในสารละลายได้ดีกว่าพอลิเมอร์ที่เป็นผนัง ลงในสารละลายของพอลิเมอร์ที่เป็นผนัง ซึ่งมีสารที่เป็นแกนกระจายตัว ทำให้เกิดการแยกตัวของผนังออกจากสารละลายตัวกลาง วิธีนี้ใช้ได้ดีสำหรับการหุ้มสารที่เป็นแกนชนิดของแข็งและของเหลว

1.1.2 การเตรียมไมโครแคปซูลแบบโคอะเซอเวชันเชิงซ้อน

การเตรียมไมโครแคปซูลแบบโคอะเซอเวชันเชิงซ้อน เตรียมได้โดยการทำให้ประจุของพอลิเมอร์สมดุล โดยการนำพอลิเมอร์ 2 ชนิดที่มีประจุตรงกันข้ามมารวมกัน เช่น เจลาตินและกัมอาราบิก ที่ความกรดต่างเป็นกลางเจลาตินจะมีประจุบวก ขณะที่กัมอาราบิกมีประจุลบเนื่องจากการไอออนไนซ์ของหมู่กลูโคโรนิก (glucuronic group)

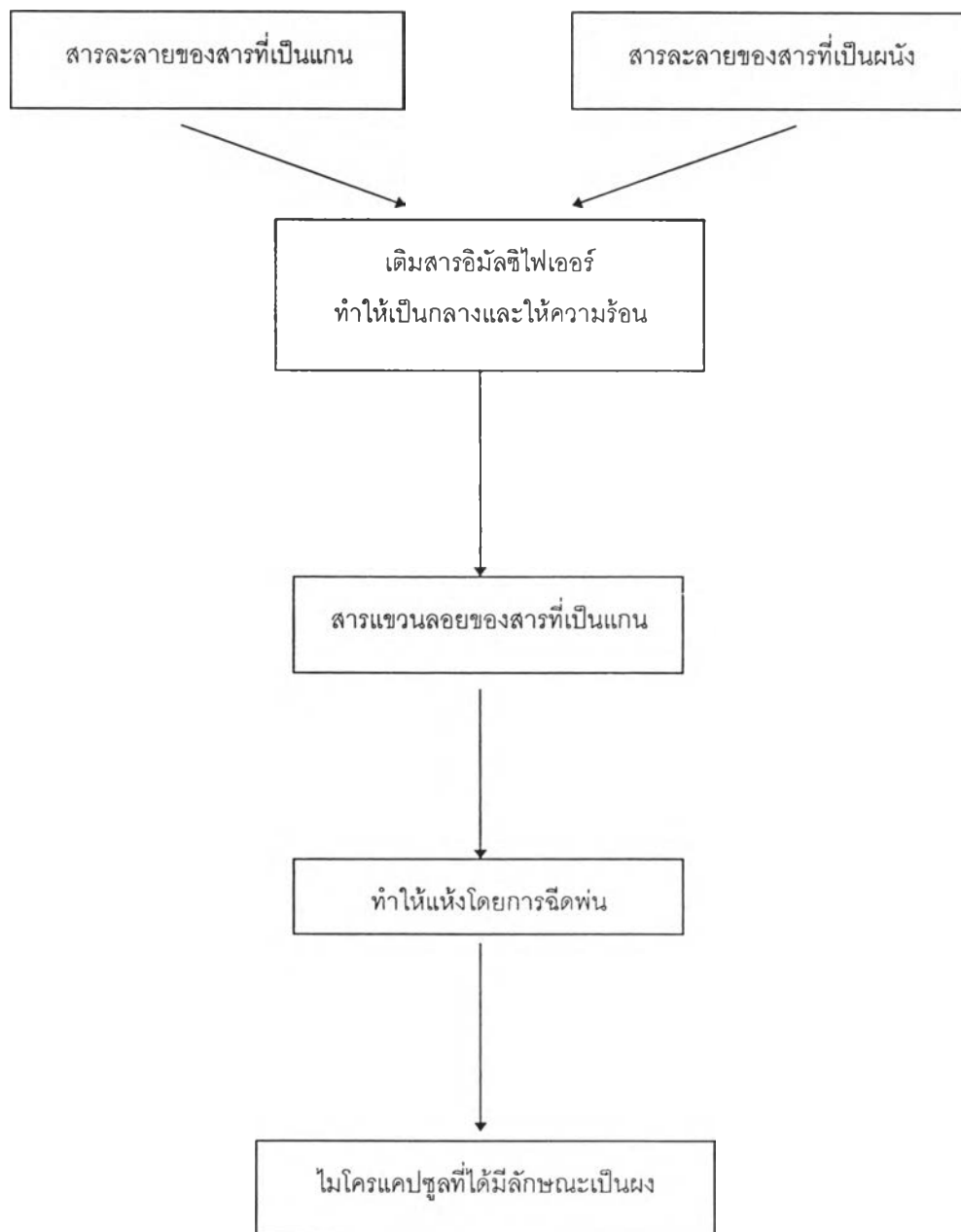
ซึ่งเป็นกรด พอลิเมอร์ทั้งสองชนิดนี้จะรวมตัวกันทำให้ประจุรวมเป็นศูนย์ และเกิดการแยกตัวออกมาจากวัฏภาคของเหลว และถ้ามีการทำให้แห้งอย่างมีประสิทธิภาพแล้ว จะได้ผนังแคปซูลที่ยอมให้มีการแพร่ผ่านต่ำมากสามารถใช้เก็บน้ำมันซึ่งมีจุดเดือดต่ำได้เป็นเวลานาน

2. กระบวนการทางเชิงกล

2.1 กระบวนการเตรียมไมโครแคปซูลแบบสเปรย์ดรายอิง(spray drying)

เป็นเทคนิคการเตรียมไมโครแคปซูล โดยสารที่เป็นแก๊สจะละลาย หรือแขวนลอยอยู่ในสารละลายพอลิเมอร์ หรือพอลิเมอร์หลอมเหลว แล้วฉีดพ่นทำให้แห้ง ได้เป็นผนังพอลิเมอร์หุ้มสารที่เป็นแก๊สไว้ ประโยชน์ของเทคนิคนี้คือสามารถเก็บรักษาวัสดุที่ว่องไวได้ดี เนื่องจากไมโครแคปซูลถูกทำให้แห้งอย่างรวดเร็ว นอกจากนี้ยังประหยัด ได้มีการนำเทคนิคฉีดพ่น (สเปรย์ดรายอิง) มาใช้ในการเตรียมผลิตภัณฑ์พวกน้ำหอม ซึ่งเตรียมเป็นอิมัลชันในสารละลายพอลิเมอร์ เช่น กัมอาราบิก แล้วฉีดออกมาเป็นอนุภาคขนาด 250 ไมโครเมตร ซึ่งเป็นขนาดที่เหมาะสมกับผลิตภัณฑ์แบ่งโรยตัวสำหรับผลิตภัณฑ์ฉีดพ่น จะต้องมีความหนาอนุภาคเล็กกว่า 74 ไมโครเมตร ถ้าสารที่เป็นแก๊สรวมอยู่กับไขมันหรือขี้ผึ้งที่หลอมเหลว กระบวนการที่ใช้เตรียมเรียกว่า สเปรย์ชิลลิ่ง (spray chilling) เนื่องจากต้องทำให้อิมัลชันหรือสารแขวนลอยเย็นตัวลงจนมีอุณหภูมิต่ำกว่าจุดหลอมเหลว เพื่อทำให้เกิดเป็นอนุภาคแข็ง วิธีนี้นิยมใช้ในการเตรียมไมโครแคปซูลของกรดซิตริก ไวตามินซี และเฟอร์รัสซัลเฟต

รูปที่ ก.1 แสดงกระบวนการเตรียมไมโครแคปซูล โดยการผสมสารละลายของสารที่เป็นแก๊สและสารละลายของสารที่เป็นผนัง ละลายน้ำ พอลิเมอร์ที่ใช้จะอยู่ในสภาพอิมัลชัน หลังจากการผสมแล้วจะได้สารแขวนลอยของสารที่เป็นแก๊ส จากนั้นทำให้แห้ง โดยการฉีดพ่น จะได้เป็นไมโครแคปซูล

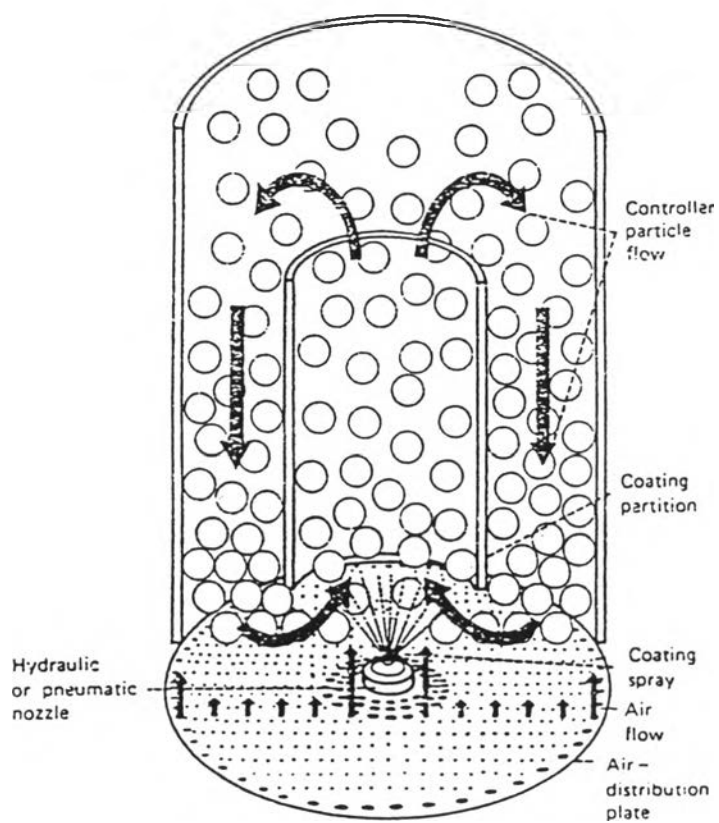


รูปที่ ก.1 กระบวนการเตรียมไมโครแคปซูลโดยวิธีการฉีดพ่น [17]

2.2 กระบวนการเตรียมไมโครแคปซูลแบบการหุ้มโดยแขวนลอยในอากาศ (air-suspension coating)

การหุ้มโดยแขวนลอยในอากาศ เป็นวิธีการหุ้มอนุภาคด้วยสารละลายหรือสารที่หลอมเหลว วิธีนี้สามารถใช้ได้กว้างขวางและควบคุมการเตรียมไมโครแคปซูลได้เป็นอย่างดี อนุภาคที่เป็นแกนจะแขวนลอยอยู่ในอากาศด้วยแรงลม ดังแสดงในรูปที่ ก.2

จากรูปที่ ก.2 ทรงกระบอกด้านนอกและด้านในถูกรองรับโดยถาดที่เจาะรูให้ลมผ่าน ทำให้อนุภาคที่เป็นแกนเคลื่อนที่จากด้านนอกและหมุนเข้าด้านในเป็นวัฏจักร โดยผ่านทรงกระบอกด้านในหลายครั้ง ภายในเวลาสั้น ๆ ขณะที่อนุภาคเคลื่อนที่ขึ้นจะปะทะกับละอองเล็ก ๆ ของสารละลายของสารผนังที่ถูกฉีดพ่นออกมาในแต่ละครั้ง โดยอนุภาคจะได้รับสารละลายที่ใช้หุ้มเพียงเล็กน้อยเท่านั้น ตัวทำละลายจะระเหยและอนุภาคเกือบแห้งในขณะที่ตกกลับมายังตะแกรงด้านนอก อนุภาคที่ถูกหุ้มมีขนาดตั้งแต่ 150 ไมโครเมตรจนถึงขนาดเท่าเม็ดยา เนื่องจากมีชั้นบาง ๆ ของสารที่หุ้มถูกฉีดอย่างสม่ำเสมอไปบนผิวหน้าทั้งหมดของอนุภาคในทิศทางต่าง ๆ ดังนั้น จึงทำให้ได้การหุ้มที่สม่ำเสมอ สารที่เหมาะสมจะใช้เป็นผนังด้วยวิธีนี้ ได้แก่ ชีผึ้ง อนุพันธ์ของเซลลูโลส และพอลิเมอร์ที่ละลายน้ำได้



รูปที่ ก.2

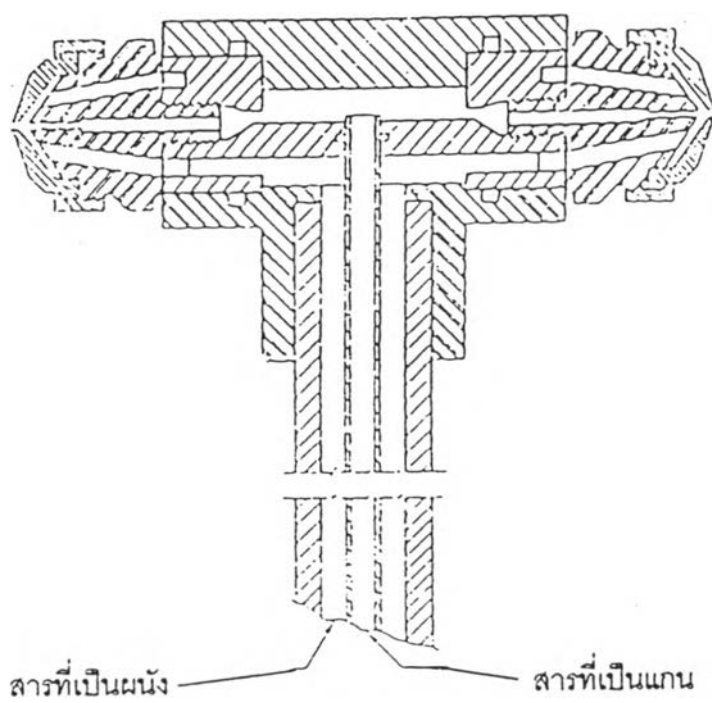
Wurster Coating Chamber [17]

2.3 กระบวนการเตรียมไมโครแคปซูลแบบการหุ้มโดยการอัดฉีดจาก ศูนย์กลาง (centrifugal extrusion)

วิธีนี้สารที่เป็นแกนจะถูกหุ้มโดยใช้หัวฉีดชนิดที่หมุนได้ ซึ่งบรรจุกระบอกฉีด หลายกระบอกที่มีจุดศูนย์กลางร่วมกัน ดังรูปที่ ก.3

ในกระบวนการนี้สายของของเหลว (liquid jet) ที่เป็นแกนจะถูกอัดฉีดพุ่งออกไปและถูกล้อมรอบด้วยสารละลายหรือสารหลอมเหลวที่เป็นผนังหุ้ม เมื่อสายของของเหลวที่อัดฉีดเคลื่อนผ่านอากาศ จะแตกออกกลายเป็นหยดของสารที่เป็นผนัง หุ้มสารที่เป็นแกนอยู่ภายใน ขณะที่หยดลอยอยู่ ผนังที่หลอมเหลวจะแข็งขึ้น หรือตัวทำละลายระเหยออกจากสารละลายของผนัง เทคนิคนี้เหมาะเป็นอย่างยิ่งสำหรับใช้เตรียมไมโครแคปซูลที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 200-400 ไมโครเมตร และเหมาะสำหรับของเหลวหรือของเหลวข้นเท่านั้น เนื่องจากหยดเหล่านี้เกิดจากการแตกออกของสายของของเหลวที่ถูกอัดฉีด

เทคนิคนี้เสียค่าใช้จ่ายน้อยสำหรับการผลิตหยดขนาดใหญ่ ซึ่งหุ้มด้วยสารที่หลอมเหลว เช่น ไขมันและซีเมนต์ เป็นต้น นอกจากนี้ยังใช้กันอย่างกว้างขวางในการหุ้มของเหลวด้วยพอลิเมอร์สังเคราะห์ และเจลาติน ผนังหุ้มที่ไม่เหมาะที่จะใช้เตรียมด้วยวิธีนี้ คือ ผนังที่เป็นของเหลวที่ข้นเป็นสาย ไม่สามารถแยกออกเป็นหยดได้



รูปที่ ก.3 ภาพตัดขวางของหัวฉีดชนิดที่หมุนได้ [17]

3. กระบวนการทางเคมี

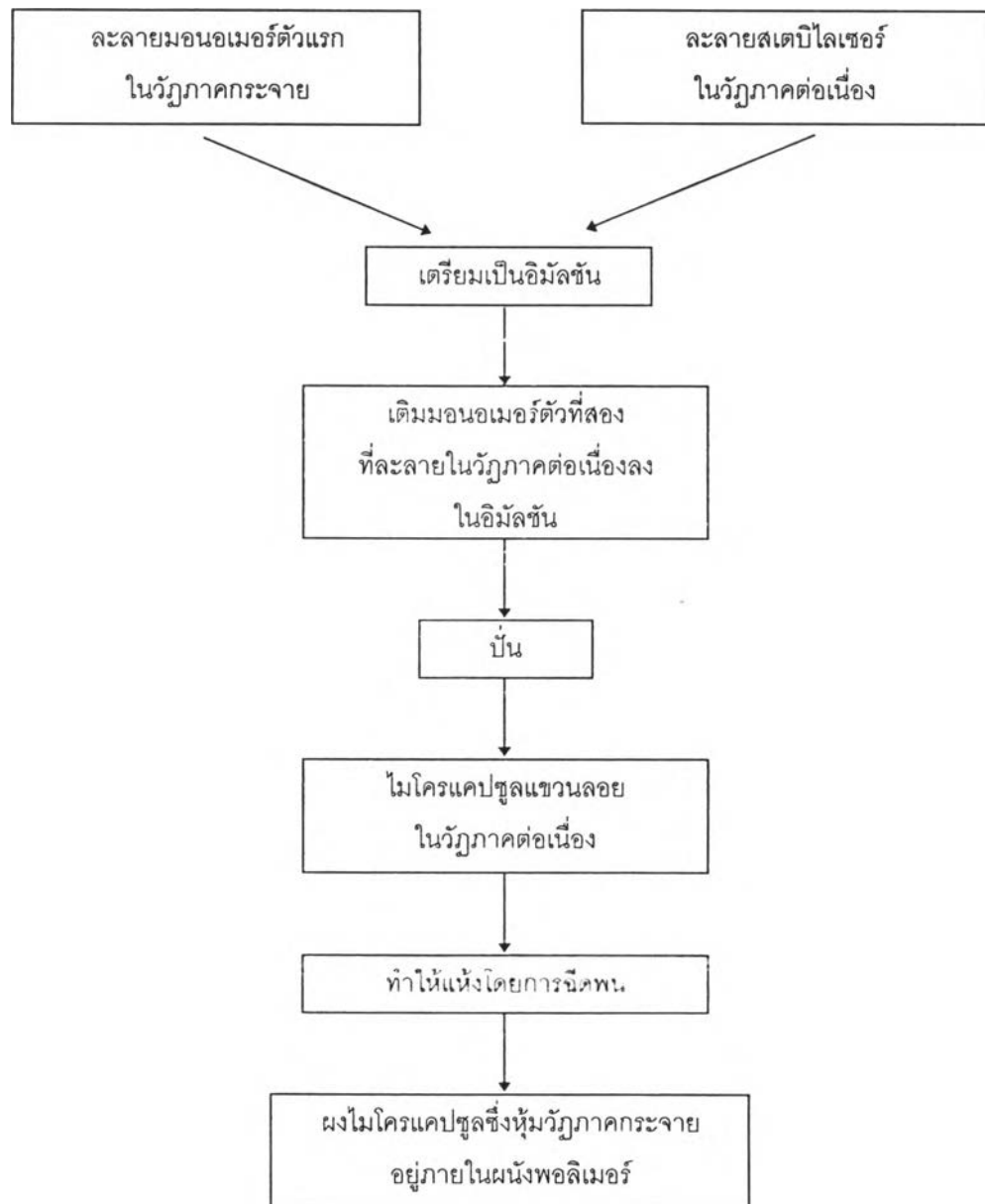
3.1 กระบวนการเตรียมไมโครแคปซูลโดยการพอลิเมอไรซ์ระหว่างผิวหน้า (interfacial polycondensation)

เทคนิคการพอลิเมอไรซ์ระหว่างผิวหน้า เป็นการสร้างผนังแคปซูลที่เป็นพอลิเมอร์บาง ๆ หนานักโมเลกุลสูง โดยจะประกอบด้วยมอนอเมอร์ 2 ชนิด ทำปฏิกิริยากันระหว่างผิวหน้าของวัฏภาคอิมัลชันได้ฟิล์มพอลิเมอร์บาง ๆ ซึ่งไม่ละลายและกระจายอยู่ในตัวกลางของสารตั้งต้น ตัวอย่างของพอลิเมอร์ที่สามารถเตรียมได้โดยใช้เทคนิคนี้ แสดงไว้ในตารางที่ ก.1

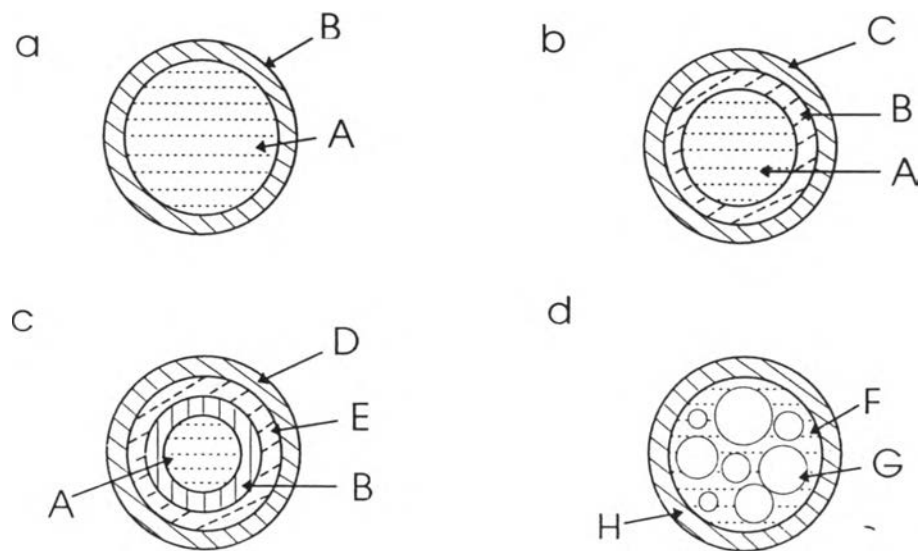
ตารางที่ ก.1 แสดงตัวอย่างของพอลิเมอร์ที่ใช้เตรียมไมโครแคปซูลโดยเทคนิคการพอลิเมอไรซ์ระหว่างผิวหน้า

สารที่เป็นผนัง	โครงสร้างการเชื่อมโยงในพอลิเมอร์	หมู่ฟังก์ชันที่ทำปฏิกิริยา
พอลิเอไมด์ (polyamide)	$\text{-N}-\overset{\text{C}}{\parallel}{\text{C}}-\text{}$	$\text{-N-H} + \text{C}-\overset{\text{C}}{\parallel}{\text{C}}-\text{}$
พอลิยูรีเทน (polyurethane)	$\text{-N}-\overset{\text{C}}{\parallel}{\text{C}}-\text{C}-\text{}$	$\text{-O-H} + \text{C}-\overset{\text{C}}{\parallel}{\text{C}}-\text{N}-\text{}$
พอลิซัลโฟนาไมด์ (polysulfonamide)	$\text{-N}-\overset{\text{C}}{\parallel}{\text{S}}-\text{}$	$\text{-N-H} + \text{C}-\overset{\text{C}}{\parallel}{\text{S}}-\text{}$
พอลิเอสเทอร์ (polyester)	$\text{-C}-\overset{\text{C}}{\parallel}{\text{C}}-\text{}$	$\text{-O-H} + \text{C}-\overset{\text{C}}{\parallel}{\text{C}}-\text{}$
พอลิคาร์บอเนต (polycarbonate)	$\text{-C}-\overset{\text{C}}{\parallel}{\text{C}}-\text{C}-\text{}$	$\text{-O-H} + \text{Cl}-\overset{\text{C}}{\parallel}{\text{C}}-\text{Cl}-\text{}$

กระบวนการพอลิเมอไรส์ระหว่างผิวหน้า ทำได้โดยสารที่เป็นแกนกับ
มอนอเมอร์ตัวหนึ่งอยู่ในวัฏภาคกระจาย และมอนอเมอร์อีกตัวหนึ่งอยู่ในวัฏภาค
ต่อเนื่อง เพื่อควบคุมการเกิดแคปซูล มอนอเมอร์ตัวแรกและสารที่เป็นแกนจะถูกเตรียม
เป็นอิมัลชันก่อน โดยยังไม่มีมอนอเมอร์ตัวที่สอง เมื่อเติมวัฏภาคต่อเนื่องที่มี
มอนอเมอร์ตัวที่สองอยู่ลงไป ในอิมัลชัน ก็จะเกิดปฏิกิริยาระหว่างผิวหน้าของสารที่
กระจายตัวอยู่ ได้เป็นฟิล์มพอลิเมอไรส์หุ้มสารนั้นไว้ ดังรูปที่ ก.4 และไมโครแคปซูลที่ได้
จากการเตรียมโดยเทคนิคนี้มีโครงสร้างดังแสดงในรูปที่ ก.5



รูปที่ ก.4 แสดงขั้นตอนการเตรียมไมโครแคปซูลโดยเทคนิคการพอลิเมอร์ไรซ์
ระหว่างผิวหน้า [17]



รูปที่ ก.5 แสดงลักษณะของไมโครแคปซูลที่เตรียมโดยเทคนิคการพอลิเมอไรซ์
ระหว่างผิวหน้า

a (A) คือ สารที่เป็นแกน

(B) คือ ผนังหุ้มที่เป็นพอลิเมอร์

b (A) คือ สารที่เป็นแกน

(B) คือ ผนังหุ้มที่เป็นพอลิเมอร์

(C) คือ ผนังชั้นที่สองที่เกิดจากเทคนิคการฉีดพ่นหรือเทคนิคที่คล้ายกัน

c (A) คือ สารที่เป็นแกน

(B) คือ ผนังหุ้มที่เป็นพอลิเมอร์

(E) คือ สารที่เป็นแกนซึ่งเหมือนหรือต่างจาก (A) ก็ได้

(D) คือ ผนังหุ้มที่เป็นพอลิเมอร์ชั้นที่สองซึ่งอาจเหมือนหรือต่างจาก (B) ก็ได้

d (G) คือ แคปซูลจากรูป a, b หรือ c

(F) คือ ตัวกลางการกระจายของแคปซูล G

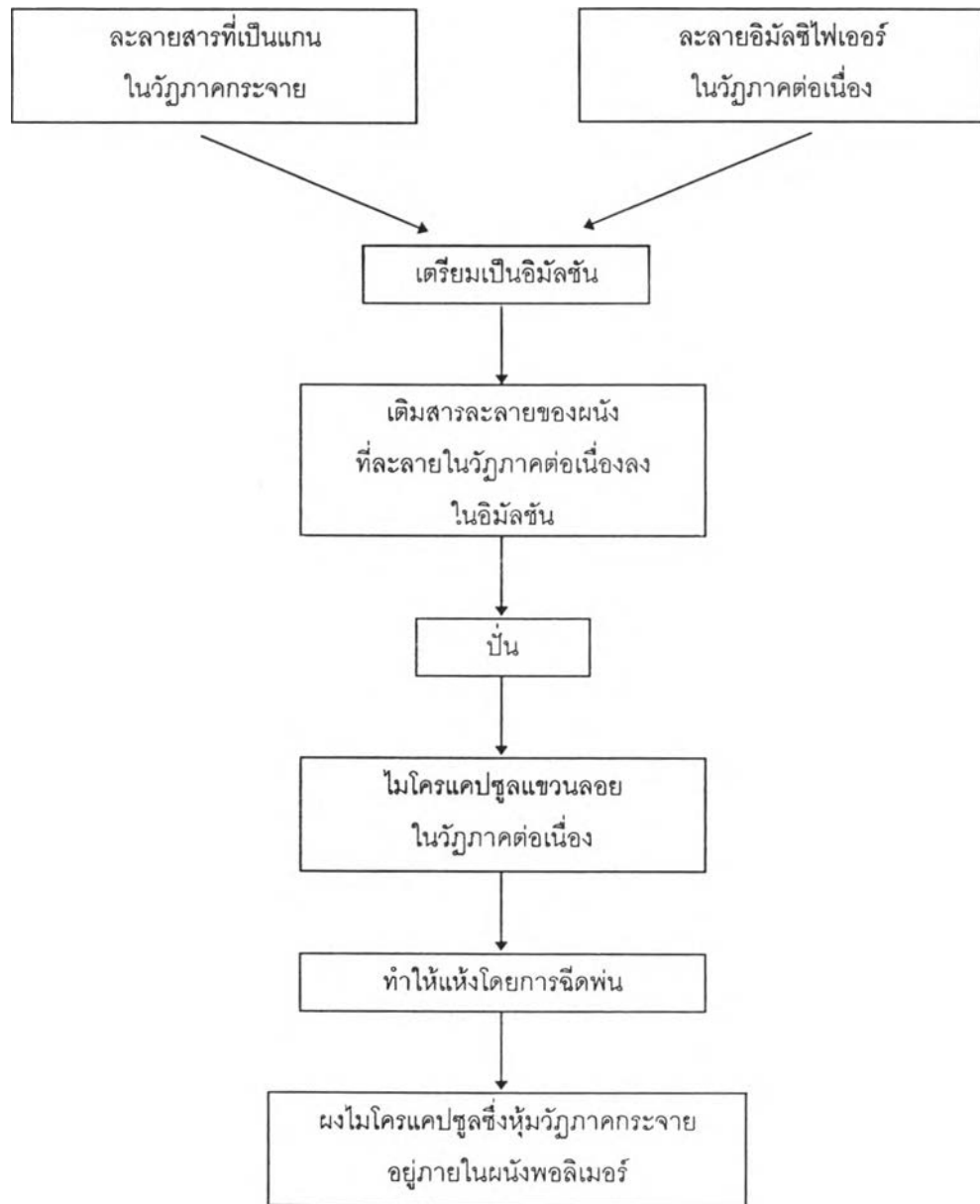
(H) คือ ผนังหุ้มที่เป็นพอลิเมอร์ซึ่งเตรียมโดยเทคนิคการพอลิเมอไรซ์
ระหว่างผิวหน้า

ประสิทธิภาพในการหุ้มของไมโครแคปซูล วัดได้โดยการหาปริมาณตัวทำละลายอิสระที่ไม่ถูกหุ้ม ตัวทำละลายนี้จะถูกสกัดออกจากของเหลวหนืดของไมโครแคปซูล โดยการสกัดโดยใช้เครื่องแก๊สโครมาโตกราฟี ผลรวมของตัวทำละลายในตัวอย่างที่ใช้สารซึ่งสามารถสกัดตัวทำละลายออกจากผนัง และหาปริมาณได้โดยวิธีการวิเคราะห์ทางโครมาโตกราฟีเช่นกัน อัตราส่วนของตัวทำละลายอิสระต่อตัวทำละลายทั้งหมด สามารถนำมาหาประสิทธิภาพในการหุ้ม กระบวนการพอลิเมอร์ไรซ์ระหว่างผิวสามารถควบคุมให้มีประสิทธิภาพในการหุ้มได้อย่างน้อยถึง 98 % ตัวทำละลายที่นิยมใช้คือ ไซลีน (xylene) และทอลูอีน (toluene)

3.2 กระบวนการเตรียมไมโครแคปซูลการพอลิเมอร์ไรซ์แบบ in-situ

เป็นเทคนิคการที่ใช้ในการเตรียมไมโครแคปซูลโดยพอลิเมอร์ไรซ์มอนอเมอร์ชนิดหนึ่งบนผิวหน้าของอนุภาค เช่น การหุ้มเส้นใยเซลลูโลสด้วยพอลิเอทิลีน ขณะที่จุ่มลงในทอลูอีนที่ปราศจากน้ำ ในขั้นแรกเติมโททานิเยมเทตระคลอไรด์ ตามด้วยไตรเอทิลอลูมิเนียม คะตะลิสต์ซีเกลอร์ (Triethylaluminium Ziegler catalyst) จะรวมตัวกันบนผิวของเส้นใยที่อุณหภูมิ 20-30 องศาเซลเซียส เมื่อตัวเร่งปฏิกิริยาเกิดขึ้นที่ผิวเส้นใยจะมีสีน้ำตาลเข้ม เมื่อเติมเอทิลีน หรือสไตรีน จะเกิดการพอลิเมอร์ไรซ์ที่ผิวหน้า ปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรซ์จะให้อัตราส่วนโดยน้ำหนักของพอลิเอทิลีนและเซลลูโลสเป็น 50:50 สารที่เป็นแกนมีน้ำหนักโมเลกุลสูงถึง 2×10^6 และมีจุดหลอมเหลว 56-58 องศาเซลเซียส ในขณะที่ทางทฤษฎีจะให้จุดหลอมเหลวสูงสุดได้ถึง 61 องศาเซลเซียส กระบวนการนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการเคลือบแก้ว การเคลือบโดยทั่วไปทั้งโปร่งแสงหรือทึบแสง สามารถทำให้ใสขึ้นได้ด้วยการหลอมภายหลังจากที่เตรียมได้

กระบวนการนี้ทำได้โดยเตรียมอิมัลชันของสารที่เป็นแกนซึ่งอยู่ภายใต้วัฏภาค กระดาษในวัฏภาคต่อเนื่อง เมื่อเติมวัฏภาคต่อเนื่องที่มีสารที่เป็นผนังลงไปในอิมัลชันก็จะเกิดปฏิกิริยาได้เป็นฟิล์มพอลิเมอร์ ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงหุ้มสารนั้นอยู่ ดังแสดงในรูปที่ ก.6



รูปที่ ก.6 ขั้นตอนการเตรียมไมโครแคปซูลโดยเทคนิคพอลิเมอร์ไรซ์เซชันแบบ in-situ [17]

อิทธิพลของตัวแปรในเทคนิคต่าง ๆ

ในการเลือกใช้เทคนิคใดๆ ก็ตาม ควรจะพิจารณาสมบัติทางกายภาพดังต่อไปนี้

1. ความสามารถในการเปียกได้ของสารที่เป็นแกน

เทคนิคโคอะเซอเวชัน เป็นเทคนิคที่ทำให้เกิดวัฏภาคของเหลวซึ่งมีพอลิเมอร์มากแยกออกจากสารละลายพอลิเมอร์ อาจทำได้โดยการเติมของเหลวที่ไม่ใช่ตัวทำละลาย การหุ้มแบบนี้สมบัติที่สำคัญมากคือ ความสามารถในการเปียกได้ของสารที่เป็นแกน อนุภาคของแข็งที่เปียกได้ดีจะหุ้มได้ง่ายกว่าการหุ้มหยดของเหลวที่ไม่ละลาย

2. ความสามารถในการละลายของสารที่เป็นแกน

ในระบบโคอะเซอเวชันสารที่เป็นแกนต้องไม่ละลายในตัวทำละลายของพอลิเมอร์ และพอลิเมอร์ต้องไม่สามารถแทรกเข้าไปในหยดของเหลวที่เป็นแกน ในระบบการพอลิเมอร์ไรซ์ระหว่างผิวหน้า การตัดสินใจเกี่ยวกับความสามารถในการละลายของมอนอเมอร์ ต้องพิจารณาเลือกทั้งชนิดของตัวทำละลายและพอลิเมอร์ด้วย ในกรณีสารที่เป็นแกนละลายได้น้อยในสารละลายพอลิเมอร์ มักเลือกเตรียมด้วยวิธีการหุ้มโดยวิธีฉีดพ่นแห้ง นอกจากนี้วิธีนี้สามารถหุ้มของแข็งที่ละลายน้ำได้ด้วยสารละลายพอลิเมอร์ซึ่งละลายน้ำได้ เนื่องจากน้ำระเหยอย่างรวดเร็วหลังจากการฉีดพ่น ออกเป็นหยดไปกระทบกับสารที่เป็นแกนทำให้มีการแทรกหรือละลายสารที่เป็นแกนเพียงเล็กน้อยเท่านั้น

3. ความสามารถในการแพร่ผ่านและความยืดหยุ่นของผนัง

ความสามารถในการแพร่ผ่านของพอลิเมอร์แสดงให้เห็นว่า สารที่ถูกหุ้มสามารถถูกปลดปล่อยออกมาในอัตราที่ต้องการหรือไม่ ไมโครแคปซูลจะต้องสามารถใช้ได้สะดวกและจะต้องแตกด้วยความดันเริ่มต้นที่ต้องการ ผนังพอลิเมอร์ ขนาดของไมโครแคปซูล และความหนาของผนังจะเป็นตัวกำหนดความยืดหยุ่นและความแข็งแรงของผนัง

4. ตัวแปรอื่น ๆ

ช่วงความเข้มข้นและอุณหภูมิ ซึ่งอาจมีผลทำให้เกิดการเกาะเป็นก้อน ความเหนียวหนืดของสารละลายของผนังระหว่างการทำให้แห้ง จุดหลอมตัว อุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (T_g) องศาการจัดเรียงตัวเป็นผลึก อัตราการเสื่อมสภาพของผนัง และสมบัติอื่นๆ จะต้องนำมาพิจารณาด้วยเช่นกัน

ปัจจัยบางอย่างเหมาะสมกับเทคนิคการเตรียมไมโครแคปซูลอย่างหนึ่ง แต่อาจจะไม่เหมาะสมกับเทคนิคอีกอย่างหนึ่ง เช่น ถ้าสารที่เป็นแกนเป็นของแข็งและไม่สามารถเตรียมเป็นของเหลวหนืดได้ไม่เหมาะสมกับวิธีการอัดฉีดของเหลวให้เป็นสาย (liquid-jet method) ถ้าอนุภาคของแข็งมีขนาดใหญ่ควรใช้วิธีการแยกวัฏภาค หรือการหุ้มแขวนลอยในอากาศ ถ้าสารที่เป็นแกนเป็นของเหลวอินทรีย์ใช้วิธีการหุ้มแขวนลอยในอากาศไม่ได้ วิธีการอัดฉีดของเหลวให้เป็นลำสายจะใช้ได้ดีสำหรับอนุภาคที่มีขนาดใหญ่กว่า 100 ไมโครเมตร ถ้าอนุภาคเล็กกว่านี้ควรใช้วิธีการโคอะเซอเวชัน และวิธีการพอลิเมอร์ไรซ์ระหว่างผิวหน้าจะช้าและสิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายมาก การเตรียมไมโครแคปซูลที่มีขั้วสูง โดยทั่วไปจะเตรียมได้ยาก แต่อาจทำได้โดยวิธีอัดฉีดให้เป็นสายหรือวิธีการพอลิเมอร์ไรซ์ระหว่างผิวหน้า หรือวิธีการแยกวัฏภาคตามความเหมาะสม

ภาคผนวก ข โปรแกรม UREA

```
/*Calculation of Urea concentration*/
#include<stdio.h>
#include<conio.h>
#include<math.h>
#include<string.h>

#define MAXI 101

float L,D,D1,Ka,Kb,l,RT,period;
float a,b,d,Va,Vi,V, w,Ve,Wu,Csat;
float PM[MAXI][2];
float T,N,temp,Ws, Ka,Kb ;
long g,i,j,k;
FILE *result;

main()
{
    long MAXJ,MAXK ;
    N = 0.01 ;
    T = 0.2 * pow(N,2) .
    clrscr();
    /*printf scanf*/
    printf("\n\t Calculation of Urea Concentration \n\n");
    printf("Enter your data \n");
    printf("\n Temperature(oC): ");
    scanf("%f",&temp);
    printf("\n Initial urea weight(grams): ");
    scanf("%f",&Wu);
    printf("\n Core diameter(cm.): ");
    scanf("%f",&d);
    printf("\n Capsule thickness(cm.): ");
    scanf("%f",&w);
    printf("\n Diffusion coefficient(D*e8)(sq.cm./sec): ");
    scanf("%f",&D1);
```

```

printf("\n External volumn(cu.cm): ");
scanf("%f",&Ve);
printf("\n Release Time(days): ");
scanf("%f",&RT);

/*1*/
Ka = 1;
Kb = 1;
b = d / 2 ;
a = b + w ;
L = a / b;
Va = 4*3.1415926543*(pow(a,3))/3;
V = Ve/Va;
I = 0.2 ;
D = D1*pow(10,-8);
period = 86400/(T*pow(w,2)/D) ;
MAXK = RT;
Ws=(Wu-(Csat*Va))/(Csat*Ve);
OpenFile();
Initialize();
MAXJ = period;
for(k=1;k<=MAXK;k++) {
    for(j=1;j<=MAXJ;j++) {
        if (PM[MAXI-1][0] < Ws)
            PM[0][1] = PM[0][0];
        else
            PM[0][1] = PM[0][0] + (3/Kb*(T/N)*(L-1)*(PM[1][0] - PM[0][0]));
        for(i=1;i<MAXI-1;i++) {
            PM[i][1] = (I*PM[i-1][0]) + (I*(PM[i+1][0])) + ((1-(2*I))*PM[i][0]);
        }
        i=MAXI-1;
        PM[i][1] = PM[i][0] + ((3/(V*Ka))*(T/N)*(1-(1/L))*(PM[i-1][0] - PM[i][0]));
        SwitchResult();
    }
    PrintResult(k);
}

```

```

    CloseFile();
}
Initialize()
{
    for(j=0;j<2;j++) {
        for(i=0;i<MAXI;i++) {
            PM[i][j] = 0;
        }
    }
    PM[0][0] = 1/Kb;
}
SwitchResult()
{
    for(i=0;i<MAXI;i++) {
        PM[i][0]=PM[i][1];
    }
}
PrintResult(int g)
{
    float c ;
    fprintf(result,"at %d is ",g);
    for(i=0;i<MAXI;i++){
        c=PM[i][0]*Csat;
        fprintf(result,"%0.6f ",c);
    }
    fprintf(result,"\n");
}
OpenFile()
{
    if ((result = fopen("output.dat","w")) == NULL)
        exit(1);
}
CloseFile()
{
    fclose(result);
}

```


ภาคผนวก ค

ตารางที่ ค.1 ปริมาณยูเรียสะสมที่ถูกปลดปล่อยจากแคปซูลตัวอย่าง D เมื่อใช้แบบจำลอง
เทียบกับผลการทดลองและสมการของ Lu และ Lee

เวลา (วัน)	ปริมาณยูเรียสะสมที่ถูกปลดปล่อยจากแคปซูล (กรัม)		
	การทดลอง	แบบจำลอง	สมการของ Lu และ Lee
1	0.22	0.2378	0.2498
2	0.70	0.4969	0.4985
3	0.90	0.7549	0.7462
4	1.25	1.0117	0.9927
5	1.53	1.2644	1.2382
6	1.59	1.4747	1.4659
7		1.6393	1.6416
8	1.69	1.7683	1.7767
9		1.8693	1.8805
10	1.80	1.9482	1.9602
11		2.0102	2.0216
12		2.0587	2.0687
13	1.93	2.0967	2.1049
14		2.1265	2.1329
15		2.1498	2.1542
16		2.1681	2.1706
17	1.84	2.1824	2.1833
18		2.1936	2.1930
19		2.2023	2.2005
20		2.2092	2.2062
21		2.2146	2.2106
22		2.2188	2.2140
23	1.95	2.2221	2.2166
24		2.2247	2.2186
25		2.2267	2.2202
26		2.2283	2.2214
27		2.2295	2.2223
28		2.2305	2.2230
29		2.2313	2.2235
30	1.97	2.2319	2.2239

ตารางที่ ค.2 ปริมาณยูเรียสะสมที่ถูกปลดปล่อยจากแคปซูลตัวอย่าง F เมื่อใช้แบบจำลอง
เทียบกับผลการทดลองและสมการของ Lu และ Lee

เวลา (วัน)	ปริมาณยูเรียสะสมที่ถูกปลดปล่อยจากแคปซูล (กรัม)		
	การทดลอง	แบบจำลอง	สมการของ Lu และ Lee
1		0.1391	0.1563
2		0.3028	0.3121
3		0.4659	0.4676
4	0.48	0.6286	0.6226
5		0.7915	0.7771
6		0.9533	0.9313
7		1.1134	1.0850
8	1.09	1.2551	1.2370
9		1.3758	1.3691
10	1.35	1.4779	1.4794
11		1.5647	1.5717
12	1.38	1.6383	1.6489
13		1.7008	1.7134
14	1.43	1.7541	1.7673
15	1.6	1.7992	1.8124
16		1.8374	1.8501
17		1.8699	1.8816
18	1.65	1.8976	1.9079
19		1.9210	1.9299
20	1.66	1.9409	1.9484
21		1.9578	1.9637
22		1.9721	1.9766
23		1.9844	1.9874
24		1.9947	1.9964
25		2.0035	2.0039
30	1.7	2.0311	2.0266

ตารางที่ ค.3 ปริมาณยูเรียสะสมที่ถูกปลดปล่อยจากแคปซูลตัวอย่าง L เมื่อใช้แบบจำลอง
เทียบกับผลการทดลองและสมการของ Lu และ Lee

เวลา (วัน)	ปริมาณยูเรียสะสมที่ถูกปลดปล่อยจากแคปซูล (กรัม)		
	การทดลอง	แบบจำลอง	สมการของ Lu และ Lee
1		0.0165	0.0364
2		0.053	0.0727
3		0.0911	0.1090
4		0.1292	0.1453
5		0.1674	0.1816
10	0.05	0.3571	0.3625
11		0.3951	0.3987
12	0.07	0.4331	0.4348
13		0.471	0.4708
14		0.5089	0.5069
15	0.08	0.5462	0.5429
16		0.5841	0.5790
17	0.1	0.6219	0.6149
23	0.2	0.8478	0.8304
35	0.47	1.2603	1.2493
40		1.3862	1.3858
50		1.5739	1.5837
53	1.1	1.6168	1.6280
60		1.6994	1.7115
63	1.5	1.7283	1.7401
70		1.7836	1.7940
77	1.65	1.8253	1.8336
95	1.73	1.8916	1.8940
100		1.903	1.9038
114	1.8	1.9251	1.9224

ตารางที่ ค.4 ปริมาณยูเรียสะสมที่ถูกปลดปล่อยจากแคปซูลตัวอย่าง M เมื่อใช้แบบจำลอง
เทียบกับผลการทดลองและสมการของ Lu และ Lee

เวลา (วัน)	ปริมาณยูเรียสะสมที่ถูกปลดปล่อยจากแคปซูล (กรัม)		
	การทดลอง	แบบจำลอง	สมการของ Lu และ Lee
1		0.2579	0.2650
2	0.22	0.5326	0.5289
3	0.48	0.806	0.7914
4	1.00	1.0738	1.0528
5	1.02	1.2854	1.2809
6	1.30	1.4406	1.4450
7	1.35	1.5543	1.5624
8	1.43	1.6378	1.6466
9		1.699	1.7068
10	1.62	1.7438	1.7499
11		1.7767	1.7808
12		1.8008	1.8030
13	1.68	1.8185	1.8188
14		1.8315	1.8301
15		1.841	1.8383
16		1.848	1.8441
17	1.78	1.8531	1.8482
20		1.8616	1.8549
21		1.8631	1.8560
22	1.80	1.8642	1.8568
23		1.865	1.8573
24		1.8656	1.8577
25	1.80	1.866	1.8580
26		1.8663	1.8582
27		1.8665	1.8584
28		1.8667	1.8585
29		1.8668	1.8585
30	1.80	1.8669	1.8586

ตารางที่ ค.5 ปริมาณยูเรียสะสมที่ถูกปลดปล่อยจากแคปซูลตัวอย่าง Q เมื่อใช้แบบจำลอง
เทียบกับผลการทดลองและสมการของ Lu และ Lee

เวลา (วัน)	ปริมาณยูเรียสะสมที่ถูกปลดปล่อยจากแคปซูล (กรัม)		
	การทดลอง	แบบจำลอง	สมการของ Lu และ Lee
1		0.0417	0.0650
2		0.1103	0.1300
3		0.1786	0.1949
4		0.2476	0.2598
5	0.10	0.3164	0.3245
6	0.15	0.3845	0.3892
7	0.20	0.4532	0.4538
8	0.25	0.5218	0.5183
9	0.30	0.5896	0.5828
10		0.6581	0.6472
11		0.7258	0.7115
12	0.43	0.7940	0.7757
13		0.8623	0.8399
14		0.9297	0.9040
15	0.60	0.9970	0.9680
18		1.1732	1.1571
19		1.2235	1.2134
20	1.00	1.2708	1.2654
21		1.3148	1.3133
22		1.3553	1.3575
23	1.15	1.3933	1.3983
25		1.4612	1.4706
27	1.40	1.5199	1.5322
30		1.5936	1.6077
35	1.62	1.6856	1.6992
40		1.7497	1.7603
50		1.8251	1.8283
60	1.80	1.8615	1.8586



ประวัติผู้เขียน

นางสาวกัญต์กนิษฐ์ ธนศิริวัฒนา เกิดเมื่อวันที่ 21 กรกฎาคม พุทธศักราช 2514 ที่กรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาปริญญาตรีวิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร จากคณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ในปีการศึกษา 2535 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อ พ.ศ. 2537