

การเตรียมแผ่นสำเนาอิเล็กทรอนิกส์พร้อมด้วยพอลิแซ็กคาไรด์เจลจากเปลือกทุเรียน

นางสาวธาริณี ธีระธนากร

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ประยุกต์และเทคโนโลยีสิ่งทอ ภาควิชาวัสดุศาสตร์
คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2554
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR)
are the thesis authors' files submitted through the Graduate School.

PREPARATION OF ELECTROSPUN FIBER MAT USING POLYSACCHARIDE GEL
FROM DURIAN HULLS

Miss TharineeTheerathanagorn

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Science Program in Applied Polymer Science and Textile Technology

Department of Materials Science

Faculty of Science

ChulalongkornUniversity

Academic Year 2011

Copyright of ChulalongkornUniversity

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การเตรียมแผ่นเส้นใยอิเล็กทรอนิกส์ด้วยพอลิแซ็กคาไรด์เจลจากเปลือกทุเรียน
โดย	นางสาวธาริณี ชีระธนากร
สาขาวิชา	วิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ประยุกต์และเทคโนโลยีสิ่งทอ
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	อาจารย์ ดร.กนกทิพย์ บุญเกิด
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	อาจารย์ ดร.รัฐพล รังกุพันธุ์

คณะวิทยาศาสตร์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิทยาศาสตร์

(ศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ หารหนองบัว)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อุษา แสงวัฒนาโรจน์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(อาจารย์ ดร.กนกทิพย์ บุญเกิด)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(อาจารย์ ดร.รัฐพล รังกุพันธุ์)

..... กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.มณฑนา โอภาสประภาสิต)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย

(ดร.ปิยะพร คามภิรภาพพันธ์)

ชาโรณี วีระธนากร: การเตรียมแผ่นเส้นใยอิเล็กทรอนิกส์โพรสปีนด้วยพอลิแซ็กคาไรด์เจลจากเปลือกทุเรียน.
(PREPARATION OF ELECTROSPUN FIBER MAT USING POLYSACCHARIDE GEL FROM
DURIAN HULLS.) อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: อ.ดร.กนกทิพย์ บุญเกิด, อ. ที่ปรึกษา
วิทยานิพนธ์ร่วม: อ.ดร.รัฐพล รังกุพันธุ์, 130 หน้า.

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการเตรียมเส้นใยอิเล็กทรอนิกส์โพรสปีนจากพอลิแซ็กคาไรด์เจลที่ได้จากเปลือกทุเรียน เนื่องจากพอลิแซ็กคาไรด์เจลเป็นพอลิเมอร์ชีวภาพที่มีสมบัติในการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรียหลายชนิด จึงมีความเหมาะสมต่อการพัฒนาเป็นวัสดุปิดแผล งานวิจัยนี้ประกอบด้วย 3 ส่วน ได้แก่ การเตรียมเส้นใยจากสารละลายพอลิแซ็กคาไรด์เจลบริสุทธิ์และที่ผ่านการแปรสภาพ การเตรียมเส้นใยจากสารละลายผสมของพอลิแซ็กคาไรด์เจลและพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ และการเชื่อมขวางแผ่นเส้นใยที่เตรียมได้ รวมถึงการศึกษาประสิทธิภาพในการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรียของแผ่นเส้นใยที่ได้ในระดับเบื้องต้น โดยได้ทำการศึกษาอิทธิพลของความเข้มข้น สภาวะในการแปรสภาพสารละลายพอลิแซ็กคาไรด์เจลด้วยวิธีต่าง ๆ ได้แก่ การเติมสารลดแรงตึงผิว การลดน้ำหนักโมเลกุลของพอลิแซ็กคาไรด์เจลด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์โดยมีการเร่งปฏิกิริยาด้วยการฉายรังสีไมโครเวฟและการให้ความร้อนแก่สารละลาย การแยกส่วนของสารละลายโดยการปั่นเหวี่ยงแยกตะกอน รวมถึงผลของความต่างศักย์ทางไฟฟ้าที่ให้แก่สารละลายและอัตราส่วนโดยปริมาตรของพอลิแซ็กคาไรด์เจลและพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่มีต่อลักษณะของเส้นใยที่เตรียมได้จากการระบวนการอิเล็กทรอนิกส์โพรสปีน จากการศึกษาพบว่า ไม่สามารถเตรียมเส้นใยจากสารละลายพอลิแซ็กคาไรด์เจลบริสุทธิ์ และสารละลายพอลิแซ็กคาไรด์เจลที่ผ่านการแปรสภาพได้ โดยจะได้อนุภาคที่มีขนาดประมาณ 400 ถึง 900 นาโนเมตรจากบางสภาวะ และพบว่า การเติมพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ลงในสารละลายพอลิแซ็กคาไรด์เจลจะช่วยเพิ่มความสามารถในการเกิดเป็นเส้นใยได้ดีขึ้น โดยลักษณะและขนาดของเส้นใยที่เตรียมได้นั้นจะขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของพอลิเมอร์ อัตราส่วนผสมของพอลิเมอร์ทั้งสองชนิด และสภาวะในการปั่นเส้นใย เมื่อทำการปั่นเส้นใยจากสารละลายผสมระหว่างพอลิไวนิลแอลกอฮอล์และพอลิแซ็กคาไรด์เจลที่ผ่านการแยกตะกอน พบว่า จะได้เส้นใยเรียบขนาดประมาณ 200 ถึง 400 นาโนเมตร โดยเส้นใยที่ได้จะมีลักษณะเรียบและขนาดใหญ่ขึ้นเมื่อสารละลายผสมมีส่วนของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์เพิ่มขึ้น จากการศึกษาการเชื่อมขวางแผ่นเส้นใยเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการต้านทานน้ำด้วยสารเชื่อมขวางต่าง ๆ ได้แก่ สารละลายแคลเซียมคลอไรด์ กรดมาเลอิก และไอระเหยของสารละลายกลูตารัลดีไฮด์ พบว่า แผ่นเส้นใยจะสามารถเชื่อมขวางได้โดยการอบไอระเหยของสารละลายกลูตารัลดีไฮด์ที่ความเข้มข้นร้อยละ 25 โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 2 ชั่วโมง นอกจากนี้เมื่อทำการทดสอบประสิทธิภาพในการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรีย *S.aureus* และ *E.coli* พบว่า แผ่นเส้นใยอิเล็กทรอนิกส์โพรสปีนที่เตรียมได้จากสารละลายผสมระหว่างพอลิแซ็กคาไรด์เจลที่ความเข้มข้นร้อยละ 4.42 และพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่ความเข้มข้นร้อยละ 15 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ที่อัตราส่วนโดยปริมาตรของพอลิแซ็กคาไรด์เจลและพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (PG:PVA) เท่ากับ 50:50 จะสามารถยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรียได้ทั้งสองชนิด

ภาควิชา วัสดุศาสตร์..... ลายมือชื่อนิสิต

สาขาวิชา วิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ประยุกต์..... ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

และเทคโนโลยีสิ่งทอ..... ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

ปีการศึกษา 2554

5372261023 : MAJOR MATERIALS SCIENCE

KEYWORDS: POLYSACCHARIDE GEL / DURIAN HULL / ELECTROSPINNING

THARINEE THEERATHANAGORN: PREPARATION OF ELECTROSPUN FIBER MAT USING POLYSACCHARIDE GEL FROM DURIAN HULLS. ADVISOR: KANOKTIP BOONKERD, Ph.D., CO-ADVISOR: RATTHAPOL RANGKUPAN, Ph.D., 130 pp.

The objective of this research was to prepare the electrospun fiber from polysaccharide gel (PG) extracted from durian hull. PG is a biopolymer with inherent anti-bacterial property, which could be a good candidate for wound dressing applications. This work was separated in 3 parts: electrospinning of PG and conditioned PG solution, electrospinning of PG and poly (vinyl alcohol) (PVA) blend, and crosslinking of PG/PVA fibers. Preliminary study on anti-microbial property of obtained fiber was also carried out. Effect of polymer concentration, subsequent solution conditioning methods, i.e. surfactant addition, enhancement of PG degradation with hydrogen peroxide under microwave and thermal activation, and PG fractionation by centrifugal force, applied electric field and PG:PVA blending ratio were investigated. While, electrospinning of PG and conditioned PG solutions obtained no fibers, sub-microparticles with a size range of 400 nm to 900 nm were formed from conditioned PG solution spinning. The addition of PVA into PG solution enhanced spinnability of the blend solution resulting in the formation of electrospun fibers of various sizes depending on solution concentration, blend ratio and spinning condition. Smooth fibers with size range of 200 nm to 400 nm were obtained from the blend solution of PVA and fractioned PG. Increasing PVA proportion increased average size of obtained fibers. To improve water resistant of PG/PVA electrospun fiber, the different crosslinking agents were used including calcium chloride, maleic acid and 25 %wt glutaraldehyde vapor. The result showed the PG/PVA mat could be only effectively crosslinked by 25 %wt glutaraldehyde vapor at ambient for 2 hours. Efficiency of anti-bacteria both of *S. aureus* and *E. coli* was observed even using 4.42 %w/v of PG blend with 15 %w/v at ratio of PG:PVA at 50:50.

Department :Materials Science..... Student's Signature

Field of Study : Applied Polymer Science..... Advisor's Signature

And Textile Technology..... Co-advisor's Signature

Academic Year : 2011.....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี โดยได้รับความช่วยเหลือจากหลาย ๆ ท่าน ซึ่งผู้วิจัยขอขอบพระคุณ อ.ดร. กนกทิพย์ บุญเกิด อาจารย์ที่ปรึกษา และ อ.ดร. รัฐพล รั้งกฤษณ์ อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม เป็นอย่างสูงสำหรับการให้คำแนะนำทางด้านวิชาการ การออกแบบ และวางแผนการวิจัย แนวทางในการดำเนินงานวิจัย และการตรวจแก้ไขรายงานการวิจัย

ขอขอบคุณ รศ. ดร. สุพันธ์ พงษ์สามารถ อาจารย์ประจำภาควิชาชีวเคมี คณะเภสัชศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่เอื้อเฟื้อสารพอลิแซ็กคาไรด์เจลที่ใช้ในงานวิจัยครั้งนี้

ขอขอบคุณ คุณตรีศ กมลวรรณ ที่เอื้อเฟื้อเปลือกทุเรียนหอมทองที่ใช้ในการสกัดสารพอลิแซ็กคาไรด์เจลที่ใช้ในงานวิจัยนี้

ขอขอบคุณ คุณธนิตย์ สิงหนุญพงศ์ เจ้าหน้าที่ประจำภาควิชาจุลชีววิทยา จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้คำแนะนำและความช่วยเหลือด้านความรู้เกี่ยวกับการทดสอบการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรีย

ขอขอบคุณ ทู่นสนับสนุนโครงการวิจัยจากศูนย์ความเป็นเลิศด้านเทคโนโลยีปิโตรเคมีและวัสดุ และศูนย์นวัตกรรมนาโนเทคโนโลยีแห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ขอขอบคุณ ห้องปฏิบัติการเทคโนโลยีการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต สถาบันวิจัยโลหะและวัสดุ ตึกวิทยาลัยปิโตรเลียมและปิโตรเคมี และสถาบันวิจัยโลหะและวัสดุ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ห้องปฏิบัติการวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ และศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ในความเอื้อเฟื้อเครื่องมือในการดำเนินงานวิจัยครั้งนี้และเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการทุกท่านที่ได้ให้คำแนะนำเป็นอย่างดีเครื่องมือในการดำเนินงานวิจัยครั้งนี้

สุดท้ายนี้ คณะผู้วิจัย กราบขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ และทุกคนในครอบครัวที่เป็นกำลังใจและให้การสนับสนุนตลอดมาจนกระทั่งงานวิจัยสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ	
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญรูป.....	ฎ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	3
1.3 ขอบเขตงานวิจัย.....	4
บทที่ 2 วารสารปริทรรศน์.....	5
2.1 เพกติน (Pectin)	5
2.2 สารสกัดพอลิแซ็กคาไรด์จากเปลือกทุเรียน.....	8
2.3 พอลิแซ็กคาไรด์เจลที่สกัดได้จากเปลือกทุเรียน (Polysaccharide gel; PG)...	11
2.4 ผ้าปิดแผล (Wound dressing)	20
2.5 การปั่นเส้นใยโดยใช้เทคนิคการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต (Electrospinning)	22
2.6 พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (Poly (vinyl alcohol; PVA)	25
2.7 การเชื่อมขวางเส้นใย.....	27
2.8 ความหนืด.....	27
2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	34
บทที่ 3 อุปกรณ์และวิธีดำเนินงานวิจัย.....	37
3.1 แผนการดำเนินงานวิจัย.....	37

	หน้า
3.2 วัสดุ สารเคมี และอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง.....	41
3.3 วิธีการทดลอง.....	43
3.4 การศึกษาลักษณะพื้นฐานของเส้นใยพอลิแซ็กคาไรด์เจลที่เตรียมได้ จากกระบวนการอิเล็กโทรสปินนิง.....	52
3.5 การศึกษาประสิทธิภาพในการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรีย ของแผ่นเส้นใยพอลิแซ็กคาไรด์เจล.....	52
3.6 สถานที่ทำการวิจัย.....	53
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง.....	54
4.1 การศึกษาสมบัติของสารละลายพอลิแซ็กคาไรด์เจล.....	54
4.2 การเตรียมเส้นใยจากสารละลายพอลิแซ็กคาไรด์เจล.....	98
4.3 การเตรียมเส้นใยจากสารละลายผสมระหว่างพอลิแซ็กคาไรด์เจล และพอลิไวนิลแอลกอฮอล์.....	105
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง.....	109
5.1 ข้อเสนอแนะ.....	111
รายการอ้างอิง.....	112
ภาคผนวก.....	116
ภาคผนวก ก	117
ภาคผนวก ข	120
ภาคผนวก ค	122
ภาคผนวก ง	124
ภาคผนวก จ.....	126
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	130

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	ปริมาณเพกตินในพืช.....	6
2.2	น้ำหนักโมเลกุลของเพกติน.....	7
2.3	ปริมาณของหมู่เมทอกซิลในเพกติน.....	7
2.4	ชนิดและปริมาณของสารพอลิแซ็กคาไรด์ที่สกัดได้จากเปลือกของผลทุเรียน.....	9
2.5	สัดส่วนองค์ประกอบธาตุของสารสกัดพอลิแซ็กคาไรด์จากเปลือกทุเรียน.....	9
2.6	สัดส่วนและองค์ประกอบของน้ำตาลของสารพอลิแซ็กคาไรด์ที่สกัดได้จากเปลือกทุเรียน.....	9
2.7	ลักษณะ ปริมาณ และองค์ประกอบของน้ำตาลของสารสกัดพอลิแซ็กคาไรด์เจล	11
2.8	ความสามารถในการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรียชนิดต่าง ๆ ของพอลิแซ็กคาไรด์เจลด้วยวิธีการวัด Clear zone.....	15
3.1	สภาวะการเชื่อมขวางแผ่นเส้นใยพอลิแซ็กคาไรด์เจลด้วยสารละลายแคลเซียมคลอไรด์.....	50
3.2	สภาวะการเชื่อมขวางแผ่นเส้นใยพอลิแซ็กคาไรด์เจลด้วยออปโอะระเหยของสารละลายกลูตาไรต์ไฮด์.....	51
4.1	ค่าความหนืดและค่าการนำไฟฟ้าของสารละลายพอลิแซ็กคาไรด์เจลที่ความเข้มข้นต่าง ๆ.....	55
4.2	ผลของการเตรียมเส้นใยอิเล็กทรอนิกส์จากสารละลายพอลิแซ็กคาไรด์เจลบริสุทธิ์	56
4.3	ค่าความหนืด ค่าการนำไฟฟ้า และขนาดของอนุภาคที่เตรียมได้จากสารละลายพอลิแซ็กคาไรด์เจลบริสุทธิ์และสารละลายพอลิแซ็กคาไรด์เจลที่มีการเติมสารลดแรงตึงผิวชนิดต่าง ๆ.....	59
4.4	ค่าความหนืดและค่าการนำไฟฟ้าของสารละลายพอลิแซ็กคาไรด์เจลและพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ.....	73
4.5	ความเข้มข้นและปริมาณของพอลิแซ็กคาไรด์เจลภายหลังการปั่นเหวี่ยงแยกตะกอน.....	82

ตารางที่		หน้า
4.6	ลักษณะและขนาดของเส้นใยที่ได้จากสารละลายผสมของพอลิแซ็กคาไรด์เจลและพอลิไวนิลแอลกอฮอล์.....	97
4.7	ลักษณะทางกายภาพของแผ่นเส้นใยพอลิแซ็กคาไรด์เจลภายหลังการเชื่อมขวางด้วยสารละลายแคลเซียมคลอไรด์.....	98
4.8	ลักษณะทางกายภาพของแผ่นเส้นใยพอลิแซ็กคาไรด์เจลภายหลังทำการเชื่อมขวางด้วยการอบไอระเหยของสารละลายกลูตารัลดีไฮด์ที่สภาวะต่าง ๆ.....	101
4.9	ร้อยละการเชื่อมขวางแผ่นเส้นใยผสมระหว่างพอลิแซ็กคาไรด์เจลและพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่ความเข้มข้นและอัตราส่วนต่าง ๆ.....	105
4.10	ร้อยละการลดลงของจำนวนแบคทีเรียที่มีอยู่บนเส้นใยภายหลังการบ่มที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียสเป็นระยะเวลา 0 และ 24 ชั่วโมง.....	108

สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
2.1	โครงสร้างของเพกติน.....	6
2.2	การเกิดเจลของเพกตินที่มีระดับเมทิลเอสเทอร์สูง (HM) และเมทิลเอสเทอร์ต่ำ (LM)	8
2.3	การตกตะกอนของเพกตินเนื่องจากเอนไซม์เพกตินเนส.....	8
2.4	น้ำหนักโมเลกุลของพอลิแซ็กคาไรด์เจลที่สกัดได้จากเปลือกทุเรียน.....	12
2.5	ค่าความหนืดของสารละลายพอลิแซ็กคาไรด์เจล.....	13
2.6	กลไกการเกิดเจลของสารละลายพอลิแซ็กคาไรด์เจล.....	14
2.7	กลไกการเกิดเจลของพอลิแซ็กคาไรด์เจลและแคลเซียมไอออน.....	15
2.8	ความสามารถในการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรีย <i>S.aureus</i> ของพอลิแซ็กคาไรด์เจลที่ความเข้มข้นต่าง ๆ ด้วยวิธีการวัด clear zone.....	16
2.9	ภาพ SEM ของเชื้อแบคทีเรีย <i>S.aureus</i> ภายหลังจากการบ่มที่อุณหภูมิ 37 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เมื่อมีสารละลายพอลิแซ็กคาไรด์เจลที่ความเข้มข้นต่าง ๆ.....	16
2.10	ภาพ SEM ของเชื้อแบคทีเรีย <i>E. coli</i> ภายหลังจากการบ่มที่อุณหภูมิ 37 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เมื่อมีสารละลายพอลิแซ็กคาไรด์เจลที่ความเข้มข้นต่าง ๆ.....	17
2.11	ลักษณะสารละลายพอลิแซ็กคาไรด์เจลและแผ่นฟิล์มที่เตรียมได้จากสารละลายพอลิแซ็กคาไรด์เจล.....	17
2.12	ตัวอย่างการนำฟิล์มพอลิแซ็กคาไรด์เจลไปใช้งานในรูปแบบต่าง ๆ	18
2.13	แผ่นฟิล์มพอลิแซ็กคาไรด์เจลและแผ่นใยแห้งแปะแผลพอลิแซ็กคาไรด์เจล.....	19
2.14	บาดแผลสุนัข.....	20
2.15	วัสดุปิดแผลชนิดต่าง ๆ.....	21
2.16	ขั้นตอนการเกิดกระแสพอลิเมอร์เมื่อได้รับศักย์ไฟฟ้ากำลังสูง.....	23
2.17	การยึดตัวของกระแสพอลิเมอร์ในระหว่างที่เคลื่อนตัวจากปลายเข็มไปยังฉากรองรับ	24
2.18	ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของพอลิไวนิลอะซีเตต.....	25
2.19	ปฏิกิริยาการเชื่อมขวางระหว่างพอลิไวนิลแอลกอฮอล์และโซเดียมอัลจิเนตด้วยการดมาเลอิก.....	26

รูปที่	หน้า	
2.20	ปฏิบัติการเชื่อมขวางทางเคมีของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์และกลูตาไรต์ไฮดริต์...	27
2.21	แบบจำลองแสดงการเคลื่อนที่ของระนาบชั้นของไหล.....	28
2.22	กราฟแสดงพฤติกรรมการไหลแบบนิวโทเนียน.....	29
2.23	พฤติกรรมการไหลของของไหลแบบนอนนิวโทเนียนชนิดเสถียรเหมือนพลาสติก.....	30
2.24	ลักษณะโมเลกุลของของเหลวที่มีการไหลชนิดเสถียรเหมือนพลาสติก.....	30
2.25	การไหลของของไหลแบบนอนนิวโทเนียนชนิดไดลาแทนต์.....	31
2.26	พฤติกรรมการเคลื่อนที่โมเลกุลสารแบบไดลาแทนต์.....	31
2.27	พฤติกรรมการไหลของของไหลแบบนอนนิวโทเนียนชนิดพลาสติก.....	32
2.28	พฤติกรรมการไหลของของไหลแบบนอนนิวโทเนียนชนิดทิกโซโทรปิกและรีโอเพกติก..	32
2.29	พฤติกรรมการไหลของของไหลแบบนอนนิวโทเนียนแบบทิกโซโทรปิก.....	33
3.1	แผนผังการศึกษาสมบัติของสารละลายพอลิแซ็กคาไรด์เจลและสารละลายพอลิแซ็กคาไรด์เจลที่มีการเติมสารลดแรงตึงผิว สารออกซิไดส์ และพอลิเมอร์สังเคราะห์.....	38
3.2	แผนผังการเตรียมสารละลายและการปั่นเส้นใยพอลิแซ็กคาไรด์เจลในรูปแบบต่าง ๆ	39
3.3	แผนผังการเชื่อมขวางและการศึกษาสมบัติของแผ่นเส้นใยพอลิแซ็กคาไรด์เจล..	40
3.4	แผนภาพการเตรียมสารละลายผสมของพอลิแซ็กคาไรด์เจลและพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่มีความเข้มข้นของพอลิเมอร์ทั้งสองที่แตกต่างกัน.....	47
3.5	แผนภาพการเตรียมสารละลายผสมของพอลิแซ็กคาไรด์เจลและพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่มีความเข้มข้นและอัตราส่วนที่แตกต่างกัน.....	49
4.1	ความหนืดของสารละลายพอลิแซ็กคาไรด์เจลที่ความเข้มข้นร้อยละ 2 3 4 6 และ 8 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร.....	55
4.2	ภาพถ่าย SEM อนุภาคของสารละลายพอลิแซ็กคาไรด์เจลที่ได้ภายหลังจากการปั่นเส้นใยจากสารละลายที่มีความเข้มข้นร้อยละ 3 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร.....	57
4.3	ภาพจำลองการเกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุลของพอลิแซ็กคาไรด์เจลและน้ำ.....	58
4.4	ภาพถ่าย SEM ของอนุภาคพอลิแซ็กคาไรด์เจลที่ความเข้มข้นร้อยละ 6 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ที่มีการเติมสารลดแรงตึงผิวชนิดต่าง ๆ	59
4.5	ความหนืดของสารละลายพอลิแซ็กคาไรด์เจลที่ความเข้มข้นร้อยละ 6 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ภายหลังจากการลดความหนืดด้วยปฏิบัติการออกซิเดชัน.....	63

รูปที่	หน้า
4.6 ความเหน็ดของสารละลายพอลิแซ็กคาไรด์เจลที่ความเข้มข้นร้อยละ 6 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ภายหลังจากการลดความเหน็ดด้วยปฏิกิริยาออกซิเดชัน และเร่งปฏิกิริยาด้วยการให้ความร้อน.....	64
4.7 ภาพถ่าย SEM ของอนุภาคที่ได้จากกระบวนการอิเล็กโทรสปินนิงของสารละลายพอลิแซ็กคาไรด์เจลภายหลังจากการลดความเหน็ดด้วยปฏิกิริยาออกซิเดชัน	65
4.8 อิทธิพลของความร้อนที่มีต่อค่าความเหน็ดของสารละลายพอลิแซ็กคาไรด์เจลที่ความเข้มข้นต่าง ๆ.....	67
4.9 ความเหน็ดของสารละลายพอลิแซ็กคาไรด์เจลที่ความเข้มข้นร้อยละ 2 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ที่ระยะเวลาต่าง ๆ กัน.....	69
4.10 ความเหน็ดของสารละลายพอลิแซ็กคาไรด์เจลที่ความเข้มข้นร้อยละ 3 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ที่ระยะเวลาต่าง ๆ กัน.....	70
4.11 ความเหน็ดของสารละลายพอลิแซ็กคาไรด์เจลที่ความเข้มข้นร้อยละ 4 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ที่ระยะเวลาต่าง ๆ กัน.....	70
4.12 ความเหน็ดของสารละลายพอลิแซ็กคาไรด์เจลที่ความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ที่ระยะเวลาต่าง ๆ กัน.....	71
4.13 ความเหน็ดของสารละลายพอลิแซ็กคาไรด์เจลที่ความเข้มข้นร้อยละ 6 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ที่ระยะเวลาต่าง ๆ กัน.....	71
4.14 ความเหน็ดของสารละลายผสมระหว่างสารละลายพอลิแซ็กคาไรด์เจลที่มีความและสารละลายพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ ที่มีอัตราส่วนโดยปริมาตรของพอลิเมอร์ทั้งสองชนิดเท่ากับ 50:50.....	74
4.15 ค่าการนำไฟฟ้าของสารละลายผสมระหว่างสารละลายพอลิแซ็กคาไรด์เจลและสารละลายพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ ที่มีอัตราส่วนโดยปริมาตรของพอลิเมอร์ทั้งสองชนิดเท่ากับ 50:50.....	75
4.16 ภาพถ่าย SEM เส้นใยที่ได้จากสารละลายผสมระหว่างพอลิแซ็กคาไรด์เจลที่ความเข้มข้นร้อยละ 2 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร และพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ.....	75

รูปที่	หน้า	
4.17	ภาพถ่าย SEM เส้นใยที่ได้จากสารละลายผสมระหว่างพอลิแซ็กคาไรด์เจลที่ ความเข้มข้นร้อยละ 3 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร และพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่ ความเข้มข้นต่าง ๆ.....	75
4.18	ภาพถ่าย SEM เส้นใยที่ได้จากสารละลายผสมระหว่างพอลิแซ็กคาไรด์เจลที่ ความเข้มข้นร้อยละ 4 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร และพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่ ความเข้มข้น ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ.....	76
4.19	ภาพถ่าย SEM เส้นใยที่ได้จากสารละลายพอลิไวนิลแอลกอฮอล์บริสุทธิ์ที่ความ เข้มข้นต่าง ๆ.....	76
4.20	ขนาดเฉลี่ยของเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยที่ได้จากสารละลายที่มีความ เข้มข้นแตกต่างกัน.....	78
4.21	สารละลายผสมระหว่างพอลิแซ็กคาไรด์เจลและพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ เมื่อตั้ง ทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 20 นาที.....	78
4.22	เส้นใยที่ได้จากสารละลายผสมระหว่างพอลิแซ็กคาไรด์เจล และพอลิไวนิล แอลกอฮอล์ที่อัตราส่วนโดยปริมาตร PG:PVA เท่ากับ 50:50 เมื่อทำการปั่น เส้นใยเป็นเวลานาน 1 ชั่วโมง.....	79
4.23	เส้นใยที่ได้จากสารละลายผสมระหว่างพอลิแซ็กคาไรด์เจล และพอลิไวนิล แอลกอฮอล์ที่อัตราส่วนโดยปริมาตร PG: PVA เท่ากับ 40:60 เมื่อทำการปั่น เส้นใยเป็นเวลานาน 2 ชั่วโมง.....	79
4.24	แผ่นเส้นใยที่ได้จากสารละลายผสมระหว่างพอลิแซ็กคาไรด์เจลที่ความเข้มข้น ร้อยละ 3 และพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่ความเข้มข้นร้อยละ 15 โดยน้ำหนักต่อ ปริมาตรที่อัตราส่วนโดยปริมาตร PG:PVA เท่ากับ 50:50 เมื่อทำการปั่นเส้นใย เป็นเวลานาน 24 ชั่วโมง.....	80
4.25	ความเหนียวของสารละลายผสมระหว่างพอลิแซ็กคาไรด์เจล และพอลิไวนิล แอลกอฮอล์ เมื่อตั้งสารละลายทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 2 4 และ 24 ชั่วโมง	83
4.26	ความเหนียวของสารละลายพอลิแซ็กคาไรด์เจล ก่อนและหลังการปั่นเหวี่ยงแยก ตะกอนของสารละลาย.....	83
4.27	ค่าการนำไฟฟ้าของสารละลายพอลิแซ็กคาไรด์เจล ก่อนและหลังการปั่นเหวี่ยง แยกตะกอนของสารละลาย.....	84

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ทุเรียนจัดเป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญชนิดหนึ่งของประเทศไทย เนื่องจากได้รับความนิยมในการบริโภคทั้งในและต่างประเทศ อย่างไรก็ตาม ทุเรียนเป็นผลไม้ที่มีเปลือกหนาจึงทำให้เกิดขยะปริมาณมากภายหลังการบริโภค ส่งผลให้เกิดปัญหาในการกำจัดตามมา เพื่อเป็นการเพิ่มมูลค่าให้แก่ขยะทางเกษตรกรรม จึงมีงานวิจัยจำนวนมากศึกษาถึงประโยชน์ของเปลือกทุเรียน ดังเช่นงานวิจัยของ Pongsamart และ Panmaung, 1998^[1] ที่สกัดสารพอลิแซ็กคาไรด์จากเปลือกทุเรียนโดยพบว่า เปลือกทุเรียนประกอบด้วยสารพอลิแซ็กคาไรด์ 2 ประเภท ได้แก่ เส้นใยพอลิแซ็กคาไรด์ (Polysaccharide Fiber; PF) และพอลิแซ็กคาไรด์เจล (Polysaccharide Gel; PG) ประมาณร้อยละ 7.3 และ 15.1 โดยน้ำหนักของเปลือกแห้ง ตามลำดับ อย่างไรก็ตามพบว่า พอลิแซ็กคาไรด์เจลที่สกัดได้นั้นมีความสามารถในการก่อเกิดเจลและฟิล์ม สามารถพองตัวและละลายน้ำได้ อีกทั้งยังมีความสามารถในการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรียทั้งแกรมบวกและแกรมลบหลายชนิด^[2] ได้แก่ *Staphylococcus aureus* (*S. aureus*) *Staphylococcus epidermidis* (*S. epidermidis*) *Micrococcus luteus* (*M. luteus*) *Bacillus subtilis* (*B. subtilis*) *Lactobacillus pentosus* (*L. pentosus*) และ *Escherichia coli* (*E. coli*) จากสมบัติในการก่อเกิดเจลและความสามารถในการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรีย จึงได้มีการพัฒนาสารสกัดพอลิแซ็กคาไรด์เจลเป็นผลิตภัณฑ์ทางการแพทย์และเภสัชกรรมในหลายรูปแบบ เช่น สารเคลือบยา ยาสีฟัน น้ำยาดับกลิ่นปาก สารเคลือบไหมขัดฟัน และผลิตภัณฑ์ปิดแผล^[3] โดยเฉพาะอย่างยิ่งผลิตภัณฑ์ปิดแผลพอลิแซ็กคาไรด์เจลที่ได้มีการศึกษาถึงประสิทธิภาพในการรักษาบาดแผลบนผิวหนังสัตว์ โดยการเตรียมผลิตภัณฑ์ปิดแผลในรูปแบบต่าง ๆ เช่น เจลปิดแผล และแผ่นฟิล์มปิดแผลที่เตรียมด้วยวิธีการหล่อและระเหยตัวทำละลาย^[4] ซึ่งพบว่า แผ่นฟิล์มปิดแผลพอลิแซ็กคาไรด์เจลสามารถลดระยะเวลาการหายของบาดแผลและลดอาการติดเชื้อแบคทีเรียของบาดแผลบนผิวหนังสุนัขและสุกรได้มากกว่าเจลปิดแผล^[5,6] อย่างไรก็ตาม ด้วยข้อจำกัดทางด้านความหนาและทึบของแผ่นฟิล์มที่เตรียมด้วยวิธีการหล่อและระเหยตัวทำละลายจะทำให้แผ่นฟิล์มปิดแผลดังกล่าวมีความสามารถในการถ่ายเทแก๊สและของเหลวต่ำ

ดังนั้น ในงานวิจัยนี้จึงมีแนวคิดที่จะพัฒนาผลิตภัณฑ์ปิดแผลจากพอลิแซ็กคาไรด์เจลที่สกัดได้จากเปลือกทุเรียน เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการรักษาบาดแผลให้สูงขึ้น โดยการเตรียมแผ่นปิดแผลจากพอลิแซ็กคาไรด์เจลด้วยกระบวนการอิเล็กโทรสปินนิงที่ภาวะต่าง ๆ ทั้งนี้เนื่องจากเส้นใยที่ผลิตด้วยกระบวนการอิเล็กโทรสปินนิงจะมีสมบัติที่เด่นชัด^[7] คือ 1) เส้นใยที่ได้มีขนาดเล็กมาก โดยทั่วไปมีขนาดตั้งแต่หลายสิบนานโนเมตรจนถึงประมาณ 1-2 ไมโครเมตร จึงมักจะถูกเรียกว่า เส้นใยนาโน (Nanofibers) หรือ เส้นใยนาโนอิเล็กโทรสปิน (Electrospun nanofibers) 2) เส้นใยที่ได้มีอัตราส่วนระหว่างพื้นผิวต่อปริมาตรสูงมากกว่า 1,000 เท่า เมื่อเปรียบเทียบกับเส้นใยในระดับไมโครเมตร และ 3) แผ่นเส้นใยนาโนที่ได้จะมีรูพรุนขนาดเล็กจำนวนมากทำให้มีการส่งผ่านของเหลวและแก๊สได้ดี จากสมบัติดังกล่าวทำให้เส้นใยที่ได้จากกระบวนการอิเล็กโทรสปินนิงได้รับความสนใจและถูกนำมาประยุกต์ใช้อย่างกว้างขวางในปัจจุบัน โดยเฉพาะอย่างยิ่งในทางการแพทย์และเภสัชกรรม เช่น ผลิตภัณฑ์แผ่นปิดแผลที่เตรียมจากพอลิเมอร์ธรรมชาติชนิดต่าง ๆ ซึ่งกำลังได้รับความสนใจอย่างมาก ทั้งนี้เนื่องจากพอลิเมอร์จากธรรมชาติส่วนใหญ่ไม่มีความเป็นพิษ มีความเข้ากันได้ทางชีวภาพสูง มีความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพได้ เป็นวัสดุหมุนเวียน มีราคาต่ำ ส่งเสริมการสร้างเนื้อเยื่อ และพอลิเมอร์ธรรมชาติบางชนิดยังมีประสิทธิภาพในการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรียอีกด้วย

จากข้อดีของพอลิเมอร์ธรรมชาติและเส้นใยที่ได้จากกระบวนการอิเล็กโทรสปินนิงดังกล่าวมาแล้ว ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีเป้าหมายในการนำกระบวนการอิเล็กโทรสปินนิงมาใช้ในการผลิตแผ่นปิดแผลที่เตรียมจากพอลิแซ็กคาไรด์เจลที่สกัดได้จากเปลือกทุเรียน เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของแผ่นปิดแผลให้มีสมบัติที่ใกล้เคียงแผ่นปิดแผลในอุดมคติที่นอกจากจะมีสมบัติในการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรียและส่งเสริมการหายของบาดแผลแล้ว ยังต้องมีความสามารถในดูดซับและถ่ายเทสิ่งขับหลัง เช่น เลือด น้ำเหลือง หนอง และมีความสามารถในการระบายอากาศที่ดีเพื่อไม่ให้เกิดการเน่าเปื่อยของบาดแผลอีกด้วย

อย่างไรก็ตามพบว่า การเตรียมเส้นใยจากสารละลายพอลิเมอร์ธรรมชาติด้วยกระบวนการอิเล็กโทรสปินนิงนั้นเป็นไปได้ยาก เนื่องจากพอลิเมอร์ธรรมชาติส่วนใหญ่ไม่สามารถละลายในตัวทำละลายอินทรีย์ทั่วไปได้ ซึ่งเป็นสาเหตุมาจากน้ำหนักโมเลกุลที่สูงมากของพอลิเมอร์ธรรมชาติ ส่งผลให้สารละลายที่ได้มักมีความหนืดและแรงตึงผิวสูง อีกทั้งยังมีสมบัติความเป็นพอลิอิเล็กโทรไลต์ สามารถแตกตัวเป็นประจุจึงยากต่อการเกิดเป็นเส้นใยที่ต่อเนื่องด้วยกระบวนการอิเล็กโทรสปินนิง แต่เนื่องจากข้อดีทางด้านชีวภาพของพอลิเมอร์ธรรมชาติจึงมีงานวิจัยจำนวนมากยังคงพยายามศึกษาการเตรียมเส้นใยด้วยกระบวนการอิเล็กโทรสปินนิงจากพอลิเมอร์ธรรมชาติด้วยวิธีต่าง ๆ เพื่อลดข้อจำกัดของพอลิเมอร์ธรรมชาติ เช่น การเตรียมเส้นใย

จากพอลิเมอร์ธรรมชาติ โดยการเติมสารลดแรงตึงผิว การเติมพอลิเมอร์สังเคราะห์ที่ไม่มีประจุ และไม่มีความเป็นพิษ เช่น พอลิเอทิลีนออกไซด์ (Polyethylene oxide; PEO) และพอลิไวนิล แอลกอฮอล์ (Polyvinyl alcohol; PVA) ^[9, 10] เพื่อปรับปรุงความสามารถในกระบวนการผลิตใน ขณะที่ยังคงความเข้ากันได้ทางชีวภาพไว้ได้เป็นอย่างดี และการลดน้ำหนักโมเลกุลและความหนืด ของพอลิเมอร์ ธรรมชาติก่อนปั่นเส้นใยด้วยกระบวนการอิเล็กโทรสปินนิง^[11]

อย่างไรก็ตาม พอลิแซ็กคาไรด์เจลเป็นพอลิเมอร์ที่สามารถละลายและพองตัวในน้ำได้ ง่าย จึงทำให้เกิดการเสถียรภาพอันเนื่องมาจากความชื้นได้ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการเชื่อมขวาง แผ่นเส้นใย เพื่อให้มีความคงรูปและมีสมบัติเชิงกลที่ดีขึ้น เพื่อให้เหมาะสมแก่การนำไปใช้งาน โดยมีรายงานการเชื่อมขวางชีววัสดุเหล่านี้หลายวิธี อาทิ การเชื่อมขวางโดยการใช้ความร้อน (Dehydrothermal treatment; DHT)^[12] การเชื่อมขวางโดยการใช้สารเคมี เช่น กลูตารัลดีไฮด์ (Glutaraldehyde; GA)^[13] และกรดมาเลอิก (Maleic acid)^[14] และการเชื่อมขวางทางกายภาพ เช่น การแลกเปลี่ยนประจุระหว่างพอลิแซ็กคาไรด์เจลและแคลเซียมคลอไรด์ (Calcium chloride)^[15]

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นที่จะศึกษาสภาวะต่าง ๆ ที่มีผลต่อการเตรียมแผ่นเส้นใย พอลิแซ็กคาไรด์เจลด้วยกระบวนการอิเล็กโทรสปินนิง โดยมีการแบ่งปัจจัยต่าง ๆ ที่ศึกษาเป็นสอง ปัจจัยหลัก คือ 1) ปัจจัยด้านสารละลาย ได้แก่ ความเข้มข้น และอัตราส่วนของพอลิเมอร์ผสมที่ ส่งผลต่อสมบัติของสารละลายและลักษณะของเส้นใยที่เตรียมได้ 2) ปัจจัยทางด้านการผลิต ได้แก่ ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ให้แกสารละลาย จากนั้นจึงทำการคัดเลือกแผ่นเส้นใยที่เตรียมได้มา ทำการศึกษาการเชื่อมขวางแผ่นเส้นใยด้วยวิธีต่าง ๆ ได้แก่ การเชื่อมขวางทางกายภาพด้วย สารละลายแคลเซียมคลอไรด์ และการเชื่อมขวางทางเคมีด้วยสารละลายกรดมาเลอิก และ ไอโระเหยของสารละลายกลูตารัลดีไฮด์ จากนั้นจึงทำการทดสอบประสิทธิภาพในการยับยั้งการ เจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรีย *S. aureus* และ *E. coli* ของแผ่นเส้นใยพอลิแซ็กคาไรด์เจลภายหลัง การเชื่อมขวาง

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1 ศึกษาอิทธิพลของสภาวะในการเตรียมเส้นใยด้วยที่มีต่อลักษณะและขนาดของเส้นใยที่ เตรียมได้ด้วยกระบวนการอิเล็กโทรสปินนิง

1.2.2 ศึกษาและเปรียบเทียบคุณลักษณะและความสามารถในการเชื่อมขวางแผ่นเส้นใย พอลิแซ็กคาไรด์เจลที่ผ่านการเชื่อมขวางด้วยวิธีต่าง ๆ

1.2.3 ศึกษาประสิทธิภาพในการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรียของแผ่นเส้นใย พอลิแซ็กคาไรด์เจลที่เตรียมได้

1.3 ขอบเขตงานวิจัย

1.3.1 เตรียมเส้นใยพอลิแซ็กคาไรด์เจลด้วยกระบวนการอิเล็กโทรสปินนิงด้วยวิธีต่าง ๆ ดังนี้

- เตรียมเส้นใยจากสารละลายพอลิแซ็กคาไรด์เจลบริสุทธิ์
- เตรียมเส้นใยจากสารละลายพอลิแซ็กคาไรด์เจลที่มีการเติมสารลดแรงตึงผิว
ประจุลบ ประจุบวก ไม่มีประจุ และมีทั้งประจุลบและบวก
- เตรียมเส้นใยจากสารละลายพอลิแซ็กคาไรด์เจลความหนืดต่ำ
- เตรียมเส้นใยจากสารละลายผสมของพอลิแซ็กคาไรด์เจลและพอลิไวนิล
แอลกอฮอล์
- เตรียมเส้นใยจากสารละลายผสมของพอลิแซ็กคาไรด์เจลหลังปั่นเหวี่ยงตะกอน
และพอลิไวนิลแอลกอฮอล์

1.3.3 เชื่อมขวางแผ่นเส้นใยพอลิแซ็กคาไรด์เจลด้วยวิธีต่าง ๆ ดังนี้

- เชื่อมขวางด้วยการแช่แผ่นเส้นใยลงในสารละลายแคลเซียมคลอไรด์
- เชื่อมขวางด้วยการแช่แผ่นเส้นใยลงในสารละลายกรดมาเลอิก
- เชื่อมขวางแผ่นเส้นใยด้วยการอบไอร่ะเหยของสารละลายกลูตารัลดีไฮด์

1.3.4 วิเคราะห์คุณลักษณะของแผ่นเส้นใยพอลิแซ็กคาไรด์เจลที่เตรียมได้ทั้งก่อนและหลัง
ทำการเชื่อมขวาง

1.3.5 ทดสอบประสิทธิภาพในการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรีย *S. aureus* และ
E.coli ด้วยมาตรฐานการทดสอบ AATCC 100

บทที่ 2

วารสารปริทรรศน์

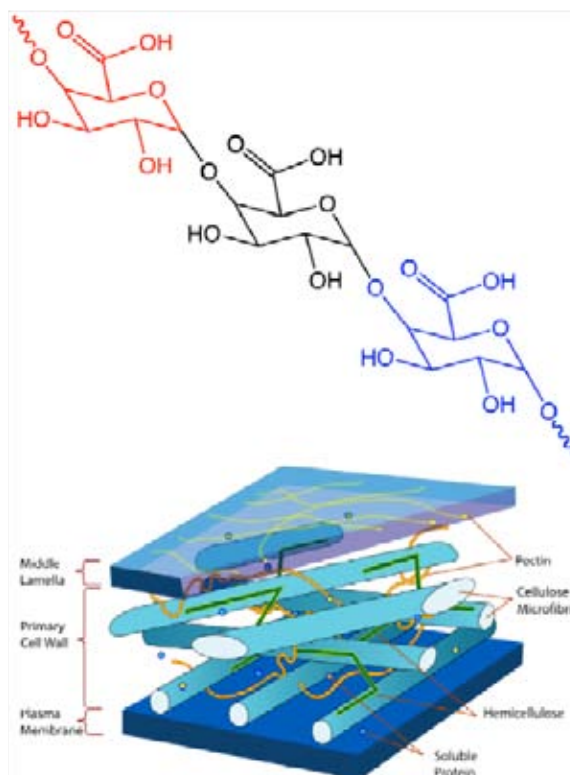
ในปัจจุบันพอลิเมอร์ธรรมชาติ (Natural polymer) เป็นอีกหนึ่งวัสดุทางเลือกที่กำลังได้รับความนิยมอย่างมากเนื่องจากวัสดุธรรมชาติเหล่านี้มีความปลอดภัยต่อสุขภาพ มีความเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม อีกทั้งยังเป็นวัตถุดิบที่มีอยู่มากในธรรมชาติทั้งจากผลผลิตทางการเกษตรหรือผลิตผลทางทะเล จึงทำให้วัสดุเหล่านี้มีราคาต่ำ นอกจากนี้พอลิเมอร์ธรรมชาติเหล่านี้ยังมีความเข้ากันได้ทางชีวภาพสูงและสามารถย่อยสลายได้เองตามธรรมชาติ จากข้อดีและประโยชน์ของพอลิเมอร์ธรรมชาติดังที่ได้กล่าวมาแล้ว ทำให้พอลิเมอร์ธรรมชาติได้รับความนิยมในการนำมาพัฒนาเป็นผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ มากมาย หนึ่งในพอลิเมอร์ธรรมชาติที่กำลังได้รับความนิยมอย่างมากคือ พอลิแซ็กคาไรด์ (Polysaccharide) ที่ได้มาจากผลผลิตทางการเกษตรต่าง ๆ เช่น อัลจิเนตที่สกัดได้จากสาหร่ายสีน้ำตาล ไคติน ไคโตซานที่สกัดได้จากเปลือกแข็งของสัตว์น้ำจำพวกกุ้งและปูและเพกติน ซึ่งเป็นพอลิแซ็กคาไรด์ที่สกัดได้จากเปลือกของผลไม้ชนิดต่าง ๆ โดยในการทดลองนี้สนใจที่จะศึกษาพอลิแซ็กคาไรด์ที่มีสมบัติคล้ายเพกติน จึงทำการศึกษาสมบัติเบื้องต้นของเพกติน ซึ่งแสดงดังต่อไปนี้

2.1 เพกติน (Pectin)^[16]

เพกติน เป็นพอลิแซ็กคาไรด์ชนิดหนึ่งที่พบได้ในบริเวณเนื้อเยื่อระหว่างผนังเซลล์พืชด้านนอก (Middle lamellae) ทำหน้าที่ยึดเกาะเซลล์ให้ติดกัน จึงสามารถพบได้ในผักและผลไม้ทั่วไป และจะมีปริมาณแตกต่างกันไปตามชนิดของแหล่งกำเนิด ดังแสดงในตารางที่ 2.1 จากการศึกษาโครงสร้างพบว่า เพกตินเป็นพอลิเมอร์ของกรดน้ำตาลกาแลกทูโรนิก (Polygalacturonic acid) ซึ่งเป็นอนุพันธ์ของกาแลกโทสโดยเชื่อมต่อกันด้วยพันธะแอลฟา 1-4 ซึ่งบางส่วนของหมู่คาร์บอกซิล (COOH) ในโครงสร้างของเพกตินจะถูกเอสเทอร์ไฟต์ด้วยหมู่เมทิลได้เป็นเมทอกซิลเอสเทอร์ ดังรูปที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ปริมาณเพกตินในพืชชนิดต่าง ๆ^[16]

ชนิดของพืช	ปริมาณเพกติน (ร้อยละ)
มะเขือเทศ	0.2 - 0.5
สตรอเบอรี	0.6 - 0.7
ราสเบอรี	0.7 - 1.0
ท้อ	0.3 - 1.2
องุ่น	0.2 - 1.0
แอปเปิ้ล	0.5 - 1.6
สาลี่	0.5 - 0.8
กล้วย	0.7 - 1.2
แอปเปิลคอกท	0.7 - 1.3
มะนาว	3.0 - 4.0
เกรปฟรุท	1.6 - 4.5
เปลือกส้ม	20 - 40



รูปที่ 2.1 โครงสร้างของเพกติน^[17]

อย่างไรก็ตามพบว่า เพกตินที่สกัดได้จากพืชแต่ละชนิดจะมีขนาดโมเลกุลแตกต่างกันไปตามชนิดและสภาพแวดล้อมของแหล่งกำเนิด ดังแสดงในตารางที่ 2.2 โดยเพกตินที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงจะทำให้สารละลายของเพกตินมีความหนืดสูงและสามารถเกิดเจลได้ง่าย และนอกจากขนาดโมเลกุลแล้วปริมาณเมทิลเอสเทอร์ยังเป็นอีกหนึ่งปัจจัยที่สำคัญต่อความหนืดและการเกิดเจลของเพกติน โดยแสดงจากระดับในการเกิดเอสเทอร์ (Degree of esterification, DE) ซึ่งหมายถึงจำนวนของหมู่คาร์บอกซิลที่ถูกทำให้เป็นเอสเทอร์ โดยคำนวณเป็นร้อยละของน้ำหนักเอสเทอร์ต่อน้ำหนักของกรดกาแลกทูโรนิก ซึ่งพืชที่มีค่า DE มากกว่า ร้อยละ 50 จะจัดเป็นพวกเพกตินที่มีเมทิลเอสเทอร์ในระดับสูงและจะสามารถเกิดเจลได้ง่าย โดยเมทิลเอสเทอร์หรือหมู่เมทอกซิลในเพกตินของพืชแต่ละชนิดจะมีปริมาณที่ต่างกันไป ดังแสดงในตารางที่ 2.3

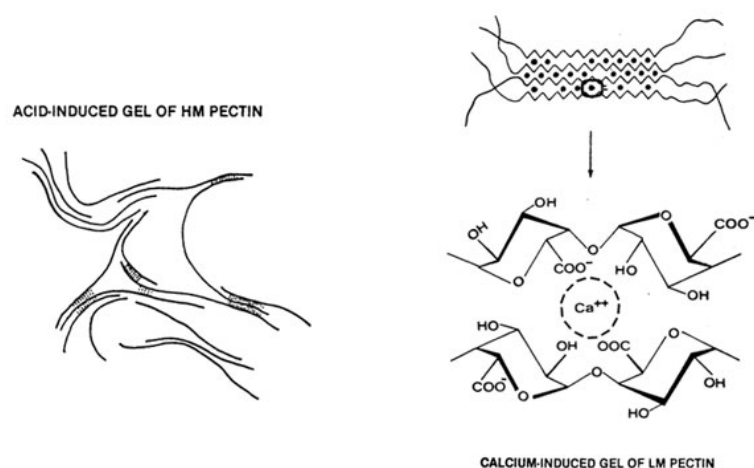
ตารางที่ 2.2 น้ำหนักโมเลกุลของเพกตินจากพืชต่าง ๆ^[16]

ชนิดของพืช	น้ำหนักโมเลกุล (ดาลตัน)
แอปเปิ้ลและมะนาว	200,000 - 360,000
สาหร่ายและพลับ	250,000 - 350,000
ส้ม	23,000 - 71,000
ส้มเขียวหวาน	40,000 - 50,000

ตารางที่ 2.3 ปริมาณของหมู่เมทอกซิลในเพกตินจากพืชต่าง ๆ^[16]

ชนิดของพืช	ปริมาณของหมู่เมทอกซิล (ร้อยละ)
แอปเปิ้ล	10.0 - 11.4
หัวบีท	8.3
ส้มเกลี้ยง	9.4 - 9.6
สตอเบอรี่	0.2

เมื่อศึกษาสมบัติในการละลายของเพกตินพบว่า เพกตินเป็นพอลิเมอร์ที่ไม่สามารถละลายน้ำ ทั้งนี้เนื่องจากเป็นโมเลกุลขนาดใหญ่ และเมื่ออยู่ในน้ำจะเป็นสารแขวนลอยที่มีประจุลบ เนื่องจากหมู่คาร์บอกซิลของกรดคาแลกทูโรนิกจะแตกตัวให้โปรตอน จึงทำให้เพกตินเป็นสารแขวนลอยที่มีลักษณะขุ่นหนืดเช่นเดียวกับแป้งเปียก นอกจากนี้ยังพบว่าเพกตินที่มีหมู่เมทอกซิลสูงจะมีความสามารถในการก่อเกิดเจลได้เอง ทั้งนี้เพราะการเกิดเจลเป็นผลมาจากการที่เพกตินต่างโมเลกุลเชื่อมโยงกันเป็นเครือข่ายแล้วอุ้มน้ำและตัวถูกละลายไว้ภายใน แต่หากมีประจุลบมากเกินไปโมเลกุลต่าง ๆ จะไม่เกิดการเชื่อมโยงกัน ดังนั้นหากมีการนำเพกตินที่มีเมทิลเอสเทอร์ต่ำ ๆ มาผลิตแยมหรือเยลลี่ จะต้องเติมไอออนของโลหะที่มีประจุบวกสองขึ้นไป เช่น ไอออนของแคลเซียมเพื่อสะเทินกับประจุลบและทำให้โมเลกุลของเพกตินเชื่อมโยงกันได้ ดังรูปที่ 2.2 อย่างไรก็ตามพบว่า โดยปกติเพกตินมักจะเป็นสารประกอบเชิงซ้อนอยู่กับโปรตีนซึ่งส่วนใหญ่จะมีประจุบวก และมักจะถูกเพกตินล้อมรอบเอาไว้ จึงมีประจุที่ผิวเป็นประจุลบ แต่เมื่อมีการย่อยสลายเพกตินด้วยเอนไซม์เพกติเนสซึ่งจะมีผลทำให้ส่วนของโปรตีนที่มีประจุบวกส่วนหนึ่งเป็นอิสระ จึงเกิดแรงยึดเหนี่ยวกับโมเลกุลอื่นของเพกติน ดังรูปที่ 2.3 เมื่อเกิดปรากฏการณ์เช่นนี้จะมีการรวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อนขนาดใหญ่ตกตะกอนออกมา



รูปที่ 2.2 การเกิดเจลของเพกตินที่มีระดับเมทิลเอสเทอร์สูง (HM) และเมทิลเอสเทอร์ต่ำ (LM)^[18]



รูปที่ 2.3 การตกตะกอนของเพกตินเนื่องจากเอนไซม์เพกตินเนส^[19]

2.2 สารสกัดพอลิแซ็กคาไรด์จากเปลือกทุเรียน

2.2.1 การสกัดสารพอลิแซ็กคาไรด์จากเปลือกทุเรียน

Pongsamart และ Panmaung^[1] ศึกษาการสกัดสารพอลิแซ็กคาไรด์จากเปลือกของผลทุเรียน และการพัฒนาสารพอลิแซ็กคาไรด์จากเปลือกของผลทุเรียนเพื่อใช้ทางเภสัชกรรม โดยการนำเปลือกทุเรียนแห้งพันธุ์หมอนทองมาสกัดตามวิธีของ Pongsamart^[1] และวิธีที่พัฒนาจากวิธีของ Padmadisatra, et al^[20] จะได้สารสกัดพอลิแซ็กคาไรด์ 2 ชนิด ได้แก่ สารพอลิแซ็กคาไรด์เจล (Polysaccharide gel; PG) และเส้นใยพอลิแซ็กคาไรด์ (Polysaccharide fiber; PF) ตามลำดับ ซึ่งสัดส่วนโดยน้ำหนักของสารสกัดพอลิแซ็กคาไรด์ทั้งสองชนิดเปรียบเทียบกับน้ำหนักเปลือกทุเรียนแห้งแสดงดังตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 ชนิดและปริมาณของสารพอลิแซ็กคาไรด์ที่สกัดได้จากเปลือกของผลทุเรียน^[1]

ผลิตภัณฑ์	น้ำหนักรวม	
	กรัม(g)	ร้อยละ(%)
เปลือกแห้งของผลทุเรียน (Dried durian-fruit hulls)	1000.0	100.0
พอลิแซ็กคาไรด์เจล (PG)	72.8	7.3
เส้นใยพอลิแซ็กคาไรด์ (PF)	151.1	15.1

2.2.2 องค์ประกอบทางเคมีของสารสกัดพอลิแซ็กคาไรด์ที่ได้จากเปลือกทุเรียน

สารสกัดพอลิแซ็กคาไรด์จากเปลือกทุเรียนทั้งสองชนิดประกอบด้วย Carbon (C) Hydrogen (H) และ Oxygen (O) ในอัตราส่วนอะตอมดังแสดงในตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 สัดส่วนองค์ประกอบธาตุของสารสกัดพอลิแซ็กคาไรด์จากเปลือกทุเรียน^[1]

ผลิตภัณฑ์	ธาตุ(in atomic ratio)				
	C	H	O	N	S
พอลิแซ็กคาไรด์เจล (PG)	2.9	5.7	3.2	-	-
พอลิแซ็กคาไรด์ไฟเบอร์ (PF)	3.5	6.4	3.1	-	-

เมื่อศึกษาองค์ประกอบของน้ำตาลที่ได้จากการวิเคราะห์สารสกัดพอลิแซ็กคาไรด์ที่ได้จากเปลือกทุเรียนโดยเทคนิค Thin layer chromatography (TLC) และ High Performance Liquid Chromatography (HPLC) พบว่า พอลิแซ็กคาไรด์เจลมีส่วนประกอบที่แสดงสัญญาณของน้ำตาลที่ตรงกับน้ำตาลมาตรฐานต่าง ๆ ดังแสดงในตารางที่ 2.6

ตารางที่ 2.6 สัดส่วนและองค์ประกอบของน้ำตาลในสารสกัดพอลิแซ็กคาไรด์จากเปลือกทุเรียน^[1]

โมเลกุลน้ำตาล	PG (%mol)	PF (%mol)
Arabinose	1.2	-
Rhamnose	4.8	-
Xylose	0.4	-
Galactose	4.9	-
Glucose	20.0	100
Galacturonic acid	67.9	-

2.2.3 โครงสร้างทางกายภาพและทางเคมีของสารสกัดพอลิแซ็กคาไรด์เจลที่ได้จากเปลือกทุเรียน

เมื่อศึกษาลักษณะความเป็นผลึกด้วยเทคนิค X-ray Diffraction (XRD) พบว่าพอลิแซ็กคาไรด์เจลแสดงโครงสร้างที่เป็นอสัณฐาน หรือ Amorphous powder ในขณะที่เส้นใยพอลิแซ็กคาไรด์แสดงโครงสร้างที่เป็นผลึก หรือ Crystalline powder ในลักษณะที่คล้ายคลึงกับโครงสร้างของเซลลูโลส เมื่อศึกษาโครงสร้างและหมู่ฟังก์ชันทางเคมีของสารสกัดพอลิแซ็กคาไรด์ทั้งสองชนิดโดยเทคนิค Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR) พบว่าพอลิแซ็กคาไรด์เจลแสดงสัญญาณของ IR Spectrum ที่แตกต่าง ณ ตำแหน่ง 1749 cm^{-1} (C=O) 1639 cm^{-1} (COO) และ 1019 ถึง 1105 cm^{-1} (C-OH) ที่อาจแสดงถึงหมู่ Carbonyl ที่ไม่พบอยู่ในโครงสร้างของเส้นใยพอลิแซ็กคาไรด์

2.2.4 สมบัติในการละลาย

จากการศึกษาสมบัติในการละลายพบว่า พอลิแซ็กคาไรด์เจลมีความสามารถในการพองตัว และละลายน้ำได้สารที่มีลักษณะขุ่นหนืด อีกทั้งยังมีความสามารถในการก่อเกิดเจลที่ความเข้มข้นที่เหมาะสม ในขณะที่เส้นใยพอลิแซ็กคาไรด์เป็นสารสกัดที่ไม่สามารถละลายในตัวทำละลายทั่วไปได้ ทั้งนี้เนื่องจากเส้นใยพอลิแซ็กคาไรด์มีโครงสร้างที่มีความเป็นผลึกสูงเช่นเดียวกับโครงสร้างของเซลลูโลสทั่วไป

จากการศึกษาโครงสร้าง สมบัติ และองค์ประกอบของพอลิแซ็กคาไรด์ทั้งสองชนิดที่สกัดได้จากเปลือกทุเรียน จะพบว่า พอลิแซ็กคาไรด์เจลเป็นสารที่มีโครงสร้างและสมบัติที่คล้ายกับเพกติน เนื่องจากมีพอลิเมอร์ของกาแลกทูโรนิกเป็นองค์ประกอบหลัก ซึ่งสามารถพองตัว และละลายน้ำได้บางส่วน อีกทั้งยังมีความสามารถในการก่อเกิดเจลที่ความเข้มข้นและค่าความเป็นกรดต่างที่เหมาะสม ในขณะที่เส้นใยพอลิแซ็กคาไรด์เจลมีโครงสร้างที่เป็นผลึกและไม่สามารถละลายในตัวทำละลายทั่วไปได้ ดังนั้นพอลิแซ็กคาไรด์เจลจึงเป็นสารสกัดที่เหมาะสมแก่การนำไปใช้งานในรูปแบบต่าง ๆ ได้หลากหลายกว่าเส้นใยพอลิแซ็กคาไรด์ จากโครงสร้างและสมบัติของพอลิแซ็กคาไรด์เจลที่คล้ายคลึงสมบัติของเพกตินนี้เอง ทำให้พอลิแซ็กคาไรด์เจลเป็นอีกหนึ่งวัสดุทางเลือกที่สามารถนำมาใช้ประโยชน์อย่างหลากหลายทั้งในด้านอาหาร ยา และวัสดุศาสตร์ แทนเพกติน ทำให้มีการศึกษาสมบัติและองค์ประกอบของพอลิแซ็กคาไรด์เจลดังกล่าวต่อไป

2.3 พอลิแซ็กคาไรด์เจลที่สกัดได้จากเปลือกทุเรียน (Polysaccharide gel; PG)^[2]

2.3.1 การสกัดสารพอลิแซ็กคาไรด์เจลจากเปลือกทุเรียน

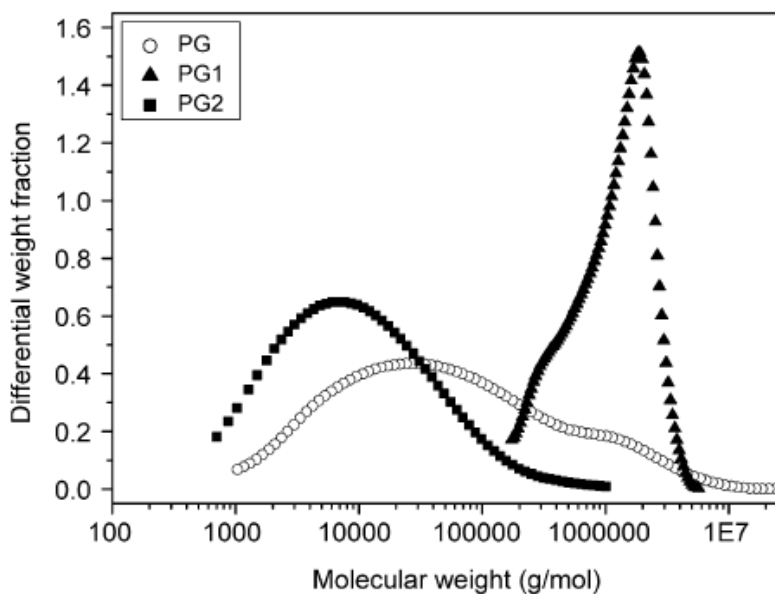
เมื่อทำการแยกองค์ประกอบของพอลิแซ็กคาไรด์เจลที่สกัดได้จากเปลือกทุเรียนด้วยเทคนิค Ion exchange column chromatography (IEC) จะพบว่าพอลิแซ็กคาไรด์เจลจะสามารถถูกแยกเป็น 2 ส่วนคือ PG1 และ PG 2 เมื่อทำการชะด้วยน้ำและสารละลายโซเดียมคลอไรด์ตามลำดับ ซึ่งพอลิแซ็กคาไรด์เจลทั้งสองส่วนจะมีองค์ประกอบของน้ำตาลในปริมาณที่แตกต่างกัน ดังแสดงในตารางที่ 2.7 แต่อย่างไรก็ตามพบว่า พอลิแซ็กคาไรด์เจลที่สกัดได้จะมีกรดน้ำตาลกาแลกทูโรนิกเป็นองค์ประกอบหลัก เนื่องจากมีปริมาณของกรดน้ำตาลกาแลกทูโรนิกโดยรวมที่มากกว่าร้อยละ 50 ขององค์ประกอบทั้งหมดนั่นเอง

ตารางที่ 2.7 ลักษณะ ปริมาณ และองค์ประกอบของน้ำตาลของสารสกัดพอลิแซ็กคาไรด์เจล^[2]

	PG	PG1	PG2
ลักษณะ	ผงสีขาวครีม	ผงปุ๋ยสีครีม	ผงปุ๋ยสีขาว
ผลที่ได้ (%)	10.0	22.0	68.6
ปริมาณโปรตีน (%w/w)	2.6	1.4	2.4
องค์ประกอบของน้ำตาล (%)			
Ara	1.2	2.2	0.7
Rha	4.8	10.7	2.1
Xyl	0.4	0.8	-
Gal	4.9	8.1	4.9
Glc	20.9	43.3	6.0
Gal A	67.9	34.9	86.2

เมื่อทำการศึกษาน้ำหนักโมเลกุลของพอลิแซ็กคาไรด์เจลที่สกัดได้จากเปลือกทุเรียนด้วยเทคนิค Size exclusion chromatography จะพบว่า พอลิแซ็กคาไรด์เจลจะมีน้ำหนักโมเลกุลส่วนใหญ่ประมาณ 10,000 ถึง 1,000,000 กรัมต่อโมล อย่างไรก็ตามพบว่า น้ำหนักโมเลกุลของพอลิแซ็กคาไรด์เจลมีการกระจายตัวที่กว้างมาก กล่าวคือมีน้ำหนักโมเลกุลตั้งแต่ 100 ถึง 10⁷ กรัมต่อโมล เมื่อพิจารณาน้ำหนักโมเลกุลของพอลิแซ็กคาไรด์เจลที่ได้จากการแยกส่วนจะพบว่า PG1 จะเป็นตัวกำหนดน้ำหนักโมเลกุลที่มีค่าสูง ในขณะที่ PG 2 จะมีน้ำหนักโมเลกุลต่ำกว่าแต่มีการกระจายตัวของน้ำหนักโมเลกุลที่สูงกว่ามาก ดังนั้นน้ำหนักโมเลกุลของพอลิแซ็กคาไรด์เจลโดยรวม

จึงมีค่าสูงกว่า PG 2 เพียงเล็กน้อยดังแสดงในรูปที่ 2.4 อย่างไรก็ตามพบว่า น้ำหนักโมเลกุลของพอลิแซ็กคาไรด์เจลดโดยรวมจะขึ้นอยู่กับสัดส่วนของ PG1 และ PG 2 ที่มีอยู่ในโครงสร้างของพอลิแซ็กคาไรด์เจลด

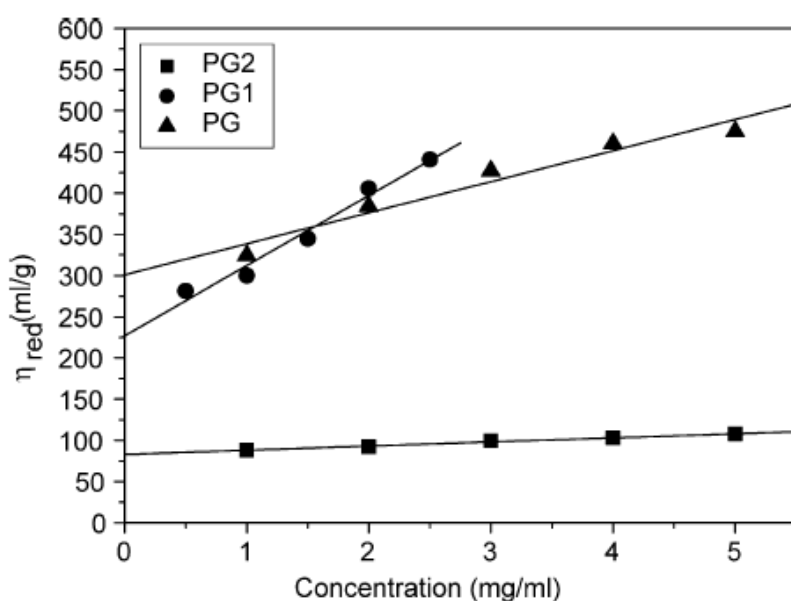


รูปที่ 2.4 น้ำหนักโมเลกุลของพอลิแซ็กคาไรด์เจลดที่สกัดได้จากเปลือกทุเรียน^[2]

2.3.2 สมบัติของสารละลายพอลิแซ็กคาไรด์เจลดที่สกัดได้จากเปลือกทุเรียน

จากการศึกษาสมบัติของสารละลายพอลิแซ็กคาไรด์เจลดพบว่า พอลิแซ็กคาไรด์เจลดสามารถพองตัวและละลายน้ำได้สารละลายที่มีลักษณะขุ่นหนืด และเมื่อศึกษาสมบัติของสารละลายพอลิแซ็กคาไรด์เจลดที่ความเข้มข้นร้อยละ 4 โดยน้ำหนักพบว่า สารละลายจะมีค่าความเป็นกรดต่าง (pH) เท่ากับ 2.29 ± 0.05 ซึ่งแสดงความเป็นกรดอันเนื่องมาจากมีการน้ำตาลกาแลกทูโรนิกเป็นองค์ประกอบหลักนั่นเอง

จากการศึกษาสมบัติการไหลของสารละลายพบว่า สารละลายพอลิแซ็กคาไรด์เจลดจะมีพฤติกรรมการไหลแบบ Non-newtonian ในลักษณะของ Pseudoplastic flow กล่าวคือเมื่อได้รับแรงกระทำความหนืดของสารละลายจะมีค่าลดลง และเมื่อศึกษาค่าความหนืดของสารละลายพอลิแซ็กคาไรด์เจลดที่ความเข้มข้น 0.5 ถึง 5 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร พบว่า ค่าความหนืดของสารละลายพอลิแซ็กคาไรด์เจลดโดยรวมจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อสารละลายมีความเข้มข้นเพิ่มขึ้น ดังรูปที่ 2.5 อย่างไรก็ตามพบว่า สารละลายพอลิแซ็กคาไรด์เจลดโดยรวมจะแสดงค่าความหนืดที่มากกว่าสารละลายพอลิแซ็กคาไรด์เจลดที่ได้จากการแยกส่วน (PG1 และ PG2) ทั้งนี้เนื่องจากการแยกส่วนของพอลิแซ็กคาไรด์เจลดจะทำให้สายโซ่โมเลกุลขาดออก หรือเกิดการ Depolymerization ระหว่างกระบวนการแยกส่วนนั่นเอง

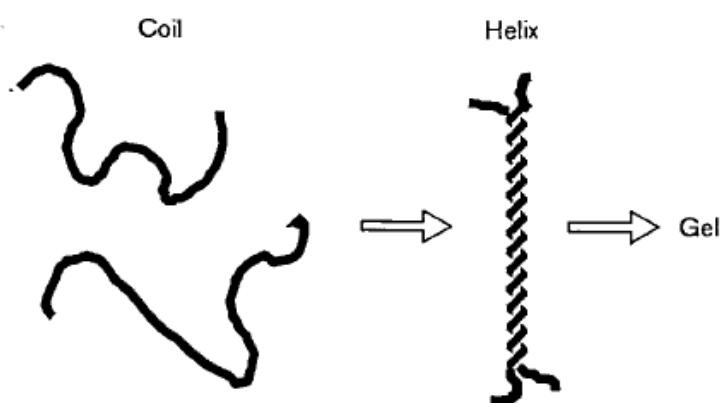


รูปที่ 2.5 ค่าความหนืดของสารละลายพอลิแซ็กคาไรด์เจลที่ความเข้มข้น 0.5 ถึง 5 mg/ml^[2]

2.3.3 สมบัติการก่อเกิดเจล

สมบัติที่สำคัญประการหนึ่งของพอลิแซ็กคาไรด์เจลในการนำมาใช้ประโยชน์ด้านต่าง ๆ คือ สมบัติการเกิดเจลและฟิล์ม^[21] ทั้งนี้เนื่องจากสารละลายพอลิแซ็กคาไรด์เจลจะแสดงลักษณะกึ่งของแข็ง และกึ่งของเหลว หรือที่เรียกว่า Sol-Gel ที่สภาวะหนึ่ง ๆ โดยพบว่า สารละลายพอลิแซ็กคาไรด์เจลจะแสดงสมบัติคล้ายของเหลว (Liquid-like properties) ก็ต่อเมื่อมีตัวทำละลายเป็นองค์ประกอบหลักในสารละลาย และจะแสดงสมบัติคล้ายของแข็ง (Solid-like properties) เมื่อโมเลกุลของพอลิแซ็กคาไรด์เจลเกิดการเชื่อมโยงกัน ซึ่งจะทำให้สารละลายที่ได้เปลี่ยนสภาพเป็นเจล โดยกลไกการเกิดเจลของพอลิแซ็กคาไรด์เจล มี 3 ขั้นตอน^[22] คือ

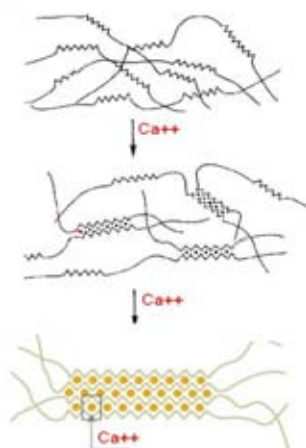
- สายโซ่ของพอลิแซ็กคาไรด์เจลจะเกิดการเคลื่อนที่เข้ามาใกล้และรวมตัวกัน
- เกิดการจัดเรียงตัวของสายโซ่โมเลกุล โดยการบิดเป็นเกลียว (Helical regions)
- สายโซ่โมเลกุลที่บิดเป็นเกลียวแล้วเกิดพันธะไฮโดรเจนซึ่งกันและกัน ซึ่งทำให้เกิดการเชื่อมโยงกันของสายโซ่ ส่งผลให้สารละลายมีลักษณะที่คงรูป หรือเป็นเจล ดังแสดงในรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 กลไกการเกิดเจลของสารละลายพอลิแซ็กคาไรด์เจล^[23]

อย่างไรก็ตามการเกิดเจลของสารละลายพอลิแซ็กคาไรด์เจลจะขึ้นอยู่กับปัจจัยต่าง ๆ ดังนี้

- ความเข้มข้นของสารละลายพอลิแซ็กคาไรด์เจล
- ตัวทำละลาย โดยพอลิแซ็กคาไรด์เจลจะสามารถเป็นเจลได้ดีเมื่อมีน้ำเป็นตัวทำละลาย ทั้งนี้เนื่องจากสามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนกับโมเลกุลของน้ำได้ง่าย
- อุณหภูมิ ทั้งนี้เนื่องจากเจลของพอลิแซ็กคาไรด์เจลที่เกิดขึ้นนั้นเป็นเจลประเภทที่ผันกลับได้ด้วยความร้อน หรือเรียกว่า Thermoreversible gel กล่าวคือ ลักษณะของเจลจะเปลี่ยนกลับเป็นของเหลวได้เมื่อได้รับความร้อนและจากของเหลวจะกลายเป็นเจลก็ต่อเมื่ออุณหภูมิของสารละลายมีค่าลดลง
- ค่าความเป็นกรดต่าง โดยพบว่าสารละลายพอลิแซ็กคาไรด์เจลจะเปลี่ยนสภาพกลายเป็นเจลได้ดีในสารละลายที่มีความเป็นกรดสูง หรือมีค่าความเป็นกรดต่าง (pH) ต่ำ
- สารก่อเกิดเจล พอลิแซ็กคาไรด์เจลจะสามารถก่อเกิดเจลได้เมื่อมีการเติมสารที่มีประจุ $2+$ เช่น แคลเซียมคลอไรด์ ลงในสารละลาย โดยแคลเซียมไอออน (Ca^{2+}) จะรวมตัวกับประจุลบของพอลิแซ็กคาไรด์เจลและกลายเป็นเจลในลักษณะที่เรียกว่า Egg-box structure ดังแสดงในรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 กลไกการเกิดเจลของพอลิแซ็กคาไรด์เจลและแคลเซียมไอออน^[24]

2.3.4 สมบัติทางชีวภาพของพอลิแซ็กคาไรด์เจล^[2]

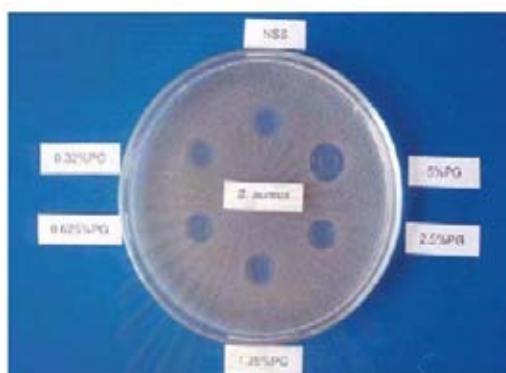
จากการศึกษาสมบัติทางชีวภาพของพอลิแซ็กคาไรด์เจลพบว่าพอลิแซ็กคาไรด์เจลมีประสิทธิภาพยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรียหลายชนิด ได้แก่ *Staphylococcus aureus* (*S. aureus*) *Staphylococcus epidermidis* (*S. epidermidis*) *Micrococcus luteus* (*M. luteus*) *Bacillus subtilis* (*B. subtilis*) *Lactobacillus pentosus* (*L. pentosus*) และ *Escherichia coli* (*E. coli*) ดังแสดงในตารางที่ 2.8 และ รูปที่ 2.8

ตารางที่ 2.8 ความสามารถในการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรียชนิดต่าง ๆ ของพอลิแซ็กคาไรด์เจลด้วยวิธีการวัด Clear zone^[2]

%	Diameter of inhibition zone, mm (mean \pm SD)						
	<i>B. subtilis</i>	<i>E. coli</i>	<i>S. aureus</i>	<i>S. epidermidis</i>	<i>M. luteus</i>	<i>L. pentosus</i>	<i>L. plantarum</i>
5	12.96 \pm 0.1	13.44 \pm 0.5	15.13 \pm 0.6	13.09 \pm 0.65	16.58 \pm 1.31	18.72 \pm 1.2	nz
2.5	12.45 \pm 0.3	12.86 \pm 0.4	13.06 \pm 0.5	12.73 \pm 0.33	14.28 \pm 0.33	16.26 \pm 0.6	nz
1.25	11.67 \pm 0.5	12.25 \pm 0.9	12.93 \pm 0.2	11.89 \pm 1.10	13.74 \pm 0.73	14.12 \pm 0.8	nz
0.63	11.05 \pm 0.2	11.52 \pm 0.5	11.98 \pm 0.1	10.88 \pm 0.88	12.91 \pm 0.49	12.98 \pm 1.2	nz
0.32	9.86 \pm 1.2	10.49 \pm 0.6	10.73 \pm 0.7	10.13 \pm 0.20	10.92 \pm 0.51	11.84 \pm 0.7	nz
NSS	nz	nz	nz	nz	nz	nz	nz

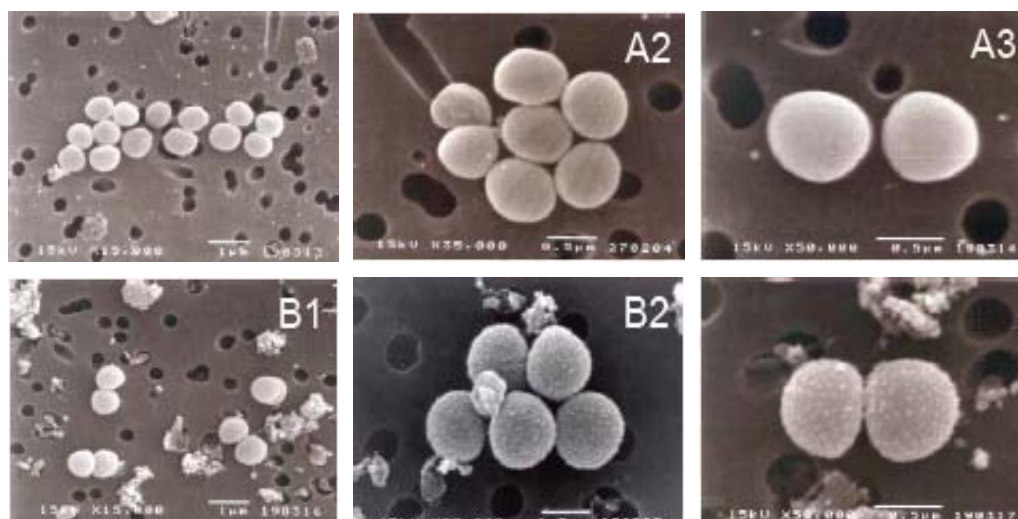
nz = ไม่มี inhibition zone

NSS = อาหารเลี้ยงเชื้อ

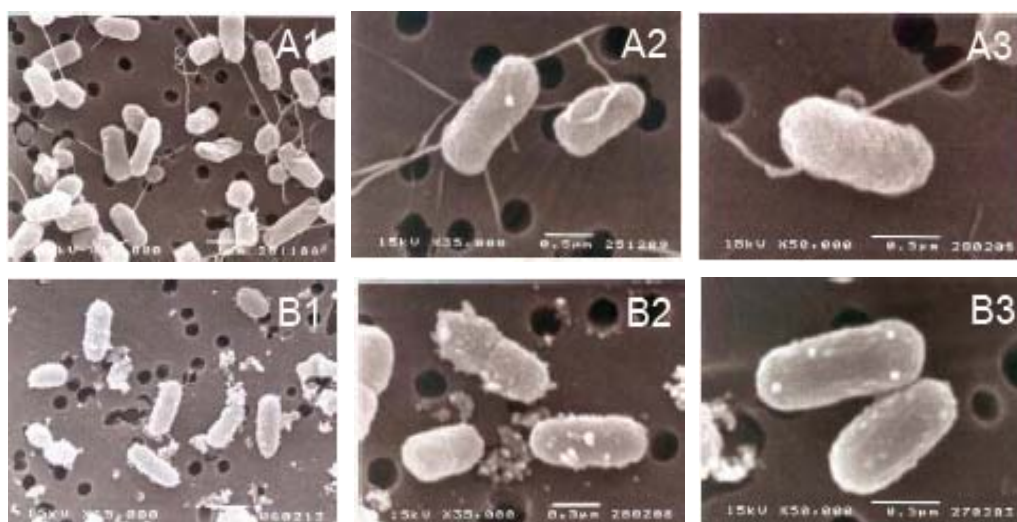


รูปที่ 2.8 ความสามารถในการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรีย *S.aureus* ของพอลิแซ็กคาไรด์เจลที่ความเข้มข้นต่าง ๆ ด้วยวิธีการวัด Clear zone^[2]

รูปที่ 2.9 และ 2.10 แสดงลักษณะของเชื้อแบคทีเรีย *S. aureus* และ *E. Coli* ซึ่งเป็นแบคทีเรียแกรมบวกและแกรมลบ ตามลำดับ จะเห็นได้ว่า กลไกการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรียทั้งสองชนิดนั้นเกิดขึ้นบริเวณผนังเซลล์ของเชื้อแบคทีเรีย ทั้งนี้เนื่องจากพอลิแซ็กคาไรด์เจลมีสมบัติเป็นสารพอลิอิเล็กโทรไลต์ ซึ่งประจุลบของพอลิแซ็กคาไรด์เจลที่เกิดจากการแตกตัวของหมู่คาร์บอกซิลในสายโซ่กรดน้ำตาลกาแลกทูโรนิกจะสามารถเข้ารวมตัวกับประจุบวกและทำลายผนังเซลล์ของ *S.aureus* ในขณะเดียวกันประจุลบของพอลิแซ็กคาไรด์เจลจะรบกวนสมดุลของผนังเซลล์แบคทีเรีย ซึ่งทำให้เซลล์เกิดการเสียสมดุลการส่งผ่านอาหาร ส่งผลให้เกิดการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรีย อย่างไรก็ตามพบว่า กลไกการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรียของพอลิแซ็กคาไรด์เจลยังคงไม่เป็นที่แน่ชัด ซึ่งจะต้องมีการศึกษาต่อไป



รูปที่ 2.9 ภาพ SEM ของเชื้อแบคทีเรีย *S.aureus* (ATCC 12228) ภายหลังจากบ่มที่อุณหภูมิ 37 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง; (A1, A2, A3) ไม่มี PG; (B1, B2); 0.32% PG; (B3) 0.64% PG^[2]

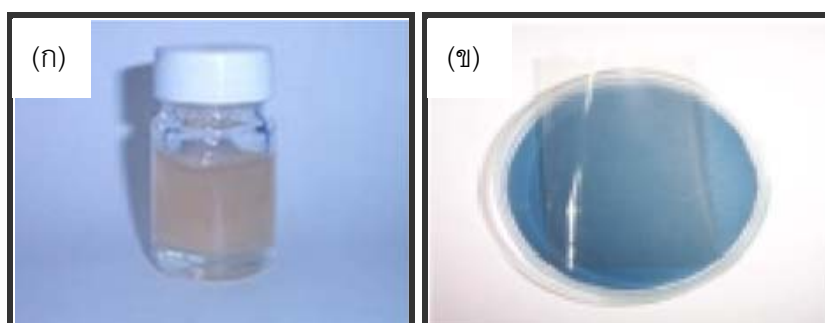


รูปที่ 2.10 ภาพ SEM ของเชื้อแบคทีเรีย *E. coli* (ATCC 25922) ภายหลังจากบ่มที่อุณหภูมิ 37 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง; (A1, A2, A3) ไม่มี PG; (B1, B2); 0.32% PG; (B3) 0.64% PG^[2]

2.3.5 การนำไปใช้ประโยชน์

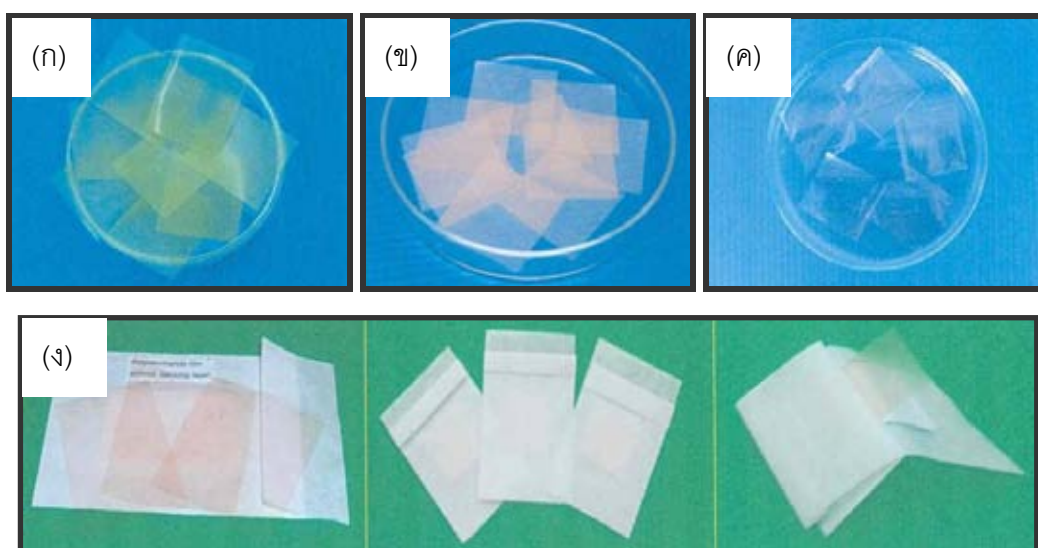
2.3.5.1 แผ่นปิดแผลจากสารสกัดพอลิแซ็กคาไรด์เจลที่ได้จากเปลือกทุเรียน^[25]

จากสมบัติในการก่อเกิดเจลและฟิล์มของสารสกัดพอลิแซ็กคาไรด์เจลที่ได้จากเปลือกผลทุเรียน ทำให้สามารถนำสารละลายพอลิแซ็กคาไรด์เจลไปใช้ในการเตรียมแผ่นฟิล์มปิดแผลชนิดใหม่ที่ละลายน้ำได้ ดังรูป 2.11 โดยแบบแรก (ก) จะอยู่ในรูปของสารละลายพอลิแซ็กคาไรด์เจล และเมื่อทำการป้ายที่บริเวณบาดแผลจะเปลี่ยนเป็นแผ่นฟิล์มบาง ๆ ในขณะที่อีกแบบ (ข) จะอยู่ในรูปของแผ่นฟิล์มที่เตรียมได้จากสารละลายพอลิแซ็กคาไรด์เจลที่ผสมกับพลาสติกไซเซออร์ต่าง ๆ ได้แก่ กลีเซอริน โพรพิลีนไกลคอล และพอลิเอทิลีนไกลคอล ซึ่งทำการเตรียมได้จากวิธีหล่อระเหยตัวทำละลาย (Casting/solvent evaporation)



รูปที่ 2.11 (ก) ลักษณะสารละลายพอลิแซ็กคาไรด์เจลและ (ข) ลักษณะของแผ่นฟิล์มที่เตรียมได้จากสารละลายพอลิแซ็กคาไรด์เจล^[25]

เมื่อทดสอบการซึมผ่านของน้ำและสมบัติเชิงกลของแผ่นฟิล์มโดยทำการทดสอบความแข็งแรงและความยืดหยุ่นของแผ่นฟิล์มที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส พบว่าพลาสติไซเซอร์ที่เติมจะเข้าไปแทรกระหว่างช่องว่างของพอลิแซ็กคาไรด์เจล ทำให้ความสามารถในการดูดซับความชื้นของแผ่นฟิล์มพอลิแซ็กคาไรด์เจลเพิ่มขึ้น เนื่องจากหมู่โครงสร้างทางเคมีของพลาสติไซเซอร์สามารถเกิดปฏิกิริยากับโมเลกุลของน้ำได้ดี นอกจากนี้ยังพบว่า แผ่นฟิล์มพอลิแซ็กคาไรด์เจลที่มีการเติมพลาสติไซเซอร์นั้นจะมีความยืดหยุ่นมากกว่า ซึ่งสามารถนำมาใช้เป็นผลิตภัณฑ์ทางการแพทย์และเภสัชกรรมต่าง ๆ ได้ ดังรูปที่ 2.12

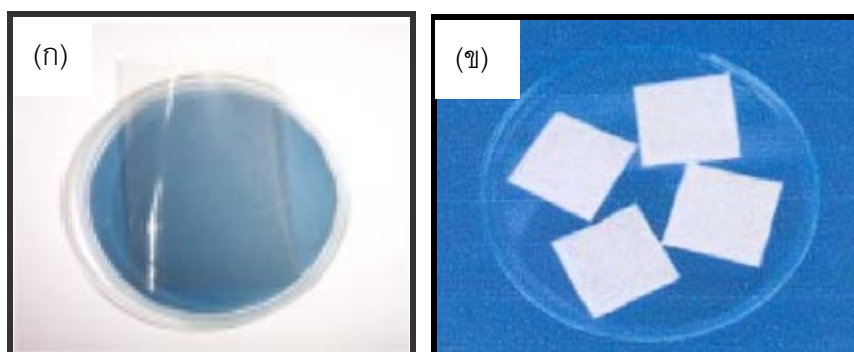


รูปที่ 2.12 ตัวอย่างการนำฟิล์มพอลิแซ็กคาไรด์เจลไปใช้งานในรูปแบบต่าง ๆ (ก) แผ่นฟิล์มปิดแผลผิวหนัง (ข) แผ่นฟิล์มปิดแผลผิวหนังที่เติมพลาสติไซเซอร์ (ค) แผ่นฟิล์มอมดับกลิ่นปาก (ง) แผ่นฟิล์มปิดแผลช่องปากผสมตัวยา Triamcinolone acetonide^[25]

2.3.5.2 การศึกษาสมบัติและประสิทธิภาพของแผ่นฟิล์มและแผ่นใยปิดแผลพอลิแซ็กคาไรด์เจลจากเปลือกทุเรียนต่อการหายของบาดแผลบนผิวหนังของสุนัข (Property of polysaccharide gel from durian as durian as dressing preparations and its effect on wound healing in dog skin)^[5]

จากสมบัติทางชีวภาพในการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรีย และความสามารถในการก่อเกิดเจลและฟิล์ม จึงมีการศึกษาการเตรียมผลิตภัณฑ์แผ่นปิดแผลที่เตรียมจากสารสกัดพอลิแซ็กคาไรด์เจลจากเปลือกแห้งของผลทุเรียนในรูปแบบของแผ่นฟิล์มและแผ่นใยแห้งแปะแผล ดังรูปที่ 2.13 โดยทำการเตรียมแผ่นฟิล์มพอลิแซ็กคาไรด์เจลด้วยวิธีการหล่อระเหยตัวทำละลาย และมีการใช้ไฟรไฟลีนไกลคอลเป็นพลาสติไซเซอร์ ซึ่งพบว่า แผ่นฟิล์มที่เตรียมได้มี

ลักษณะบางใส มีสีชมพูจาง เมื่อทดสอบสมบัติเชิงกลของแผ่นฟิล์มที่เตรียมได้ พบว่าแผ่นฟิล์มพอลิแซ็กคาไรด์เจลที่เติมพลาสติกไฮเซออร์มีความอ่อนตัว เหนียว และยืดหยุ่นที่ดีกว่าแผ่นฟิล์มพอลิแซ็กคาไรด์เจลที่ไม่เติมพลาสติกไฮเซออร์ นอกจากนี้พบว่า แผ่นฟิล์มแปะแผลพอลิแซ็กคาไรด์เจลสามารถพองตัวและยึดติดกับเนื้อเยื่อได้ดี ในขณะที่แผ่นใยแห้งแปะแผลที่เตรียมได้จากสารละลายพอลิแซ็กคาไรด์เจลที่ความเข้มข้นร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก ด้วยเครื่อง Freeze dryer จะได้แผ่นใยแห้งสีขาวที่มีลักษณะอ่อนนุ่ม เหนียวและหนา แต่อย่างไรก็ตามพบว่า ผลิตภัณฑ์ทั้งสองรูปแบบสามารถดูดความชื้นจากภายนอกได้ดี



รูปที่ 2.13 (ก) แผ่นฟิล์มพอลิแซ็กคาไรด์เจลและ (ข) แผ่นใยแห้งแปะแผลพอลิแซ็กคาไรด์เจล^[5]

จากนั้นเมื่อนำแผ่นปิดแผลพอลิแซ็กคาไรด์เจลที่เตรียมได้ทั้งสองรูปแบบมาศึกษาประสิทธิภาพในการรักษาบาดแผลเปิดบนผิวหนังของสุนัข โดยทดลองในสุนัขเพศเมียโตเต็มที่ สุขภาพแข็งแรง น้ำหนักประมาณ 12-15 กิโลกรัม จำนวน 4 ตัว และทำการผ่าตัดเปิดแผลผิวหนังสุนัขในแนวกลางหลัง จำนวน 8 แผล จากนั้นจึงทำการรักษาบาดแผลโดยแบ่งเป็น 4 กลุ่มทดลอง คือ การรักษาบาดแผลด้วยยาสามัญไพวโดนไฮโอดีน (กลุ่มควบคุม) การรักษาบาดแผลด้วยแผ่นฟิล์มพอลิแซ็กคาไรด์เจล (กลุ่มทดลองที่ 1) การรักษาบาดแผลแผ่นใยแห้งของพอลิแซ็กคาไรด์เจล (กลุ่มทดลองที่ 2) และการรักษาบาดแผลด้วยยาสามัญไพวโดนไฮโอดีนและปิดด้วยแผ่นฟิล์ม Opsite® Flexigrid (กลุ่มทดลองที่ 3) ตามลำดับ โดยทุกบาดแผลมีการปิดทับด้วยผ้าก๊อซ จากนั้นจึงประเมินการหายของบาดแผลทุก 3 วัน เป็นระยะเวลา 21 ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า บาดแผลที่รักษาด้วยแผ่นฟิล์มพอลิแซ็กคาไรด์เจลปิดเร็วและมีขนาดของบาดแผลเหลืออยู่เล็กกว่าเมื่อเทียบกับบาดแผลในกลุ่มควบคุม และแสดงการปิดของทุกแผลอย่างสมบูรณ์ในวันที่ 21 ดังแสดงในรูปที่ 2.14 ในขณะที่การรักษาด้วยกลุ่มควบคุม กลุ่มการทดลองที่ 2 และกลุ่มการทดลองที่ 3 จะมีการปิดของแผลอย่างสมบูรณ์ได้ร้อยละ 50.0 87.5 และ 37.5 ตามลำดับ



รูปที่ 2.14 บาดแผลสุนัขที่ติดด้วยแผ่นฟิล์มพอลิแซ็กคาไรด์เจลที่ระยะเวลา 3 12 และ 21 วัน^[5]

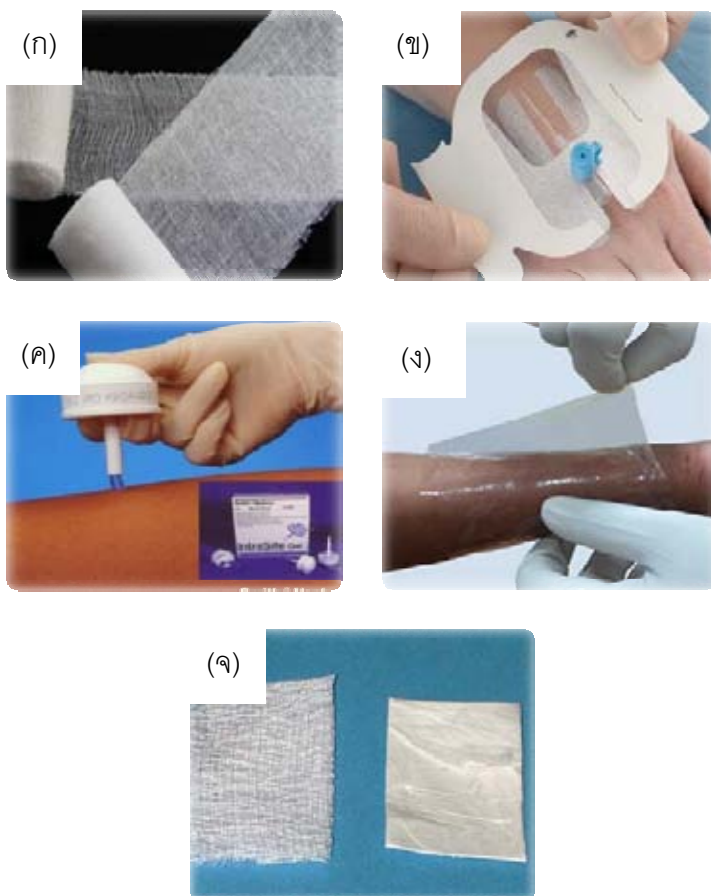
จากผลการศึกษาชี้ให้เห็นว่า ผลิตภัณฑ์แปะแผลที่เตรียมจากพอลิแซ็กคาไรด์เจล ทั้งในรูปแบบของแผ่นฟิล์มและแผ่นใยแห้งแสดงสมบัติในอุดมคติที่ดีของแผ่นแปะแผลโดยรักษาความชื้นของบาดแผลทำให้บาดแผลหายเร็ว ส่งเสริมการหายของบาดแผลโดยลดการอักเสบและปฏิกิริยาของเนื้อเยื่อ ส่งเสริมการเจริญแบ่งตัวของเซลล์เยื่อบุหนัง จากผลการศึกษานี้แนะนำว่า ผลิตภัณฑ์แปะแผลที่เตรียมจากพอลิแซ็กคาไรด์เจลทั้งในรูปแบบแผ่นฟิล์มและแผ่นใยแห้งแปะแผลสามารถนำมาใช้รักษาบาดแผลเปิดในสุนัขและมีประสิทธิภาพสูงกว่าการรักษาด้วยวิธีที่มักนิยมใช้และการใช้แผ่นฟิล์มแปะแผลที่ขายทั่วไป

2.4 ผ้าปิดแผล (Wound dressing)

โดยปกติร่างกายจะมีกลไกการห้ามเลือดตามธรรมชาติอยู่แล้วแต่การปฐมพยาบาลเพื่อห้ามเลือดยังคงเป็นสิ่งจำเป็นต่อการรักษาบาดแผล ซึ่งวิธีการห้ามเลือดที่ผู้คนส่วนใหญ่รู้จักกันคือ การกดแผล การกดเส้นเลือดแดงเหนือแผล การใช้สายรัด นอกจากนี้วิธีทั่วไปเหล่านี้วงการแพทย์ยังพยายามพัฒนาวิธีห้ามเลือดแบบใหม่ออกมาเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการรักษาบาดแผลให้มากขึ้น โดยการใช้แผ่นปิดแผลห้ามเลือด ซึ่งเป็นเทคโนโลยีการห้ามเลือดแบบหนึ่งที่ใช้อยู่ในปัจจุบัน และเหมาะสมกับการรักษาบาดแผลที่ไม่ลึกมาก เช่น แผลถลอกจากอุบัติเหตุ หรือแม้แต่ไฟไหม้น้ำร้อนลวกที่ผู้ป่วยต้องมาล้างแผลอย่างต่อเนื่องทุกวันและต้องเปลี่ยนวัสดุปิดแผลทุกวัน จนกว่าแผลนั้นจะหายสนิท ข้อเสียของวิธีนี้คือ ลื่นเปื่อยตลอดเวลาและค่าใช้จ่าย ซึ่งถ้าแผลไม่ลึกมากการเปลี่ยนวัสดุปิดแผลบ่อย ๆ อาจทำให้เลือดออกมากขึ้นและแผลหายได้ช้า จึงก่อให้เกิดงานวิจัยจำนวนมากศึกษาถึงการรักษาบาดแผลด้วยวัสดุปิดแผลชนิดพิเศษต่าง ๆ ที่ทำให้ไม่ต้องไปทำแผลทุกวัน ไม่จำเป็นต้องเปลี่ยนวัสดุปิดแผลทุกวัน ลดความเจ็บปวดระหว่างการทำแผล และมีสมบัติที่ใกล้เคียงวัสดุปิดแผลในอุดมคติมากที่สุด โดยสมบัติของวัสดุปิดแผลในอุดมคติ^[26] ได้แก่

- สามารถดูดซับและกักเก็บความชื้นบริเวณรอบบาดแผลได้ดี
- มีความแข็งแรงและปกป้องบาดแผลจากสิ่งแวดล้อมภายนอกได้ดี
- มีสมบัติในการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรีย
- ส่งเสริมการหายของบาดแผลและการสร้างเนื้อเยื่อที่จะเกิดขึ้นใหม่
- มีความสามารถในการดูดซับและถ่ายเทสิ่งขับหลั่ง เช่น เลือด น้ำเหลือง หนอง
- มีความสามารถในการระบายอากาศที่ดีเพื่อไม่ให้เกิดการเน่าเปื่อยของบาดแผล
- ไม่ส่งผลให้เกิดการอักเสบ และติดเชื้อของบาดแผล
- สะดวกและง่ายต่อการเปลี่ยนวัสดุปิดแผล

โดยในปัจจุบันมีวัสดุปิดแผลมากมายหลายชนิด ดังแสดงในรูปที่ 2.15 ทั้งนี้การเลือกใช้วัสดุปิดแผลจะขึ้นอยู่กับลักษณะของบาดแผลที่เกิดขึ้น



รูปที่ 2.15 วัสดุปิดแผลชนิดต่าง ๆ ได้แก่ (ก) ผ้าก๊อซ (ข) แผ่นฟิล์ม (ค) เจล (ง) แผ่นไฮโดรเจล และ (จ) แผ่นเส้นใยนาโน^[26]

2.5 การปั่นเส้นใยโดยใช้เทคนิคการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต (Electrospinning)^[27]

“เส้นใยนาโน (Nanofiber)” เป็นเส้นใยที่มีขนาดเล็กในระดับนาโนเมตร ถึงระดับ 100 นาโนเมตร ทำให้มีข้อดี คือมีอัตราส่วนระหว่างพื้นผิวต่อปริมาตร (Surface-to-volume ratio) สูง นอกจากนี้แผ่นเส้นใยที่ได้จะประกอบไปด้วยรูพรุนขนาดเล็กจำนวนมาก ส่งผลให้มีสมบัติพิเศษต่าง ๆ เช่น สมบัติเชิงกลสมบัติทางไฟฟ้า หรือสมบัติทางชีวภาพที่ดีมากเหมาะสำหรับงานเฉพาะด้านซึ่งต้องการความได้เปรียบของขนาดเล็กและความเป็นรูพรุนสูง

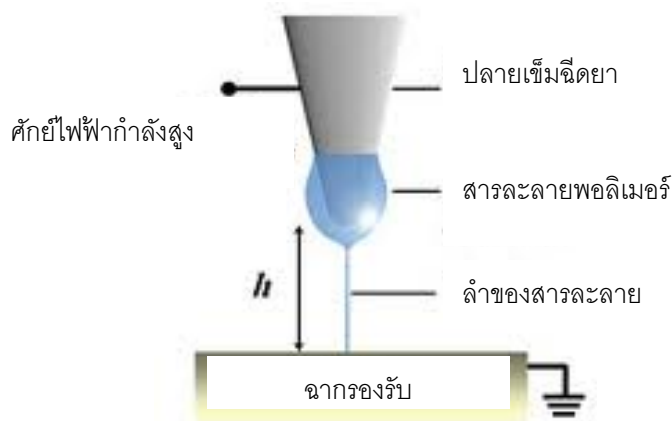
2.5.1 หลักการเกิดเส้นใย

การทำงานของระบบอิเล็กทรอนิกส์เมื่อยังไม่ให้ศักย์ไฟฟ้ากำลังสูงแก่ระบบสารละลายจำนวนหนึ่งจะรวมตัวกันเป็นหยดรูปร่างครึ่งทรงกลมที่บริเวณปลายเข็มโลหะ อันเป็นผลเนื่องมาจากแรงตึงผิว (Surface tension) แต่เมื่อให้ความต่างศักย์กำลังสูงจะทำให้เกิดสนามไฟฟ้าครอบคลุมส่วนปลายของเข็มโลหะและมีประจุเกิดขึ้นที่ผิวของสารละลาย จึงเกิดแรงผลักทางไฟฟ้าสถิต (Electrostatic repulsion) ขึ้นในทิศตรงกันข้ามกับแรงตึงผิว ดังนั้นถ้าสนามไฟฟ้ามีค่ามากพอที่จะทำให้เกิดแรงผลักมากกว่าแรงตึงผิว จะส่งผลให้รูปร่างครึ่งทรงกลมของสารละลายที่อยู่ปลายเข็มยืดออกเป็นรูปร่างทรงกรวยที่เรียกว่า “กรวยของเทลเลอร์” (Taylor's cone) และเมื่อสนามไฟฟ้าที่ให้แก่ระบบมีค่ามากขึ้นจนกระทั่งถึงค่าวิกฤตค่าหนึ่งจะเกิดแรงขับเคลื่อนให้สารละลายพุ่งออกมาเป็นลำ (Solution jet) โดยบริเวณที่ลำของสารละลายได้ยืดออกมาห่างจากจุดเริ่มต้นระยะหนึ่ง สารละลายจะถูกเหนี่ยวนำให้เกิดประจุที่ผิวของสารละลายด้วยสนามไฟฟ้าภายนอกที่เกิดจากความต่างศักย์ระหว่างปลายเข็มถึงวัสดุรองรับที่เป็นตัวนำ ด้วยเหตุผลดังกล่าวนี้ ทำให้เกิดแรงที่ไม่สมดุล ส่งผลให้เกิดการบิดโค้งของเส้นใยบริเวณลำของสารละลาย ดังรูปที่ 2 ลำสารละลายจึงยืดออกในเส้นทางที่ซับซ้อนขึ้น และนำมาซึ่งเส้นใยที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่เล็กลงอย่างมากและยิ่งรอบของการบิดโค้งมีจำนวนมากขึ้นจะทำให้สารละลายยืดออกเป็นเส้นที่เล็ก ประกอบกับการระเหยออกของตัวทำละลายทำให้เกิดเส้นใยที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กในระดับนาโนเมตร ตกลงบนวัสดุรองรับในลักษณะที่ไม่เกิดการถักทอ (Non-woven nanofiber)

2.5.2 กระบวนการป้อนเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตนี้แบ่งออกได้เป็น 3 ขั้นตอนด้วยกัน ได้แก่

2.5.2.1 ขั้นตอนการเกิดกระแสพอลิเมอร์

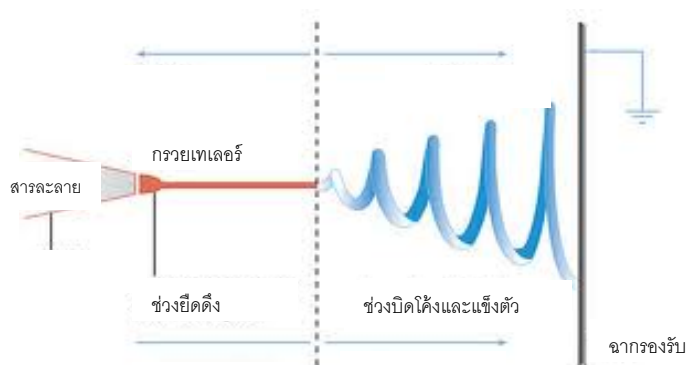
เมื่อให้ศักย์ไฟฟ้ากำลังสูงแก่สารละลายพอลิเมอร์เพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จะทำให้หยดของพอลิเมอร์ที่บริเวณปลายเข็มซึ่งมีลักษณะเป็นทรงกลมเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างเป็นลักษณะทรงกรวย ทั้งนี้เป็นผลมาจากแรงผลักรวมของประจุไฟฟ้าที่เกิดขึ้นและเมื่อเพิ่มศักย์ไฟฟ้าขึ้นไปอีก ส่วนปลายของกรวยจะมีการสะสมของประจุเพิ่มมากขึ้นทำให้เกิดแรงผลักรวมของประจุที่เพิ่มขึ้น และเมื่อแรงผลักรวมไฟฟ้าที่ศักย์ไฟฟ้ามีค่ามากกว่าแรงตึงผิวของสารละลายพอลิเมอร์จะ ทำให้เกิดกระแสพอลิเมอร์พุ่งออกมาและยืดออกไปยังฉากรองรับดังแสดงในรูปที่ 2.16



รูปที่ 2.16 ขั้นตอนการเกิดกระแสพอลิเมอร์เมื่อได้รับศักย์ไฟฟ้ากำลังสูง^[28]

2.5.2.2 ขั้นตอนการยืดตัวของกระแสพอลิเมอร์ในระหว่างที่เคลื่อนตัวจากปลายเข็มไปยังฉากรองรับ

หลังจากขั้นตอนที่ 2.5.2.1 ลำเส้นใยที่พุ่งออกมาจะมีแนวทางเคลื่อนที่ของกระแสพอลิเมอร์เป็นเส้นตรงในช่วงแรกโดยระยะที่เป็นเส้นตรงนี้จะขึ้นกับค่าอัตราส่วนระหว่างศักย์ไฟฟ้าต่อระยะทางจากปลายเข็มถึงอุปกรณ์รองรับ ซึ่งการมีอัตราส่วนดังกล่าวมาก จะส่งผลให้สารละลายถูกยืดดึงเป็นช่วงของเส้นตรงได้มาก จากนั้นลำเส้นใยจะสามารถยืดขยายได้อย่างต่อเนื่อง อันเป็นผลมาจากแรงผลักระหว่างประจุในแต่ละโค้งของลำเส้นใยดังรูปที่ 2.17



รูปที่ 2.17 การยืดตัวของกระแสพอลิเมอร์ในระหว่างที่เคลื่อนตัวจากปลายเข็มไปยังฉากรองรับ^[29]

2.5.2.3 ขั้นตอนการแข็งตัวของกระแสพอลิเมอร์เป็นเส้นใย ซึ่งเป็นขั้นตอนสุดท้ายในกระบวนการเตรียมเส้นใยโดยการปั่นด้วยไฟฟ้าสถิต โดยตัวทำละลายที่อยู่ในสารละลายพอลิเมอร์เกิดการระเหยออกไป ทำให้เส้นใยเกิดการคงรูปก่อนตกลงบนฉากรองรับ

ปัจจัยที่ส่งผลต่อลักษณะและขนาดของเส้นใย สามารถแบ่งตัวแปรสำคัญที่ทำให้เกิดผลกระทบต่อลักษณะเส้นใยได้เป็น 3 กลุ่ม คือ

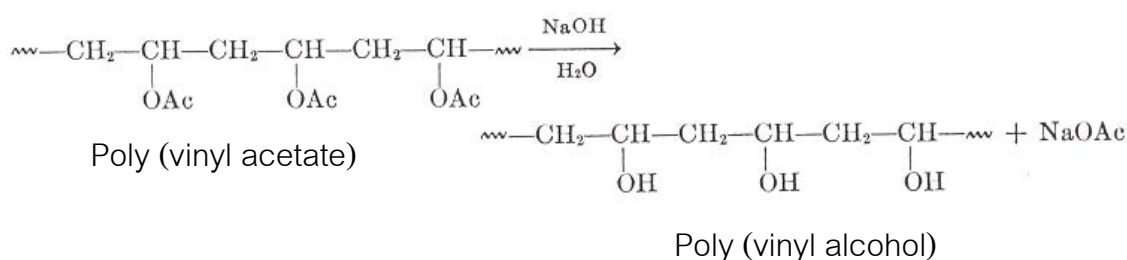
1) ตัวแปรด้านสารละลาย สมบัติของสารละลายเป็นตัวแปรที่ส่งผลต่อการเตรียมเส้นใยนาโนอย่างมากโดยเฉพาะอย่างยิ่งขนาดและรูปร่างของเส้นใย เช่น แรงตึงผิวของสารละลายจะส่งผลต่อการเกิดปุ่มคล้ายลูกบิด หรือ บิด (beads) ซึ่งมีลักษณะเป็นก้อนทรงกลมหรือรีอยู่บนเส้นใยและหากความเข้มข้นของสารละลายมีค่าสูงขึ้นไปจะมีผลทำให้ปริมาณปุ่มคล้ายลูกบิดลดลง

2) ตัวแปรในระบบ เป็นปัจจัยที่สำคัญมากอีกกลุ่มหนึ่งประกอบด้วย ความต่างศักย์ไฟฟ้า อัตราการไหลของสารละลาย คุณสมบัติของสารละลาย ชนิดของวัสดุรองรับ ระยะห่างระหว่างปลายเข็มกับวัสดุรองรับและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเข็มโลหะ ตัวแปรเหล่านี้ล้วนมีผลต่อลักษณะของเส้นใยโดยเฉพาะความต่างศักย์ไฟฟ้า ซึ่งส่วนใหญ่หากศักย์ไฟฟ้าที่ให้แก่ระบบมีค่ามากจะส่งผลให้ขนาดของเส้นใยเล็กลง ทั้งนี้เนื่องจากมีแรงผลักทางไฟฟ้าเพิ่มขึ้นส่งผลให้เส้นใยถูกยืดได้มากจึงมีขนาดเล็กลง

3) สภาพแวดล้อม มีผลต่อสารละลายและทำให้ลักษณะของเส้นใยเปลี่ยนไป เช่น ในกรณีที่มีความชื้นในระบบสูงจะเกิดปรากฏการณ์คล้ายกับการควบแน่นเป็นหยดน้ำบนผิวของเส้นใย ทำให้เกิดรูพรุนบนเส้นใยในปริมาณมากขึ้น

2.6 พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (Poly (vinyl alcohol); PVA)^[30]

พอลิไวนิลแอลกอฮอล์เป็นพอลิเมอร์สังเคราะห์ที่ไม่มีสารพิษ ไม่มีกลิ่น ไม่มีประจุ และละลายน้ำได้ โดยพอลิไวนิลแอลกอฮอล์สามารถสังเคราะห์ขึ้นจากปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของพอลิไวนิลอะซิเตต (Poly (vinyl acetate); PVAc) และมีโครงสร้างผลึกแบบผสม ดังรูปที่ 2.18 พอลิไวนิลแอลกอฮอล์เป็นเทอร์โมพลาสติกที่มีสมบัติพิเศษ คือ มีสมบัติการก่อเกิดฟิล์ม และการยึดติดที่ดีเยี่ยม อีกทั้งยังทนทานต่อการกัดกร่อนของน้ำมัน น้ำมันหล่อลื่น และตัวทำละลายต่าง ๆ ได้ดี นอกจากนี้ยังมีความทนแรงดึงและความยืดหยุ่นสูง รวมทั้งมีปริมาณออกซิเจนที่สูงจึงมีสมบัติป้องกันการระเหยของกลิ่นและน้ำมัน ทั้งนี้สมบัติดังกล่าวขึ้นอยู่กับปริมาณความชื้น หากมีความชื้นสูงจะสามารถดูดซับน้ำได้มาก โดยน้ำจะทำหน้าที่เป็นพลาสติกไฮเซออร์ทำให้มีความยืดหยุ่นเพิ่มขึ้น พอลิไวนิลแอลกอฮอล์สามารถย่อยสลายได้โดยวิธีชีวภาพและ มีความทนทานต่อความร้อนสูง โดยพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่ได้จากการไฮโดรไลซิสอย่างสมบูรณ์และได้จากการไฮโดรไลซิสบางส่วนจะมีจุดหลอมเหลวที่ 230 และ 180 ถึง 190 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ซึ่งสามารถใช้ผลิตเป็นเส้นใย ฟิล์ม และแผ่นกรองได้ง่าย เนื่องจากสามารถละลายในน้ำได้ดี และมีสภาพเข้ากันได้ทางชีวภาพ อย่างไรก็ตามพบว่า สมบัติทางกายภาพและทางเคมีจะขึ้นกับระดับของการพอลิเมอไรเซชัน (Degree of polymerization) และระดับของการไฮโดรไลซิส (Degree of hydrolysis)



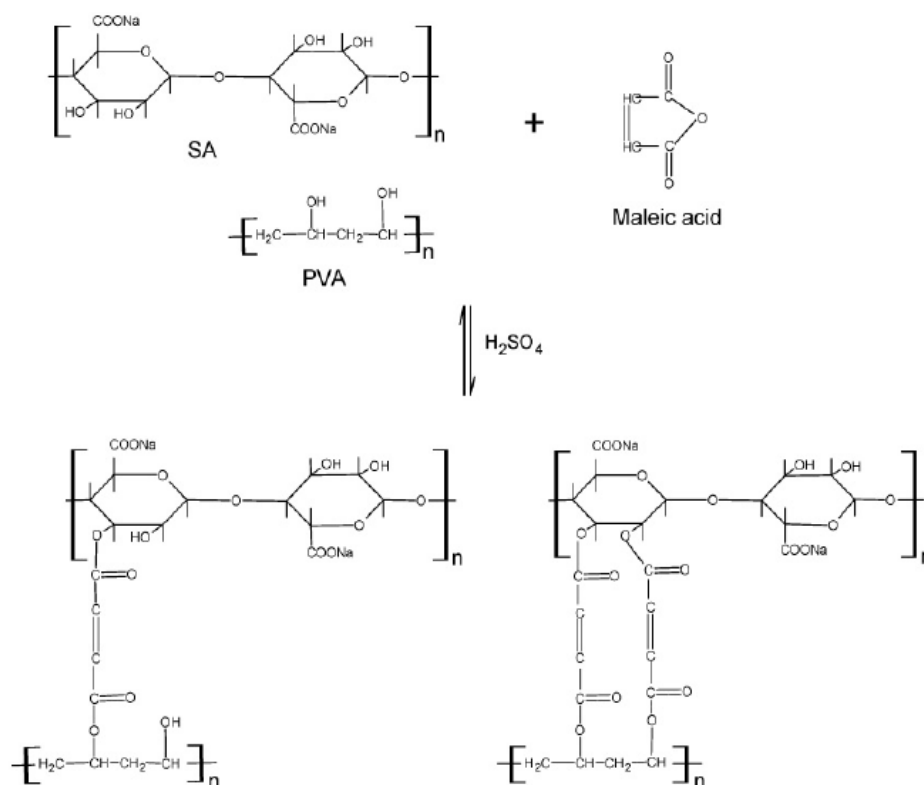
รูปที่ 2.18 ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของพอลิไวนิลอะซิเตต^[30]

การใช้งานของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ แบ่งออกเป็นสองลักษณะ คือลักษณะแรก อาศัยสมบัติการละลายในน้ำ เช่น ใช้เป็นตัวช่วยทำให้ระบบอิมัลชัน และทำสารแขวนลอยต่าง ๆ ให้เข้มข้น คือใช้เป็นสารข้น (Thickening agent) และใช้ทำแผ่นฟิล์มเคลือบกระดาษซึ่งมีความใสเหนียวและทนต่อการขีดข่วน และลักษณะที่สองคือการทำให้ไม่ละลายน้ำ คือนำพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ไปทำปฏิกิริยาเคมีให้ไม่สามารถละลายแล้วจึงนำมาใช้งาน ซึ่งพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่

ไม่ละลายในน้ำนี้สามารถดูดน้ำและความชื้นได้ประมาณร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก จึงใช้เป็นเส้นใยแทนฝ้ายได้เส้นใยพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ทนทานต่อการสึกหรอและสามารถคงรูปได้เป็นอย่างดี

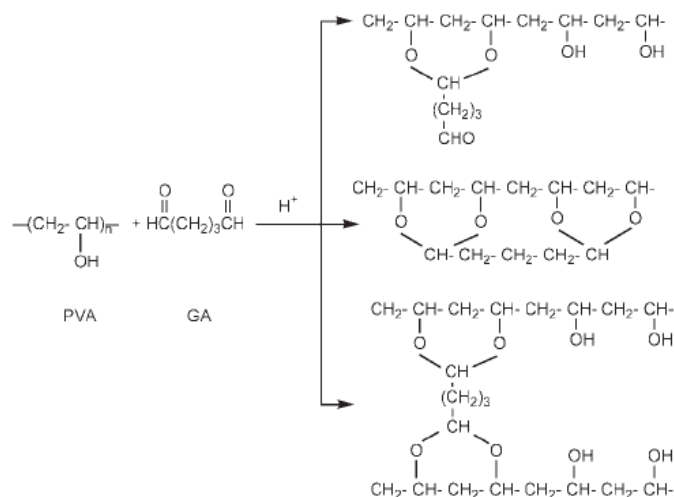
2.7 การเชื่อมขวางเส้นใย

การเชื่อมขวางเส้นใย เป็นการเชื่อมโยงระหว่างสายโซ่ของพอลิเมอร์ในโครงสร้างสามมิติ ซึ่งจะทำให้พอลิเมอร์มีความแข็งแรงมากขึ้น แต่การทำเช่นนี้มักสูญเสียความยืดหยุ่นไป เนื่องจากการเคลื่อนไหวนៃของสายโซ่พอลิเมอร์เกิดได้ยากขึ้น Dong และคณะ^[31] ได้ทำการศึกษาการเชื่อมขวางแผ่นเส้นใยผสมของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ผสมอัลจินเตและพอลิซัลโฟน ด้วยสารละลายกรดมาเลอิก ที่ความเข้มข้นร้อยละ 1.5 และเร่งปฏิกิริยาด้วยกรดไฮโดรคลอริกที่ความเข้มข้นร้อยละ 0.05 โดยน้ำหนัก ตามปฏิกิริยา ดังแสดงในรูปที่ 2.19



รูปที่ 2.19 ปฏิกิริยาการเชื่อมขวางระหว่างพอลิไวนิลแอลกอฮอล์และไซเตียมอัลจินเตกับกรดมาเลอิก^[31]

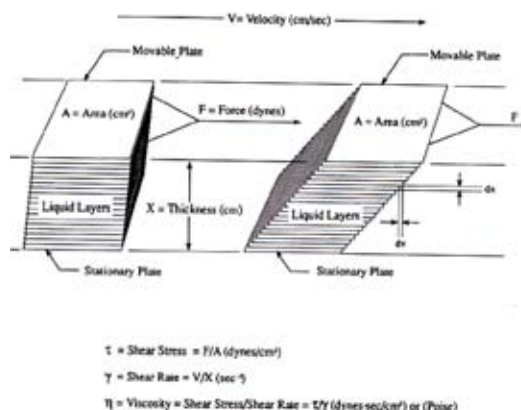
Wang และ Hsieh, 2009^[32] ได้ทำการศึกษาการเชื่อมขวางเส้นใยพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ ด้วยสารละลายกลูตารัลดีไฮด์ (Glutaraldehyde, GA) ที่ความเข้มข้นร้อยละ 25 โดยน้ำหนัก การเชื่อมขวางทางเคมีเกิดจากการทำปฏิกิริยาระหว่างหมู่ฟังก์ชันบนสายโซ่โมเลกุลของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์และกลูตารัลดีไฮด์ ดังแสดงในรูปที่ 2.20



รูปที่ 2.20 ปฏิกิริยาการเชื่อมขวางทางเคมีของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์และกลูตารัลดีไฮด์^[32]

2.8 ความหนืด^[33]

ความหนืด คือ ผลที่ได้จากการวัดแรงเสียดทานภายในการไหล (Fluid) โดยแรงเสียดทานจะเกิดขึ้นก็ต่อเมื่อชั้นของของไหลมีการเคลื่อนที่สัมพันธ์กัน แรงเสียดทานยิ่งมีค่ามากเท่าใดยิ่งต้องใช้แรงในการเคลื่อนที่มากขึ้นเท่านั้น แรงที่กล่าวถึงนี้ เรียกว่า ความเค้นเฉือน (Shear stress) หรือความเค้นภายนอก โดยปกติแล้วการเฉือน (Shearing) จะเกิดขึ้นเสมอเมื่อวัตถุมีการเคลื่อนที่ เช่น การเทของเหลว การราดหรือปาดของเหลวปกคลุมไปบนพื้นผิวหนึ่ง ๆ ดังนั้นของไหลที่มีความหนืดสูงจึงต้องการแรงในการเคลื่อนที่มากกว่าของไหลที่มีความหนืดต่ำ อย่างไรก็ตามค่าความหนืดนี้ยังสามารถอธิบายถึงความสามารถในการต้านทานการไหลภายในตัวของไหล และอาจจะถูกพิจารณาให้เป็นตัวชี้วัดความเสียดทานของไหลได้ โดยยิ่งของไหลมีความหนืดต่ำมากเท่าไรจะยิ่งมีความสามารถในการเปลี่ยนรูปได้มากเท่านั้น เซอร์ไอแซก นิวตัน (Sir Issac Newton) ได้อธิบายในเรื่องความหนืดโดยอาศัยแบบจำลองดังแสดงในรูปที่ 2.21



รูปที่ 2.21 แบบจำลองแสดงการเคลื่อนที่ของระนาบชั้นของไหล^[34]

เมื่อระนาบของของไหลสองชั้นที่ขนานกันและมีพื้นที่เท่ากันคือ A ถูกแยกออกจากกันเป็นระยะทาง dx เคลื่อนที่ในทิศทางเดียวกันด้วยความเร็วที่ต่างกันคือ v_1 และ v_2 นิวตันได้สมมุติว่าแรงที่ต้องใช้ในการรักษาความแตกต่างของความเร็ว จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความแตกต่างของความเร็วหรือเกรเดียนต์ความเร็ว ซึ่งแสดงได้ดังนี้

$$\frac{F}{A} = \eta \frac{dv}{dx}$$

โดย η คือเป็นค่าคงที่ Coefficient of viscosity หรือเรียกง่าย ๆ ว่า Viscosity

ค่าเกรเดียนต์ความเร็ว (dv/dx) เรียกอีกอย่างหนึ่งว่า อัตราเฉือน (Shear rate) เขียนแทนได้ด้วย S มีหน่วยเป็น วินาที⁻¹ เทอม F/A คือแรงต่อหน่วยพื้นที่ที่ต้องการในการทำให้เกิดการเฉือน เรียกว่า ความเค้นเฉือน เขียนแทนด้วย F' มีหน่วยเป็น ไดน์ต่อตารางเซนติเมตร หรือนิวตันต่อตารางเมตร ในระบบ SI ดังนี้

$$\eta = F'/S$$

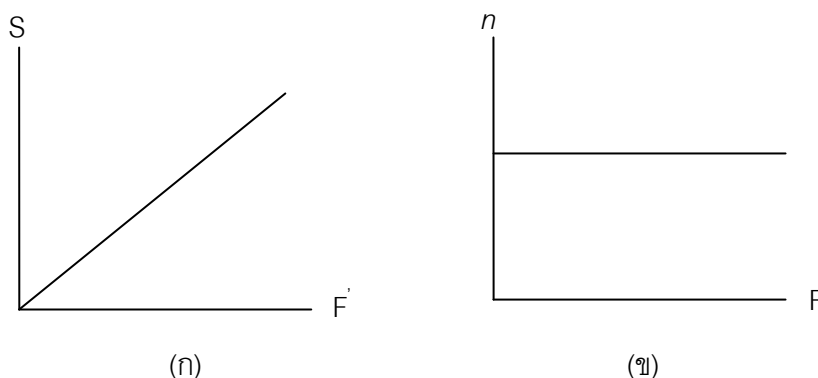
ปกติหน่วยของความหนืด คือ พอยส์ หรือ เซนติพอยส์ แต่บางครั้งอาจพบในรูปของหน่วย พาสคัลวินาที หรือมิลลิพาสคัลวินาที ซึ่งเป็นหน่วยในระบบ SI

$$1 \text{ mPa}\cdot\text{S} = 1 \text{ Cp}$$

นิวตันได้ตั้งสมมุติฐานไว้ว่า วัสดุทุกชนิด ณ อุณหภูมิหนึ่ง ๆ จะมีค่าความหนืดที่ไม่ขึ้นกับอัตราเฉือน หรืออีกนัยหนึ่งคือ ถ้าเพิ่มแรงขึ้นเป็นสองเท่าก็จะทำให้ของไหลไหลเร็วขึ้นเป็นสองเท่าด้วย แต่ความจริงแล้ววัสดุที่มีลักษณะดังกล่าวมีอยู่เพียงบางชนิดเท่านั้น แต่จะมีพฤติกรรมการไหลที่แตกต่างกัน ดังต่อไปนี้

ก) ของไหลแบบนิวโทเนียน (Newtonian fluids)

วัสดุที่มีพฤติกรรมเป็นไปตามที่นิวตันได้ตั้งสมมติฐานไว้นั้นเรียกว่า ของไหลแบบนิวโทเนียน ซึ่งจากรูปที่ 2.22(ก) จะเห็นว่าความสัมพันธ์ระหว่าง อัตราเฉือน (S) และความเค้นเฉือน (F') เป็นไปในลักษณะเส้นตรงที่มีความชันคงที่ ซึ่งแสดงให้เห็นว่า ค่าความหนืดของสาร อนุหนุมิหนึ่ง ๆ จะมีค่าคงที่เสมอเมื่อเปลี่ยนแปลงความเค้นเฉือน ดังแสดงรูปที่ 2.22(ข)



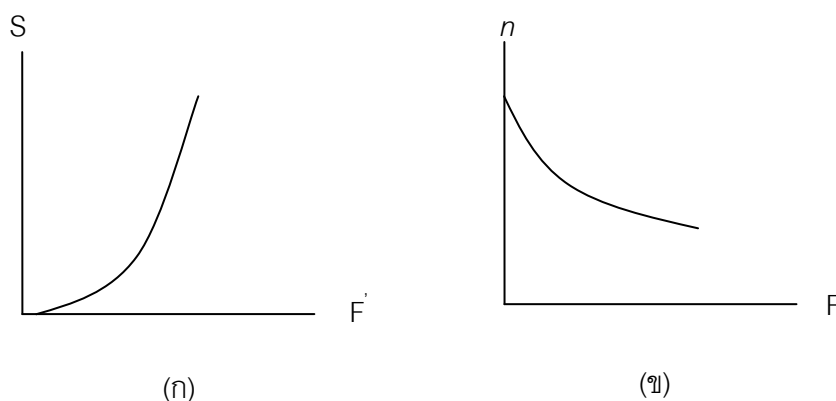
รูปที่ 2.22 กราฟแสดงพฤติกรรมของไหลแบบนิวโทเนียน

ตัวอย่างของสารที่จัดอยู่ในประเภทนี้ ได้แก่ น้ำ ตัวทำละลายที่มีขนาดโมเลกุลไม่ใหญ่มาก และของไหลมาตรฐานเป็นต้น

ข) ของไหลแบบนอนนิวโทเนียน (Non-Newtonian fluids)

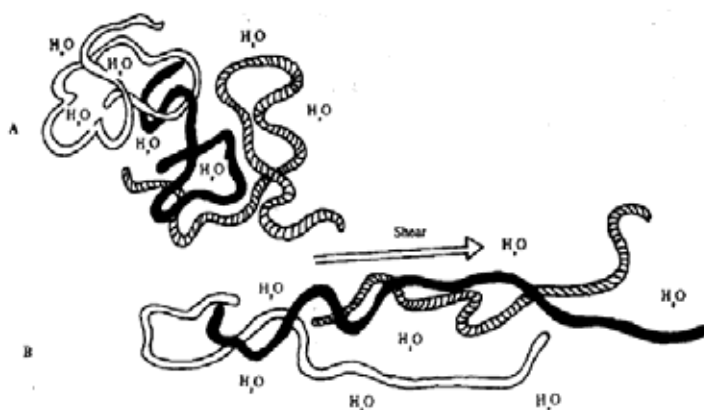
ความสัมพันธ์ระหว่าง F' และ S สำหรับของไหลประเภทนี้จะไม่เป็นค่าคงที่ คือ ถ้า S เปลี่ยน ค่า F' จะไม่เปลี่ยนในลักษณะที่เป็นสัดส่วนเดียวกัน ดังนั้นค่าความหนืดจึงเปลี่ยนเมื่อ S เปลี่ยนไป การวัดค่าความหนืดด้วยเครื่องคนละรูน หรือใช้ขนาดเข็ม ความเร็วต่างกัน จึงส่งผลให้ค่าที่วัดได้มีความแตกต่างออกไป ดังนั้นการวัดเพื่อให้ได้ค่าที่แน่นอนจึงต้องอาศัยการควบคุมภาวะตัวแปรต่าง ๆ อย่างระมัดระวัง โดยค่าที่วัดได้จะเรียกว่า ค่าความหนืดปรากฏ (Apparent viscosity) พฤติกรรมของไหลของของไหลแบบนอนนิวโทเนียนมีอยู่หลายประเภทซึ่งสามารถจำแนกได้ดังนี้

- พฤติกรรมเสมือนพลาสติก(Pseudoplastic behavior) เป็นพฤติกรรมส่วนใหญ่ของของเหลวประเภทนอนนิวโทเนียน ซึ่งพบได้บ่อยครั้งในน้ำสลิปเซรามิก บางครั้งเรียกว่า เชียร์ทินนิง (Shear thinning) เนื่องจากค่าความหนืดจะลดลงเมื่อเพิ่มอัตราเฉือนดังแสดงในรูปที่ 2.23(ก) และ (ข)



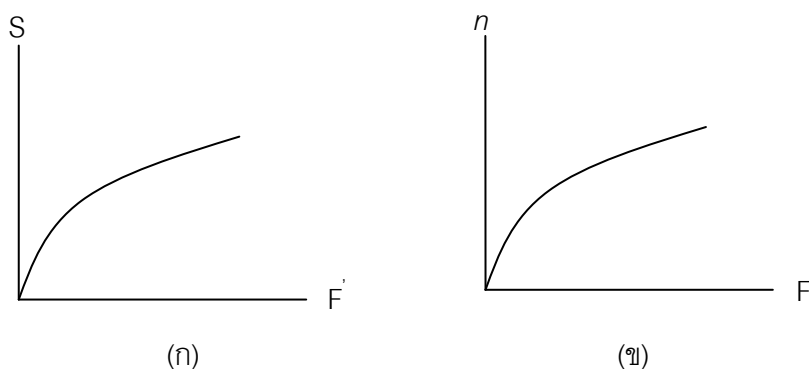
รูปที่ 2.23 พฤติกรรมการไหลของของไหลแบบนอนนิวโทเนียนชนิดเสมือนพลาสติก^[33]

พฤติกรรม Pseudoplastic flow มักพบในสารช่วยแขวนตะกอน (Suspending agent) ซึ่งเป็นสารกลุ่มพอลิเมอร์ทั้งที่ได้จากธรรมชาติเช่น Tragacanth และ Acacia และพอลิเมอร์สังเคราะห์เช่น Methylcellulose และ Sodium carboxymethylcellulose พอลิเมอร์เป็นสารที่มีโมเลกุลยาวจะพันกันคล้ายเส้นด้ายและจะกักน้ำไว้ระหว่างโมเลกุลของมัน เมื่อให้แรงน้อย ๆ พอลิเมอร์เหล่านี้จะมีการเรียงตัวใหม่ในทิศทางเดียวกับแรงที่ให้เข้าไป และจะเกิดการไหลถ้าให้แรงมาก ๆ ส่งผลให้ความหนืดลดลงตามไปด้วย สาเหตุที่ของไหลแสดงพฤติกรรมการไหลแบบนอนนิวโทเนียนชนิดเสมือนพลาสติกคือ โมเลกุลเรียงตัวเป็นระเบียบมากขึ้นในทิศทางของแรงที่ให้ ส่งผลให้แรงยึดระหว่างโมเลกุลและความต้านทานการไหลลดลง จึงทำให้โมเลกุลของน้ำถูกปลดปล่อยออกมาภายนอก เพราะการเรียงตัวตามทิศทางของการไหลไม่มีช่องว่างให้น้ำอยู่ ซึ่งน้ำที่ถูกปล่อยออกมาจะช่วยหล่อลื่นการไหลดังแสดงในรูปที่ 2.24

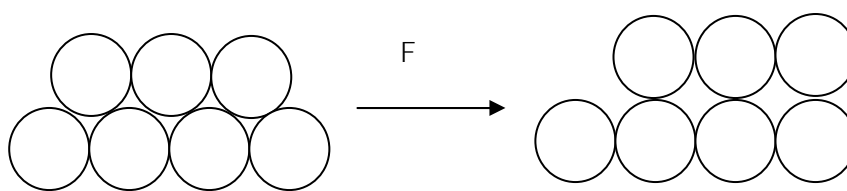


รูปที่ 2.24 ลักษณะโมเลกุลของของเหลวที่มีการไหลแบบ Pseudoplastic (บน) เมื่อไม่มีแรงกระทำและ (ล่าง) เมื่อถูกแรงกระทำให้ไหล^[35]

- พฤติกรรมไดลาแทนต์ (Dilatants behavior) เป็นพฤติกรรมซึ่งไม่เป็นที่พึงปรารถนาเนื่องจากเมื่ออัตราเฉือนมีค่าสูงขึ้น วัสดุจะเริ่มจับตัวแข็งขึ้น ทำให้เกิดการไหลที่ไม่สม่ำเสมอ ซึ่งถ้าเป็นวัสดุที่อยู่ในระหว่างกระบวนการรีดก็อาจทำให้หัวฉีดหรือแม่พิมพ์เกิดการระเบิดได้ พฤติกรรมไดลาแทนต์ หรือ เซียร์ทิกเคนนิง (Shear thickening) ดังรูปที่ 2.25 มักปรากฏในของเหลวที่มีส่วนผสมของอนุภาคของแข็งอยู่ในปริมาณสูง ๆ เช่น น้ำดินชั้น ของผสมระหว่างทรายกับน้ำ เป็นต้น ทั้งนี้เนื่องจากในสภาวะดังกล่าว อนุภาคจะมีการจัดเรียงตัวแบบชิดกันมากที่สุด การทำให้เกิดความเค้นเฉือนในแนวระดับนั้นเท่ากับเป็นการทำให้อนุภาคแถวบนเคลื่อนตัวไปอยู่เหนืออนุภาคที่เรียงอยู่แถวล่าง ดังรูปที่ 2.26 ซึ่งการเคลื่อนตัวเช่นนี้จะทำให้วัสดุมีความหนืดสูงมาก เนื่องจากขณะที่อนุภาคเคลื่อนตัวนั้นจะเกิดการชนกันของอนุภาคอื่น ๆ และเกิดการเปลี่ยนแปลงทั้งในแนวตั้งและแนวระดับ

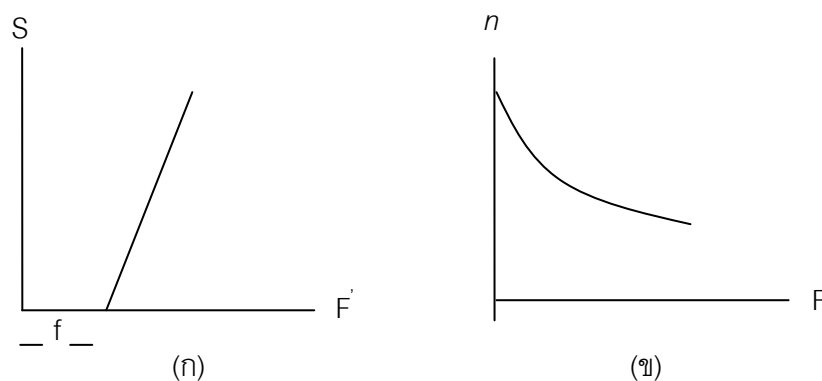


รูปที่ 2.25 พฤติกรรมการไหลของของไหลแบบนอนนิวโทเนียนชนิดไดลาแทนต์^[33]



รูปที่ 2.26 พฤติกรรมการเคลื่อนที่โมเลกุลสารแบบไดลาแทนต์^[33]

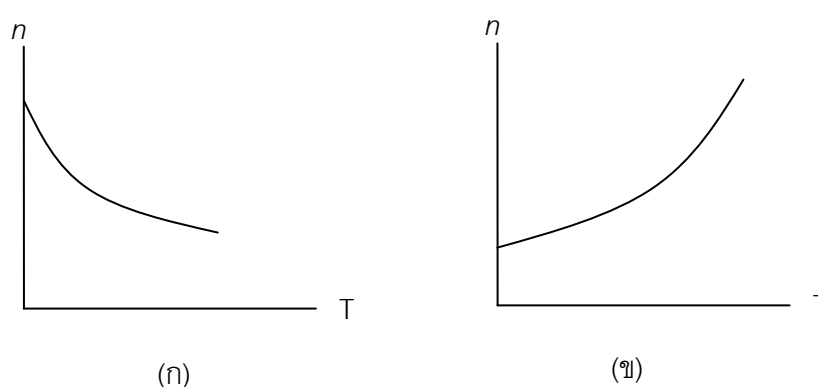
- พฤติกรรมพลาสติก (Plastic) ภายใต้ภาวะที่อยู่กับที่ของไหลชนิดนี้จะประพฤติตัวเสมือนเป็นของแข็ง จึงต้องอาศัยแรงจำนวนหนึ่งมากกระทำ เพื่อที่จะทำให้เกิดการไหล ดังรูปที่ 2.27 ตัวอย่างที่เห็นได้ชัดคือ กรณีของซอสมะเขือเทศ ซึ่งต้องทำการเขย่าขวดก่อนจึงจะสามารถเทออกจากขวดได้



รูปที่ 2.27 พฤติกรรมการไหลของของไหลแบบนอนนิวโทเนียนชนิดพลาสติก^[33]

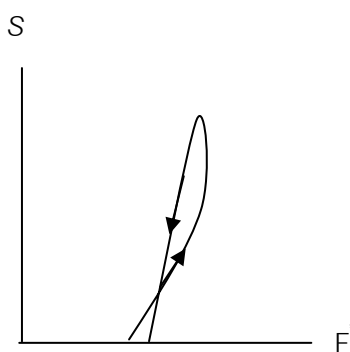
การไหลชนิดพลาสติกนี้อาจแสดงพฤติกรรมแบบนิวโทเนียนชนิดเสมือนพลาสติกหรือไดลาแทนต์อย่างใดอย่างหนึ่งก็ได้

จากที่กล่าวมาข้างต้น เป็นการพิจารณาผลของอัตราเฉือนที่มีต่อพฤติกรรมการไหลของไหลแบบนอนนิวโทเนียน แต่ถ้ามีการพิจารณาในเรื่องของระยะเวลาด้วยการแบ่งชนิดของของไหลแบบนอนนิวโทเนียนสามารถแบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ ทิกโซโทรปี (Thixotropy) และรีโอเพกซี (Rheopexy) โดยของไหลบางชนิดจะแสดงค่าความหนืดที่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลาภายใต้ภาวะที่มีค่าอัตราเฉือนคงที่ ซึ่งเป็นไปได้ 2 กรณีคือ ถ้าของไหลมีค่าความหนืดลดลงตามเวลา จะจัดอยู่ในประเภททิกโซโทรปิก (Thixotropic) ส่วนของไหลที่มีค่าความหนืดเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาจะเรียกว่าประเภทรีโอเพกติก (Rheoplectic) ดังรูปที่ 2.28



รูปที่ 2.28 พฤติกรรมการไหลของของไหลแบบนอนนิวโทเนียนชนิด (ก) ทิกโซโทรปิกและ (ข) รีโอเพกติก^[33]

ของไหลประเภทรีโอเพกติกมักจะพบไม่ได้บ่อยนัก ที่พบอยู่เป็นประจำมักอยู่ในประเภททิกโซโทรปิก อาทิเช่น จารบี หมึกพิมพ์ เป็นต้น อย่างไรก็ตามพฤติกรรมการไหลทั้งชนิดทิกโซโทรปิกและรีโอเพกติกอาจเกิดขึ้นพร้อม ๆ กับพฤติกรรมการไหลชนิดอื่น ๆ ที่ได้กล่าวมาข้างต้น หรืออาจเกิดขึ้นเฉพาะที่อัตราเฉือนค่าใดค่าหนึ่ง โดยของไหลบางชนิดอาจถึงค่าความหนืดสุดท้ายที่วัดได้ภายในเวลาเพียงไม่กี่วินาที ในขณะที่ตัวอื่น ๆ อาจต้องใช้เวลาหลายวัน ในกรณีที่ทำการศึกษาพฤติกรรมการไหลโดยเปลี่ยนแปลงค่าอัตราเฉือน ของไหลประเภททิกโซโทรปิกจะแสดงพฤติกรรมดังแสดงในรูปที่ 2.29 ซึ่งเป็นการพล็อตกราฟระหว่างอัตราเฉือนกับความเค้นเฉือนจากการเพิ่มค่าอัตราเฉือนไปจนถึงค่า ๆ หนึ่งแล้วลดลงมาจนถึงจุดเริ่มต้นอย่างรวดเร็ว จะเห็นว่าการพาขึ้นและขาลงจะทับกันไม่สนิท ซึ่งเป็นผลมาจากการลดลงของค่าความหนืดตามเวลาของการเฉือน โดยการเปลี่ยนแปลงค่าความหนืดนี้อาจจะเกิดขึ้นอย่างถาวรหรือไม่ก็ได้



รูปที่ 2.29 พฤติกรรมการไหลของของไหลแบบนอนนิวโทเนียนแบบทิกโซโทรปิกปัจจัยที่มีผลต่อพฤติกรรมไหล^[33]

ปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าความหนืด ได้แก่

2.8.1 อุณหภูมิ เป็นปัจจัยที่มีผลกระทบบอย่างเด่นชัดต่อพฤติกรรมไหลของวัสดุบางชนิดที่มีความไวต่ออุณหภูมิ การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเพียงเล็กน้อยก็สามารถทำให้ค่าความหนืดเปลี่ยนไปได้อย่างชัดเจน การศึกษาในแง่อิทธิพลของอุณหภูมิต่อวัสดุจึงมีประโยชน์มากสำหรับผลิตภัณฑ์ที่ต้องมีการใช้งาน หรือใช้กระบวนการผลิตที่เกี่ยวข้องกับอุณหภูมิ เช่น น้ำมันเครื่อง จารบี เป็นต้น

2.8.2 อัตราเฉือน ดังที่ได้กล่าวมาในเบื้องต้นแล้วว่า ของเหลวประเภทนอนนิวโทเนียน จะมีพฤติกรรมไหลที่เปลี่ยนไปตามอัตราเฉือน การศึกษาผลกระทบในเรื่องนี้

จึงเป็นสิ่งที่มีความสำคัญต่อกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์หลายชนิด เช่น สีทา เครื่องสำอางค์ กาว สีเคลือบ อาหาร เป็นต้น

2.8.3 ภาวะระหว่างการวัด การควบคุมภาวะของวัสดุที่จะทำการวัดเป็นสิ่งจำเป็นที่ต้องระมัดระวัง เนื่องจากสามารถส่งผลกระทบต่อค่าความหนืดได้ จึงต้องมีการจดบันทึกเทคนิคที่ใช้ในการวัดอย่างละเอียดด้วย เช่น รุ่นของเครื่อง ความเร็ว ขนาดเข็ม ขนาดภาชนะที่บรรจุสาร และเทคนิคที่ใช้ในการเตรียมตัวอย่าง เป็นต้น

2.8.4 เวลา เป็นปัจจัยที่มีผลกระทบต่อวัสดุประเภททิกโซโทรปิก และรีโอเพกติก แต่ก็ยังมีสารอื่น ๆ อีกหลายชนิดที่มีค่าความหนืดสามารถเปลี่ยนแปลงไปตามกาลเวลาได้ แม้จะไม่มีวุ้นเค้นมากระทำก็ตาม ซึ่งอาจเป็นผลมากจากการบ่มเก็บไว้นานหรือเป็นการวัดความหนืดของสารในขณะที่อยู่ระหว่างการดำเนินปฏิกิริยา เป็นต้น

2.8.5 ส่วนผสมและสารเติมแต่งเป็นปัจจัยหนึ่งที่มีผลกระทบต่อความหนืดเนื่องจากเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงส่วนผสมด้วยการเปลี่ยนสัดส่วนขององค์ประกอบหรือเติมสารใด ๆ ลงไปก็ย่อมทำให้ค่าความหนืดเปลี่ยนแปลงไปได้ เช่น การเติมตัวทำละลายลงในหมึกพิมพ์เพื่อลดความหนืด หรือการเติมสารควบคุมการไหลลงในสีทาบ้าน เป็นต้น

2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การเตรียมเส้นใยจากพอลิเมอร์ธรรมชาติด้วยกระบวนการอิเล็กโทรสปินนิงนั้นเป็นไปได้ยาก เนื่องจากพอลิเมอร์ธรรมชาติส่วนใหญ่ไม่สามารถละลายในตัวทำละลายอินทรีย์ทั่วไปได้ ซึ่งเป็นสาเหตุมาจากน้ำหนักโมเลกุลที่สูงมากของพอลิเมอร์ธรรมชาติ ส่งผลให้สารละลายที่ได้มักมีความหนืดและแรงตึงผิวสูง จึงยากต่อการเกิดเป็นเส้นใยที่ต่อเนื่องด้วยกระบวนการอิเล็กโทรสปินนิง แต่เนื่องจากข้อดีทางด้านชีวภาพของพอลิเมอร์ธรรมชาติ จึงมีงานวิจัยจำนวนมากยังคงพยายามศึกษาการเตรียมเส้นใยด้วยกระบวนการอิเล็กโทรสปินนิงจากพอลิเมอร์ธรรมชาติด้วยวิธีต่าง ๆ เพื่อลดข้อจำกัดของพอลิเมอร์ธรรมชาติ ดังงานวิจัยต่อไปนี้

Kriegel และคณะ, 2009^[8] ศึกษาการเตรียมเส้นใยอิเล็กโทรสปินนิงจากสารละลายโคโตซาน โดยพบว่า โคโตซานซึ่งเป็นสารประเภทพอลิแซ็กคาไรด์ที่ได้จากเปลือกกุ้งและปู ไม่สามารถเตรียมเป็นเส้นใยด้วยกระบวนการอิเล็กโทรสปินนิงจากสารละลายโคโตซานบริสุทธิ์ได้แม้จะมีการเติมสารลดแรงตึงผิวชนิดต่าง ๆ ได้แก่ Brij 35 (Nonionic surfactant) DTAB (Cationic surfactant) และ SDS (Anionic surfactant) ก็ตาม แต่จะสามารถเตรียมเส้นใยอิเล็กโทรสปินนิงจากโคโตซานได้ก็ต่อเมื่อมีการเติมพอลิเมอร์สังเคราะห์ที่ไม่มีประจุ เช่น พอลิเอทิลีนออกไซด์

(Polyethylene oxide; PEO) เพื่อปรับปรุงความสามารถในกระบวนการผลิตในขณะที่ยังคงความเข้ากันได้ทางชีวภาพไว้ได้เป็นอย่างดี

Shahidul และคณะ, 2010^[9] ศึกษาการเตรียมเส้นใยอิเล็กทรอนิกส์พ่นจากอัลจินตซึ่งเป็นสารพอลิแซ็กคาไรด์ที่ได้จากสาหร่ายสีน้ำตาล โดยพบว่า สามารถเตรียมเส้นใยอิเล็กทรอนิกส์พ่นจากอัลจินตได้ก็ต่อเมื่อมีการผสมพอลิเมอร์สังเคราะห์เช่น พอลิไวนิลแอลกอฮอล์และเมื่อสัดส่วนของอัลจินตในสารละลายเพิ่มขึ้นจะทำให้เส้นใยที่ได้มีขนาดเล็กลงด้วย

Boomin และคณะ, 2008^[10] ศึกษาการเตรียมเส้นใยอิเล็กทรอนิกส์พ่นจากไคติน โดยพบว่า ไคตินเป็นสารพอลิแซ็กคาไรด์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงมาก จึงไม่สามารถละลายในตัวทำละลายทั่วไปและเตรียมให้อยู่ในรูปเส้นใยอิเล็กทรอนิกส์พ่นได้ แต่จะสามารถเตรียมเป็นเส้นใยอิเล็กทรอนิกส์พ่นได้เมื่อทำการลดน้ำหนักโมเลกุลของไคตินลง 10 เท่า โดยการฉายรังสีแกมมาและใช้ 1,1,1,3,3,3-hexafluoro-2-propanol (HFIP) เป็นตัวทำละลายในการเตรียมเส้นใย

Theerathanagorn และคณะ, 2011^[11] ได้ศึกษาการเตรียมแผ่นเส้นใยอิเล็กทรอนิกส์พ่นจากพอลิแซ็กคาไรด์เจลที่สกัดได้จากเปลือกทุเรียนพบว่า สามารถเตรียมเส้นใยอิเล็กทรอนิกส์พ่นได้จากสารละลายผสมระหว่างพอลิแซ็กคาไรด์เจลและพอลิเอทิลีนออกไซด์ที่ความเข้มข้นร้อยละ 8 โดยน้ำหนัก ในอัตราส่วนของพอลิแซ็กคาไรด์เจลและพอลิเอทิลีนออกไซด์ที่แตกต่างกัน ได้แก่ 3:1 2:1 1:1 1:2 และ 1:3 และเมื่อสารละลายผสมมีอัตราส่วนของพอลิเอทิลีนออกไซด์สูงขึ้น เส้นใยผสมที่ได้จะมีขนาดที่ใหญ่และเรียบขึ้น แต่อย่างไรก็ตามพบว่า แผ่นเส้นใยผสมที่เตรียมได้นั้นจะเสียหายได้ง่ายเมื่อสัมผัสน้ำและความชื้น เนื่องจากความสามารถในการละลายน้ำได้ง่ายของพอลิแซ็กคาไรด์เจลและพอลิเอทิลีนออกไซด์ จึงมีแนวคิดที่จะใช้พอลิเมอร์สังเคราะห์ที่มีความต้านทานน้ำและความชื้นสูงขึ้นแต่ยังคงสมบัติในการละลายน้ำ เช่น พอลิไวนิลแอลกอฮอล์

Enlong และคณะ, 2008^[12] ศึกษาการเตรียมและเชื่อมขวางเส้นใยอิเล็กทรอนิกส์พ่นจากพอลิไวนิลแอลกอฮอล์เพื่อเพิ่มสมบัติในการต้านทานน้ำ โดยใช้กรดมาเลอิก เป็นสารเชื่อมขวางในอัตราส่วนระหว่างโมลของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์และกรดมาเลอิกที่แตกต่างกัน จากการทดลองพบว่า เส้นใยพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่มีความเข้มข้นร้อยละ 8 โดยน้ำหนัก และเชื่อมขวางด้วยกรดมาเลอิกในอัตราส่วนระหว่างพอลิไวนิลแอลกอฮอล์และกรดมาเลอิกเท่ากับ 20:1 มีประสิทธิภาพในการต้านทานน้ำสูงสุด เนื่องจากสารเชื่อมขวางสามารถเกิดโครงสร้างร่างแหกับสายโซ่ของพอลิเมอร์ได้ในปริมาณที่เหมาะสม

Lili Wu และคณะ, 2005^[13] ศึกษาการตรึงเอมไซม์เซลลูเลสในแผ่นเส้นใยอิเล็กทรอนิกส์พ่นที่เตรียมจากสารละลายผสมระหว่างเอมไซม์เซลลูเลสและพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ โดยเส้นใยที่ได้จะมีขนาดเฉลี่ยประมาณ 200 นาโนเมตร อย่างไรก็ตามพบว่า แผ่นเส้นใยที่เตรียมจากพอลิไวนิล

แอลกอฮอล์นั้นมีความต้านทานต่อน้ำค่อนข้างต่ำ ซึ่งทำให้ไม่เหมาะสมต่อการนำไปใช้งาน จึงทำการเชื่อมขวางแผ่นเส้นใยที่เตรียมได้ โดยการอบไอระเหยของสารละลายกอลลูตารัลดีไฮด์ที่ความเข้มข้นร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียสเป็นระยะเวลา 1 ชั่วโมง ซึ่งจากการทดลองพบว่า แผ่นเส้นใยสามารถตรึงเอมไซม์เซลลูเลสไว้ได้เป็นอย่างดี โดยพบว่า แผ่นเส้นใยอิเล็กโทรสปินที่ผ่านการใช้งานหกครั้งยังคงเหลือปริมาณเอมไซม์เซลลูเลสเปรียบเทียบกับปริมาณเริ่มต้นถึงร้อยละ 36

นอกจากนี้ Alexis และคณะ, 2007^[30] ได้ศึกษาหลักการเชื่อมขวางพอลิแซ็กคาไรด์สองชนิด ได้แก่ โซเดียมอัลจีเนต (Sodium alginate; SA) และพอลิกลาแลกตูโรนิกแอซิด (Polygalacturonic acid; PGA) เพื่อเพิ่มความสามารถในการต้านทานน้ำให้มากขึ้น โดยพบว่าเมื่อมีการใส่สารเชื่อมขวางที่สามารถแตกตัวให้อิออนประจุ 2+ เช่น CaCl_2 จะทำให้โมเลกุลของ Ca^{2+} แทรกเข้าไปอยู่ในสายโซ่โมเลกุลของพอลิเมอร์ทั้งสองชนิดและเกิดโครงร่าง 3 มิติในรูปแบบของ Egg-block model

จากงานวิจัยที่ได้กล่าวมาข้างต้นก่อให้เกิดแนวทางในการเตรียมเส้นใยอิเล็กโทรสปินจากพอลิเมอร์ธรรมชาติด้วยวิธีต่าง ๆ เช่น การเติมสารลดแรงตึงผิวลงในสารละลายพอลิเมอร์ การเตรียมเส้นใยจากพอลิเมอร์ที่มีการลดน้ำหนักโมเลกุลหรือความหนืด และการเตรียมเส้นใยจากสารละลายผสมระหว่างพอลิเมอร์ธรรมชาติและพอลิเมอร์สังเคราะห์ เพื่อเพิ่มความสามารถในการผลิต ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นที่จะศึกษาถึงภาวะในการเตรียมแผ่นเส้นใยอิเล็กโทรสปินจากพอลิแซ็กคาไรด์เจลที่สกัดได้จากเปลือกทุเรียนด้วยวิธีต่าง ๆ ดังที่กล่าวมาข้างต้น จากนั้นศึกษาการเชื่อมขวางแผ่นเส้นใยเพื่อป้องกันการเสียสภาพจากการสัมผัสน้ำหรือความชื้น พร้อมทั้งศึกษาสัณฐานวิทยาและประสิทธิภาพในการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรียของแผ่นเส้นใยผลที่ได้จากงานวิจัยนี้จะเป็นการพัฒนาผลิตภัณฑ์แผ่นปิดแผลจากพอลิแซ็กคาไรด์เจลที่สกัดได้จากเปลือกทุเรียนให้มีประสิทธิภาพมากขึ้นโดยการใช้นวัตกรรมใหม่ในกระบวนการผลิต

บทที่ 3

อุปกรณ์และวิธีดำเนินงานวิจัย

3.1 แผนการดำเนินงานวิจัย

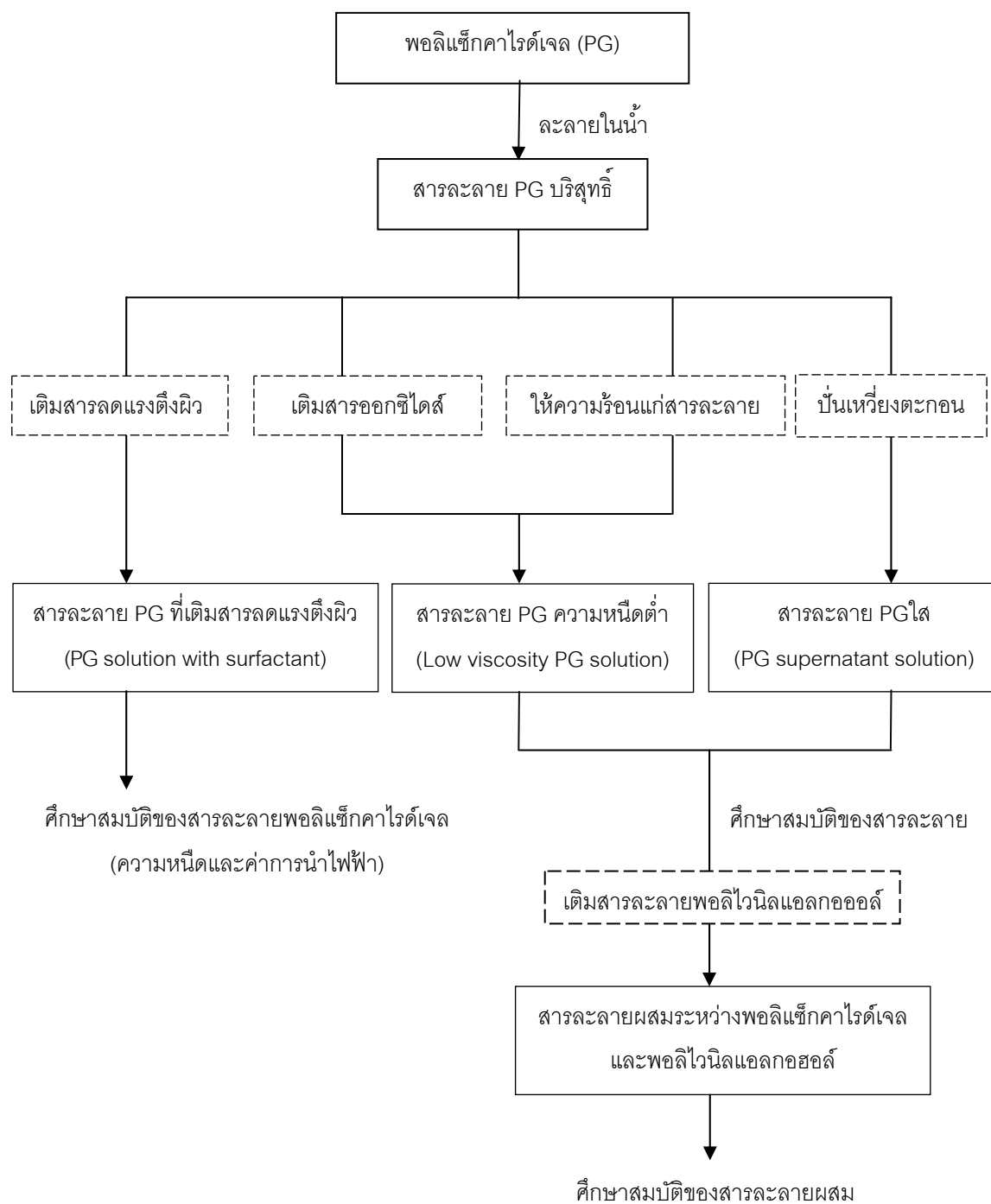
งานวิจัยนี้ประกอบด้วย 3 ส่วนหลักคือ การเตรียมแผ่นเส้นใยอิเล็กทรอนิกส์จากสารละลายพอลิแซ็กคาไรด์เจล และสารละลายผสมของพอลิแซ็กคาไรด์เจลและพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ ดังแสดงการเตรียมสารละลายและวิธีการปั่นเส้นใยในแผนผังรูปที่ 3.1 และ 3.2 ตามลำดับ การเชื่อมขวางแผ่นเส้นใยพอลิแซ็กคาไรด์เจล ดังแสดงในแผนผังรูปที่ 3.3 และการทดสอบประสิทธิภาพในการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรียของแผ่นเส้นใยพอลิแซ็กคาไรด์เจล โดยมีรายละเอียดในการเตรียมเส้นใยและการเชื่อมขวางเส้นใยที่แตกต่างกัน ดังนี้

3.1.1 การเตรียมแผ่นเส้นใยอิเล็กทรอนิกส์แบ่งออกเป็น 4 กลุ่ม ได้แก่

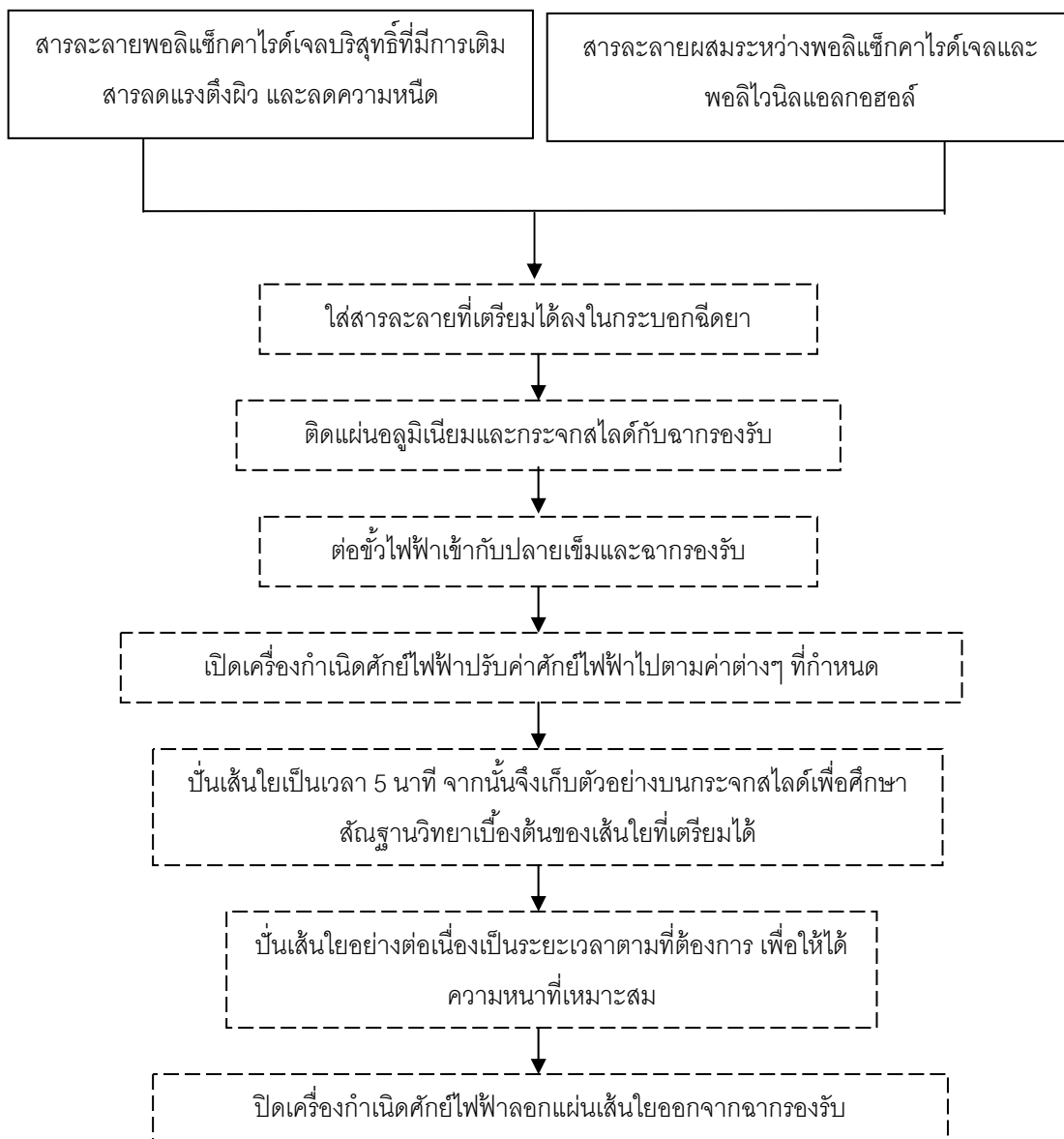
- 1) การเตรียมแผ่นเส้นใยอิเล็กทรอนิกส์จากสารละลายพอลิแซ็กคาไรด์เจลบริสุทธิ์
- 2) การเตรียมแผ่นเส้นใยอิเล็กทรอนิกส์จากสารละลายพอลิแซ็กคาไรด์เจลที่มีการเติมสารลดแรงตึงผิวชนิดต่าง ๆ
- 3) การเตรียมแผ่นเส้นใยอิเล็กทรอนิกส์จากสารละลายพอลิแซ็กคาไรด์เจลภายหลังการลดความหนืดของสารละลายด้วยปฏิกิริยาออกซิเดชัน และการให้ความร้อนแก่สารละลาย
- 4) การเตรียมแผ่นเส้นใยอิเล็กทรอนิกส์จากสารละลายผสมของพอลิแซ็กคาไรด์เจลและพอลิเมออร์สังเคราะห์

3.1.2 การเชื่อมขวางแผ่นเส้นใยแบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม ได้แก่

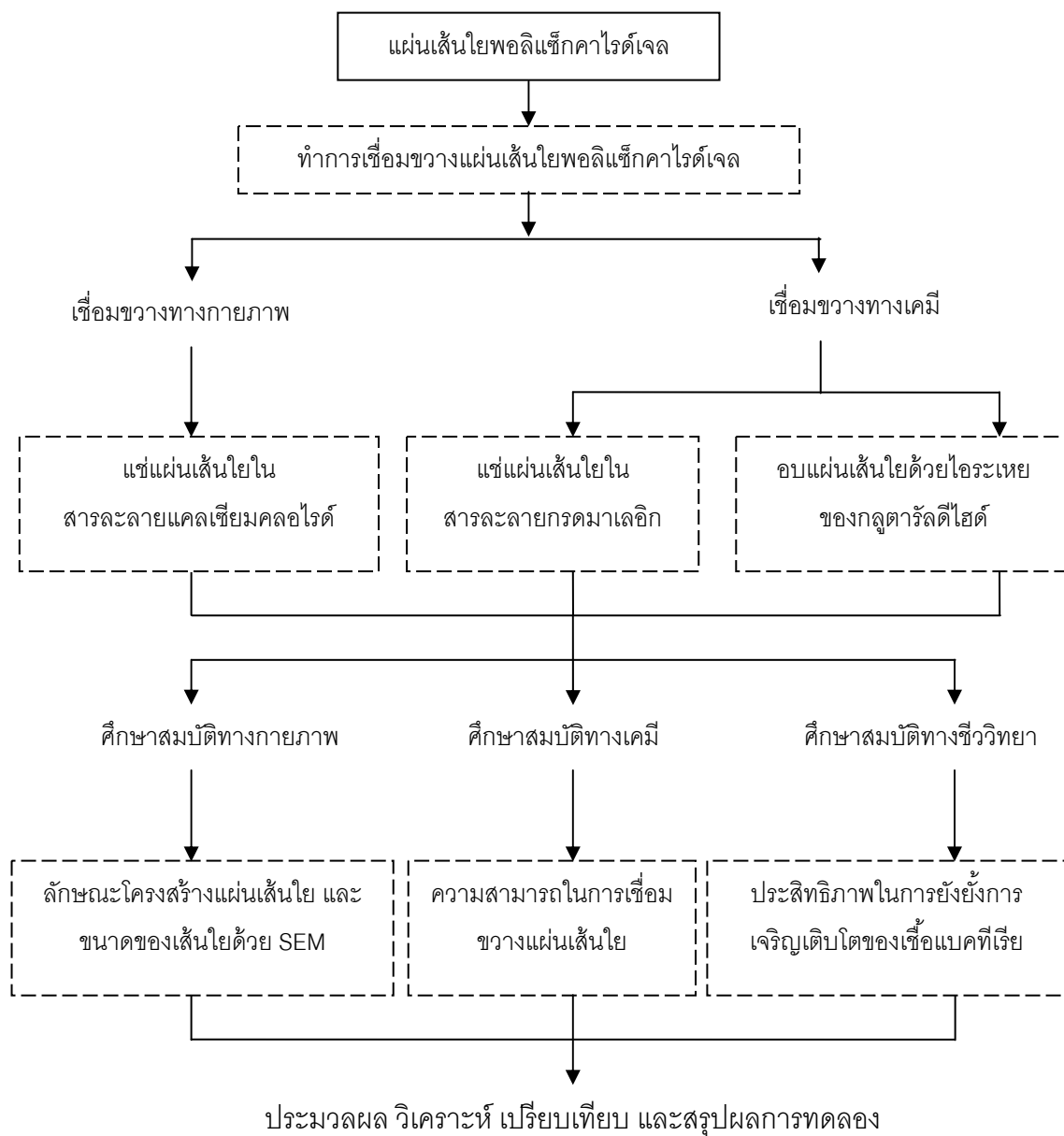
- 1) การเชื่อมขวางทางกายภาพ
 - การแลกเปลี่ยนประจุระหว่างพอลิแซ็กคาไรด์เจลและสารเชื่อมขวางแคลเซียมคลอไรด์ (CaCl_2)
- 2) การเชื่อมขวางทางเคมี
 - การเชื่อมขวางพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ด้วยการทำปฏิกิริยากับกรดมาเลอิก (Maleic acid; MA)
 - การเชื่อมขวางแผ่นเส้นใยด้วยการอบไอร่ะเหยของสารละลายกลูตารัลดีไฮด์ (Glutaraldehyde; GA)



รูปที่ 3.1 แผนผังการเตรียมและศึกษาสมบัติของสารละลายพอลิแซ็กคาไรด์เจลและสารละลายผสมของพอลิแซ็กคาไรด์เจลและพอลิไวนิลแอลกอฮอล์



รูปที่ 3.2 แผนผังการเตรียมเส้นใยพอลิเอทิลีนไกล์คอลในรูปแบบต่างๆ



รูปที่ 3.3 แผนผังการเชื่อมขวางและการศึกษาสมบัติของแผ่นเส้นใยพอลิเอทิลีนไครดเจล

3.2 วัสดุ สารเคมี และอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

3.2.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

- เครื่องจ่ายศักย์ไฟฟ้ากำลังสูง(High voltage power supply) บริษัท Gamma High Voltage รุ่น EM 30-P, SPECTRUM SPL-868
- เครื่องควบคุมอัตราการไหล (Syringe pump) บริษัท New Era Pump System รุ่น NE-300
- เตาให้ความร้อน และเครื่องกวนสารแบบแม่เหล็ก (Magnetic stirrer with heating) บริษัท SP Science Ltd., Part. รุ่น Yellow Mag HS10 (Ika)
- เครื่องปั่นเหวี่ยงตะกอน (Centrifuges) บริษัท Forma Scientific Inc. รุ่น Forma Centrifuge 5678#LV17795813
- เครื่องชั่ง 4 ตำแหน่ง (4-digit balance) บริษัท Mettler Toledo รุ่น AE260-S balance
- ตู้อบสูญญากาศ (Vacuum drying oven and pump)
- ขั้วแอโนดและขั้วแคโทด (Anode and Cathode)
- หลอดฉีดยาและเข็มฉีดยาเบอร์21 (Syringe and Spinneret) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.66 มิลลิเมตร
- แผ่นอะลูมิเนียม (Aluminum foil)
- ฉากรับเส้นใยที่หมุนได้
- ตะแกรงลวด
- เทอร์มอมิเตอร์ (Thermometer)

3.2.2 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

- พอลิแซ็กคาไรด์เจล (Polysaccharide gel; PG) จากเปลือกทุเรียนพันธุ์หมอนทองที่สกัดด้วยวิธีของ Pongsamart^[1] เมื่อเดือนมีนาคม 2554 (Lot#1) และเดือนเมษายน 2555 (Lot#2) ซึ่งได้รับความอนุเคราะห์จากภาควิชาชีวเคมี คณะเภสัชศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (Poly(vinyl alcohol); PVA, $(C_2H_4O)_n$) น้ำหนักโมเลกุลเท่ากับ 124,000 ถึง 186,000 ระดับการไฮโดรไลซิสเท่ากับร้อยละ 87 ถึง 89 เกรดสำหรับใช้วิเคราะห์ บริษัท Sigma-Aldrich, สหรัฐอเมริกา

- สารลดแรงตึงผิวที่ไม่มีประจุ TWEEN 20 (Nonionic surfactant) (#P1254) บริษัท Sigma-Aldrich, สหรัฐอเมริกา
- สารลดแรงตึงผิวที่มีประจุบวก DTAB (Cationic surfactant) (CAS #1119944) บริษัท Acros Organics, อินเดีย
- สารลดแรงตึงผิวที่มีประจุลบ SDS (Anionic surfactant) (#71729) บริษัท FlukaChemika, สมาพันธรัฐสวิสเซอร์แลนด์
- สารลดแรงตึงผิวที่มีทั้งประจุลบและบวก AMPHOLAX 7TX (Amphoteric surfactant) บริษัท Fluka Chemika, สมาพันธรัฐสวิสเซอร์แลนด์
- สารออกซิไดส์ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (Hydrogen peroxide) บริษัท Sigma-Aldrich, สหรัฐอเมริกา
- กรดมาเลอิก (Maleic acid, $C_4H_4O_4$) เกรดสำหรับใช้วิเคราะห์ บริษัท FlukaChemika, สมาพันธรัฐสวิสเซอร์แลนด์
- แคลเซียมคลอไรด์ (Calcium chloride, $CaCl_2$) เกรดสำหรับใช้วิเคราะห์ บริษัท Carlo Erba Reagent, ฝรั่งเศส
- เอทานอล (Ethanol, C_2H_5OH) เกรดสำหรับใช้วิเคราะห์ บริษัท Merck Kgaa, สหรัฐอเมริกา
- สารละลายกลูตารัลดีไฮด์ที่ความเข้มข้นร้อยละ 25 โดยน้ำหนัก (Glutaraldehyde 25% aqueous solution, $C_5H_8O_2$) น้ำหนักโมเลกุลเท่ากับ 100.12 เกรดสำหรับใช้วิเคราะห์ บริษัท LobaChemie, อินเดีย
- น้ำกลั่น (Distilled water)

3.2.3 เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์ทดสอบ

- เครื่องวัดค่าความหนืด (Viscometer) บริษัท Brookfield รุ่น RVT II
- เครื่องวัดค่าการนำไฟฟ้า (Conductivity meter) บริษัท Mettler Toledo รุ่น LC116
- เครื่องวัดความเป็นกรดด่าง (pH meter) บริษัท Hanna รุ่น 98130
- กล้องจุลทรรศน์ (Optical Microscope: OM) บริษัท Optika รุ่น B-193
- กล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope: SEM) บริษัท Phillip รุ่น XL 30 CP

3.2.4 เชื้อจุลินทรีย์ที่ใช้ทดสอบสมบัติการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรีย

- แบคทีเรียแกรมบวกชนิด *Staphylococcus aureus* (*S. aureus*)
- แบคทีเรียแกรมลบชนิด *Escherichia coli* (*E. coli*)

3.3 วิธีการทดลอง

3.3.1 การเตรียมแผ่นเส้นใยอิเล็กทรอนิกส์โทรสปินพอลิแซ็กคาไรด์เจลจากเปลือกทุเรียนโดยกระบวนการอิเล็กทรอนิกส์โทรสปินด้วยวิธีที่แตกต่างกัน 4 วิธี ดังนี้

3.3.1.1 การเตรียมแผ่นเส้นใยอิเล็กทรอนิกส์โทรสปินจากสารละลายพอลิแซ็กคาไรด์เจลบริสุทธิ์ ซึ่งมีขั้นตอนดังนี้

1) เตรียมสารละลาย

เตรียมสารละลายพอลิแซ็กคาไรด์เจลที่ความเข้มข้นร้อยละ 2 3 4 6 และ 8 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง โดยใช้น้ำกลั่นเป็นตัวทำละลาย

2) ศึกษาสมบัติของสารละลาย

นำสารละลายพอลิแซ็กคาไรด์เจลที่ความเข้มข้นต่าง ๆ ที่เตรียมได้มาทำการวัดค่าความหนืดด้วยเครื่องวัดค่าความหนืด โดยใช้เข็มหมายเลข 18 และความเร็วยอบในการวัดความหนืดของสารละลายเท่ากับ 5 รอบต่อนาที และวัดค่าการนำไฟฟ้าของสารละลายด้วยเครื่องวัดค่าการนำไฟฟ้า

3) ศึกษาภาวะที่เหมาะสมของกระบวนการอิเล็กทรอนิกส์โทรสปินต่อการเตรียมเส้นใยพอลิแซ็กคาไรด์เจล

นำสารละลายพอลิแซ็กคาไรด์เจลที่เตรียมได้ปริมาตร 2 มิลลิลิตร บรรจุลงในหลอดบรรจุสารละลายขนาด 3 มิลลิลิตร และติดเข็มปลายตัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.66 มิลลิเมตร (NO. 21) บริเวณปลายหลอดบรรจุสารละลาย โดยมีการควบคุมอัตราการไหลของสารละลายที่ 0.2 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง ด้วยเครื่องควบคุมอัตราการไหลที่ต่ออยู่กับหลอดบรรจุสารละลาย จากนั้นต่อปลายเข็มเข้ากับเครื่องกำเนิดศักย์ไฟฟ้ากำลังสูง และต่อสายดินเข้ากับแผ่นอะลูมิเนียมที่ใช้เป็นฉากรองรับ โดยให้ปลายเข็มห่างจากฉากรองรับเป็นระยะทาง 20 เซนติเมตร จากนั้นจึงให้ความต่างศักย์ไฟฟ้าแก่สารละลายโดยปรับให้มีความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ต่างกันคือ 15 20 และ 25 กิโลโวลต์ เพื่อศึกษาอิทธิพลของความต่างศักย์ทางไฟฟ้าที่ให้แก่สารละลายพอลิแซ็กคาไรด์เจลที่มีต่อลักษณะและขนาดของเส้นใยที่เตรียมได้ ซึ่งค่าที่เหมาะสมจะสามารถสังเกตได้จากลักษณะของลำพอลิเมอร์เหลวที่ออกจากปลายเข็ม โดยเมื่อมีการให้ศักย์ไฟฟ้าที่เหมาะสมจะเกิดเป็นลำเส้นใยพุ่งออกมาอย่างต่อเนื่อง จากนั้นจึงเกิดการยึดตัวและเกิดการระเหย

ของตัวทำละลาย ทำให้ลําของสารละลายพอลิเมอร์แข็งตัวกลายเป็นเส้นใยสะสมอยู่บนฉากรองรับ จากนั้นจึงทำการปั่นเส้นใยจนได้ความหนาที่เหมาะสมแก่การใช้งาน

3.3.1.2 การเตรียมแผ่นเส้นใยอิเล็กโทรสปินจากสารละลายพอลิแซ็กคาไรด์เจลบริสุทธิ์ที่มีการเติมสารลดแรงตึงผิวชนิดต่าง ๆ ซึ่งมีขั้นตอนดังนี้

1) เตรียมสารละลาย

เตรียมสารละลายพอลิแซ็กคาไรด์เจลที่ความเข้มข้นร้อยละ 4 และ 6 โดยน้ำหนัก ต่อปริมาตร ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง โดยใช้ น้ำกลั่นเป็นตัวทำละลาย จากนั้นเติม สารลดแรงตึงผิวชนิดต่าง ๆ เช่น TWEEN 20 (Nonionic surfactant) DTAB (Cationic surfactant) SDS (Anionic surfactant) และ AMPHOLAX 7TX (Amphoteric surfactant) ในปริมาณที่ มากกว่าค่า Critical micelle concentration (CMC) ของสารลดแรงตึงผิวเพียงเล็กน้อยลงใน สารละลายพอลิแซ็กคาไรด์เจลในแต่ละความเข้มข้น เพื่อศึกษาผลของสารลดแรงตึงผิว แต่ละชนิดต่อความสามารถในการเตรียมเส้นใยอิเล็กโทรสปินจากพอลิแซ็กคาไรด์เจล (ค่า CMC ของ TWEEN 20 DTAB AMPHOLAX 7TX และ SDS เท่ากับ 8.04×10^{-5} 1.8×10^{-4} 6.89×10^{-5} และ 8.2×10^{-3} โมลาร์ ตามลำดับ)

2) ศึกษาสมบัติของสารละลาย

นำสารละลายพอลิแซ็กคาไรด์เจลที่มีการเติมสารลดแรงตึงผิวแต่ละชนิด มาทำการวัดค่าความหนืดและค่าการนำไฟฟ้า

3) ศึกษาภาวะที่เหมาะสมของกระบวนการอิเล็กโทรสปินนิงต่อการเตรียมเส้นใย พอลิแซ็กคาไรด์เจล ตามขั้นตอน 3.3.1.1.3

3.3.1.3 การเตรียมแผ่นเส้นใยอิเล็กโทรสปินจากสารละลายพอลิแซ็กคาไรด์เจลบริสุทธิ์ ภายหลังทำการลดความหนืดของสารละลาย

ในการทดลองนี้ได้ทำการลดความหนืดของสารละลายพอลิแซ็กคาไรด์เจลบริสุทธิ์ ด้วยวิธีที่แตกต่างกัน 2 วิธี คือ การลดความหนืดด้วยปฏิกิริยาออกซิเดชัน และการลดความหนืด โดยการให้ความร้อนแก่สารละลายดังนี้

3.3.1.3.1 การเตรียมแผ่นเส้นใยอิเล็กโทรสปินจากสารละลายพอลิแซ็กคาไรด์เจล บริสุทธิ์ภายหลังทำการลดความหนืดของสารละลายด้วยปฏิกิริยาออกซิเดชัน ซึ่งมีขั้นตอน ดังต่อไปนี้

1) เตรียมสารละลาย

เตรียมสารละลายพอลิแซ็กคาไรด์เจลที่ความเข้มข้นร้อยละ 4 และ 6 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร โดยใช้ น้ำกลั่นเป็นตัวทำละลาย จากนั้นเติมสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) ซึ่งเป็นสารออกซิไดส์ที่ความเข้มข้นร้อยละ 0.2 0.4 0.6 2 4 และ 6 โดยปริมาตร ลงในสารละลายพอลิแซ็กคาไรด์เจลแต่ละความเข้มข้น เพื่อศึกษาอิทธิพลของความเข้มข้นสารออกซิไดส์และสารละลายพอลิแซ็กคาไรด์เจลต่อลักษณะและขนาดของเส้นใยเตรียมได้จากกระบวนการอิเล็กโทรสปินนิง

2) เร่งอัตราการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน

นำสารละลายที่เตรียมได้มาทำการลดความหนืด โดยแบ่งการทดลองเป็น 2 ชุด ตามการเร่งอัตราการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน คือ การเร่งปฏิกิริยาโดยการฉายรังสีไมโครเวฟที่กำลัง 800 วัตต์ เป็นเวลา 2 นาที และการเร่งปฏิกิริยาโดยการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 15 และ 30 นาที

3) ศึกษาสมบัติของสารละลายโดยการสังเกต วัดค่าความหนืด และค่าการนำไฟฟ้าของสารละลายพอลิแซ็กคาไรด์เจลที่มีความหนืดลดลง

4) ศึกษาภาวะที่เหมาะสมของกระบวนการอิเล็กโทรสปินนิงต่อการเตรียมเส้นใยพอลิแซ็กคาไรด์เจล ตามขั้นตอน 3.3.1.1.3

หมายเหตุ: การทดลองที่ 3.3.1.1 3.3.1.2 และ 3.3.1.3.1 ได้ใช้สารสกัดพอลิแซ็กคาไรด์เจลที่สกัดเดือนมีนาคม 2554 (LOT#1)

3.3.1.3.2 การเตรียมแผ่นเส้นใยอิเล็กโทรสปินจากสารละลายพอลิแซ็กคาไรด์เจลบริสุทธิ์ภายหลังจากการลดความหนืดของสารละลายโดยการให้ความร้อนแก่สารละลาย ซึ่งมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

1) เตรียมสารละลาย

เตรียมสารละลายพอลิแซ็กคาไรด์เจลที่ความเข้มข้นร้อยละ 2 3 4 5 และ 6 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร (%w/v) โดยใช้ น้ำกลั่นเป็นตัวทำละลาย และให้ความร้อนแก่สารละลายในแต่ละความเข้มข้นที่อุณหภูมิและเวลาต่างกันคือ ละลายสารละลายพอลิแซ็กคาไรด์เจลโดยไม่มี การให้ความร้อนที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง และให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส เป็นเวลานาน 2 4 และ 6 ชั่วโมง

2) ศึกษาสมบัติของสารละลาย

นำสารละลายพอลิแซ็กคาไรด์เจลาภายหลังจากการให้ความร้อนมาตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นทำการวัดค่าความหนืดของสารละลายที่ตั้งทิ้งไว้เป็นเวลา 2 4 และ 24 ชั่วโมง เพื่อศึกษาอิทธิพลของความร้อนและระยะเวลาที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงความหนืดของสารละลาย ซึ่งส่งผลกระทบต่อกระบวนการอิเล็กโทรสปินนิ่งที่ต้องใช้เวลานานในการปั่นเส้นใย

3) ศึกษาภาวะที่เหมาะสมของกระบวนการอิเล็กโทรสปินนิ่งต่อการเตรียมเส้นใยพอลิแซ็กคาไรด์เจลา ตามขั้นตอน 3.3.1.1.3

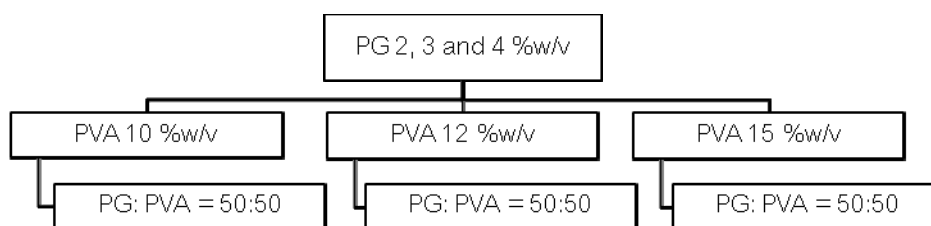
3.3.1.4 การเตรียมแผ่นเส้นใยอิเล็กโทรสปินจากสารละลายผสมระหว่างพอลิแซ็กคาไรด์เจลาและพอลิไวนิลแอลกอฮอล์

ในการทดลองนี้เป็นการเตรียมเส้นใยจากสารละลายผสมระหว่างพอลิแซ็กคาไรด์เจลาและพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ โดยมีการใช้สารละลายพอลิแซ็กคาไรด์เจลาที่ถูกเตรียมด้วยวิธีที่แตกต่างกัน 2 แบบ คือสารละลายพอลิแซ็กคาไรด์เจลาภายหลังการลดความหนืดด้วยความร้อนและสารละลายพอลิแซ็กคาไรด์เจลาภายหลังการปั่นเหวี่ยงตะกอน ดังนี้

3.3.1.4.1 การเตรียมเส้นใยจากสารละลายผสมระหว่างพอลิแซ็กคาไรด์เจลาภายหลังการลดความหนืดด้วยความร้อนและพอลิไวนิลแอลกอฮอล์

1) เตรียมสารละลาย

เตรียมสารละลายพอลิแซ็กคาไรด์เจลาที่ความเข้มข้นร้อยละ 2 3 และ 4 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร โดยใช้ น้ำกลั่นเป็นตัวทำละลาย และมีการให้ความร้อนแก่สารละลายที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง และสารละลายพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่ความเข้มข้นร้อยละ 10 12 และ 15 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร โดยใช้ น้ำกลั่นเป็นตัวทำละลายและมีการให้ความร้อนแก่สารละลายที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จากนั้นนำสารละลายพอลิเมอร์ทั้งสองชนิดที่ความเข้มข้นต่าง ๆ มาผสมกันในอัตราส่วนโดยปริมาตรของพอลิแซ็กคาไรด์เจลาและพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (PG:PVA volume ratio) ที่ 50:50 ดังรูปที่ 3.4 เพื่อศึกษาอิทธิพลของความเข้มข้นของพอลิเมอร์ที่มีต่อลักษณะและขนาดของเส้นใยที่เตรียมได้ โดยทำการปั่นกวนสารละลายผสมที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 2 ชั่วโมงจนได้เป็นเนื้อเดียวกัน



รูปที่ 3.4 แผนภาพการเตรียมสารละลายผสมระหว่างพอลิแซ็กคาไรด์เจลด (PG) และพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (PVA) ที่ความเข้มข้นของพอลิเมอร์ทั้งสองที่แตกต่างกันโดยกำหนดให้อัตราส่วนระหว่างพอลิแซ็กคาไรด์เจลดและพอลิไวนิลแอลกอฮอล์เท่ากับ 50:50

2) ศึกษาสมบัติของสารละลายผสม

3) ศึกษาภาวะที่เหมาะสมของกระบวนการอิเล็กโทรสปินนิงต่อการเตรียมเส้นใยพอลิแซ็กคาไรด์เจลด

นำสารละลายพอลิแซ็กคาไรด์เจลดที่เตรียมได้ปริมาตร 2 มิลลิลิตร บรรจุลงในหลอดบรรจุสารละลายขนาด 3 มิลลิลิตร ที่มีการติดเข็มปลายตัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.66 มิลลิเมตร (NO. 21) และมีการควบคุมอัตราการไหลที่ 0.2 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง ด้วยเครื่องควบคุมอัตราการไหลที่ต่ออยู่กับหลอดบรรจุสารละลาย จากนั้นต่อปลายเข็มเข้ากับเครื่องกำเนิดศักย์ไฟฟ้ากำลังสูง และต่อสายดินเข้ากับกับฉากหมุนที่ใช้เป็นฉากรองรับ โดยให้ปลายเข็มห่างจากฉากรองรับเป็นระยะทาง 20 เซนติเมตร จากนั้นจึงให้ความต่างศักย์ไฟฟ้าแก่สารละลายที่ 15 kV

3.3.1.4.2 การเตรียมแผ่นเส้นใยจากสารละลายผสมระหว่างพอลิแซ็กคาไรด์เจลดภายหลังการปั่นเหวี่ยงตะกอนและพอลิไวนิลแอลกอฮอล์

1) เตรียมสารละลายพอลิแซ็กคาไรด์เจลด

เตรียมสารละลายพอลิแซ็กคาไรด์เจลดร้อยละ 2 3 4 5 และ 6 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร (%w/v) โดยใช้น้ำกลั่นเป็นตัวทำละลาย และมีการให้ความร้อนแก่สารละลายที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง จากนั้นนำสารละลายพอลิแซ็กคาไรด์เจลดที่เตรียมได้มาทำการปั่นเหวี่ยงตะกอนด้วยเครื่องปั่นเหวี่ยงตะกอน (Centrifuge) ที่ความเร็วรอบ 4400 รอบต่อนาที เป็นระยะเวลา 60 นาที เพื่อแยกตะกอนพอลิแซ็กคาไรด์เจลดส่วนที่ไม่สามารถละลายน้ำได้ออก จากนั้นจึงดูสารละลายพอลิแซ็กคาไรด์เจลดที่แยกชั้นอยู่ด้านบน (Supernatant PG solution) มาทำการวัดค่าความหนืดค่าการนำไฟฟ้าของสารละลาย และค่าความเป็นกรดต่าง (pH) ของสารละลาย

2) ศึกษาความเข้มข้นของสารละลายพอลิแซ็กคาไรด์เจลที่เปลี่ยนแปลงไป ภายหลังการปั่นเหวี่ยงแยกตะกอน

ดูดสารละลายพอลิแซ็กคาไรด์เจลที่แยกชั้นอยู่ด้านบนภายหลังจากการปั่นเหวี่ยงตะกอนปริมาตร 1 มิลลิลิตร ใส่ลงในหลอดไมโครเซนตริฟิวจ์ (Microcentrifuge tube) ที่ทราบน้ำหนักที่แน่นอน จากนั้นจึงอบหลอดไมโครเซนตริฟิวจ์ที่มีสารละลายพอลิแซ็กคาไรด์เจลบรรจุอยู่ปริมาตร 1 มิลลิลิตร ในตู้อบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง ซึ่งน้ำหนักหลอดหลังอบเทียบกับน้ำหนักหลอดเปล่าเพื่อหาน้ำหนักของพอลิแซ็กคาไรด์เจลที่อยู่ในสารละลายปริมาตร 1 มิลลิลิตร โดยทำการทดลองจำนวน 3 ครั้ง แล้วคำนวณหาค่าความเข้มข้นในหน่วยร้อยละโดยน้ำหนักต่อปริมาตร (%w/v) ตามสมการดังต่อไปนี้

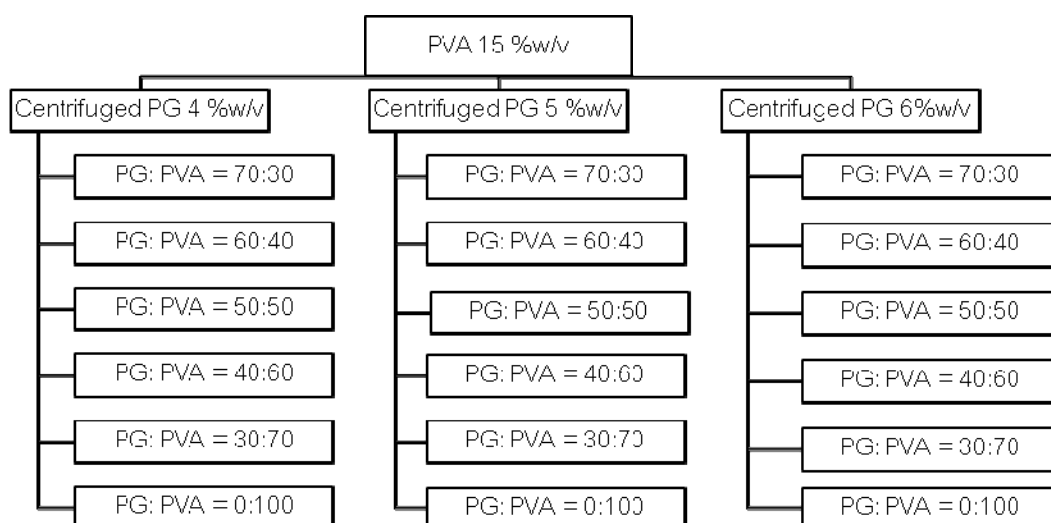
$$\text{ความเข้มข้นของ PG ภายหลังเหวี่ยงตะกอน (\%w/v)} = \frac{A-B}{A} \times 100$$

โดยที่ A คือ น้ำหนักรวมหลังอบของหลอดและตะกอนพอลิแซ็กคาไรด์เจลแห้งที่ได้จากสารละลายพอลิแซ็กคาไรด์เจล 1 มิลลิลิตร (กรัม)

B คือ น้ำหนักหลอดไมโครเซนตริฟิวจ์เปล่า (กรัม)

3) เตรียมสารละลายผสมระหว่างพอลิแซ็กคาไรด์เจลภายหลังการปั่นเหวี่ยงตะกอนและพอลิไวนิลแอลกอฮอล์

นำสารละลายพอลิแซ็กคาไรด์เจลที่ความเข้มข้นร้อยละ 4 5 และ 6 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ภายหลังการปั่นเหวี่ยงตะกอนมาผสมกับสารละลายพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่ความเข้มข้นร้อยละ 15 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ที่เตรียมโดยใช้น้ำกลั่นเป็นตัวทำละลายและมีการให้ความร้อนแก่สารละลายที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมงโดยผสมสารละลายพอลิเมอร์ทั้งสองชนิดในอัตราส่วนโดยปริมาตรของพอลิแซ็กคาไรด์เจลและพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (PG:PVA) ที่แตกต่างกัน ได้แก่ 70:30 60:40 50:50 40:60 30:70 และ 0:100 ดังแสดงในรูปที่ 3.5 แล้วทำการปั่นกวนที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 2 ชั่วโมงจนได้เป็นเนื้อเดียวกัน



รูปที่ 3.5 แผนภาพการเตรียมสารละลายผสมระหว่างพอลิแซ็กคาไรด์เจลา (PG) และพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (PVA) ในความเข้มข้นและอัตราส่วนที่แตกต่างกัน

4) ศึกษาสมบัติของสารละลายผสม

5) ศึกษาภาวะที่เหมาะสมของกระบวนการอิเล็กโทรสปินนิงต่อการเตรียมเส้นใยพอลิแซ็กคาไรด์เจลาตามขั้นตอน 3.3.1.1.3

หมายเหตุ: การทดลองที่ 3.3.1.3.2 และ 3.3.1.4 ได้ใช้สารสกัดพอลิแซ็กคาไรด์เจลาที่สกัดเดือนเมษายน 2555 (LOT#2)

3.3.2 การเชื่อมขวางแผ่นเส้นใยพอลิแซ็กคาไรด์เจลา

นำแผ่นเส้นใยพอลิแซ็กคาไรด์เจลาที่เตรียมได้ตามขั้นตอน 3.3.1 ขนาด 2.5× 2.5 ตารางเซนติเมตร มาทำการเชื่อมขวางด้วยวิธีทางกายภาพและทางเคมี ดังนี้

3.3.2.1 การเชื่อมขวางทางกายภาพ

ก. การเชื่อมขวางด้วยการแลกเปลี่ยนประจุระหว่างพอลิแซ็กคาไรด์เจลาและสารเชื่อมขวางแคลเซียมคลอไรด์ (CaCl₂)

นำแผ่นเส้นใยอิเล็กโทรสปินนิงที่เตรียมได้ตามขั้นตอน 3.3.1 แผลงในสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ที่มีความเข้มข้น ตัวทำละลายและระยะเวลาที่ต่างกัน ดังตารางที่ 3.1 จากนั้นทำการตรวจสอบการเชื่อมขวางของเส้นใย โดยนำแผ่นเส้นใยอิเล็กโทรสปินนิงที่ผ่านการเชื่อมขวางด้วยแคลเซียมคลอไรด์แล้วแช่ลงในน้ำกลั่นปริมาตร 20 มิลลิลิตร เป็นเวลา 2 ชั่วโมง สังเกตและบันทึก

เวลาในการละลายของแผ่นเส้นใย พร้อมทั้งศึกษาพื้นฐานวิทยาเบื้องต้นของแผ่นเส้นใยภายหลังการเชื่อมขวางด้วยกล้องจุลทรรศน์

ตารางที่ 3.1 สภาวะการเชื่อมขวางแผ่นเส้นใยพอลิแซ็กคาไรด์เจลด้วยสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ที่ความเข้มข้นของแคลเซียมคลอไรด์และสัดส่วนของตัวทำละลายผสมต่าง ๆ

ตัวอย่าง	สภาวะการเชื่อมขวาง		ระยะเวลาการเชื่อมขวาง
	สารเชื่อมขวาง	ตัวทำละลาย	
1	CaCl ₂ 5 %w/v	H ₂ O	10 วินาที 0.5 1 2 และ 4 ชั่วโมง
2		ethanol:H ₂ O (1:5)	
3		ethanol:H ₂ O (1:1)	
4		ethanol:H ₂ O (5:1)	
5	CaCl ₂ 10 %w/v	H ₂ O	
6		ethanol:H ₂ O (1:5)	
7		ethanol:H ₂ O (1:1)	
8		ethanol:H ₂ O (5:1)	

3.3.2.2 การเชื่อมขวางทางเคมี

ก. การเชื่อมขวางพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ด้วยการทำปฏิกิริยากับกรดมาเลอิก

(Maleicanhydride; MA)

นำแผ่นเส้นใยอิเล็กโทรสปินที่เตรียมได้ตามขั้นตอน 3.3.1 แช่ลงในสารละลายกรดมาเลอิกที่ความเข้มข้นร้อยละ 1.25 โดยน้ำหนัก ในตัวทำละลายผสมระหว่างเอทานอลร้อยละ 90 และน้ำกลั่นร้อยละ 10 โดยปริมาตร ที่มีการเติมกรดไฮโดรคลอริก ในการเร่งอัตราการเกิดปฏิกิริยาเป็นเวลา 0.5 1 2 4 และ 24 ชั่วโมง จากนั้นจึงทำการตรวจสอบการเชื่อมขวางโดยนำแผ่นเส้นใยอิเล็กโทรสปินที่ผ่านการเชื่อมขวางด้วยกรดมาเลอิกแล้วแช่ลงในน้ำกลั่นปริมาตร 20 มิลลิลิตร เป็นเวลา 2 ชั่วโมง สังเกตและบันทึกเวลาในการละลายของแผ่นเส้นใย ศึกษาพื้นฐานวิทยาเบื้องต้นของแผ่นเส้นใยภายหลังการเชื่อมขวางด้วยกล้องจุลทรรศน์

ข. การเชื่อมขวางแผ่นเส้นใยด้วยการอบไอระเหยของกลูตารัลดีไฮด์ (Glutaraldehyde)

ชั่งน้ำหนักแผ่นเส้นใยขนาด 2.5× 2.5 ตารางเซนติเมตร หลังอบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง จากนั้นนำแผ่นเส้นใยดังกล่าววางลงบนตะแกรงในภาชนะปิด ปริมาตร 500 มิลลิลิตร ที่มีสารละลายกลูตารัลดีไฮด์ที่ความเข้มข้นร้อยละ 25 โดยน้ำหนัก ปริมาตร 20 มิลลิลิตร โดยใช้สภาวะการในการเชื่อมขวางดังตารางที่ 3.2 จากนั้นชั่งน้ำหนักแผ่นเส้นใยหลังทำการเชื่อมขวาง แล้วจึงทำการตรวจสอบการเชื่อมขวางเบื้องต้น โดยนำแผ่นเส้นใย อิเล็กโทรสปันที่ผ่านการเชื่อมขวางแล้วแช่ลงในน้ำกลั่นปริมาตร 20 มิลลิลิตร เป็นเวลา 2 ชั่วโมง โดยทำการทดลองจำนวน 3 ครั้ง สังเกตและบันทึกเวลาในการละลายของแผ่นเส้นใย ศึกษา สัณฐานวิทยาเบื้องต้นของแผ่นเส้นใยภายหลังการเชื่อมขวางด้วยกล้องจุลทรรศน์ และคำนวณ ระดับการเชื่อมขวาง

ตารางที่ 3.2 สภาวะการเชื่อมขวางแผ่นเส้นใยพอลิแซ็กคาไรด์เจลด้วยอบไอระเหยของ สารละลายกลูตารัลดีไฮด์ที่ความเข้มข้นร้อยละ 25 โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิและระยะเวลาต่าง ๆ

ตัวอย่าง	สภาวะการเชื่อมขวาง		ระยะเวลาการเชื่อมขวาง
	สารเชื่อมขวาง	อุณหภูมิ	
1	สารละลายกลูตารัลดีไฮด์ ที่ความเข้มข้นร้อยละ 25 โดยน้ำหนัก	ไม่มีการให้ความร้อน	1, 2 และ 4 ชั่วโมง
2			
3			
4		ให้ความร้อนที่ 37 °C	
5			
6			

คำนวณระดับการเชื่อมขวาง ดังสมการต่อไปนี้

$$\text{ระดับการเชื่อมขวาง (\%)} = \frac{C-CW}{C} \times 100$$

โดยที่ C คือ น้ำหนักของแผ่นเส้นใยแห้ง (หลังอบ) ก่อนทำการเชื่อมขวาง
 CW คือ น้ำหนักแผ่นเส้นใยแห้งหลังทำการเชื่อมขวางและนำไปแช่น้ำ และอบที่ อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง

3.4 การศึกษาสัณฐานวิทยาของเส้นใยพอลิแซ็กคาไรด์เจลที่เตรียมได้จากกระบวนการอิเล็กโทรสปินนิง

ตัดแผ่นเส้นใยอิเล็กโทรสปินนิงทั้งก่อนและหลังทำการเชื่อมขวางเป็นวงกลมที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 6 มิลลิเมตร จากนั้นนำไปเคลือบทองด้วยเครื่อง Pularon SC500 sputter coater เป็นเวลา 2 นาที แล้วนำตัวอย่างที่เตรียมได้ไปทำการศึกษาสัณฐานวิทยาของเส้นใยภายใต้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope; SEM) ที่กำลังขยาย 2000 และ 5000 เท่า จากนั้นวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยโดยสุ่มจาก 100 ตำแหน่งของภาพ SEM ที่กำลังขยาย 5,000 เท่า โดยใช้โปรแกรม SemAfore 5.21

3.5 การศึกษาประสิทธิภาพในการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรียของแผ่นเส้นใยพอลิแซ็กคาไรด์เจล

นำแผ่นเส้นใยพอลิแซ็กคาไรด์เจลที่เตรียมได้จากกระบวนการอิเล็กโทรสปินนิง มาทำการศึกษาประสิทธิภาพในการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรีย *Staphylococcus aureus* (*S. aureus*) และ *Escherichia coli* (*E. coli*) ซึ่งเป็นแบคทีเรียที่พบมากบริเวณผิวหนัง ตามมาตรฐานการทดสอบ AATCC 100 ซึ่งมีขั้นตอนต่าง ๆ ดังนี้

- 1) ทำการเลี้ยงเชื้อแบคทีเรียชนิด *S. aureus* และชนิด *E. coli* ใน Nutrient Agar (NA) Slant ที่เป็นอาหารเลี้ยงเชื้อเป็นเวลา 24 ชั่วโมง
- 2) ทำการเจือจางเชื้อให้อยู่ในปริมาณที่วัดได้ คือ 10^0 และ 10^{-1} CFU/ml
- 3) ดูดเชื้อจาก ข้อ 2 ปริมาณ 1 มิลลิลิตร หยดลงบนแผ่นตัวอย่างทดสอบที่เตรียมไว้ จากนั้นทำการบ่มที่อุณหภูมิ 37°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง
- 4) ล้างแผ่นตัวอย่างด้วยน้ำกลั่นปริมาณ 100 มิลลิลิตร และทำการดูดเก็บไว้ในหลอดทดลอง ปริมาณ 10 ml
- 5) นำมาเทแผ่ลงในจานเพาะเชื้อ และทำการบ่มที่อุณหภูมิ 37°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง
- 6) ทำการวัดปริมาณโคโลนีของเชื้อแบคทีเรียที่ปรากฏเทียบกับปริมาณโคโลนีที่ทำการบ่มเชื้อแบคทีเรีย ณ เวลา 24 ชั่วโมง ของแผ่นทดสอบมาตรฐาน (Blank)

3.6 สถานที่ทำการวิจัย

- ห้องปฏิบัติการวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ ชั้น3 ตึกอาคารแถบนี้ละนिति ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์
- ห้องปฏิบัติการเทคโนโลยีการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต ชั้น 10 สถาบันวิจัยโลหะและวัสดุ ตึกวิทยาลัยปิโตรเลียมและปิโตรเคมี และสถาบันวิจัยโลหะและวัสดุ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

ผลการทดลองประกอบด้วย 3 ส่วนหลักคือ การเตรียมแผ่นเส้นใยอิเล็กทรอนิกส์จากสารละลายพอลิแซ็กคาไรด์เจลและสารละลายผสมของพอลิแซ็กคาไรด์เจลและพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ การเชื่อมขวางแผ่นเส้นใยพอลิแซ็กคาไรด์เจล และการทดสอบประสิทธิภาพในการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรียของแผ่นเส้นใยพอลิแซ็กคาไรด์เจล ดังแสดงต่อไปนี้

4.1 การเตรียมแผ่นเส้นใยพอลิแซ็กคาไรด์เจล แบ่งออกเป็น 4 กลุ่ม ดังนี้

4.1.1 การเตรียมแผ่นเส้นใยอิเล็กทรอนิกส์จากสารละลายพอลิแซ็กคาไรด์เจลบริสุทธิ์

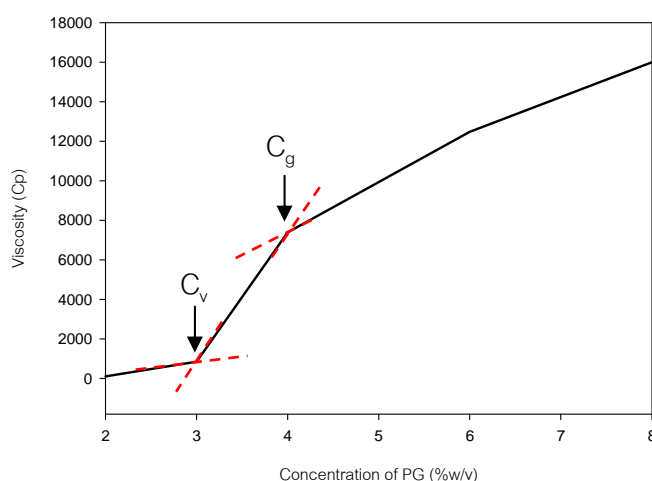
ก) การศึกษาสมบัติของสารละลายพอลิแซ็กคาไรด์เจลบริสุทธิ์ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ

เมื่อพิจารณาสมบัติของสารละลายพอลิแซ็กคาไรด์เจลที่ความเข้มข้นต่าง ๆ พบว่าสารละลายจะมีค่าความหนืดและค่าการนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของสารละลายพอลิแซ็กคาไรด์เจลเพิ่มมากขึ้น ดังตารางที่ 4.1 ทั้งนี้เนื่องจากสารละลายมีปริมาณสายโซ่ของพอลิแซ็กคาไรด์เจลเพิ่มมากขึ้น จึงมีค่าความหนืดเพิ่มขึ้น ในขณะที่สายโซ่พอลิแซ็กคาไรด์เจลที่เพิ่มมากขึ้นนี้จะส่งผลให้เกิดการแตกตัวเป็นประจุลบ (Ionization) ของหมู่คาร์บอกซิลิกซึ่งเป็นหมู่ฟังก์ชันของสายโซ่กรดน้ำตาลกาแลกทูโรนิกมากขึ้น จึงทำให้สารละลายมีค่าการนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้น โดยในการทดลองนี้ได้ทำการศึกษาสมบัติของสารละลายพอลิแซ็กคาไรด์เจลที่ความเข้มข้นตั้งแต่ร้อยละ 2 ถึง 8 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร สำหรับสารละลายที่มีความเข้มข้นมากกว่าร้อยละ 8 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร จะมีความหนืดที่สูงมากจนมีลักษณะเป็นเจลที่คงรูป จึงไม่สามารถศึกษาสมบัติของสารละลายด้วยวิธีเดียวกันได้

เมื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นและความหนืดของสารละลาย ดังรูปที่ 4.1 พบว่า ค่าความหนืดของสารละลายพอลิแซ็กคาไรด์เจลจะมีการเปลี่ยนแปลง 2 ชั้น คือ ณ จุด C_v และ C_g ซึ่งแสดงถึงความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายที่มีลักษณะข้นหนืด (Viscous) และสารละลายที่มีลักษณะเป็นเจล (Gelation) ตามลำดับ ซึ่งการเปลี่ยนแปลงของสารละลายนี้สามารถสังเกตได้จากการเปลี่ยนแปลงอย่างฉับพลันของค่าความหนืด หรือ ความชันของกราฟ

ตารางที่ 4.1 ค่าความหนืดและค่าการนำไฟฟ้าของสารละลายพอลิแซ็กคาไรด์เจลที่ความเข้มข้นร้อยละ 2 3 4 6 และ 8 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร

สารละลาย	ความเข้มข้น (%w/v)	ค่าความหนืด (Cp)	ค่าการนำไฟฟ้า (ms/cm)
PG	2	102	6.80
	3	852	8.85
	4	7,393	10.17
	6	12,480	11.61
	8	16,000	13.27



รูปที่ 4.1 ความหนืดของสารละลายพอลิแซ็กคาไรด์เจลที่ความเข้มข้นร้อยละ 2 3 4 6 และ 8 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร

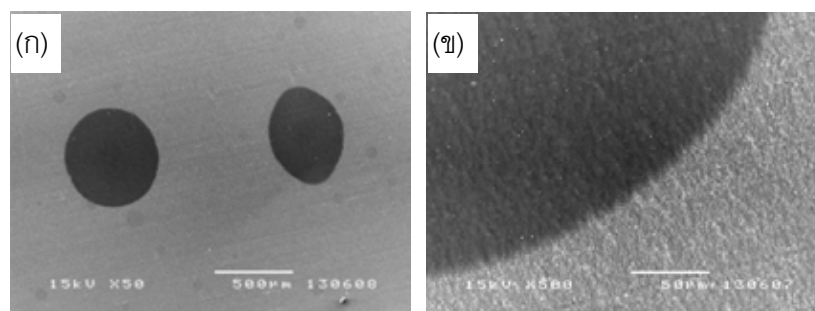
ข) ลักษณะของเส้นใยอิเล็กทรอนิกส์ที่ได้จากสารละลายพอลิแซ็กคาไรด์เจลบริสุทธิ์ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ

จากการทดลองเตรียมเส้นใยอิเล็กทรอนิกส์จากสารละลายพอลิแซ็กคาไรด์เจลที่ความเข้มข้นร้อยละ 2 ถึง 8 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร โดยทำการปั่นเส้นใยด้วยกระบวนการอิเล็กทรอนิกส์ซึ่งมีการให้ความต่างศักย์ทางไฟฟ้าแก่สารละลายที่ 15 20 และ 25 กิโลโวลต์ โดยกำหนดให้มีระยะห่างระหว่างปลายเข็มถึงฉากรองรับ 20 เซนติเมตร และมีอัตราการไหลของสารละลาย 0.2 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง พบว่า สารละลายพอลิแซ็กคาไรด์เจลในทุกความเข้มข้นไม่สามารถขึ้นรูปเป็นเส้นใยได้แม้จะมีการให้ความต่างศักย์ทางไฟฟ้าสูงสุดถึง 25 กิโลโวลต์ ก็ตาม จากการทดลองพบว่า

สารละลายพอลิแซ็กคาไรด์เจลที่ความเข้มข้นต่ำ (ร้อยละ 2 และ 3 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร) จะเกิดเป็นลักษณะของละอองฝอย (Electrospraying) ตลอดการปั่นเส้นใย และเมื่อทำการศึกษาสัญญาณวิทยาพบว่า ไม่ปรากฏลักษณะของเส้นใยบนฉากรองรับ แต่จะปรากฏลักษณะของอนุภาคที่มีขนาดตั้งแต่ 52 ถึง 500 ไมโครเมตร ดังแสดงในรูปที่ 4.2 ในขณะที่สารละลายที่มีความเข้มข้นตั้งแต่ร้อยละ 4 ถึง 6 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร จะปรากฏลักษณะของหยดสารละลายขนาดใหญ่ตกลงบนฉากรองรับ โดยมีการยึดตัวของลำสารละลายพอลิเมอร์ (Polymer jet) ณ ปลายเข็ม ออกเป็นช่วง ๆ แต่ไม่สามารถยึดติดออกเป็นเส้นใยที่ต่อเนื่องได้ ในขณะที่สารละลายพอลิแซ็กคาไรด์เจลที่มีความเข้มข้นสูง (ร้อยละ 8 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร) จะมีลักษณะคล้ายเจลที่คงรูป ซึ่งไม่เหมาะสมต่อการปั่นเส้นใยด้วยกระบวนการอิเล็กโทรสปินนิง โดยผลที่สังเกตได้ระหว่างการเตรียมเส้นใยด้วยกระบวนการอิเล็กโทรสปินนิงในสภาวะต่าง ๆ สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ผลของการเตรียมเส้นใยอิเล็กโทรสปินจากสารละลายพอลิแซ็กคาไรด์เจลบริสุทธิ์ในน้ำกลั่นที่ความเข้มข้นต่าง ๆ กัน

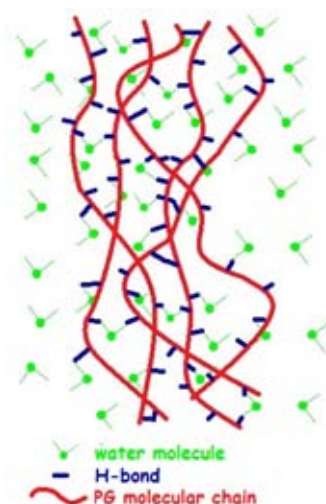
ความเข้มข้น (%w/v)	ปริมาณศักย์ไฟฟ้าที่ให้ (kV)	ระยะจากปลายเข็มถึงฉากรองรับ (cm)	ผลที่สังเกตได้
2-3	15-25	20	มีลักษณะที่เป็นละอองฝอย โดยไม่เกิดเป็นลำสายของพอลิเมอร์แต่เกิดเป็น Electrospraying
4-6	15-25	20	มีลักษณะเป็นแท่งยึดออกที่ปลายเข็ม และเกิดหยดของสารละลายตกลงบนแผ่นอลูมิเนียม และขนาดของหยดเล็กลงเมื่อทำการเพิ่มศักย์ไฟฟ้า
8	15-25	20	สารละลายมีความหนืดมากจนไม่สามารถทำการปั่นออกมาเป็นลำสายของพอลิเมอร์ได้



รูปที่ 4.2 ภาพถ่าย SEM อนุภาคของสารละลายพอลิแอครีลาไมด์เจลที่ได้ภายหลังทำการปั่นเส้นใยจากสารละลายที่มีความเข้มข้นร้อยละ 3 โดยน้ำหนักต่อปริมาตรมีกำลังขยาย (ก) 50 และ (ข) 500 เท่า

ลักษณะที่เตรียมได้จากสารละลายพอลิแอครีลาไมด์เจลด้วยกระบวนการอิเล็กโทรสปินนิงสามารถอธิบายได้จากลักษณะการเปลี่ยนแปลงอย่างเด่นชัดของค่าความหนืด โดยพบว่าสารละลายที่มีความเข้มข้นต่ำ (ร้อยละ 2 และ 3 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร) จะมีค่าความหนืดที่ต่ำเกินไป และมีปริมาณสายโซ่โมเลกุลไม่เพียงพอต่อการเกี่ยวพันของสายโซ่โมเลกุลที่ต่อเนื่อง จึงทำให้เกิดลักษณะของอนุภาคนาขนาดเล็กเมื่อมีการให้แรงทางไฟฟ้า และเมื่อสารละลายมีความเข้มข้นมากกว่าร้อยละ 3 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร (ณ จุด C_v) สารละลายที่เตรียมได้จะมีลักษณะข้นหนืดแต่ยังคงไม่สามารถเตรียมให้อยู่ในรูปของเส้นใยได้ ในขณะที่สารละลายที่มีความเข้มข้นตั้งแต่ร้อยละ 4 โดยน้ำหนักต่อปริมาตรขึ้นไป จะมีลักษณะเป็นเจล (ณ จุด C_g) ทำให้เกิดหยดสารละลายปรากฏอยู่บนแผ่นอลูมิเนียมที่ใช้เป็นฉากรองรับ ซึ่งหยดของสารละลายจะมีขนาดใหญ่ขึ้นตามความเข้มข้นของสารละลาย โดยปัญหาที่พบนี้คล้ายคลึงกับปัญหาการขึ้นรูปเส้นใยด้วยกระบวนการอิเล็กโทรสปินนิงของพอลิอิเล็กโทรไลต์ที่เตรียมจากพอลิเมอร์ธรรมชาติ เช่น ไคโตซานและไซเดียมอัลจินต^[8,9] ซึ่งสาเหตุที่แท้จริงของการเกิดปัญหานี้ยังไม่เป็นที่เข้าใจอย่างแน่ชัดความเป็นไปได้หนึ่งคือ การที่พอลิแอครีลาไมด์เจลที่ใช้เป็นพอลิอิเล็กโทรไลต์ (Polyelectrolyte) ที่มีองค์ประกอบหลักเป็นกรดน้ำตาลกาแลกทูโรนิกมากกว่าร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก ซึ่งหมู่คาร์บอกซิลิก (Carboxylic group; COOH) บนสายโซ่โมเลกุลของกรดน้ำตาลกาแลกทูโรนิกนี้สามารถแตกตัวเป็นหมู่คาร์บอกซิลเลตไอออน (Carboxylate ion; COO⁻) ซึ่งมีประจุลบ หากประจุลบดังกล่าวมีปริมาณถึงระดับหนึ่งอาจจะทำให้แรงผลักรหว่างประจุระหว่างสายโซ่ภายในโมเลกุลของพอลิแอครีลาไมด์เจลมีมากพอที่จะส่งผลต่อการเกี่ยวพันกันของสายโซ่โมเลกุล (Chain entanglement) นอกจากนี้การเกิดพันธะทุติยภูมิ หรือพันธะไฮโดรเจน (Hydrogen bond) ระหว่างโมเลกุลของพอลิแอครีลาไมด์เจลและน้ำ จะทำให้สายโซ่โมเลกุลของสารทั้งสองยึดเกาะกันแน่น และทำให้โมเลกุลมีโครงสร้างเป็น 3 มิติ (3-D macromolecule network) ดังรูปที่ 4.3 ส่งผลให้ความสามารถในการเคลื่อนที่ของสาย

โซ่โมเลกุลลดน้อยลง หรือเกิดลักษณะเป็นเจล ซึ่งทำให้ไม่สามารถถูกยืดดึงออกเป็นเส้นใยที่ต่อเนื่องด้วยแรงทางไฟฟ้าได้



รูปที่ 4.3 ภาพจำลองการเกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุลของพอลิแซ็กคาไรด์เจลและน้ำ

4.1.2 การเตรียมแผ่นเส้นใยอิเล็กโทรสปินจากสารละลายพอลิแซ็กคาไรด์เจลที่มีการเติมสารลดแรงตึงผิวชนิดต่าง ๆ

จากผลการทดลองเบื้องต้นในหัวข้อ 4.1.1 จะเห็นว่าไม่สามารถเตรียมเส้นใยจากสารละลายพอลิแซ็กคาไรด์เจลบริสุทธิ์ได้ ทั้งนี้เนื่องจากสมบัติความเป็นพอลิอิเล็กโทรไลต์และการเกิดพันธะไฮโดรเจนของสารละลายพอลิแซ็กคาไรด์เจลดังที่กล่าวไปแล้ว ดังนั้นเพื่อเป็นการเพิ่มความสามารถในการเตรียมเส้นใยด้วยกระบวนการอิเล็กโทรสปินนิง ในการทดลองนี้จึงมีการเติมสารลดแรงตึงผิวชนิดต่าง ๆ เช่น สารลดแรงตึงผิวที่มีประจุบวก ลบ มีทั้งบวกและลบ และไม่มีประจุ ทั้งนี้เพื่อให้โมเลกุลของสารลดแรงตึงผิวชนิดต่าง ๆ เข้าแทรกระหว่างสายโซ่โมเลกุลของพอลิแซ็กคาไรด์เจล อีกทั้งสารลดแรงตึงผิวบางชนิดจะสามารถเกิดพันธะทางเคมีโดยอาศัยการแลกเปลี่ยนประจุ ส่งผลให้แรงผลักระหว่างสายโซ่โมเลกุลลดลงและเกิดการเกี่ยวพันกันของสายโซ่โมเลกุลเพิ่มขึ้น^[8] โดยการทำปฏิกิริยาระหว่างสารทั้งสองสามารถตรวจสอบได้จากการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของค่าการนำไฟฟ้าของสารละลายที่เปลี่ยนแปลงไป โดยในการทดลองนี้เลือกทำการศึกษาสารละลายพอลิแซ็กคาไรด์เจลที่ความเข้มข้นร้อยละ 6 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ทั้งนี้เนื่องจากสารละลายพอลิแซ็กคาไรด์เจลที่ความเข้มข้นดังกล่าวมีความหนืดอยู่ในช่วงที่เหมาะสมต่อการยืดตัวของลำสารละลายพอลิเมอร์ในกระบวนการอิเล็กโทรสปินนิง

ก) สมบัติของสารละลายพอลิแซ็กคาไรด์เจลที่มีการเติมสารลดแรงตึงผิวชนิดต่าง ๆ

จากการศึกษาสมบัติของสารละลายพอลิแซ็กคาไรด์เจลที่ความเข้มข้นร้อยละ 6 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร เปรียบเทียบกับสมบัติของสารละลายพอลิแซ็กคาไรด์เจลที่มีการเติมสารลดแรงตึงผิวชนิดต่าง ๆ ได้แก่ SDS DTAB TWEEN 20 และ AMPHOLAX 7TX ซึ่งเป็นสารลดแรงตึงผิวที่มีประจุลบ บวก ไม่มีประจุ และมีทั้งประจุบวกและลบ ตามลำดับ โดยจะพบว่า การเติมสารลดแรงตึงผิวจะส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าการนำไฟฟ้ามากกว่าค่าความหนืดของสารละลาย ดังแสดงในตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ความหนืด ค่าการนำไฟฟ้า และขนาดของอนุภาคที่ได้จากสารละลายพอลิแซ็กคาไรด์เจลบริสุทธิ์และสารละลายพอลิแซ็กคาไรด์เจลที่มีการเติมสารลดแรงตึงผิวชนิดต่าง ๆ

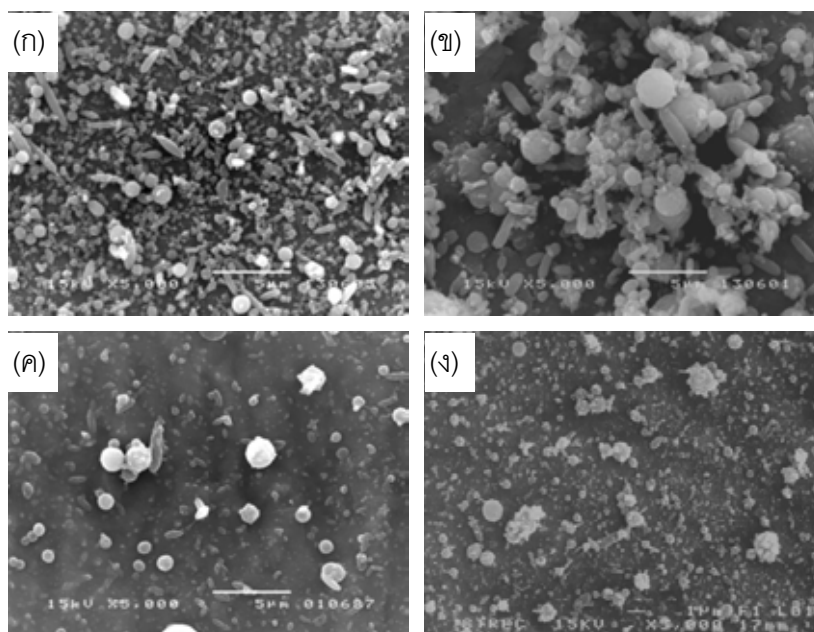
สารละลาย	สารลดแรงตึงผิว (surfactant)	ความเข้มข้น (%w/v)	ค่าความหนืด (Cp)	ค่าการนำ ไฟฟ้า (ms/cm)	ขนาดอนุภาค± SD (nm)
PG	-	6	1,2480	11.61	หยุดขนาด ใหญ่
PG	SDS	6	1,2036	28.78	402±186
PG	DTAB	6	1,3454	22.01	901±472
PG	TWEEN 20	6	1,2547	10.32	459±309
PG	AMPHOLAX 7TX	6	1,2895	22.45	474±218

เมื่อพิจารณาค่าความหนืดและค่าการนำไฟฟ้าของสารละลายพอลิแซ็กคาไรด์เจลและสารละลายพอลิแซ็กคาไรด์เจลที่มีการเติมสารลดแรงตึงผิวชนิดต่าง ๆ พบว่า การเติมสารลดแรงตึงผิวที่มีประจุลบ (SDS) จะทำให้ค่าการนำไฟฟ้าของสารละลายเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากสารละลายมีปริมาณประจุจากสารลดแรงตึงผิวเพิ่มขึ้น แต่อย่างไรก็ตามพบว่า สารละลายจะมีความหนืดลดลงเล็กน้อย ทั้งนี้เนื่องจากสารละลายพอลิแซ็กคาไรด์เจล เป็นพอลิเมอร์ที่สามารถแตกตัวให้ประจุลบเมื่ออยู่ในรูปของสารละลาย หรือเรียกว่า Anionic polysaccharide จึงอาจเกิดการผลักรบกวนระหว่างประจุของสารลดแรงตึงผิวและประจุบนสายโซ่ของพอลิแซ็กคาไรด์เจล ทำให้มีการเกี่ยวพันของสายโซ่โมเลกุลลดลง ส่งผลให้สารละลายมีค่าความหนืดลดลง อย่างไรก็ตาม สารลดแรงตึงผิวที่มีประจุลบและพอลิแซ็กคาไรด์เจลจะยังคงสามารถเข้ากันได้ โดยการทำปฏิกิริยากันระหว่างส่วนที่ไม่มีขั้วของสารลดแรงตึงผิว (Non-polar tail) และหมู่ที่ไม่มีขั้วในสายโซ่ของพอลิเมอร์ (Non-polar group) ด้วย Hydrophobic interaction ดังนั้นสารลดแรงตึงผิวจึงสามารถ

แทรกอยู่ระหว่างโมเลกุลของพอลิแซ็กคาไรด์เจล และลดการเกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างสายโซ่พอลิแซ็กคาไรด์เจล ทำให้ความหนืดของสารละลายลดลงเล็กน้อย ในขณะที่สารละลายพอลิแซ็กคาไรด์เจลที่มีการเติมสารลดแรงตึงผิวที่มีประจุบวก (DTAB) จะมีค่าการนำไฟฟ้าและความหนืดเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากสารลดแรงตึงผิวที่มีประจุตรงข้ามกับพอลิแซ็กคาไรด์เจลจะสามารถทำปฏิกิริยากับโมเลกุลของพอลิแซ็กคาไรด์เจลโดยการแลกเปลี่ยนประจุ ซึ่งจะช่วยลดแรงผลักระหว่างประจุบนสายโซ่โมเลกุลของพอลิแซ็กคาไรด์เจล และส่งผลให้เกิดการเกี่ยวพันของสารโซ่โมเลกุลเพิ่มขึ้น ในขณะที่สารลดแรงตึงผิวที่ไม่มีประจุ (TWEEN 20) ไม่ส่งผลต่อค่าการนำไฟฟ้าและความหนืดของสารละลายมากนัก โดยสารลดแรงตึงผิวประเภทนี้จะสามารถเข้ากันได้กับสารละลายพอลิแซ็กคาไรด์เจลด้วยส่วนที่ไม่มีขั้วของพอลิเมอร์และสารลดแรงตึงผิวเช่นเดียวกับสารลดแรงตึงผิวที่มีประจุลบ นอกจากนี้ยังพบว่า เมื่อเติมสารลดแรงตึงผิวที่มีทั้งประจุบวกและลบ (AMPHOLAX 7TX) สารละลายจะมีค่าการนำไฟฟ้าและความหนืดเพิ่มขึ้น ซึ่งอาจสันนิษฐานได้ว่าสารลดแรงตึงผิวชนิดนี้ทำหน้าที่คล้ายประจุบวกเมื่ออยู่ในสารละลายพอลิแซ็กคาไรด์เจล

ข) ลักษณะเส้นใยพอลิแซ็กคาไรด์เจลจากสารละลายพอลิแซ็กคาไรด์เจลที่มีการเติมสารลดแรงตึงผิวชนิดต่าง ๆ

จากการทดลองเตรียมเส้นใยจากสารละลายพอลิแซ็กคาไรด์เจลที่ความเข้มข้นร้อยละ 6 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ที่มีการเติมสารลดแรงตึงผิวชนิดต่าง ๆ ด้วยกระบวนการอิเล็กโตรสปินนิง โดยให้ความต่างศักย์ทางไฟฟ้าแก่สารละลายที่ 15 20 และ 25 กิโลโวลต์ โดยกำหนดให้มีระยะห่างระหว่างปลายเข็มถึงฉากรองรับ 20 เซนติเมตร และมีอัตราการไหลของสารละลาย 0.2 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง พบว่า ไม่มีเส้นใยปรากฏบนฉากรองรับไม่ว่าจะมีการเติมสารลดแรงตึงผิวชนิดใดก็ตาม แต่จะได้เป็นอนุภาคพอลิแซ็กคาไรด์เจลขนาด 402 901 459 และ 474 ไมโครเมตร เมื่อมีการเติมสารลดแรงตึงผิวชนิดที่มีประจุลบ บวก ไม่มีประจุ และมีทั้งประจุบวกและลบ ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.4(ก) ถึง (ง) ซึ่งนอกจากนี้ยังพบว่า การเติมสารลดแรงตึงผิวที่มีประจุบวก จะได้อนุภาคที่มีขนาดใหญ่ที่สุด ทั้งนี้คาดว่าประจุลบของพอลิแซ็กคาไรด์เจลสามารถดึงดูดประจุบวกของสารลดแรงตึงผิว ทำให้แรงผลักระหว่างประจุลบระหว่างสายโซ่โมเลกุลลดลง ส่งผลให้เกิดการเกี่ยวพันของสายโซ่มากขึ้น ดังนั้นโมเลกุลของพอลิเมอร์จึงถูกผลักระเด็นออกมาในปริมาณที่มากกว่า แต่อย่างไรก็ตามพบว่า สารละลายยังคงมีความหนืดสูง อีกทั้งยังมีค่าการนำไฟฟ้าต่ำ จึงถูกยึดติดด้วยแรงทางไฟฟ้าได้น้อย ส่งผลให้ได้อนุภาคของพอลิแซ็กคาไรด์เจลที่ได้มีขนาดใหญ่



รูปที่ 4.4 ภาพถ่าย SEM ของอนุภาคที่ได้จากกระบวนการอิเล็กโทรสปินนิงของสารละลายพอลิแซ็กคาไรด์เจลที่ความเข้มข้นร้อยละ 6 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ที่มีการเติมสารลดแรงตึงผิว (ก) ประจุลบ (SDS) (ข) ประจุบวก (DTAB) (ค) ไม่มีประจุ (TWEEN 20) และ (ง) มีทั้งประจุบวกและลบ (AMPHOLAX 7TX)

4.1.3 การเตรียมแผ่นเส้นใยอิเล็กโทรสปินนิงจากสารละลายพอลิแซ็กคาไรด์เจลบริสุทธิ์ภายหลังการลดความหนืดของสารละลายด้วยปฏิกิริยาออกซิเดชัน และการให้ความร้อนแก่สารละลาย

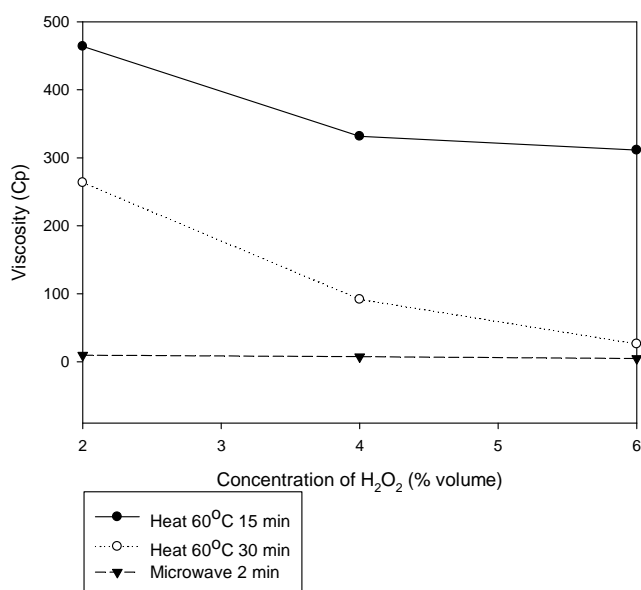
จากการทดลอง 4.1.1 พบว่า ไม่สามารถเตรียมเส้นใยอิเล็กโทรสปินนิงจากสารละลายพอลิแซ็กคาไรด์เจลบริสุทธิ์ได้ ทั้งนี้เนื่องจากข้อจำกัดด้านสมบัติความเป็นพอลิอิเล็กโทรไลต์ของพอลิแซ็กคาไรด์เจลแล้ว ความหนืดและความสามารถในการเกิดเจลที่ความเข้มข้นต่ำของสารละลายพอลิแซ็กคาไรด์เจลยังเป็นปัจจัยสำคัญที่ขัดขวางการเคลื่อนที่ของสายไซโมเลกุลของพอลิแซ็กคาไรด์เจล ดังนั้นในการทดลองนี้จึงทำการลดความหนืดของสารละลายพอลิแซ็กคาไรด์เจลด้วยวิธีที่แตกต่างกัน 2 วิธีคือ การลดความหนืดของสารละลายด้วยปฏิกิริยาออกซิเดชันและการลดความหนืดโดยการให้ความร้อนแก่สารละลาย เพื่อเพิ่มความสามารถในการขึ้นรูปเส้นใยด้วยกระบวนการอิเล็กโทรสปินนิง ดังนี้

4.1.3.1 การเตรียมเส้นใยอิเล็กทรอนิกส์จากสารละลายพอลิแซ็กคาไรด์เจลบริสุทธิ์ภายหลังการลดความหนืดของสารละลายด้วยปฏิกิริยาออกซิเดชัน

ก) สมบัติของสารละลายพอลิแซ็กคาไรด์เจลบริสุทธิ์ภายหลังการลดความหนืดด้วยปฏิกิริยาออกซิเดชัน

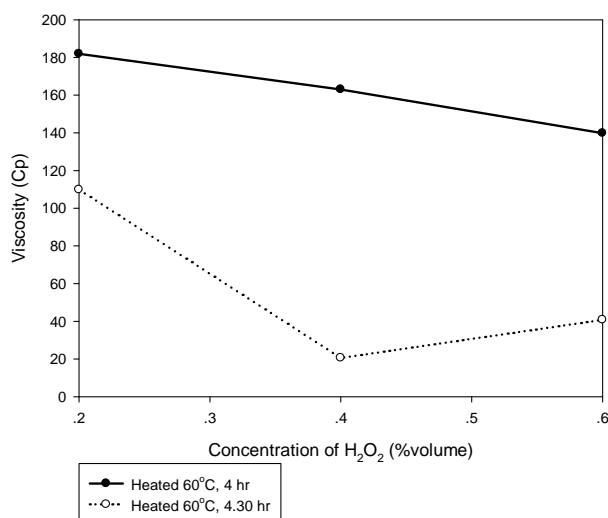
จากการศึกษาสมบัติของสารละลายพอลิแซ็กคาไรด์เจลที่ความเข้มข้นร้อยละ 4 และ 6 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ที่ทำการลดความหนืดของสารละลายโดยการเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ร้อยละ 2 4 และ 6 โดยปริมาตร จากนั้นทำการเร่งปฏิกิริยาออกซิเดชัน 2 วิธีด้วยกัน วิธีแรกเป็นการฉายรังสีไมโครเวฟที่กำลัง 800 วัตต์ เป็นเวลา 2 นาที วิธีที่สองเป็นการให้ความร้อนแก่สารละลายที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 และ 30 นาที จากการทดลองพบว่า สารละลายพอลิแซ็กคาไรด์เจลที่ความเข้มข้นร้อยละ 4 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร จะมีความหนืดลดลงอย่างมากแม้จะมีการเติมสารออกซิไดส์เพียงร้อยละ 2 โดยปริมาตร ก็ตาม ซึ่งจากการสังเกตพบว่า สารละลายพอลิแซ็กคาไรด์เจลที่ได้จะมีลักษณะที่เหลวคล้ายน้ำเมื่อทำการเร่งปฏิกิริยาด้วยการฉายรังสีไมโครเวฟและให้ความร้อน

เมื่อพิจารณาสารละลายพอลิแซ็กคาไรด์เจลที่ความเข้มข้นร้อยละ 6 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร จะพบว่า สารละลายพอลิแซ็กคาไรด์เจลที่เร่งปฏิกิริยาโดยการฉายรังสีไมโครเวฟจะมีความหนืดลดลงจาก 12,480 เซนติพอยส์ เป็น 9.66 7.50 และ 4.89 เซนติพอยส์ เมื่อมีการเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ร้อยละ 2 4 และ 6 โดยปริมาตร ตามลำดับ ดังรูปที่ 4.5 เมื่อพิจารณาสารละลายพอลิแซ็กคาไรด์เจลที่เร่งปฏิกิริยาโดยการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 15 นาที จะมีความหนืดลดลงจาก 12,480 เซนติพอยส์ เป็น 463.7 331.6 และ 311.3 เซนติพอยส์ เมื่อมีการเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ร้อยละ 2 4 และ 6 โดยปริมาตร ตามลำดับ ในขณะที่การให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 30 นาที จะมีความหนืดลดลงจาก 12,480 เซนติพอยส์ เป็น 263.4 91.7 และ 26.4 เซนติพอยส์ จากการทดลองจะเห็นได้ว่า การใช้รังสีไมโครเวฟจะทำให้เกิดปฏิกิริยาที่รุนแรงในระยะเวลาอันสั้น ซึ่งสังเกตได้จากค่าความหนืดที่ลดลงจากเดิมถึงร้อยละ 99.9 เมื่อเทียบกับความหนืดของสารละลายพอลิแซ็กคาไรด์เจลที่ความเข้มข้นร้อยละ 6 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ก่อนทำการลดความหนืดด้วยปฏิกิริยาออกซิเดชัน ในขณะที่การให้ความร้อนเป็นระยะเวลานานถึง 30 นาที จะส่งผลให้ความหนืดของสารละลายลดลงอย่างมากเช่นเดียวกัน โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อสารละลายมีปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์มากขึ้นถึงร้อยละ 4 และ 6 โดยปริมาตร



รูปที่ 4.5 ความหนืดของสารละลายพอลิแซ็กคาไรด์เจลาที่ความเข้มข้นร้อยละ 6 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ภายหลังจากการลดความหนืดด้วยปฏิกิริยาออกซิเดชันและเร่งปฏิกิริยาด้วยวิธีต่าง ๆ

เมื่อทำการลดความเข้มข้นของสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ลง 10 เท่า โดยการเติมสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ความเข้มข้นร้อยละ 0.2 0.4 และ 0.6 โดยปริมาตร ลงในสารละลายพอลิแซ็กคาไรด์เจลาที่ความเข้มข้นร้อยละ 6 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร และเร่งปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยการให้ความร้อนแก่สารละลายที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส แล้วสังเกตและศึกษาค่าความหนืดที่เปลี่ยนแปลงไปตามระยะเวลาที่ให้ความร้อนแก่สารละลาย พบว่า ความหนืดของสารละลายจะเริ่มลดลงจนสังเกตการเปลี่ยนแปลงได้เมื่อมีการให้ความร้อนแก่สารละลายเป็นเวลา 4 ชั่วโมง โดยความหนืดของสารละลายพอลิแซ็กคาไรด์เจลาจะมีค่าลดลงเมื่อมีความเข้มข้นของสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เพิ่มขึ้น เมื่อมีการให้ความร้อนแก่สารละลายที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 4 ชั่วโมง 30 นาที จะพบว่า ความหนืดของสารละลายลดลงอย่างมากและจับพลันเมื่อมีการเติมสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ความเข้มข้นร้อยละ 0.4 และ 0.6 โดยปริมาตร ดังรูปที่ 4.6 อย่างไรก็ตามพบว่า การลดความหนืดด้วยปฏิกิริยาออกซิเดชันโดยการใช้สารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์จะทำให้ความหนืดของสารละลายลดลงอย่างมากแม้จะใช้สารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในปริมาณเพียงเล็กน้อย ซึ่งแสดงถึงการเกิดปฏิกิริยาที่รุนแรงเกินไป ส่งผลให้สายโซ่โมเลกุลของพอลิแซ็กคาไรด์เจลาถูกตัดเป็นสายโซ่สั้น ๆ และไม่เกิดการเกี่ยวพันของสายโซ่โมเลกุลที่เพียงพอต่อการเตรียมเส้นใยด้วยกระบวนการอิเล็กทรอนิกส์

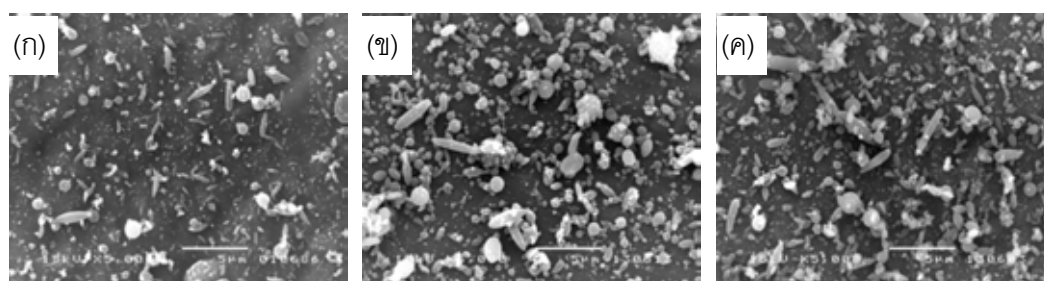


รูปที่ 4.6 ความหนืดของสารละลายพอลิแซ็กคาไรด์เจลาที่ความเข้มข้นร้อยละ 6 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ภายหลังจากการลดความหนืดด้วยปฏิกิริยาออกซิเดชัน และเร่งปฏิกิริยาด้วยการให้ความร้อนแก่สารละลายที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส

ข) ลักษณะเส้นใยอิเล็กทรอนิกส์จากสารละลายพอลิแซ็กคาไรด์เจลาภายหลังการลดความหนืดด้วยปฏิกิริยาออกซิเดชัน

จากการทดลองในหัวข้อ 4.1.3.1ก) พบว่า สารละลายพอลิแซ็กคาไรด์เจลาที่ความเข้มข้นร้อยละ 6 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร และทำการเร่งปฏิกิริยาออกซิเดชันของสารละลายด้วยการให้ความร้อนเป็นระยะเวลา 15 นาที เป็นสารละลายที่มีความหนืดเหมาะสมต่อการปั่นเส้นใยด้วยกระบวนการอิเล็กทรอนิกส์ที่เร็วที่สุด จึงนำสารละลายที่เตรียมได้มาทำการเตรียมเส้นใยด้วยกระบวนการอิเล็กทรอนิกส์โดยให้ความต่างศักย์ทางไฟฟ้าแก่สารละลายที่ 15 20 และ 25 กิโลโวลต์ โดยกำหนดให้มีระยะห่างระหว่างปลายเข็มถึงฉากรองรับ 20 เซนติเมตร และมีอัตราการไหลของสารละลาย 0.2 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง แต่อย่างไรก็ตามพบว่า ไม่มีลักษณะของเส้นใยเกิดขึ้น แต่จะได้ลักษณะอนุภาคของสารละลายพอลิแซ็กคาไรด์เจลาขนาด 475 459 และ 371 นาโนเมตร เมื่อมีการเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ร้อยละ 2 4 และ 6 โดยปริมาตร ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.7 ทั้งนี้เนื่องจากปฏิกิริยาออกซิเดชันที่เกิดขึ้นจะทำให้ความยาวสายโซ่โมเลกุลของพอลิแซ็กคาไรด์เจลาถูกตัดทอนลงอย่างมาก มีผลทำให้การเกี่ยวพันของสายโซ่โมเลกุลลดลง ทั้งนี้สามารถสังเกตได้จากการลดลงอย่างมากของค่าความหนืดของสารละลายพอลิแซ็กคาไรด์เจลาภายหลังทำการลดความหนืดด้วยปฏิกิริยาออกซิเดชันและเร่งปฏิกิริยาด้วยความร้อน นอกจากนี้จากการทดลองยังสังเกตได้ว่า ค่าความหนืดของสารละลายพอลิแซ็กคาไรด์เจลาที่ผ่านการลดความหนืดจะมีค่าลดลงเรื่อย ๆ เมื่อเวลาผ่านไป ทั้งนี้เนื่องจากภาวะที่ใช้ในการทดลอง

ค่อนข้างรุนแรง จึงไม่สามารถหยุดปฏิกิริยาออกซิเดชันที่เกิดขึ้นได้ในทันที ส่งผลให้ไม่สามารถเตรียมเส้นใยจากสารละลายพอลิแซ็กคาไรด์เจลที่ทำการลดความหนืดด้วยปฏิกิริยาออกซิเดชันโดยใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ซึ่งเป็นสารออกซิไดส์ที่ค่อนข้างรุนแรงได้



รูปที่ 4.7 ภาพถ่าย SEM ของอนุภาคที่ได้จากกระบวนการอิเล็กโทรสปินนิงของสารละลายพอลิแซ็กคาไรด์เจลภายหลังการลดความหนืดด้วยปฏิกิริยาออกซิเดชันโดยการเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (ก) ร้อยละ 2 (ข) ร้อยละ 4 และ (ค) ร้อยละ 6 โดยปริมาตร

4.1.3.2 การเตรียมเส้นใยอิเล็กโทรสปินนิงจากสารละลายพอลิแซ็กคาไรด์เจลบริสุทธิ์ที่ถูกลดความหนืดโดยการให้ความร้อนแก่สารละลาย

จากการทดลอง 4.1.3.1 พบว่า การลดความหนืดของสารละลายพอลิแซ็กคาไรด์เจลด้วยปฏิกิริยาออกซิเดชันโดยใช้สารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เป็นสารออกซิไดส์ จะทำให้เกิดปฏิกิริยาที่ค่อนข้างรุนแรง และส่งผลให้สารละลายพอลิแซ็กคาไรด์เจลมีความหนืดลดลงอย่างมากอันเนื่องมาจากสายโซ่โมเลกุลของพอลิแซ็กคาไรด์เจลถูกตัดเป็นสายโซ่สั้น ๆ ทำให้ไม่เหมาะสมต่อการเตรียมเส้นใยด้วยกระบวนการอิเล็กโทรสปินนิงที่ต้องการการเกี่ยวพันของสายโซ่โมเลกุลที่เพียงพอ อย่างไรก็ตามการลดค่าความหนืดมีแนวโน้มที่จะทำให้เกิดโครงสร้างของเส้นใยได้ สังเกตได้จากการเปลี่ยนจากหยดของสารละลายเป็นอนุภาค ดังนั้นในการทดลองนี้จึงทำการเตรียมเส้นใยอิเล็กโทรสปินนิงจากสารละลายพอลิแซ็กคาไรด์เจลที่ถูกลดความหนืดโดยการให้ความร้อนแก่สารละลายที่ระยะเวลาต่าง ๆ ซึ่งเป็นการลดความหนืดของสารละลายที่รุนแรงน้อยกว่าการใช้ปฏิกิริยาออกซิเดชัน ผลการศึกษาแสดงดังต่อไปนี้

ก) สมบัติของสารละลายพอลิแซ็กคาไรด์เจลภายหลังการลดความหนืดโดยการให้ความร้อนแก่สารละลายที่ระยะเวลาต่าง ๆ

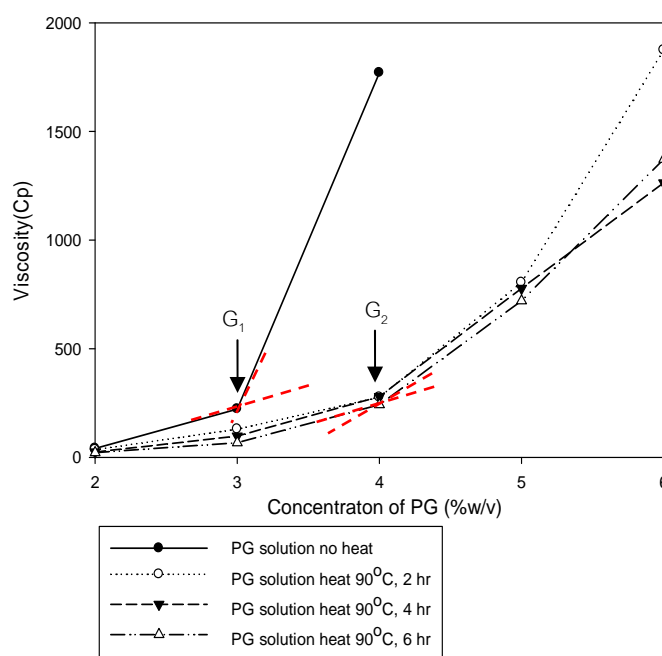
ในการทดลองนี้ได้ทำการศึกษาอิทธิพลของการให้ความร้อนและระยะเวลาที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงความหนืดของสารละลายพอลิแซ็กคาไรด์เจลที่ความเข้มข้นร้อยละ 2 ถึง 6 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร โดยจะให้ความร้อนแก่สารละลายที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา

ต่าง ๆ และทำการวัดค่าความหนืดของสารละลายภายหลังการให้ความร้อนและตั้งสารละลายทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นระยะเวลา 2 4 และ 24 ชั่วโมง เบื้องต้นพบว่า เมื่อไม่มีการให้ความร้อน พอลิแซ็กคาไรด์เจลที่ความเข้มข้นร้อยละ 2 3 และ 4 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร สามารถละลายในน้ำได้ภายในเวลา 24 ชั่วโมง แต่เมื่อความเข้มข้นของพอลิแซ็กคาไรด์เจลเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ความสามารถในการละลายลดลง โดยพอลิแซ็กคาไรด์เจลที่ความเข้มข้นร้อยละ 5 และ 6 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร จะใช้เวลาในการละลายอย่างสมบูรณ์ถึง 48 ชั่วโมง อย่างไรก็ตามเมื่อมีการให้ความร้อนแก่สารละลายพอลิแซ็กคาไรด์เจล ความสามารถในการละลายของพอลิแซ็กคาไรด์เจลจะเพิ่มมากยิ่งขึ้น โดยสังเกตได้จากเมื่อมีการให้ความร้อนแก่สารละลายที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส พอลิแซ็กคาไรด์เจลทุกความเข้มข้นสามารถละลายได้อย่างสมบูรณ์โดยใช้เวลาในการละลายเพียง 2 ชั่วโมง

1) อิทธิพลของความร้อนที่มีต่อสมบัติของสารละลายพอลิแซ็กคาไรด์เจล

เมื่อทำการศึกษาอิทธิพลของความร้อนที่มีต่อสมบัติของสารละลายพอลิแซ็กคาไรด์เจลโดยการเปรียบเทียบค่าความหนืดของสารละลายที่มีการให้ความร้อนและที่ไม่มีการให้ความร้อน พบว่า ค่าความหนืดของสารละลายพอลิแซ็กคาไรด์เจลทั้งที่ให้และไม่ให้ความร้อนจะมีค่าสูงขึ้นเมื่อสารละลายมีความเข้มข้นเพิ่มขึ้น จากรูปที่ 4.8 ซึ่งแสดงถึงอิทธิพลของการให้ความร้อนที่ระยะเวลาต่าง ๆ กันต่อค่าความหนืดของสารละลายพอลิแซ็กคาไรด์เจลที่ความเข้มข้นต่าง ๆ เมื่อพิจารณาค่าความหนืดของสารละลายที่ไม่มีการให้ความร้อนจะพบว่า สารละลายพอลิแซ็กคาไรด์เจลที่มีความเข้มข้นมากกว่าร้อยละ 3 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร จะมีค่าความหนืดเพิ่มขึ้นอย่างฉับพลัน ณ จุด G_1 ซึ่งมีสาเหตุมาจากความสามารถในการเกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุลของพอลิแซ็กคาไรด์เจลและน้ำ ทำให้โมเลกุลมีโครงสร้างเป็น 3 มิติ ซึ่งแสดงถึงการเกิดเจล (Gelation) ของสารละลายพอลิแซ็กคาไรด์เจล ส่งผลให้มีความสามารถในการเคลื่อนที่ของสายโซ่โมเลกุลลดน้อยลง ดังนั้นสารละลายพอลิแซ็กคาไรด์เจลที่ความเข้มข้นร้อยละ 4 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ที่เตรียมโดยไม่มีการให้ความร้อนแก่สารละลายจึงมีค่าความหนืดสูงชันอย่างมาก ดังรูปที่ 4.8 และหากไม่มีการให้ความร้อนจะไม่สามารถเตรียมสารละลายพอลิแซ็กคาไรด์เจลที่ความเข้มข้นสูงกว่าร้อยละ 4 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ได้ ขณะที่เมื่อมีการให้ความร้อนแก่สารละลายจะทำให้สารละลายมีค่าความหนืดลดลงอย่างมาก จากการทดลองพบว่า ความหนืดของสารละลายพอลิแซ็กคาไรด์เจลที่ความเข้มข้นร้อยละ 2 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ที่ได้รับความร้อนที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 2 4 และ 6 ชั่วโมง จะมีค่าลดลง ร้อยละ 19 46 และ 53 ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับความหนืดของสารละลายพอลิแซ็กคาไรด์เจลที่ไม่ได้รับความร้อน ดังรูปที่ 4.8

ในขณะที่สารละลายพอลิแซ็กคาไรด์เจลที่ความเข้มข้นร้อยละ 3 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร จะมีความหนืดลดลงร้อยละ 46 59 และ 71 ตามลำดับ และสารละลายพอลิแซ็กคาไรด์เจลที่ความเข้มข้นร้อยละ 4 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร จะมีความหนืดลดลงร้อยละ 89 90 และ 91 ตามลำดับ ซึ่งจากการทดลองในส่วนนี้ จะสังเกตได้ว่า ความร้อนที่ให้แก่สารละลายจะส่งผลให้ค่าความหนืดลดลงอย่างชัดเจนยิ่งขึ้นเมื่อสารละลายมีความเข้มข้นสูงขึ้น โดยพบว่า การเพิ่มระยะเวลาการให้ความร้อนจาก 2 ชั่วโมง เป็น 4 และ 6 ชั่วโมง ตามลำดับ ไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความหนืดของสารละลายของสารละลายพอลิแซ็กคาไรด์เจลที่ความเข้มข้นต่ำ (ร้อยละ 2 และ 3 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร)



รูปที่ 4.8 อิทธิพลของความร้อนที่มีต่อค่าความหนืดของสารละลายพอลิแซ็กคาไรด์เจลที่ความเข้มข้นต่าง ๆ

สำหรับสารละลายที่ได้รับความร้อน เมื่อความเข้มข้นของสารละลายเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 4 เป็น ร้อยละ 5 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร พบว่าค่าความหนืดของสารละลายเพิ่มขึ้นอย่างฉับพลัน ณ จุด G_2 ดังแสดงในรูปที่ 4.8 โดยการเพิ่มขึ้นของค่าความหนืดอย่างฉับพลันนี้บ่งบอกถึงการเกิดเจลของสารละลายพอลิแซ็กคาไรด์เจลเช่นเดียวกับสารละลายพอลิแซ็กคาไรด์เจลที่ไม่ได้รับความร้อน เมื่อเปรียบเทียบความเข้มข้นที่ส่งผลให้เกิดการก่อเจลระหว่างสารละลายพอลิแซ็กคาไรด์เจลที่ได้และไม่ได้รับความร้อน จะเห็นว่า การให้ความร้อนส่งผลให้การเกิดเจลของสารละลายพอลิแซ็กคาไรด์เจลเกิดขึ้นที่ความเข้มข้นสูงกว่า ซึ่งโดยธรรมชาติของพอลิแซ็กคาไรด์

เจลจะมีสมบัติเกิดเจลที่ความเข้มข้นต่ำ ทำให้ไม่เหมาะสมต่อการนำไปใช้ในกระบวนการผลิตบางประเภท แต่จากการทดลองจะเห็นได้ว่าการให้ความร้อนเป็นวิธีที่ช่วยแก้ปัญหาการเกิดเจลอันเนื่องมาจากการสร้างพันธะไฮโดรเจนได้ เมื่อพิจารณาถึงผลของเวลาที่ให้ความร้อนต่อค่าความหนืด จะเห็นว่าในกรณีของสารละลายที่มีความเข้มข้นสูงขึ้นไป (ร้อยละ 5 และ 6 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร) การให้ความร้อนแก่สารละลายเป็นระยะเวลาที่นานมากขึ้น ค่าความหนืดของสารละลายจะมีแนวโน้มลดลงมากขึ้น ซึ่งสังเกตได้อย่างชัดเจนในกรณีของสารละลายที่มีความเข้มข้นร้อยละ 6 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ทั้งนี้เนื่องมาจากเมื่อความเข้มข้นของสารละลายเพิ่มขึ้นจะเกิดแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุล หรือ พันธะไฮโดรเจนระหว่างหมู่ไฮดรอกซิลของสายโซ่โมเลกุลเพิ่มขึ้น การให้ความร้อนเป็นเวลานานขึ้น จะช่วยลดการพันธะข้างต้นมากขึ้น นอกจากนี้การให้ความร้อนที่เพียงพอยังส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของสายโซ่พอลิแซ็กคาไรด์เจล ทำให้ความยาวของสายโซ่โมเลกุลลดลง ค่าความหนืดของสารละลายจึงมีค่าลดลงอย่างถาวรเมื่อมีการให้ความร้อนแก่สารละลายเป็นเวลานาน

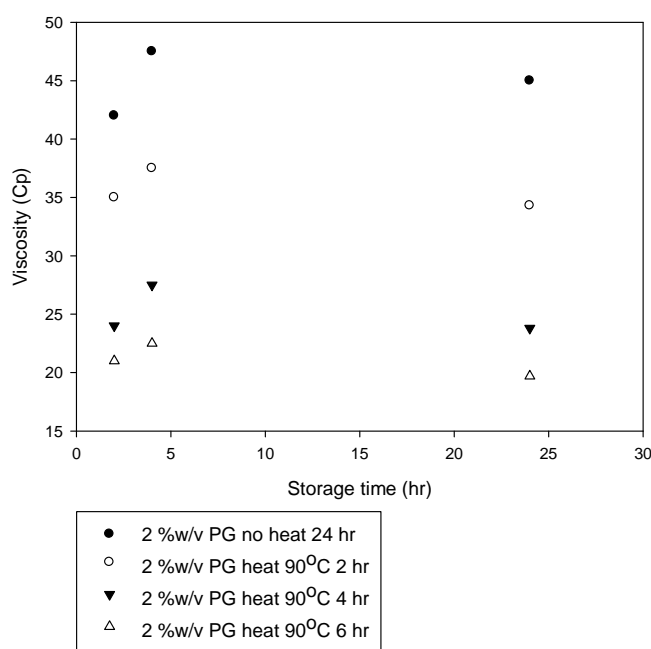
2) การศึกษาอิทธิพลของเวลาต่อสมบัติของสารละลายพอลิแซ็กคาไรด์เจล

เนื่องจากกระบวนการอิเล็กโทรสปินนิงเป็นกระบวนการที่ใช้เวลานาน ดังนั้นจึงจำเป็นต้องศึกษาถึงสมบัติของสารละลายที่เปลี่ยนไปตามเวลาด้วย ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาโดยการตั้งสารละลายพอลิแซ็กคาไรด์เจลที่มีความเข้มข้นต่าง ๆ กัน ตั้งแต่ร้อยละ 2 3 และ 4 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ที่เตรียมได้ทั้งที่มีการให้ความร้อนและที่ไม่มีการให้ความร้อนแก่สารละลายไว้ที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นทำการวัดค่าความหนืดของสารละลายพอลิแซ็กคาไรด์เจลที่เปลี่ยนแปลงไปตามระยะเวลา 2 4 และ 24 ชั่วโมง ตามลำดับ

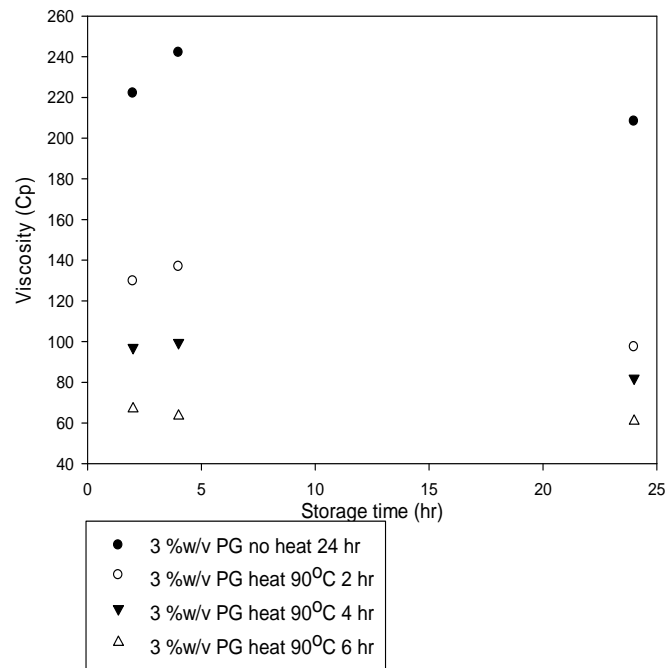
จากผลการทดลองพบว่า สารละลายพอลิแซ็กคาไรด์เจลที่มีความเข้มข้นต่ำ (ร้อยละ 2 และ 3 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร) ทั้งที่ได้รับความร้อนและไม่ได้รับความร้อนเป็นเวลาต่าง ๆ กัน จะมีค่าความหนืดของสารละลายที่ไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลามากนัก ดังรูปที่ 4.9 และ 4.10

เมื่อพิจารณาค่าความหนืดของสารละลายพอลิแซ็กคาไรด์เจลที่มีความเข้มข้นสูงขึ้นไป (ร้อยละ 4 5 และ 6 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร) พบว่า สารละลายความเข้มข้นร้อยละ 4 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ที่ไม่ได้รับความร้อน จะมีความหนืดเพิ่มขึ้นอย่างมากจาก 2,375 เซนติพอยส์ เป็น 7,258 เซนติพอยส์ เมื่อตั้งสารละลายทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องโดยไม่มีการกวนสารละลายเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ดังแสดงในรูปที่ 4.11 ในทางตรงกันข้ามสารละลายที่มีความเข้มข้นข้างต้นเมื่อได้รับความร้อนไม่ว่าจะเป็นเวลานานเท่าไร ค่าความหนืดของสารละลายเมื่อตั้งทิ้งไว้จะไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก

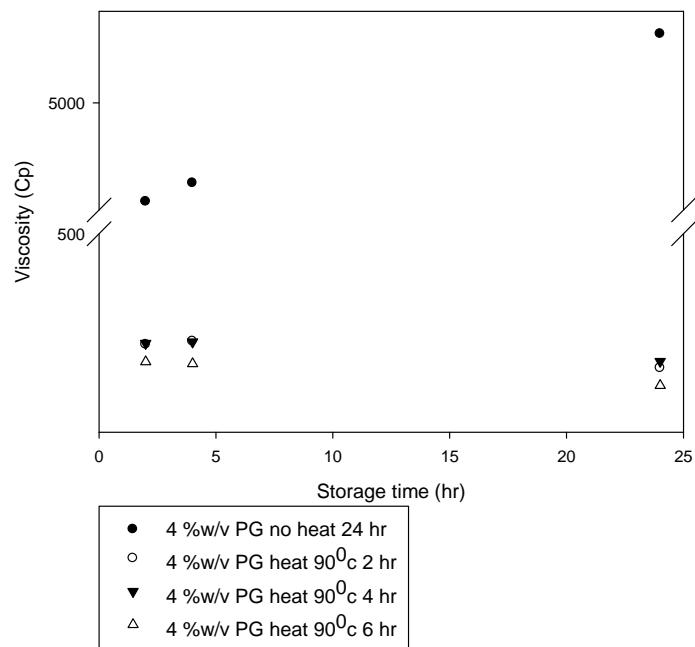
สำหรับสารละลายพอลิแซ็กคาไรด์เจลที่ความเข้มข้นร้อยละ 5 และ 6 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ที่มีการให้ความร้อนแก่สารละลายที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 2 และ 4 ชั่วโมง ดังรูปที่ 4.12 และ 4.13 พบว่า ค่าความหนืดของสารละลายจะเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องเมื่อตั้งสารละลายทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากที่ความเข้มข้นนี้เป็นความเข้มข้นที่สารละลายพอลิแซ็กคาไรด์เจลสามารถเกิดเจลได้ถึงแม้จะมีการให้ความร้อนก็ตาม หากให้ความร้อนไม่นานพอ สายโซ่จะยังคงอยู่ใกล้กัน การตั้งทิ้งไว้จึงส่งผลให้พันธะไฮโดรเจนระหว่างสายโซ่สามารถเกิดเพิ่มขึ้น ค่าความหนืดจึงมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้น แต่อย่างไรก็ตามพบว่า ค่าความหนืดของสารละลายจะลดลงไม่เปลี่ยนแปลงมากนักเมื่อมีการให้ความร้อนแก่สารละลายเป็นเวลา 6 ชั่วโมง ทั้งนี้เนื่องจากการให้ความร้อนแก่สารละลายเป็นระยะเวลาที่นานขึ้น อาจมีผลให้ความยาวสายโซ่โมเลกุลของพอลิแซ็กคาไรด์เจลถูกลดทอนโดยปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส ความหนืดของสารละลายจึงไม่เพิ่มขึ้นตามเวลาที่ตั้งทิ้งไว้ จากการทดลองในส่วนนี้เห็นได้ว่า การให้ความร้อนแก่สารละลาย จะช่วยให้สมบัติของสารละลายมีเสถียรภาพมากยิ่งขึ้น



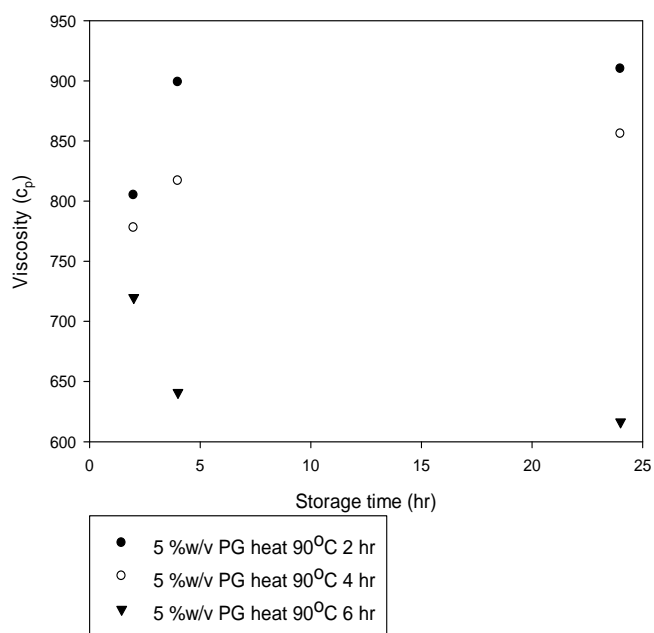
รูปที่ 4.9 ความหนืดของสารละลายพอลิแซ็กคาไรด์เจลที่ความเข้มข้นร้อยละ 2 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ที่ระยะเวลาต่าง ๆ กัน



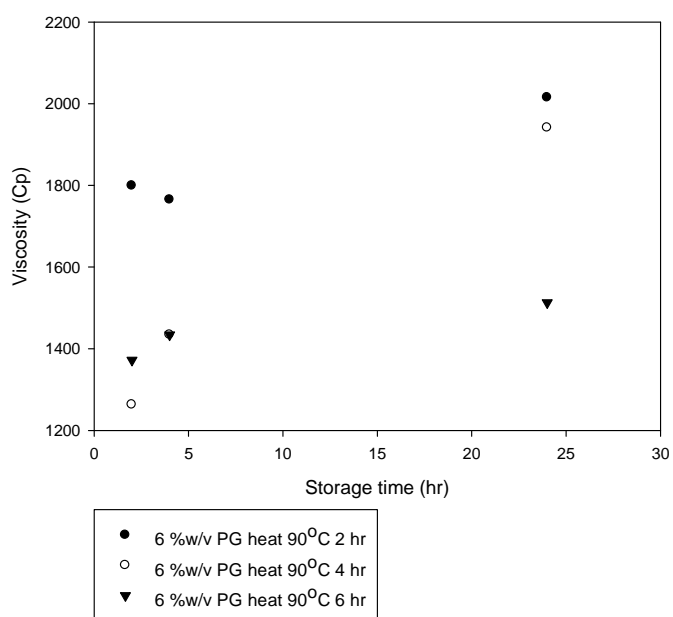
รูปที่ 4.10 ความหนืดของสารละลายพอลิแซ็กคาไรด์เจลาที่ความเข้มข้นร้อยละ 3 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ที่ระยะเวลาต่าง ๆ กัน



รูปที่ 4.11 ความหนืดของสารละลายพอลิแซ็กคาไรด์เจลาที่ความเข้มข้นร้อยละ 4 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ที่ระยะเวลาต่าง ๆ กัน



รูปที่ 4.12 ความหนืดของสารละลายพอลิแซ็กคาไรด์เจลาที่ความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ที่ระยะเวลาต่าง ๆ กัน



รูปที่ 4.13 ความหนืดของสารละลายพอลิแซ็กคาไรด์เจลาที่ความเข้มข้นร้อยละ 6 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ที่ระยะเวลาต่าง ๆ กัน

ข) ลักษณะเส้นใยอิเล็กทรอนิกส์ที่เตรียมได้จากสารละลายพอลิแซ็กคาไรด์เจล ภายหลังจากการลดความหนืดโดยการให้ความร้อนแก่สารละลาย

เมื่อนำสารละลายพอลิแซ็กคาไรด์เจลที่ความเข้มข้นต่าง ๆ มาทำการเตรียมเส้นใยด้วยกระบวนการอิเล็กทรอนิกส์ป็นนึ่ง ซึ่งมีการให้ความต่างศักย์ทางไฟฟ้าแก่สารละลายที่ 15 20 และ 25 กิโลโวลต์ โดยกำหนดให้มีระยะห่างระหว่างปลายเข็มถึงฉากรองรับ 20 เซนติเมตร และมีอัตราการไหลของสารละลาย 0.2 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง พบว่า สารละลายพอลิแซ็กคาไรด์เจล ในทุกความเข้มข้นไม่สามารถขึ้นรูปเป็นเส้นใยได้แม้จะมีการให้ความร้อนแก่สารละลายนานถึง 6 ชั่วโมง และให้ความต่างศักย์ทางไฟฟ้าสูงถึง 25 กิโลโวลต์ ก็ตาม จากการทดลองจะพบเพียงหยดของสารละลายตกลงบนฉากรองรับ โดยหยดของสารละลายจะมีขนาดใหญ่ขึ้นเมื่อสารละลายมีความเข้มข้นของพอลิแซ็กคาไรด์เจลเพิ่มมากขึ้น

4.1.4 การเตรียมแผ่นเส้นใยอิเล็กทรอนิกส์จากสารละลายผสมของพอลิแซ็กคาไรด์เจลและพอลิเมอร์สังเคราะห์

ภายใต้ขอบเขตและสภาวะการทดลองที่ผ่านมาพบว่า ไม่สามารถเตรียมเส้นใยอิเล็กทรอนิกส์จากสารละลายพอลิแซ็กคาไรด์เจลบริสุทธิ์ได้ แม้จะมีการเติมสารลดแรงตึงผิว หรือการลดความหนืดของสารละลายพอลิแซ็กคาไรด์เจลด้วยวิธีต่าง ๆ ก็ตาม ดังนั้นในการทดลองนี้จึงทำการเตรียมเส้นใยจากสารละลายผสมของพอลิแซ็กคาไรด์เจลที่ผ่านการลดความหนืดโดยการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง ทั้งนี้เนื่องจากเป็นสภาวะที่ทำให้สารละลายพอลิแซ็กคาไรด์เจลมีค่าความหนืดลดลงและไม่เปลี่ยนแปลงตามระยะเวลา จากนั้นจึงเติมพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ ซึ่งเป็นพอลิเมอร์สังเคราะห์ที่ไม่มีประจุ โดยคาดว่าสายใยของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์จะสามารถเข้าแทรกระหว่างโมเลกุลของพอลิแซ็กคาไรด์เจลทำให้ช่วยลดแรงผลักระหว่างประจุ และส่งเสริมให้เกิดการเกี่ยวพันของสายใยโมเลกุลเพิ่มมากขึ้น ซึ่งผลการทดลองแสดงดังต่อไปนี้

4.1.4.1 การเตรียมเส้นใยจากสารละลายผสมของพอลิแซ็กคาไรด์เจลภายหลังจากการลดความหนืดและพอลิไวนิลแอลกอฮอล์

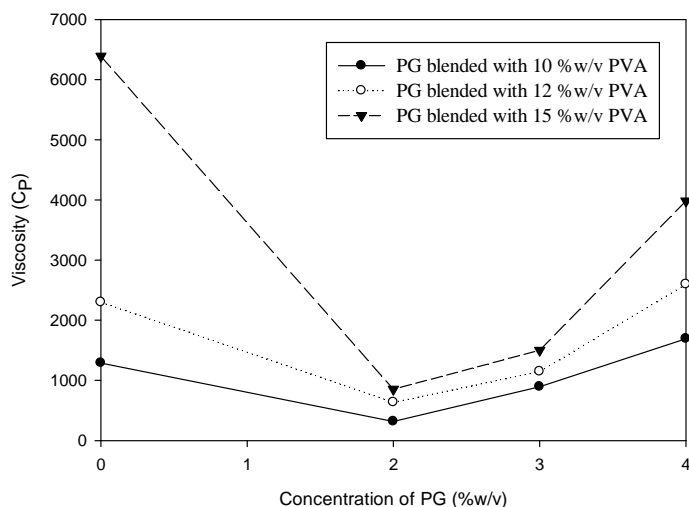
ก) สมบัติของสารละลายผสมระหว่างพอลิแซ็กคาไรด์เจลภายหลังจากการลดความหนืดและพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ

เมื่อทำการศึกษาสมบัติของสารละลายผสมระหว่างสารละลายพอลิแซ็กคาไรด์เจลที่ความเข้มข้นร้อยละ 2 3 และ 4 โดยนำหนักต่อปริมาตร ที่ผ่านการลดความหนืดโดยการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง และสารละลายพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่

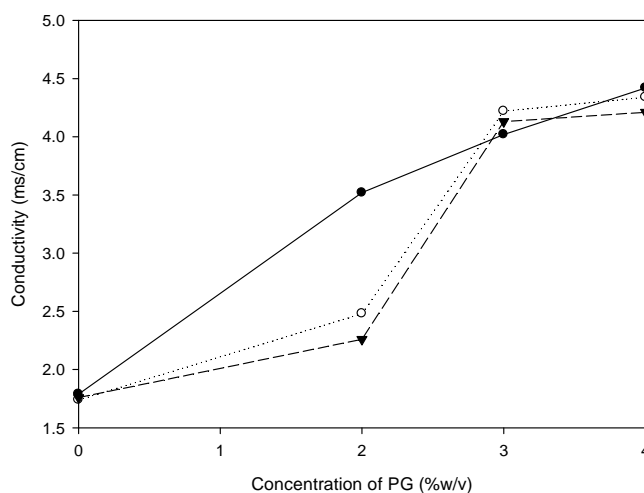
ความเข้มข้นร้อยละ 10 12 และ 15 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ที่มีอัตราส่วนโดยปริมาตรของพอลิเมอร์ทั้งสองชนิดเท่ากับ 50:50 เพื่อศึกษาความเข้มข้นของพอลิเมอร์ทั้งสองชนิดที่เหมาะสมต่อการเตรียมเส้นใยด้วยกระบวนการอิเล็กโตรสปินนิง จากนั้นจึงวัดค่าความหนืดและค่าการนำไฟฟ้าของสารละลายผสมเปรียบเทียบกับสมบัติของสารละลายพอลิเมอร์บริสุทธิ์ทั้งสองชนิด ดังแสดงในตารางที่ 4.4 ผลที่ได้พบว่า ค่าความหนืดของสารละลายผสมจะแปรผันตามความเข้มข้นของสารละลายทั้งสองชนิด กล่าวคือ เมื่อความเข้มข้นของสารละลายพอลิเมอร์ทั้งสองชนิดเพิ่มขึ้น จะส่งผลให้ค่าความหนืดของสารละลายผสมมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นด้วย ดังรูปที่ 4.14 ในขณะที่ค่าการนำไฟฟ้าของสารละลายผสมจะแปรผันตามความเข้มข้นของสารละลายพอลิแซ็กคาไรด์เจลแต่แปรผกผันกับความเข้มข้นของสารละลายพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ ทั้งนี้เนื่องจากสารละลายผสมที่มีความเข้มข้นของพอลิแซ็กคาไรด์เจลสูงจะมีปริมาณประจุลบในสารละลายมากกว่า จึงส่งผลให้ค่าการนำไฟฟ้าของสารละลายผสมมีแนวโน้มสูงขึ้น ในขณะที่สารละลายผสมที่มีความเข้มข้นของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์สูงจะมีความหนืดมาก ทำให้ความสามารถในการเคลื่อนที่ของประจุในสารละลายลดลงและส่งผลให้ค่าการนำไฟฟ้าของสารละลายผสมลดลงเมื่อความเข้มข้นของสารละลายพอลิไวนิลแอลกอฮอล์เพิ่มขึ้น ดังรูปที่ 4.15

ตารางที่ 4.4 ค่าความหนืดและค่าการนำไฟฟ้าของสารละลายพอลิแซ็กคาไรด์เจลและพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ

ตัวอย่าง	สารละลาย	ความเข้มข้น (%w/v)	ค่าความหนืด (Cp)	ค่าการนำไฟฟ้า (ms/cm)
1	PG	2	102	6.80
2		3	852	8.85
3		4	7,393	10.17
4	PVA	10	1,290	1.79
5		12	2,298	1.74
6		15	6,389	1.75



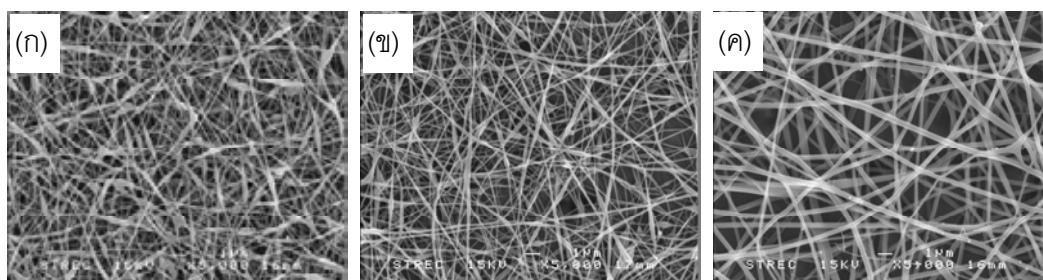
รูปที่ 4.14 ความหนืดของสารละลายผสมระหว่างสารละลายพอลิแซ็กคาไรด์เจลที่มีความเข้มข้นร้อยละ 2 3 และ 4 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร และสารละลายพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่มีความเข้มข้นร้อยละ 10 12 และ 15 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ที่มีอัตราส่วนโดยปริมาตรของพอลิเมอร์ทั้งสองชนิดเท่ากับ 50:50



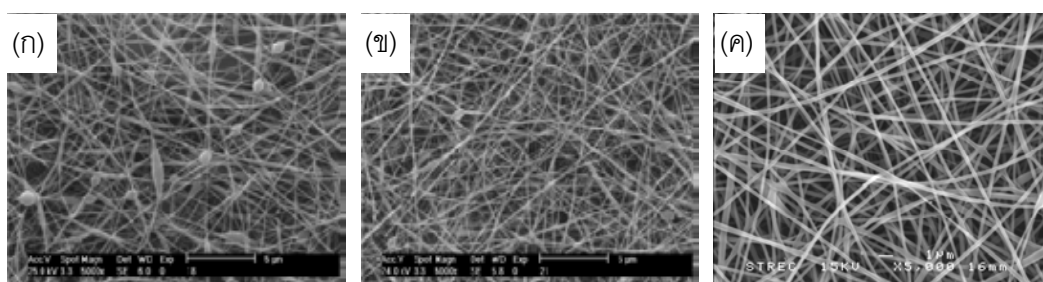
รูปที่ 4.15 ค่าการนำไฟฟ้าของสารละลายผสมระหว่างสารละลายพอลิแซ็กคาไรด์เจลที่มีความเข้มข้นร้อยละ 2 3 และ 4 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร และสารละลายพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่มีความเข้มข้นร้อยละ 10 12 และ 15 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ที่มีอัตราส่วนโดยปริมาตรของพอลิเมอร์ทั้งสองชนิดเท่ากับ 50:50

ข) ลักษณะเส้นใยผสมระหว่างพอลิแซ็กคาไรด์เจลที่ผ่านการลดความหนืดและพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่มีความเข้มข้นต่าง ๆ

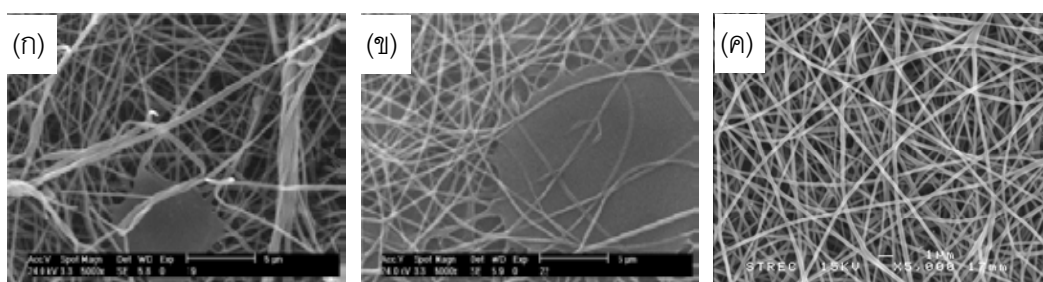
รูปที่ 4.16 4.17 และ 4.18 แสดงลักษณะของเส้นใยผสมที่เตรียมได้จากสารละลายผสมระหว่างพอลิแซ็กคาไรด์เจลและพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่เตรียมได้ตามขั้นตอน 4.1.4.1 ก) โดยมีอัตราส่วนโดยปริมาตรของพอลิเมอร์ทั้งสองชนิดเท่ากับ 50:50 เปรียบเทียบกับเส้นใยที่ได้จากสารละลายพอลิไวนิลแอลกอฮอล์บริสุทธิ์ที่ความเข้มข้นร้อยละ 10 12 และ 15 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ดังแสดงในรูปที่ 4.19



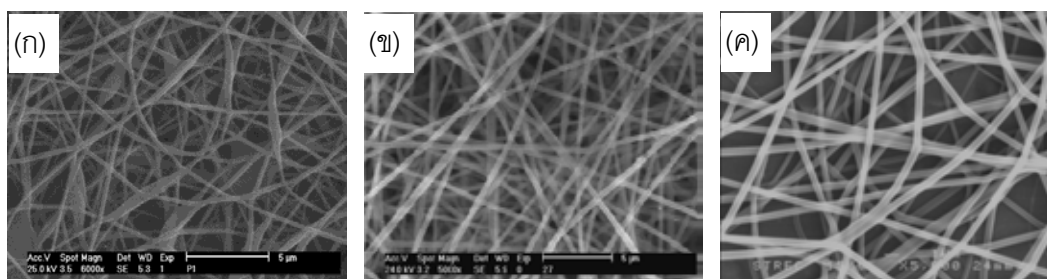
รูปที่ 4.16 ภาพถ่าย SEM เส้นใยที่ได้จากสารละลายผสมระหว่างพอลิแซ็กคาไรด์เจลที่ความเข้มข้นร้อยละ 2 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร และพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่ความเข้มข้น (ก) ร้อยละ 10 (ข) ร้อยละ 12 และ (ค) ร้อยละ 15 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร



รูปที่ 4.17 ภาพถ่าย SEM เส้นใยที่ได้จากสารละลายผสมระหว่างพอลิแซ็กคาไรด์เจลที่ความเข้มข้นร้อยละ 3 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร และพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่ความเข้มข้น (ก) ร้อยละ 10 (ข) ร้อยละ 12 และ (ค) ร้อยละ 15 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร

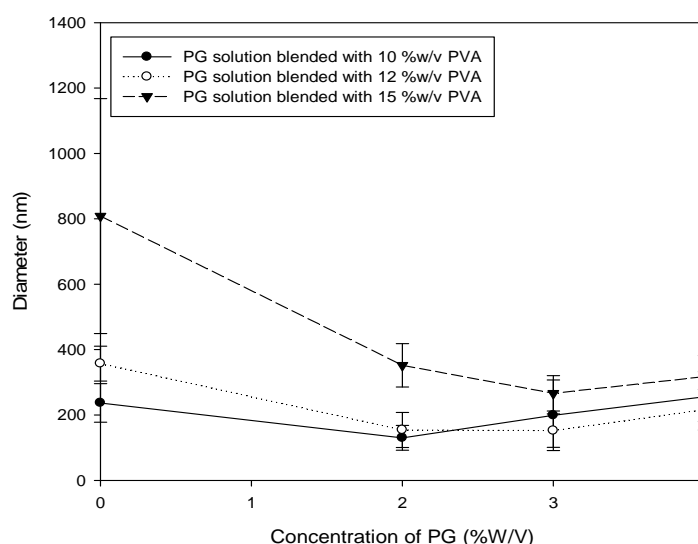


รูปที่ 4.18 ภาพถ่าย SEM เส้นใยที่ได้จากสารละลายผสมระหว่างพอลิแซ็กคาไรด์เจลที่ความเข้มข้นร้อยละ 4 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร และพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่ความเข้มข้น (ก) ร้อยละ 10 (ข) ร้อยละ 12 และ (ค) ร้อยละ 15 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร



รูปที่ 4.19 ภาพถ่าย SEM เส้นใยที่ได้จากสารละลายพอลิไวนิลแอลกอฮอล์บริสุทธิ์ที่ความเข้มข้น (ก) ร้อยละ 10 (ข) ร้อยละ 12 และ (ค) ร้อยละ 15 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร

จากการศึกษาสัณฐานวิทยาของเส้นใยผสมที่ได้จากกระบวนการอิเล็กโตรสปินนิง พบว่า เส้นใยที่ได้จากสารละลายผสมระหว่างพอลิแซ็กคาไรด์เจลาที่ความเข้มข้นต่ำ (ร้อยละ 2 และ 3 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร) และพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่ความเข้มข้นร้อยละ 10 และ 12 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร จะมีลักษณะของเม็ดปิดอยู่ในโครงสร้าง (Beads-on-string structure) ดังแสดงในรูปที่ 4.16(ก) 4.16(ข) และ 4.17(ก) และเมื่อความเข้มข้นของสารละลายเพิ่มมากขึ้น รูปร่างของเม็ดปิดที่พบจะมีลักษณะที่เรียวมากขึ้น ดังรูปที่ 4.17(ข) นอกจากนี้ยังพบว่า สารละลายที่มีความเข้มข้นสูงขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งในสารละลายผสมที่มีพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่ความเข้มข้นร้อยละ 15 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร จะได้เส้นใยเรียบไม่มีลักษณะของเม็ดปิด ดังรูปที่ 4.16 (ค) 4.17(ค) และ 4.18 โดยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อสารละลายผสมมีความเข้มข้นของพอลิเมอร์ทั้งสองชนิดสูงขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4.20



รูปที่ 4.20 ขนาดเฉลี่ยของเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยที่ได้จากสารละลายผสมที่มีความเข้มข้นแตกต่างกัน และมีอัตราส่วนโดยปริมาตรของพอลิเมอร์ทั้งสองชนิดเท่ากับ 50:50

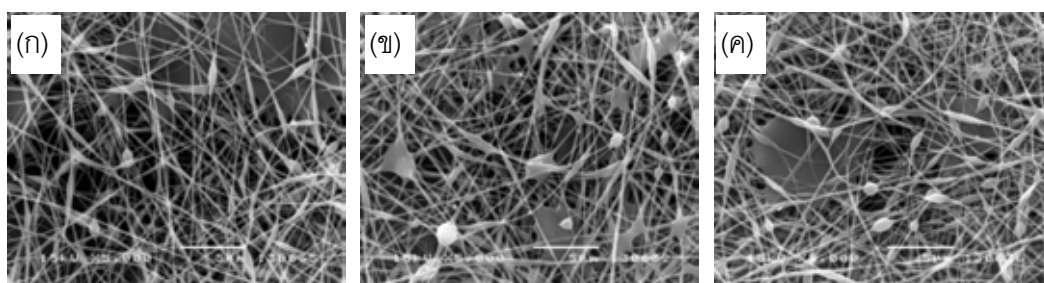
ทั้งนี้ลักษณะและขนาดของเส้นใยที่เตรียมได้สามารถอธิบายได้จากการศึกษาอิทธิพลของความเข้มข้นที่ส่งผลต่อสมบัติของสารละลายในหัวข้อ 4.1.4.1 ก) ซึ่งพบว่า ค่าความหนืดและค่าการนำไฟฟ้าของสารละลายจะเพิ่มขึ้นเมื่อสารละลายมีความเข้มข้นมากขึ้น ซึ่งปัจจัยทั้งสองค่านี้จะส่งผลต่อลักษณะและขนาดของเส้นใยที่ได้จากกระบวนการอิเล็กโตรสปินนิง กล่าวคือ เมื่อสารละลายมีค่าความหนืดเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้เส้นใยที่ได้มีขนาดใหญ่และเรียบขึ้น เนื่องจากความหนืดที่เพิ่มขึ้นนั้นเป็นผลมาจากสารละลายมีปริมาณสายโซ่โมเลกุลของพอลิเมอร์มากขึ้น จึงส่งผลให้เกิดการเกี่ยวพันของสายโซ่โมเลกุลพอลิเมอร์ที่เพียงพอ ทำให้เกิดการยึดดึงออกเป็นเส้นใยที่ต่อเนื่องได้ เส้นใยที่ได้จึงมีลักษณะของเม็ดปิดลดลง แต่อย่างไรก็ตามพบว่า ค่าความหนืดที่เพิ่มขึ้นนี้จะขัดขวางการยึดดึงของเส้นใยด้วยแรงทางไฟฟ้า ดังนั้นเส้นใยที่เตรียมได้จึงมีขนาดใหญ่ขึ้น ในทางกลับกันสารละลายที่มีค่าความหนืดต่ำจะส่งผลให้ได้เส้นใยที่เตรียมได้มีลักษณะของเม็ดเปิดเกิดขึ้น เนื่องจากสารละลายมีการเกี่ยวพันของสายโซ่โมเลกุลที่ไม่เพียงพอ ส่งผลให้เกิด Capillary instability บนลำสารละลายพอลิเมอร์ ทำให้ลำของสารละลายพอลิเมอร์เกิดการยึดตัวออกเป็นช่วง โดยช่วงที่มีการยึดตัวออกมากกว่าจะเกิดเป็นเส้นใยขนาดเล็ก และช่วงที่ไม่เกิดการยึดตัวจะเกิดเป็นเม็ดเปิด นอกจากนี้ยังพบว่า ค่าการนำไฟฟ้าของสารละลายยังเป็นอีกหนึ่งปัจจัยที่ส่งผลต่อลักษณะและขนาดของเส้นใยที่ได้จากกระบวนการอิเล็กโตรสปินนิง กล่าวคือ เมื่อค่าการนำไฟฟ้าของสารละลายเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้เส้นใยที่ได้มีขนาดเล็กลง ทั้งนี้สารละลายจะมีจำนวนประจุมากขึ้นเมื่อความเข้มข้นของสารละลายเพิ่มขึ้น ซึ่งจำนวนประจุที่มากขึ้นนี้จะส่งผลให้สารละลายพอลิเมอร์มีความสามารถในการยึดตัวออกเป็นเส้นใยเพิ่มขึ้นเมื่อได้รับแรงทางไฟฟ้า ส่งผลให้ได้เส้นใยที่มีขนาดเล็กลง แต่จากการทดลองนี้จะพบว่า ค่าความหนืดของสารละลายจะส่งผลต่อขนาดและลักษณะของสารละลายมากกว่าค่าการนำไฟฟ้าของสารละลาย

อย่างไรก็ตามพบว่า สารละลายผสมระหว่างพอลิแซ็กคาไรด์เจลาที่ความเข้มข้นร้อยละ 4 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร และพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่ความเข้มข้นร้อยละ 10 และ 12 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร จะเกิดการแยกชั้นของสารละลายผสม เมื่อตั้งสารละลายทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 20 นาที ดังแสดงในรูปที่ 4.21 ทั้งนี้เนื่องจากพอลิเมอร์ทั้งสองชนิดไม่ได้เกิดพันธะทางเคมีซึ่งกันและกัน แต่ผสมรวมกันได้ด้วย Hydrophilic interaction เช่น พันธะไฮโดรเจน ซึ่งเป็นพันธะที่ไม่แข็งแรงมากนัก ดังนั้นเมื่อสารละลายผสมมีสัดส่วนของพอลิแซ็กคาไรด์เจลาในปริมาณที่มากขึ้น จะส่งผลให้โมเลกุลของพอลิแซ็กคาไรด์เจลาเกิดการรวมตัวกันเองได้ง่ายขึ้นและแยกชั้นออกจากสารละลายพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ ดังนั้นสารละลายผสมที่ความเข้มข้นดังกล่าว จึงไม่เหมาะสมต่อการเตรียมเส้นใยด้วยกระบวนการอิเล็กโตรสปินนิงซึ่งต้องใช้ระยะเวลาในการเตรียมแผ่นเส้นใยให้ได้ความหนาที่เหมาะสมต่อการนำไปใช้งาน

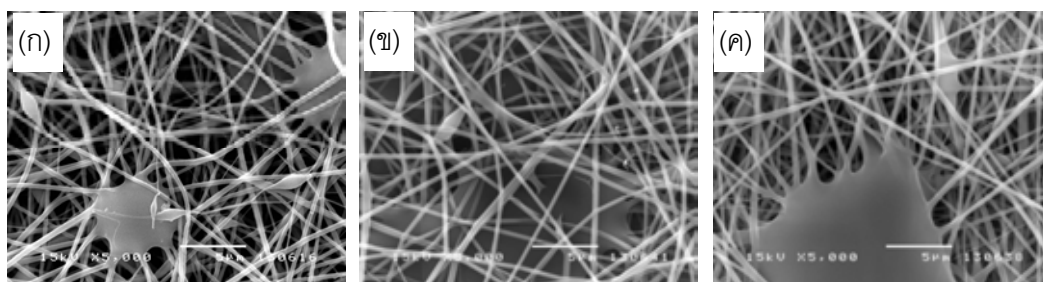


รูปที่ 4.21 สารละลายผสมระหว่างพอลิแซ็กคาไรด์เจลาที่ความเข้มข้นร้อยละ 4 โดยน้ำหนักต่อปริมาตรและพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่ความเข้มข้นร้อยละ 10 และ 12 โดยน้ำหนักต่อปริมาตรที่อัตราส่วนโดยปริมาตร PG:PVA เท่ากับ 50:50 เมื่อตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 20 นาที

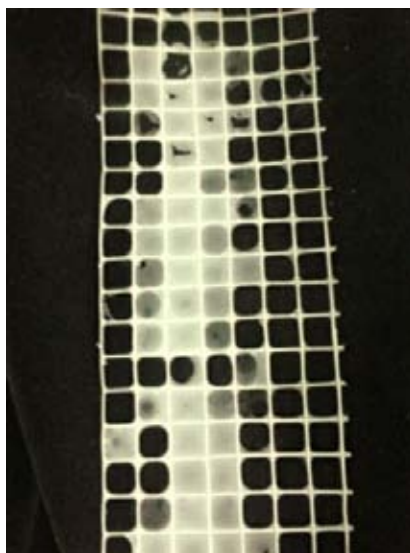
จากการทดลองข้างต้นสามารถสรุปได้ว่า เส้นใยที่ได้จากสารละลายผสมระหว่างพอลิแซ็กคาไรด์เจลาที่ความเข้มข้นร้อยละ 2 3 และ 4 โดยน้ำหนักต่อปริมาตรและพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ร้อยละ 15 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร จะได้เส้นใยที่มีลักษณะเรียบที่สุด จึงทำการปั่นเส้นใยที่ความเข้มข้นดังกล่าวเป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อให้ได้ความหนาที่เหมาะสมต่อการใช้งาน แต่อย่างไรก็ตามพบว่า ลักษณะและขนาดของเส้นใยที่ได้จะเริ่มมีลักษณะเปลี่ยนไป และเริ่มมีหยดของสารละลายขนาดใหญ่เกิดขึ้นเมื่อทำการปั่นเส้นใยเป็นระยะเวลา 1 ชั่วโมง ดังแสดงในรูปที่ 4.22 และเมื่อทำการปั่นเส้นใยเป็นเวลานานถึง 24 ชั่วโมง หยดของสารละลายที่เกิดขึ้นจะทำให้สูญเสียโครงสร้างของแผ่นเส้นใยบางส่วน ดังแสดงในรูปที่ 4.24 จึงไม่สามารถเตรียมให้อยู่ในรูปของแผ่นเส้นใยได้ แม้จะมีการเพิ่มสัดส่วนของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ซึ่งเป็นพอลิเมอร์สังเคราะห์ โดยการปรับให้อัตราส่วนโดยปริมาตรระหว่างพอลิแซ็กคาไรด์เจลาและพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (PG:PVA) เท่ากับ 40:60 ก็ตาม ซึ่งพบว่า ลักษณะของเส้นใยที่มีขนาดใหญ่และเรียบขึ้น แต่อย่างไรก็ตามจะเริ่มพบหยดของสารละลายเมื่อทำการปั่นเส้นใยเป็นระยะเวลา 2 ชั่วโมง ดังรูป 4.23



รูปที่ 4.22 เส้นใยที่ได้จากสารละลายผสมระหว่างพอลิแซ็กคาไรด์เจลาที่ความเข้มข้น (ก) ร้อยละ 2 (ข) ร้อยละ 3 และ (ค) ร้อยละ 4 และพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่ความเข้มข้นร้อยละ 15 โดยน้ำหนักต่อปริมาตรที่อัตราส่วนโดยปริมาตร PG:PVA เท่ากับ 50:50 เมื่อทำการปั่นเส้นใยเป็นเวลานาน 1 ชั่วโมง



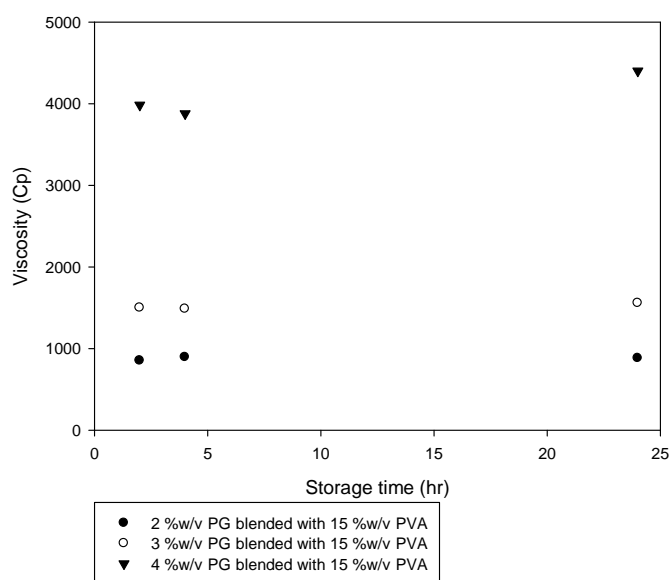
รูปที่ 4.23 เส้นใยที่ได้จากสารละลายผสมระหว่างพอลิแซ็กคาไรด์เจลที่ความเข้มข้น (ก) ร้อยละ 2 (ข) ร้อยละ 3 และ (ค) ร้อยละ 4 และพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่ความเข้มข้น ร้อยละ 15 โดยน้ำหนักต่อปริมาตรที่อัตราส่วนโดยปริมาตร PG: PVA เท่ากับ 40:60 เมื่อทำการปั่นเส้นใยเป็นเวลานาน 2 ชั่วโมง



รูปที่ 4.24 แผ่นเส้นใยที่ได้จากสารละลายผสมระหว่างพอลิแซ็กคาไรด์เจลที่ความเข้มข้นร้อยละ 3 และพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่ความเข้มข้นร้อยละ 15 โดยน้ำหนักต่อปริมาตรที่อัตราส่วนโดยปริมาตร PG:PVA เท่ากับ 50:50 เมื่อทำการปั่นเส้นใยเป็นเวลานาน 24 ชั่วโมง

จากปัญหาที่เกิดขึ้นจากการทดลองข้างต้น ทำให้ผู้วิจัยทำการศึกษาสมบัติและลักษณะทางกายภาพของสารละลายผสมที่เปลี่ยนแปลงไปตามระยะเวลา โดยการวัดค่าความหนืด และสังเกตลักษณะทางกายภาพของสารละลายผสมระหว่างพอลิแซ็กคาไรด์เจลที่ความเข้มข้นร้อยละ 2 3 และ 4 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร และพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่ความเข้มข้นร้อยละ 15 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ที่อัตราส่วนโดยปริมาตรของพอลิแซ็กคาไรด์เจลและพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (PG:PVA) เท่ากับ 50:50 ซึ่งตั้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 2 4 และ 24 ชั่วโมง พบว่าสารละลายผสมจะไม่มี การเปลี่ยนแปลงค่าความหนืดมากนัก ดังแสดงในรูปที่ 4.25 แต่จะมีลักษณะทางกายภาพที่เปลี่ยนแปลงไปอย่างชัดเจน กล่าวคือ สารละลายผสมจะเกิดการแยกส่วน โดยมี

ลักษณะของเม็ดเจลเล็ก ๆ ของพอลิแซ็กคาไรด์เจลกระจายอยู่ในสารละลายพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ เมื่อตั้งสารละลายผสมทิ้งไว้เป็นระยะเวลา 1 ชั่วโมง นอกจากนี้ยังพบว่า สารละลายผสมที่มีสัดส่วนของพอลิแซ็กคาไรด์เจลลดลงจะใช้เวลานานขึ้นในการเกิดการแยกส่วนของสารละลาย โดยพบว่า สารละลายผสมที่มีสัดส่วนของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์เพิ่มขึ้นที่อัตราส่วนโดยปริมาตรของพอลิแซ็กคาไรด์เจลและพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (PG:PVA) เท่ากับ 40:60 จะเกิดการแยกส่วนของพอลิแซ็กคาไรด์เจลเมื่อเก็บไว้เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ทั้งนี้่าจะมีสาเหตุมาจากการที่โมเลกุลของพอลิแซ็กคาไรด์เจลซึ่งสกัดได้จากเปลือกทุเรียนมีการกระจายตัวของน้ำหนักโมเลกุลที่กว้างมาก ประกอบไปด้วยสายโซ่โมเลกุลที่มีมวลโมเลกุลสูงและต่ำ ซึ่งมีความสามารถในการละลายที่ต่างกัน โดยสายโซ่โมเลกุลที่มีความยาวมาก หรือที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงจะละลายในตัวทำละลายได้น้อย โดยจะพองตัวและแขวนลอยอยู่ในสารละลาย ซึ่งสามารถสังเกตได้จากลักษณะทางกายภาพของสารละลายมีลักษณะขุ่น ดังนั้นเมื่อตั้งสารละลายทิ้งไว้โดยปราศจากการกวน หรือได้รับแรงกระทำจากภายนอก จะทำให้สายโซ่โมเลกุลที่ไม่สามารถละลายได้เหล่านี้เกิดการรวมตัว และเหนียวนำไปให้เกิดการแยกส่วนออกจากสารละลายผสม ซึ่งการรวมตัวของพอลิแซ็กคาไรด์เจลที่ไม่สามารถละลายน้ำได้จะขัดขวางการยืดดึงออกเป็นเส้นใยด้วยแรงทางไฟฟ้า และส่งผลให้เกิดหยดของสารละลายเมื่อทำการปั่นเส้นใยด้วยกระบวนการอิเล็กโทรสปินนิงในระยะเวลา 1 ชั่วโมง



รูปที่ 4.25 ความหนืดของสารละลายผสมระหว่างพอลิแซ็กคาไรด์เจลที่ความเข้มข้นร้อยละ 2 3 และ 4 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร และพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่ความเข้มข้นร้อยละ 15 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ที่อัตราส่วนโดยปริมาตร PG:PVA เท่ากับ 50:50 เมื่อตั้งสารละลายทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 2 4 และ 24 ชั่วโมง

4.1.4.2 การเตรียมแผ่นเส้นใยอิเล็กทรอนิกส์จากสารละลายผสมระหว่างพอลิแซ็กคาไรด์ เจลภายหลังปั่นเหวี่ยงแยกตะกอนและพอลิไวนิลแอลกอฮอล์

จากการทดลอง 4.1.4.1 พบว่า การเติมพอลิไวนิลแอลกอฮอล์จะช่วยเพิ่มความสามารถในการเตรียมเส้นใยด้วยกระบวนการอิเล็กทรอนิกส์ แต่อย่างไรก็ตามพบว่า ไม่สามารถเตรียมเส้นใยเป็นระยะเวลาสั้นเพื่อให้ได้ความหนาที่เหมาะสมต่อการใช้งานได้ ทั้งนี้เนื่องจากข้อจำกัดทางด้านการละลายของพอลิแซ็กคาไรด์เจลบางส่วนที่มีสายโซ่พอลิเมอร์น้ำหนักโมเลกุลสูง หรือมีความยาวของสายโซ่มาก ทำให้ไม่สามารถละลายในตัวทำละลายได้ ซึ่งการละลายอย่างไม่สมบูรณ์นี้จะขัดขวางการยึดติดออกเป็นเส้นใยที่ต่อเนื่องด้วยแรงทางไฟฟ้า ดังนั้นในการทดลองนี้จึงได้ทำการปั่นเหวี่ยงแยกตะกอนของสารละลายพอลิแซ็กคาไรด์เจล เพื่อกำจัดพอลิแซ็กคาไรด์เจลส่วนที่ไม่สามารถละลายได้อย่างสมบูรณ์ออกก่อนจะทำการผสมกับสารละลายพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ เพื่อเพิ่มความสามารถในการปั่นเส้นใยด้วยกระบวนการอิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้ระยะเวลานาน ซึ่งผลการทดลองแสดงดังต่อไปนี้

ก) การเตรียมสารละลายพอลิแซ็กคาไรด์เจลโดยการปั่นเหวี่ยงแยกตะกอน

จากการศึกษาการละลายของพอลิแซ็กคาไรด์เจลโดยใช้น้ำเป็นตัวทำละลายพบว่า สารละลายพอลิแซ็กคาไรด์เจลที่ได้มีสีส้มขุ่น เนื่องจากสายโซ่โมเลกุลของพอลิแซ็กคาไรด์เจลบางส่วนมีน้ำหนักโมเลกุลสูงหรือมีสายโซ่ยาวจึงไม่สามารถละลายน้ำได้ แต่จะพองตัวและแขวนลอยอยู่ในสารละลาย ซึ่งจะก่อให้เกิดปัญหาในกระบวนการผลิตบางประเภทที่มีความสำคัญในระดับอนุภาค เช่น กระบวนการอิเล็กทรอนิกส์ ดังนั้นในการทดลองนี้จึงได้นำสารละลายพอลิแซ็กคาไรด์เจลที่ผ่านการลดความหนืดโดยการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง มาทำการแยกพอลิแซ็กคาไรด์เจลส่วนที่ไม่สามารถละลายน้ำได้ออกโดยอาศัยการปั่นเหวี่ยงแยกตะกอนที่ความเร็วรอบ 4400 รอบต่อนาที อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 60 นาที จากนั้นจึงศึกษาความเข้มข้นของสารละลายพอลิแซ็กคาไรด์เจลภายหลังการปั่นเหวี่ยงแยกตะกอน พร้อมทั้งศึกษาสมบัติต่าง ๆ ของสารละลาย ได้แก่ ค่าความหนืด ค่าการนำไฟฟ้า และค่าความเป็นกรดต่างของสารละลายพอลิแซ็กคาไรด์เจลทั้งก่อนและหลังการปั่นเหวี่ยงแยกตะกอน

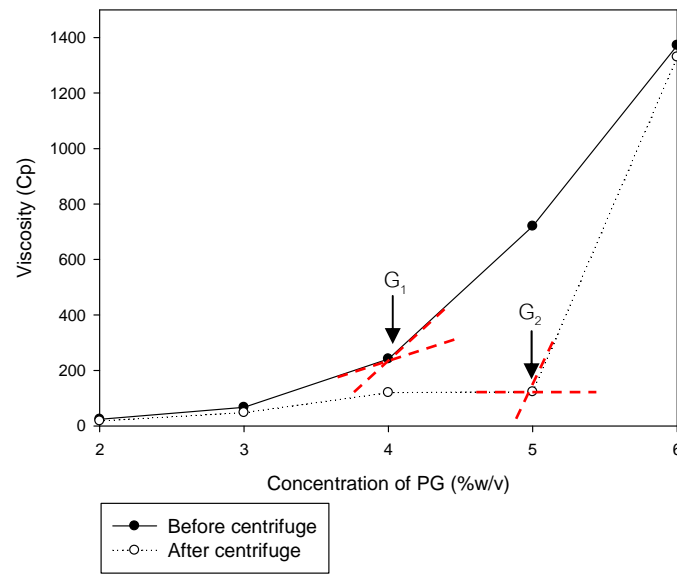
จากการทดลองทำการปั่นเหวี่ยงแยกตะกอนของสารละลายพอลิแซ็กคาไรด์เจลที่ความเข้มข้นร้อยละ 2 3 4 5 และ 6 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร เพื่อนำส่วนที่ไม่สามารถละลายในน้ำได้ออก จากนั้นนำสารละลายใสส่วนบน (Supernatant PG solution) มาทำการวิเคราะห์ปริมาณพอลิแซ็กคาไรด์เจลที่สามารถละลายน้ำได้ พบว่า สารละลายพอลิแซ็กคาไรด์เจลที่ความเข้มข้นร้อยละ 2 3 4 5 และ 6 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร จะมีความเข้มข้นของสารละลายภายหลังการปั่น

เหวี่ยงแยกตะกอนเท่ากับร้อยละ 1.47 2.39 3.40 4.42 และ 5.05 ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 4.5 โดยสารละลายพอลิแซ็กคาไรด์เจลที่ความเข้มข้นต่ำ (ร้อยละ 2 และ 3 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร) จะมีปริมาณพอลิแซ็กคาไรด์เจลที่ตกตะกอนมากกว่าสารละลายพอลิแซ็กคาไรด์เจลที่มีความเข้มข้นสูง (ร้อยละ 4 5 และ 6 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร) ทั้งนี้เนื่องจากสารละลายพอลิแซ็กคาไรด์เจลที่ความเข้มข้นต่ำจะมีความหนืดต่ำ ดังนั้นเมื่อทำการปั่นเหวี่ยงแยกตะกอนจะทำให้พอลิแซ็กคาไรด์เจลส่วนที่ไม่สามารถละลายน้ำได้ตกลงสู่ด้านล่างของหลอดได้ง่ายและรวดเร็วกว่าในระยะเวลาการปั่นเหวี่ยงที่เท่ากัน

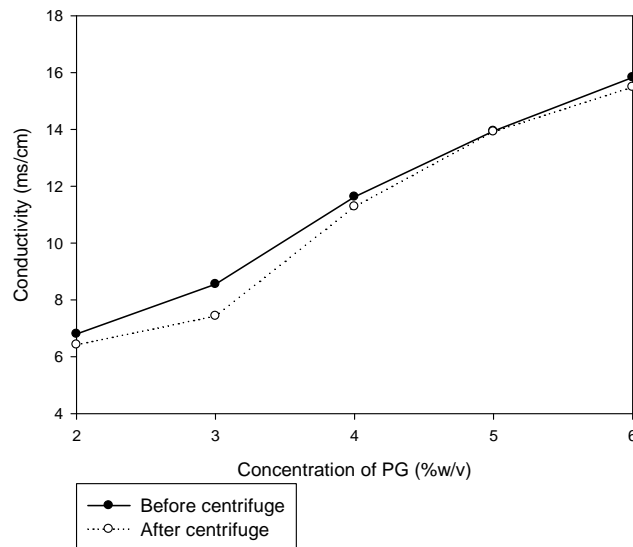
ตารางที่ 4.5 ความเข้มข้นและปริมาณของพอลิแซ็กคาไรด์เจลที่สามารถละลายน้ำได้ภายหลังการปั่นเหวี่ยงแยกตะกอนที่ความเร็วรอบ 4400 รอบต่อนาที อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 60 นาที

ความเข้มข้นของ PG ก่อนเหวี่ยงแยก ตะกอน (%w/v)	ความเข้มข้นของ สารละลาย PG หลัง เหวี่ยงแยกตะกอน±SD (%w/v)	ร้อยละของน้ำหนัก PG ที่ ตกตะกอน±SD (%)
2	1.67±0.09	16.33±4.48
3	2.48±0.01	17.44±0.19
4	3.40±0.08	14.92±1.89
5	4.42±0.04	11.67±0.70
6	5.05±0.07	15.78±1.17

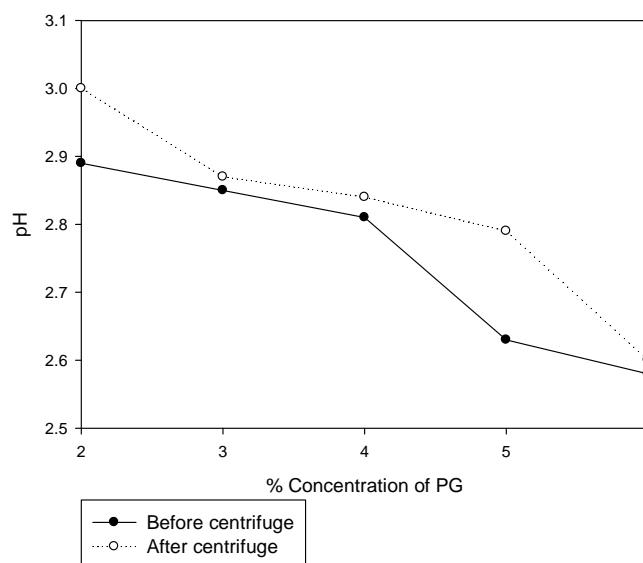
เมื่อทำการศึกษาสมบัติของสารละลายพอลิแซ็กคาไรด์เจลก่อนและหลังการปั่นเหวี่ยงแยกตะกอนพบว่า ค่าความหนืดและค่าการนำไฟฟ้าของสารละลายพอลิแซ็กคาไรด์เจลหลังการปั่นเหวี่ยงตะกอนมีค่าลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับค่าความหนืดและค่าการนำไฟฟ้าของสารละลายพอลิแซ็กคาไรด์เจลก่อนทำการปั่นเหวี่ยงแยกตะกอน ดังแสดงในรูปที่ 4.26 และ 4.27 ตามลำดับ ในขณะที่ค่าความเป็นกรดต่างของสารละลายมีค่าเพิ่มขึ้นดังรูปที่ 4.28 ทั้งนี้เนื่องจากการปั่นเหวี่ยงแยกตะกอนของสารละลายพอลิแซ็กคาไรด์เจลนั้นจะทำให้เกิดการสูญเสียพอลิแซ็กคาไรด์เจลที่ไม่สามารถละลายน้ำได้ไปบางส่วน จึงทำให้ปริมาณสายโซ่พอลิเมอร์ในสารละลายลดลง



รูปที่ 4.26 ความหนืดของสารละลายพอลิแซ็กคาไรด์เจลาที่ความเข้มข้นร้อยละ 2 3 4 5 และ 6 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ก่อนและหลังการปั่นเหวี่ยงแยกตะกอนของสารละลาย



รูปที่ 4.27 ค่าการนำไฟฟ้าของสารละลายพอลิแซ็กคาไรด์เจลาที่ความเข้มข้นร้อยละ 2 3 4 5 และ 6 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ก่อนและหลังการปั่นเหวี่ยงแยกตะกอนของสารละลาย



รูปที่ 4.28 ค่าความเป็นกรดต่างของสารละลายพอลิแซ็กคาไรด์เจลที่ความเข้มข้นร้อยละ 2 3 4 5 และ 6 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ก่อนและหลังการปั่นเหวี่ยงแยกตะกอนของสารละลาย

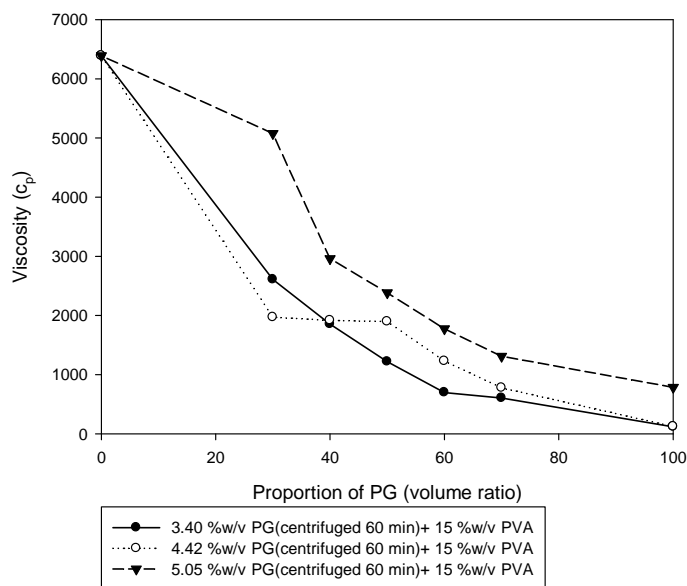
เมื่อพิจารณาค่าความหนืดของสารละลายพอลิแซ็กคาไรด์เจลหลังทำการปั่นเหวี่ยงแยกตะกอนที่ความเข้มข้นร้อยละ 2 3 4 5 และ 6 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร พบว่า สารละลายมีค่าความหนืดลดลงร้อยละ 24 28 50 83 และ 3 ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับความหนืดของสารละลายพอลิแซ็กคาไรด์เจลก่อนทำการปั่นเหวี่ยงแยกตะกอน ดังแสดงในรูปที่ 4.26 ซึ่งจะสังเกตเห็นว่า สารละลายที่มีความเข้มข้นร้อยละ 4 และ 5 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร จะมีการลดลงของค่าความหนืดสูงถึงร้อยละ 50 และ 83 ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจากสารละลายพอลิแซ็กคาไรด์เจลก่อนทำการปั่นเหวี่ยงแยกตะกอนจะมีความเข้มข้นเริ่มต้นในการเกิดเจลตั้งแต้อ้อยละ 4 โดยน้ำหนักต่อปริมาตรขึ้นไป ดังนั้นที่ความเข้มข้นดังกล่าวจึงมีค่าความหนืดสูงขึ้นมาอย่างฉับพลัน ณ จุด G_1 แต่เมื่อทำการปั่นเหวี่ยงแยกตะกอนจะทำให้สารละลายพอลิแซ็กคาไรด์เจลมีความเข้มข้นลดลงจากเดิมคือ ร้อยละ 4 และ 5 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร เป็นร้อยละ 3.40 และ 4.42 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ซึ่งมีค่าน้อยกว่าค่าความเข้มข้นที่สามารถเกิดเจลได้ ดังนั้นค่าความหนืดของสารละลายพอลิแซ็กคาไรด์เจลจึงลดลงจากค่าความหนืดเดิมอย่างมาก แต่อย่างไรก็ตามพบว่า ค่าความหนืดหลังทำการปั่นเหวี่ยงแยกตะกอนของสารละลายพอลิแซ็กคาไรด์เจลที่มีความเข้มข้นร้อยละ 6 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร จะไม่เปลี่ยนแปลงหรือลดลงมากนัก ทั้งนี้เนื่องจากสารละลายพอลิแซ็กคาไรด์เจลหลังทำการปั่นเหวี่ยงแยกตะกอนมีความเข้มข้นมากกว่าร้อยละ 5 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ซึ่งที่ความเข้มข้นนี้ สารละลายยังคงสามารถเกิดเจลได้ ซึ่งสังเกตได้จากความหนืดที่เพิ่มขึ้นอย่างฉับพลัน ณ จุด G_2 (รูปที่ 4. 26)

ข) สมบัติของสารละลายผสมระหว่างพอลิแซ็กคาไรด์เจลที่ผ่านการปั่นเหวี่ยงแยกตะกอนและพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่ความเข้มข้นและอัตราส่วนโดยปริมาตรของพอลิเมอร์ทั้งสองที่แตกต่างกัน

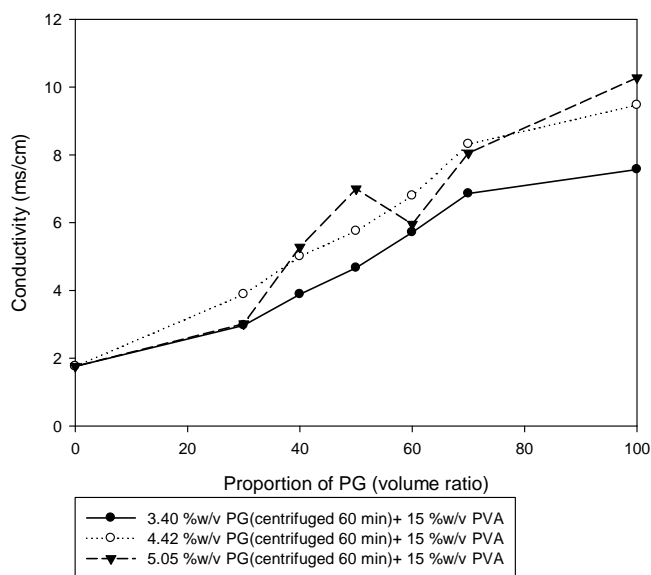
ในการทดลองนี้ได้ทำการเตรียมสารละลายผสมระหว่างสารละลายพอลิแซ็กคาไรด์เจลที่มีความเข้มข้นภายหลังการปั่นเหวี่ยงแยกตะกอนตามขั้นตอนที่ 4.1.4.2 ก) เท่ากับร้อยละ 3.40 4.42 และ 5.05 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร และสารละลายพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่ความเข้มข้นร้อยละ 15 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ในอัตราส่วนโดยปริมาตรของพอลิแซ็กคาไรด์เจลและพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (PG:PVA) เท่ากับ 70:30 60:40 50:50 40:60 30:70 และ 0:100 จากนั้นทำการศึกษาสมบัติของสารละลายผสมซึ่งจะพบว่า สมบัติของสารละลายผสมจะขึ้นอยู่กับปัจจัยหลัก 2 ปัจจัยคือ ความเข้มข้นของสารละลายพอลิแซ็กคาไรด์เจล และอัตราส่วนโดยปริมาตรของพอลิแซ็กคาไรด์เจลและพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ ดังนี้

1) อิทธิพลของความเข้มข้นของสารละลายพอลิแซ็กคาไรด์เจลภายหลังการปั่นเหวี่ยงแยกตะกอนต่อสมบัติของสารละลายผสม

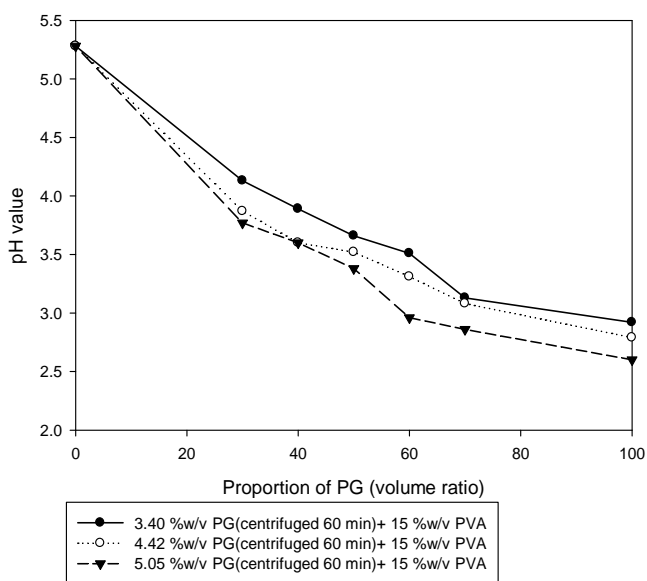
เมื่อศึกษาอิทธิพลของความเข้มข้นของพอลิแซ็กคาไรด์เจลที่มีต่อสมบัติของสารละลายผสม โดยพิจารณาจากสารละลายผสมที่มีอัตราส่วนเดียวกันจะพบว่า ค่าความหนืดของสารละลายผสมจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อสารละลายผสมมีความเข้มข้นของพอลิแซ็กคาไรด์เจลเพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4.29 นอกจากนี้ยังพบว่า ปริมาณพอลิแซ็กคาไรด์เจลที่เพิ่มมากขึ้นในสารละลายผสม จะส่งผลให้มีประจุลบที่เกิดจากการแตกตัวของกรดน้ำตาลกาแลกทูโรนิกเพิ่มขึ้น ทำให้สารละลายผสมมีค่าการนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4.30 และพบว่า ค่าความเป็นกรดต่าง (pH) ของสารละลายผสมจะลดลงเมื่อสารละลายมีความเข้มข้นของพอลิแซ็กคาไรด์เจลเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากปริมาณกรดน้ำตาลกาแลกทูโรนิกในสารละลายผสมที่มากขึ้น จะส่งผลให้สารละลายแสดงสมบัติความเป็นกรดมากขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4.31 ทั้งนี้พบว่า สารละลายผสมจะมีค่าความกรดต่าง (pH) ประมาณ 3.5 ถึง 4 ซึ่งยังคงแสดงสมบัติความเป็นกรดของพอลิแซ็กคาไรด์เจลไว้ได้เป็นอย่างดีแม้จะมีการเติมพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ในอัตราส่วนโดยปริมาตรถึงร้อยละ 70 ก็ตาม



รูปที่ 4.29 ความหนืดของสารละลายผสมระหว่างสารละลายพอลิแซ็กคาไรด์เจลาภายหลังการปั่นเหวี่ยงแยกตะกอนที่ความเข้มข้นร้อยละ 3.40 4.42 และ 5.05 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร กับสารละลายพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่ความเข้มข้นร้อยละ 15 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ในอัตราส่วนโดยปริมาตรที่แตกต่างกัน



รูปที่ 4.30 ค่าการนำไฟฟ้าของสารละลายผสมระหว่างสารละลายพอลิแซ็กคาไรด์เจลาภายหลังการปั่นเหวี่ยงแยกตะกอนที่ความเข้มข้นร้อยละ 3.40 4.42 และ 5.05 โดยน้ำหนักต่อปริมาตรกับสารละลายพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่ความเข้มข้นร้อยละ 15 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ในอัตราส่วนโดยปริมาตรที่แตกต่างกัน



รูปที่ 4.31 ค่าความเป็นกรดต่าง (pH) ของสารละลายผสมระหว่างสารละลายพอลิแซ็กคาไรด์เจลดภายหลังการปั่นเหวี่ยงแยกตะกอนที่ความเข้มข้นร้อยละ 3.40 4.42 และ 5.05 โดยน้ำหนักต่อปริมาตรกับสารละลายพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่ความเข้มข้นร้อยละ 15 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ในอัตราส่วนโดยปริมาตรที่แตกต่างกัน

2) อิทธิพลของอัตราส่วนโดยปริมาตรของสารละลายพอลิแซ็กคาไรด์เจลดและพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ต่อสมบัติของสารละลายผสม

เมื่อศึกษาอิทธิพลของอัตราส่วนโดยปริมาตรของสารละลายพอลิแซ็กคาไรด์เจลดและพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่มีต่อสมบัติของสารละลายผสม โดยพิจารณาที่สารละลายผสมที่มีความเข้มข้นเท่ากันจะพบว่า ค่าความหนืดของสารละลายผสมจะมีค่าลดลงเมื่อสารละลายผสมมีสัดส่วนของสารละลายพอลิแซ็กคาไรด์เจลดมากขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4.29 ทั้งนี้เนื่องจากสารละลายพอลิแซ็กคาไรด์เจลดที่ความเข้มข้นร้อยละ 3.40 4.42 และ 5.05 จะมีค่าความหนืดที่ต่ำกว่าสารละลายพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่ความเข้มข้นร้อยละ 15 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร อย่างมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งสารละลายพอลิแซ็กคาไรด์เจลดที่มีความเข้มข้นร้อยละ 3.40 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร จะมีความหนืดต่ำกว่าค่าความหนืดของสารละลายพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่ความเข้มข้นร้อยละ 15 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ถึง 10 เท่า ดังนั้นเมื่อสารละลายผสมมีสัดส่วนของสารละลายพอลิแซ็กคาไรด์เจลดมากขึ้นจะทำให้ค่าความหนืดของสารละลายผสมมีแนวโน้มลดลง นอกจากนี้ยังพบว่า สัดส่วนพอลิแซ็กคาไรด์เจลดที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้สารละลายผสมมีค่าการนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้น

แต่จะมีค่าความเป็นกรดต่าง (pH) ของสารละลายผสมลดลง อันเนื่องมาจากปริมาณสายโซ่โมเลกุลของพอลิแซ็กคาไรด์เจลที่มากขึ้นนั่นเอง

อย่างไรก็ตามพบว่า สารละลายผสมระหว่างพอลิแซ็กคาไรด์เจลที่ผ่านการปั่นเหวี่ยงแยกตะกอนและพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่มีอัตราส่วนโดยปริมาตร PG:PVA เท่ากับ 70:30 จะเกิดการแยกเฟสของสารละลายพอลิแซ็กคาไรด์เจลออกจากสารละลายพอลิไวนิลแอลกอฮอล์เมื่อตั้งสารละลายผสมทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 30 นาที ทั้งนี้เนื่องจากพอลิเมอร์ทั้งสองชนิดไม่ได้เกิดพันธะทางเคมีซึ่งกันและกันดังที่ได้กล่าวมาแล้ว ดังนั้นเมื่อสารละลายผสมมีสัดส่วนของพอลิแซ็กคาไรด์เจลในปริมาณที่มากกว่า พอลิแซ็กคาไรด์เจลจะสามารถรวมตัวกันเองและแยกชั้นออกมาจากสารละลายพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ได้มากขึ้น ดังนั้นสารละลายผสมที่มีอัตราส่วนโดยปริมาตร PG:PVA เท่ากับ 70:30 จึงไม่เหมาะสมต่อการนำมาปั่นเป็นเส้นใยด้วยกระบวนการอิเล็กโทรสปินนิง

เมื่อทำการศึกษาสมบัติของสารละลายผสมของพอลิแซ็กคาไรด์เจลและพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ก่อนและหลังทำการปั่นเหวี่ยงแยกตะกอน โดยเปรียบเทียบสารละลายผสมที่ได้จากสารละลายพอลิแซ็กคาไรด์เจลที่ความเข้มข้นร้อยละ 4 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ก่อนและหลังทำการปั่นเหวี่ยงแยกตะกอนที่อัตราส่วนโดยปริมาตรของพอลิแซ็กคาไรด์เจลและพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (PG:PVA) เท่ากับ 50:50 จะพบว่า การปั่นเหวี่ยงแยกตะกอนของสารละลายพอลิแซ็กคาไรด์เจลที่ความเข้มข้นร้อยละ 4 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ก่อนผสมกับสารละลายพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่ความเข้มข้นร้อยละ 15 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร จะทำให้ค่าความหนืดของสารละลายผสมลดลงอย่างมากจาก 3,983 เซนติพอยส์ เป็น 1,220 เซนติพอยส์ ทั้งนี้เนื่องจากการปั่นเหวี่ยงแยกตะกอนจะสามารถกำจัดพอลิแซ็กคาไรด์เจลส่วนที่ไม่ละลายน้ำและส่งผลให้เกิดเจลออกไป ค่าความหนืดของสารละลายผสมจึงมีค่าลดลงนั่นเอง

ค) ลักษณะเส้นใยอิเล็กโทรสปินที่เตรียมจากสารละลายผสมระหว่างพอลิแซ็กคาไรด์เจลที่ผ่านการปั่นเหวี่ยงแยกตะกอนและพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่ความเข้มข้นและอัตราส่วนโดยปริมาตรของพอลิเมอร์ทั้งสองที่แตกต่างกัน

จากการทดลองเตรียมเส้นใยจากสารละลายผสมระหว่างสารละลายพอลิแซ็กคาไรด์เจลที่ผ่านการปั่นเหวี่ยงแยกตะกอนและสารละลายพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่ความเข้มข้นและอัตราส่วนโดยปริมาตรของพอลิแซ็กคาไรด์เจลต่อพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่แตกต่างกันพบว่า การปั่นเหวี่ยงแยกตะกอนของสารละลายพอลิแซ็กคาไรด์เจลก่อนทำการผสมสารละลายพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ จะช่วยเพิ่มความสามารถในการปั่นเส้นใย ซึ่งสังเกตได้จากลักษณะกรวย

เทเลอร์ของสารละลายที่อยู่ปลายเข็มจะถูกยึดดึงออกเป็นเส้นใยอย่างสม่ำเสมอ ซึ่งแสดงถึงการเกี่ยวพันของสายโซ่โมเลกุลในสารละลายผสมที่เพียงพอ อีกทั้งยังไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงสมบัติและลักษณะทางกายภาพของสารละลายผสมเมื่อเวลาผ่านไป ทำให้สามารถเตรียมเส้นใยจากสารละลายผสมได้เป็นระยะเวลาจนถึง 24 ชั่วโมง จนได้ความหนาที่เหมาะสม

จากการศึกษาพื้นฐานวิทยาของเส้นใย พบว่า ลักษณะและขนาดของเส้นใยที่เตรียมได้จากสารละลายผสมระหว่างพอลิแซ็กคาไรด์เจลและพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ขึ้นอยู่กับปัจจัยหลัก 3 ปัจจัย ได้แก่ อัตราส่วนโดยปริมาตรระหว่างพอลิแซ็กคาไรด์เจลและพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ ความเข้มข้นของสารละลายพอลิแซ็กคาไรด์เจล และความต่างศักย์ทางไฟฟ้าที่ให้แก่สารละลายผสมที่มีผลต่อลักษณะและขนาดของเส้นใยที่เตรียมได้ด้วยกระบวนการอิเล็กโทรสปินนิง ดังนี้

1) อิทธิพลของอัตราส่วนโดยปริมาตรระหว่างพอลิแซ็กคาไรด์เจลและพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ต่อลักษณะและขนาดของเส้นใยที่เตรียมได้

จากการศึกษาอิทธิพลของอัตราส่วนโดยปริมาตรของพอลิแซ็กคาไรด์เจลและพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ต่อขนาดและลักษณะของเส้นใยที่เตรียมได้ พบว่า เมื่อพิจารณาสารละลายผสมระหว่างพอลิแซ็กคาไรด์เจลภายหลังการปั่นเหวี่ยงแยกตะกอนที่ความเข้มข้นร้อยละ 3.40 และ พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่ความเข้มข้นร้อยละ 15 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ที่อัตราส่วนโดยปริมาตรของพอลิแซ็กคาไรด์เจลต่อพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่ (PG:PVA) เท่ากับ 70:30 60:40 50:50 40:60 30:70 และ 0:100 ดังรูปที่ 4.32 จะพบว่า เมื่อสารละลายผสมมีสัดส่วนของพอลิแซ็กคาไรด์เจลมากขึ้น จะส่งผลให้เส้นใยที่ได้มีขนาดเล็กลง อีกทั้งยังมีลักษณะของเม็ดปิดมากขึ้น ซึ่งลักษณะของเส้นใยที่เกิดขึ้นนี้สามารถอธิบายได้จากการศึกษาสมบัติของสารละลายผสมในหัวข้อ 4.1.4.2 ข) ซึ่งพบว่า สารละลายผสมที่มีสัดส่วนของพอลิแซ็กคาไรด์เจลมากจะมีค่าความหนืดต่ำ แต่จะมีค่าการนำไฟฟ้าสูง จากสมบัติของสารละลายดังกล่าวจะส่งผลให้สารละลายถูกยึดดึงออกเป็นเส้นใยด้วยแรงทางไฟฟ้าได้ดี เส้นใยที่ได้จึงมีขนาดเล็กลง ดังแสดงในรูปที่ 4.35 แต่อย่างไรก็ตามพบว่า สารละลายผสมที่มีสัดส่วนของพอลิแซ็กคาไรด์เจลสูง (ร้อยละ 60 โดยปริมาตร) จะสามารถแสดงสมบัติความเป็นพอลิอิเล็กโทรไลต์และความสามารถในการเกิดเจลของพอลิแซ็กคาไรด์เจลได้มากขึ้น ซึ่งสมบัติเหล่านี้จะขัดขวางการเกี่ยวพันของสายโซ่โมเลกุลทำให้เกิด Capillary instability บนลำของสารละลายพอลิเมอร์ ดังนั้นสารละลายจึงมีการยึดดึงออกเป็นช่วง ๆ ทำให้ได้เส้นใยที่มีลักษณะของเม็ดปิดเชื่อมต่อกัน ดังรูปที่ 4.32(ก) ถึง (ค) และเมื่อศึกษาอิทธิพลของอัตราส่วนโดยปริมาตรของพอลิแซ็กคาไรด์เจลและพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ในสารละลายที่มีความเข้มข้นของพอลิแซ็กคาไรด์เจลสูงขึ้นคือ ร้อยละ 4.42 และ 5.05 โดยน้ำหนักต่อ

ปริมาตร จะได้ผลที่สอดคล้องกันคือ เมื่อสารละลายผสมมีสัดส่วนของพอลิแซ็กคาไรด์เจลดมากขึ้นจะส่งผลให้ได้เส้นใยที่มีขนาดเล็กและมีลักษณะของเม็ดปิดมากขึ้น ดังรูปที่ 4.33 ถึง 4.34

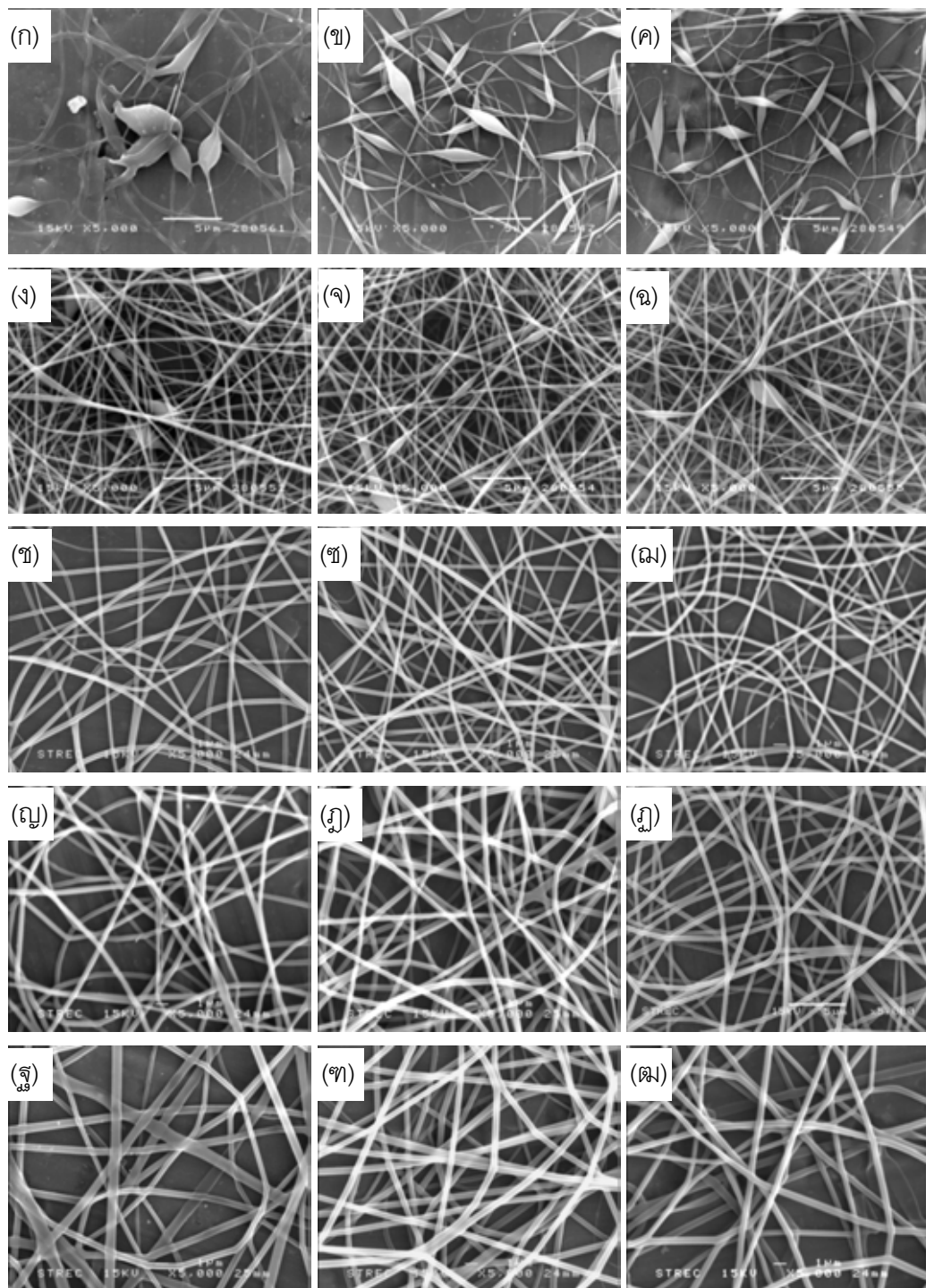
2) อิทธิพลของความเข้มข้นของสารละลายพอลิแซ็กคาไรด์เจลในสารละลายผสมต่อลักษณะและขนาดของเส้นใยที่เตรียมได้

เมื่อทำการศึกษาอิทธิพลของความเข้มข้นของสารละลายพอลิแซ็กคาไรด์เจลในสารละลายผสมต่อลักษณะและขนาดของเส้นใย โดยพิจารณาจากลักษณะของเส้นใยที่ได้จากสารละลายผสมระหว่างพอลิแซ็กคาไรด์เจลที่ความเข้มข้นร้อยละ 3.40 4.42 และ 5.05 โดยนำหนักต่อปริมาตร และพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่ความเข้มข้นร้อยละ 15 โดยนำหนักต่อปริมาตรที่อัตราส่วนโดยปริมาตรของ PG:PVA เท่ากับ 60:40 โดยมีการให้ศักย์ไฟฟ้าแก่สารละลายเท่ากับ 15 กิโลโวลต์ ซึ่งจะเห็นความแตกต่างของลักษณะเส้นใยที่ส่งผลมาจากการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของพอลิแซ็กคาไรด์เจลในสารละลายผสมได้ชัดเจน โดยพบว่า เส้นใยที่ได้จากสารละลายผสมที่มีความเข้มข้นของพอลิแซ็กคาไรด์เจลเท่ากับร้อยละ 3.40 โดยนำหนักต่อปริมาตร จะเป็นเส้นใยที่มีลักษณะของเม็ดปิดอยู่ในโครงสร้าง โดยเม็ดปิดจะมีขนาดเฉลี่ย 1389 ± 634 นาโนเมตร ดังแสดงในรูปที่ 4.32(ก) และเมื่อพิจารณาเส้นใยที่ได้จากสารละลายผสมที่มีความเข้มข้นของพอลิแซ็กคาไรด์สูงขึ้นไปเท่ากับร้อยละ 4.42 และ 5.05 โดยนำหนักต่อปริมาตร พบว่า เส้นใยที่ได้จะเรียบขึ้น มีลักษณะของเม็ดปิดลดลง ดังแสดงในรูปที่ 4.33(ก) และ 4.34(ก) และเมื่อพิจารณาอิทธิพลของความเข้มข้นของสารละลายพอลิแซ็กคาไรด์เจลที่มีต่อขนาดของเส้นใยจะพบว่า เส้นใยที่ได้จากสารละลายผสมที่มีความเข้มข้นของพอลิแซ็กคาไรด์เจลด้อยลง 3.40 4.42 และ 5.05 โดยนำหนักต่อปริมาตร จะมีขนาดเฉลี่ยเท่ากับ 267 ± 52 276 ± 57 และ 277 ± 98 นาโนเมตร ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.35 4.36 และ 4.37 ซึ่งจะสังเกตได้ว่า เส้นใยที่ได้จากสารละลายผสมที่มีความเข้มข้นของพอลิแซ็กคาไรด์เจลดสูงขึ้นไปจะมีขนาดใหญ่และเรียบขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากสารละลายผสมที่มีความเข้มข้นของพอลิแซ็กคาไรด์เจลดสูงขึ้นไปจะมีการเกี่ยวพันของสายโซ่โมเลกุลที่มากขึ้น จึงทำให้สารละลายถูกยึดตั้งเป็นเส้นใยได้อย่างต่อเนื่อง เส้นใยที่เตรียมได้จึงมีลักษณะที่เรียบขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่า สารละลายผสมที่มีความเข้มข้นของสารละลายพอลิแซ็กคาไรด์เจลดมากขึ้นจะมีค่าความหนืดเพิ่มขึ้น ส่งผลให้สารละลายถูกยึดตั้งได้น้อยลง เส้นใยที่ได้จึงมีขนาดใหญ่กว่าเส้นใยที่ได้จากสารละลายผสมที่มีความเข้มข้นของพอลิแซ็กคาไรด์เจลดต่ำกว่า และเมื่อศึกษาอิทธิพลของความเข้มข้นของสารละลายพอลิแซ็กคาไรด์เจลที่มีอัตราส่วนโดยปริมาตร และการให้ศักย์ไฟฟ้าศักย์ไฟฟ้าที่ต่างไปจากข้างต้นจะพบว่า ลักษณะและขนาดของ

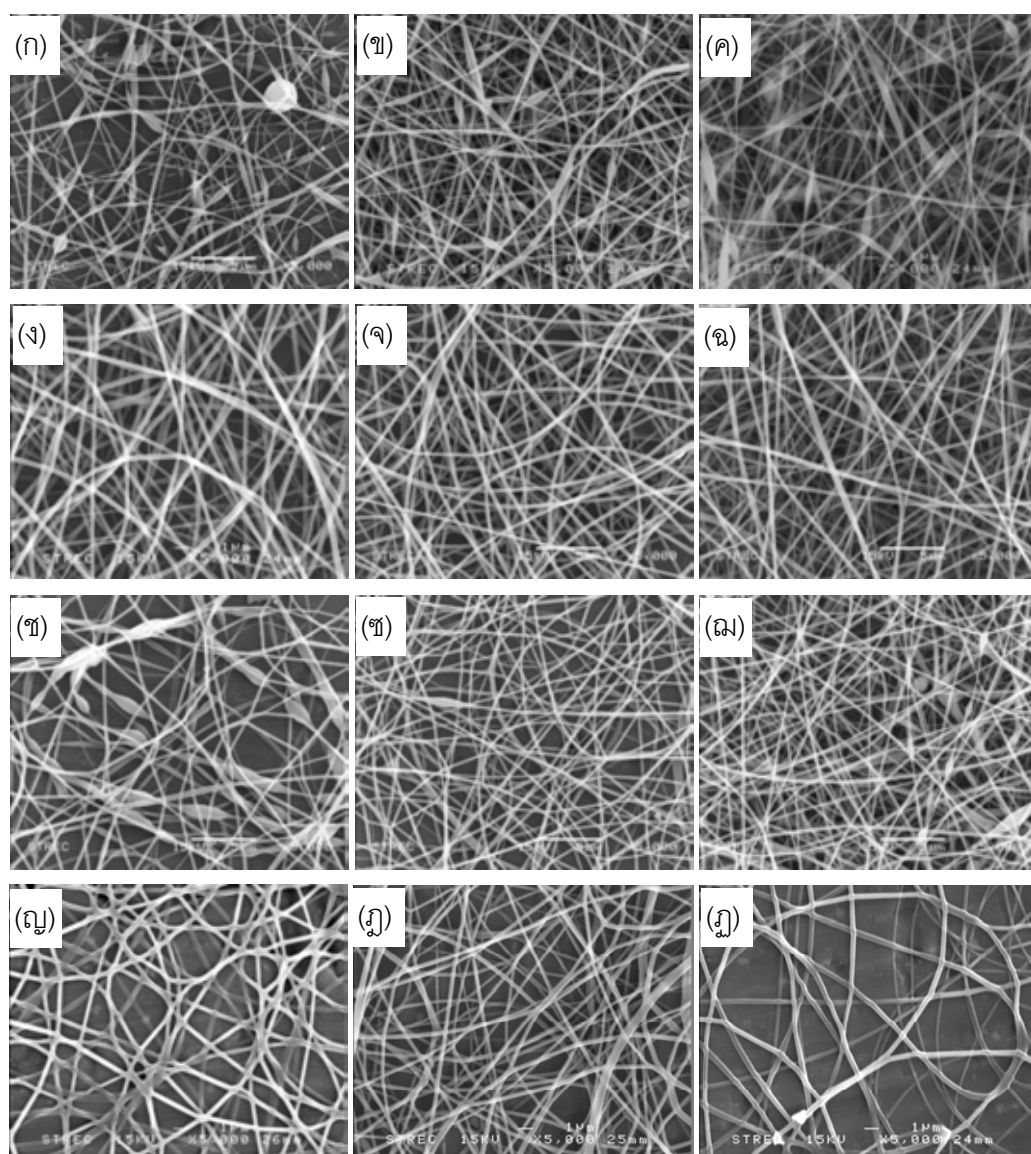
เส้นใยจะมีแนวโน้มเดียวกันคือ เส้นใยจะมีลักษณะเรียบ จำนวนเม็ดปิดน้อยลง และขนาดของเส้นใยเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของพอลิแซ็กคาไรด์เจลเพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4.32 ถึง 4.37

3) อิทธิพลของความต่างศักย์ทางไฟฟ้าที่ให้แก่สารละลายผสมต่อลักษณะและขนาดของเส้นใยที่เตรียมได้

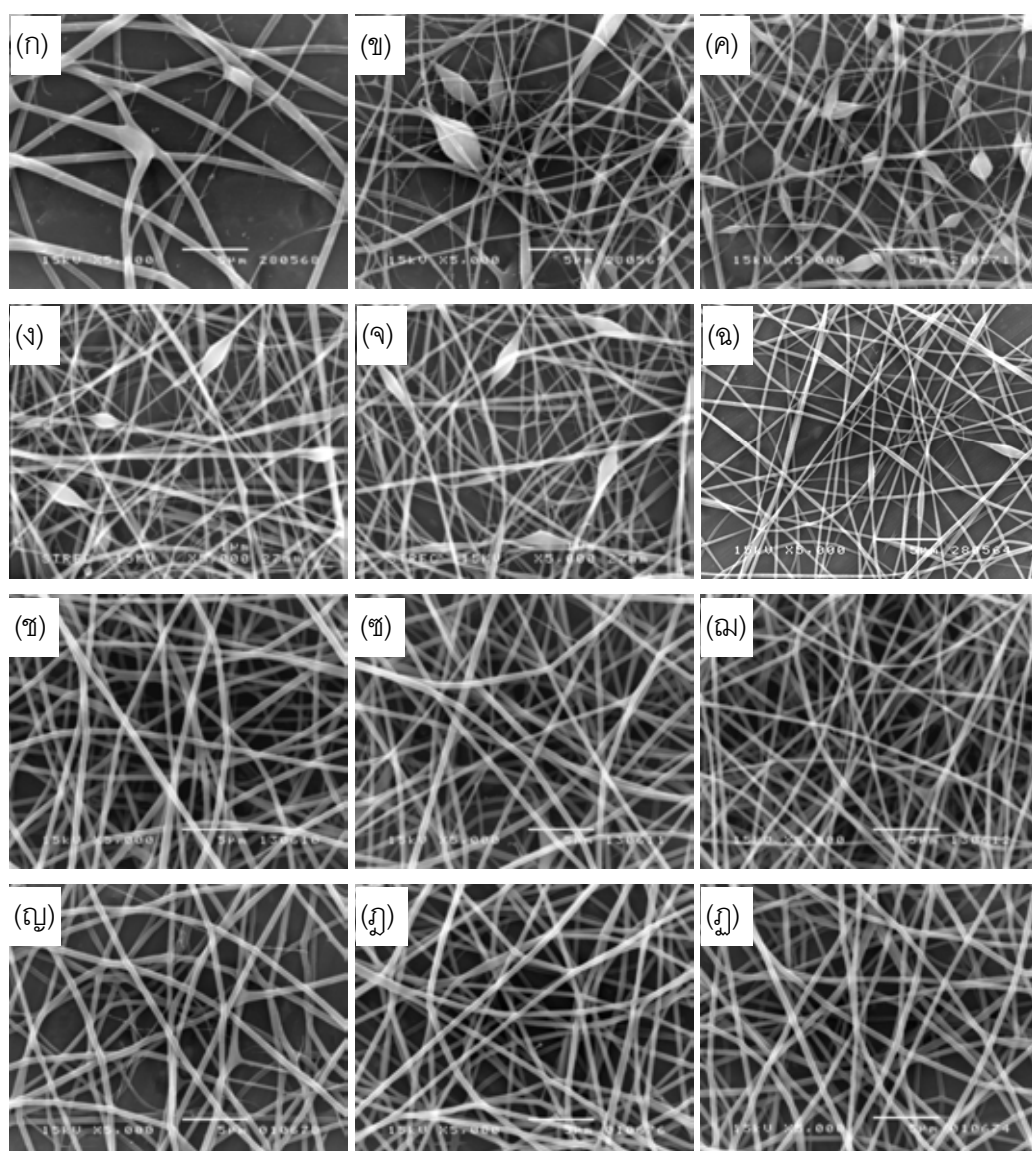
จากการศึกษาอิทธิพลของความต่างศักย์ทางไฟฟ้าที่ให้แก่สารละลายผสมที่มีต่อลักษณะและขนาดของเส้นใยที่เตรียมได้ โดยพิจารณาจากเส้นใยที่ได้จากสารละลายผสมระหว่างพอลิแซ็กคาไรด์เจลที่ความเข้มข้นร้อยละ 3.40 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร และพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่ความเข้มข้นร้อยละ 15 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ที่อัตราส่วนโดยปริมาตรของ PG:PVA เท่ากับ 50:50 เมื่อมีการให้ความต่างศักย์ไฟฟ้าแก่สารละลายเท่ากับ 15 20 และ 25 กิโลโวลต์ จะสามารถเห็นความแตกต่างของลักษณะและขนาดของเส้นใยที่มีผลมาจากความต่างศักย์ไฟฟ้าได้ชัดเจน โดยพบว่า เมื่อความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ให้แก่สารละลายมีค่าเพิ่มขึ้น เส้นใยที่ได้จะมีลักษณะของเม็ดปิดที่เรียวมากขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4.32(ก) (ข) และ (ค) และจากการพิจารณาอิทธิพลของความต่างศักย์ที่มีต่อขนาดของเส้นใยพบว่า เมื่อมีการให้ศักย์ไฟฟ้าแก่สารละลายเท่ากับ 15 20 และ 25 กิโลโวลต์ เส้นใยที่ได้จะมีขนาดเฉลี่ยเท่ากับ 293 ± 117 179 ± 63 และ 154 ± 39 นาโนเมตร ตามลำดับ ซึ่งสังเกตได้ว่า เส้นใยที่ได้จะมีขนาดเฉลี่ยที่ลดลงเมื่อมีการให้ความต่างศักย์ทางไฟฟ้าแก่สารละลายสูงขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4.35 ทั้งนี้เนื่องจากการเพิ่มความต่างศักย์ทางไฟฟ้าจะเป็นการเพิ่มแรงดึงทางไฟฟ้าให้แก่สารละลาย ทำให้ลำของสารละลายพอลิเมอร์สามารถถูกยึดดึงได้มากขึ้น เส้นใยที่ได้จึงมีลักษณะที่เรียวมากขึ้น เม็ดปิดมีลักษณะเรียวและมีปริมาณลดลง อีกทั้งเส้นใยที่ได้จะมีขนาดเล็กลงด้วย อย่างไรก็ตามพบว่า เมื่อพิจารณาอิทธิพลของความต่างศักย์ทางไฟฟ้าของสารละลายผสมที่มีความเข้มข้น และอัตราส่วนโดยปริมาตรของพอลิแซ็กคาไรด์เจลและพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่แตกต่างจากข้างต้นจะพบว่า ลักษณะและขนาดของเส้นใยที่ได้จะมีแนวโน้มเดียวกัน กล่าวคือ เส้นใยจะมีขนาดเล็ก อีกทั้งยังมีลักษณะเรียว ได้ลักษณะของเม็ดปิด ลดลง เมื่อมีการให้ความต่างศักย์ทางไฟฟ้าแก่สารละลายในปริมาณที่สูงขึ้น ดังรูปที่ 4.32 ถึง 4.37



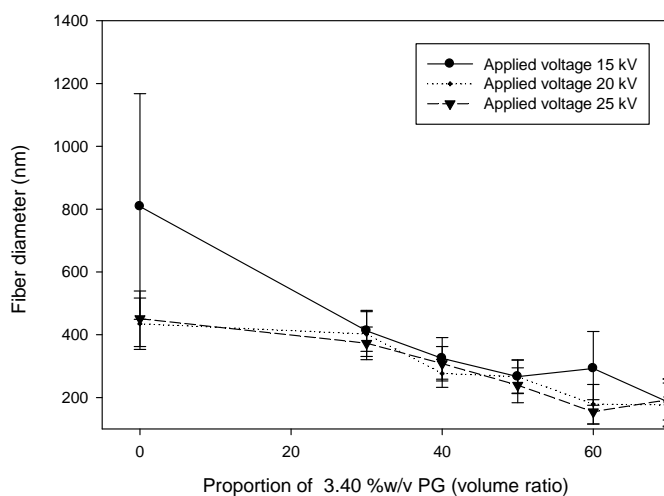
รูปที่ 4.32 ภาพถ่าย SEM เส้นใยที่ได้จากสารละลายผสมระหว่างพอลิแซ็กคาไรด์เจลหลังการปั่นเหวี่ยงแยกตะกอนที่ความเข้มข้นร้อยละ 3.40 และพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่ความเข้มข้นร้อยละ 15 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ที่อัตราส่วนโดยปริมาตร PG:PVA เท่ากับ 60:40 (ก)-(ค) 50:50 (ง)-(จ) 40:60 (ช)-(ฉ) 30:70 (ญ)-(ฎ) และ 0:100 (ฐ)-(ต) เมื่อให้ความต่างศักย์ไฟฟ้าแก่สารละลาย 15 และ 25 กิโลโวลต์ ตามลำดับ



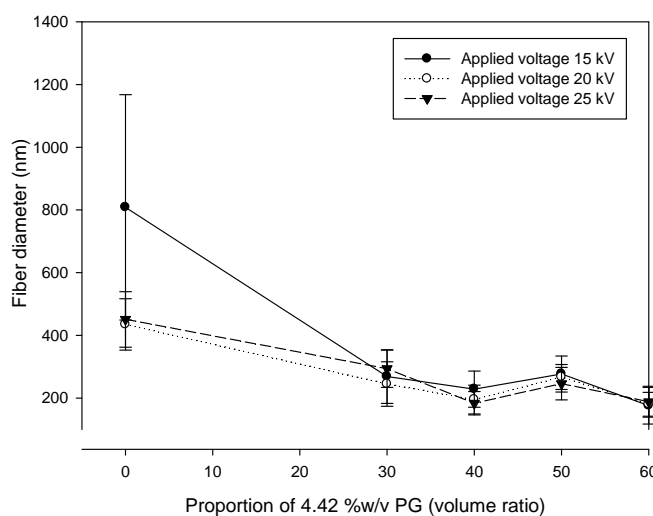
รูปที่ 4.33 ภาพถ่าย SEM เส้นใยที่ได้จากสารละลายผสมระหว่างพอลิแซ็กคาไรด์เจลาตินหลังการปั่นเหวี่ยงแยกตะกอนที่ความเข้มข้นร้อยละ 4.42 และพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่ความเข้มข้นร้อยละ 15 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ที่อัตราส่วนโดยปริมาตร PG:PVA เท่ากับ 60:40 (ก)-(ค) 50:50 (ง)-(จ) 40:60 (ช)-(ฉ) และ 30:70 (ญ)-(ฎ) เมื่อให้ความต่างศักย์ไฟฟ้าแก่สารละลาย 15 20 และ 25 กิโลโวลต์ ตามลำดับ



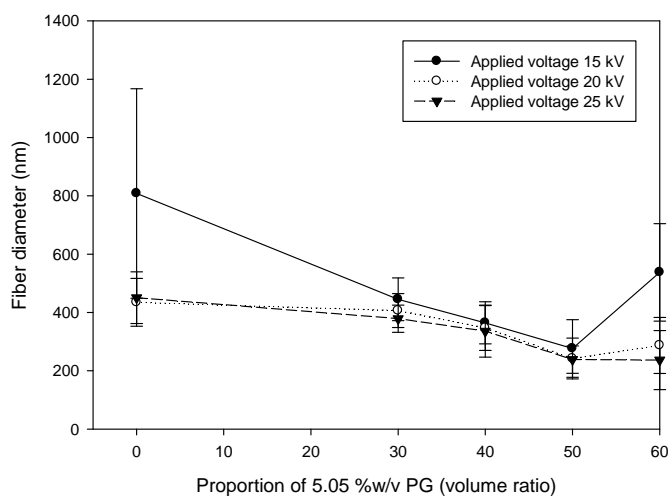
รูปที่ 4.34 ภาพถ่าย SEM เส้นใยที่ได้จากสารละลายผสมระหว่างพอลิแซ็กคาไรด์เจลาตินหลังการปั่นเหวี่ยงแยกตะกอนที่ความเข้มข้นร้อยละ 5.05 และพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่ความเข้มข้นร้อยละ 15 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ที่อัตราส่วนโดยปริมาตร PG:PVA เท่ากับ 60:40 (ก)-(ค) 50:50 (ง)-(จ) 40:60 (ช)-(ฉ) และ 30:70 (ญ)-(ฎ) เมื่อให้ความต่างศักย์ไฟฟ้าแก่สารละลาย 15 20 และ 25 กิโลโวลต์ตามลำดับ



รูปที่ 4.35 ขนาดเฉลี่ยของเส้นใยที่ได้จากสารละลายผสมระหว่างพอลิแซ็กคาไรด์เจลาตินหลังการปั่นเหวี่ยงแยกตะกอนที่ความเข้มข้นร้อยละ 3.40 และพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่ความเข้มข้นร้อยละ 15 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ที่อัตราส่วนโดยปริมาตร PG:PVA เท่ากับ 60:40 50:50 40:60 30:70 และ 0:100 (ญ)-(ฎ) เมื่อให้ความต่างศักย์ไฟฟ้าแก่สารละลาย 15 20 และ 25 กิโลโวลต์



รูปที่ 4.36 ขนาดเฉลี่ยของเส้นใยที่ได้จากสารละลายผสมระหว่างพอลิแซ็กคาไรด์เจลาตินหลังการปั่นเหวี่ยงแยกตะกอนที่ความเข้มข้นร้อยละ 4.42 และพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่ความเข้มข้นร้อยละ 15 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ที่อัตราส่วนโดยปริมาตร PG:PVA เท่ากับ 60:40 50:50 40:60 30:70 และ 0:100 (ญ)-(ฎ) เมื่อให้ความต่างศักย์ไฟฟ้าแก่สารละลาย 15 20 และ 25 กิโลโวลต์



รูปที่ 4.37 ขนาดเฉลี่ยของเส้นใยที่ได้จากสารละลายผสมระหว่างพอลิแซ็กคาไรด์เจลหลังการปั่นเหวี่ยงแยกตะกอนที่ความเข้มข้นร้อยละ 5.05 และพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่ความเข้มข้นร้อยละ 15 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ที่อัตราส่วนโดยปริมาตร PG:PVA เท่ากับ 60:40 50:50 40:60 30:70 และ 0:100 (ญ)-(ฎ) เมื่อให้ความต่างศักย์ไฟฟ้าแก่สารละลาย 15 20 และ 25 กิโลโวลต์

อย่างไรก็ตามพบว่า สารละลายผสมระหว่างพอลิแซ็กคาไรด์เจลที่ความเข้มข้นร้อยละ 5.05 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร และพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่ความเข้มข้นร้อยละ 15 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ที่อัตราส่วนโดยปริมาตรของ PG:PVA เท่ากับ 60:40 จะเกิดการแยกส่วนของสารละลาย โดยพอลิแซ็กคาไรด์เจลจะเกิดการแยกส่วนเป็นเม็ดเจลเล็ก ๆ เมื่อตั้งสารละลายทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 30 นาที ทั้งนี้เนื่องจากสารละลายพอลิแซ็กคาไรด์เจลที่ความเข้มข้นร้อยละ 5.05 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ได้จากการปั่นเหวี่ยงแยกตะกอนของสารละลายพอลิแซ็กคาไรด์เจลที่ความเข้มข้นร้อยละ 6 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ซึ่งสารละลายพอลิแซ็กคาไรด์เจลที่ความเข้มข้นดังกล่าวมีความหนืดสูง ดังนั้นเมื่อทำการปั่นเหวี่ยงแยกตะกอนของสารละลาย จะทำให้สายโซ่โมเลกุลของพอลิแซ็กคาไรด์เจลที่ไม่สามารถละลายน้ำได้ตกตะกอนลงมาได้น้อยกว่าสารละลายพอลิแซ็กคาไรด์เจลที่มีความหนืดต่ำกว่า ดังนั้นสารละลายพอลิแซ็กคาไรด์เจลที่ความเข้มข้นนี้จึงยังคงมีพอลิแซ็กคาไรด์เจลที่ไม่สามารถละลายน้ำได้อยู่ในปริมาณที่มากกว่า จึงแสดงสมบัติการเกิดเจลและแยกส่วนออกจากสารละลายพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ ซึ่งไม่เหมาะสมต่อการนำมาเตรียมเส้นใยด้วยกระบวนการอิเล็กโตรสปินนิง และเพื่อให้ได้แผ่นเส้นใยที่มีประสิทธิภาพในการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรียสูงสุด คณะผู้วิจัยจึงเลือกเตรียมแผ่นเส้นใยจากสารละลายผสมที่มีความเข้มข้นและอัตราส่วนโดยปริมาตรของพอลิแซ็กคาไรด์เจล ดังแสดงในตารางที่ 4.6 เป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อให้ได้แผ่นเส้นใยที่มีความหนาเหมาะสม ซึ่งพบว่า แผ่นเส้นใยที่มีปริมาณของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์มาก จะทำให้ได้แผ่นเส้นใยที่มีความหนามากกว่า

ตารางที่ 4.6 ลักษณะและขนาดของเส้นใยที่ได้จากสารละลายผสมระหว่างพอลิแซ็กคาไรด์เจลและพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่ความเข้มข้นและอัตราส่วนโดยปริมาตรต่าง ๆ

สารละลายผสม	ปริมาณของ PG (%PG solid content)	เส้นผ่านศูนย์กลาง \pm ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (นาโนเมตร)						ความหนาของแผ่นเส้นใย (ไมโครเมตร)
		เส้นใย			เม็ดบีด			
		ขนาดเล็ก	เล็กที่สุด	ใหญ่ที่สุด	ขนาดเล็ก	เล็กที่สุด	ใหญ่ที่สุด	
3.40 %w/v PG + 15 %w/v PVA (50:50)	21.05	239 \pm 55.60	110	480	-	-	-	89 \pm 19.
4.42 %w/v PG + 15 %w/v PVA (50:50)	25.00	246 \pm 51.82	140	500	-	-	-	54 \pm 6
4.42 %w/v PG + 15 %w/v PVA (60:40)	33.33	188 \pm 49.17	90	360	601 \pm 15.53	350	1020	38 \pm 5
5.05 %w/v PG + 15 %w/v PVA (30:70)	14.63	379 \pm 46.81	240	510	-	-	-	69 \pm 3
5.05 %w/v PG + 15 %w/v PVA (40:60)	21.05	336 \pm 89.26	130	580	-	-	-	55 \pm 12
5.05 %w/v PG + 15 %w/v PVA(50:50)	28.57	300 \pm 56.40	150	450	489 \pm 127.2	360	760	52 \pm 2
PVA 15 %w/v	0	450 \pm 88.70	300	730	-	-	-	76 \pm 2

4.2 การเชื่อมขวางแผ่นเส้นใยพอลิแซ็กคาไรด์เจล

การทดลองนี้เป็นการศึกษาการเชื่อมขวางของแผ่นเส้นใยพอลิแซ็กคาไรด์เจล โดยการนำแผ่นเส้นใยพอลิแซ็กคาไรด์เจลที่เตรียมได้ตามขั้นตอน 4.1 ขนาด 2.5× 2.5 ตารางเซนติเมตร มาทำการเชื่อมขวางด้วยวิธีทางกายภาพและทางเคมี ดังนี้

4.2.1 ผลการเชื่อมขวางทางกายภาพ

4.2.1.1 ผลการเชื่อมขวางแผ่นเส้นใยผสมด้วยการแลกเปลี่ยนประจุระหว่างพอลิแซ็กคาไรด์เจลและสารเชื่อมขวางแคลเซียมคลอไรด์ (CaCl_2)

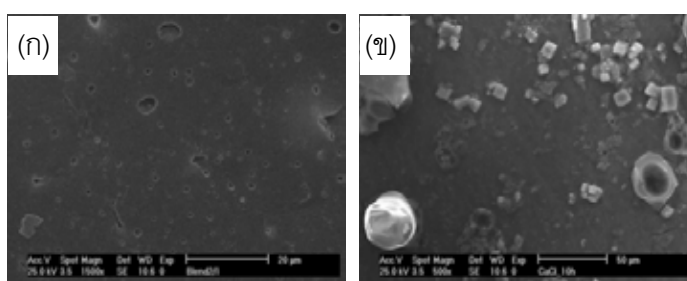
จากการศึกษาการเชื่อมขวางแผ่นเส้นใยพอลิแซ็กคาไรด์เจลด้วยสารละลายแคลเซียมคลอไรด์โดยการนำแผ่นเส้นใยพอลิแซ็กคาไรด์เจลที่เตรียมได้จากสารละลายผสมระหว่างพอลิแซ็กคาไรด์เจลที่ความเข้มข้นร้อยละ 3.40 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร และพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่ความเข้มข้นร้อยละ 15 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ที่อัตราส่วนโดยปริมาตรของพอลิแซ็กคาไรด์เจลและพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (PG:PVA) เท่ากับ 50:50 แช่ลงในสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ที่มีความเข้มข้นร้อยละ 5 และ 10 โดยน้ำหนัก พบว่าแผ่นเส้นใยดังกล่าวเกิดการเปลี่ยนแปลงลักษณะทางกายภาพโดยทันทีดังแสดงในตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.7 ลักษณะทางกายภาพของแผ่นเส้นใยพอลิแซ็กคาไรด์เจลภายหลังการเชื่อมขวางด้วยสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ที่สภาวะต่าง ๆ

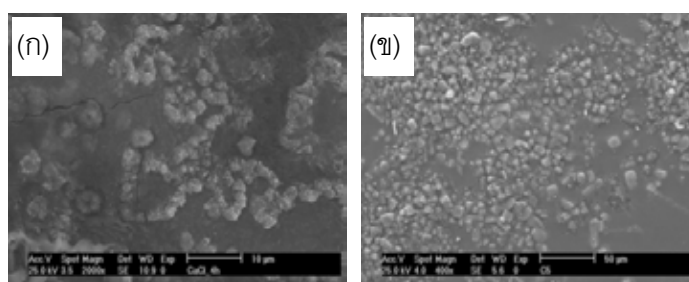
ตัวอย่าง	สภาวะการเชื่อมขวาง		ลักษณะทางกายภาพของแผ่นเส้นใยภายหลังการเชื่อมขวาง
	สารเชื่อมขวาง	ตัวทำละลาย	
1	5 %wt CaCl_2	H_2O	แผ่นเส้นใยละลายหายไปทันที
2		ethanol: H_2O (1:5)	แผ่นเส้นใยใส หดตัว และมีลักษณะเป็นเมือก
3		ethanol: H_2O (1:1)	แผ่นเส้นใยใส และหดตัว
4		ethanol: H_2O (5:1)	แผ่นเส้นใยใสขึ้นเล็กน้อย ไม่หดตัว
5	10 %wt CaCl_2	H_2O	แผ่นเส้นใยละลายหายไปทันที
6		ethanol: H_2O (1:5)	แผ่นเส้นใยใส หดตัว และมีลักษณะเป็นเมือก
7		ethanol: H_2O (1:1)	แผ่นเส้นใยใส และหดตัว
8		ethanol: H_2O (5:1)	แผ่นเส้นใยใสขึ้นเล็กน้อย ไม่หดตัว

จากการศึกษาลักษณะทางกายภาพของแผ่นเส้นใยภายหลังการเชื่อมขวางพบว่าไม่สามารถเชื่อมขวางแผ่นเส้นใยได้ด้วยสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ที่มีน้ำและตัวทำละลายผสมระหว่างน้ำและเอทานอลในอัตราส่วนโดยปริมาตรของเอทานอลและน้ำ (ethanol:H₂O) เท่ากับ 1:5 เป็นตัวทำละลาย ทั้งนี้เนื่องจากสารละลายที่มีน้ำเป็นตัวทำละลายในปริมาณมาก จะทำให้โมเลกุลของพอลิแซ็กคาไรด์เจลและพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่อยู่ในเส้นใยสามารถทำปฏิกิริยากับโมเลกุลของน้ำก่อนที่จะเกิดการเชื่อมขวางด้วยการแลกเปลี่ยนประจุระหว่างพอลิแซ็กคาไรด์เจลและแคลเซียมคลอไรด์ จึงทำให้แผ่นเส้นใยเกิดการละลายก่อนการเชื่อมขวาง

เมื่อศึกษาพื้นฐานวิทยาของแผ่นเส้นใยที่ได้ภายหลังจากการเชื่อมขวางแผ่นเส้นใยด้วยสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ที่ความเข้มข้นร้อยละ 5 และ 10 โดยน้ำหนัก ในตัวทำละลายผสมระหว่างน้ำและเอทานอลที่อัตราส่วนโดยปริมาตรของเอทานอลและน้ำ (ethanol:H₂O) เท่ากับ 1:1 และ 5:1 และใช้ระยะเวลาในการเชื่อมขวาง 24 ชั่วโมง จะพบว่า แผ่นเส้นใยที่ได้ภายหลังการเชื่อมขวางจะไม่ละลายน้ำ แต่จะมีสภาพเป็นแผ่นฟิล์ม และไม่มีโครงสร้างของเส้นใยเหลืออยู่ ดังแสดงในรูปที่ 4.38 และ 4.39 นอกจากนี้ยังพบว่า การเชื่อมขวางแผ่นเส้นใยด้วยสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ที่มีความเข้มข้นสูงถึงร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก จะได้ลักษณะของแผ่นฟิล์มที่มีผลึกของแคลเซียมคลอไรด์เกิดขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4.39 โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อสารเชื่อมขวางมีเอทานอลและน้ำในอัตราส่วน ethanol:H₂O เท่ากับ 5:1 เป็นตัวทำละลาย ทั้งนี้เนื่องจากแคลเซียมคลอไรด์ไม่สามารถละลายในตัวทำละลายผสมได้อย่างสมบูรณ์ ดังนั้นจากการทดลองนี้จึงสามารถสรุปได้ว่า การเชื่อมขวางแผ่นเส้นใยพอลิแซ็กคาไรด์เจลด้วยสารละลายแคลเซียมคลอไรด์จะทำให้สูญเสียโครงสร้างของเส้นใย ทั้งนี้เนื่องจากสารละลายแคลเซียมคลอไรด์มีน้ำเป็นตัวทำละลาย ซึ่งจะทำให้โมเลกุลของพอลิเมอร์ทั้งสองชนิดสามารถเคลื่อนที่ในตัวทำละลายที่มีน้ำได้ดี จึงเกิดการสูญเสียโครงสร้างของเส้นใยก่อนที่จะมีการเชื่อมขวางโดยการแลกเปลี่ยนประจุระหว่าง พอลิแซ็กคาไรด์เจลและแคลเซียมคลอไรด์



รูปที่ 4.38 ภาพถ่าย SEM แผ่นฟิล์มที่ได้หลังจากการเชื่อมขวางด้วยสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ที่ความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ที่มีน้ำและเอทานอลในอัตราส่วนโดยปริมาตรของ ethanol:H₂O เท่ากับ (ก) 1:1 และ (ข) 5:1 เป็นตัวทำละลาย และทำการเชื่อมขวางเป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง

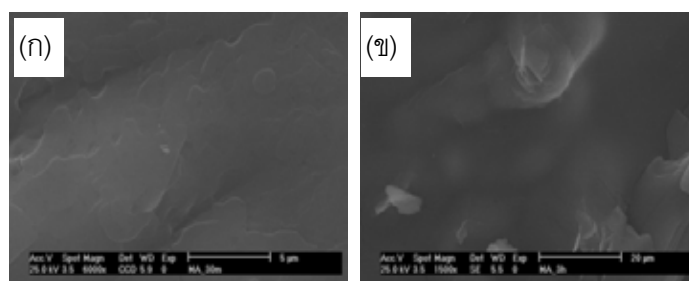


รูปที่ 4.39 ภาพถ่าย SEM แผ่นฟิล์มที่ได้หลังจากการเชื่อมขวางด้วยสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ที่ความเข้มข้นร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก ที่มีน้ำและเอทานอลในอัตราส่วนโดยปริมาตรของ ethanol:H₂O เท่ากับ (ก) 1:1 และ (ข) 5:1 เป็นตัวทำละลาย และทำการเชื่อมขวางเป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง

4.2.2 ผลการเชื่อมขวางทางเคมี

4.2.2.1 ผลการเชื่อมขวางแผ่นเส้นใยผสมด้วยการทำปฏิกิริยาระหว่างเส้นใยพอลิไวนิลแอลกอฮอล์กับกรดมาเลอิก (Maleic acid; MA)

จากการศึกษาการเชื่อมขวางพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่อยู่ในแผ่นเส้นใยด้วยสารละลายกรดมาเลอิกที่ความเข้มข้น 1.25 โดยน้ำหนัก ในตัวทำละลายผสมระหว่างเอทานอลร้อยละ 90 และน้ำกลั่นร้อยละ 10 โดยปริมาตร ที่มีการเติมกรดไฮโดรคลอริกเพื่อเร่งอัตราการเกิดปฏิกิริยาเป็นเวลา 0.5 1 2 4 และ 24 ชั่วโมง พบว่า แผ่นเส้นใยภายหลังจากการเชื่อมขวางด้วยสารละลายกรดมาเลอิกเป็นเวลา 0.5 1 และ 2 ชั่วโมงจะสามารถละลายหายไปในพื้นที่ที่แช่น้ำ ในขณะที่แผ่นเส้นใยที่ทำการเชื่อมขวางเป็นระยะเวลา 4 และ 24 ชั่วโมง จะได้แผ่นฟิล์มใสที่ไม่เหลือโครงสร้างของเส้นใย ดังแสดงในรูปที่ 4.40 โดยแผ่นฟิล์มดังกล่าวจะสามารถละลายน้ำได้ในเวลาประมาณ 2 และ 6 ชั่วโมง ตามลำดับ



รูปที่ 4.40 ภาพถ่าย SEM แผ่นฟิล์มที่ได้หลังจากการเชื่อมขวางด้วยสารละลายกรดมาเลอิกที่ความเข้มข้น 1.25 โดยน้ำหนัก ในตัวทำละลายผสมระหว่างเอทานอลร้อยละ 90 และน้ำกลั่นร้อยละ 10 โดยปริมาตร เป็นระยะเวลา (ก) 4 และ (ข) 24 ชั่วโมง

4.2.2.2 ผลการเชื่อมขวางแผ่นเส้นใยผสมด้วยการทำปฏิกิริยาระหว่างเส้นใยพอลิแซ็กคาไรด์ เจลและเส้นใยพอลิไวนิลแอลกอฮอล์กับไอระเหยของกลูตารัลดีไฮด์ (Glutaraldehyde; GA)

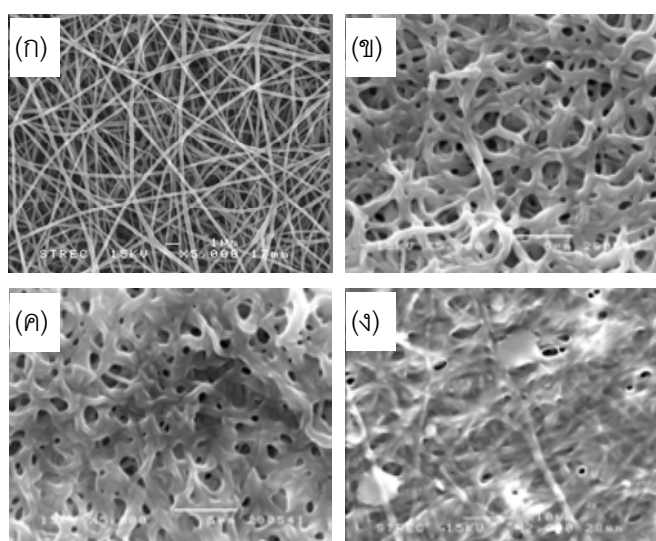
จากการศึกษาการเชื่อมขวางแผ่นเส้นใยพอลิแซ็กคาไรด์เจลด้วยการอบไอระเหยของสารละลายกลูตารัลดีไฮด์ในภาชนะปิด โดยไม่มีการให้ความร้อน และให้ความร้อนแก่สารละลายเพื่อเร่งอัตราการระเหยของสารละลายที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส พบว่า แผ่นเส้นใยที่ได้ภายหลังจากการเชื่อมขวางจะมีลักษณะทางกายภาพเปลี่ยนแปลงไปดังแสดงตารางที่ 4.8

ตารางที่ 4.8 ลักษณะทางกายภาพของแผ่นเส้นใยพอลิแซ็กคาไรด์เจลภายหลังจากการเชื่อมขวางด้วยการอบไอระเหยของสารละลายกลูตารัลดีไฮด์ที่สภาวะต่าง ๆ

สภาวะการเชื่อมขวาง		ระยะเวลาในการเชื่อมขวาง (ชั่วโมง)	ลักษณะทางการภาพของแผ่นเส้นใยภายหลังการเชื่อมขวาง
สารเชื่อมขวาง	อุณหภูมิ		
25 %wt Glutaraldehyde	ให้ความร้อนที่ 37 °C	1	แผ่นเส้นใยไม่เกิดการหดตัว
		2	แผ่นเส้นใยไม่เกิดการหดตัวอย่างมาก
		4	แผ่นเส้นใยไม่เกิดการหดตัวอย่างมาก
	ไม่มีการให้ความร้อน	1	แผ่นเส้นใยไม่เกิดการหดตัว
		2	แผ่นเส้นใยไม่เกิดการหดตัว
		4	แผ่นเส้นใยไม่เกิดการหดตัว

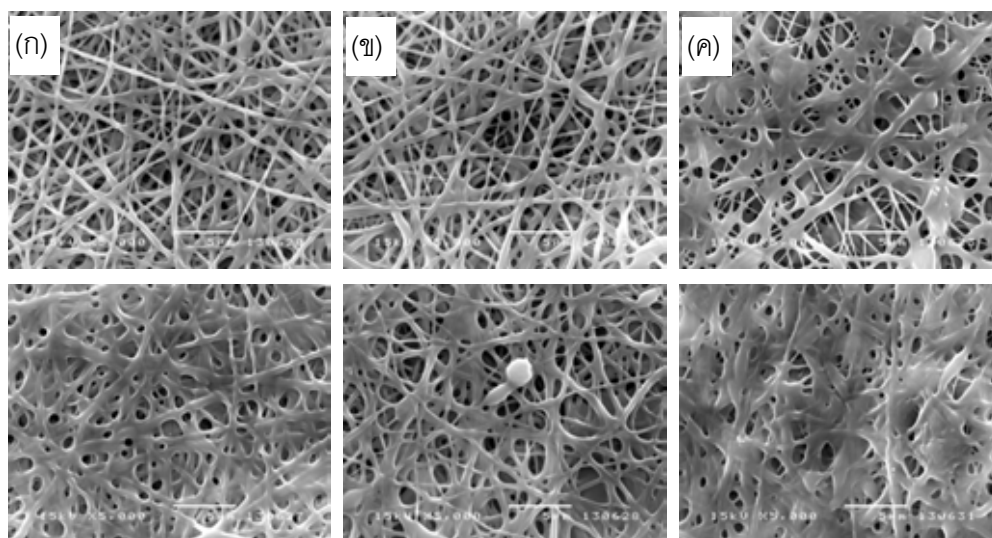
จากตาราง 4.8 พบว่า การเชื่อมขวางแผ่นเส้นใยด้วยการอบไอระเหยของสารละลายกลูตารัลดีไฮด์โดยมีการให้ความร้อนแก่สารละลายที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียสในภาชนะปิด จะทำให้แผ่นเส้นใยที่ได้มีลักษณะที่ใสขึ้น อีกทั้งยังเกิดการหดตัวมากขึ้นเมื่อทำการเชื่อมขวางเป็นระยะเวลานานขึ้นด้วย ทั้งนี้เนื่องจากการให้ความร้อนแก่สารละลายกลูตารัลดีไฮด์จะทำให้เกิดไอน้ำขึ้นในภาชนะที่ใช้ในการเชื่อมขวาง ส่งผลให้โมเลกุลพอลิแซ็กคาไรด์เจลและพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่อยู่ในโครงสร้างของเส้นใยทำปฏิกิริยากับโมเลกุลของน้ำ จึงทำให้แผ่นเส้นใยบางส่วนเกิดการละลาย และส่งผลให้เกิดการหดตัวของแผ่นเส้นใย ในขณะที่ลักษณะทางกายภาพที่สังเกตได้ด้วยตาเปล่าของแผ่นเส้นใยที่เชื่อมขวางโดยไม่มีการให้ความร้อนจะไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก อย่างไรก็ตามเมื่อทำการศึกษาสัณฐานวิทยาของแผ่นเส้นใยภายหลังจากการเชื่อมขวางด้วยการอบไอกลูตารัลดีไฮด์โดยไม่มีการให้ความร้อน เป็นระยะเวลา 1 2 และ 4 ชั่วโมง พบว่า เส้นใยจะเกิดการบวมตัว (swelling) และมีการเชื่อมขวางกันมากขึ้นเมื่อใช้ระยะเวลาในการเชื่อมขวางมากขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4.41(ข) (ค) และ (ง) จากนั้นเมื่อทำการตรวจสอบการเชื่อมขวางโดยนำแผ่นเส้นใยที่ได้ภายหลังจากการเชื่อมขวางที่ระยะเวลาต่าง ๆ มาแช่ลงในน้ำ พบว่า แผ่นเส้นใยที่ผ่าน

การเชื่อมขวางเป็นระยะเวลา 1 ชั่วโมง จะมีลักษณะเป็นเจลใส และไม่สามารถคงรูปเป็นแผ่นได้ เมื่ออยู่ในน้ำ ในขณะที่แผ่นเส้นใยที่ทำการเชื่อมขวางเป็นระยะเวลานาน 2 และ 4 ชั่วโมง จะยังสามารถคงรูปของแผ่นเส้นใยได้ อย่างไรก็ตามพบว่า แผ่นเส้นใยที่ทำการเชื่อมขวางเป็นระยะเวลา 4 ชั่วโมง ไม่เหลือโครงสร้างรูพรุนของแผ่นเส้นใยอิเล็กโทรสปินที่สอดคล้องกับวัตถุประสงค์ของการทดลองนี้ดังแสดงในรูปที่ 4.41(ง) ดังนั้นสภาวะในการเชื่อมขวางแผ่นเส้นใยที่เหมาะสมกับการทดลองนี้ที่สุดคือ การเชื่อมขวางแผ่นเส้นใยด้วยการอบไอระเหยกลูตารัลดีไฮด์โดยไม่มีการให้ความร้อนเป็นระยะเวลา 2 ชั่วโมง ทั้งนี้เนื่องจาก แผ่นเส้นใยจะยังคงโครงสร้างของเส้นใยและความเป็นรูพรุน ในขณะที่มีประสิทธิภาพในการต้านทานน้ำเพิ่มขึ้น ดังรูปที่ 4.41(ค)

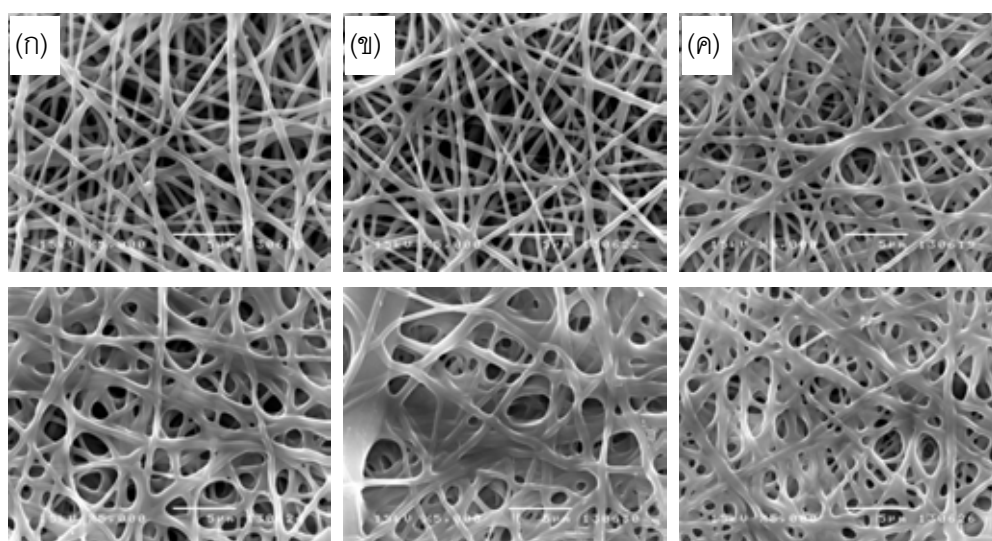


รูปที่ 4.41 ภาพถ่าย SEM ของแผ่นเส้นใยที่ได้จากสารละลายผสมระหว่างพอลิแซ็กคาไรด์เจลาตินที่ความเข้มข้นร้อยละ 4 และพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่ความเข้มข้นร้อยละ 15 โดยน้ำหนักต่อปริมาตรที่อัตราส่วนโดยปริมาตรของ PG:PVA เท่ากับ 50:50 (ก) ก่อนการเชื่อมขวาง และหลังการเชื่อมขวางด้วยการอบไอระเหยของสารละลายกลูตารัลดีไฮด์เป็นระยะเวลา (ข) 1 (ค) 2 และ (ง) 4 ชั่วโมง

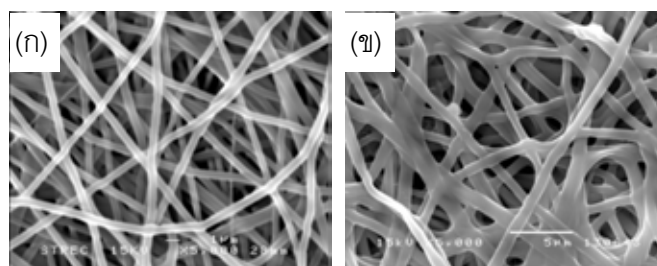
จากการศึกษาลักษณะของเส้นใยผสมที่มีความเข้มข้นและอัตราส่วนของพอลิแซ็กคาไรด์เจลาตินและพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ต่าง ๆ ภายหลังจากการเชื่อมขวางด้วยการอบไอระเหยของสารละลายกลูตารัลดีไฮด์โดยไม่มีการให้ความร้อนแก่สารละลายเป็นเวลา 2 ชั่วโมง ดังแสดงในรูปที่ 4.42 ถึง 4.44(ก) เปรียบเทียบกับลักษณะของเส้นใยดังกล่าวภายหลังการแช่น้ำเป็นเวลา 2 ชั่วโมง ดังแสดงในรูปที่ 4.42 ถึง 4.44(ข) พบว่า แผ่นเส้นใยที่ผ่านการเชื่อมขวางจะคงรูป และไม่ละลายน้ำ อีกทั้งยังคงแสดงลักษณะความเป็นรูพรุนของเส้นใยแม้จะทำการแช่แผ่นเส้นใยในน้ำเป็นเวลา 2 ชั่วโมงก็ตาม



รูปที่ 4.42 ภาพถ่าย SEM ของเส้นใยผสมระหว่าง PG 3.40 %w/v และ PVA 15 %w/v ที่อัตราส่วน 50:50 (ก) และ PG 4.42 %w/v และ PVA 15 %w/v ที่อัตราส่วน (ข) 50:50 (ค) 60:40 เมื่อผ่านการเชื่อมขวางด้วยการอบไอระเหยของสารละลายกลูตารัลดีไฮด์ ก่อน (บน) และหลัง (ล่าง) แช่น้ำเป็นเวลา 2 ชั่วโมง



รูปที่ 4.43 ภาพถ่าย SEM ของเส้นใยผสมระหว่าง PG 5.05 %w/v และ PVA 15 %w/v ที่อัตราส่วน (ก) 30:70 (ข) 40:60 และ (ค) 50:50 เมื่อผ่านการเชื่อมขวางด้วยการอบไอระเหยของสารละลาย กลูตารัลดีไฮด์ ก่อน (บน) และหลัง (ล่าง) แช่น้ำเป็นเวลา 2 ชั่วโมง



รูปที่ 4.44 ภาพถ่าย SEM ของเส้นใยพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ 15 %w/v เมื่อผ่านการเชื่อมขวางด้วยการอบไอระเหยของสารละลายกลูตารัลดีไฮด์ ก่อน (ก) และหลัง (ข) แช่น้ำเป็นเวลา 2 ชั่วโมง

ตารางที่ 4.9 แสดงระดับการเชื่อมขวางของแผ่นเส้นใยผสมซึ่งคำนวณจากร้อยละการสูญเสียน้ำหนักของแผ่นเส้นใยที่ผ่านการเชื่อมขวางก่อนและหลังทำการแช่แผ่นเส้นใยในน้ำเป็นระยะเวลา 2 ชั่วโมง พบว่า เมื่อเปรียบเทียบร้อยละการสูญเสียน้ำหนักของแผ่นเส้นใยที่ได้จากสารละลายผสมระหว่างพอลิแซ็กคาไรด์เจลที่ความเข้มข้นร้อยละ 5.05 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร และ พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่ความเข้มข้นร้อยละ 15 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร โดยมีอัตราส่วนของ PG:PVA เท่ากับ 30:70 40:60 และ 50:50 พบว่า เส้นใยดังกล่าวจะมีร้อยละการเชื่อมขวางเท่ากับ 99.83 ± 0.21 99.73 ± 0.22 และ 99.56 ± 0.26 ตามลำดับ ซึ่งจะสังเกตได้ว่า เส้นใยผสมจะมีร้อยละการเชื่อมขวางลดลงเมื่อมีสัดส่วนของพอลิแซ็กคาไรด์เจลเพิ่มขึ้น ซึ่งสัมพันธ์กับลักษณะของเส้นใยภายหลังการละลายน้ำที่แสดงข้างต้น ซึ่งจะเห็นว่า เส้นใยผสมที่มีสัดส่วนของพอลิแซ็กคาไรด์เจลมาก จะมีลักษณะความเป็นรูพรุนลดลงภายหลังจากการละลายน้ำ ทั้งนี้เนื่องจากการเชื่อมขวางด้วยสารละลายกลูตารัลดีไฮด์จะเกิดจากการทำปฏิกิริยาระหว่างพอลิไวนิลแอลกอฮอล์และกลูตารัลดีไฮด์เป็นส่วนใหญ่ ซึ่งลักษณะการเชื่อมขวางเช่นนี้ จะส่งผลดีต่อการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรีย เนื่องจากโมเลกุลของพอลิแซ็กคาไรด์เจลที่ไม่ได้ถูกเชื่อมขวางจะยังคงสามารถยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรีย ในขณะที่ยังคงความเป็นรูพรุนในการถ่ายเทอากาศ และของเสียได้

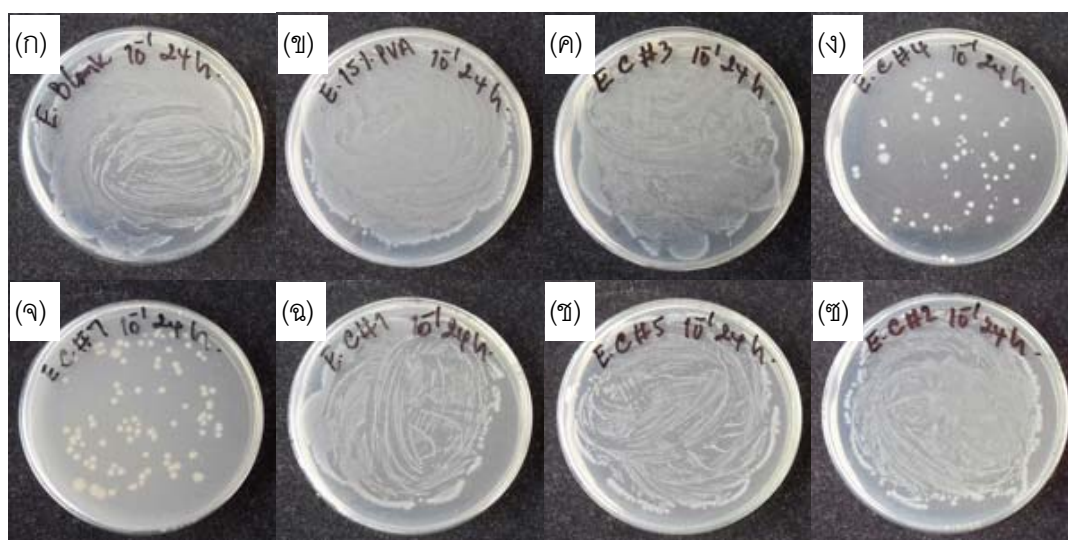
ตารางที่ 4.9 ร้อยละการเชื่อมขวางแผ่นเส้นใยผสมระหว่างพอลิแซ็กคาไรด์เจลและพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่ความเข้มข้นและอัตราส่วนต่าง ๆ

ตัวอย่าง	ร้อยละการเชื่อมขวาง \pm SD (% Crosslink)
PG 3.40 %w/v + PVA 15 %w/v(50:50)	99.72 \pm 0.10
PG 4.42 %w/v + PVA 15 %w/v(50:50)	99.54 \pm 0.17
PG 4.42 %w/v + PVA 15 %w/v(60:40)	99.46 \pm 0.12
PG 5.05 %w/v + PVA 15 %w/v(30:70)	99.83 \pm 0.21
PG 505. %w/v + PVA 15 %w/v(40:60)	99.73 \pm 0.22
PG 5.05 %w/v + PVA 15 %w/v(50:50)	99.56 \pm 0.26
PVA 15 %w/v	99.90 \pm 0.09

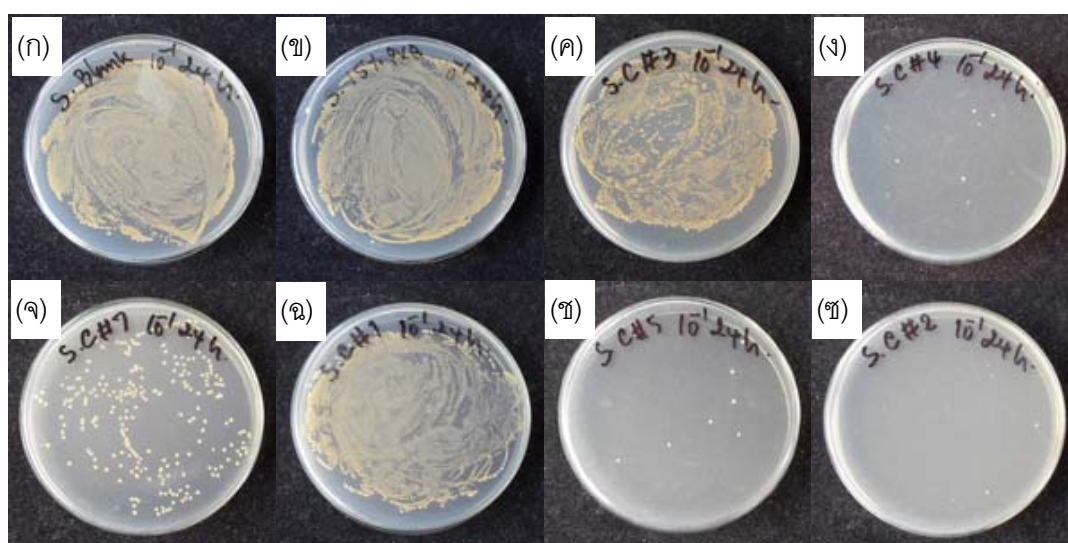
4.3 การศึกษาประสิทธิภาพในการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรียของแผ่นเส้นใยพอลิแซ็กคาไรด์เจล

จากรูปที่ 4.45 และ 4.46 แสดงประสิทธิภาพในการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรีย *Escherichia coli* (*E. coli*) และ *Staphylococcus aureus* (*S. aureus*) ของแผ่นเส้นใยอิเล็กโทรสปินที่เตรียมได้จากสารละลายผสมระหว่างพอลิแซ็กคาไรด์เจลและพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่มีความเข้มข้นและอัตราส่วนของพอลิเมอร์ทั้งสองชนิดที่แตกต่างกัน โดยพบว่า แผ่นเส้นใยที่เตรียมได้จากสารละลายผสมระหว่างพอลิแซ็กคาไรด์เจลที่ความเข้มข้นร้อยละ 4.42 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร และพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่ความเข้มข้นร้อยละ 15 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ในอัตราส่วนโดยปริมาตรของ PG:PVA เท่ากับ 50:50 จะมีประสิทธิภาพในการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรีย *Escherichia coli* และ *Staphylococcus aureus* โดยมีร้อยละการลดลงของจำนวนเชื้อแบคทีเรียที่อยู่บนแผ่นเส้นใยเมื่อเวลาผ่านไป 24 ชั่วโมง เท่ากับ ร้อยละ 62.66 และ 92 ตามลำดับ ในขณะที่แผ่นเส้นใยที่ได้จากสารละลายผสมระหว่างพอลิแซ็กคาไรด์เจลที่ความเข้มข้นร้อยละ 4.42 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร และพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่ความเข้มข้นร้อยละ 15 โดยน้ำหนักต่อปริมาตรที่อัตราส่วนโดยปริมาตรของ PG:PVA เท่ากับ 60:40 จะแสดงประสิทธิภาพในการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรีย *Escherichia coli* เพียงชนิดเดียว โดยมีร้อยละการลดลงของเชื้อแบคทีเรียเท่ากับ 38.66 อย่างไรก็ตามพบว่า แผ่นเส้นใยพอลิแซ็กคาไรด์เจลจะมีประสิทธิภาพในการยับยั้งการ

เจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรีย *Staphylococcus aureus* ซึ่งเป็นแบคทีเรียแกรมบวกได้ดีกว่า โดยพบว่า แผ่นเลี้ยงยี่ที่เตรียมได้จากสารละลายผสมระหว่างพอลิแซ็กคาไรด์เจลาที่ความเข้มข้นร้อยละ 5.05 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร และพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่ความเข้มข้นร้อยละ 15 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ในอัตราส่วนโดยปริมาตรของ PG:PVA เท่ากับ 50:50 และ 40:60 จะมีร้อยละการลดลงของเชื้อแบคทีเรียเท่ากับ 97.5 และ 92.7 ดังแสดงในตารางที่ 4.10 ทั้งนี้เนื่องจากประจุลบที่เกิดจากการแตกตัวของหมู่ฟังก์ชันของกรดน้ำตาลกาแลกทูโรนิกจะสามารถเข้ารวมตัวกับประจุบวกที่อยู่บนผนังเซลล์ของเชื้อแบคทีเรียแกรมบวก ซึ่งอาจทำให้ผนังเซลล์ถูกทำลาย ส่งผลให้กลไกการผ่านเข้าออกบริเวณผนังเซลล์และสมดุลภายในเซลล์เสียไปและทำให้เซลล์แบคทีเรียตายได้ในที่สุด^[2] อย่างไรก็ตามพบว่า กลไกในการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรียทั้งสองชนิดบนแผ่นเลี้ยงยี่พอลิแซ็กคาไรด์เจลา ยังไม่เป็นที่แน่ชัด ซึ่งจะต้องทำการศึกษาถึงกลไกการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรียทั้งสองชนิดต่อไป



รูปที่ 4.45 จำนวนเชื้อแบคทีเรียชนิด *Escherichia coli* (*E. coli*) ที่หลงเหลือบน (ก) แผ่นมาตรฐาน (ข) แผ่นเลี้ยงยี่ 15 % PVA (ค) แผ่นเลี้ยงยี่ผสม PG 3.40 %w/v + PVA 15 %w/v (50:50) (ง) แผ่นเลี้ยงยี่ผสม PG 4.42 %w/v + PVA 15 %w/v (50:50) (จ) แผ่นเลี้ยงยี่ผสม PG 4.42 %w/v + PVA 15 %w/v (60:40) (ฉ) แผ่นเลี้ยงยี่ผสม PG 5.05 %w/v + PVA 15 %w/v (30:70) (ช) แผ่นเลี้ยงยี่ผสม PG 5.05 %w/v + PVA 15 %w/v (40:60) (ซ) แผ่นเลี้ยงยี่ผสม PG 5.05 %w/v + PVA 15 %w/v (50:50) ภายหลังจากการบ่มเชื้อเป็นเวลา 24 ชั่วโมง



รูปที่ 4.46 จำนวนเชื้อแบคทีเรียชนิด *Staphylococcus aureus* (*S. aureus*) ที่หลงเหลือบน (ก) แผ่นมาตรฐาน (ข) แผ่นเส้นใย 15 % PVA (ค) แผ่นเส้นใยผสม PG 3.40 %w/v + PVA 15 %w/v (50:50) (ง) แผ่นเส้นใยผสม PG 4.42 %w/v + PVA 15 %w/v (50:50) (จ) แผ่นเส้นใยผสม PG 4.42 %w/v + PVA 15 %w/v (60:40) (ฉ) แผ่นเส้นใยผสม PG 5.05 %w/v + PVA 15 %w/v (30:70) (ช) แผ่นเส้นใยผสม PG 5.05 %w/v + PVA 15 %w/v (40:60) (ฌ) แผ่นเส้นใยผสม PG 5.05 %w/v + PVA 15 %w/v (50:50) ภายหลังจากการบ่มเชื้อเป็นเวลา 24 ชั่วโมง

ตารางที่ 4.10 ร้อยละการลดลงของจำนวนแบคทีเรียที่มีอยู่บนเส้นใยภายหลังการบ่มที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียสเป็นระยะเวลา 0 และ 24 ชั่วโมง

เชื้อแบคทีเรีย	ตัวอย่าง	จำนวน แบคทีเรีย CFU/Sample (0 h.)	จำนวน แบคทีเรีย CFU/Sample (24 h.)	% Reduction
<i>Escherichia coli</i>	Blank	1.5×10^6	$>3.00 \times 10^6$	-
	15% pure PVA	-	$>3.00 \times 10^6$	0
	3.40 %w/v PG + 15 %w/v PVA(50:50); C#3	-	$>3.00 \times 10^6$	0
	4.42 %w/v PG + 15 %w/v PVA(50:50); C#4	-	5.6×10^5	62.66
	4.42 %w/v PG + 15 %w/v PVA(60:40); C#7	-	9.2×10^5	38.66
	5.05%w/v PG + 15 %w/v PVA(30:70); C#1	-	$>3.00 \times 10^6$	0
	5.05 %w/v PG + 15 %w/v PVA(40:60); C#5	-	$>3.00 \times 10^6$	0
	5.05 %w/v PG + 15 %w/v PVA(50:50); C#2	-	$>3.00 \times 10^6$	0
<i>Staphylococcus aureus</i>	Blank	1.0×10^6	$>3.00 \times 10^6$	-
	15% pure PVA	-	$>3.00 \times 10^6$	0
	3.40 %w/v PG + 15 %w/v PVA(50:50); C#3	-	$>3.00 \times 10^6$	0
	4.42 %w/v PG + 15 %w/v PVA(50:50); C#4	-	8.0×10^4	92.00
	4.42 %w/v PG + 15 %w/v PVA(60:40); C#7	-	$>3.00 \times 10^6$	0
	5.05 %w/v PG + 15 %w/v PVA(30:70); C#1	-	$>3.00 \times 10^6$	0
	5.05 %w/v PG + 15 %w/v PVA(40:60); C#5	-	7.3×10^4	92.70
	5.05 %w/v PG + 15 %w/v PVA(50:50); C#2	-	2.5×10^4	97.50

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ประกอบด้วย 3 ส่วนหลักคือ การเตรียมแผ่นเส้นใยอิเล็กทริกสปันจากสารละลายพอลิแซ็กคาไรด์เจลและสารละลายผสมของพอลิแซ็กคาไรด์เจลและพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ การเชื่อมขวางแผ่นเส้นใยพอลิแซ็กคาไรด์เจล และการทดสอบประสิทธิภาพในการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรียของแผ่นเส้นใยพอลิแซ็กคาไรด์เจล

จากการศึกษาการเตรียมเส้นใยจากพอลิแซ็กคาไรด์เจลด้วยกระบวนการอิเล็กทริกสปันพบว่า ไม่สามารถเตรียมเส้นใยจากสารละลายพอลิแซ็กคาไรด์เจลบริสุทธิ์ได้แม้จะมีการเติมสารลดแรงตึงผิว หรือลดความหนืดของสารละลายด้วยปฏิกิริยาออกซิเดชันหรือการให้ความร้อนก็ตาม โดยพบว่า เมื่อทำการอิเล็กทริกสปันสารละลายพอลิแซ็กคาไรด์เจลที่ความเข้มข้นร้อยละ 6 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ที่มีการเติมสารลดแรงตึงผิวที่มีประจุลบ ประจุบวก ไม่มีประจุ และมีประจุทั้งลบและบวก จะได้อนุภาคที่มีขนาด 402 901 459 และ 474 นาโนเมตร ตามลำดับ และเมื่อทำการเตรียมเส้นใยสารละลายพอลิแซ็กคาไรด์เจลที่ความเข้มข้นร้อยละ 6 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ที่มีการเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ซึ่งเป็นสารออกซิไดส์ที่ความเข้มข้นร้อยละ 2 4 และ 6 โดยปริมาตร และเร่งปฏิกิริยาโดยการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 นาที ก็จะได้เป็นอนุภาคที่มีขนาด 475 459 และ 371 นาโนเมตร โดยไม่พบลักษณะของเส้นใยปรากฏเช่นกัน แต่จะสามารถเตรียมเส้นใยได้จากสารละลายผสมของพอลิแซ็กคาไรด์เจลที่ความเข้มข้นร้อยละ 2 3 และ 4 โดยน้ำหนักต่อปริมาตรและพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่ความเข้มข้นร้อยละ 15 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ในอัตราส่วนโดยปริมาตรของ PG:PVA เท่ากับ 50:50 ซึ่งเส้นใยที่ได้มีขนาดตั้งแต่ 200 ถึง 400 นาโนเมตร อย่างไรก็ตามพบว่า จะเกิดหยดของสารละลายขนาดใหญ่ตกลงบนแผ่นเส้นใยเมื่อเวลาผ่านไป 1 ชั่วโมง แต่เมื่อทำการเตรียมเส้นใยจากสารละลายผสมของพอลิแซ็กคาไรด์เจลที่ทำการแยกส่วนที่ละลายไม่สมบูรณ์ออกด้วยการปั่นเหวี่ยงตะกอนที่มีความเข้มข้นเท่ากับร้อยละ 3.40 4.42 และ 5.05 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร และพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่ความเข้มข้นร้อยละ 15 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร จะสามารถปั่นเส้นใยได้อย่างต่อเนื่องเป็นระยะเวลาสั้น โดยเส้นใยที่ได้จะมีลักษณะเรียบ และมีขนาดใหญ่ขึ้นเมื่อสารละลายมีความเข้มข้นของพอลิเมอร์ทั้งสองเพิ่มขึ้น และมีอัตราส่วนของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์มาก อย่างไรก็ตามพบว่า เส้นใยที่ได้จะมีขนาดเล็กลงเมื่อมีการให้ความต่างศักย์ทางไฟฟ้าเพิ่มขึ้นถึง 25 กิโลโวลต์ ซึ่งถือว่าเป็นค่า

ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่เหมาะสมที่สุดในการเตรียมเส้นใย เนื่องจากจะทำให้เส้นใยถูกยึดตั้งได้อย่างต่อเนื่องนั่นเอง

เมื่อทำการศึกษาความสามารถในการเชื่อมขวางแผ่นเส้นใยด้วยวิธีต่าง ๆ พบว่า แผ่นเส้นใยที่เตรียมได้จะกลายเป็นเจลและไม่เหลือโครงสร้างของเส้นใยเมื่อทำการเชื่อมขวางด้วยสารละลายแคลเซียมคลอไรด์และกรดมาเลอิก ในขณะที่การเชื่อมขวางด้วยการอบไอระเหยของสารละลายกลูตาไรต์ไฮดริสที่อุณหภูมิห้องเป็นระยะเวลา 2 ชั่วโมง จะได้ลักษณะของเส้นใยภายหลังการเชื่อมขวางที่ดีที่สุด ทั้งนี้เนื่องจากแผ่นเส้นใยจะสามารถคงรูป และยังคงมีโครงสร้างของเส้นใย และมีความเป็นรูพรุนแม้จะทำการทดสอบด้วยการละลายน้ำก็ตาม โดยแผ่นเส้นใยที่ได้จากสารละลายผสมของพอลิแซ็กคาไรด์เจลภายหลังปั่นเหวี่ยงตะกอนที่ความเข้มข้นร้อยละ 3.40 4.40 และ 5.05 โดยปริมาตร และพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่ความเข้มข้นร้อยละ 15 โดยปริมาตร ในอัตราส่วนของ PG:PVA ต่าง ๆ จะมีร้อยละการเชื่อมขวางเฉลี่ยถึง 99.5 ซึ่งจะทำให้แผ่นเส้นใยมีประสิทธิภาพในการต้านทานน้ำ และเหมาะสมต่อการนำไปใช้งานมากยิ่งขึ้น

เมื่อทดสอบประสิทธิภาพในการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรีย *S.aureus* และ *E.coli* พบว่า แผ่นเส้นใยที่เตรียมได้จากสารละลายผสมระหว่างพอลิแซ็กคาไรด์เจลที่ผ่านการปั่นเหวี่ยงตะกอนที่ความเข้มข้นร้อยละ 4.42 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร และพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่ความเข้มข้นร้อยละ 15 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ในอัตราส่วนโดยปริมาตรของ PG:PVA เท่ากับ 50:50 จะมีประสิทธิภาพในการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรีย *E. coli* และ *S. aureus* โดยมีร้อยละการลดลงของจำนวนเชื้อแบคทีเรียที่อยู่บนแผ่นเส้นใยเมื่อเวลาผ่านไป 24 ชั่วโมงเท่ากับร้อยละ 62.66 และ 92 ตามลำดับ ในขณะที่แผ่นเส้นใยที่ได้จากสารละลายผสมระหว่างพอลิแซ็กคาไรด์เจลที่ความเข้มข้นร้อยละ 4.42 โดยน้ำหนักต่อปริมาตรและพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่ความเข้มข้นร้อยละ 15 โดยน้ำหนักต่อปริมาตรในอัตราส่วนโดยปริมาตรของ PG:PVA เท่ากับ 60:40 จะแสดงประสิทธิภาพในการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรีย *E. coli* เพียงชนิดเดียว โดยมีร้อยละการลดลงของเชื้อแบคทีเรียเท่ากับ 38.66 อย่างไรก็ตามพบว่า แผ่นเส้นใยพอลิแซ็กคาไรด์เจลจะมีประสิทธิภาพในการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรีย *S. aureus* ซึ่งเป็นแบคทีเรียแกรมบวกได้ดีกว่า โดยพบว่าแผ่นเส้นใยที่เตรียมได้จากสารละลายผสมระหว่างพอลิแซ็กคาไรด์เจลที่ความเข้มข้นร้อยละ 5.05 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร และพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่ความเข้มข้นร้อยละ 15 โดยน้ำหนักต่อปริมาตรในอัตราส่วนโดยปริมาตรของ PG:PVA เท่ากับ 50:50 และ 40:60 จะมีร้อยละการลดลงของเชื้อแบคทีเรียเท่ากับ 97.5 และ 92.7 ตามลำดับ

5.1 ข้อเสนอแนะ

- 1) ควรศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับอิทธิพลของปริมาณสารลดแรงตึงผิวแต่ละชนิดต่อการขึ้นรูปเส้นใยด้วยกระบวนการอิเล็กโทรสปินนิง
- 2) ควรศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับการลดความหนืดโดยการใช้สารออกซิไดส์ชนิดอื่น ๆ เพื่อให้ได้สารละลายพอลิแซ็กคาไรด์เจลที่มีน้ำหนักโมเลกุลและความหนืดที่เหมาะสมต่อการเตรียมเส้นใยด้วยกระบวนการอิเล็กโทรสปินนิง
- 5) ควรศึกษาน้ำหนักโมเลกุล และองค์ประกอบที่แน่นอนของพอลิแซ็กคาไรด์เจลส่วนที่ไม่สามารถละลายน้ำและตกตะกอนออกมาภายหลังการปั่นเหวี่ยงแยกตะกอน
- 6) ควรศึกษาปัจจัยอื่น ๆ ด้านกระบวนการผลิตที่มีผลต่อลักษณะและขนาดของเส้นใยที่เตรียมได้ เช่น ระยะห่างระหว่างฉากรองรับ และอัตราการไหลของสารละลาย
- 3) ควรทดสอบประสิทธิภาพในการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรียด้วยวิธีการทดสอบอื่น ๆ เช่น วิธี Clear zone เพื่อยืนยันผลการทดสอบที่ถูกต้อง
- 4) ควรศึกษาอิทธิพลของลักษณะและขนาดของเส้นใยต่อการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรียชนิดต่าง ๆ

รายการอ้างอิง

- [1] Pongsamart, S. and Panmaung, T. Isolation of polysaccharides from fruit-hulls of durian (*Durio Zibethinus L.*). Songklanakarin Journal of Science and Technology 20 (1998): 323-332.
- [2] Lipipun, V., Nantawanit, N., Pongsamart, S. Antimicrobial activity (in vitro) of polysaccharide gel from durian fruit-hulls. Songklanakarin Journal of Science and Technology 24 (2002): 31-8.
- [3] Thunyakitpisal, Ng., Phetcharakupt, V., Thunyakitpisal, P. and Pongsamart, S. A study of durian-rind polysaccharide mouthwash on the level of *S.mutans* in fixed orthodontic patient. Journal of the thai association of orthodontists Volume 1 (2011): 11-17.
- [4] Girddit, W., Sutanthavibul, N., Lertchaiporn, J. and Pongsamart, S. Properties of polysaccharide gel (PG) from fruit-hull of durian and its use in film-dressing preparation. Thai Journal of Pharmaceutical Sciences 25 (2001): Supplement: 6.
- [5] Chansiripornchai, P. and Pongsamart, S. Property of polysaccharide gel from durian as dressing preparation and its effect on wound healing in dog skin. Thai Journal of Veterinary Medicine 38 (2008): 55-61.
- [6] Chansiripornchai, P., Pramatwinai, C., Rungsipipat, A., Pongsamart, S. and Nakchat, O. The efficiency of polysaccharide gel extracted from fruit-hulls of durian (*Durio zibethinus L.*) for wound healing in pig skin. Acta horticulturae journal 679 (2005): 37-43.
- [7] Doshi, J. and Reneker, D.H. Electrospinning process and application of electrospun fibres. Journal of Electrostatics 35(2-3)(1995): 151-160.
- [8] Kriegel, C., Kit, K.M., McClements, D.J. and Weiss, J. Electrospinning of chitosan-poly (ethylene oxide) blend nanofibers in the presence of micellar surfactant solutions. Polymer 50 (2009): 189-200.

- [9] Shahidul, I. and Mohammad, Rezaul, K. Fabrication and characterization of poly (vinyl alcohol)/alginate blend nanofibers by electrospinning method. Colloids and Surfaces A: Physicochem. Engineering Aspect 366 (2010): 135-140.
- [10] Byung, M., Sung, W., Jung N., Young Y., Taek, L., Pil K. and Won, P. Chitin and chitosan nanofibers: electrospinning of chitin and deacetylation of chitin nanofibers. Polymer 45 (2004): 7137–7142.
- [11] Theerathanagorn, T., Sapmaneeukul, W., Boonkerd, K. and Rangkupan, R. Preparation of electrospun nanofiber mats from polysaccharide extracted from durian hulls. Proceeding of 2nd Polymer Conference of Thailand (PCT-2). 20-21. October 2011, Convention Center, Chulabhorn Research Institute, Bangkok.
- [12] Yang, D., Li, Y. and Nie, J. Preparation of gelatin/PVA nanofibers and their potential application in controlled release of drugs. Carbohydrate Polymers 69 (2007): 538-543.
- [13] Lili, W., Xiaoyan, Y. and Jing, S. Immobilization of cellulase in nanofibrous PVA membranes by electrospinning. Journal of Membrane Science 250 (2005): 167–173.
- [14] Christina, T., Carl, S., Jonathon, H., and Saad, A. K. In Situ Cross-Linking of Electrospun Poly (vinyl alcohol) Nanofibers. Macromolecules 43 (2010): 630–637.
- [15] Christopher, A. et al. Electrospinning alginate-based nanofibers: From blends to crosslinked low molecular weight alginate-only systems. Carbohydrate Polymers 85 (2011) 111–119.
- [16] Sharma, B.R., Naresh, L., Dhuldhoya, N.C., Merchant, S.U. and Merchant, U.C. An Overview on Pectins. Times Food Processing Journal June-July Issue (2006): 44-51.
- [17] Brent L. R., Malcolm A. O. and Debra M. Pectins: structure, biosynthesis, and oligogalacturonide-related signaling. Phytochemistry 57 (2001) 929–967.

- [18] ปฏิกิริยาเคมีและการเปลี่ยนแปลงทางเคมีของแป้งที่สำคัญ. [ออนไลน์].2552.
แหล่งที่มา: <http://gumunbah.pbworks.com/w/page/8665289/7>
[5 พฤษภาคม 2555]
- [19] Maria H., Heloisa C., Nina W.and Gilvan W. Extraction of Pectin From Apple Pomace. Brazilian archives of Biology and technology 48 (2005): 259-266.
- [20] Padmadisatra, et al.New insulating particleboards from durian peel and coconut coir. Building and Environment 38 (2003):435-441.
- [21] Hokputsa, S., Girddit, W., Pongsamart, S., Inngjerdingen, K., Heinze, T., Koschella, A., Harding, S.E. andPaulsen, B.S. Water-soluble polysaccharideswith pharmaceutical importance from durian rinds (Durio zibethinus Murr.): isolation, fractionation, characterization and bioactivity. CarbohydratePolymers 56 (2004): 47-481.
- [22] Lertchaiporn, J., Kerddit, W., Vayumhasuwan, P. and Pongsamart, S. Gelling and film forming properties of polysaccharide gel from fruit hulls of durian for application in pharmaceutical products.Songklanakarin Journal of Science and Technology 23 (2001):56-62.
- [23] Lennart, P. Gelling polysaccharides. Colloid & Interface Science 3 (1998):643-650.
- [24] พอลิแซ็กคาไรด์. [ออนไลน์].2549. แหล่งที่มา: [http://eu.lib.kmutt.ac.th/elearning/Course ware /BCT611/Chap4 /Chap4_intro.htm](http://eu.lib.kmutt.ac.th/elearning/Course%20ware/BCT611/Chap4/Chap4_intro.htm) [23 มีนาคม 2555]
- [25] Nickerson, M.T., Paulson, A.T. and Speers, R.A. Rheological properties of gellan solutions: effect of calcium ions and temperature on pre-gel formation. Food Hydrocolloids 17 (2003): 577-583.
- [26] Pongsamart, S., Nanatawanit, N., Lertchaipon, J. and Lipipun, V. Novel water soluble antibacterial dressing of durian polysaccharide gel. Acta horticulturae journal678 (2005): 65-73.

- [27] James, R. H. and Joseph A. G. A Review of Wound Healing and Wound Dressing Products. The Journal of Foot and Ankle Surgery 36 (1997): 2-14.
- [28] Remeker, D.H. and Yarin A.L. Electrospinning jets and polymer nanofibers. Polymer 10 (2008): 10-16.
- [29] สารหน้ารู้: Electrospinning ตอนที่ 2. [ออนไลน์].2552.แหล่งที่มา: <http://physics.kku.ac.th/smsg/wordpress/?p=527> [5 มีนาคม 2555]
- [30] Saxena, S.K. POLYVINYL ALCOHOL (PVA). Chemical and Technical Assessment (CTA) 61st JECFA (2004): 1-3.
- [31] Dong, Y.Q. et al. Preparation of Poly (vinyl alcohol) sodium alginate hollow fiber composite membranes and pervaporation dehydration characterization of aqueous alcohol mixtures. Desalination 193 (2006): 202-210.
- [32] Yuhong, W., You-Lo, H. Crosslinking of polyvinyl alcohol (PVA) fibrous membranes with glutaraldehyde and PE G diacylchloride. Journal of Applied Polymer Science116 (2010): 3249–3255.
- [33] สายัณห์สุยพงษ์พันธ์ และวิรัตน์ปฐมชัยอัมพร. ความหนืดคุณลักษณะเฉพาะของของไหล. [ออนไลน์].เข้าถึงได้จาก www.dss.go.th/dssweb/starticles/.../pep_9_2549_viscosity.pdf. [5 มีนาคม 2555]
- [35] Carbohydrate technology. [ออนไลน์].2553. แหล่งที่มา http://eu.lib.kmutt.ac.th/Courseware/BCT611/Chap4/chapter4_6.html [1 กรกฎาคม 2555]

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

วิธีการสกัดพอลิแซ็กคาไรด์เจลจากเปลือกทุเรียน

1. ขั้นตอนการเตรียมเปลือกทุเรียน

นำเปลือกทุเรียนหมอนทองสดบดละเอียดน้ำหนัก 15 กิโลกรัม มาล้างด้วย 0.5 % Citric acid ประมาณ 15 ลิตร แล้วอบแห้งประมาณ 36-48 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 50 °C เก็บเปลือกแห้งและทำการชั่งน้ำหนัก (น้ำหนักที่ได้จะอยู่ที่ประมาณ 2,000-2,500 กรัม) นำเปลือกที่ได้มาทำการแช่และล้างในขั้นต่อไป

2. ขั้นตอนการแช่และล้างเปลือก

2.1 นำเปลือกทุเรียนอบแห้งที่เตรียมไว้จากข้อ 1 มาแช่ใน 5 % Acid Alcohol ปริมาตร 30 ลิตร (วิธีการเตรียมสารข้อที่ 1) เป็นเวลา 6 ชั่วโมง (ระหว่างที่แช่คนเป็นครั้งคราว) เมื่อครบ 6 ชั่วโมง กรองเปลือกทุเรียนด้วยผ้าขาวบาง

2.2 นำเปลือกข้อ 2.1 มาล้างด้วยสารละลายโซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนต (NaHCO_3) ปริมาตร 30 ลิตร (วิธีการเตรียมสารข้อที่ 3) กรองเปลือกทุเรียนด้วยผ้าขาวบาง

2.3 นำเปลือกจากข้อ 2.2 มาล้างด้วย 75% Alcohol ปริมาตร 22.8 ลิตร (วิธีการเตรียมสารข้อที่ 5) กรองเปลือกทุเรียนด้วยผ้าขาวบาง นำเปลือกที่ได้ใส่ภาชนะเก็บไว้ที่อุณหภูมิ 4 °C เพื่อนำไปทำการสกัดต่อไป

3. ขั้นตอนการสกัด

3.1 ต้มน้ำ (DI water) 30 ลิตร จนน้ำเดือด ก่อนนำเปลือกที่เตรียมจากข้อ 2 มาต้มในน้ำ เทใส่ลงไปคนให้ทั่วแล้วเติม Sodium hexametaphosphate ($(\text{NaPO}_3)_6$) น้ำหนัก 150 กรัม คนให้สารละลายกระจายทั่วกัน และวัด pH หาก pH มากกว่า 4 ให้เติม Citric acid ลงไปประมาณ 4-6 กรัม จับเวลาในการต้ม 45 นาที

3.2 เมื่อครบ 45 นาที นำน้ำสกัด PG ที่ได้จากข้อ 3.1 มากกรองด้วยผ้าขาวบางและกรองผ่านเครื่องกรอง โดยผ่านชุดกรองหยาบ (ควอร์ต) จำนวน 2 ชุด ได้กรองขนาด 5.1 และขนาด 0.45 μm ตามลำดับ เก็บน้ำสกัด PG ที่ผ่านการกรองเป็นน้ำ 1

3.3 ต้มน้ำ (DI water) 30 ลิตร จนน้ำเดือด นำกากของเปลือกจากข้อ 3.2 มาต้มสกัดซ้ำตามวิธีข้อ 3.1 เติม $(\text{NaPO}_3)_6$ น้ำหนัก 90 กรัม คนให้สารละลายกระจายทั่วกัน คนให้สารละลายกระจายทั่วกัน และวัด pH หาก pH มากกว่า 4 ให้เติม Citric acid ลงไปประมาณ 3-4 กรัม จับเวลาในการต้ม 45 นาที

3.4 เมื่อครบ 45 นาที นำน้ำสกัด PG ที่ได้จากข้อ 3.3 มากรองด้วยผ้าขาวบางและกรองผ่านเครื่องกรอง ตามข้อ 3.2

3.5 นำน้ำสกัด PG ที่ได้จากข้อ 3.2 และ 3.4 มาทำการระเหยน้ำออกภายใต้ความดันต่ำด้วยเครื่อง Rotary Evaporator จนได้สารละลายสีเหลืองข้นเหนียว

4. ขั้นตอนการตกตะกอน

4.1 นำสารข้นเหนียวที่ได้จากข้อ 3.5 มาตกตะกอนด้วย 4% Acid Alcohol ที่แช่เย็นไว้ 4 °C (วิธีการเตรียมสารข้อที่ 2) ปริมาตร 3 เท่าของสารข้นเหนียวที่ได้ (โดยเทสารเหนียวให้เป็นสายบางๆ ซ้ำๆ ลงใน 4% Acid Alcohol ที่กวนวนอย่างต่อเนืองตลอดเวลา) กรองตะกอน PG สีขาว

4.2 นำตะกอน PG ที่ได้ จากข้อ 4.1 มาล้างด้วย 75 % Alcohol (วิธีการเตรียมสารข้อที่ 4) ปริมาตรพอท่วมตะกอน PG กรอง ตะกอน PG ด้วยผ้าไนลอน ทำซ้ำ 3 ครั้ง

4.3 นำตะกอน PG ที่ได้ จากข้อ 4.2 มาล้างด้วย 95 % Alcohol ปริมาตรพอท่วมตะกอน PG กรองตะกอน PG ด้วยผ้าไนลอน

4.4 นำตะกอนที่ได้จากข้อ 4.3 มาเกลี่ยบาง ๆ บนถาด (บันทึกลักษณะตะกอนและสี) นำไปอบที่อุณหภูมิ 50 °C ประมาณ 10-12 ชั่วโมง

4.5 นำ PG ที่ผ่านการอบแห้งจากข้อ 4.4 มาละลายด้วย DI water ให้สารละลายมีความเข้มข้น 3 % (3 %PG) ทำการวัด pH ด้วย pH Meter และวัดความหนืดของสารละลายด้วย Viscometer บันทึกผลที่ได้

วิธีการเตรียมสาร

1. 5% Acid Alcohol เตรียมโดยนำ 75% Alcohol 100 ml มาเติม HCL 5 ml
2. 4% Acid Alcohol เตรียมโดยนำ 75% Alcohol 100 ml มาเติม HCL 5 ml
3. สารละลาย NaHCO_3 เตรียมจากชั่ง NaHCO_3 มา 400 g. ละลายน้ำ 30 L
4. 75% Alcohol เตรียมจากนำ 95% Alcohol 3000 ml มาเติมน้ำลงไป 800 ml
5. นำ 95% Alcohol ปริมาตร 18 L เติมน้ำลงไป 4,800 ml จะได้ 75% Alcohol 22.8 L

ข้อควรระวังการสกัด

1. การต้มในข้อ 3.1 ใส่เปลือกที่อุณหภูมิ 80 °C อุณหภูมิไม่ให้เกิน 90 °C และไม่ต่ำกว่า 70 องศาเซลเซียส ครบ 20 นาที เปิดฝาหม้อต้ม จนครบ 45 นาที
2. การต้มในข้อ 3.2 ใส่เปลือกที่อุณหภูมิ 80 °C อุณหภูมิไม่ให้เกิน 90 °C และไม่ต่ำกว่า 70 องศาเซลเซียส เปิดฝาหม้อต้ม จนครบ 45 นาที

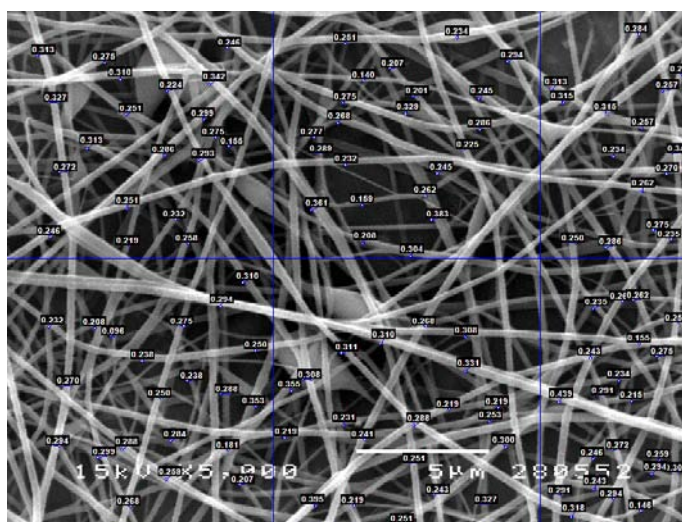
ภาคผนวก ข

ตาราง ก การหาความเข้มข้นของสารละลายพอลิแซ็กคาไรด์เจลภายใต้การปั่นเหวี่ยงตะกอนที่ความเร็วรอบ 4400 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 60 นาที

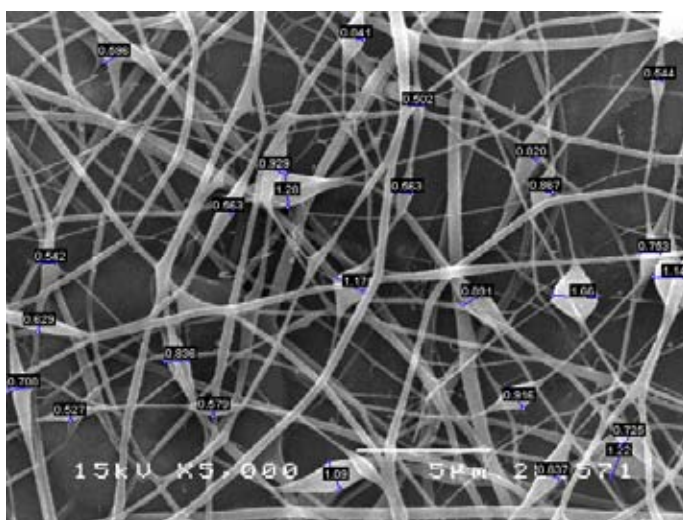
ความเข้มข้นของ PG(%w/v)	ครั้งที่	น้ำหนักหลอดเปล่า (g)	น้ำหนักหลอดและตะกอน PG แห้งจากสารละลาย 1 ml (g)	น้ำหนักPGแห้งในสารละลาย 1 ml (g)	น้ำหนักPGแห้งในสารละลาย 1 ml (g)	ร้อยละของน้ำหนักที่สูญเสีย (% weight loss)
2	1	1.0527	1.0699	0.0172	1.72	14.00
	2	1.0530	1.0687	0.0157	1.57	21.50
	3	1.0522	1.0695	0.0173	1.73	13.50
	น้ำหนักเฉลี่ย± SD	1.0526 ± 0.0004	1.0694 ± 0.0006	0.0167 ± 0.0009	1.67 ± 0.0896	16.33 ± 4.48
3	1	1.0732	1.0979	0.0247	2.47	17.67
	2	1.0735	1.0983	0.0248	2.48	17.33
	3	1.0742	1.0990	0.0248	2.48	17.33
	น้ำหนักเฉลี่ย± SD	1.0736 ± 0.0005	1.0984 ± 0.0006	0.0248 ± 0.0001	2.48 ± 0.0058	17.44 ± 0.19
4	1	1.0489	1.0838	0.0349	3.49	12.75
	2	1.0495	1.0830	0.0335	3.35	16.25
	3	1.0493	1.0830	0.0337	3.37	15.75
	น้ำหนักเฉลี่ย± SD	1.0492 ± 0.0003	1.0833 ± 0.0005	0.0340 ± 0.0008	3.40 ± 0.0757	14.92 ± 1.89
5	1	1.1352	1.1790	0.0438	4.38	12.40
	2	1.1356	1.1798	0.0442	4.42	11.60
	3	1.1354	1.1799	0.0445	4.45	11.00
	น้ำหนักเฉลี่ย± SD	1.1354 ± 0.0002	1.1796 ± 0.0005	0.0442 ± 0.0004	4.42 ± 0.0351	11.67 ± 0.70
6	1	1.0639	1.1145	0.0506	5.06	15.67
	2	1.0631	1.1143	0.0512	5.12	14.67
	3	1.0637	1.1135	0.0498	4.98	17.00
	น้ำหนักเฉลี่ย± SD	1.0636 ± 0.0004	1.1141 ± 0.0005	0.0505 ± 0.0007	5.05 ± 0.0702	15.78 ± 1.17

ภาคผนวก ค

ตัวอย่างการวัดขนาดของเส้นใยและเม็ดปิดด้วยโปรแกรม SEM Afore 5.21



รูป ก เส้นใยที่ได้จากสารละลายผสมของ PG 4.42 %w/v และ PVA 15 %w/v ในอัตราส่วนโดยปริมาตร PG:PVA เท่ากับ 50:50



รูป ข เส้นใยที่ได้จากสารละลายผสมของ PG 4.42 %w/v และ PVA 15 %w/v ในอัตราส่วนโดยปริมาตร PG:PVA เท่ากับ 60:40

ภาคผนวก ง

ตาราง ข ร้อยละการเชื่อมขวางของแผ่นเส้นใยด้วยการอบไอระเหยของสารละลายกลูตารัลดีไฮด์ที่อุณหภูมิห้อง เป็นระยะเวลา 2 ชั่วโมง

ตัวอย่าง	Sample	น้ำหนักแผ่นเส้นใยแห้ง ก่อนทำการเชื่อมขวาง (mg)	น้ำหนักแผ่นเส้นใยแห้ง หลังทำการเชื่อมขวางและแช่น้ำ (mg)	น้ำหนักแผ่นเส้นใย ที่สูญเสียไป (mg)	ร้อยละการเชื่อมขวาง (% crosslink)
PG 4 % w/v + PVA 15 % w/v (50/50)	1	184.26	183.90	0.36	99.80
	2	184.55	184.10	0.45	99.76
	3	184.23	183.50	0.73	99.60
	น้ำหนักเฉลี่ย± SD	184.35 ± 0.18	183.83 ± 0.31	0.51 ± 0.19	99.72 ± 0.10
PG 5 % w/v + PVA 15 % w/v (50/50)	1	297.82	296.37	1.45	99.51
	2	298.36	296.53	1.83	99.39
	3	297.34	296.49	0.85	99.71
	น้ำหนักเฉลี่ย± SD	297.84 ± 0.51	296.46 ± 0.08	1.38 ± 0.49	99.54 ± 0.17
PG 5 % w/v + PVA 15 % w/v (60/40)	1	196.41	195.09	1.32	99.33
	2	197.12	196.25	0.87	99.56
	3	196.36	195.35	1.01	99.49
	น้ำหนักเฉลี่ย± SD	196.63 ± 0.43	195.56 ± 0.61	1.07 ± 0.23	99.46 ± 0.12
PG 6 % w/v + PVA 15 % w/v (30/70)	1	293.52	293.43	0.09	99.97
	2	293.29	293.12	0.17	99.94
	3	294.03	292.81	1.22	99.59
	น้ำหนักเฉลี่ย± SD	293.61 ± 0.38	293.12 ± 0.31	0.49 ± 0.63	99.83 ± 0.21
PG 6 % w/v + PVA 15 % w/v (40/60)	1	214.31	214.01	0.30	99.86
	2	214.18	213.89	0.29	99.86
	3	214.20	213.08	1.12	99.48
	น้ำหนักเฉลี่ย± SD	214.23 ± 0.07	213.66 ± 0.51	0.57 ± 0.48	99.73 ± 0.22
PG 6 % w/v + PVA 15 % w/v (50/50)	1	154.32	153.76	0.56	99.64
	2	155.11	153.98	1.13	99.27
	3	154.29	153.95	0.34	99.78
	น้ำหนักเฉลี่ย± SD	154.57 ± 0.47	153.90 ± 0.12	0.68 ± 0.41	99.56 ± 0.26
PVA 15 % w/v	1	238.38	238.34	0.04	99.98
	2	239.10	238.89	0.21	99.91
	3	238.99	238.51	0.48	99.80
	น้ำหนักเฉลี่ย± SD	238.82 ± 0.39	238.58 ± 0.28	0.24 ± 0.22	99.90 ± 0.09

ภาคผนวก จ

ตาราง ค ร้อยละการลดลงของจำนวนแบคทีเรียที่มีอยู่บนเส้นใยภายหลังจากอบที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียสเป็นระยะเวลา 0 และ 24 ชั่วโมง

เชื้อแบคทีเรีย	ตัวอย่าง	จำนวนเชื้อแบคทีเรียเริ่มต้น (CFU)	จำนวนโคโลนีของแบคทีเรีย (24 hr)	จำนวนแบคทีเรีย CFU/Sample (0 hr)	จำนวนแบคทีเรีย CFU/Sample (24 hr)	% Reduction
<i>Escherichia coli</i>	Blank (0 hr)	10^0	>300	1.5×10^6	$>3.00 \times 10^6$	-
		10^{-1}	150.33±5.03			
	Blank	10^0	>300	1.5×10^6	$>3.00 \times 10^6$	-
		10^{-1}	>300			
	15% pure PVA	10^0	>300	-	$>3.00 \times 10^6$	0
		10^{-1}	>300			
	3.40 %w/v PG + 15 %w/v PVA(50:50); C#3	10^0	>300	-	$>3.00 \times 10^6$	0
		10^{-1}	>300			
	4.42 %w/v PG + 15 %w/v PVA(50:50); C#4	10^0	>300	-	5.6×10^5	62.66
		10^{-1}	56.33±10.12			
	4.42 %w/v PG + 15 %w/v PVA(60:40); C#7	10^0	>300	-	9.2×10^5	38.66
		10^{-1}	106±3.61			
	5.05 %w/v PG + 15 %w/v PVA(40:60); C#5	10^0	>300	-	$>3.00 \times 10^6$	0
		10^{-1}	>300			
	5.05 %w/v PG + 15 %w/v PVA(50:50); C#2	10^0	>300	-	$>3.00 \times 10^6$	0

เชื้อแบคทีเรีย	ตัวอย่าง	จำนวนเชื้อแบคทีเรีย เริ่มต้น (CFU)	จำนวนโคโลนี ของแบคทีเรีย (24 hr)	จำนวนแบคทีเรีย CFU/Sample (0 hr)	จำนวนแบคทีเรีย CFU/Sample (24 hr)	% Reduction
<i>Staphylococcus aureus</i>	Blank (0 hr)	10 ⁰	>300	1.5 x 10 ⁶	>3.00 x 10 ⁶	-
		10 ⁻¹	74±5			
	15% pure PVA	10 ⁰	>300	-	>3.00 x 10 ⁶	0
		10 ⁻¹	>300			
	3.40 %w/v PG + 15 %w/v PVA(50:50); C#3	10 ⁰	>300	-	>3.00 x 10 ⁶	0
		10 ⁻¹	>300			
	4.42 %w/v PG + 15 %w/v PVA(50:50); C#4	10 ⁰	74±5	-	8.0 x 10 ⁴	92.00
		10 ⁻¹	8±0			
	4.42 %w/v PG + 15 %w/v PVA(60:40); C#7	10 ⁰	>300	-	>3.00 x 10 ⁶	0
		10 ⁻¹	164.67±14.50			
	5.05 %w/v PG + 15 %w/v PVA(30:70); C#1	10 ⁰	>300	-	>3.00 x 10 ⁶	0
		10 ⁻¹	>300			
	5.05 %w/v PG + 15 %w/v PVA(40:60); C#5	10 ⁰	73.33±8.96	-	7.3 x 10 ⁴	92.70
		10 ⁻¹	7.33±3.06			
	5.05 %w/v PG + 15 %w/v PVA(50:50); C#2	10 ⁰	25.33±3.21	-	2.5 x 10 ⁴	97.50
		10 ⁻¹	1.33±2.31			

การคำนวณการลดลงของปริมาณเชื้อแบคทีเรียที่อยู่บนแผ่นเส้นใย

คำนวณร้อยละการลดลงของจำนวนเชื้อแบคทีเรีย ดังสมการ

$$100(C-A)/C=R$$

โดยที่

R = ร้อยละการลดลงของจำนวนเชื้อแบคทีเรีย (% Reduction)

A = จำนวนเชื้อแบคทีเรียที่อยู่บนชิ้นทดสอบที่สภาวะการทดสอบตามมาตรฐาน AATCC 100 ภายหลังจากสัมผัสชิ้นทดสอบเป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง

C = จำนวนเชื้อแบคทีเรียที่อยู่บนชิ้นงานมาตรฐาน (Blank) ภายหลังจากสัมผัสชิ้นงานมาตรฐานเป็นระยะเวลา 0 ชั่วโมง

ตัวอย่างการคำนวณ

คำนวณประสิทธิภาพในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย *Escherichia coli* ของแผ่นเส้นใยที่ได้จากสารละลายผสมของพอลิแซ็กคาไรด์เจลาที่ความเข้มข้นร้อยละ 4.42 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร และพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่ความเข้มข้นร้อยละ 15 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ที่อัตราส่วนโดยปริมาตร PG:PVA เท่ากับ 50:50 (C#4)

จากสมการ $100(C-A)/C=R$

เมื่อ C = 150

A = 56

จะได้ % Reduction เท่ากับ $100(150-56)/150= 66.67 \%$

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวธาริณี วีระธนากร เกิดที่จังหวัดนนทบุรี ในวันที่ 4 พฤศจิกายน พ.ศ. 2530 สำเร็จ การศึกษาปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาพอลิเมอร์และสิ่งทอ ภาควิชาวัสดุศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2552 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิทยาศาสตร มหาบัณฑิต เมื่อปีการศึกษา 2553 สาขาวิชาวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ประยุกต์และเทคโนโลยีสิ่งทอ ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ผลงานวิจัยที่มีการเผยแพร่

- Theerathanagorn, T., Sapmaneenukul, W., Boonkerd, K. and Rangkupan, R. Preparation of electrospun nanofiber mats from polysaccharide extracted from durian hulls. Proceeding of 2nd Polymer Conference of Thailand (PCT-2). 20-21. October 2011, Convention Center, Chulabhorn Research Institute, Bangkok.