

รายงานการวิจัย

การสังเคราะห์พอลิ(เมทิลเมทาคริเลต) ที่ต่อกิ่งบนแป้งข้าวโพด
โดยใช้โพแทสเซียมเปอร์ซัลเฟตเป็นสารริเริ่มปฏิกิริยา

Synthesis of maize starch grafted poly(methylmethacrylate)
using potassium persulfate as initiator



ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วราภรณ์ ธนะกุลรังสรรค์

นางสาวกนกวรรณ จ้าวสุวรรณ

นายชัชวาลย์ สุขมัน

RMUTK - CARIT



โครงการวิจัยทุนสนับสนุนงานวิจัยของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

งบประมาณรายได้ ปี พ.ศ. 2550

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ ที่ได้สนับสนุนทุนวิจัยงบประมาณ
เงินรายได้ ประจำปี พ.ศ. 2550 และขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์
มหาวิทยาลัยที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี



บทคัดย่อ

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้ เพื่อศึกษาภาวะที่เหมาะสมในการสังเคราะห์พอลิ(เมทิลเมทาคริเลต) ที่ต่อกิ่งบนแป้งข้าวโพดซึ่งเป็นพอลิเมอร์ที่แตกสลายทางชีวภาพได้ โดยใช้โพแทสเซียมเปอร์ซัลเฟตเป็นสารริเริ่มปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 50°C ภายใต้บรรยากาศแก๊สไนโตรเจน โดยมีตัวแปรที่ศึกษา คือ ปริมาณเมทิลเมทาคริเลต (MMA) ปริมาณโพแทสเซียมเปอร์ซัลเฟต (PPS) และเวลาในการทำปฏิกิริยา จากการศึกษาพบว่าปริมาณการต่อกิ่งสูงสุดเท่ากับ 99.4% ที่อุณหภูมิ 50°C เมื่อใช้ MMA 50 mmol และ PPS 2 mmol และเวลาในการทำปฏิกิริยา 90 นาที ในการวิเคราะห์ด้วย FT-IR เพื่อยืนยันผลการต่อกิ่ง พบหมู่ไฮดรอกซิล (-OH) ที่พีก 3390.6 cm^{-1} และ 3513 cm^{-1} ซึ่งเป็นหมู่ทำหน้าที่ของแป้ง และพบหมู่คาร์บอนิล (>C=O) ที่พีกในช่วง $1950 - 1600\text{ cm}^{-1}$ ซึ่งเป็นหมู่ทำหน้าที่ของ MMA ในการวัดค่าความหนืดและคำนวณน้ำหนักโมเลกุลซึ่งเป็นสมบัติทางกายภาพของพอลิเมอร์ร่วมที่สังเคราะห์ได้ พบว่าความหนืดและน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยเพิ่มขึ้นเมื่อการต่อกิ่งเพิ่มขึ้น



ABSTRACT

The objective of this research was to study the optimum condition to synthesize maize starch grafted poly(methylmethacrylate) which is biodegradable polymer using potassium persulfate (PPS) as an initiator at the reaction temperature of 50°C under nitrogen gas atmosphere. The variables of study were amounts of methylmethacrylate (MMA) and potassium persulfate (PPS), and reaction time. It was found that the maximum grafting percentage of the grafted copolymer was 99.4% at 50°C with the amounts of MMA and PPS of 50 and 2 mmol, respectively and in the reaction time of 90 min. In order to confirm the grafted result, the grafted copolymer was characterized by FT-IR. The hydroxyl group (-OH) of starch was found at the peaks of 3390.6 cm^{-1} and 3513 cm^{-1} and the carbonyl group ($>\text{C}=\text{O}$) of MMA was found in the peak range of 1950-1600 cm^{-1} . Viscosity and average molecular weight, the physical properties of grafted copolymer, were investigated. It was found that the grafting percentage increased with an increase of the viscosity and the average molecular weight.

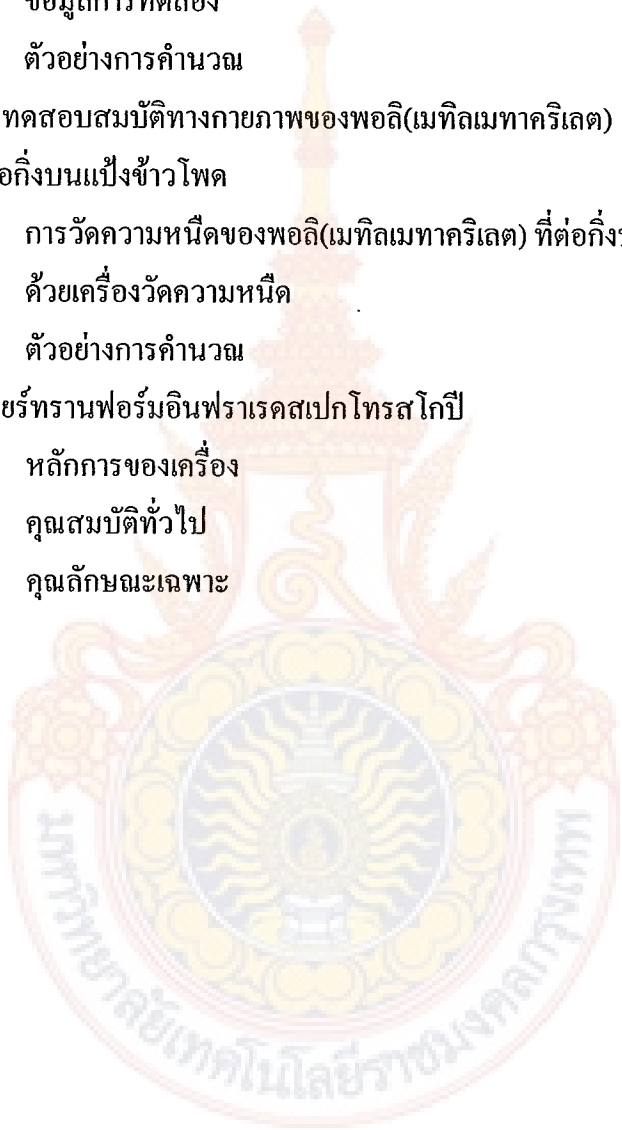


สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	ข
บทคัดย่อ	ค
ABSTRACT	ง
สารบัญ	จ
รายการตาราง	ช
รายการรูป	ฉ
บทที่	
1. บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	3
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
2. การทบทวนวรรณกรรม	5
2.1 แบ่ง	5
2.1.1 ความรู้เบื้องต้นและความสำคัญของแบ่ง	5
2.1.2 องค์ประกอบภายในเม็ดแบ่ง	6
2.1.3 ลักษณะของเม็ดสตาร์ชและ โครงสร้างของเม็ดสตาร์ช	9
2.1.4 สมบัติของแบ่ง	12
2.1.5 การคัดแปรแบ่ง	19
2.2 พอลิเมอร์	20
2.2.1 แร่ระหว่างโมเลกุลและพันธะเคมีในพอลิเมอร์	21
2.2.2 การจำแนกประเภทของพอลิเมอร์	22
2.3 พอลิเมอร์ร่วมจากแบ่งกับพอลิเมอร์สังเคราะห์	26
2.4 งานวิจัยที่ผ่านมา	27

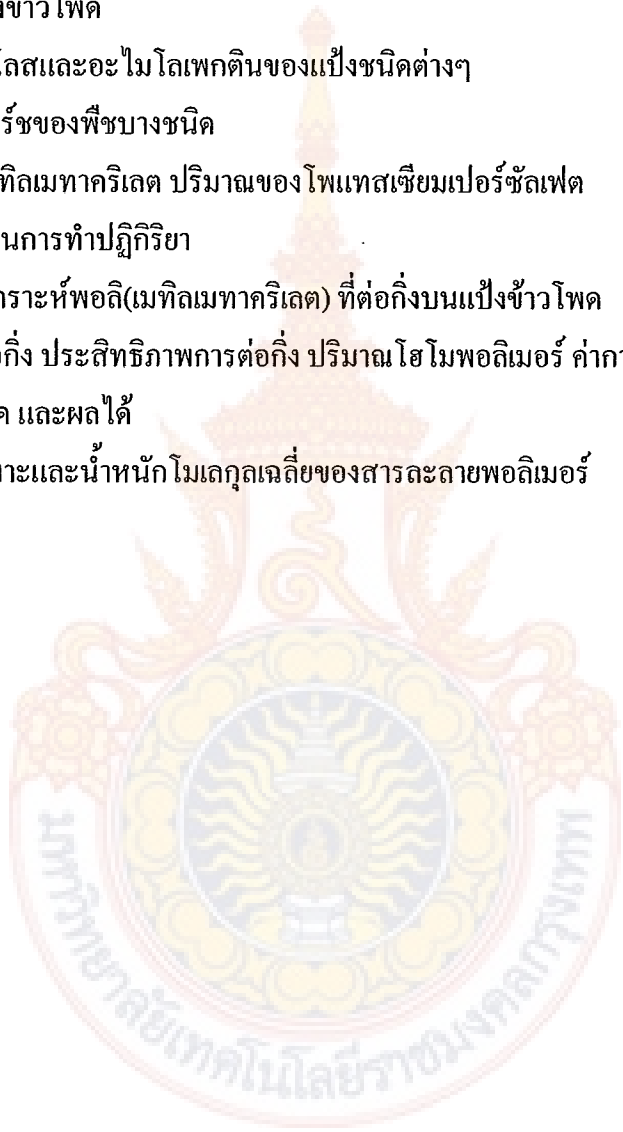
บทที่	หน้า
3. วิธีการวิจัย	30
3.1 วัสดุและอุปกรณ์	30
3.1.1 อุปกรณ์ในการทดลอง	30
3.1.2 วัสดุและสารเคมี	31
3.1.3 เครื่องมือทดลองและเครื่องมือวิเคราะห์	31
3.2 วิธีการทดลอง	31
3.2.1 การสกัดตัวยับยั้งออกจากเมทิลเมทาคริเลตมอนอเมอร์	31
3.2.2 การเตรียมพอลิ(เมทิลเมทาคริเลต) ที่ต่อกิ่งบนแป่งข้าวโพด	32
3.2.3 การสกัดพอลิเมอร์เอกพันธ์ออกจากพอลิเมอร์ร่วมแบบต่อกิ่งบนแป่งข้าวโพด	33
3.2.4 การวัดความหนืดของพอลิเมอร์ร่วมแบบต่อกิ่ง	33
3.2.5 การวิเคราะห์หมู่ทำหน้าที่ของพอลิเมอร์ร่วมที่สังเคราะห์ได้	35
4. ผลการทดลองและอภิปรายผล	36
4.1 พอลิ(เมทิลเมทาคริเลต) ที่ต่อกิ่งบนแป่งข้าวโพดที่สังเคราะห์ได้	36
4.2 ผลของเวลาในการเกิดปฏิกิริยาต่อสมบัติของพอลิ(เมทิลเมทาคริเลต) ที่ต่อกิ่งบนแป่งข้าวโพด	38
4.3 ผลของปริมาณของเมทิลเมทาคริเลตที่มีต่อสมบัติของพอลิ(เมทิลเมทาคริเลต) ที่ต่อกิ่งบนแป่งข้าวโพด	40
4.4 ผลของปริมาณของโพแทสเซียมเปอร์ซัลเฟตที่มีต่อสมบัติของพอลิ(เมทิลเมทาคริเลต) ที่ต่อกิ่งบนแป่งข้าวโพด	41
4.5 การวิเคราะห์หมู่ทำหน้าที่ของพอลิ(เมทิลเมทาคริเลต) ที่ต่อกิ่งบนแป่งข้าวโพด	42
4.6 สมบัติทางกายภาพของพอลิ(เมทิลเมทาคริเลต) ที่ต่อกิ่งบนแป่งข้าวโพด	44
5. สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	46
5.1 สรุปผลการวิจัย	46
5.2 ข้อเสนอแนะ	46
บรรณานุกรม	48

	หน้า
ภาคผนวก	50
ภาคผนวก ก ข้อมูลการวิจัย	50
ก.1 ข้อมูลการทดลอง	50
ก.2 ตัวอย่างการคำนวณ	50
ภาคผนวก ข การทดสอบสมบัติทางกายภาพของพอลิ(เมทิลเมทาคริเลต) ที่ต่อกิ่งบนแป้งข้าวโพด	53
ข.1 การวัดความหนืดของพอลิ(เมทิลเมทาคริเลต) ที่ต่อกิ่งบนแป้งข้าวโพด ด้วยเครื่องวัดความหนืด	53
ข.2 ตัวอย่างการคำนวณ	54
ภาคผนวก ค ฟลูเรีย์ทรานฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี	56
ค.1 หลักการของเครื่อง	56
ค.2 คุณสมบัติทั่วไป	57
ค.3 คุณลักษณะเฉพาะ	57
ประวัตินักวิจัย	58



รายการตาราง

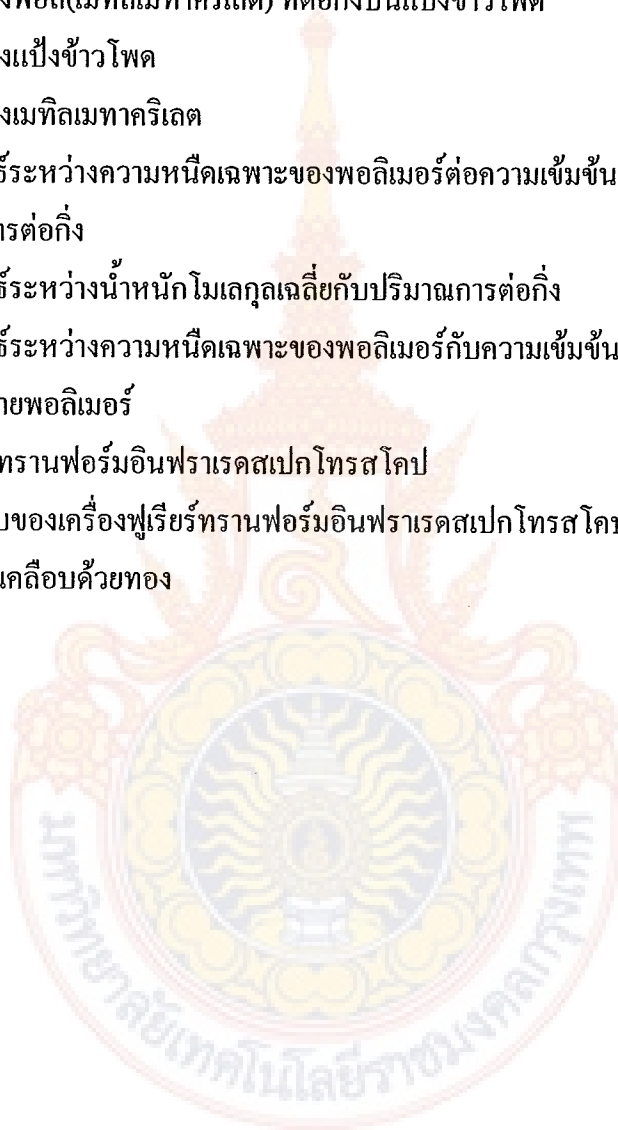
ตารางที่	หน้า
2.1 สมบัติของแป้งข้าวโพด	6
2.2 ปริมาณอะไมโลสและอะไมโลเพกตินของแป้งชนิดต่างๆ	9
2.3 สมบัติเม็ดสตาร์ชของพืชบางชนิด	18
3.1 ปริมาณของเมทิลเมทาคริเลต ปริมาณของโพแทสเซียมเปอร์ซัลเฟต และเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา	32
ก.1 ข้อมูลการสังเคราะห์พอลิ(เมทิลเมทาคริเลต) ที่ต่อกิ่งบนแป้งข้าวโพด	50
ก.2 ปริมาณการต่อกิ่ง ประสิทธิภาพการต่อกิ่ง ปริมาณไฮโดรพอลิเมอร์ ค่าการเปลี่ยน ค่าการเลือกเกิด และผลได้	52
ข.1 ความหนืดเฉพาะและน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยของสารละลายพอลิเมอร์	53



รายการรูป

รูปที่	หน้า
2.1 โครงสร้างของอะไมโลส	6
2.2 ลักษณะการเกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุลของพอลิแซ็กคาไรด์และการจับกับโมเลกุลของน้ำ	7
2.3 โครงสร้างของอะมิโลเพกทิน	8
2.4 การจัดเรียงตัวของโมเลกุลอะไมโลส และอะมิโลเพกทินในเม็ดแป้ง	10
2.5 ลักษณะ และรูปร่างของเม็ดสตาร์ชที่ได้จากพืชบางชนิด	11
2.6 การเปลี่ยนแปลงความหนืดของแป้งข้าวสาลี แป้งข้าวโพด แป้งมันฝรั่ง และแป้งมันสำปะหลัง	16
2.7 รูปแบบความหนืดของแป้งสูกชนิดต่างๆ เมื่อแบ่งตามกำลังการพองตัว	16
2.8 การเปลี่ยนแปลงของเม็ดแป้งในระหว่างการหุงต้ม	17
2.9 ลักษณะการพองตัวของเม็ดสตาร์ช และการเปลี่ยนแปลงความหนืดของสารละลาย	18
2.10 การเกิดรีโทรเกรเดชัน	20
2.11 กลไกการคืนตัวของแป้ง	20
2.12 การเกิดพอลิเมอร์แบบกึ่ง	25
2.13 การเกิดพอลิเมอร์แบบร่างแห	26
2.14 โครงสร้างโมเลกุลจำลองของกราฟต์พอลิเมอร์ร่วมของแป้ง	27
3.1 เครื่องฟูรีเยร์ทรานฟอรั่ม อินฟราเรดสเปกโทรโฟโตมิเตอร์	36
3.2 ส่วนประกอบของเครื่องฟูรีเยร์ทรานฟอรั่มอินฟราเรดสเปกโทรโฟโตมิเตอร์เป็นกระบอกที่เคลือบด้วยทอง	36
4.1ก PPS 1 mmol MMA 20 mmol เวลา 30 นาที	37
4.1ข PPS 1 mmol MMA 20 mmol เวลา 60 นาที	37
4.1ค PPS 1 mmol MMA 20 mmol เวลา 90 นาที	38
4.1ง PPS 1 mmol MMA 20 mmol เวลา 120 นาที	38
4.1จ PPS 1 mmol MMA 30 mmol เวลา 90 นาที	38
4.1ฉ PPS 1 mmol MMA 40 mmol เวลา 90 นาที	38
4.1ช PPS 1 mmol MMA 50 mmol เวลา 90 นาที	39

รูปที่	หน้า
4.4 ผลของปริมาณ PPS ที่มีต่อสมบัติของพอลิ(เมทิลเมทาคริเลต) ที่ต่อกึ่งบนแป้งข้าวโพด เมื่อใช้ MMA 50 mmol และเวลาในการเกิดปฏิกิริยา 90 นาที	42
4.5 สเปกตรัมของพอลิ(เมทิลเมทาคริเลต) ที่ต่อกึ่งบนแป้งข้าวโพด	43
4.6 สเปกตรัมของแป้งข้าวโพด	43
4.7 สเปกตรัมของเมทิลเมทาคริเลต	44
4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดเฉพาะของพอลิเมอร์ต่อความเข้มข้นกับปริมาณการต่อกึ่ง	45
4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยกับปริมาณการต่อกึ่ง	45
ข.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดเฉพาะของพอลิเมอร์กับความเข้มข้นของสารละลายพอลิเมอร์	55
ค.1 เครื่องฟูรีเยร์ทรานฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโคป	57
ค.2 ส่วนประกอบของเครื่องฟูรีเยร์ทรานฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโคปเป็นกระบอกที่เคลือบด้วยทอง	57



บทที่ 1

บทนำ

บทนี้จะกล่าวถึงความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ ขอบเขตของงานวิจัย และประโยชน์ที่ได้รับจากงานวิจัยนี้

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

จากการพัฒนาเทคโนโลยีด้านต่างๆ ที่ไม่หยุดนิ่ง ทำให้เกิดผลิตภัณฑ์หรือวัสดุใหม่ขึ้นมาแทนทรัพยากรธรรมชาติอย่างมากมาย ตัวอย่างเช่น พลาสติก เหล็ก แก้ว เป็นต้น เนื่องจากพลาสติกมีสมบัติที่ดีที่แตกต่างจากวัสดุอื่นๆ ทำให้เกิดการพัฒนาเทคโนโลยีในการผลิตพลาสติกมากมายเพื่อปรับปรุงสมบัติของพลาสติกให้เหมาะกับการใช้งานแต่ละประเภท เช่น การพัฒนาพลาสติกชนิดพอลิเอทิลีนให้เป็นพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง (High density polyethylene, HDPE) เป็นต้น

การปรับปรุงสมบัติของพลาสติกทำได้โดยการเลือกใช้วัตถุดิบ ปฏิกริยาเคมี กระบวนการผลิต และกระบวนการขึ้นรูปต่างๆ นอกจากนี้ยังสามารถปรุงแต่งสมบัติได้ง่ายโดยการเติมสารเติมแต่ง (Additive) เช่น สารเสริมสภาพพลาสติก (Plasticizer) สารปรับปรุงคุณภาพ (Modifier) ตัวเติม (Filler) สารคงสภาพ (Stabilizer) ตัวยับยั้ง (Inhibitor) สารหล่อลื่น (Lubricant) และผงสี (Pigment) เป็นต้น ทั้งยังสามารถผลิตพลาสติกที่มีน้ำหนักเบา ราคาถูกเมื่อเทียบกับวัสดุอื่นที่สามารถใช้งานในลักษณะเดียวกัน ทำให้พลาสติกกลายเป็นส่วนหนึ่งของการดำรงชีวิตของมนุษย์ และมีแนวโน้มที่จะเพิ่มปริมาณมากขึ้น

อย่างไรก็ตามการใช้งานพลาสติกยังมีข้อจำกัด คือ พลาสติกส่วนใหญ่ไม่สามารถแตกสลายตามธรรมชาติ หรือต้องใช้เวลาในการแตกสลายที่ยาวนาน ก่อให้เกิดปริมาณขยะที่เพิ่มขึ้นอย่างมากมาย ซึ่งเป็นปัญหาสำคัญที่ทั่วโลกกำลังเผชิญอยู่ วิธีการกำจัดขยะพลาสติกมีหลายวิธี เช่น การนำไปฝัง หรือนำไปถมดิน ซึ่งการกำจัดทั้ง 2 วิธีนี้ไม่สามารถแตกสลายพลาสติกได้ทั้งหมดและใช้เวลานาน จึงมีการเผาขยะพลาสติกเพื่อเป็นเชื้อเพลิง (Incineration) และสามารถลดปริมาณขยะพลาสติกอย่างได้ผลดี แต่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมสูง เนื่องจากกระบวนการเผาพลาสติกจะให้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งเป็นแก๊สที่ทำให้เกิดปรากฏการณ์เรือนกระจก ทำให้อุณหภูมิของโลกสูงขึ้น นอกจากนี้การนำขยะพลาสติกกลับมาใช้ใหม่มีข้อจำกัด คือ ขั้นตอนการทำซ้ำซ้อนโดยต้องแยกประเภทของพลาสติก กำจัดสิ่งที่ไม่ต้องการออก และต้องลดขนาดก่อนเข้ากระบวนการ ทำให้

พลาสติกมีสมบัติเชิงกลลดลงเพราะถูกแรงเฉือนกล (Mechanical shear) ในเครื่องบดทำลาย โครงสร้างของพอลิเมอร์ให้แตกออก ส่งผลให้ความยาวของโมเลกุลและน้ำหนักมวลโมเลกุลลดลง

นักวิจัยจึงให้ความสนใจในการสังเคราะห์พอลิเมอร์ ที่สามารถแตกสลายได้ในธรรมชาติ ด้วยแสงอาทิตย์หรือจุลินทรีย์ พอลิเมอร์ที่สามารถแตกสลายด้วยแสงอาทิตย์ได้ (Photodegradable polymer) จะมีกลุ่มคาร์บอนิล (Carbonyl group) ดูดซึมรังสีอัลตราไวโอเลต ทำให้พันธะของพอลิเมอร์แตกสลายออก ส่วนพอลิเมอร์ที่แตกสลายทางชีวภาพได้ (Biodegradable polymer) จะมีกลุ่มที่ถูกไฮโดรไลสได้ (Hydrolysable group) ซึ่งสามารถเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส และปฏิกิริยาออกซิเดชันได้ง่าย แต่มีข้อจำกัด คือ พลาสติกที่สังเคราะห์ได้มีราคาสูง และกระบวนการผลิตซับซ้อน จึงมีการประยุกต์โดยการต่อกิ่ง (Graft) พอลิเมอร์สังเคราะห์ซึ่งไม่เสื่อมทางชีวภาพลงบนพอลิเมอร์ธรรมชาติที่แตกสลายได้ ทำให้ได้พลาสติกที่มีสมบัติที่ดีของพอลิเมอร์สังเคราะห์และเสื่อมทางชีวภาพได้ พอลิเมอร์ธรรมชาติที่นิยมใช้ คือ แป้ง (Starch) ซึ่งมีปริมาณมากและต้นทุนการผลิตต่ำ

แป้งเป็นคาร์โบไฮเดรตประกอบขึ้นจากหน่วยของน้ำตาลกลูโคส ($C_6H_{12}O_6$) เป็นแหล่งพลังงานที่สร้างใหม่ได้ และสามารถดัดแปรแป้งทำให้สมบัติของแป้งเปลี่ยนแปลงเพื่อนำไปใช้ประโยชน์ต่างๆ ทั้งทางเคมี ชีวภาพ และกายภาพ ซึ่งเป็นที่ต้องการของอุตสาหกรรมต่างๆ มากมาย ลักษณะทั่วไปของแป้ง คือ เป็นพอลิเมอร์ที่มีแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลส่วนใหญ่เป็นพันธะไฮโดรเจน จัดเรียงตัวค่อนข้างเป็นระเบียบ โครงสร้างประกอบด้วยอะไมโลสและอะไมโลเพกติน ทำให้แป้งมีสมบัติต่างๆ เช่น ไม่ละลายในน้ำเย็น ไม่อ่อนตัว หรือหลอมเหลวเมื่อได้รับความร้อนจึงส่งผลต่อการขึ้นรูป นอกจากนี้พลาสติกที่ได้จากแป้งเพียงอย่างเดียวจะมีสมบัติบางประการที่ไม่เหมาะสมต่อการใช้งาน เช่น ไม่มีความยืดหยุ่น แข็ง แต่เปราะง่าย ทำให้เป็นข้อจำกัดในการทำผลิตภัณฑ์พลาสติกจากแป้งโดยตรง

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาภาวะที่เหมาะสมในการสังเคราะห์พอลิเมอร์ร่วม (Copolymer) ที่แตกสลายได้จากการต่อกิ่งเมทิลเมทาคริเลตบนแป้งข้าวโพด โดยใช้โพแทสเซียมเปอร์ซัลเฟตเป็นสารริเริ่มปฏิกิริยารีดอกซ์ และศึกษาสมบัติทางกายภาพ คือ ความหนืดและน้ำหนักโมเลกุล รวมทั้งวิเคราะห์หมู่ทำหน้าที่ของพอลิเมอร์ร่วมที่สังเคราะห์ได้ ทั้งนี้ความรู้ที่ได้สามารถนำไปสู่ความรู้ใหม่ในการสังเคราะห์พอลิเมอร์ร่วมที่แตกสลายได้ และเป็นแนวทางในการอนุรักษ์สิ่งแวดล้อมโดยการนำไปผลิตพลาสติกที่สามารถแตกสลายได้ในระดับอุตสาหกรรม

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาภาวะที่เหมาะสมในการสังเคราะห์พอลิ(เมทิลเมทาคริเลต) ที่ต่อกิ่งบนแป้งข้าวโพดโดยใช้โพแทสเซียมเปอร์ซัลเฟตเป็นสารริเริ่มปฏิกิริยา

1.2.2 เพื่อศึกษาสมบัติทางกายภาพ และวิเคราะห์หมู่ทำหน้าที่ของพอลิเมอร์ร่วมที่สังเคราะห์ได้

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1.3.1 ศึกษาภาวะที่เหมาะสมในการสังเคราะห์พอลิ(เมทิลเมทาคริเลต) ที่ต่อกิ่งบนแป้งข้าวโพดโดยใช้โพแทสเซียมเปอร์ซัลเฟต เป็นสารริเริ่มปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 50°C และภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจน โดยมีตัวแปรในการศึกษาดังนี้

1.3.1.1 ปริมาณเมทิลเมทาคริเลต เท่ากับ 20, 30, 40 และ 50 mmole

1.3.1.2 ปริมาณโพแทสเซียมเปอร์ซัลเฟตซึ่งเป็นสารริเริ่มปฏิกิริยา เท่ากับ 1, 2, 3 และ 4 mmole

1.3.1.3 เวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา เท่ากับ 30, 60, 90 และ 120 นาที

1.3.2 ศึกษาสมบัติทางกายภาพ และวิเคราะห์หมู่ทำหน้าที่ของพอลิเมอร์ร่วมที่สังเคราะห์ได้ ดังนี้

1.3.2.1 วัดความหนืดของพอลิเมอร์ร่วมที่สังเคราะห์ได้ ด้วยเครื่องวัดความหนืด (Ubbelohde viscometer) และคำนวณค่าความหนืดสัมพัทธ์โดยใช้สมการของฮักกิน (Huggin's equation)

1.3.2.2 คำนวณน้ำหนักโมเลกุลของพอลิเมอร์ร่วมที่สังเคราะห์ได้ โดยใช้สมการของมาร์ก ฮาวินค์ (Mark Houwink's equation)

1.3.2.3 วิเคราะห์หมู่ทำหน้าที่ของพอลิเมอร์ร่วมที่สังเคราะห์ได้ ด้วยเครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรด (Fourier Transform Infrared Spectroscopy, FT-IR)

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 สามารถสังเคราะห์พอลิ(เมทิลเมทาคริเลต) ที่ต่อกิ่งบนแป้งข้าวโพดโดยใช้โพแทสเซียมเปอร์ซัลเฟตเป็นสารริเริ่มปฏิกิริยา

1.4.2 ได้แนวทางในการอนุรักษ์สิ่งแวดล้อม โดยการผลิตพลาสติกที่สามารถแตกสลายได้ระดับอุตสาหกรรม

1.4.3 ได้ผลงานวิจัยในระดับนานาชาติ หรือระดับชาติ (วารสารทางวิชาการและ/หรือ การประชุมวิชาการ)



บทที่ 2

การทบทวนวรรณกรรม

บทนี้จะกล่าวถึงความรู้เกี่ยวกับแป้ง ความรู้เกี่ยวกับพอลิเมอร์ และงานวิจัยที่ผ่านมา เพื่อเป็นแนวทางในการวางแผนในการทำงานวิจัยนี้

2.1 แป้ง

2.1.1 ความรู้เบื้องต้นและความสำคัญของแป้ง

แป้งเป็นคาร์โบไฮเดรตเชิงซ้อนที่มีกลูโคสแต่ละหน่วยมาต่อกันเป็นสายยาว โครงสร้างพื้นฐานประกอบด้วยมอลโทส (Maltose) ของ 4- α -D-กลูโคไพราโนซิล-d-กลูโคไพราโนส (4- α -D-glucopyranosyl-d-glucopyranose) โดยหน่วยย่อยที่สุดของแป้งประกอบด้วย คาร์บอน ไฮโดรเจน และออกซิเจนในอัตราส่วน 6:10:5 สูตรเคมีคือ $C_6H_{10}O_5$ แป้งจัดเป็นพอลิเมอร์แบบควบแน่นของกลูโคสที่ปราศจากน้ำ (Anhydroglucose unit) พันธะที่เชื่อมต่อกันระหว่างกลูโคสแต่ละหน่วยในโมเลกุลของแป้ง เรียกว่า พันธะไกลโคซิดิก (Glycosidic bond) [1]

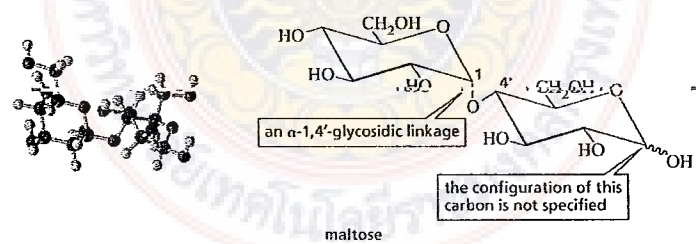
แป้งข้าวโพดจัดได้ว่าเป็นแป้งที่มีมากที่สุดในโลก ผลิตจากข้าวโพด (Corn หรือ Maize) ที่มีชื่อวิทยาศาสตร์ว่า *Zea mays L.* อยู่ในวงศ์ *Gramineae* มีต้นกำเนิดในทวีปอเมริกากระจายไปในทวีปแอฟริกา อินเดีย ออสเตรเลีย และประเทศในยุโรปที่มีอากาศอบอุ่น ข้าวโพดมีหลายพันธุ์ เช่น หัวแข็ง (Dent) หัวบุบ (Flint) ปอป (Pop) แป้ง (Flour) หวาน (Sweet) และข้าวเหนียว (Waxy) แป้งข้าวโพดเป็นแป้งที่มีการนำมาใช้ประโยชน์กันมากที่สุดในโลก เนื่องจากประเทศสหรัฐอเมริกาเป็นผู้ผลิตรายใหญ่ และนำเทคนิคทางพันธุวิศวกรรมช่วยคัดแปรคุณภาพ ทำให้เกิดความหลากหลายทางพันธุกรรมในข้าวโพด ส่งผลให้แป้งที่ผลิตได้มีสมบัติแตกต่างกัน นอกจากนี้ผลพลอยได้จากการสกัดแป้งส่วนใหญ่จะเป็นโปรตีน และน้ำมันซึ่งมีมูลค่าทางการค้าเช่นกัน แต่ข้อเสียที่สำคัญ คือ การสกัดแป้งและแยกโปรตีนออกทำได้ยาก และแป้งที่สกัดได้ยังมีไขมันเหลืออยู่ (ประมาณ 1%) ซึ่งจะส่งผลต่อสมบัติของผลิตภัณฑ์ ตารางที่ 2.1 แสดงสมบัติของแป้งข้าวโพด

ตารางที่ 2.1 สมบัติของแป้งข้าวโพด

สมบัติ	แป้งข้าวโพด
ขนาดเม็ดแป้ง (ไมครอน)	3-26
ปริมาณอะไมโลส (%)	28
ขั้นการเกิดพอลิเมอร์ (Degree of polymerization)	800
อุณหภูมิเริ่มเปลี่ยนแปลงความหนืด (Pasting temperature, °C)	79.18
ความหนืดสูงสุด (Peak viscosity, RVU)	217.13
ความหนืดสุดท้าย (Final viscosity, RVU)	195.21
ความหนืดต่ำสุด (Trough viscosity, RVU)	145.67
อุณหภูมิเริ่มต้นเกิดเจลลิตีไนซ์ (Onset temperature, T _o °C)	49
อุณหภูมิสุดท้ายที่เกิดเจลลิตีไนซ์ (Conclusion temperature, T _c °C)	67

2.1.2 องค์ประกอบภายในเม็ดแป้ง

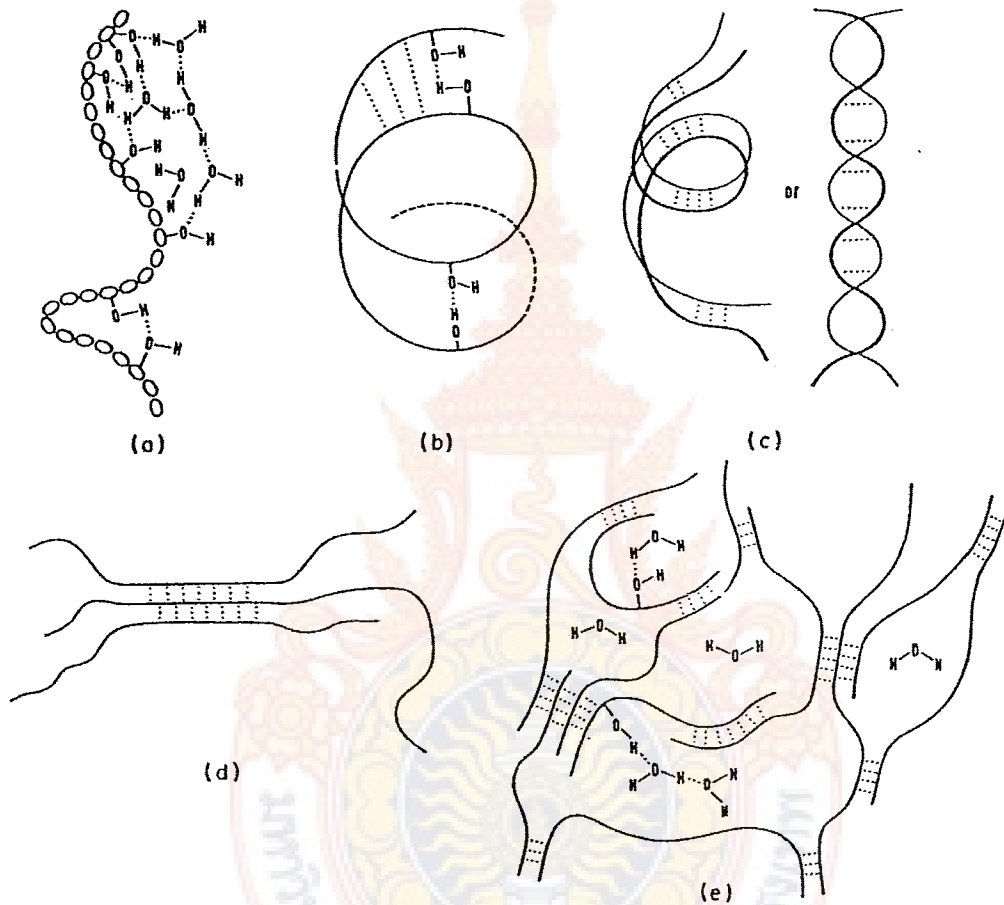
2.1.2.1 อะไมโลส เป็นพอลิเมอร์สายยาวของน้ำตาลกลูโคส ประกอบด้วยโมเลกุลของน้ำตาลกลูโคส หรือหน่วย -α-D-กลูโคไพราโนซิล ประมาณ 250-2000 หน่วยเรียงต่อกันด้วยพันธะไกลโคไซด์ที่ตำแหน่ง α-D (1→4) ดังแสดงในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 โครงสร้างของอะไมโลส

อะไมโลสไม่ละลายน้ำ แต่เมื่อเติมน้ำลงไป อะไมโลสจะเกาะตัวกันเป็นตะกอนที่ไม่ละลาย เนื่องจากโมเลกุลของอะไมโลสเป็นสายยาว จึงมีโอกาที่จะจับคู่กับอะไมโลสอีก

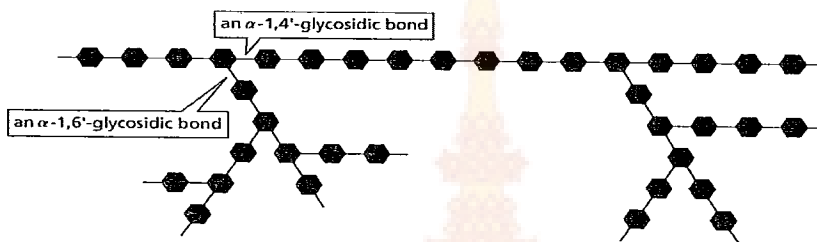
โมเลกุลหนึ่ง เป็นสายยาวคู่ขนานเกาะกันด้วยพันธะไฮโดรเจนกลายเป็นตาข่ายมีขนาดใหญ่ขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 2.2 ทำให้ความสามารถในการอุ้มน้ำลดลงและตกตะกอนได้ ปรากฏการณ์นี้ เรียกว่า รีโทรเกรเดชัน (Retrogradation) และตะกอนที่ได้เรียกว่า แป้งรีโทรเกรด (Retrograded starch) แต่แป้งเหนียว (Waxy starch) มีอะไมโลสน้อยมากจึงไม่เกิดรีโทรเกรเดชัน [2]



รูปที่ 2.2 ลักษณะการเกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุลของพอลิแซ็กคาไรด์ และการจับกับโมเลกุลของน้ำ

2.1.2.2 อะไมโลเพกทิน เป็นส่วนของกลูโคสที่ต่อกันเป็นสาย ซึ่งมีกิ่งก้านสาขาแตกแขนงออกไป โครงสร้างเป็นสายประกอบด้วยหน่วยของกลูโคสต่อกันด้วยพันธะไกลโคซิดิกแบบ α -1, 4 ส่วนบริเวณรอยต่อระหว่างโซ่หลักกับกิ่งก้านจะต่อกันด้วยพันธะไกลโคซิดิกแบบ α -1, 6 (α -1, 6 Glycosidic) ประมาณร้อยละ 4-5 โดยทั่วไปอะไมโลเพกทินมีน้ำหนักโมเลกุลประมาณ 8,000,000 ดังแสดงในรูปที่ 2.3

แป้งแต่ละชนิดมีปริมาณของอะไมโลสและอะไมโลเพกทินไม่เท่ากัน ดังแสดงในตารางที่ 2.2 โดยโครงสร้างของอะไมโลสเป็นส่วนที่ทำให้เกิดความแข็งแรง เนื่องจากมีการจัดเรียงตัวของโมเลกุลที่แน่นกว่า เป็นระเบียบมากกว่า ส่วนอะไมโลเพกทินจะขัดขวางการสร้างพันธะระหว่างโมเลกุลในการเกิดเจล อะไมโลเพกทินไม่ละลายน้ำแต่ดูดน้ำได้ และเกิดการพองตัว



รูปที่ 2.3 โครงสร้างของอะไมโลเพกทิน

2.1.2.3 สารตัวกลาง และส่วนประกอบอื่นๆ สารตัวกลางมีโครงสร้างลักษณะเชิงกิ่ง เช่นเดียวกับอะไมโลเพกทิน แต่จะมีกิ่งที่ยาวกว่า โครงสร้างของสารตัวกลางขึ้นอยู่กับชนิดและการเก็บเกี่ยวของพืช ส่วนประกอบอื่นๆ ภายในเมล็ดแป้งที่มีผลต่อลักษณะ และสมบัติของเมล็ดแป้ง ได้แก่

1. ไขมัน แป้งมีองค์ประกอบของไขมันอยู่ต่ำกว่า 1% ในการกำจัดไขมันออกจากแป้ง ทำได้โดยการสกัดด้วยตัวทำละลาย หรือแตกสลายโดยใช้ไอน้ำย่อย ไขมันจะส่งผลกระทบต่อลักษณะของแป้งโดยลดความสามารถในการพองตัว การละลาย และการจับตัวของแป้งกับน้ำ นอกจากนี้กรดไขมันที่ไม่อิ่มตัวซึ่งอยู่บนพื้นผิวเมล็ดแป้งจะทำให้เกิดกลิ่นที่ไม่พึงประสงค์ เนื่องจากเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน แต่ถ้าเป็นไขมันที่รวมตัวเชิงซ้อนกับอะไมโลสจะไม่ก่อให้เกิดกลิ่น เนื่องจากสามารถต้านทานการเกิดออกซิเดชันได้

2. โปรตีน แป้งมีส่วนประกอบของโปรตีนอยู่ต่ำกว่า 1% โดยโปรตีนจะเกาะที่พื้นผิวของเมล็ดแป้ง เกิดผลกระทบต่อลักษณะของแป้ง โดยทำให้เกิดประจุบนพื้นผิวเมล็ดแป้ง ทำให้มีผลต่อการกระจายตัวของเมล็ดแป้ง ทำให้แป้งมีการดูดซับน้ำ การพองตัว และการเกิดเจลที่ในซ์เปลี่ยนแปลงไป

3. เถ้า โดยทั่วไปแป้งมีองค์ประกอบของสารอนินทรีย์ เช่น โซเดียม โพแทสเซียม แมกนีเซียม และแคลเซียม ซึ่งวิเคราะห์ปริมาณได้จากส่วนที่เหลือหรือเถ้าจากการเผาไหม้โดยสมบูรณ์

4. ฟอสฟอรัส แป้งมีส่วนประกอบของฟอสฟอรัสอยู่น้อยกว่า 0.1% แป้งจากธัญพืชมีฟอสฟอรัสในรูปฟอสโฟลิพิด (Phospholipid) ประมาณ 0.02% ถึง 0.06% แป้งจากหัวและรากมีองค์ประกอบของฟอสฟอรัสประมาณ 0.3% ถึง 0.4% ฟอสฟอรัสภายในแป้งอยู่ในรูปฟอสเฟตเชื่อมต่อกับหมู่ไฮดรอกซิลที่คาร์บอนตำแหน่งที่ 3 และ 6 (C3 และ C6) ของหน่วยกลูโคส

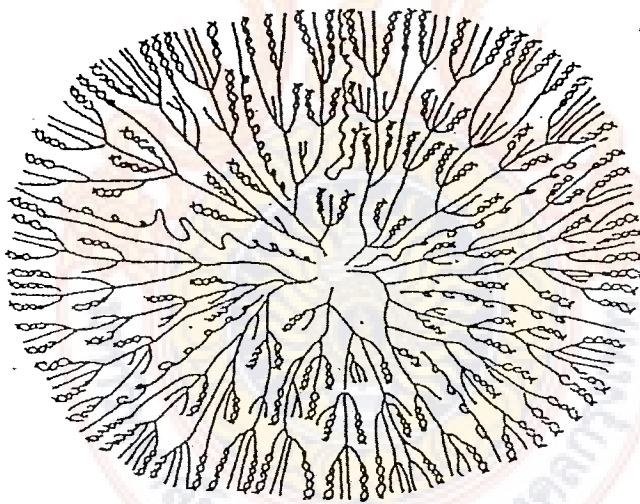
ตารางที่ 2.2 ปริมาณอะไมโลสและอะไมโลเพกตินของแป้งชนิดต่างๆ

ชนิดแป้ง	% อะไมโลส	% อะไมโลเพกติน
ข้าวโพด	28	72
มันฝรั่ง	21	79
ข้าวสาลี	28	72
มันสำปะหลัง	17	83
ข้าวโพดเหนียว (Waxy maize)	0	100
ข้าวฟ่าง	28	72
ข้าว	17	83
สาธู	27	73
ท้าวขาม่อม	20	80
ข้าวโพด (Amylo maize)	50-80	20-50

2.1.3 ลักษณะของเม็ดสตาร์ชและโครงสร้างของเม็ดสตาร์ช

2.1.3.1 สตาร์ช คือ ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการนำแป้งมาเปลี่ยนสมบัติทางเคมี และ/หรือทางกายภาพจากเดิมด้วยความร้อน และ/หรือเอนไซม์ และ/หรือสารเคมีต่างๆ เพื่อให้เหมาะกับการนำไปใช้ในอุตสาหกรรมอาหารต่างๆ การจัดเรียงตัวของโมเลกุลอะไมโลสและอะไมโลเพกตินยังไม่เป็นที่แน่ชัด แต่มีการเสนอว่าอะไมโลเพกตินมีรูปร่างโมเลกุลแบบกึ่งไม่เป็นรัศมีทรงกลม ส่วนอะไมโลสจับอยู่ปลายส่วนที่เป็นเส้นตรง ดังแสดงในรูปที่ 2.4 ทำให้เกิดเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนแรกเป็นส่วนที่เป็นอสัณฐาน (Amorphous area) โมเลกุลจับตัวกันหลวมๆ ประกอบด้วยส่วนที่เป็นกิ่งก้านมีพันธะ α -1, 6-ไกลโคซิดิก เป็นส่วนใหญ่ ดังนั้นบริเวณนี้จึงไวต่อความร้อนและกรด ส่วนที่สองเป็นส่วนที่เป็นผลึก (Crystalline area) จับกันหนาแน่นด้วยพันธะไฮโดรเจน ทั้งนี้หน่วยของกลูโคสต่อกันด้วยพันธะ α - 1, 4 ไกลโคซิดิก เป็นส่วนใหญ่ [3]

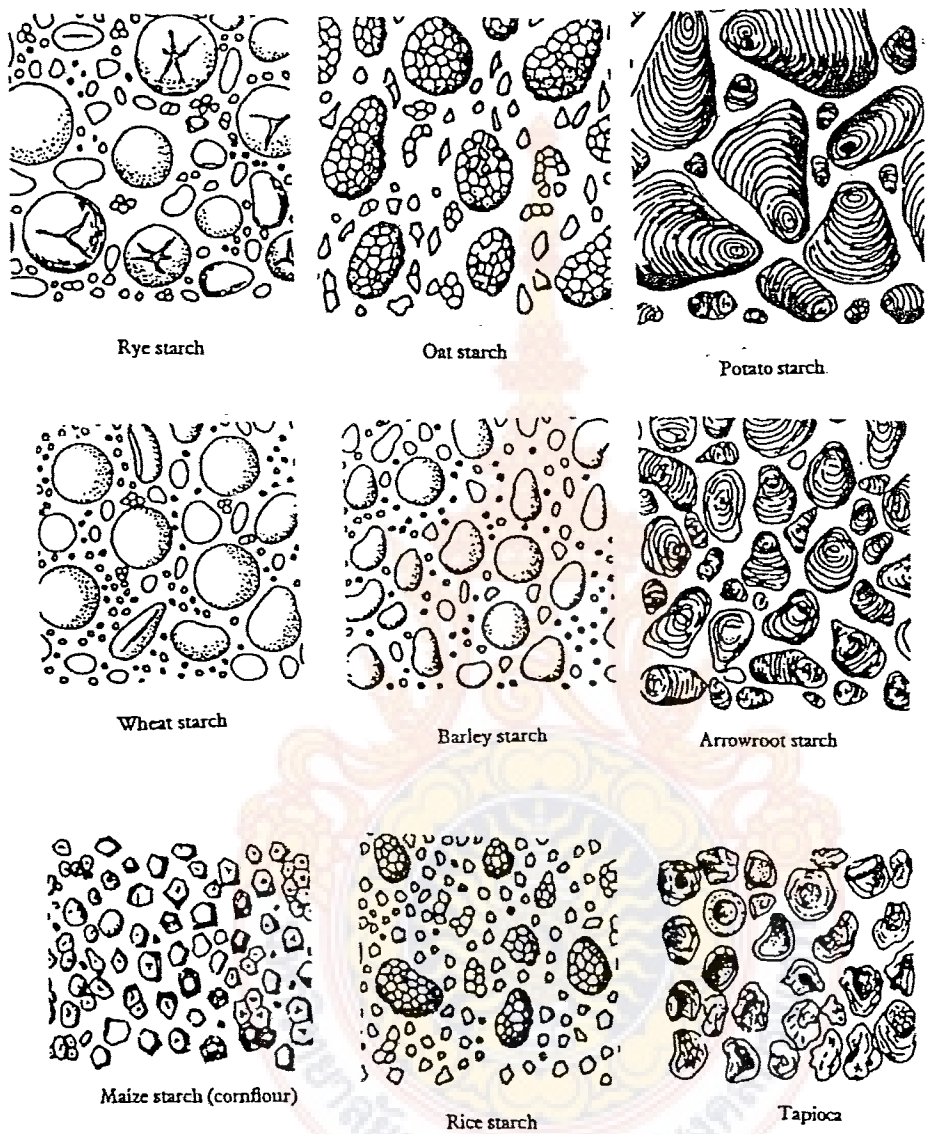
2.1.3.2 ลักษณะของเม็ดสตาร์ช รูปร่างของเม็ดสตาร์ชที่มาจากพืชแต่ละชนิดจะแตกต่างกัน ซึ่งใช้เป็นตัวชี้บ่งชนิดของสตาร์ชได้ เช่น เม็ดสตาร์ชมันฝรั่งมีรูปร่างเป็นวงรีคล้ายไข่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 15-100 μm เม็ดสตาร์ชมันฝรั่งมีฟอสฟอรัสเป็นองค์ประกอบประมาณ 0.06-0.1% เนื่องจากมีหมู่ฟอสเฟตเอสเทอร์อยู่บนโมเลกุลของอะไมโลเพกติน จึงทำให้มีประจุลบ ทำให้อุดน้ำและพองตัวได้ง่าย สารละลายที่ได้มีลักษณะใส มีความหนืดสูง และเกิดรีโทรเกรเดชันในอัตราต่ำ เม็ดสตาร์ชข้าวโพดมีขนาดเล็ก รูปร่างทั้งกลมและเหลี่ยมปนกัน เม็ดสตาร์ชของข้าวโพดถึงจะมาจากแหล่งเดียวกัน แต่จะมีลักษณะรูปร่างหลายแบบผสมกันทั้งที่เป็นรูปกลมหรือหลายเหลี่ยม ส่วนเม็ดสตาร์ชข้าวสาลีรูปแบนกลมคล้ายเลนส์มีขนาดต่างๆ กัน มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางระหว่าง 2-35 μm ส่วนเม็ดสตาร์ชข้าวเจ้ามีขนาดค่อนข้างเล็ก ซึ่งตรงกันข้ามกับเม็ดสตาร์ชของมันฝรั่งจะมีขนาดใหญ่กว่ามาก มีความหนาแน่นน้อยกว่าทำให้สุกได้ง่าย ภายในเม็ดสตาร์ชมีแร่ธาตุ ลิพิด และโปรตีนเป็นองค์ประกอบอยู่บ้างเล็กน้อย ดังนั้นเมื่อส่องดูแป้งด้วยกล้องจุลทรรศน์ จะเห็นลักษณะรูปร่างของเม็ดสตาร์ชที่ปรากฏจะชี้บ่งได้ว่าเป็นแป้งที่มาจากพืชชนิดใด



รูปที่ 2.4 การจัดเรียงตัวของโมเลกุลอะไมโลสและอะไมโลเพกตินในเม็ดแป้ง

เม็ดสตาร์ชของมันฝรั่งจะอยู่อย่างอิสระภายในแวคิวโอล (Vacuoles) ทำให้แยกออกได้ง่ายโดยการสกัดด้วยน้ำ แล้วปล่อยให้เม็ดสตาร์ชตกตะกอนก่อนทำให้แห้ง เม็ดสตาร์ชที่มาจากธัญพืชส่วนใหญ่มีลิพิดเป็นองค์ประกอบเล็กน้อย อาจเป็นกรดไขมันอิสระและไลโซฟอสโฟลิพิด ซึ่งเม็ดสตาร์ชข้าวโพดจะเป็นไลโซฟอสฟาติลคอลลิน ประมาณ 89% ของฟอสโฟลิพิดทั้งหมด อัตราส่วนกรดไขมันอิสระต่อไลโซฟอสโฟลิพิดจะแปรตามชนิดของธัญพืช ดังนั้นสตาร์ช

ที่ได้จากธัญพืชจะแยกเมล็ดสารถออกได้ยาก เพราะส่วนที่เป็นสารถจะอยู่ในเอนโดสเปิร์ม (Endosperm) ที่ห่อหุ้มไว้ด้วยลิโปโปรตีน (Lipoprotein coat)



รูปที่ 2.5 ลักษณะและรูปร่างของเม็ดสารถที่ได้จากพืชบางชนิด

2.1.3.3 โครงสร้างของเม็ดสารถ ภายในเม็ดสารถประกอบด้วยพอลิเมอร์กลูแคน 2 ชนิดผสมกัน คือ อะไมโลสเป็นพอลิเมอร์สายยาวของ α -(1 $\rightarrow$ 4) กลูแคน และอะไมโลเพกทินเป็นสายแขนงที่โมเลกุลมีขนาดใหญ่และน้ำหนักโมเลกุลสูง ต่อกันด้วยพันธะ α -(1 $\rightarrow$ 4) เป็นสายตรง และมีพันธะ α -(1 $\rightarrow$ 6) เป็นสายแขนง อะไมโลสและองค์ประกอบของอะไมโลเพกทินในเม็ดสารถแต่ละชนิดจะแตกต่างกันที่น้ำหนักโมเลกุล ขึ้นการเกิดพอลิเมอร์ของแต่ละสายตำแหน่ง

ที่อยู่ในเมล็ดสตาร์ช และสัดส่วนของอะไมโลสต่ออะไมโลเพกทิน ดังนั้นสมบัติของสตาร์ชที่ได้จากพืชแต่ละชนิดจะแตกต่างกัน การที่สตาร์ชแต่ละชนิดมีสมบัติแตกต่างกันจึงมีความสามารถต่อการทำหน้าที่ (Functionality) แตกต่างกัน เนื่องมาจากสัดส่วนและโครงสร้างขององค์ประกอบ

เมล็ดสตาร์ชส่วนใหญ่มีอะไมโลสเป็นองค์ประกอบประมาณ 20-39% และมีอะไมโลเพกทินประมาณ 70-80% แต่สตาร์ชจากถั่ว (Peas) และข้าวโพดบางสายพันธุ์มีอะไมโลสสูง 50-80% เรียกว่า ข้าวโพดอะไมโล (Amylomaize) และเมล็ดสตาร์ชของข้าวโพดบางสายพันธุ์ประกอบด้วยอะไมโลเพกทิน 100% และไม่มีอะไมโลสเลยเรียกว่า ข้าวโพดเหนียว (Waxy maize) ถ้าเป็นสตาร์ชจากข้าวฟ่าง (Millet) ที่ไม่มีอะไมโลสเลยเรียกว่า ข้าวฟ่างเหนียว (Waxy millet)

2.1.4 สมบัติของแป้ง

2.1.4.1 การดูดซึมน้ำ การพองตัวและการละลาย การเติมน้ำลงในแป้งและตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง เม็ดแป้งจะดูดซึมน้ำที่เติมลงไปภายใต้บรรยากาศห้อง จนเกิดสมดุลระหว่างความชื้นภายในเม็ดแป้งกับน้ำที่เติมและความชื้นในบรรยากาศ ปริมาณน้ำที่ถูกดูดซึมจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ แป้งส่วนใหญ่เมื่อเกิดสมดุลภายใต้บรรยากาศปกติจะมีความชื้น 10-17% จากการทดลอง พบว่าแป้งข้าวโพด แป้งมันสำปะหลัง แป้งมันฝรั่ง และแป้งข้าวโพดเหนียว สามารถดูดซึมน้ำได้ในปริมาณ 39.9, 42.9, 50.9 และ 51.4 g ต่อน้ำหนักแป้งแห้ง 100 g ตามลำดับ น้ำในเม็ดแป้งมี 3 แบบ คือ น้ำผลึก น้ำไมอิสระ (Bound water) และน้ำอิสระ (Free water) โดยมีการจับกับแป้งได้แน่นตามลำดับ แป้งที่มีความชื้น 8-10% สามารถจับกับน้ำได้สูงกว่าค่านี้ เนื่องจากเมื่อน้ำจับกับหมู่ไฮดรอกซิลที่คาร์บอนตำแหน่งที่ 6 ของกลูโคสแต่ละหน่วยของแป้ง จะได้สตาร์ชโมโนไฮเดรต

น้ำหรือของเหลวชนิดอื่นสามารถแพร่ และผ่านเข้าไปในร่างแหของไมเซลล์ (Micelles) ในเม็ดแป้งได้อย่างอิสระ ซึ่งทดสอบได้จากการแขวนลอยเม็ดแป้งในสารละลายไอโอดีนเจือจางจะเกิดสีในเม็ดแป้ง เมื่อใส่โซเดียมไทโอซัลเฟต (Sodium thiosulfate) ลงไป พบว่าสีจะจางลงอย่างรวดเร็ว และเมื่อนำมาส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน พบว่าเม็ดแป้งประกอบด้วยรูพรุนจำนวนมากซึ่งทำหน้าที่เป็นตะแกรงโมเลกุล (Molecular sieve) รูพรุนเหล่านี้อาจเกิดขึ้นในขั้นตอนการทำแห้งในกระบวนการผลิตแป้ง หรืออาจมีอยู่แล้วในแป้งธรรมชาติ แต่ถูกขยายขนาดให้ใหญ่ในขั้นตอนการทำแห้งในกระบวนการผลิตแป้ง

แป้งดิบจะไม่ละลายในน้ำที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิเจลาติไนซ์ เนื่องจากมีพันธะไฮโดรเจนซึ่งเกิดจากหมู่ไฮดรอกซิลของโมเลกุลแป้งที่อยู่ใกล้ๆ กันเชื่อมต่อกันอยู่ แต่เมื่ออุณหภูมิของสารผสมน้ำแป้งเพิ่มสูงกว่าอุณหภูมิเจลาติไนซ์ พันธะไฮโดรเจนจะถูกทำลาย โมเลกุล

ของน้ำจะเข้ามาจับกับหมู่ไฮดรอกซิลที่เป็นอิสระ เม็ดแป้งจะพองตัว ทำให้การละลาย ความหนืด และความใสเพิ่มขึ้น ปัจจัยที่มีผลต่อการพองตัวและความสามารถในการละลาย ได้แก่ ชนิดของแป้ง ความแข็งแรงและลักษณะของร่างแหภายในเม็ดแป้ง สิ่งเจือปนในเม็ดแป้งที่ไม่ใช่คาร์โบไฮเดรต ปริมาณน้ำในสารละลายแป้ง และการตัดแปรงแป้งทางเคมี รูปแบบในการพองตัว และการละลายของเม็ดแป้งแต่ละชนิดจะมีรูปแบบที่แตกต่างกันไป

เมื่อให้ความร้อนแก่สารละลายน้ำแป้ง เม็ดแป้งจะพองตัว และแป้งบางส่วนจะละลายออกมา กำลังการพองตัวของแป้งแสดงเป็นปริมาตรหรือน้ำหนักของเม็ดแป้งที่เพิ่มขึ้นมากที่สุดเมื่อเม็ดแป้งพองตัวอย่างอิสระในน้ำ

ปัจจัยที่มีผลต่อการพองตัว และความสามารถในการละลายของแป้งมีหลายประการ ได้แก่

1. ชนิดของแป้ง แป้งแต่ละชนิดมีรูปแบบในการพองตัว และการละลายแตกต่างกัน ถ้าพิจารณาตามความสามารถในการพองตัวและการละลายของแป้ง จะแบ่งแป้งเป็น 3 ชนิด คือ แป้งจากธัญพืช แป้งจากส่วนราก และ แป้งจากส่วนหัว

(ก) แป้งจากธัญพืช มีรูปแบบการพองตัวและการละลายสองชั้น แสดงว่ามีพันธะภายในเม็ดแป้ง 2 ชนิด คือ พันธะบริเวณเปลือก และบริเวณออสติฐานของเม็ดแป้ง แป้งจำพวกนี้มีจำนวนพันธะสูงสุด แต่มีกำลังการพองตัวและการละลายต่ำสุด เนื่องจากมีปริมาณอะไมโลสสูงซึ่งอะไมโลสจะทำให้โครงสร้างร่างแหในเม็ดแป้งแข็งแรงขึ้น ทำให้พองตัวต่ำ

(ข) แป้งจากส่วนรากหรือส่วนกลางลำต้น (Pith) เช่น แป้งมันสำปะหลัง มีการพองตัวเพียงชั้นเดียว กำลังการพองตัวและการละลายมีค่าสูงกว่าแป้งจากธัญพืช เนื่องจากมีจำนวนพันธะน้อยกว่า แป้งจากส่วนรากจะเกิดเจลาตินไนซ์ที่อุณหภูมิต่ำกว่าแป้งจากธัญพืช

(ค) แป้งจากส่วนหัว เช่น แป้งมันฝรั่งมีการพองตัวสูง เนื่องจากพันธะภายในร่างแหอ่อนแอ นอกจากนี้หมู่ฟอสเฟตภายในแป้งมันฝรั่งทำให้เกิดการพองตัวสูงขึ้น เนื่องจากสามารถก่อให้เกิดแรงผลักดันทางไฟฟ้าได้ การพองตัวในแป้งจากส่วนหัวจะเกิดเพียงชั้นเดียวและเกิดขึ้นที่อุณหภูมิต่ำ การพองตัวแบบนี้เป็นลักษณะของแป้งที่เป็นพอลิอิเล็กโทรไลต์ (Polyelectrolyte)

2. ความแข็งแรงและลักษณะร่างแหภายในเม็ดแป้ง หรืออีกนัยหนึ่ง คือ จำนวนและชนิดของพันธะภายในเม็ดแป้ง อัตราส่วนของอะไมโลสต่ออะไมโลเพกติน น้ำหนักโมเลกุล การกระจายตัวของโมเลกุล จำนวนกิ่งก้านสาขา การจัดเรียงตัว และความยาวของกิ่งก้านสาขาในอะไมโลเพกติน

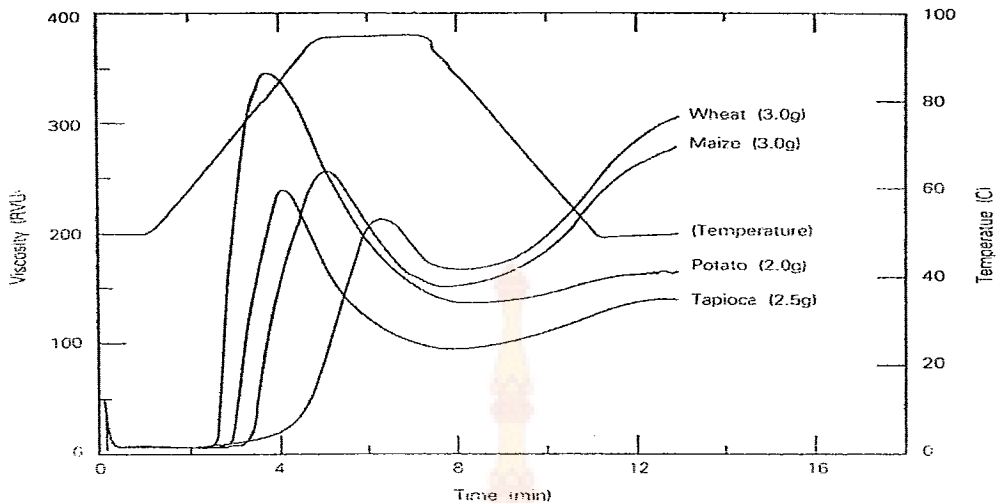
3. สิ่งเจือปนในเม็ดแป้งที่ไม่ใช่คาร์โบไฮเดรต สิ่งเจือปนเป็นปัจจัยสำคัญในการพองตัวของเม็ดแป้ง เช่น แป้งข้าวโพดที่สกัดไขมันออกจะพองตัวอย่างอิสระ และเป็นรูปแบบเดียวกันดีกว่าแป้งข้าวโพดปกติ เนื่องจากกรดไขมันธรรมชาติของแป้งข้าวโพดปกติจะยับยั้งการพองตัวของเม็ดแป้ง โดยเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนกับอะไมโลส (Lipid-amylose complex) นอกจากนั้นการเติมสารลดแรงตึงผิวในแป้งจะมีผลต่อการพองตัวของเม็ดแป้ง การเติมโพแทสเซียมปาล์มมิเตท (Potassium palmitate) และสเตียเรต (Stearate) จะลดกำลังการพองตัวของแป้งมันสำปะหลัง ในขณะที่การเติมโซเดียมซัลเฟต (Sodium sulfate) และเซทิลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ (Cetyl trimethyl ammonium bromide) จะเพิ่มกำลังการพองตัวของเม็ดแป้ง

4. สมบัติหลังการตัดแปรทางเคมี การพองตัวและการละลายของแป้งจะเปลี่ยนไปเมื่อมีการตัดแปรแป้งทางเคมี การตัดแปรด้วยกรดหรือการเกิดออกซิเดชันด้วยเกลือไฮโปคลอไรต์ (Hypochlorite) ทำให้พันธะภายในร่างแหแตกออก เม็ดแป้งจะกระจายออกเป็นชิ้นเล็กๆ ทำให้การละลายและการพองตัวสูงขึ้น การตัดแปรแป้งด้วยปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชัน จะเกิดการแทนที่ของหมู่ทำหน้าที่ยื่นๆ ภายในโมเลกุลของแป้ง ทำให้พันธะภายในเม็ดแป้งอ่อนแอลง อุณหภูมิการเกิดเจลลิ่งในซึ่ต่ำลง การพองตัวเพิ่มขึ้น ขอบเขตในการลดลงของอุณหภูมิเจลลิ่ง และการพองตัวที่เพิ่ม ขึ้นอยู่กับจำนวนและธรรมชาติของหมู่ทำหน้าที่ที่แทนที่ การทำครอสลิง (Crossed linking) ทำให้ความแข็งแรงของพันธะภายในเม็ดแป้งเพิ่มขึ้น ดังนั้นความสามารถในการพองตัวและการละลายจึงลดลง

5. ปริมาณน้ำที่มีในภาวะที่เกิดการพองตัว มีผลต่อการพองตัวและการละลาย สารละลายที่มีปริมาณแป้งต่ำกว่า 20% ค่าการละลายจะสูงกว่า 20% การพองตัวอิสระและการละลายที่สูงขึ้นจะถูกยับยั้งในสภาพที่สารละลายมีปริมาณน้ำน้อย สารประกอบอื่นๆ เช่น ซูโครส กลูโคส และสารอิเล็กโทรไลต์ เช่น โซเดียมคลอไรด์ มีผลกระทบต่อการพองตัวของแป้ง พบว่าเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของซูโครสและลดปริมาณของแป้ง ทำให้การละลายของแป้งเพิ่มขึ้น

2.1.4.2 ความหนืด เป็นสมบัติเฉพาะตัวที่สำคัญของแป้ง เกิดจากการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ ปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อความหนืดของแป้ง ได้แก่

1. ชนิดของแป้ง แป้งแต่ละชนิดมีความหนืดแตกต่างกัน ดังแสดงในรูปที่ 2.6 ความหนืดของน้ำแป้งที่เกิดขึ้นเมื่อให้ความร้อนและมีการกวน หรือคนอย่างสม่ำเสมอจากอุณหภูมิ 50°C ถึง 95°C และให้คงที่ที่ 95°C เป็นเวลา 2.5 นาที จากนั้นลดอุณหภูมิลงเป็น 50°C จะเห็นว่าแป้งแต่ละชนิดจะมีรูปแบบ (Profile) การเปลี่ยนแปลงของความหนืดแตกต่างกัน ซึ่งวัดค่าความหนืดจากเครื่องวิเคราะห์ความหนืดอย่างรวดเร็ว (Rapid Visco Analyzer, RVA)



รูปที่ 2.6 การเปลี่ยนแปลงความหนืดของแป้งข้าวสาลี แป้งข้าวโพด แป้งมันฝรั่ง และแป้งมันสำปะหลัง

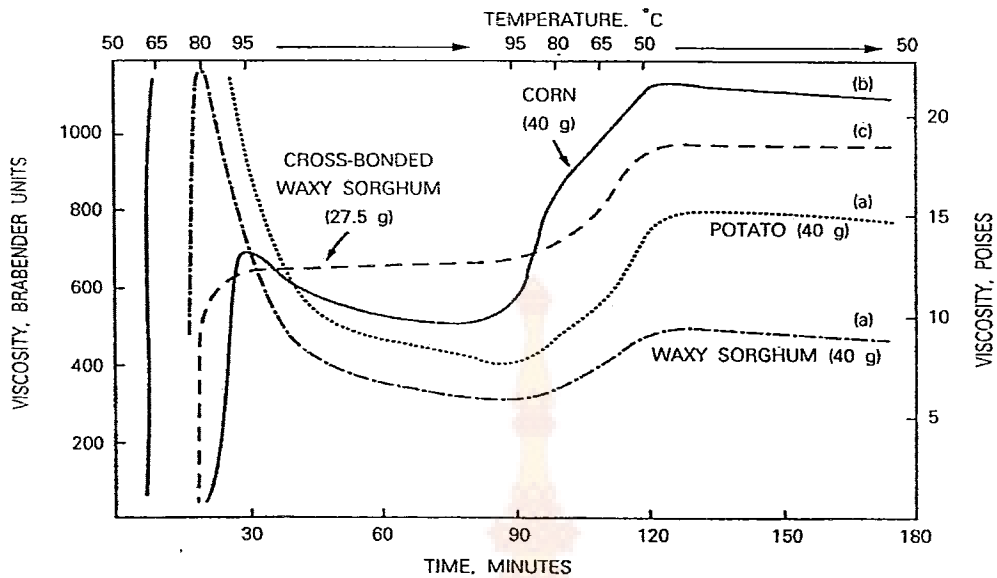
การแบ่งชนิดของแป้งจากกราฟ ซึ่งแสดงค่าความหนืดของแป้งสุกตามกำลังการพองตัวของแป้งที่วัดค่าด้วยเครื่องบราเบนเดอร์วิสโคอะไมโลกราฟ (Brabender visco-amylograph) แบ่งเป็น 4 แบบ ดังแสดงในรูปที่ 2.7

แบบ (a) กราฟจากเมล็ดแป้งที่มีกำลังการพองตัวสูง (High-swelling starches) เช่น แป้งมันฝรั่ง แป้งข้าวฟ่าง แป้งจากธัญพืช เมื่อให้ความร้อนแก่แป้ง เม็ดแป้งจะมีกำลังการพองตัวสูง ทำให้แรงที่ยึดกันภายในโมเลกุลอ่อนตัวลง เม็ดแป้งกระจายตัวออกเมื่อได้รับแรงเฉือน ลักษณะกราฟความหนืดจึงสูงขึ้น และลดลงอย่างรวดเร็วระหว่างการต้มสุก

แบบ (b) กราฟจากเมล็ดแป้งที่มีกำลังการพองตัวปานกลาง (Moderate-swelling starches) ได้แก่ แป้งจากธัญพืชต่างๆ เม็ดแป้งพองตัวไม่มากถึงขั้นกระจายตัวออก จึงได้กราฟความหนืดที่สูงขึ้นน้อยกว่า และเกิดการสลายตัวระหว่างการต้มสุกน้อยกว่า

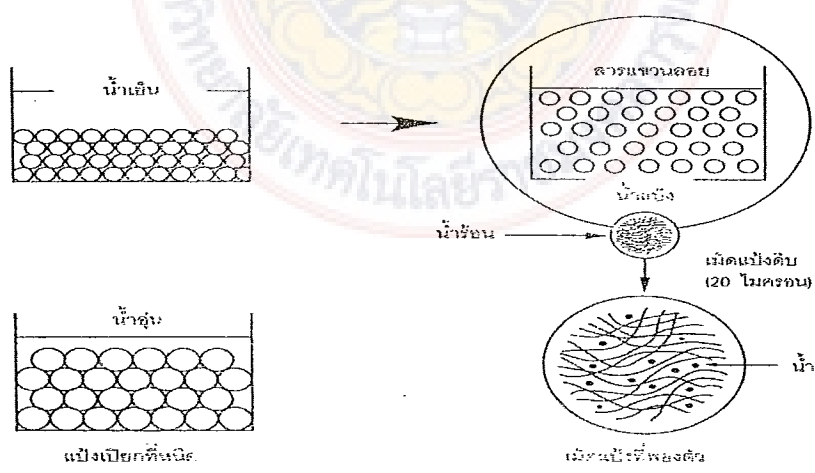
แบบ (c) กราฟจากเมล็ดแป้งที่มีการพองตัวน้อย (Restricted-swelling starches) ได้แก่ ถั่วต่างๆ และแป้งครอสลิงหรือพันธะข้าม (Cross-linked หรือ Cross-bonded) วิธีครอสลิงทำให้การพองตัว และการละลายของเม็ดแป้งลดลง เม็ดแป้งที่พองตัวมีเสถียรภาพมากขึ้น ลักษณะกราฟความหนืดจึงไม่ปรากฏเป็นยอดสูงสุดมีค่าความหนืดสูงอาจจะคงที่หรือเพิ่มขึ้นระหว่างการต้มสุก

แบบ (d) กราฟจากเมล็ดแป้งที่มีการพองตัวน้อยมาก (Highly-restricted swelling starches) ได้แก่ แป้งที่มีปริมาณอะมิโลสสูง เช่น แป้งข้าวโพดอะไมโลเมส ซึ่งมีอะมิโลส 50-80%



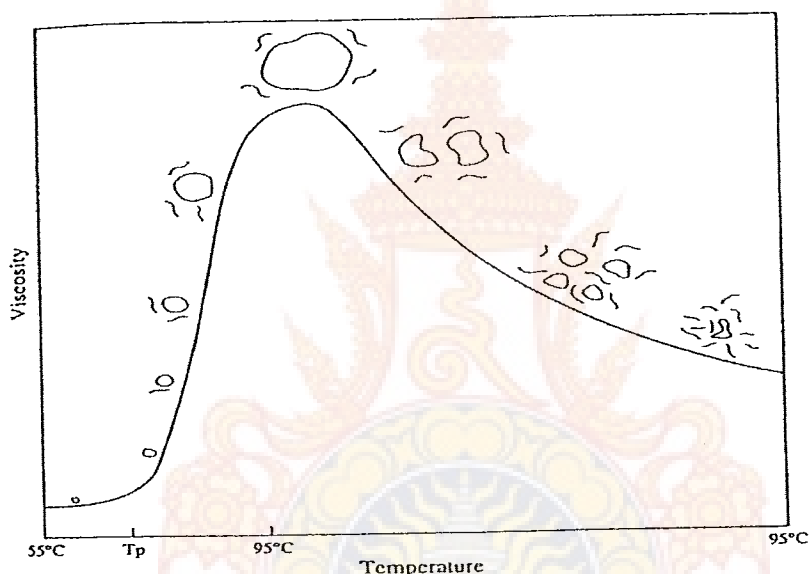
รูปที่ 2.7 รูปแบบความหนืดของแป้งสูกชนิดต่างๆ ที่แบ่งตามกำลังการพองตัว

2. การเกิดเจลาตินในเซชัน โมเลกุลของแป้งประกอบด้วยหมู่ไฮดรอกซิลจำนวนมาก ยึดเกาะกันด้วยพันธะไฮโดรเจน มีสมบัติชอบน้ำแต่เนื่องจากเม็ดแป้งอยู่ในรูปร่างแห ซึ่งการจัดเรียงตัวลักษณะนี้ทำให้เม็ดแป้งละลายในน้ำเย็นยาก ดังนั้นในขณะที่แป้งอยู่ในน้ำเย็น เม็ดแป้งจะดูดซึมน้ำและพองตัวเล็กน้อย แต่เมื่อให้ความร้อนกับสารละลายน้ำแป้ง พันธะไฮโดรเจน คลายตัวลง เม็ดแป้งจะดูดน้ำแล้วพองตัวออก ดังแสดงในรูปที่ 2.8 น้ำแป้งมีความหนืดมากขึ้นและใสขึ้น เนื่องจากโมเลกุลของน้ำอิสระที่อยู่รอบๆ เม็ดแป้งเหลือน้อยลง เม็ดแป้งเคลื่อนไหวยากขึ้น ทำให้เกิดความหนืด ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า การเกิดเจลาตินในเซชัน



รูปที่ 2.8 การเปลี่ยนแปลงของเม็ดแป้งในระหว่างการหุงต้ม

เม็ดสตาร์ชมีสมบัติหักเหแสงสองแนว (Optical birefringence) คือ จะปรากฏเป็นแสงเมื่อส่องดูด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบโพลาไรส์ สมบัตินี้ซึ่งบ่งว่าสตาร์ชมีการเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบ (Order orientation) หรือเป็นผลึก (Crystal) เม็ดสตาร์ชที่สมบูรณ์จะไม่ถูกทำลายขณะแปรรูป ไม่ละลายในน้ำเย็น และดูคุ่นน้ำเย็นได้เพียงเล็กน้อย ความสามารถในการดูคุ่นน้ำของเม็ดสตาร์ชจะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ดังนั้นเมื่อละลายในน้ำอุ่น เม็ดสตาร์ชจะค่อยๆ ดูคุ่นน้ำและพองตัวออก การพองตัวนี้สามารถเปลี่ยนกลับไปได้ เพราะเม็ดสตาร์ชจะหดตัวได้เมื่ออบได้น้ำออกหรือทำให้แห้ง ถ้าเพิ่มอุณหภูมิของน้ำสูงขึ้นเรื่อยๆ เม็ดสตาร์ชพองตัวมากขึ้นจนมีขนาดใหญ่และแตกออกดังแสดงในรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 ลักษณะการพองตัวของเม็ดสตาร์ชและการเปลี่ยนแปลงความหนืดของสารละลาย

สตาร์ชเมื่อได้รับความร้อนจนถึงอุณหภูมิสูงสุด คือ 95°C และให้คงที่ที่อุณหภูมินี้ จะเกิดสารละลายขุ่นหนืด (Starch paste) ซึ่งเป็นสารผสมของอะไมโลสและอะไมโลเพกทิน กระบวนการนี้คืนกลับไม่ได้ ดังนั้นเม็ดสตาร์ชจะสูญเสียสมบัติการหักเหแสงสองแนว (Birefringence) และโครงสร้างที่เป็นผลึก โมเลกุลของอะไมโลสหลุดออกมาอยู่นอกเม็ดสตาร์ชบางส่วน ช่วงอุณหภูมิที่เริ่มเกิดเจลาติไนเซชันจนสมบูรณ์จะแปรผันตามวิธีการที่ใช้วัด และอัตราส่วนของสตาร์ชต่อน้ำ ชนิดของเม็ดสตาร์ช และความไม่เป็นเนื้อเดียวกันภายในเม็ดสตาร์ช ระยะของการเกิดเจลาติไนเซชันจะส่องดูด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบโพลาไรส์ และอาจเห็นการหายไปของสมบัติการหักเหแสงสองแนวในช่วงต้น ตารางที่ 2.3 แสดงสมบัติของเม็ดสตาร์ชของพืชบางชนิด

ตารางที่ 2.3 สมบัติเม็ดสตาร์ชของพืชบางชนิด

สมบัติ	สตาร์ชข้าวโพด	สตาร์ชมันสำปะหลัง	สตาร์ชข้าวสาลี
ขนาดของอนุภาค (μm)	2-30	4-35	2-55
% อะไมโลส	28	17	28
ช่วงอุณหภูมิที่เกิด เจลที่ในเซชัน (°C)	62-80	52-65	52-85
ความหนืดสัมพัทธ์	ปานกลาง	สูง	ต่ำ
ความข้นใสของสารละลาย	ขุ่น	ใส	ขุ่น
ลิวิต (% สตาร์ชแห้ง)	0.8	0.1	0.9
โปรตีน (% สตาร์ชแห้ง)	0.35	0.1	0.4

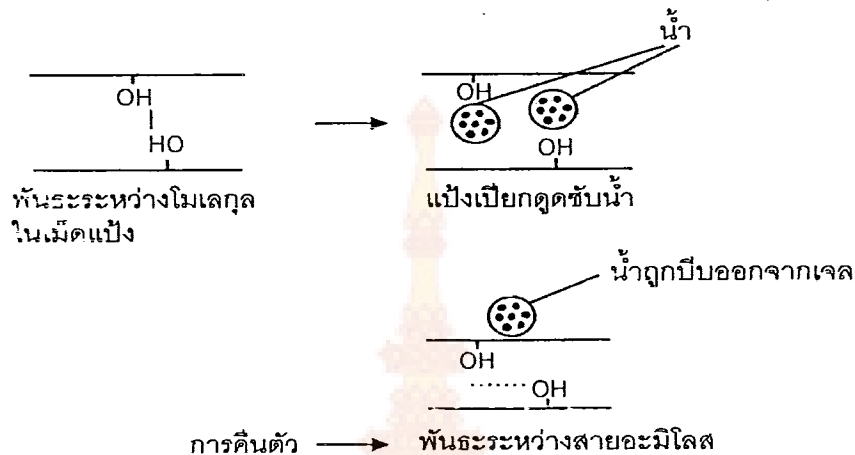
เม็ดสตาร์ชที่ได้รับความร้อนในภาวะที่มีน้ำปริมาณมาก จะพองตัวมากและมีอะไมโลสส่วนที่ละลายน้ำได้หลุดออกมากด้วย หากมีความดันหรือแรงเฉือนที่ทำให้เม็ดสตาร์ชถูกทำลาย จะได้สารละลายที่มีลักษณะขุ่นหนืด ซึ่งประกอบด้วยส่วนที่ละลายได้ของอะไมโลสและบางส่วนของอะไมโลเพกทิน ถ้าทิ้งให้สารละลายสตาร์ชเย็นลง อาจได้สารละลายที่มีหนืดหยุ่น (Viscoelastic) หรือเป็นเจล

การศึกษาเจลลิตีในเซชันของเม็ดสตาร์ช จะใช้สารละลายสตาร์ชที่มีความเข้มข้น 5% กวนและให้ความร้อน เม็ดสตาร์ชจะดูดน้ำและพองตัวออก เบียดตัวซึ่งกันและกันภายในภาชนะ ทำให้ความหนืดเพิ่มขึ้น การกวนทำให้เม็ดสตาร์ชที่พองตัวเต็มที่แตกออกได้ง่าย ซึ่งมีผลทำให้ความหนืดลดลง เมื่อเยื่อที่หุ้มเมล็ดสตาร์ชแตกออก โมเลกุลของอะไมโลสจะหลุดออกและแพร่กระจายอยู่ในสารละลาย

เมื่อทิ้งให้สารละลายของเม็ดสตาร์ชที่เกิดเจลลิตีในเซชันเย็นลง โมเลกุลของสตาร์ชบางส่วน โดยเฉพาะโมเลกุลของอะไมโลสจะมาเกาะรวมตัวกันตกตะกอน หรือเกิดเป็นเจล เรียกกระบวนการนี้ว่า รีโทรเกรเดชัน ลักษณะของเจลที่เกิดขึ้นจะมีเนื้อสัมผัสแข็งหรืออ่อนขึ้นอยู่กับ การเกิดโซนรอยต่อ (Junction zone) ซึ่งแปรผันตามองค์ประกอบอื่นๆ เช่น ไขมัน โปรตีน น้ำตาล กรด และปริมาณน้ำที่อยู่ในสารละลายนั้น

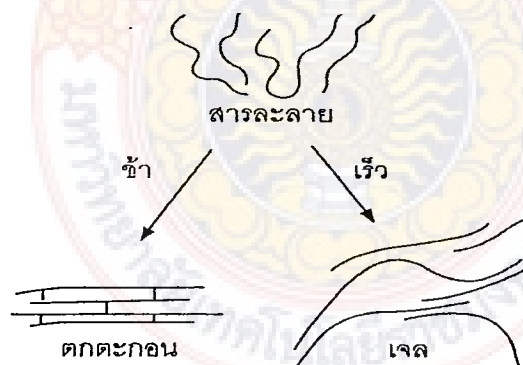
3. การเกิดรีโทรเกรเดชัน เมื่อแป้งได้รับความร้อนถึงอุณหภูมิเจลลิตีในเซชันแล้วให้ความร้อนต่อไป เม็ดแป้งจะพองตัวเต็มที่และแตกออกทำให้ความหนืดลดลง เนื่องจากโมเลกุลของอะไมโลสมีขนาดเล็กและจะกระจัดกระจายออกมา เมื่อปล่อยให้เย็นลงโมเลกุลของ

อะไมโลส จะเกิดการเรียงตัวใหม่ด้วยพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุลเกิดเป็นร่างแหสามมิติ สามารถอุ้มน้ำและไม่ดูดน้ำเข้ามาอีก ความหนืดคงตัวมากขึ้น เกิดลักษณะเจลเหนียว ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า การเกิดรีโทรเกรเดชัน ดังแสดงในรูปที่ 2.10 หรือ การคืนตัว ดังแสดงในรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.10 การเกิดรีโทรเกรเดชัน

การคืนตัวของแป้งถ้าเกิดขึ้นอย่างช้าๆ จะเกิดการตกตะกอน แต่ถ้าเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วจะทำให้เจลข้น ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ เช่น ชนิดและความเข้มข้นของแป้ง กระบวนการให้ความร้อน อุณหภูมิ ระยะเวลา ความเป็นกรด-เบส ปริมาณและขนาดของโมเลกุลของอะไมโลสและอะไมโลเพกทิน และองค์ประกอบทางเคมีอื่นๆ ในแป้ง



รูปที่ 2.11 กลไกการคืนตัวของแป้ง

2.1.5 การดัดแปรแป้ง

วิธีการดัดแปรแป้งมีหลายวิธี ดังนี้

2.1.5.1 การดัดแปรแป้งทางเคมี (Chemical modification) ได้แก่

1. การเกิดอนุพันธ์ (Derivatives) ประกอบด้วย

(ก) การแทนที่สารในโมเลกุลเดี่ยวของแป้ง (Monostarch substitution) เกิดทั้งปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันและปฏิกิริยาอีเทอร์ริฟิเคชัน เช่น แป้งไฮดรอกซีเอทิล

(ข) การแทนที่โมเลกุลที่มีหมู่ฟังก์ชันมากกว่า 1 หมู่ เช่น แป้งครอสลิงก์

2. การลดขนาดโมเลกุลแป้งด้วยกรด (Acid thinning) เช่น แป้งดัดแปรด้วยกรด (Acid modified starch)

3. เดกทรีไนเซชัน (Dextrinization) เป็นการลดขนาด หรือเปลี่ยนการจับเกาะ (Depolymerization/transglycosylation) โดยใช้ความร้อน หรือความร้อนกับกรด

4. ออกซิเดชัน (Oxidation) ทำให้เกิดการฟอกสีและลดขนาดโมเลกุล เช่น แป้งออกซิไดซ์ (Oxidized starch)

5. การแยกสลายด้วยน้ำ (Hydrolysis) โดยใช้น้ำย่อยหรือกรด เพื่อแยกสลายให้เป็นน้ำตาลโมเลกุลเล็ก เช่น มอลโตเดกซ์ทริน (Maltodextrin)

2.1.5.2 การดัดแปรแป้งทางกายภาพ (Physical modification) ได้แก่

1. เจลาติไนเซชัน เป็นวิธีที่ให้ความร้อนแก่แป้งจนผ่านขั้นตอนของเจลาติไนเซชันแล้วทำให้แห้งทันที เช่น แป้งพรีเจลาติไนซ์ (Pre-gelatinized starch)

2. แป้งละลายน้ำเย็น (Granular-Cold-Water-Soluble-Starch, GCWSS) เป็นการแปรรูปแป้งให้สามารถละลายในน้ำเย็น โดยไม่ผ่านขั้นตอนการเกิดเจลาติไนเซชัน

3. การลดขนาดเม็ดแป้งโดยทางกล จะได้ลดขนาดเม็ดแป้งได้เร็ว

4. การอบอ่อน (Annealing) เป็นการให้ความร้อนในขณะที่เม็ดแป้งอยู่ในอุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิเจลาติไนเซชัน

5. การแปรรูปด้วยความร้อนชื้น (Heat moisture treatment) เป็นการให้ความร้อนแก่แป้งสูงกว่าอุณหภูมิเจลาติไนเซชันในขณะที่แป้งมีความชื้นต่ำ

2.1.5.3 การดัดแปรทางเทคโนโลยีชีวภาพ (Biotechnological modification) ได้แก่

1. แป้งเหนียว (Waxy starch) คือ แป้งที่มีปริมาณอะไมโลสต่ำหรือไม่มีเลย

2. แป้งที่มีอะไมโลสสูง (High-amylose starch)

2.2 พอลิเมอร์

พอลิเมอร์ คือ สารที่มีขนาดโมเลกุลใหญ่ประกอบด้วยหน่วยที่ซ้ำๆ กัน (Repeating unit) ที่เรียกว่า เมอร์ (Mer) หรือ โมโนเมอร์ (Monomer) ซึ่งเป็นคำกรีก พอลิ แปลว่า มากมาย และ เมอร์ แปลว่า หน่วยหรือส่วน ดังนั้นพอลิเมอร์จึงเป็นสารที่มีโมเลกุลยาวมาก บางกรณีเป็นสายตรง

(Linear) บางกรณีเป็นกิ่งสาขา (Branched) หน่วยที่ซ้ำๆ กันของพอลิเมอร์ ปกติแล้วจะเหมือนหรือเกือบเหมือนมอนอเมอร์ [4]

2.2.1 แรงระหว่างโมเลกุลและพันธะเคมีในพอลิเมอร์

โดยปกติโมเลกุลประกอบด้วยอะตอมซึ่งยึดกันไว้ด้วยพันธะ และอะตอมประกอบด้วยนิวเคลียส ซึ่งมีประจุบวกอยู่ตรงกลางและล้อมรอบด้วยกลุ่มอิเล็กตรอน อิเล็กตรอนรอบนอกที่เรียกว่า เวเลนซ์อิเล็กตรอน (Valence electron) จะเกี่ยวข้องกับการเกิดปฏิกิริยาเคมี และการเกิดพันธะปฐมภูมิ (Primary bond)

2.2.1.1 พันธะปฐมภูมิ ได้แก่

1. พันธะไอออนิก (Ionic bond) เกิดจากอะตอมหนึ่งให้อิเล็กตรอนกับอีกอะตอมหนึ่ง ทำให้เกิดประจุบวกและลบกับอะตอมทั้งสอง ดังนั้นอะตอมทั้งสองจึงยึดกัน ด้วยแรงทางไฟฟ้า การเรียงตัวของอิเล็กตรอนในลักษณะเช่นนี้จะมีความเสถียรมากที่สุด และพบมากในผลึกเกลือใหญ่ๆ แต่พันธะเหล่านี้ปกติจะไม่ค่อยพบในสารพอลิเมอร์ จะมีอยู่บ้างก็ในพอลิเมอร์ที่เรียกว่า ไอโอโนเมอร์ (Ionomers) เป็นพอลิเมอร์ร่วมของแอลฟาโอเลฟินกับมอนอเมอร์กรดคาร์บอกซิลิก เช่น กรดเมทาคริลิก (Methacrylic acid) และทำให้เป็นกลางด้วยอออนบวกของโลหะ ดังนั้นการเกิดโครงร่างแบบเชื่อมขวาง จะเกิดผ่านโลหะกับหมู่คาร์บอกซิล พอลิเมอร์ชนิดนี้ใช้ในงานที่ต้องการความใสมากๆ และยืดหยุ่น

2. พันธะโคเวเลนต์ (Covalence bond) พันธะประเภทนี้เกิดจากเวเลนซ์อิเล็กตรอน 1 คู่ หรือมากกว่า 1 คู่ มาใช้ร่วมกันระหว่างอะตอม 2 อะตอม ทำให้เกิด โมเลกุลที่เสถียร พันธะประเภทนี้เป็นพันธะที่สำคัญในการเกิดพอลิเมอร์

3. พันธะโคออร์ดิเนต (Coordinate bond) ลักษณะของพันธะประเภทนี้ คล้ายกับพันธะโคเวเลนต์ที่อิเล็กตรอนเข้าร่วมกันเพื่อให้เกิดเสถียรภาพ เพียงแต่ว่าในพันธะโคออร์ดิเนตนี้อิเล็กตรอนที่เข้าร่วมจะมาจากอะตอมหนึ่งอะตอมใดทั้ง 2 อิเล็กตรอน

4. พันธะโลหะ (Metallic bond) พันธะประเภทนี้จะมีลักษณะที่ประจุบวกอัดแน่นกันอยู่ และมีอิเล็กตรอนเคลื่อนที่อย่างอิสระ ดังนั้นจึงมีสภาพนำไฟฟ้าสูง เป็นลักษณะที่โลหะกับโลหะมาสร้างพันธะกัน พันธะประเภทนี้ยังไม่พบในพอลิเมอร์ แต่พันธะระหว่างโลหะกับสารอินทรีย์อยู่ในช่วงการศึกษา ซึ่งเป็นพอลิเมอร์ที่เรียกว่า เมทัลโลซีน (Metellocene)

2.2.1.2 พันธะทุติยภูมิ (Secondary bond) พันธะประเภทนี้เกิดจากแรงระหว่างโมเลกุล (Intermolecular forces) ซึ่งอาจเรียกว่า แรงแวนเดอร์วาลส์ (Van der Waals) ก็ได้ ซึ่งแบ่งเป็นประเภทย่อย ดังนี้

1. แรงไดโพล (Dipole forces) เกิดจากแรงทางไฟฟ้าของอะตอมต่างชนิดกันในโมเลกุลหนึ่งๆ ทำให้เกิดความสมดุลซึ่งเรียกว่ามีสภาพขั้ว (Polar) หรือมีไดโพลโมเมนต์ (Dipole moment) เกิดขึ้น เมื่อโมเลกุลเหล่านี้มาอยู่ใกล้กัน ทำให้มีแรงกระทำต่อกัน

2. แรงเหนี่ยวนำ (Induction forces) บางครั้งโมเลกุลที่มีสภาพขั้วจะมีอิทธิพลต่อโมเลกุลข้างเคียง และเกิดการเหนี่ยวนำทำให้เกิดไดโพลได้เหมือนกัน แม้ว่าจะไม่ถาวร และเมื่อเหนี่ยวนำได้จะทำให้เกิดแรงกระทำระหว่างโมเลกุลที่เป็นไดโพลถาวรกับโมเลกุลที่เป็นไดโพลไม่ถาวร ซึ่งถูกเหนี่ยวนำแรงที่เกิดขึ้นนี้เรียกว่า แรงเหนี่ยวนำ ซึ่งโดยปกติจะเป็นแรงอ่อนๆ และไม่ขึ้นกับอุณหภูมิ

3. พันธะไฮโดรเจน (Hydrogen bond) เป็นพันธะที่เกิดจากอะตอมไฮโดรเจนกับอะตอมอื่นๆ 2 อะตอม ซึ่งมีพบมากในพอลิเมอร์ พันธะไฮโดรเจนนี้จะเกิดระหว่าง 2 หมู่ทำหน้าที่ในโมเลกุลเดียวกันหรือต่างโมเลกุลเดียวกัน โดยปกติพันธะประเภทนี้เกิดจากอะตอมไฮโดรเจนเกาะอยู่ระหว่างหมู่ที่ให้โปรตอน (Proton donor) เช่น หมู่ไฮดรอกซิล หมู่คาร์บอกซิล หมู่เอมีน หรือหมู่เอไมด์ กับหมู่ที่รับโปรตอน (Proton acceptor) เช่น ออกซิเจนในคาร์บอนิลอิเทอร์ และไฮดรอกซิลในโตรเจนในเอมีน เอไมด์ หรืออาจเป็นฮาโลเจนก็ได้ โมเลกุลที่มีสภาพขั้วที่เกี่ยวข้องกับพันธะชนิดนี้ เช่น น้ำ แอลกอฮอล์ กรดไฮโดรฟลูออริก เป็นต้น พวกพอลิเมอร์ที่มีสภาพขั้วจะทำให้มีผลต่อโครงสร้าง เช่น ไนลอน เซลลูโลส และโปรตีน ซึ่งมีผลมาจากพันธะไฮโดรเจนด้วยเช่นกัน ความยาวพันธะไฮโดรเจนมีค่าประมาณ 2.4 ถึง 3.2 Å และมีพลังงานการสลายพันธะอยู่ระหว่าง 3-7 kcal/mole สำหรับอะตอมที่สามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนได้มีเพียงฟลูออรีน ไนโตรเจน ออกซิเจน และคลอรีน เท่านั้นที่สภาพไฟฟ้าลบ (Electronegativity) เพียงพอ

2.2.2 การจำแนกประเภทของพอลิเมอร์

2.2.2.1 พอลิเมอร์อินทรีย์ (Organic polymer) หมายถึง พอลิเมอร์ที่เกิดจากสารอินทรีย์ธรรมชาติ ได้แก่ พอลิแซ็กคาไรด์ โปรตีน กาวธรรมชาติ เส้นใยธรรมชาติ ยางธรรมชาติ เป็นต้น ส่วนพอลิเมอร์อินทรีย์ที่สังเคราะห์มีมากมาย เช่น ยางสังเคราะห์ พลาสติก กาว เส้นใย เป็นต้น

1. แบ่งตามลักษณะการใช้งาน เป็น 4 กลุ่ม ดังนี้

(ก) อีลาสโตเมอร์ (Elastomer) หรือยาง (Rubber)

(ข) พลาสติก (Plastic)

(ค) เส้นใย (Fiber)

(ง) สีและสารยึดติด (Paint and adhesives) ซึ่งเป็นวัสดุเคลือบผิว

2. แบ่งตามสมบัติทางกายภาพ (Physical properties) เป็น 2 กลุ่ม คือ

(ก) พอลิเมอร์ประเภทเทอร์มอพลาสติก (Thermoplastic polymer) พอลิเมอร์ชนิดนี้จะละลายได้ดีในตัวทำละลายบางชนิด เมื่อถูกความร้อนหลอมเหลวได้ และเมื่อเย็นลงจะแข็งตัว สามารถทำให้หลอมและแข็งตัวได้หลายๆ ครั้งโดยสมบัติทางเคมีไม่เปลี่ยนแปลง แบ่งเป็น 2 กลุ่ม ได้แก่

- กลุ่มเทอร์มอพลาสติกอสัณฐานหรือไม่เป็นผลึก (Amorphous thermoplastics) กลุ่มนี้มีสมบัติแข็งแต่เปราะ เช่น พอลิสไตรีน (Polystyrene) พอลิเมทิลเมทาคริเลต (Polymethyl methacrylate) พอลิเมอร์อะคริโลไนไตรล์ บิวตะไดอิน สไตรีน (Acrylonitrile-butadiene-styrene copolymer) เป็นต้น

- กลุ่มเทอร์มอพลาสติกที่เป็นผลึกบางส่วน (Partial crystalline thermo-plastics) กลุ่มนี้จะมีโครงสร้างของโซ่โมเลกุลอย่างเป็นระเบียบทำให้เรียงตัวได้ดี จึงมีความเป็นผลึกปนอยู่ ประกอบกับการที่อุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (Glass transition temperature, T_g) ถ้าอยู่ต่ำกว่าอุณหภูมิห้องจะทำให้พอลิเมอร์มีลักษณะยืดหยุ่นและเหนียวพอสมควร เช่น พอลิเอทิลีน (Polyethylene) พอลิพรอพิลีน (Polypropylene) และพอลิเอไมด์ (Polyamide) เป็นต้น

ข. กลุ่มพอลิเมอร์ประเภทเทอร์มอเซต (Thermosetting polymer) พอลิเมอร์กลุ่มนี้จะมีรูปทรงถาวร เมื่อผ่านกรรมวิธีการผลิตโดยใช้ความร้อนหรือความดัน ผลผลิตที่ได้ไม่สามารถหลอมละลายได้อีก ไม่ละลายในตัวทำละลาย คือ เกิดกระบวนการไม่ย้อนกลับ โดยเมื่อได้ผลผลิตแล้วไม่สามารถเปลี่ยนรูปร่างใหม่ สาเหตุที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากก่อนผ่านกระบวนการผลิต โครงสร้างของพอลิเมอร์ยังไม่เป็นร่างแห แต่เมื่อผ่านกระบวนการโดยให้ความร้อนหรือความดันเข้าไป จะมีการเปลี่ยนแปลงทางเคมีในโครงสร้าง เกิดการเชื่อมโยงระหว่างสายโซ่โมเลกุล ทำให้ผลผลิตที่ได้มีความคงทนไม่หลอม ไม่ละลาย ถ้าให้ความร้อนมากๆ จะไหม้เกรียมและสมบัติเปลี่ยนไปจากเดิม ตัวอย่างที่เห็นชัดเจนคือ ยางธรรมชาติที่ผ่านกระบวนการวัลคาไนเซชัน ซึ่งจะเชื่อมโยงสายโซ่โมเลกุลด้วยกำมะถันทำให้แข็งแรงมากขึ้น

3. แบ่งตามลักษณะการจัดเรียงตัวของมอนอเมอร์ เป็น 2 กลุ่ม คือ

(ก) พอลิเมอร์เอกพันธุ์ (Homopolymers) สายโซ่โมเลกุลประกอบด้วยมอนอเมอร์ชนิดเดียว เช่น ถ้าโมโนเมอร์เป็น A สายโซ่โมเลกุลจะเป็นดังนี้

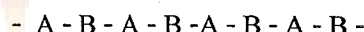


ตัวอย่างเช่น พอลิเอทิลีน สายโซ่โมเลกุลประกอบด้วยเอทิลีนชนิดเดียว หรือพอลิสไตรีนจะประกอบด้วยมอนอเมอร์สไตรีนเพียงชนิดเดียว

(ข) พอลิเมอร์ร่วม สายโซ่โมเลกุลประกอบด้วยมอนอเมอร์ตั้งแต่สองชนิดขึ้นไป เช่น พอลิเมอร์ร่วมสไตรีน เป็นต้น พอลิเมอร์ร่วมที่ประกอบด้วยมอนอเมอร์ 3 ชนิด เช่น

ABS (Acrylonitrile-butadiene-styrene) กรณียพอลิเมอร์ร่วมที่มาจากมอนอเมอร์ 2 ชนิด แบ่งได้หลายแบบตามลักษณะการเรียงตัวของมอนอเมอร์ คือ

- พอลิเมอร์ร่วมแบบสลับ (Alternating copolymer) ถ้าพิจารณาในกรณีที่มียอนอเมอร์ A และมอนอเมอร์ B ในสายโซ่โมเลกุลจะประกอบด้วย A และ B สลับกันไปอย่างเป็นระเบียบ คือ

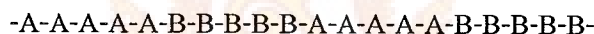


- พอลิเมอร์ร่วมแบบสุ่ม (Random copolymer) ในสายโซ่โมเลกุลจะพบมอนอเมอร์ทั้ง 2 ชนิด เช่น A และ B อยู่ปะปนกันอย่างไม่เป็นระบบ ดังนี้



จะเห็นได้ว่าอาจพบ A 1 หน่วย หรือ 2 หน่วยก็ได้ B ก็เช่นกันอาจพบ 1 หน่วยหรือ 2 หน่วยหรือมากกว่าก็ได้

- พอลิเมอร์ร่วมแบบบล็อก (Block copolymer) พอลิเมอร์ร่วมพวกนี้ประกอบด้วยมอนอเมอร์ 2 ชนิด แต่ละชนิดจะพบว่าอยู่กันเป็นกลุ่มๆ ในสายโซ่พอลิเมอร์ มีลักษณะดังนี้

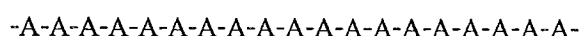


- พอลิเมอร์ร่วมแบบตอกิ่ง (Graft copolymer) มีลักษณะเป็นสายโซ่โมเลกุลที่มีกิ่งแยกจากสายโซ่หลัก แต่หน่วยของโมโนเมอร์ในสายโซ่หลักจะมีชนิดเดียว เช่น A จะเป็น A ตลอด และมีหน่วยของโมโนเมอร์อีกชนิดหนึ่ง เช่น B แยกเป็นกิ่งออกไป มีลักษณะดังนี้



4. แบ่งตามชนิดของโครงสร้างโมเลกุล ซึ่งแบ่งออกเป็น 3 ชนิด คือ

(ก) พอลิเมอร์เชิงเส้น (Linear polymer or nonlinear polymer) พอลิเมอร์ชนิดนี้สายโซ่โมเลกุลมีลักษณะเป็นเส้นยาวๆ ไม่มีกิ่งหรือสาขาแยกออกไป มีลักษณะดังนี้



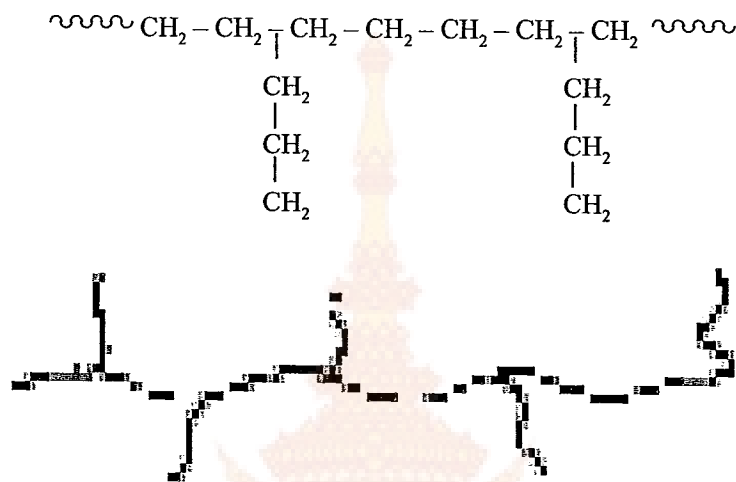
ตัวอย่างเช่น พอลิเอทิลีนสายโซ่ตรง (Linear polymers)



(ข) พอลิเมอร์โซ่กิ่ง (Branched polymer or Non linear polymer) พอลิเมอร์ชนิดนี้สายโซ่โมเลกุลจะมีกิ่งก้านสาขาแยกออกไปจากสายโซ่หลัก มีลักษณะดังแสดงในรูปที่

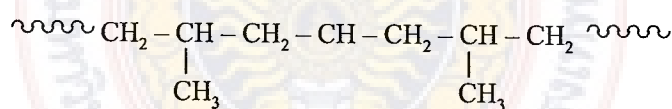
2.18

ตัวอย่างเช่น



รูปที่ 2.12 การเกิดพอลิเมอร์แบบโซ่กิ่ง

กรณีนี้คือ พอลิเอทิลีนที่มีกิ่งก้านสาขาแยกออกจากโซ่หลัก สังเกตให้ดีว่ากิ่งที่แยกออกจากสายโซ่หลักนั้นต้องเป็นหน่วยที่ซ้ำๆ กัน หรือหน่วยของมอนอเมอร์ แต่ถ้ากิ่งที่เกาะอยู่เป็นส่วนประกอบของมอนอเมอร์กรณีนี้ไม่ถือเป็นกิ่ง เช่น พอลิพรอพิลีน



จะเห็นว่าทั้งหมู่ฟีนิล และหมู่เมทิลเป็นส่วนประกอบในโมเลกุลมอนอเมอร์ คือ โมเลกุลสไตรีนและโมเลกุลโพรพิลีน กรณีที่เห็นนี้ถือว่าเป็นพอลิเมอร์สายโซ่ตรง

(ค) พอลิเมอร์ร่างแห (Network polymer) พอลิเมอร์กลุ่มนี้จะเป็นสายโซ่โมเลกุลเชื่อมโยงกันเป็นร่างแห หรืออาจเรียกว่าพอลิเมอร์แบบเชื่อมโยง มีลักษณะคล้ายตาข่าย ดังแสดงในรูปที่ 2.13

2.2.2.2 พอลิเมอร์อนินทรีย์ (Inorganic polymer) หมายถึง กลุ่มพอลิเมอร์ที่เกิดจากสารอนินทรีย์ ทั้งที่เกิดในธรรมชาติและที่สังเคราะห์ได้ พอลิเมอร์ที่เกิดในธรรมชาติ เช่น ทราบ ดิน

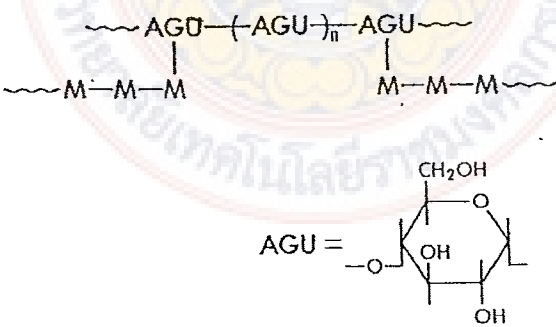
ที่ผ่านกระบวนการแล้วจะเปลี่ยนเป็นแก้ว อิฐ ซีเมนต์ เป็นต้น ส่วนพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์ ได้แก่ เส้นใย เช่น เส้นใยคาร์บอน เส้นใยซิลิกอน คาร์ไบด์ เป็นต้น



รูปที่ 2.13 การเกิดพอลิเมอร์แบบร่างแห

2.3 พอลิเมอร์ร่วมจากแป้งกับพอลิเมอร์สังเคราะห์

การสังเคราะห์พอลิเมอร์ร่วมจากแป้งกับพอลิเมอร์สังเคราะห์ ส่วนมากเป็นการสังเคราะห์พอลิเมอร์ร่วมแบบต่อกิ่ง โดยต่อกิ่งพอลิเมอร์สังเคราะห์ลงบนสายโซ่โมเลกุลของแป้ง ดังแสดงในรูปที่ 2.14 ถึงแม้ว่าขั้นตอนในการผลิตจะซับซ้อนกว่าการเตรียมพอลิเมอร์ผสม แต่ผลิตภัณฑ์ที่ได้จะไม่ประสบปัญหาความเข้ากันไม่ได้ ทั้งนี้เนื่องจากแป้งและพอลิเมอร์สังเคราะห์มีการเชื่อมกันด้วยพันธะโคเวเลนต์ซึ่งเป็นพันธะเคมีที่ถาวร สมบัติของผลิตภัณฑ์ที่ได้เป็นการรวมสมบัติที่ดีของแป้งและพอลิเมอร์สังเคราะห์เข้าด้วยกัน จึงมีการใช้ประโยชน์จากต่อกิ่งพอลิเมอร์ร่วมเหล่านี้มากมาย เช่น ขึ้นรูปเป็นฟิล์มที่มีความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพ หรือนำไปใช้เป็นสารเสริมสภาพเข้ากันได้ (Compatibiliser) ในการเตรียมพอลิเมอร์ร่วมระหว่างแป้งกับพอลิเมอร์สังเคราะห์ [3]



รูปที่ 2.14 โครงสร้างโมเลกุลจำลองของพอลิเมอร์ร่วมแบบต่อกิ่งของแป้ง

ปฏิกิริยาการสังเคราะห์ต่อกิ่งพอลิเมอร์ร่วมที่ใช้กันโดยทั่วไป คือ ปฏิกิริยาการต่อกิ่งพอลิเมอร์ร่วมแบบอนุมูลเสรี (Free radical graft copolymerization) ซึ่งริเริ่มปฏิกิริยาโดยการ

ฉายรังสี (Irradiation) หรือโดยการใช้สารริเริ่มปฏิกิริยา การฉายรังสีทำให้เกิดอนุมูลเสรีจากการที่สายโซ่โมเลกุลของพอลิเมอร์ขาดออกจากกัน วิธีนี้เป็นวิธีที่ได้สะดวกและรวดเร็ว ให้ปริมาณการตอ้งสูง แต่วิธีนี้มีความยุ่งยากทางเทคนิค เครื่องมือราคาสูง ต้องใช้ประสบการณ์และความชำนาญอย่างมาก รวมทั้งอาจเกิดอันตรายจากรังสีได้ ส่วนการใช้สารริเริ่มปฏิกิริยาเป็นวิธีที่ปลอดภัยกว่า และไม่ต้องใช้เครื่องมือที่มีราคาสูง สารริเริ่มปฏิกิริยาที่ใช้มีหลายชนิด เช่น เบนโซอิลเปอร์ออกไซด์ (Benzoyl peroxide) ซีริกไอออน (Ceric ion) โพแทสเซียมเปอร์ซัลเฟต (Potassium persulfate) ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (Hydrogen peroxide) กับกรดแอสคอร์บิก (Ascorbic acid) และแมงกานิกไพโรฟอสเฟต (Manganic pyrophosphate) เป็นต้น

2.4 งานวิจัยที่ผ่านมา

เมอร์ชาและคณะ [5] ได้นำอะคริโลไนไตรล์และเมทิลอะคริเลตตอ้งลงบนแป้งในตุ้กลางที่เป็นน้ำ พบว่าปริมาณการตอ้งขึ้นกับความเข้มข้นของสารริเริ่มปฏิกิริยา ความเข้มข้นของมอนอเมอร์ เวลา และอุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา นอกจากนี้ยังพบว่าอะคริโลไนไตรล์มีความว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยามากกว่าเมทิลอะคริเลต และจากการเปรียบเทียบความว่องไวต่อปฏิกิริยาระหว่างเบนโซอิลเปอร์ออกไซด์ (BPO) และ 2,2'-อะโซ-บิส-ไอโซบิวทิโรไนไตรล์ (AIBN) ในการพอลิเมไรเซชันร่วมแบบตอ้งไวนิลอะซิเตตลงบนแป้งมันฝรั่ง พบว่า BPO มีความว่องไวต่อปฏิกิริยามากกว่า

เกาและคณะ [6] ศึกษาการตอ้งเมทิลเมทาคริเลต (MMA) บนแป้งสาตุในน้ำ โดยใช้ซีริกแอมโมเนียมไนเตรด (CAN) และโพแทสเซียมเปอร์ซัลเฟต (PPS) เป็นสารริเริ่มปฏิกิริยาภายใต้บรรยากาศแก๊สไนโตรเจน พบว่าเมื่อใช้ CAN เป็นสารริเริ่มปฏิกิริยา ให้ปริมาณการตอ้งสูงสุดเท่ากับ 46% เมื่อใช้แป้งสาตุ 1 กรัม CAN 2.0 mmol กรดไนตริก 0.4 mmol และ MMA 141 mmol ที่อุณหภูมิ 70°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ส่วนกรณีที่ใช้ PPS เป็นสารริเริ่มปฏิกิริยา ให้ปริมาณการตอ้งสูงสุดเท่ากับ 90% เมื่อใช้แป้งสาตุ 1 กรัม PPS 1.82 mmol และ MMA 47 mmol ที่อุณหภูมิ 50°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง 30 นาที

ผลการศึกษาพบว่าปริมาณการตอ้ง ประสิทธิภาพการตอ้ง และอัตราการตอ้ง ขึ้นกับความเข้มข้นของสารริเริ่มปฏิกิริยา มอนอเมอร์ และแป้ง รวมทั้งเวลาและอุณหภูมิที่ใช้ทำปฏิกิริยา

ฟาร์ครูโอราซีและคณะ [7] ศึกษาการตอ้งเมทิลเมทาคริเลตบนแป้งแคนนา โดยใช้แมงกานิกไพโรฟอสเฟตเป็นสารริเริ่มปฏิกิริยา ผลการศึกษาพบว่าปริมาณการตอ้ง ประสิทธิภาพการตอ้ง และอัตราการตอ้ง ขึ้นกับความเข้มข้นของสารริเริ่มปฏิกิริยา มอนอเมอร์ และแป้ง

รวมทั้งเวลาและอุณหภูมิที่ใช้ทำปฏิกิริยา และยืนยันการสังเคราะห์โดยใช้ไออาร์สเปกตรัมของแป้ง สาธู MMA และการตอ่กิ่งพอลิเมอร์ร่วม

ศรีวิศตาวาและคณะ [8] ศึกษาวิธีใหม่ในการคำนวณค่าปริมาณการตอ่กิ่งของพอลิเมอร์ร่วมแบบตอ่กิ่งของแป้งและพอลิอะคริโลไนไทรล์ โดยใช้สารริเริ่มปฏิกิริยาหลายชนิด ได้แก่ เบนโซอิลเปอร์ออกไซด์ ซิริกซัลเฟต โพแทสเซียมเปอร์ซัลเฟต และสารเฟนตัน (Fenton's reagent) พร้อมทั้งคำนวณปริมาณการตอ่กิ่งระหว่างกลูโคสในไฮโดรไลสของพอลิเมอร์ร่วม โดยวิธีไทเทรตและวิเคราะห์ปริมาณไนโตรเจน

แพนดาและคณะ [9] ศึกษาการตอ่กิ่งสไตรีนบนแป้งข้าวโพดด้วยวิธีฉายแสง ^{60}Co โดยผสมแป้งข้าวโพดและสไตรีนอย่างละ 4 กรัม น้ำ 1 mL และตัวทำละลายอินทรีย์ ได้แก่ เอทิลีนไกลคอล และเอทานอล 1.5 mL พบว่าร้อยละแอดออน (% Add-on) มีค่าสูงสุดเท่ากับ 43% และร้อยละการเปลี่ยน (% Conversion) จากสไตรีนมอนอเมอร์เป็นตอ่กิ่งพอลิสไตรีน (Grafted polystyrene) สูงสุดเท่ากับ 76% เมื่อใช้น้ำเป็นตัวทำละลายเพียงอย่างเดียว

พิมพ์พรรณและคณะ [10] ได้ดัดแปรแป้งข้าวเหนียวด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์ โดยใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาและน้ำเป็นตัวทำละลาย เมื่อปฏิกิริยาสิ้นสุด ทำผลิตภัณฑ์ให้เป็นกลางด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริก ตรวจสอบโครงสร้างทางเคมีของแป้งดัดแปรด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี จากนั้นนำแป้งดัดแปรมาขึ้นรูปเป็นแผ่นพลาสติกด้วยวิธีการหล่อ พร้อมทั้งจับเวลาที่แห้ง ทดสอบสมบัติความทนแรงดึง การดูดความชื้น และแผ่นพลาสติกที่เตรียมสามารถแตกสลายทางชีวภาพได้ พบว่าปริมาณของกรดมาเลอิกแอนไฮไดรด์ และเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยามีผลต่อสมบัติของแผ่นพลาสติกที่เตรียมได้

พิมพ์พรรณและคณะ [11] ได้ดัดแปรแป้งมันสำปะหลังด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์ โดยใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาและน้ำเป็นตัวทำละลาย เมื่อสิ้นสุดปฏิกิริยา ทำผลิตภัณฑ์ให้เป็นกลางด้วยการเติมสารละลายกรดไฮโดรคลอริก ขึ้นรูปแป้งดัดแปรที่เตรียมได้ด้วยวิธีการหล่อเป็นแผ่นพลาสติก ศึกษาลักษณะและสมบัติของแผ่นพลาสติกดังกล่าวโดยใช้เทคนิคการวิเคราะห์หลายวิธี พบว่าปริมาณของมาเลอิกแอนไฮไดรด์มีผลต่อโครงสร้างทางเคมีของแป้ง และลักษณะของแผ่นพลาสติกมีความแตกต่างกัน แผ่นพลาสติกดังกล่าวสามารถแตกสลายทางชีวภาพได้ทั้งหมด ไม่ละลายในตัวทำละลายทั่วไป เช่น คลอโรฟอร์ม หรือสารละลายกรดทั้งที่อุณหภูมิห้องและอุณหภูมิสูง แต่ละลายในสารละลายด่างที่ร้อน นอกจากนี้ยังพบว่าแผ่นพลาสติกซึ่งเตรียมจากแป้งดัดแปรสมบัติแตกต่างจากพลาสติกที่เตรียมจากแป้งที่ไม่ได้ดัดแปร กล่าวคือ มีอุณหภูมิเปลี่ยนสภาพแก้ว (T_g) และจุดหลอมเหลวต่ำกว่า ดูดซึมน้ำได้ดีกว่า และมีความแข็งแรงมากกว่า

ต่อรงและพิมพ์พรรณ [12] และ หอริมารกุลและคณะ [13] สังเคราะห์พอลิเมอร์ร่วมแบบต่อกิ่งของเป็งมันสำปะหลังและเมทิลเมทาคริเลต โดยใช้เบนโซอิลเปอร์ออกไซด์เป็นสารริเริ่มปฏิกิริยาในตัวยางที่เป็นน้ำที่อุณหภูมิ 80°C ที่ภาวะต่างๆ กันภายใต้บรรยากาศแก๊สไนโตรเจน จากการวิเคราะห์คุณลักษณะการต่อกิ่ง ซึ่งได้แก่ ร้อยละแอดออน (Add on) การดำเนินไปของปฏิกิริยาในการเกิดพอลิเมทิลเมทาคริเลต ประสิทธิภาพการต่อกิ่ง สัดส่วนการต่อกิ่ง และปริมาณผลิตภัณฑ์ที่ได้ พบว่า ปริมาณของเป็งมันสำปะหลัง เมทิลเมทาคริเลตและเบนโซอิลเปอร์ออกไซด์ มีผลกระทบต่อลักษณะการต่อกิ่งอย่างเห็นได้ชัด ในขณะที่เวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยามีผลกระทบต่อเล็กน้อย นอกจากนี้ถ้าเพิ่มปริมาณของการสังเคราะห์จากระดับห้องปฏิบัติการ และเปลี่ยนเป็นการสังเคราะห์ภายใต้บรรยากาศแก๊สออกซิเจน เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการประยุกต์สู่อุตสาหกรรม พบว่าไม่มีผลต่อคุณลักษณะการต่อกิ่ง โดยค่าที่ได้มีความใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการสังเคราะห์ในระดับห้องปฏิบัติการ ทั้งนี้ได้ยืนยันการเกิดพอลิเมอร์ร่วมแบบต่อกิ่งโดยใช้เทคนิคฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี เจลเพอร์มิเอชันโครมาโทกราฟี และการวิเคราะห์ลักษณะทางสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด รวมทั้งวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนด้วยเทอร์โมกราวิเมตริกอะนาไลเซอร์

เอื้อโสภณและคณะ [14] สังเคราะห์เป็งมันสำปะหลังดัดแปรจากปฏิกิริยาระหว่างเป็งมันสำปะหลังกับมาเลอิกแอนไฮไดรด์ โดยใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา และนำเป็นตัวทำละลาย ทำผลิตภัณฑ์ให้เป็นกลางด้วยการเติมสารละลายกรดไฮโดรคลอริก ผสมแป้งที่ผ่านการดัดแปรกับสารเสริมสภาพพลาสติก (Plasticizer) ปริมาณต่างๆ สารเสริมสภาพพลาสติกที่ใช้ 4 ชนิด คือ กลีเซอรอล ซอร์บิทอล กรดสเตียริก และน้ำมันปาล์ม ขึ้นรูปของผสมที่เตรียมได้ด้วยวิธีการหล่อเป็นฟิล์มแผ่นพลาสติก วิเคราะห์และทดสอบสมบัติต่างๆ พบว่า ชนิดและปริมาณของสารเสริมสภาพพลาสติก มีผลต่อสมบัติด้านแรงดึงและความสามารถในการดูดความชื้นเป็นอย่างมาก ฟิล์มเหล่านี้มีความทนทานต่อไขมันและน้ำมันดีมาก แต่ไม่ทนทานต่อน้ำ กรด และด่าง นอกจากนี้ยังมีความทนทานต่อบรรยากาศที่ต่ำกว่า และสามารถแตกสลายทางชีวภาพได้สูงกว่าฟิล์มแป้งดัดแปรที่ไม่ผสมสารเสริมสภาพพลาสติก

บทที่ 3

วิธีการวิจัย

บทนี้จะกล่าวถึงวัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการสังเคราะห์พอลิ(เมทิลเมทาคริเลต) ที่ต้องก่อบนแป้งข้าวโพด ซึ่งเป็นพอลิเมอร์ร่วมที่แตกสลายทางชีวภาพได้ โดยใช้โพแทสเซียมเปอร์ซัลเฟตเป็นสารริเริ่มปฏิกิริยารีดอกซ์ และวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์ที่สังเคราะห์ได้ เพื่อศึกษาภาวะที่เหมาะสมในการสังเคราะห์

3.1 วัสดุและอุปกรณ์

3.1.1 อุปกรณ์ในการทดลอง ประกอบด้วย

- 3.1.1.1 ขวดรูปชมพู่ (Conical flask) ขนาด 250 และ 500 mL
- 3.1.1.2 รีฟลักซ์คอนเดนเซอร์ (Reflux condenser)
- 3.1.1.3 กรวยกรอง (Glass funnel)
- 3.1.1.4 ชุดสกัดแยก (Soxhlet)
- 3.1.1.5 บีกเกอร์ (Beaker) ขนาด 50, 100, 250, 400 และ 500 mL
- 3.1.1.6 หลอดหยด (Dropper)
- 3.1.1.7 ช้อนตักสาร (Spoon)
- 3.1.1.8 ปิเปตต์ (Pipette) ขนาด 10 และ 20 mL
- 3.1.1.9 เทอร์โมมิเตอร์ (Thermometer) 0- 100°C
- 3.1.1.10 จุกยาง (Rubber plug)
- 3.1.1.11 ชุดขาตั้ง (Stand and clamp)
- 3.1.1.12 ขวดสามคอ (Three-neck round bottom flask) ขนาด 1 L
- 3.1.1.13 สายยางซิลิโคน (Silicone tube)
- 3.1.1.14 ขวดน้ำกลั่น (Injection bottle)
- 3.1.1.15 ถ้วยอบสาร (Crucible)
- 3.1.1.16 เดซิเคเตอร์ (Desiccator)
- 3.1.1.17 คอลัมน์สกัดตัวยับยั้งปฏิกิริยา (Column for extract inhibitor)
- 3.1.1.18 ทิมเบอร์ (Timber)

3.1.1.19 ที่กรองน้ำในตู้ปลา (Aquarium liquid filter, AP 1600)

3.1.2 วัสดุและสารเคมี ประกอบด้วย

3.1.2.1 กรดไฮโดรคลอริก (HCl, AR grade, 36%) Humburg Chemical Co. Ltd.

(Germany)

3.1.2.2 แก๊สไนโตรเจน (N_2 , HP grade, 99.95%) บริษัทไทยอินดัสเตรียลแก๊ส จำกัด

3.1.2.3 ซิลิกาเจล (Silica gel) Merck Co., Ltd. (Germany)

3.1.2.4 น้ำกลั่น (Distilled water)

3.1.2.5 แป้งข้าวโพด จากบริษัทยูนิลีเวอร์ เบสท์ฟู้ดส์ (ประเทศไทย) จำกัด

3.1.2.6 โพแทสเซียมเปอร์ซัลเฟต ($KHSO_4$, AR grade) Mallinckrodt Co. Ltd.

(Mexico)

3.1.2.7 มอนอเมอร์เมทิลเมทาคริเลต ($CH_2C(CH_3)COOCH_3$, MMA, 99.0%) Fluka

3.1.2.8 เมทานอล (CH_3COOH) Merck Co., Ltd. (Germany)

3.1.2.9 แอซีโตน (CH_3COCH_3) AR grade, 36%) Humburg Chemical Co. Ltd.

(Germany)

3.1.2.10 ใยแก้ว (Fiber glass)

3.1.3 เครื่องมือทดลองและเครื่องมือวิเคราะห์

3.1.3.1 เครื่องชั่งละเอียด ทศนิยม 4 ตำแหน่ง

3.1.3.2 เครื่องแยกสารด้วยแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง

3.1.3.3 อ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ

3.1.3.4 แผ่นให้ความร้อนพร้อมที่กวนด้วยแม่เหล็ก

3.1.3.5 ตู้อบลมร้อน (Hot air oven) Model: YCO-010 series

3.1.3.6 เครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (Fourier transform infrared (FT-IR) Spectroscopy)

3.1.3.7 เครื่องวัดความหนืด (Ubbelohde viscometer)

3.2 วิธีการทดลอง

3.2.1 การสกัดด้วยขี้ผึ้งออกจากเมทิลเมทาคริเลตมอนอเมอร์

3.2.1.1 เตรียมคอลัมน์สำหรับสกัด ดังนี้

1. ใส่ใยแก้วในคอลัมน์เป็นชั้นที่ 1 สูงประมาณ 1/5 ของคอลัมน์

- 2. ใส่ซิลิกาเจลในคอลัมน์เป็นชั้นที่ 2 สูงประมาณ 2/5 ของคอลัมน์
- 3. ใส่ใยแก้วอีกครั้งเป็นชั้นที่ 3 สูงประมาณ 1/5 ของคอลัมน์
- 3.2.1.2 รินมอนอเมอร์เมทิลเมทาคริเลตลงในคอลัมน์ที่เตรียมไว้ในข้อ 3.2.1.1
- 3.2.1.3 เก็บมอนอเมอร์ที่ผ่านการสกัดแล้วในตู้เย็นซึ่งควบคุมอุณหภูมิที่ประมาณ 0°C

3.2.2 การเตรียมพอลิ(เมทิลเมทาคริเลต) ที่ต่อกิ่งบนแป้งข้าวโพด

ตารางที่ 3.1 แสดงปริมาณของเมทิลเมทาคริเลต ปริมาณของโพแทสเซียมเปอร์ซัลเฟต และเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา น้ำหนักจริงของสารแต่ละชนิดแสดงในภาคผนวก ก

วิธีการเตรียมพอลิ(เมทิลเมทาคริเลต) ที่ต่อกิ่งบนแป้งข้าวโพด ดังนี้

3.2.2.1 ชั่งน้ำหนักแป้งประมาณ 5.5 กรัม ใส่ลงในขวดสามคอ แล้วเจลาตินไนซ์ที่อุณหภูมิ 70°C บนแผ่นให้ความร้อนพร้อมที่กวนด้วยแม่เหล็กและผ่านแก๊สไนโตรเจนพร้อมกับกวนแท่งแม่เหล็กตลอดเวลา เป็นเวลา 30 นาที จากนั้นลดอุณหภูมิลงจนถึง 50°C และควบคุมอุณหภูมิให้คงที่ที่ 50°C

ตารางที่ 3.1 ปริมาณของเมทิลเมทาคริเลต ปริมาณของโพแทสเซียมเปอร์ซัลเฟต และเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา

การทดลองที่	เวลา (min)	ปริมาณเมทิลเมทาคริเลต (mmol)	ปริมาณโพแทสเซียมเปอร์ซัลเฟต (mmol)
1	30	20	1
2	60	20	1
3	90	20	1
4	120	20	1
5	T	30	1
6	T	40	1
7	T	50	1
8	T	M	2
9	T	M	3
10	T	M	4

หมายเหตุ T คือ เวลาที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลองที่ 1-4

M คือ ปริมาณของเมทิลเมทาคริเลตที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลองที่ 5-7

3.2.2.2 เติมโพแทสเซียมเปอร์ซัลเฟตประมาณ 1.35 กรัม (หรือ 1 mmol) ลงในขวดสามคอในข้อ (1) แล้วกวนต่ออีก 15 นาที

3.2.2.3 เติมมอนอเมอร์เมทิลเมทาคริเลตประมาณ 10.6 mL (หรือ 20 mmol) แล้วกวนตลอดเวลา อีก 30 นาที

3.2.2.4 เติมเมทานอลจำนวน 250 mL ลงในขวดสามคอในข้อ (1) เพื่อตกตะกอน

3.2.2.5 เหยี่ยงแยกและกรองตะกอนที่ได้จากข้อ (4) แล้วอบที่อุณหภูมิ 60°C จนน้ำหนักคงที่ ชั่งและบันทึกน้ำหนักสารที่อบแห้งแล้ว สารที่ได้เป็นพอลิเมอร์ผสมที่ประกอบด้วยพอลิเมอร์ร่วมและพอลิเมอร์เอกพันธุ์

3.2.3 การสกัดพอลิเมอร์เอกพันธุ์ออกจากพอลิเมอร์ร่วมแบบต่อกิ่งบนแปรงข้าวโพด

3.2.3.1 เตรียมอุปกรณ์ชุดสกัด (soxhlet)

3.2.3.2 เติมแอซีโตนในขวดก้นกลม แล้วให้ความร้อนจนถึง 70°C

3.2.3.3 ใส่พอลิเมอร์ผสมที่ได้จากข้อ 3.2.3 ลงในทิมเบอร์ แล้วสกัดเป็นเวลา 8 ชั่วโมง

3.2.3.4 ทำการสกัดซ้ำจากข้อ (2) – (3) อีกครั้ง

3.2.3.5 อบพอลิเมอร์ร่วมที่สกัดได้ที่ 50°C จนน้ำหนักคงที่ ชั่งและบันทึกน้ำหนักของพอลิเมอร์ร่วมที่สังเคราะห์ได้

3.2.4 การวัดความหนืดของพอลิเมอร์ร่วมแบบต่อกิ่ง โดยมีขั้นตอนดังนี้

3.2.4.1 ให้พอลิเมอร์ร่วมแบบต่อกิ่งบนแปรงข้าวโพดที่สังเคราะห์ได้ ทำปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสด้วยกรด (Acid hydrolysis) กับสารละลายกรดไฮโดรคลอริก 0.5 M

ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสด้วยกรด เป็นกระบวนการทำลายโครงสร้างขององค์ประกอบของแปรงข้าวโพดในพอลิเมอร์ร่วม โดยนำพอลิเมอร์ร่วมแบบต่อกิ่งบนแปรงข้าวโพดที่สกัดได้จากข้อ 3.2.3 จำนวน 1.0 กรัม ให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 70°C กับ 0.5 M กรดไฮโดรคลอริก 100 mL เป็นเวลา 6 ชั่วโมง จากนั้นกรองและล้างด้วยน้ำกลั่น แล้วอบกากที่ได้ที่อุณหภูมิ 60°C จนน้ำหนักคงที่

3.2.4.2 วัดความหนืด และคำนวณน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยของพอลิเมอร์ร่วมที่สังเคราะห์ได้

เตรียมสารละลายของพอลิเมอร์ร่วมที่สังเคราะห์ได้ โดยละลายพอลิเมอร์ร่วมที่สังเคราะห์ได้จากข้อ 3.2.3 ด้วยแอซีโตนที่อุณหภูมิ 30°C แล้ววัดความหนืดด้วยเครื่องวัดความหนืด (Ubbelohde viscometer) วัดค่าความหนืดของสารละลายพอลิเมอร์ร่วมที่สังเคราะห์ได้และคำนวณ

โดยใช้สมการของฮักกิน (Huggin’s equation) และคำนวณค่าน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยของพอลิเมอร์
ร่วมที่สังเคราะห์โดยใช้สมการของมาร์ก โหวินค์ (Mark Houwink’s equation) [7]

สมการของฮักกิน:

$$\frac{\eta_{sp}}{C} = [\eta] + K'[\eta]^2 C \tag{3.1}$$

และ $\eta_{sp} = \eta_{red} C$ (3.2)

- เมื่อ η_{sp} คือ ค่าความหนืดเฉพาะของพอลิเมอร์
 η_{red} คือ ความหนืดที่ลดลงของพอลิเมอร์
 C คือ ความเข้มข้นของพอลิเมอร์
 K' คือ ค่าคงที่ของฮักกิน
 $[\eta]$ คือ ค่าความหนืดเฉพาะของพอลิเมอร์ต่อความเข้มข้น

วิธีหาค่าความหนืดเป็นดังนี้

1. เตรียมสารละลายของพอลิเมอร์ร่วมที่สังเคราะห์ได้ในเอซีโตน ที่มีค่าความเข้มข้นที่แน่นอน 5 ค่า ซึ่งอยู่ระหว่าง 0.0005 ถึง 0.005 g polymer/mL solution
2. จับเวลาการไหลของเอซีโตน ด้วยเครื่องวัดความหนืด 3 ครั้ง เพื่อหาค่าเฉลี่ยให้ค่าเฉลี่ยที่ได้เท่ากับ T_0
3. จับเวลาการไหลของสารละลายในข้อ (1) ด้วยเครื่องวัดความหนืด 3 ครั้ง เพื่อหาค่าเฉลี่ย ให้ค่าเฉลี่ยที่ได้เท่ากับ T_1
4. คำนวณความหนืดสัมพัทธ์, η_r ด้วยสมการที่ (3.3)

$$\eta_r = \frac{T_1}{T_0} \tag{3.3}$$

แล้วคำนวณความหนืดเฉพาะ, η_{sp} ด้วยสมการที่ (3.4)

$$\eta_{sp} = \eta_r - 1 \tag{3.4}$$

เขียนกราฟจากค่า η_{sp} ที่ได้จากสมการที่ (3.4) เพื่อคำนวณค่าความหนืดเฉพาะของพอลิเมอร์ต่อหน่วยความเข้มข้น โดยให้แทนค่าของ $\frac{\eta_{sp}}{C}$ ลงในแกน y และแทนค่าความเข้มข้นของสารละลายของพอลิเมอร์ร่วมที่สังเคราะห์ได้ในเอซีโตน (C) ลงในแกน x จะได้กราฟเส้นตรงซึ่งจะได้ค่าจุดตัดบนแกน y (คือ $C = 0$) เท่ากับ $[\eta]$ และความชันของกราฟเท่ากับ $K'[\eta]^2$

แทนค่า $[\eta]$ ที่ได้ลงในสมการของมาร์ก โหวินค์ (สมการที่ 3.5) เพื่อคำนวณน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยของพอลิเมอร์ร่วมที่สังเคราะห์ได้ ซึ่งพอลิเมอร์ร่วมที่สังเคราะห์ได้ คือ PMMA

$$[\eta] = KM_v^a \quad (3.5)$$

- เมื่อ K คือ ค่าคงที่มีค่าเท่ากับ $7.7 \times 10^{-3} \text{ g.mL}^{-1}$
 a คือ ค่าคงที่มีค่าเท่ากับ 0.70 สำหรับสารละลายของ PMMA ในแอซีโตน
 M_v คือ คำนวณน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ย

3.2.5 การวิเคราะห์หมู่ทำหน้าที่ของพอลิเมอร์ร่วมที่สังเคราะห์ได้

การวิเคราะห์หมู่ทำหน้าที่ของพอลิเมอร์ร่วมที่เตรียมได้ ด้วยเครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกป (Fourier transform infrared (FT-IR) Spectroscopy) ซึ่งได้รับความอนุเคราะห์ให้ใช้เครื่องจากภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



บทที่ 4

ผลการทดลองและอภิปรายผล

บทนี้จะกล่าวถึงผลการทดลองการสังเคราะห์พอลิ(เมทิลเมทาคริเลต) ที่ต่อกิ่งบนแปรงข้าวโพด ซึ่งเป็นพอลิเมอร์ที่แตกสลายทางชีวภาพได้ โดยใช้โพแทสเซียมเปอร์ซัลเฟตเป็นสารริเริ่มปฏิกิริยารีดอกซ์ในบรรยากาศแก๊สไนโตรเจน เพื่อศึกษาภาวะที่เหมาะสมในการสังเคราะห์โดยมีตัวแปรในการทดลองคือ ปริมาณของเมทิลเมทาคริเลตและโพแทสเซียมเปอร์ซัลเฟต และเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา เพื่อยืนยันสารที่สังเคราะห์ได้โดยการตรวจสอบหมู่ทำหน้าที่ยของเมทิลเมทาคริเลตที่ต่อกิ่งบนแปรงข้าวโพดด้วยเครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี พร้อมทั้งหาค่าความหนืดโดยใช้เครื่องวัดความหนืด และคำนวณค่าความหนืดสัมพัทธ์และน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยจากสมการของฮักกินและมาร์ก โสวินค์ ตามลำดับ

4.1 พอลิ(เมทิลเมทาคริเลต) ที่ต่อกิ่งบนแปรงข้าวโพดที่สังเคราะห์ได้

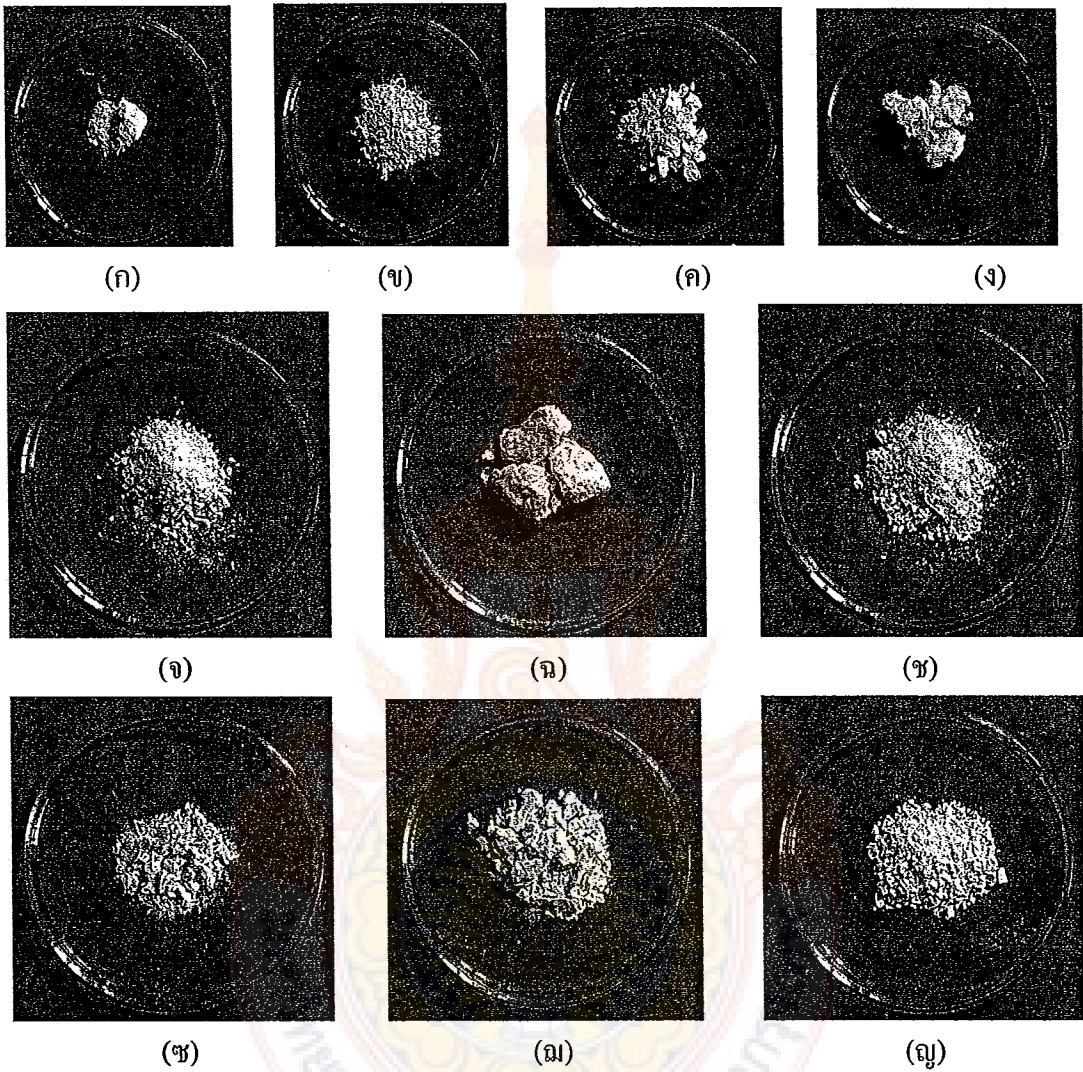
รูปที่ 4.1 (ก) ถึง (ญ) แสดงผลิตภัณฑ์ที่สังเคราะห์ได้ที่ภาวะต่างๆ จาก 10 การทดลอง พบว่าผลิตภัณฑ์ที่ได้เป็นสารสีขาวทึบแสง โดยในบางภาวะการทดลองจะมีลักษณะเป็นผง แต่บางภาวะการทดลองจะเกาะกันเป็นก้อน

รูปที่ 4.1 (ก) ถึง 4.1 (ง) เป็นผลิตภัณฑ์ที่สังเคราะห์ได้เมื่อศึกษาผลของเวลาในการทำปฏิกิริยา ที่มีต่อสมบัติของผลิตภัณฑ์ โดยให้ปริมาณของ MMA เท่ากับ 20 mmol และปริมาณของ PPS เท่ากับ 1 mmol จะเห็นว่าผลิตภัณฑ์ที่สังเคราะห์ในเวลา 30 นาที ในรูปที่ 4.1 (ก) และ 120 นาที ในรูปที่ 4.1 (ง) จะเกาะกันเป็นก้อน ในขณะที่ผลิตภัณฑ์ซึ่งสังเคราะห์ในเวลา 60 ในรูปที่ 4.1 (ข) และ 90 นาที ในรูปที่ 4.1 (ค) มีลักษณะเป็นผง

รูปที่ 4.1 (จ) ถึง 4.1 (ซ) แสดงผลิตภัณฑ์ที่สังเคราะห์ได้เมื่อศึกษาผลของปริมาณของ MMA ที่มีต่อสมบัติของผลิตภัณฑ์ โดยให้ปริมาณของ PPS เท่ากับ 1 mmol และเวลาในการทำปฏิกิริยาเท่ากับ 90 นาที จะเห็นว่าผลิตภัณฑ์ที่สังเคราะห์เมื่อใช้ MMA 40 mmol ในรูปที่ 4.1 (ฉ) จะเกาะกันเป็นก้อน ในขณะที่ผลิตภัณฑ์ซึ่งสังเคราะห์เมื่อใช้ MMA 30 mmol ในรูปที่ 4.1 (จ) และ 50 mmol ในรูปที่ 4.1 (ซ) มีลักษณะเป็นผง

รูปที่ 4.1 (ซ) ถึง 4.1 (ญ) แสดงผลิตภัณฑ์ที่สังเคราะห์ได้เมื่อศึกษาผลของปริมาณของ PPS ที่มีต่อสมบัติของผลิตภัณฑ์ โดยให้ปริมาณของ MMA เท่ากับ 50 mmol และเวลาในการทำปฏิกิริยาเท่ากับ 90 นาที จะเห็นว่าผลิตภัณฑ์ที่สังเคราะห์เมื่อใช้ PPS 2 mmol ในรูปที่ 4.1 (ซ) และ

3 mmol ในรูปที่ 4.1 (ฉ) จะเกาะกันเป็นก้อนเล็กๆ ในขณะที่ผลิตภัณฑ์ซึ่งสังเคราะห์เมื่อใช้ PPS 4 mmol ในรูปที่ 4.1 (ญ) มีลักษณะเป็นผง



รูปที่ 4.1 ลักษณะของผลิตภัณฑ์ที่สังเคราะห์ที่ภาวะต่างๆ

ใช้ PPS 1 mmol MMA 20 mmol (ก) 30 นาที (ข) 60 นาที (ค) 90 นาที และ (ง) 120 นาที

ใช้ PPS 1 mmol ในเวลา 90 นาที (จ) MMA 30 mmol (ฉ) 40 mmol และ (ช) 50 mmol

ใช้ MMA 50 mmol ในเวลา 90 นาที (ซ) PPS 2 mmol (ฌ) 3 mmol และ (ญ) 4 mmol

4.2 ผลของเวลาในการเกิดปฏิกิริยาต่อสมบัติของพอลิ(เมทิลเมทาคริเลต) ที่ตอกลงบนแป้งข้าวโพด

การเลือกภาวะที่เหมาะสมในการสังเคราะห์พอลิเมอร์ร่วมแบบตอกลง จะพิจารณาจาก ปริมาณการตอกลง (Percentage grafting, %G) ประสิทธิภาพการตอกลง (Grafting efficiency, %GE) ปริมาณพอลิเมอร์เอกพันธ์ (Percentage homopolymer, %H) ค่าการเปลี่ยนทั้งหมด (Percentage total conversion, %TC) ค่าการเลือกเกิด (Percentage selectivity, % Selectivity) และผลได้ (Percentage yield, %Yield) ซึ่งสมการในการคำนวณค่าต่างๆ ดังนี้ คือ

$$\text{ปริมาณการตอกลง (\%G)} = \frac{W_2 - W_1}{W_1} \times 100 \quad (4.1)$$

$$\text{ประสิทธิภาพการตอกลง (\%GE)} = \frac{W_2 - W_1}{W_3} \times 100 \quad (4.2)$$

$$\text{ปริมาณพอลิเมอร์เอกพันธ์ (\%H)} = \frac{W_4 - W_1}{W_3} \times 100 \quad (4.3)$$

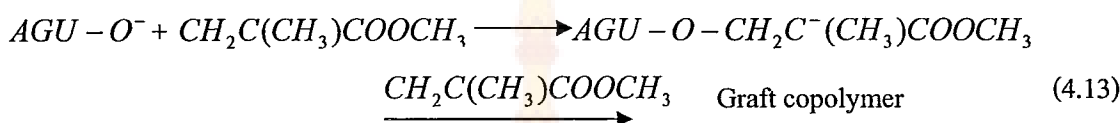
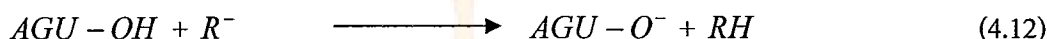
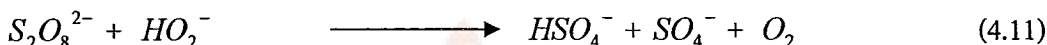
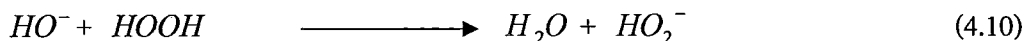
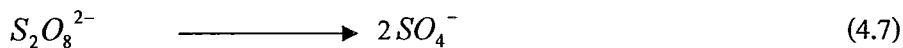
$$\text{ค่าการเปลี่ยนทั้งหมด (\%TC)} = \frac{W_4 - W_1}{W_3} \times 100 \quad (4.4)$$

$$\text{ค่าการเลือกเกิด (\%Selectivity)} = \frac{W_2 - W_1}{W_4 - W_1} \times 100 \quad (4.5)$$

$$\text{ผลได้ (\%Yield)} = \frac{W_2}{W_1 + W_3 + W_{PPS}} \times 100 \quad (4.6)$$

- เมื่อ W_1 คือ น้ำหนักแป้งเริ่มต้นที่ไม่รวมความชื้น (g) ความชื้นของแป้งข้าวโพดเท่ากับ 8.76%
 W_2 คือ น้ำหนักของเมทิลเมทาคริเลตที่ตอกลงบนแป้ง (g)
 W_3 คือ น้ำหนักของเมทิลเมทาคริเลตเริ่มต้น (g)
 W_4 คือ น้ำหนักของเมทิลเมทาคริเลตที่ตอกลงบนแป้งและน้ำหนักของพอลิเมอร์เอกพันธ์ (g)
 W_{PPS} คือ น้ำหนักของโพแทสเซียมเปอร์ซัลเฟต (g)

กลไกในการเกิดปฏิกิริยาการตอกลงบนแป้งข้าวโพด โดยใช้โพแทสเซียมเปอร์ซัลเฟตเป็น สารริเริ่มปฏิกิริยารีดอกซ์ เมื่อให้ความร้อนแก่สารละลาย จะทำให้ส่วนที่เป็นเปอร์ซัลเฟตแตกตัวเป็น อนุมูลเสรี และเกิดเป็นกลุ่มอนุมูลเสรีมากมายบนสายโซ่ของแป้งข้าวโพด โดยมีขั้นตอนการ เกิดปฏิกิริยาการสังเคราะห์พอลิเมอร์ร่วมของพอลิ(เมทิลเมทาคริเลต) บนสายโซ่ของแป้งข้าวโพดดังนี้

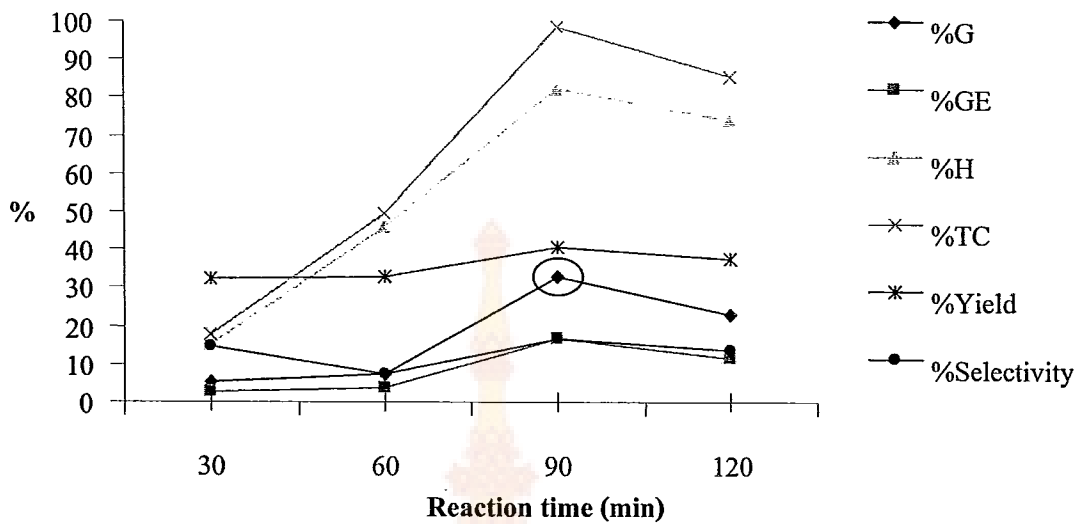


ซึ่ง AGU-OH คือ หน่วยของกลูโคสที่ได้จากแป้งข้าวโพด

R⁻ คือ กลุ่มของอนุมูลเสรี

รูปที่ 4.2 แสดงผลของเวลาที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยาที่มีต่อสมบัติในการต่อกิ่ง คือ ปริมาณการต่อกิ่ง ประสิทธิภาพการต่อกิ่ง ปริมาณพอลิเมอร์เอกพันธ์ ค่าการเปลี่ยนทั้งหมด ค่าการเลือกเกิด และผลได้ พบว่าเมื่อเวลาที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น ปริมาณการต่อกิ่งเพิ่มขึ้นจาก 30 นาที จนถึงเวลา 90 นาที แต่เมื่อเพิ่มเวลาเป็น 120 นาที ปริมาณการต่อกิ่งลดลง เนื่องจากว่าเมื่อเวลาเพิ่มขึ้นในช่วงแรก ปริมาณน้ำที่อยู่ในปฏิกิริยาจะระเหยมากขึ้น และทำให้จำนวนของเมทิลเมทาคริเลตถูกต่อกิ่งบนแป้งมากขึ้น จึงทำให้สารละลายมีความหนืดสูงขึ้น ซึ่งส่งผลให้โมเลกุลของเมทิลเมทาคริเลตเคลื่อนที่ได้ช้าลง และสายโซ่ของแป้งที่อยู่ติดกันเกิดการจับตัวกันเองในบริเวณที่เป็นอนุมูลเสรี จึงทำให้ปริมาณการต่อกิ่งลดลง นอกจากนี้ยังพบว่าค่าของประสิทธิภาพการต่อกิ่ง ปริมาณพอลิเมอร์เอกพันธ์ ค่าการเปลี่ยนทั้งหมด ค่าการเลือกเกิด และผลได้ให้แนวโน้มในการเปลี่ยนแปลงค่าดังกล่าวไปในทิศทางเดียวกันกับค่าของปริมาณการต่อกิ่ง ซึ่งเกิดจากเหตุผลดังกล่าวข้างต้น

จากผลการทดลอง พบว่าเวลาที่เหมาะสมในการทำปฏิกิริยาเพื่อให้ได้ปริมาณการต่อกิ่งสูงสุด เท่ากับ 90 นาที ดังนั้นในการศึกษาผลของปริมาณของเมทิลเมทาคริเลตและผลของปริมาณของโพแทสเซียมเปอร์ซัลเฟตที่มีต่อสมบัติต่างๆ ได้แก่ ปริมาณการต่อกิ่ง ประสิทธิภาพการต่อกิ่ง ปริมาณพอลิเมอร์เอกพันธ์ ค่าการเปลี่ยนทั้งหมด ค่าการเลือกเกิด และผลได้ จึงเลือกใช้เวลาในการทำปฏิกิริยาเท่ากับ 90 นาทีเป็นเวลาที่เหมาะสมในการสังเคราะห์พอลิเมอร์ร่วมดังกล่าว

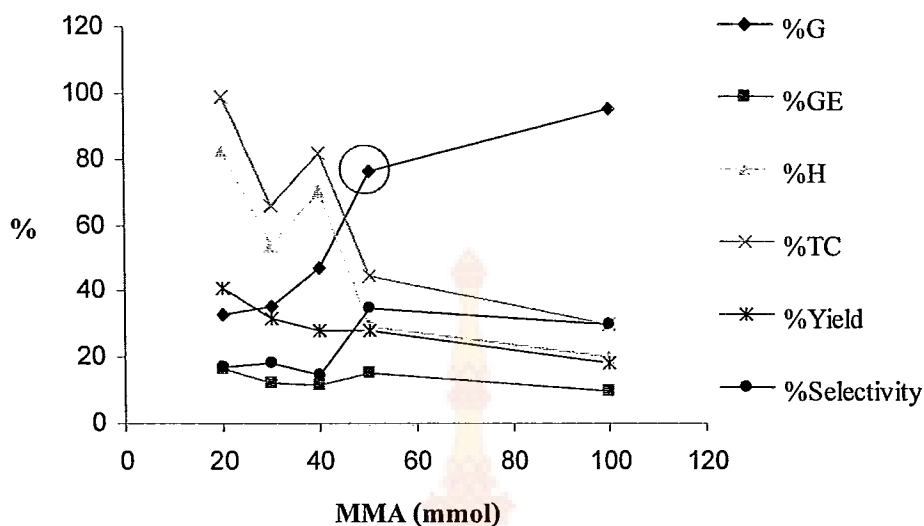


รูปที่ 4.2 ผลของเวลาในการเกิดปฏิกิริยาที่มีต่อสมบัติของพอลิ(เมทิลเมทาคริเลต) ที่ต่อกิ่งบนแป้งข้าวโพด เมื่อใช้ MMA 20 mmol และ PPS 1 mmol

4.3 ผลของปริมาณของเมทิลเมทาคริเลตที่มีต่อสมบัติของพอลิ(เมทิลเมทาคริเลต) ที่ต่อกิ่งบนแป้งข้าวโพด

ในการศึกษาผลของปริมาณของเมทิลเมทาคริเลต ที่มีผลต่อปริมาณการต่อกิ่งโดยให้ปริมาณของเมทิลเมทาคริเลตเท่ากับ 20, 30, 40 และ 50 mmol เวลาในการทำปฏิกิริยา 90 นาที และปริมาณของโพแทสเซียมเปอร์ซัลเฟตเท่ากับ 1 mmol จากรูปที่ 4.3 พบว่าเมื่อปริมาณของเมทิลเมทาคริเลตเพิ่มขึ้น ทำให้ปริมาณการต่อกิ่งเพิ่มขึ้น ซึ่งเกิดเนื่องจากแป้งมีปริมาณคงที่ และมีอนุมูลเสรีเกิดขึ้นในสายโซ่ของแป้ง ดังนั้นเมื่อความเข้มข้นของเมทิลเมทาคริเลตเพิ่มขึ้น โอกาสที่เมทิลเมทาคริเลตที่ต่อกิ่งบนแป้งจึงมากขึ้น และเมทิลเมทาคริเลตจับกันเองน้อยลง ทำให้ปริมาณพอลิเมอร์เอกพันธุ์ลดลงอย่างเห็นได้ชัดเจน เมื่อปริมาณการต่อกิ่งเพิ่มขึ้น ค่าการเปลี่ยนทั้งหมดลดลงในทิศทางเช่นเดียวกับการเปลี่ยนแปลงของปริมาณพอลิเมอร์เอกพันธุ์

ผลการทดลองข้างต้นพบว่า ปริมาณของเมทิลเมทาคริเลตที่เหมาะสมที่จะได้ปริมาณการต่อกิ่งสูงสุดเท่ากับ 50 mmol ดังนั้นในการศึกษาผลของปริมาณของโพแทสเซียมเปอร์ซัลเฟตที่มีต่อสมบัติต่างๆ จึงเลือกใช้ปริมาณของเมทิลเมทาคริเลตนี้เป็นปริมาณของเมทิลเมทาคริเลตที่เหมาะสมในการสังเคราะห์พอลิเมอร์ร่วมดังกล่าว

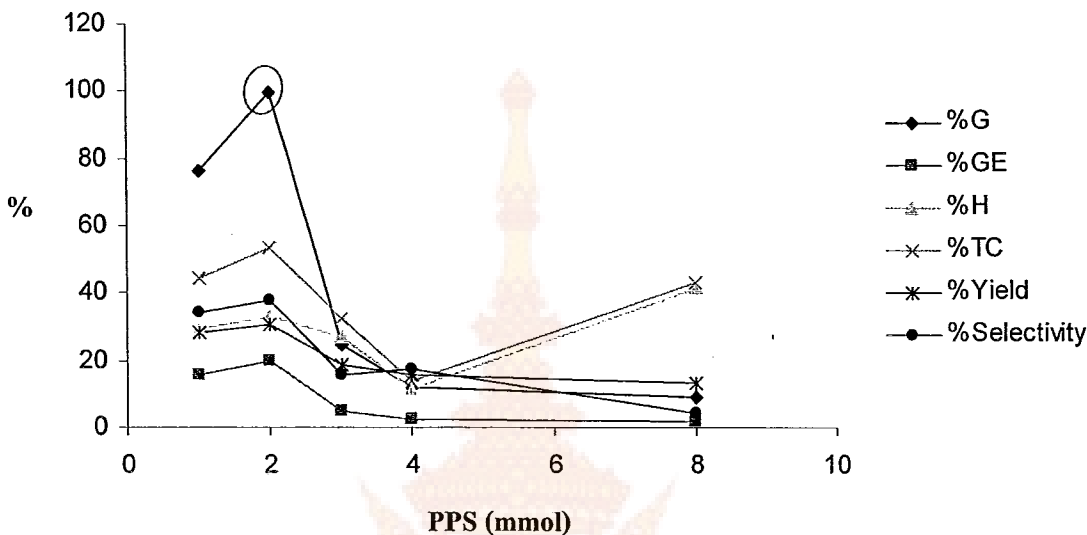


รูปที่ 4.3 ผลของปริมาณ MMA ที่มีต่อสมบัติของพอลิ(เมทิลเมทาคริเลต) ที่ต่อกิ่งบนแป้งข้าวโพด เมื่อใช้ PPS 1 mmol และเวลาในการเกิดปฏิกิริยา 90 นาที

4.4 ผลของปริมาณของโพแทสเซียมเปอร์ซัลเฟตที่มีต่อสมบัติของพอลิ(เมทิลเมทาคริเลต) ที่ต่อกิ่งบนแป้งข้าวโพด

รูปที่ 4.4 แสดงผลของปริมาณของโพแทสเซียมเปอร์ซัลเฟตที่มีสมบัติต่างๆ ในการต่อกิ่ง โดยให้ปริมาณของโพแทสเซียมเปอร์ซัลเฟตดังนี้ เท่ากับ 1, 2, 3 และ 4 mmol เวลาในการทำปฏิกิริยา เท่ากับ 90 นาที และปริมาณของเมทิลเมทาคริเลตเท่ากับ 50 mmol พบว่าเมื่อปริมาณของโพแทสเซียมเปอร์ซัลเฟตเพิ่มขึ้นจาก 1 mmol เป็น 2 mmol ปริมาณการต่อกิ่งสูงสุดเพิ่มขึ้นและเป็นค่าสูงสุดที่ปริมาณของโพแทสเซียมเปอร์ซัลเฟตเท่ากับ 2 mmol ซึ่งเกิดจากการที่ปริมาณของโพแทสเซียมเปอร์ซัลเฟตเพิ่มขึ้น ทำให้แป้งมีบริเวณที่ว่างไว้ออกปฏิกิริยา (Active site) มากขึ้น เพราะโพแทสเซียมเปอร์ซัลเฟตเป็นสารที่ช่วยทำให้เกิดอนุมูลเสรีบนสายโซ่ของแป้ง ทำให้เมทิลเมทาคริเลตสามารถเข้าไปต่อกิ่งบนบริเวณที่ว่างไวบนสายโซ่ของแป้งมากขึ้น ดังนั้นจึงทำให้ปริมาณการต่อกิ่งเพิ่มขึ้น แต่เมื่อปริมาณของโพแทสเซียมเปอร์ซัลเฟตเพิ่มสูงกว่า 2 mmol จะทำให้อนุมูลเสรีในแป้งที่อยู่ติดกันมีมากขึ้น ทำให้โอกาสที่แป้งจับตัวกันเองเพิ่มสูงขึ้นและโอกาสในการต่อกิ่งน้อยลง ดังนั้นปริมาณการต่อกิ่งจึงลดลง นอกจากนี้ยังพบว่าการเปลี่ยนแปลงของประสิทธิภาพการต่อกิ่ง ค่าการเลือกเกิด และผลได้ มีทิศทางเดียวกับปริมาณการต่อกิ่ง แต่ปริมาณพอลิเมอร์เอกพันธ์ และค่าการเปลี่ยนทั้งหมด มีค่าสูงขึ้นเมื่อปริมาณของโพแทสเซียมเปอร์ซัลเฟตสูงกว่า 4 mmol ซึ่งอาจเกิดเนื่องจากเมื่อแป้งจับตัวกันเองเพิ่มสูงขึ้น ทำให้โมเลกุลของเมทิลเมทาคริเลตทำปฏิกิริยาพอลิเมอร์เชนกันเอง

เมื่อพิจารณาจากผลการทดลองในหัวข้อ 4.1 – 4.3 จึงสรุปได้ว่าภาวะที่เหมาะสมในการสังเคราะห์พอลิ(เมทิลเมทาคริเลต) ที่ต่อกิ่งบนแป้งข้าวโพด คือ ปริมาณของเมทิลเมทาคริเลตเท่ากับ 50 mmol ปริมาณของโพแทสเซียมเปอร์ซัลเฟต 2 mmol และเวลาที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยา 90 นาที

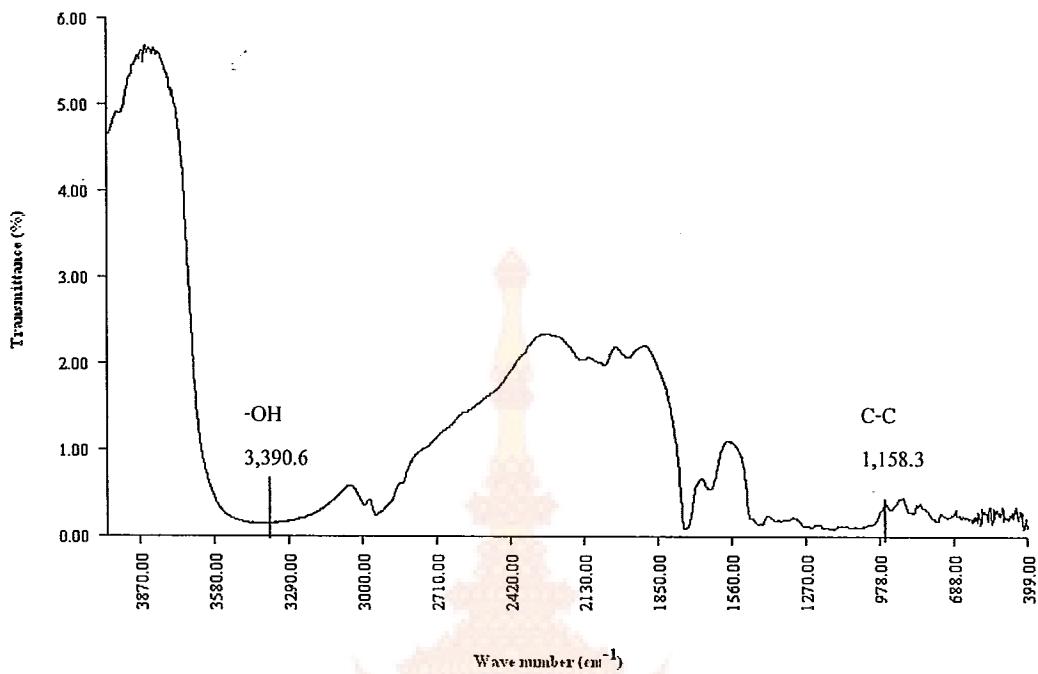


รูปที่ 4.4 ผลของปริมาณ PPS ที่มีต่อสมบัติของพอลิ(เมทิลเมทาคริเลต) ที่ต่อกิ่งบนแป้งข้าวโพด เมื่อใช้ MMA 50 mmol และเวลาในการเกิดปฏิกิริยา 90 นาที

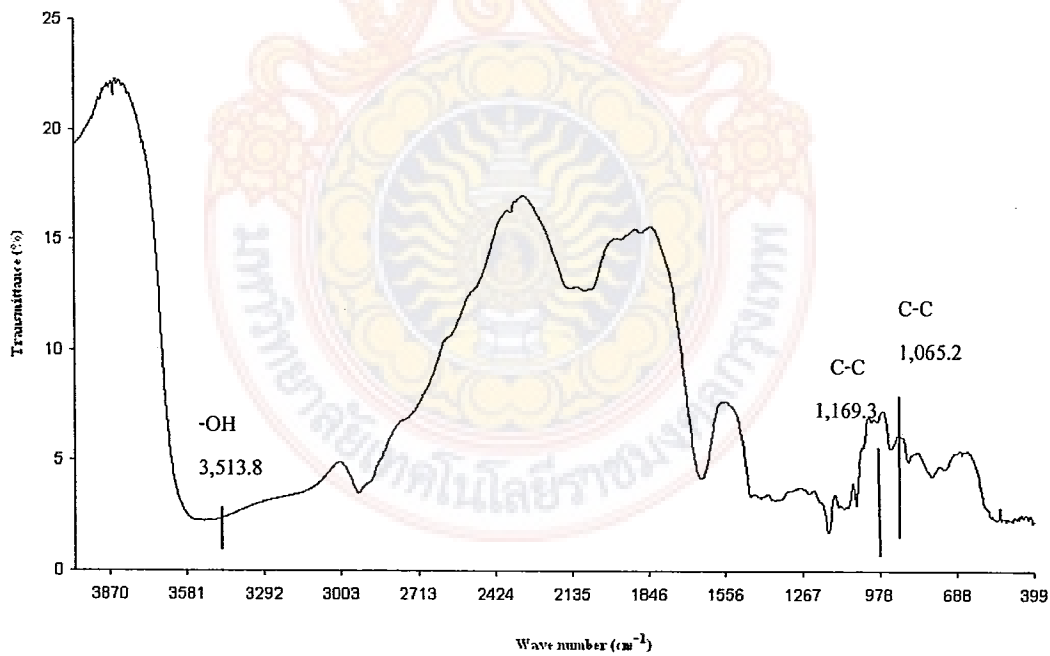
4.5 การวิเคราะห์หมู่ทำหน้าที่ของพอลิ(เมทิลเมทาคริเลต) ที่ต่อกิ่งบนแป้งข้าวโพด

รูปที่ 4.5 ถึง 4.7 แสดงสเปกตรัมของพอลิ(เมทิลเมทาคริเลต) ที่ต่อกิ่งบนแป้งข้าวโพด แป้งข้าวโพด และเมทิลเมทาคริเลต ซึ่งวิเคราะห์ด้วยเครื่องฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี

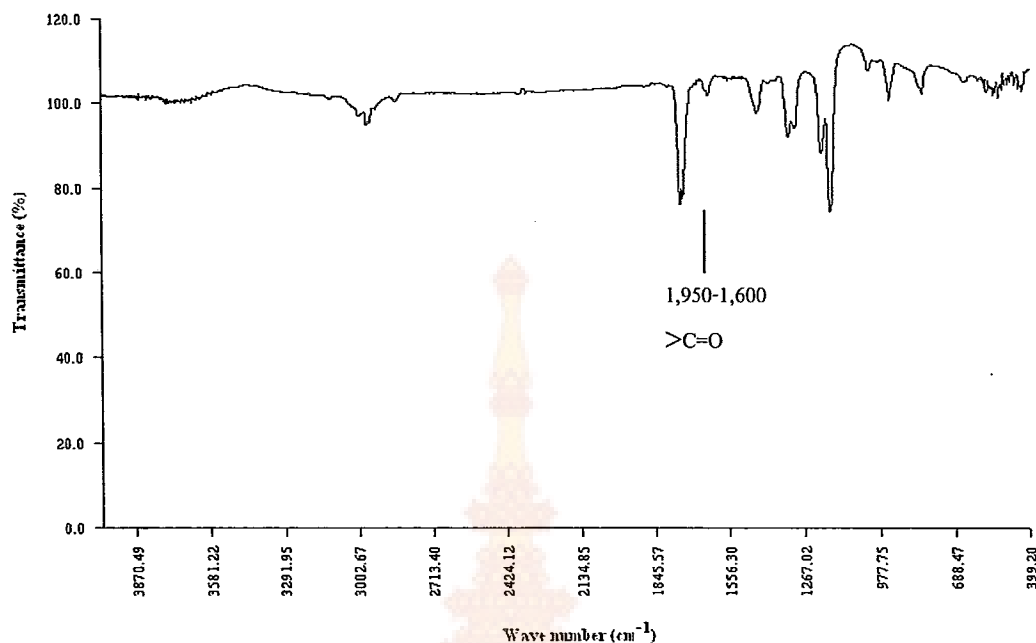
รูปที่ 4.5 แสดงสเปกตรัมของพอลิ(เมทิลเมทาคริเลต) ที่ต่อกิ่งบนแป้งข้าวโพดซึ่งพบหมู่ไฮดรอกซิล (-OH) ที่พิก 3390.6 cm^{-1} และ 1158.3 cm^{-1} และพบว่าสเปกตรัมบางส่วนของแป้งหายไปเมื่อเปรียบเทียบกับรูปที่ 4.6 ซึ่งเป็นสเปกตรัมของแป้งข้าวโพด โดยพบพิกที่ 1169.3 cm^{-1} และ 1065.2 cm^{-1} รวมทั้งพบหมู่ไฮดรอกซิล (-OH) ที่ 1513.3 cm^{-1} เช่นกัน รูปที่ 4.7 แสดงสเปกตรัมของเมทิลเมทาคริเลต ซึ่งพบหมู่คาร์บอนิล (>C=O) ในช่วงพิกที่ 1950-1600 cm^{-1} และสอดคล้องกับสเปกตรัมของ(พอลิ)เมทิลเมทาคริเลตที่ต่อกิ่งบนแป้งข้าวโพดในรูปที่ 4.5 เช่นกัน จึงเป็นการยืนยันว่างานวิจัยนี้สามารถต่อกิ่งพอลิเมทิลเมทาคริเลตลงบนแป้งข้าวโพดได้ และได้ผลิตภัณฑ์พอลิ(เมทิลเมทาคริเลต) ที่ต่อกิ่งบนแป้งข้าวโพด



รูปที่ 4.5 สเปกตรัมของพอลิ(เมทิลเมทาคริเลต) ที่ต่อกับบนแป้งข้าวโพด



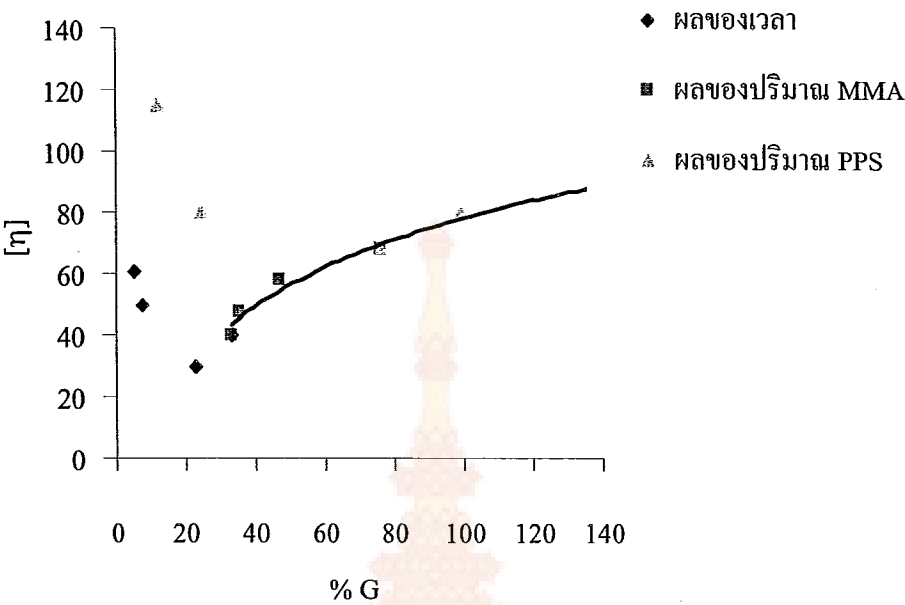
รูปที่ 4.6 สเปกตรัมของแป้งข้าวโพด



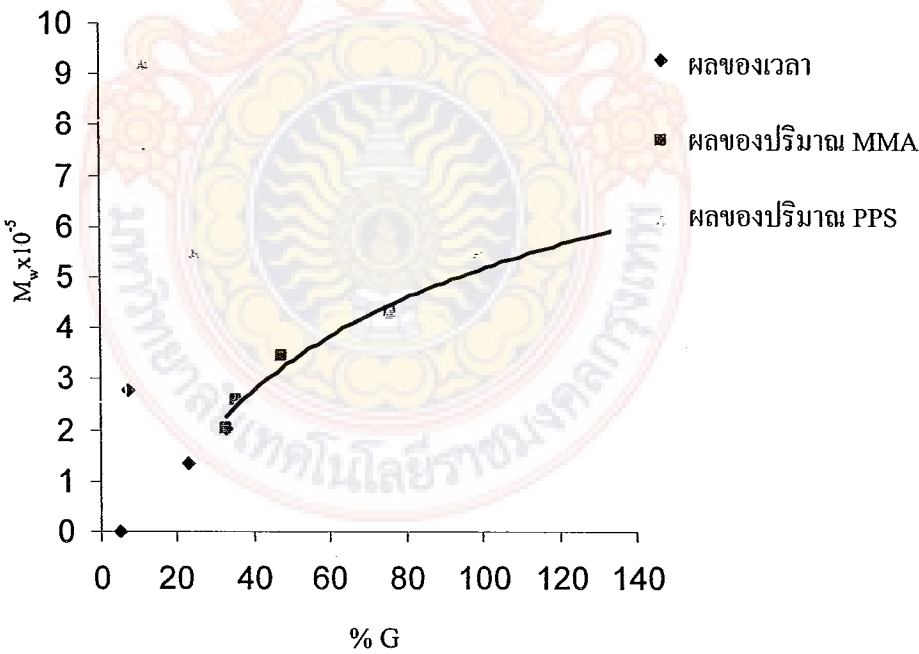
รูปที่ 4.7 สเปกตรัมของเมทิลเมทาคริเลต

4.6 สมบัติทางกายภาพของพอลิ(เมทิลเมทาคริเลต) ที่ต่อกิ่งบนแป้งข้าวโพด

สมบัติทางกายภาพที่ศึกษา คือ ความหนืด โดยวัดค่าความหนืดของพอลิ(เมทิลเมทาคริเลต) ที่ต่อกิ่งบนแป้งข้าวโพด โดยใช้โพแทสเซียมเปอร์ซัลเฟตเป็นสารริเริ่มปฏิกิริยารีดอกซ์ ด้วยเครื่องวัดความหนืดที่ 30°C โดยเปรียบเทียบกับความหนืดของแอซีโตนที่ 30°C แล้วคำนวณค่าความหนืดเฉพาะของพอลิเมอร์ต่อความเข้มข้นโดยใช้สมการของฮักกิน และคำนวณน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยโดยใช้สมการของมาร์ก โหวินค์ ดังแสดงในรูปที่ 4.8 และ 4.9 พบว่า ความหนืดเฉพาะของพอลิเมอร์ต่อความเข้มข้นและน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยแปรผันตามปริมาณการต่อกิ่ง โดยความหนืดเฉพาะของพอลิเมอร์ต่อความเข้มข้น และน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณการต่อกิ่งเพิ่มขึ้น เนื่องจากปริมาณการต่อกิ่งบ่งบอกถึงปริมาณของเมทิลเมทาคริเลตที่ต่อบนสายโซ่ของแป้งข้าวโพด ถ้าปริมาณการต่อกิ่งเพิ่มขึ้นแสดงว่ามีเมทิลเมทาคริเลตเพิ่มขึ้น จึงทำให้ความหนืดเฉพาะและน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยเพิ่มขึ้นด้วย



รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดเฉพาะของพอลิเมอร์ต่อความเข้มข้นกับปริมาณการต่อกิ่ง



รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยกับปริมาณการต่อกิ่ง

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

บทนี้เป็นการสรุปผลการวิจัยจากการศึกษาภาวะที่เหมาะสม ในการสังเคราะห์พอลิ(เมทิลเมทาคริเลต) ที่ต่อกิ่งบนแป้งข้าวโพด โดยใช้โพแทสเซียมเปอร์ซัลเฟตเป็นสารริเริ่มปฏิกิริยา รวมทั้งให้ข้อเสนอแนะจากประสบการณ์ที่ได้จากการทำโครงการวิจัยนี้

5.1 สรุปผลการวิจัย

ในการศึกษาภาวะที่เหมาะสมในการสังเคราะห์พอลิ(เมทิลเมทาคริเลต) ที่ต่อกิ่งบนแป้งข้าวโพดโดยใช้โพแทสเซียมเปอร์ซัลเฟตเป็นสารริเริ่มปฏิกิริยา ซึ่งมีตัวแปรที่ศึกษา คือ ปริมาณเมทิลเมทาคริเลตมอนอเมอร์ ปริมาณโพแทสเซียมเปอร์ซัลเฟต และเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา ที่อุณหภูมิ 50°C พบว่าภาวะที่เหมาะสม คือ ปริมาณเมทิลเมทาคริเลตมอนอเมอร์ เท่ากับ 50 mmol ปริมาณของโพแทสเซียมเปอร์ซัลเฟตเท่ากับ 2 mmol และเวลาที่เหมาะสมในการทำปฏิกิริยาเท่ากับ 90 นาที เนื่องจากที่ภาวะนี้จะให้ปริมาณการต่อกิ่งสูงสุด เท่ากับ 99.4%

การศึกษาสมบัติทางเคมีเพื่อยืนยันผลการสังเคราะห์พอลิ(เมทิลเมทาคริเลต) ที่ต่อกิ่งบนแป้งข้าวโพด โดยใช้เครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี พบว่า ผลิตภัณฑ์ที่สังเคราะห์ได้เป็นพอลิ(เมทิลเมทาคริเลต) ที่ต่อกิ่งบนแป้งข้าวโพด เนื่องจากพบหมู่ไฮดรอกซิล ($-\text{OH}$) ซึ่งเป็นหมู่ทำหน้าทีของแป้ง และพบหมู่คาร์บอนิล ($>\text{C}=\text{O}$) ซึ่งเป็นหมู่ทำหน้าทีของเมทิลเมทาคริเลต

ในการวัดค่าความหนืดซึ่งเป็นสมบัติทางกายภาพของพอลิ(เมทิลเมทาคริเลต) ที่ต่อกิ่งบนแป้งข้าวโพดด้วยเครื่องวัดความหนืด โดยวัดค่าความหนืดที่ 3°C แล้วใช้สมการของฮักกินส์ คำนวณความหนืดเฉพาะ และใช้สมการของมาร์ก-โฮวีนส์ คำนวณน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ย พบว่าความหนืดเฉพาะและน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยมีค่ามากขึ้นเมื่อปริมาณการต่อกิ่งเพิ่มขึ้น

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 ในขั้นตอนแยกตัวยังออกจากมอนอเมอร์เมทิลเมทาคริเลต ต้องควบคุมอุณหภูมิของคอลัมน์โดยใช้น้ำแข็งหล่อเย็นตลอดเวลาที่สกัด เพื่อป้องกันเมทิลเมทาคริเลตตกค้างในคอลัมน์

5.2.2 หลังจากเจลาติไนซ์ที่อุณหภูมิ 70°C แล้วลดอุณหภูมิลงเป็น 50°C ในระหว่างลดอุณหภูมิไม่ควรใช้น้ำแข็ง เนื่องจากจะเกิดการคลายตัวที่ไม่สมบูรณ์

5.2.3 ในการใช้แก๊สไนโตรเจนไล่ออกซิเจนออกจากระบบ ควรให้อัตราไหลของแก๊สไนโตรเจนมีค่าต่ำ เพื่อให้ปฏิกิริยาดำเนินไปอย่างต่อเนื่องและลดการสูญเสียแก๊สไนโตรเจน

5.2.4 หลังจากขั้นตอนการต่อถังเสร็จแล้ว ให้อบค้างคืนที่อุณหภูมิ 70°C (ประมาณ 12 ชั่วโมง) เพราะถ้าอบนานผลิตภัณฑ์อาจจะไหม้ได้ และควรอบสารในงานเพาะเชื้อ (Petri dish) เพราะผลิตภัณฑ์ที่อบจะมีความชื้นสม่ำเสมอ

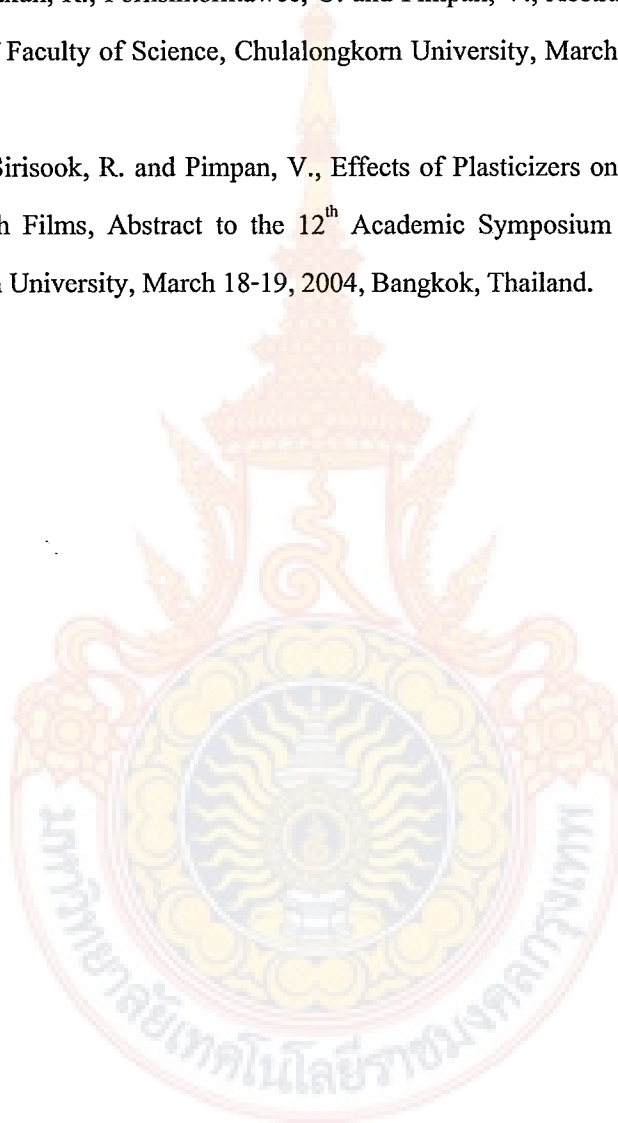
5.2.5 ควรศึกษาการสังเคราะห์พอลิเมอร์ร่วมแบบต่อกิ่ง โดยทดลองใช้แป้งที่มีราคาถูก หรือเปลี่ยนชนิดของพอลิเมอร์สังเคราะห์ หรือใช้สารเริ่มปฏิกิริยาอื่นๆ เนื่องจากพอลิเมอร์ร่วมที่สามารถแตกสลายทางชีวภาพได้จะช่วยลดปัญหามลพิษในสิ่งแวดล้อม



บรรณานุกรม

- 1 กล้าณรงค์ ศรีรอด และ เกื้อบุญ ปิยะจอมขวัญ. 2546. “ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับแป้ง”. เทคโนโลยีแป้ง. พิมพ์ครั้งที่ 3. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. กรุงเทพฯ: 1-72
- 2 นิธิยา รัตนานนท์, 2545, เคมีอาหาร, พิมพ์ครั้งที่ 2, สำนักพิมพ์โอเดียนสโตร์. หน้า 155-295
- 3 วิมลวรรณ พิมพ์พันธุ์. 2548. การเตรียมผลิตภัณฑ์ที่ย่อยสลายทางชีวภาพจากแป้ง. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. กรุงเทพฯ.
- 4 ชัยวัฒน์ เจนวาณิชย์. 2526. พอลิเมอร์เชิงพาณิชย์. กรุงเทพฯ: โอเดียนสโตร์.
- 5 Misra, B. N., Dogra, R., Kaur, L. and Sood, D., Grafting onto Starch II, Graft Copolymerization of Vinyl Acetate onto Starch by Radical Initiator, Journal Of Polymer Science Polymer Chemistry, 18 (1980): 341-344.
- 6 Gao, J.P., Tian, R.C., Yu, J.G. and Duan, M.L., Graft Copolymers of Methyl Methacrylate onto Canna Starch Using Manganic Pyrophosphate as an Initiator, Journal of Applied Polymer Science, 53 (1994): 1091-1102.
- 7 Fakhrú I-Razi, A., Qudsieh, I.Y.M., Wan Yunus, W.M.Z., Ahmad, M.B. and AbRahman, M.Z., Graft Copolymerization of Methyl Methacrylate onto Sago Starch Using Ceric Ammonium Nitrate and Potassium Persulfate as Redox Initiator Systems, Journal of Applied Polymer Science, 82 (2001): 1375-1381.
- 8 Srivastava, B.K., Pande, C.S. and Misra, B.N., A New Method for Determination of Percentage Grafting in Starch-Polyacrylonitrile Graft Copolymer, Indian Journal Chemistry, 14A (1976): 274-275.
- 9 Fanta, G.F., Burr, R.C., Doane, W.M. and Russell, C.R., Graft Polymerization of Styrene onto Starch by Simultaneous Cobalt-60 Irradiation, Journal of Applied Polymer Science, 21 (1977): 425-433.
- 10 Pimpan, V., Sirisk, R., Rungsumpunkul, S. and Cheunchon, S., Preliminary Study on Preparation of Environmental Friendly Materials from Modified Glutinous Starch, Journal of Metals, Materials and Minerals, 12 (2) (2003): 59.
- 11 Pimpan, V., Ratanarat, K. and Pongchawanakul M., “Preliminary Study on Preparation of Biodegradable Plastic from Modified Cassava Starch”, Journal of Science Research Chulalongkorn, 26 (2) (2001): 117.

- 12 Thothong, P. and Pimpan, V., Synthesis of Grafted Copolymers of Cassava Starch and Methyl Methacrylate Using Benzoyl Peroxide as an Initiator, Abstract to the 12th Academic Symposium of Faculty of Science, Chulalongkorn University, March 18-19, 2004, Bangkok, Thailand.
- 13 Horthimaworrakun, R., Pornsintornatawee, O. and Pimpan, V., Abstract to the 13th Academic Symposium of Faculty of Science, Chulalongkorn University, March 16-17, 2005, Bangkok, Thailand.
- 14 Uasopon, S., Sirisook, R. and Pimpan, V., Effects of Plasticizers on Properties of Modified Cassava Starch Films, Abstract to the 12th Academic Symposium of Faculty of Science, Chulalongkorn University, March 18-19, 2004, Bangkok, Thailand.



ภาคผนวก



ภาคผนวก ก

ข้อมูลการวิจัย

ภาคผนวกนี้เป็นการรวบรวมข้อมูลที่ได้จากการทดลอง และการคำนวณปริมาณการกราฟต์ ประสิทธิภาพการกราฟต์ ปริมาณไฮโมพอลิเมอร์ ค่าการเปลี่ยน ค่าการเลือกเกิด และผลได้

ก.1 ข้อมูลการทดลอง

ตารางที่ ก.1 ข้อมูลการสังเคราะห์พอลิ(เมทิลเมทาคริเลต) ที่ต่อกิ่งบนแป้งข้าวโพด

การทดลองที่	แป้ง (g)	PPS (g)	MMA (mL)	เวลาที่ใช้ (min)	น้ำหนักก่อนสกัด (g)	น้ำหนักหลังสกัด(g)
1	5.4745	1.3507	10.6	30	6.7470	5.2584
2	5.4817	1.3515	10.6	60	9.9050	5.3654
3	5.4800	1.3509	10.6	90	14.7897	6.6485
4	5.4798	1.3501	10.6	120	13.4838	6.1362
5	5.4800	1.3501	15.9	90	14.7801	6.7719
6	5.4808	1.3495	21.2	90	21.2137	7.3573
7	5.4816	1.3515	26.5	90	16.0368	8.7995
8	5.4809	2.7012	26.5	90	18.1786	9.9711
9	5.4845	4.0598	26.5	90	12.9663	6.2417
10	5.4803	5.4005	26.5	90	8.4347	5.5970

ก.2 ตัวอย่างการคำนวณ

ตัวอย่างการคำนวณผลการทดลองต่างๆ ในการทดลองเพื่อศึกษาภาวะที่เหมาะสมจากการต่อกิ่งเมทิลเมทาคริเลตบนแป้งข้าวโพด เป็นดังนี้

ตัวอย่างจากการทดลองที่ 8

ปริมาณแป้งข้าวโพด (หักความชื้นแล้ว) 5.0008 g

ปริมาณโพแทสเซียมเปอร์ซัลเฟต 2.7012 g

ปริมาณเมทิลเมทาคริเลต	24.8040 g
น้ำหนักก่อนสกัด	18.1786 g
น้ำหนักหลังสกัด	9.9711 g

$$\begin{aligned}
 \text{ปริมาณการตอึง (\%G)} &= \frac{W_2 - W_1}{W_1} \times 100 \\
 &= \frac{9.9711 - 5.0008}{5.0008} \times 100 \\
 &= 99.39
 \end{aligned}
 \tag{4.1}$$

$$\begin{aligned}
 \text{ประสิทธิภาพการตอึง (\%GE)} &= \frac{W_2 - W_1}{W_3} \times 100 \\
 &= \frac{9.9711 - 5.0008}{24.8040} \times 100 \\
 &= 20.04
 \end{aligned}
 \tag{4.2}$$

$$\begin{aligned}
 \text{ปริมาณโฮโมพอลิเมอร์ (\%H)} &= \frac{W_4 - W_2}{W_3} \times 100 \\
 &= \frac{18.1786 - 9.9711}{24.8040} \times 100 \\
 &= 33.09
 \end{aligned}
 \tag{4.3}$$

$$\begin{aligned}
 \text{ค่าการเปลี่ยน (\%TC)} &= \frac{W_4 - W_1}{W_3} \times 100 \\
 &= \frac{18.1786 - 5.0008}{24.8040} \times 100 \\
 &= 53.13
 \end{aligned}
 \tag{4.4}$$

$$\begin{aligned}
 \text{ค่าการเลือกเกิด (\%Selectivity)} &= \frac{W_2 - W_1}{W_4 - W_1} \times 100 \\
 &= \frac{9.9711 - 5.0008}{18.1786 - 5.0008} \times 100 \\
 &= 37.72
 \end{aligned}
 \tag{4.5}$$

$$\begin{aligned}
 \text{ผลได้ (\%Yield)} &= \frac{W_2}{W_1 + W_3 + W_{PPS}} \times 100 \\
 &= \frac{9.9711}{5.0008 + 24.8040 + 2.7012} \times 100 \\
 &= 30.67
 \end{aligned}
 \tag{4.6}$$

ตารางที่ ก.2 ปริมาณการตอ้กั ประสิทธิภาพการตอ้กั ปริมาณโซโม่อดิเมอรื ค้าการเปลี่น
ค้าการเลือกเกิด และผลได้

การทดลองที่	เวลา (min)	MMA (mmol)	PPS (mmol)	%G	%GE	% H	%TC	%Selectivity	%Yield
1	30	20	1	5.11	2.58	15.00	17.58	14.66	32.31
2	60	20	1	7.28	3.67	45.75	49.42	7.42	32.97
3	90	20	1	32.97	16.62	82.06	98.67	16.84	40.86
4	120	20	1	22.73	11.45	74.06	85.51	13.39	37.71
5	90	30	1	35.44	11.91	53.81	65.72	18.12	31.89
6	90	40	1	47.13	11.88	69.83	81.71	14.53	28.09
7	90	50	1	75.94	15.31	29.18	44.49	34.42	28.24
8	90	50	2	99.39	20.04	33.09	53.13	37.72	30.67
9	90	50	3	24.73	4.99	27.11	32.10	15.54	18.43
10	90	50	4	11.94	2.41	11.44	13.85	17.38	15.90



ภาคผนวก ข

การทดสอบสมบัติทางกายภาพของพอลิ(เมทิลเมทาคริเลต) ที่ต่อกิ่งบนแป้งข้าวโพด

ภาผนวกนี้กล่าวถึงข้อมูลการวัดความหนืดของพอลิ(เมทิลเมทาคริเลต) ที่ต่อกิ่งบนแป้งข้าวโพดที่สังเคราะห์ได้ด้วยเครื่องวัดความหนืด (Ubbelohde viscometer) ตัวอย่างการคำนวณหาความหนืดโดยใช้สมการของฮักกิน (Huggin's equation) และการคำนวณน้ำหนักโมเลกุลของพอลิเมอร์ร่วมที่สังเคราะห์ได้โดยใช้สมการของมาร์ก โฮวีนค์ (Mark Houwink's equation)

- ข.1 การวัดความหนืดของพอลิ(เมทิลเมทาคริเลต) ที่ต่อกิ่งบนแป้งข้าวโพดด้วยเครื่องวัดความหนืด
- | | | |
|-------------------------------------|------------|---------|
| เวลาในการเคลื่อนที่ของแอชีโตน | ครั้งที่ 1 | 44.97 s |
| | ครั้งที่ 2 | 44.18 s |
| | ครั้งที่ 3 | 44.64 s |
| เวลาเฉลี่ยในการเคลื่อนที่ของแอชีโตน | | 44.60 S |

ตารางที่ ข.1 ความหนืดเฉพาะและน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยของสารละลายพอลิเมอร์

การทดลองที่	ความหนืดเฉพาะ $[\eta]$	น้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ย	%G
1	60.35	365,698.9	5.11
2	50.00	279,511.0	7.28
3	40.00	203,215.2	32.97
4	30.00	134,732.4	22.73
5	47.30	258,200.9	35.44
6	58.00	345,526.9	47.13
7	68.00	433,679.4	75.94
8	80.00	547,014.6	99.39
9	80.00	547,014.6	24.73
10	115.00	918,656.2	11.94

ข.2 ตัวอย่างการคำนวณ

ตัวอย่างการคำนวณความหนืดโดยใช้สมการของฮักกิน และน้ำหนักโมเลกุลของพอลิ(เมทิลเมทาคริเลต) ที่ต่อกิ่งบนแป้งข้าวโพดที่สังเคราะห์ได้โดยใช้สมการของมาร์ก โหวินค์

ตัวอย่างจากการทดลองที่ 8

เวลาในการเคลื่อนที่เฉลี่ยของแอชีโตน เท่ากับ 44.60 s

ความหนืดเฉพาะ η_{sp} ;

$$\eta_{sp} = \eta_r - 1 \quad (3.4)$$

$$\begin{aligned} \eta_{sp} &= 1.2245 - 1 \\ &= 0.2245 \end{aligned}$$

ความเข้มข้นของสารละลายพอลิเมอร์เท่ากับ 1.45×10^{-3} g/mL และ 0.49×10^{-3} g/mL เมื่อคำนวณในทำนองเดียวกัน จะได้ η_{sp} เท่ากับ 0.0907 และ 0.0410 ตามลำดับ ซึ่ง $\eta_{sp} = \frac{\eta_{red} - 1}{C}$

แทนค่าจะได้

$$\begin{aligned} \eta_{sp} &= \frac{1.2245 - 1}{4.02 \times 10^{-3}} \\ &= 55.8349 \end{aligned}$$

ถ้าความเข้มข้นเท่ากับ 1.45×10^{-3} g/mL และ 0.49×10^{-3} g/mL เมื่อคำนวณในทำนองเดียวกัน จะได้ η_{sp} เท่ากับ 62.5272 และ 83.5913 ตามลำดับ นำค่า η_{sp} ที่ได้ไปเขียนกราฟเพื่อหาค่าความหนืดเฉพาะของพอลิเมอร์ต่อหน่วยความเข้มข้น $[\eta]$ จากความสัมพันธ์ของสมการของฮักกิน สามารถสร้างกราฟได้ดังนี้ แทนค่าในสูตร

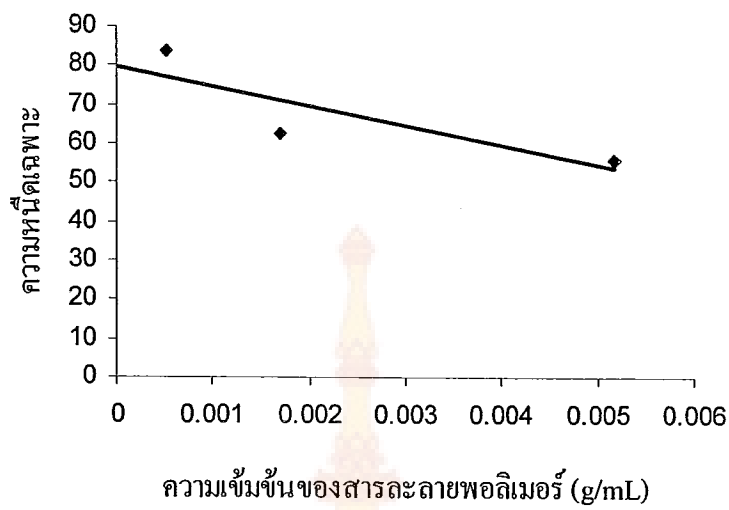
ความหนืดรีดิวซ์ (η_{red}) ที่ความเข้มข้น 4.02×10^{-3} g/mL

$$\begin{aligned} \eta_{red} &= \frac{54.61 \text{ s}}{44.60 \text{ s}} \\ &= 1.2245 \end{aligned}$$

หมายเหตุ ถ้าความเข้มข้นเท่ากับ 1.45×10^{-3} g/mL และ 0.49×10^{-3} g/mL คำนวณในทำนองเดียวกัน จะได้ค่า η_{red} 1.0907 และ 1.0410 ตามลำดับ

จากกราฟจะได้จุดตัดแกน y คือ $[\eta]$ เท่ากับ 80 นำค่า $[\eta]$ ที่ได้ไปคำนวณหาค่าน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยในสมการของมาร์ก โหวินค์

$$\begin{aligned} 80 &= 7.7 \times 10^{-3} \text{ g.mL}^{-1} M_v^{0.70} \\ M_v &= 547,014 \end{aligned}$$



รูปที่ ข.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดเฉพาะของพอลิเมอร์กับความเข้มข้นของสารละลายพอลิเมอร์



ภาคผนวก ค

ฟูเรียร์ทรานฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี

(Fourier Transform Infrared Spectroscopy)

ภาคผนวกนี้กล่าวถึงหลักการของฟูเรียร์ทรานฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี ซึ่งใช้วิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีของพอลิ(เมทิลเมทาคริเลต) ที่ต้องกึ่งบนแข็งขาวโพลที่สังเคราะห์ได้ เพื่อเป็นแนวทางในการใช้เทคนิค และเครื่องฟูเรียร์ทรานฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี

ค.1 หลักการของเครื่อง

ฟูเรียร์ทรานฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี มีวิธีวัดที่ต่างไปจากเครื่องมือสเปกโทรสโกปีทั่วไปคือ ใช้วัดความเข้มของแสงต่อความยาวคลื่นหรือกำลังขยายที่ความยาวคลื่นต่างๆ อย่างต่อเนื่องเทียบกับเวลา เรียกว่า เวลา-โดเมนสเปกโทรสโกปี (Time-domain spectroscopy) จากนั้นเวลา-โดเมนสเปกตรัม (Time-domain spectrum) จะถูกเปลี่ยนเป็นความถี่-โดเมนสเปกตรัม (Frequency-domain spectrum) ด้วยฟูเรียร์ทรานฟอร์ม (Fourier Transform) จากการใช้ดิจิทัลคอมพิวเตอร์ สิ่งทีสเปกตรัมทั้งสองแตกต่างกันจริงๆ คือ ความถี่-โดเมนสเปกตรัมเป็นสเปกตรัมที่ได้จากการวัดการดูดกลืนแสงที่ความถี่ต่างๆ กัน ทีละครั้งในช่วงระยะเวลาหนึ่ง แต่ฟูเรียร์ทรานฟอร์มสเปกตรัม (Fourier Transform spectrum) ได้จากการวัดการดูดกลืนแสงที่ความถี่ต่างๆ พร้อมกันหมด ดังนั้นฟูเรียร์ทรานฟอร์มจึงช่วยให้การวิเคราะห์รวดเร็วขึ้น การแยก (Resolution) จะดีขึ้นหรือเป็นการทำให้อัตราส่วนระหว่างสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (Signal-to-noise ratio) ดีกว่าวิธีธรรมดา เพราะการวัดด้วยเครื่องธรรมดาจะเป็นแบบวัดทีละความถี่ (Sequentially) แต่ FT-IR วัดที่ความถี่ต่างๆ อย่างต่อเนื่อง (Simultaneously) เรียกว่า ข้อดีเฟลเกทส์ (Fellgett's advantage) สามารถใช้ช่องทางเข้าแบบวงกลม (Circular entrance aperture) แทนทางเข้าแบบช่องเล็กยาว (Entrance slit) ทำให้กำลังแสงสูงขึ้น การแยกดีขึ้น การวิเคราะห์ง่ายและสะดวกด้วยการใช้คอมพิวเตอร์ควบคุมการทำงาน อย่างไรก็ตามเครื่องฟูเรียร์ทรานฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปีมีราคาสูง และต้องเสียค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาสูง เนื่องจากต้องเก็บในห้องควบคุมความชื้นตลอดเวลา

ค.2 คุณสมบัติทั่วไป

เป็นเครื่องวิเคราะห์โครงสร้างของสารประกอบอินทรีย์ โดยใช้หลักการการดูดกลืนรังสีอินฟราเรด เมื่อรังสีอินฟราเรดถูกดูดกลืนพลังงานจะถูกเปลี่ยนเป็นพลังงานการหมุนและการสั่นของโมเลกุล โมเลกุลของสารแต่ละชนิดจะให้สเปกตรัมที่เป็นเอกลักษณ์ของพันธะในโมเลกุลนั้น ซึ่งเป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่อการพิสูจน์โครงสร้างของสารประกอบ

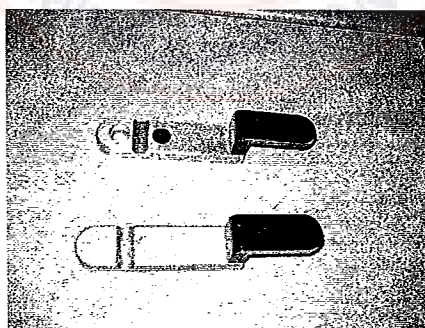
ค.3 คุณลักษณะเฉพาะ

ความไวในการวิเคราะห์ (High Sensitivity)

1. มีค่า $S/N > 40000:1$ ซึ่งนับว่าเป็นหนึ่งใน FT-IR ที่มี Sensitivity ที่ดีที่สุด
2. ตัวตรวจวัดเป็นชนิด DLATGS ซึ่งเป็น DTGS ที่มีส่วนของ L- Alamine ทำให้ตัวตรวจวัดมีความคงตัวสูงขึ้น
3. ในระบบทางเดินแสง ใช้กระจกที่เคลือบด้วยทองที่ให้ค่า Reflectance สูงถึง 98% ทำให้ลดการสูญเสียความเข้มแสงในการสะท้อนของระบบ



รูปที่ ค.1 เครื่องฟูเรียร์ทรานฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโคป



รูปที่ ค.2 ส่วนประกอบของเครื่องฟูเรียร์ทรานฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโคป
เป็นกระจกที่เคลือบด้วยทอง

ประวัตินักวิจัย



หัวหน้าโครงการ

1. ชื่อ

นางสาววารรณ์ ธนะกุลรังสรรค์
MISS WARAPORN TANAKULRUNGSANK
2. ตำแหน่งปัจจุบัน

ข้าราชการตำแหน่งผู้ช่วยศาสตราจารย์
3. หน่วยงานที่อยู่ที่สามารถติดต่อได้สะดวก พร้อมหมายเลขโทรศัพท์ โทรสาร และ e-mail

สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
2 ถนนนางลิ้นจี่ เขตสาทร กรุงเทพฯ 10120
โทรศัพท์ 0 2287 9734
โทรสาร 0 2287 9734
e-mail: warapornt@rmut.ac.th

4. ประวัติการศึกษา

ปีที่จบการศึกษา	ระดับปริญญา	อักษรย่อปริญญาและชื่อเต็ม	สาขาวิชา	วิชาเอก	ชื่อสถาบันการศึกษา	ประเทศ
2536	เอก	D. Eng. Doctor of Engineering	Catalyst Engineering	Catalyst Engineering	Kyoto University	ญี่ปุ่น
2530	โท	วศ.ม. วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต	วิศวกรรมเคมี	วิศวกรรมเคมี	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย	ไทย
2521	ตรี	วท.บ. วิทยาศาสตร์บัณฑิต	เคมีวิศวกรรม	เคมีวิศวกรรม	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย	ไทย

5. สาขาวิชาการที่มีความชำนาญพิเศษ (แตกต่างจากวุฒิการศึกษา) ระบุสาขาวิชาการ
วิศวกรรมเคมี วิศวกรรมตัวเร่งปฏิกิริยา
6. ประสบการณ์ที่เกี่ยวข้องกับการบริหารงานวิจัยทั้งภายในและภายนอกประเทศ

6.1 หัวหน้าโครงการวิจัย: ชื่อโครงการวิจัย

1. การศึกษาการนำบัคคัลที่ติดจากไอของสารประกอบซัลเฟอร์โดยใช้เทคนิค XPS และ DRIFT ด้วยปฏิกิริยาการใช้แสง ร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมขนาดนาโนเมตรที่สังเคราะห์ด้วยเทคนิคการเผาแบบเฟลมสเปรย์
2. การควบคุมโครงสร้างรูพรุนขนาดเมโซของตัวเร่งปฏิกิริยาที่เกิดออกไซด์
3. การสังเคราะห์พอลิ (เมทิลเมทาคริเลต) ที่กราฟต์บนแป้งข้าวโพดโดยใช้โพแทสเซียมเปอร์ซัลเฟตเป็นสารเริ่มปฏิกิริยา

6.3 งานวิจัยที่ทำเสร็จแล้ว

1. การสังเคราะห์อนุภาคไทเทเนียมขนาดนาโนเมตรด้วยเทคนิคการเผาแบบเฟลมสเปรย์ การประชุม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ครั้งที่ 1 ระหว่างวันที่ 27 – 23 สิงหาคม 2551 ณ โรงแรมธรรมรินทร์ ธนา อำเภอเมือง จังหวัดตรัง งบประมาณประจำปี 2550
2. การสังเคราะห์พอลิ(เมทิลเมทาคริเลต) กราฟต์บนแป้งข้าวโพดโดยใช้โพแทสเซียมเปอร์ซัลเฟตเป็นสารเริ่มปฏิกิริยา การประชุมวิชาการวิศวกรรมเคมีและเคมีประยุกต์แห่งประเทศไทย ครั้งที่ 17 ระหว่างวันที่ 29 – 30 ตุลาคม 2550 ณ โรงแรม ดิเอมเพรส อำเภอเมือง จังหวัดเชียงใหม่ งบประมาณประจำปี 2550
3. อิทธิพลของสารกระตุ้นที่มีต่อหมู่หน้าที่และประสิทธิภาพในการดูดซับของถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากกากกาแฟ งบประมาณผลประโยชน์ ประจำปี 2550 ผู้ร่วมวิจัย
4. การผลิตไบโอดีเซลในเครื่องปฏิกรณ์แบบกึ่งกะโดยการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบวิวิธพันธุ์ งบประมาณผลประโยชน์ ประจำปี 2550 ผู้ร่วมวิจัย
5. การควบคุมโครงสร้างรูพรุนขนาดเมโซของตัวเร่งปฏิกิริยาที่เกิดออกไซด์ ประจำปี 2549 หัวหน้าโครงการ
6. การแยกโลหะหนักออกจากสารละลายด้วยถ่านกัมมันต์จากกะลามะพร้าว โดยใช้หูดูดซับแบบชั้นครึ่ง งบประมาณประจำปี 2549
7. การสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะออกไซด์ด้วยวิธีโซล-เจลเพื่อเคลือบบนเยื่อแผ่นอะลูมินา สำหรับสังเคราะห์สารประกอบโอเลฟิน งบประมาณผลประโยชน์ ประจำปี 2548 หัวหน้าโครงการ
8. การสังเคราะห์เส้นใยซิลิกาด้วยวิธีโซล-เจลโดยใช้เทคนิคอิเล็กโตรสปินนิง งบประมาณผลประโยชน์ ประจำปี 2548 ผู้ร่วมวิจัย
9. การผลิตถ่านกัมมันต์จากกากกาแฟโดยใช้ฟลูอิดไอเซนไอน้ำ งบประมาณผลประโยชน์ ประจำปี 2548 ผู้ร่วมวิจัย
10. การสร้างอิทธิพลของอุณหภูมิวัดปริมาณแอลกอฮอล์ความเข้มข้นสูง งบประมาณผลประโยชน์ ประจำปี 2548 ผู้ร่วมวิจัย

11. กระดาษต้นไม้จากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร งบประมาณผลประโยชน์ประจำปี 2548 ผู้ร่วมวิจัย
12. การบำบัดน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมสิ่งทอด้วยปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลซิส โดยใช้ไทเทเนีย การประชุมสัมมนาทางวิชาการ สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 21 ระหว่างวันที่ 28 – 30 มีนาคม 2548 ณ โรงแรมเชียงใหม่ภูคำ อำเภอเมือง จังหวัดเชียงใหม่ งบประมาณประจำปี 2546 (งบวัสดุฝึก) สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล วิทยาเขตเทคนิคกรุงเทพฯ
13. การปรับปรุงน้ำมันปาล์มดิบเป็นเชื้อเพลิงสำหรับเครื่องยนต์ดีเซลหมุนช้า การประชุมสัมมนาทางวิชาการ สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 20 ระหว่างวันที่ 11 – 13 กุมภาพันธ์ 2547 ณ โรงแรมอมรินทร์ลาดูน อำเภอเมือง จังหวัดพิษณุโลก งบประมาณประจำปี 2545 สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล
14. การผลิตถ่านอัดก้อนจากผงถ่านแอนทราไซต์และวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร การประชุมสัมมนาทางวิชาการ สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 20 ระหว่างวันที่ 11 – 13 กุมภาพันธ์ 2547 ณ โรงแรมอมรินทร์ลาดูน อำเภอเมือง จังหวัดพิษณุโลก งบประมาณประจำปี 2545 (งบวัสดุฝึก) สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล วิทยาเขตเทคนิคกรุงเทพฯ
15. การศึกษาสมบัติการดูดซับของถ่านกัมมันต์. 2543 รายงานการประชุมสัมมนาทางวิชาการ สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 17. 3, 740-752 โครงการวิจัยและพัฒนาหน้ากากป้องกันสารพิษทางทหาร งบประมาณประจำปี 2541 กองทัพอากาศ กระทรวงกลาโหม
16. The influence of base type on the characterization of a nickel oxide catalyst formed by a sol-gel technique, 2005, Proceeding of the International Conference on Recent Advances in Mechanical & Materials Engineering (ICRAMME 05), May 30-31, 2005, Kuala Lumpur, Malaysia, Paper No. 57.
17. Modification of Crude Palm Oil to Diesel Engine Fuel, 29th Congress on Science and Technology of Thailand, October 20-22, 2003, Khon Kean, Thailand, SI-3 งบประมาณประจำปี 2545 สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล
18. The effect of silica added on large surface area of nanocrystalline titania”, Proceeding of the 10th International Ceramics Congress: Part B, Section D Sintering Science and Technology, Florence, Italy, July 2002, p.101-108 ทุนเมธีวิจัยอาวุโส สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.)
19. Phase transformation behavior of nanocrystalline χ -alumina powder obtained by thermal decomposition of AIP in inert organic solvent, 2004, *Journal of Materials*

- Science* **39** (10): 2417-2421 ทนกาญจนาภิเษก สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.)
20. Synthesis of thermally stable micro spherical χ -alumina by thermal decomposition of aluminum isopropoxide in mineral oil, 2003, *Inorganic Chemistry Communication* **6**: 930-934 ทนกาญจนาภิเษก สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.)
 21. The influence of Si-O-Zr bonds on the crystal-growth inhibition of zirconia prepared by the glycothermal method, 2003, *Journal of Material processing Technology* **136**: 186-189 ทนกาญจนาภิเษก สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.)
 22. Critical nanoparticle size for thermal stability, 2003, *Journal of Materials Science Letters*, **22**: 1587-1589 ทนเมธีวิทย์อาวุธโส สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.)
 23. Synthesis of thermally stable micro spherical chi-alumina by thermal decomposition of aluminum isopropoxide in mineral oil, 2003, *Inor. Chem. Comm.*, **6** 930-934, ทนกาญจนาภิเษก สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.)
 24. Effect of crystallite size and calcination temperature on the thermal stability of single nanocrystalline chromium oxide: expressed by novel correlation, 2003, *Materials Research Innovation*, **7**, 118-123 ทนเมธีวิทย์อาวุธโส สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.)
 25. New correlation for the effects of the crystallite size and calcination temperature on the single iron oxide nano-crystallites, 2003, *Crystal Growth & Design*, **2** (3), 215-210 ทนเมธีวิทย์อาวุธโส สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.)
 26. Synthesis of large-surface area silica-modified zirconia by the glycothermal method, 2002, *Journal of Materials Science Letters*, **21** (18), 1461-1464 ทนกาญจนาภิเษก สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.)
 27. Thermal Stability of Silica-Modified Titania Ultrafine Particles Synthesized by the Glycothermal Method, 2000, *Ceramic Transactions*, **115**, 643-654 ทนเมธีวิทย์อาวุธโส สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.)
 28. One pot solvothermal synthesis of thermal stable, porous silica-modified alumina powders by supercritical removal of organic solvents, 2000, *Journal of Metals, Materials and Minerals*, **9** (2), 35-54 ทนเมธีวิทย์อาวุธโส สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.)
 29. Effect of organic solvents on the thermal stability of porous silica-modified alumina powders prepared via one pot solvothermal synthesis, 2000 *Inorganic Chemistry*

- Communication*, 3, 671-676, 2000. ทุนเมธีวิจัยอาวุโส สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.)
30. Synthesis of large-surface area silica-modified titania ultrafine particles by the glycothermal method, 2000, *J. Material Science Letters*, 19, 1439-1443 ทุนเมธีวิจัยอาวุโส สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.)
 31. Mechanism of Diesel Exhaust Gas Abatement by Synthetic Zeolite ZSM-5, 1998, *Journal of Metals, Materials and Minerals*, 7 (2), 32-38 ทุนเมธีวิจัยอาวุโส สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.)
 32. Selective Aromatization of Propane on Metallosilicate Catalysts , 1996, *Journal of Science Faculty, Chiangmai University*, 23 (2), 42-49 งบประมาณประจำปี 2537 สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล
 33. Inui, T., K. Fujioka, Y. Fujii, T. Takeguchi, H. Nishiyama and W. Tanakulrungsank, "Highly Active Catalysts for Syngas Production to Methanol and More Valuable Hydrocarbons", *Study of Surface Science and Catalysis*, 1993. ผู้ร่วมวิจัย
 34. Inui, T., K. Fujioka, W. Tanakulrungsank and T. Takeguchi, "Spillover Effect in Methane Reforming Reactions in Ni-based Composite Catalysts Modified with Precious Metals", *Study of Surface Science and Catalysis*, 1993. ผู้ร่วมวิจัย
 35. Takeguchi, T., W. Tanakulrungsank and T. Inui, "Separation and/or Concentration of CO₂-N₂ Gaseous Mixture by Pressure-Swing Adsorption using Metal-incorporated Microporous Crystals with High Surface Area", *Gas Separation and Purification*, 7, 3, 1993. ผู้วิจัย
 36. Inui, T., S. Shibata and W. Tanakulrungsank, "Purification of O₂-N₂ Gaseous Mixture by Pressure-Swing Adsorption using Na-A Zeolites", *Gas Separation and Purification*, 6, 185, 1992. ผู้ร่วมวิจัย

ผู้ร่วมวิจัย

1. ชื่อ

นางสาวกนกวรรณ จ้าวสุวรรณ
MISS KANOKWAN NGAOSUWAN
2. ตำแหน่งปัจจุบัน

ข้าราชการตำแหน่งอาจารย์
3. หน่วยงานที่อยู่ที่สามารถติดต่อได้สะดวก พร้อมหมายเลขโทรศัพท์ โทรสาร และ e-mail

ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
2 ถนนนางลิ้นจี่ เขตสาทร กรุงเทพฯ 10120
โทรศัพท์ 0 2287 9734
โทรสาร 0 2287 9734
e-mail: pren@meetingmall.com

4. ประวัติการศึกษา

ปีที่จบการศึกษา	ระดับปริญญา	อักษรย่อปริญญาและชื่อเต็ม	สาขาวิชา	วิชาเอก	ชื่อสถาบันการศึกษา	ประเทศ
		วศ.ม.			มหาวิทยาลัย	
2544	โท	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต	วิศวกรรมเคมี	วิศวกรรมเคมี	เกษตรศาสตร์ บางเขน	ไทย
		วศ.บ.			มหาวิทยาลัย	
2541	ตรี	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต	วิศวกรรมเคมี	วิศวกรรมเคมี	เทคโนโลยี สุรนารี	ไทย

5. สาขาวิชาการที่มีความชำนาญพิเศษ (แตกต่างจากวุฒิการศึกษา) ระบุสาขาวิชาการ
- การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ การถ่ายเทมวลสาร

6. งานวิจัยที่ทำเสร็จแล้ว

1. Mathematical modeling and simulation for gas-liquid reactors, 2005, Computers and Chemical Engineering, in press, 2005
2. การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับปฏิกรณ์ก๊าซ-ลิฟต์ การประชุมสัมมนาทางวิชาการมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ บางเขน ครั้งที่ 39 ระหว่างวันที่ 5 – 7 กุมภาพันธ์ 2545 ณ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ บางเขน

ผู้ร่วมวิจัย

1. ชื่อ

นายชัชวาลย์ สุขมัน
MR. CHATCHAWAN SOOKMAN

2. ตำแหน่งปัจจุบัน

ข้าราชการตำแหน่งอาจารย์

3. หน่วยงานที่อยู่ที่สามารถติดต่อได้สะดวก พร้อมหมายเลขโทรศัพท์ โทรสาร และ e-mail

สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
2 ถนนนางลิ้นจี่ เขตสาทร กรุงเทพฯ 10120
โทรศัพท์ 0 2287 9600 ต่อ 1210
โทรสาร 0 2287-9734
e-mail: csookman@yahoo.com

4. ประวัติการศึกษา

ปีที่จบการศึกษา	ระดับปริญญา	อักษรย่อปริญญาและชื่อเต็ม	สาขาวิชา	วิชาเอก	ชื่อสถาบันการศึกษา	ประเทศ
2543	โท	วศ.ม. วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต	วิศวกรรมเคมี	วิศวกรรมเคมี	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี	ไทย
2540	ตรี	วท.บ. วิทยาศาสตร์บัณฑิต	เคมี	เคมี	มหาวิทยาลัยนเรศวร	ไทย

5. สาขาวิชาการที่มีความชำนาญพิเศษ (แตกต่างจากวุฒิการศึกษา) ระบุสาขาวิชาการเทคโนโลยีเยื่อแผ่น การสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยา

6. ประสบการณ์ที่เกี่ยวข้องกับการบริหารงานวิจัยทั้งภายในและภายนอกประเทศ

- 6.1 หัวหน้าโครงการวิจัย: ชื่อโครงการวิจัย .
1. ผลของอุณหภูมิต่อปฏิกิริยาการสะเทินน้ำเสียกรดด้วยเปลือกหอยในฟลูอิดไดซ์เบดแบบท่อสองชั้น

2. ผลของอุณหภูมิต่อปฏิกิริยาการสะเทินน้ำเสียกรดด้วยเปลือกไข่ในฟลูอิดไดซ์เบดแบบทอสองชั้น

6.2 งานวิจัยที่ทำเสร็จแล้ว

- Samart C., A. Cherngvanich and C Sookman, 2005, Synthesis of mesoporous silica from rice husk ash. 3rd international conference on materials for advance technology. 3-8 July, Singapore.
- C. Sookman, P. Kongkachuiyachay, 2005, Base Type on Properties of NiO Synthesized by Sol-Gel Method. The 3rd workshop on regional network formation for enhancing research and education. 7-10 August, Penang, Malaysia (งบ ผลประโยชน์ปี 2548)
- C. Samart and C. Sookman, 2005, Synthesis of Nanoporous Silica from Natural Resources. The 3rd workshop on regional network formation for enhancing research and education. 7-10 August, Penang, Malaysia
- C. Sookman, W. Tanakulrungsank and P. Kongkachuiyachay, 2005, The Influence of Base Type on the Characterization of a Nickel Oxide Catalyst Formed by a Sol-Gel Technique. ICRAMME 05. 30-31 May, Kuala Lumpur, Malaysia. (งบผลประโยชน์ปี 2548)
- ผลของอุณหภูมิต่อปฏิกิริยาการสะเทินน้ำเสียกรดด้วยเปลือกหอยในฟลูอิดไดซ์เบดแบบทอสองชั้น. 2547 รายงานการประชุมสัมมนาทางวิชาการสถาบันเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 20. ระหว่างวันที่ 11 – 13 กุมภาพันธ์ 2547 ณ โรงแรมอมรินทร์ลาดูน อำเภอเมือง จังหวัดพิษณุโลก งบประมาณประจำปี 2546 สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล
- Modification of Crude Palm Oil Diesel Engine Fuel, 2546, 29th Congress on Science and Technology of Thailand. (งบประมาณปี 2546)
- ผลของอุณหภูมิต่อปฏิกิริยาการสะเทินน้ำเสียกรดด้วยเปลือกไข่ในฟลูอิดไดซ์เบดแบบทอสองชั้น. 2546 รายงานการประชุมสัมมนาทางวิชาการสถาบันเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 19.