

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง



การศึกษาการปลดปล่อยของนุ้ยเคมีโดยใช้เทคนิค
การหุ้มสารด้วยพอลิเมอร์

รฟ. นายนริศ ทวีรรวงศ์
ร.๒๕/๗ นางสาวรัชนิกร ลือพรมมาศ
๒๕๓๗

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน.....
วัน,เดือน,ปี.....

โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต
ภาควิชาเคมี
คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา ๒๕๓๗

๖๑๒๕๓๓๑๒

**Releasing of Chemical fertilizer by
Microencapsulation Technique**

**Mr.Naris Taweeyanyongkul
Miss Rutchaneekorn Lueprommas**

**A Special Project submitted in Partial Fulfillment of the
Requirement for the Degree of Bachelor of Science
Department of Chemistry
Faculty of Science
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
1994**

หัวข้อโครงการพิเศษ การศึกษาการปลดปล่อยของปุ๋ยโดยใช้เทคนิคการหุ้มสารด้วย
พอลิเมอร์

โดย นายนริศ ทวีयरยงกุล
นางสาวรัชนีกร ลือพรมมาศ

ภาควิชา เคมี

อาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร. นิพนธ์ วงศ์วิเศษสิริกุล
อ. กรองแก้ว ทิพย์ศักดิ์

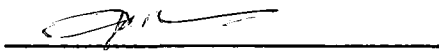
ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
อนุมัติให้นำโครงการพิเศษฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต



(ผศ.ดร.เมธิชญชัย ไชยสิทธิ์)

หัวหน้าภาควิชาเคมี

คณะกรรมการโครงการพิเศษ



(รศ.อรุณี คงศักดิ์ไพศาล)

ประธานกรรมการ



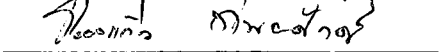
(อ.พิศมัย ชัยรัตน์อุทัย)

กรรมการ



(ผศ.ดร.นิพนธ์ วงศ์วิเศษสิริกุล)

กรรมการ



(อ.กรองแก้ว ทิพย์ศักดิ์)

กรรมการ

ลิขสิทธิ์ของภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

หัวข้อโครงการพิเศษ	การศึกษากการปลดปล่อยของปุ๋ยโดยใช้เทคนิคการหุ้มสารด้วย พอลิเมอร์
นักศึกษาผู้จัดทำ	นายนริศ ทวีรระยกุล นางสาวรัชนีกร ลือพรหมมาศ
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผศ.ดร. นิพนธ์ วงศ์วิเศษสิริกุล อ. กรองแก้ว ทิพย์ศักดิ์
ภาควิชา	เคมี
ปีการศึกษา	2537

บทคัดย่อ

ไมโครแคปซูลชั้นคือการหุ้มสารด้วยพอลิเมอร์เพื่อควบคุมอัตราการปลดปล่อยของปุ๋ยเคมี เทคนิคที่ใช้ในการหุ้มสารจะทำการทำให้แห้งด้วยการพ่น (spray dry) พอลิเมอร์ที่สังเคราะห์มาใช้เป็นตัวหุ้มได้แก่ พอลิเมอร์ร่วมแบบต่อของแป้งมันสำปะหลังกับอะครีลาไมด์ (อัตราส่วน 1:1 โดยโมล) พอลิเมอร์ร่วมแบบต่อของยางธรรมชาติกับอะครีลาไมด์ (อัตราส่วน 1:1 โดยโมล) และโรซินมาเลอิกแอนไฮดรายด์ การสังเคราะห์จะเปลี่ยนแปลงปริมาณเนื้อพอลิเมอร์และเปรียบเทียบประสิทธิภาพของพอลิเมอร์แต่ละชนิดโดยวิเคราะห์หาเปอร์เซ็นต์การปลดปล่อยปุ๋ยเคมีออกจากพอลิเมอร์ ซึ่งจากการศึกษาพบว่าอัตราการปลดปล่อยปุ๋ยเคมีจะขึ้นกับชนิดของพอลิเมอร์ที่ใช้หุ้มและปริมาณพอลิเมอร์ โดยพบว่าโรซินมาเลอิกแอนไฮดรายด์ เหมาะสมที่ใช้เป็นพอลิเมอร์สำหรับหุ้มปุ๋ย เพื่อควบคุมอัตราการปลดปล่อยมากกว่าอีกสองชนิด และเมื่อปริมาณเนื้อพอลิเมอร์มีมากจะช่วยลดอัตราการปลดปล่อยได้เพิ่มขึ้น

Special Project Title	Releasing of Chemical fertilizer by Microencapsulation Technique
Name	Mr. Naris Taweeyanyongkul Miss Rutchaneekorn Lueprommas
Special Project Advisor	Asst.Prof.Dr. Nipon Wongwisetsirikul Miss Krongkaew Tippayasuk
Department	Chemistry
Academic Year	1994

Abstract

Microencapsulation was polymer coating for control releasing rate of chemical fertilizer. This coating was used by spray drying technique. The synthesis of polymer materials for coating were graft copolymer of starch with acrylamide, graft copolymer of latex rubber with acrylamide and rosin maleic anhydride adduct. Polymer were synthesized using various solid content and compared efficiency each polymer by analyzed % releasing of fertilizer from polymer. From the research work it is found that the releasing rate of chemical fertilizer depend upon the type of polymer coating and the quantity of solid content. Rosin ester (maleic anhydride) was the most suitable polymer coating for control releasing rate of chemical fertilizer and the release controlling of fertilizer was reduce relatively with increasing the quantity of solid content.

กิติกรรมประกาศ

กราบขอบพระคุณ ผศ.ดร. นิพนธ์ วงศ์วิเศษสิริกุล และอาจารย์ กรองแก้ว ทิพย์ศักดิ์ ที่กรุณาให้คำปรึกษา แนะนำ และให้ความช่วยเหลือในด้านต่าง ๆ จนทำให้การดำเนินงานโครงการพิเศษนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

กราบขอบพระคุณ รศ. อรุณี คงศักดิ์ไพศาล และอาจารย์ พิสมัย ชัยรัตน์อุทัย ท่านประธานและคณะกรรมการตรวจสอบโครงการพิเศษ ตลอดจนอาจารย์ภาควิชาเคมีทุกท่านที่กรุณาให้คำแนะนำ ตรวจสอบ และแก้ไขโครงการพิเศษนี้ ให้ถูกต้องสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

กราบขอบพระคุณ ดร.อัญชลีพร วาริทสวัสดิ์ ที่ให้ความช่วยเหลือในการจัดหาเครื่องมือที่ใช้ในการเคลือบผิวที่ใช้ในโครงการพิเศษนี้

กราบขอบพระคุณอาจารย์ และ เจ้าหน้าที่ ภาควิชาเทคโนโลยีชีวภาพ ที่อนุเคราะห์ในการใช้เครื่องมือพ่นแห้ง (spray dry) , ให้คำแนะนำและดูแลในการใช้เครื่องมือ

สุดท้ายนี้ ขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ และขอบคุณเพื่อน ๆ ทุกคนในภาควิชาเคมีที่ได้ให้การสนับสนุน ตลอดจนให้กำลังใจในการทำงานครั้งนี้ตลอดมา

นายนริศ ทวีรระยกุล

นางสาวรัชนีกร ลือพรมมาศ

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 ชนิดของสารที่เป็นแกน	8
ตารางที่ 2.2 ชนิดของสารที่เป็นผนัง	9
ตารางที่ 2.3 แสดงตัวอย่างของพอลิเมอร์ที่ใช้เตรียมไมโครแคปซูล โดยเทคนิคพอลิเมอไรซ์ระหว่างผิวหน้า	18
ตารางที่ 2.4 แสดงองค์ประกอบทางเคมีของโรซิน	34
ตารางที่ 2.5 แสดงสมบัติของโรซินชนิดต่าง ๆ	35
ตารางที่ 4.1 แสดงความหนืดของพอลิเมอร์ที่ใช้หุ้มปุ๋ย	44
ตารางที่ 4.2 แสดงการละลายของโรซินเอสเทอร์ในตัวทำละลายต่าง ๆ	45
ตารางที่ 4.3 แสดงค่าที่ใช้ในการคำนวณกราฟมาตรฐานของสารละลายในเทอร์ต	46
ตารางที่ 4.4 แสดงปริมาณไนโตรเจนและเปอร์เซ็นต์การปลดปล่อยไนโตรเจนที่เวลาต่าง ๆ ของไมโครแคปซูลโดยพอลิเมอร์ร่วมแบบต่อของยางธรรมชาติกับอะครีลาไมด์	47
ตารางที่ 4.5 แสดงปริมาณไนโตรเจนและเปอร์เซ็นต์การปลดปล่อยไนโตรเจนที่เวลาต่าง ๆ ของไมโครแคปซูลโดยโรซินเอสเทอร์ (60%)	48
ตารางที่ 4.6 แสดงปริมาณไนโตรเจนและเปอร์เซ็นต์การปลดปล่อยไนโตรเจนที่เวลาต่าง ๆ ของไมโครแคปซูลโดยโรซินเอสเทอร์ (40%)	49
ตารางที่ 4.7 แสดงปริมาณไนโตรเจนและเปอร์เซ็นต์การปลดปล่อยไนโตรเจนที่เวลาต่าง ๆ ของไมโครแคปซูลโดยพอลิเมอร์ร่วมแบบต่อของแป้งมันสำปะหลังกับอะครีลาไมด์ (5.0%)	50
ตารางที่ 4.8 แสดงปริมาณไนโตรเจนและเปอร์เซ็นต์การปลดปล่อยไนโตรเจนที่เวลาต่าง ๆ ของไมโครแคปซูลโดยพอลิเมอร์ร่วมแบบต่อของแป้งมันสำปะหลังกับอะครีลาไมด์ (2.5%)	51
ตารางที่ 4.9 แสดงค่าเปอร์เซ็นต์การปลดปล่อยไนโตรเจนของสารพอลิเมอร์ที่ใช้หุ้มในเวลาต่าง ๆ	58

สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 ชนิดของไมโครแคปซูล	6
รูปที่ 2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างประจุรวมของสารคอลลอยด์และ pH ของสารละลาย	10
รูปที่ 2.3 กระบวนการเตรียมไมโครแคปซูลโดยวิธีฉีดพ่น	13
รูปที่ 2.4 ไมโครแคปซูลที่เตรียมได้โดยการทำแห้งโดยวิธีการฉีดพ่น	14
รูปที่ 2.5 แสดงการเตรียมไมโครแคปซูลแบบการหุ้มแขวนลอยในอากาศ	15
รูปที่ 2.6 แสดงภาพตัดขวางของหัวฉีดชนิดที่หมุนได้	16
รูปที่ 2.7 แสดงขั้นตอนการเตรียมไมโครแคปซูลโดยเทคนิคการพอลิเมอไรซ์ระหว่างผิวหน้า	20
รูปที่ 2.8 แสดงภาพถ่ายที่ได้จากกล้องอิเล็กตรอนไมโครสโคปของไมโครแคปซูล	21
รูปที่ 2.9 แสดงลักษณะของไมโครแคปซูลที่เตรียมโดยเทคนิคการพอลิเมอไรซ์ระหว่างผิวหน้า	21
รูปที่ 2.10 ขั้นตอนการเตรียมไมโครแคปซูลโดยเทคนิคพอลิเมอไรซ์เซชันแบบ in-situ	24
รูปที่ 2.11 ลักษณะไมโครแคปซูล	27
รูปที่ 2.12 แสดงโครงสร้างของแป้งซึ่งประกอบโมเลกุลของอะไมโลสและอะไมโลเพกติน	29
รูปที่ 2.13 แสดงโครงสร้างทางเคมีของโรซินชนิดกรดอะบิติกและชนิดกรดไพมาริก	33
รูปที่ 4.1 แสดงกราฟมาตรฐานของไนโตรเจนที่ความต่างศักย์ต่าง ๆ	52
รูปที่ 4.2 แสดงเปอร์เซ็นต์ของธาตุไนโตรเจนที่ถูกปลดปล่อยจากไมโครแคปซูลโดยพอลิเมอรั่มแบบต่อของยางธรรมชาติกับอะครีลาไมด์	53
รูปที่ 4.3 แสดงเปอร์เซ็นต์ของธาตุไนโตรเจนที่ถูกปลดปล่อยจากไมโครแคปซูลโดยโรซินมาลีอิกแอนไฮดรายด์ (60%)	54
รูปที่ 4.4 แสดงเปอร์เซ็นต์ของธาตุไนโตรเจนที่ถูกปลดปล่อยจากไมโครแคปซูลโดยโรซินมาลีอิกแอนไฮดรายด์ (40%)	55
รูปที่ 4.5 แสดงเปอร์เซ็นต์ของธาตุไนโตรเจนที่ถูกปลดปล่อยจากไมโครแคปซูลโดยพอลิเมอรั่มแบบต่อของแป้งมันสำปะหลังกับอะครีลาไมด์ (5.0%)	56
รูปที่ 4.6 แสดงเปอร์เซ็นต์ของธาตุไนโตรเจนที่ถูกปลดปล่อยจากไมโครแคปซูลโดยพอลิเมอรั่มแบบต่อของแป้งมันสำปะหลังกับอะครีลาไมด์ (2.5%)	57
รูปที่ 4.7 แสดงเปอร์เซ็นต์ของธาตุไนโตรเจนที่ถูกปลดปล่อยจากไมโครแคปซูลโดยสารหุ้มพอลิเมอรั่มชนิดต่าง ๆ	61

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อปัญหาพิเศษภาษาไทย	ก
บทคัดย่อปัญหาพิเศษภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญตาราง	ง
สารบัญรูป	จ
บทที่ 1 บทนำ	1
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักเกณฑ์ที่เกี่ยวข้อง	3
-ไมโครเอนแคปซูเลชัน	6
-สารที่เป็นแกน	7
-สารที่เป็นผนังของไมโครแคปซูล	8
-กระบวนการเตรียมไมโครแคปซูล	9
1.กระบวนการทางกายภาพ	9
2.กระบวนการทางเชิงกล	12
3.กระบวนการทางเคมี	18
4.อิทธิพลของตัวแปรในเทคนิคต่าง ๆ	25
5.การเลือกใช้เทคนิคต่าง ๆ	26
-กลไกการควบคุมการปลดปล่อยสาร	26
-เรซินที่ใช้ในการกระบวนการผลิตไมโครแคปซูเลชัน	28
1.พอลิเมอร์ร่วมแบบต่อของแข็งมันสำปะหลังกับมอนอเมอร์ไวนิล	28
2.พอลิเมอร์ร่วมแบบต่อของยางธรรมชาติกับมอนอเมอร์ไวนิล	31
3.เรซินมาลีอิกแอนไฮไดรไรต์	32
บทที่ 3 การดำเนินงานวิจัย	37
3.1 สารเคมีและเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง	37
3.1.1 สารเคมี	37
3.1.2 เครื่องมือ	38
3.2 วิธีการทดลอง	38

สารบัญ (ต่อ)

3.2.1 การเตรียมสารละลาย Na_2EDTA ความเข้มข้น 10 เปอร์เซ็นต์	38
3.2.2 การเตรียมกรดไนตริกความเข้มข้น 1 โมลาร์	39
3.2.3 การเตรียมสารละลายโปแทสเซียมเปอร์ซัลเฟตความเข้มข้น 0.1 โมลาร์	39
3.2.4 การสังเคราะห์พอลิเมอร์ร่วมแบบต่อของแป้งมันสำปะหลังกับมอนอเมอร์อะคริลาไมด์	39
3.2.5 การสังเคราะห์โรซินมาลีนิกแอนไฮดรายด์	39
3.2.6 การเตรียมอิมัลชันของโรซินเอสเทอร์	40
3.2.7 การสังเคราะห์พอลิเมอร์ร่วมแบบต่อของยางธรรมชาติกับอะคริลาไมด์	40
3.2.8 การสังเคราะห์ไมโครแคปซูลโดยสารพอลิเมอร์หุ้มชนิดต่าง ๆ	41
3.3 การศึกษาสมบัติของสารพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์ได้	41
3.3.1 การศึกษาความหนืดของสารพอลิเมอร์ของสารพอลิเมอร์ที่ใช้หุ้ม	41
3.3.2 การศึกษาสมบัติในการละลายของโรซินเอสเทอร์	41
3.3.3 การวิเคราะห์หาค่าจุดหลอมเหลวของโรซินเอสเทอร์	41
3.3.4 การวิเคราะห์ค่าความเป็นกรดของโรซินเอสเทอร์	41
3.3.5 การศึกษาหาอัตราการปลดปล่อยปุ๋ยโดยวัดค่าความเข้มข้นของไอออนไนเตรต	42
บทที่ 4 ผลการทดลอง	44
4.1 สารหุ้มพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์ได้	44
4.2 ความหนืดของสารพอลิเมอร์ที่ใช้หุ้มปุ๋ย	44
4.3 การศึกษาสมบัติการละลายของโรซินเอสเทอร์	45
4.4 การวิเคราะห์หาค่าจุดหลอมเหลวของโรซินเอสเทอร์	45
4.5 ไมโครแคปซูลที่เตรียมได้จากการหุ้มโดยพอลิเมอร์	46
4.6 การทำกราฟมาตรฐานไอออนไนเตรต	46
4.7 การวัดอัตราการปลดปล่อยของไมโครแคปซูล	46

สารบัญ (ต่อ)

บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	61
ข้อเสนอแนะ	62
ภาคผนวก	63
บรรณานุกรม	68

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญของปัญหา

ปุ๋ยเคมีที่ใช้ทางการเกษตรนั้นมีส่วนประกอบของธาตุหลัก 3 ธาตุคือ ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และ โพแทสเซียม และยังมีสารอาหารต่าง ๆ ที่จำเป็นสำหรับพืชอีก ซึ่งก็แล้วแต่ การนำไปใช้ประโยชน์ของปุ๋ยเคมีนั้น ๆ การใช้ปุ๋ยเคมีในงานด้านการเกษตรนั้นก่อให้เกิด ปัญหาการชะล้างของปุ๋ยไปสู่แหล่งน้ำซึ่งเป็นปัญหาต่อสิ่งแวดล้อม เนื่องจากปริมาณของปุ๋ย เคมีที่มีมากจะทำให้วัชพืชน้ำเจริญเติบโตได้ดี ก่อให้เกิดผลเสียต่อสมดุลนิเวศวิทยา เมื่อ พิจารณาถึงสารเคมีที่มีอยู่ในปุ๋ย จะเห็นว่าสารเคมีเหล่านั้นสามารถละลายน้ำได้ ได้แก่

ปุ๋ยที่มีธาตุไนโตรเจนซึ่งจะอยู่ในรูปไอออนไนเตรต, ไอออนแอมโมเนีย หรืออาจจะอยู่ในรูป ของยูเรีย

ปุ๋ยที่มีธาตุฟอสฟอรัสซึ่งจะอยู่ในรูปไอออนฟอสเฟต

ปุ๋ยที่มีธาตุโพแทสเซียมซึ่งจะอยู่ในรูปไอออนโพแทสเซียม

ไอออนและสารประกอบที่มีอยู่ในปุ๋ยสามารถที่จะละลายในน้ำได้ดี เมื่อปุ๋ยเคมีถูกชะล้าง ด้วยน้ำ ปริมาณไอออนที่มีอยู่ในน้ำจะขึ้นอยู่กับปริมาณปุ๋ย ถ้ามีปุ๋ยมากไอออนในน้ำก็จะมี มากตามไปด้วย สามารถเปรียบเทียบได้กับการแตกตัวของเกลือในน้ำ ซึ่งกรณีดังกล่าวพืชจะไม่สามารถดูดซึมสารเหล่านี้เพื่อนำไปใช้ประโยชน์ได้หมด ก็จะถูกชะล้างลงสู่ลำคลองหรือ แหล่งน้ำทำให้ปริมาณไอออนเหล่านี้มีมาก ก็ทำให้มีปริมาณสารตกค้างในสิ่งแวดล้อมมีมาก ด้วย

การทำให้สารอาหารของพืชถูกปลดปล่อยออกมาช้า ๆ เพื่อให้พืชสามารถดูดซึมไปใช้งาน ได้มากที่สุด หรือให้มีปริมาณสารตกค้างน้อยที่สุด ซึ่งจะทำให้การใช้งานของปุ๋ยเคมีมี ประสิทธิภาพสูงสุดด้วย และเป็นการช่วยลดปัญหาสิ่งแวดล้อม วิธีการที่สามารถช่วยลด ปัญหาดังกล่าวได้ก็คือ การเคลือบปุ๋ยเคมีที่นำไปใช้งานทางด้านเกษตรด้วยสารเคมี หรือสารพอลิเมอร์ชนิดต่าง ๆ เพื่อป้องกันให้น้ำเข้าไปชะล้างได้น้อยลง ก็จะทำให้เกิด ไอออนได้น้อยลงด้วย วิธีการที่ใช้ในการหุ้มหรือเคลือบปุ๋ยที่นิยมใช้กันโดยทั่วไปคือการทำ ไมโครแคปซูลของปุ๋ยเคมีนั้น ๆ สารเคมีหรือพอลิเมอร์ที่ใช้หุ้มจะทำให้อัตราการปลดปล่อย

ปุ๋ยเคมีช้าลง จนกระทั่งสารอาหารในปุ๋ยเคมีนั้นหมดไปเหลือแต่สารที่ใช้หุ้ม และถ้าสารที่ใช้หุ้มสามารถย่อยสลายได้โดยธรรมชาติในสภาวะแวดล้อมก็จะไม่ทำให้เกิดปัญหาต่อสิ่งแวดล้อมในอนาคต

โครงการพิเศษนี้จะใช้สารพอลิเมอร์เคลือบปุ๋ยเคมี พอลิเมอร์ที่ใช้ในการเคลือบมี 3 ชนิดด้วยกันคือ

1. พอลิเมอร์ร่วมแบบต่อของแป้งมันสำปะหลังกับมอนอเมอร์อะคริลาไมด์
2. พอลิเมอร์ร่วมแบบต่อของยางธรรมชาติกับมอนอเมอร์อะคริลาไมด์
3. โรซินมาลีอิกแอนไฮไดรด์

1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1 เพื่อศึกษาถึงแนวทางการประยุกต์ใช้พอลิเมอร์ร่วมแบบต่อของแป้งมันสำปะหลังกับอะคริลาไมด์ พอลิเมอร์ร่วมแบบต่อของยางธรรมชาติกับอะคริลาไมด์ และโรซินมาลีอิกแอนไฮไดรด์ ในการเคลือบปุ๋ยเคมี สำหรับควบคุมการปลดปล่อยสารอาหารให้แก่พืช

1.2.2 เพื่อวิเคราะห์ปริมาณสารอาหารของพืชที่ถูกปลดปล่อยออกมา หลังจากทำการเคลือบด้วยสารพอลิเมอร์ชนิดต่าง ๆ

1.3 ขอบเขตการศึกษา

1.3.1 การสังเคราะห์พอลิเมอร์ร่วมแบบต่อชนิดต่าง ๆ โดยหาสภาวะที่เหมาะสมในการสังเคราะห์พอลิเมอร์ร่วมแบบต่อของแป้งมันสำปะหลังกับอะคริลาไมด์ พอลิเมอร์ร่วมแบบต่อของยางธรรมชาติกับอะคริลาไมด์ และ โรซินมาลีอิกแอนไฮไดรด์

1.3.2 ปุ๋ยเคมีที่ใช้คือปุ๋ยสูตร 15 - 0 - 0 ที่มีไนโตรเจนอยู่ในรูปของแคลเซียมไนเตรต

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ทราบสภาวะที่เหมาะสมในการสังเคราะห์สารพอลิเมอร์ทั้ง 3 ชนิด ให้มีสมบัติเหมาะสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้ในการเคลือบปุ๋ยเคมี

1.4.2 ทราบอัตราการปลดปล่อยสารอาหารให้แก่พืชเพื่อลดปริมาณการชะล้างปุ๋ยเคมี สู่อากาศแวดล้อม

บทที่ 2

ทฤษฎีและหลักเกณฑ์ที่เกี่ยวข้อง

เนื่องจากความเป็นประโยชน์ของปุ๋ยเคมีขึ้นกับการละลายของปุ๋ยนั้นในสารละลายของดินเป็นสำคัญ ดังนั้น ก่อนที่จะอธิบายในรายละเอียดเกี่ยวกับปุ๋ยที่มีการควบคุมการปลดปล่อย เพื่อให้เป็นประโยชน์จึงควรทำความเข้าใจความหมายของคำว่า “การละลาย” และ “ความสามารถในการละลาย” ของปุ๋ยเสียก่อน

การละลาย (dissolution) หมายถึง ตัวถูกละลาย (solute) ผสมรวมกับตัวทำละลาย(solvent) เป็นเนื้อเดียวกัน เมื่อใส่ปุ๋ยลงไปในน้ำที่มีปริมาตรจำกัด ปุ๋ยใดละลายได้เร็วกว่าก็เรียกว่า ปุ๋ยนั้นมีอัตราการละลาย (dissolution rate) สูงกว่า

ความสามารถในการละลายหรือการละลายได้ (solubility) หมายถึง ปริมาณหรือความเข้มข้นของตัวถูกละลายในสารละลายอิ่มตัว ณ อุณหภูมิที่กำหนดให้ ยกตัวอย่างเช่น แอมโมเนียมไนเตรต 187 กรัม ละลายในน้ำ 100 กรัม อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส จะได้สารละลายอิ่มตัว แต่ถ้าจะเตรียมสารละลายแอมโมเนียมคลอไรด์ที่อิ่มตัว ในน้ำปริมาณเท่ากันและอุณหภูมิเท่ากัน ก็ใช้เกลือดังกล่าวเพียง 37.2 กรัมเท่านั้น แสดงว่าแอมโมเนียมไนเตรดมีความสามารถในการละลายสูงกว่าแอมโมเนียมคลอไรด์

แนวความคิดในการพัฒนาปุ๋ยที่มีการควบคุมความเป็นประโยชน์ แบ่งได้เป็น 2 แบบคือ

1. ควบคุมการปลดปล่อย (controlled release) ธาตุอาหาร ปุ๋ยที่ปลดปล่อยธาตุอาหารออกมาอย่างช้า ๆ นั้นมีอยู่หลายประเภท ซึ่งแต่ละประเภทมีกลไกของการควบคุมที่แตกต่างกันคือ

- (1) เคลือบปุ๋ยที่ละลายง่ายด้วยสารที่ป้องกันการซาบซึมน้ำ
- (2) ปุ๋ยเป็นสารประกอบที่มีการละลายน้ำอย่างช้า ๆ
- (3) ปุ๋ยเป็นสารประกอบที่ต้องมีจุลินทรีย์ดินเข้าย่อยเสียก่อนจึงละลาย ซึ่งการละลายน้ำของปุ๋ยดังกล่าวจึงขึ้นอยู่กับกิจกรรมของจุลินทรีย์ดิน
- (4) ปุ๋ยอินทรีย์ซึ่งได้จากธรรมชาติ เมื่อจุลินทรีย์ดินเข้าย่อยสลายแล้วจะปลดปล่อยธาตุอาหารรูปที่เป็นประโยชน์ต่อพืชออกมา

ข้อดีของปุ๋ยที่ควบคุมการปลดปล่อยธาตุอาหาร

1.1 ปุ๋ยประเภทนี้ค่อย ๆ ปลดปล่อยธาตุอาหารในรูปที่เป็นประโยชน์ต่อพืชออกมา พืชจึงมีโอกาสใช้ได้ในช่วงเวลายาวนานกว่า ประสิทธิภาพของปุ๋ยประเภทนี้จึงมักสูงกว่าปุ๋ยที่ละลายง่ายทั่ว ๆ ไป

1.2 การสูญหายโดยการชะล้างของน้ำมีน้อยลง

1.3 ไม่ทำให้สารละลายของดินมีความเข้มข้นสูงเกินไปจนเป็นอันตรายต่อพืช แม้ว่า จะใส่ปุ๋ยทั้งหมดตามอัตราที่กำหนดเพียงครั้งเดียว

1.4. เนื่องจากเป็นปุ๋ยที่ค่อยๆละลาย พืชจึงได้รับธาตุอาหารในรูปที่เป็นประโยชน์ อย่างต่อเนื่อง

2. ปกป้องรักษาความเป็นประโยชน์ (protected availability) ของธาตุอาหาร ได้แก่ การรักษาธาตุอาหารที่ละลายออกมาจากปุ๋ยให้คงอยู่ในรูปที่เป็นประโยชน์ไปนาน ๆ หรือ ป้องกันการเปลี่ยนแปลงไปสู่รูปที่เสี่ยงต่อการสูญหาย เช่น การใช้สารชะงักกระบวนการ ไนตริฟิเคชัน (nitrification inhibitors) เพื่อป้องกันมิให้อิออนแอมโมเนียมแปรสภาพไปเป็น ไอออนไนเตรต คีเลตก็เป็นสารอีกประเภทหนึ่ง ซึ่งมีธาตุประกอบอยู่ในโครงสร้าง แม้ว่า สารเหล่านี้จะละลายน้ำได้ดี แต่ธาตุอาหารที่มีอยู่ก็เป็นประโยชน์ต่อพืชได้นานกว่า เมื่อ เทียบกับการใช้ปุ๋ยธาตุโดยทั่วไป

ปุ๋ยที่มีสารเคลือบ

การเคลือบผิวของเม็ดปุ๋ยที่ละลายง่าย เพื่อควบคุมการละลายของปุ๋ย มีหลักการ ดังต่อไปนี้

1. ยูเรียเคลือบด้วยกำมะถัน (sulfur-coated urea หรือ SCU) การเคลือบปุ๋ยชนิดเม็ด ด้วยกำมะถัน เป็นวิธีที่เหมาะสมเนื่องจาก

(1) สามารถใช้เคลือบปุ๋ยได้แทบทุกชนิด ไม่ว่าจะมีความธาตุอาหารใดประกอบอยู่บ้าง

(2) วิธีการเคลือบไม่สลับซับซ้อน

(3) กำมะถันมีราคาไม่แพงนัก เมื่อเม็ดปุ๋ยละลายแล้ว กำมะถันก็แปรสภาพต่อไป เป็นไอออนซัลเฟต ซึ่งพืชใช้ประโยชน์ได้อีกด้วย ยูเรียที่เคลือบด้วยกำมะถันเป็นปุ๋ยที่ได้รับ

ความนิยมมากกว่าปุ๋ยชนิดอื่น ๆ อย่างไรก็ตาม การนำกำมะถันเพียงอย่างเดียวมาหลอมแล้วเคลือบปุ๋ยเร็ว ทำให้ผิวที่เคลือบมีรูพรุนมากเกินไป เป็นเหตุให้ความสามารถในการละลายได้ไม่ดีนัก จึงต้องแก้ไขจุดบกพร่องนี้โดยการผสมสารอีก 2 อย่าง คือ (1) ขี้ผึ้งเป็นวัสดุอุดกันรั่ว (wax sealant) เพื่อลดการซึมของน้ำ (2) สารควบคุมกิจกรรมของจุลินทรีย์ (microbiocide) เช่น เพนตาคลอโรฟีนอล หรือน้ำมันดินจากถ่านหิน ซึ่งจะช่วยป้องกันมิให้จุลินทรีย์ดินออกซิไดส์กำมะถันเกินไป

2. ปุ๋ยที่เคลือบด้วยสารพอลิเมอร์ (polymer coating fertilizers) หมายถึง ปุ๋ยที่ได้จากการเคลือบปุ๋ยเม็ดชนิดใดชนิดหนึ่งด้วยสารพอลิเมอร์ อัตราการละลายของปุ๋ยขึ้นอยู่กับความหนาของสารเคลือบ วิธีการเคลือบและชนิดของปุ๋ยที่อยู่ภายใน หากเคลือบหนาอัตราการละลายก็จะต่ำลง สำหรับวิธีการเคลือบแบ่งได้เป็น 3 วิธีคือ

2.1 เคลือบด้วยสารที่ยอมให้น้ำซึมผ่านได้บ้าง (semipermeable membrane) น้ำจึงซึมเข้าสู่ปุ๋ยอย่างช้า ๆ เมื่อน้ำเริ่มละลายเนื้อปุ๋ยซึ่งอยู่ภายใน จะทำให้เกิดความดันออสโมติก ในที่สุดสารเคลือบจะปริและปุ๋ยซึมออกมาสู่ดิน

2.2 เคลือบปุ๋ยด้วยสารกั้นน้ำ แต่เจาะรูเล็ก ๆ (pin hole) เอาไว้บ้าง เพื่อให้ น้ำซึมเข้าและน้ำปุ๋ยซึมออกอย่างจำกัด

2.3 เคลือบด้วยสารที่กั้นน้ำ แต่เมื่ออยู่ในดินสารเคลือบจะถูกจุลินทรีย์ย่อยสลายให้เกิดช่องหรือรอยแยก ซึ่งเป็นช่องทางให้น้ำซึมเข้าและน้ำปุ๋ยซึมออกมาได้

ปุ๋ยที่เคลือบสารพอลิเมอร์เป็นปุ๋ยที่ละลายได้ง่าย แต่จะคงสภาพเป็นของแข็งจนกว่าจะมีน้ำผ่านสารเคลือบเข้ามาละลาย ดังนั้น การปลดปล่อยธาตุอาหารในรูปที่เป็นประโยชน์ออกมาสู่ดินจึงเป็นไปอย่างจำกัด ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความหนาของสารเคลือบและวิธีการเคลือบ หากสามารถนำปุ๋ยที่เคลือบและควบคุมให้มีอัตราการปลดปล่อยธาตุอาหารแตกต่างกัน มาผสมกันอย่างพอเหมาะ ก็จะได้ปุ๋ยที่ให้ธาตุอาหารสอดคล้องกับความต้องการของพืชในช่วงเวลาต่าง ๆ

การเคลือบเม็ดปุ๋ยยังมีข้อได้เปรียบอีก 2 ประการ คือ

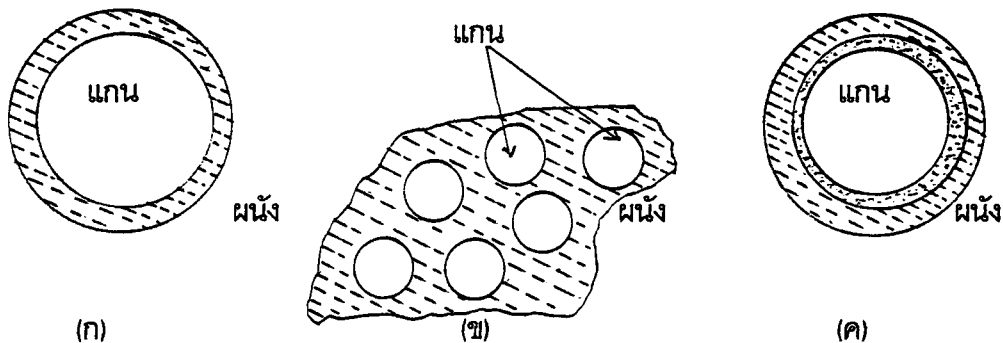
(1) ช่วยให้สภาพทางฟิสิกส์ของปุ๋ยดีขึ้นไม่ขึ้นง่าย นอกจากนี้ยังเป็นเทคนิคที่ใช้กับปุ๋ยได้อย่างกว้างขวาง

(2) จะใช้กับปุ๋ยสูตรใดหรือจะผสมธาตุอาหารองรวมไปด้วยก็ได้ อย่างไรก็ตามข้อเสียของวิธีนี้คือ เมื่อผลิตมาก ๆ การเคลือบมักไม่ค่อยสม่ำเสมอ และต้นทุนการเคลือบสูง แต่เมื่อเปรียบเทียบแล้วยังราคาถูกกว่าการผลิตปุ๋ยที่เป็นสารละลายซ้ำ

ในปัจจุบันปุ๋ยที่ผลิตโดยวิธีนี้ เรียกกันโดยทั่วไปว่า ออสโมโคท (osmocote) ซึ่งให้ทั้งธาตุปุ๋ยไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และโปแทสเซียม การละลายของปุ๋ยจะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ส่วน pH ของดิน หรือการเพิ่มความชื้นของดินในช่วงตั้งแต่เหนือจุดเหี่ยวเฉาอย่างถาวร ถึงความจุความชื้นในสนามไม่มีผลต่อการละลายของปุ๋ยดังกล่าว

ไมโครเอนแคปซูลชัน (Microencapsulation)

ไมโครเอนแคปซูลชัน เป็นกระบวนการหุ้มห่ออนุภาคของแข็ง หรือหยดของเหลวขนาดเล็กด้วยผนังหุ้ม ได้เป็นไมโครแคปซูลที่มีสมบัติสามารถนำไปใช้เป็นประโยชน์หลายประการ วัสดุที่อยู่ภายในไมโครแคปซูลเรียกว่า สารที่ถูกหุ้ม แกน วัสดุภายใน หรือสารที่บรรจุอยู่ และผนังหุ้มเรียกว่า เปลือก สารหุ้ม หรือเยื่อหุ้ม โดยทั่วไปไมโครแคปซูลนี้จะอยู่ในรูปทรงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ในช่วง 1-1000 ไมโครเมตร ขนาดและการกระจายของขนาดจะขึ้นอยู่กับกระบวนการควบคุมกระบวนการผลิต แต่อย่างไรก็ตามไมโครแคปซูลอาจมีรูปทรงหรือโครงสร้างต่างๆ กันดังแสดงในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 ชนิดของไมโครแคปซูล

รูปที่ 2.1 (ก) แสดงลักษณะไมโครแคปซูลที่มีโครงสร้างเป็นแบบไมโนนิวเคลียร์ (mononuclear)

รูปที่ 2.1 (ข) แสดงลักษณะไมโครแคปซูล ซึ่งสารที่เป็นแกนถูกแบ่งย่อยเป็นส่วน ๆ ตรึงอยู่ในผนังของแคปซูลที่ล้อมรอบอยู่ โครงสร้างเหล่านี้เรียกว่า กลุ่มของไมโครแคปซูล (aggregate)

รูปที่ 2.1 (ค) แสดงลักษณะไมโครแคปซูลที่มีผนังมากกว่า 1 ชั้น ลักษณะของไมโครแคปซูลจะถูกกำหนดโดยขนาดและการกระจายขนาดของอนุภาค ความว่องไวของสารกลไกการปลดปล่อยสาร เสถียรภาพในการเก็บรักษา และตัวแปรอื่น ๆ

เหตุผลในการเตรียมไมโครแคปซูลมีหลายประการ บางกรณีต้องการแยกสารออกจากสิ่งแวดล้อม เช่น วิตามินบางชนิดจะเสถียรสมบัติบางประการถ้าสัมผัสกับออกซิเจน หนองเหนียวการระเหยของสารที่ระเหยได้ง่าย ปรับปรุงสมบัติการใช้งานของวัสดุที่มีลักษณะเหนียวหนืด หรือบางกรณีต้องการควบคุมอัตราการปลดปล่อยสารเพื่อยืดอายุการใช้งานของสาร เช่นการควบคุมอัตราการปลดปล่อยปุ๋ยหรือยา เป็นต้น

สารที่เป็นแกน

สารที่เป็นแกนไม่ควรละลาย และทำปฏิกิริยากับวัฏภาคต่อเนื่อง โดยทั่วไปสารที่เป็นแกน เป็นได้ทั้งของแข็งที่ละลายน้ำและไม่ละลายน้ำ ของเหลวที่ไม่ละลายน้ำ สารละลายและอนุภาคของแข็งที่กระจายตัวอยู่ในของเหลว ตารางที่ 2.1 แสดงชนิดของสารที่เป็นแกน

ตารางที่ 2.1 ชนิดของสารที่เป็นแกน

มอนอเมอร์	น้ำมัน	สารฆ่าเชื้อรา
วิตามิน	สารเติมแต่งอาหาร	อาหาร
สารยึดเกาะ	เชื้อเพลิง	น้ำหอม
แบคทีเรีย	สารฆ่าวัชพืช	ตัวทำปฏิกิริยาต่าง ๆ
สารเร่งปฏิกิริยา	หมึก	สี
ตัวทำละลาย	ปุ๋ย	เชื้อเพลิงจรวด
สารลดแรงตึงผิว	สารฆ่าแมลง	ยา
วิตามิน	ไวรัล	โลหะ
ฮอริโมน	พลาสติกไซเซอร์	สารให้กลิ่น
สเตบิลไลเซอร์	สีย้อม	สารทำให้ยางสุก

สารที่เป็นผนังของไมโครแคปซูล

สารที่ใช้เป็นผนังของไมโครแคปซูลหรือสารที่หุ้ม เป็นสารที่สามารถรวมตัวกันรอบอนุภาคของสารที่เป็นแกนเพื่อให้มีสมบัติตามต้องการ โดยทั่วไปเป็นพวกพอลิเมอร์ธรรมชาติหรือพอลิเมอร์สังเคราะห์ เช่น เจลาติน แป้ง หรือเอทิลเซลลูโลส เป็นต้น โดยสามารถเตรียมให้ยึดหยุ่น แข็ง หรือเปราะได้ ด้วยการเลือกชนิดของสารพอลิเมอร์ ความหนาในการหุ้ม สารเติมแต่งและวิธีในการเตรียม ตัวอย่างของสารที่เป็นผนัง แสดงไว้ในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ชนิดของสารที่เป็นผนัง

เจลาติน	กัมอาราบิก	ซูโครส
เอทิลเซลลูโลส	คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส	พอลิคาร์บอเนต
พอลิสไตรีน	ยางธรรมชาติ	พอลิไวนิลแอลกอฮอล์
พอลิเมทิลเมทาคริเลต	แป้ง	พอลิยูเรีย
พอลิอะคริเลต	เรซินอะมิโน	พอลิเอสเทอร์
ซิลิเกต	โรซิน	เรซินยูเรีย-ฟอร์มัลดีไฮด์
พอลิบีวทาไดอิน	พอลิไอโซพรีน	อะลูมิเนียม
พอลิอีเทอร์	พาราฟิน	พอลิเอไมด์

กระบวนการเตรียมไมโครแคปซูล

ปัจจุบันกระบวนการเตรียมไมโครแคปซูลมีมากมาย และกำลังพัฒนาให้ดีขึ้นต่อไปในอนาคต เทคนิคต่าง ๆ ขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ เช่น ความสามารถในการละลายของสารที่ใช้เป็นผนังซึ่งเป็นพอลิเมอร์ ความสามารถในการละลายของสารที่เป็นแกน ขนาดของอนุภาค ความสามารถในการแพร่ผ่านผนัง พลังงานอิสระของผิวหน้า รูปแบบของการปลดปล่อยสารที่ต้องการ และสมบัติทางกายภาพของไมโครแคปซูล กระบวนการเตรียมไมโครแคปซูลแบ่งออกเป็น 3 ประเภทใหญ่ ๆ คือ

- 1) กระบวนการทางกายภาพ
- 2) กระบวนการทางเชิงกล
- 3) กระบวนการทางเคมี

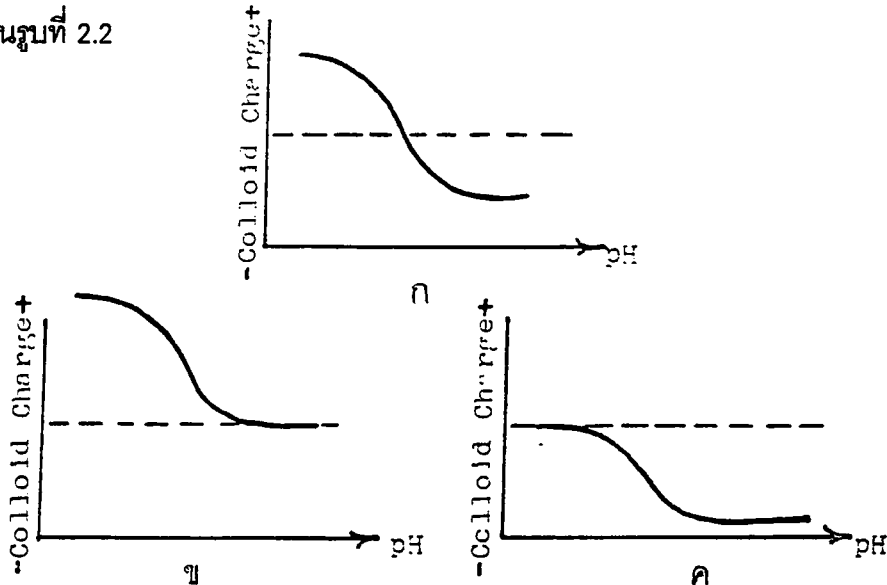
1. กระบวนการทางกายภาพ

1.1 เทคนิคการเตรียมไมโครแคปซูลแบบโคอะเซอร์เวชัน (coacervation - microencapsulation)

โคอะเซเวชัน หมายถึง ปรากฏการณ์ในการเกิดวัฏภาคสองชั้นที่มีตัวทำละลายชนิดเดียวกัน โดยเกิดเป็นชั้นที่มีคอลลอยด์มาก และชั้นที่มีคอลลอยด์น้อย

สารที่สามารถเกิดโคอะเซเวชันนี้ จะต้องสามารถละลายหรือกระจายตัวในน้ำได้ ได้แก่ สารคอลลอยด์ไฮโดรฟิลิกเช่น เจลาติน (gelatin) แอลจีเนต (alginate) แอลบูมิน (albumin) เคซีน (casein) กัมอาราบิก (gum arabic) แป้ง (starch) พอลิอะคริลิก (polyacrylic) และพอลิอะคริลามิเด (polyacrylamide) เป็นต้น สารคอลลอยด์ไฮโดรฟิลิกเหล่านี้เมื่ออยู่ในน้ำจะอยู่ในลักษณะโซ่ที่พันกันอย่างไม่ระเบียบ

สารคอลลอยด์นี้จะมีหมู่ที่สามารถแตกตัวเป็นไอออนได้หลายหมู่ตามสายโซ่โมเลกุล ทำให้เกิดประจุไฟฟ้าขึ้นซึ่งมีความสัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลง pH ของสารละลาย ดังแสดงในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างประจุรวมของสารคอลลอยด์ และ pH ของสารละลาย

- ก) สารคอลลอยด์ชนิดแอมโฟเทอริก
- ข) สารคอลลอยด์ชนิดไอออนบวก
- ค) สารคอลลอยด์ชนิดไอออนลบ

สารคอลลอยด์ไฮโดรฟิลิกชนิดแอมโฟเทอริก คือ สารที่เมื่อมีการเปลี่ยนแปลง pH แล้วสามารถมีประจุรวมเป็นได้ทั้งบวก และลบ ซึ่งในโมเลกุลของสารประเภทนี้จะมีทั้งหมู่ที่สามารถแตกตัวเป็นไอออนบวก และลบได้ และจุดที่ pH ซึ่งมีประจุรวมเป็นศูนย์ เรียกว่า จุดไอโซอิเล็กตริก สารคอลลอยด์ไฮโดรฟิลิกชนิดไอออนบวกจะมีประจุรวมเป็นบวกเพียงอย่าง

เดียว สารคอลลอยด์ไฮโดรฟิลลิคชนิดไอออนประจุลบจะมีประจุรวมเป็นลบเพียง
อย่างเดียว

เทคนิคการเตรียมไมโครแคปซูลแบบโคอะเซอเวชันแบ่งได้เป็น 2 ประเภทใหญ่ คือ

1. การเตรียมไมโครแคปซูลแบบโคอะเซอเวชันอย่างง่าย
2. การเตรียมไมโครแคปซูลแบบโคอะเซอเวชันเชิงซ้อน

1. การเตรียมไมโครแคปซูลแบบโคอะเซอเวชันอย่างง่าย ทำได้โดยการแยกน้ำที่อยู่
รอบ ๆ พอลิเมอร์ออกโดยการเติมของเหลวที่ไม่ใช่ตัวทำละลายที่ดีของพอลิเมอร์นั้น ลด
อุณหภูมิลง เติมสารที่ทำให้เกิดการแยกวัฏภาค หรือเติมพอลิเมอร์อื่นซึ่งมีค่าการละลาย
สูงกว่าพอลิเมอร์ที่เป็นผนัง การเกิดการแยกตัวของวัฏภาคของเหลวที่มีพอลิเมอร์มาก
พอลิเมอร์ต้องสามารถเปียกหมด หรืออนุภาคของสารที่เป็นแกนจะต้องแขวนลอยอยู่ได้ดี
และมีการหุ้มอย่างต่อเนื่อง จากนั้นเป็นขั้นตอนการทำให้แข็งตัว และเกิดการแยกของ
ไมโครแคปซูล ซึ่งเป็นขั้นที่ยากที่สุดของกระบวนการนี้

เทคนิคการเตรียมไมโครแคปซูลแบบโคอะเซอเวชันโดยอาศัยอุณหภูมิ โดยทั่วไป
อุณหภูมิที่มีผลต่อการละลายมาก จึงอาศัยหลักการเรื่องการละลายของพอลิเมอร์มาใช้ในการ
การเตรียม โดยการทำให้พอลิเมอร์ที่ละลายอยู่เกิดการแยกตัวออกเมื่อลดอุณหภูมิลง
อย่างไรก็ตามผลของอุณหภูมิส่วนใหญ่จะใช้ร่วมกับวิธีการอื่น ๆ

เทคนิคการเตรียมไมโครแคปซูลแบบโคอะเซอเวชัน โดยอาศัยความสามารถในการ
ละลายที่ต่างกันของพอลิเมอร์สองชนิด ทำได้โดยเติมพอลิเมอร์ชนิดหนึ่งซึ่งสามารถละลาย
ในสารละลายได้ดีกว่าพอลิเมอร์ที่เป็นผนัง ลงในสารละลายของพอลิเมอร์ที่เป็นผนัง ซึ่งมี
สารที่เป็นแกนกระจายตัว ทำให้เกิดการแยกตัวของผนังออกจากสารละลายตัวกลาง วิธีนี้
ใช้ได้ดีสำหรับการหุ้มสารที่เป็นแกนชนิดของแข็งและของเหลว

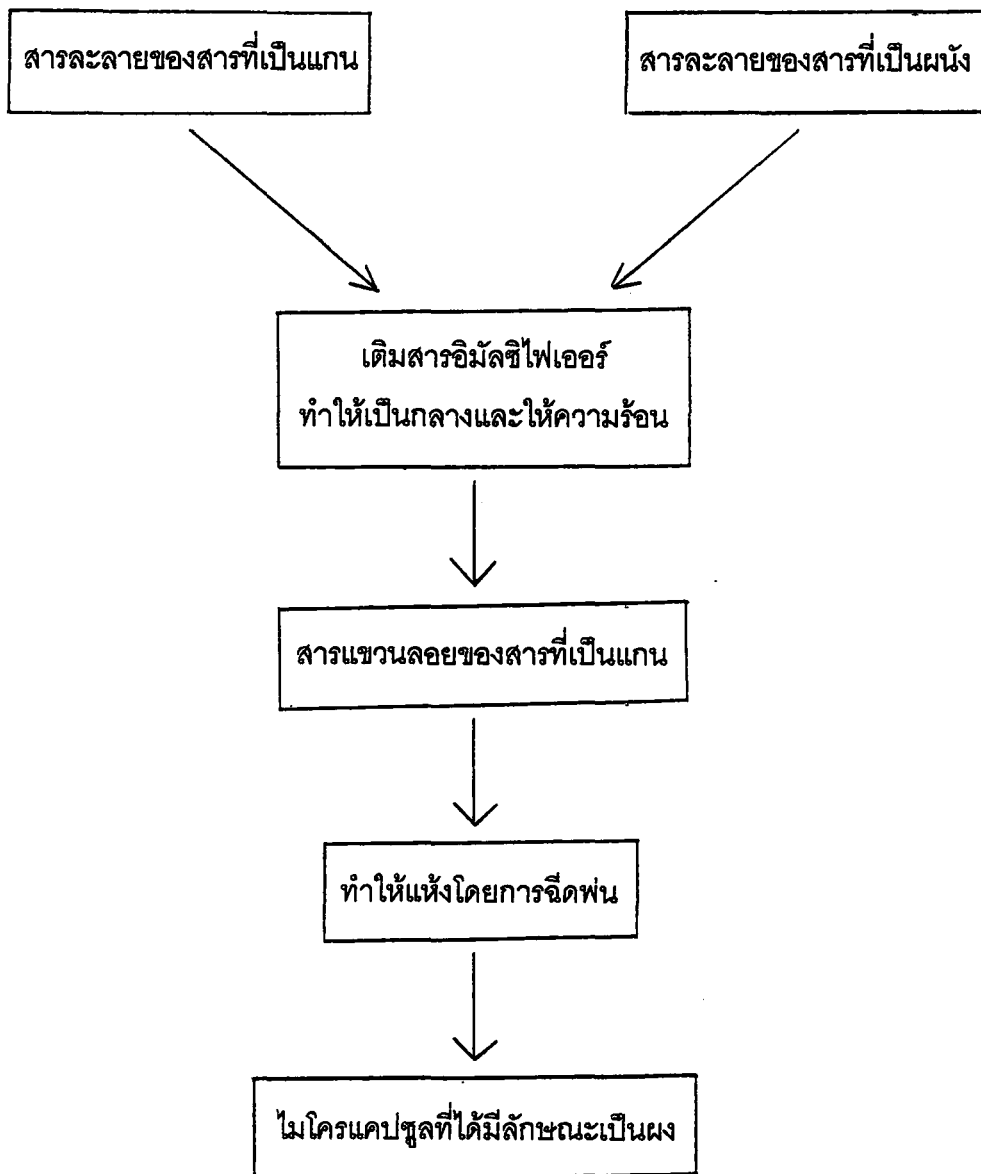
2. การเตรียมไมโครแคปซูลแบบโคอะเซอเวชันเชิงซ้อน เตรียมได้โดยการทำให้ประจุ
ของพอลิเมอร์สมดุล โดยการนำพอลิเมอร์ 2 ชนิดที่มีประจุตรงกันข้ามมารวมกัน เช่น เจลา-
ตินและกัมอาราบิกที่ pH เป็นกลางเจลาตินจะมีประจุบวก ในขณะที่กัมอาราบิกมีประจุลบ

เนื่องจากมีการไอออนไนซ์ของหมู่กลูโคโรนิก ซึ่งเป็นกรด พอลิเมอร์ทั้งสองชนิดนี้จะรวมตัวกัน ทำให้ประจุรวมเป็นศูนย์ และการเกิดการแยกตัวออกมาจากวัฏภาคของเหลว และถ้ามีการทำให้แห้งอย่างมีประสิทธิภาพแล้ว จะได้ผงแคปซูลซึ่งยอมให้มีการแพร่ผ่านต่ำมาก สามารถใช้เก็บน้ำมันซึ่งมีจุดเดือดต่ำได้เป็นเวลานาน

2. กระบวนการทางเชิงกล

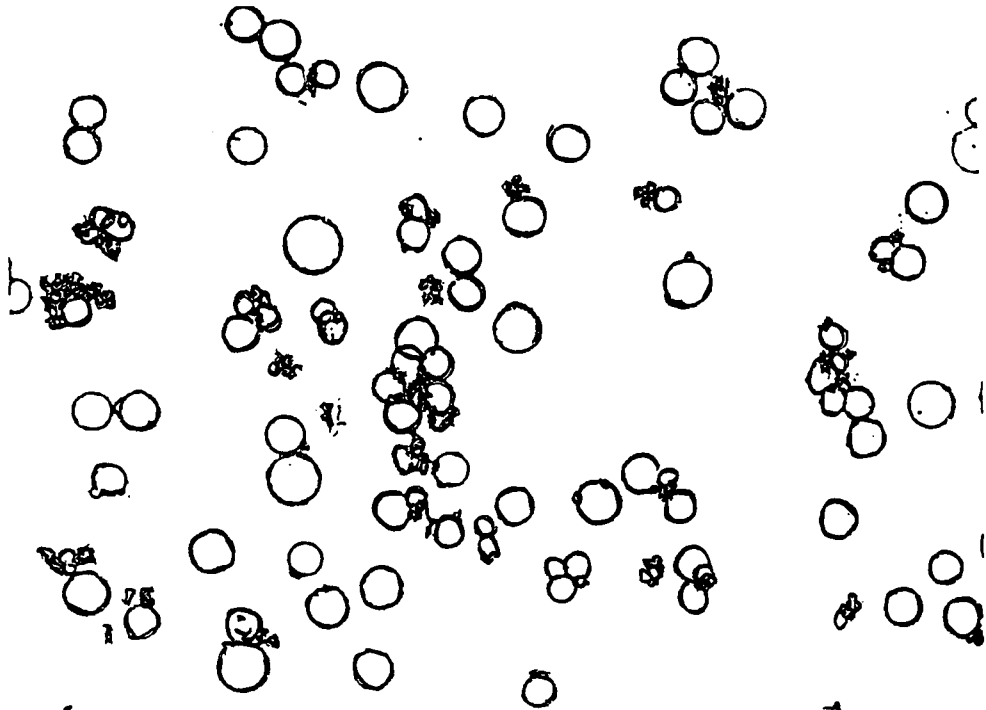
2.1 กระบวนการเตรียมไมโครแคปซูลแบบสเปรย์ดรายอิง (spray drying) เป็นเทคนิคการเตรียมไมโครแคปซูล โดยสารที่เป็นแกนจะละลาย หรือแขวนลอยอยู่สารละลาย พอลิเมอร์ หรือพอลิเมอร์หลอมเหลว แล้วฉีดพ่นทำให้แห้ง ได้เป็นผงพอลิเมอร์หุ้มสารที่เป็นแกนไว้ ประโยชน์ของเทคนิคนี้คือ สามารถเก็บรักษาวัสดุที่ไวต่ออากาศได้ดี เนื่องจากไมโครแคปซูลถูกทำให้แห้งอย่างรวดเร็ว นอกจากนี้ยังประหยัด ได้มีการนำเทคนิคฉีดพ่น (สเปรย์ดรายอิง) มาใช้ในการเตรียมผลิตภัณฑ์พวกน้ำหอม ซึ่งเตรียมเป็นอิมัลชันในสารละลายพอลิเมอร์ เช่น กัมอาราบิก แล้วฉีดออกมาเป็นอนุภาคขนาด 250 ไมโครเมตรซึ่งเป็นขนาดที่เหมาะสมกับผลิตภัณฑ์แป้งโรยตัว สำหรับผลิตภัณฑ์ฉีดพ่น จะต้องขนาดอนุภาคเล็กกว่า 74 ไมโครเมตร ถ้าสารที่เป็นแกนรวมอยู่กับไขมันหรือซีมีนที่หลอมเหลว กระบวนการที่ใช้เตรียมเรียกว่า สเปรย์ชิลลิ่ง (spray chilling) เนื่องจากต้องทำให้อิมัลชันหรือสารแขวนลอยเย็นตัวลงจนมีอุณหภูมิต่ำกว่าจุดหลอมเหลว เพื่อทำให้เกิดเป็นอนุภาคแข็งขึ้นวิธีนี้นิยมใช้ในการเตรียมไมโครแคปซูลของกรดซิตริก วิตามินซี และเฟอร์ริสซัลเฟต

รูปที่ 2.3 แสดงกระบวนการในการเตรียมไมโครแคปซูล โดยการผสมสารละลายของสารที่เป็นแกนและสารละลายของสารที่เป็นผนัง ละลายน้ำพอลิเมอร์ที่ใช้จะอยู่ในสภาพอิมัลชัน หลังจากการผสมแล้วจะได้สารแขวนลอยของสารที่เป็นแกน จากนั้นทำให้แห้งโดยการฉีดพ่น จะได้เป็นไมโครแคปซูล



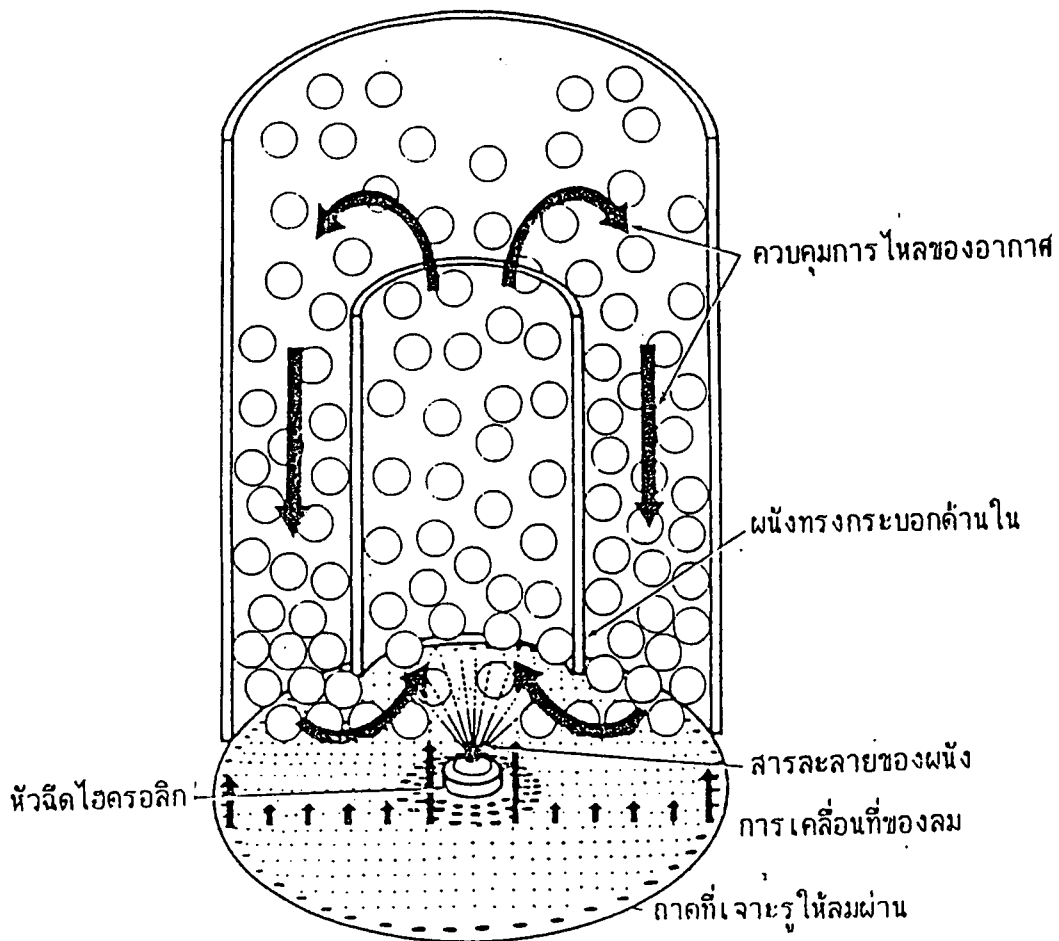
รูปที่ 2.3 กระบวนการเตรียมไมโครแคปซูลโดยวิธีฉีดพ่น

กระบวนการเตรียมไมโครแคปซูลโดยวิธีการฉีดพ่นนี้มีประโยชน์มาก และไมโครแคปซูลที่เตรียมได้ สามารถแสดงได้ดังรูป 2.4



รูปที่ 2.4 ไมโครแคปซูลที่เตรียมได้โดยการทำให้แห้งโดยวิธีการฉีดพ่น

2.2 กระบวนการเตรียมไมโครแคปซูลแบบการหุ้มโดยแขวนลอยในอากาศ (air-suspension coating) การหุ้มแขวนลอยในอากาศ เป็นวิธีการหุ้มอนุภาคด้วยสารละลายหรือสารที่หลอมเหลว วิธีนี้สามารถใช้ได้กว้างขวางและควบคุมการเตรียมไมโครแคปซูลได้เป็นอย่างดี อนุภาคที่เป็นแกนจะแขวนลอยอยู่ในอากาศด้วยแรงลม ดังแสดงในรูปที่ 2.5

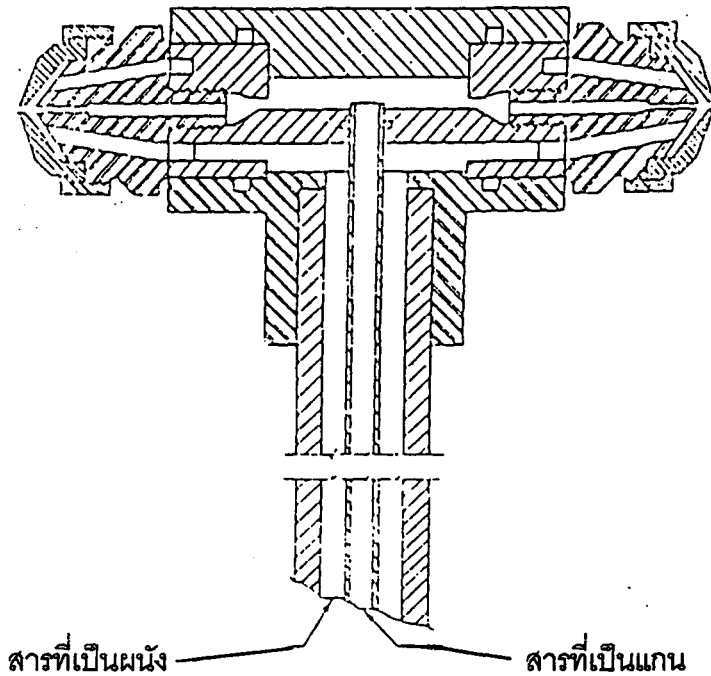


รูปที่ 2.5 แสดงการเตรียมไมโครแคปซูลแบบการหุ้มแขวนลอยในอากาศ

จากรูปที่ 2.5 ทรงกระบอกด้านนอกและด้านในถูกรองรับโดยภาชนะที่เจาะรูให้ลมผ่าน ทำให้อากาศที่เป็นแกนเคลื่อนที่จากด้านนอกและหมุนเข้าด้านในเป็นวัฏจักร โดยผ่านทรงกระบอกด้านในหลายครั้ง ภายในเวลาสั้น ๆ ขณะที่อนุภาคเคลื่อนที่ขึ้นจะปะทะกับละอองเล็ก ๆ ของสารละลายของผนังที่ถูกฉีดพ่นออกมาในแต่ละครั้ง โดยอนุภาคจะได้รับสารละลายที่ใช้หุ้มเพียงเล็กน้อยเท่านั้น ตัวทำละลายจะระเหย และอนุภาคเกือบแห้งในขณะที่ตกกลับมายังตะแกรงด้านนอก อนุภาคที่ถูกหุ้มมีขนาดตั้งแต่ 150 ไมโครเมตรจนถึงขนาด

เท่าเม็ดยา เนื่องจากมีชั้นบาง ๆ ของสารที่หุ้มถูกฉีกอย่างสม่ำเสมอไปบนผิวหน้าทั้งหมดของอนุภาคในทิศทางต่าง ๆ ดังนั้น จึงทำให้ได้การหุ้มที่สม่ำเสมอ สารที่เหมาะสมจะใช้เป็นผนังด้วยวิธีนี้ ได้แก่ ชีวสังเคราะห์ของเซลลูโลส และพอลิเมอร์ที่ละลายน้ำได้

2.3 กระบวนการเตรียมไมโครแคปซูลแบบการหุ้มโดยการอัดฉีดจากศูนย์กลาง (centrifugal extrusion) วิธีนี้สารที่เป็นแกนจะถูกหุ้มโดยใช้หัวฉีดชนิดที่หมุนได้ ซึ่งบรรจุกระบอกฉีดหลายกระบอกที่มีจุดศูนย์กลางร่วมกัน ดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 แสดงภาพตัดขวางของหัวฉีดชนิดที่หมุนได้

ในกระบวนการนี้สายของของเหลว (liquid jet) ที่เป็นแกนจะถูกอัดฉีดพุ่งออกไป และถูกล้อมรอบด้วยสารละลายหรือสารหลอมเหลวที่เป็นผนังหุ้ม เมื่อสายของของเหลวที่อัดฉีดเคลื่อนที่ผ่านอากาศ จะแตกออกกลายเป็นหยดของสารที่เป็นผนัง หุ้มสารที่เป็นแกนอยู่ภายใน ขณะที่หยดลอยอยู่ ผนังที่หลอมเหลวจะแข็งขึ้น หรือตัวทำละลายระเหยออกจากสารละลายของผนัง เทคนิคนี้ เหมาะเป็นอย่างยิ่งสำหรับใช้เตรียมไมโครแคปซูลที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 200-400 ไมโครเมตร และเหมาะสำหรับของเหลวหรือของเหลวชั้นเท่านั้น เนื่องจากหยดเหล่านี้เกิดจากการแตกออกของสายของของเหลวที่ถูกอัดฉีด

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

เทคนิคนี้เสียค่าใช้จ่ายน้อยสำหรับการผลิตหยดขนาดใหญ่ ซึ่งหุ้มด้วยสารที่หลอมได้ เช่น ไขมันและซีเมนต์ เป็นต้น นอกจากนี้ยังใช้กันอย่างกว้างขวางในการหุ้มของเหลวด้วยพอลิเมอร์สังเคราะห์ และเจลาติน ผนังหุ้มที่ไม่เหมาะที่จะใช้เตรียมด้วยวิธีนี้ คือ ผนังที่เป็นของเหลวที่ชั้นเป็นสาย ไม่สามารถแยกออกเป็นหยดได้

2.4 กระบวนการเตรียมไมโครแคปซูลแบบการหุ้มด้วยโลหะภายใต้สุญญากาศ (vacuum metallizing) ได้มีการพัฒนาเทคนิคการหุ้มภายใต้สุญญากาศ ในการหุ้มอนุภาคด้วยโลหะและอโลหะชนิดต่าง ๆ อย่างกว้างขวาง จนสามารถเตรียมอนุภาคให้มีขนาดเล็กถึง 10 ไมโครเมตรการทำงานทั้งหมดอยู่ภายใต้สุญญากาศ โดยมีสายพานซึ่งถูกทำให้สั้นสะท้อนลำเลียงอนุภาคลงไปยังส่วนให้ความเย็น จากนั้นผ่านไปสัมผัสกับไอโลหะจากเตาให้ความร้อน ไอโลหะจะควบแน่นบนอนุภาคขนาดเล็กที่เย็น ทำให้เกิดการหุ้มซึ่ง มีผิวเรียบ เทคนิคนี้ใช้เตรียมเฉพาะของแข็งเท่านั้น ผนังหุ้มที่ได้ไม่สามารถป้องกันน้ำหรือแก๊สได้อย่างสมบูรณ์ การแข็งตัวของไอโลหะจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วจนไม่มีการจับตัวเป็นกลุ่ม ยกเว้นไอของสารพวกซีเมนต์ หรือสารที่เหนียวหนืด ค่าใช้จ่ายในกระบวนการนี้ค่อนข้างสูง เนื่องจากต้องเปลี่ยนสารที่เป็นผนังให้อยู่ในสถานะไอและต้องเก็บสารที่เป็นแกนไว้ภายใต้สุญญากาศ

2.5 กระบวนการเตรียมไมโครแคปซูลที่มีผนังเป็นของเหลว (liquid wall microencapsulation) กระบวนการเตรียมไมโครแคปซูลที่มีผนังเป็นของเหลวมีประโยชน์มากมายหลายประการ เช่น สารที่เป็นแกนสามารถแตกได้เมื่อต้องการ สารที่เป็นผนังและสารที่เป็นแกนสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ นอกจากนี้ความสามารถในการแพร่ผ่านของโมเลกุลผ่านผนังที่เป็นของเหลวสามารถควบคุมได้ดีกว่าการแพร่ผ่านผนังที่เป็นของแข็ง ของเหลวที่เป็นแกนอาจเป็นหยดอิมัลชันหรือสารแขวนลอย สารที่เป็นผนังสามารถทำให้เสถียรได้ด้วยการเติมสารลดแรงตึงผิว และสารเพิ่มความแข็งแรง ไมโครแคปซูลนี้จะเสถียรจนสามารถแขวนลอยได้ด้วยการปั่นเพียงเล็กน้อย และเมื่อหยุดปั่นจะเกิดการรวมตัวกันอย่างช้า ๆ เนื่องจากกระบวนการนี้ไม่สิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายมากและสารที่ใช้เป็นผนังสามารถนำกลับมาใช้ได้ใหม่อีกครั้ง ผนังของเหลวนี้จึงถูกนำมาใช้ในอุตสาหกรรมต่าง ๆ เช่น การนำสารปนเปื้อนออกจากน้ำเสีย เป็นต้น

สำหรับการนำไปประยุกต์ใช้งาน จะเตรียมหยดที่บรรจุสารตั้งต้นให้อยู่ในรูปอิมัลชันในของเหลวที่จะหุ้มซึ่งไม่สามารถรวมเป็นเนื้อเดียวกันได้ อิมัลชันที่ได้จะเสถียรมาก

สามารถนำมากระจายตัวในของเหลวที่ต้องการเพื่อนำไปใช้ต่อไป หยดไฮโดรคาร์บอนที่หุ้ม
หยดเล็ก ๆ ของสารละลายอิมัลชันไฟเออร์

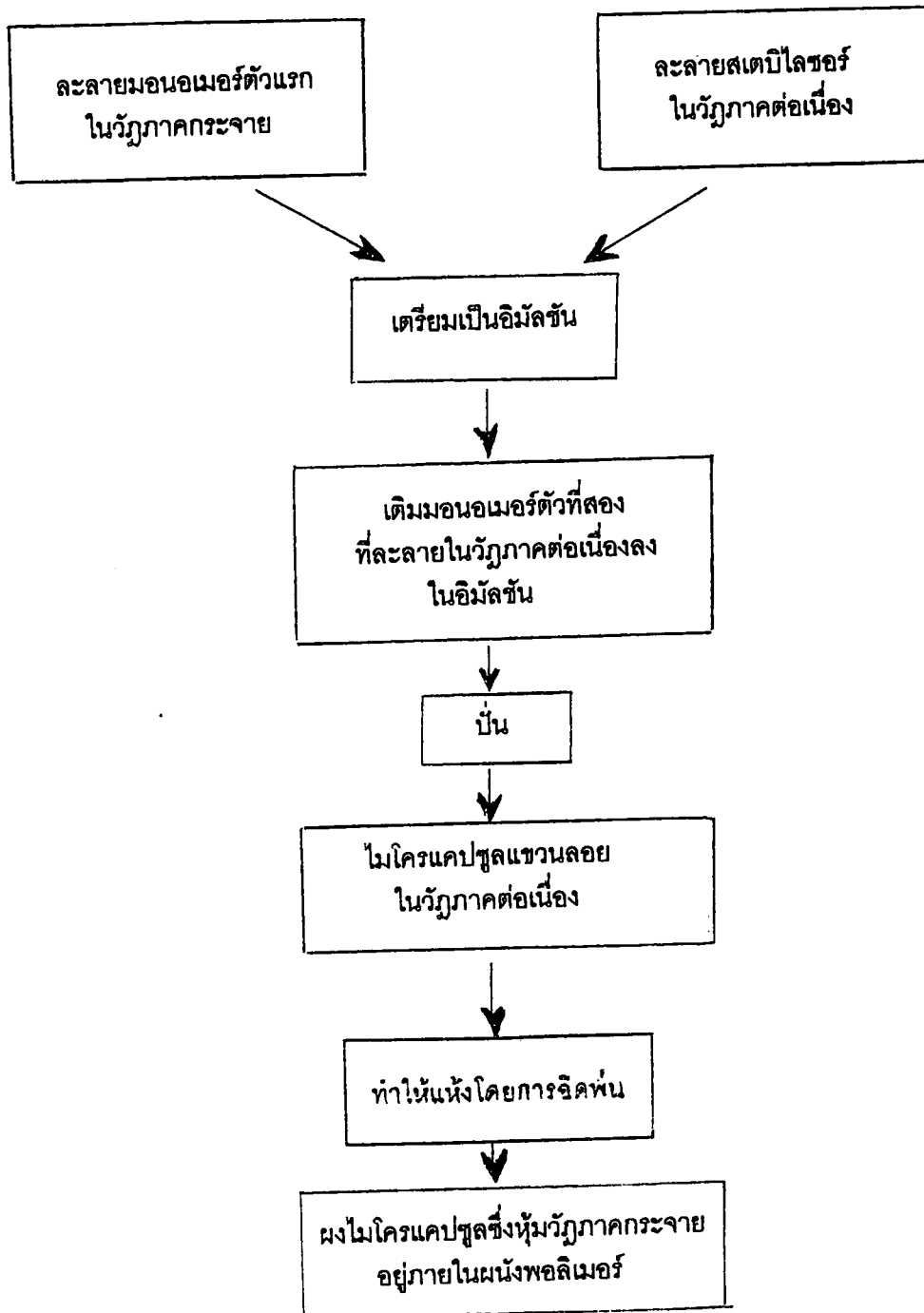
3.กระบวนการทางเคมี

3.1 กระบวนการเตรียมไมโครแคปซูลโดยการพอลิเมอไรซ์ระหว่างผิวหน้า
(interfacial polycondensation) เทคนิคการพอลิเมอไรซ์ระหว่างผิวหน้า เป็นการสร้างผนัง
แคปซูลที่เป็นพอลิเมอร์บาง ๆ น้ำหนักโมเลกุลสูง โดยจะประกอบด้วยมอนอเมอร์ 2 ชนิด
ทำปฏิกิริยากันระหว่างผิวหน้าของวัฏภาคอิมัลชัน ได้ฟิล์มพอลิเมอร์บาง ๆ ซึ่งไม่ละลายและ
กระจายอยู่ในตัวกลางของสารตั้งต้น ตัวอย่างของพอลิเมอร์ที่สามารถเตรียมได้ โดยใช้
เทคนิคนี้ แสดงไว้ในตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 แสดงตัวอย่างของพอลิเมอร์ที่ใช้เตรียมไมโครแคปซูล โดยเทคนิคการพอลิเมอไรซ์ระหว่างผิวหน้า

สารที่เป็นผนัง	โครงสร้างการเชื่อมโยง ในพอลิเมอร์	หมู่ฟังก์ชันที่ ทำปฏิกิริยา
พอลิเอไมด์	$\begin{array}{c} \text{O} \\ \\ \text{-N-C-} \end{array}$	$\begin{array}{c} \text{O} \\ \\ \text{-N-H + Cl-C-} \end{array}$
พอลิยูรีเทน	$\begin{array}{c} \text{O} \\ \\ \text{-N-C-O-} \end{array}$	$\begin{array}{c} \text{O} \\ \\ \text{-O-H + O-C-N-} \end{array}$
พอลิซัลโฟนาไมด์	$\begin{array}{c} \text{O} \\ \\ \text{-N-S-} \end{array}$	$\begin{array}{c} \text{O} \\ \\ \text{-N-H + Cl-S-} \end{array}$
พอลิเอสเทอร์	$\begin{array}{c} \text{O} \\ \\ \text{-O-C-} \end{array}$	$\begin{array}{c} \text{O} \\ \\ \text{-O-H + Cl-C-} \end{array}$
พอลิคาร์บอเนต	$\begin{array}{c} \text{O} \\ \\ \text{-O-C-O} \end{array}$	$\begin{array}{c} \text{O} \\ \\ \text{-O-H + Cl-C-Cl} \end{array}$

กระบวนการพอลิเมอไรส์ระหว่างผิวหน้า ทำได้โดยสารที่เป็นแกนกับมอนอเมอร์ตัวหนึ่งอยู่ในวัฏภาคกระจาย และมอนอเมอร์อีกตัวหนึ่งอยู่ในวัฏภาคต่อเนื่อง เพื่อควบคุมการเกิดแคปซูล มอนอเมอร์ตัวแรกและสารที่เป็นแกนจะถูกเตรียมเป็นอิมัลชันก่อน โดยยังไม่มีมอนอเมอร์ตัวที่สอง เมื่อเติมวัฏภาคต่อเนื่องที่มีมอนอเมอร์ตัวที่สองอยู่ลงไป ในอิมัลชัน ก็จะเกิดปฏิกิริยาระหว่างผิวหน้าของสารที่กระจายตัวอยู่ ได้เป็นฟิล์มพอลิเมอไรส์หุ้มสารนั้นไว้ ดังรูปที่ 2.7

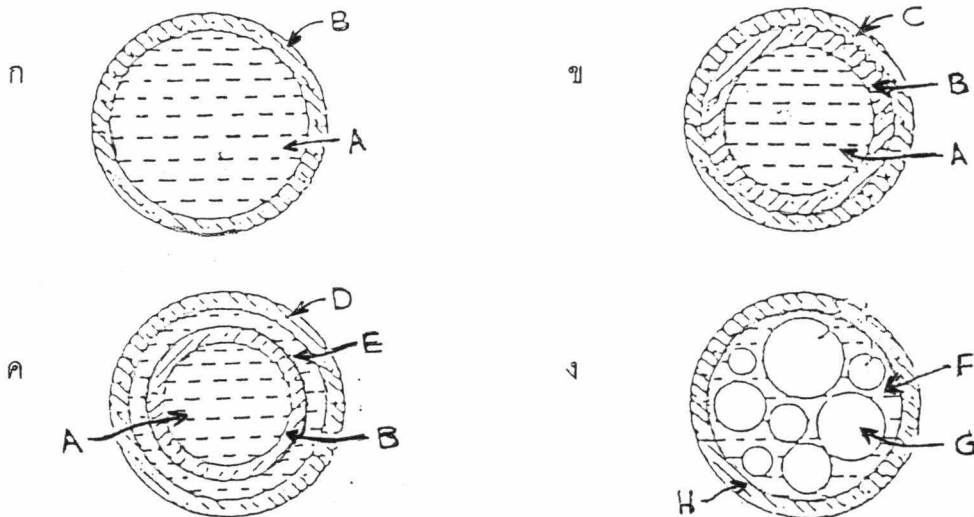


รูปที่ 2.7 แสดงขั้นตอนการเตรียมไมโครแคปซูลโดยเทคนิคการพอลิเมอไรซ์
ระหว่างผิวหน้า



รูปที่ 2.8 แสดงภาพถ่ายที่ได้จากกล้องอิเล็กตรอนไมโครสโคปของไมโครแคปซูลที่เตรียมได้โดยเทคนิคการพอลิเมอไรซ์ระหว่างผิวหน้าโดยไมโครแคปซูลถูกเคลือบไว้บนกระดาษ

ไมโครแคปซูล ที่มีโครงสร้างต่าง ๆ สามารถเตรียมได้โดยใช้เทคนิคนี้ ตัวอย่างดังแสดงไว้ในรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 แสดงลักษณะของไมโครแคปซูลที่เตรียมโดยเทคนิคการพอลิเมอไรซ์ระหว่างผิวหน้า

- ก. (A) คือ สารที่เป็นแกน
(B) คือ ผนังหุ้มที่เป็นพอลิเมอร์
- ข. (A) คือ สารที่เป็นแกน
(B) คือ ผนังหุ้มที่เป็นพอลิเมอร์
(C) คือ ผนังชั้นที่สองที่เกิดจากเทคนิคการฉีดพ่นหรือเทคนิคที่คล้ายกัน
- ค. (A) คือ สารที่เป็นแกน
(B) คือ ผนังหุ้มที่เป็นพอลิเมอร์
(E) คือ สารที่เป็นแกนซึ่งเหมือนหรือต่างจาก (A) ก็ได้
(D) คือ ผนังหุ้มที่เป็นพอลิเมอร์ชั้นที่สองซึ่งอาจเหมือนหรือต่างจาก (B) ก็ได้
- ง. (G) คือ แคปซูลจากรูป ก, ข หรือ ค
(F) คือ ตัวกลางการกระจายของแคปซูล G
(H) คือ ผนังหุ้มที่เป็นพอลิเมอร์ซึ่งเตรียมโดยเทคนิคการพอลิเมอไรซ์ระหว่างผิวหน้า

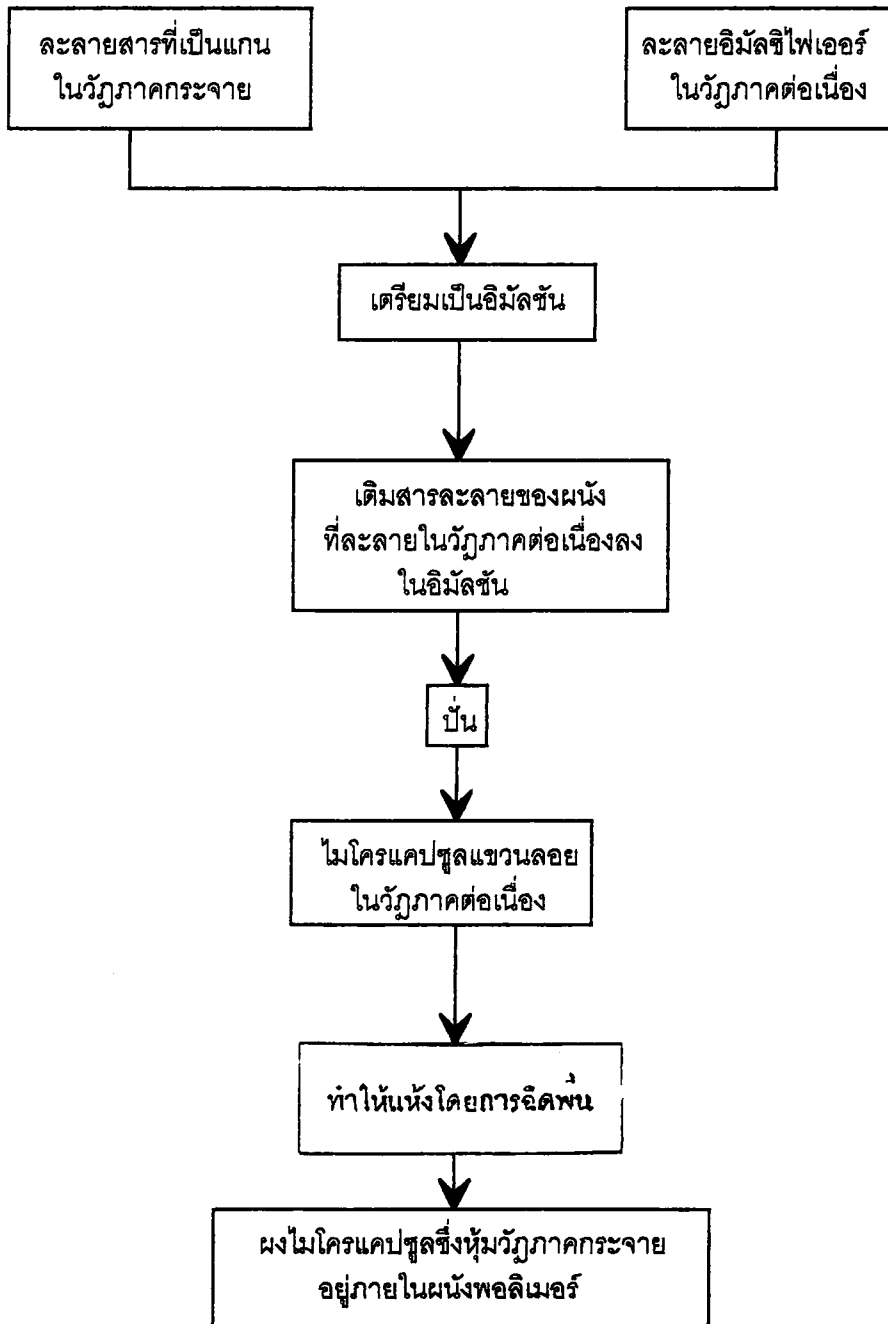
ดังที่อธิบายไว้ในตอนต้นว่าเทคนิคการฉีดพ่นเหมาะสำหรับการเตรียมฟิล์มพอลิเมอร์ที่สามารถละลายได้ในตัวทำละลาย แต่สำหรับพอลิเมอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง ซึ่งหาตัวทำละลายได้ยาก และความหนืดของสารละลายสูง จึงเป็นข้อจำกัดในการใช้เทคนิคนี้

ประสิทธิภาพในการหุ้มของไมโครแคปซูล วัดได้โดยการหาปริมาณตัวทำละลายอิสระที่ไม่ถูกหุ้ม ตัวทำละลายนี้จะถูกสกัดออกจากของเหลวหนืดของไมโครแคปซูล โดยการนำของเหลวหนืดนี้ไปผสมกับตัวทำละลายที่ใช้สกัด ปริมาณของตัวทำละลายในตัวกลางที่ใช้สกัดโดยใช้เครื่องแก๊สโครมาโตกราฟี ผลรวมของตัวทำละลายในระบบจะหาได้จากการใช้สารซึ่งสามารถสกัดตัวทำละลายออกจากผนัง และหาปริมาณได้ โดยวิธีการวิเคราะห์ทางโครมาโตกราฟีเช่นกัน อัตราส่วนของตัวทำละลายอิสระต่อตัวทำละลายทั้งหมด สามารถนำมาหาประสิทธิภาพในการหุ้ม กระบวนการควบคุมระหว่างผิวสามารถควบคุมให้มีประสิทธิภาพในการหุ้มได้อย่างน้อยถึง 98 % ตัวทำละลายที่นิยมใช้คือ ไซลีน และ ทอลูอีน

3.2 กระบวนการเตรียมไมโครแคปซูลการพอลิเมอไรซ์แบบ in-situ เป็นเทคนิคการใช้ในการเตรียมไมโครแคปซูลโดยพอลิเมอไรซ์มอนอเมอร์ชนิดหนึ่งบนผิวหน้า

ของอนุภาค เช่น การหุ้มเส้นใยเซลลูโลสด้วยพอลิเอทิลีน ขณะที่จุ่มลงในทอลูอีนที่ปราศจากน้ำ ในขั้นแรกเติมไททาเนียมเตตระคลอไรด์ ตามด้วยไตรเอทิลอลูมิเนียม คะตะลิสต์ซีเกลอร์ (Ziegler catalyst) จะรวมตัวกันบนผิวของเส้นใยที่อุณหภูมิ 20-30 องศาเซลเซียส เมื่อตัวเร่งปฏิกิริยาเกิดขึ้นผิวเส้นใยจะมีสีน้ำตาลเข้ม เมื่อเติมเอทิลีน หรือสไตรีน จะเกิดการพอลิเมอไรซ์ที่ผิวหน้า ปฏิกิริยาพอลิเมอไรซ์จะให้อัตราส่วนโดยน้ำหนักของพอลิเอทิลีนและเซลลูโลสเป็น 50:50 สารที่เป็นแกนมีน้ำหนักโมเลกุลสูงถึง 2×10^6 และมีจุดหลอมเหลว 56-58 องศาเซลเซียส ในขณะที่ทางทฤษฎีจะให้จุดหลอมเหลวสูงสุดได้ถึง 61 องศาเซลเซียส กระบวนการนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการเคลือบแก้ว การเคลือบโดยทั่วไปทั้งโปร่งแสงหรือทึบแสง สามารถทำให้ใสขึ้นได้ด้วยการหลอมภายหลังจากที่เตรียมได้

กระบวนการนี้ทำได้โดยเตรียมอิมัลชันของสารที่เป็นแกนซึ่งอยู่ในวัฏภาคกระจายในวัฏภาคต่อเนื่อง เมื่อเติมวัฏภาคต่อเนื่องที่มีสารที่เป็นผนังลงไปในอิมัลชันก็จะเกิดปฏิกิริยาได้เป็นฟิล์มพอลิเมอไรต์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงหุ้มสารนั้นอยู่ ดังแสดงในรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 ขั้นตอนการเตรียมไม่ใครแคปซูลโดยเทคนิคพอลิเมอไรเซชันแบบ in-situ

4. อิทธิพลของตัวแปรในเทคนิคต่าง ๆ

ในการเลือกใช้เทคนิคใด ๆ ก็ตาม ควรจะพิจารณาสมบัติทางกายภาพ ดังต่อไปนี้

1. ความสามารถในการเปียกได้ของสารที่เป็นแกน

เทคนิคโคอะเซอเวชัน เป็นเทคนิคที่ทำให้เกิดวัฏภาคของเหลวซึ่งมีพอลิเมอร์มาก แยกออกจากสารละลายพอลิเมอร์ อาจทำได้โดยการเติมของเหลวที่ไม่ใช่ตัวทำละลาย การหุ้มแบบนี้สมบัติที่สำคัญมาก คือ ความสามารถในการเปียกได้ของสารที่เป็นแกน อนุภาคของแข็งที่เปียกได้ดี จะหุ้มได้ง่ายกว่าการหุ้มหยดของเหลวที่ไม่ละลาย

2. ความสามารถในการละลายของสารที่เป็นแกน

ในระบบโคอะเซอเวชันสารที่เป็นแกนต้องไม่ละลายในตัวทำละลายของพอลิเมอร์ และพอลิเมอร์ต้องไม่สามารถแทรกเข้าไปในหยดของเหลวที่เป็นแกน ในระบบการพอลิเมอร์ระหว่างผิวหน้า การตัดสินใจเกี่ยวกับความสามารถในการละลายของมอนอเมอร์ในวัฏภาค ต้องพิจารณาเลือกทั้งชนิดของตัวทำละลายและพอลิเมอร์ด้วย ในกรณีสารที่เป็นแกนละลายได้น้อยในสารละลายพอลิเมอร์ มักเลือกเตรียมด้วยวิธีการหุ้มโดยวิธีฉีดพ่นแห้ง นอกจากนี้ วิธีนี้สามารถหุ้มของแข็งที่ละลายน้ำได้ด้วยสารละลายพอลิเมอร์ซึ่งละลายน้ำได้ เนื่องจากน้ำระเหยอย่างรวดเร็วหลังจากฉีดพ่นออกเป็นหยดไปกระทบกับสารที่เป็นแกน ทำให้มีการแทรกหรือละลายสารที่เป็นแกนเพียงเล็กน้อยเท่านั้น

3. ความสามารถในการแพร่ผ่านและความยืดหยุ่นของผนัง

ความสามารถในการแพร่ผ่านของพอลิเมอร์แสดงให้เห็นว่า สารที่ถูกหุ้มสามารถถูกปลดปล่อยออกมาในอัตราที่ต้องการหรือไม่ ไม่ใคร่แคปซูลจะต้องสามารถใช้ได้สะดวกและจะต้องแตกด้วยความดันเริ่มต้นที่ต้องการ ผนังพอลิเมอร์ ขนาดของไมโครแคปซูล และความหนาของผนังจะเป็นตัวกำหนดความยืดหยุ่น และความแข็งแรงของผนัง

4. ตัวแปรอื่น ๆ

ช่วงความเข้มข้นและอุณหภูมิ ซึ่งอาจมีผลทำให้เกิดการเกาะเป็นก้อน ความเหนียวหนืดของสารละลายของผนังระหว่างการทำให้แห้ง จุดหลอมตัว อุณหภูมิกลาสทรานซิชัน (T_g) องค์การจัดเรียงตัวเป็นผลึก อัตราการเสื่อมสภาพของผนังและสมบัติอื่น ๆ จะต้องนำมาพิจารณาด้วยเช่นกัน

5. การเลือกใช้เทคนิคต่าง ๆ

ปัจจัยบางอย่างเหมาะสมกับเทคนิคการเตรียมไมโครแคปซูลอย่างหนึ่ง แต่อาจจะไม่เหมาะสมกับเทคนิคอีกอย่างหนึ่ง เช่น ถ้าสารที่เป็นแกนเป็นของแข็งและไม่สามารถเตรียมเป็นของเหลวหนืดได้ไม่เหมาะสมกับวิธีการอัดฉีดของเหลวให้เป็นสาย (liquid-jet method) ถ้าอนุภาคของแข็งมีขนาดใหญ่ควรใช้วิธีการแยกแก้วภาค หรือการหุ้มแขวนลอยในอากาศ ถ้าสารที่เป็นแกนเป็นของเหลวอินทรีย์ใช้วิธีการหุ้มแขวนลอยในอากาศไม่ได้ วิธีการอัดฉีดของเหลวให้เป็นลำสายจะใช้ได้ดีสำหรับอนุภาคที่มีขนาดใหญ่กว่า 100 ไมโครเมตร ถ้าอนุภาคขนาดเล็กกว่านี้ควรใช้วิธีการโคอะเซอเวชัน และวิธีการพอลิเมอไรซ์ระหว่างผิวหน้าจะช้าและสิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายมาก การเตรียมไมโครแคปซูลที่มีขั้วสูง โดยทั่วไปจะเตรียมได้ยาก แต่อาจทำได้โดยวิธีอัดฉีดให้เป็นสายหรือวิธีการพอลิเมอไรซ์ระหว่างผิวหน้า หรือวิธีการแยกแก้วภาคตามความเหมาะสม

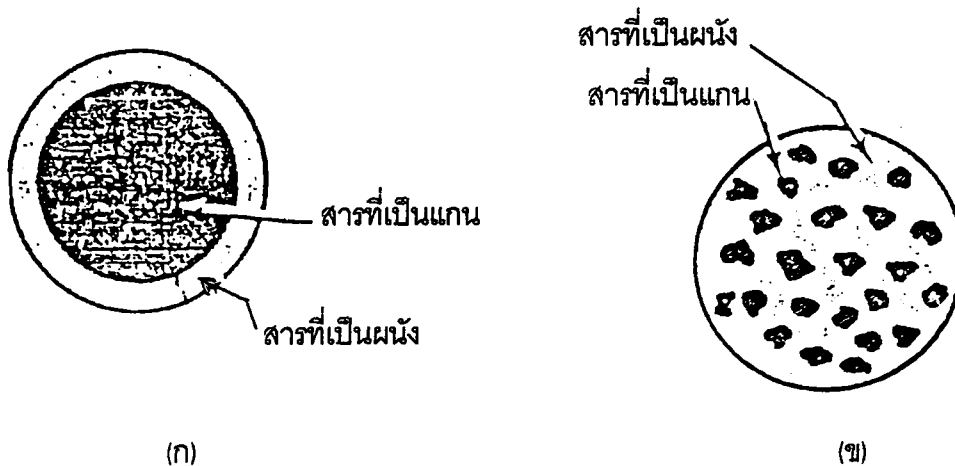
กลไกการควบคุมการปลดปล่อยสาร

โดยปกติทั่วไปแล้วทั้งในแนวความคิดและทางปฏิบัติของการควบคุมการปลดปล่อยสารจะมีกลไก 3 แบบคือ

1. การปลดปล่อยสารโดยการแพร่ผ่านผนัง ลักษณะการปลดปล่อยสารที่เป็นแกนที่เป็นของเหลว ของแข็ง สารแขวนลอย หรือสารละลาย การปลดปล่อยสารที่เป็นแกนจะถูกควบคุมโดยการแพร่ผ่านผนังหรือผ่านรูพรุนเล็ก ๆ ของผนังไมโครแคปซูล

ในทางทฤษฎี การปลดปล่อยแบบนี้มี 2 ลักษณะ ตามลักษณะของไมโครแคปซูลคือ ไมโครแคปซูลที่มีลักษณะที่ประกอบด้วยสารที่เป็นแกน ที่เป็นของแข็งอยู่ภายในผนังที่มีลักษณะเป็นทรงกลมซึ่งสามารถควบคุมการปลดปล่อยสารได้ การปลดปล่อยแบบนี้มีอัตราการปลดปล่อยสารที่คงที่ คือ $dQ/dt = k$ (เมื่อ $dQ/dt =$ อัตราการปลดปล่อยสาร, $k =$ ค่าคงที่) การปลดปล่อยแบบนี้จะเป็นที่ต้องการเป็นอย่างมาก ลักษณะไมโครแคปซูลชนิดนี้ เรียกว่า "depot device" หรือ "reservoir device" และลักษณะไมโครแคปซูลอีกแบบหนึ่งคือ สารที่เป็นแกนจะกระจายตัวหรือละลายอยู่ในสารที่เป็นผนัง ซึ่งสามารถควบคุมการปลดปล่อยสารได้ ลักษณะไมโครแคปซูลชนิดนี้ เรียกว่า "monolithic device" ซึ่งมีอัตราการปลดปล่อยสาร dQ/dt เป็นสัดส่วนกับเวลา

ลักษณะไมโครแคปซูลทั้ง 2 แบบ ได้แสดงในรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 ลักษณะไมโครแคปซูล

(ก) depot device

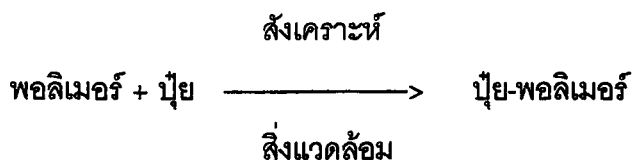
(ข) monolithic device

2. การปลดปล่อยโดยการกัดเซาะทำลาย ลักษณะนี้อ่อนภาคหรือหดยของสารที่เป็นแกนจะกระจายตัวแบบไม่เป็นเนื้อเดียวกันอยู่ในพอลิเมอร์เมทริกซ์ ซึ่งเป็นของแข็งที่สามารถสลายตัวทางชีวภาพหรือไม่ก็ได้ การควบคุมการปลดปล่อยสารจะควบคุมโดยการแพร่ผ่านพอลิเมอร์เมทริกซ์(สารที่เป็นผนัง) หรือการกัดเซาะของพอลิเมอร์เมทริกซ์ หรือทั้งสองกรณีรวมกัน

การปลดปล่อยแบบนี้จะขึ้นอยู่กับพื้นที่ผิวของผนัง ถ้าพื้นที่ผิวของเมมเบรนมีค่าคงที่ เช่นในกรณีของฟิล์มบางเรียบ ในขณะที่เกิดการกัดเซาะอัตราการปลดปล่อยสารจะมีค่าคงที่จนกระทั่งฟิล์มถูกกัดเซาะไปหมด แต่สำหรับกรณีของลักษณะทรงกลม อัตราการปลดปล่อยสารจะลดลงเรื่อย ๆ อย่างช้า ๆ ตามเวลา ดังนั้นอัตราการปลดปล่อยสารจะไม่คงที่

3. การปลดปล่อยโดยการเกิดปฏิกิริยาเคมีแบบย้อนกลับ (release by retrograde chemical reactions) ลักษณะการปลดปล่อยแบบนี้เป็นลักษณะการเกิดพันธะเคมีของสารที่ต้องการจะปลดปล่อยกับสารพอลิเมอร์ธรรมชาติหรือสังเคราะห์ เช่น พันธะเอไมด์ หรือพันธะเอสเทอร์ ซึ่งการปลดปล่อยสามารถควบคุมได้โดยปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส หรือการเกิด

ปฏิกิริยาเคมีย้อนกลับของพันธะเคมี โดยสารหรือสิ่งที่มีอยู่ในธรรมชาติ เช่น น้ำ อากาศ แสงแดด หรือจุลินทรีย์ เข้าทำลายพันธะเคมีนั้น แสดงดังสมการ



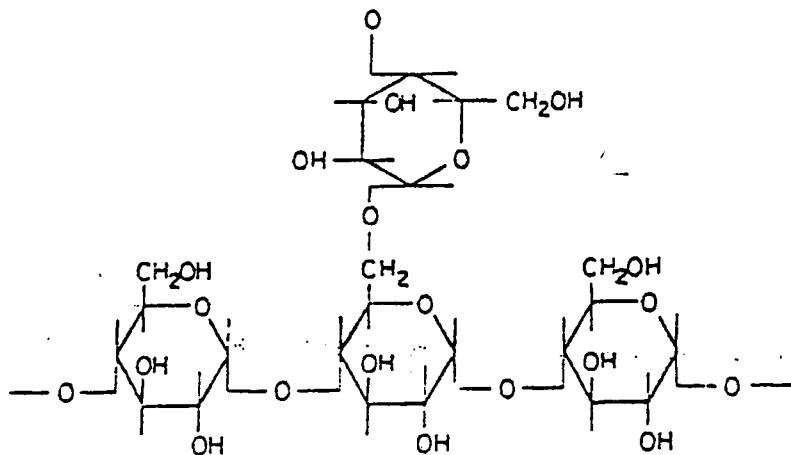
ตัวอย่างลักษณะการปลดปล่อยสารแบบนี้ ได้แก่ การตรึงปุ๋ยในพอลิเมอร์ การตรึงสารฆ่าเชื้อราบนโมเลกุลตัวยึดเกาะของสี เป็นต้น

อัตราการปลดปล่อยแบบนี้จะขึ้นอยู่กับสมบัติของสารโมเลกุลใหญ่ (macro-molecule) กับสภาพแวดล้อมภายนอก เช่น เมื่อมีน้ำอยู่รอบ ๆ ระบบ เพื่อกระตุ้นให้เกิดการปลดปล่อย สารถ้าพันธะเคมีเป็นพันธะแอนไฮไดรด์ จะไวต่อปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสมากกว่าพันธะเอสเทอร์ หรือพันธะเอไมด์ พอลิเมอร์ที่ไม่เป็นร่างแหก็จะไวต่อปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสมากกว่าพอลิเมอร์ที่เป็นร่างแห และพอลิเมอร์ที่เป็นผลึกหรือโครงสร้างที่เป็นระเบียบจะไวต่อปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสน้อยกว่าที่เป็นสัณฐาน หรือโครงสร้างที่เป็นแบบอะแทคติก (atactic) เป็นต้น

เรซินที่ใช้ในกระบวนการผลิตไมโครเอนแคปซูล

1. พอลิเมอร์ร่วมแบบต่อของแป้งมันสำปะหลังกับมอนอเมอร์วินิล

แป้งเป็นพอลิเมอร์ธรรมชาติเป็นสารประกอบอินทรีย์ประเภทคาร์โบไฮเดรตที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่ ประกอบเป็นหน่วยย่อยคือ กลูโคสต่อกันด้วยพันธะกลูโคไซด์ สามารถแสดงได้โดยหน่วย anhydroglucose ดังรูป 2.12



รูปที่ 2.12 แสดงโครงสร้างของแป้งซึ่งประกอบโมเลกุลของอะไมโลสและอะไมโลเพกติน

โครงสร้างภายในแป้งได้เป็น 2 ประเภทคือ อะไมโลส (amylose) และอะไมโลเพกติน (amylopectin) ปฏิกิริยาการเกิดพอลิเมอร์จะเป็นปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันแบบควบแน่นมีการกำจัดน้ำออก 1 โมเลกุล หน่วยกลูโคสจะต่อกันผ่านอะตอมออกซิเจนที่ติดกับอะตอมของคาร์บอนตำแหน่งที่ 1 กับอะตอมของคาร์บอนตำแหน่งที่ 4 พันธะไกลโคไซด์จะมีเสถียรภายใต้สภาวะเบสและถูกไฮโดรไลซ์ด้วยกรด จะทำให้สายโซ่โมเลกุลของแป้งถูกทำลายลงทำให้แป้งมีน้ำหนักโมเลกุลลดลง หมู่ไฮดรอกซิลของหน่วยแอนไฮโดรกลูโคสสามารถเกิดปฏิกิริยาให้สารพวกอีเธอร์ และ เอสเทอร์ และสามารถถูกออกซิไดซ์ให้อัลดีไฮด์ คีโตน และ หมู่คาร์บอกซิลได้

การบวมตัวและการเกิดเป็นเม็ดแป้ง

เม็ดแป้งจะไม่ละลายน้ำที่อุณหภูมิต่ำกว่า 50°C ฉะนั้นการละลายของเม็ดแป้งจะต้องให้ความร้อน ซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดของแป้งและความเข้มข้น โดยพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุลที่ยึดเม็ดแป้งไว้ด้วยกัน จะอ่อนตัวและเม็ดแป้งก็จะเริ่มบวมตัวอย่างรวดเร็ว อุณหภูมิที่ทำให้เกิดการบวมตัวเรียกว่า อุณหภูมิการเกิดเจล เม็ดแป้งจะอมน้ำไว้และบวมหลายเท่าจากปริมาตรเดิม เมื่อให้ความร้อนและปั่นกววนส่วนผสมไปด้วยพร้อมกัน จะทำให้ส่วนผสมกลายเป็นเนื้อเดียวกัน ความหนืดมีค่ามากที่สุดเมื่อเม็ดแป้งเกิดการบวมด้วยและอมน้ำไว้ได้มากที่สุด หลังจากนั้นจะเกิดการแตกออกของเม็ดแป้ง ความหนืดก็จะลดลง

เม็ดแป้งประกอบด้วยส่วนที่เป็นผลึก (crystalline) และส่วนที่เป็นอสัณฐาน (amorphus) ซึ่งในระหว่างเกิดการบวมตัวที่สามารถผันกลับได้นั้น น้ำจะแทรกเข้าไปในส่วนที่เป็นอสัณ-

ฐาน และทำให้เกิดการบวมตัวที่บริเวณอวัยวะฐานนั้น โดยที่ส่วนที่เป็นผลึกไม่มีการเปลี่ยนแปลง

การเกิดเจลด้วยใช้ความร้อน เกิดขึ้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิของแป้งให้สูงขึ้น เม็ดแป้งเกิดการพองตัวกระทบซึ่งกันและกัน ความหนืดของน้ำแป้งจะเพิ่มขึ้นจนถึงจุดวิกฤติ จากนั้นแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลเริ่มอ่อนตัวลงและความหนืดจะลดลง

การบวมตัวในช่วงเริ่มต้นในระหว่างการเกิดเป็นเจลเกิดขึ้นในส่วนที่เป็นอวัยวะฐานของเม็ดแป้ง จะเกิดการแตกออกของพันธะไฮโดรเจนที่อ่อนตัวและเกิดการแทรกตัวของน้ำเข้าไปในโมเลกุล ขณะที่อุณหภูมิของน้ำแป้งเพิ่มขึ้น การแทรกตัวของน้ำก็เกิดมากขึ้นและพันธะไฮโดรเจนในส่วนที่เป็นผลึกก็จะเริ่มแตกออก เม็ดแป้งบวมตัวขึ้นโดยโมเลกุลอะไมโลเปกตินถูกแทรกด้วยน้ำ แต่โครงสร้างนี้ยังคงรูปอยู่ได้ เนื่องจากมีบางส่วนที่ไม่ถูกแทรกด้วยน้ำเป็นส่วนยึดโครงสร้าง โครงสร้างที่ทำให้เม็ดแป้งที่บวมตัวแล้วมีสมบัติยืดหยุ่นได้ ซึ่งสามารถกำหนดค่าความหนืดของแป้งที่เกิดเป็นเจลเมื่อให้ความร้อน เมื่ออะไมโลเปกตินมีน้ำหนักโมเลกุลสูง และพันธะไฮโดรเจนในโครงสร้างมีมากจะทำให้ปริมาตรที่บวมตัวของเม็ดแป้งก่อนแตกออกจากกันมีค่ามากขึ้นและความหนืดมีค่าสูงขึ้น

สมบัติของแป้งที่เป็นเจลจะขึ้นอยู่กับวิธีการให้ความร้อนและสารอื่น ๆ ที่ปนอยู่ในแป้ง ดังนั้นถ้าควบคุมสภาวะของการให้ความร้อนจะทำให้ได้แป้งที่มีสมบัติตามต้องการ ปัจจัยที่เกี่ยวข้องได้แก่ ความเข้มข้น อุณหภูมิ เวลา อัตราเร็วของการปั่นกวน pH และชนิดของสารตัวเติมหรือสิ่งเจือปนอื่น ๆ การให้ความร้อนจะทำให้เม็ดแป้งแตกออกและน้ำแทรกเข้าไปในตัวแป้งได้ เมื่อความเข้มข้นของแป้งมีค่าสูงพอที่จะยังยั้งการเติมน้ำอย่างสมบูรณ์ของเม็ดแป้งแล้ว สมบัติการไหลของแป้งที่เป็นเจลจะต่างไปจากสมบัติที่มีความเข้มข้นของแป้งต่ำกว่า และที่ความเข้มข้นสูงกว่าความเข้มข้นวิกฤติ เม็ดแป้งจะเกิดการแตกออกได้ง่ายด้วยแรงเฉือน ยิ่งความเข้มข้นสูงความหนืดก็ยิ่งมากและจะเกิดเจลได้มาก

การปั่นที่มีประสิทธิภาพมากและเร็ว จะทำให้การถ่ายเทความร้อนมีประสิทธิภาพและทั่วถึงมากกว่า และกระบวนการให้ความร้อนก็เกิดขึ้นเร็ว จะทำให้เม็ดแป้งแตกออกอย่างรวดเร็วขึ้น โดยแป้งส่วนใหญ่จะเกิดเป็นเจลได้ที่ pH สูง ๆ และที่ pH ต่ำ ๆ

การปรับปรุงสมบัติของแป้ง

การปรับปรุงสมบัติแป้ง เพื่อผลิตภัณฑ์แป้งที่มีสมบัติเป็นที่ต้องการสำหรับการใช้งานเฉพาะด้าน การปรับปรุงสมบัติของแป้ง จะทำให้ผลิตภัณฑ์แป้งเปลี่ยนลักษณะของการเกิดเป็นเจล มีปริมาณของแป้งที่ความหนืดของสารละลายแป้งต่ำและเพิ่มสมบัติชอบน้ำ ทำให้แป้งมีความต้านทานต่อการลดลงของความหนืดในสภาพกรดและภายใต้แรงเฉือน การปรับปรุงสมบัติของแป้งจะทำให้สามารถลดปริมาณความชื้นการเปลี่ยนรูปร่างทางกายภาพ การควบคุมการสลายตัวการเปลี่ยนแปลงปริมาณของอะไมโลสหรืออะไมโลเพกติน และเกิดการจัดเรียงตัวของโมเลกุลหรือการเกิดหมู่ฟังก์ชันที่ต่างไปจากเดิม

การปรับปรุงสมบัติของแป้งโดยปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชัน

เตรียมได้โดยการทำให้เกิดเป็นอนุภาคลิเธเรซินบนโมเลกุลของแป้ง ซึ่งจะให้เป็นตัวริเริ่มขนาดใหญ่ สำหรับมอนอเมอร์ไวนิลและอะคริลิค ซึ่งจะทำให้โมเลกุลของแป้งเกิดโซ่สาขาที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง

ปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันโดยทำให้เกิดฟรีเรดิคัล ความถี่ของการต่อโซ่สาขานบนโมเลกุลของแป้งสามารถคำนวณได้จากเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของพอลิเมอไรท์ที่สังเคราะห์ขึ้น น้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยของโซ่สาขานบนโมเลกุลของแป้งสามารถหาได้ โดยกระทำให้แป้งสลายตัวเป็นน้ำตาลโดยใช้กรดหรือเอนไซม์

ประสิทธิภาพของการต่อสามารถแสดงในรูปเปอร์เซ็นต์ของพอลิเมอไรท์ต่อโซ่สาขา เช่น ในการทำปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันจะให้พอลิเมอไรท์สังเคราะห์จำนวนครึ่งหนึ่ง เป็นพอลิเมอไรท์ไม่มีโซ่สาขา ดังนั้นประสิทธิภาพในการต่อโซ่สาขามีค่า 50 เปอร์เซ็นต์

ปฏิกิริยาพอลิเมอไรท์ไรเซชันที่ควรมีประสิทธิภาพของการต่อโซ่สาขาสูงสุด

2. พอลิเมอไรท์ร่วมแบบต่อของ ยางธรรมชาติกับมอนอเมอร์ไวนิล

เนื่องจากยางธรรมชาติเป็นผลิตภัณฑ์ได้จากสวนยางและมีมากในประเทศ จึงควรมีการนำยางธรรมชาติมาใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรมมากขึ้น แต่เนื่องจากยางธรรมชาติก็มีสมบัติที่จำกัดหลายอย่างเช่น ความคงทน ต่อสิ่งแวดล้อม ต่อสารเคมี ความแข็งแรง และที่สำคัญยางธรรมชาติไม่ทำปฏิกิริยากับน้ำหรือไม่ละลายน้ำ ไม่ยอมให้น้ำซึมผ่าน ดังนั้นการนำมาประยุกต์ใช้กับปุ๋ยจะต้องทำการปรับปรุงให้มีการละลายน้ำบ้าง เพื่อให้ปุ๋ยสามารถ

แทรกออกมาได้ วิธีการหนึ่งคือการกราฟท์ด้วยหมู่ที่ชอบน้ำ เช่น หมู่ไวนิลอะครีริก หรือ ไวนิลอะคริลาไมด์ เป็นต้น และเพื่อเป็นการเพิ่มสมบัติของยางด้วย

ยางธรรมชาติซึ่งได้จากต้นยางพารา มีน้ำหนักโมเลกุลสูง สายโซ่โมเลกุลยาวและมีพันธะคู่ซึ่งมีความว่องไวสูง ดังนั้นจึงเป็นการง่ายที่จะใช้ยางธรรมชาติสังเคราะห์เป็นกราฟท์ โคพอลิเมอร์กับมอนอเมอร์ไวนิล โดยที่มียางธรรมชาติเป็นสายโมเลกุลหลัก และ มอนอเมอร์ไวนิลเป็นโซ่สาขา ความยาวของกิ่งสาขาจะสั้นถ้าหากใช้ความเข้มข้นของยางธรรมชาติมาก

3. โรซินมาลีอกแอนไฮดราบายด์

โรซินเป็นเรซินธรรมชาติ ที่มีความสำคัญมาก ประกอบด้วยผลิตภัณฑ์ที่ได้จากต้นไม้จำพวกสน (Genus Pinus) มีต้นสนหลายชนิดที่ผลิตโรซินออกมา ซึ่งมีความสำคัญทางการค้าสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ชนิด ดังนี้

1. กัมโรซิน (Gum rosin) เป็นโอลีโอเรซิน (oleoresin) ที่ถูกขับออกมาจากต้นสนที่ปลูกขึ้นเพื่อขูดหรือกรีดเอาเรซิน

โอลีโอเรซิน ประกอบด้วยโรซิน (rosin) น้ำมันสน (turpentine) และ aqueous exudate โรซินชนิดนี้ทำให้บริสุทธิ์ได้โดยการกลั่น (distillation refining)

2. Wood rosin ได้จากไม้สนโดยวิธีการสกัดด้วยตัวทำละลาย

3. Tall oil rosin เป็นผลิตภัณฑ์พลอยได้จากกระบวนการผลิตกระดาษกราฟท์ (Kraft paper process) tall oil ที่มีสิ่งเจือปนเป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้หลังจากการทำให้เป็นกรดของกระบวนการซัลไฟต์ (sulphite process) โรซินชนิดนี้ประกอบด้วยกรดโรซิน (rosin acid) กรดไขมัน (fatty acid) และ เทอร์พีนที่ระเหยได้ (volatile terpenes) โรซินชนิดนี้ทำให้บริสุทธิ์โดยการกลั่นลำดับส่วน

องค์ประกอบทางเคมีของโรซิน

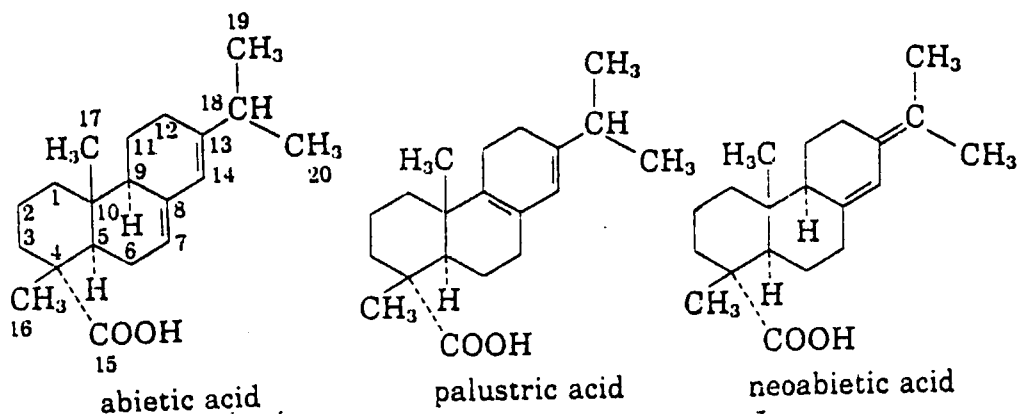
โรซินประกอบด้วยสารประกอบของกรดอินทรีย์หลายชนิดมีโครงสร้างหลักเป็นไฮโดรฟีนแอนทรีน (hydrophenanthrene nuclei) ซึ่งสามารถจำแนกออกได้ เป็น 2 ประเภทใหญ่ ๆ ตามโครงสร้างพื้นฐานดังนี้

1. ชนิดกรดอะไบติก (abietic type acid)

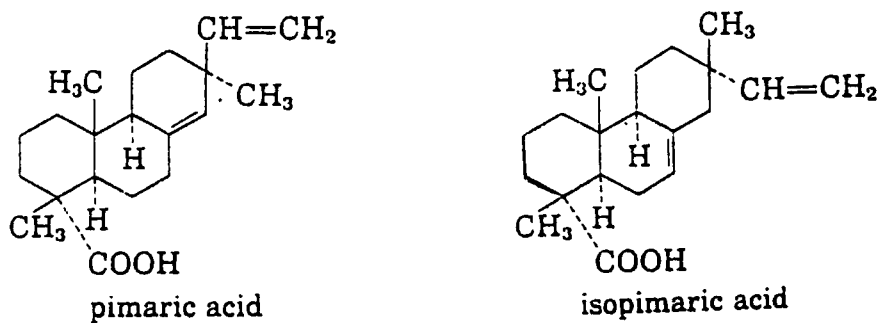
ซึ่งโครงสร้างของกรดชนิดนี้จะมีหมู่ไอโซโพรพิลเกาะอยู่บนคาร์บอนตำแหน่งที่ 13 ของโครงสร้างหลัก

2. ชนิดกรดไพมาริก (pimaric type acid)

ซึ่งโครงสร้างจะมีหมู่เมทิลและหมู่ไวนิลเกาะอยู่บนคาร์บอนตำแหน่งเดียวกัน

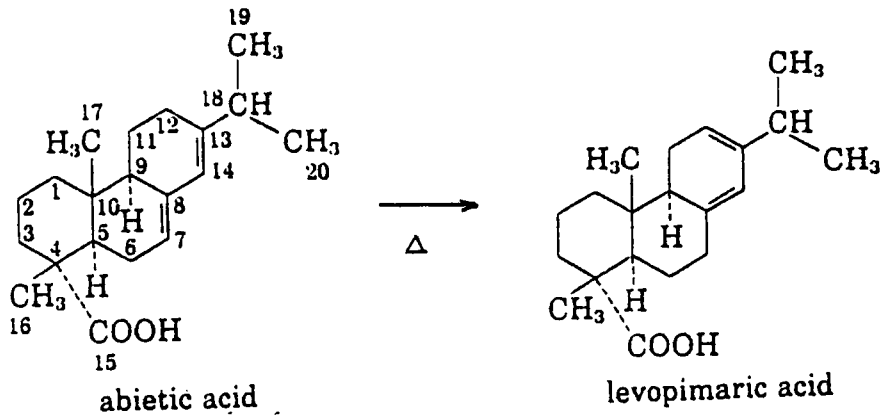


รูปที่ 2.13ก แสดงโครงสร้างทางเคมีของโรซินชนิดกรดอะไบติก



รูปที่ 2.13ข แสดงโครงสร้างทางเคมีของโรซินชนิดกรดไพมาริก

กรดอะไบติกและอนุพันธ์สามารถเกิดไอโซเมอร์ไรซ์ได้ โดยใช้ความร้อนหรือกรดให้ผลิตภัณฑ์เป็น levopimaric acid ดังสมการข้างล่าง



โรซินแต่ละชนิดได้จากแหล่งต่าง ๆ จะมีองค์ประกอบทางเคมีและอัตราส่วนของกรดโรซินที่แตกต่างกัน

ตารางที่ 2.3 แสดงองค์ประกอบทางเคมีของโรซิน

ชนิดของกรดโรซิน	Abietic acid	Neo-abietic acid	Palustic acid	Isomeric acid	Dehydro abietic acid
Gum rosin	22	20	25	17	6
Tall rosin	32	-	12	12	29
Wood rosin	49	-	12	13	13

โรซินมีช่วงหลอมเหลวที่อุณหภูมิ 70-90 องศาเซลเซียส ขึ้นอยู่กับแหล่งกำเนิดกับคุณภาพ การแบ่งเกรดจะแบ่งตามสีของโรซิน

ตารางที่ 2.4 แสดงสมบัติของโรซินชนิดต่าง ๆ

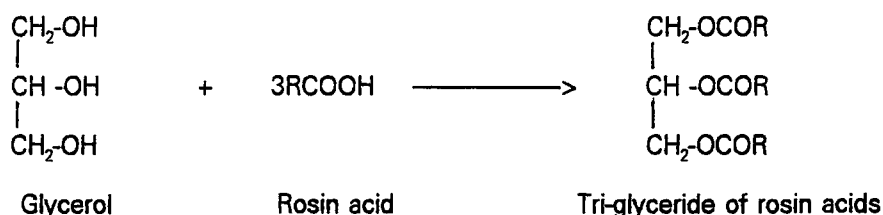
สมบัติของโรซิน	wood rosin	tall rosin
จุดหลอมเหลว	80	83
ค่าความเป็นกรด	168	165
ค่าสaponนิฟิเคชัน	176	175
ส่วนที่ไม่เกิดสaponนิฟิเคชัน	7.5	6.0
กรดไขมัน	-	1.5

การปรับปรุงสมบัติโรซิน

เนื่องจากโรซินที่ได้จากแหล่งต่าง ๆ มีจุดอ่อนตัวที่ 70-90 องศาเซลเซียส มีสมบัติในการทนความร้อนและสมบัติเชิงกลไม่ดี จึงต้องทำการปรับปรุงสมบัติให้ดีขึ้นโดยการทำปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน ซึ่งจะช่วยให้สมบัติเชิงกล สมบัติความร้อน และมีสีดีขึ้น

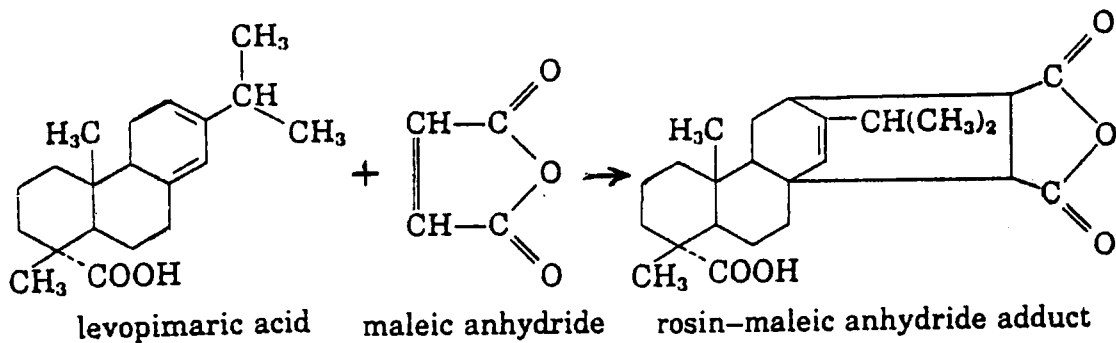
โรซินเอสเทอร์ สามารถเตรียมได้โดยการทำปฏิกิริยาระหว่างกรดโรซินกับพอลิออลสมบัติของโรซินเอสเทอร์ที่เตรียมได้จะขึ้นกับชนิดของพอลิออลที่ใช้ การทำปฏิกิริยาโดยทั่ว ๆ ไป ทำให้โรซินเหลือค่าความเป็นกรดประมาณ 10

พอลิออลที่ใช้ทั่วไป ได้แก่ กลีเซอรอลและ pentaerythritol ซึ่งจะได้โรซินเอสเทอร์ที่มีจุดหลอมเหลวและการละลายต่างกัน ปฏิกิริยาที่เกิดแสดงได้ดังสมการ



โรซินเอสเทอร์ที่เตรียมได้จะมีจุดอ่อนตัวช่วงกว้างและเหมาะสมในการประยุกต์ใช้งานในอุตสาหกรรมต่าง ๆ การเตรียมโรซินเอสเทอร์ที่มีจุดอ่อนตัวที่อุณหภูมิสูงสามารถทำปฏิกิริยา Diels-Alder กับไดอีนอไฟล์ (dienophile) ได้แก่ มาลลิกแอนไฮไดรด์ หรือกรดอะคริลิก จะได้

ผลิตภัณฑ์เป็นเป็นกรดพอลิคาร์บอกซิลิก ซึ่งสามารถทำปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันไปเป็นโรซินเอสเทอร์ที่มีจุดอ่อนตัวที่อุณหภูมิสูง ดังสมการข้างล่างนี้



ประโยชน์ของโรซินเอสเทอร์

1. ใช้ในอุตสาหกรรมเคลือบผิวเพื่อปรับปรุงสมบัติความเงา ความแข็ง และเพื่อลดต้นทุนในการผลิต
2. ใช้ผลิตวานิชในการทำตัวอักษรชนิดลอก (letterpress) และหมึกพิมพ์ (lithographic ink)

บทที่ 3

การดำเนินงานการวิจัย

3.1 สารเคมีและเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

3.1.1 สารเคมี

สารเคมี	เกรด	ผู้ผลิต(บริษัท)
เบ็งมันสำปะหลัง	เกรดการค้า	-
อะคริลาไมด์	เกรดการค้า	-
กรดไนตริกเข้มข้น	เกรดวิเคราะห์	Merck
Na ₂ EDTA	เกรดวิเคราะห์	J.T. Baker Inc.
โพธิ์ลิ้นไกลคอลล	เกรดการค้า	J.T. Baker Inc.
โปแทสเซียมเปอร์ซัลเฟต	เกรดวิเคราะห์	Fluka
โรซิน	เกรดการค้า	-
บิวแคลเซียมไนเทรต	เกรดการค้า	บิวเคมีแห่งชาติ
มาลิอิกแอนไฮไดรไรต์	เกรดวิเคราะห์	Fluka
กลีเซอรอล	เกรดวิเคราะห์	Fluka
ยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูง	เกรดการค้า	-
สารสเตรปีไลเซอร์ (NP4000)	เกรดการค้า	-
ไดเอทิลีนไตรเอมีน	เกรดวิเคราะห์	Merck
โปแทสเซียมไนเทรต	เกรดวิเคราะห์	Fluka
อลูมิเนียมซัลเฟต	เกรดวิเคราะห์	Merck
ซิลเวอร์ซัลเฟต	เกรดวิเคราะห์	Merck
กรดซัลฟามิก	เกรดวิเคราะห์	Seetze - Hannover
กรดบอริก	เกรดวิเคราะห์	Fluka
โซเดียมไฮดรอกไซด์	เกรดวิเคราะห์	Merck
น้ำกลั่น	-	

3.1.2 เครื่องมือ

ก) หม้อปฏิกิริยา แบบ 4 คอ (4-necked reaction vessel) ขนาด 2000 ml บริษัท Schott Duran

ข) ไบพัตกวน แบบ 3 ชั้น และแบบพับได้

ค) อ่างน้ำ (water bath) พร้อมเครื่องควบคุมอุณหภูมิ

ง) เครื่องกวนเชิงกล (mechanic stirrer) บริษัท Kika Werk รุ่น RW20

จ) เทอร์โมมิเตอร์ 0-100 องศาเซลเซียส และ 0-300 องศาเซลเซียส

ฉ) ชุดควบแน่น (condencer)

ช) เครื่องชั่งละเอียดทศนิยม 2 ตำแหน่ง บริษัท Sartorius

ซ) เครื่องชั่งละเอียดทศนิยม 4 ตำแหน่ง บริษัท Sartorius

ฅ) เครื่องวัดค่า pH บริษัท Metrohm รุ่น 645 pH meter

ญ) เครื่องวัดค่าไนเตรตอิออน บริษัท Metrohm รุ่น AG CH-9101 Herisau

ฎ) ขวดสามคอ ขนาด 500 มล.บริษัท Schott Duran

ฏ) เครื่องผสมแบบลูกบอลล์ (Ball mill) บริษัท Pascall Engineering Ins.

ฐ) เครื่องวัดความหนืดแบบ Brookfield บริษัท Brookfield Engineering

Laboratories, Inc.

ฑ) เครื่องพ่นแห้ง (Spray Dry) บริษัท Buchi รุ่น 190 minispray dry

ฒ) เครื่องแก้วต่าง ๆ

3.2 วิธีการทดลอง

3.2.1 การเตรียมสารละลาย Na_2EDTA ความเข้มข้น 10 เปอร์เซ็นต์

ชั่งเกลือไดโซเดียมของกรดเอทิลีนไดเอมีนเตตระอะซิติก 2 โมเลกุลของน้ำ (ethylenediamine tetraacetic acid disodium salt dihydrate) จำนวน 10 กรัม ด้วยเครื่องชั่งละเอียดทศนิยม 4ตำแหน่ง ใส่ในบีกเกอร์ขนาด 200 มล. เติมน้ำกลั่นประมาณ 75 มล. กวนสารให้เข้ากันและให้ความร้อนแก่สารในขณะที่กวนตลอดเวลาจนส่วนที่เป็นของแข็งละลายหมด แล้วทำสารละลายเย็นตัวที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นเทสารละลายลงขวดวัดปริมาตร (volumetric flask) ขนาด 100 มล. เติมน้ำกลั่นลงไปจนสารละลายมีปริมาตร 100 มล.

3.2.2 การเตรียมกรดไนตริกความเข้มข้น 1 โมลาร์

ชั่งน้ำหนักของกรดไนตริกเข้มข้นมา 15.6 มล. เทลงในขวดวัดปริมาตรขนาด 250 มล. และเติมน้ำกลั่นลงไปจนสารละลายมีปริมาตร 250 มล.

3.2.3 การเตรียมสารละลายไปแทสเซียมเปอร์ซัลเฟตความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ ในสารละลายกรดไนตริกความเข้มข้น 1 โมลาร์

ชั่งไปแทสเซียมเปอร์ซัลเฟต จำนวน 2.7 กรัม ในบีกเกอร์ขนาด 250 มล. เติมน้ำกลั่นกรดไนตริกความเข้มข้น 1 โมลาร์ จำนวน 100 มล. กวนให้เข้ากันจนส่วนที่เป็นของแข็งละลายหมด นำสารละลายที่ได้เก็บในขวดสีชาที่อุณหภูมิต่ำกว่า 15 องศาเซลเซียส

3.2.4 การสังเคราะห์พอลิเมอร์ร่วมแบบต่อของแป้งมันสำปะหลังกับมอนอเมอร์อะคริลาไมด์

เติมน้ำกลั่นจำนวน 440 มล. ในหม้อปฏิกิริยา ให้ความร้อนจนถึงอุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เติมแป้งมันสำปะหลังจำนวน 100 กรัมลงไป แล้วปั่นกวนโดยใช้เครื่องกวนเชิงกลด้วยความเร็ว 1000 รอบต่อนาที ต่อจากคาร์บอนไดออกไซด์เข้ากับหม้อปฏิกิริยา ปั่นกวนอย่างต่อเนื่อง จนกระทั่งสารละลายเป็นเจลใส แล้วลดอุณหภูมิจนถึงอุณหภูมิต่ำลง เติมอะคริลาไมด์ จำนวน 42.262 กรัม สารละลาย Na_2EDTA จำนวน 20 มล. และโพรพิลีนไกลคอล จำนวน 0.8 มล. ปั่นกวนต่อไปอีก 15 นาที เพิ่มอุณหภูมิแบ่งให้ได้ 40 องศาเซลเซียส ความเร็วรอบในการปั่นกวนเป็น 2000 รอบต่อนาที แล้วจึงเติมสารละลายไปแทสเซียมเปอร์ซัลเฟตความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ จำนวน 40 มล. ลงไปอย่างรวดเร็ว ทำการปั่นกวนจนกระทั่งปฏิกิริยาสิ้นสุด ใช้เวลาประมาณ 3 ชั่วโมง จะได้ผลิตภัณฑ์พอลิเมอร์ร่วมของแป้งมันสำปะหลังกับอะคริลาไมด์

3.2.5 การสังเคราะห์โรซินมาเลอิกแอนไฮดรายด์

ชั่งกัมโรซินจำนวน 400 กรัม ใส่ในหม้อปฏิกิริยา ให้อุณหภูมิที่ประมาณ 100 องศาเซลเซียส จนกระทั่งกัมโรซินหลอมเป็นสารละลายหนืด เติมกลีเซอรอลจำนวน 70 กรัมลงไป แล้วเพิ่มอุณหภูมิเป็น 150 องศาเซลเซียส พร้อมทั้งปั่นกวนโดยใช้เครื่องกวนเชิงกลด้วยความเร็ว 500 รอบต่อนาที เติมมาเลอิกแอนไฮดรายด์จำนวน 30 กรัมลงไป พร้อมทั้งเพิ่มอุณหภูมิเป็น 260 องศาเซลเซียส ทำการปั่นกวนต่อเป็นเวลา 3 ชั่วโมง ทดสอบค่า

ความเป็นกรดของโรซินเอสเทอร์ ซึ่งค่าที่ได้ต้องต่ำกว่า 20 จึงทำการหยุดปฏิกิริยา โรซินเอสเทอร์ที่เตรียมได้เทใส่ถาด โรซินเอสเทอร์ที่ได้จะแข็งตัว จากนั้นนำมาบดให้ละเอียด เก็บโรซินเอสเทอร์ที่เตรียมได้ในเดซิเคเตอร์เพื่อป้องกันความชื้น

สภาวะการสังเคราะห์ มีการเปลี่ยนแปลง ได้ดังนี้

-สังเคราะห์ในสภาวะปกติ

-สังเคราะห์ในสภาวะก๊าซไนโตรเจน

-สังเคราะห์ในสภาวะก๊าซไนโตรเจน และเติมสารเร่งปฏิกิริยา คือ $AlCl_3$

3.2.6 การเตรียมอิมัลชันของโรซินเอสเทอร์

ในการทดลองนี้ จะเตรียมโรซินเอสเทอร์ที่มีปริมาณของแข็งอยู่ 40 และ 60 เปอร์เซ็นต์ โดยใช้ โรซินเอสเทอร์ 100 กรัม และน้ำกลั่น 150 มิลลิลิตร และโรซินเอสเทอร์ 100 กรัม และน้ำ 67 มิลลิลิตร ตามลำดับ โดยในการเตรียมอิมัลชันจะทำการปรับสารถละลายให้มีความเป็นเบส โดยการเติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 1 นอร์มอลในปริมาณ 0.72 มิลลิลิตรต่อน้ำหนักโรซินเอสเทอร์ 1 กรัม เติมสารเคมีทั้งหมดลงในหม้อผสมของเครื่องผสมแบบลูกบอลล์ ทำการบดผสมให้ได้ความละเอียดของโรซินเอสเทอร์ในช่วง 25-45 ไมครอน โดยใช้เวลาประมาณ 48 ชั่วโมง นำของผสมที่ผลิตได้วัดความหนืดโดยใช้เครื่องวัดความหนืดแบบ Brookfield

3.2.7 การสังเคราะห์พอลิเมอร์ร่วมแบบต่อของยางธรรมชาติกับอะครีลาไมด์

ซึ่งยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูง 100 ส่วน ใส่ในหม้อปฏิกิริยาขนาด 2000 มล. เติมสารเพิ่มเสถียรภาพ NP 4000 จำนวน 3 ส่วน บั่นกวนด้วยเครื่องกวนชนิดเชิงกลด้วยอัตราความเร็ว 165 รอบต่อนาที ภายใต้บรรยากาศก๊าซไนโตรเจน เป็นเวลา 60 นาที เติมอะครีลาไมด์ 30 ส่วน ลงในหม้อปฏิกิริยา แล้วเพิ่มอัตราเร็วในการบั่นกวนเป็น 200 รอบต่อนาที เป็นเวลา 60 นาที และควบคุมอุณหภูมิของหม้อปฏิกิริยา ให้อยู่ในช่วง 23-25 องศาเซลเซียส เติม สารริเริ่มปฏิกิริยา t-butyl hydroperoxide 0.01 ส่วน และไดเอทิลีน ไตรเอมีน 4.44 เท่าของสารริเริ่ม ทำการบั่นเป็นเวลา 15 นาที ด้วยอัตราความเร็ว 165 รอบต่อนาที จากนั้นหยุดการบั่นกวน และตั้งทิ้งไว้เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

3.2.8 การสังเคราะห์ไมโครแคปซูลโดยสารพอลิเมอร์หุ้มชนิดต่าง ๆ

ซึ่งปฏิกิริยาเคมีในเทอร์ต (15-0-0) หนัก 50 กรัม ผสมลงในสารละลายพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์ได้แต่ละชนิด โดยนำสารละลายพอลิเมอร์มาอย่างละ 50 กรัม ทำการปั่นกวนโดยมอเตอร์ที่ความเร็วรอบ 100 รอบต่อนาที เป็นเวลา 15 นาที นำสารละลายที่ได้นี้ทำการฉีดพ่นแห้งโดยใช้เครื่องฉีดพ่นแห้ง (spray dry) ตั้งอุณหภูมิเครื่องที่ 100-120 องศาเซลเซียส

3.3 การศึกษาสมบัติของสารพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์ได้

3.3.1 การศึกษาความหนืดของสารพอลิเมอร์ที่ใช้หุ้ม

นำสารพอลิเมอร์ที่เตรียมได้มาวัดความหนืด โดยใช้เครื่องวัดความหนืดแบบ Brookfield และบันทึกผล

3.3.2 การศึกษาสมบัติในการละลายของโรซินเอสเทอร์

นำโรซินมาลึอกแอนไฮดรายด์ที่บดแห้งละเอียดซึ่งได้จากการสังเคราะห์โรซินมาลึอกแอนไฮดรายด์ตามหัวข้อ 3.2.5 หนัก 1 กรัม แล้วเติมตัวทำละลายชนิดต่าง ๆ เพื่อทำการทดสอบการละลายลงไป 25 มิลลิลิตร เขย่าให้เข้ากัน และตั้งทิ้งไว้ประมาณ 30 นาที สังเกตผลที่ได้แล้วจึงบันทึกผล

ตัวทำละลายได้แก่ คาร์บอนเตตระคลอไรด์ คลอโรฟอร์ม เมทิลเอทิลคีโตน ไดเอทิลอีเทอร์ ทอลูอีน เอทิลอะซิเตต เฮกเซน ไสโคลเฮกเซน และเมทิลแอลกอฮอล์

3.3.3 การวิเคราะห์หาค่าจุดหลอมเหลวของโรซินเอสเทอร์

นำโรซินมาลึอกแอนไฮดรายด์ที่สังเคราะห์ได้ในสภาวะต่าง ๆ ใส่ลงในหลอดแก้วแคปิลารีเพียงเล็กน้อย นำไปวัดค่าอุณหภูมิในการหลอมเหลวโดยเครื่องวัดค่าการหลอมเหลว แล้วบันทึกผลอุณหภูมิการหลอมเหลวของโรซินเอสเทอร์แต่ละชนิด

3.3.4 การวิเคราะห์ค่าความเป็นกรดของโรซินเอสเทอร์

ซึ่งโรซินเอสเทอร์ 2 กรัม นำมาละลายใน สารละลายผสมของทอลูอีนและเมทิลสไตรีน อัตราส่วน 1:1 โดยปริมาตร จำนวน 100 มล. หยดทีนออฟทาลีน ลงไป 3-5 หยด นำสารที่ได้มาไตเตรทด้วยสารละลายไปแทลเลียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 0.1

โมลาร์ จนถึงจุดยุติจะได้สารละลายสีชมพู บันทึกปริมาณไปแทลเทียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ นำมาคำนวณหา ค่าความเป็นกรดดังสมการดังนี้

$$\text{ค่าความเป็นกรดโรซินเอสเทอร์} = \frac{56.1 \times V \times N}{W}$$

V = ปริมาตรของ สารละลายไปแทลเทียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์

N = ความเข้มข้นของสารละลายไปแทลเทียมไฮดรอกไซด์ (โมลาร์)

W = น้ำหนักของโรซินเอสเทอร์ (กรัม)

3.3.5 การศึกษาหาอัตราการปลดปล่อยนุ้ย โดยวัดค่าความเข้มข้นของ ไอออนไนเตรต

- การเตรียมสารละลายมาตรฐานไปแทลเทียมไนเตรต

นำไปแทลเทียมไนเตรตไปอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วทิ้งให้เย็นในเดซิเคเตอร์ ชั่งไปแทลเทียมไนเตรตหนัก 0.7218 กรัม ด้วยเครื่องชั่งละเอียด ทศนิยม 4 ตำแหน่ง ใส่ในขวดวัดปริมาตรขนาด 1000 มล. เติมน้ำกลั่นให้ได้ปริมาตร 1000 มล. ทำการเก็บรักษาสารละลายมาตรฐานนี้ โดยเติมคลอโรฟอร์ม 2 มล. ลงไป ปิดสารละลายมาตรฐานไปแทลเทียมที่เตรียมได้จำนวน 1 มล. ใส่ในขวดวัดปริมาตรขนาด 100 มล. เติมน้ำกลั่นให้ได้ปริมาตร 100 มล. ปิดสารละลายมาตรฐานไปแทลเทียมจำนวน 10 ,40 ,45, 50 ,55, 60 ,70 และ 100 มล. ปรับปริมาตรเป็น 100 มล. จะได้สารละลายมาตรฐานที่มีไอออนไนเตรต เท่ากับ 1,10,40,50,60,70 และ 100 มิลลิกรัม ตามลำดับ

- การเตรียมสารละลายบัฟเฟอร์

ชั่ง $\text{Ag}_2(\text{SO}_2)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$ 17.32 กรัม , Ag_2SO_4 1.28 กรัม, $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$ 3.43 กรัม , H_3BO_3 1.28 กรัม และ กรดซัลฟามิก (Sulfamic acid) 2.52 กรัม ละลายในน้ำกลั่น 800 มล. พร้อมทั้งปรับ pH ให้เท่ากับ 3 ด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ แล้วปรับปริมาตรเป็น 1000 มล. ในขวดวัดปริมาตร และเก็บรักษาไว้ในขวดสีชา

- วิธีการวัดหาค่าไอออนไนเตรต

ก) การเตรียมกราฟมาตรฐาน

ปิเปตสารละลายมาตรฐาน 1,10,40,50,60,70 และ100 มก. มาขวดละ 10 มล. ใส่ในบีกเกอร์ขนาด 50 มล. ตามลำดับ แล้วเติมสารละลายบัฟเฟอร์ 10 มล. ลงไป จากนั้นทำการกวนด้วยเครื่องกวนแบบแม่เหล็ก แล้วจุ่มอิเล็กโทรดวัดค่าไอออนไนเทรตลงไป บันทึกค่าเป็นมิลลิโวลต์ หลังจากจุ่ม 1 นาที

นำค่าที่วัดได้ไปเขียนกราฟ โดยพลอตกราฟระหว่างค่ามิลลิโวลต์ที่วัดได้เป็นแกนตั้งกับค่าล็อกกาลีทีมของความเข้มข้นของสารมาตรฐานเป็นแกนนอน

ข) การเตรียมสารตัวอย่าง

ซึ่งไม่มีใครแคปซูลที่เตรียมได้ด้วยเครื่องชั่งทศนิยม 4 ตำแหน่งมา 1 กรัมใส่ในบีกเกอร์ขนาด 50 มล. จำนวน 11 ชุด เติมน้ำกลั่นปริมาตร 10 มล. ในแต่ละบีกเกอร์ แล้วตั้งทิ้งไว้ และจับเวลาที่ 5,10,15,20,25,30,40,50,60,90 และ 120 นาที ตามลำดับ เมื่อครบเวลาที่กำหนด ปิเปตสารละลายที่ได้ในช่วงเวลาต่าง ๆ มา 5 มล. ใส่ลงในขวดวัดปริมาตรขนาด 100 มล. และเติมน้ำกลั่นลงไปจนสารละลายมีปริมาตรเป็น 100 มล.

การวิเคราะห์สารละลายตัวอย่าง จะทำการปิเปตสารละลายตัวอย่างมา 10 มล. ใส่ลงในบีกเกอร์ขนาด 50 มล. เติมน้ำกลั่นบัฟเฟอร์ 10 มล. ทำการกวนด้วยเครื่องกวนแบบแม่เหล็ก แล้ววิเคราะห์หาค่าไอออนไนเทรตในสารละลายตัวอย่างเช่นเดียวกับสารละลายมาตรฐาน

หมายเหตุ สารละลายตัวอย่างจะต้องมีความเข้มข้นอยู่ในช่วงเดียวกับสารละลายมาตรฐาน ถ้าไม่อยู่ในช่วงเดียวกันต้องทำการเจือจางสารละลายตัวอย่าง ให้อยู่ในช่วงเดียวกันก่อน สภาวะในการวิเคราะห์สารละลายมาตรฐาน และสารละลายตัวอย่าง จะต้องอยู่ในสภาวะเดียวกัน เช่น ความเร็วในการกวนด้วยแม่เหล็ก, อุณหภูมิของสารละลาย และมุมของอิเล็กโทรดที่จุ่มในสารละลาย เป็นต้น

บทที่ 4

ผลการทดลอง

จากการสังเคราะห์สารพอลิเมอร์ที่ใช้หุ้มชนิดต่าง ๆ และการวิเคราะห์หาปริมาณไนเตรตไอออนในน้ำ สามารถแสดงค่าได้ดังต่อไปนี้

4.1 สารหุ้มพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์ได้

- 1 พอลิเมอร์ร่วมแบบต่อของแป้งมันสำปะหลังกับอะคริลาไมด์ ผลิตภัณฑ์ที่เตรียมได้มีลักษณะเป็นเนื้อเดียวกัน สีขาวขุ่นใส
- 2 พอลิเมอร์ร่วมแบบต่อของยางธรรมชาติกับอะคริลาไมด์ ผลิตภัณฑ์ที่เตรียมได้เป็นของเหลวลักษณะเป็นลาเทกซ์สีขาวเหมือนน้ำนม
- 3 โรซินเอสเทอร์ ผลิตภัณฑ์ที่เตรียมได้เป็นของแข็งสีน้ำตาลแดงใส

4.2 ความหนืดของสารพอลิเมอร์ที่ใช้หุ้มปุ๋ย

ตารางที่ 4.1 แสดงความหนืดของพอลิเมอร์ที่ใช้หุ้มปุ๋ย

ชนิดของสารพอลิเมอร์ที่ใช้หุ้ม	ความหนืด(เซนติพอยท์)
โรซินเอสเทอร์อิมัลชันที่มีปริมาณของแข็ง 40%	1,516.00
โรซินเอสเทอร์อิมัลชันที่มีปริมาณของแข็ง 60 %	2,015.00
สารละลายพอลิเมอร์ร่วมแบบต่อของยางธรรมชาติกับอะคริลาไมด์ ที่มีปริมาณของแข็ง 5%	26.50
สารละลายพอลิเมอร์ร่วมแบบต่อของยางธรรมชาติกับอะคริลาไมด์ที่มีปริมาณของแข็ง 10%	115.00
สารละลายพอลิเมอร์ร่วมแบบต่อของยางธรรมชาติกับอะคริลาไมด์ที่มีปริมาณของแข็ง 15%	149.16
สารละลายพอลิเมอร์ร่วมแบบต่อของแป้งมันสำปะหลังกับอะคริลาไมด์ที่มี ปริมาณของแข็ง 5%	60.00
สารละลายพอลิเมอร์ร่วมแบบต่อของแป้งมันสำปะหลังกับอะคริลาไมด์ที่มีปริมาณของแข็ง 10%	39,250.00

4.3 การศึกษาสมบัติการละลายของโรซินเอสเทอร์

ตารางที่ 4.2 แสดงการละลายของโรซินเอสเทอร์ในตัวทำละลายต่าง ๆ

ตัวทำละลาย	การละลาย
สารประกอบคลอไรด์อินทรีย์	
คาร์บอนเตตระคลอไรด์	ละลาย
คลอโรฟอร์ม	ละลาย
สารประกอบคีโตน	
เมทิลเอทิลคีโตน	ละลาย
สารประกอบอีเทอร์	
ไดเอทิลอีเทอร์	ละลายเร็วมาก
สารประกอบอะโรมาติกส์	
ทอลูอีน	ละลายได้เล็กน้อย
สารประกอบเอสเทอร์	
เอทิลอะซิเตต	ละลาย
สารประกอบอะลิฟาติกส์	
เฮกเซน	ไม่ละลาย
ไซโคลเฮกเซน	ไม่ละลาย
สารประกอบแอลกอฮอล์	
เมทิลแอลกอฮอล์	ละลาย

4.4 การวิเคราะห์หาจุดหลอมเหลวของโรซินเอสเทอร์

1. กัมโรซิน มีจุดหลอมเหลว 65.0 °C
2. โรซินเอสเทอร์ในสภาวะบรรยากาศ มีจุดหลอมเหลว 99.5 °C
3. โรซินเอสเทอร์ในภาวะก๊าซไนโตรเจน มีจุดหลอมเหลว 99.5 °C
4. โรซินเอสเทอร์ในภาวะก๊าซไนโตรเจนและเติมตัวเร่งปฏิกิริยา คือ อลูมิเนียมไตรคลอไรด์ มีจุดหลอมเหลว 118.0 °C

4.5 ไมโครแคปซูลที่เตรียมได้จากการหุ้มโดยสารพอลิเมอร์

เนื่องจากสารละลายจะถูกฉีดโดยเครื่องฉีดพ่นแห้ง (spray dry) ทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้แห้งเป็นผง การใช้เครื่องฉีดพ่นแห้งนี้มีข้อจำกัดที่ความหนืดของสารละลายที่ต้องการฉีดพ่นจะต้องไม่มากกว่า 100 เซนติพอยท์

4.6 การทำกราฟมาตรฐานไอออนไนเทรต

ตารางที่ 4.3 แสดงค่าที่ใช้ในการคำนวณกราฟมาตรฐานของสารละลายไนเทรต

ความเข้มข้นของสารละลาย มาตรฐาน (mg/g)	ค่าล็อกกาลิทึมของสาร ละลายมาตรฐาน	ค่ามิลลิ โวลท์(mV)
1	0.000	147.5
10	1.000	92.7
30	1.477	64.9
40	1.602	62.2
45	1.653	59.2
50	1.698	53.1
55	1.740	51.8
60	1.778	51.5
70	1.845	47.3
100	2.000	37.0

4.7 การวัดอัตราการปลดปล่อยของไมโครแคปซูล

จะใช้วิธีวัดค่ามิลลิโวลท์ (mV) แล้วนำมาเทียบค่ากับกราฟมาตรฐาน ค่าไอออนไนเทรตที่ได้จากกราฟมาตรฐานโดยถูกทำให้เป็นค่าของไนโตรเจนและรายงานผลในรูปของปริมาณการปลดปล่อยไนโตรเจน (mg/g) และเปอร์เซ็นต์การปลดปล่อย ดังนี้

ตารางที่ 4.4 แสดงปริมาณไนโตรเจนและเปอร์เซ็นต์การปลดปล่อยไนโตรเจนที่เวลาต่าง ๆ ของไมโครแคปซูลโดยพอลิเมอร์รวมแบบต่อของยางธรรมชาติกับอะครีลาไมด์

เวลาที่ใช้ทดสอบ (นาที)	ปริมาณไนโตรเจนที่ปลดปล่อย (mg/g)	%การปลดปล่อย ไนโตรเจน
5	528.56	36.80
10	539.01	37.52
15	571.61	39.79
20	589.79	41.06
25	580.63	40.42
30	558.34	38.87
40	549.66	38.26
50	560.53	39.02
60	567.15	39.48
90	576.10	40.11
120	558.34	38.87

ตารางแสดงที่ 4.5 แสดงปริมาณไนโตรเจนและเปอร์เซ็นต์การปลดปล่อย
ไนโตรเจนที่เวลาต่าง ๆ ของไมโครแคปซูลโดยโรซินเอสเทอร์ (60%)

เวลาที่ใช้ทดสอบ (นาที)	ปริมาณการปลดปล่อยไนโตรเจน (mg/g)	% การปลดปล่อย ไนโตรเจน
5	424.52	40.90
10	522.39	50.33
15	532.72	51.32
20	580.63	55.94
25	587.48	54.53
30	580.63	55.94
40	585.19	56.38
50	623.01	60.02
60	635.39	61.21
90	603.80	58.17
120	615.74	59.32

ตารางที่ 4.6 แสดงค่าปริมาณไนโตรเจนและเปอร์เซ็นต์การปลดปล่อยไนโตรเจนที่
เวลาต่าง ๆ ของไมโครแคปซูลโดยโรซินเอสเทอร์ (40%)

เวลาที่ใช้ในทดสอบ (นาทึ)	ปริมาณการปลดปล่อยไนโตรเจน (mg/g)	%การปลดปล่อย ไนโตรเจน
5	436.31	36.78
10	453.73	38.25
15	543.25	45.79
20	460.89	38.85
25	545.38	45.97
30	553.98	46.70
40	585.19	49.33
50	582.90	49.14
60	582.91	49.13
90	596.76	50.30
120	632.84	53.35

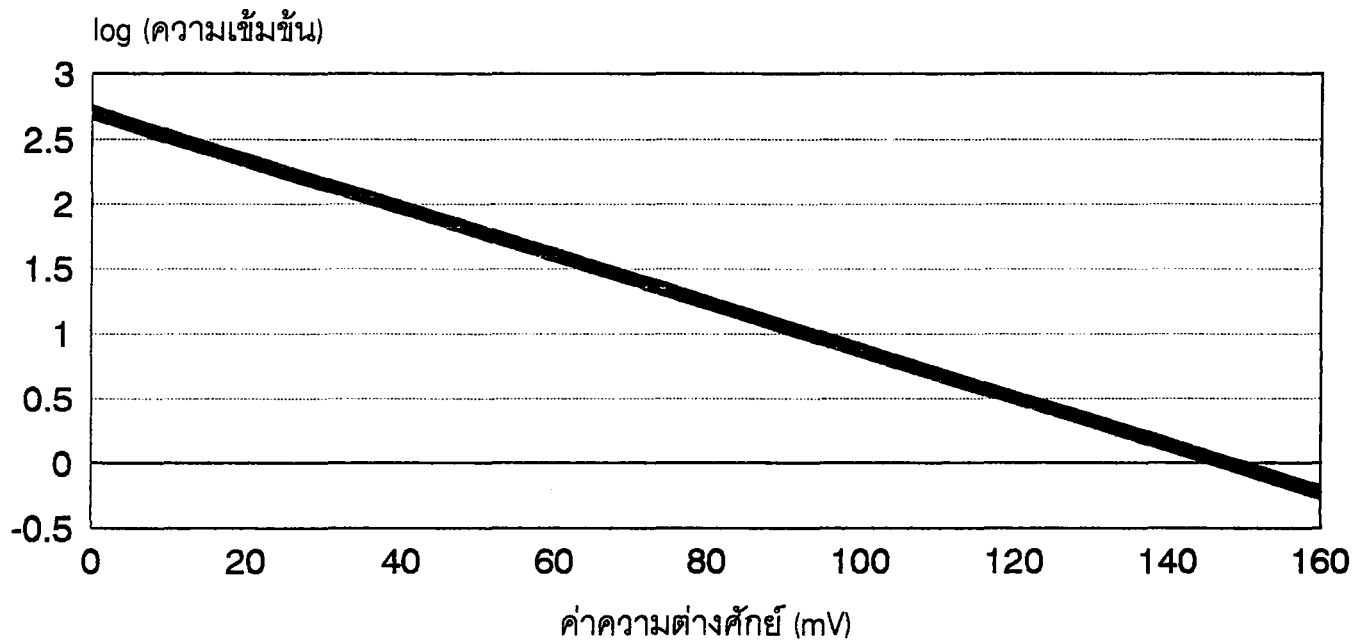
ตารางที่ 4.7 แสดงค่าปริมาณไนโตรเจนและเปอร์เซ็นต์การปลดปล่อยไนโตรเจนของไมโครแคปซูลโดยพอลิเมอร์รวมแบบต่อของแป้งมันสำปะหลังกับอะครีลาไมด์(5%)

เวลาที่ใช้ทดสอบ (นาที)	ปริมาณการปลดปล่อยไนโตรเจน (mg/g)	% การปลดปล่อย ไนโตรเจน
5	393.6	31.10
10	452.8	35.78
15	493.5	39.00
20	487.4	38.52
25	552.9	43.65
30	552.2	43.64
40	548.1	43.31
50	648.1	51.22
60	491.5	38.84
90	499.8	39.50
120	514.7	40.67

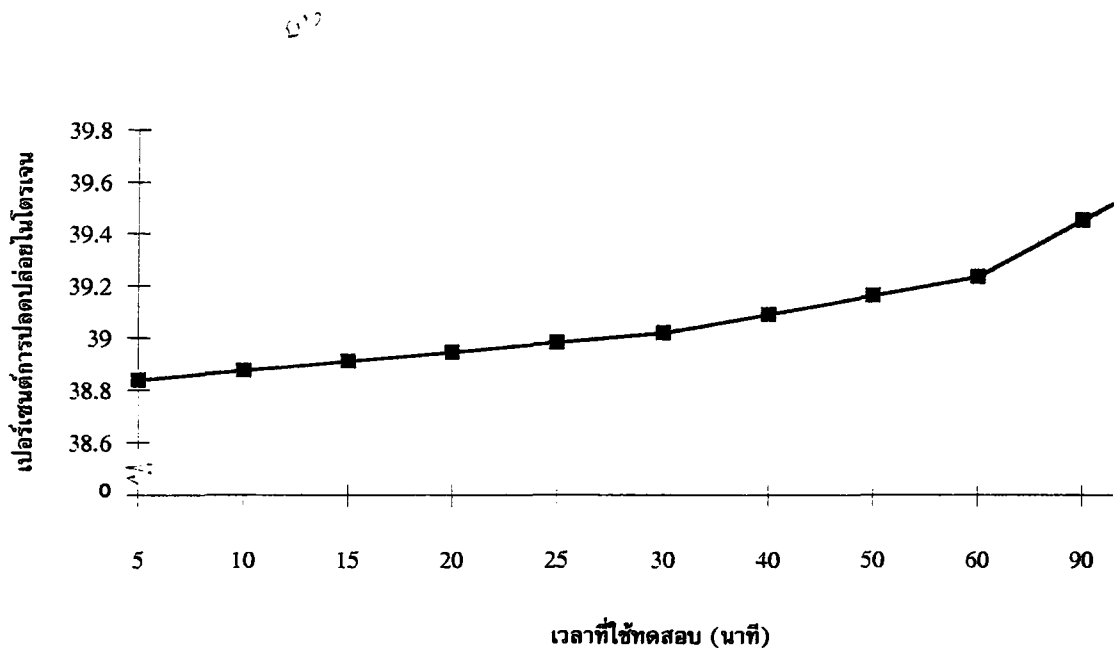
ตารางที่ 4.8 แสดงค่าปริมาณไนโตรเจน และเปอร์เซ็นต์การปลดปล่อยไนโตรเจนที่เวลาต่างๆของไมโครแคปซูลโดยพอลิเมอร์ร่วมแบบต่อของแป้งมันสำปะหลังกับอะคริลาไมด์ (2.5%)

เวลาที่ใช้ทดสอบ (นาทื)	ปริมาณการปลดปล่อยไนโตรเจน (mg/g)	%การปลดปล่อย ไนโตรเจน
5	578.3	44.62
10	601.5	46.40
15	625.5	48.25
20	627.9	48.44
25	606.2	46.76
30	599.1	46.22
40	620.6	47.87
50	589.8	45.50
60	585.2	45.14
90	606.2	46.76
120	613.3	47.31

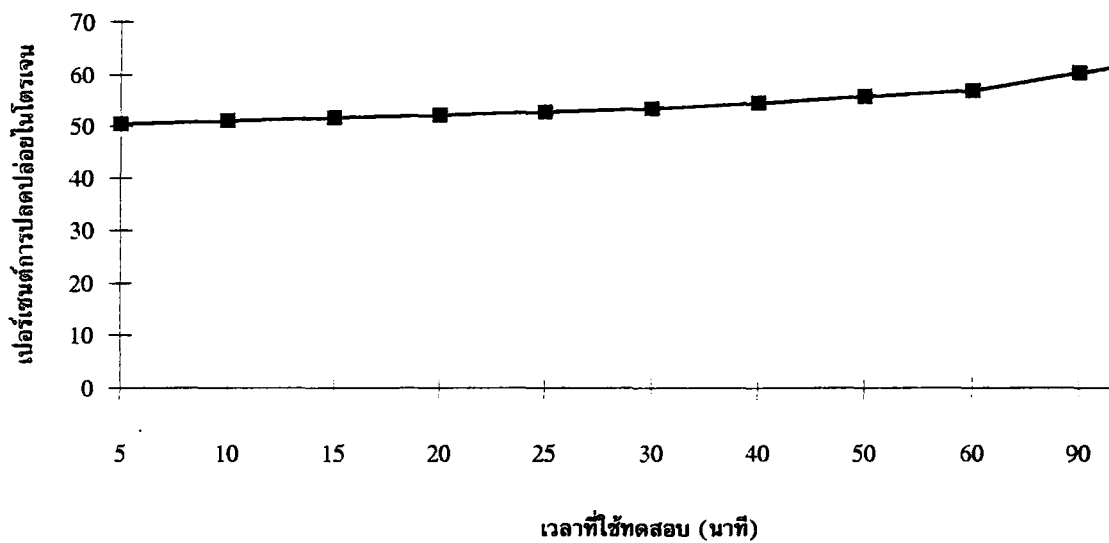
กราฟมาตรฐานของไนโตรเจนที่ความต่างศักย์ต่าง ๆ



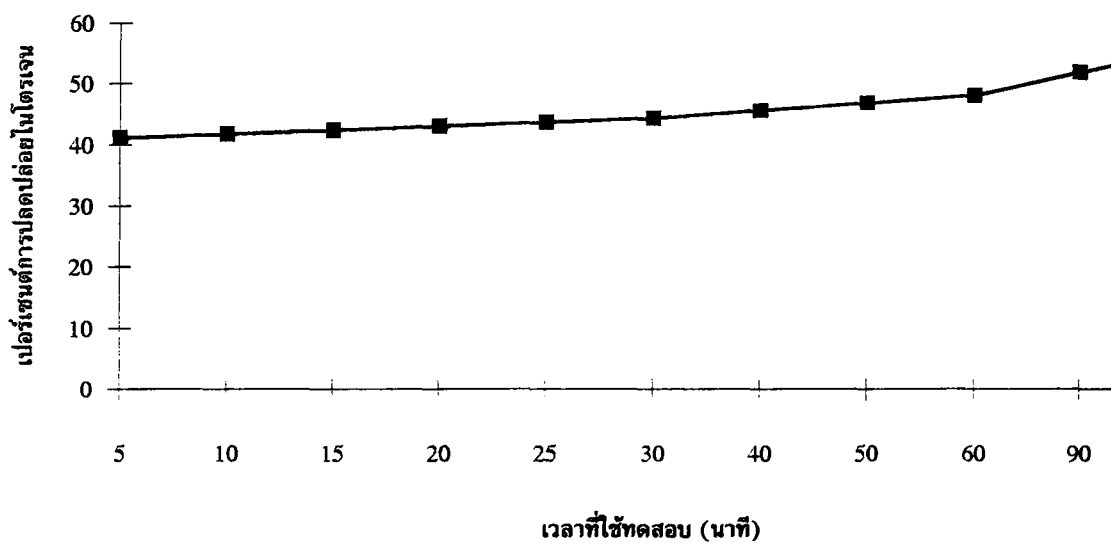
รูปที่ 4.1 แสดงกราฟมาตรฐานของไนโตรเจนที่ความต่างศักย์ต่าง ๆ



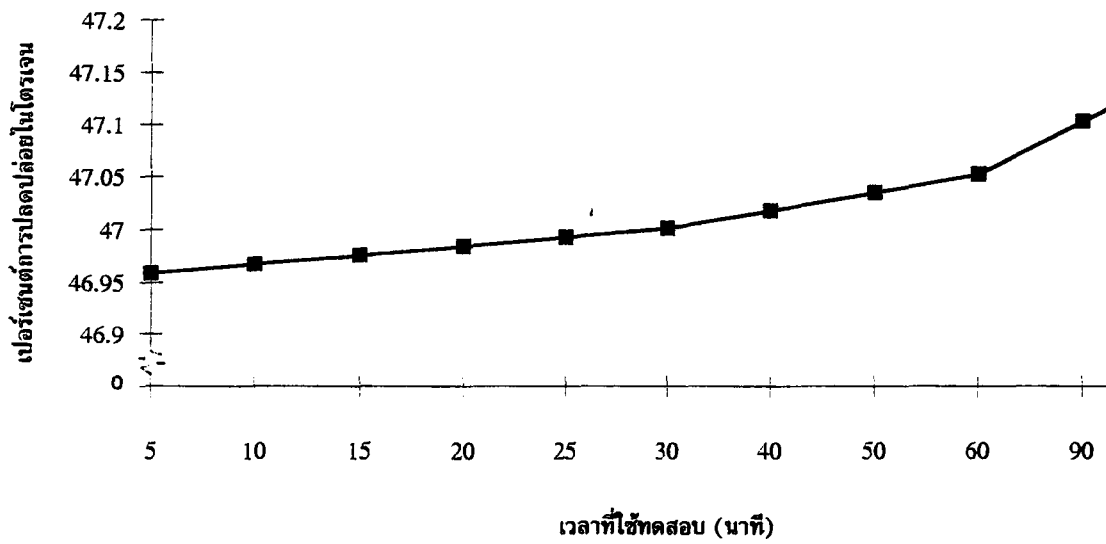
รูปที่ 4.2 แสดงเปอร์เซ็นต์ของธาตุไนโตรเจนที่ถูกปลดปล่อยจากไมโครแคปซูลโดยพอลิเมอร์ร่วมแบบต่อของยางธรรมชาติกับอะครีลาไมด์



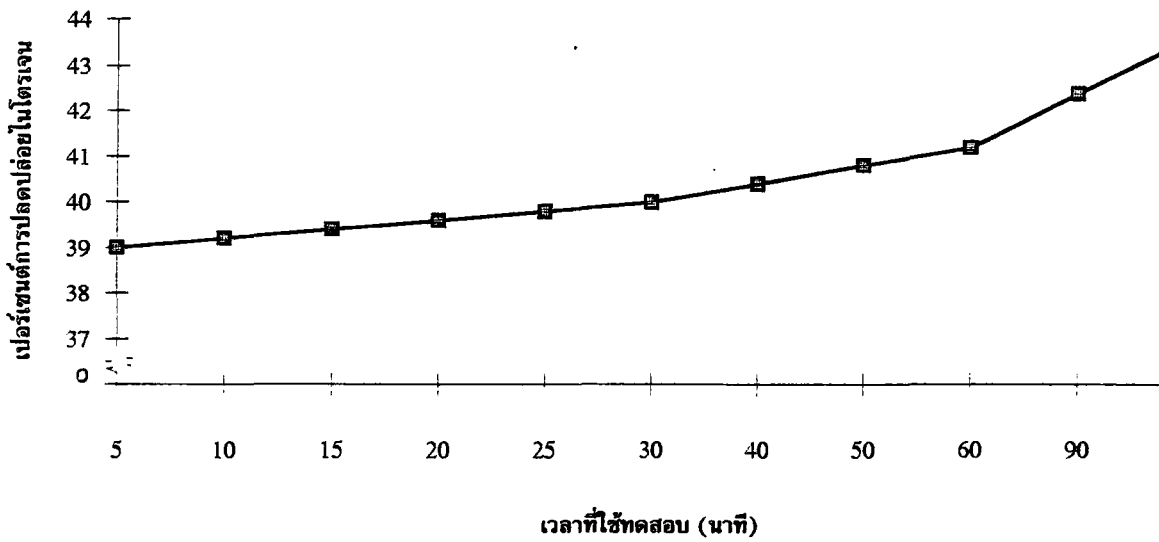
รูปที่ 4.3 แสดงเปอร์เซ็นต์ของธาตุไนโตรเจนที่ถูกปลดปล่อยจากไมโครแคปซูลโดยโรซินมาลีอิก แอนไฮไดรไรต์ (60%)



รูปที่ 4.4 แสดงเปอร์เซ็นต์ของธาตุไนโตรเจนที่ถูกปลดปล่อยจากไมโครแคปซูลโดยมาลีอิก แอนไฮดรายด์ (40%)



รูปที่ 4.5 แสดงเปอร์เซ็นต์ของธาตุไนโตรเจนที่ถูกปลดปล่อยจากไมโครแคปซูลโดยพอลิเมอร์ร่วมแบบต่อของแป้งมันสำปะหลังกับอะครีลาไมด์ (2.5%)



รูปที่ 4.6 แสดงเปอร์เซ็นต์ของธาตุไนโตรเจนที่ถูกปลดปล่อยจากไมโครแคปซูลโดยพอลิเมอร์ร่วมแบบต่อของแป้งมันสำปะหลังกับอะคริลาไมด์ (5%)

จากผลการทดลอง สามารถนำมาสร้างกราฟมาตรฐานของสารละลายไฮออนไนเทรตโดยพลอตกราฟระหว่างค่าล็อกกาลีทีมของความเข้มข้นกับค่ามิลลิโวลท์ที่วัดได้

จากกราฟมาตรฐานนี้สามารถหาค่าปริมาณการปลดปล่อยไนโตรเจนได้ดังตารางที่ 4.4 ,4.5 ,4.6 ,4.7 และ 4.8 และได้กราฟแสดงเปอร์เซ็นต์การปลดปล่อย ดังรูปที่ 4.2 ,4.3 ,4.4 ,4.5 และ 4.6 จากตารางและรูปดังกล่าวสามารถสรุปออกมาได้ดังแสดงในตารางที่ 4.9

ตารางที่ 4.9 แสดงค่าเปอร์เซ็นต์การปลดปล่อยไนโตรเจนของสารพอลิเมอร์ที่ใช้หุ้มในเวลาต่าง ๆ

ชนิดเวลาที่ใช้ในการปลดปล่อย	พอลิเมอร์ร่วมของแป้งมันสำปะหลังกับอะครีลาไมด์ (2.5%) ¹	พอลิเมอร์ร่วมของแป้งมันสำปะหลังกับอะครีลาไมด์ (5.0%)	พอลิเมอร์ยางธรรมชาติกับอะครีลาไมด์	โรซิน เอสเทอร์ (60%)	โรซิน เอสเทอร์ (40%)
5 นาที	44.62 ¹	31.10	36.80	40.90	36.78
10 นาที	46.40	35.78	37.52	50.33	38.25
15 นาที	48.25	39.00	39.79	51.32	45.79
20 นาที	48.44	38.52	41.06	55.94	38.85
25 นาที	46.76	43.65	40.42	54.53	45.97
30 นาที	46.22	43.64	38.87	55.94	46.70
40 นาที	47.87	43.31	38.26	56.38	49.33
50 นาที	45.50	51.22	39.02	60.02	49.14
60 นาที	45.14	38.84	39.48	61.21	49.13
90 นาที	46.76	39.50	40.11	58.17	50.30
120 นาที	47.31	40.67	38.87	59.32	53.35

หมายเหตุ 1.เปอร์เซ็นต์การปลดปล่อยไนโตรเจนของไมโครแคปซูลที่หุ้มด้วยพอลิเมอร์ชนิดต่าง ๆ ที่เวลาต่าง ๆ กัน

2.ค่าเปอร์เซ็นต์ของแข็งของพอลิเมอร์ที่ใช้หุ้ม

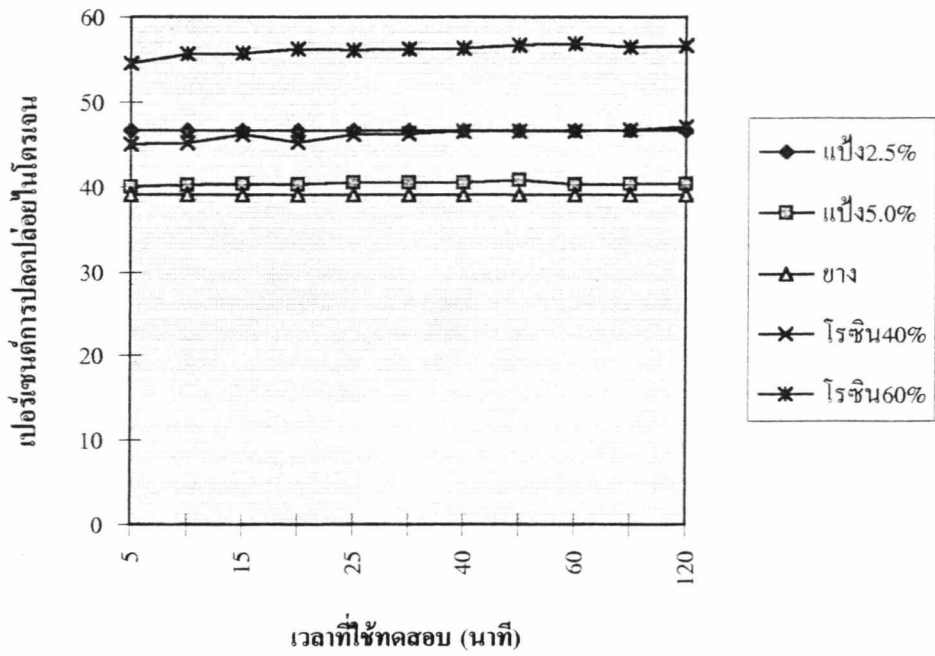
จากข้อมูลที่ได้จากตารางที่ 4.9 สามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

1.การปลดปล่อยไนโตรเจนของไมโครแคปซูลที่หุ้มด้วยพอลิเมอร์ร่วมแบบต่อของยางธรรมชาติกับอะครีลาไมด์ และพอลิเมอร์ร่วมแบบต่อของแป้งมันสำปะหลังกับอะครีลาไมด์ ที่มีปริมาณของแข็ง 2.5 % และ 5.0 % มีเปอร์เซ็นต์การปลดปล่อยไนโตรเจนค่อนข้างคงที่คือที่ 37.83% ,45.96% และ 35.88% ตามลำดับ

2.การปลดปล่อยไนโตรเจนของไมโครแคปซูลที่หุ้มด้วยโรซินเอสเทอร์ที่มีปริมาณของแข็ง 40 % และ 60% จะมีเปอร์เซ็นต์การปลดปล่อยเพิ่มขึ้นตามเวลา โดยมีอัตราการปลดปล่อยเป็น 0.13% และ 0.15% ต่อหน้าที่ตามลำดับ และมีการปลดปล่อยไนโตรเจนค่อนข้างคงที่หลังจากเวลาผ่านไป 30 นาที

3.จะเห็นว่าเปอร์เซ็นต์การปลดปล่อยไนโตรเจนในช่วง 5 นาทีแรกค่อนข้างสูง และในเวลาถัดมาก็มีปริมาณการปลดปล่อยไนโตรเจนค่อนข้างคงที่ เปอร์เซ็นต์การปลดปล่อยไนโตรเจนไม่ขึ้นกับเวลา ยกเว้นไมโครแคปซูลที่หุ้มด้วยโรซินเอสเทอร์

4.สารหุ้มพอลิเมอร์ชนิดเดียวกัน เมื่อมีปริมาณของแข็งสูงจะทำให้เปอร์เซ็นต์การปลดปล่อยไนโตรเจนน้อยกว่า นั่นคือยังมีเนื้อพอลิเมอร์หุ้มอยู่มากปุ๋ยจะถูกปลดปล่อยออกมาได้น้อย เพราะพอลิเมอร์จะป้องกันไม่ให้ปุ๋ยทำปฏิกิริยากับน้ำได้รวดเร็ว ดังนั้นถ้าต้องการให้ไมโครแคปซูลปลดปล่อยปุ๋ยออกมาน้อย ก็ต้องใช้สารหุ้มพอลิเมอร์ที่มีเปอร์เซ็นต์ของแข็งมาก



รูปที่ 4.7 แสดงเปอร์เซ็นต์ของธาตุไนโตรเจนที่ถูกปลดปล่อยจากไมโครแคปซูลโดยสารหุ้มพอลิเมอร์ชนิดต่าง ๆ

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

โครงการพิเศษนี้ ทำการศึกษาสารพอลิเมอร์ที่นำมาหุ้มปุ๋ย เพื่อให้อัตราการปลดปล่อยและสารอาหารในปุ๋ยลดลง เพื่อให้พืชสามารถนำไปใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพ และไม่ถูกพัดพาหรือชะล้างกลายเป็นน้ำทิ้งทางการเกษตร ซึ่งจะเป็นมลภาวะต่อไปในอนาคต และจากการศึกษาวิจัยได้ทดลองใช้พอลิเมอร์หุ้ม 3 ชนิด คือ

1. พอลิเมอร์ร่วมแบบต่อของแป้งมันสำปะหลังกับอะคริลาไมด์
2. พอลิเมอร์ร่วมแบบต่อของยางธรรมชาติกับอะคริลาไมด์
3. โรซินมาเลอิกแอนไฮดไรด์

สาเหตุที่เลือกใช้พอลิเมอร์ทั้ง 3 ชนิดนี้ เพราะว่าเป็นพอลิเมอร์ที่หาได้ง่าย ทำการสังเคราะห์ขึ้นเองได้ และสามารถถูกย่อยสลายได้ เนื่องจากเป็นพอลิเมอร์ที่ได้จากธรรมชาติ

จากการศึกษาพบว่า

1. เวลาไม่มีผลต่ออัตราการปลดปล่อยของไมโครแคปซูล แต่จะขึ้นกับชนิดของพอลิเมอร์ที่นำมาหุ้ม โดยพอลิเมอร์ร่วมแบบต่อของแป้งมันสำปะหลังกับอะคริลาไมด์ และพอลิเมอร์ร่วมแบบต่อของยางธรรมชาติกับอะคริลาไมด์จะมีเปอร์เซ็นต์การปลดปล่อยคงที่ อยู่ในช่วง 30-50 เปอร์เซ็นต์ ส่วนไมโครแคปซูลที่ใช้โรซินเอสเทอร์เป็นพอลิเมอร์หุ้ม จะมีอัตราการปลดปล่อยร้อยละ 60

เมื่อเปรียบเทียบไมโครแคปซูลทั้ง 3 ชนิด พบว่าไมโครแคปซูลที่มีองค์ประกอบของยางธรรมชาติและแป้งมันสำปะหลังเป็นผนังมีอัตราการปลดปล่อยค่อนข้างคงที่ ส่วนโรซินเอสเทอร์มีการปลดปล่อยเพิ่มขึ้นตามเวลาในช่วงแรก แล้วจึงมีการปลดปล่อยคงที่เมื่อเวลาผ่านไป

2. ขนาดอนุภาคของไมโครแคปซูลมีผลต่อการปลดปล่อย โดยถ้ามีขนาดอนุภาคเล็ก จะมีพื้นที่ผิวมาก น้ำสามารถซึมผ่านได้ดีทำให้เกิดปฏิกิริยาการสลายตัวให้สารอาหารออกมา มากและรวดเร็ว

3. ไมโครแคปซูลที่เคลือบโดยสารพอลิเมอร์ที่มีปริมาณของแข็งมาก จะทำให้สารอาหารถูกปลดปล่อยออกมาได้น้อยกว่าสารพอลิเมอร์ที่มีปริมาณของแข็งต่ำ

4. เครื่องมือที่ใช้ในการสังเคราะห์ไมโครแคปซูลคือเครื่องพ่นแห้ง (spray dry) จะมีข้อจำกัดที่ความหนืดของสารละลาย ถ้ามีความหนืดมากกว่า 100 เซนติพอยด์ จะใช้เครื่องมือนี้ไม่ได้ ถ้าสารละลายของพอลิเมอร์หุ้มมีปริมาณเปอร์เซ็นต์ของแข็งสูง ๆ จะใช้วิธีการปั่นผสมแล้วนำไปอบแห้ง เช่น ไมโครแคปซูลของโรซินเอสเทอร์ เป็นต้น

ข้อเสนอแนะ

1. การผลิตไมโครแคปซูล ควรจะเป็นเครื่องมือที่ฉีดพ่นพอลิเมอร์หุ้มสารที่เป็นแกนเป็นของแข็ง ส่วนการใช้เครื่องพ่นไมโครแคปซูลโดยสารที่เป็นแกนและพอลิเมอร์ที่หุ้มอยู่ในวัฏภาคเดียวกัน จะทำให้การผลิตไมโครแคปซูลไม่เหมาะสม เพราะหลังอบแห้งจึงทำให้เกิดการชะล้างออกได้ง่ายในช่วงแรกจะเห็นว่าเปอร์เซ็นต์การปลดปล่อยปุ๋ยค่อนข้างคงที่ เวลาจึงไม่มีผลต่อการปลดปล่อยภายในเวลา 5-10 นาที เนื่องจากสารละลายเข้าสู่ภาวะสมดุล

2. ควรทำการทดลองการปลดปล่อยปุ๋ยของไมโครแคปซูลโดยการให้น้ำไหลผ่าน จะให้ผลใกล้เคียงกับการนำไมโครแคปซูลไปใช้งานจริง

ภาคผนวก

แสดงตารางข้อมูลของการศึกษาการปลดปล่อยไนโตรเจนของไมโครแคปซูลของปุ๋ยที่หุ้มด้วยสารพอลิเมอร์ชนิดต่าง ๆ

ไมโครแคปซูลที่หุ้มด้วยพอลิเมอร์ร่วมแบบต่อของแป้งมันสำปะหลังกับอะครีลาไมด์ ที่มีเปอร์เซ็นต์ของแข็งเป็น 5.0

เวลาที่ทดสอบ (นาที)	ค่ามิลลิวัตต์	log [ความเข้มข้น]	ปริมาณที่ปลดปล่อย (mg/g)	เปอร์เซ็นต์ที่ปลดปล่อย
5	60.6	1.595	393.6	31.10
10	57.2	1.656	452.8	35.78
15	55.2	1.693	493.5	39.00
20	52.5	1.687	487.9	38.52
25	52.5	1.742	552.7	43.65
30	52.7	1.742	552.2	43.64
40	48.7	1.738	548.1	43.31
50	55.3	1.816	648.1	51.72
60	54.9	1.691	491.5	38.84
90	54.2	1.698	499.8	39.50
120	59.1	1.711	514.7	40.67

ไมโครแคปซูลที่หุ้มด้วยพอลิเมอร์ร่วมแบบต่อของแข็งมันสำปะหลังกับอะครีลาไมด์ที่เปอร์เซ็นต์ของแข็งเป็น 2.5

เวลาที่ทดสอบ (นาที)	ค่ามิลลิวัตต์	log [ความเข้มข้น]	ปริมาณที่ปลดปล่อย (mg/g)	เปอร์เซ็นต์ที่ปลดปล่อย
5	75.4	1.762	578.3	44.62
10	74.4	1.779	601.4	46.40
15	73.6	1.796	625.5	48.25
20	73.3	1.797	627.9	48.44
25	74.2	1.782	606.2	46.76
30	74.5	1.777	599.1	46.72
40	73.6	1.792	620.6	47.87
50	74.9	1.770	589.7	45.50
60	75.1	1.767	585.2	45.14
90	74.2	1.782	606.2	46.76
120	73.9	1.787	613.3	47.31

ไมโครแคปซูลที่หุ้มด้วยพอลิเมอร์ร่วมแบบต่อของยางธรรมชาติกับอะครีลาไมด์

เวลาที่ทดสอบ (นาที)	ค่ามิลลิโวลต์	log [ความเข้มข้น]	ปริมาณที่ปลด ปล่อย (mg/g)	เปอร์เซ็นต์ที่ปลด ปล่อย
5	77.7	1.723	528.5	39.80
10	77.2	1.731	539.0	37.52
15	75.7	1.757	571.6	39.79
20	74.9	1.770	589.8	41.06
25	75.3	1.763	580.6	40.42
30	76.3	1.747	558.3	38.87
40	76.7	1.740	549.6	38.26
50	76.2	1.748	560.5	39.02
60	75.9	1.753	567.5	39.48
90	54.2	1.760	576.1	40.11
120	776.3	1.746	558.3	38.87

ไมโครแคปซูลที่หุ้มด้วยโรจินมาลีอิกแอนไฮดรยด์ ที่เปอร์เซ็นต์ของแข็งเป็น 60

เวลาที่ทดสอบ (นาที)	ค่ามิลลิวัตต์	log [ความเข้มข้น]	ปริมาณที่ปลดปล่อย (mg/g)	เปอร์เซ็นต์ที่ปลดปล่อย
5	83.3	1.627	424.5	40.90
10	78.6	1.718	522.4	50.33
15	77.5	1.726	532.7	51.32
20	75.3	1.763	580.6	55.94
25	75.0	1.769	587.5	54.53
30	75.0	1.763	580.6	55.94
40	75.1	1.767	585.2	56.38
50	73.5	1.794	623.0	60.02
60	73.0	1.803	635.3	61.21
90	74.3	1.781	603.8	58.17
120	73.8	1.789	615.7	59.32

ไมโครแคปซูลที่หุ้มด้วยโรซินมาลีอิกแอนไฮดรยด์ ที่เปอร์เซ็นต์ของแข็งเป็น 40

เวลาที่ทดสอบ (นาที)	ค่ามิลลิวัตต์	log [ความเข้มข้น]	ปริมาณที่ปลดปล่อย (mg/g)	เปอร์เซ็นต์ที่ปลดปล่อย
5	82.6	1.639	436.3	36.78
10	81.3	1.656	453.7	38.25
15	77.0	1.735	543.4	45.79
20	81.2	1.663	460.9	38.85
25	76.9	1.736	545.4	45.97
30	76.5	1.743	553.9	46.70
40	75.1	1.767	585.2	49.33
50	75.2	1.765	582.9	49.14
60	75.2	1.765	782.9	49.13
90	74.6	1.775	596.8	50.30
120	73.1	1.801	632.84	53.35

บรรณานุกรม

1. Daniels, R. Microencapsulation; Noyes Data corp: New Jersey, 1976.
2. Herman. F.M.; Norbert, M.B.; Chalries. G.O. Encyclopedia of polymer Science and Engineering, 9; John-Wiley & Son : New York, 1987
3. Vandegaer , J.E. Microencapsulation Processes and Applications; Plinum Press: New York , 1974
4. Vandegaer, J.E. Microencapsulation Processes and Application; Plenum Press : New York , 1974
5. World Intellectual Property Organization. "Method for producing ecologic capsule of natural origin for prodducts with controlled release of the active ingredient" , 1990
6. Jay B. Class Resin, Natural , Hercules Research Center , vol.14 pp.438-444
7. Pichet Tungpunyaruch "Process Industial in graftcopooymer of natural rubber with vimyl monomer." M.SD. Thesis ,Chemistry Science of King Mongkut's Institute of Technology Ladkrbang, 1994
8. รศ.ดร.ยงยุทธ ไสสธสภาน ปุ๋ยที่มีการควบคุมความเป็นประโยชน์ , หลักการผลิตและใช้ปุ๋ย, พิมพ์ครั้งที่ 1 , หน้า 15-120, บริษัท โรงพิมพ์ไทยวัฒนาพานิช จำกัด กรุงเทพฯ , พ.ศ.2528
9. ชัยยะพร เกกตุแก้ว, วาริณี ส่งาโยธิน, อังคณา วรไพมูลย์ "การเตรียมไมโครแคปซูลที่บรรจุสารฆ่าเชื้อราที่ใช้ในสีทา" , โครงการพิเศษหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต, ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, พ.ศ. 2533
10. วราลัย หลิมไชยกุล, อนินทยา สิงหสุต, เสาวรัจ ไถ่สถิตย์มณฑล "การสังเคราะห์สารพอลิเมอร์ร่วมของแบริ่งมันสำปะหลังที่มีคุณสมบัติดูดซึมน้ำเพื่อใช้ในการปรับปรุงคุณภาพดิน" , โครงการพิเศษหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต, ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, พ.ศ. 2533