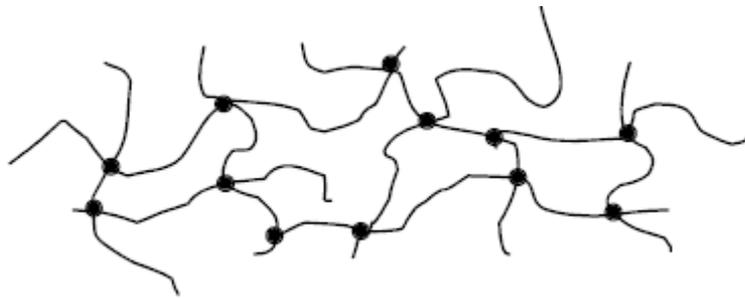


บทที่ 2

ทฤษฎีและเอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ไฮโดรเจล (Hydrogel) [1], [2]

ไฮโดรเจลเป็นพอลิเมอร์โครงสร้างร่างแหที่ละลายน้ำได้ บางครั้งเรียกว่า colloidal gel ซึ่งน้ำสามารถแพร่กระจายได้ในระดับปานกลาง ไฮโดรเจลเป็น superabsorbent ได้จากธรรมชาติและจากการสังเคราะห์คือ สามารถดูดซับน้ำได้มากกว่า 99%



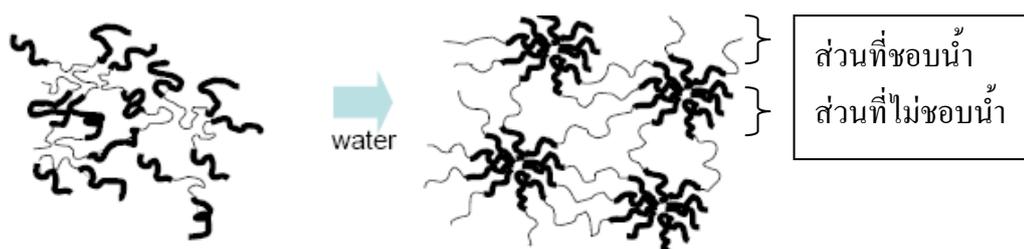
รูปที่ 2.1 แสดงโครงสร้างของไฮโดรเจล [2]

การนำไปใช้งาน

- ใช้เป็นผ้าอ้อมเด็กที่ใช้แล้วทิ้งซึ่งจะดูดซับปัสสาวะหรือฝอานามัย
- คอนแทกเลนส์ (ซิลิโคน ไฮโดรเจล, พอลิอะคริลามายด์)
- เสริมหน้าอก
- ใช้โรยในดินให้ความชุ่มชื้นกับดินที่แห้งแล้ง
- ผ้าปิดแผล
- บรรจุยาที่ต้องการให้ปลดปล่อยตามระยะเวลา

ตัวอย่างพอลิเมอร์สังเคราะห์ที่ใช้ทำไฮโดรเจล ได้แก่ polyvinyl alcohol, sodium polyacrylate, acrylate polymers และ copolymers ที่มีหมู่ที่ชอบน้ำ (hydrophilic) มากๆ ซึ่งแบ่งออกเป็น

- Physical hydrogel คือ ไฮโดรเจลที่มีโครงสร้างเป็น โครงร่างตาข่าย 3 มิติ ซึ่งแต่ละสายโซ่มีการเชื่อมโยงกันด้วยพันธะไฮโดรเจนอ่อนๆหรือแรงทางไฟฟ้าสถิต

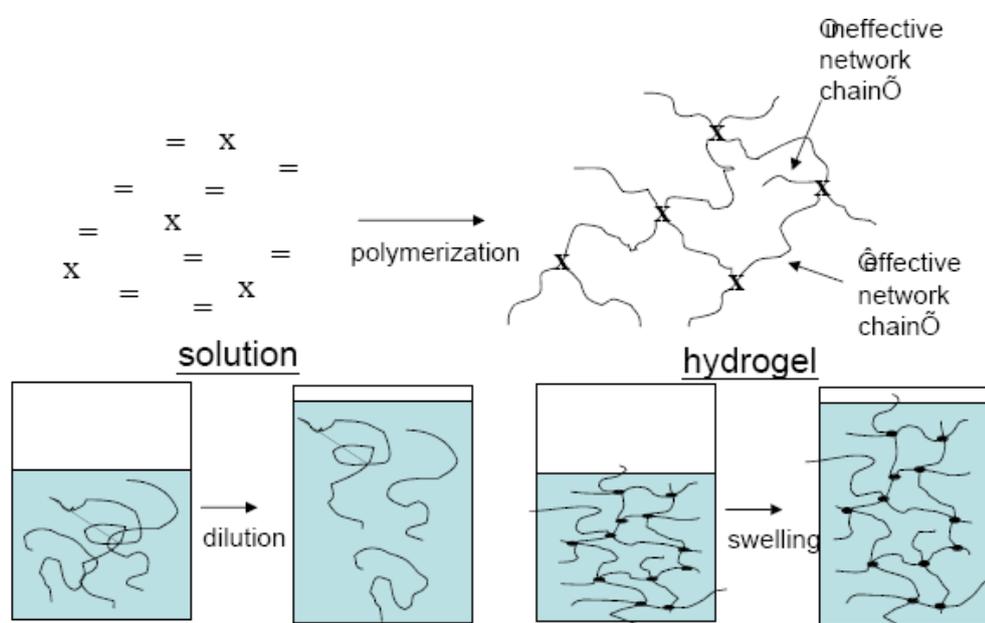


รูปที่ 2.2 แสดงการบวมตัวของ Physical Hydrogel [2]

ส่วนที่ชอบน้ำ เช่น Poly(ethylene glycol) (PEG)

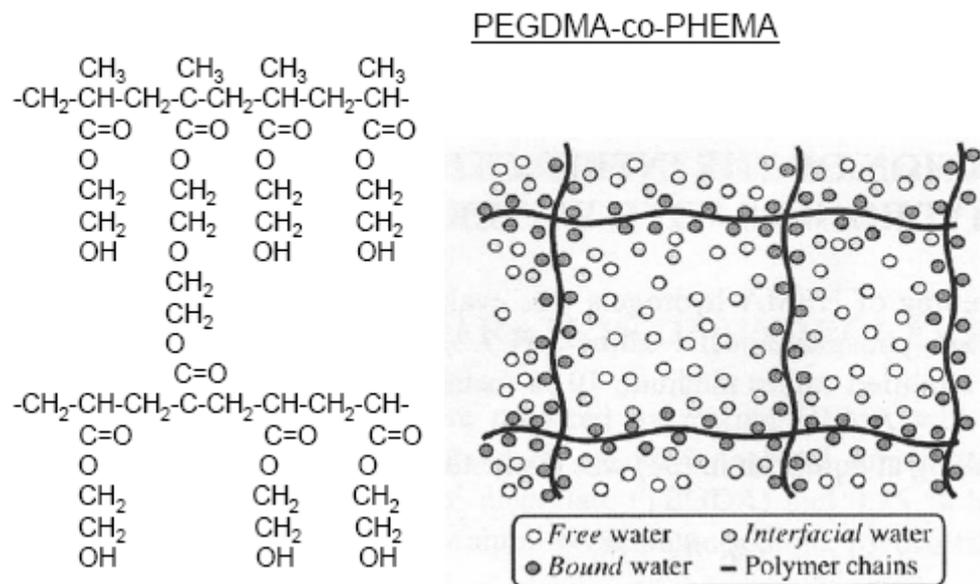
ส่วนที่ไม่ชอบน้ำ เช่น Poly(propylene oxide) (PPO), Poly(butylene oxide) (PBO)

- Chemical hydrogel คือ ไฮโดรเจลที่มีโครงสร้างเป็นโครงร่างตาข่าย 3 มิติ ซึ่งแต่ละสายโซ่พอลิเมอร์จะเกิดปฏิกิริยาเชื่อมโยงกันด้วยพันธะโควาเลนต์ที่มีความแข็งแรง



รูปที่ 2.3 แสดงโครงสร้างและการบวมตัวของไฮโดรเจล [2]

โครงร่างตาข่าย 3 มิติ เกิดจากการเกี่ยวพันกันของมอนอเมอร์ในสารละลายที่ประกอบด้วยน้ำและมีพันธะเชื่อมโยงอยู่ด้วย ตัวอย่างสารก่อพันธะเชื่อมโยงเช่น bisacrylamide โครงร่างตาข่าย 3 มิติส่วนที่ชอบน้ำของไวนิลมอนอเมอร์ เช่น hydroxyethyl methacrylate, poly(ethylene glycol) methacrylate, acrylic acid, acrylamide, N-isopropylacrylamide รูปที่ 2.3 แสดงโครงสร้างและการบวมตัวของไฮโดรเจล โดยที่ X คือสารก่อพันธะเชื่อมโยง และ = คือมอนอเมอร์เกิดพอลิเมอร์ได้เป็นไฮโดรเจล ในงานวิจัยนี้ใช้ Poly(2-hydroxyethyl methacrylate) ซึ่งเป็นหนึ่งในไฮโดรเจลที่ใช้ในทางการแพทย์คือใช้ทำคอนแทกเลนส์

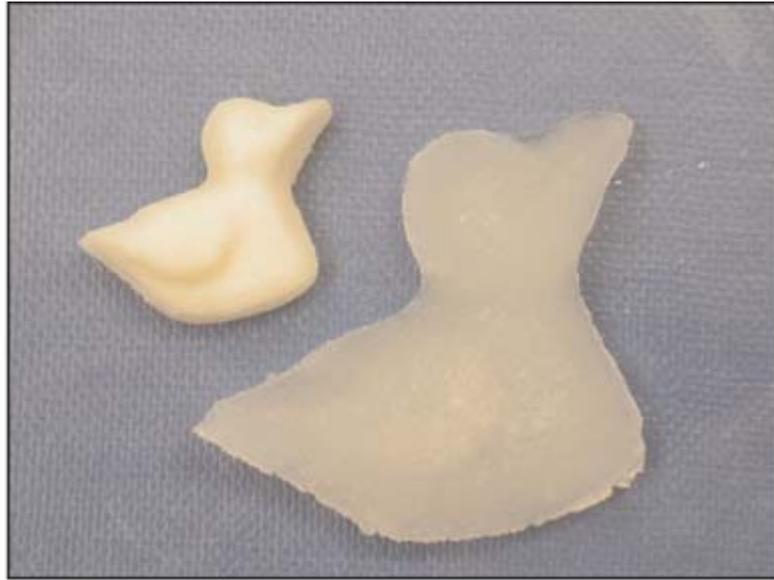


รูปที่ 2.4 แสดงลักษณะของน้ำที่อยู่ในไฮโดรเจล [2]

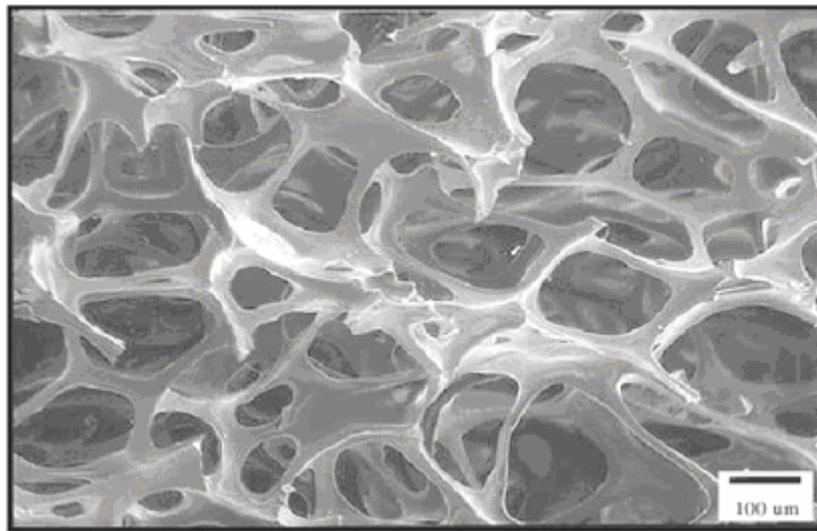
เมื่อไฮโดรเจลเกิดการบวมตัวในน้ำจะมีลักษณะของน้ำที่อยู่ในไฮโดรเจล 3 แบบคือ

1. Free water คือน้ำที่อยู่บริเวณผิวนอกของไฮโดรเจล
2. Interfacial water คือน้ำที่แทรกอยู่ในโมเลกุลของไฮโดรเจล
3. Bound water คือน้ำที่ดึงดูดกับไฮโดรเจลด้วยพันธะไฮโดรเจน

ใน chemical hydrogel เป็นพอลิเมอร์ดูดซับน้ำซึ่งมีพันธะโควาเลนต์เป็นพันธะเชื่อมโยงในโครงร่างตาข่าย 3 มิติ ไฮโดรเจลเป็นโมเลกุลที่ไม่จำกัดเรื่องขนาด ดังนั้น ไฮโดรเจลบางครั้งจึงเรียก Supermacromolecules คุณสมบัติของไฮโดรเจลคือสามารถคงรูปทรงได้หลังจากเกิดการพองตัวแล้ว ดังแสดงในรูปที่ 2.5 แสดงไฮโดรเจลที่แห้งและไฮโดรเจลที่เกิดการพองตัวแล้วคือ รูปทรงยังเหมือนเดิมแต่ขนาดใหญ่ขึ้น รูปที่ 2.6 แสดงรูพรุนที่เกิดขึ้นของไฮโดรเจลด้วย SEM (Scanning electron microscopy) ไฮโดรเจลที่มีอัตราการดูดซับน้ำช้าๆ นิยมนำไปใช้ประโยชน์ทางด้านการปลดปล่อยยา ในขณะที่งานหลายๆประเภทต้องการไฮโดรเจลที่มีการดูดซับน้ำที่เร็ว การดูดซับน้ำที่เร็วต้องทำให้อนุภาคของไฮโดรเจลมีขนาดเล็กและเกิดการกระจายตัวที่ดีของอนุภาคไฮโดรเจลในระดับไมโครทำให้การดูดซับน้ำเร็วในระดับนาโน



รูปที่ 2.5 แสดงไฮโดรเจลขณะแห้ง (ซ้าย) และไฮโดรเจลที่เกิดการพองตัวในน้ำ (ขวา) [1]



รูปที่ 2.6 แสดงรูพรุนที่เกิดขึ้นของไฮโดรเจลด้วย SEM [1]

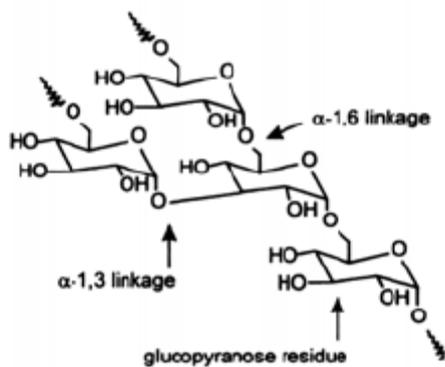
ตารางที่ 2.1 แสดงตัวอย่างไฮโดรเจลที่ใช้ในทางการแพทย์ [2]

Hydrogel polymer	Medical application
Poly(vinyl alcohol) (PVA) Polyacrylamide (PAAm) Poly(N-vinyl pyrrolidone) (PNVP) Poly(hydroxyethyl methacrylate) (PHEMA) Poly(ethylene oxide) (PEO) Poly(ethylene glycol) (PEG) Poly(ethylene glycol) monomethyl ether (PEGME) Cellulose	Blood-Compatible Hydrogel
Poly(hydroxyethyl methacrylate) (PHEMA) copolymerized with: NVP Methacrylic acid (MAA) Butyl methacrylate (BMA) Methyl methacrylate (MMA) 3-methyl-2-hydroxypropylmethacrylate (MHPM)	Contact Lenses
PHEMA/Poly(ethylene terephthalate) (PTFE) Celulose acetate PVA and cellulose acetate PNVP, PHEMA, cellulose acetate PVA and PHEMA Terpolymers of HEMA, MMA and NVP PHEMA,P(HEMA-co-MMA) PVA P(HEMA-b-siloxane) PVA, poly(acrylic acid) (PVA), poly(glyceriyl methacrylate)	Artificial Tendons Other Medical Application Artificial kidney Membranes for plasmapheresis Artificial liver Artificial skin Mammoplasty Maxillofacial reconstruction Vocal cord reconstruction Sexual organ reconstruction Ophthalmic applications

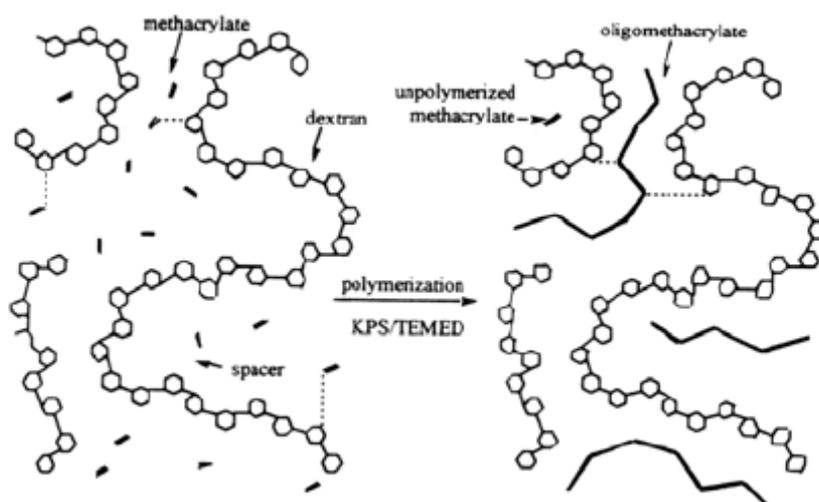
ตารางที่ 2.1 (ต่อ)

Hydrogel polymer	Medical application
PVA, HEMA, MMA	Articular Cartilage
Poly(glycolic acid) (PGA), Poly(lactic acid) (PLA), PLA-PGA, PLA-PEG, Chitosan, Dextran, Dextran-PEG, polycyanoacrylates, fumaric acid-PEG, sebacic acid 1,3-bis(p-carboxyphenoxy) propane (P(CPP-SA))	Controlled Drug Delivery Biodegradable hydrogels
PHEMA, PVA, PNVP, poly(ethylene-co-vinyl acetate) (PEVAc)	Non- Biodegradable hydrogels Neutral
Poly(acrylamide) (PAAm), Poly(acrylic acid) (PAA), PMAA, poly(diethylaminoethyl methacrylate) (PDEAEMA), poly(dimethylaminoethyl methacrylate) (PDMAEMA),	pH-sensitive
Poly(methacrylic acid-grafted-polyethylene glycol) (P(MAA-g-EG)), Poly(acrylic acid-grafted-polyethylene glycol) (P(PAA-g-EG))	Complexing hydrogels
Poly(N-isopropyl acrylamide) (PNIPAAm)	Temperature-sensitive
PNIPAAm/PAA, PNIPAAm/PMAA	pH/ Temperature –sensitive

ตัวอย่างกลไกการเกิดปฏิกิริยาของ Biodegradable Hydrogels คือ dextran hydrogels dextran จะเกิดปฏิกิริยากับ methacrylate หลังจากนั้นจะเกิดพันธะเชื่อมโยงกันที่ vinyl monomer ดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.7 แสดงโครงสร้างของ dextran [2]



รูปที่ 2.8 แสดงการเกิด dextran hydrogel [2]

2.2 แมงลัก [3]



รูปที่ 2.9 แสดงต้นแมงลัก [3]

ชื่อสมุนไพร :	แมงลัก
ชื่อวิทยาศาสตร์ :	<i>Ocimum canum Sims.</i>
ชื่อพ้อง :	<i>O. americanum Linn.</i>
ชื่ออังกฤษ :	Hoary Basil
ชื่อวงศ์ :	LABIATAE
ชื่อท้องถิ่น :	ม้งลัก (ภาคกลาง) ก้อมก้อขาว (ภาคเหนือ)

2.2.1 ลักษณะทางพฤกษศาสตร์

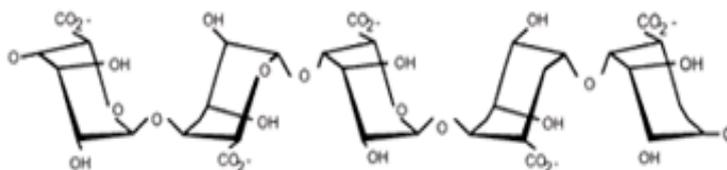
แมงลักเป็นพืชเขตร้อน ในบ้านเรามักปลูกไว้เป็นผักสวนครัว และอาหารหวานได้หลายชนิด แมงลักเป็นพืชล้มลุกลำต้นขนาดเล็กทรงพุ่มคล้ายกระเพรา และโหระพา ต้นสูงประมาณ 65 ซม. ทุกส่วนของลำต้นมีกลิ่นหอม ใบมีขนอ่อนเป็นใบเดี่ยว รูปรี กว้าง 1-2.5 ซม. ยาว 2-5 ซม. ปลายและโคนแหลม มีกลิ่นหอม ขอบใบเรียบหรือหยักมนๆ ใบประดับจะคงอยู่เมื่อเป็นผล ผลเป็นผลชนิดแห้ง รูปรี ขนาดเล็ก ดอกออกเป็นช่อที่ปลายกิ่งหรือที่ยอดกลีบดอกสีขาว ดอกติดรอบก้านช่อเป็นชั้นๆ ชั้นละ 2 ช่อย่อย ช่อย่อยละ 3 ดอก กลีบดอกร่วงง่าย แต่กลีบเลี้ยงจะอยู่คงทน เมล็ดกลม ขาวสีดำ มีเมือกห่อหุ้มเมื่อโคนน้ำจะพองตัว

ต้นแมงลักให้น้ำมันระเหยได้ใช้แต่งกลิ่นสบู่ และเครื่องสำอาง กลิ่นของน้ำมันหอมระเหยนี้แตกต่างกันไปตามท้องถิ่นที่ปลูก น้ำมันแมงลักที่ซื้อขายกันในท้องตลาดมีอยู่ 3 ชนิดด้วยกัน ชนิดที่หนึ่ง ประกอบด้วย methyl cinnamate เป็นสารหลัก ชนิดที่ 2 ประกอบด้วย d-camphor เป็นสารหลัก ชนิดที่ 3 ประกอบด้วย polyuronide พบในธรรมชาติในรูปของเกลือ อาจเป็นเกลือ Ca K Mg ของ polyuronide ซึ่งประกอบด้วยน้ำตาลและกรด uronic acid เชื่อมต่อกันด้วย glycoside linkage และเป็น branched chain ส่วนของน้ำตาลอาจจะเป็น pentose uronic acid ที่พบมากคือ glucuronic acid และ galacturonic acid

Polyuronide [4] คือ กรด alginic เกิดจากการเรียงตัวของกรด hexuronic สองตัวคือ

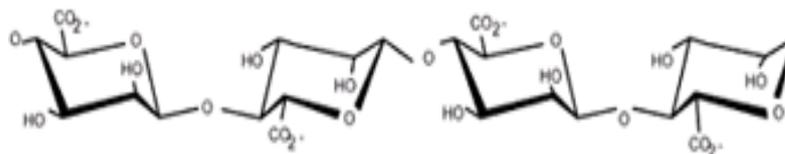
- (beta) - D – mannuronic acid unit และ
- (alpha) – L – guluronic acid

Guluronic acid block



รูปที่ 2.10 แสดงโครงสร้างของกรดคูลูโรนิก [4]

Mannuronic acid block



รูปที่ 2.11 แสดงโครงสร้างของกรดแมนนูโรนิก [4]

2.2.2 สารประกอบทางเคมี

เม็ดแมงลักประกอบด้วยสารคาร์โบไฮเดรตหลายชนิดซึ่งเป็นโมเลกุลใหญ่ และสารประกอบอื่น ๆ เช่น Camphene , mucilage , myrcene oil, D-Glucose เป็นต้น เปลือกผลแมงลักมีสารเมือก (mucilage) ซึ่งพองตัวในน้ำได้ ,ใบมีน้ำมันหอมระเหย ประเภทการบูร, เบอ์นีอัล, ซีนิออล และยูจีนอล cirsilineol, cirsimaritin, isothymusin, isothymonin, apigenin, rosmarinic acid, eugenol ,น้ำมันไม่ระเหย , น้ำมันหอมระเหย

2.2.3 สรรพคุณทางยา [3]

เม็ดแมงลักหรือที่หลายๆ คนเรียกในวัยเด็กว่าไข่กบนั้น ถือได้ว่าเป็นสมุนไพรไทยชนิดหนึ่งที่มีคุณประโยชน์มากมาย ยิ่งเวลาที่เม็ดแมงลักพองตัวเต็มที่สามารถนำมาใช้ทานก่อนอาหารเพื่อช่วยลดน้ำหนักได้ โดยบริเวณเปลือกนอกของผลจะมีสารเป็นสารเมือกใสๆ ซึ่งสามารถพองตัวได้ 45 เท่า และได้มีการวิจัยพบว่าเม็ดแมงลักมีสรรพคุณเป็นยาระบาย อีกทั้งเมือกยังสามารถช่วยหล่อลื่นให้อุจจาระอ่อนตัว สามารถขับถ่ายได้สะดวกยิ่งขึ้น แล้วยังช่วยเพิ่มกากอาหารด้วย ฉะนั้นหากผู้ใดที่คิดจะลดน้ำหนัก เพียงแค่นำเม็ดแมงลักมาแช่น้ำแล้วกินก่อนกินอาหารเพื่อให้อิ่มเร็วขึ้น ก็น่าจะเป็นทางเลือกของการลดน้ำหนักที่น่าสนใจ แต่ทั้งนี้ต้องแน่ใจว่าได้แช่เม็ดแมงลักให้พองเต็มที่แล้ว มิเช่นนั้นเวลาทานเข้าไปเม็ดแมงลักจะไปดูดน้ำในกระเพาะ ทำให้จับตัวเป็นก้อนแข็งและอุดตันลำไส้ จากยาระบายก็จะกลายเป็นท้องผูกได้

ส่วนที่ใช้เป็นยา คือ เม็ดแมงลักแก่ โดยข้อมูลทางวิทยาศาสตร์พบว่า เม็ดแมงลักประกอบด้วยสารคาร์โบไฮเดรตหลายชนิด ซึ่งเป็นโมเลกุลใหญ่ และสารประกอบอื่น ๆ เช่น Camphene, ucillage, myrcene oil, D-Glucose เป็นต้น เมื่อท่านจะลองใช้เม็ดแมงลัก สามารถเตรียมได้ โดยใช้เม็ดแมงลัก 1-2 ช้อนชา แช่น้ำ 1 แก้วใหญ่ ทิ้งไว้จนกว่าจะพองเต็มที่ ถ้าใช้เป็นยาระบายให้ทานก่อนนอน ถ้าเป็นยาลดความอ้วนให้ทานก่อนอาหาร หรือทดแทนอาหารเป็นบางมื้อเพราะอาจเป็นโรคขาดสารอาหารได้

ทั้งต้น แก้วกเสียด ขับลมในลำไส้ แก้มตานซาง แก้วพิษตานซาง ขับลม แก้วท้องอืดเพื่อในเด็ก ขับเหงื่อ แก้วไอ รักษาโรคทางเดินอาหาร แก้วปวดฟัน แก้วลมป่วง

ใบ แก้วโรคลำไส้พิการ ขับลมในลำไส้ แก้พิษตานซาง แก้หวัด หลอดลมอักเสบ รักษาโรค
ผิวหนัง แก้อาเจียน ขับลม ขับเหงื่อ รักษาเกลืออน้ำนม

เมล็ด เป็นยาระบาย รักษาบิด ขับปัสสาวะ

นอกจากนี้ เมล็ดยังใช้ผสมกับสมุนไพรอื่นๆรักษาโรคดังต่อไปนี้

ราก รักษาอาการไอแห้ง รักษาอาการพิษสำแดง

ทั้งต้น รักษาโรคริดสีดวง ตานขโมย แก้ท้องอืด ผอมแห้ง แก้ยาเบื่อ

ใบ แก้กระษัย แก้ลมกระษัยเหล็ก แก้ลมกระษัยดาน ขับน้ำนม แก้ไข้ลิ้นหด

เมล็ด บีบน้ำมันผสมยาอุจาด แก้ลม ขับเหงื่อ แก้โรคทางเดินอาหาร เป็นยาระบายอ่อนๆ

2.2.4 สารเมือก (Mucilage) [3]

การแยกสารเมือก (Mucilage) ออกจากเมล็ด ใช้กรรมวิธีแบบง่ายๆโดยขั้นตอนได้กล่าวใน
ส่วนการทดลอง สารเมือกที่ได้มีลักษณะเหนียวข้น คล้ายวุ้น สีขาวขุ่น มีการไหลที่ไม่ดีนัก มีความ
หนืดมากแม้จะมีความเข้มข้นเพียงเล็กน้อยก็ตาม เมื่อนำเมือกมาทำให้แห้งจะเกาะเป็นแผ่นบางๆสี
ขาวคล้ำ เมื่อถูกน้ำจะพองตัวอีกทันที มีสภาวะเป็นกลาง

ส่วนประกอบทางเคมีสารเมือกเป็นพอลิยูโรไนด์ (Polyuronide) พบในธรรมชาติในรูปของ
เกลือ อาจจะเป็น เกลือของแคลเซียม โปแตสเซียมหรือแมกนีเซียมซึ่งประกอบด้วยน้ำตาล และ
Uronic acid เชื่อมต่อกันด้วย Glycoside linkage และเป็นลักษณะโซ่กิ่ง ส่วนน้ำตาล อาจเป็นเพนโตส
หรือเฮกโซส อาจมีทั้งเฮกโซสและเพนโตสอยู่ด้วยกัน Uronic acid ที่พบมากคือ Glucuronic acid
และ Galacturonic acid และมีองค์ประกอบทางเคมีของสารเมือกแมงลักดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 แสดงองค์ประกอบทางเคมีของสารเมือกแมงลัก [5]

Chemical composition	Content(%wet basis)
Moisture	10.48
Protein	0.81
Fat	1.73
Ash	4.43
Crude fiber	17.35
Carbohydrate	65.20

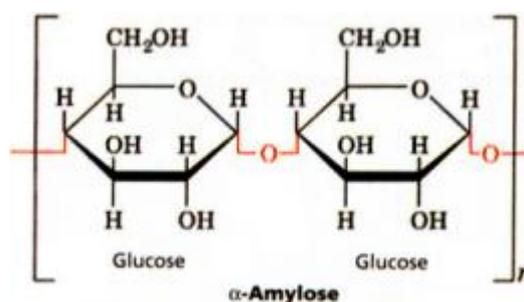
2.3 แป้ง [6]

แป้งเป็นพอลิแซคคาไรด์ที่เกิดจากกลูโคสจำนวนหลายพัน โมเลกุลมาเชื่อมต่อกันมีโครงสร้างเป็นทั้งแบบสายยาวและกิ่งก้านสาขา แป้งมีมากในพืชประเภทเมล็ดและหัว ข้าวโพดมีแป้ง 50% ข้าวเจ้ามีแป้ง 75% และมันฝรั่งมีแป้ง 20% ฯลฯ เมื่อแป้งถูกความร้อนจะกลายเป็นเดกซ์ทริน ซึ่งเป็นสารที่มีรสหวานเล็กน้อยและมีสมบัติเหนียวแบบกาว

2.3.1 โครงสร้างของแป้ง

แป้ง(Starch) เป็นโพลีแซคคาไรด์(Polysaccharide) ที่สำคัญที่สุดในธรรมชาติ เกิดจากโมโนแซคคาไรด์ (Monosaccharide) หลาย ๆ หน่วย มาต่อกัน สูตรทั่วไปคือ $(\text{CH}_2\text{O})_n$ โดยปกติแป้งจะมีอยู่ในเมล็ด, ราก และลำต้นของพืช ลักษณะของแป้งจะเป็นเม็ดเล็ก มีรูปร่างแตกต่างกันไปตามชนิดของพืช แป้งมีส่วนประกอบที่สำคัญ คือ

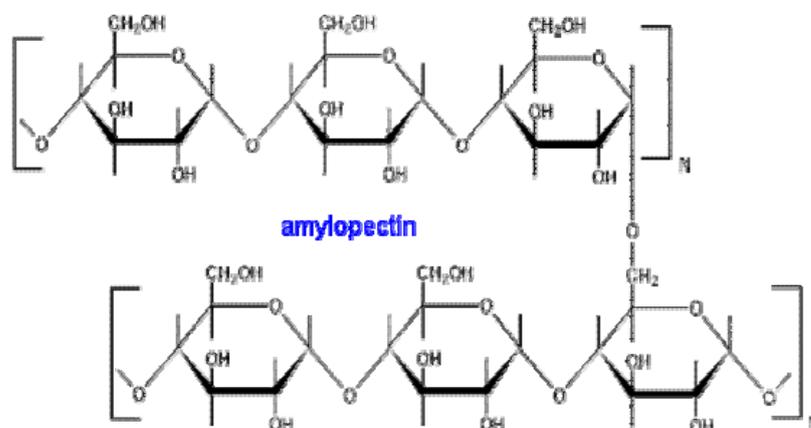
1. อัลฟา-อะไมเลส(Alpha-Amylose) ประกอบไปด้วยหน่วยของกลูโคส D(+) ประมาณ 500-2,000 มาเชื่อมต่อกันเป็นสายยาวด้วยพันธะ Alpha,1-4 glycosidic linkage น้ำหนักโมเลกุลแตกต่างกันไปตั้งแต่ 2,000-500,000 โดยทั่วไปอะไมเลสจะไม่ละลายน้ำ แต่สามารถกระจายตัวอยู่ในน้ำเป็นไมเซลล์ และเมื่อรวมกับไอโอดีนจะให้สีน้ำเงิน มีอยู่ประมาณ 20-25% ของแป้งทั้งหมด



รูปที่ 2.12 แสดง โครงสร้างของอัลฟา-อะไมเลส [6]

2. อะไมโลเพคติน (Amylopectin) เป็นแป้งที่มีโครงสร้างแตกแขนง โดยแต่ละแขนงจะประกอบไปด้วยหน่วยกลูโคสประมาณ 12 หน่วย แขนงของอะไมโลเพคตินจะยึดกันด้วยพันธะ Alpha, 1-4 - glycosidic linkage แต่ละจุดที่มีการแตกแขนงจะยึด

กันด้วยพันธะ Alpha, 1-6 glycosidic linkage น้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ย $\geq 1,000,000$ เมื่อรวมตัวกับไอโอดีนจะให้สีม่วงแดง มีอยู่ประมาณ 75-80% ของแป้งทั้งหมด



รูปที่ 2.13 แสดงโครงสร้างของอะไมโลเพคติน [6]

2.3.2 สมบัติของแป้ง

โดยปกติเมื่อแป้งผสมอยู่ในน้ำแป้งจะแตกตัวเป็นเม็ดเล็ก ๆ กระจายอยู่ในน้ำ แต่จะไม่ละลายน้ำเนื่องจากอนุภาคของแป้งจะมีขนาดใหญ่เกินที่จะละลายน้ำได้แป้งจะมีความหนาแน่นค่อนข้างสูงประมาณ 1.45-1.64 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร (ขึ้นอยู่กับชนิดของแป้ง) ดังนั้นแป้งจึงพร้อมที่จะตกตะกอนหลังจากแขวนลอยอยู่แต่เมื่ออุณหภูมิของสารแขวนลอยสูงขึ้นประมาณ 60-70°C (ขึ้นอยู่กับชนิดของแป้ง) น้ำจะเข้าไปใน amorphous region และพลังงานความร้อนจะทำลายพันธะไฮโดรเจน ใน crystalline region ทำให้สามารถเข้าไปในเม็ดแป้งมากยิ่งขึ้น ส่งผลให้เม็ดแป้งเกิดบวมอย่างรวดเร็ว ความหนาแน่นจะลดลงความหนืดจะสูงขึ้น ยิ่งไปกว่านั้นผิวของเม็ดแป้งจะเปิดมากขึ้น จนเม็ดแป้งเกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างฉับพลัน ทำให้อะไมโลส ออกจากเม็ดแป้งเกิดเป็นเจลขึ้น ซึ่งเป็นปรากฏการณ์ที่เรียกว่า การเกิดเจล (Gelatinization)

2.4 มอนอเมอร์ 2-Hydroxyethylmethacrylate (HEMA) [7]

ในงานวิจัยนี้ใช้มอนอเมอร์ 2-Hydroxyethyl methacrylate เป็นมอนอเมอร์ปรับปรุงสมบัติของแผ่นฟิล์มไฮโดรเจลสารเมือกจากเม็ดแมงลัก

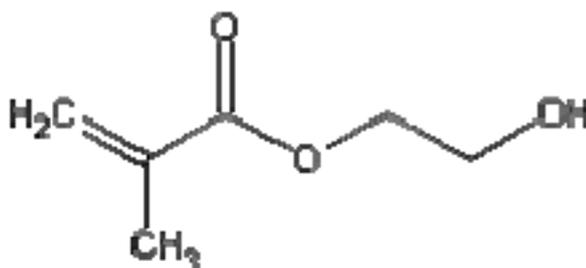
ชื่อเคมี IUPAC : 2-Methyl-2 propenoic acid 2-hydroxyethyl ester

ชื่อเคมีทั่วไป : 2-Hydroxyethyl methacrylate

ชื่อพ้อง : Glycol Methacrylate; Beta-Hydroxyethyl Methacrylate; Mhoromer; Heme-a; 2-Propenoic acid, 2-methyl-, 2-hydroxyethyl ester; GMA; Ethylene glycol methacrylate; Bisomer Hema

สูตรโมเลกุล : $C_6H_{10}O_3$

สูตรโครงสร้าง :



รูปที่ 2.14 แสดง โครงสร้างของ 2-Hydroxyethyl methacrylate [7]

2.4.1 สมบัติทางกายภาพและเคมี (Physical and Chemical Properties)

สถานะ :	ของเหลว
สี :	ใสไม่มีสี
กลิ่น :	คล้ายผลไม้
น้ำหนักโมเลกุล :	130.14
จุดเดือด :	205-208 °C
จุดหลอมเหลว/จุดเยือกแข็ง :	-12 °C
ความถ่วงจำเพาะ :	1.0340
ความหนืด :	9 mPa.sec
ความดันไอ :	0.5 mmHg
ความสามารถในการละลายน้ำที่(g/100ml) :	ละลายได้ที่ 20 °C
ความเป็นกรด-เบส(pH) :	4 ที่ 20 °C
ข้อมูลทางกายภาพและเคมีอื่นๆ :	สารนี้ไวต่อแสง ความชื้น ความร้อน
แฟกเตอร์แปลงหน่วย	1 ppm = 5.32 mg/m ³ หรือ 1 mg/m ³ = 0.187 ppm ที่ 25 °C

2.4.2 อันตรายต่อสุขภาพอนามัย (Health Effect)

สัมผัสทางผิวหนัง :	การสัมผัสสฤกผิวหนัง จะทำให้เกิดการระคายเคือง เกิดภูมิแพ้
สัมผัสสฤกตา :	การสัมผัสสฤกตา จะทำให้เกิดการระคายเคืองต่อตา
การก่อดะเร็ง :	สารนี้ไม่ได้อยู่ในรายชื่อของสารก่อดะเร็งของ ACGIH IARC NIOSHNTTP หรือ OSHA
ความผิดปกติอื่น ๆ :	สารนี้ทำลายตับ ไต ระบบประสาทส่วนกลาง

2.4.3 ความคงตัวและการเกิดปฏิกิริยา (Stability and Reaction)

ความคงตัวทางเคมี :	สารนี้มีความเสถียรภายใต้อุณหภูมิและความดันปกติ
สารที่เข้ากันไม่ได้ :	เอมีน สารประกอบกรดเปอร์ออกไซด์ กรด เบส ความร้อน
สภาวะที่ต้องหลีกเลี่ยง :	สารที่เข้ากันไม่ได้ สารออกซิไดซ์รุนแรง
สารที่ทำให้เสถียร :	ไฮโดรควิน โนโนโมโนซิลอีเธอร์ (4-เมรอกวีฟีนอล)

2.4.4 การเกิดอัคคีภัยและการระเบิด (Fire and Explosion)

มีจุดวาบไฟที่ประมาณ 101 °C และมีจุดลุกติดไฟได้เองที่ประมาณ 214 °C สารดับเพลิงในกรณีเกิดเพลิงไหม้ให้ใช้น้ำ ผงเคมีแห้ง โฟมเคมี หรือโฟมต้านทาน แอลกอฮอล์ กรณีเกิดเพลิงไหม้ให้สวมใส่อุปกรณ์ช่วยหายใจชนิดมีถังอากาศในตัว (SCBA) ที่ผ่านการรับรองจาก MSHA/NIOSH และชุดป้องกันสารเคมีชนิดปิดคลุมเต็มตัว ในระหว่างการเกิดเพลิงไหม้จะทำให้เกิดก๊าซระคายเคืองและก๊าซจากการสลายตัวเนื่องจากความร้อน หรือการเผาไหม้

2.4.5 การเก็บรักษา/สถานที่เก็บ/เคลื่อนย้าย/ขนส่ง (Storage and Handling)

เก็บในภาชนะบรรจุที่ปิดมิดชิดเมื่อไม่ได้ใช้งาน เก็บในบริเวณที่เย็นและแห้ง หรือในระบบทำความเย็นที่อุณหภูมิประมาณ 4 °C ให้ล้างทำความสะอาดร่างกาย ให้ทั่วถึงภายหลังทำการเคลื่อนย้าย ถอดเสื้อผ้าที่เปื้อนสารนี้ออกและซักทำความสะอาดก่อนนำมาใช้อีกครั้ง หลีกเลี่ยงการสัมผัสกับตา ผิวหนัง หรือเสื้อผ้า หลีกเลี่ยงการกิน หรือการกลืนเข้าไปและการหายใจเข้าไป

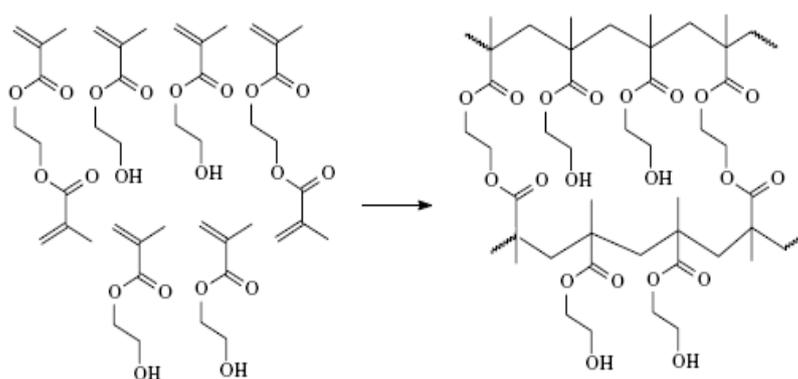
2.4.6 การกำจัดกรณีรั่วไหล (Leak and Spill)

วิธีการปฏิบัติในกรณีเกิดการหกรั่วไหล ให้หยุดการรั่วไหล ถ้าสามารถทำได้โดยปราศจากความเสี่ยงอันตราย ดูดซับสารที่หกรั่วไหลด้วยวัสดุเฉื่อย เช่น ทรายแห้ง หรือดิน แล้วเก็บใส่ในภาชนะสำหรับบรรจุกากของเสียจากเคมี วิธีการปฏิบัติในกรณีเกิดการหกรั่วไหล ให้สวมใส่

อุปกรณ์ป้องกันอันตรายที่เหมาะสม ล้างทำความสะอาดส่วนที่หกไว้ไหลทันที ให้ออกซิเจนใน ส่วนของอุปกรณ์ป้องกันอันตราย

2.4.7 Poly (2-hydroxyethyl) methacrylate [8]

Poly (2-hydroxyethyl) methacrylate เป็น Hydrosoluble monomer ที่สามารถเกิดพอลิเมอร์ได้ที่อุณหภูมิต่ำ (-20°C ถึง 10°C) สามารถเตรียมเป็นไฮโดรเจลได้หลากหลายและยังเป็นที่ยอมรับอย่างแพร่หลายในทางการแพทย์ซึ่งเป็น Biomaterial หมู่ Hydroxyethyl ที่มีอยู่ในพอลิเมอร์ทำให้มีความเป็น Hydrophilicity สูง เป็น Biocompatibility ที่ดี การสังเคราะห์ไฮโดรเจล Poly (2-hydroxyethyl) methacrylate จากมอนอเมอร์ โดยเกิดโคพอลิเมอร์เชลล์ของมอนอเมอร์ที่ชอบน้ำ และโคพอลิเมอร์ที่มีหลายหมู่ฟังก์ชันโดยมีสารก่อพันธะเชื่อมโยงทำให้เกิดโครงร่างตาข่าย 3 มิติที่ชอบน้ำ โดยทั่วไปแล้วจะใช้มอนอเมอร์ที่ชอบน้ำ เช่น methacrylates และ methacrylamides ยกตัวอย่างเช่น โคพอลิเมอร์ของ 2-hydroxyethylmethacrylate (HEMA) และ ethyleneglycol bismethacrylate (EGDMA) ซึ่งใช้ทำคอนแทคเลนส์และทำ drug delivery โคพอลิเมอร์ของ acrylamide และ methylenebisacrylamide ที่เกิดพันธะเชื่อมโยงใช้เตรียมเป็นเจลสำหรับ electrophoresis พอลิเมอร์ไรเซชันของ vinyl monomer จะใช้ตัวริเริ่มปฏิกิริยาทำให้เกิดอนุมูลอิสระ (peroxides, azo-compounds) ซึ่งอนุมูลอิสระจะเกิดโดยการให้ความร้อนใช้ปฏิกิริยารีดอกซ์ (ตัวอย่าง ammoniumpersulfate + N,N'-tetramethyl ethylenediamine, TEMED) หรือใช้ Photoinitiator ดังรูปที่ 2.15



Poly(2-hydroxyethyl methacrylate)

รูปที่ 2.15 แสดงการสังเคราะห์ Poly(2-hydroxyethyl methacrylate) [8]

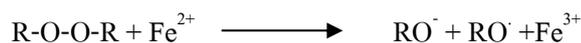
2.5 ตัวริเริ่มปฏิกิริยา [9]

ในงานวิจัยนี้ใช้การริเริ่มปฏิกิริยาแบบรีดอกซ์เป็นปฏิกิริยาออกซิเดชันรีดักชันเป็นจำนวนมากให้อนุมูลอิสระที่สามารถริเริ่มปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันได้ วิธีที่ใช้กันมากและใช้กันมาช้านาน

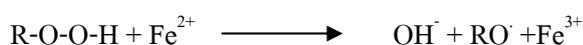
ได้แก่ น้ำยาเฟนตัน (Fenton's reagent) ซึ่งประกอบด้วยไฮดรอกซิลไอออน(II) ไฮดรอกซิลไอออนและไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ สารทั้งสองทำปฏิกิริยากันเกิดอนุมูลอิสระไฮดรอกซิล ดังนี้



ไฮดรอกซิลไอออน(II) ไฮดรอกซิลไอออนสามารถรีดิวซ์ออร์แกนิกเปอร์ออกไซด์อื่นๆ ได้ด้วย



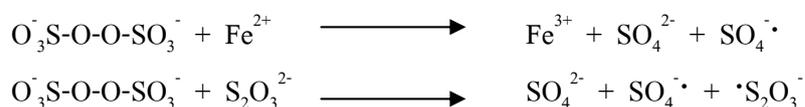
หรือ



หรือ



นอกจากออร์แกนิกเปอร์ออกไซด์แล้ว เปอร์ซัลเฟตไฮดรอกซิลไอออนก็สามารถรีดิวซ์ด้วยไฮดรอกซิลไอออน Fe^{2+} , $\text{Ag}(\text{CN})_2^-$, $\text{S}_2\text{O}_3^{2-}$ ได้ดังนี้



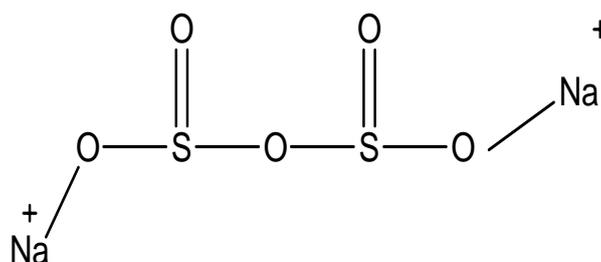
ตัวรีดิวซ์บางตัวเช่น HSO_3^- , SO_3^{2-} และ $\text{S}_2\text{O}_3^{2-}$ ก็สามารถทำปฏิกิริยากับตัวออกซิไดซ์ต่างๆ เช่น Cu^{2+} , Fe^{3+} , ClO_3^- และ H_2O_2 ก่อให้เกิดอนุมูลอิสระ ซึ่งสามารถริเริ่มปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันได้ การริเริ่มแบบรีดอกซ์มีข้อดีหรือข้อได้เปรียบอยู่สองประการ คือ

1. ปฏิกิริยาทั่วไปสามารถเกิดได้ดีและเร็วพอสมควรที่อุณหภูมิในช่วงของอุณหภูมิห้อง ($0-50^\circ\text{C}$) จึงใช้ประโยชน์ได้ดีในกรณีที่ต้องการให้ปฏิกิริยาเกิดที่อุณหภูมิต่ำ
2. ตัวถูกรีดิวซ์อาจเป็นได้ทั้งสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ จึงเป็นการสะดวกต่อการเลือกใช้ตัวทำละลาย เช่นถ้าต้องการให้ปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันเกิดในตัวกลางที่เป็นตัวทำละลายอินทรีย์ ก็เลือกใช้ตัวถูกรีดิวซ์ที่เป็นสารอินทรีย์ ตรงกันข้ามถ้าต้องการให้เกิดในตัวกลางที่เป็นน้ำก็เลือกใช้ตัวถูกรีดิวซ์ที่เป็นสารอนินทรีย์ พอลิเมอไรเซชันที่เกิดในตัวกลางที่เป็นน้ำมีข้อได้เปรียบอยู่อย่างหนึ่งคือ สามารถควบคุมอุณหภูมิได้ง่าย เพราะน้ำเป็นตัวกระจายความร้อนได้ดีมาก

ในการทดลองนี้ใช้ Sodium Metabisulphite (SMB) เป็นตัวรีดิวซ์, Ammonium Persulphate (APS) เป็นตัวออกซิไดซ์ ซึ่งทั้งสองตัวเป็นตัวริเริ่มปฏิกิริยาและ N,N'-Methylenebisacrylamide (BIS) เป็นสารเชื่อมโยง สมบัติของสารเหล่านี้แสดงดังต่อไปนี้

2.5.1 Sodium Metabisulphite (SMB) [10]

ชื่อทางการค้า :	Sodium Metabisulphite
ชื่ออื่นๆ :	Sodium Pyrosulphite, Disodium Pyrosulfite, SMBS, Pyrosulfurous acid disodium salt
มวลโมเลกุล :	190.10
สูตรโมเลกุล :	$\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$
สูตรโครงสร้าง :	



รูปที่ 2.16 แสดง โครงสร้างของ Sodium Metabisulphite [10]

2.5.1.1 สมบัติทางกายภาพและเคมี (Physical and Chemical Properties)

ลักษณะ :	ผลึกสีขาวหรือเป็นผง มีกลิ่นของซัลเฟอร์
จุดหลอมเหลว :	150°C
ความถ่วงจำเพาะ (20°C) :	1.40
ความหนาแน่น :	1000 - 2000 kg/m ³
การละลายในน้ำ :	650g/L
pH :	3.5-5.0
ความสามารถในการละลาย :	ละลายในน้ำและกลีเซอรอล ละลายได้ในแฮกซออลเล็กน้อย

2.5.1.2 ความเสถียรภาพ (Stability)

มีความเสถียร ไม่เข้ากับ oxidizing agent ที่แรงและกรดแก่

2.5.1.3 ความเป็นพิษ (Toxicology)

ทำให้เกิดการระคายเคืองและเป็นอันตรายหากกลืนกินเข้าไป และอาจทำให้เกิดโรคมะเร็งได้

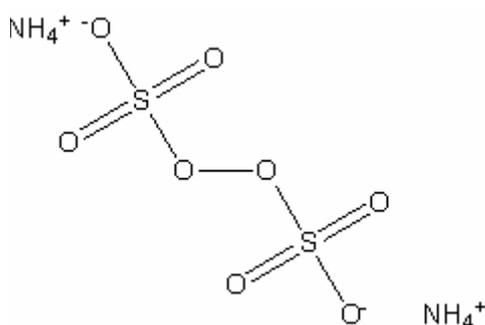
2.5.2 Ammonium Persulphate (APS) [10]

ชื่ออื่น : Ammonium peoxidesulphate, Peroxidisulfuric acid diammonium salt

มวลโมเลกุล : 228.19

สูตรโมเลกุล : $(\text{NH}_4)_2\text{S}_2\text{O}_8$

สูตรโครงสร้าง :



รูปที่ 2.17 แสดงโครงสร้างของ Ammonium Persulphate [10]

2.5.2.1 สมบัติทางกายภาพและเคมี (Physical and Chemical Properties)

ลักษณะ : ไม่มีสีเป็นผลึกสีขาว

กลิ่น : ไม่มีกลิ่น

ค่า pH (20°C) : 3.2

จุดหลอมเหลว : 120°C (สลายตัว)

ความถ่วงจำเพาะ : 1.98

ความสามารถในการละลายน้ำ (20°C) : 582 g/l

อุณหภูมิสลายตัว : > 120°C

2.5.2.2 ความเสถียรภาพ (Stability)

มีความเสถียร อาจเกิดการลุกไหม้กับวัสดุที่ติดไฟได้ ไม่เข้าเป็นเนื้อเดียวกับเบส, วัสดุติดไฟ, H₂O₂, สารประกอบเปอร์ออกไซด์, สารประกอบซิลเวอร์, ซิงค์ และอาจจะสลายตัวได้ถ้าอยู่ในน้ำหรือในอากาศที่ชื้น

2.5.2.3 ความเป็นพิษ (Toxicology)

อันตรายถ้ากลืนกินเข้าไป เป็นอันตรายอย่างมากกับผนังเยื่อ อาจเป็นสาเหตุของโรคผิวหนังอักเสบ ตาอักเสบหรือระคายเคืองทางเดินหายใจ และอาจทำให้เกิดโรคมะเร็งได้ เนื่องจากการสูดดมหรือสัมผัสผิวหนัง

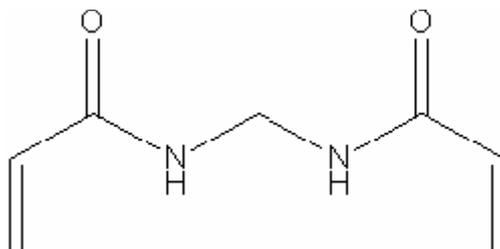
2.5.3 N,N'-Methylenebisacrylamide (BIS) [10]

N,N'-Methylenebisacrylamide นิยมใช้เป็นสารเชื่อมโยงในโปรตีนและคาร์โบไฮเดรตที่ใช้ในทางการแพทย์เนื่องจากไม่เป็นพิษ [19]

สูตรโมเลกุล : $C_7H_{10}N_2O_2$

มวลโมเลกุล : 154.17

สูตรโครงสร้าง :



รูปที่ 2.18 แสดงโครงสร้างของ N,N'-Methylenebisacrylamide [10]

2.5.3.1 สมบัติทางกายภาพและเคมี (Physical and Chemical Properties)

ลักษณะ : ผลึกสีขาว

จุดหลอมเหลว : $> 300^{\circ}C$

ความหนาแน่น : 5.31

ความถ่วงจำเพาะ : 1.24

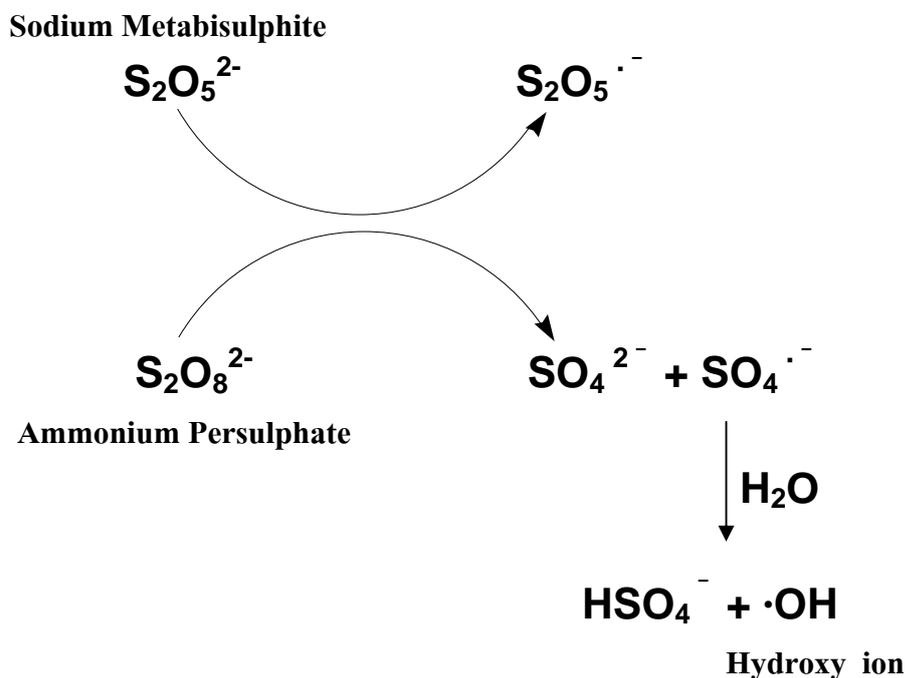
2.5.3.2 ความเสถียรภาพ (Stability)

มีความเสถียรภายใต้สภาวะปกติ เมื่อสลายตัวเกิดก๊าซอันตรายคาร์บอนมอนอกไซด์ คาร์บอนไดออกไซด์ ไนโตรเจนออกไซด์ ในระหว่างพอลิเมอไรซ์ไม่เกิดสารที่เป็นอันตราย ไม่เข้ากันกับเบสแก่ กรดแก่ และ oxidizing agent

2.5.3.3 ความเป็นพิษ (Toxicology)

อันตรายถ้ากลืนกินเข้าไป

2.5.3.4 การเกิดการริเริ่มแบบรีดอกซ์ [11]



รูปที่ 2.19 แสดงการเกิดการริเริ่มแบบรีดอกซ์ [11]

จากรูปที่ 2.19 Sodium Metabisulphite เป็นตัว reducing agent เกิดปฏิกิริยา Oxidation ให้ อิเล็กตรอนแก่ Ammonium Persulphate ซึ่งเป็นตัว oxidizing agent เกิดปฏิกิริยา Reduction เกิด Sulphate radical เมื่ออยู่ในน้ำได้เป็น Hydroxy ion ซึ่งเป็น initiator เกิดพอลิเมอร์ต่อไป

2.6 พอลิเมอร์ผสม (Polymer Blend) [12]

การทำพอลิเมอร์ผสมเป็นวิธีการปรับปรุงสมบัติของพอลิเมอร์ที่นิยมใช้กันมาก โดยการนำ พอลิเมอร์ 2 ชนิด ซึ่งอยู่ในสถานะที่เป็นของไหล ได้แก่ เป็นสารละลาย (solution) หรือสาร หลอมเหลว (molten) มาผสมให้อยู่รวมเป็นเนื้อเดียวกัน (blending) ได้เป็นพอลิเมอร์ผสม (polymer blend) ซึ่งมีสมบัติที่ดีของพอลิเมอร์แต่ละชนิดมารวมกัน แต่การผสมเข้าเป็นเนื้อเดียวกันของพอลิ เมอร์ต่างชนิดกันนั้น โดยธรรมชาติแล้วจะเป็นไปได้ยาก ดังนั้น พอลิเมอร์ผสมที่ได้จึงไม่เป็น สารละลายของแข็งที่แท้จริง และพบว่าเมื่ออยู่ในสถานะที่เป็นของแข็ง พอลิเมอร์ชนิดหนึ่งจะ กระจายอยู่ในเนื้อหรือเมตริกซ์ที่ต่อเนื่อง (continuous matrix) ของพอลิเมอร์อีกชนิดหนึ่ง ทั้งนี้การ กระจายตัวดังกล่าวต้องเป็นไปอย่างสม่ำเสมอ มิฉะนั้น จะทำให้เกิดเป็นข้อบกพร่อง (defects) ของ ผลิตภัณฑ์ และส่งผลให้สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมต่ำกว่าของพอลิเมอร์บริสุทธิ์ได้ ดังนั้นจึง ต้องพิจารณาถึงสภาพเข้ากันได้ (compatibility) ของพอลิเมอร์ที่นำมาผสมกันซึ่งบางชนิดสามารถ

เข้ากันได้ดี บางชนิดไม่สามารถเข้ากันได้เนื่องจากโครงสร้างสายโซ่ต่างกันจึงไม่สามารถกระจายตัวอย่างอิสระเกิดการแยกชั้น นอกจากนี้ ยังมีปัจจัยทางพลังงาน (energy factor) ที่ทำให้พอลิเมอร์ 2 ชนิดเข้ากันได้ นั่นคือ พลังงานที่ใช้ในการผสมผสานโมเลกุลหรือสายโซ่ของพอลิเมอร์ เช่น การดูดกลืนพลังงานความร้อนของพอลิเมอร์แต่ละชนิดต่างกัน

1. กลไกสภาพเข้ากันได้ (Compatibility Mechanism)

พอลิเมอร์ผสมส่วนใหญ่จะให้สมบัติที่ค่อนข้างต่ำโดยเฉพาะสมบัติเชิงกล ทั้งนี้เนื่องจากแรงดึงดูระหว่างผิวสัมผัสที่ต่ำและความเค้นสะสม (stress concentration) จากดิสเพอร์สในเมทริกซ์ ดังนั้น เพื่อเพิ่มความสามารถในการเข้ากันได้ในการผสม จึงนิยมใช้สารช่วยผสมหรือการทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมีในระหว่างการผสม (in-situ chemical reaction) เพื่อปรับปรุงแรงดึงดูระหว่างผิวสัมผัสของพอลิเมอร์ผสมเพื่อให้ได้โครงสร้างสัณฐานวิทยาและสมบัติของพอลิเมอร์ผสมที่เหมาะสม

2. วิธีการผสมเพื่อความเข้ากันได้ (Method of Compatibilization)

เทคนิคที่ใช้ในการผสมเพื่อความสามารถในการเข้ากันได้ และทำให้ได้พอลิเมอร์ผสมที่มีสมบัติที่มีสมบัติตามต้องการนั้นมีอยู่ด้วยกันหลายวิธี โดยแต่ละวิธีอาจมีความเกี่ยวข้องกัน ดังนั้น การเลือกใช้ขึ้นอยู่กับผู้ผลิตเป็นหลัก โดยจะพิจารณาจากต้นทุนเป็นสำคัญ เทคนิคเหล่านี้คือ

2.1 การพิจารณาสภาพผสมเข้ากันได้ทางเทอร์โมไดนามิกส์ (Thermodynamic Miscibility)

ความสามารถในการเข้ากันได้ทางเทอร์โมไดนามิกส์ เป็นหลักการที่ได้มีการนำไปใช้ประโยชน์ในกระบวนการผลิตทางการค้า โดยหลักการดังกล่าวนี้ขึ้นอยู่กับสมดุลระหว่างเอนทัลปีและเอนโทรปีของการผสมที่มีต่อพลังงานเสรีของการผสม (free energy of mixing) การเปลี่ยนแปลงพลังงานเสรีของการผสมสามารถแสดงได้ดังสมการ

โดยที่	ΔG	=	$\Delta H - T\Delta S$
	ΔG	=	การเปลี่ยนแปลงพลังงานเสรีของการผสม
	ΔH	=	การเปลี่ยนแปลงเอนทัลปีของการผสม
	ΔS	=	การเปลี่ยนแปลงเอนโทรปีของการผสม
	T	=	อุณหภูมิ (K)

2.2 การเติมแบบบล็อกหรือกราฟต์โคพอลิเมอร์ (Addition of Block or Graft Copolymer)

การเติมแบบบล็อกหรือกราฟต์โคพอลิเมอร์ เป็นเทคนิคหนึ่งที่ได้รับค่านิยมในการผสมเพื่อเพิ่มความสามารถในการเข้ากันได้ บล็อกโคพอลิเมอร์จะได้รับความนิยมมากกว่ากราฟต์โคพอลิเมอร์ โดยเฉพาะบล็อกโคพอลิเมอร์ที่ประกอบด้วยบล็อกของพอลิเมอร์ที่เหมือนกันกับพอลิเมอร์แต่ละชนิดที่นำมาผสมกัน โดยโคพอลิเมอร์ที่ใช้ต้องมีโครงสร้างทางเคมีและน้ำหนักโมเลกุลที่เหมาะสมที่จะไปอยู่ระหว่างเฟสของพอลิเมอร์แต่ละชนิด

โครงสร้างทางเคมีและน้ำหนักโมเลกุลของโคพอลิเมอร์จะมีผลอย่างมากต่อประสิทธิภาพของการเป็นสารช่วยผสม จากการตรวจสอบประสิทธิภาพของสารช่วยผสม โดยการทดสอบสมบัติความทนแรงดึงสามารถสรุปผลได้ดังนี้

1. บล็อกโคพอลิเมอร์มีประสิทธิภาพมากกว่ากราฟต์โคพอลิเมอร์
2. ไคบบล็อกโคพอลิเมอร์มีประสิทธิภาพมากกว่าไตรบล็อกโคพอลิเมอร์
3. ไคบบล็อกโคพอลิเมอร์ที่ประกอบด้วยบล็อกที่มีความยาวลดหลั่นลงมามีประสิทธิภาพสูงกว่าไคบบล็อกโคพอลิเมอร์ที่ประกอบด้วยบล็อกที่มีความยาวเท่ากัน

2.3 การเติมพอลิเมอร์ที่มีหมู่ฟังก์ชันหรือส่วนที่ว่องไวต่อการทำปฏิกิริยา (Addition of Functional/Reactive Polymer)

การเติมพอลิเมอร์ที่มีหมู่ฟังก์ชันเพื่อทำหน้าที่เป็นสารช่วยผสม บ่อยครั้งเป็นการนำพอลิเมอร์ชนิดใดชนิดหนึ่งที่จะทำการผสมมาดัดแปรให้มีหมู่ฟังก์ชัน หรือส่วนที่ว่องไวต่อปฏิกิริยา โดยหมู่ฟังก์ชันดังกล่าวต้องสามารถเกิดปฏิกิริยา หรือมีแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุล เช่น พันธะไฮโดรเจน กับพอลิเมอร์ชนิดที่สองได้ กระบวนการดัดแปรพอลิเมอร์ให้มีหมู่ฟังก์ชันสามารถทำได้ในเครื่องปฏิกรณ์หรือโดยผ่านกระบวนการอัดรีด ตัวอย่างเช่น มาเลอิกแอนไฮไดรด์ที่กราฟต์บนสายโซ่ของพอลิโอเลฟินส์ โดยหมู่คาร์บอกซิลิกของมาเลอิกแอนไฮไดรด์มีความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาเคมีกับหมู่อะมิโนของพอลิเอไมด์ได้ ทั้งนี้พอลิโอเลฟินส์กราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์จัดเป็นสารช่วยผสม ที่ได้รับความนิยมในทางการค้าและมีราคาไม่แพงนัก

2.4 การทำให้เกิดปฏิกิริยากราฟต์โคพอลิเมอร์หรือพอลิเมอร์ไรเซชันในระหว่างการผสม (In-situ Grafting Polymerization)

การทำให้เกิดปฏิกิริยากราฟต์โคพอลิเมอร์หรือพอลิเมอร์ไรเซชันในระหว่างการผสมหรือ reactive blending เป็นวิธีใหม่ที่ใช้ในการผสมพอลิเมอร์ให้เข้ากันได้ โดยต่างจากวิธีอื่นๆคือ องค์ประกอบที่ทำการผสมจะถูกนำมาดัดแปรเพื่อให้เกิดปฏิกิริยากับพอลิเมอร์อีกชนิดหนึ่งได้ โดยไม่จำเป็นต้องเติมสารช่วยผสม ตัวอย่างเช่น การผสมระหว่างพอลิคาร์บอนเนตกับพอลิเอสเทอร์ แม้ว่าในบางครั้งการผสมแบบไม่ต่อเนื่องสามารถนำมาใช้กับการผสมแบบ reactive blending ได้ แต่การใช้กระบวนการแบบต่อเนื่อง เช่น การอัดรีดแบบสกรูเดี่ยว (single-screw extruder) และการอัดรีดแบบสกรูคู่ (twin-screw extruder) ก็ได้รับความนิยมเช่นกัน เพราะกระบวนการดังกล่าวสามารถควบคุมอุณหภูมิ และสิ่งที่ไม่ต้องการจากดำเนินไปของปฏิกิริยาได้ดีกว่า

2.6.1 กลไกในการเกิดปฏิกิริยาในการผสม อาจมีได้ดังนี้

1. เกิดกราฟต์หรือบล็อกโคพอลิเมอร์ จากการเกิดปฏิกิริยาเคมีระหว่างหมู่ที่ว่องไวต่อปฏิกิริยาเคมีในพอลิเมอร์ ซึ่งอาจกระตุ้นได้โดยการเติมตัวริเริ่ม (initiator) ในระหว่างการผสม

2. เกิดบล็อกโคพอลิเมอร์จากปฏิกิริยาการแลกเปลี่ยน (interchange reaction) ที่สายโซ่โมเลกุลหลักของพอลิเมอร์แต่ละชนิดที่นำมาผสมกัน ซึ่งส่วนใหญ่จะเกิดกับพอลิเมอร์ชนิดควบแน่น
3. เกิดการขาดและรวมกันใหม่ของแต่ละโมเลกุล เพื่อสร้างบล็อกหรือกราฟต์โคพอลิเมอร์ โดยกระบวนการดังกล่าวจะเกิดภายใต้ภาวะที่แรงเฉือนสูง
4. ส่งเสริมให้เกิดปฏิกิริยาโดยการเติมตัวเร่งปฏิกิริยา (catalyst)

2.6.2 ความสามารถในการละลายเข้ากันได้และความสามารถในการผสมเข้ากันได้ (Miscibility and Compatibility) [13]

ความสามารถในการละลายเข้ากันได้ (Miscibility) ในระดับโมเลกุลจัดเป็นมโนทัศน์ทางทฤษฎีเทอร์โมไดนามิกส์กล่าวคือเมื่อเกิดขึ้นจะทำให้เกิดระบบวัฏภาคเดี่ยวเนื้อเดียว (Homogeneous single-phase system) มีสมบัติอยู่ระหว่างพอลิเมอร์ 2 ชนิด และโดยทั่วไปจะเป็นสัดส่วนกับความเข้มข้นของพอลิเมอร์ชนิดนั้นๆ พอลิเมอร์ผสมจัดเป็นสิ่งที่มีความประโยชน์ในทางการค้า โดยเฉพาะเมื่อองค์ประกอบมีส่วนเกี่ยวข้องกับความสามารถในการละลายเข้ากันได้ของโมเลกุล (molecular miscibility) ได้แก่ น้ำหนักโมเลกุลต่ำ ความเป็นผลึกมีค่าเท่ากับศูนย์ ความมีขั้วคล้ายกัน พันธะไฮโดรเจนร่วมกัน

ความสามารถในการผสมเข้ากันได้ (Compatibility) จัดเป็นสมบัติในทางปฏิบัติของพอลิเมอร์ผสมบางชนิดซึ่งละลายได้ในระดับโมเลกุลและมีประโยชน์ในทางการค้า อย่างไรก็ตามระบบพอลิเมอร์ผสมส่วนใหญ่ในทางการค้าเป็นระบบที่ไม่ละลาย (immiscible) ในระดับโมเลกุล และแยกออกเป็นระบบหลายวัฏภาค (multi-phase system) ในขณะที่ระบบหลายวัฏภาคนี้นานขึ้นจะมีแรงยึดเกาะระหว่างผิวมากขึ้น (strong interfacial adhesion) ทำให้สามารถรวมสมบัติที่ดีที่สุดของแต่ละวัฏภาคและเกิดเป็นความสมดุลของสมบัติทั้งหมดที่ไม่สามารถได้จากสมบัติของพอลิเมอร์บริสุทธิ์โดยลำพัง ยิ่งไปกว่านั้นระบบชั้นนำหลายระบบมีการปรับปรุงระบบผสมร่วมที่สำคัญ (major synergistic improvement) มากกว่า 1 สมบัติ

2.6.3 เคมีของพอลิเมอร์ผสม [13]

ระบบพอลิเมอร์แบบหลายวัฏภาคอาจเกิดขึ้นได้หลายวิธีดังนี้

พอลิเมอร์ผลึก (Crystalline Polymer) ในทางปฏิบัติไม่มีผลึก 100 เปอร์เซ็นต์ แต่จะเป็นระบบ 2 วัฏภาคคือผลึก (crystalline) และอสัณฐาน (amorphous) โดยในแต่ละวัฏภาคมีส่วนทำให้เกิดการกระจายตัวของสมบัติทั้งหมด ในบางวิธีสมบัติที่ได้เหมาะกับมโนทัศน์ทั่วไปของระบบพอลิเมอร์แบบหลายวัฏภาคแต่อย่างไม่มีความรู้พื้นฐานเพียงพอที่จะรวมเข้าในหัวข้อปัจจุบันได้

พอลิเมอร์ผสม (Polymer Blend) เกิดจากการผสมพอลิเมอร์ที่แตกต่างกัน 2 ชนิด ในขณะที่ระบบบางชนิดอาจเหมาะกับความต้องการทางเทอร์โมไดนามิกส์เพื่อให้เกิดความสามารถในการละลายเข้ากันได้ของโมเลกุลที่สมบูรณ์ แต่โดยส่วนมากจัดเป็นการละลายได้บางส่วนหรือไม่ละลายเลย และแยกวัฏภาคออกเป็น 2 หรือมากกว่า 2 วัฏภาค ด้วยเหตุนี้คำว่าพอลิเมอร์ผสมและระบบหลายวัฏภาคจึงนิยมใช้แทนระบบนี้

พอลิเมอร์ร่วมแบบบล็อกและต่อกิ่ง (Block and Graft Copolymer) ประกอบด้วยโครงสร้างพอลิเมอร์ที่ไม่เหมือนกันตั้งแต่ 2 ชนิดขึ้นไป ซึ่งไม่สามารถละลายเข้ากันได้ ถ้าพอลิเมอร์ถูกทำให้แยกออกจากกันหรือแม้แต่การเกิดพันธะโควาเลนต์เป็นโมเลกุลเดี่ยวก็ตามจะมีแนวโน้มแยกออกจากกันเป็นแต่ละวัฏภาค (individual phases) ทำให้เกิดโครงสร้างเป็นแบบหลายวัฏภาคได้ ยิ่งไปกว่านั้นเทคนิคส่วนมากที่ใช้ในการสังเคราะห์พอลิเมอร์ร่วมแบบบล็อกและต่อกิ่งรวมทั้งพอลิเมอร์เดี่ยวแต่ละตัวไม่ประสบผลสำเร็จ ด้วยเหตุนี้จึงทำให้เกิดพอลิเมอร์ผสมแบบหลายวัฏภาค ในตอนเริ่มต้น นักเคมีพอลิเมอร์คิดว่าสิ่งนี้ไม่เป็นที่ต้องการจึงพยายามทำให้เกิดพอลิเมอร์ร่วมแบบบล็อกหรือต่อกิ่ง 100 เปอร์เซ็นต์ ต่อมาจึงทราบว่า การพัฒนาทางการค้าที่จะสำเร็จได้ดีที่สุดคือการพัฒนาผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากการผสมระหว่างพอลิเมอร์เดี่ยว 2 ชนิด ให้เกิดเป็นพอลิเมอร์ร่วมแบบบล็อกหรือต่อกิ่งที่มีแรงยึดเหนี่ยวที่แข็งแรงระหว่างวัฏภาคที่แยกออกจากกัน

ไอโอโนเมอร์ (Ionomer) โดยทั่วไปจะประกอบด้วยสัดส่วนของกลุ่มไอออนิกที่มีประจุ (charged ionic groups) อยู่เล็กน้อยในพอลิเมอร์อินทรีย์ที่มีสัดส่วนอยู่มาก โดยมีพันธะเป็นแบบโควาเลนต์และมีความเป็นขั้วต่ำมาก ในที่นี้ประกอบด้วยโครงสร้าง 2 โครงสร้างที่ไม่เหมือนกัน และพยายามแยกออกเป็นแต่ละวัฏภาคอย่างดีที่สุด ทั้งนี้เนื่องจากกลุ่มไอออนิกมีอยู่น้อย โดยทั่วไปจะเกิดเป็นวัฏภาคเล็กๆ ที่ไม่ต่อเนื่อง (discrete microphases) ในขณะที่พอลิเมอร์โควาเลนต์ (covalent polymer) ที่มีอยู่มากเกิดเป็นวัฏภาคเมตริกซ์ต่อเนื่อง (continuous matrix phase) ระบบนี้จึงจัดเป็นระบบหลายวัฏภาค (multiphase system) เช่นกัน ไอโอโนเมอร์นี้มีความคล้ายคลึงกันกับชนิดอื่นๆ แต่ยังคงอยู่ในระหว่างการศึกษารายละเอียดเพื่อจัดรวมเข้ากับทฤษฎีที่มีอยู่

โครงร่างแหพอลิเมอร์แบบสามมิติ (Interpenetrating Polymer Network, (IPN)) เกิดขึ้นอย่างเหมาะสมโดย

1. เริ่มจากการพอลิเมอไรซ์มอนอเมอร์ A ไปเป็นพอลิเมอร์ A
2. จากนั้นทำให้เกิดการเชื่อมโยง (crosslinking) เล็กน้อย
3. ทำให้บวม (swelling) ด้วยของเหลวมอนอเมอร์ B หรือโอลิโกเมอร์ B
4. พอลิเมอไรซ์มอนอเมอร์ B ไปเป็นพอลิเมอร์ B
5. สุดท้ายเชื่อมโยงพอลิเมอร์ B

การทำเช่นนี้ทำให้พอลิเมอร์ผสมที่ถักกันอยู่อย่างหนาแน่น (tightly interwoven) บนโครงสร้างที่มีขนาดเล็กลง และทำให้เกิดโครงสร้างที่มีเสถียรภาพอย่างถาวร ด้วยเหตุนี้จึงทำให้เกิดวิธีการที่ซับซ้อนในการควบคุมการผลิตโครงสร้างแบบหลายวัฏภาค

2.6.4 สมบัติโดยทั่วไป [13]

สมบัติกับอัตราส่วนระหว่าง A และ B เมื่อพอลิเมอร์ A และ B นำมาผสมกันในอัตราส่วนจาก 100/0 ถึง 0/100 และเขียนกราฟระหว่างสมบัติกับอัตราส่วน A/B อาจสังเกตพฤติกรรมได้เป็นลักษณะใดลักษณะหนึ่งใน 4 แบบต่อไปนี้

แบบที่ 1 ละลายเข้ากันได้ (Miscible)

ถ้าพอลิเมอร์ละลายซึ่งกันและกันได้อย่างสมบูรณ์ในระดับโมเลกุล และเกิดเป็นวัฏภาคเนื้อเดียว โดยทั่วไปสมบัติที่ได้จะเป็นสัดส่วนกับอัตราส่วนของพอลิเมอร์ทั้งสองในพอลิเมอร์ผสมทำให้ได้กราฟเป็นเส้นตรงหรืออย่างน้อยที่สุดเป็นเส้นโค้งที่สม่ำเสมอ (simple monotonic curve) ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับหน่วยที่ใช้ในการวัดหรือการเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ เส้นโค้งแบบนี้อาจใช้ได้ ในทางทฤษฎีเพื่อให้คำจำกัดความเป็นระบบเนื้อเดียว (homogeneous system) หรืออย่างน้อยเพื่อจำกัดพฤติกรรมแบบเนื้อเดียว (homogeneous behavior) ในทางปฏิบัติมีประโยชน์สำหรับนักผลิตสารประกอบที่ต้องการผลิตสเปกตรัมสมดุลของสมบัติที่ได้ (spectrum of balance of properties) อย่างง่ายจากพอลิเมอร์ธรรมดาสองชนิด พบว่าระบบพอลิเมอร์ผสมในทางการค้าที่สำคัญหลายชนิดแสดงพฤติกรรมเช่นนี้

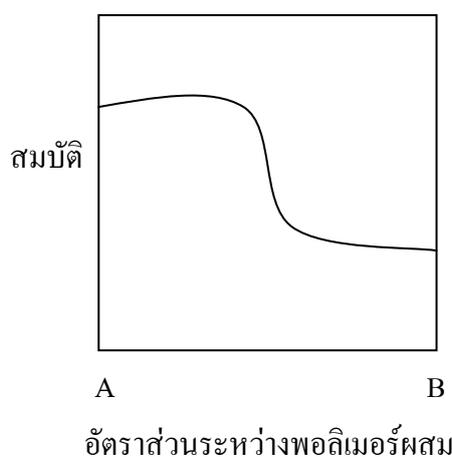
พฤติกรรมแบบเนื้อเดียนี้อาจจะสังเกตได้แม้ว่าพอลิเมอร์ทั้งสองไม่ละลายซึ่งกันและกันในระดับโมเลกุลโดยสามารถอธิบายด้วยเหตุผล 2 ประการ

1) สมบัติต่างๆ ขึ้นอยู่กับลักษณะโครงสร้างที่สำคัญ และไม่ไวต่อโครงสร้างในระดับไมโคร (fine-detail microstructure) ดังนั้นการทดสอบอย่างง่าย เพื่อที่จะเห็นการแยกของวัฏภาคเล็กๆ จึงทำไม่ได้ผล โดยทั่วไปการทดสอบในอัตราที่ต่ำ (conventional low-rate tests) เช่น มอดูลัส และการทดสอบการเบี่ยงเบนทางความร้อน (HDT) เป็นวิธีที่ใช้กันสำหรับพฤติกรรมแบบนี้ ในขณะที่อาจทำให้การวิเคราะห์ในทางทฤษฎีเกิดความผิดพลาดแต่ก็เป็นที่ยอมรับกันสำหรับนักผลิตสารประกอบ และการประยุกต์ใช้ทางพอลิเมอร์ผสม

2) การไหลของหลอมเหลวที่อัตราความเค้นสูงจะเป็นแบบทิศทางเดียว โดยเฉพาะในการอัดรีด (extrusion) จะทำให้เกิดโครงสร้างแบบลามลลา ซึ่งพอลิเมอร์ที่ไม่ละลายสองชนิดเกิดเป็นอนุกรมสลับกัน อยู่ในโครงสร้างของวัฏภาคต่อเนื่อง จากนั้นเป็นการทดสอบตามแนวแกน (axial tests) เช่น สมบัติแรงดึง ที่ใช้วัดสมบัติเฉลี่ยที่คำนวณจากพื้นที่ภาคตัดขวางสัมพัทธ์ของวัฏภาคทั้งสองในส่วนผสมซึ่งจุดนี้เป็นส่วนที่ทำให้เกิดข้อผิดพลาดในทางทฤษฎีได้ แต่สมบัติที่ได้จะมีประโยชน์ในทางปฏิบัติสำหรับผลิตภัณฑ์เฉพาะงาน

แบบที่ 2 การผสมเข้ากันได้แบบกึ่งหนึ่ง (Semi-Compatible)

เมื่อพอลิเมอร์สองชนิดผสมกันแล้วไม่ละลายเข้ากันและแยกออกเป็นวัฏภาคเมตริกซ์แบบต่อเนื่อง และควบคุมสมบัติทั้งหมดไว้ในขณะที่พอลิเมอร์รองจะเกิดเป็นโดเมนกระจายตัว (dispersed domain) และกระทำหน้าที่เหมือนเป็นสารเติมซึ่งมีผลเพียงส่วนน้อยต่อสมบัติที่ได้ ด้วยเหตุนี้อัตราส่วนระหว่าง A และ B ที่สูงจะมีสมบัติคล้ายกับพอลิเมอร์ A และอัตราส่วนระหว่าง B และ A ที่สูงจะมีสมบัติคล้ายกับพอลิเมอร์ B และแน่นอนเมื่ออัตราส่วนระหว่าง A และ B เท่ากันจะทำให้เกิดการเปลี่ยนกลับของวัฏภาค (phase inversion) ด้วยการเปลี่ยนแปลงสมบัติอย่างรวดเร็วจากวัฏภาค (two-phase system) ดังแสดงในรูปที่ 2.20



รูปที่ 2.20 แสดงการผสมเข้ากันได้แบบกึ่งหนึ่ง [13]

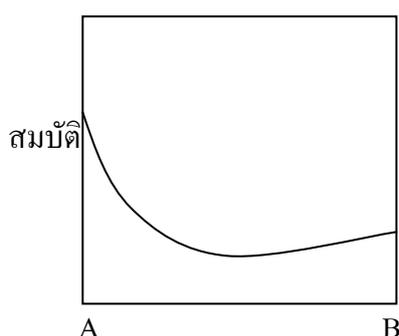
ความสำคัญของระบบนี้คือการสังเกตเห็นวัฏภาครอง (minor phase) ของโดเมนกระจายตัว โดยใช้ผลของส่วนผสมหลักร่วม (major synergistic effects) ที่มีสมบัติเฉพาะและไม่เกิดอย่างรุนแรงไปจากสมบัติที่ใช้ของวัฏภาคเมตริกซ์ชนิดต่อเนื่องหลักมากนัก ด้วยเหตุนี้การกระจายตัวของโดเมนขนาดเล็กมากๆ ในเมตริกซ์พลาสติกชนิดแข็งจึงสามารถทำให้เกิดส่วนผสมเพิ่มขึ้นอย่างมากทางด้านความทนทานต่อแรงกระแทก โดยไม่มีผลมากนักจากความแข็งแรง ความแข็ง อุณหภูมิการเบี่ยงเบนทางความร้อน และความต้านทานต่อสารเคมีของวัฏภาคเมตริกซ์ชนิดต่อเนื่อง สิ่งนี้จัดเป็นพื้นฐานพลาสติกชนิดแข็งและทนทานต่อแรงกระแทกสูง ซึ่งจัดสัดส่วนที่สำคัญของพอลิเมอร์ผสมในทางการค้า ในทางตรงกันข้ามการกระจายตัวของโดเมนเทอร์โมพลาสติกชนิดแข็งและมีขนาดเล็กมาก ในวัฏภาคเมตริกซ์ชนิดต่อเนื่องประเภทยางเทอร์โมพลาสติกจะสามารถเชื่อมพันธะของโมเลกุลเข้าด้วยกัน โดยการเชื่อมโยงทางกายภาพทำให้เกิดความแข็งแรงและความยืดหยุ่นที่ดี โดยไม่มีการเสียสมบัติของความสามารถทางกระบวนการเทอร์โมพลาสติก และด้วยเหตุนี้จึงเกิดสาขาทางด้านอิลาสโตเมอร์เทอร์โมพลาสติก

ตามทฤษฎีแบบทั่วไปพอลิเมอร์หลักเกิดเป็นวัฏภาคเมตริกซ์แบบต่อเนื่องและเกิดเป็นช่วงของสมบัติ (property plateau) ส่วนโดเมนชนิดกระจายตัวจะช่วยให้ปรับปรุงช่วงของสมบัติให้เป็นสัดส่วนกับพื้นที่ภาคตัดขวาง โดยทำหน้าที่เหมือนเป็นอนุภาคของสารเติมแบบไม่ต่อเนื่องที่แน่นอนในช่วงของสมบัติที่ไม่ได้มีลักษณะแบนราบทั้งหมด

ในทางทฤษฎีอาจมีความซับซ้อนมากขึ้น เนื่องจากกฎของวัฏภาคจะกล่าวถึงการละลายของพอลิเมอร์ลงในวัฏภาคเมตริกซ์แบบต่อเนื่องของพอลิเมอร์หลัก สิ่งนี้ทำให้เกิดการปรับปรุงสมบัติให้แข็งแรงมากขึ้นเหมือนพฤติกรรมแบบที่ 1 ด้วยเหตุนี้ความเด่นชัดระหว่างแบบที่ 1 และแบบที่ 2 จึงไม่มีความแตกต่างทางคุณภาพอย่างแน่นอนเพียงแต่อยู่ในระดับหนึ่งเท่านั้น จากการศึกษาอนุกรมของพอลิเมอร์ A และ B ด้วยสเปกตรัมของการละลายได้บางส่วน ในบางครั้งระบุให้เห็นว่าสเปกตรัมของเส้นโค้งสอดคล้องกันระหว่างพฤติกรรมแบบที่ 1 และแบบที่ 2

แบบที่ 3 ไม่สามารถผสมเข้ากัน (Incompatible)

เมื่อพอลิเมอร์สองชนิดไม่ละลายซึ่งกันและกันอย่างสมบูรณ์ และแยกออกเป็นวัฏภาคโดยอาจมีการดึงดูระหว่างกันเล็กน้อย โดยระหว่างผิว (interface) ของวัฏภาคทั้งสองอ่อนแอกว่าด้วยเหตุนี้จึงอาจเกิดความล้มเหลวได้แม้ที่ความเค้นต่ำมากๆ ทั้งทางกล ทางความร้อนหรือทางเคมี จากนั้นสมบัติของผสมอาจจะลดต่ำลงมากกว่าพอลิเมอร์แต่ละตัวที่มีอยู่ในของผสม สมบัติที่ว่องไวในเรื่องนี้คือความแข็งแรงดึงสุดท้ายและการดึงยืด ณ จุดขาดซึ่งบ่งบอกให้ทราบถึงความไม่สามารถละลายเข้ากันได้เลย และโดยทั่วไปเป็นคำจำกัดความที่สำคัญของความไม่สามารถเข้ากันได้ (incompatibility) ในทางปฏิบัติสภาวะที่คล้ายกันจะมีผลต่อความว่องไวของสารเคมี เช่น การแตกหักเนื่องจากความเค้นทางสิ่งแวดล้อมอาจจะมีผลเนื่องจากการที่ระหว่างผิวอ่อนแอ ดังแสดงในรูปที่ 2.21



อัตราส่วนระหว่างพอลิเมอร์ผสม

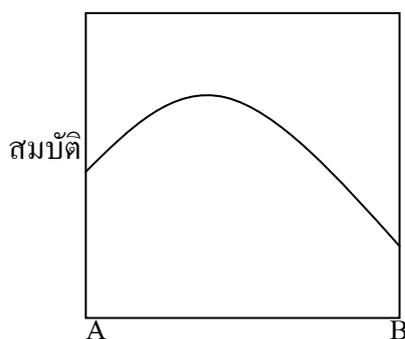
รูปที่ 2.21 ความไม่สามารถผสมเข้ากันได้ [13]

ในทางปฏิบัติวิธีพิสูจน์ประโยชน์ที่ได้คือความสามารถในการหลอมเหลวในบางระบบที่ไม่สามารถละลายเข้ากันมากๆทำให้ขาดการดึงดูดระหว่างผิวเกิดการไหลของหลอมเหลวได้ง่ายมากและอาจใช้ปรับความสามารถในการหลอมเหลว ในทางปฏิบัติมีโน้ตที่สั้นนี้จัดว่าค่อนข้างใหม่และไม่ได้มีการศึกษากันโดยตลอดเพื่อบ่งบอกถึงประโยชน์สุดท้าย

แบบที่ 4 ร่วมผสม (Synergistic)

พอลิเมอร์ผสมอาจแสดงสมบัติที่ดีกว่าพอลิเมอร์แต่ละตัวที่นำมาผสม เนื่องจากมีการปรับปรุงส่วนผสมที่สำคัญในทางปฏิบัติ ตัวอย่างหนึ่งของปรากฏการณ์นี้คือการใช้โดเมนยางชนิดกระจายตัวเพิ่มความทนทานต่อแรงกระแทกของเมตริกซ์ที่มีลักษณะคล้ายแก้วและเปราะ ตัวอย่างที่นำมาใช้กัน ได้แก่ พอลิสไตรีนชนิดทนทานต่อแรงกระแทกสูง พอลิเมอร์ร่วมระหว่างอะครีโลไนไตรล์บิวทาไดอีนสไตรีน พอลิไวนิลคลอไรด์ชนิดแข็ง และพอลิพรอพิลีนชนิดทนทานต่อแรงกระแทกสูง นอกจากนี้ยังมีพลาสติกในทางวิศวกรรม ได้แก่ เรซินเอพอกซีและไนลอน เป็นต้น ในระบบทั้งหมดพอลิเมอร์ประเภทยางเป็นพวกที่ไม่ละลายเข้ากันทำให้เกิดเป็นโดเมนยางที่ไม่ต่อเนื่องและไม่ทำให้เกิดการเบี่ยงเบนอย่างรุนแรงในทางด้านความแข็งแรง ความแข็ง การเบี่ยงเบนทางความร้อนและความต้านทานต่อสารเคมีของเมตริกซ์ต่อเนื่อง แต่พันธะระหว่างผิว (interfacial bonding) แข็งแรงพอที่จะส่งผ่านความเค้นระหว่างวัสดุทั้งสองและด้วยเหตุนี้จึงเกิดการรวมสมบัติที่ดีที่สุดไว้ในแต่ละวัสดุ ดังแสดงในรูปที่ 2.22

ความสำคัญของระบบร่วมผสมในทางปฏิบัติเห็นได้อย่างเด่นชัด การอธิบายในทางทฤษฎีมีปัญหาเป็นอย่างมากและมีทฤษฎีมากมายที่น่าสนใจที่จะนำมาใช้อธิบายปรากฏการณ์นี้ จึงเป็นงานที่สำคัญงานหนึ่งของการวิจัยในปัจจุบัน ได้แก่ เรื่องกลศาสตร์ของการแตกหัก (fracture mechanics) เมื่อเกิดความเข้าใจในทฤษฎีมากขึ้นจึงหวังว่าจะสามารถนำการร่วมผสมมาใช้ให้เกิดประโยชน์มากขึ้นด้วย



รูปที่ 2.22 ระบบร่วมผสม [13]

สมบัติแต่ละชนิด เมื่อได้มีการศึกษาถึงสมบัติที่แตกต่างกันของระบบพอลิเมอร์ผสมหนึ่ง นักวิจัยพบว่าสมบัติที่ได้ อาจมีการกระทำตามแบบที่ 1 แบบที่ 2 แบบที่ 3 หรือแบบที่ 4 ก็ได้ ถ้าใช้การจำแนกลักษณะนี้เพื่อวิเคราะห์การละลายและการแยกวัสดุตามทฤษฎีลักษณะปรากฏที่ได้

อาจก่อให้เกิดความวุ่นวาย โดยทั่วไปสมบัติบางประการเกิดจากกลไกสุทธิ (gross mechanisms) โดยแบบที่ 1 ไม่ว่องไวต่อการแยกวัฏภาคขนาดเล็กในระดับที่ละเอียด ในขณะที่สมบัติอื่นว่องไวต่อการแยกวัฏภาคขนาดเล็กที่ละเอียด (fine-scale microphase separation) และอาจแสดงพฤติกรรมเป็นแบบ 2 หรือแบบที่ 3 ก็ได้ ความสามารถเข้ากันได้ในทางปฏิบัติ (practical compatibility) เช่น ความสัมพันธ์ที่แตกต่างกันทำให้วิศวกรเลือกและใช้ความสมดุลของสมบัติที่มีประโยชน์มากขึ้น โดยไม่สามารถทำนายได้จากการละลายทางเทอร์โมไดนามิกส์ (thermodynamic miscibility) ธรรมดาทั่วไป

2.7 กระบวนการหล่อขึ้นรูป (casting) [14]

การหล่อ (casting) จัดเป็นกระบวนการขึ้นรูปชนิดหนึ่งโดยการนำของไหลหรือสารละลายที่เป็นมอนอเมอร์หรือพอลิเมอร์เหลวในแม่พิมพ์เปิด (open mold) ซึ่งเป็นที่เกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันหรือการบ่ม (curing) การหล่ออาจจะทำให้อยู่ในรูปของแผ่นฟิล์ม หรือแผ่นซีทก็ได้โดยการเทเรซินที่เป็นของเหลวให้ไหลผ่านสายพานหรือทำให้เกิดการตกตะกอนในภาชนะที่มีสารเคมีอยู่ (chemical bath) เป็นต้น

การหล่อแตกต่างจากเทคนิคอื่นๆ ดังนี้คือ

1. โดยทั่วไปไม่ต้องอาศัยความดัน แต่ถ้าขึ้นงานซับซ้อนและมีเป็นจำนวนมากก็จำเป็นต้องอาศัยความดัน และเรียกวิธีการนี้ว่า การหล่อแบบใช้ความดัน (pressure casting)
2. วัสดุตั้งต้นจะใช้เป็นของเหลวมากกว่าจะใช้เป็นเม็ดหรือผงเหมือนที่ใช้กันอยู่ทั่วไปในการอัดแบบขึ้นรูปอื่นๆ
3. โดยทั่วไปนิยมใช้มอนอเมอร์มากกว่าพอลิเมอร์

มีการหล่อหลายแบบที่ไม่จัดอยู่ตามข้อจำกัดข้างต้น แต่มีชื่อเรียกเป็นการหล่อเหมือนกัน เช่น การหล่อแบบชนิดอัดขึ้นรูป (extrusion casting) วิธีการนี้เป็นการอัดรีดเรซินไปบนผิวของลูกกลิ้งขัดมันที่มีน้ำหล่อเย็นเป็นตัวควบคุมอุณหภูมิ การหล่อแบบหมุนเหวี่ยง (centrifugal casting) นิยมใช้กับพลาสติกเสริมแรง (reinforced plastics) วิธีนี้ทำได้โดยนำเรซินและเส้นใยไฟเบอร์กลาสชนิดตัด (chopped fibrous glass) มาวางลงในแผ่นเหล็กหมุนกลวง (hollow mandrel) ซึ่งวางอยู่ตรงกลางเพื่อยึดตัวงาน แผ่นเหล็กหมุนนี้จะหมุนเข้าไปในเตาอบ ทำให้เรซินกระจายอย่างสม่ำเสมอเข้าไปยังพื้นผิวด้านในของส่วนที่กลวงโดยอาศัยแรงที่เกิดขึ้นเกิดการบ่มตัวได้ผลิตภัณฑ์กลวงสำเร็จเป็นชิ้นงานต่อไป

การหล่อยังเป็นที่นิยมใช้กันอยู่ เนื่องจากราคาของแม่พิมพ์ค่อนข้างถูก ใช้เวลาในการทำน้อย และอุปกรณ์ช่วยมีราคาไม่แพง เช่น ใช้เตาอบช่วยบ่มได้ทั้งชิ้นงานขนาดเล็กหรือขนาดใหญ่ ได้ความหนาตามต้องการ อีกทั้งการผ่านเครื่องจักร และการตกแต่งชิ้นงานก็มีน้อย นอกจากนี้ยังทำได้เร็วโดยไม่ต้องอาศัยอุปกรณ์พิเศษซึ่งมีราคาแพงมาช่วย การหล่อพลาสติกขึ้นอยู่กับชนิดของ

พลาสติกและวัสดุประสงค์ของการใช้งาน มีชื่อเรียกกระบวนการผลิตแตกต่างกันออกไป ในที่นี้จะขอยกตัวอย่างพลาสติกบางชนิดที่นิยมใช้วิธีนี้ได้แก่ อะคริลิก ฟีนอลิก เอฟอกซี พอลิเอสเทอร์ พอลิยูรีเทน และไนลอน เป็นต้น

2.7.1 การหล่อพอลิเอสเทอร์

พอลิเอสเทอร์นิยมนำมาใช้ในกระบวนการหล่อ เนื่องจากราคาถูก ใช้ได้ง่ายและหาได้โดยทั่วไป เทของเหลวพอลิเอสเทอร์ที่ผสมตัวเร่งปฏิกิริยาลงในแม่พิมพ์จะเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันและได้รูปทรงตามต้องการ พอลิเอสเทอร์นำมาหล่อได้ดีเมื่อเวลาและอุณหภูมิเปลี่ยนไปทำให้เกิดความแข็งหลายระดับเทคนิคหนึ่งที่น่าสนใจคือ การเทด้วยมือ (hand pouring techniques) ซึ่งมีวิธีการ 3 ขั้นตอน ดังนี้คือ

1. เตรียมเรซินผสมที่ต้องการรวมทั้งเติมสารเติมแต่ง เม็ดสี และอื่นๆลงในสูตรผสมที่ต้องการ
2. เติมตัวเร่งปฏิกิริยาลงในสูตรผสม แล้วเทลงในแม่พิมพ์
3. เมื่อได้เวลาของการบ่ม แยกชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์

ในการหล่อพอลิเอสเทอร์อาจใช้ในการหล่อแบบหมุนเหวี่ยงและแบบหมุนเป็นวง (centrifugal and rotation casting) มาใช้กับชิ้นงานชนิดกึ่งเหลวได้อีกด้วย การหล่อแบบหมุนเหวี่ยงจะทำให้เกิดการหล่อของวัตถุกลง โดยอาศัยการหมุนแม่พิมพ์ตามแนวแกนที่ความเร็ว 100 รอบต่อนาที ในขณะที่การหล่อแบบหมุนสองแกนทำให้เกิดการหมุนในสองแกนด้วยความเร็วในการหมุนน้อยกว่า 10 รอบต่อนาที หลักการนี้คล้ายกับการอัดแบบชนิดเท (slushing)

2.7.2 แม่พิมพ์ของการหล่อพอลิเอสเทอร์

แม่พิมพ์ของการหล่อประเภทนี้สามารถแบ่งออกเป็น 2 กลุ่มคือ แม่พิมพ์แบบแข็ง (rigid molds) กับแม่พิมพ์แบบยืดหยุ่น (flexible mold)

2.7.2.1 แม่พิมพ์แบบแข็ง นิยมใช้เมื่อมีการดึงโครงร่าง (draft) ที่เพียงพอและไม่มีอันเดอร์คัทมาขัดขวางขณะเอาแม่พิมพ์ออก ประโยชน์ของแม่พิมพ์แบบนี้คือ ค่าใช้จ่ายในการทำเครื่องมือต่ำและอายุการใช้งานนาน โครงสร้างทำจากวัสดุต่างๆกันดังนี้คือ ไฟเบอร์กลาส เอฟอกซีหล่อ (cast epoxy) โลหะหล่อ (cast metal) ยูรีเทนหล่อ (cast urethane) และแผ่นซีทีเทอร์โมพลาสติกที่เกิดจากระบบสุญญากาศ

2.7.2.2 แม่พิมพ์แบบยืดหยุ่น เหมาะกับชิ้นงานที่มีอันเดอร์คัท หรือมีการดึงโครงร่างไม่เพียงพอทำให้ใช้แม่พิมพ์แบบแข็งไม่ได้ แม่พิมพ์แบบยืดหยุ่นที่นิยมใช้กันมากได้แก่ ยางซิลิโคน (silicone rubber) เนื่องจากมีความเหนียวสูง และทนทานต่อสารเคมีอีกทั้งมีการคายความร้อนที่ดี นอกจากนี้ยังมีสมบัติการปลดปล่อยตัวเองได้ (self-releasing properties) ซึ่งทำให้ไม่ต้องอาศัยสารช่วยในการปลดปล่อย (release agents) อีลาสโตเมอร์ยูรีเทน (urethane elastomers) เป็นที่นิยมนำมา

ทำแม่พิมพ์แบบยืดหยุ่น เนื่องจากมีสมบัติคล้ายคลึงกับยางใน คือมีความยืดหยุ่นและความเหนียวแต่ไม่มีสมบัติการปลดปล่อย ไวนิลพลาสติกโซล (vinyl plastisol) ใช้ทำแม่พิมพ์ชนิดนี้ได้เช่นกัน ไวนิลไม่เกิดเป็นเจลหรือบวมตัวเหมือนกับตัวอื่นแต่มีความยืดหยุ่นสูงมาก โดยปกติจะอยู่ในรูปของของเหลว ถ้านำมาใช้ต้องทำให้ร้อนถึงอุณหภูมิประมาณ 77°C จากนั้นจึงเทลงในแบบที่มีการให้ความร้อนไว้ก่อน (preheating) แม่พิมพ์ชนิดนี้เหมาะกับอันเดอร์คัทแบบร่องลึก (deep undercut) แต่เนื่องจากมีความต้านทานต่อสารเคมีต่ำจึงทำให้ไม่มีความเสถียรในเรื่องของขนาด

2.8 เอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

A. Pourjavadi, A.M. Harzandi และ H. Hosseinzadeh, (2004) [15] การตัดแปรสำหรับ carrageenan เพื่อสังเคราะห์เป็น superabsorbent hydrogel โดยการกราฟต์โคพอลิเมอร์ของ acrylic acid บน kappa-carrageenan ในอากาศ โดยการใส่สารเชื่อมโยงและอนุมูลอิสระเป็นตัวริเริ่มปฏิกิริยา การเกิดพอลิเมอร์ของ Polyacrylic acid กราฟต์บน kappa-carrageenan ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสารเชื่อมโยง ความเข้มข้นของมอนอเมอร์ ความเข้มข้นของตัวริเริ่มปฏิกิริยา และอุณหภูมิขณะผสม จากการทดลองพบว่า ไฮโดรเจลสามารถดูดซับน้ำได้ดีที่สุดได้ 789 g/g เมื่อเทียบกับน้ำหนักก่อนแช่น้ำ ศึกษาการบวมตัวในสารละลายเกลือชนิดต่างๆ พบว่าต้องเตรียมที่สถานะเป็นกลางใช้ persulfate เป็นตัวริเริ่มปฏิกิริยา และใช้สารเชื่อมโยงที่มีหมู่ชอบน้ำสองหมู่

A. Pourjavadi, M. Kurdtabar, Gholam R. Mahdavinia, และ H. Hosseinzadeh, (2006) [16] ในงานวิจัยนี้ได้สังเคราะห์ protein-based superabsorbent hydrogel และศึกษาพฤติกรรมการบวมตัวโดยเตรียม acrylic acid กราฟต์บนคอลลาเจนซึ่งเป็นโปรตีนได้จากไขกระดูกใช้ potassium persulfate (KPS) เป็นตัวริเริ่มปฏิกิริยาและใช้ N,N'-methylene bisacrylamide (MBA) เป็นสารเชื่อมโยง นำไปพิสูจน์ลักษณะโครงสร้างด้วย FTIR ในการเตรียมไฮโดรเจลขึ้นอยู่กับปัจจัยคือความเข้มข้นของสารเชื่อมโยง ความเข้มข้นของมอนอเมอร์ ความเข้มข้นของตัวริเริ่มปฏิกิริยา และอุณหภูมิขณะผสม จึงได้ไฮโดรเจลที่มีความสามารถในการบวมตัวในน้ำถึง 920 g/g เมื่อเทียบกับน้ำหนักของไฮโดรเจลก่อนแช่น้ำ ศึกษาการบวมตัวในสารละลายเกลือชนิดต่างๆ และการบวมตัวในสารละลายที่ pH 1-13 ซึ่งพฤติกรรมการบวมตัวและไม่บวมตัวของไฮโดรเจลในสารละลายที่เป็นกรดและเบสทำให้ไฮโดรเจลเหมาะที่จะนำไปทำเป็น drug delivery systems เนื่องจากโปรตีนที่ใช้เป็นโปรตีนจากกระดูก จึงคาดว่าน่าจะเข้ากับร่างกายของมนุษย์ได้

A. Pourjavadi, R. Mahdavinia, และ H. Hosseinzadeh, (2005) [17] ในงานวิจัยนี้ได้ปรับปรุง carrageenan สังเคราะห์ superabsorbent hydrogel 2-acrylamido-2-methylpropanesulfonic acid (AMPS) กราฟต์บน kappa-carrageenan ใช้ ammonium persulfate (APS) เป็นตัวริเริ่มปฏิกิริยาและใช้ N,N,N',N'-tetramethyl ethylenediamine (TMEDA) เป็นตัวเร่ง ใช้ N,N'-methylene bisacrylamide (MBA) เป็นสารเชื่อมโยง นำไปพิสูจน์ลักษณะโครงสร้างด้วย FTIR สมบัติการดูด

ชั้นน้ำของไฮโดรเจลขึ้นอยู่กับ ความเข้มข้นของสารเชื่อมโยง ความเข้มข้นของมอนอเมอร์ ความเข้มข้นของตัวริเริ่มปฏิกิริยา และอุณหภูมิขณะผสม ศึกษาการบวมตัวในสารละลายเกลือชนิดต่างๆ LiCl, NaCl, KCl, MgCl₂, CaCl₂, SrCl₂, BaCl₂, และ AlCl₃ และการบวมตัวในสารละลายที่ pH 1-13

R.M.D. Soares, A.M.F. Lima, R.V.B. Oliveira, A.T.N. Pires, และ V. Soldi (2005) [18] ศึกษาการเตรียมฟิล์มจากแป้งข้าวโอ๊ตและแป้งข้าวโพดผสมกับ Xanthan ที่อัตราส่วน Xanthan/แป้งที่แตกต่างกัน นำมาวิเคราะห์ Thermogravimetric analysis และ FTIR จากการศึกษาพบว่า การเติมแป้งไปผสมกับ Xanthan ทำให้ความเสถียรทางความร้อนของฟิล์มเพิ่มขึ้น

M. Schou, A. Longares, C. Montesinos-Herrero, F.J. Monahan, D. O’Riordan, และ M. O’Sullivan (2005) [19] ศึกษาสมบัติของฟิล์ม sodium caseinate โดยเตรียมจาก Glycerol กับ Protein ในอัตราส่วนที่แตกต่างกัน นำไปทดสอบสมบัติเชิงกล ศึกษาการนำไปประยุกต์ใช้ห่ออาหารโดยนำฟิล์มไปห่อขนมปังที่ระยะเวลาต่างๆ จากการศึกษาพบว่าปริมาณ Glycerol เพิ่มขึ้นปริมาณความชื้นก็เพิ่มขึ้นด้วย ค่า Tensile strength , Elastic modulus ลดลง หลังจากนำฟิล์มมาห่อขนมปัง 6 ชั่วโมงพบว่าฟิล์มมีความแข็งแรงลดลง

S.K.Bajpai (1999) [20] ศึกษา Hydrogels โดยการนำ casein มา crosslink กับ polyacrylamide และศึกษาพฤติกรรมการบวมตัวและการปลดปล่อยยา จากการศึกษาพบว่าใช้ casein มาละลายใน NaOH เติม monomer Acrylamide, N,N’-Methylenebisacrylamide(crosslink), Sodium Metabisulphite(initiator), Potassium Persulphate(initiator) และน้ำ ได้ casein crosslink กับ polyacrylamide และพบว่า Hydrogels บวมตัวได้มากที่สุดที่สภาวะเป็นกลาง

ณรงค์ ยุคันตรพรพงษ์และคณะ (1981) [21] ศึกษาการแยกสารที่มีสมบัติในการพองตัวจากเม็ดแมงลักเพื่อใช้ในการเกษตรอุตสาหกรรมและเภสัชกรรม สารเมือก (mucilage) ซึ่งได้การพองตัวในน้ำของเม็ดแมงลัก มีสมบัติที่น่าสนใจ การแยกสารเมือกออกจากเม็ด และทำให้อยู่ในรูปของผงแห้ง ใช้กรรมวิธีแบบง่ายๆ และผงเมือกแห้งที่ได้นี้ ได้นำไปศึกษาสมบัติทางกายภาพในแนวทางที่จะนำไปใช้ประโยชน์ อาทิเช่น ศึกษาสมบัติการไหล, ความหนืด, การพองตัวในน้ำที่มี pH ต่างๆ และความคงตัวของสารเมือกอันเป็นสมบัติที่เกี่ยวข้องกับการนำเอาสารเมือกไปใช้เป็นสารช่วยให้เกิดการแขวนลอย (suspending agent) ศึกษาปริมาณความชื้นที่มีในผงแห้งและความสามารถในการดูดความชื้น เพื่อเป็นข้อมูลในการนำเอาผงเมือกแห้ง ไปดกเป็นเม็ดหรือแคปซูล หรือในการเก็บรักษาผงเมือกแห้ง นอกจากนี้ได้ทดลองเตรียมยาน้ำแขวนตะกอน โดยใช้สารเมือกจากเม็ดแมงลักนี้เป็นสารช่วยให้เกิดการแขวนลอย

S. Mathew, M. Brahmakumar, และ T. Abraham (2006) [22] ศึกษา microstructural สมบัติเชิงกล สมบัติทางเคมี สมบัติทางความร้อนและสมบัติการพองตัวของฟิล์มที่ทำมาจากแป้งมันฝรั่งผสมกับไคโตซานขึ้นรูปฟิล์มโดยการหล่อแล้วนำไปประเหยตัวทำละลายออกไป จากการศึกษาทดลองพบว่าเมื่อปริมาณแป้งมากขึ้นทำให้สมบัติการพองตัวดีขึ้น แป้งกับไคโตซานมีแรงกระทำ

ระหว่างกันจากหมู่ไฮดรอกซิลของแป้งกับหมู่อะมิโนของไคโตซาน การทนต่อความร้อนเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณแป้งเพิ่มขึ้น फिल्मไคโตซานจะเรียบและเป็นเนื้อเดียวกัน ในขณะที่ฟิล์มแป้งมีเม็ดทรงกลมเล็กๆ फिल्मแป้งกับไคโตซานเข้ากันได้ค่อนข้างดี फिल्मที่ได้มีความ flexible สูงขึ้นและมี %elongation คีขึ้นด้วย

L. Wen-Fu, และ C. Chin-Fu (1998) [23] ศึกษาการสังเคราะห์และพฤติกรรมการพองตัวของไฮโดรเจลจาก 2-hydroxyethyl methacrylate (HEMA) โคพอลิเมอร์กับ N,N'-dimethyl(acrylamido propyl) ammonium propane sulfonate (DMAAPS) โดยใช้ Ammonium persulfate (APS) และ N,N,N',N',tetramethyl-ethylenediamine (TEMED) เป็น redox initiator จากการศึกษาทดลองพบว่าพฤติกรรมพองตัวขึ้นอยู่กับธรรมชาติของไฮโดรเจลคือ จำนวนประจุ และสถานะแวดล้อมคือ ค่า pH และอุณหภูมิ เมื่อปริมาณ DMAAPS เพิ่มขึ้นพฤติกรรมพองตัวก็จะเพิ่มขึ้นด้วย ที่อุณหภูมิสูงขึ้นเวลาที่ใช้ในการพองตัวก็จะลดลง และมีลักษณะโปร่งแสง

ธีระพล มณีวรรณท์กุล, สุวิทย์ เอื้อโสภณ, อรกมล ทองใบ, (2544) [24] ศึกษาการเตรียมฟิล์มไฮโดรเจล (Hydrogel) ผสมระหว่างสารเมือก (Mucilage) ที่ได้จากการพองตัวของเมล็ดแมงลัก (*Ocimum canum sims.*) กับพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (PVA 3%w/w) ศึกษาอัตราส่วนและระยะเวลาในการปรับสภาพทางความร้อนที่เหมาะสมต่อการนำไปใช้งาน ทำการเปรียบเทียบค่าการดูดซับน้ำ (Water Uptake) และสมบัติเชิงกลของฟิล์มที่ได้จาก PVA อย่างเดียวที่ผ่านการปรับสภาพทางความร้อนที่ 100 °C เป็นเวลา 0, 2.5, 5 และ 10 นาที ตามลำดับ กับฟิล์มผสมระหว่างสารเมือกและ PVA ในอัตราส่วน 1:1 โดยปริมาตร และในอัตราส่วน 2:1 โดยปริมาตร โดยผ่านการปรับสภาพเช่นเดียวกับฟิล์มที่ได้จาก PVA อย่างเดียว ศึกษาสมบัติทางความร้อนของฟิล์มทั้ง 3 สูตร โดยใช้เทคนิค TGA และ DSC ในการตรวจสอบ จากการทดลองพบว่า สมบัติทางความร้อนของฟิล์มผสมจะแปรผันตามกับปริมาณของสารเมือกที่ใช้และระยะเวลาที่ใช้ในการปรับสภาพทางความร้อน และฟิล์มผสมในอัตราส่วน 2:1 ที่ผ่านการปรับสภาพทางความร้อนเป็นเวลา 2.5 นาทีให้สมบัติโดยรวมดีที่สุด โดยจะให้ค่าการดูดซับน้ำ 605.34 % ค่าความแข็งแรงดึง (Tensile Strength) 584 MPa และค่าความสามารถในการยืด (% Elongation at break) 16%

B. Ramarai, และ R. Radhakrishnan (1994) [25] งานวิจัยนี้ได้สังเคราะห์ไฮโดรเจลที่มีโครงสร้างร่างแหแบบสอดประสาน (Interpenetrating Hydrogel Network) จากเจลาตินและพอลิอะคริลาไมด์โดยใช้สารเชื่อมโยง ศึกษาพฤติกรรมพองตัวของไฮโดรเจลในน้ำและในสารละลายกรดซัลฟิวริกฟอสเฟตบัฟเฟอร์ที่ pH ต่างๆ วิเคราะห์ผลของอุณหภูมิที่มีต่อพฤติกรรมพองตัวจาก 25-60 °C เพื่อนำไปประยุกต์ใช้ทางด้านการแพทย์เป็น drug release