

การปรับปรุงสมบัติไม่ชอบน้ำของผ้าอเล็กโทรสปั้นพอลิแล็กติกแอซิดโดยการปรับสภาพด้วยพลาสมา

นางสาวนลินทิพย์ ช่างสาร

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาปิโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)

ปีการศึกษา 2555

เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

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.

IMPROVEMENT OF HYDROPHOBIC PROPERTY OF ELECTROSPUN POLY(LACTIC
ACID) FABRICS BY PLASMA TREATMENT

Miss Nalintip Changsam

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

Faculty of Science

Chulalongkorn University

Academic Year 2012

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การปรับปรุงสมบัติไม่ชอบน้ำของผ้าอเล็กโทรสบัน
	พอลิแล็กติกแอซิดโดยการปรับสภาพด้วยพลาสมา
โดย	นางสาวนลินทิพย์ ช่างสาร
สาขาวิชา	ปิโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.บุญโชติ เผ่าสวัสดิ์ยรรยง
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วรวรรณ พันธุ์นาวิน

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยรับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิทยาศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ หารหนองบัว)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. ศุภวรรณ ตันตยานนท์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.บุญโชติ เผ่าสวัสดิ์ยรรยง)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วรวรรณ พันธุ์นาวิน)

..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วราวุฒิ ตั้งพสุธาดล)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เดิมศักดิ์ ศรีศิริรินทร์)

นลินทิพย์ ช่างสาร :การปรับปรุงสมบัติไม่ชอบน้ำของผ้าอิเล็กทรอนิกส์ปั่นพอลิแล็กติกแอซิด
 โดยการปรับสภาพด้วยพลาสมา.(IMPROVEMENT OF HYDROPHOBIC PROPERTY
 OF ELECTROSPUN POLY(LACTIC ACID) FABRICS BY PLASMA TREATMENT)
 อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ผศ.ดร.บุญโชติ เผ่าสวัสดิ์ยรรยง, อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์
 ร่วม : ผศ. ดร.วรวรรณ พันธุมนาวิน 70 หน้า.

ความขรุขระในระดับนาโนเมตรและไมโครเมตรและสมบัติไม่ชอบน้ำของแก้วที่มีขนาด
 นาโนเมตรจะลดพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างหยดน้ำและผิวของใบบัวทำให้เกิดสมบัติไม่ชอบน้ำยิ่งยวด
 โครงสร้างบนผิวของใบบัวจึงถูกเลียนแบบเพื่อใช้ในการปรับปรุงสมบัติไม่ชอบน้ำของพอลิแล็กติก
 แอซิด พอลิแล็กติกแอซิดจะถูกเตรียมด้วยเทคนิคอิเล็กทรอนิกส์ปั่นแล้วนำมาอบพลาสมาของ
 แก๊สซัลเฟอร์เฮกซะฟลูออไรด์เพื่อปรับปรุงสมบัติไม่ชอบน้ำ ใช้เทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน
 แบบส่องกราดศึกษาลักษณะของแผ่นเส้นใยที่เตรียมได้ศึกษาองค์ประกอบทางเคมีที่เกิดขึ้นหลัง
 อบพลาสมาด้วยอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี เอกซ์-เรย์โฟโตอิเล็กตรอนสเปกโทรสโกปี และ
 อิเล็กตรอนโพรบไมโครอนาลิซิส พบว่าผิวของแผ่นเส้นใยที่มีความขรุขระจะทำให้หน้าสัมผัสกับผิว
 แผ่นเส้นใยได้น้อยลง อะตอมของฟลูออรีนที่ถูกเหนี่ยวนำลงบนผิวของแผ่นเส้นใยหลังอบ
 พลาสมาของแก๊สซัลเฟอร์เฮกซะฟลูออไรด์เป็นผลให้พลังงานผิวลดลง ดังนั้นในงานนี้จึงประสบ
 ความสำเร็จในการใช้เทคนิคอิเล็กทรอนิกส์ปั่นและกระบวนการอบพลาสมาของแก๊สซัลเฟอร์เฮก
 ซะฟลูออไรด์เพื่อเพิ่มสมบัติไม่ชอบน้ำยิ่งยวดของผ้าอิเล็กทรอนิกส์ปั่นพอลิแล็กติกแอซิด

สาขาวิชาปิโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์.....ลายมือชื่อนิสิต.....
 ปีการศึกษา 2555.....ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....
 ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม.....

5272362623 MAJOR PETROCHEMISTRY AND POLYMER SCIENCE

KEYWORDS :POLY(LACTIC ACID) / SF₆ PLASMA TREATMENT / ELECTROSPINNING

NALINTIP CHANGSARN : IMPROVEMENT OF HYDROPHOBIC PROPERTY OF ELECTROSPUN POLY(LACTIC ACID) FABRICS BY PLASMA TREATMENT.

ADVISOR : ASST.PROF. BOONCHOAT PAOSAWATYANYONG, Ph.D.,

CO-ADVISOR : ASST.RROF. WORAWAN BHANTHUMNAVIN, Ph.D., 70 pp.

The microstructure and nanostructure roughness and the hydrophobicity of nanoscale wax reduced contact area between water droplets and the leaf's surface resulting in leading to the generation of the superhydrophobicity. The structure of lotus leaves is mimicked to improvement of hydrophobicity of poly(lactic acid). The electrospun PLA fabrics were fabricated by electrospinning technique and then SF₆ plasma treatment was employed to improve its hydrophobicity surface. The morphology of the electrospun poly(lactic acid) fabrics were observed by scanning electron microscopy. Attenuated total reflection fourier transform infrared spectroscopy, X-ray photoelectron spectroscopy and Electron probe micro analysis were used to determine the changes in surface chemical composition of the treated fabrics. Our result revealed that the rough surface of the electrospun poly(lactic acid) fabrics decreased the contact area with water droplet. The fluorine atoms were introduced onto the electrospun surface after SF₆ plasma treatment, resulting in a decrease in its surface energy. Therefore the superhydrophobicity of the electrospun poly(lactic acid) fabrics were successfully fabricated *via* electrospinning and SF₆ plasma treatment.

Field of Study : Petrochemistry and

.....Polymer Science

Academic Year : 2012.....

Student's Signature

Advisor's Signature

Co-advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

ขอกราบขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.บุญโชติ เผ่าสวัสดิ์ยรรยง อาจารย์ที่ปรึกษาและผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วรวรรณ พันธุ์นาวัน อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม สำหรับวิชาความรู้ คำแนะนำต่างๆ ที่เป็นแนวทางในการทำงานวิจัยในทุกๆ ขั้นตอน ตลอดจนความช่วยเหลือที่จนกระทั่งวิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอกราบขอบพระคุณศูนย์ความเป็นเลิศด้านฟิสิกส์ที่สนับสนุนทุนในการทำงานวิจัยนี้ จนกระทั่งงานวิจัยและวิทยานิพนธ์นี้สามารถสำเร็จลุล่วง

ขอขอบพระคุณสำนักงานนวัตกรรมแห่งชาติ คุณมณฑา ไก่หิรัญ และศูนย์พัฒนาอุตสาหกรรมเซรามิก จังหวัดลำปาง สำหรับความอนุเคราะห์เมตตาสติภอลิแล็กติกแอสิด

ขอกราบขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ ดร. ศุภวรรณ ตันตยานนท์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วราวุฒิ ตั้งพสุธาตล และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เต็มศักดิ์ ศรีศรีรินทร์ ที่ได้ให้ความกรุณาอย่างยิ่งในการเป็นคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รวมถึงการให้คำแนะนำเพื่อแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ ทำให้วิทยานิพนธ์เล่มนี้มีความสมบูรณ์มากขึ้น

ท้ายที่สุดขอขอบพระคุณครอบครัวที่ให้การสนับสนุนในทุกๆ เรื่อง รวมถึงสมาชิกของห้องปฏิบัติการพลาสมาและผู้ที่มีอุปการะคุณทุกท่านที่ไม่ได้กล่าวนามในที่นี้ที่มีส่วนทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จได้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฎ
สารบัญภาพ.....	ฏ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 พอลิแล็กติกแอซิด (Poly(lactic acid), PLA).....	4
2.2 สมบัติไม่ชอบน้ำ (hydrophobicity).....	5
2.3 เทคนิคอิเล็กโทรสปินนิ่ง (electrosinining).....	9
2.3.1 ปัจจัยที่มีผลต่อลักษณะของเส้นใยที่ผลิตจากเทคนิคอิเล็กโทรสปินนิ่ง.....	11
2.3.1.1 ความหนืด(viscosity)และความเข้มข้นของสารละลาย(concentration).....	11
2.3.1.2 ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ให้ (applied voltage).....	12
2.3.1.3 ระยะห่างระหว่างปลายเข็มจนถึงวัสดุรองรับ (tip to collector distance).....	12
2.3.1.4 อัตราการไหลของสารละลาย (flow rate).....	13
2.3.2 การวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพของเส้นใยที่ได้จากเทคนิคอิเล็กโทรสปินนิ่ง.....	13
2.3.2.1 ขนาดของเส้นใย.....	13
2.3.2.2 พื้นที่ผิวของแผ่นเส้นใย.....	13
2.4 พลาสมา (plasma).....	15
2.4.1 ปฏิกริยาที่เกิดขึ้นในพลาสมาและทำให้เกิดอนุภาคต่างๆที่ว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยา (active species).....	15

	หน้า
2.4.1.1 การกระตุ้น (excitation).....	15
2.4.1.2 การแตกตัวด้วยอิเล็กตรอน (ionization by electrons).....	15
2.4.1.3 การแยกตัว (dissociation).....	15
2.4.1.4 การแลกเปลี่ยนประจุ (charge exchange).....	16
2.4.2 เทคนิคที่ใช้ตรวจสอบชนิดอนุภาคที่เกิดขึ้นในกระบวนการอาบ พลาสมา.....	16
2.4.3 งานวิจัยที่ใช้กระบวนการอาบพลาสมาในการปรับปรุงสมบัติไม่ชอบน้ำ.....	17
2.4.4 เทคนิคที่ใช้ตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบทางเคมีบนผิววัสดุที่ถูก อาบพลาสมา.....	19
2.4.4.1 เทคนิคอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (Infrared Spectroscopy, IR).....	19
2.4.4.2 เทคนิคเอกซ์-เรย์โฟโตอิเล็กตรอนสเปกโทรสโกปี (X-ray Photoelectron Spectroscopy, XPS)	21
2.3.4.3 เทคนิคอิเล็กตรอนโพรบไมโครอนาลิซิส (Electron Probe Microanalysis , EPMA).....	21
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	23
3.1 สารเคมี.....	23
3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในเทคนิคอิเล็กโทรสปินนิง.....	23
3.3 ขั้นตอนและวิธีการทดลอง.....	23
3.3.1 ขั้นตอนการเตรียมสารละลายที่ใช้ในเทคนิคอิเล็กโทรสปินนิง.....	23
3.3.2 ขั้นตอนการขึ้นรูปเส้นใยโดยใช้เทคนิคอิเล็กโทรสปินนิง.....	24
3.3.3 การปรับปรุงสมบัติไม่ชอบน้ำของเส้นใยพอลิแล็กติกแอซิดด้วยเครื่องอาบ พลาสมา.....	25
3.3.3.1 ภาชนะสุญญากาศ (chamber).....	25
3.3.3.2 ระบบปั๊มสุญญากาศ (vacuum pump system).....	25
3.3.3.3 ระบบแก๊ส (gas system).....	25
3.3.3.4 ระบบให้กำเนิดพลาสมา (plasma system).....	26
3.4 การตรวจสอบสมบัติของเส้นใยพอลิแล็กติกแอซิด.....	26
3.4.1 การตรวจสอบขนาดของเส้นใยพอลิแล็กติกแอซิดที่เตรียมจากเทคนิค อิเล็กโทรสปินนิง.....	26

3.4.2 การตรวจสอบพื้นที่ผิวของเส้นใยพอลิแล็กติกแอซิดที่เตรียมจากเทคนิค อิเล็กโทรสปินนิง.....	26
3.4.3 การตรวจสอบองค์ประกอบทางเคมีของเส้นใยพอลิแล็กติกแอซิดก่อนและ หลังอาบพลาสมาทำด้วยเทคนิคต่างๆ.....	27
3.4.3.1 เทคนิคแอทเทนนูเอเทดโททัลรีเฟล็กชันฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์ม อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (Attenuated Total Reflection Fourier Transform Infrared Spectroscopy, ATR-FTIR)	27
3.4.3.2 เทคนิคเอกซ์-เรย์ โฟโตอิเล็กตรอนสเปกโทรสโกปี (X-ray Photoelectron Spectroscopy, XPS)	27
3.4.3.3 เทคนิคอิเล็กตรอนโพรบไมโครอานาลิซิส (Electron Probe Microanalysis, EPMA)	27
3.4.4 การตรวจสอบสมบัติไม่ชอบน้ำของเส้นใยพอลิแล็กติกแอซิด.....	27
3.4.5 ตรวจสอบการเกิดฟลูออรีนในสถานะแก๊สด้วยเทคนิคออปติคอลลิมิต ชันสเปกโทรสโกปี (Optical Emission Spectroscopy, OES)	27
บทที่ 4 ผลการวิเคราะห์ข้อมูล.....	28
4.1 การเตรียมเส้นใยด้วยเทคนิคอิเล็กโทรสปินนิง.....	28
4.1.1 ผลของการปรับเปลี่ยนความเข้มข้นของสารละลายพอลิแล็กติกแอซิดที่ใช้ใน เทคนิคอิเล็กโทรสปินนิง.....	28
4.1.2 ผลของการปรับเปลี่ยนค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าจากเครื่องให้ศักย์ไฟฟ้ากำลัง สูงที่มีต่อลักษณะและขนาดของเส้นใยที่เตรียมได้จากเทคนิคอิเล็กโทรสปินนิง.....	29
4.1.3 ผลของการปรับเปลี่ยนระยะห่างระหว่างปลายเข็มจนถึงวัสดุรองรับที่มีต่อ ลักษณะและขนาดของเส้นใยที่เตรียมได้จากเทคนิคอิเล็กโทรสปินนิง.....	34
4.2 การปรับปรุงสมบัติไม่ชอบน้ำ.....	34
4.2.1 ความขรุขระของแผ่นเส้นใยพอลิแล็กติกแอซิด.....	
4.2.2 องค์ประกอบทางเคมีที่เกิดขึ้นจากกระบวนการอาบพลาสมาด้วย แก๊สซัลเฟอร์เฮกซะฟลูออไรด์.....	35 52
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....	52
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	52

	หน้า
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	53
เอกสารอ้างอิง.....	63
ภาคผนวก.....	70
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	

สารบัญตาราง

		หน้า
ตารางที่ 2.1	ค่าแรงตึงผิวของสาร.....	7
ตารางที่ 2.2	หมู่ฟังก์ชันบนฟิล์มพอลิแล็กติกแอซิดที่ถูกอาบพลาสมาด้วยแก๊สซัลเฟอร์เฮกซะฟลูออไรด์.....	20
ตารางที่ 4.1	ขนาด พื้นที่ผิว และค่ามุมสัมผัสของน้ำบนเส้นใยที่เตรียมจากสารละลาย	34
ตารางที่ 4.2	หมู่ฟังก์ชันบนแผ่นเส้นใยพอลิแล็กติกแอซิดก่อนและหลังอาบพลาสมา..	38
ตารางที่ 4.3	ปริมาณของหมู่ฟังก์ชันที่อยู่บนแผ่นเส้นใยพอลิแล็กติกแอซิดที่ได้จากเทคนิคเอกซ์-เรย์โฟโตอิเล็กตรอนสเปกโทรสโกปี.....	40
ตารางที่ 4.4	การปรับปรุงสมบัติไม่ชอบน้ำของแผ่นเส้นใยพอลิแล็กติกแอซิดโดยการเพิ่มกำลังวัตต์	44
ตารางที่ 4.5	สมบัติของฟิล์มและแผ่นเส้นใยพอลิแล็กติกแอซิด.....	47
ตารางที่ 4.6	การย่อยสลายด้วยวิธีฝังดิน.....	50
ตารางที่ ผ 1	ค่ามุมสัมผัสของน้ำกับแผ่นเส้นใยพอลิแล็กติกแอซิดที่เตรียมจากเทคนิคอิเล็กโทรสปินนิง แล้วอาบพลาสมาของแก๊สซัลเฟอร์เฮกซะฟลูออไรด์.....	64
ตารางที่ ผ 2	ค่ามุมสัมผัสของสารไดไอโอโดมีเทนกับแผ่นเส้นใยพอลิแล็กติกแอซิดที่เตรียมจากเทคนิคอิเล็กโทรสปินนิงแล้วอาบพลาสมาของแก๊สซัลเฟอร์เฮกซะฟลูออไรด์	65
ตารางที่ ผ 3	พลังงานพื้นผิวของแผ่นเส้นใยพอลิแล็กติกแอซิดที่เตรียมจากเทคนิคอิเล็กโทรสปินนิงแล้วอาบพลาสมาของแก๊สซัลเฟอร์เฮกซะฟลูออไรด์ ...	66

สารบัญภาพ

		หน้า
ภาพที่ 2.1	สูตรโครงสร้างของพอลิเล็กติกแอซิด.....	4
ภาพที่ 2.2	มุมสัมผัสของของเหลว (contact angle, θ).....	5
ภาพที่ 2.3	ลักษณะการเปียกผิวของน้ำบนวัสดุที่มีสมบัติชอบน้ำและวัสดุที่มีสมบัติไม่ชอบน้ำ.....	6
ภาพที่ 2.4	ตัวอย่างความขรุขระระดับไมโครเมตรบนใบไม้ที่มีสมบัติไล่น้ำ.....	8
ภาพที่ 2.5	ความขรุขระที่เป็นช่องว่างที่กักอากาศไว้บนผิวใบบัว.....	9
ภาพที่ 2.6	ช่วงต่างๆของการเกิดเส้นใยที่เตรียมจากเทคนิคอิเล็กโทรสปินนิง.....	10
ภาพที่ 2.7	ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดและพื้นที่ผิวของแผ่นเส้นใยในลอนที่เตรียมจากเทคนิคอิเล็กโทรสปินนิงด้วยความเข้มข้นของสารละลายพอลิเมอร์ต่างๆ.....	14
ภาพที่ 2.8	ปริมาณอะตอมของฟลูออรีนของโคพอลิเมอร์ระหว่างพอลิเมทิลเมทาคริเลทกับเตตระไฮโดรเปอร์ฟลูออโรเอทิลออลคริเลท.....	14
ภาพที่ 2.9	สเปกตรัมของอนุภาคฟลูออรีนจากเทคนิคเอกซเรย์ฟลูออริสเซนส์สเปกโทรสโกปีที่ตรวจวัดในกระบวนการอบพลาสติกของแก๊สซัลเฟอร์เฮกซะฟลูออไรด์.....	17
ภาพที่ 2.10	สเปกตรัมจากเทคนิคอินฟราเรดสเปกโทรสโกปีของผ้าพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลทที่อบพลาสติกของแก๊สซัลเฟอร์เฮกซะฟลูออไรด์.....	20
ภาพที่ 2.11	สเปกตรัมจากเทคนิคอินฟราเรดสเปกโทรสโกปีของฟิล์มพอลิเล็กติกทั้งที่ผ่านการอบพลาสติกของแก๊สซัลเฟอร์เฮกซะฟลูออไรด์และไม่ได้ผ่านการอบพลาสติก.....	21
ภาพที่ 3.1	เครื่องอิเล็กโทรสปินนิง.....	24
ภาพที่ 4.1	ภาพถ่ายจากเทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของแผ่นเส้นใยที่เตรียมจากเทคนิคอิเล็กโทรสปินนิงโดยใช้ค่าความเข้มข้นของสารละลายพอลิเล็กติกแอซิดต่างๆกัน ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าคงที่ที่ 15 kV ระยะห่างระหว่างปลายเข็มจนถึงวัสดุรองรับคงที่ที่ 15 cm และอัตราการฉีดสารละลายคงที่ที่ 0.6 mL/h	29

ภาพที่ 4.2	การกระจายขนาดของเส้นใยที่เตรียมจากเทคนิคอิเล็กโตรสปินนิงโดยใช้สารละลายพอลิแล็กติกแอซิดที่มีความเข้มข้นคงที่ที่ 10 wt% อัตราการฉีดสารละลายคงที่ที่ 0.6 mL/h โดยปรับเปลี่ยนค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า (kV) และระยะห่างระหว่างปลายเข็มจนถึงวัสดุรองรับ (cm) ต่างกัน	31
ภาพที่ 4.3	ภาพถ่ายจากเทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดเทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของแผ่นเส้นใยที่เตรียมจากเทคนิคอิเล็กโตรสปินนิงโดยใช้ระยะห่างระหว่างปลายเข็มจนถึงวัสดุรองรับต่างๆกัน ค่าความเข้มข้นของสารละลายพอลิแล็กติกแอซิดที่ 10 wt% ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าคงที่ที่ 15 kV และอัตราการฉีดสารละลายคงที่ที่ 0.6 mL/h	33
ภาพที่ 4.4	ภาพถ่ายจากเทคนิคเทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดกำลังขยายสูงของผิวฟิล์มพอลิแล็กติกแอซิดและผิวของแผ่นเส้นใยที่เตรียมจากเทคนิคอิเล็กโตรสปินนิงโดยใช้ค่าความเข้มข้นของสารละลายพอลิแล็กติกแอซิดที่ 10 wt% ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าคงที่ที่ 15 kV อัตราการฉีดสารละลายคงที่ที่ 0.6 mL/h และระยะห่างระหว่างปลายเข็มจนถึงวัสดุรองรับ 20 cm....	35
ภาพที่ 4.5	สเปกตรัมของสปีชีส์ในกระบวนการอบพลาสมาของแก๊สซัลเฟอร์เฮกซะฟลูออไรด์ที่ได้จากเทคนิคออปติคอลลิมิสชันสเปกโทรสโกปี.....	36
ภาพที่ 4.6	สเปกตรัมจากเทคนิคแอมเพนนูเอเทตโททัลรีเฟลกชันฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปีของการดูดกลืนอินฟราเรดของแผ่นเส้นใยพอลิแล็กติกแอซิดที่ไม่ได้อบพลาสมาและอบพลาสมาของแก๊สซัลเฟอร์เฮกซะฟลูออไรด์ (กำลังวัตต์ 50 W, เวลาในการอบพลาสมา 300 sec, ความดัน 0.5 torr).....	37
ภาพที่ 4.7	สเปกตรัมจากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคเอกซ์-เรย์โฟโตอิเล็กตรอนสเปกโทรสโกปีของแผ่นเส้นใยพอลิแล็กติกแอซิดไม่ได้อบพลาสมาและอบพลาสมาของแก๊สซัลเฟอร์เฮกซะฟลูออไรด์.....	39
ภาพที่ 4.8	อนุภาคของฟลูออรีนบนแผ่นเส้นใยพอลิแล็กติกแอซิดที่อบพลาสมาของแก๊สซัลเฟอร์เฮกซะฟลูออไรด์โดยใช้กำลังวัตต์ต่างๆที่ได้จากเทคนิคอิเล็กตรอนโพรบไมโครอนาลิซิส (เวลาในการอบพลาสมา 300 sec, ความดัน 0.5 torr).....	41

ภาพที่ 4.9	ค่าพลังงานพื้นผิวของแผ่นพอลิแล็กติกแอซิดที่อบพลาสติกโดยใช้กำลังวัตต์ที่ 20 W-50 W (เวลาในการอบพลาสติก 300 sec, ความดัน 0.5 torr).....	42
ภาพที่ 4.10	ค่ามุมสัมผัสของน้ำของแผ่นพอลิแล็กติกแอซิดที่อบพลาสติกโดยใช้กำลังวัตต์ที่ 20 W-50 W (เวลาในการอบพลาสติก 300 sec, ความดัน 0.5 torr)...	42
ภาพที่ 4.11	ลักษณะแผ่นเส้นใยพอลิแล็กติกแอซิดที่ถูกอบพลาสติกโดยใช้กำลังวัตต์ 75 W, ความดันคงที่ที่ 0.5 torr, และเวลาที่ใช้ในการอบพลาสติก 300 sec ...	43
ภาพที่ 4.12	อนุภาคของฟลูออรีนบนแผ่นเส้นใยพอลิแล็กติกแอซิดที่อบพลาสติกของแก๊สซัลเฟอร์เฮกซะฟลูออไรด์โดยใช้เวลาในการอบพลาสติกต่างๆกันที่ได้จากเทคนิคอิเล็กตรอนโพรบไมโครนาลิซิส.....	45
ภาพที่ 4.13	ค่าพลังงานพื้นผิวของแผ่นพอลิแล็กติกแอซิดที่อบพลาสติกโดยใช้เวลาในการอบพลาสติกที่ 0 sec-300 sec (ความดัน 0.5 torr และกำลังวัตต์ 0.5 torr).....	46
ภาพที่ 4.14	ค่ามุมสัมผัสของน้ำของแผ่นพอลิแล็กติกแอซิดที่อบพลาสติกโดยใช้เวลาในการอบพลาสติกที่ 0 sec-300 sec (ความดัน 0.5 torr และกำลังวัตต์ 0.5 torr).....	46
ภาพที่ 4.15	ลักษณะของแผ่นเส้นใยที่ถูกอบพลาสติกโดยใช้เวลาในการอบพลาสติก 480 sec และ 600 sec (ความดัน 0.5 torr และกำลังวัตต์ 0.5 torr).....	47
ภาพที่ 4.16	ลักษณะของการเปียกผิวของน้ำและค่ามุมสัมผัสของน้ำบนแผ่นฟิล์มและบนแผ่นเส้นใยพอลิแล็กติกแอซิดก่อนและหลังอบพลาสติกที่เวลาในการอบพลาสติก 300 sec โดยใช้กำลังวัตต์ 50 W และความดัน 0.5 torr.....	48
ภาพที่ 4.17	เปอร์เซ็นต์การเพิ่มขึ้นของค่ามุมสัมผัสของน้ำระหว่างฟิล์มและแผ่นเส้นใยพอลิแล็กติกแอซิดหลังอบพลาสติกที่เวลาในการอบพลาสติก 300 sec กำลังวัตต์ที่ 50W และความดัน 0.5 torr	49
ภาพที่ 4.18	ค่ามุมสัมผัสของน้ำกับแผ่นเส้นใยที่ผ่านการอบพลาสติกของแก๊สซัลเฟอร์เฮกซะฟลูออไรด์ในระยะเวลา 3 เดือน.....	49

<p>ภาพที่ ผ 1</p>	<p>ปริมาณของอะตอมฟลูออรีนบนแผ่นภาพจากเทคนิคอิเล็กตรอนโพรบไมโคร อนุาลิซิสของแผ่นเส้นใยพอลิแล็กติกแอซิดที่อบพลาสติกด้วยกำลังวัตต์ต่างๆ เวลาที่ใช้ในการอบพลาสติกมา 300 sec. ความดัน 0.5 torr.....</p>	<p>66</p>
<p>ภาพที่ ผ 2</p>	<p>ปริมาณของอะตอมฟลูออรีนจากแผ่นภาพจากเทคนิคอิเล็กตรอนโพรบไมโคร อนุาลิซิสของแผ่นเส้นใยพอลิแล็กติกแอซิดที่อบพลาสติกด้วยเวลาที่ใช้ใน การอบพลาสติกมาที่ 60 sec และ 300 sec (ความดัน 0.5 torr และกำลังวัตต์ 50 kV)</p>	<p>69</p>

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันมีการนำพลาสติกที่ผลิตจากวัตถุดิบทางปิโตรเคมีมาใช้อำนวยความสะดวกให้แก่มนุษย์ในปริมาณมาก เนื่องจากมีจุดเด่นที่สามารถตอบสนองความต้องการด้านการใช้งานได้หลากหลาย ตลอดจนมีราคาที่เหมาะสม ส่งผลให้อัตราการใช้พลาสติกเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง ก่อให้เกิดปัญหาสารพิษตกค้างจากการกำจัดขยะเนื่องจากปกติแล้วพลาสติกย่อยสลายได้ยาก จึงมีความพยายามที่จะหาพลาสติกที่ย่อยสลายง่ายมาใช้ทดแทน นั่นก็คือพลาสติกแตกสลายทางชีวภาพ (biodegradable plastic) ซึ่งเป็นพลาสติกที่ย่อยสลายได้อันเนื่องมาจากกลไกการย่อยสลายด้วยจุลินทรีย์ แบคทีเรีย และเอนไซม์ที่มีอยู่ในธรรมชาติในสภาวะและช่วงเวลาที่เหมาะสม [1] พอลิแล็กติกแอซิดเป็นพอลิเมอร์แตกสลายทางชีวภาพ (biodegradable polymer) ที่เป็นผลพลอยได้จากจากวัตถุดิบจำพวกอ้อย ข้าวโพด มันสำปะหลัง ซึ่งเป็นผลผลิตทางการเกษตรของประเทศ ดังนั้นการใช้ผลิตภัณฑ์ที่ถูกแปรรูปจากพอลิแล็กติกจึงช่วยเพิ่มมูลค่าให้กับผลผลิตทางการเกษตร และลดปริมาณการนำเข้าของสารปิโตรเคมีจากต่างประเทศด้วย [2] พอลิแล็กติกแอซิดสามารถใช้ผลิตบรรจุภัณฑ์ต่างๆ และอุปกรณ์ทางการแพทย์ ทำให้ผลิตภัณฑ์ดังกล่าวสามารถย่อยสลายได้ง่ายหลังการใช้งาน จึงเป็นข้อดีอย่างยิ่งที่จะนำพอลิแล็กติกแอซิดมาผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ที่ไม่สามารถใช้ซ้ำได้ ผลิตภัณฑ์ที่ใช้แล้วทิ้งมากที่สุดกลุ่มหนึ่ง ได้แก่ ผ้าอนามัยและผ้าอ้อมเด็กซึ่งหากผลิตจากส่วนประกอบที่ย่อยสลายง่าย ก็จะช่วยลดปัญหาเรื่องขยะลงได้ การนำพอลิแล็กติกแอซิดมาใช้แทนฟิล์มของพอลิเอทิลีนที่เป็นวัสดุชั้นนอกสุดของผ้าอนามัยและผ้าอ้อมเด็กจึงน่าสนใจอย่างมาก แต่เนื่องจากวัสดุชั้นนอกสุดของผลิตภัณฑ์ดังกล่าวจำเป็นต้องมีสมบัติป้องกันการซึมเปื้อนของของเหลว ผู้วิจัยจึงต้องการปรับปรุงพอลิแล็กติกแอซิดให้มีสมบัติไม่ชอบน้ำ (hydrophobicity) ซึ่งการปรับปรุงสมบัติดังกล่าวบนวัสดุชนิดต่างๆ มีงานวิจัยได้รายงานไว้หลากหลายวิธี เช่น วิธีจุ่มอัดและอบผ้าด้วยสารกันน้ำ (pad-dry-cure method)[3] การทำโคพอลิเมอร์ไรเซชัน (copolymerization) กับสารที่มีสมบัติไม่ชอบน้ำ [4] วิธีการปั่นเคลือบ (spin coat) [5] ด้วยสารที่มีสมบัติไม่ชอบน้ำ รวมไปถึงกระบวนการอบพลาสติก [6-8]

กระบวนการอบพลาสติกจัดเป็นเทคโนโลยีสะอาดประเภทหนึ่ง เนื่องจากไม่ได้ใช้ตัวทำละลาย ทำให้ไม่มีของเหลวเหลือทิ้ง จึงช่วยลดค่าใช้จ่ายเรื่องสารเคมีและกระบวนการบำบัดของ

เสีย ซึ่งเป็นข้อได้เปรียบสำหรับการแข่งขันในอุตสาหกรรม อนุภาคในพลาสติกมีพลังงานจำกัดทำให้การปรับปรุงสมบัติดังกล่าวเกิดเฉพาะบริเวณพื้นผิวเท่านั้น Chaiwong และคณะ [2] รายงานการใช้กระบวนการอบพลาสติกด้วยแก๊สซัลเฟอร์เฮกซะฟลูออไรด์ปรับปรุงให้ฟิล์มพอลิแล็กติกแอซิดมีสมบัติไม่ชอบน้ำสูงขึ้น โดยมีค่ามุมสัมผัสของน้ำเพิ่มจาก 60° สูงขึ้นเป็น 101° เนื่องจากว่ามีหมู่ฟังก์ชันที่ลดพลังงานผิวของฟิล์มลง อย่างไรก็ตามองค์ประกอบทางเคมีไม่ใช่เพียงปัจจัยเดียวที่ทำให้เกิดสมบัติไม่ชอบน้ำบนผิววัสดุ แต่หากรวมไปถึงปัจจัยด้านความขรุขระบนผิวอีกด้วย Yoon และคณะ [9] รายงานว่าแผ่นเส้นใยพอลิ(3-ไฮดรอกซีบิวทิเรต-โค-3-ไฮดรอกซีวาเลอเรต) หรือ poly(3-hydroxybutyrate-co-3-hydroxyvalerate) ที่มีผิวขรุขระซึ่งเตรียมจากเทคนิคอิเล็กโทรสปินนิงจะมีสมบัติไม่ชอบน้ำ ($\theta = 141^\circ$) สูงกว่าฟิล์มพอลิเมอร์ที่มีผิวเรียบ ($\theta = 86^\circ$) เนื่องจากผิวที่ขรุขระจะให้น้ำสัมผัสกับผิววัสดุได้น้อยลง และเมื่อนำแผ่นเส้นใยไปอบพลาสติกพบว่าสามารถปรับปรุงให้มีสมบัติไม่ชอบน้ำยิ่งยวด ($\theta = 158^\circ$) ได้ ดังนั้นการเตรียมวัสดุด้วยเทคนิคอิเล็กโทรสปินนิงเพื่อทำให้ผิววัสดุมีความขรุขระก่อนนำไปอบพลาสติกสามารถปรับปรุงให้มีสมบัติไม่ชอบน้ำยิ่งยวดได้ [10] ในงานวิจัยนี้จึงได้นำแผ่นเส้นใยพอลิแล็กติกแอซิดที่เตรียมจากเทคนิคอิเล็กโทรสปินนิงมาอบพลาสติกด้วยแก๊สซัลเฟอร์เฮกซะฟลูออไรด์ เพื่อปรับปรุงให้มีสมบัติไม่ชอบน้ำยิ่งยวดได้

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 ศึกษาปัจจัยที่ทำให้เกิดสมบัติไม่ชอบน้ำของแผ่นเส้นใยพอลิแล็กติกแอซิด เช่น ความขรุขระบนแผ่นเส้นใยพอลิแล็กติกแอซิดก่อนอบพลาสติกโดยเปรียบเทียบกับแผ่นฟิล์ม และองค์ประกอบทางเคมีที่เกิดขึ้นหลังอบพลาสติกบนแผ่นเส้นใยพอลิแล็กติกแอซิด

1.2.2 ปรับปรุงสมบัติไม่ชอบน้ำยิ่งยวดให้กับแผ่นเส้นใยพอลิแล็กติกแอซิดที่เตรียมจากเทคนิคอิเล็กโทรสปินนิงและอบพลาสติกด้วยแก๊สซัลเฟอร์เฮกซะฟลูออไรด์และเปรียบเทียบกับสมบัติดังกล่าวกับสมบัติของฟิล์ม

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1.3.1 เตรียมแผ่นเส้นใยพอลิแล็กติกแอซิดด้วยเทคนิคอิเล็กโทรสปินนิง โดยมีการปรับเปลี่ยนตัวแปรต่างๆ

1.3.2 อบพลาสติกบนแผ่นเส้นใยพอลิแล็กติกแอซิดด้วยแก๊สซัลเฟอร์เฮกซะฟลูออไรด์ที่สภาวะต่างๆ กัน

1.3.3 ตรวจสอบสมบัติของแผ่นเส้นใยพอลิแล็กติกแอซิดที่ผ่านการอบพลาสมาของแก๊สซัลเฟอร์เฮกซะฟลูออไรด์ โดยเปรียบเทียบกับแผ่นเส้นใยพอลิแล็กติกแอซิดที่ไม่ได้ผ่านการอบพลาสมา ดังนี้

1.3.3.1 ตรวจสอบลักษณะและขนาดของเส้นใยพอลิแล็กติกแอซิด

1.3.3.2 ตรวจสอบองค์ประกอบทางเคมีที่เกิดขึ้นบนแผ่นเส้นใยพอลิแล็กติกแอซิดจากกระบวนการอบพลาสมา

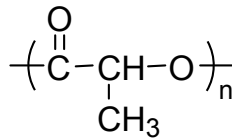
1.3.3.3 ตรวจสอบสมบัติไม่ชอบน้ำ

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 พอลิแล็กติกแอซิด (Poly (lactic acid), PLA)

พอลิแล็กติกแอซิดจัดเป็นพอลิเมอร์ประเภทพอลิเอสเทอร์ (ภาพที่ 2.1) ที่เตรียมจากกระบวนการพอลิเมอไรเซชัน (polymerization) ของกรดแล็กติก (lactic acid, C₃H₆O₃) ซึ่งกรดแล็กติกสามารถผลิตได้จากการหมักพืชที่มีแป้งและน้ำตาลเป็นองค์ประกอบหลัก ดังนั้นจึงสามารถนำผลผลิตทางการเกษตร เช่น ข้าวโพด อ้อย และมันสำปะหลังมาใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตพอลิแล็กติกแอซิดได้ [11] วัตถุดิบเหล่านี้สามารถสร้างขึ้นมาทดแทนได้อย่างต่อเนื่องด้วยเหตุนี้เองพอลิแล็กติกแอซิดจึงกลายเป็นทางเลือกใหม่มาแทนที่พลาสติกที่ผลิตจากทรัพยากรปิโตรเลียม ทำให้ลดการใช้ทรัพยากรที่ไม่สามารถสร้างขึ้นใหม่ทดแทนได้ในเวลาอันรวดเร็ว และกำลังจะหมดไปในอนาคตอันใกล้



ภาพที่ 2.1 สูตรโครงสร้างของพอลิแล็กติกแอซิด

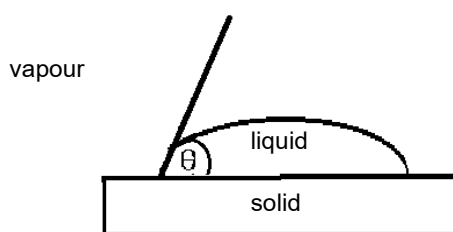
มีงานวิจัยต่างๆ รายงานว่าพอลิแล็กติกแอซิดมีศักยภาพในการทดแทนพลาสติกที่ใช้กันอยู่ทั่วไป โดยเฉพาะอย่างยิ่งในด้านการใช้เป็นบรรจุภัณฑ์ เนื่องจากมีข้อดีหลายประการกล่าวคือ พอลิแล็กติกแอซิดมีสมบัติความอ่อนตัวและทนต่อแรงดึงยึดได้ดีกว่าพอลิโพรพิลีน (polypropylene, PP) พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง (high density polyethylene, HDPE) และพอลิสไตรีน (polystyrene, PS) ซึ่งเป็นข้อดีของวัสดุที่นำมาผลิตเป็นบรรจุภัณฑ์ [12] นอกจากนี้พอลิแล็กติกแอซิดยังมีสมบัติป้องกันการซึมผ่านของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และแก๊สออกซิเจนได้ดีกว่าพอลิสไตรีน [13] จึงช่วยป้องกันการเสื่อมสภาพของผลิตภัณฑ์ที่บรรจุภายในได้ดีกว่าด้วย ในการขึ้นรูปพอลิแล็กติกแอซิดสามารถใช้กระบวนการขึ้นรูปพลาสติกที่ใช้โดยทั่วไป เช่น กระบวนการอัดรีด (extrusion) กระบวนการฉีด (injection molding) กระบวนการเป่า (blow molding) และกระบวนการปั่นเส้นใย (fiber spinning) [14] โดยที่ในกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์จากพอลิแล็กติกแอซิดจะใช้พลังงานน้อยเมื่อเทียบกับพลาสติกจากสารทางปิโตรเคมี จึงเป็นการประหยัดพลังงาน [15] อีกทั้งยังสามารถลดปัญหาสิ่งแวดล้อมจาก

ขยะพลาสติก เนื่องจากพอลิแล็กติกแอซิดสามารถย่อยสลายได้รวดเร็วเมื่อเปรียบเทียบกับพลาสติกจากทรัพยากรปิโตรเลียม และพอลิแล็กติกแอซิดยังสามารถแตกสลายทางชีวภาพ (biodegradation) ด้วยแบคทีเรียได้ ในงานวิจัยของ Arena และคณะ [16] พบว่าแบคทีเรียที่ชื่อว่า *Bacillus licheniformis* สามารถย่อยสลายพอลิแล็กติกแอซิดได้ 42% โดยมวลภายในระยะเวลา 5 เดือน ในขณะที่พลาสติกจากทรัพยากรปิโตรเลียมจะไม่เกิดการย่อยสลายทางชีวภาพ สมบัติเด่นอีกประการหนึ่งของพอลิแล็กติกแอซิดก็คือสามารถเข้ากันได้กับเนื้อเยื่อของสิ่งมีชีวิต (biocompatibility) จึงทำให้พอลิแล็กติกแอซิดเป็นวัสดุที่มีศักยภาพสูงในการใช้เป็นอุปกรณ์ทางการแพทย์ที่ต้องใช้ในร่างกายมนุษย์ เช่น วัสดุค้ำจุนสำหรับการเพาะเลี้ยงเนื้อเยื่อ (tissue scaffolds) [17-20] วัสดุนำส่งยา [13, 21, 22] และอุปกรณ์สำหรับยึดกระดูก [23-25] เป็นต้น

ด้วยสมบัติต้านการของพอลิแล็กติกแอซิดดังที่ได้กล่าวมา อาทิ สมบัติการทนต่อแรงดึงยืด มีสมบัติความอ่อนตัว สามารถผลิตจากวัตถุดิบที่เป็นทรัพยากรสร้างขึ้นใหม่ทดแทนได้ และความไม่เป็นพิษต่อร่างกาย ตลอดจนมีความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพ จึงเหมาะสมอย่างยิ่งที่จะนำมาใช้เป็นส่วนประกอบของผลิตภัณฑ์แบบใช้แล้วทิ้ง เช่น การนำพอลิแล็กติกแอซิดมาใช้แทนฟิล์มของพอลิเอทิลีนที่เป็นวัสดุชั้นนอกสุดของผ้าอนามัยและผ้าอ้อมเด็ก ด้วยเหตุนี้จึงต้องมีการปรับปรุงสมบัติไม่ชอบน้ำ (hydrophobicity) ของพอลิแล็กติกแอซิด เพื่อป้องกันการซึมเปื้อนของของเหลวในขณะที่ใช้งานผลิตภัณฑ์

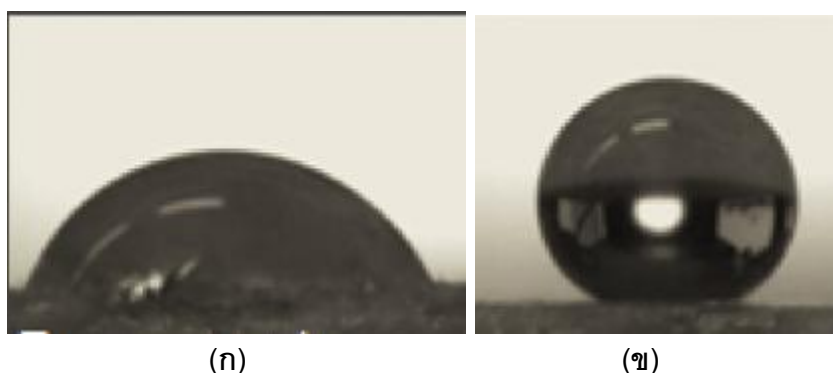
2.2 สมบัติไม่ชอบน้ำ (hydrophobicity)

สมบัติไม่ชอบน้ำของวัสดุเกิดจากการที่โมเลกุลของผิววัสดุจะมีแรงดึงดูดกับโมเลกุลของน้ำน้อยกว่าแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลของน้ำด้วยกันเอง ทำให้น้ำไม่กระจายตัวหรือซึมลงบนวัสดุ [26] ในการศึกษาสมบัติดังกล่าวจะใช้วิธีการวัดค่ามุมสัมผัสของน้ำ (water contact angle) มุมสัมผัสของของเหลว (contact angle, θ) เป็นมุมที่หยดของเหลวทำกับพื้นผิวของวัสดุโดยจะวัดจากรอยต่อระหว่างวัฏภาคสามวัฏภาค (three phase) ได้แก่ ของแข็ง (solid) ของเหลว (liquid) และไอ (vapour) [27] ดังภาพที่ 2.2



ภาพที่ 2.2 มุมสัมผัสของของเหลว (contact angle, θ)

ในการวัดค่ามุมสัมผัสของน้ำจะเริ่มจากหยดน้ำกลั่นลงบนวัสดุ เครื่องวัดค่ามุมสัมผัสของน้ำจะบันทึกภาพหยดน้ำและวัดค่ามุมสัมผัสของน้ำ ซึ่งสามารถบอกถึงระดับการเปียกผิวของของเหลว กล่าวคือเมื่อ θ มีค่าเท่ากับ 0° จะเกิดการเปียกผิวอย่างสมบูรณ์ (perfect wetting) น้ำจะซึมลงบนผิววัสดุ และ θ ที่มีค่าระหว่าง $0-90^\circ$ ผิววัสดุจะเกิดการเปียกซึ่งแสดงสมบัติความชอบน้ำ (hydrophilicity) (ภาพที่ 2.3ก) เมื่อ θ มีค่าระหว่าง $90-150^\circ$ ผิวของวัสดุจะมีสมบัติไม่ชอบน้ำ (hydrophobicity) (ภาพที่ 2.3ข) ส่วน θ ที่มีค่าตั้งแต่ $150-180^\circ$ ผิวของวัสดุจะมีสมบัติไม่ชอบน้ำยิ่งยวด (superhydrophobicity) โดยเฉพาะเมื่อ θ มีค่า 180° จะแสดงว่าวัสดุนั้นมีสมบัติไม่ชอบน้ำอย่างสมบูรณ์ (perfectly non-wetted) [27]



ภาพที่ 2.3 ลักษณะการเปียกผิวของน้ำบน (ก) วัสดุที่มีสมบัติชอบน้ำ (hydrophilicity)
(ข) วัสดุที่มีสมบัติไม่ชอบน้ำ (hydrophobicity) [28]

แรงตึงผิวของน้ำและพลังงานผิวเป็นปัจจัยที่สำคัญที่ทำให้เกิดปรากฏการณ์การเปียกผิวของน้ำบนวัสดุ โดยที่แรงตึงผิวของน้ำจะเป็นแรงของโมเลกุลที่อยู่บริเวณพื้นผิวน้ำกระทำต่อพื้นผิวของน้ำ [27] และพลังงานผิวของวัสดุเป็นพลังงานที่ทำให้เกิดการแผ่ (spreading) และเปียกผิวของวัสดุ หากแรงตึงผิวของน้ำน้อยกว่าพลังงานผิวของวัสดุโมเลกุลของน้ำจะเกิดการยึดเกาะบนผิววัสดุและเกิดการเปียกผิวขึ้น ในทางตรงข้ามถ้าแรงตึงผิวของน้ำมากกว่าพลังงานผิวของวัสดุ โมเลกุลของน้ำจะยึดเกาะกันและหยดน้ำมีลักษณะเกือบเป็นทรงกลม ทำให้หยดน้ำเกิดการเปียกผิววัสดุน้อย

การหาพลังงานพื้นผิว (γ_S) สามารถคำนวณได้จากสมการของ Owens-Wendt [6, 29]

$$\gamma_L(1 + \cos \theta) = 2(\gamma_S^d \gamma_L^d)^{\frac{1}{2}} + 2(\gamma_S^p \gamma_L^p)^{\frac{1}{2}} \quad (2.1)$$

$$\gamma_S = \gamma_S^d + \gamma_S^p \quad (2.2)$$

โดยที่ γ_L = แรงตึงผิวของของเหลวที่ใช้ทดสอบ

θ = ค่ามุมสัมผัสของของเหลวกับผิววัสดุ (ค่านี้ได้จากเทคนิคการวัดค่ามุมสัมผัส)

γ_S^d = พลังงานพื้นผิวส่วนที่ไม่มีขั้วของวัสดุ

γ_L^d = แรงตึงผิวส่วนที่ไม่มีขั้วของของเหลวที่ใช้ทดสอบ

γ_S^p = พลังงานผิวส่วนที่มีขั้วของวัสดุ

γ_L^p = แรงตึงผิวส่วนที่มีขั้วของของเหลว

γ_S = พลังงานผิวของวัสดุ

ในงานวิจัยนี้จะเลือกใช้ของเหลว 2 ชนิด คือน้ำและไดไอโอโดมีเทน ซึ่งมีค่าแรงตึงผิวดังแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ค่าแรงตึงผิวของสาร [30]

สาร	γ_L (mN/m)	γ_L^d (mN/m)	γ_L^p (mN/m)
น้ำ	72.8	21.8	51
ไดไอโอโดมีเทน	50.8	46.6	4.2

แทนค่าตัวแปรในสมการที่ 2.1 ได้ว่า

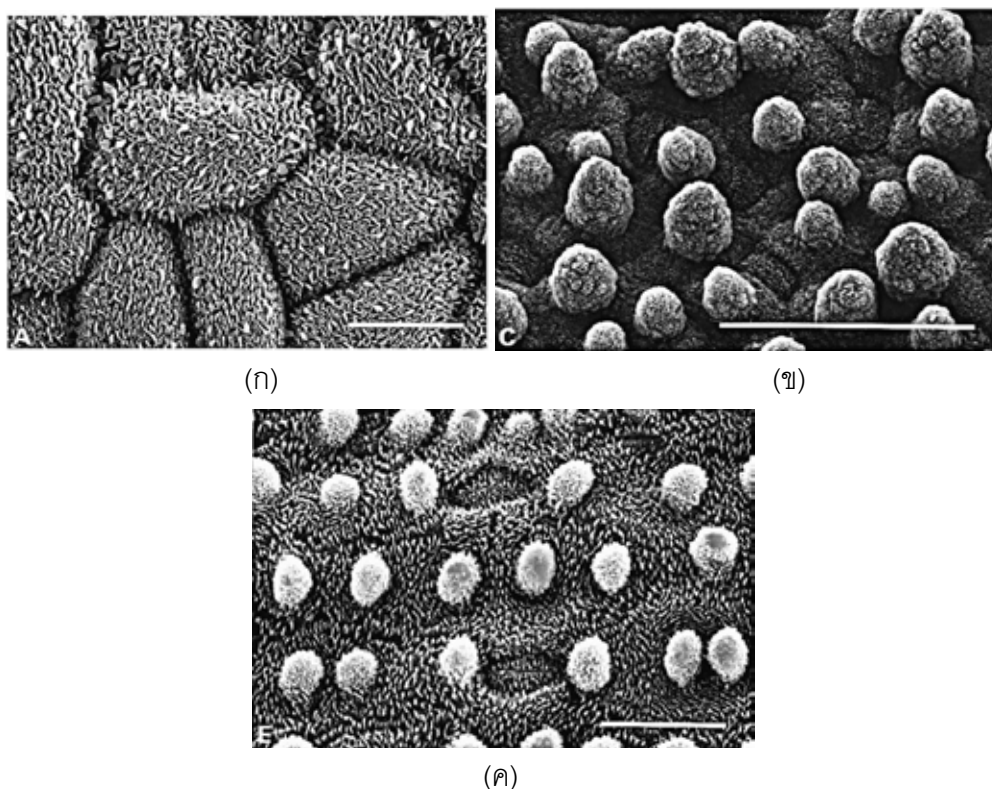
$$\text{น้ำ ; } \gamma_L(1 + \cos \theta_{H_2O}) = 2(21.8\gamma_S^d)^{\frac{1}{2}} + 2(51\gamma_S^p)^{\frac{1}{2}}$$

$$\text{ไดไอโอโดมีเทน ; } \gamma_L(1 + \cos \theta_{CH_2I_2}) = 2(46.6\gamma_S^d)^{\frac{1}{2}} + 2(4.2\gamma_S^p)^{\frac{1}{2}}$$

วัดค่ามุมสัมผัสของน้ำและไดไอโอโดมีเทนด้วยเทคนิค contact angle measurement แล้วแทนค่าลงใน θ_{H_2O} และ $\theta_{CH_2I_2}$ หลังจากนั้นคำนวณแบบแก้สมการ 2 ตัวแปร เพื่อหาค่า γ_S^d และ γ_S^p หลังจากนั้นแทนค่าลงในสมการที่ 2.2 เพื่อหาค่าพลังงานผิวของวัสดุ (γ_S)

สมบัติไม่ชอบน้ำได้รับความสนใจทั้งในด้านงานวิจัยและด้านอุตสาหกรรม จึงต้องมีการศึกษา พัฒนา และปรับปรุงสมบัติดังกล่าวอย่างต่อเนื่อง สมบัติไม่ชอบน้ำที่พบเห็นในธรรมชาติ คือการเกิดน้ำกลิ้งบนใบบัว ซึ่งเป็นสิ่งที่มนุษย์เห็นและรู้จักมานานหลายร้อยปีแล้ว Neinhuis และ Barthlott ได้รายงานว่ามีใบบัวมีปุ่มเล็กๆ ขนาด 20-40 μm ทำให้มีความขรุขระระดับไมโครเมตรบนผิวใบบัว ซึ่งบนปุ่มของใบบัวจะมีผลึกของแว็กซ์ (wax crystals) ขนาดนาโนเมตรจัดเรียงตัวในลักษณะคล้ายเส้นผม (hair-like structure) และผลึกดังกล่าวนี้มีสมบัติไม่ชอบน้ำ ดังนั้นการที่ผิวของใบบัวมีความขรุขระทั้งในระดับไมโครเมตรและนาโนเมตร ประกอบ

กับมีสารที่มีสมบัติไม่ชอบน้ำเคลือบอยู่บนผิว ทำให้หยดน้ำสัมผัสกับผิวของใบบัวได้น้อยมาก จึงเกิดการกลิ้งของหยดน้ำบนใบบัวหรือที่เรียกว่าปรากฏการณ์น้ำกลิ้งบนใบบัว (lotus effect) [10, 31, 32] ทำให้เกิดสมบัติไล่น้ำขึ้น (water repellency) และยังพบปรากฏการณ์ดังกล่าวกับพืชชนิดอื่นๆ ด้วย เนื่องจากมีผิวขรุขระดังภาพที่ 2.4



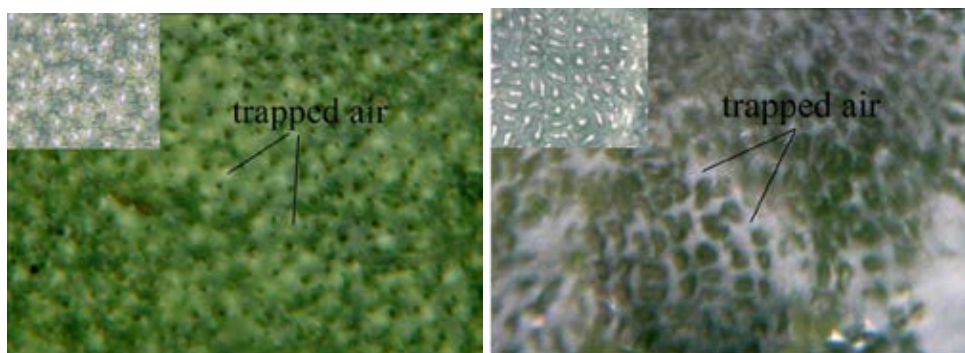
ภาพที่ 2.4 ตัวอย่างความขรุขระระดับไมโครเมตรบนใบไม้ที่ทำให้เกิดสมบัติไล่น้ำ

(ก) *Hypericum aegypticum* (ข) บัวหลวง (*Nelumbo nucifera*)

(ค) แกลดิโอลัส (*Gladiolus watsonioides*) [32]

การใช้ธรรมชาติเป็นแหล่งเรียนรู้และนำความรู้ที่ได้มาพัฒนาจึงก่อให้เกิดประโยชน์ได้อย่างมากมาย ทำให้มีผลงานวิจัยหลายชิ้นที่นำปรากฏการณ์ดังกล่าวมาเป็นต้นแบบในการปรับปรุงสมบัติไม่ชอบน้ำของวัสดุ อาทิ งานวิจัยของ Miwa และคณะได้เคลือบแร่อะลูมินัมออกไซด์ (boehmite) ลงบนแผ่นแก้ว ทำให้มีความขรุขระเกิดขึ้นบนผิวของแผ่นแก้ว [5] ในงานวิจัยของ Bae และคณะ [33] ได้ใช้กระบวนการกราฟที่อนุภาคซิลิกาด้วยแสงยูวีลงบนผ้าพอลิแล็กติกแอซิด ทำให้มีความขรุขระระดับไมโครเมตรเกิดขึ้นบนผิวผ้า และยังมีรายงานจากงานของ Lee และคณะ [34] ซึ่งได้ปรับสภาพผิวของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงให้มีโครงสร้างแบบ hierarchical structure ซึ่งประกอบด้วยความขรุขระระดับไมโครเมตรและนาโนเมตร จากงานวิจัยที่กล่าวมานี้

พบว่า การปรับสภาพผิวของวัสดุต่างๆ ให้มีความขรุขระทั้งในระดับไมโครเมตรและนาโนเมตรเป็นผลให้เกิดสมบัติไม่ชอบน้ำบนผิววัสดุ เนื่องจากว่าอากาศจะแทรกตัวอยู่ระหว่างความขรุขระที่เกิดขึ้น น้ำจึงสัมผัสกับผิวของวัสดุได้น้อยลง [10, 35] ซึ่งสามารถยืนยันได้จากภาพถ่ายในงานวิจัยของ Wang และคณะ [36] รายงานว่าความขรุขระบนผิวใบบัวจะทำให้เกิดช่องว่างที่สามารถกักอากาศเอาไว้ ซึ่งจะช่วยป้องกันไม่ให้น้ำซึมลงบนใบบัวและถือว่าเป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อสมบัติไม่ชอบน้ำยิ่งยวดของใบบัว (ภาพที่ 2.5)



ภาพที่ 2.5 ความขรุขระที่เป็นช่องว่างที่กักอากาศไว้บนผิวใบบัว [36]

ยังมีงานวิจัยของ Han และคณะ [37] ที่ใช้วิธีการเคลือบไททาเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) บนแผ่นซิลิกอน (silicon wafer) ซึ่งเป็นการเพิ่มความขรุขระและยังเพิ่มพื้นที่ผิวให้มากขึ้น ในการเพิ่มพื้นที่ของผิวที่มีลักษณะขรุขระจะทำให้เพิ่มโอกาสในการกักอากาศเอาไว้ได้มากขึ้นนั่นเอง

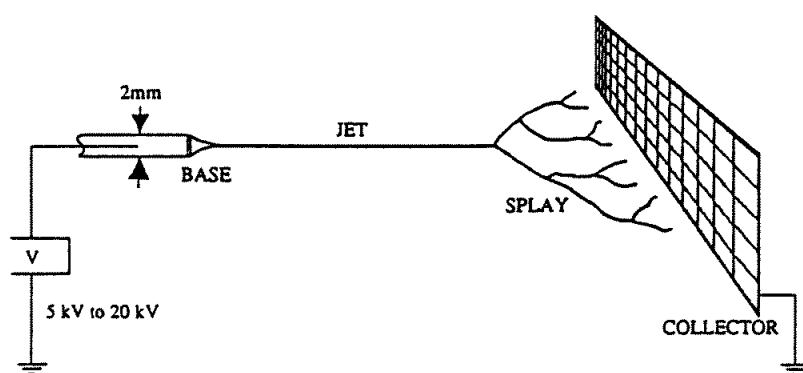
วิธีที่ใช้เตรียมผิวของวัสดุให้มีความขรุขระมีหลากหลายวิธีด้วยกัน เช่น กระบวนการแยกวัฏภาค (phase separation) [38] กระบวนการเคลือบด้วยไอเชิงเคมี (chemical vapor deposition) [39, 40] กระบวนการโซลเจล (sol gel process) [41, 42] และเทคนิคอิเล็กโทรสปินนิง (electrospinning) [43]

2.3 เทคนิคอิเล็กโทรสปินนิง (electrospinning)

เทคนิคอิเล็กโทรสปินนิงเป็นเทคนิคที่สามารถเตรียมวัสดุให้มีสมบัติไม่ชอบน้ำได้ เนื่องจากมีความขรุขระของเส้นใยในระดับไมโครเมตร ทำให้น้ำสัมผัสกับผิวแผ่นเส้นใยได้น้อยลง [10] Yoon และคณะ [9] ได้เปรียบเทียบค่ามุมสัมผัสของน้ำบนพอลิเมอร์ชนิดเดียวกันที่มีลักษณะเป็นแผ่นฟิล์มกับแผ่นเส้นใยที่เตรียมจากเทคนิคอิเล็กโทรสปินนิง พบว่าค่ามุมสัมผัสของน้ำกับแผ่นเส้นใยสูงถึง 141° ซึ่งจัดว่าเป็นวัสดุที่มีสมบัติไม่ชอบน้ำ ในขณะที่แผ่นฟิล์มมีค่ามุมสัมผัสของน้ำเพียงแค่ 86° ซึ่งจัดว่าเป็นวัสดุที่มีสมบัติชอบน้ำ เทคนิคอิเล็กโทรสปินนิงจึงเป็นอีกเทคนิคหนึ่งที่น่าสนใจที่นำมาช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการปรับปรุงสมบัติไม่ชอบน้ำให้แก่วัสดุ

อิเล็กโทรสปินนิงเป็นเทคนิคหนึ่งที่มีประสิทธิภาพที่อาศัยแรงผลักทางไฟฟ้า (electrical forces) ในการผลิตเส้นใยแบบต่อเนื่องให้มีขนาดตั้งแต่นาโนเมตรไปจนถึงไมโครเมตร [44, 45] ทำให้เส้นใยมีลักษณะเฉพาะ อาทิ มีพื้นผิวจำเพาะสูง (specific surface area) อัตราส่วนความยาวต่อความกว้างสูง (aspect ratio) และมีความเป็นรูพรุนสูง (porosity) [46] ด้วยเหตุนี้จึงมีการนำไปใช้งานในหลายๆ ด้าน เช่น ด้านการแพทย์ ด้านวัสดุศาสตร์ ด้านสิ่งแวดล้อม และเทคโนโลยีชีวภาพ หรือด้านอิเล็กทรอนิกส์ นอกจากนี้เทคนิคดังกล่าวยังมีการใช้ต้นทุนการผลิตและพลังงานในการผลิตต่ำ รวมไปถึงเครื่องมือที่ใช้ไม่ซับซ้อน

เทคนิคอิเล็กโทรสปินนิงประกอบไปด้วยเครื่องมือหลัก 3 ส่วน ได้แก่ ส่วนของเครื่องให้ศักย์ไฟฟ้ากำลังสูง ส่วนของระบบฉีดคือเข็มและเครื่องควบคุมอัตราการฉีดสารละลาย ส่วนของวัสดุรองรับที่เป็นโลหะ เทคนิคนี้สามารถใช้ในการผลิตเส้นใยให้มีขนาดเล็กในช่วงไมโครเมตรถึงนาโนเมตรโดยจะแบ่งช่วงของการเกิดเส้นใยออกเป็น 4 ช่วงด้วยกัน คือช่วงฐาน (base region) ช่วงเส้นพุ่ง (jet region) ช่วงพ่นเป็นฝอย (splaying region) และช่วงรองรับเส้นใย (collection region) [47] ดังแสดงในภาพที่ 2.6



ภาพที่ 2.6 ช่วงต่างๆ ของการเกิดเส้นใยที่เตรียมจากเทคนิคอิเล็กโทรสปินนิง [47]

หลักการทำงานของเทคนิคนี้คือในขณะที่ยังไม่ได้ให้ศักย์ไฟฟ้าหยุดของสารละลายที่ปลายเข็มจะมีลักษณะเป็นครึ่งวงกลมเนื่องจากแรงตึงผิวของสารละลาย เมื่อต่อปลายเข็มโลหะเข้ากับขั้วไฟฟ้าของเครื่องให้ศักย์ไฟฟ้ากำลังสูง ซึ่งในงานวิจัยนี้จะใช้ขั้วบวก ทำให้ประจุลบในสารละลายถูกดึงเข้าหาขั้วบวกของเครื่องให้ศักย์ไฟฟ้ากำลังสูง เป็นเหตุให้มีประจุบวกที่ผิวของสารละลายเป็นจำนวนมาก ประจุบวกเหล่านี้จะผลักกันแล้วเกิดแรงผลักทางไฟฟ้าขึ้น [48] หากเพิ่มค่าศักย์ไฟฟ้ากำลังสูงจนกระทั่งแรงผลักทางไฟฟ้าสามารถเอาชนะแรงตึงผิวของสารละลายได้ จะทำให้สารละลายที่เคยมีลักษณะเป็นครึ่งวงกลมเกิดการยืดออกจากปลายเข็มที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางในระดับมิลลิเมตรจนกระทั่งมีลักษณะคล้ายทรงกรวยซึ่งเป็นสารละลายในช่วงฐาน

(base region) หลังจากนั้นสารละลายในช่วงดังกล่าวจะถูกดึงด้วยสนามไฟฟ้าที่เกิดจากความต่างศักย์ระหว่างปลายเข็มกับวัสดุรองรับ (grounded collector) ทำให้สารละลายพุ่งออกจากปลายเข็มที่มีศักย์ไฟฟ้าที่สูงกว่าไปยังวัสดุรองรับที่มีศักย์ไฟฟ้าต่ำกว่าจึงเรียกสารละลายในช่วงนี้ว่า ช่วงเส้นพุ่ง (jet region) ซึ่งสารละลายในช่วงนี้จะเกิดการยืดออกตามการเพิ่มของระยะห่างจากปลายเข็มกับวัสดุรองรับ [49] ประกอบกับมีการระเหยของตัวทำละลายออกจากสารละลายเป็นเหตุให้สารละลายมีขนาดลดลง และเมื่อสารละลายมีขนาดลดลงเรื่อยๆ จะทำให้แรงยึดเหนี่ยวภายในเส้นพุ่งลดลงจนน้อยกว่าแรงผลัทางไฟฟ้าเส้นพุ่งจะเกิดการแตกออกเป็นเส้นเล็กๆ เรียกว่าช่วงพ่นเป็นฝอย (splaying region) สารละลายจึงมีการลดขนาดลงอีกทั้งยังมีการระเหยของตัวทำละลายออกจากสารละลายจนกลายเป็นของแข็งแล้วตกสู่วัสดุรองรับ ช่วงนี้คือช่วงรองรับ (collection region) ของแข็งที่สะสมบนวัสดุรองรับคือเส้นใยที่มีขนาดในช่วงไมโครเมตรถึงนาโนเมตร [50] ลักษณะของเส้นใยที่ได้จะขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ จึงต้องมีการปรับเปลี่ยนให้มีความเหมาะสมเพื่อให้ได้เส้นใยที่มีสมบัติตามต้องการ

2.3.1 ปัจจัยที่มีผลต่อลักษณะของเส้นใยที่ผลิตจากเทคนิคอิเล็กโตรสปินนิง ได้แก่

2.3.1.1 ความหนืด (viscosity) และความเข้มข้นของสารละลาย (concentration)

เทคนิคอิเล็กโตรสปินนิงเป็นเทคนิคที่สามารถใช้ผลิตเส้นใยจากสารละลายพอลิเมอร์ และเนื่องจากพอลิเมอร์เกิดจากการสร้างพันธะโคเวเลนต์ระหว่างโมเลกุลของมอนอเมอร์จนเกิดเป็นสายโซ่พอลิเมอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง และสายโซ่พอลิเมอร์จะมีการเกี่ยวพันกันทำให้การขาดออกจากกันของสายโซ่พอลิเมอร์เมื่อถูกดึงยืดเกิดได้ยาก ทำให้ได้เส้นใยที่มีความต่อเนื่อง [51-53] ด้วยเหตุนี้พอลิเมอร์จึงมีสมบัติที่เหมาะสมที่จะนำมาใช้ผลิตเป็นเส้นใย

ความหนืดและความเข้มข้นของสารละลายพอลิเมอร์เป็นปัจจัยสำคัญของเทคนิคอิเล็กโตรสปินนิงที่จะส่งผลต่อลักษณะและขนาดของเส้นใย กล่าวคือเมื่อใช้สารละลายพอลิเมอร์ที่มีความเข้มข้นต่ำกว่า สายโซ่พอลิเมอร์จะมีการเกี่ยวพันกันน้อยทำให้สายโซ่พอลิเมอร์เกิดการเคลื่อนที่ได้ง่าย (chain mobility) นั่นคือมีความหนืดที่ต่ำกว่า สายโซ่พอลิเมอร์จึงถูกดึงยืดออกได้มากในขณะที่ได้รับแรงผลัทางไฟฟ้า ซึ่งจะเกิดการลดขนาดของเส้นใยได้มากกว่าการใช้สารละลายพอลิเมอร์ที่มีความเข้มข้นสูง [52, 54] แต่ถ้าหากใช้ความเข้มข้นต่ำเกินไปสายโซ่พอลิเมอร์จะเกี่ยวพันกันน้อยมากเป็นผลให้มีความหนืดต่ำมาก [55] ดังนั้นจึงไม่สามารถต้านทานแรงผลัทางไฟฟ้าที่สูงได้ สารละลายที่พุ่งออกมาจึงเกิดการขาดช่วงไม่มีความต่อเนื่องกันกลายเป็นหยดของสารละลายก่อนที่จะตกสู่วัสดุรองรับจึงพบเห็นเป็นปมบนแผ่นเส้นใย[56, 57]

2.3.1.2 ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ให้ (applied voltage)

เทคนิคอิเล็กโทรสปินนิงจะอาศัยแรงผลักดันทางไฟฟ้าในการผลิตเส้นใย ซึ่งแรงผลักดันทางไฟฟ้างกล่าวเกิดจากการผลักดันกันของประจุที่มีขั้วทางไฟฟ้าที่เหมือนกันในบริเวณผิวของสารละลาย ประกอบกับมีแรงทางไฟฟ้าจากสนามไฟฟ้าภายนอกที่เกิดจากความต่างศักย์ระหว่างปลายเข็มกับวัสดุรองรับ อิทธิพลของแรงผลักดันทางไฟฟ้านี้จะเป็นเหตุให้สารละลายพุ่งออกจากปลายเข็มไปยังวัสดุรองรับและเกิดเป็นเส้นใยขึ้น ดังนั้นแรงผลักดันทางไฟฟ้าจึงเป็นปัจจัยหนึ่งที่มีความสำคัญต่อการผลิตเส้นใย [58] และสามารถปรับเปลี่ยนแรงผลักดันทางไฟฟ้าให้มีค่าที่เหมาะสมจากการปรับค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า

มีงานวิจัยที่ศึกษาถึงการปรับเปลี่ยนค่าศักย์ไฟฟ้าในเทคนิคอิเล็กโทรสปินนิงที่มีผลต่อขนาดของเส้นใย และพบว่าการใช้ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่มีค่ามาก เป็นการเพิ่มความหนาแน่นของประจุไฟฟ้า (net charge density) ส่งผลให้มีแรงผลักดันทางไฟฟ้าสูง ดังนั้นสารละลายจึงพุ่งออกจากปลายเข็มและถูกดึงยืดมากขึ้น เป็นผลให้เกิดการลดขนาดของเส้นใย [59] แต่ถ้าค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าสูงเกินไปจะทำให้เกิดเส้นใยมีขนาดใหญ่ขึ้น เนื่องจากว่าความหนาแน่นของประจุไฟฟ้าสูงขึ้นจนมีแรงผลักดันทางไฟฟ้าผลักดันสารละลายออกจากปลายเข็มในปริมาณมาก [54]

2.3.1.3 ระยะห่างระหว่างปลายเข็มจนถึงวัสดุรองรับ (tip to collector distance)

ระยะห่างระหว่างปลายเข็มจนถึงวัสดุรองรับเป็นปัจจัยหนึ่งที่มีอิทธิพลต่อการระเหยของตัวทำละลายและระยะการยืดของสารละลาย ซึ่งจะส่งผลต่อเส้นใยที่ได้ในเทคนิคอิเล็กโทรสปินนิง การลดขนาดของเส้นใยมีสาเหตุมาจากการระเหยของตัวทำละลายออกจากสารละลายที่เคลื่อนที่จากปลายเข็มไปยังวัสดุรองรับ หากระยะห่างระหว่างปลายเข็มจนถึงวัสดุรองรับมาก จะมีเวลามากเพียงพอที่จะทำให้ตัวทำละลายระเหยออกไปก่อนที่เส้นใยจะตกสู่วัสดุรองรับทำให้เส้นใยมีขนาดเล็ก [60, 61]

นอกจากนี้ปัจจัยดังกล่าวยังส่งผลต่อการยืดของสารละลาย กล่าวคือเมื่อระยะห่างระหว่างปลายเข็มจนถึงวัสดุรองรับเพิ่มขึ้น ทำให้สารละลายเกิดการยืดออกตามทิศทางการขยายได้มากขึ้น จึงเกิดการลดขนาดของเส้นใย [62] อย่างไรก็ตามในการเพิ่มระยะห่างระหว่างปลายเข็มจนถึงวัสดุรองรับเป็นสาเหตุให้ความเข้มข้นของสนามไฟฟ้าลดลง ซึ่งส่งผลให้แรงผลักดันทางไฟฟ้าที่จะทำให้สารละลายถูกดึงยืดน้อยลง [59] และรวมไปถึงการลดลงของแรงผลักดันทางไฟฟ้าที่จะทำให้เกิดสารละลายช่วงพ่นฝอย เป็นผลให้ได้เส้นใยที่มีขนาดใหญ่ [63] ในกรณีที่มีการใช้ตัวทำละลายในสารละลายเกิดการระเหยเร็วเกินไป ส่งผลให้สารละลายกลายเป็นเส้นใยอย่างรวดเร็ว

ก่อนที่จะเกิดการลดขนาดของเส้นใย ดังนั้นการปรับเปลี่ยนระยะห่างระหว่างปลายเข็มจนถึงวัสดุรองรับจึงไม่มีผลต่อขนาดของเส้นใย [54]

2.3.1.4 อัตราการไหลของสารละลาย (flow rate)

สำหรับเทคนิคอิเล็กโตรสปินนิง อัตราการไหลของสารละลายพอลิเมอร์เป็นปัจจัยที่ควบคุมปริมาณสารละลายที่ไหลออกจากปลายเข็ม ซึ่งส่งผลต่อขนาดของเส้นใย กล่าวคือการลดอัตราการไหลของสารละลาย จะทำให้สารละลายไหลออกจากปลายเข็มในปริมาณน้อยตัวทำละลายจึงมีเวลาเพียงพอในการระเหยออกจากสารละลาย เส้นใยจึงมีขนาดเล็ก [61] ถ้าหากใช้อัตราการไหลของสารละลายต่ำเกินไป ทำให้สารละลายไหลออกจากปลายเข็มน้อย ประกอบกับการใช้ตัวทำละลายที่ระเหยออกเร็วเกินไป อาจเป็นสาเหตุให้เกิดการอุดตันบริเวณปลายเข็มได้ [64]

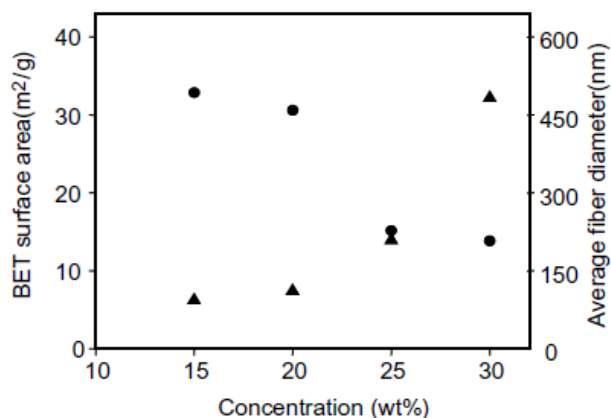
2.3.2 การวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพของเส้นใยที่ได้จากเทคนิคอิเล็กโตรสปินนิง

2.3.2.1 ขนาดของเส้นใย

โดยทั่วไปเทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดเป็นเทคนิคที่ใช้ศึกษาลักษณะพื้นผิวของวัสดุ ซึ่งจะใช้ลำอิเล็กตรอนพลังงานสูงฉายลงบนผิววัสดุ และนำสัญญาณที่เกิดจากการชนของอิเล็กตรอนกับอะตอมบนผิวของวัสดุมาสร้างเป็นภาพ [65] มีงานวิจัยหลายชิ้นที่เตรียมเส้นใยจากเทคนิคอิเล็กโตรสปินนิงและวัดขนาดของเส้นใยจากภาพที่ถ่ายด้วยเทคนิคดังกล่าว เพื่อศึกษาถึงปัจจัยต่างๆ ในเทคนิคอิเล็กโตรสปินนิงที่มีผลต่อขนาดของเส้นใย [63, 66, 67] รวมถึงการศึกษาลักษณะพื้นผิวของชิ้นงานที่ถูกอบพลาสติกมา อาทิ โดหะผสมของออลูมิเนียมและทองแดง [68] พอลิไทรีน [69] เส้นใยของผ้าไหม [70] เป็นต้น

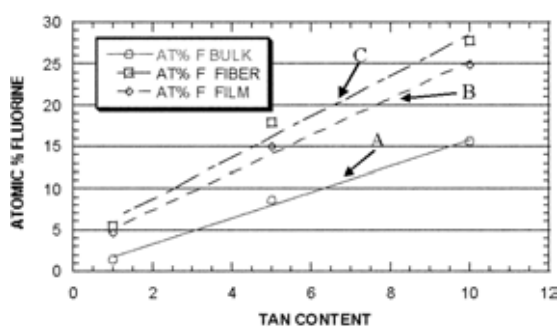
2.3.2.2 พื้นผิวของแผ่นเส้นใย

สมบัติเด่นข้อหนึ่งของเส้นใยขนาดเล็กที่ผลิตจากเทคนิคอิเล็กโตรสปินนิง ก็คือมีพื้นผิวสูง โดยทั่วไปแล้ววิธีการวัดพื้นผิวที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย คือเทคนิคบลูเนอว์ เอลเม็ท เทลเลอร์ซึ่งอาศัยหลักการของการดูดซับแก๊สไนโตรเจนบนพื้นผิว Ryu และคณะ [71] ได้ใช้เทคนิคบลูเนอว์ เอลเม็ท เทลเลอร์ ในการหาพื้นที่ผิวของเส้นใยไนลอน แล้วพบว่าพื้นที่ผิวจะสูงขึ้นเมื่อเส้นใยมีขนาดที่เล็กลงดังในภาพที่ 2.7



ภาพที่ 2.7 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาด (▲) และพื้นที่ผิว (●) ของแผ่นเส้นใยไนลอน ที่เตรียมจากเทคนิคอิเล็กโตรสปินนิงด้วยความเข้มข้นของสารละลายพอลิเมอร์ต่างๆ

ดังนั้นการใช้เทคนิคอิเล็กโตรสปินนิงในการเตรียมเส้นใย จะทำให้ได้แผ่นเส้นใยที่มีพื้นผิวจำเพาะสูง ซึ่งจะเป็นผลดีต่อการปรับปรุงหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวของวัสดุ งานวิจัยของ Deitzel และคณะ [72] รายงานว่าแผ่นเส้นใยของโคพอลิเมอร์ระหว่างพอลิเมทิลเมทาคริเลทกับเตตระไฮโดรเปอร์ฟลูออโรออกทิลอะคริเลทจะมีปริมาณของฟลูออรีนบนผิวสูงกว่าฟิล์มของโคพอลิเมอร์ชนิดเดียวกัน ดังแสดงในภาพที่ 2.8 เนื่องจากว่าแผ่นเส้นใยมีพื้นที่ผิวเฉพาะที่จะเกิดปฏิกิริยาทางเคมี (specific surface chemistry) สูงกว่าฟิล์ม



ภาพที่ 2.8 ปริมาณอะตอมของฟลูออรีนของโคพอลิเมอร์ระหว่างพอลิเมทิลเมทาคริเลทกับเตตระไฮโดรเปอร์ฟลูออโรออกทิลอะคริเลท

นอกจากปัจจัยด้านความขรุขระแล้วยังมีปัจจัยด้านองค์ประกอบทางเคมีที่ทำให้เกิดสมบัติไม่ชอบน้ำ ในยุคแรกๆ จะนิยมใช้สารเคมีที่มีส่วนผสมของแวกซ์เคลือบลงบนวัสดุ เพื่อให้มีสมบัติไม่ชอบน้ำ แต่จะพบปัญหาเรื่องความคงทนต่ำ ต่อมาได้มีการปรับปรุงและพัฒนาทั้งกระบวนการและสารเคมี [26] โดยมีรายงานว่าการปรับปรุงสมบัติไม่ชอบน้ำของพอลิเมอร์โดยใช้วิธีโคพอลิเมอร์ไรเซชัน (copolymerization) กับสารที่มีสมบัติไม่ชอบน้ำ [4, 73] อีกทั้งยังมี

การใช้วิธีจุ่มอัดและอบด้วยความร้อน เพื่อเคลือบสารเคมีลงบนสิ่งทอ เช่น ผ้าพอลิเอทิลีน [74] ผ้าฝ้าย [29] นอกจากนี้ยังมีกระบวนการหนึ่งที่น่าสนใจ นั่นก็คือกระบวนการอบพลาสมา

2.4 พลาสมา (plasma)

พลาสมาเกิดจากการให้พลังงานภายนอกแก่ระบบจนก่อให้เกิดการแตกตัว (ionization) ทำให้เกิดอนุภาคต่างๆ อาทิ อนุภาคที่อยู่ในสภาวะกระตุ้น (excited species) แรดิคัล (radicals) ไอออน (ions) อิเล็กตรอน (electrons) [75] ซึ่งอนุภาคต่างๆ เหล่านี้ในพลาสมาจะทำให้เกิดหมู่ฟังก์ชันใหม่บนผิวของวัสดุที่ถูกอบพลาสมา หรืออาจทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงบนพื้นผิว เช่น เกิดความขรุขระขึ้นบนพื้นผิว [45]

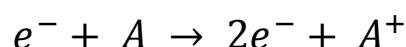
2.4.1 ปฏิริยาที่เกิดขึ้นในพลาสมาและทำให้เกิดอนุภาคที่ว่องไวต่อการเกิดปฏิริยา (active species) [76, 77]

2.4.1.1 การกระตุ้น (excitation)

เมื่อมีการให้พลังงานภายนอกแก่ระบบอิเล็กตรอนชั้นนอกสุดของอะตอมแก๊สจะเปลี่ยนจากสถานะพื้นไปอยู่ในสถานะกระตุ้น ซึ่งอิเล็กตรอนจะอยู่ในสถานะดังกล่าวนี้ได้เพียงระยะเวลาสั้นๆ จากนั้นอิเล็กตรอนจะพยายามที่จะกลับสู่สถานะพื้นโดยการปลดปล่อยพลังงานออกมาในรูปของแสง ทำให้พบเห็นว่ามีแสงเปล่งในกระบวนการอบพลาสมา

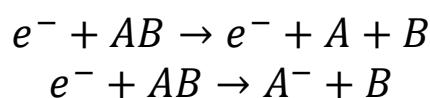
2.4.1.2 การแตกตัวด้วยอิเล็กตรอน (ionization by electrons)

เมื่ออิเล็กตรอนที่มีพลังงานสูงชนกับอะตอมหรือโมเลกุลของแก๊สในกระบวนการอบพลาสมา ทำให้อิเล็กตรอนในอะตอมหรือโมเลกุลของแก๊สหลุดออกมา และเกิดประจุบวกขึ้น



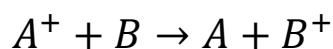
2.4.1.3 การแยกตัว (dissociation)

เมื่ออิเล็กตรอนชนกับโมเลกุลของแก๊สทำให้โมเลกุลของแก๊สแยกตัวออกจากกัน และเกิดทั้งอนุภาคที่มีประจุและไม่มีประจุ



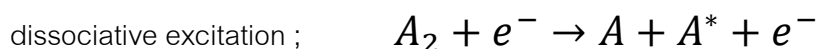
2.4.1.4 การแลกเปลี่ยนประจุ (charge exchange)

การแลกเปลี่ยนประจุจะเกิดขึ้นเมื่อไอออนเคลื่อนที่เข้าใกล้อนุภาคที่เป็นกลางทางไฟฟ้า และอนุภาคดังกล่าวจะส่งผ่านอิเล็กตรอนไปยังไอออน ทำให้ไอออนกลายเป็นอนุภาคที่เป็นกลาง ส่วนอนุภาคที่ส่งผ่านอิเล็กตรอนออกไปแล้วก็จะเกิดประจุขึ้นแทน

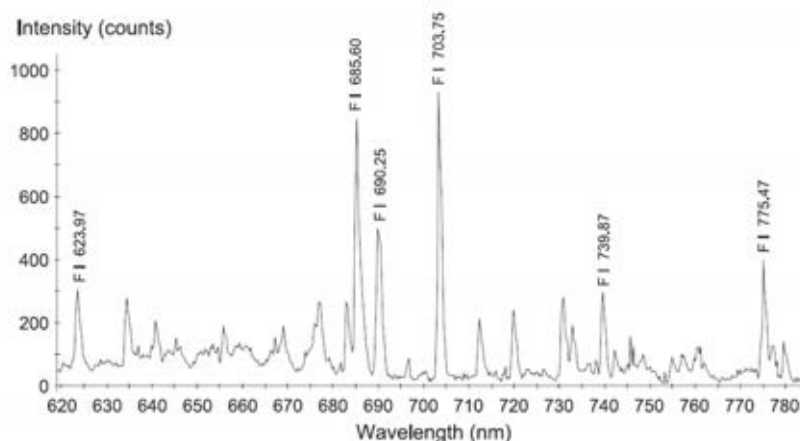


2.4.2 เทคนิคที่ใช้ตรวจสอบชนิดอนุภาคที่เกิดขึ้นในกระบวนการอาบพลาสมา

เทคนิคออปติคอลลิมิซชันสเปกโทรสโกปีเป็นเทคนิคที่ใช้ตรวจสอบชนิดของอนุภาคที่เกิดขึ้นในกระบวนการอาบพลาสมา ในงานวิจัยนี้จะได้ติดตั้งเทคนิคดังกล่าวไว้ด้านบนของแผ่นควอทซ์ที่เป็นส่วนบนของภาชนะสุญญากาศ เพื่อตรวจวัดแสงที่เปล่งผ่านแผ่นควอทซ์ออกมา ซึ่งเทคนิคดังกล่าวจะติดตั้งอยู่ด้านบนนอกของภาชนะสุญญากาศ ทำให้ไม่เกิดการรบกวนระบบในขณะที่เกิดพลาสมาในกระบวนการอาบพลาสมาจะเกิดอนุภาคที่ว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยา เช่น อนุภาคในสถานะกระตุ้น (excited species) จากปฏิกิริยาการชนกันของอิเล็กตรอนและโมเลกุลของแก๊ส (electron impaction reaction) [78]



ซึ่ง A คือ โมเลกุลของแก๊ส และ A^* คืออนุภาคของแก๊สที่อยู่ในสถานะกระตุ้น (excited species) และเป็นผลให้เกิดการปลดปล่อยแสงออกมา เทคนิคออปติคอลลิมิซชันสเปกโทรสโกปีจะตรวจวัดแสง และแสดงข้อมูลที่เป็นความยาวคลื่นของแสง (แกน x) และความเข้มของแสง (แกน y) [79] โดยนำความยาวคลื่นแสงมาเปรียบเทียบกับฐานข้อมูลของ atomic spectra database จาก NIST Atomic Spectra Database [80] เพื่อวิเคราะห์อนุภาคที่เกิดจากการแตกตัวของแก๊สในพลาสมาว่าเป็นธาตุชนิดใด ดังภาพที่ 2.9

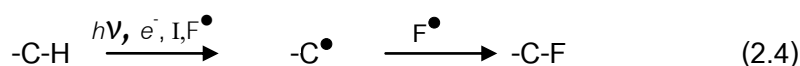
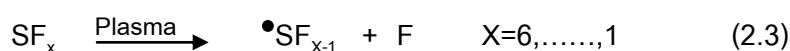


ภาพที่ 2.9 สเปกตรัมของอนุภาคฟลูออรีนจากเทคนิคออปติคอลมิสชันสเปกโทรสโกปีที่ตรวจวัดในกระบวนการอาบพลาสมาของแก๊สซัลเฟอร์เฮกซะฟลูออไรด์ [70]

อนุภาคต่างๆ ที่อยู่ในสถานะที่ว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยา ซึ่งเกิดขึ้นในกระบวนการอาบพลาสมา จะถูกเหนี่ยวนำลงบนผิวของวัสดุทำให้ผิวของวัสดุเกิดหมู่ฟังก์ชันใหม่หรือมีองค์ประกอบทางเคมีบนผิวของวัสดุเปลี่ยนแปลงไป และก่อให้เกิดการปรับเปลี่ยนสมบัติบริเวณพื้นผิวของวัสดุ [81]

2.4.3 งานวิจัยที่ใช้กระบวนการอาบพลาสมาในการปรับปรุงสมบัติไม่ชอบน้ำ

แก๊สชนิดต่างๆ ที่ใช้ในกระบวนการอาบพลาสมาจะทำให้สมบัติบนผิวของวัสดุที่มีลักษณะเฉพาะซึ่งจะต้องมีการเลือกใช้ให้เหมาะสมกับการนำไปใช้งาน เช่น การอาบพลาสมาของแก๊สออกซิเจน แก๊สไนโตรเจน และอากาศ จะทำให้เกิดหมู่ฟังก์ชันที่มีสมบัติไม่ชอบน้ำบนผิวของวัสดุ [3, 82, 83] ส่วนพลาสมาของแก๊สที่มีฟลูออรีนเป็นองค์ประกอบ เช่น แก๊สเตตระฟลูออโรมีเทน (tetrafluoromethane, CF_4) [6, 28] แก๊สออกตะฟลูออโรไซโคลบิวเทน (octafluorocyclobutane, C_4F_8) [84] แก๊สเพนตะฟลูออโรอีเทน (pentafluoroethane, CF_3CHF_2) [84] แก๊สไตรฟลูออโรมีเทน (trifluoromethane, CHF_3) [85] และแก๊สซัลเฟอร์เฮกซะฟลูออไรด์ (sulfurhexafluoride) [8, 28] จะลดพลังงานผิวของวัสดุและทำให้มีสมบัติไม่ชอบน้ำ งานวิจัยของ Selli และคณะรายงานว่าอนุภาคของฟลูออรีนที่เกิดจากการแตกตัวของแก๊สซัลเฟอร์เฮกซะฟลูออไรด์ในกระบวนการอาบพลาสมา (ดังสมการ 2.3) จะเกิดการสร้างพันธะกับอะตอมของคาร์บอนบนผิวของผ้าฝ้ายแทนที่อะตอมของไฮโดรเจน (ดังสมการ 2.4) [7] จึงพบหมู่ฟังก์ชันของ C-F เมื่อวิเคราะห์ด้วยเทคนิค Attenuated total reflectance (ATR) spectra



Kamlangkla และคณะได้นำผ้าฝ้ายมาอบพลาสมาของแก๊สซัลเฟอร์เฮกซะฟลูออไรด์ พบว่ามีฟีกของ CF, CF₂, และ CF₃ ปรากฏในสเปกตรัมของเทคนิคเอกซ์-เรย์โฟโตอิเล็กตรอนสเปกโทรสโกปีและพบว่าผ้าฝ้ายมีสมบัติไม่ชอบน้ำ เนื่องจากว่าโมเลกุลของน้ำเกิดการสร้างพันธะไฮโดรเจนกับหมู่ฟังก์ชันบนผิวของผ้าฝ้ายได้น้อยลง [86] นอกจากนี้ยังมีงานวิจัยของ Chaiwong และคณะ [2] ได้ปรับปรุงสมบัติไม่ชอบน้ำของแผ่นฟิล์มพอลิแล็กติกแอซิดโดยใช้กระบวนการอบพลาสมาของแก๊สซัลเฟอร์เฮกซะฟลูออไรด์และได้รายงานว่าค่ามุมสัมผัสของน้ำกับแผ่นฟิล์มพอลิแล็กติกแอซิดเพิ่มขึ้นจาก 60° เป็น 101° จากงานวิจัยที่กล่าวมาแสดงให้เห็นว่ากระบวนการอบพลาสมาสามารถปรับปรุงสมบัติไม่ชอบน้ำได้และในกระบวนการดังกล่าวนี้จะมีปัจจัยต่างๆ ที่สามารถควบคุมเพื่อให้ได้สมบัติตามต้องการ เช่น ความดัน (pressure) กำลังวัตต์ของความถี่วิทยุ (RF power) และเวลาที่ใช้ในกระบวนการอบพลาสมา (treatment time)

Jacobs และคณะพบว่าเวลาที่ใช้ในการอบพลาสมาเป็นปัจจัยสำคัญในการสร้างอนุภาคของฟลูออรีน กล่าวคือเมื่อเวลาเพิ่มขึ้นจะทำให้ความหนาแน่นของอนุภาคฟลูออรีนในกระบวนการอบพลาสมาเพิ่มขึ้น และมีโอกาสที่จะเกิดหมู่ฟังก์ชันที่มีฟลูออรีนเป็นองค์ประกอบบนผิวพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต (poly(ethylene terephthalate), PET) ได้มากขึ้น ค่ามุมสัมผัสของน้ำจึงสูงขึ้น [87] ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Gao และคณะที่พบว่าในการอบพลาสมาของแก๊สเตตระฟลูออโรมีเทนจะทำให้หมู่ฟังก์ชัน -CH₃ ของยางซิลิโคนหายไปแต่จะพบหมู่ฟังก์ชัน C-CF_n เกิดขึ้นและปริมาณของฟลูออรีนจะเพิ่มขึ้นตามเวลาที่ใช้ในกระบวนการอบพลาสมา อีกทั้งยังทำให้ความขรุขระบนผิวแผ่นยางเพิ่มขึ้นด้วยเนื่องจากอนุภาคในพลาสมามีพลังงานที่ทำให้เกิดการทำลายพื้นผิวบางส่วนของชิ้นงาน ซึ่งทั้งหมู่ฟังก์ชันของฟลูออรีนและความขรุขระที่เกิดขึ้นนี้ทำให้พลังงานผิวของวัสดุลดลงสมบัติไม่ชอบน้ำจึงสูงขึ้น แต่การใช้เวลาในการอบพลาสมาสูงเกินไปจะทำให้เกิดการทำลายพื้นผิวของวัสดุจนผิววัสดุมีลักษณะเรียบ สมบัติไม่ชอบน้ำจึงลดลง [6] งานวิจัยของ Hodak และคณะ [88] ได้อบพลาสมาของแก๊สซัลเฟอร์เฮกซะฟลูออไรด์บนผ้าไหมและพบว่าเมื่อเพิ่มความดันในกระบวนการอบพลาสมาให้มีค่าสูงขึ้น จะทำให้ระยะห่างระหว่างอนุภาคต่างๆ (mean free path) ในพลาสมาสั้นลงซึ่งเป็นการเพิ่มโอกาสในการชนกันของอนุภาคต่างๆ อัตราการแตกตัวของแก๊ส (ionization) จึงเพิ่มขึ้น ความหนาแน่นของฟลูออรีนในกระบวนการอบพลาสมาจะเพิ่มขึ้นด้วย ทำให้ฟลูออรีนบนผิวของผ้าไหมสูงขึ้น ดังนั้นผ้าไหมจึงดูดซับน้ำยากขึ้น ซึ่งเป็นสมบัติที่ต้องการสำหรับอุตสาหกรรมผ้าไหม ส่วนปัจจัยด้านกำลังวัตต์ (RF power) ที่ใช้ในกระบวนการอบพลาสมา ได้มีรายงานจากงานวิจัยของ Paosawatyanong และคณะว่าในการเพิ่มค่ากำลังวัตต์จะทำให้ความหนาแน่นของอนุภาคฟลูออรีนเพิ่มขึ้นเป็นผลให้ฟลูออรีนเกิดการสร้างพันธะกับผิวของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต

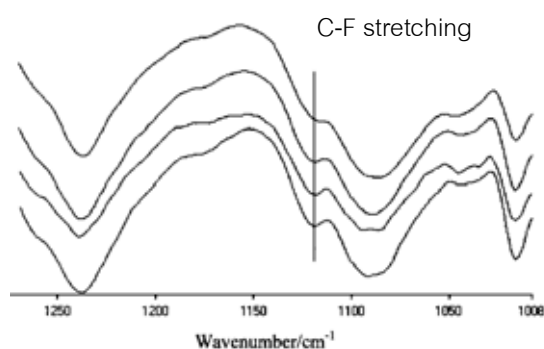
ได้มากขึ้น สมบัติไม่ชอบน้ำจึงสูงขึ้น [89]

2.4.4 เทคนิคที่ใช้ตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบทางเคมีบนผิววัสดุที่ถูกอาบพลาสมา

จากงานวิจัยที่ศึกษาการปรับปรุงสมบัติไม่ชอบน้ำด้วยกระบวนการอาบพลาสมาได้รายงานว่า การเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบทางเคมีบนผิวของวัสดุเป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้เกิด การปรับปรุงสมบัติดังกล่าว ซึ่งในการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบทางเคมีที่เกิดขึ้นนี้สามารถศึกษาได้ ด้วยเทคนิคต่างๆ ดังต่อไปนี้

2.4.4.1 เทคนิคอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (Infrared Spectroscopy, IR)

เทคนิคอินฟราเรดสเปกโทรสโกปีเป็นเทคนิคที่ใช้วิเคราะห์โครงสร้างของโมเลกุลของสารที่เป็นของแข็ง (solid) ของเหลว (liquid) และแก๊ส (gas) โดยวัดการดูดกลืนคลื่นอินฟราเรดที่ทำให้โมเลกุลเกิดการสั่นในแบบต่างๆ ซึ่งพลังงานที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสถานะการสั่นจะมีระดับพลังงานที่แน่นอน ดังนั้นแถบการดูดกลืนคลื่นอินฟราเรดที่ช่วงเลขคลื่นต่างๆ จะบ่งบอกถึงชนิดของหมู่ฟังก์ชันของโมเลกุลนั้นได้ [81, 90] Bhat และคณะได้ใช้เทคนิคแอกเทนนูเอเทดโททัลรีเฟลกชันฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปีในการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบทางเคมีของผ้าฝ้ายที่ปรับปรุงสมบัติไม่ชอบน้ำด้วยกระบวนการอาบพลาสมาของแก๊สไดคลอโรไดฟลูออโรมีเทน พบว่ามีพีกของ C-F stretching (1232 cm^{-1}) เกิดขึ้น แต่ไม่พบพีกดังกล่าวบนผ้าฝ้ายก่อนอาบพลาสมา [91] และในงานวิจัยของ Selli และคณะพบพีก C-F stretching ที่เลขคลื่น 1120 cm^{-1} จากผ้าพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตที่อาบพลาสมาของแก๊สซิลเฟอร์เฮกซะฟลูออไรด์ดังภาพที่ 2.10 [7]

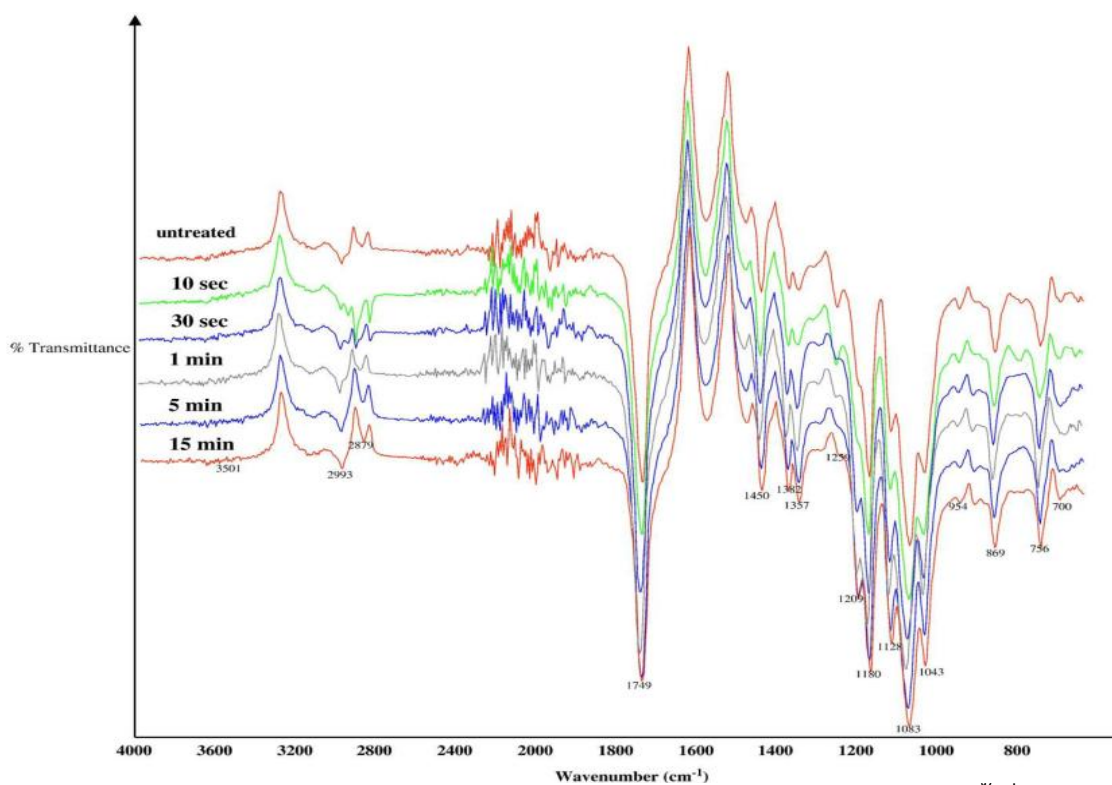


ภาพที่ 2.10 สเปกตรัมจากเทคนิคอินฟราเรดสเปกโทรสโกปีของผ้าพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตที่อาบพลาสมาของแก๊สซิลเฟอร์เฮกซะฟลูออไรด์

นอกจากนี้แล้วยังมีการนำเทคนิคนี้มาวิเคราะห์ฟิล์มพอลิแล็กติกแอซิดที่ถูกอบพลาสติกด้วยแก๊สซัลเฟอร์เฮกซะฟลูออไรด์ในงานวิจัยของ Chaiwong และคณะ(ภาพที่ 2.11) ซึ่งทำให้ทราบถึงหมู่ฟังก์ชันของพอลิแล็กติกแอซิดและหมู่ฟังก์ชันที่เกิดขึ้นหลังอบพลาสติกมา [2] (ตารางที่ 2.2)

ตารางที่ 2.2 หมู่ฟังก์ชันบนฟิล์มพอลิแล็กติกแอซิดที่ถูกอบพลาสติกด้วยแก๊สซัลเฟอร์เฮกซะฟลูออไรด์ [2]

เลขคลื่น (cm^{-1})	หมู่ฟังก์ชัน
3501	-OH stretching
2993 (asym), 2879 (sym)	-CH stretching
1749	-C=O carbonyl stretching
1450	-CH ₃ bending
1382, 1357	-CH-sym,asym,bending
1259	-C=O bending
1209	-C-F stretching
1180, 1128	-C-O- stretching
1083, 1043	-OH bending
954	-CH ₃ rocking
869, 756, 700	-C-C stretching



ภาพที่ 2.11 สเปกตรัมจากเทคนิคอินฟราเรดสเปกโทรสโกปีของฟิล์มพอลิอิมิดิกทั้งที่ผ่านการอบพลาสมาของแก๊สซัลเฟอร์เฮกซะฟลูออไรด์และไม่ได้ผ่านการอบพลาสมา [2]

2.4.4.2 เทคนิคเอกซ์-เรย์โฟโตอิเล็กตรอนสเปกโทรสโกปี (X-ray Photoelectron Spectroscopy, XPS)

เทคนิคเอกซ์-เรย์โฟโตอิเล็กตรอนสเปกโทรสโกปีเป็นเทคนิคที่ใช้รังสีเอกซ์ที่มีพลังงานมากพอซึ่งจะมากกว่าพลังงานยึดเหนี่ยว (binding energy, E_b) ของอิเล็กตรอนในระดับพลังงานชั้นใน (inner-shell) เพื่อทำให้อิเล็กตรอนจากออร์บิทัลของระดับพลังงานชั้นในหลุดออกมา ซึ่งค่าพลังงานจะเป็นสมบัติเฉพาะของแต่ละธาตุทำให้ได้สเปกตรัมเฉพาะตัวของแต่ละธาตุในสารประกอบ [76, 81, 92]

2.4.4.3 เทคนิคเทคนิคอิเล็กตรอนโพรบไมโครอนาลิซิส (Electron Probe Microanalyser, EPMA)

เทคนิคอิเล็กตรอนโพรบไมโครอนาลิซิสจะใช้ลำของอิเล็กตรอนยิงลงบนชิ้นงาน ซึ่งอิเล็กตรอนปฐมภูมิจะเกิดอันตรกิริยากับอะตอมของชิ้นงานและเกิดสัญญาณหลายชนิด สัญญาณที่เกิดขึ้นจะบ่งบอกถึงองค์ประกอบของชิ้นงานทั้งลักษณะของผิวชิ้นงานจากสัญญาณอิเล็กตรอนทุติยภูมิรวมถึงการวิเคราะห์เชิงปริมาณและเชิงคุณภาพของธาตุในชิ้นงานจากสัญญาณของรังสีเอกซ์เมื่ออิเล็กตรอนปฐมภูมิมีพลังงานสูงพอที่จะสามารถชนกับอะตอมของชิ้นงานและทำให้

อิเล็กตรอนชั้นในของอะตอมหลุดออกจนเกิดช่องว่างในอะตอมชั้นอิเล็กตรอนในวงโคจรชั้นนอกที่มีพลังงานสูงกว่าจะเข้าแทนที่พร้อมกับปลดปล่อยพลังงานออกมา ซึ่งพลังงานที่ปลดปล่อยออกมาจะเป็นพลังงานเฉพาะของอิเล็กตรอนจากธาตุนั้นๆ พลังงานชนิดนี้คือรังสีเอกซ์เฉพาะธาตุ [93, 94] ซึ่งในงานวิจัยนี้จะใช้เทคนิคนี้เพื่อตรวจสอบและยืนยันว่ามีฟลูออรีนเกิดขึ้นบนชิ้นงานหลังอาบพลาสมา

กระบวนการอาบพลาสมาสามารถปรับปรุงสมบัติไม่ชอบน้ำของวัสดุได้อย่างมีประสิทธิภาพ และยังมีรายงานว่าหากมีการเตรียมผิวของวัสดุให้มีความขรุขระก่อนนำไปอาบพลาสมาจะสามารถทำให้เกิดสมบัติไม่ชอบน้ำที่ยาวบนผิววัสดุ เช่น งานวิจัยของ Yoon และคณะ [95] ได้เตรียมแผ่นเส้นใยเซลลูโลสอะซีเตตด้วยเทคนิคอิเล็กโทรสปินนิงแล้วนำไปอาบพลาสมาของแก๊สเตตระฟลูออโรมีเทนพบว่าสามารถปรับปรุงให้มีสมบัติไม่ชอบน้ำที่ยาว

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 สารเคมี

- พอลิแล็กติกแอซิด (PLA Polymer 2002D grade $M_w = 22,046.23$ ปอนด์ต่อโมล) ของบริษัท NatureWorks® ประเทศสหรัฐอเมริกา
- คลอโรฟอร์ม (CHCl_3 99.8%) ของบริษัท RCI Labscan ประเทศไทย
- อะซีโตน (CH_3COCH_3 99.5%) ของบริษัท RCI Labscan ประเทศไทย
- แก๊สซัลเฟอร์เฮกซะฟลูออไรด์ (SF_6 99.99%) ของบริษัทแลบแก๊ส (ไทยแลนด์) จำกัด ประเทศไทย
- ไดไอโอดมีเทน (CH_2I_2 99%) ของบริษัท Sigma-Aldrich ประเทศสหรัฐอเมริกา

3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในเทคนิคอิเล็กโทรสปินนิง (electrospinning)

- เครื่องจ่ายไฟฟ้าแรงสูง (High voltage power supply) ขนาด 0-25 kV ของบริษัท LEYBOLD DIDACTIC GMBH ประเทศเยอรมนี
- เครื่องควบคุมการไหลของสารละลาย (syringe pump) ของบริษัท New Era Pump systems, Inc ประเทศสหรัฐอเมริกา

3.3 ขั้นตอนและวิธีการทดลอง

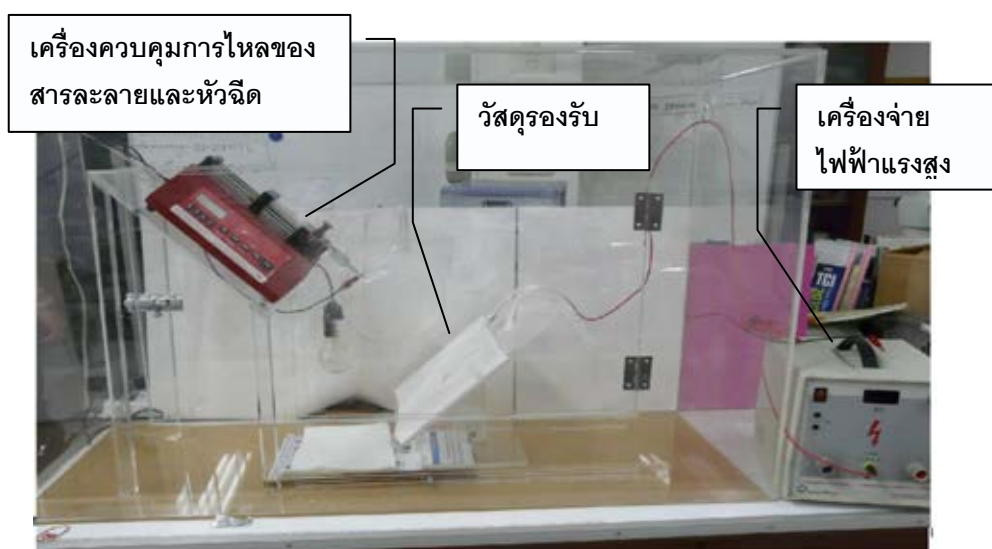
3.3.1 ขั้นตอนการเตรียมสารละลายที่ใช้ในเทคนิคอิเล็กโทรสปินนิง

เตรียมตัวทำละลายผสมโดยนำอะซีโตนผสมกับคลอโรฟอร์มในอัตราส่วน 3:1 ที่ปริมาตร 100 ml นำเม็ดพลาสติกพอลิแล็กติกแอซิดมาละลายในตัวทำละลายผสมที่ได้เตรียมไว้

ความเข้มข้นที่ศึกษา คือ 7 10 13 %wt กวนจนกระทั่งเม็ดพลาสติกพอลิแล็กติกแอซิดละลาย เป็นเนื้อเดียวกัน

3.3.2 ขั้นตอนการขึ้นรูปเส้นใยโดยใช้เทคนิคอิเล็กโตรสปินนิง

ในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยได้ประกอบเครื่องอิเล็กโตรสปินนิงขึ้นมาเพื่อใช้ในการเตรียมเส้นใย โดยมีส่วนประกอบของเครื่อง ดังภาพที่ 3.1



ภาพที่ 3.1 เครื่องอิเล็กโตรสปินนิง

ในการขึ้นรูปเส้นใยจะนำสารละลายพอลิแล็กติกแอซิดบรรจุลงในกระบอกฉีดยา ปริมาตร 10 ml ที่มีปลายเข็มโลหะติดอยู่ หลังจากนั้นนำกระบอกฉีดยาต่อเข้ากับเครื่องควบคุมการไหลของสารละลาย โดยจะควบคุมอัตราการไหลที่ 0.6 mL/h นำหัวบวกของเครื่องให้ ศักย์ไฟฟ้ากำลังสูงต่อกับปลายเข็มโลหะ ระยะห่างระหว่างปลายเข็มโลหะกับแผ่นรองรับเส้นใยที่ ถูกศึกษา คือ 10 cm, 15 cm, และ 20 cm และแผ่นรองรับจะถูกต่ออยู่กับกราวด์ของเครื่องให้ ศักย์ไฟฟ้ากำลังสูง ค่าศักย์ไฟฟ้าที่ศึกษา คือ 15 kV, 20 kV, และ 25 kV

3.3.3 การปรับปรุงสมบัติไม่ชอบน้ำของเส้นใยพอลิแล็กติกแอซิดด้วยเครื่องอาบพลาสมา

ในงานวิจัยนี้ได้ปรับปรุงสมบัติไม่ชอบน้ำของเส้นใยพอลิแล็กติกแอซิดโดยใช้เครื่องอาบพลาสมา ซึ่งมีส่วนประกอบหลักดังนี้

3.3.3.1 ภาชนะสุญญากาศ (chamber)

ภาชนะสุญญากาศทำจากเหล็กกล้าไร้สนิมซึ่งเป็นวัสดุที่มีความแข็งแรง ทนทานต่อการกัดกร่อน และต้านทานต่อการเกิดสนิม ด้านบนของภาชนะสุญญากาศจะถูกปิดด้วยแผ่นควอทซ์ซึ่งจะยอมให้สนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าจากขดลวดระนาบ (planar coil) ผ่านเข้าสู่ภาชนะสุญญากาศได้ ด้านข้างของภาชนะสุญญากาศจะถูกเชื่อมด้วยระบบแก๊ส และด้านล่างของภาชนะสุญญากาศจะถูกเชื่อมต่อกับระบบปั๊มสุญญากาศ

3.3.3.2 ระบบปั๊มสุญญากาศ (vacuum pump system)

ในงานวิจัยนี้กระบวนการอาบพลาสมาจะเกิดขึ้นในสภาวะสุญญากาศ เพื่อลดการเจือปนของแก๊สอื่นๆ ที่จะส่งผลกระทบต่อกระบวนการอาบพลาสมา ซึ่งงานจะถูกวางบนชิ้นงานภายในภาชนะสุญญากาศ หลังจากนั้นภาชนะสุญญากาศจะถูกสูบอากาศออก จนกระทั่งมีความดันที่ 3.5×10^{-5} torr โดยใช้ปั๊มสุญญากาศแบบโรตารีแวน (rotary vane pump, Productive Vacuum Technology Co.,Ltd) และปั๊มสุญญากาศแบบเทอร์โบโมเลกุลาร์ (turbo molecular pump, Edwards High Vacuum International, ประเทศสหรัฐอเมริกา) ทำให้ภาชนะสุญญากาศอยู่ในสภาวะสุญญากาศและความดันในภาชนะสุญญากาศจะถูกวัดโดยใช้เกจวัดความดัน (Edwards High Vacuum International ประเทศอังกฤษ)

3.3.3.3 ระบบแก๊ส (gas system)

ในงานวิจัยนี้จะใช้แก๊สซัลเฟอร์เฮกซะฟลูออไรด์ เพื่อปรับปรุงสมบัติไม่ชอบน้ำของแผ่นเส้นใยพอลิแล็กติกแอซิด หลังจากภาชนะสุญญากาศอยู่ในสภาวะสุญญากาศแล้วแก๊สจากถังแก๊สจะถูกปล่อยไปตามท่อ นำแก๊สผ่านตัวควบคุมการไหลของแก๊ส (Dwyer Instrument Inc,

ประเทศสหรัฐอเมริกา) เพื่อควบคุมให้แก๊สไหลเข้าสู่ภาชนะสุญญากาศให้มีปริมาณคงที่ หลังจากนั้นจะปรับความดันภายในภาชนะสุญญากาศโดยใช้วาล์วของปั๊มสุญญากาศแบบโรตารีเวน

3.3.3.4 ระบบให้กำเนิดพลาสมา (plasma system)

ประกอบไปด้วยอุปกรณ์หลักๆ คือเครื่องกำเนิดสัญญาณความถี่คลื่นวิทยุ (RF generator, CESAR 1310, dressler) ให้กำเนิดสัญญาณที่ความถี่ 13.56 MHz วงจรปรับค่าความขัด (impedance matching network) และขดลวดระนาบ (planar coil) อุปกรณ์เหล่านี้จะติดตั้งอยู่บนเนื้อแผ่นควอทซ์ สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กจากระนาบขดลวดจะถูกส่งผ่านแผ่นควอทซ์เข้าสู่ภาชนะสุญญากาศ ปัจจัยที่ต้องการปรับเปลี่ยนเพื่อให้ได้สมบัติที่ต้องการ คือความดันภายในภาชนะสุญญากาศขณะอาบพลาสมา กำลังไฟฟ้าของคลื่นความถี่วิทยุ เวลาที่ใช้ในการอาบพลาสมา

3.4 การตรวจสอบสมบัติของเส้นใยพอลิแล็กติกแอซิด

3.4.1 การตรวจสอบขนาดของเส้นใยพอลิแล็กติกแอซิดที่เตรียมจากเทคนิคอิเล็กโตรสปินนิง

เทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy (SEM, JEOL model JSM-6480LV) จะถูกใช้ในการถ่ายภาพแผ่นเส้นใยพอลิแล็กติกแอซิด แล้วนำภาพที่ได้มาวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยโดยใช้โปรแกรม JMicroVision software (V1.2.7, Nicolas Rodult)

3.4.2 การตรวจสอบพื้นที่ผิวของเส้นใยพอลิแล็กติกแอซิดที่เตรียมจากเทคนิคอิเล็กโตรสปินนิง โดยใช้เทคนิคบลูเนอร์ เอลเม็ท เทลเลอร์ (Brunauer-Emmett-Teller, BET, BELsorp max 92, BEL ประเทศญี่ปุ่น)

3.4.3 การตรวจสอบองค์ประกอบทางเคมีของเส้นใยพอลิแล็กติกแอซิดก่อนและหลังอาบพลาสมาทำด้วยเทคนิคต่างๆ ดังนี้

3.4.3.1 เทคนิคแอสซิมเมตริกแอตทนูเอตีดโททัลรีเฟล็กชันฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (Attenuated Total Reflection Fourier Transform Infrared Spectroscopy, ATR-FTIR, Nicolet iS10, Thermo Fisher Scientific)

3.4.3.2 เทคนิคเอกซ์-เรย์โฟโตอิเล็กตรอนสเปกโทรสโกปี (X-ray Photoelectron Spectroscopy, XPS, AXIS ULTRA^{DLD} model, KRATOS ANALYTICAL, ประเทศอังกฤษ)

3.4.3.3 เทคนิคอิเล็กตรอนโพรบไมโครอนาลิซิส (Electron Probe Micro Analysis, EPMA, JEOLmodel JXA-8100/8200)

3.4.4 การตรวจสอบสมบัติไม่ชอบน้ำของเส้นใยพอลิแล็กติกแอซิด

วัดค่ามุมสัมผัสของน้ำและไดโอดีโอดีเทนบนผิวชิ้นงานด้วยเทคนิคการวัดค่ามุมสัมผัสของน้ำโดยจะใช้น้ำกลั่นปริมาตร 12 μl หยดลงบนชิ้นงาน หลังจากนั้นกล้องของเครื่องวัดค่ามุมสัมผัสของน้ำ (contact angle machine) จะบันทึกภาพและวัดค่ามุมออกมา โดยที่ใน 1 ชิ้นงานจะวัดทั้งหมด 6 ตำแหน่ง แล้วนำมาหาค่าเฉลี่ย ส่วนในกรณีของไดโอดีโอดีเทนจะใช้วิธีการเดียวกันนี้แต่ใช้ปริมาตรของไดโอดีโอดีเทนประมาณ 5 μl ค่าของมุมที่ได้จะใช้พิจารณาถึงการเปียกผิวและพลังงานพื้นผิวของชิ้นงานโดยจะแสดงรายละเอียดในบทที่ 2

3.4.5 ตรวจสอบการเกิดฟลูออรีนในสถานะแก๊สด้วยเทคนิคออปติคอลลิมิตชันสเปกโทรสโกปี (Optical Emission Spectroscopy, OES, HR4000, Ocean optics Inc.)

บทที่ 4

ผลการทดลองและอภิปรายผล

ผลของงานวิจัยนี้แบ่งออกเป็น 2 ส่วนด้วยกัน คือ ส่วนของการเตรียมเส้นใยและส่วนของการปรับปรุงสมบัติไม่ชอบน้ำ

4.1 การเตรียมเส้นใยด้วยเทคนิคอิเล็กทรอนิกส์สปินนิ่ง

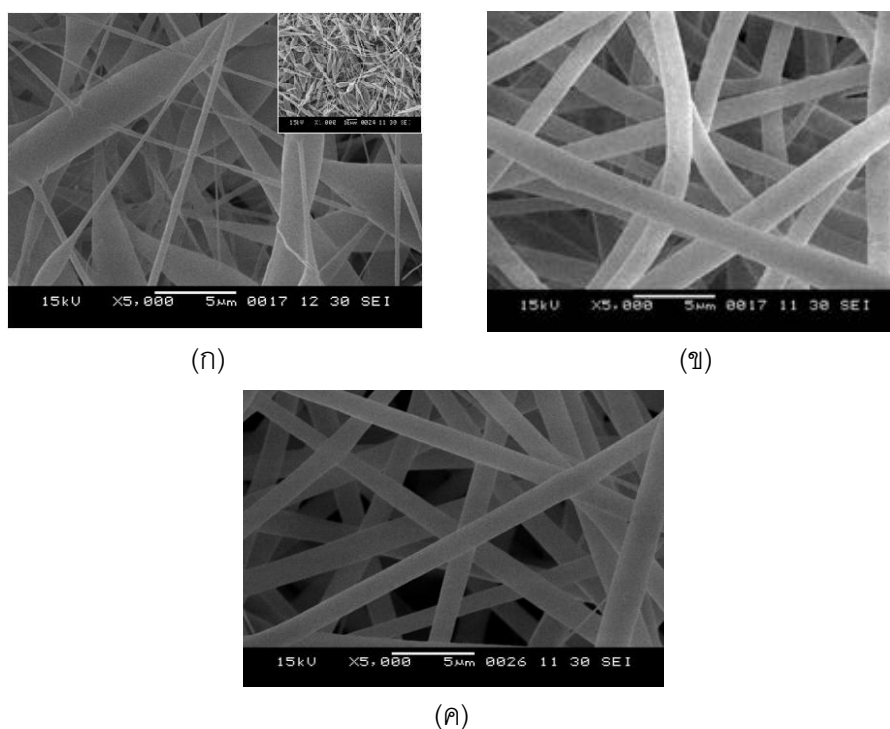
เป็นที่ทราบกันดีว่าเส้นใยขนาดเล็กจะทำให้แผ่นเส้นใยมีความขรุขระ น้ำจะสามารถสัมผัสกับผิวแผ่นเส้นใยได้น้อยกว่าวัสดุที่มีผิวเรียบ ดังนั้นเทคนิคอิเล็กทรอนิกส์สปินนิ่งน่าจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการปรับปรุงสมบัติไม่ชอบน้ำให้สูงขึ้นก่อนที่จะนำไปอาบพลาสติก ในงานวิจัยนี้ได้มีการปรับเปลี่ยนปัจจัยต่างๆ ของเทคนิคดังกล่าว ดังนี้

4.1.1 ผลของการปรับเปลี่ยนความเข้มข้นของสารละลายพอลิแล็กติกแอซิดที่ใช้ในเทคนิคอิเล็กทรอนิกส์สปินนิ่ง

แผ่นเส้นใยถูกเตรียมโดยใช้ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าคงที่ที่ 15 kV ระยะห่างระหว่างปลายเข็มจนถึงวัสดุรองรับคงที่ที่ 15 cm อัตราการฉีดสารละลายคงที่ที่ 0.6 mL/h โดยมีการปรับเปลี่ยนค่าความเข้มข้นของสารละลายพอลิแล็กติกแอซิดที่ 7 wt%, 10 wt%, และ 13 wt% แล้วศึกษาขนาดและลักษณะของเส้นใยจากภาพถ่ายของเทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (ภาพที่ 4.1) พบว่าการใช้สารละลายพอลิแล็กติกแอซิดที่มีความเข้มข้น 7 wt% จะทำให้มีปมเกิดขึ้นบนแผ่นของเส้นใย เนื่องจากสารละลายพอลิแล็กติกแอซิดมีความเข้มข้นต่ำมาก สายโซ่พอลิเมอร์จะมีการเกี่ยวพันกันน้อย เมื่อได้รับแรงผลักดันทางไฟฟ้าที่สูงสารละลายพอลิแล็กติกแอซิดที่เคลื่อนที่ออกจากปลายเข็มจะเกิดการขาดช่วง และกลายเป็นหยดของสารละลายพอลิแล็กติกแอซิดพุ่งไปยังวัสดุรองรับ เมื่อตัวทำละลายระเหยออกจึงเกิดเป็นปมบนแผ่นของเส้นใย [96, 97] ผลดังกล่าวนี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ McKee และคณะ [98] ซึ่งได้รายงานไว้ว่าเมื่อใช้สารละลายพอลิเมอร์ที่มีความเข้มข้นต่ำและมีการเกี่ยวพันกันของสายโซ่พอลิเมอร์น้อย สารละลายพอลิเมอร์จะมีความไม่ต่อเนื่องจึงเกิดทั้งปมและเส้นใยบนวัสดุรองรับ แต่เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายพอลิเมอร์ให้มีความสูงขึ้น จะเกิดการสร้างเส้นใยที่มีความต่อเนื่องกัน

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้มีการปรับเปลี่ยนความเข้มข้นของสารละลายพอลิแล็กติกแอซิดให้มีความสูงขึ้น คือ 10 wt% และ 13 wt% พบว่าภายใต้ความเข้มข้นดังกล่าวสายโซ่พอลิเมอร์จะมีการเกี่ยวพันกันมากพอ ในขณะที่ได้รับแรงผลักดันทางไฟฟ้าสารละลายพอลิแล็กติกแอซิดจะถูกดึงยึดโดยที่ไม่เกิดการขาดออกจากกัน เส้นใยที่เตรียมได้จึงมีความต่อเนื่องกันและไม่มีปมเกิดขึ้นบน

แผ่นของเส้นใย ขนาดของเส้นใยที่เตรียมจากสารละลายพอลิแล็กติกแอซิดที่มีความเข้มข้น 10 wt% และ 13 wt% คือ 1.4 μm และ 1.7 μm ตามลำดับ และเนื่องจากในสารละลายพอลิแล็กติกแอซิดที่มีความเข้มข้นสูงกว่าสายโซ่พอลิเมอร์จะมีการเกี่ยวพันกันมากขึ้นทำให้มีความต้านทานต่อการยืด [52] จึงเป็นผลให้เส้นใยที่เตรียมจากสารละลายพอลิแล็กติกแอซิดที่มีความเข้มข้นสูงกว่า (13 wt%) มีขนาดที่ใหญ่กว่าเส้นใยที่เตรียมจากสารละลายพอลิแล็กติกแอซิดที่มีความเข้มข้นที่ต่ำกว่า (10 wt%) ดังนั้นในการทดลองที่เหลือของงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้สารละลายพอลิแล็กติกแอซิดที่มีความเข้มข้น 10 wt% เพื่อเตรียมเส้นใยพอลิแล็กติกแอซิด



ภาพที่ 4.1 ภาพถ่ายจากเทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของแผ่นเส้นใยที่เตรียมจากเทคนิคอิเล็กโทรสปินนิงโดยใช้ค่าความเข้มข้นของสารละลายพอลิแล็กติกแอซิดที่ (ก) 7 wt% (ข) 10 wt% และ (ค) 13 wt% และค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าคงที่ที่ 15 kV ระยะห่างระหว่างปลายเข็มจนถึงวัสดุรองรับคงที่ที่ 15 cm อัตราการฉีดสารละลายคงที่ที่ 0.6 mL/h

4.1.2 ผลของการปรับเปลี่ยนค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าจากเครื่องให้ศักย์ไฟฟ้ากำลังสูงที่มีต่อลักษณะและขนาดของเส้นใยที่เตรียมได้จากเทคนิคอิเล็กโทรสปินนิง

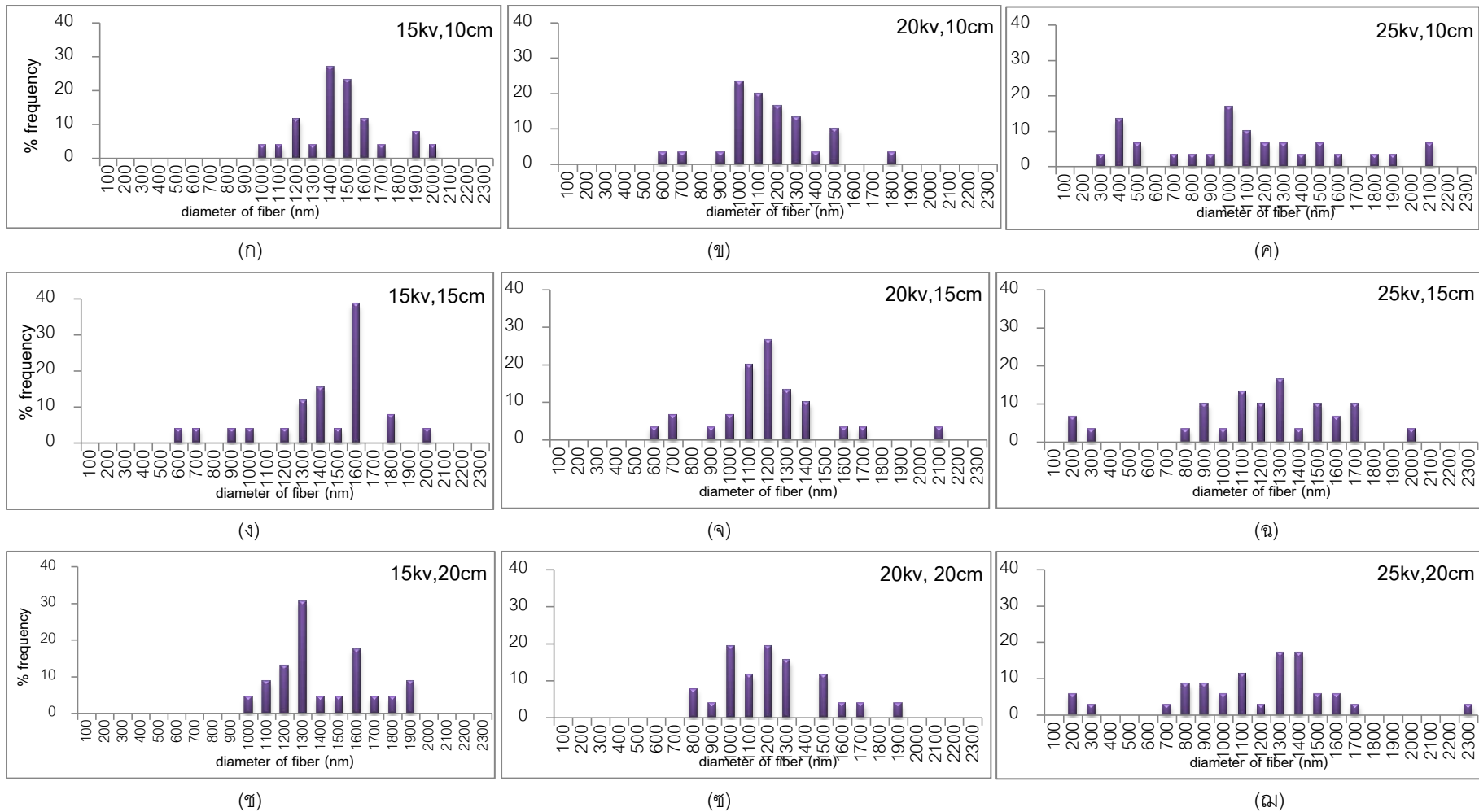
ในเทคนิคอิเล็กโทรสปินนิงจะเตรียมเส้นใยโดยใช้หัวฉีดที่เป็นเข็มโลหะขนาดเล็กจึงต้องให้ความต่างศักย์ไฟฟ้าแก่สารละลายพอลิแล็กติกแอซิด เพื่อให้เกิดแรงผลัทางไฟฟ้าที่สามารถผลักสารละลายออกจากปลายเข็ม และยังส่งผลต่อการดึงยึดในขณะที่สารละลายพุ่งไปยังวัสดุ

รองรับจนเกิดเป็นเส้นใยขึ้น จึงต้องมีการปรับเปลี่ยนค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าให้เหมาะสม เพื่อให้สารละลายเคลื่อนที่ออกจากปลายเข็มที่มีขนาดเล็กได้

ในงานวิจัยนี้ได้เตรียมแผ่นเส้นใยจากสารละลายพอลิแล็กติกแอซิดที่มีความเข้มข้นคงที่ที่ 10 wt% ระยะห่างระหว่างปลายเข็มจนถึงวัสดุรองรับคงที่ที่ 10 cm อัตราการฉีดสารละลายคงที่ที่ 0.6 mL/h โดยมีการปรับเปลี่ยนค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ 15 kV, 20 kV, และ 25 kV จากภาพที่ 4.2 (ก) - (ค) แสดงให้เห็นว่าการใช้ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่มีค่าสูง (20 kV และ 25 kV) จะได้แผ่นเส้นใยที่มีการกระจายขนาดของเส้นใยที่กว้างกว่าการใช้ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่มีค่าต่ำ (15 kV) เนื่องจากว่าการใช้ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่มีค่าสูง จะทำให้มีแรงผลักดันทางไฟฟ้าผลักดันสารละลายพอลิแล็กติกแอซิดออกจากปลายเข็มด้วยความเร่งที่สูงมาก สารละลายพอลิแล็กติกแอซิดที่พุ่งออกมาจึงมีความไม่เสถียร ผลของงานวิจัยนี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Jalili และคณะ [60] รายงานว่าสารละลายพอลิเมอร์ที่ออกจากปลายเข็มจะอยู่ในสภาวะที่ไม่เสถียรซึ่งมีสาเหตุมาจากการใช้แรงผลักดันทางไฟฟ้าที่สูง จึงเป็นผลให้เส้นใยมีขนาดไม่สม่ำเสมอ

เมื่อเตรียมแผ่นเส้นใยจากสารละลายพอลิแล็กติกแอซิดที่มีความเข้มข้นคงที่ที่ 10 wt% ระยะห่างระหว่างปลายเข็มจนถึงวัสดุรองรับคงที่ที่ 15 cm อัตราการฉีดสารละลายคงที่ที่ 0.6 mL/h โดยมีการปรับเปลี่ยนค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ 15 kV, 20 kV, และ 25 kV จากภาพที่ 4.2 (ง)-(จ) พบว่าได้ผลที่มีแนวโน้มเช่นเดียวกับการใช้ระยะห่างระหว่างปลายเข็มจนถึงวัสดุรองรับ 10 cm กล่าวคือการใช้ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ 15 kV จะสามารถเตรียมแผ่นเส้นใยที่มีการกระจายขนาดของเส้นใยแคบกว่าการใช้ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ 20 kV และ 25 kV เนื่องจากว่ามีแรงผลักดันทางไฟฟ้าที่ต่ำกว่าจะทำให้สารละลายพอลิแล็กติกแอซิดที่พุ่งออกจากปลายเข็มมีความเสถียรที่มากขึ้น

เมื่อเตรียมแผ่นเส้นใยจากสารละลายพอลิแล็กติกแอซิดที่มีความเข้มข้นคงที่ที่ 10 wt% ระยะห่างระหว่างปลายเข็มจนถึงวัสดุรองรับคงที่ที่ 20 cm อัตราการฉีดสารละลายคงที่ที่ 0.6 mL/h โดยมีการปรับเปลี่ยนค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ 15 kV, 20 kV, และ 25 kV จากภาพที่ 4.2 (ข)-(ฅ) พบว่าได้ผลที่มีแนวโน้มเช่นเดียวกับการใช้ระยะห่างระหว่างปลายเข็มจนถึงวัสดุรองรับ 10 cm และ 15 cm ดังนั้นจึงเลือกใช้ความเข้มข้นที่ 10 wt% ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้ากำลังสูง 15 kV ในการเตรียมแผ่นเส้นใย

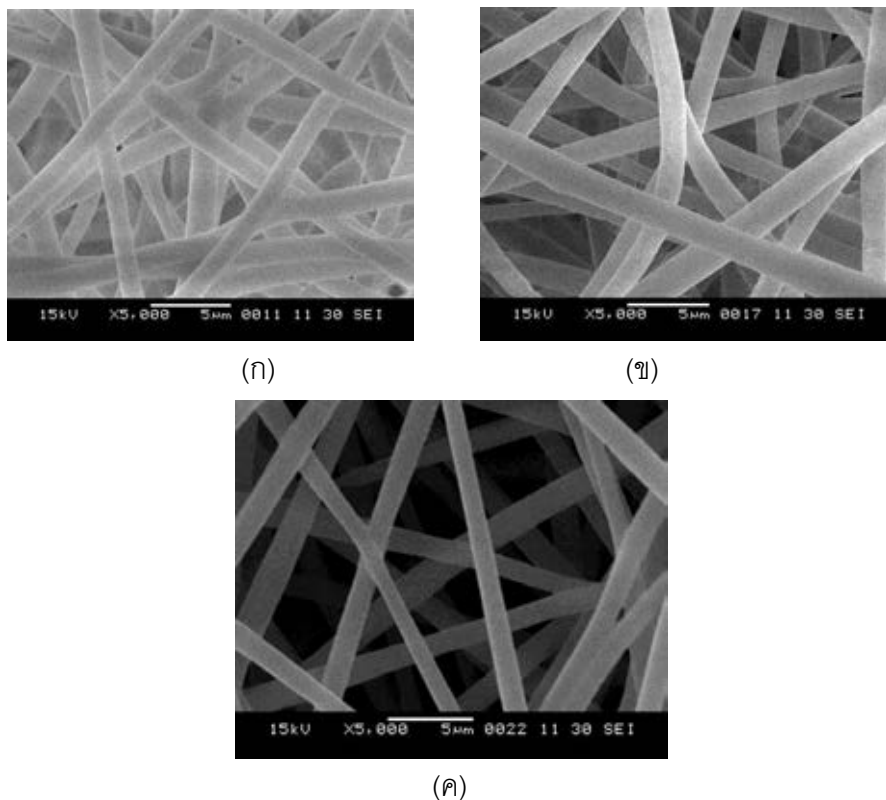


ภาพที่ 4.2 การกระจายขนาดของเส้นใยที่เตรียมจากเทคนิคอิเล็กโตรสปินนิงโดยใช้สารละลายพอลิแล็กติกแอซิดที่มีความเข้มข้นคงที่ที่ 10 wt% อัตราการฉีดสารละลายคงที่ที่ 0.6 mL/h โดยปรับเปลี่ยนค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า (kV) และระยะห่างระหว่างปลายเข็มจนถึงวัสดุรองรับ (cm) ต่างกัน

4.1.3 ผลของการปรับเปลี่ยนระยะห่างระหว่างปลายเข็มจนถึงวัสดุรองรับที่มีต่อลักษณะและขนาดของเส้นใยที่เตรียมได้จากเทคนิคอิเล็กโตรสปินนิง

ในระหว่างการเคลื่อนที่ของสารละลายพอลิแล็กติกแอซิดจากปลายเข็มไปยังวัสดุรองรับ จะเกิดการระเหยของตัวทำละลายออกจากสารละลายประกอบกับการถูกดึงยืดจากแรงทางไฟฟ้า ทำให้เกิดการลดขนาดของเส้นใย ดังนั้นจึงคาดว่า การปรับเปลี่ยนระยะห่างระหว่างปลายเข็มให้เหมาะสม เพื่อให้มีเวลามากพอที่จะทำให้ตัวทำละลายเกิดการระเหยออกจากสารละลาย และสารละลายจะยืดออกตามระยะทางที่เพิ่มขึ้นก่อนที่จะเกิดเป็นเส้นใยบนวัสดุรองรับ ทำให้สามารถเตรียมเส้นใยที่มีขนาดเล็กได้

ในงานวิจัยนี้ได้เตรียมแผ่นเส้นใยจากสารละลายพอลิแล็กติกแอซิดที่มีความเข้มข้นคงที่ที่ 10 wt% ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าคงที่ที่ 15 kV อัตราการฉีดสารละลายคงที่ที่ 0.6 mL/h โดยมีการปรับเปลี่ยนระยะห่างระหว่างปลายเข็มจนถึงวัสดุรองรับที่ 10 cm, 15 cm, และ 20 cm จาก **ภาพที่ 4.3** แสดงให้เห็นว่าเส้นใยที่เตรียมได้มีขนาดใกล้เคียงกัน แม้ว่าจะมีการเพิ่มระยะห่างระหว่างปลายเข็มจนถึงวัสดุรองรับ ซึ่งไม่เป็นไปตามที่คาดหวังไว้ เนื่องจากเกิดการระเหยของตัวทำละลายออกไปอย่างรวดเร็ว ทำให้สารละลายเกิดการแข็งตัวแล้วกลายเป็นเส้นใยก่อนที่สารละลายจะถูกดึงยืดและไม่ก่อให้เกิดการลดขนาดของเส้นใยตามการเพิ่มขึ้นของระยะห่างระหว่างปลายเข็มจนถึงวัสดุรองรับ ซึ่งผลดังกล่าวสอดคล้องกับงานวิจัยของ Zhang และคณะ [54] กล่าวคือ ในขณะที่สารละลายพอลิแล็กติกแอซิดพุ่งออกจากปลายเข็มจะเกิดการแข็งตัวแล้วกลายเป็นเส้นใยอย่างรวดเร็ว จึงไม่เกิดการลดขนาดของเส้นใยแต่จาก **ภาพที่ 4.3** จะสังเกตเห็นว่าความหนาแน่นของเส้นใยจะมีความแตกต่างอย่างชัดเจน เนื่องจากการเพิ่มระยะห่างระหว่างปลายเข็มจนถึงวัสดุรองรับจะทำให้แรงผลัทางไฟฟ้าลดลง เส้นใยบางส่วนจึงพุ่งไปไม่ถึงวัสดุรองรับจึงเกิดการสะสมของเส้นใยบนวัสดุรองรับน้อยลง ซึ่งผลที่ได้จากการปรับเปลี่ยนระยะห่างระหว่างปลายเข็มจนถึงวัสดุรองรับของงานวิจัยนี้จะมีแนวโน้มเช่นเดียวกับงานวิจัยของ Sutasinpromprae และคณะ [56]



ภาพที่ 4.3 ภาพถ่ายจากเทคนิคเทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของแผ่นเส้นใยที่เตรียมจากเทคนิคอิเล็กโตรสปินนิงโดยใช้ระยะห่างระหว่างปลายเข็มจนถึงวัสดุรองรับต่างกัน ได้แก่ (ก) 10 cm (ข) 15 cm และ (ค) 20 cm ค่าความเข้มข้นของสารละลายพอลิแล็กติกแอซิดที่ 10 wt% ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าคงที่ที่ 15 kV และอัตราการฉีดสารละลายคงที่ที่ 0.6 mL/h

เมื่อลดระยะห่างระหว่างปลายเข็มจนถึงวัสดุรองรับ (10 cm และ 15 cm) จึงมีความหนาแน่นของเส้นใยบนวัสดุรองรับมากขึ้น เส้นใยจึงเกิดการซ้อนทับกันเป็นผลให้มีพื้นที่ผิวของแผ่นเส้นใยลดลง ในขณะที่ใช้ระยะห่างระหว่างปลายเข็มจนถึงวัสดุรองรับเพิ่มเป็น 20 cm จะสามารถเตรียมแผ่นเส้นใยที่มีพื้นที่ผิวมากกว่า (ตารางที่ 4.1) ผู้วิจัยคาดหวังว่าการเลือกใช้แผ่นเส้นใยที่มีพื้นที่ผิวสูงจะเป็นการเพิ่มพื้นที่ของผิวที่มีลักษณะขรุขระและทำให้เพิ่มโอกาสในการกักอากาศเอาไว้ได้มากขึ้น [37] น้ำจึงสามารถสัมผัสกับผิวเส้นใยได้น้อยลง ค่ามุมสัมผัสของน้ำกับแผ่นเส้นใยที่มีพื้นที่ผิวที่สูงจึงมีค่าเพิ่มขึ้นดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ขนาด พื้นที่ผิว และค่ามุมสัมผัสบนน้ำของเส้นใยที่เตรียมจากสารละลายพอลิแล็กติกแอซิด

ระยะห่างระหว่างปลายเข็มจนถึงวัสดุรองรับ*(cm)	10	15	20
ขนาดของเส้นใย (nm)	1402 ± 240	1370 ± 334	1362 ± 255
พื้นที่ผิวของเส้นใย (m ² /g)	2.2	2.1	3.2
ค่ามุมสัมผัสของน้ำ (°)	111	111	118

*ความเข้มข้น 10 wt% ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าคงที่ที่ 15 kV อัตราการฉีดสารละลายคงที่ที่ 0.6 mL/h และระยะห่างระหว่างปลายเข็มจนถึงวัสดุรองรับต่างๆ กัน

จากผลการทดลองนี้ผู้วิจัยจึงเลือกใช้สารละลายพอลิแล็กติกแอซิดที่มีความเข้มข้นคงที่ที่ 10 wt% ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าคงที่ที่ 15kV อัตราการฉีดสารละลายคงที่ที่ 0.6 mL/h และระยะห่างระหว่างปลายเข็มจนถึงวัสดุรองรับคงที่ที่ 20 cm ในการเตรียมแผ่นเส้นใยเพื่อนำไปใช้ในการปรับปรุงสมบัติไม่ชอบน้ำต่อไป

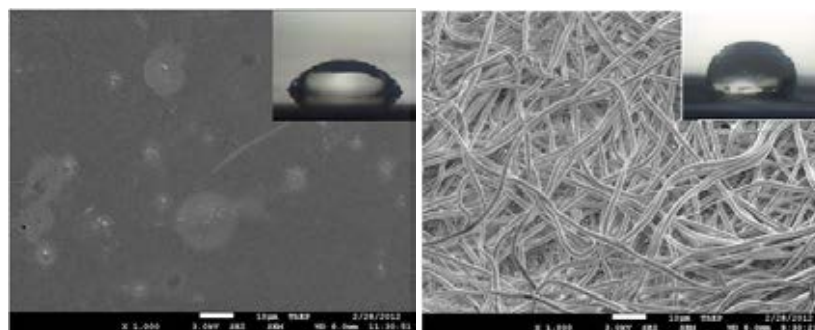
4.2 การปรับปรุงสมบัติไม่ชอบน้ำ

จากการศึกษางานวิจัยที่มีการปรับปรุงสมบัติไม่ชอบน้ำ พบว่าการปรับปรุงสมบัติดังกล่าวขึ้นอยู่กับปัจจัยด้านลักษณะทางกายภาพของพื้นผิววัสดุ และปัจจัยด้านองค์ประกอบทางเคมีของพื้นผิววัสดุ ในงานวิจัยนี้ได้มีความพยายามที่จะนำปัจจัยดังกล่าวมาใช้ในการปรับปรุงแผ่นเส้นใยพอลิแล็กติกแอซิดเพื่อให้มีสมบัติไม่ชอบน้ำยิ่งยวด โดยเตรียมแผ่นเส้นใยจากเทคนิคอิเล็กโทรสปินนิงเพื่อให้เกิดความขรุขระบนผิวแผ่นเส้นใยและนำไปอาบพลาสมาเพื่อให้เกิดหมู่ฟังก์ชันที่ไม่ชอบน้ำบนผิวแผ่นเส้นใย

4.2.1 ความขรุขระของแผ่นเส้นใยพอลิแล็กติกแอซิด

Cassie-Baxter เสนอว่าน้ำจะสามารถสัมผัสกับผิวของวัสดุที่มีความขรุขระได้น้อยกว่าผิวของวัสดุที่เรียบกว่า เนื่องจากมีอากาศแทรกอยู่บริเวณผิวที่มีความขรุขระนั้น [5, 35, 69] ดังนั้นในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยจึงได้เปรียบเทียบสมบัติไม่ชอบน้ำของฟิล์มพอลิแล็กติกแอซิดที่มีผิวเรียบและแผ่นเส้นใยพอลิแล็กติกแอซิดที่มีความขรุขระ ดังภาพที่ 4.4 พบว่าค่ามุมสัมผัสของน้ำกับฟิล์ม ($\theta = 56^\circ$) มีค่าน้อยกว่าค่ามุมสัมผัสของน้ำกับแผ่นเส้นใย ($\theta = 118^\circ$) แสดงว่าแผ่นเส้นใยมีสมบัติไม่ชอบน้ำสูงกว่า เนื่องจากว่าผิวของแผ่นเส้นใยมีความขรุขระ จึงเกิดช่องว่างระหว่างความขรุขระนั้น ทำให้อากาศสามารถแทรกตัวอยู่ระหว่างช่องว่าง น้ำจึงสามารถสัมผัสกับผิวของแผ่นเส้นใยได้น้อยลง [10] ในขณะที่ฟิล์มมีผิวเรียบน้ำจึงยึดเกาะบนพื้นผิวของฟิล์ม ทำให้เกิดการเปียกผิวได้ดี

[9, 69] ด้วยเหตุนี้จึงทำให้ผู้วิจัยเลือกแผ่นเส้นใยพอลิแล็กติกแอซิดมาปรับปรุงสมบัติไม่ชอบน้ำ แทนการเลือกใช้ฟิล์มพอลิแล็กติกแอซิด



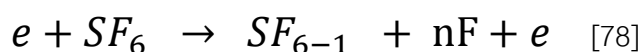
(ก)

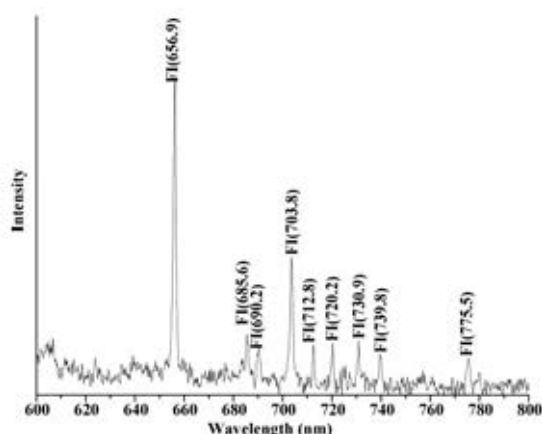
(ข)

ภาพที่ 4.4 ภาพถ่ายจากเทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดกำลังขยายสูงของ (ก) ฝิวฟิล์มพอลิแล็กติกแอซิด และ(ข) ฝิวของแผ่นเส้นใยที่เตรียมจากเทคนิคอิเล็กโทรสปินนิงโดยใช้ค่าความเข้มข้นของสารละลายพอลิแล็กติกแอซิดที่ 10 wt% ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าคงที่ที่ 15 kV อัตราการฉีดสารละลายคงที่ที่ 0.6 mL/h และระยะห่างระหว่างปลายเข็มจนถึงวัสดุรองรับ 20 cm

4.2.2 องค์ประกอบทางเคมีที่เกิดขึ้นจากกระบวนการอาบพลาสมาด้วยแก๊สซัลเฟอร์เฮกซะฟลูออไรด์

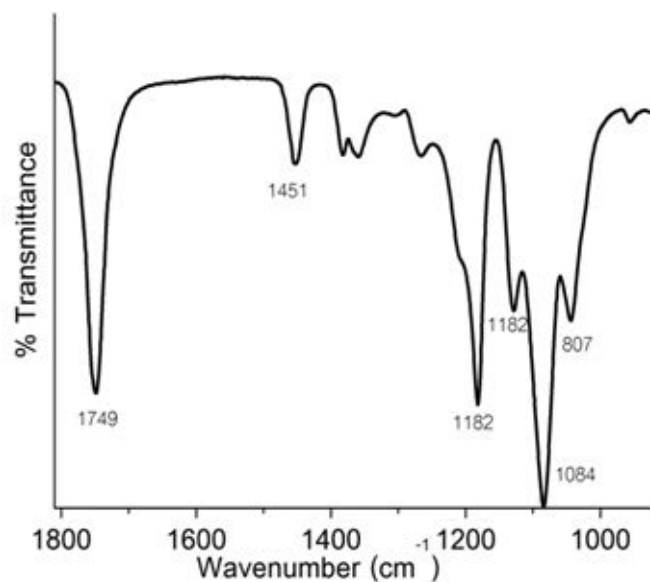
ในกระบวนการอาบพลาสมาจะทำให้แก๊สซัลเฟอร์เฮกซะฟลูออไรด์เกิดการแตกตัวและปลดปล่อยแสงที่มีความยาวคลื่นเฉพาะ จึงใช้เทคนิคออปติคอลลิมิซชันสเปกโทรสโกปีเพื่อตรวจจับแสงที่เกิดขึ้นในกระบวนการอาบพลาสมา จาก**ภาพที่ 4.5** แสดงสเปกตรัมที่ได้จากเทคนิคออปติคอลลิมิซชันสเปกโทรสโกปีซึ่งใช้ตรวจวัดชนิดของอนุภาคที่เกิดขึ้นในกระบวนการอาบพลาสมาของแก๊สซัลเฟอร์เฮกซะฟลูออไรด์ เมื่อนำสเปกตรัมที่ได้จากเทคนิคออปติคอลลิมิซชันสเปกโทรสโกปีเปรียบเทียบกับฐานข้อมูล (Atomic spectra database) จาก NIST Atomic Spectra Database [80] พบว่ามีสเปกตรัมของ F I (excited fluorine) จึงยืนยันได้ว่าในกระบวนการอาบพลาสมามีการแตกตัวของแก๊สซัลเฟอร์เฮกซะฟลูออไรด์และเกิดอนุภาคของฟลูออรีนที่อยู่ในสถานะที่ว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยา (actived fluorine)



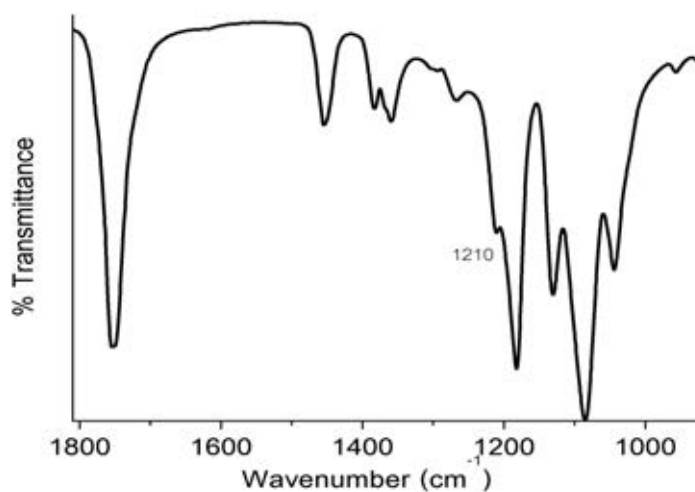


ภาพที่ 4.5 สเปกตรัมของสเปกตรัมที่พบในกระบวนการอาบพลาสมาของแก๊สซัลเฟอร์เฮกซะฟลูออไรด์ที่ได้จากเทคนิคออปติคอลมิสชันสเปกโทรสโกปี

ผู้วิจัยคาดว่าฟลูออรีนที่อยู่ในสภาวะว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยาซึ่งพร้อมที่จะเกิดการสร้างพันธะกับอะตอมบนผิวชิ้นงาน [99] จึงได้นำแผ่นเส้นใยพอลิแล็กติกแอซิดมาตรวจสอบว่ามีหมู่ฟังก์ชันใหม่ที่เกิดขึ้นหลังจากอาบพลาสมาด้วยเทคนิคเทคนิคเอทเทนนูเอตีดโททัลรีเฟลกชันฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปีหรือไม่ ภาพที่ 4.6 แสดงอินฟราเรดสเปกตรัมของเส้นใยพอลิแล็กติกแอซิดทั้งที่ผ่านและไม่ผ่านกระบวนการอาบพลาสมา จากอินฟราเรดสเปกตรัมของแผ่นเส้นใยที่ไม่ผ่านการอาบพลาสมา พบว่ามีพีคของการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดที่เลขคลื่นต่างๆ ดังตารางที่ 4.2 แสดงถึง C-C stretching, -OH bending, C-O-C antisym stretching, C-O stretching, CH₃ bending, และ C=O stretching [2, 100-102] ซึ่งเป็นหมู่ฟังก์ชันในโครงสร้างของพอลิแล็กติกแอซิดและจากแผ่นเส้นใยที่อาบพลาสมาด้วยแก๊สซัลเฟอร์เฮกซะฟลูออไรด์ พบเห็นพีคที่เลขคลื่น 1210 cm⁻¹ เกิดการเปลี่ยนแปลงซึ่งแสดงถึง C-F stretching [2] แต่การเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นในเทคนิคนี้ยังไม่มีความชัดเจนนักเนื่องจากการปรับปรุงสมบัติของชิ้นงานด้วยพลาสมาจะเกิดขึ้นเฉพาะบริเวณผิวแต่ไม่ส่งผลต่อสมบัติโดยรวมที่ลึกลงในเนื้อของชิ้นงาน จึงได้นำแผ่นเส้นใยพอลิแล็กติกแอซิดที่อาบพลาสมาไปวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีที่เกิดขึ้นบริเวณพื้นผิวด้วยเทคนิคเอกซ์-เรย์โฟโตอิเล็กตรอนสเปกโทรสโกปี



(ก)



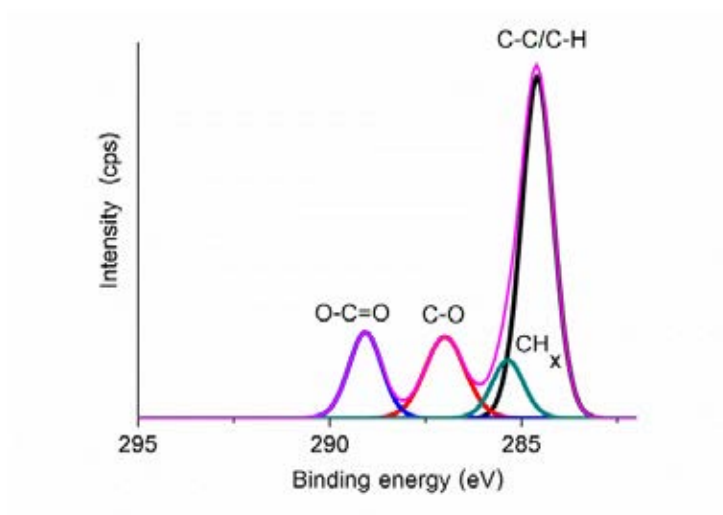
(ข)

ภาพที่ 4.6 สเปกตรัมจากเทคนิคแอมเพนนูเอตดิฟเฟอเรนเชียลเฟล็กชันฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรด สเปกโทรสโกปีของการดูดกลืนอินฟราเรดของแผ่นเส้นใยพอลิแล็กติกแอซิด (ก) ที่ไม่ได้ผ่านการอบพลาสติกและ (ข) ออบพลาสติกของแก๊สซัลเฟอร์เฮกซะฟลูออไรด์ (กำลังวัตต์ 50 W, เวลาในการอบพลาสติก 300 sec, ความดัน 0.5 torr)

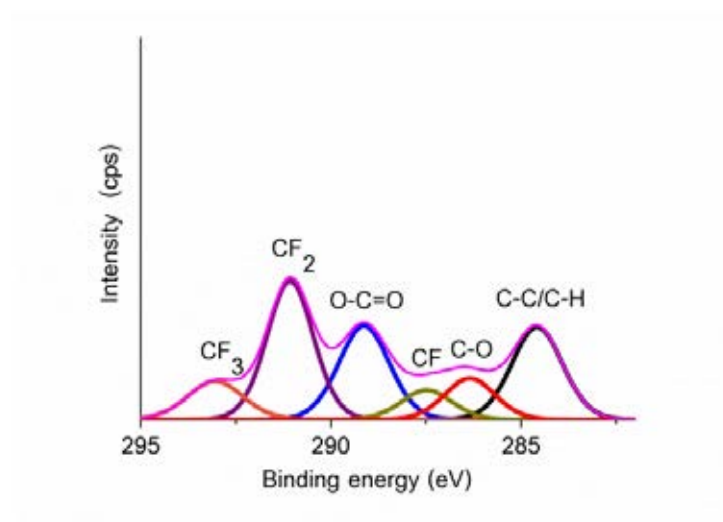
ตารางที่ 4.2 หมู่ฟังก์ชันบนแผ่นเส้นใยพอลิแล็กติกแอซิดก่อนและหลังอาบพลาสมา

เลขคลื่น (cm^{-1})	หมู่ฟังก์ชัน
807	C-C stretching
1084	-OH bending
1128	C-O-C antisym stretching
1182	C-O stretching
1451	-CH ₃ bending
1749	C=O stretching
1210	-C-F stretching

จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคเอกซ์-เรย์โฟโตอิเล็กตรอนสเปกโทรสโกปีของแผ่นเส้นใยพอลิแล็กติกแอซิด พบว่ามีสเปกตรัมเกิดขึ้นดังนี้ ค่าพลังงานยึดเหนี่ยวของอิเล็กตรอน (binding energy) ที่ 284.6 eV, 285.3 eV, 286.9 eV, และ 289.1 eV, ซึ่งแสดงถึงพันธะ C-C/C-H [89, 103], -CH_x [8], C-O [82, 103], และ O-C=O [82, 103] ตามลำดับ ดังในภาพที่ 4.7 (ก) ซึ่งเป็นพันธะที่อยู่ในโครงสร้างของพอลิแล็กติกแอซิด และมีค่าพลังงานพื้นผิว 75 mN/m เมื่อนำแผ่นเส้นใยมาอาบพลาสมาของแก๊สซัลเฟอร์เฮกซะฟลูออไรด์ จะพบว่ามี CF (287.5 eV), CF₂ (291.1 eV), และ CF₃ (293.1 eV) เกิดขึ้น (ภาพที่ 4.7 (ข)) ในขณะที่ปริมาณของหมู่ฟังก์ชัน C-C/C-H ลดลงจาก 57.6% เหลือเพียง 21.8-28.3% และปริมาณของหมู่ฟังก์ชัน C-O ลดลงจาก 17.4% เหลือเพียง 9.7-21.1% (ตารางที่ 4.3) จึงยืนยันได้ว่าอนุภาคของฟลูออรีนที่เกิดจากการแตกตัวของแก๊สซัลเฟอร์เฮกซะฟลูออไรด์ในกระบวนการอาบพลาสมาจะเกิดการสร้างพันธะกับบางส่วนของอะตอมของคาร์บอนที่เป็นโครงสร้างหลักของเส้นใยพอลิแล็กติกแอซิดแทนที่อะตอมของไฮโดรเจนและออกซิเจน ผลดังกล่าวนี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Selli และคณะ [7] รวมถึงงานวิจัยของ Kamlangkla และคณะ [86] ดังนั้นการเพิ่มขึ้นของ CF, CF₂, และ CF₃ ซึ่งเป็นหมู่ฟังก์ชันที่ไม่ชอบน้ำ (hydrophobic functional groups) ในขณะที่ C-O ที่เป็นหมู่ฟังก์ชันที่มีสมบัติชอบน้ำ (hydrophilic functional groups) กลับลดลง [85, 103] จึงทำให้หมู่ฟังก์ชันที่สร้างพันธะไฮโดรเจนกับโมเลกุลของน้ำบนเส้นใยพอลิแล็กติกแอซิดมีปริมาณลดลง เป็นผลให้สมบัติไม่ชอบน้ำสูงขึ้น [86, 104]



(ก)



(ข)

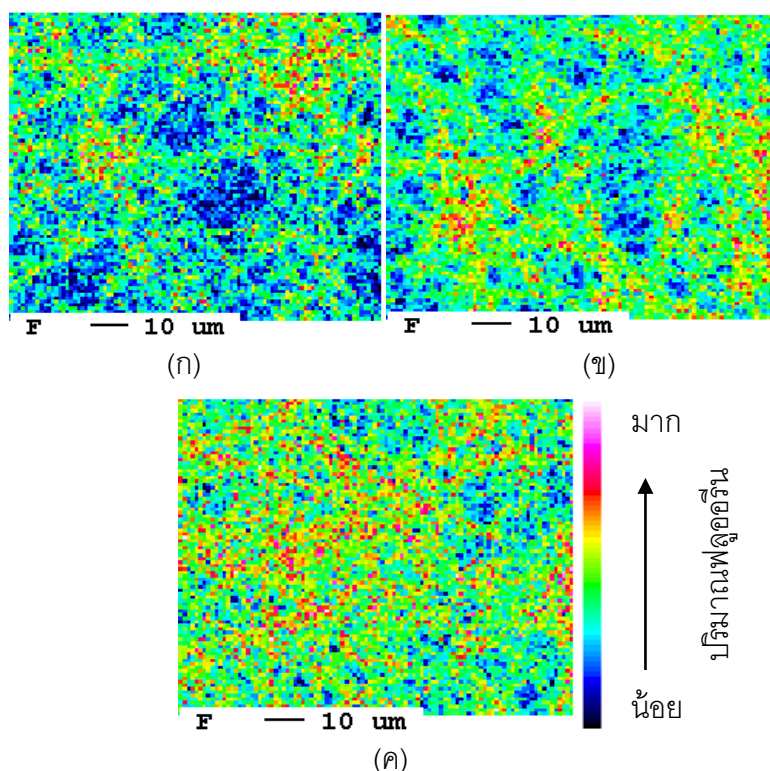
ภาพที่ 4.7 สเปกตรัมจากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคเอกซ์-เรย์โฟโตอิเล็กตรอนสเปกโทรสโกปีของแผ่นเส้นใยพอลิแล็กติกแอซิด (ก) ไม่ได้อบพลาสมา (ข) อบพลาสมาของแก๊สซัลเฟอร์เฮกซะฟลูออไรด์

ตารางที่ 4.3 ปริมาณของหมู่ฟังก์ชันที่อยู่บนแผ่นเส้นใยพอลิแล็กติกแอซิดที่ได้จากเทคนิคเอกซ์เรย์โฟโตอิเล็กตรอนสเปกโทรสโกปี

หมู่ฟังก์ชัน	ปริมาณหมู่ฟังก์ชันบนแผ่นเส้นใยพอลิแล็กติกแอซิด (%)			
	ไม่ได้อบพลาสติก	อบพลาสติกที่กำลังวัตต์ (W) *		
		20	35	50
CH _x	9.9	0	0	0
C-C/C-H	57.6	9.9-28.3	18.6-27.0	21.8-27.2
C-O	17.4	15.6-20.2	11.4-22.7	9.7-21.1
O-C=O	15.1	19.6-26.0	23.8-27.5	22-26.0
CF	0	0	0	6.9
CF ₂	0	24.3-28.6	22.1-24.7	21.5-29.8
CF ₃	0	6.8-22.2	6.5-10.2	6.4-9.9

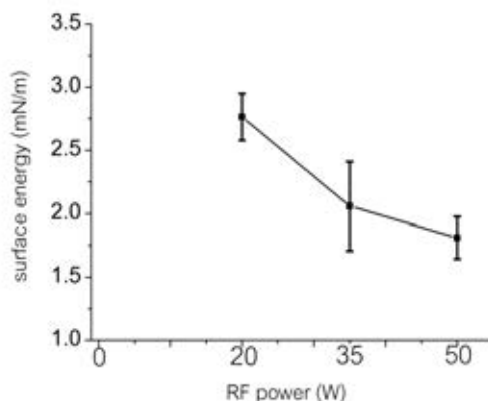
*อบพลาสติกของแก๊สซัลเฟอร์เฮกซะฟลูออไรด์ที่เวลาในการอบพลาสติก 300 s, และความดัน 0.5 torr

เมื่อมีการปรับเปลี่ยนกำลังวัตต์ของเครื่องกำเนิดสัญญาณความถี่คลื่นวิทยุ (RF power) ที่ 20 W, 35 W, และ 50 W ในกระบวนการอบพลาสติกของพอลิแล็กติกแอซิดด้วยแก๊สซัลเฟอร์เฮกซะฟลูออไรด์ พบว่าอะตอมของฟลูออรีนมีการกระจายตัวบนแผ่นเส้นใยพอลิแล็กติกแอซิดโดยที่แต่ละตำแหน่งของเส้นใยจะมีปริมาณของอะตอมฟลูออรีนแตกต่างกัน ซึ่งจะเห็นได้จากสีที่แสดงในแผนภาพจากอิเล็กตรอนโพรบไมโครนาลิซิส (ภาพที่ 4.8) กล่าวคือสีดำแสดงว่าไม่มีอะตอมของฟลูออรีนในบริเวณนั้น ส่วนสีน้ำเงินจะแสดงว่ามีอะตอมฟลูออรีนอยู่ในบริเวณนั้นน้อยมาก และปริมาณอะตอมฟลูออรีนจะมากขึ้นตามแถบสีที่แสดงไว้ จนถึงสีชมพูซึ่งแสดงว่ามีอะตอมฟลูออรีนในบริเวณนั้นมาก ผลที่ได้พบว่าเมื่อกำลังวัตต์เพิ่มขึ้นจะทำให้อนุภาคของแก๊สเกิดการแตกตัวมากขึ้น [70, 88, 89] ความหนาแน่นของฟลูออรีนที่อยู่ในสภาวะกระตุ้น (excited fluorine) จึงสูงขึ้น ซึ่งจะเพิ่มโอกาสให้ฟลูออรีนเกิดการสร้างพันธะกับอะตอมคาร์บอนของเส้นใย [105] ทำให้พบเห็นว่ามีมีการกระจายตัวของอะตอมฟลูออรีนบนแผ่นเส้นใยมากขึ้นดังภาพที่ 4.8 (ค) แต่การใช้กำลังวัตต์ที่มีค่าต่ำ แก๊สจะเกิดการแตกตัวได้น้อย ปริมาณฟลูออรีนที่เกิดการสร้างพันธะกับอะตอมคาร์บอนของเส้นใยจึงลดลง (ภาพที่ 4.8 (ก-ข))

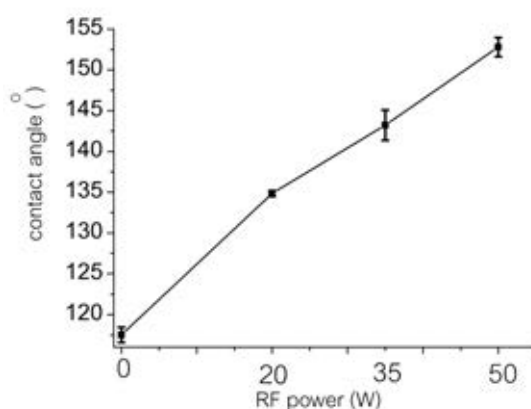


ภาพที่ 4.8 อนุภาคของฟลูออรีนบนแผ่นเส้นใยพอลิเอทิลีนเทอแรทที่อบพลาสมาของ แก๊สซัลเฟอร์เฮกซะฟลูออไรด์โดยใช้กำลังวัตต์ (ก) 20 W (ข) 35 W (ค) 50 W ที่ได้จาก เทคนิคอิเล็กตรอนโพรบไมโครนาลิซิส(เวลาในการอบพลาสมา 300 sec ความดัน 0.5 torr)

เมื่อมีปริมาณอะตอมของฟลูออรีนบนแผ่นเส้นใยพอลิเอทิลีนเทอแรทเพิ่มขึ้น จะทำให้สมบัติไม่ชอบน้ำเพิ่มขึ้น ซึ่งเห็นได้ชัดจากค่าพลังงานพื้นผิวและค่ามุมสัมผัสของน้ำบนแผ่นเส้นใยพอลิเอทิลีนเทอแรท (ภาพที่ 4.9 และภาพที่ 4.10) แผ่นเส้นใยพอลิเอทิลีนเทอแรทมีพลังงานพื้นผิวและค่ามุมสัมผัสของน้ำเป็น 75 mN/m และ 118° ตามลำดับ หลังจากนำแผ่นเส้นใยมาอบพลาสมาของแก๊สซัลเฟอร์เฮกซะฟลูออไรด์โดยเพิ่มกำลังวัตต์ พบว่าปริมาณอะตอมฟลูออรีนบนแผ่นเส้นใยเพิ่มขึ้น เป็นผลให้มีพลังงานผิวในช่วง $2.8\text{-}4.1 \text{ mN/m}$ ซึ่งเป็นระดับที่ต่ำลงมาก และค่ามุมสัมผัสของน้ำอยู่ในช่วง $135^\circ\text{-}153^\circ$ ซึ่งเป็นระดับที่สูงขึ้นมาก เนื่องจากว่าอะตอมของฟลูออรีนบนผิวแผ่นเส้นใยพอลิเอทิลีนเทอแรทที่เพิ่มขึ้นจะลดพลังงานผิวของแผ่นเส้นใย ดังภาพที่ 4.9 น้ำจึงเปียกผิวของแผ่นเส้นใยพอลิเอทิลีนเทอแรทได้น้อยลง ซึ่งสอดคล้องกับค่ามุมสัมผัสของน้ำที่เพิ่มขึ้นดังภาพที่ 4.10 ผลดังกล่าวนี้แสดงให้เห็นว่าแผ่นของเส้นใยพอลิเอทิลีนเทอแรทหลังอบพลาสมาของแก๊สซัลเฟอร์เฮกซะฟลูออไรด์จะมีสมบัติไม่ชอบน้ำเพิ่มขึ้น โดยมีกำลังวัตต์ที่ใช้ในการอบพลาสมาเป็นปัจจัยสำคัญต่อการปรับปรุงสมบัติดังกล่าว



ภาพที่ 4.9 ค่าพลังงานพื้นผิวของแผ่นพอลิแล็กติกแอซิดที่อบพลาสมาโดยใช้กำลังวัตต์ที่ 20 W-50 W (ความดัน 0.5 torr และเวลาในการอบพลาสมา 300 sec)



ภาพที่ 4.10 ค่ามุมสัมผัสของน้ำของแผ่นพอลิแล็กติกแอซิดที่อบพลาสมาโดยใช้กำลังวัตต์ที่ 20 W-50 W (ความดัน 0.5 torr และเวลาในการอบพลาสมา 300 sec)

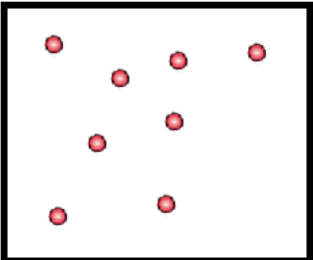
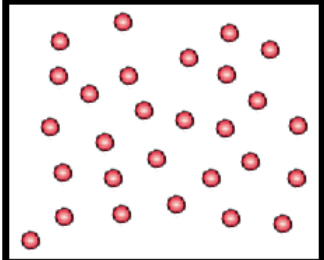
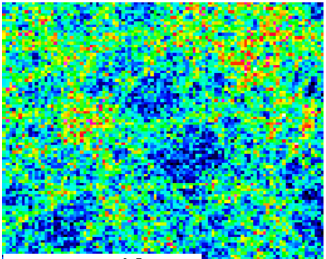
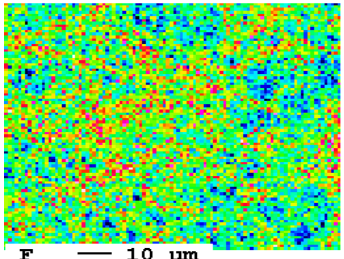
ในงานวิจัยนี้ได้มีการปรับเปลี่ยนกำลังวัตต์ให้มีค่าสูงถึง 75 W พบว่าการใช้กำลังวัตต์ในการอบพลาสมาสูงเกินไป จะทำให้เกิดการแตกตัวของแก๊สซัลเฟอร์เฮกซะฟลูออไรด์ นำไปสู่การเพิ่มความหนาแน่นของอนุภาคต่างๆ (เช่น แรดิคัล (radicals) ไอออน (ions) สปีชีส์ที่อยู่ในสถานะกระตุ้น (excited species) อิเล็กตรอน (electrons)) ที่มีความไวต่อการเกิดปฏิกิริยาเมื่อมีอนุภาคนดังกล่าวมากเกินไปจะทำให้เกิดการกัดกร่อน (etching) ผิวของแผ่นเส้นใย [6, 28, 106] และเกิดการแตกออกของพันธะ (break bond) ในโครงสร้างบนผิวของเส้นใย จึงพบว่าผิวของแผ่นเส้นใยถูกทำลายดังภาพที่ 4.11



ภาพที่ 4.11 ลักษณะแผ่นเส้นใยพอลิอิมิดิกแอซิดที่ถูกอบพลาสติกมาโดยใช้กำลังวัตต์ 75 W, ความดันคงที่ที่ 0.5 torr, และเวลาที่ใช้ในการอบพลาสติกมา 300 sec

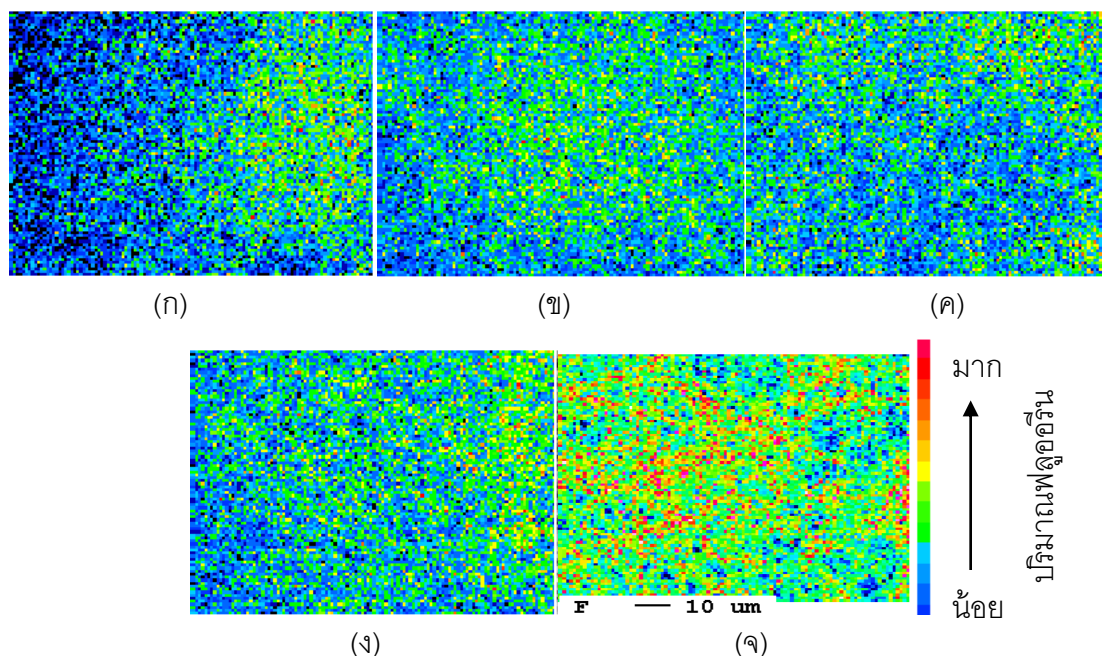
ดังนั้นในการปรับปรุงสมบัติไม่ชอบน้ำของแผ่นเส้นใยพอลิอิมิดิกแอซิดด้วยการอบพลาสติกมาของแก๊สซัลเฟอร์เฮกซะฟลูออไรด์โดยการเพิ่มกำลังวัตต์สามารถอธิบายโดยสรุปจากตารางที่ 4.4 คือเมื่อกำลังวัตต์เพิ่มขึ้นจะทำให้ความหนาแน่นของฟลูออรีนในภาชนะสุญญากาศสูงขึ้น ฟลูออรีนจึงมีโอกาสในการสร้างพันธะกับผิวของแผ่นเส้นใยได้มากขึ้น พลังงานผิวถูกลดลงและค่ามุมสัมผัสของน้ำมีค่าสูงขึ้น

ตารางที่ 4.4 การปรับปรุงสมบัติไม่ชอบน้ำของแผ่นเส้นใยพอลิแล็กติกแอซิดโดยการเพิ่มกำลังวัตต์

	กำลังวัตต์* (W)	
	20	50
ความหนาแน่นของฟลูออรีน		
แผนภาพจากเทคนิคอิเล็กตรอนโพรบไมโครอนาลิซิส		
พลังงานพื้นผิว (mN/m)	1.8	4.1
ค่ามุมสัมผัสของน้ำ (°)	122	153

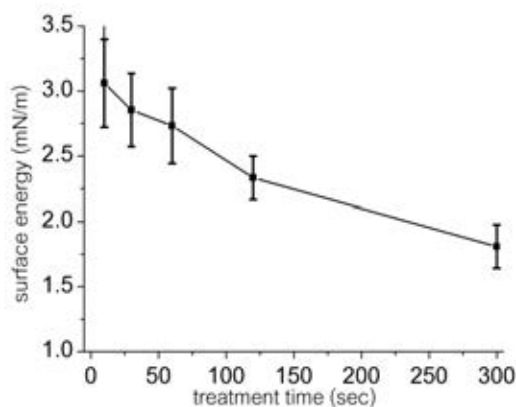
*อาบพลาสมาของแก๊สซัลเฟอร์เฮกซะฟลูออไรด์ที่เวลาในการอาบพลาสมา 300 s, และความดัน 0.5 torr

เมื่อมีการปรับเปลี่ยนเวลาที่ใช้ในการอาบพลาสมาที่ 10 sec, 30 sec, 60 sec, 120 sec และ 300 sec ในกระบวนการอาบพลาสมาของพอลิแล็กติกแอซิดด้วยแก๊สซัลเฟอร์เฮกซะฟลูออไรด์ ผลที่ได้จากแผนภาพของอิเล็กตรอนโพรบไมโครอนาลิซิส (ภาพที่ 4.12) พบว่าการใช้เวลาในการอาบพลาสมาต่ำมากๆ (10 sec) จะพบเห็นทั้งจุดสีดำซึ่งแสดงว่าไม่มีฟลูออรีนอยู่บนบริเวณนั้นของแผ่นเส้นใย และมีจุดสีน้ำเงินจำนวนมากแสดงว่ามีฟลูออรีนอยู่ในบริเวณนั้นน้อยมากเช่นกัน แต่เมื่อเวลาที่ใช้ในการอาบพลาสมาเพิ่มขึ้น (30 sec, 60 sec, และ 120 sec) จะทำให้อุณหภูมิของแก๊สเกิดการแตกตัวมากขึ้น ความหนาแน่นของฟลูออรีนที่อยู่ในสภาวะกระตุ้น (excited fluorine) จึงสูงขึ้น [87] ซึ่งจะเพิ่มโอกาสให้ฟลูออรีนเกิดการสร้างพันธะกับอะตอมคาร์บอนของเส้นใย [106] ทำให้พบเห็นว่ามีกระจายตัวของอะตอมฟลูออรีนบนแผ่นเส้นใยมากขึ้น โดยจะมีปริมาณฟลูออรีนสูงขึ้นอย่างเห็นได้ชัดเมื่อเพิ่มเวลาในการอาบพลาสมาเป็น 300 sec

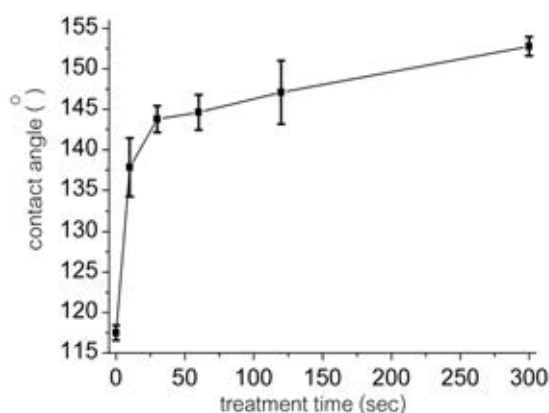


ภาพที่ 4.12 อนุภาคของฟลูออรีนบนแผ่นเส้นใยพอลิแล็กติกแอซิดที่อาบพลาสมาของแก๊สซัลเฟอร์เฮกซะฟลูออไรด์โดยใช้เวลาในการอาบพลาสมา (ก) 10 sec, (ข) 30 sec, (ค) 60 sec, (ง) 120 sec, และ (จ) 300 sec (กำลังวัตต์ 50 W ความดัน 0.5 torr) จากเทคนิคอิเล็กตรอนโพรบไมโครนาลิซิส

เมื่อมีปริมาณอะตอมของฟลูออรีนบนแผ่นเส้นใยพอลิแล็กติกแอซิดเพิ่มขึ้น จะทำให้สมบัติไม่ชอบน้ำเพิ่มขึ้น ซึ่งเห็นได้ชัดเจนจากค่าพลังงานพื้นผิวและค่ามุมสัมผัสของน้ำบนแผ่นเส้นใยพอลิแล็กติกแอซิด (**ภาพที่ 4.13 และภาพที่ 4.14**) แผ่นเส้นใยพอลิแล็กติกแอซิดมีพลังงานพื้นผิวและค่ามุมสัมผัสของน้ำเป็น 75 mN/m และ 118° ตามลำดับ หลังจากนำแผ่นเส้นใยมาอบพลาสมาของแก๊สซัลเฟอร์เฮกซะฟลูออไรด์โดยเพิ่มเวลาที่ใช้ในการอาบพลาสมาพบว่าปริมาณอะตอมฟลูออรีนบนแผ่นเส้นใยเพิ่มขึ้น เป็นผลให้มีพลังงานผิวในช่วง 1.8-3.1 mN/m ซึ่งเป็นระดับที่ต่ำลงมากและค่ามุมสัมผัสของน้ำอยู่ในช่วง 138-153° ซึ่งเป็นระดับที่สูงขึ้นมาก เนื่องจากว่าอะตอมของฟลูออรีนบนผิวแผ่นเส้นใยพอลิแล็กติกแอซิดที่เพิ่มขึ้นจะลดพลังงานผิวของแผ่นเส้นใยดัง**ภาพที่ 4.13** น้ำจึงเปียกผิวของแผ่นเส้นใยพอลิแล็กติกแอซิดได้น้อยลง ซึ่งสอดคล้องกับค่ามุมสัมผัสของน้ำที่เพิ่มขึ้นดัง**ภาพที่ 4.14** ผลดังกล่าวนี้แสดงให้เห็นว่าแผ่นของเส้นใยพอลิแล็กติกแอซิดหลังอาบพลาสมาของแก๊สซัลเฟอร์เฮกซะฟลูออไรด์จะมีสมบัติไม่ชอบน้ำเพิ่มขึ้น โดยมีเวลาที่ใช้ในการอาบพลาสมาเป็นปัจจัยสำคัญต่อการปรับปรุงสมบัติดังกล่าว

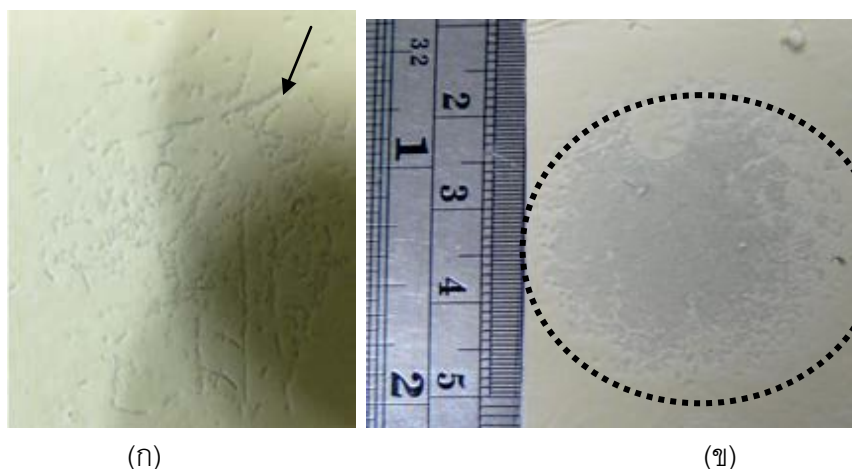


ภาพที่ 4.13 ค่าพลังงานพื้นผิวของแผ่นพอลิแล็กติกแอซิดที่อบพลาสติกโดยใช้เวลาในการอบพลาสติกที่ 0 sec-300 sec (ความดัน 0.5 torr และกำลังวัตต์ 50 W)



ภาพที่ 4.14 ค่ามุมสัมผัสของน้ำของแผ่นพอลิแล็กติกแอซิดที่อบพลาสติกโดยใช้เวลาในการอบพลาสติกที่ 0 sec-300 sec (ความดัน 0.5 torr และกำลังวัตต์ 50 W)

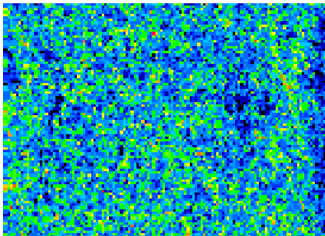
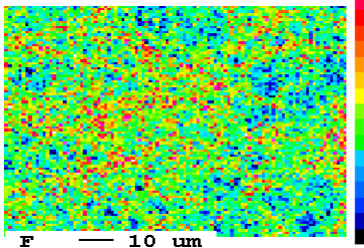
ในงานวิจัยนี้ได้มีการปรับเปลี่ยนเวลาที่ใช้ในการอบพลาสติกให้มีค่าสูงถึง 480 sec และ 600 sec พบว่าการใช้เวลาในการอบพลาสติกสูงเกินไป จะทำให้เพิ่มความหนาแน่นของอนุภาคต่างๆ (เช่น แรดิคัล ไอออน สปีชีส์ที่อยู่ในสถานะกระตุ้น อิเล็กตรอน) ที่มีความไวต่อการเกิดปฏิกิริยา เมื่อมีอนุภาคนดังกล่าวมากเกินไปจะทำให้เกิดการกัดกร่อน ผิวของแผ่นเส้นใย [6, 28, 106] และเกิดการแตกของพันธะ (break bond) บนโครงสร้างของแผ่นเส้นใยพอลิแล็กติกแอซิด จึงพบว่าผิวของแผ่นเส้นใยถูกทำลายดังภาพที่ 4.15




ภาพที่ 4.15 ลักษณะของแผ่นเส้นใยที่ถูกอบพลาสมาโดยใช้เวลาในการอบพลาสมา
(ก) 480 sec (ข) 600 sec (ความดัน 0.5 torr และกำลังวัตต์ 50 W)

นอกจากเทคนิคอิเล็กโตรสปินนิงจะสามารถเตรียมผิวแผ่นเส้นใยให้มีความขรุขระแล้วยังสามารถทำให้แผ่นเส้นใยมีพื้นที่ผิวสูงมากเมื่อเทียบกับฟิล์มที่มีผิวเรียบ ทำให้ปริมาณฟลูออรีนบนผิวแผ่นเส้นใยหลังอบพลาสมาสูงกว่าฟิล์ม และมีค่ามุมสัมผัสของน้ำจึงสูงกว่าด้วยดังตารางที่ 4.5 ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Deitzel และคณะ [72] ที่รายงานว่าเส้นใยที่มีขนาดเล็กจะมีพื้นที่ผิวเฉพาะที่จะเกิดปฏิกิริยาทางเคมี (specific surface chemistry) สูง จึงทำให้มีปริมาณของฟลูออรีนบนผิวเส้นใยสูงกว่าฟิล์ม

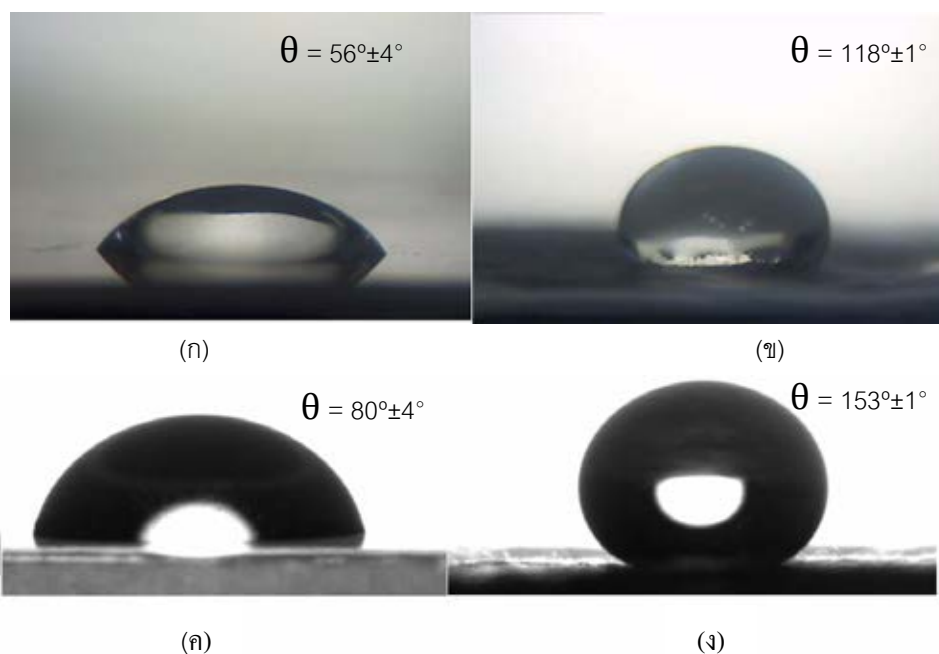
ตารางที่ 4.5 สมบัติของฟิล์มและแผ่นเส้นใยพอลิแล็กติกติกแอซิด

	ฟิล์ม	แผ่นเส้นใย
พื้นที่ผิว (m^2/g)	0.2	3.2
อะตอมของฟลูออรีนบนผิว*		
ค่ามุมสัมผัสของน้ำ ($^\circ$)*	80	153

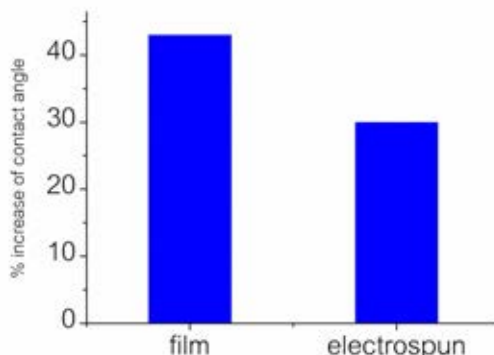

 มาก
 ↑
 ปริมาณฟลูออรีน
 ↓
 น้อย

*อบพลาสมาด้วยแก๊สซัลเฟอร์เฮกซะฟลูออไรด์ที่ความดัน 0.5 torr, เวลาที่ใช้ในการอบพลาสมา 300 sec, และกำลังวัตต์ 50 W

แต่เมื่อพิจารณาถึงการเพิ่มขึ้นของค่ามุมสัมผัสของน้ำ พบว่ามุมสัมผัสของน้ำบนฟิล์มที่อาบพลาสมามีค่าเพิ่มขึ้นจาก 56° (ภาพที่ 4.16 (ก)) เป็น 80° (ภาพที่ 4.16 (ค)) ซึ่งค่ามุมสัมผัสของน้ำที่เพิ่มขึ้นคิดเป็น 43 % (ภาพที่ 4.17) ในขณะที่มุมสัมผัสของน้ำบนแผ่นเส้นใยที่อาบพลาสมามีค่าเพิ่มขึ้นจาก 118° (ภาพที่ 4.16 (ข)) เป็น 153° (ภาพที่ 4.16 (ง)) ซึ่งค่ามุมสัมผัสของน้ำที่เพิ่มขึ้นคิดเป็น 30 % (ภาพที่ 4.17) แสดงว่าการปรับปรุงสมบัติไม่ชอบน้ำของแผ่นเส้นใยที่มีค่ามุมสัมผัสสูงขึ้นจากเดิมซึ่งมีค่าสูงอยู่แล้วให้มีค่าสูงเพิ่มขึ้นอีก ทำได้ยากขึ้นแม้ว่าจะเพิ่มปริมาณฟลูออรีนให้สูงขึ้นก็ตาม ดังนั้นการปรับปรุงสมบัติไม่ชอบน้ำของแผ่นเส้นใยจึงเกิดจากอิทธิพลจากปัจจัยด้านความขรุขระเป็นปัจจัยสำคัญ ซึ่งเห็นได้จากการที่แผ่นเส้นใยที่ไม่ผ่านการอาบพลาสมามีค่ามุมสัมผัสสูงกว่าฟิล์มทั้งที่ไม่ได้อาบและอาบพลาสมา และมียปัจจัยด้านองค์ประกอบทางเคมีที่เกิดขึ้นหลังจากอาบพลาสมาเป็นปัจจัยที่ช่วยส่งเสริมให้มีสมบัติไม่ชอบน้ำเพิ่มสูงขึ้นจากเดิม จนมีสมบัติไม่ชอบน้ำยิ่งยวดเกิดขึ้น

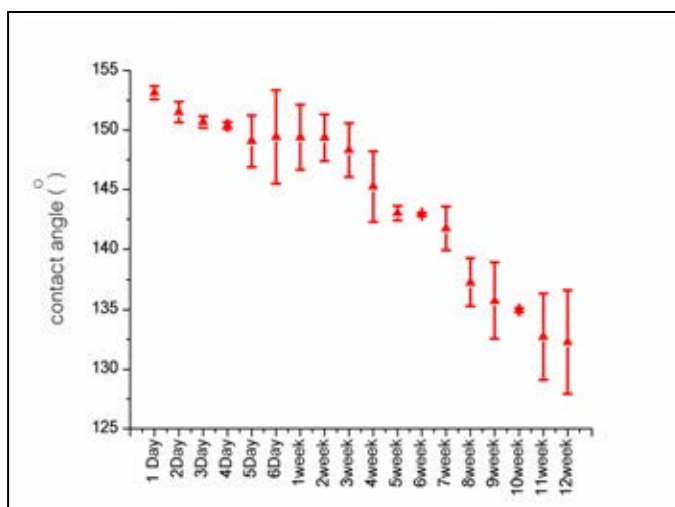


ภาพที่ 4.16 ลักษณะของการเปียกผิวของน้ำและค่ามุมสัมผัสของน้ำ (ก) บนแผ่นฟิล์มและ (ข) บนแผ่นเส้นใยพอลิเอทิลีนทเรอติกแอซิดก่อนอาบพลาสมา (ค) บนแผ่นฟิล์มและ (ง) บนแผ่นเส้นใยพอลิเอทิลีนทเรอติกแอซิดหลังอาบพลาสมาที่เวลาในการอาบพลาสมา 300 sec โดยใช้กำลังวัตต์ 50 W และความดันคงที่ที่ 0.5 torr



ภาพที่ 4.17 เปรียบเทียบการเพิ่มขึ้นของค่ามุมสัมผัสของน้ำระหว่างฟิล์มและแผ่นเส้นใยพอลิแล็กติกแอซิดหลังอบพลาสมาที่เวลาในการอบพลาสมา 300 sec กำลังวัตต์ที่ 50 W และความดัน 0.5 torr



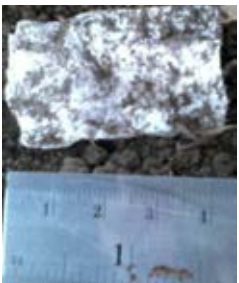



นอกจากนี้ยังพบว่าแผ่นเส้นใยที่ถูกอบพลาสมาและมีค่ามุมสัมผัสของน้ำเป็น 153° เมื่อเก็บไว้เป็นระยะเวลา 3 เดือนพบว่าค่ามุมสัมผัสของน้ำลดลงจาก 153° เป็น 132° ซึ่งแผ่นเส้นใยยังคงมีสมบัติไม่ชอบน้ำอยู่ (ภาพที่ 4.19) แต่การลดลงของค่ามุมสัมผัสของน้ำเมื่อเก็บเป็นระยะเวลานาน เนื่องจากสายโซ่โมเลกุลบนผิวเกิดการเคลื่อนไหวได้ง่ายมาก ทำให้หมู่ฟังก์ชันของ C-F บนผิวซ่อนตัวลงในเส้นใย


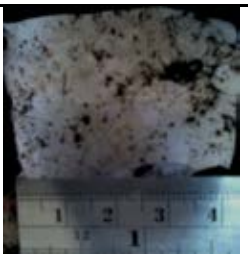
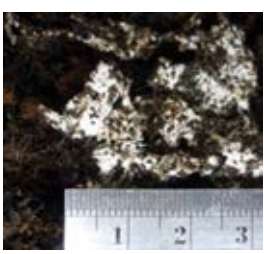

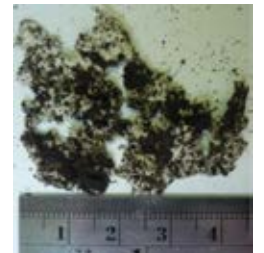
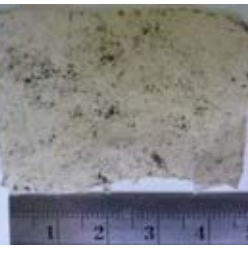


ภาพที่ 4.18 ค่ามุมสัมผัสของน้ำกับแผ่นเส้นใยที่อบพลาสมาของแก๊สซัลเฟอร์เฮกซะฟลูออไรด์ในระยะเวลา 3 เดือน

พอลิแล็กติกแอซิดเป็นพอลิเมอร์ที่ย่อยสลายได้ตามธรรมชาติ ในงานวิจัยนี้จึงนำแผ่นเส้นใยที่ปรับปรุงสมบัติไม่ชอบน้ำมาศึกษาสมบัติการย่อยสลาย จากการทำการทดลองเบื้องต้นโดยนำแผ่นเส้นใยที่ถูกอบพลาสติกมาฝังดิน และสังเกตการณ์เปลี่ยนแปลงทั้งขนาดและลักษณะของแผ่นเส้นใยที่ถูกอบพลาสติกซึ่งจะเปรียบเทียบกับแผ่นเส้นใยที่ไม่ได้อบพลาสติก พบว่าในช่วง 1-2 เดือนแรก แผ่นเส้นใยทั้งที่ไม่ได้อบและอบพลาสติกจะไม่พบการเปลี่ยนแปลง แต่เมื่อฝังดินเป็นระยะเวลา 3 เดือน แผ่นเส้นใยที่ไม่ได้อบพลาสติกจะเกิดการสลายตัวไปบางส่วน และการสลายตัวจะเกิดขึ้นอย่างเห็นได้ชัดในเดือนที่ 4 และ 5 ในขณะที่ขนาดและลักษณะของแผ่นเส้นใยที่ถูกอบพลาสติกเกิดการเปลี่ยนแปลงน้อยมากแม้ว่าจะถูกฝังดินเป็นระยะเวลา 5 เดือน เนื่องจากความชื้นเป็นปัจจัยหนึ่งที่ทำให้เกิดการย่อยสลาย ดังนั้นแผ่นเส้นใยที่ถูกรับปรุงสมบัติไม่ชอบน้ำจึงต้องใช้เวลานานขึ้นเพื่อให้เกิดการย่อยสลาย แต่ทั้งนี้ยังมีปัจจัยด้านอื่นๆ อีกที่ยังช่วยให้เกิดการย่อยสลาย คือการใช้แสงยูวีรวมถึงการย่อยสลายด้วยจุลินทรีย์ในสภาวะที่เหมาะสม ซึ่งจะก่อให้เกิดการย่อยสลายของชิ้นงานได้ดังตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 การย่อยสลายด้วยวิธีการฝังดิน

ระยะเวลา(เดือน)	แผ่นเส้นใยที่ไม่ได้อบพลาสติก	แผ่นเส้นใยที่อบพลาสติก*
0 (เริ่มต้น)		
1		
2		

ระยะเวลา(เดือน)	แผ่นเส้นใยที่ไม่ได้อบพลาสติก	แผ่นเส้นใยที่อบพลาสติก*
3		
4		
5		

*อบพลาสติกด้วยแก๊สซัลเฟอร์เฮกซะฟลูออไรด์ที่ความดัน 0.5 torr, เวลาที่ใช้ในการอบพลาสติก 300 sec, และกำลังวัตต์ 50 W

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

ในงานวิจัยนี้ได้นำปรากฏการณ์น้ำกลิ้งบนใบบัวมาเป็นต้นแบบในการปรับปรุงสมบัติไม่ชอบน้ำของพอลิแล็กติกแอซิด โดยการขึ้นรูปเส้นใยด้วยเทคนิคอิเล็กโตรสปินนิงทำให้ได้เส้นใยขนาดระดับไมโครเมตร จึงเกิดความขรุขระระดับไมโครเมตรขึ้นบนผิว เมื่อนำแผ่นเส้นใยพอลิแล็กติกแอซิดมาอาบพลาสมาด้วยแก๊สซัลเฟอร์เฮกซะฟลูออไรด์จะทำให้อะตอมของฟลูออรีนที่มีขนาดในระดับอังสตรอมเกิดขึ้น จึงเกิดความขรุขระระดับอังสตรอมขึ้นบนเส้นใยขนาดไมโครเมตร ประกอบกับการมีฟลูออรีนที่มีสมบัติไม่ชอบน้ำบนผิว ดังนั้นการที่แผ่นเส้นใยดังกล่าวมีความขรุขระและมีองค์ประกอบทางเคมีที่มีสมบัติไม่ชอบน้ำบนผิว พื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างน้ำกับแผ่นเส้นใยจึงลดลง จึงทำให้แผ่นเส้นใยดังกล่าวมีค่ามุมสัมผัสของน้ำสูงถึง 153° ซึ่งแสดงว่ามีสมบัติไม่ชอบน้ำยิ่งยวดเกิดขึ้น

5.2 ข้อเสนอแนะ

เตรียมเส้นใยให้มีรูพรุนเกิดขึ้นบริเวณพื้นผิว เพื่อเพิ่มความขรุขระและพื้นที่ผิวให้สูงขึ้น ซึ่งอาจส่งผลให้สามารถปรับปรุงสมบัติไม่ชอบน้ำให้สูงมากขึ้น

เอกสารอ้างอิง

- [1] V. Siracusa, P. Rocculi, S. Romani, M. D. Rosa. Biodegradable polymers for food packaging: a review. *Trends in Food Science & Technology* 19 (2008): 634-643.
- [2] C. Chaiwong, P. Rachtanapun, P. Wongchaiya, R. Auras, D. Boonyawan. Effect of plasma treatment on hydrophobicity and barrier property of polylactic acid. *Surf. Coat. Technol.* 204 (2010): 2933-2939.
- [3] F. Leroux, C. Campagne, A. Perwuelz, L. Gengembre. Fluorocarbon nano-coating of polyester fabrics by atmospheric air plasma with aerosol. *Appl. Surf. Sci.* 254 (2008): 3902-3908.
- [4] M. Bertolucci, G. Galli, E. Chiellini, K. J. Wynne. Wetting behavior of films of new fluorinated styrene-siloxane block copolymers. *Macromolecules* 37 (2004): 3666-3672.
- [5] M. Miwa, A. Nakajima, A. Fujishima, K. Hashimoto, T. Watanabe. Effects of the surface roughness on sliding angles of water droplets on superhydrophobic surfaces. *Langmuir* 16 (2000): 5754-5760.
- [6] S.-H. Gao, M.-K. Lei, Y. Liu, L.-S. Wen. CF₄ radio frequency plasma surface modification of silicone rubber for use as outdoor insulations. *Appl. Surf. Sci.* 255 (2009): 6017-6023.
- [7] E. Selli, G. Mazzone, C. Oliva, F. Martini, C. Riccardi, R. Barni, B. Marcandalli, M. Massafra. Characterisation of poly(ethylene terephthalate) and cotton fibres after cold SF₆ plasma treatment. *J. Mater. Chem.* 11 (2001): 1985 - 1991.
- [8] S. Zanini, P. Massini, M. Mietta, E. Grimoldi, C. Riccardi. Plasma treatments of PET meshes for fuel-water separation applications. *J. Colloid Interface Sci.* 322 (2008): 566-571.
- [9] Y. I. Yoon, H. S. Moon, W. S. Lyoo, T. S. Lee, W. H. Park. Superhydrophobicity of PHBV fibrous surface with bead-on-string structure. *J. Colloid Interface Sci.* 320 (2008): 91-95.

- [10] M. A. Samaha, H. V. Tafreshi, M. Gad-el-Hak. Superhydrophobic surfaces: from the lotus leaf to the submarine. *Comptes Rendus Mecanique* 340 (2012): 18-34.
- [11] B. Gupta, N. Revagade, J. Hilborn. Poly(lactic acid) fiber: An overview. *Progr. Polymer Sci.* 32 (2007): 455-482.
- [12] J. R. Dorgan, H. Lehermeier, M. Mang. Thermal and rheological properties of commercial-grade Poly(Lactic Acid)s. *J. Polym. Environ.* 8 (2000): 1-9.
- [13] E.-R. Kenawy, G. L. Bowlin, K. Mansfield, J. Layman, D. G. Simpson, E. H. Sanders, G. E. Wnek. Release of tetracycline hydrochloride from electrospun poly(ethylene-co-vinylacetate), poly(lactic acid), and a blend. *J. Controlled Release* 81 (2002): 57-64.
- [14] L. T. Lim, R. Auras, M. Rubino. Processing technologies for poly(lactic acid). *Progr. Polymer Sci.* 33 (2008): 820-852.
- [15] R. M. Rasal, A. V. Janorkar, D. E. Hirt. Poly(lactic acid) modifications. *Progr. Polymer Sci.* 35 (2010): 338-356.
- [16] M. Arena, C. Abbate, K. Fukushima, M. Gennari. Degradation of poly (lactic acid) and nanocomposites by *Bacillus licheniformis*. *Environ. Sci. Pollut. Res.* 18 (2011): 865-870.
- [17] Y. Wan, C. Tu, J. Yang, J. Bei, S. Wang. Influences of ammonia plasma treatment on modifying depth and degradation of poly(L-lactide) scaffolds. *Biomaterials* 27 (2006): 2699-2704.
- [18] Y. H. Lee, J. H. Lee, I.-G. An, C. Kim, D. S. Lee, Y. K. Lee, J.-D. Nam. Electrospun dual-porosity structure and biodegradation morphology of Montmorillonite reinforced PLLA nanocomposite scaffolds. *Biomaterials* 26 (2005): 3165-3172.
- [19] G. Pitarresi, F. S. Palumbo, C. Fiorica, F. Calascibetta, G. Giammona. Electrospinning of $\alpha\beta$ -poly(N-2-hydroxyethyl)-dl-aspartamide-graft-poly(lactic acid) to produce a fibrillar scaffold. *Eur. Polym. J.* 46 (2010): 181-184.

- [20] Y. Fujihara, T. Takato, K. Hoshi. Immunological response to tissue-engineered cartilage derived from auricular chondrocytes and a PLLA scaffold in transgenic mice. *Biomaterials* 31 (2010): 1227-1234.
- [21] Z. Xie, G. Buschle-Diller. Electrospun poly(D,L-lactide) fibers for drug delivery: The influence of cosolvent and the mechanism of drug release. *J. Appl. Polym. Sci.* 115 (2010): 1-8.
- [22] F. Rancan, A. Todorova, S. Hadam, D. Papakostas, E. Luciani, C. Graf, U. Gernert, E. Ruhl, B. Verrier, W. Sterry, U. Blume-Peytavi, A. Vogt. Stability of polylactic acid particles and release of fluorochromes upon topical application on human skin explants. *Eur. J. Pharm. Biopharm.* 80 (2012): 76-84.
- [23] L. S. Nair, C. T. Laurencin. Biodegradable polymers as biomaterials. *Progr. Polymer Sci.* 32 (2007): 762-798.
- [24] J. C. Middleton, A. J. Tipton. Synthetic biodegradable polymers as orthopedic devices. *Biomaterials* 21 (2000): 2335-2346.
- [25] H. Zhou, J. G. Lawrence, S. B. Bhaduri. Fabrication aspects of PLA-CaP/PLGA-CaP composites for orthopedic applications: A review. *Acta Biomater.* 8 (2012): 1999-2016.
- [26] วิมลรัตน์ ศรีจรัสสิน. เทคโนโลยีสิ่งทอเบื้องต้น, บริษัท คราฟแมนเพรส จำกัด, 2007.
- [27] T. Cosgrove. *Colloid Science - Principles, Methods and Applications*, Blackwell Publishing.
- [28] Y. Han, S. O. Manolach, F. Denes, R. M. Rowell. Cold plasma treatment on starch foam reinforced with wood fiber for its surface hydrophobicity. *Carbohydr. Polym.* 86 (2011): 1031-1037.
- [29] L. Cerne, B. Simoncic, M. Zeljko. The influence of repellent coatings on surface free energy of glass plate and cotton fabric. *Appl. Surf. Sci.* 254 (2008): 6467-6477.
- [30] สุดา. เกียรติกำจรวงศ์, สุภาภรณ์. นพคุณดิลกรัตน์. *มูมส์มัดส์และพลังงานผิวของแม่พิมพ์ในปฏิบัติการเคมีทางภาพ*, สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ, 2008.

- [31] W. Barthlott, C. Neinhuis. Purity of the sacred lotus, or escape from contamination in biological surfaces. *Planta* 202 (1997): 1-8.
- [32] C. Neinhuis, W. Barthlott. Characterization and distribution of water-repellent, self-cleaning plant surfaces. *Ann. Bot-London* 79 (1997): 667-677.
- [33] G. Y. Bae, J. Jang, Y. G. Jeong, W. S. Lyoo, B. G. Min. Superhydrophobic PLA fabrics prepared by UV photo-grafting of hydrophobic silica particles possessing vinyl groups. *J. Colloid Interface Sci.* 344 (2010): 584-587.
- [34] Y. Lee, S. H. Park, K. B. Kim, J. K. Lee. Fabrication of hierarchical structures on a polymer surface to mimic natural superhydrophobic surfaces. *Adv. Mater.* 19 (2007): 2330-2335.
- [35] A. B. D. Cassie, S. Baxter. Wettability of porous surfaces. *Trans. Faraday. Soc.* 40 (1944): 546-551.
- [36] J. Wang, H. Chen, T. Sui, A. Li, D. Chen. Investigation on hydrophobicity of lotus leaf: experiment and theory. *Plant Sci.* 176 (2009): 687-695.
- [37] T.-Y. Han, J.-F. Shr, C.-F. Wu, C.-T. Hsieh. A modified Wenzel model for hydrophobic behavior of nanostructured surfaces. *Thin Solid Films* 515 (2007): 4666-4669.
- [38] A. S.T, B. P, E. Richard, B. J. Basu. Properties of phase separation method synthesized superhydrophobic polystyrene films. *Appl. Surf. Sci.* 258 (2012): 3202-3207.
- [39] D. Banerjee, N. S. Das, K. K. Chattopadhyay. Enhancement of field emission and hydrophobic properties of silicon nanowires by chemical vapor deposited carbon nanoflakes coating. *Appl. Surf. Sci.*
- [40] Z. Zheng, Z. Gu, R. Huo, Y. Ye. Superhydrophobicity of polyvinylidene fluoride membrane fabricated by chemical vapor deposition from solution. *Appl. Surf. Sci.* 255 (2009): 7263-7267.
- [41] Y. Shi, Y. Wang, X. Feng, G. Yue, W. Yang. Fabrication of superhydrophobicity on cotton fabric by sol-gel. *Appl. Surf. Sci.* 258 (2012): 8134-8138.

- [42] R. Taurino, E. Fabbri, M. Messori, F. Pilati, D. Pospiech, A. Synytska. Facile preparation of superhydrophobic coatings by sol–gel processes. *J. Colloid Interface Sci.* 325 (2008): 149-156.
- [43] M. Kang, R. Jung, H.-S. Kim, H.-J. Jin. Preparation of superhydrophobic polystyrene membranes by electrospinning. *Colloid Surface Physicochem. Eng. Aspect.* 313–314 (2008): 411-414.
- [44] N. Bhardwaj, S. C. Kundu. Electrospinning: a fascinating fiber fabrication technique. *Biotechnol. Adv.* 28 (2010): 325-347.
- [45] S. Ramakrishna. *An Introduction to Electrospinning And Nanofibers*, World Scientific, 2005.
- [46] P. J. Brown, K. Stevens. *Nanofibers and nanotechnology in textiles*, Woodhead Publishing, 2007.
- [47] H. R. Darrell, C. Iksoo. Nanometre diameter fibres of polymer, produced by electrospinning. *Nanotechnology* 7 (1996): 216.
- [48] A. L. Andrady. *Science and technology of polymer nanofibers*, Wiley, Hoboken, N.J., 2008.
- [49] J. Doshi, D. H. Reneker. Electrospinning process and applications of electrospun fibers. *J. Electrostat.* 35 (1995): 151-160.
- [50] A. Frenot, I. S. Chronakis. Polymer nanofibers assembled by electrospinning. *Curr. Opin. Colloid Interface Sci.* 8 (2003): 64-75.
- [51] S. Ramakrishna, K. Fujihara, W.-E. Teo, T.-C. Lim, Z. Ma. *An Introduction to Electrospinning and Nanofibers*, World Scientific, 2005.
- [52] S. Zhang, W. S. Shim, J. Kim. Design of ultra-fine nonwovens via electrospinning of Nylon 6: Spinning parameters and filtration efficiency. *Mater. Design* 30 (2009): 3659-3666.
- [53] S. H. Tan, R. Inai, M. Kotaki, S. Ramakrishna. Systematic parameter study for ultra-fine fiber fabrication via electrospinning process. *Polymer* 46 (2005): 6128-6134.
- [54] C. Zhang, X. Yuan, L. Wu, Y. Han, J. Sheng. Study on morphology of electrospun poly(vinyl alcohol) mats. *Eur. Polym. J.* 41 (2005): 423-432.

- [55] X. Geng, O.-H. Kwon, J. Jang. Electrospinning of chitosan dissolved in concentrated acetic acid solution. *Biomaterials* 26 (2005): 5427-5432.
- [56] J. Sutasinpromprae, S. Jitjaicham, M. Nithitanakul, C. Meechaisue, P. Supaphol. Preparation and characterization of ultrafine electrospun polyacrylonitrile fibers and their subsequent pyrolysis to carbon fibers. *Polym. Int.* 55 (2006): 825-833.
- [57] M. M. Demir, I. Yilgor, E. Yilgor, B. Erman. Electrospinning of polyurethane fibers. *Polymer* 43 (2002): 3303-3309.
- [58] I. S. Chronakis. Chapter 16 - Micro-/nano-fibers by electrospinning technology: processing, properties and applications. *Micromanufacturing Engineering and Technology*, pp. 264-286. Boston: William Andrew Publishing, 2010.
- [59] J. S. Lee, K. H. Choi, H. D. Ghim, S. S. Kim, D. H. Chun, H. Y. Kim, W. S. Lyoo. Role of molecular weight of atactic poly(vinyl alcohol) (PVA) in the structure and properties of PVA nanofabric prepared by electrospinning. *J. Appl. Polym. Sci.* 93 (2004): 1638-1646.
- [60] R. Jalili, S. A. Hosseini, M. Morshed. The effects of operating parameters on the morphology of electrospun polyacrylonitrile nanofibres. *Iranian Polymer Journal (English Edition)* 14 (2005): 1074-1081.
- [61] X. Yuan, Y. Zhang, C. Dong, J. Sheng. Morphology of ultrafine polysulfone fibers prepared by electrospinning. *Polym. Int.* 53 (2004): 1704-1710.
- [62] C. Wang, W. Zhang, Z. H. Huang, E. Y. Yan, Y. H. Su. Effect of concentration, voltage, take-over distance and diameter of pinhead on precursory poly (phenylene vinylene) electrospinning. *Pigm. Resin Technol.* 35 (2006): 278-283.
- [63] Z. Zhao, J. Li, X. Yuan, X. Li, Y. Zhang, J. Sheng. Preparation and properties of electrospun poly(vinylidene fluoride) membranes. *J. Appl. Polym. Sci.* 97 (2005): 466-474.
- [64] P. Heikkila, A. Harlin. Parameter study of electrospinning of polyamide-6. *Eur. Polym. J.* 44 (2008): 3067-3079.

- [65] R. Reichelt. Scanning Electron Microscopy. *Science of Microscopy*, pp. 133-272. New York: Springer, 2007.
- [66] A. Buer, S. C. Ugbolue, S. B. Warner. Electrospinning and properties of some nanofibers. *Text. Res. J.* 71 (2001): 323-328.
- [67] J.-W. Chen, K.-F. Tseng, S. Delimartin, C.-K. Lee, M.-H. Ho. Preparation of biocompatible membranes by electrospinning. *Desalination* 233 (2008): 48-54.
- [68] J. Pongsopa, P. Visuttpitukul, B. Paosawatyanong. Surface hardening of aluminium-copper alloy 2011 by RF plasma nitriding process. *Key Eng. Mater.* 462-463 (2011): 1097-1102.
- [69] R. Di Mundo, F. Palumbo, R. d'Agostino. Influence of chemistry on wetting dynamics of nanotextured hydrophobic surfaces. *Langmuir* 26 (2009): 5196-5201.
- [70] P. Chaivan, N. Pasaja, D. Boonyawan, P. Suanpoot, T. Vilaithong. Low-temperature plasma treatment for hydrophobicity improvement of silk. *Surf. Coat. Technol.* 193 (2005): 356-360.
- [71] Y. J. Ryu, H. Y. Kim, K. H. Lee, H. C. Park, D. R. Lee. Transport properties of electrospun nylon 6 nonwoven mats. *Eur. Polym. J.* 39 (2003): 1883-1889.
- [72] J. M. Deitzel, W. Kosik, S. H. McKnight, N. C. Beck Tan, J. M. DeSimone, S. Crette. Electrospinning of polymer nanofibers with specific surface chemistry. *Polymer* 43 (2002): 1025-1029.
- [73] M. Ma, R. M. Hill, J. L. Lowery, S. V. Fridrikh, G. C. Rutledge. Electrospun poly(styrene-block-dimethylsiloxane) block copolymer fibers exhibiting superhydrophobicity. *Langmuir* 21 (2005): 5549-5554.
- [74] A. Khoddami, O. Avinc, S. Mallakpour. A novel durable hydrophobic surface coating of poly(lactic acid) fabric by pulsed plasma polymerization. *Prog. Org. Coat.* 67 (2010): 311-316.
- [75] C. M. Chan, T. M. Ko, H. Hiraoka. Polymer surface modification by plasmas and photons. *Surf. Sci. Rep.* 24 (1996): 1-54.

- [76] R. Shishoo, T. Institute. *Plasma technologies for textiles*, Woodhead, 2007.
- [77] D. M. Mattox. Chapter 5 - The Low Pressure Plasma Processing Environment, *Handbook of Physical Vapor Deposition (PVD) Processing (Second Edition)*, pp. 157-193. Boston: William Andrew Publishing, 2010.
- [78] Y. Wu, W. Liu, L. Hang. Research on RF-generated plasma polishing. *Physics Procedia* 32 (2012): 590-597.
- [79] S. F. Durrant, E. C. Rangel, N. C. Da Cruz, S. G. C. Castro, M. A. Bica De Moraes. Amorphous hydrogenated fluorinated carbon films produced by PECVD. *Surf. Coat. Technol.* 86-87 (1996): 443-448.
- [80] The National Institute of Standards and Technology (NIST). *NIST Atomic Spectra Database*. [ออนไลน์]. 2012. แหล่งที่มา: http://physics.nist.gov/PhysRefData/ASD/lines_form.html. [14 กันยายน 2554]
- [81] R. R. Mather, R. H. Wardman. *The Chemistry of Textile Fibres*, RSC Publishing, 2011.
- [82] N. De Geyter, R. Morent, T. Desmet, M. Trentesaux, L. Gengembre, P. Dubruel, C. Leys, E. Payen. Plasma modification of polylactic acid in a medium pressure DBD. *Surf. Coat. Technol.* 204 (2010): 3272-3279.
- [83] N.-Y. Cui, N. M. D. Brown. Modification of the surface properties of a polypropylene (PP) film using an air dielectric barrier discharge plasma. *Appl. Surf. Sci.* 189 (2002): 31-38.
- [84] S. Vaswani, J. Koskinen, D. W. Hess. Surface modification of paper and cellulose by plasma-assisted deposition of fluorocarbon films. *Surf. Coat. Technol.* 195 (2005): 121-129.
- [85] H. Tsuji, P. Sommani, Y. Hayashi, H. Kojima, H. Sato, Y. Gotoh, G. Takaoka, J. Ishikawa. Surface modification of silica glass by CHF_3 plasma treatment and carbon negative-ion implantation for cell pattern adhesion. *Surf. Coat. Technol.* 206 (2011): 900-904.

- [86] K. Kamlangkla, B. Paosawatanyong, V. Pavarajarn, J. H. Hodak, S. K. Hodak. Mechanical strength and hydrophobicity of cotton fabric after plasma treatment. *Appl. Surf. Sci.* 256 (2010): 5888-5897.
- [87] T. Jacobs, R. Morent, N. De Geyter, C. Leys. Effect of He/CF₄ DBD operating parameters on PET surface modification. *Plasma Processes Polym.* 6 (2009): S412-S418.
- [88] S. K. Hodak, T. Supasai, B. Paosawatanyong, K. Kamlangkla, V. Pavarajarn. Enhancement of the hydrophobicity of silk fabrics by SF₆ plasma. *Appl. Surf. Sci.* 254 (2008): 4744-4749.
- [89] B. Paosawatanyong, T. Supasai, V. Pavarajarn, S. K. Hodak. Hydrophobicity improvement of PET fabrics after SF₆ plasma treatment. *Int. Polym. Proc.* 23 (2008): 134-139.
- [90] แม่น. อมรสิทธิ์, อ. เพชรสม. *หลักการและเทคนิคการวิเคราะห์เชิงเครื่องมือ*, โรงพิมพ์ชวนพิมพ์, 2009.
- [91] N. V. Bhat, A. N. Netravali, A. V. Gore, M. P. Sathianarayanan, G. A. Arolkar, R. R. Deshmukh. Surface modification of cotton fabrics using plasma technology. *Text. Res. J.* 81 (2011): 1014-1026.
- [92] D. R. Baer, M. H. Engelhard. XPS analysis of nanostructured materials and biological surfaces. *J. Electron Spectros. Relat. Phenom.* 178-179 (2010): 415-432.
- [93] C. M. MacRae, N. C. Wilson, S. A. Johnson, P. L. Phillips, M. Otsuki. Hyperspectral mapping-combining cathodoluminescence and X-ray collection in an electron microprobe. *Microsc. Res. Tech.* 67 (2005): 271-277.
- [94] M. I. Pownceby, C. M. MacRae, N. C. Wilson. Mineral characterisation by EPMA mapping. *Miner. Eng.* 20 (2007): 444-451.
- [95] Y. I. Yoon, H. S. Moon, W. S. Lyoo, T. S. Lee, W. H. Park. Superhydrophobicity of cellulose triacetate fibrous mats produced by electrospinning and plasma treatment. *Carbohydr. Polym.* 75 (2009): 246-250.

- [96] T. Subbiah, G. S. Bhat, R. W. Tock, S. Parameswaran, S. S. Ramkumar. Electrospinning of nanofibers. *J. Appl. Polym. Sci.* 96 (2005): 557-569.
- [97] P. Supaphol, C. Mit-Uppatham, M. Nithitanakul. Ultrafine electrospun polyamide-6 fibers: Effect of emitting electrode polarity on morphology and average fiber diameter. *J. Polym. Sci. Pol. Phys.* 43 (2005): 3699-3712.
- [98] M. G. McKee, G. L. Wilkes, R. H. Colby, T. E. Long. Correlations of Solution Rheology with Electrospun Fiber Formation of Linear and Branched Polyesters. *Macromolecules* 37 (2004): 1760-1767.
- [99] T. Supasai, Hodak, S.K, Paosawatyanong, B. Effect of SF₆ plasma treatment on hydrophobicity improvement of fabrics. *Fizik Malaysia* 28 (2007): 1-6.
- [100] Y. Chen, J. Lin, Y. Fei, H. Wang, W. Gao. Preparation and characterization of electrospinning PLA/curcumin composite membranes. *Fibers and Polymers* 11 (2010): 1128-1131.
- [101] J.-P. Chen, C.-H. Su. Surface modification of electrospun PLLA nanofibers by plasma treatment and cationized gelatin immobilization for cartilage tissue engineering. *Acta Biomater.* 7 (2011): 234-243.
- [102] J. Xu, J. Zhang, W. Gao, H. Liang, H. Wang, J. Li. Preparation of chitosan/PLA blend micro/nanofibers by electrospinning. *Mater. Lett.* 63 (2009): 658-660.
- [103] M. G. McCord, Y. J. Hwang, Y. Qiu, L. K. Hughes, M. A. Bourham. Surface analysis of cotton fabrics fluorinated in radio-frequency plasma. *J. Appl. Polym. Sci.* 88 (2003): 2038-2047.
- [104] H. R. Allcock, L. B. Steely, A. Singh. Hydrophobic and superhydrophobic surfaces from polyphosphazenes. *Polym. Int.* 55 (2006): 621-625.
- [105] A. Raffaele-Addamo, C. Riccardi, E. Selli, R. Barni, M. Piselli, G. Poletti, F. Orsini, B. Marcandalli, M. R. Massafra, L. Meda. Characterization of plasma processing for polymers. *Surf. Coat. Technol.* 174-175 (2003): 886-890.
- [106] C. Wang, P.-C. Lai, S. H. Syu, J. Leu. Effects of CF₄ plasma treatment on the moisture uptake, diffusion, and WVTR of poly(ethylene terephthalate) flexible films. *Surf. Coat. Technol.* 206 (2011): 318-324.

ภาคผนวก

ตารางที่ ๑ ค่ามุมสัมผัสของน้ำกับแผ่นเส้นใยพอลิแล็กติกแอซิดที่เตรียมจากเทคนิคอิเล็กโทรรสปีนนิ่ง* แล้วอบพลาสติกมาของแก๊สซัลเฟอร์เฮกซะฟลูออไรด์**

เวลาที่ใช้ในการอบพลาสติกมา (sec)	ค่ามุมสัมผัสของน้ำ ($^{\circ}$)			
	ค่าเฉลี่ยของ ชั้นงานที่ 1	ค่าเฉลี่ยของ ชั้นงานที่ 2	ค่าเฉลี่ยของ ชั้นงานที่ 3	ค่าเฉลี่ย รวม
untreated	116.6	117.48	118.45	118 \pm 1
● ที่กำลังวัตต์ 20W				
10	121.0467	122.3183	123.66	122 \pm 1
30	125.3833	123.1167	126.5067	125 \pm 2
60	128.0467	129.8717	130.22	129 \pm 1
120	130.4633	132.175	131.1217	131 \pm 1
300	134.7133	134.5917	135.2233	135 \pm 0.3
● ที่กำลังวัตต์ 35W				
10	127.0033	127.305	125.8817	127 \pm 1
30	133.3483	132.9967	131.5467	133 \pm 1
60	135.6717	136.98	135.745	136 \pm 1
120	138.6717	134.7733	138.8633	137 \pm 2
300	145.2217	141.575	142.845	143 \pm 2
● ที่กำลังวัตต์ 50W				
10	136.06	135.43	142.01	138 \pm 4
30	142.25	143.58	145.52	144 \pm 2
60	145.19	142.22	146.45	145 \pm 2
120	150.03	148.58	142.64	147 \pm 4
300	153.52	151.43	153.42	153 \pm 1

*ความเข้มข้น 10 wt%, ระยะห่างระหว่างปลายเข็มจนถึงวัสดุรองรับ 20 cm, และความต่างศักย์ 15 kV

**ความดัน 0.5 torr

ตารางที่ ๒ ค่ามุมสัมผัสของสารไดไอโอดีมีเทนกับแผ่นเส้นใยพอลิแล็กติกแอซิดที่เตรียมจากเทคนิคอิเล็กโทรสปินนิง* แล้วอบพลาสติกของแก๊สซัลเฟอร์เฮกซะฟลูออไรด์**

เวลาที่ใช้ในการอบพลาสติก (sec)	ค่ามุมสัมผัสของสารไดไอโอดีมีเทน (°)			
	ค่าเฉลี่ยของ ชั้นงานที่ 1	ค่าเฉลี่ยของ ชั้นงานที่ 2	ค่าเฉลี่ยของ ชั้นงานที่ 3	ค่าเฉลี่ย รวม
untreated	0	0	0	0
● ที่กำลังวัตต์ 20W				
10	120	120	122	121±1
30	120	121	122	121±1
60	121	121	121	121±0.2
120	121	121	121	121±0.5
300	124	122	122	122±1
● ที่กำลังวัตต์ 35W				
10	121	122	122	122±1
30	124	125	125	125±0.5
60	124	125	125	124±1
120	124	125	127	125±1
300	126	128	129	128±1
● ที่กำลังวัตต์ 50W				
10	123	120	121	121±1
30	124	125	123	124±1
60	125	125	124	125±1
120	128	127	127	127±1
300	132	132	133	132±1

*ความเข้มข้น 10 wt%, ระยะห่างระหว่างปลายเข็มจนถึงวัสดุรองรับ 20 cm, และความต่างศักย์ 15 kV

**ความดัน 0.5 torr

ตารางที่ ๓ พลังงานพื้นผิวของแผ่นเส้นใยพอลิแล็กติกแอซิดที่เตรียมจากเทคนิค อิเล็กโทรสปินนิง* แล้วอบพลาสติกของแก๊สซัลเฟอร์เฮกซะฟลูออไรด์**

เวลาที่ใช้ในการอบพลาสติก (sec)	ค่ามุมสัมผัสของสารไดโอะไดโอดีเทน (°)			
	ค่าเฉลี่ยของ ชั้นงานที่ 1	ค่าเฉลี่ยของ ชั้นงานที่ 2	ค่าเฉลี่ยของ ชั้นงานที่ 3	ค่าเฉลี่ย รวม
untreated	74.8	75.8	73.9	74.9±0.9
● ที่กำลังวัตต์ 20W				
10	2.7	3.1	3.4	3.1±0.3
30	2.7	2.7	3.2	2.9±0.3
60	2.6	2.5	3.1	2.7±0.3
120	2.4	2.4	2.1	2.3±0.2
300	2.0	1.8	1.6	1.8±0.2
● ที่กำลังวัตต์ 35W				
10	3.3	3.2	3.4	3.3±0.1
30	2.5	2.4	2.5	2.5±0.0
60	2.5	2.3	2.4	2.4±0.1
120	2.4	2.3	2.1	2.3±0.2
300	2.5	1.8	1.9	2.1±0.4
● ที่กำลังวัตต์ 50W				
10	2.7	3.1	3.4	3.1±0.3
30	2.7	2.7	3.2	2.9±0.3
60	2.6	2.5	3.1	2.7±0.3
120	2.4	2.4	2.1	2.3±0.2
300	2.0	1.8	1.6	1.8±0.2

*ความเข้มข้น 10 wt%, ระยะห่างระหว่างปลายเข็มจนถึงวัสดุรองรับ 20 cm, และความต่างศักย์ 15 kV

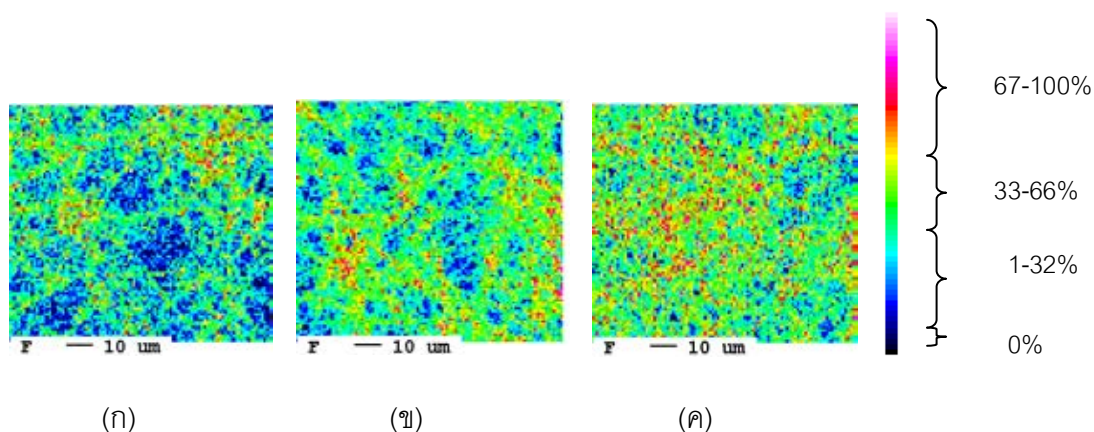
**ความดัน 0.5 torr

ตารางที่ ๔ ค่ามุมสัมผัสของน้ำ (θ) ของแผ่นเส้นใยพอลิแล็กติกแอซิดที่เตรียมจากเทคนิคอิเล็กโตรสปินนิง* แล้วอบพลาสติกมาของแก๊สซัลเฟอร์เฮกซะฟลูออไรด์**

	ค่ากำลังวัตต์ 20 W			ค่ากำลังวัตต์ 35 W		
	ค่าเฉลี่ย ชั้นงานที่1	ค่าเฉลี่ย ชั้นงานที่2	ค่าเฉลี่ย รวม	ค่าเฉลี่ย ชั้นงานที่1	ค่าเฉลี่ย ชั้นงานที่2	ค่าเฉลี่ย รวม
1วัน	134.7133	136	136±1	145	145	145±0.3
2วัน	133.79	138	136±3	143	143	143±0.1
3วัน	134.0567	136	135±1	141	142	142±0.4
4วัน	132.77	134	133±1	141	142	142±1
5วัน	133.74	134	134±0.4	141	143	142±1
6วัน	134.6033	135	135±0.3	141	142	141±1
1อาทิตย์	135.0033	135	135±0.3	139	143	141±3
2อาทิตย์	133.625	136	135±1	140	142	141±2
3อาทิตย์	133.105	134	134±1	138	137	137±1
4อาทิตย์	131.345	137	134±4	135	138	137±2
5อาทิตย์	128.71	135	132±5	131	137	134±5
6อาทิตย์	128.5967	134	131±4	129	134	131±3
7อาทิตย์	127.3	135	131±5	130	137	133±5
8อาทิตย์	125.8	134	130±6	131	134	132±2
9อาทิตย์	124.6967	132	128±5	130	134	132±3
10อาทิตย์	126.905	128	127±1	131	130	131±0.2
11อาทิตย์	126.37	130	128±2	127	129	128±1
12อาทิตย์	124.34	127	126±2	126	126	126±0.1

*ความเข้มข้น 10 wt%, ระยะห่างระหว่างปลายเข็มจนถึงวัสดุรองรับ 20 cm, และความต่างศักย์ 15 kV

**เวลาในการอบพลาสติกมา 300 sec, ความดัน 0.5 torr



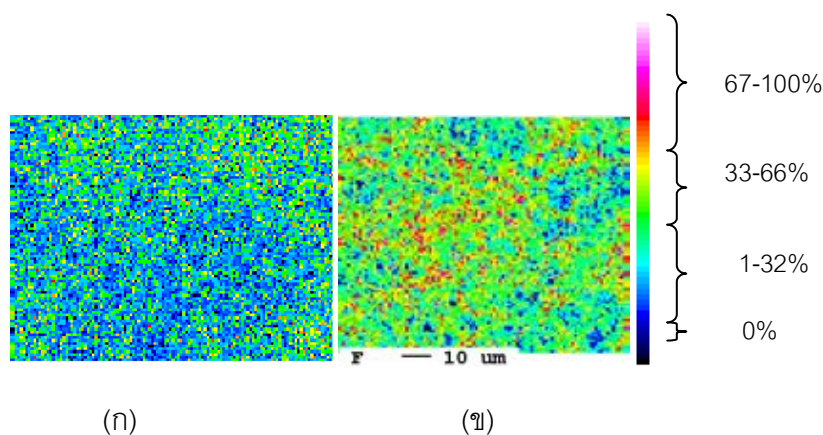
ภาพที่ ๑ ปริมาณของอะตอมฟลูออรีนบนแผ่นภาพจากเทคนิคอิเล็กตรอนโพรบไมโครนาลิซิสของแผ่นเส้นใยพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตที่อาบพลาสมาด้วยกำลังวัตต์ (ก) 20 W (ข) 35 W (ค) 50 W เวลาที่ใช้ในการอาบพลาสมา 300 sec. ความดัน 0.5 torr

ตารางที่ ๑ จำนวนของอะตอมฟลูออรีนที่มีปริมาณความเข้มข้นของฟลูออรีนต่างๆ บนแผ่นภาพจากเทคนิคอิเล็กตรอนโพรบไมโครนาลิซิสของแผ่นเส้นใยพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต*ที่อาบพลาสมาด้วยกำลังวัตต์ต่างๆ กัน**

ปริมาณความเข้มข้นของฟลูออรีน (%)	จำนวนอนุภาคของฟลูออรีนที่กำลังวัตต์ต่างๆ		
	20 W	35 W	50 W
0	160	62	51
1-32	6,047	9,268	7,140
33-66	3,134	7,749	10,738
67-100	1,867	2,516	2,739

*ความเข้มข้น 10 wt%, ระยะห่างระหว่างปลายเข็มจนถึงวัสดุรองรับ 20 cm, และความต่างศักย์ 15 kV

**เวลาในการอาบพลาสมา 300 sec, ความดัน 0.5 torr



ภาพที่ ๘ ปริมาณของอะตอมฟลูออรีนบนแผนภาพจากเทคนิคอิเล็กตรอนโพรบไมโครนาลิซิสของแผ่นเส้นใยพอลิแล็กติกแอซิด ที่อาบพลาสมาด้วยเวลาที่ใช้ในการอาบพลาสมา (ก) 60 sec (ข) 300 sec ความดัน 0.5 torr กำลังวัตต์ 50 kV

ตารางที่ ๘ จำนวนของอะตอมฟลูออรีนที่มีปริมาณความเข้มข้นของฟลูออรีนต่างๆ บนแผนภาพจากเทคนิคอิเล็กตรอนโพรบไมโครนาลิซิสของแผ่นเส้นใยพอลิแล็กติกแอซิด*ที่อาบพลาสมาด้วยเวลาในการอาบพลาสมาต่างๆ กัน**

ปริมาณความเข้มข้นของฟลูออรีน (%)	จำนวนอนุภาคของฟลูออรีนที่เวลาในการอาบพลาสมาต่างๆ	
	60 sec	300 sec
0	181	51
1-32	13,750	7,140
33-66	4,236	10,738
67-100	2,974	2,739

*ความเข้มข้น 10 wt%, ระยะห่างระหว่างปลายเข็มจนถึงวัสดุรองรับ 20 cm, และความต่างศักย์ 15 kV

**เวลาในการอาบพลาสมา 300 sec, ความดัน 0.5 torr

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวนลินทิพย์ ช่างสาร เกิดวันจันทร์ที่ 2 มีนาคม .ศ. 2530 เริ่มเข้าศึกษาระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตร์บัณฑิต ภาควิชาปิโตรเคมีและวัสดุพอลิเมอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากรในปีการศึกษา 2548 และสำเร็จการศึกษาในปีการศึกษา 2551 จากนั้นเริ่มเข้าศึกษาระดับปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาปิโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และสำเร็จการศึกษาในปีการศึกษา 2555 ระหว่างการศึกษามีการนำเสนอผลงานวิจัยในงาน Advanced Plasma Technology for Green and Biomedical Applications. และงาน Pure and Applied Chemistry International Conference 2012. (PACCON 2012) ในวันที่ 11-13 มกราคม 2555 มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ จังหวัดเชียงใหม่