

บทที่ 2

ทฤษฎี

ในบทนี้กล่าวถึงความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับปุ๋ยยูเรีย ขบวนการธาตุ วิธีการเคลื่อน
ปุ๋ย และทฤษฎีพื้นฐานเกี่ยวกับการถ่ายโอนมวลสาร

2.1 ปุ๋ยยูเรีย (urea fertilizer)

การเพิ่มผลผลิตจากการเพาะปลูก เกษตรกรจำเป็นต้องใส่ปุ๋ยลงในดินเพื่อ
เพิ่มแร่ธาตุในดินให้พอเหมาะแก่พืชที่ต้องการ ปุ๋ยที่ใช้ส่วนใหญ่มักเป็นปุ๋ยที่ให้ธาตุ
อาหารหลักแก่พืชได้แก่ ไนโตรเจน (nitrogen, N) ฟอสฟอรัส (phosphorus, P) และ
โปแตสเซียม (potassium, K) ซึ่งในบรรดาปุ๋ยธาตุหลักที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบันนี้
ปุ๋ยไนโตรเจนเป็นปุ๋ยที่ใช้มากที่สุด [4]

ไนโตรเจน (N) เป็นธาตุอาหารหลักที่พืชต้องการเป็นปริมาณมาก เพื่อใช้ในการ
เจริญเติบโต [3] และยังเป็นตัวกำหนดปริมาณผลผลิตของพืช ดังนั้นการเพิ่มไนโตรเจน
ให้แก่พืชต้องให้ในปริมาณที่เหมาะสม ถ้าพืชได้รับไนโตรเจนมากเกินไปจะเกิดความ
เสียหายได้ แต่ถ้าพืชขาดไนโตรเจนก็จะเกิดความผิดปกติและทำให้ได้ผลผลิตต่ำ

การพัฒนาเพื่อนำยูเรียมาใช้เป็นปุ๋ยในระยะแรกเริ่มนั้นเป็นไปค่อนข้างล่าช้า
เนื่องจากกระบวนการผลิตในสมัยก่อนค่อนข้างยุ่งยาก ล่าช้า และราคาปุ๋ยแพง
นอกจากนี้เกษตรกรยังไม่ค่อยมั่นใจในผลของการใช้ปุ๋ยนี้กันนัก

เมื่อได้พัฒนาเทคโนโลยีการผลิตให้มีประสิทธิภาพขึ้นและมีต้นทุนต่ำลง ตลอดจนมีการศึกษาผลของปุ๋ยต่อพืชชนิดต่าง ๆ ในทุกภูมิภาคของโลกแล้ว พบว่ายูเรียเป็นปุ๋ยไนโตรเจนที่ดี ปุ๋ยชนิดนี้จึงได้รับความนิยมมากยิ่งขึ้น ประมาณว่าเกษตรกรชาวเอเชียใช้ยูเรียประมาณร้อยละ 85 จึงนับได้ว่ายูเรียเป็นปุ๋ยไนโตรเจนประเภทปุ๋ยแข็งที่ได้รับความนิยมมากที่สุด มากกว่าปุ๋ยแอมโมเนียมไนเตรต (ammonium nitrate) และแอมโมเนียมซัลเฟต (ammonium sulfate) อย่างมากมาย [4]

2.1.1 คุณสมบัติของยูเรีย

ยูเรียเป็นสารประกอบไดเอไมด์ของคาร์บอนไดออกไซด์ (diamide of carbondioxide) หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่าคาร์บาริไมด์ (carbamide) มีน้ำหนักโมเลกุลเท่ากับ 60.06 มีไนโตรเจนซึ่งเป็นองค์ประกอบหลัก คือมีไนโตรเจนสูงถึงร้อยละ 46 โดยน้ำหนัก

ยูเรียมีอยู่ทั้งในสถานะของแข็งและของเหลว [1] ถ้าอยู่ในสถานะของเหลวจะอยู่ในรูปของเหลวผสมยูเรียแอมโมเนีย (liquid urea - ammonia) ในกรณีที่อยู่ในสถานะของแข็งจะเป็นผลึกสีขาว มีความหนาแน่น (bulk density) ประมาณ 0.7 กิโลกรัมต่อลิตร ความถ่วงจำเพาะ 1.335 จุดหลอมเหลว 132.7 °C ละลายน้ำได้ง่าย เมื่อละลายน้ำจะไม่แตกตัวเป็นไอออนเหมือนกับปุ๋ยไนโตรเจนอื่น ๆ และมีความสามารถในการละลายน้ำแสดงในตารางที่ 2.1

ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ (diffusion coefficient) ในน้ำของยูเรียที่อุณหภูมิ 25 °C เท่ากับ $(1.380 - 0.0782c_1 + 0.00464c_1^2) \times 10^{-5}$ เซนติเมตร²วินาที⁻¹ เมื่อ c_1 คือค่าความเข้มข้นของยูเรียในน้ำในหน่วยโมลต่อลิตร [7]

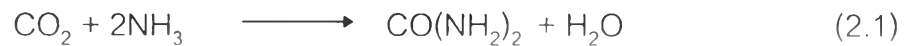
ตารางที่ 2.1 ความสามารถในการละลายน้ำของยูเรียที่อุณหภูมิ
ต่าง ๆ [4]

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ปริมาณที่สามารถละลายได้ในน้ำ 100 กรัม (กรัม)
0	66.7
20	108.0
25	119.0
40	167.0
60	251.0
80	400.0
100	733.3

2.1.2 การผลิตและการสูญสลายปุ๋ยยูเรีย

ปุ๋ยยูเรียสามารถผลิตได้จากปฏิกิริยาระหว่างคาร์บอนไดออกไซด์กับแอมโมเนีย

[8] ดังปฏิกิริยาในสมการที่ (2.1)



เนื่องจากพืชส่วนใหญ่ได้รับธาตุไนโตรเจนในรูปของไนเตรต พืชจำเป็นต้องอาศัย จุลินทรีย์ในดินเพื่อเปลี่ยนยูเรียให้เป็นไนเตรต เริ่มจากยูเรียถูกไฮโดรไลซ์ (hydrolyze) โดยมีเอนไซม์ยูรีเอส (urease enzyme) จากจุลินทรีย์ในดินเป็นตัวเร่งได้ เป็นสารตัวกลาง แล้วจึงสลายตัวได้เป็นแอมโมเนีย ดังสมการที่ (2.2)



แอมโมเนียที่ได้จากสมการ (2.2) จะละลายน้ำได้เป็นแอมโมเนียม จากนั้น แบคทีเรียชนิด *nitrosomonas* จะเปลี่ยนแอมโมเนียมเป็นไนไตรต์ ตามสมการที่ (2.3)



ต่อจากนั้นแบคทีเรียชนิด *nitrobacter* จะเปลี่ยนไนไตรต์เป็นไนเตรต ตามสมการที่ (2.4)



ปุ๋ยไนโตรเจนในดินนอกจากจะถูกพืชดูดซึมไปใช้แล้ว ยังเกิดการสูญเสียได้หลายทาง [3] คือ

1. การสูญเสียเนื่องจากการชะล้าง (leaching) โดยเฉพาะในรูปของไนเตรตไอออน (NO_3^-) จะมีมากกว่าในรูปของแอมโมเนียมไอออน (NH_4^+) เนื่องจากทั้งดินและไนเตรตมีประจุเป็นลบ ดังนั้นระหว่างฤดูฝนดินจะไม่สามารถเก็บไนเตรตไว้ได้ โดยเฉพาะไนเตรตส่วนที่อยู่ไกลจากรากพืช เมื่อฝนตกไนเตรตจะถูกชะล้างไปทำให้เกิดปัญหาสิ่งแวดล้อมขึ้น [2]

2. การกลายเป็นก๊าซกลับไปในอากาศ ไนโตรเจนจะระเหยไปสู่อากาศได้ในรูปของแก๊สที่มีไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบเช่น N_2 N_2O NO และ NH_3 ทั้งนี้เพราะเกิดปฏิกิริยาทางชีวเคมีขึ้น 3 กระบวนการคือ

- 2.1 ดีไนตริฟิเคชัน (denitrification) เกิดขึ้นโดยการรีดักชัน (reduction) ของไนเตรตไอออน ในสภาพที่มีน้ำขัง
- 2.2 ปฏิกิริยาเคมีเกี่ยวกับก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์ (NO_2) ในสภาพที่มีอากาศ
- 2.3 การระเหิดของก๊าซแอมโมเนียจากผิวดินที่มีปฏิกิริยาเป็นด่าง

2.1.3 ปุ๋ยที่มีการควบคุมการใช้ประโยชน์ (controlled release fertilizers)

แม้ว่าจะมีการใช้ปุ๋ยไนโตรเจนกันอย่างแพร่หลาย แต่ในความเป็นจริงแล้ว เทคนิคการใส่ปุ๋ยหรือการใช้ปุ๋ยอย่างมีประสิทธิภาพนั้นไม่ค่อยได้กระทำกันมากนัก จากรายงานขององค์การอาหารและยาของสหประชาชาติ (FAO) ประมาณว่ามีการสูญเสียปุ๋ยไนโตรเจนถึงร้อยละ 40 - 70 จากปริมาณที่ใช้ทั้งหมด [2] ดังจะเห็นกันทั่วไปว่าเกษตรกรส่วนใหญ่ใช้ปุ๋ยโดยวิธีการหว่าน โดยไม่คำนึงถึงธาตุอาหารที่สูญเสียไป และไม่ได้คำนึงถึงการใช้ปุ๋ยอย่างมีประสิทธิภาพมากกว่านี้ ดังนั้นจึงได้มีการศึกษาหาวิธีที่จะลดการสูญเสียให้น้อยลงพร้อมกับเพิ่มประสิทธิภาพของการใช้ปุ๋ยนี้ให้สูงขึ้น และช่วยประหยัดพลังงานในภาคเกษตรกรรม วิธีหนึ่งคือการแบ่งปุ๋ยไนโตรเจนเพื่อใส่ให้แก่พืชทีละน้อย แต่ใส่หลาย ๆ ครั้งในช่วงเวลาที่เหมาะสม แต่ผลยังไม่เป็นที่น่าพอใจนัก ต่อมานักวิชาการด้านพัฒนาการผลิตปุ๋ยได้แสวงหาปุ๋ยไนโตรเจนที่สามารถใส่ก่อนปลูกเพียงครั้งเดียว แล้วปุ๋ยจำนวนนั้นจะให้ธาตุอาหารแก่พืชอย่างเพียงพอในช่วงเวลาที่นานขึ้น ซึ่งเรียกว่า “ปุ๋ยที่มีการควบคุมการใช้ประโยชน์” ปรากฏว่าปุ๋ยหลายชนิดที่สังเคราะห์ได้ใหม่มีคุณสมบัติดังกล่าว และคาดว่าจะได้รับความนิยมจากเกษตรกรมากขึ้นตามลำดับ [4]

แนวความคิดในการพัฒนาปุ๋ยที่มีการควบคุมการใช้ประโยชน์นั้นแบ่งได้เป็น 2 แบบ [4] คือ

1. แบบปกป้องรักษาความเป็นประโยชน์ (protected availability) ของธาตุอาหาร ได้แก่การรักษาธาตุอาหารที่ละลายออกมาจากปุ๋ยให้คงอยู่ในรูปที่เป็นประโยชน์ต่อพืชไปนาน ๆ หรือป้องกันการเปลี่ยนแปลงไปสู่รูปที่เสี่ยงต่อการสูญหาย เช่นการใช้สารยับยั้งกระบวนการไนตริฟิเคชัน เพื่อป้องกันมิให้แอมโมเนียมไอออนแปรสภาพไปเป็นไนเตรตไอออน

2. แบบควบคุมการปลดปล่อย (controlled release) ธาตุอาหาร ปุ๋ยที่ปลดปล่อยธาตุอาหารออกมาอย่างช้า ๆ นั้นมีอยู่หลายประเภท ซึ่งแต่ละประเภทมีกลไกการควบคุมที่แตกต่างกันคือ

1. ทำให้ปุ๋ยละลายน้ำช้าลงด้วยการเคลือบปุ๋ยที่ละลายง่ายด้วยสารที่ป้องกันการซึมของน้ำ
2. ทำให้ปุ๋ยละลายน้ำช้าลงด้วยการทำให้ปุ๋ยเป็นสารประกอบที่มีการละลายน้ำอย่างช้า ๆ
3. ทำให้ปุ๋ยเป็นสารประกอบที่จุลินทรีย์ในดินต้องเข้าย่อยเสียก่อนจึงจะละลาย การละลายน้ำของปุ๋ยดังกล่าวจึงขึ้นอยู่กับกิจกรรมของจุลินทรีย์ในดิน

2.1.3.1 ข้อดีของปุ๋ยที่มีการควบคุมการปลดปล่อยธาตุอาหาร

1. ปุ๋ยประเภทนี้จะค่อย ๆ ปลดปล่อยธาตุอาหารในรูปที่เป็นประโยชน์ต่อพืชออกมา พืชจึงมีโอกาสใช้ในช่วงเวลายาวนานขึ้น ประสิทธิภาพของปุ๋ยประเภทนี้จึงสูงกว่าปุ๋ยที่ละลายง่ายทั่ว ๆ ไป
2. การสูญหายโดยการชะล้างของน้ำมีน้อยลง
3. ไม่ทำให้สารละลายในดินมีความเข้มข้นสูงเกินไปจนเป็นอันตรายต่อพืช แม้ว่าจะใส่ปุ๋ยทั้งหมดตามอัตราที่กำหนดไว้เพียงครั้งเดียว
4. ช่วยให้สภาพทางกายภาพของปุ๋ยดีขึ้นไม่ขึ้นง่าย
5. ใช้ได้กับปุ๋ยสูตรใด ๆ หรือจะผสมธาตุรองหรือธาตุที่พืชต้องการในปริมาณน้อยรวมไปด้วยก็ได้

2.1.3.2 การเคลือบปุ๋ยที่ละลายง่ายด้วยสารที่ป้องกันการซึมของน้ำ

การเคลือบผิวของเม็ดปุ๋ยที่ละลายได้มีหลักการดังนี้

1. การเคลือบผิวของเม็ดปุ๋ยเพียงบาง ๆ เพื่อให้ปุ๋ยละลายออกมาในอัตราที่ไม่ต่ำเกินไปและ
2. การเคลือบให้ทั่วถึงทั้งเม็ดไม่ให้มีช่องว่างที่ปุ๋ยจะทะลักออกมาทันที เมื่อปุ๋ยอยู่ในดิน

ปุ๋ยที่มีสารเคลือบตามคุณลักษณะต่าง ๆ ดังกล่าวได้แก่ ปุ๋ยยูเรียที่เคลือบด้วยกำมะถัน สารพอลิเมอร์บางชนิด และยางธรรมชาติ

2.1.3.2.1 ปุ๋ยยูเรียที่เคลือบด้วยกำมะถัน (sulfur-coated urea : SCU)

การเคลือบปุ๋ยชนิดเม็ดด้วยกำมะถัน เป็นวิธีที่เหมาะสมเนื่องจากสามารถหุ้มเคลือบปุ๋ยได้ทุกแบบไม่ว่าจะมีธาตุอาหารใดประกอบอยู่บ้าง วิธีการเคลือบไม่สลับซับซ้อนและกำมะถันมีราคาไม่แพงนัก เมื่อเม็ดปุ๋ยละลายแล้วกำมะถันก็แปรสภาพต่อไปเป็นซัลเฟตไอออน ซึ่งเป็นประโยชน์แก่พืชด้วย

ยูเรียที่เคลือบด้วยกำมะถันเป็นปุ๋ยที่ได้รับความนิยมมากกว่าปุ๋ยชนิดอื่น ๆ ใดๆก็ตามการนำกำมะถันเพียงอย่างเดียวมาหุ้มแล้วเคลือบยูเรีย ทำให้ผิวที่เคลือบมีรูพรุนมากเกินไป เป็นเหตุให้ควบคุมการละลายได้ไม่ดี การแก้ไขจุดบกพร่องนี้ทำโดยการผสมสารอีก 2 อย่าง คือ

- ก. ใช้ซีเมนต์เป็นวัสดุกันรั่ว (wax sealant) เพื่อลดการซึมน้ำ
- ข. ใช้สารควบคุมกิจกรรมของจุลินทรีย์ (microbiocide) เช่น เพนตาคลอโรฟีนอล (pentachlorophenol) หรือน้ำมันดินจากถ่านหิน (coal tar) ซึ่งจะช่วยป้องกันมิให้จุลินทรีย์ในดินออกซิไดซ์กำมะถันรวดเร็วเกินไป

2.1.3.2.2 ปุ๋ยที่เคลือบด้วยสารพอลิเมอร์ (polymer coating fertilizers)

ปุ๋ยที่เคลือบด้วยสารพอลิเมอร์ หมายถึงปุ๋ยที่ได้จากการเคลือบปุ๋ยชนิดใดชนิดหนึ่งด้วยสารพอลิเมอร์ อัตราการละลายของปุ๋ยขึ้นอยู่กับความหนาของสารเคลือบชนิดของพอลิเมอร์ วิธีการเคลือบ และชนิดของปุ๋ยที่อยู่ภายใน

สำหรับวิธีการเคลือบแบ่งได้เป็น 3 แบบ ดังแสดงในรูปที่ 2.1 คือ

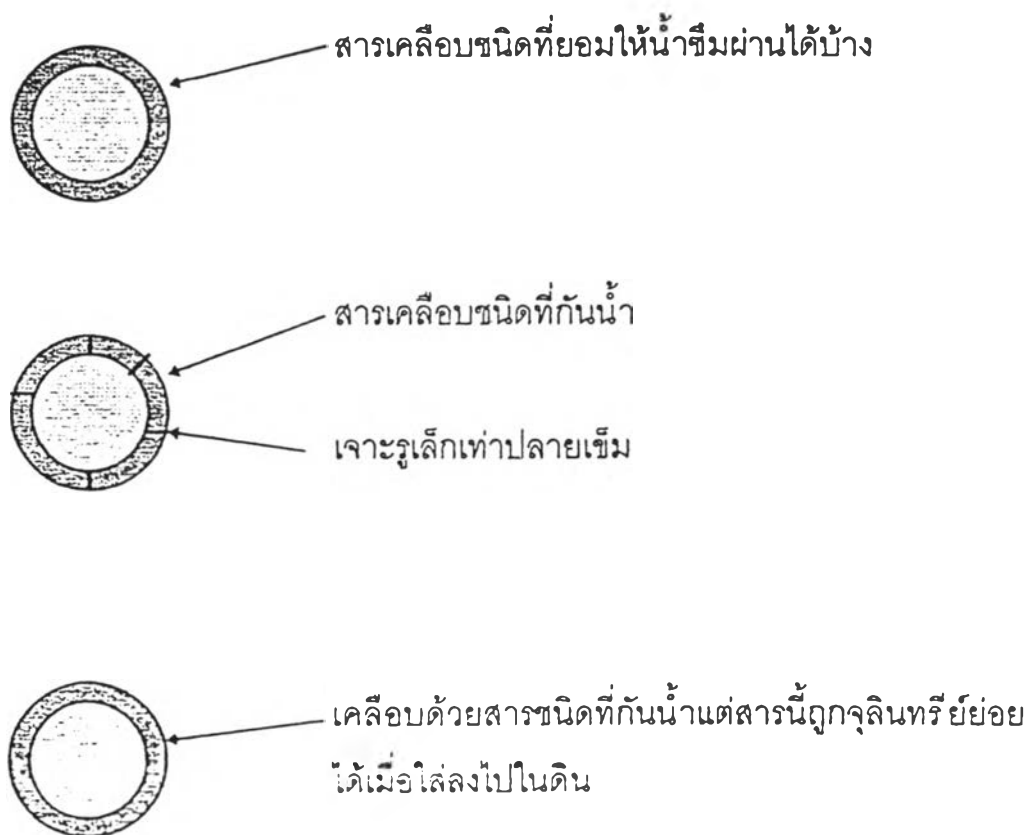
1. การเคลือบด้วยสารที่ยอมให้น้ำซึมผ่านได้บ้าง (semipermeable membrane) น้ำจะซึมเข้าสู่เม็ดปุ๋ยอย่างช้า ๆ เมื่อน้ำเริ่มละลายเนื้อปุ๋ยซึ่งอยู่ภายในจะทำให้เกิดความดันออสโมติก (osmotic pressure) จนในที่สุดสารเคลือบจะปริและปุ๋ยซึมออกมาสู่ดิน

2. การเคลือบด้วยสารกั้นน้ำ แต่เจาะรูเล็ก ๆ (pin holes) เอาไว้ เพื่อให้ น้ำซึมเข้า และน้ำปุ๋ยซึมออกอย่างจำกัด

3. การเคลือบด้วยสารกั้นน้ำ แต่เมื่ออยู่ในดินสารเคลือบจะถูกจุลินทรีย์ย่อยสลายทำให้เกิดช่องหรือรอยแยก ซึ่งเป็นช่องทางให้น้ำซึมเข้า และน้ำปุ๋ยซึมออกมาได้

ปุ๋ยที่เคลือบด้วยสารพอลิเมอร์ดังกล่าวเป็นปุ๋ยที่ละลายน้ำได้ง่าย แต่จะคงสภาพเป็นของแข็งจนกว่าจะมีน้ำผ่านสารเคลือบเข้ามาละลาย ดังนั้นการปลดปล่อยธาตุอาหารในรูปที่เป็นประโยชน์ออกมาสู่ดินจึงเป็นไปอย่างจำกัด ถ้าหากสามารถนำปุ๋ยที่เคลือบและควบคุมให้มีอัตราการปลดปล่อยธาตุอาหารแตกต่างกันมาผสมกันอย่างพอเหมาะ ก็จะได้ปุ๋ยที่ให้ธาตุอาหารสอดคล้องกับความต้องการของพืชในช่วงเวลาต่าง ๆ ได้

อย่างไรก็ตามการเคลือบปุ๋ยด้วยพอลิเมอร์มีข้อเสียคือ เมื่อผลิตมาก ๆ การเคลือบมักไม่ค่อยสม่ำเสมอ ต้นทุนการผลิตค่อนข้างสูง และสารที่เคลือบอยู่ที่ผิวของปุ๋ยนั้นค่อนข้างแตกได้ง่ายในขณะที่ทำการขนส่งหรือเมื่อถูกขูด ถูกรแรงกระแทก ซึ่งเมื่อสารที่เคลือบนั้นแตกแล้ว ปุ๋ยจะไม่สามารถควบคุมการปลดปล่อยธาตุอาหารได้อีกต่อไป [4]

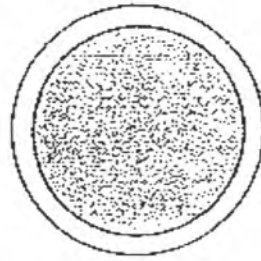


รูปที่ 2.1 การควบคุมให้น้ำที่ละลายง่ายละลายได้ช้าลงโดยใช้สารเคลือบ
 แบบต่าง ๆ [4]

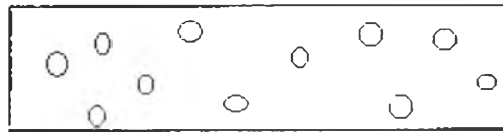
2.1.3.2.3 ปุ๋ยยูเรียที่เคลือบด้วยยางธรรมชาติ

มีการศึกษาการเคลือบปุ๋ยยูเรียด้วยยางธรรมชาติ เพื่อใช้ในการควบคุมการปลดปล่อยปุ๋ยยูเรีย [2,9,10,11] การควบคุมการให้ปุ๋ยยูเรียแก่พืช เริ่มจากเมื่อใส่ปุ๋ยยูเรียที่เคลือบด้วยยางธรรมชาติลงในดิน น้ำในดินจะแพร่เข้าไปภายในเม็ดปุ๋ยผ่านทางรูพรุนของยาง และยูเรียจะละลายในน้ำทันที จากนั้นสารละลายยูเรียจะค่อย ๆ แพร่ออกมาจากยางธรรมชาติ วิธีนี้ทำให้พืชสามารถดูดซึ่มปุ๋ยได้ทันทีซึ่งจะเป็นการใช้ปุ๋ยได้นานขึ้น

การเคลือบปุ๋ยด้วยยางธรรมชาติสามารถทำได้ 2 รูปแบบ รูปแบบแรก คือ แบบถังกักเก็บ (reservoir) ซึ่งปุ๋ยยูเรียจะถูกกักเก็บอยู่โดยเปลือกยางธรรมชาติที่หุ้มอยู่โดยรอบ ซึ่งวิธีการนี้มีข้อดีคือสามารถเลือกคุณสมบัติของชั้นเคลือบเพื่อให้ได้อัตราการปลดปล่อยตามต้องการ และสามารถบรรจุปุ๋ยได้มากกว่ารูปแบบเมทริกซ์ที่มีขนาดเท่ากัน ซึ่งจะเป็นการลดค่าใช้จ่ายในส่วนของยางที่นำมาหุ้ม แต่มีข้อเสียคือ เมื่อแคปซูลเกิดการแตกหัก ยูเรียจะหลุดออกมาซึ่งทำให้ไม่สามารถใช้งานควบคุมการปลดปล่อยได้อีกต่อไป ส่วนรูปแบบที่สองจะอยู่ในลักษณะเมทริกซ์ (matrix) ซึ่งปุ๋ยจะกระจายอยู่ในเนื้อยางธรรมชาติอย่างสม่ำเสมอ วิธีการนี้มีข้อดีคือ เมื่อแคปซูลแตกหัก แคปซูลยังคงสามารถใช้ควบคุมการปลดปล่อยปุ๋ยได้ต่อ ทั้ง 2 รูปแบบมีลักษณะดังรูปที่ 2. 2 ซึ่งทั้ง 2 รูปแบบมีวิธีการผลิตที่แตกต่างกันออกไป วิธีการผลิตแสดงในหัวข้อ 2.3.3



Reservoir



Matrix

รูปที่ 2. 2 รูปแบบของการเคลือบปุ๋ยเรียวด้วยยางธรรมชาติ [10]

2.2 ยางธรรมชาติ (natural rubber)

ยาง (rubber) เป็นวัตถุดิบสำคัญในอุตสาหกรรม ผลิตภัณฑ์ยางชนิดต่าง ๆ ได้จากแหล่งธรรมชาติหรือเรียกว่ายางธรรมชาติ (natural rubber) และจากการสังเคราะห์หรือเรียกว่ายางสังเคราะห์ (synthetic rubber) แหล่งผลิตยางสังเคราะห์ส่วนใหญ่เป็นประเทศแถบยุโรปและอเมริกา ส่วนยางธรรมชาติผลิตในประเทศแถบ เอเชียเป็นส่วนใหญ่

ประเทศไทยเริ่มอุตสาหกรรมการผลิตยางธรรมชาติประมาณ พ.ศ. 2442 และได้เป็นผู้ผลิตยางธรรมชาติรายใหญ่ที่สุดของโลกตั้งแต่ปี พ.ศ. 2534 เป็นต้นมา โดยมีการผลิตยางธรรมชาติในรูปแบบ (ชนิด) ต่าง ๆ ได้แก่ ยางแห้งต่าง ๆ คือยางแผ่นรมควัน (RSS, ribbed smoked sheet) ยางแท่งที่ที่อาร์ (TTR, thai tested rubber) ยางเครพ (crape) ยางแผ่นอบแห้ง (ADS, air dried sheet) และยางskim (skim rubber) และในรูปของยางเหลวหรือน้ำยาง คือน้ำยางข้น (concentrated latex) และน้ำยางคงรูป หรือน้ำยางพรีวัลคาไนซ์ (prevulcanised latex) [6]

2 2 1 คุณสมบัติทั่วไปของยางธรรมชาติ

ในปัจจุบันมีพืชอยู่กว่า 200 ชนิด ให้พอลิเมอร์ที่คล้ายกับยางธรรมชาติ และก็มีอยู่ 500 ชนิดที่ให้ยาง แต่จะมีเพียงชนิดเดียวที่สามารถให้ยางที่สามารถนำมาใช้งานได้ คือน้ำยางของ *Hevea brasillensis* ซึ่งเป็นพืชท้องถิ่นของประเทศบราซิล แต่มาแพร่หลายขยายพันธุ์มากมายในประเทศเขตร้อนของทวีปแอฟริกาและเอเชีย [12]

น้ำยางมีส่วนประกอบต่าง ๆ ดังแสดงในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ส่วนประกอบของน้ำยาง Hevea latex [12]

ส่วนประกอบของน้ำยาง Hevea latex	ปริมาณร้อยละ โดยน้ำหนัก
ปริมาณของแข็งทั้งหมด (total solids content)	36
องค์ประกอบที่เป็นสารโปรตีน (proteinous substances)	1-1.5
องค์ประกอบที่เป็นสารเรซิน (resinous substances)	< 1
น้ำตาล	1
น้ำ	60

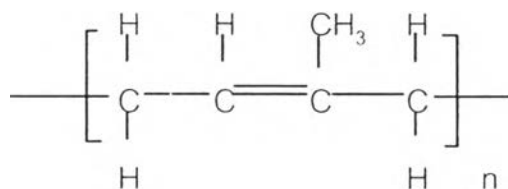
องค์ประกอบส่วนใหญ่ของปริมาณของแข็งทั้งหมดคืออนุภาคของยาง นอกจากนี้จะเป็นส่วนองค์ประกอบอื่นที่ไม่ใช่ยางเช่น สารโปรตีน สารเรซิน ซึ่งนอกจากจะมีหน้าที่ทางชีววิทยาแล้ว ยังมีผลต่อการที่ทำให้ยางแข็ง และเทคโนโลยีในการแปรรูปน้ำยาง

2.2.2 โครงสร้างทางเคมีของยางธรรมชาติ

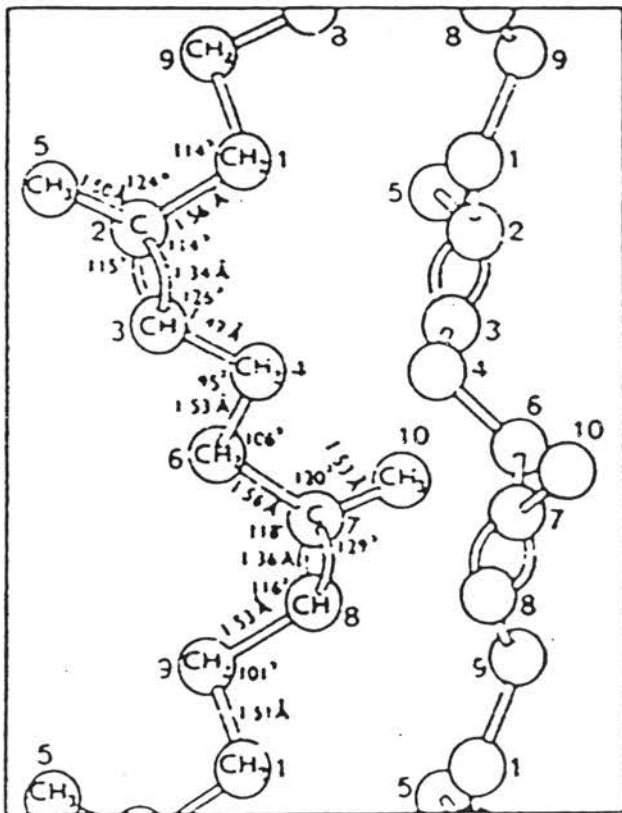
สูตรโมเลกุลของยางธรรมชาติถูกพบครั้งแรกโดยฟาราเดย์ (Faraday) ซึ่งได้เขียนเป็นรายงานในปี ค.ศ.1826 ใ้ว่า โมเลกุลของยางธรรมชาตินี้มีเพียงอะตอมของคาร์บอน (carbon) และไฮโดรเจน (hydrogen) เท่านั้น ฟาราเดย์ได้สรุปสูตรโมเลกุลออกมาเป็น C_5H_8 [12]

หลังจากได้มีการค้นพบสูตรโมเลกุลอย่างง่ายแล้ว ต่อมาได้พบว่าโครงสร้างของยางธรรมชาติคือ พอลิไอโซพรีน (polyisoprene) มีองค์ประกอบหลักคือ cis-1,4-polyisoprene (รูปที่ 2.3) และจากภาพถ่ายรังสีเอกซ์เรย์ (X-ray diagram) จะได้โครงสร้างของยางดังแสดงในรูปที่ 2.4 [12]

ยางธรรมชาติมีอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (T_g) ที่ -70°C และอุณหภูมิหลอมเหลว (T_m) ประมาณ 28°C [13]



รูปที่ 2.3 โครงสร้าง cis-1,4-polyisoprene [13]



รูปที่ 2.4 โครงสร้างทางธรรมชาติจากการฉายรังสีเอกซ์เรย์ [12]

การปรับปรุงคุณสมบัติเชิงกลและเชิงเคมีของยางธรรมชาติทำได้โดยการทำให้สายโซ่โมเลกุลเกิดการเชื่อมโยงกันขึ้นด้วยการทำให้ยางคงรูป (vulcanisation) โดยการเติมซัลเฟอร์ หรือสารอื่น ๆ เข้าไปในโครงสร้าง

กระบวนการทำให้ยางคงรูปมีผลต่อสมบัติต่าง ๆ ของยาง เช่น ความแข็ง ความยืดหยุ่น ความต้านทานต่อการบวมหรือพองในสารตัวทำละลาย เป็นต้น ผลที่มีต่อสมบัติต่าง ๆ จะมากขึ้นเพียงใดขึ้นอยู่กับทางเลือกระบบของสารที่ใช้ทำให้ยางคงรูป ตลอดจนเงื่อนไขต่าง ๆ ของการทำให้ยางคงรูป โดยทั่วไปแล้วสมบัติต่าง ๆ ของยางคงรูปจะเพิ่มขึ้นเมื่อระดับของการเชื่อมโยงสายโซ่โมเลกุลของยาง (degree of crosslinking) เพิ่มขึ้น หรือนั่นคือเมื่อจำนวนการเชื่อมโยงโมเลกุลยางเพิ่มขึ้น [14]

จากงานวิจัยพบว่ายางธรรมชาติเหมาะสมที่จะนำมาเคลือบปุ๋ยยูเรียเนื่องจากโครงสร้างที่มีหน่วยไอโซพรีนซ้ำ ๆ นั้น ถูกออกซิไดซ์ได้ในดิน ยางธรรมชาติสามารถถูกย่อยสลายได้โดยจุลินทรีย์ในดินเช่น เชื้อรา *aspergillus* และ *penicillium* และแบคทีเรีย *achinimycetes* และ *pseudomonas* เป็นต้น [15]

2.3 วิธีการเคลือบปุ๋ย

วิธีการใช้ปุ๋ยให้ได้เวลานานวิธีหนึ่งคือการเคลือบปุ๋ยด้วยสารเคลือบเช่น ซัลเฟอร์ พอลิเมอร์ และยางธรรมชาติ [2,9,11] ด้วยกระบวนการที่เหมาะสม ส่วนกระบวนการเคลือบที่นิยมในปัจจุบันคือกระบวนการไมโครเอนแคปซูลเลชัน (microencapsulation)

2.3.1 ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับไมโครเอนแคปซูลเลชัน

ไมโครเอนแคปซูลเลชัน เป็นคำศัพท์ที่รวมถึงวิธีการต่าง ๆ ที่ใช้หุ้มสารทั้งที่เป็นของเหลวและของแข็งด้วยวัสดุ เช่น พอลิเมอร์ [16] ไมโครเอนแคปซูลเลชันมีการนำไปใช้เพื่อประโยชน์ดังนี้

1. ใช้ปกป้องสารจากสิ่งแวดล้อม
2. ใช้ในการจัดการกับสารที่เป็นพิษเพื่อความปลอดภัย
3. ใช้ทำให้ของเหลวอยู่ในรูปของของแข็ง
4. ใช้ป้องกันรสชาติหรือกลิ่นที่ไม่ต้องการ
5. ใช้ควบคุมการปล่อยสารต่าง ๆ

ประโยชน์ทางการควบคุมการปล่อยสารต่าง ๆ อาจจัดได้ว่ามีความสำคัญมากที่สุดของวิธีไมโครเอนแคปซูลเลชันในทางอุตสาหกรรม โดยสารที่ถูกหุ้มเกิดการถ่ายโอนผ่านสารที่เคลือบออกมาเพื่อทำหน้าที่ของสารนั้น ๆ การปลดปล่อยสารทำได้โดยการทำลายเปลือกหุ้มด้วยการกดหรือฉีก การละลาย การหลอมเหลว การเปลี่ยนค่าความเป็นกรดต่าง (pH) การใช้เอนไซม์ ฯลฯ นอกจากนี้มีการใช้งานอีกหลายรูปแบบที่การปลดปล่อยสารที่บรรจุอยู่ไม่ได้เกิดจากการทำลายเปลือกของไมโครแคปซูล (microcapsule) แต่จะใช้การควบคุมอัตราการแพร่ของโมเลกุลของสารที่ถูกห่อหุ้มไว้ผ่านผนังออกมา ซึ่งพบมากในการควบคุมการปลดปล่อยยาจากไมโครแคปซูล [17] ซึ่งอัตราการถ่ายโอนนั้นจัดเป็นคุณสมบัติที่สำคัญอย่างมากของสารที่เคลือบ โดยอัตรา

การถ่ายโอนขึ้นอยู่กับวัสดุที่ใช้เคลือบ ความหนาของวัสดุ และโครงสร้างของไมโครแคปซูล

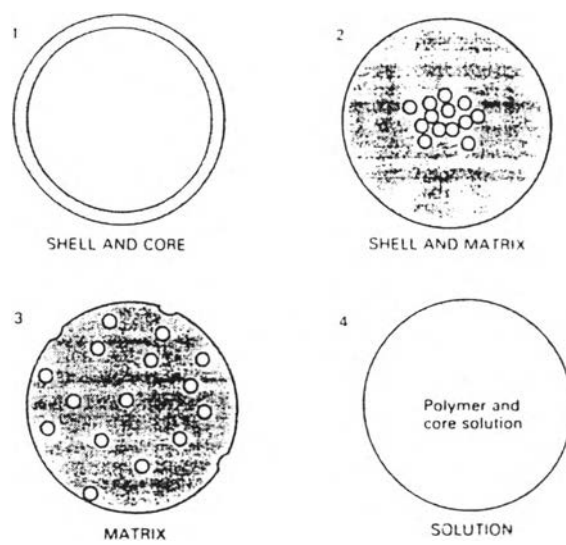
2.3.2 ไมโครแคปซูล

คำอธิบายอย่างง่ายของไมโครแคปซูล คือ หยดของเหลวหรืออนุภาคซึ่งมีชั้นของวัสดุห่อหุ้มอยู่โดยรอบ สารที่อยู่ภายในไมโครแคปซูลเรียกว่าแกน (core) ภูมิภาคภายใน (internal phase) หรือสารที่บรรจุอยู่ ส่วนที่เคลือบอยู่จะเรียกผนัง(wall) หรือ เปลือก (shell) ไมโครแคปซูลที่มีรูปร่างทรงกลมเรียกว่าไมโครสเฟียร์ (microsphere) [16]

โครงสร้างของไมโครแคปซูลทรงกลมที่เคลือบด้วยพอลิเมอร์ แบ่งได้เป็น 4 ลักษณะดังนี้

1. แบบเชลล์และคอร์ (shell and core) คือสารที่ถูกหุ้มมีความต่อเนื่องอยู่ภายใน ส่วนพอลิเมอร์ที่หุ้มมีความต่อเนื่องเช่นกันอยู่ภายนอก (continuous core of active ingredient surrounded by a continuous shell)
2. แบบเชลล์และเมทริกซ์ (shell and matrix) คือสารที่ถูกหุ้มมีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมออยู่ในพอลิเมอร์ (discrete core of active ingredient surrounded by a continuous shell)
3. แบบเมทริกซ์ (matrix) คือสารที่ถูกหุ้มมีการกระจายตัวอยู่ทั่วพอลิเมอร์ (discrete regions of active ingredient dispersed in polymer matrix)
4. แบบสารละลาย (solution) คือสารที่ถูกหุ้มละลายอยู่ในพอลิเมอร์ (active ingredient molecularly dispersed in polymer matrix)

โครงสร้างทั้ง 4 ลักษณะได้แสดงในรูปแบบที่ 2.5 [16]

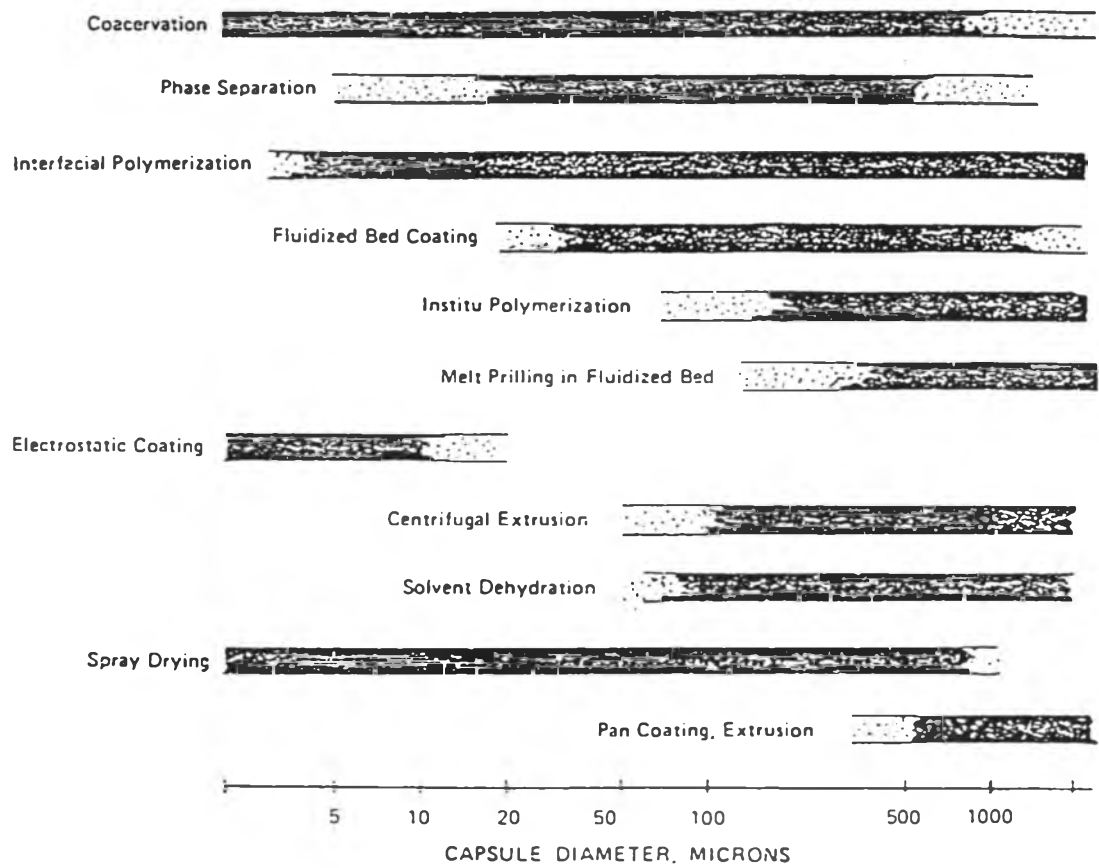


รูปที่ 2.5 ลักษณะต่างๆของไมโครแคปซูลทรงกลม [16]

นอกจากนี้ยังมีรูปแบบอื่น ๆ ของไมโครแคปซูล ซึ่งแตกต่างออกไป เช่น อนุภาคภายในอาจไม่เป็นทรงกลม ผนังอาจไม่เป็นเนื้อเดียวกัน อาจมีวัสดุที่เป็นแกนมากกว่าหนึ่งประเภทที่ถูกหุ้มอยู่ด้วยเปลือก หรืออาจมีชั้นห่อหุ้มมากกว่า 1 ชั้น [17]

ไมโครเมทริกซ์ (micromatrix) เป็นอีกรูปแบบของไมโครแคปซูล ซึ่งจะมีอนุภาคหรือหยดของเหลวขนาดเล็กจำนวนมากกระจายอยู่ในเปลือกซึ่งเป็นเฟสต่อเนื่อง (continuous phase) แม้ว่าไมโครเมทริกซ์ในอุดมคติจะมีรูปแบบที่แตกต่างไปจากไมโครแคปซูล แต่ในอุดมคติจะมีพฤติกรรมที่เหมือนกัน และค่าใช้จ่ายในการผลิตจะต่ำกว่า [10]

โดยทั่วไปขนาดไมโครแคปซูลที่มีการผลิตและใช้งาน ส่วนใหญ่จะครอบคลุมขนาดอนุภาคตั้งแต่ 2 ไมครอน ถึง 2 มิลลิเมตร [17] กระบวนการผลิตไมโครแคปซูลที่สำคัญแสดงไว้ในรูปที่ 2.6 กระบวนการผลิตเหล่านี้สามารถผลิตไมโครแคปซูลให้มีขนาดที่นิยมได้ และบางกระบวนการอาจผลิตไมโครแคปซูลให้มีขนาดนอกเหนือจากช่วงที่แสดงในรูปที่ 2.6 ได้ อย่างไรก็ตามการเลือกใช้กระบวนการผลิตกระบวนการใดขึ้นอยู่กับความสะดวกและความคุ้มค่าในการผลิต รายละเอียดกระบวนการผลิตไมโครแคปซูลแสดงในภาคผนวก ก



รูปที่ 2.6 ขนาดของไมโครแคปซูลจากกระบวนการผลิตต่าง ๆ [17]

2.3.3 วิธีการเคลือบปุ๋ยยูเรียด้วยยางธรรมชาติ

การเคลือบปุ๋ยยูเรียด้วยยางธรรมชาติ ทำได้ 2 แบบคือ

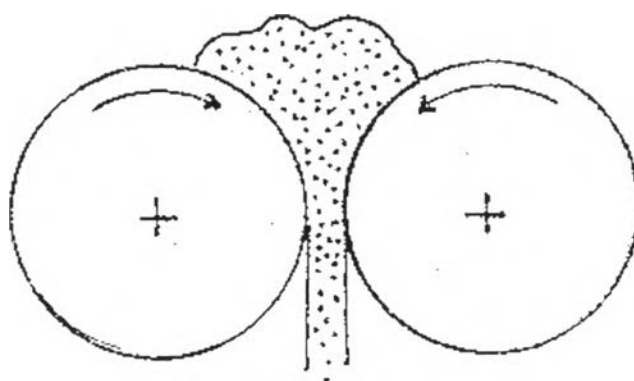
1. ระบบถังกักเก็บ (reservoir system)

ในการผลิตปุ๋ยยูเรียในรูปแบบถังกักเก็บ จะใช้วิธีโคอะเซอเวชัน (coacervation) ในการผลิต โดยการทำให้ยางธรรมชาติเป็นผง (coacervate) เกาะหุ้มอยู่โดยรอบปุ๋ย กระบวนการนี้เริ่มโดยการทำให้ปุ๋ยกระจายอยู่ในยางธรรมชาติซึ่งอยู่ในรูปของ ลาเท็กซ์ (latex) โดยมีปริมาณยางร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก ผสมอยู่ในน้ำ หลังจากนั้น จะใช้กรดอะซิติก (acetic acid) หรือกรดฟอร์มิก (formic acid) หรือกรดซัลฟิวริก (sulfuric acid) ความเข้มข้นร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก ทำให้ยางธรรมชาติเป็นผงเกาะหุ้ม อยู่รอบ ๆ ปุ๋ยยูเรีย หลังจากนั้นทำให้แข็งตัว (hardening) แล้วกรองปุ๋ยยูเรียที่ถูกเคลือบ ด้วยยางธรรมชาติแล้วนั้นออกจากของเหลว จากนั้นนำไปอบแห้ง

ปุ๋ยยูเรียที่ผ่านการเคลือบให้อยู่ในรูปแบบของถังกักเก็บนี้มีข้อเสียคือ กรณีที่มีการแตกหรือฉีกขาดของเปลือกยางธรรมชาติที่หุ้มอยู่ ปุ๋ยยูเรียทั้งหมดที่อยู่ภายในจะถูก ปลดปล่อยออกมาทันที ทำให้ไม่สามารถใช้เพื่อควบคุมการปลดปล่อยปุ๋ยได้อีกต่อไป

2.ระบบเมทริกซ์ (matrix system)

ในการผลิตปุ๋ยยูเรียที่ถูกเคลือบในรูปแบบของเมทริกซ์นั้น สามารถทำได้โดยการผสมด้วยเครื่องบดสองลูกกลิ้ง (two roll mill) ดังรูปที่ 2.7 จากนั้นจึงนำไปขึ้นรูป



รูปที่ 2.7 เครื่องบดสองลูกกลิ้ง [2]

ในขั้นแรก ยางธรรมชาติจะได้รับการผสมแบบปกติ (conventional mixing) ด้วยเครื่องบด ซึ่งจะมีการป้อนยางธรรมชาติทั้งหมดตั้งแต่เริ่มการผสม หลังจากนั้นจึงมีการเติมส่วนผสมอื่น ๆ ในขั้นตอนสุดท้ายของการผสมจะเติมซิลิเฟอร์เพื่อใช้เป็นสารเชื่อมโยงโมเลกุล สูตรส่วนผสมที่ใช้ในการผสมได้แสดงในตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 สัดส่วนของส่วนผสมหลักที่ใช้ผลิตเมทริกซ์ของยางธรรมชาติ
หุ้มยูเรีย [2]

ส่วนผสม	ปริมาณส่วนในร้อยละ ของยาง (phr)
ยางธรรมชาติ	100
ยูเรีย	600
ซิงค์ออกไซด์ (zinc oxide)	3
กรดสเตียริก (stearic acid)	1.5
TMTD (Tetramethyl thiuram disulphide)	0.25
MBT (2-Mercaptobenzthiazole)	0.50
ซิลเฟอร์	15
ยางธรรมชาติ (ส่วนที่หุ้มอยู่ภายนอก)	50

หลังจากนั้นจะมีการนำขั้นตอนพิเศษ 3 ขั้นตอนมาใช้ ดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 ยางธรรมชาติจะได้รับการนวดผสมขณะเย็น (อุณหภูมิต่ำกว่า 55 °ซ) จากนั้นจะเติม Pepton 65 เพื่อลดความหนืด แล้วจึงมีการผสมสารเร่ง (accelerator) และซิลเฟอร์

ขั้นตอนที่ 2 จะตั้งอุณหภูมิ และอัตราส่วนแรงเสียดทาน (friction ratio) ของเครื่องบดตามที่ได้กำหนดไว้ จากนั้นเติมเม็ดปุ๋ยยูเรียเพื่อนวดผสมกับยางธรรมชาติที่ผ่านการผสมในขั้นตอนที่ 1 แล้ว และปรับช่องว่างระหว่างลูกกลิ้งให้แคบลง เพื่อบีบอัดให้ปุ๋ยยูเรียเข้าไปอยู่ในเนื้อยาง

ขั้นตอนที่ 3 ในขั้นตอนนี้จะมีการเติมยางธรรมชาติเพื่อเป็นส่วนที่หุ้มภายนอก ด้วยวิธีการ split feeding จากนั้นจึงมีการม้วนและพับส่วนที่ผ่านการผสมรอบแรกแล้ว แล้วนำไปผสมอีก 5 รอบ เพื่อให้มีการกระจายที่ดีและมีการผสมตามแนวขวาง

จากนั้นจะทิ้งส่วนผสมที่ผ่านการผสมแล้วไว้ตั้งแต่ 24 ชั่วโมงขึ้นไป จึงตัดให้ได้ ขนาด แล้วนำไปขึ้นรูปด้วยวิธีการอัด (compression moulding) ทิ้งไว้อีก 24 ชั่วโมง แล้วจึงบรรจุในถุงพอลิเอทิลีนที่ปิดสนิท

2.4 การถ่ายโอนมวลสาร

การถ่ายโอนมวลสารในระบบอาจเกิดเนื่องจากการเคลื่อนที่อย่างสุ่ม (random) หรือที่เรียกว่าการแพร่ (diffusion) หรือการไหลของของไหลหรือที่เรียกว่าการพา (convection) ในที่นี้จะศึกษาการถ่ายโอนมวลสารเนื่องจากการแพร่เท่านั้น

2.4.1 กฎข้อที่หนึ่งและข้อที่สองของฟิค (Fick's first and second laws)

อาศัยกฎข้อที่หนึ่งของฟิค (Fick's first law) สามารถอธิบายปรากฏการณ์การถ่ายโอนมวลสารผ่านแผ่นฟิล์มบางเนื่องมาจากความแตกต่างของความเข้มข้นได้ดังนี้

$$q = -D \frac{dc}{dx} \quad (2.5)$$

โดย q = อัตราการถ่ายโอนมวลสารต่อพื้นที่หนึ่งหน่วย

D = สัมประสิทธิ์การแพร่สำหรับระบบพอลิเมอร์-สารถ่ายโอนหนึ่ง ๆ

$\frac{dc}{dx}$ = การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นระหว่างแผ่นฟิล์มที่หนา dx

สมการที่ (2.5) เป็นรูปแบบหนึ่งของกฎข้อที่หนึ่งของฟิคแบบมิติเดียวในระบบพิกัดมุมฉาก (cartesian coordinate) รูปแบบมิติเดียวในระบบพิกัดอื่น ๆ สามารถแสดงได้ดังในตารางที่ 2.4 [19]

ตารางที่ 2.4 กฎข้อที่หนึ่งของฟลัก [21]

ระบบพิกัดมุมฉาก (cartesian coordinates)

$$q_x = -D \frac{dc}{dx} \quad q_y = -D \frac{dc}{dy} \quad q_z = -D \frac{dc}{dz}$$

ระบบพิกัดทรงกระบอก (cylindrical coordinates)

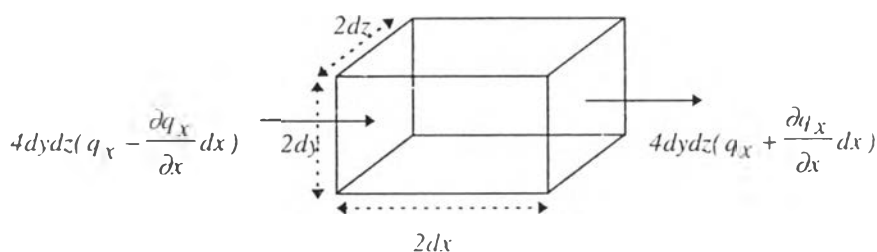
$$q_r = -D \frac{dc}{dr} \quad q_\theta = -D \frac{1}{r} \frac{dc}{d\theta} \quad q_z = -D \frac{dc}{dz}$$

ระบบพิกัดทรงกลม (spherical coordinates)

$$q_r = -D \frac{dc}{dr} \quad q_\theta = -D \frac{1}{r} \frac{dc}{d\theta} \quad q_\phi = -D \frac{1}{r \sin\theta} \frac{dc}{d\phi}$$

สำหรับระบบที่มีการถ่ายเทมวลเข้าออก ปริมาณของสารที่สะสมอยู่ในระบบ ณ เวลาหนึ่ง ๆ สามารถหาได้จากการทำสมดุลมวลรอบปริมาตรควบคุม (control volume) ดังสมการ (2.6) และรูปที่ 2.8 สำหรับระบบพิกัดมุมฉาก

$$\begin{aligned} (\text{อัตราการสะสมมวล}) &= (\text{อัตราการเข้าของมวล}) - (\text{อัตราการออกของมวล}) \\ &+ (\text{อัตราการเกิดปฏิกิริยา}) \quad (2.6) \end{aligned}$$



รูปที่ 2.8 ปริมาตรควบคุม [20]

เมื่อพิจารณากรณีอัตราการเข้าและการออกของมวลสารเกิดเนื่องจากการแพร่อย่างเดียว การแพร่เกิดในทิศทาง x เท่านั้น และไม่เกิดปฏิกิริยาขึ้นในระบบ ดังนั้น สมการ (2.6) เขียนในรูปสมการทางคณิตศาสตร์ได้ดังนี้

$$\frac{\partial}{\partial t}(A\Delta x C) = A(q_{in} - q_{out}) \quad (2.7)$$

เมื่อ C = ความเข้มข้นของสาร

A = พื้นที่ตั้งฉากกับการเคลื่อนที่ของสาร

Δx = ระยะทางของการแพร่

q_{in} = ฟลักซ์การแพร่เข้าของสาร

q_{out} = ฟลักซ์การแพร่ออกของสาร

โดยอาศัยกฎข้อที่หนึ่งของฟิสิก และให้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่มีค่าคงที่ สมการ (2.7) สามารถเขียนได้ใหม่ดังนี้

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \left(\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \right) \quad (2.8)$$

โดย $\frac{\partial C}{\partial t}$ = อัตราการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้น

$\frac{\partial^2 C}{\partial x^2}$ = อนุพันธ์อันดับสองของความเข้มข้น C เทียบกับระยะทาง x

สมการ (2.8) คือกฎข้อที่สองของฟิสิก ในระบบพิกัดอื่น ๆ สามารถเขียนได้โดยการเปลี่ยนระบบพิกัดดังนี้

ระบบพิกัดทรงกระบอก

ประกอบด้วยพิกัด r , θ และ z (ดูรูปที่ 2.9)

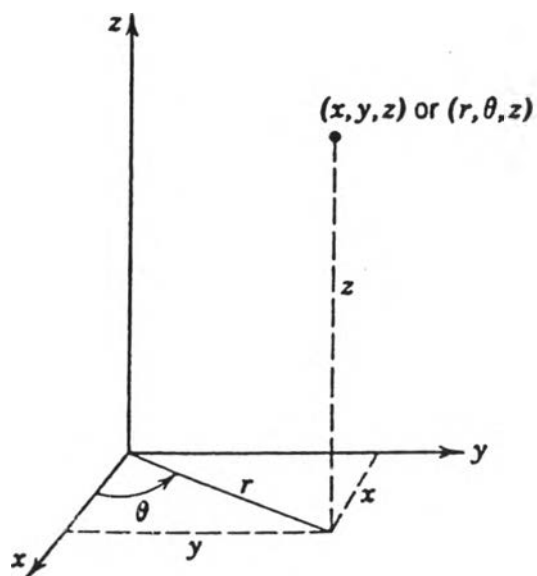
เมื่อ $x = r \cos \theta$ $y = r \sin \theta$ และ $z = z$

ระบบพิกัดทรงกลม

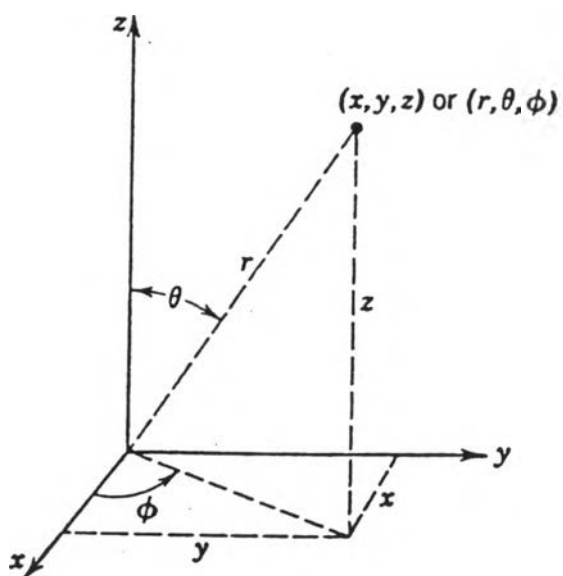
ประกอบด้วยพิกัด r , θ และ ϕ (ดูรูปที่ 2.10)

เมื่อ $x = r \sin \theta \cos \phi$ $y = r \sin \theta \sin \phi$ และ $z = r \cos \theta$

กฎข้อที่สองของฟิสิกในระบบพิกัดต่าง ๆ ได้รวบรวมไว้ในตารางที่ 2.5 [20]



รูปที่ 2.9 พิกัดทรงกระบอก และความสัมพันธ์กับพิกัดมุมฉาก [21]



รูปที่ 2.10 พิกัดทรงกลม และความสัมพันธ์กับพิกัดมุมฉาก [21]

ตารางที่ 2.5 กฎข้อที่สองของฟิสิก [20]

ระบบพิกัดมุมฉาก (cartesian coordinates)

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \left(\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} \right)$$

ระบบพิกัดทรงกระบอก (cylindrical coordinates)

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

ระบบพิกัดทรงกลม (spherical coordinates)

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

2.4.2 สัมประสิทธิ์การแพร่ (diffusion coefficient)

การวัดเชิงปริมาณของอัตราการเกิดกระบวนการแพร่โดยทั่วไปอธิบายในเทอมของค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ [20] เมื่อพิจารณาเฉพาะมิติเดียวตามแกน x คำจำกัดความของค่าสัมประสิทธิ์การแพร่คือ อัตราการถ่ายโอนสารข้ามพื้นที่หนึ่งหน่วย ตารางด้วยผลต่างความเข้มข้นของสารระหว่างแผ่นฟิล์มที่หนา dx ซึ่งก็คือค่าคงที่ในกฎการแพร่ข้อที่หนึ่งของฟิกในสมการที่ (2.5) นั่นเอง

ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่มีหน่วยเป็น (ความยาว)²(เวลา)⁻¹ เช่น เซนติเมตร² วินาที⁻¹ ปัจจัยที่มีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การแพร่แสดงในตารางที่ 2.6

ตารางที่ 2.6 แนวโน้มของค่าสัมประสิทธิ์การแพร่เมื่อปัจจัยต่าง ๆ เพิ่มขึ้น [22]

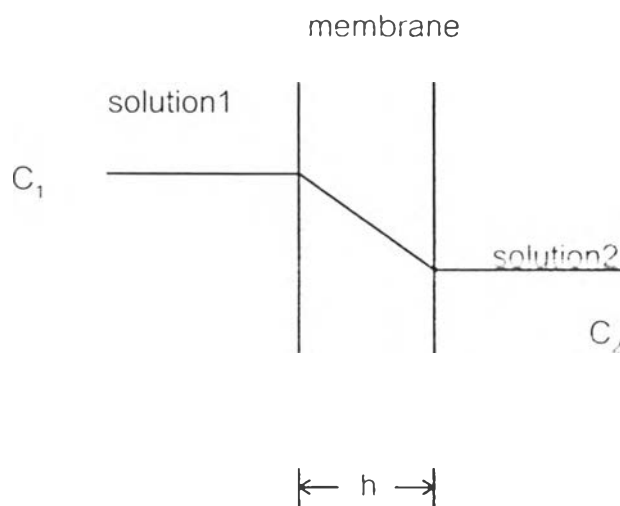
ปัจจัยที่เพิ่มขึ้น	ผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การแพร่
แรงดึงระหว่างสายพันธะ (interchain forces)	-
น้ำหนักโมเลกุลของสารที่แพร่ผ่าน (permant molecular weight)	+
ความเป็นผลึกของพอลิเมอร์ (polymer crystallinity)	-
สารที่ใช้เป็นพลาสติกไซเซอร์ (plasticizer)	+
อุณหภูมิ (temperature)	+
อุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (glass transition temp.)	-

2.4.3 สัมประสิทธิ์การแบ่งแยก (partition coefficient) [23]

รูปที่ 2.11 แสดงชั้นเมมเบรนที่แบ่งสารละลาย 1 ที่มีความเข้มข้น C_1 ออกจากสารละลาย 2 ที่มีความเข้มข้น C_2 โดยที่ C_1 แตกต่างจาก C_2 ถ้าสมมติให้ระบบอยู่ที่สภาวะคงที่ (steady - state) จากกฎข้อที่หนึ่งของฟิก จะได้ว่า

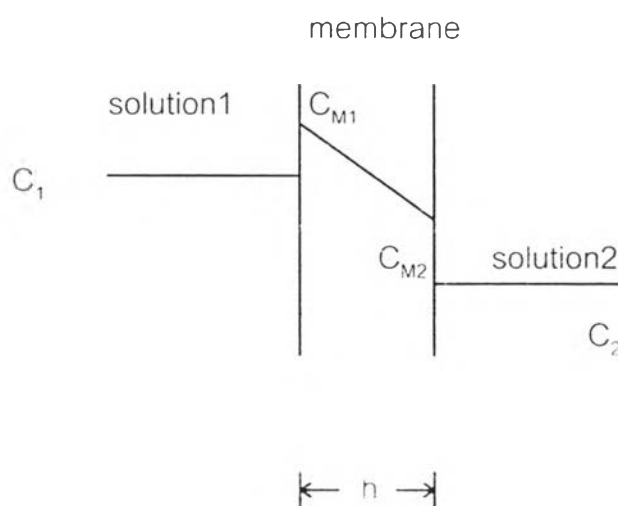
$$q = -D \frac{dc}{dx} \approx -D \left[\frac{C_2 - C_1}{h} \right] = \left(\frac{D}{h} \right) (C_1 - C_2) \quad (2.9)$$

โดย C_1 และ C_2 คือความเข้มข้นของตัวถูกละลายในสารละลายที่ 1 และที่ 2 ตามลำดับ
 h คือความหนาของเมมเบรน



รูปที่ 2.11 เมมเบรนความหนา h แบ่งสารละลายที่มีความเข้มข้น C_1 และ C_2 ออกจากกัน [23]

ในรูปที่ 2.11 ได้มีการสมมติว่าค่าความสามารถในการละลายของตัวถูกละลายในตัวทำละลาย 1 ตัวทำละลาย 2 และในเมมเบรนมีค่าเท่ากัน ซึ่งเป็นกรณีที่ค่อนข้างจะหายาก เนื่องจากโดยทั่วไปทั้งเมมเบรนและตัวทำละลายมีลักษณะทางเคมีกายภาพแตกต่างกัน ซึ่งเป็นผลให้ตัวถูกละลายมีความสามารถในการละลายในตัวทำละลายและเมมเบรนต่างกัน ซึ่งความสามารถในการละลายที่ต่างกันนี้สามารถวิเคราะห์ได้โดยการใช้กฎข้อที่หนึ่งของฟิก ระบบของเมมเบรนนี้ที่สภาวะคงที่แสดงในรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 เมมเบรนความหนา h แบ่งสารละลายที่มีความเข้มข้น C_1 และ C_2 โดยความเข้มข้นภายในและภายนอกเมมเบรนมีค่าไม่เท่ากัน [23]

จากรูปที่ 2.12 ถ้าสมมติให้ระบบอยู่ที่สภาวะคงที่ จากกฎข้อที่หนึ่งของฟิสิก
จะได้

$$q = -D \left(\frac{C_{M2} - C_{M1}}{h} \right) \quad (2.10)$$

C_{M1} และ C_{M2} คือความเข้มข้นของตัวถูกละลายที่รอยต่อระหว่างเมมเบรน
กับสารละลายภายนอก

เพื่อที่จะอธิบายฟลักซ์ q ในเทอมของความเข้มข้นของสารละลาย C_1 และ C_2
สมมติว่าเกิดสมดุลที่ผิวรอยต่อ โดยอุณหภูมิมีค่าคงที่ และสารละลายเป็นสารละลาย
เจือจาง จะได้

$$\mu_i = \mu_i^0 + RT \ln C_i = \mu_{M1}^0 + RT \ln C_{M1} \quad (2.11)$$

โดย μ = the partial molar free energy

R = ค่าคงที่ของแก๊ส

T = อุณหภูมิสัมบูรณ์

หรือ

$$\ln \left(\frac{C_{M1}}{C_i} \right) = \frac{\mu_i - \mu_{M1}}{RT}$$

ดังนั้น

$$\frac{C_{M1}}{C_i} = e^{(\mu_i - \mu_{M1})/RT} = \text{constant} = K_{M1} \quad (2.12)$$

หรือ

$$\frac{C_{M1}}{C_i} = K_{M1}$$

โดย K_{M1} คือ ค่าสัมประสิทธิ์การแบ่งแยก ซึ่งบอกถึงความเข้มข้นสัมพัทธ์ของตัวถูกละลายในเมมเบรนและในสารละลายภายนอกที่สมดุล

เช่นเดียวกันจะได้

$$\frac{C_{M2}}{C_2} = K_{M2} \quad (2.13)$$

โดย K_{M2} คือ ค่าสัมประสิทธิ์การแบ่งแยก

ดังนั้น

$$q \approx -D \left[\frac{C_{M2} - C_{M1}}{h} \right] \approx -D \left[\frac{K_{M2}C_2 - K_{M1}C_1}{h} \right] \quad (2.14)$$

ในกรณีที่สารละลาย 1 และสารละลาย 2 เป็นสารละลายชนิดเดียวกัน และ
เมมเบรนเป็นเนื้อเดียวกัน (homogenous) ดังนั้น

$$K_{M1} \approx K_{M2} \approx K_p \quad (2.15)$$

โดย K_p คือ ค่าสัมประสิทธิ์การแบ่งแยกทั่วไป (a general partition coefficient)