ใบรับรองวิทยานิพนธ์
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (เทคโนโลยีการบรรจุ)

ปริญญา

เทคโนโลยีการบรรจุ	เทคโนโลยีการบรรจุและวัสดุ
สาขา	**ภาควิชา**

เรื่อง การปรับปรุงสมบัติการต้านทานน้ำของกระดาษรีไซเคิลและเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชผสมโดยพลาสมาเฮกซะฟลูออโรพรอพิลีน

The Improvement of Water Resistance Property of Recycled Paper and Thermoplastic Starch Blend by C_3F_6 Plasma

นามผู้วิจัย นางสาวสมาภรณ์ โรจน์ทองคำ

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก ....

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ธัญญารัตน์ จิญกาญจน์, Ph.D.)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ....

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์อำพร เสน่ห์, Ph.D.)

หัวหน้าภาควิชา ....

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ธัญญารัตน์ จิญกาญจน์, Ph.D.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

....

(รองศาสตราจารย์กัญจนา ธีระกุล, D.Agr.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ .... **เดือน** .... **พ.ศ.** ....

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การปรับปรุงสมบัติการต้านทานน้ำของกระดาษรีไซเคิลและเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชผสม
โดยพลาสมาเฮกซะฟลูออโรพรอพิลีน

The Improvement of Water Resistance Property of Recycled Paper
and Thermoplastic Starch Blend by C_3F_6 Plasma

โดย

นางสาวสมาภรณ์ โรจน์ทองคำ

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (เทคโนโลยีการบรรจุ)
พ.ศ. 2557

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สมาภรณ์ โรจน์ทองคำ 2557: การปรับปรุงสมบัติการต้านทานน้ำของกระดาษรีไซเคิลและเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชผสมโดยพลาสมาเฮกซะฟลูออโรพรอพิลีน ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (เทคโนโลยีการบรรจุ) สาขาเทคโนโลยีการบรรจุ ภาควิชาเทคโนโลยีการบรรจุและวัสดุ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ผู้ช่วยศาสตราจารย์ธัญญารัตน์ จิญกาญจน์, Ph.D. 142 หน้า

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาผลของการประยุกต์พลาสมาเฮกซะฟลูออโรพรอพิลีน (C_3F_6) บนวัสดุชีวฐาน 2 ประเภท คือ กระดาษรีไซเคิลและแผ่นชีทพอลิเมอร์ชีวภาพผสมระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช กับพอลิบิวทิลีนอะดิเพท-โค-เทเรฟทาเลท งานวิจัยแบ่งออกเป็น 4 ส่วน ส่วนแรกศึกษาผลของการประยุกต์พลาสมาต่อสมบัติการต้านทานน้ำของกระดาษ ที่กำลังคลื่นวิทยุ 100 150 200 250 และ 300 วัตต์ ระยะเวลาการประยุกต์ 1 3 5 และ 10 นาที ส่วนที่สอง คือ ศึกษาผลของการประยุกต์พลาสมาต่อสมบัติการต้านทานน้ำของแผ่นชีทพอลิเมอร์ชีวภาพ โดยเลือกสภาวะที่ได้คัดกรองจากงานวิจัยในส่วนแรก ส่วนที่สามคือศึกษาผลของการประยุกต์พลาสมาต่อสมบัติทางกายภาพ สมบัติการสกัดกั้นและสมบัติเชิงกลของวัสดุชีวฐานทั้งสองประเภท ส่วนที่สี่คือศึกษาการวิเคราะห์พื้นผิวภายหลังการประยุกต์พลาสมา จากผลทดลอง พบว่าการประยุกต์พลาสมาบนกระดาษและแผ่นชีทพอลิเมอร์ชีวภาพ ส่งผลให้สมบัติการต้านทานน้ำของวัสดุทั้งสองดียิ่งขึ้น ซึ่งที่สภาวะกำลังคลื่นวิทยุต่ำและระยะการประยุกต์พลาสมาสั้น กระดาษมีการเปลี่ยนแปลงสมบัติการต้านทานน้ำมากกว่าพอลิเมอร์ชีวภาพ ส่งผลให้พอลิเมอร์ชีวภาพต้องใช้สภาวะกำลังคลื่นวิทยุสูงและระยะเวลาการประยุกต์นานขึ้น ในส่วนของสมบัติกายภาพ พบว่าการประยุกต์พลาสมาไม่ส่งผลต่อน้ำหนักมาตรฐาน ความหนา และความชื้นของทั้งกระดาษและพอลิเมอร์ชีวภาพ แต่สีของวัสดุทั้งสองชนิดเกิดการเปลี่ยนแปลง โดยมีสีเหลืองเพิ่มมากขึ้น นอกจากนี้พบว่าการประยุกต์พลาสมาช่วยลดอัตราการซึมผ่านของไอน้ำของทั้งกระดาษและพอลิเมอร์ชีวภาพอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) ซึ่งผลการประยุกต์พลาสมาต่ออัตราการซึมผ่านของไอน้ำของพอลิเมอร์ชีวภาพให้ผลที่ดีกว่ากระดาษ อย่างไรก็ตามผลอัตราซึมผ่านของแก๊สออกซิเจนพบว่าการประยุกต์พลาสมาส่งผลดีกว่ากับกระดาษ สำหรับสมบัติเชิงกล พบว่าการประยุกต์พลาสมาส่งผลให้ความแข็งแรงของทั้งกระดาษและพอลิเมอร์ชีวภาพลดลง โดยความแข็งแรงของพอลิเมอร์ชีวภาพลดลงมากกว่ากระดาษ ในส่วนการวิเคราะห์พื้นผิวของกระดาษและพอลิเมอร์ชีวภาพ พบว่าการประยุกต์พลาสมาทำให้กระดาษเกิดความขรุขระเพิ่มขึ้นเป็นผลจากการกัดกร่อนผิวด้วยกระแสพลาสมา อีกทั้งยังพบพันธะ C-F บนพื้นผิวของกระดาษ ส่วนแผ่นชีทพอลิเมอร์ชีวภาพน่าจะเกิดกลไกอื่นเช่นการเกิดฟิล์มบางของฟลูออโรคาร์บอนเนื่องจากมีผิวเรียบขึ้นซึ่งอาจเป็นผลร่วมจากเกิดการกัดกร่อนผิวจากกระแสพลาสมาน้อย

_______________ _______________ ___ / ___ / _____

ลายมือชื่อนิสิต ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

Samaporn Rojthongkam 2014: The Improvement of Water Resistance Property of Recycled Paper and Thermoplastic Starch Blend by C_3F_6 Plasma . Master of Science (Packaging Technology), Major Field: Packaging Technology, Department of Packaging and Materials Technology. Thesis Advisor: Assistant Professor Tunyarut Jinkarn, Ph.D. 142 pages.

In this study, the effect of hexafluoropropylene (C_3F_6) plasma treatment on bio-based materials composed of recycled Kraft paper and biopolymer sheet thermoplasticstarch blend was investigated. The study composed of four sections. The first section was a study on the effect of plasma treatment on water resistance properties of recycled paper. Plasma conditions use in this study were RF power and treatment time. RF power levels were varied 100, 150, 200 250 and 300 watts and treatment times were at 1, 3, 5 and 10 minutes. Second section was a study on the effect of plasma treatment on water resistance properties of biopolymer sheet applying feasible plasma conditions obtained from the first section. The third section was a study on the effect of plasma treatment on physical, barrier and mechanical properties of both materials and the fourth section was a surface analysis of bio-based materials after plasma treatment. The results showed that C_3F_6 plasma treatment significantly improved water resistance properties of both materials. Plasma conditions at 300 W for 10 min provided the highest water resistance for both materials. In addition, plasma treatment had no effect on the basis weight, thickness and moisture content of both bio-based materials. However, the color of both materials was slightly changed after plasma treatment. For barrier properties, plasma treatment significantly ($p \leq 0.05$) reduced water vapor and oxygen transmission rates of both paper and biopolymer sheet. However, plasma treatment on recycled paper showed better result in oxygen transmission rate. For mechanical properties, both materials showed lower tensile strength after plasma treatment and the effect is greater in biopolymer sheet than recycled paper. Surface analysis of recycled paper displayed an increase in surface roughness which may be due to plasma etching. According to the analysis, C-F bonding was detected on paper surface after plasma treatment. For biopolymer sheet, thin film may be obtained after plasma treatment since smoother surface was observed, indicating minor effect on plasma etching.

________________________ __________________________ ___ / ___ / _____

Student's signature Thesis Advisor's signature

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

กิตติกรรมประกาศ

ในการทำเล่มวิทยานิพนธ์เล่มนี้ข้าพเจ้าพบเจออุปสรรคมากมาย และการที่ข้าพเจ้าได้ทำเล่มวิทยานิพนธ์ให้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดีนั้น ข้าพเจ้าต้องขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธัญญารัตน์ จิญกาญจน์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก ที่ให้คำสั่งสอน คำแนะนำและเป็นที่ปรึกษาในทุกเรื่องๆ รวมทั้งคอยสนับสนุนการทำวิจัยของข้าพเจ้าให้ผ่านมาด้วยดีตลอดมา และขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตรจารย์ ดร.อำพร เสน่ห์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม สำหรับคำแนะนำในการทำวิจัย การจัดเตรียมวัสดุในการทำวิจัย และกราบขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เลอพงศ์ จารุพันธ์ ประธานสอบวิทยานิพนธ์ และอาจารย์สุพจน์ ประทีปถิ่นทอง ผู้ทรงคุณวุฒิจากภายนอกมหาวิทยาลัยที่กรุณาตรวจทาน แก้ไข และให้คำแนะนำเพิ่มเติม จนจัดทำเล่มวิทยานิพนธ์ให้เสร็จสมบูรณ์

ขอบขอบพระคุณคณาอาจารย์ภาควิชาเทคโนโลยีการบรรจุและวัสดุทุกท่านที่ให้ความเมตตา อบรมสั่งสอนและให้ความรู้แก่ข้าพเจ้า พร้อมทั้งสร้างแนวคิดใหม่เพื่อเป็นประโยชน์แก่งานวิจัย รวมทั้งเจ้าหน้าที่ภาควิชาเทคโนโลยีการบรรจุและวัสดุทุกท่าน สำหรับการประสานงานเอกสาร และอำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องมือสำหรับทดสอบ และขอบคุณเพื่อนๆภาควิชาเทคโนโลยีการบรรจุและวัสดุทุกท่าน ที่คอยให้ความช่วยเหลือและคำแนะนำที่ดีตลอดมา

ขอขอบพระคุณศูนย์วิทยาการขั้นสูงเพื่อเกษตรและอาหาร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการสนับสนุนทุน

สุดท้าย ขอขอบพระคุณบิดาและมารดาของข้าพเจ้าที่คอยให้กำลังใจ ความห่วงใย และสนับสนุนข้าพเจ้าในทุกๆเรื่องเสมอมา ทั้งหมดนี้เป็นเหมือนเป็นแรงผลักดันที่ทำให้ข้าพเจ้ามีกำลังใจและมีพลังในการทำงานให้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี

สมาภรณ์ โรจน์ทองคำ

พฤศจิกายน 2557

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สารบัญ

หน้า

สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(5)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	3
การตรวจเอกสาร	4
อุปกรณ์และวิธีการ	40
อุปกรณ์	40
วิธีการ	41
ผลและวิจารณ์	46
สรุปและข้อเสนอแนะ	92
สรุป	92
ข้อเสนอแนะ	94
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	95
ภาคผนวก	116
ภาคผนวก ก การทำงานของเครื่องพลาสมาแบบความดันต่ำ และอุณหภูมิที่เกิดขึ้นขณะเกิดพลาสมา	117
ภาคผนวก ข วิธีการทดสอบของกระดาษ	121
ภาคผนวก ค วิธีการขึ้นรูปและการทดสอบของพอลิเมอร์ชีวภาพ	132
ภาคผนวก ง ค่าทดสอบมุมสัมผัสแบบจับเวลาของกระดาษและพอลิเมอร์ชีวภาพประยุกต์พลาสมา	137
ประวัติการศึกษาและการทำงาน	142

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สารบัญตาราง

ตารางที่ **หน้า**

ตารางที่		หน้า
1	เปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียของพลาสมาแต่ละประเภท	19
2	ปฏิกิริยาที่ผิวของวัสดุในระหว่างเกิดพลาสมา	19
3	พลังงานการแตกตัวของ C_3F_6	24
4	อายุในชั้นบรรยากาศ (atmospheric lifetime) และศักยภาพในการทำให้เกิดภาวะเรือนกระจก(Global Warming Potentials, GWP) โดยค่า GWP ของก๊าซเรือนกระจกต่างๆ ในช่วงเวลา 100 ปี (GWP100) ของแก๊สเรือนกระจกต่างๆ ในกระบวนการพลาสมา	25
5	สมบัติของกระดาษรีไซเคิลก่อนการประยุกต์พลาสมา	46
6	สมบัติของแผ่นพอลิเมอร์ชีวภาพก่อนการประยุกต์พลาสมา	47
7	มุมสัมผัส งานของการยึดติด และเวลาในการดูดซึมน้ำของกระดาษประยุกต์พลาสมาที่กำลังคลื่นวิทยุและระยะเวลาในการประยุกต์พลาสมาที่แตกต่างกัน	49
8	สัญลักษณ์เพื่อใช้แทนสภาวะการประยุกต์พลาสมาต่างๆ	51
9	มุมสัมผัส งานของการยึดติด และการดูดซึมน้ำของพอลิเมอร์ชีวภาพผ่านประยุกต์พลาสมาที่กำลังคลื่นวิทยุและระยะเวลาในการประยุกต์พลาสมาที่แตกต่างกัน	54
10	อัตราการลดลงของปริมาตรหยดน้ำของกระดาษพลาสมาที่กำลังคลื่นวิทยุและระยะเวลาในการประยุกต์พลาสมาที่แตกต่างกัน	55
11	เส้นผ่าศูนย์กลางของหยดน้ำบนกระดาษ (เซนติเมตร) ที่ดูดกลับในระยะเวลาต่างๆ โดยใช้กำลังคลื่นวิทยุและระยะเวลาประยุกต์พลาสมาแตกต่างกัน	56
12	เส้นผ่าศูนย์กลางของหยดน้ำบนพอลิเมอร์ชีวภาพ (เซนติเมตร) ที่ดูดกลับในระยะเวลาต่างๆ โดยใช้กำลังคลื่นวิทยุและระยะเวลาประยุกต์พลาสมาแตกต่างกัน	57
13	ลักษณะหยดน้ำบนกระดาษที่ใช้กำลังคลื่นวิทยุและระยะเวลาประยุกต์พลาสมาแตกต่างกัน	61
14	ลักษณะหยดน้ำบนพอลิเมอร์ชีวภาพที่ใช้กำลังคลื่นวิทยุและระยะเวลาประยุกต์พลาสมาแตกต่างกัน	62
15	น้ำหนักมาตรฐาน ความหนา และปริมาณความชื้นของกระดาษประยุกต์พลาสมา	63

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่ หน้า

ตารางที่		หน้า
16	ความหนา และปริมาณความชื้นของพอลิเมอร์ชีวภาพประยุกต์พลาสมา	64
17	สีของกระดาษและพอลิเมอร์ชีวภาพประยุกต์พลาสมา	64
18	อัตราการซึมผ่านของไอน้ำ (ลูกบาศก์เซนติเมตร/ตร.ม./วัน) ของกระดาษและพอลิเมอร์ชีวภาพ ที่ผ่านประยุกต์พลาสมาที่กำลังคลื่นวิทยุและระยะเวลาในการประยุกต์พลาสมาที่แตกต่างกัน	67
19	อัตราการซึมผ่านแก๊สออกซิเจน (ลูกบาศก์เซนติเมตร/ตร.ม./วัน) ของกระดาษและพอลิเมอร์ชีวภาพ ที่ผ่านประยุกต์พลาสมาที่กำลังคลื่นวิทยุและระยะเวลาในการประยุกต์พลาสมาที่แตกต่างกัน	69
20	มอดุลัสของกระดาษและแผ่นชีทพอลิเมอร์ชีวภาพที่ผ่านประยุกต์พลาสมาที่กำลังคลื่นวิทยุและระยะเวลาในการประยุกต์พลาสมาที่แตกต่างกัน	70
21	ความต้านทานแรงดึงของกระดาษและแผ่นชีทพอลิเมอร์ชีวภาพที่ผ่านประยุกต์พลาสมาที่กำลังคลื่นวิทยุและระยะเวลาในการประยุกต์พลาสมาที่แตกต่างกัน	71
22	การยืดตัว ณ จุดที่ขาดของกระดาษและแผ่นชีทพอลิเมอร์ชีวภาพที่ผ่านประยุกต์พลาสมาที่กำลังคลื่นวิทยุและระยะเวลาในการประยุกต์พลาสมาที่แตกต่างกัน	71
23	ส่วนประกอบทางเคมีของกระดาษที่ผ่านประยุกต์พลาสมาที่กำลังคลื่นวิทยุและระยะเวลาในการประยุกต์พลาสมาที่แตกต่างกัน	74
24	ส่วนประกอบทางเคมีของแผ่นชีทพอลิเมอร์ชีวภาพที่ผ่านประยุกต์พลาสมาที่กำลังคลื่นวิทยุและระยะเวลาในการประยุกต์พลาสมาที่แตกต่างกัน	74
25	ปริมาณของพันธะของกระดาษและแผ่นชีทพอลิเมอร์ชีวภาพที่ผ่านประยุกต์พลาสมาที่กำลังคลื่นวิทยุและระยะเวลาในการประยุกต์พลาสมาที่แตกต่างกัน	83
26	ความขรุขระของกระดาษและพอลิเมอร์ชีวภาพที่ผ่านประยุกต์พลาสมาที่กำลังคลื่นวิทยุระยะเวลาในการประยุกต์พลาสมาที่แตกต่างกัน	84
27	ค่ามุมสัมผัสของกระดาษหลังการประยุกต์พลาสมา เมื่อเก็บที่สภาวะอุณหภูมิ 25-30 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 60-70 เป็นเวลา 28 วัน	91

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่ **หน้า**

28 ค่ามุมสัมผัสของพอลิเมอร์ชีวภาพหลังการประยุกต์พลาสมา เมื่อเก็บที่สภาวะ อุณหภูมิ 25-30 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 60-70 เป็นเวลา 28 วัน 91

ตารางผนวกที่

ก1 อุณหภูมิที่เกิดขึ้นในระหว่างประยุกต์พลาสมา 120

ง1 มุมสัมผัสของหยดน้ำเมื่อเวลาผ่านไปของกระดาษประยุกต์พลาสมา 138

ง2 มุมสัมผัสของหยดน้ำเมื่อเวลาผ่านไปของพอลิเมอร์ชีวภาพประยุกต์พลาสมา 140

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สารบัญภาพ

ภาพที่ | หน้า

ภาพที่		หน้า
1	การแบ่งประเภทของวัสดุชีวฐานตามต้นกำเนิด	5
2	ขั้นตอนกระบวนการผลิตวัสดุชีวฐาน	6
3	สถานะทั้งสี่ของสสาร	9
4	ภาพจำลองการประยุกต์พลาสมาระบบความดันต่ำหรือสุญญากาศ	11
5	การปรับสภาพผิววัสดุด้วยวิธีโคโรนา	12
6	การปรับสภาพผิววัสดุด้วยพลาสมา	13
7	ขอบเขตระหว่างการเกิดพลาสมาพอลิเมอร์ไรเซชันและการกัดกร่อนของแก็สที่มีฟลูออรีนเป็นองค์ประกอบ	17
8	ปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการคงสภาพของพอลิเมอร์หลังการประยุกต์พลาสมา	18
9	การทำงานของเทคนิค XPS	21
10	โครงสร้างโมเลกุลของเฮกซะฟลูออโรพรอพิลีน	23
11	โครงสร้างเซลลูโลส	26
12	การจัดเรียงของผลึกแบบ A และแบบ B ในโครงสร้างของแป้ง	31
13	กระบวนการผลิตเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช	32
14	พลาสมาเฮกซะฟลูออโรพรอพิลีน	43
15	การประยุกต์พลาสมาบนกระดาษรีไซเคิล	51
16	การกระจายตัวของหยดน้ำบนกระดาษก่อนและหลังประยุกต์พลาสมา	59
17	การกระจายตัวของหยดน้ำบนพอลิเมอร์ชีวภาพก่อนและหลังประยุกต์พลาสมา	60
18	สเปกตรัม XPS ที่ได้จากการวิเคราะห์พื้นผิวของกระดาษ (a) ก่อนประยุกต์พลาสมา (b-g) หลังการประยุกต์พลาสมา	75
19	สเปกตรัม XPS ที่ได้จากการวิเคราะห์พื้นผิวของกระดาษก่อนประยุกต์พลาสมาด้วยความละเอียดสูง	76
20	สเปกตรัม XPS ที่ได้จากการวิเคราะห์พื้นผิวของกระดาษหลังผ่านการประยุกต์พลาสมาด้วยความละเอียดสูงที่สภาวะกำลังคลื่นไฟฟ้า 250 วัตต์ ระยะเวลาประยุกต์ 10 นาที	76

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
21	สเปกตรัม XPS ที่ได้จากการวิเคราะห์พื้นผิวของแผ่นชีทพอลิเมอร์ชีวภาพ (a) ก่อนประยุกต์พลาสมา (b-g) หลังการประยุกต์พลาสมา	79
22	สเปกตรัม XPS ที่ได้จากการวิเคราะห์พื้นผิวของแผ่นชีทพอลิเมอร์ชีวภาพก่อนประยุกต์พลาสมาด้วยความละเอียดสูง	80
23	สเปกตรัม XPS ที่ได้จากการวิเคราะห์พื้นผิวของแผ่นชีทพอลิเมอร์ชีวภาพหลังประยุกต์พลาสมาด้วยความละเอียดสูง	80
24	การจัดเรียงตัวของกลูโคสที่เชื่อมต่อพันธะบีตา 1,4 ไกลโคซิดิกของเซลลูโลส	81
25	การเชื่อมต่อของพันธะของแผ่นชีทพอลิเมอร์ชีวภาพผสม	81
26	กลไกการสร้างกลุ่มอนุมูลอิสระบนพื้นผิวของวัสดุระหว่างการประยุกต์พลาสมา	82
27	ลักษณะพื้นผิวของกระดาษ โดย (a) ก่อนประยุกต์พลาสมา (b-d) ที่ระยะเวลาประยุกต์พลาสมา 5 นาที และ (e-g) ที่ระยะเวลาประยุกต์พลาสมา 10 นาที ด้วยเทคนิค Atomic Force microscope (AFM) ในพื้นที่ 10×10 ไมโครเมตร	86
28	ลักษณะพื้นผิวของแผ่นชีทพอลิเมอร์ชีวภาพ โดย (a) ก่อนประยุกต์พลาสมา b-d) ที่ระยะเวลาประยุกต์พลาสมา 5 นาที และ (e-g) ที่ระยะเวลาประยุกต์พลาสมา 10 นาที ด้วยเทคนิค Atomic Force microscope (AFM) ในพื้นที่ 10×10 ไมโครเมตร	87
29	ลักษณะพื้นผิวของกระดาษโดย (a) ก่อนประยุกต์พลาสมา (b-d) ที่ระยะเวลาประยุกต์พลาสมา 5 นาที และ (e-g) ที่ระยะเวลาประยุกต์พลาสมา 10 นาทีด้วยเทคนิค Scanning Electron Microscopy (SEM) กำลังขยาย 3,000 เท่า	88
30	ลักษณะพื้นผิวของแผ่นชีทพอลิเมอร์โดย (a) ก่อนประยุกต์พลาสมา (b-d) ที่ระยะเวลาประยุกต์พลาสมา 5 นาที และ (e-g) ที่ระยะเวลาประยุกต์พลาสมา 10 นาทีด้วยเทคนิค Scanning Electron Microscopy (SEM) ที่กำลังขยาย 3,000 เท่า	89

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพผนวกที่		หน้า
ก1	ด้านหน้าของเครื่องพลาสมาแบบความดันต่ำ	118
ก2	แชมเบอร์ทรงสี่เหลี่ยม ด้านหน้าเป็นฝาซึ่งสามารถเปิดปิดในลักษณะบานพับได้	118
ก3	ด้านหลังของเครื่องกำเนิดพลาสมาแบบความดันต่ำ ซึ่งประกอบด้วย (ก) ตู้จ่ายกระแสไฟฟ้าให้แก่เครื่องพลาสมา โดยรองรับแหล่งกำเนิดไฟฟ้าชนิด 220 VACและ (ข)มีท่อสำหรับแก๊ส เพื่อส่งเข้าแชมเบอร์ ซึ่งสามารถรองรับแก๊สได้สามชนิด	119
ก4	แหล่งกำเนิดพลังงานชนิดพลาสมา ประกอบด้วย (ก) ตัวปรับสัญญาณแบบอัตโนมัติ และ(ข) แหล่งจ่ายไฟฟ้าแบบคลื่นความถี่วิทยุ	119

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

การปรับปรุงสมบัติการต้านทานน้ำของกระดาษรีไซเคิลและเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชผสมโดยพลาสมาเฮกซะฟลูออโรพรอพิลีน

The Improvement of Water Resistance Property of Recycled Paper and Thermoplastic Starch Blend by C_3F_6 Plasma

คำนำ

เนื่องจากในปัจจุบันผู้บริโภคตระหนักถึงปัญหาที่มีต่อสภาวะแวดล้อมมากขึ้น เช่น ปัญหาขยะ และปัญหามลภาวะด้านต่างๆ จึงทำให้อุตสาหกรรมหันมาให้ความสนใจเกี่ยวกับการผลิต การออกแบบ และการใช้ประโยชน์จากผลิตภัณฑ์ที่พัฒนามาจากวัสดุที่ผลิตได้จากแหล่งธรรมชาติ มีความเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม และย่อยสลายได้เองตามธรรมชาติ (Ragaert *et al*., 2014; Hanani *et al*., 2014) เช่น พลาสติกที่ผลิตมาจากแป้ง หรือเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช(thermoplastic starch, TPS) (Simão *et al*., 2006; Simão *et al*., 2009) เซลลูโลส (cellulose) (Thorvaldsson *et al*., 2012) ไคโตซาน (chitosan) (Chang and Chian, 2013) รวมทั้งพลาสติกชีวฐานที่มีจำหน่ายเชิงการค้าในปัจจุบัน เช่น พอลิแลกติกแอซิด (polylactic acid, PLA) พอลิบิวทิลีนอะดิเพท-โค-เทเรฟทาเลท (poly (butylene adipate-co- terephthalate, PBAT) พอลิไฮดรอกซิลบิวทีเรต (polyhydroxy-butyrate, PHB) (Rhim *et al*., 2007; Yang *et al*., 2013) เป็นต้น วัสดุเหล่านี้ผลิตมาจากวัตถุดิบที่สามารถผลิตทดแทนขึ้นใหม่ได้ในธรรมชาติ (renewable resource) เช่น ผลิตมาจากพืช จำพวกข้าวโพด มันสำปะหลัง และอ้อย เป็นต้น

การใช้พลาสติกชีวภาพเป็นทางเลือก มีแนวโน้มการเติบโตสูงตามกระแสโลกที่ต้องการผลิตภัณฑ์ที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม หลายประเทศเริ่มมีกฎระเบียบในการจัดการพลาสติกและมีการส่งเสริมการผลิตพลาสติกชีวภาพ สนับสนุนให้มีการวิจัยเพื่อใช้พืชหรือวัสดุที่เหมาะสมในการผลิตพลาสติกชีวภาพ ที่ไม่เป็นอันตรายต่อผู้บริโภคและเป็นการอนุรักษ์สิ่งแวดล้อมในระยะยาว (เยาวภา, 2554; Mohanty *et al*., 2013) กระดาษเป็นวัสดุที่ผลิตจากวัตถุดิบที่สามารถผลิตทดแทนขึ้นใหม่ได้ในธรรมชาติอีกประเภทหนึ่ง ที่มีการใช้งานแพร่หลายมาอย่างต่อเนื่อง และมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เป็นผลเนื่องมาจากกระแสอนุรักษ์สิ่งแวดล้อม จึงทำให้บรรจุภัณฑ์ที่ทำมาจากกระดาษได้รับความนิยมเพิ่มมากขึ้นโดยลำดับ ทั้งนี้พบว่าในปี พ.ศ. 2554 ปริมาณการใช้กระดาษขยายตัวเพิ่มขึ้น ถึงร้อยละ 5-7

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

นอกจากนี้การขยายตัวเป็นผลมาจากภาวะเศรษฐกิจที่ปรับตัวดีขึ้น ทั้งภาคครัวเรือนและการผลิตทำให้ความต้องการใช้กระดาษเพิ่มมากขึ้น โดยเฉพาะบรรจุภัณฑ์เพื่อการขนส่งและสิ่งพิมพ์ (สำนักงานเศรษฐกิจอุตสาหกรรม, 2554) อย่างไรก็ตามทั้งพลาสติกชีวภาพและกระดาษมีข้อจำกัด คือ มีความไวต่อความชื้น ส่งผลให้ความแข็งแรงลดลง และไม่สามารถปกป้องผลิตภัณฑ์ภายในได้

การปรับสภาพผิวของวัสดุ (surface modification) เพื่อเพิ่มคุณสมบัติด้านต่างๆ หรือเพื่อให้สามารถใช้ประโยชน์ได้หลากหลาย แรงผลักดันในการปรับสภาพผิวของวัสดุชีวฐาน ส่วนหนึ่งเกิดจากความต้องการของอุตสาหกรรม เพื่อปรับปรุงคุณภาพของวัสดุชีวฐานให้ใช้งานได้ตามความต้องการ ในการประยุกต์ใช้งานที่หลากหลายมากขึ้น (Kostov *et al*., 2014) สำหรับอุตสาหกรรมบรรจุภัณฑ์การปรับสภาพผิวของวัสดุมีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาสมบัติด้านต่างๆ เช่น สมบัติการต้านทานน้ำ สมบัติการกีดขวางต่อแก๊สหรือไอน้ำ หรือสมบัติทางกายภาพ เป็นต้น การปรับสภาพผิวของวัสดุมีด้วยกันหลากหลายวิธี เช่น ทางกายภาพ ทางเคมี หรือทางกล ซึ่งการเลือกใช้เทคนิคที่เหมาะสม ขึ้นกับชนิดของวัสดุ และจุดประสงค์ของการปรับสภาพผิว แต่ละวิธีมีข้อดีข้อเสียที่แตกต่างกัน เทคโนโลยีการปรับสภาพผิวบางประเภท อาจส่งผลกระทบด้านมลภาวะต่อสิ่งแวดล้อม ใช้พลังงานสูง หรือ มีของเสียที่เหลือทิ้ง การวิจัยและพัฒนาในการปรับสภาพผิววัสดุจึงมุ่งเน้นการเลือกใช้เทคโนโลยีสะอาด ที่มีประสิทธิภาพ เช่นเทคโนโลยีพลาสมาในการปรับสภาพผิว (Amaral *et al.,* 2013; Han *et al*., 2011) ซึ่งการใช้เทคโนโลยีพลาสมา กำลังได้รับความสนใจเป็นอย่างมากเพราะเป็นเทคโนโลยีที่สะอาด สามารถใช้ปรับสภาพผิวได้กับวัสดุที่หลากหลาย (Jordá-Vilaplana *et al*., 2014) เช่น พอลิเมอร์ เส้นใย และโลหะ เป็นต้น กระบวนการของเทคโนโลยีพลาสมาเป็นวิธีการปรับสภาพผิวที่แห้ง จึงไม่ส่งผลเสียต่อวัสดุที่เป็นเส้นใยหรือวัสดุที่ไม่ทนความร้อน เนื่องจากเทคโนโลยีพลาสมาไม่มีการใช้สารเคมี หรือตัวทำละลายที่เป็นอันตราย (Campo *et al.,* 2011)

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นการใช้เทคโนโลยีพลาสมาเพื่อปรับสภาพผิวของวัสดุชีวฐาน เพื่อเพิ่มคุณสมบัติในการต้านทานน้ำ และสังเกตการเปลี่ยนแปลงสมบัติด้านอื่นๆ โดยเลือกตัวแทนของวัสดุชีวฐานในการวิจัย คือ กระดาษคราฟท์และพอลิเมอร์ชีวภาพ เนื่องจากมีแนวโน้มการเติบโตสูง และถือเป็นวัสดุหลักที่มีการใช้งานในอุตสาหกรรมบรรจุภัณฑ์ ทั้งนี้เพื่อเปรียบเทียบความแตกต่างสำหรับสมบัติการต้านทานน้ำของวัสดุทั้งสองหลังการประยุกต์พลาสมา งานวิจัยยังมุ่งเน้นศึกษาประสิทธิภาพการประยุกต์พลาสมา C_3F_6 เทียบกับงานวิจัยก่อนหน้านี้ ที่ใช้แก๊สตั้งต้นพลาสมาชนิดอื่น รวมทั้งศึกษากลไกการเปลี่ยนแปลงสภาพผิวของวัสดุทั้งสองประเภทที่เกิดจากการประยุกต์พลาสมา C_3F_6

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาอิทธิพลของกำลังคลื่นวิทยุ และระยะเวลาของพลาสมาเฮกซะฟลูออโรพรอพิลีน (C_3F_6) ต่อความสามารถในการต้านทานน้ำของวัสดุชีวฐาน

2. เพื่อศึกษาอิทธิพลของกำลังคลื่นวิทยุ และระยะเวลาในการประยุกต์พลาสมาเฮกซะฟลูออโรพรอพิลีน (C_3F_6) ต่อสมบัติเชิงกล (mechanical properties) สมบัติการกีดขวาง (barrier properties) ของวัสดุชีวฐาน

3. เพื่อเปรียบเทียบอิทธิพลของการประยุกต์พลาสมาเฮกซะฟลูออโรพรอพิลีน (C_3F_6) บนวัสดุชีวฐานในกลุ่มกระดาษและพอลิเมอร์ชีวภาพ

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

การตรวจเอกสาร

วัสดุชีวฐาน

1. ความหมายของวัสดุชีวฐาน

Haugaard *et al*. (2002) ให้คำนิยามของวัสดุชีวฐาน คือ วัสดุที่ดัดแปลงหรือมาจากแหล่งทรัพยากรที่สามารถทดแทนได้ ซึ่งมีความสามารถแตกสลายทางชีวภาพได้ (biodegradability) เป็นเพียงส่วนหนึ่งของสมบัติโดยรวมของวัสดุชีวฐานเท่านั้น เพราะวัสดุที่ย่อยสลายได้ไม่จำเป็นต้องเป็นวัสดุชีวฐานก็ได้

สมาคมการทดสอบและวัสดุของประเทศสหรัฐอเมริกา หรือ ASTM (The American Society for Testing and Materials) ได้ให้คำนิยามของวัสดุชีวฐานว่าเป็นวัสดุที่เป็นสารอินทรีย์มีส่วนประกอบเป็นธาตุคาร์บอนได้มาจากแหล่งทรัพยากรที่ทดแทนได้ (renewable resource) ผ่านทางกระบวนการทางชีวภาพ เช่น จากพืชหรือมูลสัตว์

Sustainable Biomaterials Collaboraties (SBC) ให้คำนิยามของวัสดุชีวฐานว่าเป็นวัสดุที่มาจากสิ่งมีชีวิต เช่น ผลิตผลและเศษเหลือจากการเกษตร พืช และสาหร่าย เป็นต้น

2. ประเภทของวัสดุชีวฐาน

วัสดุชีวฐานสามารถแบ่งออกเป็น 3 ประเภทใหญ่ๆ ขึ้นอยู่กับต้นกำเนิด (Petersen *et al.*, 1999) แสดงดังภาพที่ 1 ได้แก่

2.1 วัสดุชีวฐานที่สกัดโดยตรงจากชีวมวล (biomass)

วัสดุชีวฐานประเภทนี้สามารถหาได้ง่ายจากการสกัดจากผลผลิตทางเกษตร ไม่ว่าจะเป็นจากพืชหรือสัตว์ โดยธรรมชาติของวัสดุชีวฐานประเภทนี้จะมีสมบัติชอบน้ำ (hydrophilic) และมีความเป็นผลึกสูง จึงทำให้ยากต่อการขึ้นรูป และการแปรรูป โดยเฉพาะการนำมาเป็นภาชนะบรรจุ เนื่องจากวัสดุชีวฐานประเภทนี้ไวต่อความชื้น แต่ในทางกลับกันมีการสกัดกั้นการซึมผ่านของแก๊สที่ดี

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

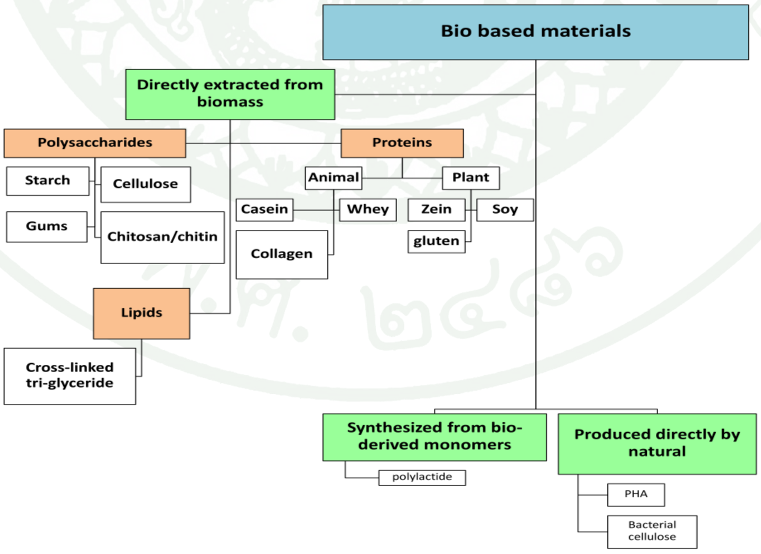
ตัวอย่างวัสดุชีวฐาน ประเภทนี้คือ พอลิแซ็กคาไรด์ เช่น แป้ง (starch) และ เซลลูโลส (cellulose) ส่วนในกลุ่มของโปรตีน เช่น เคซีน (cesin) และ กลูเตน (gluten) เป็นต้น

2.2 วัสดุชีวฐานที่มาจากการสังเคราะห์ทางเคมีของมอนอเมอร์ชีวฐาน

วัสดุชีวฐานประเภทนี้ที่เป็นที่รู้จักกันดีคือ พอลิแลคติกแอซิด (polylactic acid, PLA) เป็นพอลิเมอร์ที่มีใช้ในทางด้านอุตสาหกรรม โดยมอนอเมอร์ของพอลิแลคติกแอซิดมากจากกระบวนการหมัก (fermentation) ของคาร์โบไฮเดรต ซึ่งคาร์โบไฮเดรตได้มาจากผลิตผลทางการเกษตร เช่น ข้าวโพด ข้าวสาลี ซึ่งราคาของวัตถุดิบเหล่านี้มาราคาถูกและกากที่เหลือจากการหมักก็นำมาเป็นอาหารสัตว์ได้อีกด้วย

2.3 วัสดุชีวฐานที่ผลิตมาจากการดัดแปลงพันธุกรรมของจุลินทรีย์

วัสดุชีวฐานประเภทนี้ผลิตโดยจุลินทรีย์หรือการดัดแปลงพันธุกรรมของแบคทีเรีย ตัวอย่างเช่นพอลิไฮดรอกซิลอัลคาโนเอต (polyhydroxyalkanoates, PHAs) และ พอลิไฮดรอกซิลบิวทาเรต (polyhydroxybutyrate, PHB) ซึ่งพอลิเมอร์เหล่านี้ยังต้องมีการพัฒนา เพื่อนำมาใช้เป็นภาชนะบรรจุได้อย่างมีประสิทธิภาพ



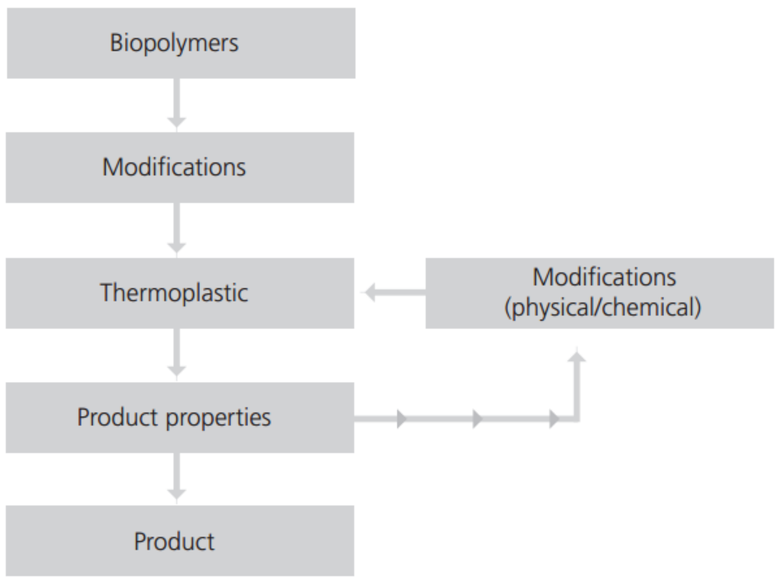
ภาพที่ 1 การแบ่งประเภทของวัสดุชีวฐานตามต้นกำเนิด

ที่มา: ดัดแปลงจาก Chandra and Rustgi (1999)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

3. การปรับสภาพผิวของวัสดุชีวฐาน

เนื่องจากในปัจจุบันมีการใช้ประโยชน์จากวัสดุชีวฐานที่หลากหลายในทางอุตสาหกรรม จึงมีวิธีหลากหลายเพื่อใช้ในการปรับปรุงพื้นผิวของวัสดุชีวฐานให้เหมาะสมกับการใช้งาน เนื่องจากการนำวัสดุชีวฐานมาใช้ประโยชน์ทางด้านต่างๆนั้น ยังมีข้อจำกัดในหลายๆด้าน เช่น ความทนต่อความร้อน ความแข็งแรง และความไวต่อความชื้น ซึ่งสิ่งเหล่านี้ส่งผลให้มีการใช้วัสดุชีวฐานยังไม่แพร่หลาย ดังนั้น การใช้ประโยชน์จากวัสดุชีวฐานนั้น จำเป็นต้องมีการปรับสภาพผิวก่อน หรือปรับปรุงสมบัติในด้านต่างๆ ทั้งนี้การปรับสภาพผิวของวัสดุชีวฐานขึ้นอยู่กับจุดประสงค์การใช้งานแต่ละอย่างด้วย เช่น วัสดุชีวฐานบางประเภทมีสมบัติชอบน้ำ และไวต่อความชื้นจากสิ่งแวดล้อม ทำให้ความแข็งแรงของวัสดุลดลง และไม่สามารถนำไปใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพมากนัก การปรับสภาพผิวของวัสดุชีวฐานจึงเป็นสิ่งจำเป็นก่อนนำไปใช้งาน แสดงตามภาพที่ 2 เพื่อสามารถนำไปใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น หรือปรับสภาพผิวเพื่อเร่งให้เกิดการย่อยสลายของวัสดุ เป็นต้น ซึ่งแนวทางการปรับปรุงสมบัติของวัสดุชีวฐาน มีดังนี้



ภาพที่ 2 ขั้นตอนกระบวนการผลิตวัสดุชีวฐาน

ที่มา: Weber (2000)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

4. แนวทางการปรับสภาพผิววัสดุชีวฐาน

4.1 เกิดจากการแตกตัวของแก๊ส (ionization gas treatment) ประกอบด้วยแก๊สที่มีความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยา เช่น อนุมูลอิสระ อิเล็กตรอน และโมเลกุลที่อยู่ในสถานะกระตุ้น เช่น เทคนิคพลาสมา ซึ่งเป็นเทคนิคเกี่ยวกับการแตกตัวของโมเลกุลแก๊ส แล้วกลายเป็นแก๊สที่มีประจุ เข้าทำปฏิกิริยาบนผิวของพอลิเมอร์ ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงที่ผิวหน้าของพอลิเมอร์ (Ooij and Luo, 2002) เช่น Jordá-Vilaplana *et al.* (2014) ศึกษาเกี่ยวกับเทคนิคพลาสมาแบบความดันบรรยากาศที่ส่งผลต่อพลังงานผิวของฟิล์มพอลิแลคติกแอซิด เพื่อการใช้ประโยชน์จากฟิล์มพอลิแลคติกแอซิดด้านต่างๆในทางอุตสาหกรรม เช่น การพิมพ์ หรือเพิ่มสมบัติการต้านทานน้ำ เป็นต้น นอกจากนี้เทคนิคพลาสมาสามารถนำมาใช้ในสายการผลิตแบบต่อเนื่องและเป็นเทคนิคที่ไม่ก่อให้เกิดของเสียในกระบวนการอีกด้วย อีกงานวิจัยที่ Kim and Masuokab (2009) ได้ศึกษาผลของพลาสมาด้วยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์บนฟิล์มพอลิแลคติกแอซิด และฟิล์มพอลิไฮดรอกซิลบิวทีเรตต่อสมบัติการย่อยสลาย ซึ่งพบว่าภายหลังประยุกต์พลาสมา ฟิล์มทั้งสองชนิดเกิดการเปลี่ยนแปลงที่ผิวหน้า คือ มีความเป็นขั้วมาก ความขรุขระมากขึ้น และมีการย่อยสลายมากขึ้น เนื่องจากพลาสมาทำให้โครงสร้างภายในพอลิเมอร์ถูกทำลาย และมีหมู่ฟังก์ชันใหม่ คือหมู่คาร์บอกซิลิก และหมู่คาร์บอนิก ซึ่งทั้งสองหมู่ฟังก์ชันนี้เข้าไปทำให้สายโซ่พอลิเมอร์แตกออก อีกงานวิจัยของ Rhim (2013) ทำการศึกษาการเคลือบซิลเวอร์ (silver) บนฟิล์มพอลิแลคติกแอซิดด้วยเทคนิคสปัตเตอริ่ง พบว่า ภายหลังการเคลือบความขรุขระของฟิล์มพอลิแลคติกแอซิดไม่มีความแตกต่างกับก่อนการเคลือบ แต่ความทึบแสงของฟิล์มเพิ่มขึ้น เนื่องจากการเคลือบด้วยซิลเวอร์ ทำให้เกิดชั้นฟิล์มโลหะ และชั้นฟิล์มโลหะส่งผลให้สมบัติการซึมผ่านแก๊สออกซิเจนและไอน้ำดีขึ้นเช่นกัน เพราะชั้นฟิล์มโลหะช่วยลดการแพร่ผ่านของแก๊สและลดอัตราการแพร่ด้วย

4.2 กระบวนการทางเคมี (chemical reactions) เกิดได้ทั้งในสถานะแก๊ส และของเหลวเกี่ยวกับการเกิดปฏิกิริยาทางเคมีที่ผิวหน้าของพอลิเมอร์ เช่น การเคลือบพอลิเมอร์ด้วยสารละลาย หรือ การใช้สารเคมีเพื่อปรับหมู่ฟังก์ชันที่ผิวของพอลิเมอร์ เช่น ในงานวิจัยของ Khwaldia *et al.*(2014) ศึกษาผลของการเคลือบกระดาษด้วยเคซีเนต และไคโตซาน พบว่าการเคลือบเคซีเนตเป็นชั้นแรกและเคลือบไคโตซานเป็นชั้นที่สอง ส่งผลให้ค่าการซึมผ่านของไอน้ำต่ำกว่าการเคลือบด้วยเคซีเนตเพียงชั้นเดียว เนื่องจากเกิดปฏิกิริยาระหว่างไคโตซานและเคซีเนต ทำให้เกิดเป็นชั้นพอลิเมอร์และเข้าอุดช่องว่างของกระดาษ จึงทำให้การแพร่ของไอน้ำลดลง ส่วน Sane and Ratcharak (2014) ศึกษาการเคลือบด้วยพอลิ(2,2,2-ไตรฟลูออโรเอทิลเมทาคริเลท) โดยวิธีกระบวนขยายตัวอย่างรวดเร็วของสารละลายเหนือการขยายตัวอย่างรวดเร็วของไหลเหนือวิกฤต (Rapid Expansion of

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

Supercritical Solutions, RESS) บนแผ่นชีทพอลิเมอร์ผสมซึ่งประกอบด้วยเทอรโมพลาสติกสตาร ชและพอลิ(บิวทิลีนอะดิเพท-โค-เทอเรฟทาเลท) เพื่อศึกษาสมบัติไม่ชอบน้ำของตัวอย่าง โดยพบว่า การเคลือบด้วยสารฟลูออโรพอลิเมอร์ดังกล่าวส่งผลให้ค่ามุมสัมผัสมีค่าเพิ่มสูงขึ้น และอัตราการซึมผ่านของไอน้ำลดลง นอกจากนี้การเคลือบแบบนี้ทำให้ได้ชั้นเคลือบที่บาง และมีการกระจายตัวของอนุภาคของสารฟลูออโรพอลิเมอร์อย่างสม่ำเสมอ

4.3 กระบวนการกราฟพอลิเมอร์ไรเซชั่น (graft polymerization) ซึ่งเกิดได้จากการใช้สารเคมีหรือการใช้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า เช่น รังสียูวี และรังสีแกรมม่า ทำให้เกิดการเชื่อมต่อของสายโซ่ โดยใช้รังสียูวี เป็นต้น เช่น ในงานวิจัยของ Subedi *et al.* (2009) ที่ได้ทำการศึกษาผลของการปรับสภาพผิวพอลิคาร์บอเนตด้วยรังสียูวีที่ความยาวคลื่น 254 และ 356 นาโนเมตร พบว่าความสามารถเปียกผิวของพอลิคาร์บอเนตหลังการปรับสภาพผิว มีค่าเพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากการกระตุ้นด้วยรังสียูวี ทำให้เกิดอนุมูลอิสระซึ่งเข้าไปทำฏิกิริยาผิวที่ผิวของพอลิเมอร์ จึงเกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมี ส่งผลให้ความสามารถในการเปียกผิวเพิ่มขึ้นนั่นเอง ในงานวิจัยของ Zhu *et al.* (2014) ใช้วิธีการกราฟระหว่าง epoxidized itaconic acid (EIA) และ Epicard บนพื้นผิวของฟิล์มแป้งที่ผสมกับพอลิแลคติกแอซิด (starch blend PLA) พบว่าหลังการ graft พื้นผิวของพอลิเมอร์มีแรงยึดของรอยต่อระหว่างเฟส (Interfacial adhesion) ระหว่างแป้งกับพอลิแลคติกแอซิดดีขึ้น เพราะอิพรอกซีได้เข้าไปสร้างพันธะระหว่างแป้งและพอลิแลคติกแอซิดให้ดียิ่งขึ้น ส่วน Khan *et al.* (2006) พบว่าการใช้รังสียูวีสามารถเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการ graft ระหว่างอะคลิริกมอนอเมอร์กับฟิล์มที่ผสมจากแป้งสาคูกับพอลีไวนิลแอลกอฮอร์ เนื่องจากรังสียูวีทำให้เกิด cross-linking ของสายโซ่พอลิเมอร์ได้ดีขึ้น ส่งผลให้ความแข็งแรงของฟิล์มเพิ่มมากขึ้น แต่ยังคงรักษาสมับติการย่อยสลายได้อีกด้วย

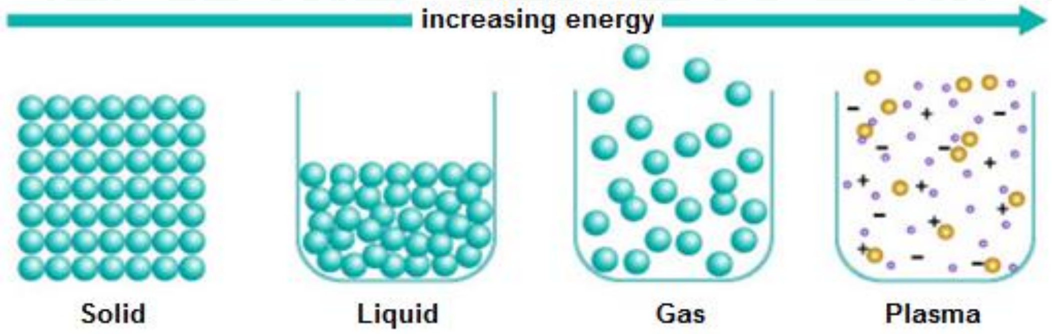
จากวิธีการปรับสภาพพื้นผิววัสดุชีวฐานที่กล่าวมาในข้างต้น พบว่าการปรับสภาพผิววัสดุชีวฐานด้วยวิธีการประยุกต์พลาสมาเป็นวิธีการปรับสภาพผิวประเภทหนึ่งที่น่าสนใจ เนื่องจากเป็นเทคโนโลยีที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม สามารถเลือกใช้แก๊สที่เหมาะสมกับการปรับสภาพผิววัสดุชีวฐานได้หลากหลายประเภท นอกจากนี้เทคโนโลยีพลาสมานั้นมีกระบวนการปรับสภาพผิวที่แห้ง ไม่ต้องใช้น้ำหรือตัวทำละลายอื่นในการปรับสภาพผิว ส่งผลกระทบต่ำต่อสิ่งแวดล้อม และเป็นการลดต้นทุนการผลิต (Sarmadi, 2013)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

พลาสมา

1. ความหมายของพลาสมา

เพ็ญโฉม (2554) กล่าวว่า สสารโดยทั่วไปมี 3 สถานะ ได้แก่ ของแข็ง ของเหลว และแก๊ส ซึ่งสสารเหล่านี้เมื่อได้รับพลังงานหรือลดพลังงานจะเกิดการเปลี่ยนสถานะ ทั้งนี้มีการนิยามพลาสมาว่าเป็นสสารลำดับที่สี่ คือมีสมบัติคล้ายทั้งแก๊สและของเหลว (Burm, 2012; Amaral *et al.,* 2013) แสดงตามภาพที่ 3 โดยพลาสมาเกิดจากการให้พลังงาน เช่น ความร้อนแก่แก๊ส จนเกิดการแตกตัวเป็นโมเลกุลหรืออะตอมของแก๊ส แล้วได้ผลิตภัณฑ์ออกมาเป็นไอออน (ions) อิเล็กตรอน (electrons) โฟตอน (photon) และอนุมูลอิสระ (free radicals) ซึ่งภายใต้สภาวะปกติ ไอออนและอิเล็กตรอนอาจกลับมารวมตัวกันได้ใหม่อย่างรวดเร็ว แต่ในสภาวะที่มีการจ่ายพลังงาน เช่น ความร้อนหรือไฟฟ้า อนุภาคในพลาสมาจะไม่เสถียร โดยเฉพาะอิเล็กตรอนที่มีพลังงานจลน์สูง และสามารถเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระ ส่งผลให้เกิดการชนระหว่างอิเล็กตรอนกับอนุภาคต่างๆที่อยู่รอบข้าง เช่น ไอออนของอะตอมหรือโมเลกุล หรืออิเล็กตรอนด้วยกันเอง ซึ่งในระหว่างเกิดการชนกัน จะเกิดการถ่ายทอดพลังงานออกมา แล้วมีพลังงานส่วนหนึ่งจะถูกคายออกมาในรูปของความร้อนหรือแสง จึงเห็นการเปล่งแสงคู่กับการเกิดพลาสมา จึงมีการนำพลาสมามาประยุกต์ใช้ประโยชน์กับวัสดุที่หลากหลาย เช่น หลอดไฟ โทรทัศน์ เส้นใย และฟิล์มเคลือบผิว เป็นต้น (Simão *et al.*, 2009; Campo *et al.,* 2011)



ภาพที่ 3 สถานะทั้งสี่ของสสาร

ที่มา: Atav (2013)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

2. ประเภทพลาสมา

พลาสมาแบ่งออกเป็น 2 ประเภทใหญ่ๆ คือ พลาสมาที่มีอยู่ตามธรรมชาติ (natural plasma) พบได้ในจักรวาล ส่วนอีกประเภทหนึ่งคือพลาสมาที่สร้างขึ้นในห้องปฏิบัติการ (laboratory plasma) ซึ่งสามารถแบ่งออกเป็น พลาสมาอุณหภูมิสูง (high temperature plasma) หรือพลาสมาฟิวชัน (fusion plasma) เป็นพลาสมาที่อยู่ในสมดุลความร้อนความร้อนเฉพาะที่ (local thermal equilibrium, LTE) โดยพลาสมาประเภทนี้ต้องการอุณหภูมิสูง เพื่อให้เกิดสมดุลทางความร้อน จึงทำให้ทุกสปีชีร์ในพลาสมามีอุณหภูมิเท่ากัน ในทางกลับกันพลาสมาอุณหภูมิต่ำ (low temperature plasma) หรือพลาสมาแก๊สดิสชาร์จ (gas discharge plasma) จัดอยู่ในกลุ่มพลาสมาที่ไม่อยู่ในสมดุลความร้อนเฉพาะที่ (non local thermal equilibrium, Non-LTE) คือทุกสปีชีร์ในพลาสมามีอุณหภูมิไม่เท่ากัน โดยอิเล็กตรอนมีอุณหภูมิสูงกว่าอนุภาคหนัก เช่น ไอออน อะตอม และโมเลกุล (Bogaerts *et al.,* 2002)

โดยทั่วไปพลาสมาอุณหภูมิต่ำหรือพลาสมาแก๊สดิสชาร์จ แบ่งออกเป็น 2 ประเภทหลักๆ คือ (Morent *et al.,* 2008)

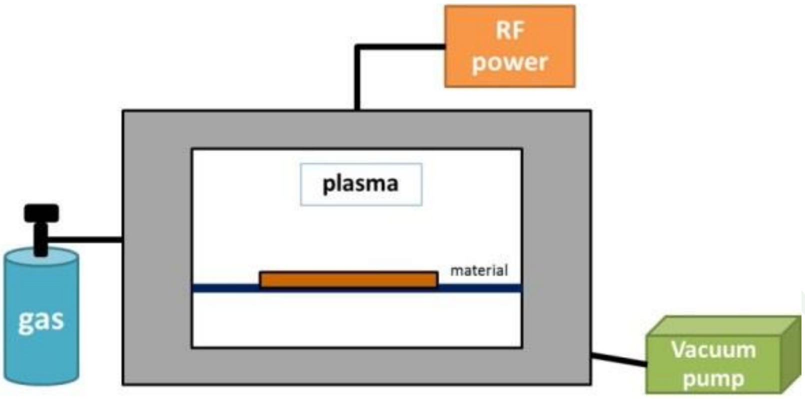
2.1 พลาสมาร้อน (thermal plasma) เป็นพลาสมาที่อิเล็กตรอนและอนุภาคต่างๆในระบบใช้ความร้อนสูง แต่พลาสมาแบบนี้ไม่สามารถใช้ได้กับการปรับสภาพผิวของวัสดุที่ไวกับความร้อน เช่น พอลิเมอร์

2.2 พลาสมาเย็น (non-thermal or cold plasma) เป็นพลาสมาที่ประกอบด้วยอนุภาคต่างๆใช้ความร้อนไม่มากในการกระตุ้นให้เกิดพลังงาน เนื่องจากพลาสมาระบบนี้ใช้ความร้อนไม่มากนัก จึงไม่ส่งผลเสียกับวัสดุที่ปรับสภาพผิว ทำให้สามารถนำมาใช้ได้กับวัสดุที่ไวต่อความร้อน เช่น พอลิเมอร์ชีวฐานต่างๆ นอกจากนี้ยังแบ่งประเภทของพลาสมาเย็น ออกเป็น 2 ประเภท คือ

2.2.1 การประยุกต์พลาสมาในระบบความดันต่ำหรือสุญญากาศ (Low pressure non-thermal plasma or vacuum plasma) คือ สภาวะพลาสมาที่เกิดมีความดันน้อยกว่าความดันบรรยากาศ ซึ่งในอนุภาคที่มีประจุจะผลิตพลาสมาเมื่อความดันแก๊สลดลง โดยโมเลกุลของแก๊สมีการแตกตัวเป็นไอออนที่อุณหภูมิห้องได้ ขณะที่อุณหภูมิของอิเล็กตรอนอิสระสูงถึง 30,000-100,000 เคลวิน ซึ่งเป็นเป็นสภาวะที่ผลิตอนุภาคพลาสมาต่างๆ ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ข้อดีที่สำคัญที่สุดของพลาสมาระบบนี้ คือ ไม่ส่งผลเสียต่อพื้นผิวของวัสดุ ความหนาของชั้นฟิล์มที่สามารถทำได้คือ 10

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

นาโนเมตร เกิดชั้นฟิล์มที่มีความเป็นเนื้อเดียวกัน (homogeneous film) และมีความบริสุทธิ์สูง (purity) เป็นสภาวะพลาสมาที่ใช้ปริมาณแก๊สน้อยจึงเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม ดังภาพที่ 4



ภาพที่ 4 ภาพจำลองการประยุกต์พลาสมาระบบความดันต่ำหรือสุญญากาศ

2.2.2 การประยุกต์พลาสมาความดันบรรยากาศ (Atmospheric pressure plasma) คือ สภาวะพลาสมาที่ใช้ความดันบรรยากาศในการทำให้เกิดพลาสมา ใช้พลังงานต่ำ ใช้เวลาในกระบวนน้อยกว่าเมื่อเทียบกับวิธีความดันต่ำ เพราะไม่ต้องเสียเวลาในการทำให้สภาวะเกิดสุญญากาศ (Lommatzsch and Ihde, 2009; Badyal *et al.*, 2003) แบ่งออกเป็น

ก. Filamentary Volume Barrier Discharge non thermal Plasma Treatment หรือการปรับสภาพผิวแบบ โคโรนา (corona treatment) เป็นการเตรียมผิวหน้าวัสดุ โดยใช้แรงดันไฟฟ้าที่สูง เพื่อให้โลเกลุลของแก๊สในอากาสแตกตัวระหว่างขั้วไฟฟ้าให้กลายเป็นไอออน ซึ่งไอออนที่เกิดขึ้นจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงที่ผิวหน้าของวัสดุ ส่วนใหญ่จะใช้ในทางอุตสาหกรรม เพื่อเพิ่มพลังงานพื้นผิวของพลาสติกและแผ่นอะลูมิเนียมฟรอยด์ อีกทั้งยังส่งผลให้เกิดความขรุขระที่ผิวหน้า ส่งผลให้ความสามารถในการเปียกผิวเพิ่มสูงขึ้น

ข. Volumetric Diffuse Non thermal Plasma Treatment เป็นการรวมวิธีการประยุกต์พลาสมาระหว่างแบบสุญญากาศและแบบความดันบรรยากาศ มีความใกล้เคียงกับวิธีปรับสภาพผิวแบบโคโรนา สามารถควบคุมการสร้างสภาวะและมีประสิทธิภาพมากกว่า โดยสร้างพลาสมาในระบบเปิด แล้วมีการใช้แก๊สเฉื่อย เช่น แก๊สอาร์กอน (Ar) หรือแก๊สฮีเลียม (He) เป็นแก๊สตัวพา (carrier gas) เพื่อให้เกิดกระแสพลาสมาอย่างสม่ำเสมอ (Cernáková *et al.*, 2006)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

3. ข้อดีของเทคโนโลยีพลาสมา

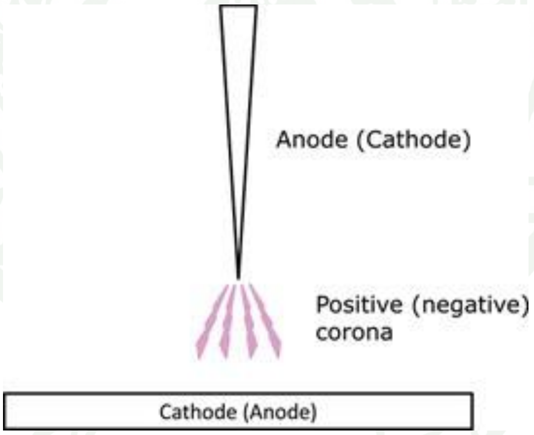
3.1 การประยุกต์พลาสมาสามารถปรับสภาพพื้นผิวของวัสดุเท่านั้น โดยการประยุกต์พลาสมาไม่ได้ส่งผลต่อโครงสร้างส่วนใหญ่ของวัสดุ

3.2 สามารถประยุกต์พลาสมาได้กับวัสดุทุกชนิด เช่น โลหะ พอลิเมอร์ เส้นใย สิ่งทอ เซรามิก และวงจรไฟฟ้า เป็นต้น

3.3 การเลือกใช้แก๊สที่แตกต่างกันในการประยุกต์พลาสมาส่งผลให้เกิดลักษณะการปรับสภาพผิวของวัสดุที่แตกต่างกัน

3.4 เทคโนโลยีพลาสมาเป็นกระบวนแบบแห้งที่ไม่ต้องใช้สารเคมี หรือตัวทำละลาย จึงไม่มีปัญหาเกี่ยวกับสารเคมีตกค้างบนพื้นผิวของวัสดุ และไม่มีปัญหาเกี่ยวกับการจัดการสารเคมีที่หลงเหลืออยู่

3.5 การปรับสภาพผิวด้วยพลาสมาสามารถเกิดการเปลี่ยนแปลงบนพื้นผิวที่ค่อนข้างสม่ำเสมอ สามารถเพิ่ม ลดการเปลี่ยนแปลงที่ผิวได้โดยปรับ พลังงานและระยะเวลาในการประยุกต์พลาสมา



ภาพที่ 5 การปรับสภาพผิววัสดุด้วยวิธีโคโรนา

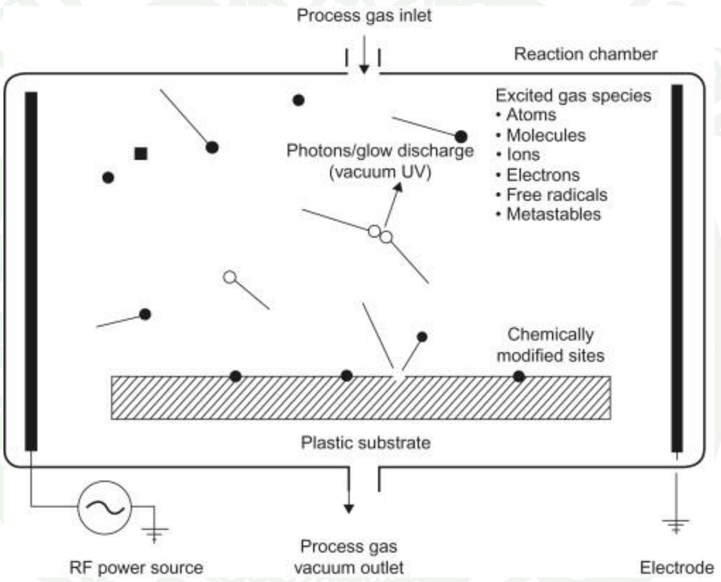
ที่มา : Kusano (2007)

4. กระบวนการปรับสภาพผิววัสดุด้วยพลาสมา

การปรับสภาพผิวด้วยพลาสมา หรือการประยุกต์พลาสมา เกิดจากการทำให้แก๊สที่ต้องการเกิดการแตกตัว มีประจุ (ionized gas) โดยแหล่งพลังงานที่ใช้ในการเกิดพลาสมา เช่น คลื่นวิทยุ คลื่น

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ไมโครเวฟ และคลื่นไฟฟ้ากระแสตรง (Getty, 2002) เมื่อปรับความดันบรรยากาศให้เหมาะสม แก๊สจะแตกตัวเป็นพลาสมา แล้วเกิดเป็นสถานะกระตุ้นของอนุภาคต่างๆ เช่น ไอออน อิเล็กตรอน และอนุมูลอิสระ ซึ่งอนุภาคเหล่านี้จะถูกกระตุ้นอยู่ตลอดเวลาและมีความไม่เสถียรสูง อนุภาคต่างๆ ที่ไม่เสถียรจะเข้าทำปฏิกิริยากับโมเลกุลของวัสดุที่ต้องการปรับสภาพผิว รูปแบบของปฏิกิริยามีหลายรูปแบบ ขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ เช่น ชนิดของแก๊สและประเภทของพลาสมา โดยสมบัติต่างๆของผิววัสดุที่ถูกประยุกต์ด้วยพลาสมาก็ขึ้นอยู่กับชนิดของแก๊สที่ใช้ในการสร้างพลาสมาด้วย สำหรับการประยุกต์พลาสมากับวัสดุที่ไวต่อความชื้น เช่น กระดาษ และพอลิเมอร์ชีวภาพ ต้องใช้แก๊สที่มีสมบัติความไม่ชอบน้ำ เพื่อทำให้ผิวหน้าของวัสดุสามารถต้านทานน้ำได้มากขึ้น (Ellinghorst, 2006)



ภาพที่ 6 การปรับสภาพผิววัสดุด้วยพลาสมา

ที่มา: Ebnesajjad (2014)

Hess et al. (2004) กล่าวว่าสารประกอบฟลูออรีน ทำให้ผิววัสดุสามารถต้านน้ำได้ โดยการไปลดพลังงานพื้นผิวของวัสดุ มีความเสถียรทางความร้อน และทนต่อแรงกระแทกได้ดี ตัวอย่างสารประกอบฟลูออรีน เช่น คาร์บอนเตตระฟลูออไรด์ (tetrafluoride, CF_4) เฮกซะฟลูออโรพรอพิลีน (hexafluoropropylene, C_3F_6) และซัลเฟอร์เฮกซะฟลูออไรด์ (sulferhexafluoride, SF_6) เป็นต้น ส่วนสารประกอบที่มีออกซิเจนและไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบ ทำให้วัสดุดูดซึมน้ำได้ดีขึ้น เพราะไปเกิดหมู่ฟังก์ชันของพอลิเมอร์ เช่น คาร์บอนิล ไฮดรอกซิล และอะมิโน ทำให้พลังงานที่ผิวของวัสดุมีค่าเพิ่มขึ้น ตัวอย่าง เช่น ออกซิเจน (O_2) โอโซน (O_3) คาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) และ ไนโตรเจนได

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ออกไซด์ (NO_2) เป็นต้น (Yuasa and Yara, 2006) การเปลี่ยนคุณสมบัติชอบน้ำ (hydrophilic) ไปเป็นคุณสมบัติไม่ชอบน้ำ (hydrophobic) ให้กับวัสดุ เป็นการเพิ่มหรือเติมหมู่ฟังก์ชัน (function groups) ที่ไม่มีขั้ว (non polar) ให้กับผิววัสดุ โดยเฉพาะพลาสมาฟลูออรีนที่เป็นการเพิ่มพันธะ C-F แทนที่พันธะของอะตอมคาร์บอนเดิมในโมเลกุลของวัสดุ ทั้งนี้ไอออนฟลูออรีนมีแนวโน้มจะเข้าแทนที่อะตอมออกซิเจนในกลุ่มคาร์บอนิล (carbonyl group) ที่เป็นโครงสร้างหลักของเส้นใยธรรมชาติ (ธีรวรรณ, 2549)

4.1 รูปแบบของการปรับสภาพผิววัสดุด้วยพลาสมา แบ่งออกเป็น 3 กลุ่ม ดังนี้ (Chan *et al.*, 1996)

4.1.1 การกัดกร่อน (etching)

พลาสมาอาจก่อให้การกัดกร่อนบนพื้นผิว ทำให้พื้นผิวของวัสดุขรุขระ(etching) มากขึ้น ซึ่งเกิดจากปฏิกิริยาระหว่างพื้นผิวของวัสดุและแก๊สที่ใช้ในระบบ เช่น การใช้แก๊สออกซิเจนกัดกร่อนผิวของวัสดุอินทรีย์ (organic materials) ออกซิเจนจะทำปฏิกิริยากับคาร์บอน และไฮโดรเจนบนผิววัสดุ แล้วได้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ แก๊สคาร์บอนมอนดอกไซด์ และน้ำ ในอุตสาหกรรมส่วนใหญ่จะใช้แก๊สออกซิเจน อาร์กอน และคาร์บอนเตตระฟลูออไรด์ (CF_4) ซึ่งทำให้พื้นผิวมีความขรุขระขนาดไมโครเมตรถึงนาโนเมตร (Kusano *et al.*, 2007) นอกจากนี้มีการใช้หลักการกัดกร่อน เพื่อปรับสภาพพื้นผิวของวัสดุที่มีพลังงานพื้นผิวต่ำ (low surface energy materials) ก่อนที่ทำการเคลือบด้วยเทคนิคอื่นๆ (Hess *et al.,* 2008; Favia *et al.,* 2003)

ในบางกรณีการใช้แก๊สที่มีฟลูออรีนเป็นองค์ประกอบ เช่น คาร์บอนเตตระฟลูออไรด์ (CF_4) หรือซัลเฟอร์เฮกซะฟลูออไรด์ (SF_6) ทำให้เกิดการทับถม (deposition) ของกลุ่มสารประกอบฟลูออรีน (fluorocarbon group) พร้อมทั้งเกิดการกัดกร่อนพื้นผิวของวัสดุร่วมด้วย ซึ่งกระบวนการนี้เป็นการผสมผสานระหว่างการกัดกร่อนและการเกิดฟังก์ชันนอลิเซชัน (functionalization) ซึ่งเป็นการปรับสภาพผิววัสดุทางเคมี โดยมีหมู่ฟังก์ชันที่เกิดปฏิกิริยาเฉพาะ (specific application) ซึ่งต่างจากพลาสมาพอลิเมอร์ไรเซชัน (plasma polymerization) เพราะพลาสมาพอลิเมอร์ไรเซชันเกิดจากการแตกตัว (ionization) การถูกกระตุ้น (excitation) และการแยกตัวออก (dissociation) ของแก๊สมอนอเมอร์ จากนั้นเกิดกระบวนการพอลิเมอร์ไรเซชันระหว่างแก๊สมอนอเมอร์ที่ถูกกระตุ้น และทับถมบนลงบนพื้นผิวของวัสดุจนเกิดเป็นชั้นฟิล์มบาง(Milella *et al.,* 2009; Lejeune *et al.,* 2010)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

4.1.2 พลาสมาพอลิเมอร์ไรเซชัน (plasma polymerization)

พลาสมาพอลิเมอร์ไรเซชัน เป็นกระบวนการที่ทำให้เกิดชั้นฟิล์มบางบนผิวของวัสดุ ซึ่งเกิดจากการแตกตัวของมอนอเมอร์ของแก๊สพลาสมา แล้วเกิดเกาะตัวกลายเป็นชั้นฟิล์มบางระดับนาโนเมตรบนวัสดุ ซึ่งชั้นฟิล์มบางนั้นเกิดจากการเชื่อมต่อของสายโซ่ จึงทำให้ไม่มีช่องว่าง (pinhole-free) ส่งผลให้มีสมบัติการกีดขวางที่ดีขึ้น นอกจากนี้ยังสามารถเกิดชั้นฟิลมได้ทั้งบนพอลิ-เมอร์ โลหะ แก้ว และเซรามิก (Pulpyte *et al.,* 2011) โครงสร้างของชั้นฟิล์มที่เกิดขึ้นค่อนข้างซับซ้อน เพราะขึ้นกับหลายปัจจัยเช่น ลักษณะของแชมเบอร์พลาสมา กำลังคลื่นไฟฟ้า ชนิดของวัสดุที่ต้องการประยุกต์พลาสมา อุณหภูมิ แก๊สที่ใช้ประยุกต์พลาสมาและความดัน (Ohkubo andInagaki, 1990)

การเกาะตัวของชั้นฟิล์มที่มาจากสารประกอบฟลูออรีน เช่น ฟลูออรีน (F_2) ไฮโดรเจนฟลูออไรด์ (HF) ไนโตรเจนไตรฟลูออไรด์ (NF_3) โบรมีนไตรฟลูออไรด์ (BrF_3) และ ซัลเฟอร์เตตระฟลูออไรด์ (SF_4) จะทำให้พื้นผิวมีพลังงานพื้นผิวต่ำลง ดังนั้นเมื่อใช้แก๊สในกลุ่มสารประกอบฟลูออรีน เพื่อประยุกต์พลาสมา แก๊สจะแตกตัวแล้วให้หมู่ CF_2 และ CF_3 ซึ่งพลังงานที่ผิวต่ำ จึงทำให้วัสดุมีสมบัติไม่ชอบน้ำ เมื่อเทียบกับหมู่ CH_2 และ CH_3 ที่พบบนวัสดุที่มีสมบัติชอบน้ำ (Hare *et al.,* 1954) วิธีการตรวจสอบสมบัติของชั้นฟิล์ม ส่วนใหญ่ใช้เทคนิควิเคราะห์ผิววัสดุ X-ray Photoelectron Spectroscopy (XPS) เพราะเทคนิคนี้จะแสดงหมู่ฟังก์ชันที่เกิดขึ้นหลังการประยุกต์พลาสมา พร้อมทั้งแสดงการเกิดการเชื่อมต่อของสายโซ่ได้อีกด้วย เช่น เมื่อใช้เมื่อใช้แก๊สพลาสมาในกลุ่มสารประกอบฟลูออรีน จะพบปริมาณของ CF_3 ที่เพิ่มขึ้น เป็นต้น (Chan *et al.,* 1996)

4.1.3 การเกิดปฏิริยาบนพื้นผิวของวัสดุ (surface reaction)

ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวของวัสดุนั้น สามารถเกิดขึ้นได้จากหลายรูปแบบ เช่น การเกิดปฏิกิริยาระหว่างหมู่สปีชีร์ในสภาวะแก๊สกับหมู่สปีชีร์บนพื้นผิวของวัสดุ หรือเกิดปฏิกิริยาในหมู่สปีชีร์บนพื้นผิวของวัสดุ ซึ่งสามารถผลิตหมู่ฟังก์ชันและเกิดการเชื่อมต่อของสายโซ่ (crosslinking) บนพื้นผิวของวัสดุ โดยส่วนใหญ่ใช้แก๊สแอมโมเนีย(NH_3) แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์(CO_2) แก๊สไนโตรเจน (N_2) และแก๊สออกซิเจน (O_2) เพื่อสร้างหมู่ที่เร่งให้เกิดปฏิกิริยา (active sites) เช่น หมู่ไฮ-ดรอกซิล (-OH) หมู่คาร์บอนิล (-COOH) หรือกลุ่มอะมิโน (-NH_2) บนพื้นผิวของวัสดุ (Kim and Masuoka, 2009) ซึ่งการเลือกชนิดของแก๊สจะส่งผลให้เกิดหมู่ฟังก์ชันที่แตกต่างกันบนพื้นผิวของวัสดุ

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

และทำให้วัสดุมีสมบัติเปลี่ยนแปลงไป เช่น ความสามารถการเปียกผิว หรือความสามารถการยึดติด เป็นต้น (Hotta *et al.*, 2013)

4.2 ปัจจัยที่ส่งผลต่อการปรับสภาพผิวของวัสดุด้วยวิธีพลาสมา

ผลของพลาสมาที่ส่งผลต่อพื้นผิวของวัสดุ ได้รับอิทธิพลจากแก๊สที่ใช้ประยุกต์พลาสมาและโครงสร้างทางเคมีของวัสดุ โดยทั่วไปแล้วการปรับสภาพพื้นผิวโดยวิธีพลาสมาค่อนข้างซับซ้อน จึงก่อให้เกิดปฏิกิริยาบนพื้นผิววัสดุที่หลากหลาย นอกจากนี้ความคงสภาพ(stability)ของวัสดุหลังผ่านการประยุกต์พลาสมาก็เป็นปัจจัยหนึ่งที่สำคัญ ซึ่งขึ้นอยู่กับวิธีการปรับสภาพด้วยพลาสมาและสภาวะการเก็บวัสดุ ปัจจัยที่ส่งผลต่อการปรับสภาพผิวของวัสดุด้วยวิธีพลาสมา สามารถอธิบายได้ดังนี้

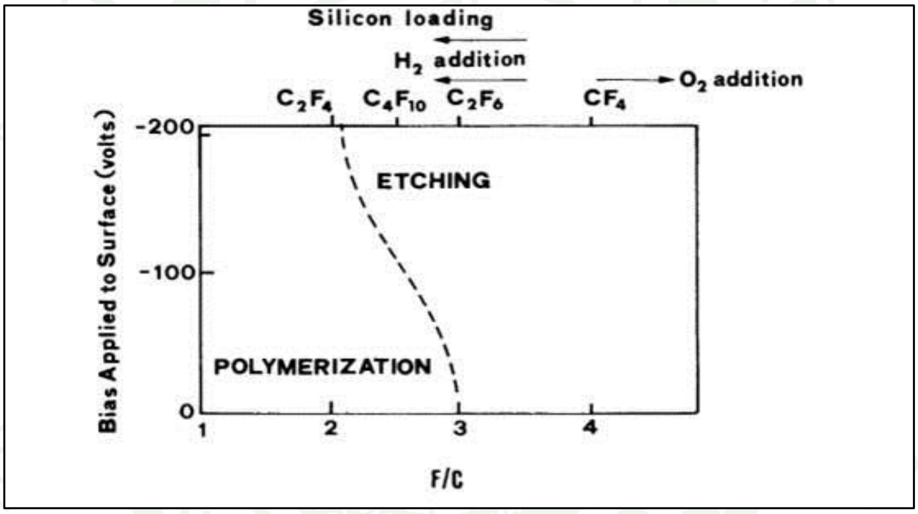
4.2.1 ชนิดของแก๊สที่ประยุกต์พลาสมา

การประยุกต์พลาสมามีการเลือกแก๊สหลากหลายชนิด โดยทั่วไปแล้วแก๊สที่เป็นที่นิยมใช้ คือ ออกซิเจน ไนโตรเจน คาร์บอนไดออกไซด์และอากาศ ซึ่งแก๊สแต่ละชนิดส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงผิววัสดุที่แตกต่างกัน ปัจจัยที่สำคัญในการเลือกใช้แก๊สเพื่อประยุกต์พลาสมา หนึ่งคือเมื่อแก๊สเกิดการแตกตัวในสภาวะพลาสมาแล้ว เกิดหมู่ฟังก์ชันที่ต้องการและมีความเฉพาะเจาะจง ซึ่งสามารถทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงบนพื้นผิวของวัสดุ สองคือแก๊สพลาสมามักจะก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงบนพื้นผิวของวัสดุในรูปแบบอย่างง่ายมากกว่าโครงสร้างที่ซับซ้อน

สำหรับงานวิจัยนี้เลือกใช้แก๊สที่มีฟลูออรีนเป็นองค์ประกอบ ซึ่งแก๊สที่มีฟลูออรีนเป็นองค์ประกอบสามารถทำให้พื้นผิวเกิดการกัดกร่อนได้ และสามารถทำให้เกิดฟิล์มบางของฟลูออรีนได้ ซึ่งฟิล์มประเภทนี้มีการยึดติดกับพื้นผิวได้หลากหลาย และเป็นฟิล์มที่ทำให้พื้นผิวของวัสดุมีพลังงานที่ผิวต่ำ นอกจากนี้แก๊สประเภทนี้ยังส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบบนพื้นผิวของวัสดุได้ คือ เกิดหมู่ฟังก์ชันใหม่ หรือเกิดการเชื่อมต่อของสายโซ่โมเลกุล (crosslinking) ซึ่งภายใต้สภาวะพลาสมา แก๊สที่มีฟลูออรีนเป็นองค์ประกอบจะเกิดการแตกตัวเป็น 3 กลุ่ม คือ กลุ่มอนุมูลอิสระที่มีประจุ (charged particles) เช่น ไอออนและอิเล็กตรอน ทำให้เกิดการขาดของสายโซ่โมเลกุล กลุ่มที่สองคืออะตอมฟลูออรีน ซึ่งทำให้เกิดกัดกร่อนที่ผิวของวัสดุ และกลุ่มที่สามคือกลุ่มอนุมูลอิสระของคาร์บอนและฟลูออรีน (CF_x radicals) ซึ่งในแก๊สฟลูออโรคาร์บอนแต่ละชนิด จะผลิตกลุ่มอนุมูลอิสระของคาร์บอนและฟลูออรีนได้จำนวนและชนิดที่แตกต่างกัน (McCord *et al.,* 2003)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ทั้งนี้รูปแบบการปรับสภาพพื้นผิวของวัสดุด้วยแก๊สที่มีฟลูออรีนเป็นองค์ประกอบมีความแตกต่างกัน เพราะยังขึ้นกับสัดส่วนของคาร์บอนและฟลูออรีนด้วย โดยแก๊สที่มีฟลูออรีนและคาร์บอนเป็นองค์ประกอบ ซึ่งมีสัดส่วนของฟลูออรีนต่อคาร์บอนประมาณมากกว่าสาม จะทำให้เกิดกัดกร่อนของพื้นผิวมากกว่าจะเกิดการเกาะตัวของชั้นฟิล์ม เช่น แก๊ส CF_4 ซึ่งมีสัดส่วนของฟลูออรีนต่อคาร์บอนมากกว่าสามทำให้แก๊สดังกล่าวมีสมบัติการกัดกร่อนสูง ในทางกลับกันถ้าแก๊สที่มีสัดส่วนของฟลูออรีนต่อคาร์บอนประมาณน้อยกว่าสาม ซึ่งฟลูออรีนจะสัดส่วนค่อนข้างน้อย ทำให้เกิดกระบวนการพลาสมาพอลิเมอร์ไรเซชันมากกว่าการกัดกร่อน แสดงดังภาพที่ 8 นอกจากนี้แก๊ส SF_6 ที่มีฟลูออรีนและซัลเฟอร์เป็นองค์ประกอบ ซึ่งสัดส่วนของฟลูออรีนต่อคาร์บอนเป็นศูนย์ ทำให้เกิดการกัดกร่อนที่ผิว และยังทำให้เกิดหมู่ฟังก์ใหม่ของฟลูออรีน (Agostino, 1990) บนพื้นผิวด้วย



ภาพที่ 7 ขอบเขตระหว่างการเกิดพลาสมาพอลิเมอร์ไรเซชันและการกัดกร่อนของแก๊สที่มีฟลูออรีนเป็นองค์ประกอบ

ที่มา: Coburn and Winters (1979)

4.2.2 โครงสร้างทางเคมีของวัสดุ

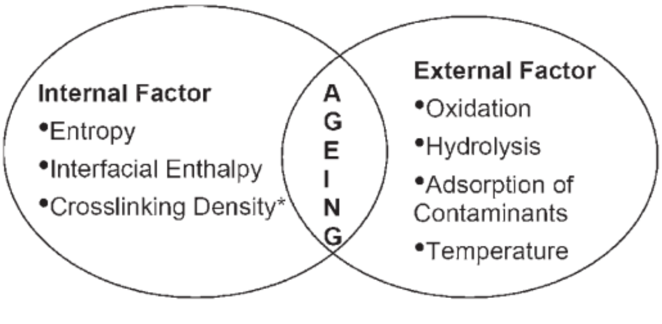
วัสดุที่มีโครงสร้างทางเคมีที่แตกต่างกันจะทำให้เกิดผลกระทบบนพื้นผิวของวัสดุที่แตกต่างกัน เช่น การเกิดความขรุขระบนพื้นผิวของวัสดุ อัตราการ incorporation และกระจายตัวของหมู่ฟังก์ชันใหม่ที่มาจากสภาวะพลาสมา เป็นต้น ซึ่งส่งผลต่อสมบัติของวัสดุด้วย เช่น สมบัติการต้านทานน้ำ สมบัติการกีดขวาง หรือสมบัติเชิงกล เป็นต้น โดยในงานวิจัยของ Avérous *et al.*

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

(2013) ทำการศึกษาผลของการประยุกต์พลาสมาด้วยแก๊สเอทีลีน (C_2H_2) บนฟิล์มที่แตกสลายได้ทางชีวภาพ (biodegradable film) ที่มีความแตกต่างกันทางโครงสร้าง พบว่าหลังการประยุกต์พลาสมาเกิดการออกซิเดชัน (oxidation) บนพื้นผิวของวัสดุ ทำให้เกิดสเปกตรัมของหมู่ C-O ถ้าใช้เวลาในการประยุกต์พลาสมามากขึ้นส่งผลให้เกิดการออกซิเดชันและหมู่ C-O มากขึ้นด้วย ซึ่งฟิล์มที่มีส่วนประกอบของวงแหวนที่มีองค์ประกอบเป็นอะตอมต่างชนิดกัน เช่น ออกซิเจน (heteroatoms) จะเกิดการออกซิเดชันน้อย ทำให้เกิดชั้นฟิล์มที่เปราะ เกิดรอยแตกได้ง่าย ส่งผลเสียต่อสมบัติการซึมผ่านของไอน้ำ นอกจากนี้ผลของการประยุกต์พลาสมาต่อวัสดุที่มีโครงสร้างแบบสายโซ่ตรง (aliphatic) ส่งผลดีมากกว่าวัสดุที่มีโครงสร้างเป็นวงแหวน (aromatic) เนื่องจากโครงสร้างวงแหวนมีความเสถียรของอนุมูลอิสระที่สร้างหมู่ฟังก์ชันต่างๆยาก เช่น หมู่ฟังก์ชันที่มีออกซิเจนเป็นองค์ประกอบ (Inagaki *et al.*, 2003)

4.2.3 ความคงสภาพ (stability)

เมื่อวัสดุผ่านการประยุกต์พลาสมาแล้ว การเก็บรักษาในสภาวะที่เหมาะสมก็เป็นสิ่งหนึ่งที่สำคัญ โดยปัจจัยที่ส่งผลการคงสภาพของวัสดุหรือการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของหมู่ฟังก์ชันพลาสมาที่เกิดขึ้นนั้นขึ้นกับ สภาวะแวดล้อมในการเก็บและอุณหภูมิ เป็นต้น เนื่องจากสายโซ่ของวัสดุที่ถูกปรับสภาพบนพื้นผิวของวัสดุนั้นสามารถเคลื่อนที่ได้ดีกว่าสายโซ่ของวัสดุที่อยู่ภายในโครงสร้าง ซึ่งวัสดุที่มีน้ำหนักโมเลกุลน้อยจะมีการแพร่ผ่านของแก๊สออกซิเจนและไอน้ำได้ง่ายกว่าวัสดุที่มีน้ำหนักโมเลกุลมาก ดังนั้นการคงสภาพของวัสดุภายหลังจากการประยุกต์พลาสมาสามารถทำได้โดยการเพิ่มความเป็นผลึกและลดการเคลื่อนที่ของโมเลกุลของวัสดุ (Feast *et al.,* 1991)



ภาพที่ 8 ปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการคงสภาพของพอลิเมอร์หลังการประยุกต์พลาสมา

ที่มา: Griesser (2006)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางที่ 1 เปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียของพลาสมาแต่ละประเภท

การใช้งาน	ระบบความดันต่ำหรือสุญญากาศ		ความดันบรรยากาศ	
	ข้อดี	ข้อเสีย	ข้อดี	ข้อเสีย
หลักการทั่วไป	พลาสมากระจายตัวสม่ำเสมอในแชมเบอร์	เกี่ยวข้องกับระบบสุญญญาากาศที่ยุ่งยากซับซ้อน และยากในการนำไปใช้ในสายการผลิต	สามารถนำไปใช้ได้จริงในสายการผลิต	พื้นที่ของการปรับสภาพผิวจำกัด ต้องใช้หัว nozzles ขนาดใหญ่
การปรับสภาพผิว	ใช้กับวัสดุได้หลากหลายประเภท	เนื่องจากใช้ได้กับวัสดุหลายประเภท ทำให้ต้องใช้ปั๊มขนาดที่เหมาะสมกับวัสดุแต่ละประเภท	ใช้เวลาน้อยในการปรับสภาพผิว	พลาสมาเจ็ทใช้พลังงานสูง ซึ่งส่งผลเสียแก่พื้นผิว
การเคลือบ	ชั้นเคลือบมีความเป็นเนื้อเดียวกัน	ภายในแชมเบอร์อาจเกิดการปนเปื้อน เพราะใช้ได้กับวัสดุหลายประเภท	ไม่นิยมใช้ในอุตสาหกรรม	

ที่มา: ดัดแปลงจาก Diener electronic (2009)

ตารางที่ 2 ปฏิกิริยาที่ผิวของวัสดุในระหว่างเกิดพลาสมา

ชื่อปฏิกิริยา	ปฏิกิริยา	รายละเอียด
การกัดกร่อน (etching)	$AB + C_{solid} \rightarrow A + BC_{Vapour}$	วัสดุเกิดการกัดกร่อน
การดูดซับ (adsorption)	$M_{gas} + S \rightarrow M_{solid}$ $R_{gas} + S \rightarrow R_{solid}$	โมเลกุลและอนุภาคจากพลาสมาสัมผัสที่ผิวของวัสดุและถูกดูดซับเข้าไปที่ผิวหน้าวัสดุ
การทับถม (deposition)	$AB \rightarrow A + B_{solid}$	เกิดการฟอร์มตัวของชั้นฟิล์ม

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางที่ 2 (ต่อ)

ชื่อปฏิกิริยา	ปฏิกิริยา	รายละเอียด
การรวมตัว (recombination)	$S - A + A \rightarrow S + A_2$ $S - R + R_1 \rightarrow S + M$	โมเลกุลและอนุภาคจากพลาสมาทำปฏิกิริยากับสปีชี่ร์ที่ดูดซับบนผิวหน้าของวัสดุ แล้วกลายมาเป็นสารประกอบ
สปัตเตอริง (sputtering)	$S - B + A^+ \rightarrow S^+ + B + A$	ไอออนประจุบวกจากพลาสมาเข้าไปกำจัดอะตอมที่ผิววัสดุด้วยพลังงานที่เหมาะสม
พอลิเมอร์ไรเซชัน (polymerization)	$R_g + R_s \rightarrow P_2$ $M_g + R_s \rightarrow P_2$	อนุภาคพลาสมาทำปฏิกิริยากับอนุภาคที่ผิววัสดุ แล้วเกิดการฟอร์มตัวเป็นพอลิเมอร์

ที่มา: Nehra (2008)

5. เทคนิคที่ใช้ในการตรวจสอบลักษณะพื้นผิวของวัสดุ

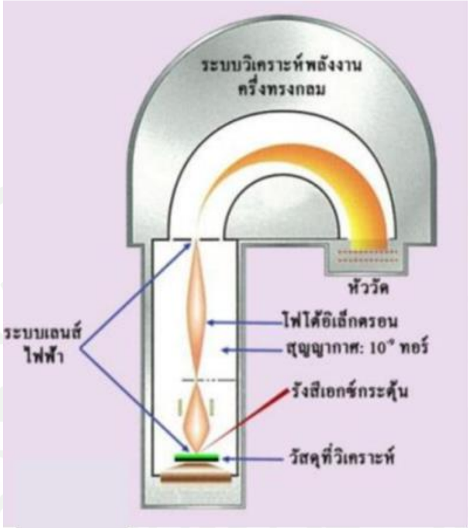
เมื่อทำการปรับสภาพผิวด้วยวิธีพลาสมา การตรวจการเปลี่ยนแปลงบนพื้นผิวของวัสดุเป็นสิ่งที่จำเป็น เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นนั้น ส่งผลให้พอลิเมอร์มีสมบัติต่างๆที่เปลี่ยนไป โดยทั่วไปแล้วเทคนิคที่ใช้ในการตรวจสอบ มีดังนี้

5.1 Fourier Transform infrared (FTIR)

เทคนิคนี้เป็นเทคนิคที่ง่ายในการตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงของหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวของวัสดุ ในการประยุกต์พลาสมาจะเกิดหมู่ฟังก์ชันใหม่ๆบนพื้นของวัสดุมากมาย โดยโหมดที่ใช้ในการตรวจสอบคือ โหมด ATR (Attenuated Total Reflection) แต่การเลือกใช้เทคนิคนี้ต้องขึ้นอยู่กับความเข้มของการปรับสภาพ ถ้าใช้สภาวะการปรับสภาพที่มีความเข้มน้อย ก็อาจใช้เทคนิคนี้แล้วไม่เห็นถึงความแตกต่าง และชั้นที่ถูกปรับสภาพต้องไม่น้อยกว่า 10 นาโนเมตร ถ้าความหนาของชั้นน้อยกว่า เทคนิคนี้ก็ไม่แสดงผลความแตกต่างเช่นกัน (Teodoru *et al.,* 2009)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

5.2 X-ray photoelectron spectroscopy (XPS)



ภาพที่ 9 การทำงานของเทคนิค XPS

ที่มา: ศูนย์ทางฟิสิกส์ของลำอนุภาคและพลาสมา (2554)

เทคนิค XPS มีอาจแปลเป็นภาษาไทยได้ว่า “สเปตโตรสโคปีของอนุภาคอิเล็กตรอนที่ถูกปลดปล่อยด้วยรังสีเอกซ์” เป็นเทคนิคที่ใช้ในการวิเคราะห์ทางเคมีสามารถวิเคราะห์ได้ทั้งเชิงคุณภาพและเชิงปริมาณ เช่น ชนิดและจำนวนธาตุองค์ประกอบ โครงสร้างทางเคมี ชนิดของพันธะทางเคมีและสถานะออกซิเดชันของอะตอม เป็นต้น นอกจากนี้ยังใช้วิเคราะห์สภาพผิวของวัสดุที่เปลี่ยนแปลงไป ภายหลังถูกกระทบด้วยความร้อน สารเคมี ไอออน พลาสมา หรือรังสียูวี เป็นต้น หลักการของเทคนิค XPS แสดงดังภาพที่ 9 โดยเริ่มต้นจากการยิงรังสีเอกซ์พลังงานเดี่ยวไปยังวัสดุที่ต้องการวิเคราะห์ สำหรับค่าพลังงานของรังสีเอกซ์ที่ใช้สำหรับวัสดุจะทราบได้จากข้อมูลที่มีอยู่ เช่นถ้าใช้เป็นอะลูมิเนียมเป็นเป้าแอโนดใช้รังสีเอกซ์ที่มีพลังงาน 1253.6 eV ซึ่งรังสีเอกซ์แบบนี้จัดอยู่ในกลุ่ม soft x-ray และรังสีเอกซ์จะไปปลดปล่อยให้อิเล็กตรอนในอะตอมหลุดเป็นอิสระ เรียกว่า โฟโต้อิเล็กตรอน จากนั้นโฟโต้อิเล็กตรอนจากผิววัสดุจะถูกรวบรวมและโฟกัสไปที่รูเปิดเล็กตรงทางเข้าของระบบวิเคราะห์ ภายในระบบนั้นจะบังคับให้อิเล็กตรอนวิ่งโค้ง จนถึงแผงหัววัด จากนั้นวัดพลังงานจลน์ของโฟโต้อิเล็กตรอน จะทำให้ทราบว่าโฟโต้อิเล็กตรอนตัวนี้ถูกเหนี่ยวนำอยู่ในอะตอมที่ระดับพลังงานใด แสดงตามภาพที่ 9 (ศูนย์ทางฟิสิกส์ของลำอนุภาคและพลาสมา, 2554)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

5.3 Energy dispersive x-ray spectroscopy (EDS)

EDS เป็นอุปกรณ์วิเคราะห์เชิงพลังงานตัวหนึ่งที่อยู่ในระบบของ Scanning electron microscopy (SEM) เพื่อใช้วิเคราะห์ธาตุต่าง ๆ ที่มีอยู่ในตัวอย่าง ซึ่งจะรับสัญญาณรังสีเอกซ์จากตัวอย่าง นิยมวัดออกมาในรูปของปริมาณรังสีเอ็กซ์ที่เกิดขึ้นจากธาตุที่ต้องการวิเคราะห์ในสารมาตรฐาน ซึ่งเป็นธาตุบริสุทธิ์ แต่ข้อจำกัดของ EDS คือ ถ้าจำนวนธาตุที่ต้องการวิเคราะห์มีจำนวนน้อยมาก จะไม่สามารถวิเคราะห์ตัวอย่างได้

5.4 Scanning Electron Microscope (SEM)

มีชื่อภาษาไทยว่า “กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด” นิยมใช้ในการตรวจสอบชิ้นงานด้วยความละเอียดสูง โดยอิเล็กตรอนที่มีความเร็วสูงพุ่งเข้าชนผิวของวัสดุภายใต้สภาวะสุญญากาศ แล้วอิเล็กตรอนเกิดการสะท้อนและเปล่งรังสีออกมาจากผิวหน้าของวัสดุ จากนั้นอิเล็กตรอนเกิดการกระเจิงกลับเบี่ยงเบนไปจากทิศที่พุ่งเข้าชน เกิดเป็นอิเล็กตรอนที่สามารถแทรกซึมทะลุเข้าไปในเนื้อวัสดุได้ และมีการเปล่งรังสีกลับมา (ปิ่นสุภา, 2545) ประโยชน์จากการใช้ SEM คือ การศึกษาลักษณะการแตกหักภายในเนื้อวัสดุ หรือลักษณะการแตกของผิวหน้าของวัสดุ เนื่องจากการปรับสภาพผิววัสดุด้วยพลาสมา ทำให้พื้นผิวของวัสดุเกิดการเปลี่ยนแปลง เช่น เกิดการกัดกร่อนของเส้นใย เกิดการทับถมของชั้นฟิล์มบางพอลิเมอร์ หรือมีอนุภาคเข้าไปแรกอยู่ในโครงสร้าง เป็นต้น (Mercado-Cabrera *et al.*, 2013; Qiu *et al.*, 2014; Chen *et al.*, 2014)

5.5 Atomic Frequency Microscope (AFM)

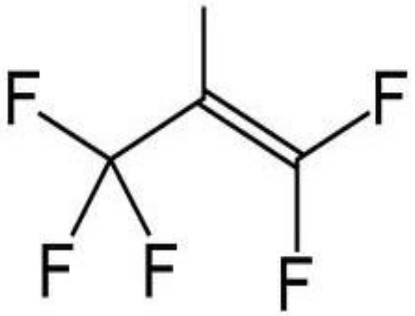
เป็นกล้องจุลทรรศน์แบบหัวสแกนประเภทหนึ่งที่สามารถใช้ในการถ่ายภาพวัตถุที่มีขนาดเล็กในระดับนาโนเมตร หรือถ่ายภาพอะตอมของสสารได้ โดยที่กล้อง AFM จะมีลักษณะการทำงานที่พิเศษเฉพาะตัวคือจะใช้หัวอ่านขนาดเล็กวัดแรงผลักและแรงดูดที่เกิดขึ้นระหว่างหัวเข็มกับพื้นผิวของวัตถุนั้นได้โดยที่กล้อง AFM จะมีลักษณะการทำงานที่พิเศษเฉพาะตัวคือจะใช้หัวอ่านขนาดเล็กวัดแรงผลักและแรงดูดที่เกิดขึ้นระหว่างหัวเข็มกับพื้นผิววัตถุ เพื่อมาสร้างเป็นภาพของพื้นผิวของวัตถุนั้นได้ โดยที่กล้อง AFM สามารถนำมาใช้ในการถ่ายภาพขยายในระดับนานโนเมตรของวัตถุที่นำไฟฟ้าและวัตถุที่ไม่นำไฟฟ้า ลักษณะชิ้นงานที่ใช้ในการทดสอบ เช่น พื้นผิวพอลิเมอร์ เซรามิค วัสดุคอมโพสิท กระจกหรือแก้ว (จริยา, 2552)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

พลาสมาเฮกซะฟลูออโรพรอพิลีน

ในงานวิจัยนี้เลือกใช้แก๊สที่มีฟลูออรีนเป็นส่วนประกอบ ซึ่งการเกิดปฏิกิริยาบนพื้นผิววัสดุจะขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆมากมาย ทั้งสภาวะการประยุกต์พลาสมาและโครงสร้างทางเคมีของวัสดุที่นำมาประยุกต์พลาสมา โดยส่วนใหญ่แก๊สที่มีฟลูออรีนเป็นองค์ประกอบนั้นจะมีการผลิตอนุภาคของ CF_x ซึ่งเป็นอนุภาคที่สำคัญรวมทั้งไอออนและอิเล็กตรอนเกิดขณะเกิดพลาสมาส่งผลต่อการเกิดการเปลี่ยนแปลงบนพื้นผิวของวัสดุ โดยเกิดปรากฏการณ์ bombardment บนพื้นผิวของวัสดุ ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงพันธะที่ผิวของวัสดุ และเกิดการดูดซับหมู่ฟังก์ชันใหม่ที่เกิดขึ้น ตัวอย่างของแก๊สที่มีฟลูออรีนเป็นส่วนประกอบใช้ในการประยุกต์พลาสมา เช่น แก๊สเตตระฟลูออโรมีเทน (Tetrafluoromethane, CF_4) แก๊สไตรฟลูออโรมีเทน (Trifluoromethane, CHF_3) แก๊สซัลเฟอร์เฮกซะฟลูออรีน (Sulfurhexafluorine, SF_6) และแก๊สออกตะฟลูออโรพรอเพน (Octafluoropropane, C_3F_8) เป็นต้น (Kharitonov *et al*., 2014)

แก๊สเฮกซะฟลูออโรโพรโพิลีน (hexafluoropropylene, C_3F_6) เป็นสารประกอบของพอลิอะตอมมิคโมเลกุล (polyatomic molecule) ของคาร์บอนและฟลูออรีน เป็นแก๊สที่ไม่มีสี ไม่มีกลิ่น ไม่ติดไฟ และไม่เป็นพิษ มีโครงสร้างดังภาพที่ 10



ภาพที่ 10 โครงสร้างโมเลกุลของเฮกซะฟลูออโรพรอพิลีน

ที่มา: ชญาภา (2553)

แก๊สเฮกซะฟลูออโรพรอพิลีน ใช้ทำเป็นสารทำความเย็นในเครื่องทำความเย็น และใช้เป็นสารมัธยันตร์ในการเตรียมยางในกลุ่มที่มีชื่อว่าฟลูออโรอิลาสโตเมอร์ (Fluoroelastomer) หรือฟลูออโรคาร์บอนอิลาสโตเมอร์ (Fluorocarbonelastomer) มีชื่อทางการค้าว่า Viton ของบริษัท

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

DuPont (ชญาภา, 2553) นอกจากนี้มีการใช้แก๊สเฮกซะฟลูออโรพรอพิลีนเพื่อปรับสภาพผิวสิ่งทอ คือ ผ้าไหม กับผ้าฝ้าย พบว่าการปรับสภาพผิวด้วยพลาสมา สามารถเพิ่มความไม่ชอบน้ำ (hydrophobicity) ค่ามุมสัมผัสและค่าความต้านทานแรงดึงเพิ่มขึ้น เมื่อเทียบกับก่อนปรับสภาพด้วยพลาสมา (Li and Jinjin, 2007) ในส่วนของพลังงานที่ใช้ในการแตกตัว(Dissociation energies) ของ C_3F_6 พบว่ามีการเกิดพลังงานหลากหลายช่องทางด้วยกัน โดยในตารางที่ 3แสดงการคำนวณพลังงานที่เกิดขึ้นแสดงอยู่ในรูปของพลังงานความร้อนเอลทาลปี (heats of formation, ∆H)

ตารางที่ 3 พลังงานการแตกตัวของ C_3F_6

กลไกการแตกตัว	∆H (kcal/mol)
$C_3F_6 + nhv \longrightarrow C_2F_4 + CF_2$	75.0-82.7
$C_3F_6 + nhv \longrightarrow C_2F_3 + CF_3$	100.0–105.0
$C_3F_6 + nhv \longrightarrow C_2F_5 + CF$	117.0
$C_3F_6 + nhv \longrightarrow CF + CF_2 + CF_3$	171.0

ที่มา: Rubio (2001)

อย่างไรก็ตามมีแก๊สหลายชนิดที่นำมาประยุกต์พลาสมาส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ทางด้านก่อให้สภาวะเรือนกระจก แต่การใช้แก๊สเฮกซะฟลูออโรพรอพิลีนในการประยุกต์พลาสมา มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมน้อยกว่าแก๊สสำหรับประยุกต์พลาสมาชนิดอื่น โดยเทียบด้วย อายุในชั้นบรรยากาศ (atmospheric lifetime) และค่าศักยภาพที่ส่งผลทำให้เกิดภาวะเรือนกระจก (Global Warming Potentials, GWP) แสดงตามตารางที่ 4 เพราะแก๊สเฮกซะฟลูออโรพรอพิลีน เป็นแก๊สฟลูออโรคาร์บอนแบบไม่อิ่มตัว (unsaturated perfluorocarbons) ซึ่งง่ายต่อการย่อยสลายตัวในบรรยากาศมากกว่า แก๊สฟลูออโรคาร์บอนแบบอิ่มตัว (saturated perfluorocarbons) (Nakamura *et al.*, 2003)

Takahashi *et al*. (2000) ทำการศึกษากลไกการทับถม (deposition) ของฟิล์มมาจากการพลาสมาด้วยแก๊สฟลูออโรคาร์บอนประเภทต่างๆ เมื่อเกิดสภาวะพลาสมาอนุภาคที่สำคัญและมีจำนวนมาก คือ CF_2 ซึ่งเข้าไปเป็นส่วนหนึ่งของชั้นฟิล์มพอลิเมอร์ โดย C_3F_6 เป็นฟลูออโรคาร์บอนประเภทไม่อิ่มตัว (unsaturated fluorocarbon) มีอัตราการทับถม (deposition rate) ต่ำ เมื่อเทียบกับกับแก๊สฟลูออโรคาร์บอนประเภทอื่น เพราะการเปลี่ยน C_3F_6 ให้กลายเป็น เฮกซะฟลูออโร

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ไซโคโพรเพน(hexafluorocyclopropane) ซึ่งมีสมบัติคล้าย C_4F_8 ที่มีอัตราการทับถมที่ดีทำได้ยาก นอกจากนี้มีการประยุกต์พลาสมาแบบความดันบรรยากาศ โดยใช้แก๊ส C_3F_6 ทับถมบนแผ่นฟิล์ม เพื่อเป็น release coating ในเทปกาว ซึ่งทำให้สามารถดึงและม้วนเทปกลับได้ง่าย (Yaganawa *et al.,* 2007)

ตารางที่ 4 อายุในชั้นบรรยากาศ (atmospheric lifetime) และศักยภาพในการทำให้เกิดภาวะเรือนกระจก (Global Warming Potentials, GWP) โดยค่า GWP ของก๊าซเรือนกระจกต่างๆ ในช่วงเวลา 100 ปี (GWP_{100}) ของแก๊สเรือนกระจกต่างๆ ในกระบวนการพลาสมา

ก๊าซเรือนกระจก	อายุในชั้นบรรยากาศ (ปี)	GWP_{100}
CO_2	-	1
SF_6	3,200	23,900
CF_4	50,000	6,500
C_3F_6	10	-

ที่มา : Fracassi and Agostino (1999); Nakamura (2003)

ตัวอย่างวัสดุชีวฐานที่เลือกใช้ในงานวิจัย

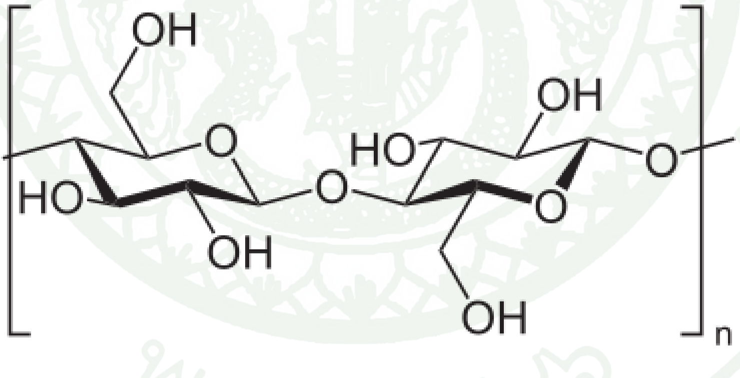
1. กระดาษ

กระดาษ หมายถึง วัสดุที่ได้จากการสานอัดแน่นของเส้นใยจากพืชเป็นแผ่นบางๆ โดยทั่วไปมีความหนาไม่เกิน 0.012 นิ้ว ซึ่ง The International Organization for Standardization (ISO) กำหนดว่ากระดาษที่มีน้ำหนักมากกว่า 250 กรัมต่อตารางเมตร หรือ 51 ปอนด์ต่อ 1,000 ตารางฟุต เรียกว่า กระดาษแข็ง (paperboard) การกำหนดลักษณะเฉพาะ (characteristic) ของกระดาษ นิยมใช้ความหนา หรือน้ำหนักต่อพื้นที่ ได้แก่ แกรมเมจ (grammage) แสดงเป็นกรัมต่อตารางเมตร หรือน้ำหนักมาตรฐาน (basic weight) แสดงค่าเป็นปอนด์ต่อ1,000 ตารางฟุต (งามทิพย์, 2550)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

1.1 โครงสร้างกระดาษ

โครงสร้างกระดาษ ประกอบด้วยเส้นใยเซลลูโลส (cellulose fibers) โดยเซลลูโลสเป็นองค์ประกอบหลักของผนังเซลล์พืช เป็นพอลิแซคคาไลด์เชิงเส้น (linear polysaccharide) ที่ประกอบด้วยหน่วยกลูโคส (glucose) จำนวนมากเชื่อมต่อกันเป็นโซ่ตรงด้วยพันธะบีตา 1-4 ส่วนใหญ่เส้นใยเซลลูโลสเป็นโครงสร้างผลึก (crystalline structure) ประมาณร้อยละ 70 และร้อยละ 30 เป็นโครงสร้างอสัณฐาน (amorphous structure) ความแข็งแรงของเส้นใยกลูโคสเกิดขึ้นจากการเรียงตัวของหน่วยกลูโคสในสายพอลิเมอร์ และพันธะไฮโดรเจนที่ยึดเส้นใยไว้ ซึ่งพันธะไฮโดรเจนจะสูญเสียความแข็งแรง เมื่อเส้นใยเซลลูโลสสัมผัสกับน้ำ เพราะโมเลกุลของน้ำเข้าไปแทรกระหว่างหมู่ไฮดรอกซิล และออกซิเจน ในกระบวนการผลิตกระดาษนั้นเมื่อน้ำถูกกำจัดออกไปจะทำให้สายโซ่โมเลกุลอยู่ชิดกัน และมีโอกาสที่หมู่ไฮดรอกซิลบนผิวหน้าของเส้นใยจะมาอยู่ใกล้กัน และเกิดพันธะไฮโดรเจนขึ้นโดยตรง (ดวงทิพย์, 2550) โดยเฉลี่ยระดับการเกิดพอลิเมอร์ไรเซชันอยู่ระหว่าง 3000 ถึง 1500 ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับแหล่งที่มาของเซลลูโลสด้วย (Carlmark and Malmström, 2013) ในทางอุตสาหกรรมนำเซลลูโลสมาใช้ประโยชน์อย่างกว้างขวาง เช่น นำมาตีเยื่อเพื่อใช้เป็นภาชนะบรรจุในรูปของกระดาษ และกระดาษแข็ง เป็นต้น (Tighe *et al*., 1998)



ภาพที่ 11 โครงสร้างเซลลูโลส

ที่มา: Lejeune and Deprez (2010)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

1.2 องค์ประกอบของกระดาษ แบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ

การที่กระดาษสามารถยึดตัวเป็นแผ่นได้นั้น เกิดจากเส้นใยเป็นจำนวนมากสานกันอย่างไม่เป็นระเบียบ เส้นใยดังกล่าวโดยทั่วไปจะใช้เส้นใยจากธรรมชาติจากพืช อาจมีการใช้เส้นใยจากสัตว์หรือจากแร่ นอกจากนี้ยังมีการใช้เส้นใยสังเคราะห์ เช่นพวกพอลิอาไมด์ (Polyamide) ซึ่งช่วยทดแทนการใช้เส้นใยจากธรรมชาติ ทั้งนี้สามารถแบ่งประเภทของเส้นใย ดังนี้

1.2.1 ส่วนที่เป็นเส้นใย (fiber)

1.2.1.1 เยื่อใยยาว (needle pulp) ได้จากไม้ใบแคบ (softwood) เป็นไม้ที่ขึ้นบริเวณที่สูง อากาศเย็น โตช้า ใบมีลักษณะแคบเรียวยาว เส้นใยมีลักษณะหยาบ มีความแข็งแรงสูง มีความความยาวประมาณ 3-4 มิลลิเมตร และมีช่วงค่าความถ่วงจะเพาะ (specific gravity) ต่ำ คือ 0.17-0.46 ไม้ในกลุ่มนี้ ได้แก่ ต้นสน (Pier) เป็นต้น (งามทิพย์, 2557)

1.2.1.2 เยื่อใยสั้น (leaf pulp) ได้จากไม้ใบกว้าง (hardwood) เป็นไม้ที่ขึ้นบริเวณเขตร้อน โตเร็ว ใบมีลักษณะกว้าง เส้นใยมีลักษณะเล็ก ละเอียด มีความแข็งแรงต่ำ มีความความยาวประมาณ 1.0-1.5 มิลลิเมตร และมีช่วงค่าความถ่วงจะเพาะ (specific gravity) สูง คือ 0.50-1.50 ไม้ในกลุ่มนี้ ได้แก่ ต้นยูคาลิปตัส (Eucalyptus) และ กระถินเทพา (Acacia) เป็นต้น (งามทิพย์, 2557)

1.2.1.3 เยื่อหมุนเวียน (recycle pulp) เพื่อเป็นการใช้ทรัพยากรได้คุ้มค่าประกอบกับการลดต้นทุนของกระดาษ ได้มีการนำกระดาษใช้แล้วมาใช้ในการผลิตกระดาษอีกครั้งหนึ่ง เยื่อที่ได้จากกระดาษที่ใช้แล้วจะมีความขาวและความแข็งแรงต่ำลงเนื่องจากต้องผ่านขบวนการขจัดสิ่งที่ปนเปื้อนและกระบวนการเชิงกลที่อาจทำให้เส้นใยสั้นลง ความแข็งแรงลดลง

1.2.2 ส่วนที่ไม่ใช่เป็นเส้นใย (non-fiber)

องค์ประกอบที่ไม่ใช่เส้นใยจะเป็นสารเติมแต่ง (Additives) ที่เติมเข้าไประหว่างการผลิตกระดาษเพื่อช่วยให้กระดาษที่ได้ออกมามีคุณสมบัติเหมาะกับการใช้งานที่ต้องการได้ดียิ่งขึ้น สารเติมแต่งมีมากมายแล้วแต่กรรมวิธีการผลิต มีดังนี้

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

1.2.2.1 ตัวเติม (Filler) ส่วนใหญ่เป็นสารอนินทรีย์ ใช้เพื่อเพิ่มปริมาณกระดาษ ทำให้ได้ปริมาณมากขึ้น ช่วยลดต้นทุนการผลิต นอกจากนี้ยังช่วยเพิ่มความขาว ความเรียบ ลดรูพรุนในกระดาษ และเพิ่มการดูดซับหมึกพิมพ์ สารที่ใช้ เช่น ดินขาว (kaolin clay) แคลเซียมคาร์บอเนต (calcium carbonate, $CaCO_3$) ไททา-เนียมไดออกไซด์ (titanium dioxide, TiO_2) เป็นต้น (งามทิพย์, 2550)

1.2.2.2 สารกันซึม (sizing Agent) เป็นสารที่ใช้เติมลงในน้ำเยื่อเพื่อช่วยลดการซึมของของเหลวเข้าไปในเนื้อกระดาษ ทำให้กระดาษมีอัตราการดูดซึมความชื้นลดลง ตัวอย่างสารกันซึม ได้แก่ ไข (wax) ยางมะตอย (asphlt) และชันสน (rosin) เป็นต้น การเติมสารกันซึมมีผลทำให้ความแข็งแรงของกระดาษลดลงด้วย (งามทิพย์, 2550)

1.2.2.3 ตัวยึด (binder) ทำหน้าที่ให้ความแข็งแรงให้กระดาษ เช่น ความทนทานแรงดึงขาด (tensile strength) ความทนทานแรงดันทะลุ (bursting strength) เป็นต้น สารที่เป็นตัวยึด เช่น แป้ง แป้งดัดแปร (modified starch) กัมจากพืช (vegetable gum) เป็นต้น (งามทิพย์, 2550)

1.2.2.4 สารเติมแต่งอื่นๆ ทำหน้าที่ช่วยเสริมให้สารเติมแต่งที่กล่าวมา ทำหน้าที่เฉพาะได้ดียิ่งขึ้น เช่น สารเพิ่มการตกค้าง (retention aid) สารควบคุมจุลชีวะ (microbiological control agent) เป็นต้น

1.3 การปรับสภาพพื้นผิวของกระดาษ

สุชาดา (2551) กล่าวว่า การปรับสภาพผิวกระดาษมี 2 วิธี คือ การปรับสภาพผิวทางกายภาพ (physical modification) และการปรับสภาพผิวทางเคมี (chemical modification)การปรับสภาพผิวทางกายภาพ (physical modification)

1.3.1 การปรับสภาพผิวทางกายภาพ ด้วยวิธีทางกายภาพในขั้นตอนของชุดขัดผิว (calender) ในกระบวนการผลิตกระดาษ เมื่อกระดาษถูกรีดผ่านชุดลูกรีด ซึ่งเป็นลูกกลิ้งโลหะวางเรียงซ้อนกันในแนวตั้ง จะให้แรงกดไปที่กระดาษมีผิวเรียบมากขึ้น มีความหนาที่สม่ำเสมอ ความมันวาว และมีความเหมาะสมในการพิมพ์มากขึ้น (Bierman, 1996)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

1.3.2 การปรับสภาพผิวทางเคมี (chemical modification

การปรับสภาพผิวทางเคมี มีจุดประสงค์เพื่อทำให้กระดาษมีสมบัติตามต้องการ เช่น เพิ่มความแข็งแรงของผิวกระดาษ เพิ่มความต้านทานน้ำ หรือน้ำมัน เป็นต้น การปรับสภาพทางเคมีสามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภท (Bierman, 1996) ดังนี้

1.3.2.1 การฉาบด้วยสารกันซึม (surface sizing)

การฉาบด้วยสารกันซึม เป็นการทำให้กระดาษต้านทานการซึมผ่านของของเหลวได้มากขึ้น เช่น น้ำ หมึกพิมพ์ เป็นต้น ซึ่งอยู่ในขั้นตอนของชุดฉาบผิว (size press) ในกระบวนการผลิตกระดาษ วัตถุประสงค์เพื่อให้กระดาษมีสมบัติที่ดีขึ้น เหมาะกับการนำไปใช้งาน โดยกระดาษผ่านการฉาบด้วยสารกันซึม ความพรุนของกระดาษจะลดลง เนื่องจากสารกันซึมไปอุดรูเล็กที่ผิวกระดาษ (Gamelas *et al.*, 2010) ถ้าเติมสารกันซึมในขั้นตอนการตีเยื่อ เรียก internal sizing และถ้าพ่นสารกันซึมเคลือบกระดาษในขั้นตอนทำแห้ง เรียก external sizing แต่การเติมสารกันซึมทำให้ความแข็งของกระดาษลดลงด้วย

1.3.2.2 การเคลือบ (coating)

การเคลือบมีจุดประสงค์ เพื่อเพิ่มคุณภาพของกระดาษ และเพิ่มสมบัติบางประการให้สอดคล้องกับการใช้งานมากขึ้น นิยมเคลือบกระดาษด้วยสารเติมแต่ง โดยมีสารยึดสารเติมแต่งให้ติดบนผิวกระดาษ นอกจากนี้การเคลือบยังช่วยให้ผิวของกระดาษเรียบ และสว่างมากขึ้น ความสามารถในการตีพิมพ์ดีขึ้น หรือสามารถนำไปใช้งานในด้านต่างๆได้มากขึ้น เช่น การเพิ่มคุณสมบัติต้านทานน้ำและไขมันสำหรับภาชนะบรรจุอาหารแช่แข็ง เป็นต้น (Andersson, 2008)

1.4 กระดาษเหนียว (kraft paper)

กระดาษเหนียวตามความหมายสากล หมายถึงกระดาษที่ผลิตจากเยื่อซัลเฟตล้วน หรือมีเยื่อซัลเฟตอยู่ร้อยละ 80 และมีสมบัติเด่นในด้านความแข็งแรง โดยเฉพาะความทนทานต่อการฉีกขาด แรงดึง แรงดันทะลุ และการหักพับ สำหรับประเทศไทยมีการกำหนดมาตรฐานกระดาษเหนียวโดยสำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม และให้คำนิยามกระดาษเหนียวไว้กว้างๆ ดังนี้ “กระดาษเหนียว หมายถึง กระดาษเหนียวที่เหมาะสำหรับห่อของ หรือแผ่นกระดาษลูกฟูก”กระดาษ

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เหนียวที่นำมาใช้ส่วนมากเป็นชนิดที่ยังไม่ผ่านการฟอกขาว มีสีธรรมชาติสีน้ำตาลคล้ำ ใช้ในการห่อสินค้าทั่วไป เนื่องจากกระดาษเหนียวที่ผลิตจากเยื่อซัลเฟตล้วนๆ มีราคาค่อนข้างสูง ดังนั้นจึงได้มีการผลิต imitation kraft paper ขึ้น โดยผลิตจากส่วนผสมของเยื่อซัลเฟตหรือเยื่อเคมีชนิดอื่น และเศษกระดาษ แต่ให้คุณภาพเทียบเท่ากระดาษเหนียวที่ทำจากเยื่อซัลเฟตล้วน (บุษกร และคณะ, 2545)

2. พลาสติกแตกสลายได้ทางชีวภาพจากแป้ง (thermoplastic starch)

แป้ง (starch) เป็นพอลิแซ็คคาไรด์ ชนิดหนึ่งที่พบมากในธรรมชาติ มากเป็นอันดับสอง รองจากเซลลูโลส และเป็นแหล่งพลังงานที่สำคัญของคนและสัตว์ โดยส่วนใหญ่แล้วแป้งได้มากจากข้าวโพด ข้าว ข้าวสาลี มันฝรั่ง และมันสำปะหลัง ซึ่งเป็นพืชเศรษฐกิจหลักของไทย แป้งประกอบด้วยโครงสร้างที่เป็นพอลิแซคคาไรด์ทั้งสายโซ่ตรงและสายโซ่ที่เป็นกิ่ง คือ อะไมโลส (amylose) ประมาณ 15-25% และอะไมโลเพกทิน (amylopectin) 75-85% ขึ้นอยู่กับชนิดของพืช (Mohanty *et al.*, 2013) เนื่องจากโครงสร้างของแป้งมีความสลับซับซ้อนและมีขนาดเล็ก เมื่อมองด้วยตาเปล่าจงไม่สามารถบอกความแตกต่างของเม็ดแป้งได้ ในธรรมชาติโมเลกุลแป้งจะมีการจัดเรียงตัวเกิดเป็นโครงสร้างกึ่งผลึกที่เป็นระเบียบในแกรนูลแป้ง (starch granule) โครงสร้างระดับแกรนูลของแป้งมีความแข็งแรงมาก อีกทั้งสามารถทนต่ออุณหภูมิที่สูงถึง 220 องศาเซลเซียส (Jianping *et al.*, 1997) ดังนั้นการนำวัตถุดิบที่ผลิตได้ภายในประเทศมาใช้ประโยชน์อย่างคุ้มค่า จะช่วยลดต้นทุนการผลิตและทดแทนวัตถุดิบที่นำเข้าจากต่างประเทศ

2.1 สมบัติของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช

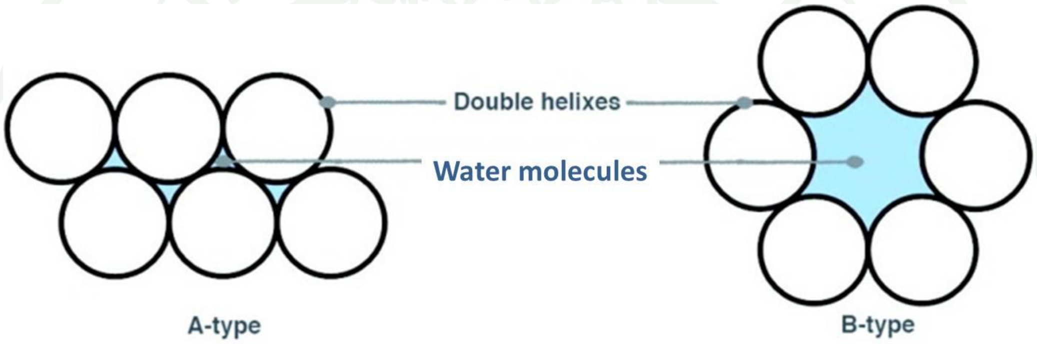
2.1.1 ลักษณะสัณฐาน (morphology)

ลักษณะอสัณฐานของแกรนูลแป้งนั้น มีหลากหมายรูปแบบ เช่น วงกลม วงรี และมีขนาดที่หลากหลายตามชนิดของแป้ง ซึ่งในระหว่างกระบวนการเปลี่ยนจากเม็ดแป้งแกรนูลให้มีลักษณะเป็นฟิล์มพอลิเมอร์เนื้อเดียว จะเป็นการทำลายพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุลของแป้ง แล้วทำให้เกิดการสร้างพันธะระหว่างพลาสติกไซเซอร์และโมเลกุลของแป้ง (Yang *et al.*, 2006)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

2.1.2 โครงสร้าง (structure)

เม็ดแป้งมีลักษณะโครงสร้างผลึก 3 แบบขึ้นอยู่กับลักษณะในการจัดเรียงตัวของเกลียวคู่ ถ้ามีการเรียงตัวหนาแน่นมากและมีปริมาณน้ำต่ำจะจัดเป็นผลึกแบบ A (แป้งจากธัญพืชต่างๆ) ถ้ามีการเรียงตัวกันหลวมๆ และมีปริมาณน้ำสูงจะจัดเป็นผลึกแบบ B (แป้งจากพืชหัว) ถ้ามีการเรียงตัวทั้งแบบ A และ B รวมกันจัดเป็นผลึกแบบ C (แป้งจากพืชตระกูลถั่ว) นอกจากนี้แป้งยังมีโครงสร้างผลึกแบบ V ซึ่งเกิดจากการที่สายแอไมโลสสามารถเกดสารเชิงซ้อนกับสารต่างๆได้ เช่น ไอโอดีน กรดไขมัน อิมัลซิไฟ หรือบิวทานอล เป็นต้น (วรายุทธ, 2553)



ภาพที่ 12 การจัดเรียงตัวของผลึกแบบ A และ แบบ B ในโครงสร้างของแป้ง

ที่มา: Dufresne (2010)

2.1.3 สมบัติเชิงกล (mechanical property)

สมบัติเชิงกลนั้นจะขึ้นอยู่กับชนิดของแป้ง โดยเฉพาะสัดส่วนของอะไมโลสและอะไมโลเพกทิน เช่น แป้งที่มีสัดส่วนของอะไมโลเพกตินสูง จะมีสมบัติอ่อนเหนียว (ductile) ในทางกลับกันถ้าแป้งมีสัดส่วนของอะไมโลสสูง วัสดุนั้นจะมีสมบัติเปราะ (brittle) นอกจากนี้การใช้พลาสติกไซเซอร์ก็ส่งผลต่อสมบัติเชิงกลเช่นกัน โดย Saiah *et al.*(2007) กล่าวว่าผลของการใส่พลาสติกไซเซอร์เข้าไปในกระบวนการขึ้นรูปฟิล์มนั้น ส่งผลให้ความแข็งแรงของฟิล์มลดลง เพราะความแข็งแรงของพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุลแป้งลดลง เพราะพลาสติกไซเซอร์เข้าไปสร้างพันธะกับโมเลกุลของแป้งแทน

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

2.1.4 สมบัติทางความร้อน (thermal property)

จากการศึกษาเกี่ยวกับความเป็นผลึก โดยใช้เทคนิค XRD (X-ray Diffractometer) พบว่า การเอ็กทรูด (extrude) ให้เป็นฟิล์มนั้น จะทำให้ความเป็นผลึกลดลง เพราะว่าฟิล์มมีลักษณะ อสัณฐาน (amorphous) มากขึ้น จึงใช้พลังงานต่ำในการย่อยสลาย (Saiah *et al*., 2007)

2.2 แนวทางการนำแป้งมาใช้ประโยชน์เกี่ยวกับบรรจุภัณฑ์

สามารถทำได้หลายวิธีดังนี้ (กุลฤดี และกล้าณรงค์, 2554)

2.1.1 การใช้แป้งเป็นตัวเต็ม (filler) หรือสารตัวเติมในกระดาษ

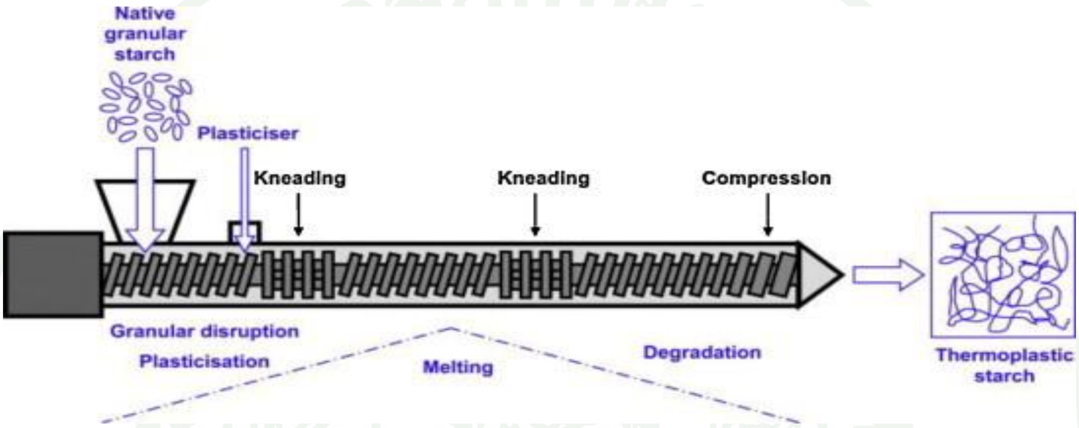
ในอุตสาหกรรมผลิตกระดาษมักมีการใส่ตัวเติม(filler) ลงไปในกระบวนการผลิตกระดาษ เช่น เคลย์ และแคลเซียมคาร์บอเนต ซึ่งการเติมสารเติมแต่งนั้นทำให้กระดาษมีสมบัติความทึบแสงมากขึ้น ช่วยเพิ่มปริมาณเนื้อกระดาษจึงเป็นการลดต้นทุนการผลิต และช่วยเพิ่มความสามารถด้านการพิมพ์ให้กับกระดาษ แต่การใส่ตัวเติมส่งผลเสียกับความแข็งแรงของกระดาษ ดังนั้นการทำให้ตัวเติมสร้างพันธะไฮโดรเจนกับเส้นใยของกระดาษได้ ก็จะส่งผลดีต่อความแข็งแรงของกระดาษ (Shen *et al.*, 2013)

2.1.2 เทอร์โมพลาสติก

การนำแป้งมาใช้ในการผลิตพลาสติก มีข้อจำกัด คือโครงสร้างผลึกในแกรนูลของแป้งมีความแข็งแรงมาก เนื่องจากอุณหภูมิที่ทำให้แป้งอ่อนตัว (softening temperature) สูงกว่าอุณหภูมิสลายตัว (degradation temperature) จึงทำให้การแปรรูปแป้งให้กลายมาเป็นเทอร์โมพลาสติกไปเป็นได้ยาก ในกระบวนการจึงต้องมีการใส่พลาสติไซเซอร์ เพื่อเข้าไปทำลายโครงสร้างภายในของแป้งที่ยึดกันด้วยพันธะไฮโดรเจน และช่วยเข้าไปเพิ่มช่องว่างภายในโครงสร้าง เพื่อให้แปรรูปได้ง่ายมากขึ้น โดยพลาสติไซเซอร์ที่นิยมใช้ เช่น กลีเซอรอล และซอร์บิทอล (Coffin and Fishman, 1994) นอกจากนี้ยังต้องอาศัยความร้อน และแรงกลเพื่อช่วยเข้าไปทำลายโครงสร้างของแป้งอีกทางหนึ่งด้วย (Avérous, 2004) จึงจะได้วัสดุที่เรียกว่าเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช (thermoplastic starch, TPS) เม็ดพลาสติกเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่ผลิตได้สามารถนำไปขึ้นรูป

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ด้วยเครื่องมือและกระบวนการผลิตมาตรฐานที่ใช้สำหรับพลาสติกทั่วไป เช่น เอกซ์ทรูเดอร์ เครื่องฉีด และเครื่องเป่าฟิล์ม เป็นต้น แต่การใช้เทอร์โมพลาสติกอย่างเดียวทำให้มีข้อจำกัดในการใช้งาน เนื่องจากเทอร์โมพลาสติกไวต่อความชื้นอย่างมาก ดังนั้นในอุตสาหกรรมจึงมีการนำเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชมาผสมกับพอลิเมอร์และสารเติมแต่ง (additive) ต่างๆ ซึ่งในปัจจุบันมีงานวิจัยหลายงานที่ศึกษาเกี่ยวกับผลของการผสมของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชกับพอลิเมอร์อื่นๆ เช่น พอลิแลคติกแอซิด พอลิไฮดรอกซิลบิวทีเรต พอลิคาร์โปแลคโตน เป็นต้น



ภาพที่ 13 กระบวนการผลิตเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช

ที่มา: Xie (2012)

2.1.3 โฟมจากแป้ง (starch-based foams)

โฟมจากแป้งถูกพัฒนาขึ้นมาเพื่อทดแทนโฟมที่ผลิตจากพอลิสไตรีน หรือพอลิเมอร์ที่มาจากปิโตรเลียมอื่นๆ ซึ่งผลิตออกมาเป็นผลิตภัณฑ์หลายชนิด เช่น เม็ดโฟมกันกระแทก (losses-fill) ถาดหรือจานโฟม ซึ่งโฟมจากพอลิเมอร์ดังกล่าวส่งผลเสียแก่สิ่งแวดล้อมทั้งในกระบวนการผลิตและกระบวนการกำจัด ทำให้มีการนำแป้งมาเป็นโฟม ซึ่งนอกจากแป้งจะสามารถย่อยสลายได้แล้ว ยังมีกระบวนการผลิตที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม คือในระหว่างกระบวนการเอ็กทรูชันมีการเติมน้ำเข้าไปใน โดยน้ำและแรงเฉือนที่เกิดขึ้นจะทำให้แป้งเกิดการเจลลาติไนซ์ (gelatinization) คือปรากฏการณ์ของน้ำแป้งเมื่อได้รับความร้อน ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงในภายในโมเลกุล ของเม็ดแป้ง (starch granule) เนื่องจากความร้อนทำลายพันธะไฮโดรเจนภายในโมเลกุลของสตาร์ชในเม็ดแป้ง แล้วแป้งจะเกิดการรวมตัวกับน้ำ และน้ำถูกกำจัดออก ในขณะออกมาจากการเอ็กทรูดซ์ ทำให้แป้งให้เกิดรูพรุนในโครงสร้างโฟม (blowing agent) (Tatarka and Cunningham, 1998)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

การประยุกต์พลาสมาบนวัสดุชีวฐาน

ปัจจุบัน เริ่มมีการใช้พลาสมา เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติของวัสดุชีวฐานมากขึ้น ในที่นี่ได้รวบรวมงานวิจัยที่เกี่ยวข้องในการประยุกต์พลาสมาเพื่อปรับปรุงสมบัติต่างๆของวัสดุชีวฐาน มีรายละเอียดดังนี้

Denes *et al*. (2002) ศึกษาผลของการประยุกต์พลาสมาด้วยแก๊สซัลฟอร์เฮกซะฟลูออไรด์บนวัสดุที่แตกต่างกัน ได้แก่ กระดาษที่ไม่มีสารติมแต่ง และพอลิอะไครลิกแอซิด (PAA) พบว่าสำหรับกระดาษ การประยุกต์พลาสมาส่งผลให้ที่ผิวของกระดาษเกิดกลไลของการกัดกร่อน ซึ่งเกิดกระบวนการฟังก์ชันนอลไรเซชันขึ้นพร้อมกันด้วย อย่างไรก็ตามเมื่อใช้ระยะเวลาการประยุกต์พลาสมามากกว่า 5 นาที พบว่าปริมาณของอะตอมฟลูออรีนไม่มีความแตกต่างทางนัยสำคัญ เป็นเพราะเกิดกลไกการกัดกร่อนที่ส่งผลให้เกิดการสร้างฟังก์ชันนอลไรเซชันของ –CF นั่นเอง สำหรับ PAA พบว่าเกิดชั้นของฟลูออริเนตบางๆบน PAA โดยมาจากกลไลการกัดกร่อนของหมู่สปีชีร์ที่เกิดจากสภาวะพลาสมา นอกจานกี้สภาวะพลาสมาส่งผลให้พื้นผิวมีความขรุขระเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากผลของ decarboxylation และ dehydro-fluorination ซึ่งสัมพันธ์กับโครงสร้างที่มีหมู่คาร์บอกซิลิกของ PAA

Andrade *et al.* (2005) ศึกษาผลของการประยุกต์พลาสมาบนฟิล์มที่ผลิตมาจาก maize starch ด้วย 1-butene (C_4H_8) เป็นพลาสมาแบบระบบสุญญากาศพบว่าลักษณะสัณฐานของฟิล์มก่อนและหลังประยุกต์พลาสมาไม่แตกต่างที่กำลังขยายต่ำ โดยใช้เทคนิค AFM เพื่อแสดงให้เห็นความขรุขระของพื้นผิวของฟิล์ม นอกจากนี้มีการทดสอบการวัดมุมสัมผัส แล้วพิจารณาความสูงและความกว้างของหยดน้ำที่หยด พบว่าความสูงและความกว้างของหยดน้ำเป็นฟังก์ชันของเวลาที่ผ่านไป ซึ่งการเปลี่ยนแปลงของความสูงและความกว้างหยดน้ำ แสดงให้เห็นถึงการดูดซับของน้ำ ดังนั้นเมื่อเวลาผ่านไป แล้วค่ามุมสัมผัสลดลงเป็นผลมาจากการดูดซึมน้ำที่ผิวของฟิล์มนั้นเอง

Simão et al. (2006) ศึกษาการเคลือบฟิล์มข้าวโพด ด้วยวิธี Chemical Vapour Deposition (CVD) โดยใช้แก็สมีเทน (methane, CH_4) และประยุกต์พลาสมาด้วยซัลเฟอร์เฮกซะฟลูออไรด์ (SF_6)อีกครั้ง ซึ่งการปรับสภาพผิวของฟิล์มนี้ส่งผลให้ฟิล์มมีสมบัติไม่ชอบน้ำมากขึ้น โดยค่ามุมสัมผัสเพิ่มขึ้นจาก 35 องศาสำหรับฟิล์มที่ไม่ได้ผ่านการเคลือบมีเทนเป็น 80 องศาสำหรับฟิล์มที่ผ่านการเคลือบด้วยมีเทน และเมื่อนำฟิล์มที่เคลือบด้วยมีเทนมาประยุกต์พลาสมาด้วย SF_6 ส่งผลให้ค่ามุมสัมผัสเพิ่มสูงขึ้นเป็น 85 องศา นอกจากนี้การวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XPS พบว่า ภายหลังการ

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ปรับสภาพผิวหน้าฟิล์มด้วยสารทั้งสอง พบปริมาณฟลูออรีนบนพื้นผิวของฟิล์ม และมีปริมาณของซัลเฟอร์น้อยกว่าฟลูออรีน เนื่องจากโครงสร้างของซัลเฟอร์ไม่ใช่โครงสร้างหลักของพอลิเมอร์

Li and Jinjin (2007) ศึกษาการใช้แก๊สเฮกซะฟลูออโรพรอพิลีน เพื่อปรับสภาพผ้าไหมและผ้าฝ้าย พบว่าระยะเวลา 1 นาที มุมสัมผัสของผ้าไหมและผ้าฝ้ายมีค่ามากขึ้น ส่วนความดันและกำลังไฟฟ้าไม่ค่อยส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของค่ามุมสัมผัส และยิ่งเพิ่มความดันและกำลังไฟฟ้าส่งผลให้มุมสัมผัสมีค่าลดลง เมื่อทำการทดสอบด้วยเทคนิค XPS พบว่าผ้าที่ปรับสภาพนั้นจะแสดงหมู่ –CF, –CF_2และ –CF_3 ซึ่งผ้าที่ไม่ได้ปรับสภาพ ไม่ได้แสดงหมู่ดังกล่าว แสดงว่าหมู่CF, CF_2และ CF_3 ทำให้เกิดสมบัติไม่ชอบน้ำ ส่วนสมบัติเชิงกล พบว่าผ้าที่ปรับสภาพมีค่าความต้านทานต่อแรงดึง (tensile strength)เพิ่มขึ้นเล็กน้อย และค่าการซึมผ่านไอน้ำลดลงเล็กน้อย เนื่องจากการประยุกต์พลาสมาไม่ได้ส่งผลกระทบกับโครงสร้างโดยรวมของวัสดุ และพลาสมาอาจทำให้เกิดชั้นฟิล์มบางบนผิวของวัสดุได้

Hodak *et al.* (2008) ศึกษาการใช้แก๊สซัลเฟอร์เฮกซะฟลูออไรด์ (SF_6) เพื่อปรับสภาพผ้าไหม โดยใช้คลื่นวิทยุ (radio frequency, RF) เป็นแหล่งกำเนิดพลาสมา พบว่าเมื่อประยุกต์พลาสมาโดยใช้เวลาในการปรับสภาพมากขึ้น ที่กำลังของกำลังคลื่นวิทยุน้อยกว่า 50 วัตต์ และความดันมากกว่า 0.05 ทอร์ ส่งผลให้ใช้เวลาในการดูดซับน้ำของผ้าไหม (water absorption time) ลดน้อยลง เนื่องจากที่สภาวะดังกล่าวมีความเข้มข้นของสปีชีร์ฟลูออรีนมาก มีผลให้มีระยะห่างของการชนกันระหว่างสปีชีร์ที่เกิดจากสภาวะพลาสมาน้อยลง จึงทำให้กระบวนการแตกตัวเป็นไอออน (ionization)ลดลงด้วย และทำให้มีอัตราการแทนที่ของอะตอมฟลูออรีนบนผิวหน้าของผ้าไหมเพิ่มขึ้น

Simão et al. (2009) ทำการศึกษาสมบัติการต้านทานน้ำของฟิล์มข้าวโพด จากการประยุกต์พลาสมาด้วย SF_6 พบว่าค่ามุมสัมผัสจะเพิ่มขึ้น เมื่อประยุกต์พลาสมาในเวลานานขึ้น เพราะเกิดการเปลี่ยนแปลงที่พื้นผิวของฟิล์ม โดยมีฟลูออไรด์มาอยู่บนพื้นผิวของฟิล์ม เมื่อทดสอบด้วย AFM พบว่าลักษณะพื้นผิวจะเปลี่ยนแปลงไปตามเวลาที่ทำการประยุกต์พลาสมา และเมื่อใช้เวลา 300 วินาที ในการประยุกต์พลาสมา พบว่าจะเห็นแกรนูลชัดเจนอยู่บนผิวของฟิล์ม ซึ่งความขรุขระของพื้นผิวสามารถวัดได้จากความสูงของพีค และระยะห่างของพีคจากกราฟ ซึ่งพบว่าเมื่อใช้เวลาในการประยุกต์พลาสมามากขึ้น จะส่งผลให้ความสูงของพีค และระยะห่างของพีคเพิ่มขึ้นด้วย นอกจากนี้มีการวัด surface elastic module (S*) พบว่ามีการเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ระหว่างฟิล์มที่ผ่านการประยุกต์และไม่ได้ผ่านการประยุกต์

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

Park et al. (2009) ศึกษาการเตรียมเส้นใยเซลลูโลสไตรอะซิเตตขนาดนาโน/ไมโคร (nano/micro fibrous cellulose triacetate, CTA) โดยวิธี electrospun ที่ความเข้มข้น 5% พบว่าค่ามุมสัมผัสสูงถึง 142° เนื่องจากเกิดความขรุขระที่ผิววัสดุมากขึ้น และเพิ่มสมบัติความไม่ชอบน้ำอย่างยิ่งยวด (superhydrophobic) ด้วยวิธีประยุกต์พลาสมาด้วย CF_4 พบว่าหลังการประยุกต์พลาสมาระยะเวลา 60 วินาที ค่ามุมสัมผัสเพิ่มขึ้น 153° เนื่องจากการประยุกต์พลาสมาช่วยลดพลังงานพื้นผิวเพราะมีพันธะ C-F มากขึ้นบริเวณผิวหน้า

Chaiwong et al. (2010) ศึกษาผลของการประยุกต์พลาสมาโดย SF_6 บนฟิล์มพอลิแลคติกแอซิด เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติการต้านทานน้ำ พบว่า เมื่อทำการประยุกต์พลาสมาที่กำลังไฟ 25 วัตต์ และความดัน 100 มิลลิทอร์ ทำให้ค่ามุมสัมผัสมีค่าเพิ่มขึ้น เป็น 101° เพราะมีพลังงานการยึดติดต่ำ แต่ถ้าเพิ่มกำลังวัตต์เป็น 50 และ 75 วัตต์ จะทำให้ค่ามุมสัมผัสลดลง เพราะเกิดการกัดกร่อน ส่วนค่าการซึมผ่านของไอน้ำ พบว่าไม่มีการเปลี่ยนแปลงทางนัยสำคัญ แต่เวลาการดูดซับน้ำมีการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญ คือเมื่อเวลาในการประยุกต์พลาสมานานขึ้น จะส่งผลให้ใช้เวลาในการดูดซับน้ำมากขึ้นด้วย เป็นเพราะการดูดซับน้ำถูกควบคุมด้วยสมบัติการสลายตัวของสารละลาย และตัวทำละลาย ในขณะที่การซึมผ่านของไอน้ำ จะเกี่ยวกับกลไกการซึมผ่านและสมบัติการละลายของสาร นั่นคือ วัสดุที่มีการซึมผ่านได้ง่าย เป็นผลมาจากสมบัติของพอลิเมอร์ เช่น โครงสร้างทางเคมี ความเป็นผลึก และการเกิดการเชื่อมต่อของสายโซ่ เมื่อวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวของฟิล์มด้วยเทคนิค ATR-FTIR พบว่าเมื่อทำการประยุกต์พลาสมาที่กำลัง 25 วัตต์ และความดัน 100 มิลลิทอร์ พื้นผิวมีลักษณะความขรุขระมากขึ้น เมื่อยิ่งเพิ่มเวลาในการประยุกต์มากขึ้น พื้นผิวก็มีความขรุขระมากยิ่งขึ้นด้วย แสดงให้เห็นว่าการประยุกต์พลาสมาส่งผลให้เกิดการกัดกร่อนที่ผิวของฟิล์มนั่นเอง

Sahin (2011) ทำการศึกษาการปรับสภาพผิวของวัสดุ ด้วยแก๊สอาร์กอนบนกระดาษ และพลาสมาด้วยแก๊สเตตระฟลูออโรอีเทน (TFE) ทับลงอีกครั้ง ทำให้เกิดการเชื่อมต่อของสายโซ่บนผิวของกระดาษ เพื่อทำให้เกิดชั้นฟลูออโรเนต ซึ่งเพิ่มสมบัติการต้านทานน้ำของกระดาษ นอกจากนี้พบว่ากระดาษผ่านพลาสมาด้วยแก๊สทั้งสองแล้ว มีลักษณะของผิวหน้าของกระดาษที่มีความขรุขระมากยิ่งขึ้น และการดูดซึมน้ำของกระดาษที่เคลือบด้วย TFE ลดลงเพียง 1.3 % แต่ถ้ามีการปรับสภาพผิวก่อนด้วยแก๊สอาร์กอนก่อน จะทำให้การดูดซึมน้ำลดลงถึง 22% เมื่อเทียบกับกระดาษที่ไม่ได้ผ่านการเคลือบ

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

Han et al. (2011) ทำการศึกษาเกี่ยวกับการประยุกต์พลาสมาแบบเย็นบนโฟมที่ทำมาจากแป้ง (starch foam) โดยใช้แก๊ส SF_6 พบว่าการประยุกต์พลาสมาส่งผลให้เกิดชั้นฟิล์มของฟลูออรีนบนผิวของวัสดุ และเพิ่มสมบัติไม่ชอบน้ำให้กับวัสดุด้วย การทดสอบค่ามุมสัมผัสพบว่ามีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 120 องศา และโฟมที่ไม่ได้ผ่านการประยุกต์พลาสมาจะมีอัตราการลดลงของมุมสัมผัสที่สูง เป็นเพราะว่าน้ำได้ถูกดูดซับเข้าไปในโฟม และทำให้เกิดการละลายน้ำ แต่การใช้แก๊ส SF_6 ทำให้พื้นผิวของวัสดุแข็งแรงมากขึ้น จึงไม่เกิดการละลายน้ำ การดูดซึมน้ำและการซึมผ่านของไอน้ำลดลง ส่วนพารามิเตอร์ที่ส่งผลต่อการทดลอง คือ อัตราเร็วในการเกิดชั้นฟิล์มฟลูออรีน และสัดส่วนของออกซิเจนต่อคาร์บอน โดยฟลูออรีนมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 46.8% เป็น 60.2%

Jassal et al. (2012) ทำการศึกษาการประยุกต์พลาสมาแบบความดันบรรยากาศด้วยการประยุกต์พลาสมาบนสิ่งทอ โดยการใช้แก๊สผสมระหว่างฮีเลียมและ 1,3 บิวตะไดอีน พบว่าหลังการประยุกต์พลาสมา เวลาในการดูดซึมน้ำเพิ่มขึ้นจาก 12 นาทีเป็นมากกว่า 60 นาที และค่ามุมสัมผัสเพิ่มขึ้นจาก 0 เป็น 142 องศา หลังการประยุกต์พลาสมา โดยสัดส่วนของแก๊สผสมจะส่งผลเกี่ยวกับการเพิ่มขึ้นของคาร์บอน ของตัวอย่างที่ผ่านการพลาสมา ทำให้เกิดหมู่ CH_x มากขึ้น และปริมาณของออกซิเจนลดลง แสดงให้เห็นว่าหมู่ไฮดรอกซิลบนผิวสิ่งทอถูกกำจัดออกไป ทำให้เกิดชั้นฟิล์มไฮโดรคาร์บอนใหม่บนผิวของสิ่งทอนั่นเอง

Xiao *et al.* (2013) ศึกษาการใช้พลาสมาเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติการต้านทานน้ำ โดยใช้หลักการกราฟของมอนอเมอร์ทั้งสองชนิดคือ buty acrylate และ 2-ethylhexyl acrylate ลงบนผิวของกระดาษคราฟท์ฟอกขาวที่ขึ้นรูปด้วยเครื่องขึ้นรูปมาตรฐาน (bleached kraft hand sheet) ด้วยการประยุกต์พลาสมาในความดันบรรยากาศ โดยใส่มอนอเมอร์ทั้งสองลงไปในระหว่างการตีเยื่อ 1 ชั่วโมง แล้วทำการปรับสภาพด้วยกำลัง 10 วัตต์ และใช้เวลาน้อยกว่า 3 นาที พบว่ามุมสัมผัสของกระดาษหลังปรับสภาพมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ และมีปริมาณของมอนอเมอร์ที่ทำการกราฟน้อยกว่า 4.0 wt% แต่ยังส่งผลทำให้กระดาษคราฟท์ฟอกขาวมีสมบัติการต้านทานน้ำเพิ่มขึ้นได้

Mano *et al.* (2013) ทำการศึกษาโดยใช้วิธีการตกตะกอนของพอลิไฮดรอกซิลบิวทาเรต (polyhydroxylbutyrate, PHB) บนผิวกระดาษ โดยใช้วิธี phase separation พบว่าพื้นผิวของกระดาษมีความขรุขระ ทั้งขนาดไมโครและนาโน มีค่ามุมสัมผัสโดยเฉลี่ย คือ 153 องศา นอกจากนี้ยังมีการใช้แก๊สอาร์กอน ในการปรับสภาพพลาสมา พบว่าพื้นผิวมีความสามารถขณะเปียก (wettability surface) เพิ่มมากขึ้นและค่ามุมสัมผัสลดลง เมื่อใช้เวลาในการประยุกต์พลาสมามากขึ้น เพราะเกิด

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

การขัดขวางของพันธะไฮโดรเจน ภายในส่วนอสัณฐานของเส้นใยเซลลูโลส ทำให้เกิดความชอบน้ำเพิ่มมากขึ้น

Amaral *et al.* (2013) ศึกษาการประยุกต์พลาสมาแบบเย็น (cold plasma treatment) ใช้แก๊สไนโตรเจน กับกระดาษรีไซเคิล เพื่อเพิ่มความชอบน้ำ พบว่าเมื่อกระดาษผ่านการประยุกต์พลาสมา เป็นเวลา 60 วินาที มุมสัมผัสมีค่าลดลงจาก 110 เป็น 28 องศา และเมื่อเพิ่มเวลาในการประยุกต์มากขึ้นมุมสัมผัสไม่มีการเปลี่ยนแปลงมากนัก งานของการยึดติด (work of adhesion)ของของเหลวนั้นสามารถคำนวณได้จากสมการของ Young พบว่าก่อนประยุกต์พลาสมางานของการยึดติดมีค่า 48 ดายน์ต่อเซนติเมตร และหลังทำการประยุกต์พลาสมา มีงานองการยึดติดมีค่า 137 ดายน์ต่อเซนติเมตร เพราะการประยุกต์พลาสมาทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมีบนผิวกระดาษ หรือเรียกว่า electric discharge treatment ที่ไปทำปฏิกิริยากับหมู่ที่มีขั้ว และ/หรือเพิ่มควขามขรุขระบนพื้นผิวของกระดาษ

Chang and Chian *et al.* (2013) ทำการศึกษาการประยุกต์พลาสมาบนฟิล์มไคโตซานด้วยแก๊สอาร์กอน เมื่อใช้เทคนิค FTIR-ATR พบว่าก่อนการประยุกต์พลาสมาฟิล์มไคโตซานแสดงเฉพาะหมู่อะมิโนที่ 1600 ซม$^{-1}$ และหลังการประยุกต์พลาสมาบนฟิล์มไคโตซาน พบว่ามีหมู่ไฮดรอกซิลและหมู่คาร์บอนิลเพิ่มขึ้นที 1650 และ 1085 ซม$^{-1}$ ตามลำดับ นั้นแสดงให้เห็นว่าฟิล์มไคโตซานมีสมับติชอบน้ำมากยิ่งขึ้น เนื่องจากมีโมเลกุลของน้ำเข้าไปในฟิล์มได้มากขึ้น ซึ่งส่งผลต่อดีสมบัติการย่อยสลายของฟิล์ม คือ หลังการประยุกต์พลาสมาฟิล์มสามารถย่อยสลายได้ดีขึ้น นอกจากนี้เมื่อศึกษาลักษณะพื้นผิวของฟิล์มก่อนประยุกต์พลาสมา พบว่าฟิล์มไคโตซานมีความเรียบและมีความเป็นเนื้อเดียวกัน แต่เมื่อผ่านการประยุกต์พลาสมา ฟิล์มมีความขรุขระและมีรอยนูนมากขึ้น นั้นเป็นเพราะการประยุกต์พลาสมาส่งผลให้เกิดการทำลายผิวของฟิล์ม

Maia *et al*. (2013) ศึกษาการประยุกต์พลาสมาบนยางมอนอเมอร์เอทิลีนพรอพิลีนไดอีน (ethylene propylene diene monomer, EPDM) ด้วยแหล่งพลังงานที่เป็นไมโครเวฟ ด้วยแก๊สไนโตรเจน แก๊สออกซิเจน แก๊สไฮโดรเจน และแก็สอาร์กอน พบว่าหลังการประยุก์พลาสมาด้วยแก๊สดังกล่าว เกิดการเติมหมู่ฟังก์ชันออกซิเจนและไนโตรเจนบนพื้นผิวของยาง ซึ่งหมู่ฟังก์ชันที่เกิดขึ้นมาใหม่นั้นเป็นกลุ่มมีขั้ว (polar group) คือ หมู่คาร์บอนิลและหมู่คาร์บอเนต จึงทำให้ค่ามุมสัมผัสมีค่าลดลง นอกจากนี้เมื่อทำการประยุกต์พลาสมาด้วยแก๊สผสมระหว่างแก๊สอาร์กอน แก๊สไนโตรเจน และแก๊สไฮโดรเจน ที่ระยะวเลา 60-300 วินาที พบว่าการประยุกต์พลาสมาด้วยระยะเวลาที่นานขึ้น ทำ

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ให้ยางเกิดการย่อยสลาย และมีความแข็งแรงลดลง ทั้งนี้ผลของระยะเวลาการประยุกต์พลาสมาที่ 600 วินาที ยังส่งผลให้ผิวหน้าของยางเกิดการหลุดลอกออก

Sahin (2013) ทำการศึกษาการประยุกต์พลาสมาด้วยออกตะเมทิลไซโคลเตเตระทราไซเลน (octamethylcyclotetrasiloxane, OMCTSO) บนกระดาษ พบว่าหลังการประยุกต์พลาสมาพบอนุภาคกระจายตัวอยู่ทั่วบนพื้นผิวของกระดาษ และพบชั้นฟิล์บางบนพื้นผิวของกระดาษอีกด้วย ในส่วนของการดูดซับน้ำ พบว่าหลังการประยุกต์พลาสมาความสามารถดูดซับน้ำลดลงถึง 44% ที่สภาวะการประยุกต์พลาสมา 50 วัตต์ เวลาการประยุกต์ 5 นาทีและความดัน 300 มิลลิทอร์ เนื่องจากเกิดการสร้างพันธะโควาเลนต์ระหว่าง OMCTSO และกระดาษ จึงทำให้กระดาษมีสมบัติไม่ชอบน้ำ ซึ่งน้ำเป็นของเหลวที่มีขั้ว สามารถแทรกเข้าไปในช่องว่างของกระดาษที่มีโครงสร้างเป็นรูพรุนได้ และลดจำนวนพันธะไฮโดรเจนภายในโครงสร้างของกระดาษ นอกจากนี้กระดาษหลังการประยุกต์พลาสมามีสมบัติการสกัดกั้นอากาศที่ดีขึ้น เพราะว่าหลังการประยุกต์พลาสมาเกิดการเชื่อมต่อของ OMCTSO บนพื้นผิวของกระดาษ ซึ่ง OMCTSO สามารถเข้าไปอุดในช่องว่างภายในโครงสร้างของเส้นใยกระดาษ

Qiu *et al*. (2014) ทำการศึกษาผลของศักย์ไฟฟ้าต่อการประยุกต์พลาสมาบนเส้นใยของป่านรามีด้วยแก๊สฮีเลียมที่ศักย์ไฟฟ้าแตกต่างกัน พบว่าหลังการประยุกต์พลาสมาพื้นผิวของเส้นใยป่านเกิดการกัดกร่อน ซึ่งเป็นผลมาจากการเพิ่มศักย์ไฟฟ้าที่มากขึ้น ส่งผลให้พื้นผิวของเส้นใยมีความขรุขระมากขึ้น โดยที่ศักย์ไฟฟ้า 1.5-9 กิโลโวลต์จะเห็นการสะสมของจุดเล็กๆบนพื้นผิวของเส้นใย ซึ่งสังเกตเห็นได้จากรอยบากและรอยนูน ทั้งนี้ที่ศักย์ไฟฟ้า 9 กิโลโวลต์เห็นการหลุดลอกของเส้นใยมาก เนื่องจากมาจากอนุภาคที่ถูกกระตุ้นด้วยพลาสมาที่ศักย์ไฟฟ้าสูงจะมีความหนาแน่นและมีพลังงานของอนุภาคมาก จึงส่งผลต่อให้เกิดการทำลายพันธะทางเคมีของเส้นใยป่าน

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

1. วัตถุดิบ

1.1 กระดาษคราฟท์ประเภททำลอน CS 125 น้ำหนักมาตรฐาน 125 กรัมต่อตารางเมตร ซึ่งได้รับความอนุเคราะห์จาก บริษัทสยามคราฟท์ จำกัด

1.2 พอลิเมอร์ชีวภาพผสมระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช (Thermoplastic starch, TPS) กับพอลิบิวทิลีนอะดิเพท-โค-เทเรฟทาเลท (poly(butylene adipate-co- terephthalate, PBAT) โดยใช้คำย่อแทน คือ TPS/PBAT ผสมในอัตราส่วน 60:40

1.3 แก๊สเฮกซะฟลูออโรพรอพิลีน (Hexafluoropropylene gas, C_3F_6) ซื้อมาจาก บริษัท พอลิซอร์ส จำกัด

2. อุปกรณ์

2.1 เครื่องแก้วที่ใช้ในการทดลองและเดซิกเคเตอร์
2.2 เครื่องชั่งละเอียดทศนิยม 3 ตำแหน่ง (Shimadzn BX300, Japan)
2.3 เครื่องชั่งละเอียดทศนิยม 4 ตำแหน่ง (Sartorius BP110S, Germany)
2.4 นาฬิกาจับเวลา
2.5 ไมโครปิเปต (Gilson, France)
2.6 ตู้อบลมร้อนแบบควบคุมอุณหภูมิ (Memmert, Germany)
2.7 เครื่องวัดความหนา (Mitoyo ID-C112BS, Japan)
2.8 ชุดทดสอบการซึมผ่านของไอน้ำ
2.9 เครื่องวัดสี (Hunter Lab Model Miniscan XE, USA)
2.10 เครื่องทดสอบความต้านทานแรงดึง (Instron 5965, USA)
2.11 ชุดทดสอบการดูดซึมน้ำ (Cobb test)
2.12 เครื่องวัดมุมสัมผัส (OCA 20 Dataphysics, Filderstadt, Germany)
2.13 เครื่องผลิตพลาสมาความดันต่ำ

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิธีการ

1. ตรวจสอบสมบัติเบื้องต้นของกระดาษ

ตัดกระดาษตามขนาดที่ต้องการตามวิธีการตัดทดสอบแต่ละชนิด ปรับสภาวะวัสดุในตู้ควบคุมอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์สภาวะอุณหภูมิ 27± 1 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 65 ± 2 (ISO 187) เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำมาทดสอบสมบัติต่างๆ ดังต่อไปนี้

1.1 ทดสอบสมบัติทางกายภาพและสมบัติเชิงกลของกระดาษก่อนประยุกต์พลาสมา

1.1.1 น้ำหนักมาตรฐานของกระดาษ (ดัดแปลงจาก ASTM D646-96)
1.1.2 ความหนาของวัสดุชีวฐาน (ASTM D645-97)
1.1.3 ปริมาณความชื้น (ASTM D644-99)
1.1.4 สี (ระบบ L a* b*)
1.1.5 ความต้านทานแรงดึง (ASTM D828-93)

1.2 ทดสอบสมบัติการต้านทานน้ำ และสมบัติการสกัดกั้นการซึมผ่านของกระดาษก่อนประยุกต์พลาสมา

1.2.1 ทดสอบปริมาณการดูดซึมน้ำ (Cobb’s test) (ดัดแปลงจาก ASTM D3285-93)
1.2.2 ทดสอบมุมสัมผัสของน้ำ (ดัดแปลงจาก ASTM D5946-04)
1.2.3 คำนวณค่างานของการยึดติด
1.2.4 ทดสอบอัตราการซึมผ่านของไอน้ำ (ASTM E96)
1.2.5 ทดสอบอัตราการซึมผ่านของแก๊สออกซิเจน (ASTM D3985)

2. ตรวจสอบสมบัติเบื้องต้นของแผ่นชีทพอลิเมอร์ชีวภาพ

ตัดตัวอย่างตามขนาดที่ต้องการตามวิธีการตัดทดสอบแต่ละชนิด ปรับสภาวะวัสดุในตู้ควบคุมอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์สภาวะอุณหภูมิ 23± 1 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ ร้อยละ 50± 2 เป็นเวลา 48 ชั่วโมง จากนั้นนำมาทดสอบสมบัติต่างๆ ดังต่อไปนี้

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

2.1 ทดสอบสมบัติทางกายภาพและสมบัติเชิงกลของแผ่นชีทพอลิเมอร์ชีวภาพก่อนประยุกต์พลาสมา

2.1.1 ความหนาของวัสดุ (ASTM D645-97)

2.1.2 ปริมาณความชื้น (AACC, 2000 method 44-15A)

2.1.3 สี (ระบบ L a* b*)

2.1.4 ความต้านทานแรงดึง (ASTM D638)

2.2 ทดสอบสมบัติการต้านทานน้ำ และสมบัติการสกัดกั้นการซึมผ่านของแผ่นชีทพอลิเมอร์ชีวภาพก่อนประยุกต์พลาสมา

2.2.1 ทดสอบการดูดซึมน้ำ (ดัดแปลงจาก Andrade *et al.*,2005)

2.2.2 ทดสอบมุมสัมผัส (ดัดแปลงจาก ASTM D5946-04)

2.2.3 คำนวณค่างานของการยึดติด

2.2.4 ทดสอบอัตราการซึมผ่านของไอน้ำ (ASTM E96)

2.2.5 ทดสอบอัตราการซึมผ่านของแก๊สออกซิเจน (ASTM D3985)

3. ประยุกต์พลาสมาโดยเครื่องผลิตพลาสมาความดันต่ำ

3.1 การเตรียมตัวอย่างกระดาษและแผ่นชีทพอลิเมอร์ชีวภาพ

ตัดกระดาษและแผ่นชีทพอลิเมอร์ชีวภาพขนาด 20 × 7 เซนติเมตร เพื่อให้ใส่ตัวอย่างลงในแชมเบอร์สุญญากาศของเครื่องผลิตพลาสมาความดันต่ำได้พอดี

3.2 การประยุกต์พลาสมาบนกระดาษและแผ่นชีทพอลิเมอร์ชีวภาพ

ใส่ตัวอย่างลงในแชมเบอร์สุญญากาศ และดูดอากาศออกเพื่อให้ความดันภายในแชมเบอร์สุญญากาศค่อยๆลดลงจนคงที่ จากนั้นผ่านแก๊สเข้าไปในแชมเบอร์สุญญากาศจนได้ความดันแก๊สที่ต้องการ ปรับคลื่นวิทยุตามที่ต้องการ และเมื่อระบบทำงานเครื่องกำเนิดคลื่นวิทยุจะส่งคลื่นรบกวนกระตุ้นให้แก๊สแตกตัวเป็นพลาสมา และเข้าประยุกต์บนผิวกระดาษและพอลิเมอร์ชีวภาพ เมื่อเสร็จสิ้นการประยุกต์พลาสมา นำตัวอย่างออกจากแชมเบอร์สุญญากาศ เพื่อนำไปทดสอบสมบัติต่างๆต่อไป

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

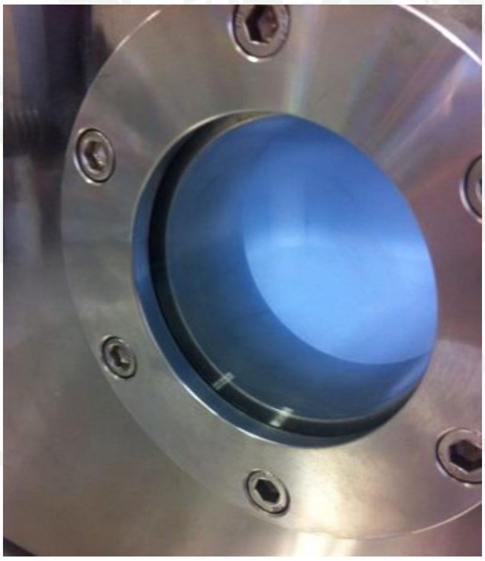
4. ศึกษาอิทธิพลของสภาวะพลาสมาต่อสมบัติการต้านทานน้ำของกระดาษ

4.1 แผนการทดลอง

วางแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ (completely randomized design, CRD) โดยศึกษา 2 ปัจจัย ได้แก่กำลังคลื่นวิทยุ 5 ระดับ คือ 100, 150, 200, 250 และ 300 วัตต์ และระยะเวลาการประยุกต์ 4 ระดับ คือ 1, 3, 5, 10 นาที โดยให้ความดันคงที่ เพื่อศึกษากำลังคลื่นวิทยุและระยะเวลาการประยุกต์ที่เหมาะสมในการปรับปรุงสมบัติการต้านทานน้ำของแผ่นชีทพอลิเมอร์สำหรับการศึกษาขั้นต่อไป

4.2 การทดลอง

นำกระดาษที่ผ่านมาประยุกต์พลาสมาภายใต้สภาวะพลาสมาต่างๆมาทดสอบสมบัติการต้านทานน้ำ (มุมสัมผัส งานของการยึดติด และการดูดซึมน้ำ) ตามวิธีในข้อ 1.2.1, 1.2.2 และ 1.2.3 เปรียบเทียบผลการทดสอบกับวัสดุชีวฐานที่ไม่ผ่านการประยุกต์พลาสมา



ภาพที่ 14 พลาสมาเฮกซะฟลูออโรพรอพิลีน

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

5. ศึกษาอิทธิพลของสภาวะพลาสมาต่อสมบัติการต้านทานน้ำของพอลิเมอร์ชีวภาพ

5.1 แผนการทดลอง

วางแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ (completely randomized design, CRD) โดยกำหนดกำลังคลื่นวิทยุและระยะเวลาการประยุกต์ที่เหมาะสมที่สุดจากการทดลองในข้อที่ 4 ทั้งนี้เพื่อเลือกสภาวะการประยุกต์พลาสมาที่สนใจ 3 ระดับ โดยพิจารณาจากสมบัติการต้านทานน้ำ ศึกษาและเปรียบเทียบสมบัติด้านต่างๆ ภายหลังการประยุกต์พลาสมาต่อไป

5.2 การทดลอง

นำแผ่นชีทพอลิเมอร์ชีวภาพ ที่ผ่านมาประยุกต์พลาสมาภายใต้สภาวะพลาสมาต่างๆ มาทดสอบสมบัติการต้านทานน้ำ (มุมสัมผัส งานของการยึดติด และการดูดซึมน้ำ) ตามวิธีในข้อ 2.2.1, 2.2.2 และ2.2.3เปรียบเทียบผลการทดสอบกับแผ่นชีทพอลิเมอร์ชีวภาพที่ไม่ผ่านการประยุกต์พลาสมา

6. ศึกษาอิทธิพลของสภาวะพลาสมาต่อสมบัติกีดขวาง และสมบัติเชิงกลของกระดาษและแผ่นชีทพอลิเมอร์ชีวภาพ

6.1 แผนการทดลอง

วางแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ (completely randomized design, CRD) โดยกำหนดกำลังวิทยุและระยะเวลาการประยุกต์ที่เหมาะสมที่สุดจากการทดลองในข้อที่ 4 ทั้งนี้เพื่อเลือกสภาวะการประยุกต์พลาสมาที่สนใจ 3 ระดับ โดยพิจารณาจากสมบัติกีดขวางและสมบัติเชิงกล เพื่อศึกษาและเปรียบเทียบสมบัติด้านต่างๆของกระดาษและแผ่นชีทพอลิเมอร์ชีวภาพ ภายหลังการประยุกต์พลาสมาต่อไป

6.2 การทดลอง

นำกระดาษและแผ่นชีทพอลิเมอร์ชีวภาพ ที่ผ่านมาประยุกต์พลาสมาภายใต้สภาวะพลาสมาต่างๆมาทดสอบ ทดสอบการสมบัติการกีดขวาง และสมบัติเชิงกล เปรียบเทียบผลการทดสอบกับวัสดุตัวอย่างที่ไม่ผ่านการประยุกต์พลาสมา

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

7. ศึกษาอิทธิพลของสภาวะพลาสมาต่อลักษณะพื้นผิวของกระดาษและแผ่นชีทพอลิเมอร์ชีวภาพ

7.1 แผนการทดลอง

วางแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ (completely randomized design, CRD) โดยกำหนดกำลังวิทยุและระยะเวลาการประยุกต์ที่เหมาะสมที่สุดจากการทดลองในข้อที่ 4 ทั้งนี้เพื่อเลือกสภาวะการประยุกต์พลาสมาที่สนใจ 3 ระดับ โดยพิจารณาจากการวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวของตัวอย่าง เพื่อศึกษาและเปรียบเทียบสมบัติด้านต่างๆของวัสดุชีวฐานชนิดต่างๆ ภายหลังการประยุกต์พลาสมาต่อไป

7.2 การทดลอง

นำกระดาษและพอลิเมอร์ชีวภาพ ที่ผ่านมาประยุกต์พลาสมาภายใต้สภาวะพลาสมาต่างๆมา การวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวของตัวอย่าง เปรียบเทียบผลการทดสอบกับวัสดุตัวอย่างที่ไม่ผ่านการประยุกต์พลาสมา

7.2.1 วิเคราะห์พื้นผิว โดยเทคนิค scanning electron microscopy (SEM) ด้วยเครื่อง scanning electron microscope (FEI, QUANTA 450, Czech) ด้วยกำลังขยาย 3,000 เท่า

7.2.2 วิเคราะห์ความขุขระของพื้นผิว โดยเทคนิค atomic force microscopy (AFM) ด้วยเครื่อง Automatic force microscope (Asylum research, USA) ในพื้นที่ 10×10 ไมโครเมตร

7.2.3 วิเคราะห์องค์ประกอบบนพื้นผิว โดยเทคนิค X-ray photoelectron spectroscopy (XPS) ด้วยเครื่อง X-ray photoelectron spectroscope (AXIS Ultra DLD., England)

8. วิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

วิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติโดยการทดสอบความแปรปรวน (analysis of variance, ANOVA) และเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยระหว่างทรีตเมนต์โดยวิธี Ducan’s new multiple range test (DMRT) ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ด้วยโปรแกรม SPSS

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ผลและวิจารณ์

1. ตรวจสอบสมบัติของวัสดุชีวฐาน

1.1 กระดาษรีไซเคิล

กระดาษที่ใช้ในการทดสอบเป็นกระดาษรีไซเคิลใช้เป็นกระดาษทำลอนลูกฟูกมีส่วนผสมของเยื่อรีไซเคิล 100 เปอร์เซนต์ น้ำหนักมาตรฐาน 125 กรัมต่อตารางเมตร (ได้รับความอนุเคราะห์จากบริษัทสยามคราฟท์อุตสาหกรรม โดยมีชื่อรหัสสินค้า CS 125) เนื่องจากเป็นกระดาษที่มาจากเยื่อรีไซเคิล จึงมีลักษณะหยาบและไม่มีการเคลือบใดๆ ส่งผลให้มีสมบัติชอบน้ำที่เด่นชัด เมื่อเทียบกับกระดาษบรรจุภัณฑ์ประเภทอื่นๆ สมบัติก่อนการประยุกต์พลาสมาของกระดาษชนิดนี้ แสดงดังตารางที่ 5

1.2 แผ่นชีทพอลิเมอร์ชีวภาพ

แผ่นชีทพอลิเมอร์ชีวภาพที่ใช้ในการทดสอบเป็นแผ่นชีทพอลิเมอร์ผสมระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช กับพอลิบิวทิลีนอะดิเพท-โค-เทเรฟทาเลท (Thermoplastic starch blend Poly(butylene adipate-co- terephthalate,TPS/PBAT) ในอัตราส่วน 60 : 40 และใช้กรีเซอรอลเป็นพลาสติกไซเซอร์อัตราส่วน 35 phr (parts per hundred parts of resin) ขึ้นรูปด้วยวิธีอัดรูป (casting) มีความหนาอยู่ระหว่าง 0.700-0.900 มิลลิเมตร ซึ่งสมบัติของแผ่นพอลิเมอร์ชีวภาพก่อนการประยุกต์พลาสมา ตามตารางที่ 6

ตารางที่ 5 สมบัติของกระดาษรีไซเคิลก่อนการประยุกต์พลาสมา

	properties	values
Physical	Basis weight (g/m^2)	127.7±2.8
	Thickness (mm)	0.124±0.096
	Moisture (%)	7.66±0.17
	L*	59.60±0.50
	a*	5.52±0.15
	b*	16.30±0.30

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางที่ 5 (ต่อ)

	properties	values
Water resistance	Contact angle (degree)	n/a
	Work on adhesion (dyne/cm)	n/a
	Water absorption (g/m^2)	168.0±17.5
Barrier	Water vapor transmission rate (g/m^2/day)	1,718±29
	Oxygen transmission rate (cm^3/m^2/day)	242,918±4463
Mechanical	Tensile strength MD direction (MPa)	38.53±2.64
	Elongation at break (%)	2.36±0.22
	Modulus (MPa)	3,618±324

หมายเหตุ n/a ไม่สามารถวัดค่าได้

ตารางที่ 6 สมบัติของแผ่นชีทพอลิเมอร์ชีวภาพก่อนการประยุกต์พลาสมา

	properties	values
Physical	Thickness (mm)	0.827±0.060
	Moisture (%)	13.13±0.05
	L*	70.69±2.89
	a*	2.00± 1.10
	b*	12.26±3.00
Water resistance	Contact angle (degree)	57.6± 4.7
	Work on adhesion (dyne/cm)	112.0±5.7
	Water absorption (g/m^2)	0.32±0.05
Barrier	Water vapor transmission rate (g/m^2/day)	90.65±7.72
	Oxygen transmission rate (cm^3/m^2/day)	3,625±51
Mechanical	Tensile strength (MPa)	5.74±0.35
	Elongation at break (%)	558.80±29.85
	Modulus (MPa)	21.93±1.24

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางที่ 6 (ต่อ)

properties	values
Glass transition temperature of TPS (°C)	51.84
Melting temperature of TPS (°C)	243.44
Glass transition temperature of PBAT (°C)	-29.08
Melting temperature of PBAT (°C)	121.75

2. ศึกษาอิทธิพลของสภาวะพลาสมา C_3F_6 ต่อสมบัติการต้านทานน้ำของกระดาษ

จากการศึกษาอิทธิพลของกำลังคลื่นวิทยุและระยะเวลาในการประยุกต์พลาสมา C_3F_6 ต่อสมบัติการต้านทานน้ำของกระดาษ ด้วยกำลังคลื่นวิทยุ 100 150 200 250 และ 300 วัตต์ ด้วยระยะเวลาในการประยุกต์พลาสมา 1 3 5 และ 10 นาที ผลการทดลองแสดงในตารางที่ 7

เมื่อพิจารณากำลังคลื่นวิทยุ พบว่า หากเพิ่มกำลังกำลังคลื่นวิทยุ ส่งผลให้ค่ามุมสัมผัสมีค่าเพิ่มสูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) แต่การใช้กำลังคลื่นวิทยุที่ 50 วัตต์ ไม่สามารถทำให้เกิดสภาวะพลาสมาได้ ส่วนกำลังคลื่นวิทยุที่100-150 วัตต์ ทำให้เกิดการเปล่งแสงพลาสมาที่ไม่สม่ำเสมอ และสีในการเกิดพลาสมาจะอ่อนกว่าเมื่อเทียบกับการใช้คลื่นวิทยุที่ 200-300 วัตต์ โดยที่เวลาประยุกต์พลาสมาเท่ากันคือ 10 นาที แต่กำลังคลื่นวิทยุต่างกัน คือ 200 250 และ 300 มีค่ามุมสัมผัสต่างกันคือ 102.4 106.3 และ124.9 องศา ตามลำดับ ซึ่งที่ระยะเวลาประยุกต์พลาสมาที่ 5 นาที ก็มีแนวโน้มของมุมสัมผัสแบบนี้เช่นเดียวกัน ทั้งนี้เมื่อพิจารณาระยะเวลาในการประยุกต์พลาสมาส่งผลให้ค่ามุมสัมผัสมีค่าเพิ่มสูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) เช่นกัน โดยที่คลื่นวิทยุเท่ากันคือ 300 วัตต์ แต่เวลาประยุกต์ต่างกัน คือ 5 และ 10 นาที มีค่ามุมสัมผัสที่แตกต่างกันคือ 105.5 และ124.9 องศา ตามลำดับ ซึ่งที่คลื่นวิทยุที่ 200 และ 250 วัตต์ ก็มีแนวโน้มของมุมสัมผัสเป็นไปในทำนองเดียวกันเดียวกัน

การที่มุมสัมผัสของกระดาษเกิดการเปลี่ยนแปลงหลังผ่านการประยุกต์พลาสมา เนื่องจากการประยุกต์พลาสมาทำให้เกิดเชื่อมต่อของหมู่ฟลูออรีนที่เกิดจากการแตกตัวของพลาสมาเฮกซะฟลูออโรพรอพิลีนบนพื้นผิวของกระดาษ ซึ่งสอดคล้องกับหลายงานวิจัย (Sahin *et al.*, 2007; Hess *et al.*, 2008, 2009) การปรับสภาพกระดาษจากวัสดุที่มีสมบัติชอบน้ำ(hydrophilic) ให้เป็นวัสดุที่มีสมบัติไม่ชอบน้ำ(hydrophobic) ด้วยเทคโนโลยีพลาสมา ยังขึ้นกับอีกหลายปัจจัย เช่น ชนิดของแก๊สที่ใช้ในการประยุกต์พลาสมา กำลังไฟฟ้า ความดัน ระยะเวลาการประยุกต์พลาสมา และชนิดของวัสดุ

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

(Thorvaldson *et al.*, 2012; Jafari, 2013) ในส่วนของคลื่นวิทยุและเวลาที่ใช้ในการประยุกต์พลาสมาที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่ามุมสัมผัสมีค่าเพิ่มสูงขึ้นด้วย เป็นเพราะความหนาแน่นและพลังงานที่เพิ่มขึ้นของอนุภาคฟลูออรีนที่เกิดจากสภาวะพลาสมา ส่งผลให้ไอออนอิสระของฟลูออรีนเข้าแทนที่ในโครงสร้างโมเลกุลของกระดาษได้มากขึ้น จึงส่งผลให้มีค่ามุมสัมผัสเพิ่มสูงขึ้น (Marais *et al.*, 2006; Simão *et al.*, 2009)

ตารางที่ 7 มุมสัมผัส งานของการยึดติด และการดูดซึมน้ำของกระดาษประยุกต์พลาสมาที่กำลังคลื่นวิทยุและระยะเวลาในการประยุกต์พลาสมาที่แตกต่างกัน

condition		values		
RF power (watt)	Treatment time (min)	Contact angle (degree)	Work on adhesion (dyne/cm)	Water absorption (g/m^2)
untreated		n/a	n/a	168.0±17.5^{a}
100	1	n/a	n/a	155.3±19.3^{bcd}
	3	n/a	n/a	150.2±22.4^{bcde}
	5	n/a	n/a	145.3±10.5^{def}
	10	n/a	n/a	149.3±15.1^{bcde}
150	1	n/a	n/a	148.3±15.1^{bcde}
	3	n/a	n/a	161.1±16.0^{bcd}
	5	n/a	n/a	145.3±12.3^{def}
	10	n/a	n/a	132.5±12.3^{def}
200	1	n/a	n/a	158.2±14.2^{bcd}
	3	n/a	n/a	177.9±23.5^{a}
	5	n/a	n/a	166.5±24.5^{bc}
	10	102.4±5.2^{b}	57.2±6.5b	69.2±35.8^{h}
250	1	n/a	n/a	152.3±15.5^{bcde}
	3	n/a	n/a	156.4±6.4^{bcd}
	5	92.3±6.9^{a}	75.2±14.1^{a}	112.1±16.1^{g}
	10	106.3±4.1^{b}	52.4±5.0^{b}	33.8±6.9^{i}

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางที่ 7 (ต่อ)

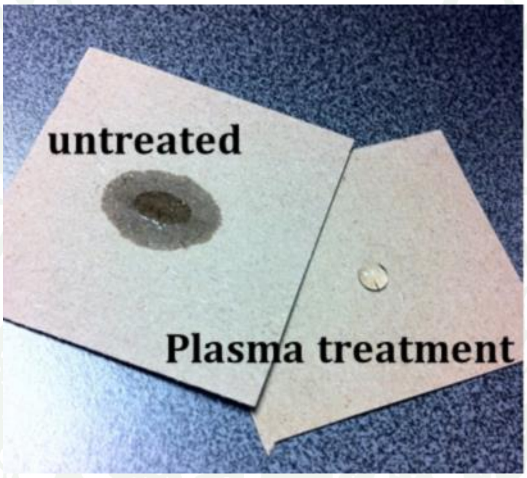
condition		values		
RF power (watt)	Treatment time (min)	Contact angle (degree)	Work on adhesion (dyne/cm)	Water absorption (g/m^2)
	3	n/a	n/a	139.6±22.3^{def}
	5	105.5±8.7^{b}	53.6±10.6^{b}	64.2±11.1^{h}
	10	124.9±6.8^{c}	31.2±7.2^{c}	28.0±5.4^{i}

หมายเหตุ $^{a-i}$ ตัวอักษรที่ต่างกันในแนวตั้ง หมายถึงค่าเฉลี่ยมีความแตกต่างกันทางสถิติ ($p \leq 0.05$)
n/a ไม่สามารถวัดค่าได้

สมบัติการต้านทานน้ำสามารถทดสอบได้หลายวิธีไม่เพียงแต่การวัดมุมสัมผัสเท่านั้น ยังมีการคำนวณหางานของการยึดติด (work of adhesion, W_a) และปริมาณการดูดซึมน้ำ ทั้งนี้งานของการยึดติด สามารถคำนวณได้จากค่ามุมสัมผัส ซึ่งค่าของงานในการยึดติดนั้นจะเพิ่มขึ้นเมื่อค่ามุมสัมผัสลดลง ในทางกลับกันเมื่องานของการยึดติดลดลง ค่ามุมสัมผัสก็จะมีค่าเพิ่มขึ้นเช่นกัน โดยงานของการยึดติดมีความสัมพันธ์กับสมบัติการต้านทานน้ำของกระดาษ คือ ถ้างานการยึดติดน้อยจะส่งผลให้กระดาษมีสมบัติในการต้านทานน้ำที่ดี ส่วนการดูดซึมน้ำ หรือการทดสอบ Cobb’s test พบว่า การประยุกต์พลาสมาที่กำลังคลื่นวิทยุที่ 100-150 วัตต์ เวลา 5 นาที กระดาษเริ่มมีการดูดซึมน้ำแตกต่างจากกระดาษที่ไม่ได้ผ่านการประยุกต์พลาสมาเล็กน้อย แต่ที่กำลังคลื่นวิทยุ 200-300 วัตต์ 10 นาที กระดาษมีการดูดซึมน้ำน้อยลงแตกต่างจากกระดาษที่ไม่ได้ผ่านการประยุกต์พลาสมาอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) สอดคล้องกับ Hodak *et al.* (2008) ที่พบว่าเมื่อเพิ่มกำลังคลื่นวิทยุและระยะเวลาในการประยุกต์พลาสมา ส่งผลให้การดูดซึมน้ำน้อยลง เพราะความเข้มข้นของสปีชีร์ฟลูออรีน (fluorinating species) เพิ่มขึ้น แล้วเข้าไปแทนที่ในโครงสร้างโมเลกุลของวัสดุ ณ บริเวณผิวสัมผัส ทำให้สมบัติการต้านทานน้ำเพิ่มขึ้นอีกด้วย นอกจากการลดการดูดซึมน้ำอาจเกิดจากการนี้ Sahin (2013) พบว่าการประยุกต์พลาสมาด้วยสารระเหยประเภทซิลิโคน ทำให้เกิดชั้นฟิล์มซิลิโคนเข้าไปอุดช่องว่างของรูพรุนกระดาษ ส่งผลให้กระดาษมีการดูดซึมน้ำน้อยลง

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

จากผลการทดลองในขั้นตอนนี้สามารถสรุปได้ว่าที่กำลังคลื่นวิทยุ 200 250 และ 300 วัตต์ เวลาการประยุกต์พลาสมาที่ 5 นาทีขึ้นไป ซึ่งในการทดลองอยู่ที่ 5 และ 10 นาที เป็นสภาวะที่เหมาะสมในการปรับปรุงสมบัติการต้านทานน้ำสำหรับกระดาษ จึงเลือกสภาวะดังกล่าว เพื่อศึกษาอิทธิพลของสภาวะพลาสมา C_3F_6 ต่อสมบัติการต้านทานน้ำของพอลิเมอร์ชีวภาพที่ผสมระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช (Thermoplastic Starch, TPS) กับพอลิบิวทิลีนอะดิเพท-โค-เทเรฟทาเลท (poly(butylene adipate-co- terephthalate), PBAT) โดยกำหนดสภาวะการประยุกต์พลาสมาต่างๆ แสดงตามตารางที่ 8



ภาพที่ 15 การประยุกต์พลาสมาบนกระดาษรีไซเคิล

ตารางที่ 8 สัญลักษณ์เพื่อใช้แทนสภาวะการประยุกต์พลาสมาต่างๆ

กำลังคลื่นวิทยุ	ระยะเวลาประยุกต์พลาสมา	สัญลักษณ์
200	5	200/5
200	10	200/10
250	5	250/5
250	10	250/10
300	5	300/5
300	10	300/10

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

3. ศึกษาอิทธิพลของสภาวะพลาสมา C_3F_6 ต่อสมบัติการต้านทานน้ำของพอลิเมอร์ชีวภาพผสม TPS/PBAT

จากการศึกษาอิทธิพลของกำลังคลื่นวิทยุและระยะเวลาในการประยุกต์พลาสมาต่อสมบัติการต้านทานน้ำของพอลิเมอร์ชีวภาพ ด้วยกำลังคลื่นวิทยุ 200 250 และ 300 วัตต์ ส่วนระยะเวลาในการประยุกต์พลาสมา 5 และ10 นาทีต่อสมบัติการต้านทานน้ำของพอลิเมอร์ชีวภาพ ผลการทดลองแสดงในตารางที่ 9

จากการทดสอบมุมสัมผัสของน้ำของแผ่นพอลิเมอร์ชีวภาพ TPS/PBAT ก่อนและหลังการประยุกต์พลาสมา พบว่ามีค่ามุมสัมผัสมีความแตกต่างทางนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) โดยค่ามุมสัมผัสของแผ่นชีทTPS/PBAT ก่อนการประยุกต์พลาสมา เท่ากับ 57.6 องศา และที่สภาวะกำลังคลื่นวิทยุ 200 วัตต์ระยะเวลาการประยุกต์พลาสมา 5 นาที มีค่ามุมสัมผัสของน้ำเท่ากับ 62.3 องศา ซึ่งค่ามุมสัมผัสยังไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) กับพอลิเมอร์ชีวภาพผสมก่อนการประยุกต์พลาสมา แต่เมื่อเพิ่มระยะเวลาการประยุกต์พลาสมาเป็น 10 นาที พบว่าค่ามุมสัมผัสก็เพิ่มขึ้น อย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) ซึ่งค่ามุมสัมผัสที่สภาวะกำลังคลื่นวิทยุ 300 วัตต์ ระยะเวลา 10 นาที มีค่ามุมสัมผัสมากที่สุด คือ 80.2 องศา แสดงว่าที่สภาวะดังกล่าวทำให้วัสดุมีสมบัติไม่ชอบน้ำมากขึ้น (Slavutsky and Bertuzzi, 2014) สอดคล้องกับงานวิจัยของ Simão *et al.* (2009) พบว่าตัวอย่างคือฟิล์มแป้งที่ผ่านการประยุกต์พลาสมาด้วย SF_6 ค่ามุมสัมผัสเพิ่มขึ้น และเมื่อเพิ่มระยะเวลาการประยุกต์พลาสมา ก็ส่งผลให้ค่ามุมสัมผัสมากขึ้นเนื่องจากเกิดการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบทางเคมีบนพื้นผิว ซึ่งฟลูออรีนเข้าไปเป็นส่วนหนึ่งของพื้นผิวของวัสดุ (Liu *et al.*, 2010; Hana *et al.*, 2011) ซึ่งค่ามุมสัมผัสที่เพิ่มขึ้นน้อยกว่าในกรณีกระดาษจากเยื่อรีไซเคิล

การดูดซึมน้ำของแผ่นพอลิเมอร์ชีวภาพ พบว่าก่อนและหลังการประยุกต์พลาสมา การดูดซึมน้ำแตกต่างเล็กน้อย ซึ่งที่คลื่นวิทยุ 200-300 วัตต์ เวลา 5 นาที ค่าการดูดซึมน้ำไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ แต่ที่ 300 วัตต์ เวลา 10 นาที มีค่าการดูดซึมน้ำน้อยที่สุด คือ 0.27 กรัมต่อตารางเมตร สอดคล้องกับ Hana *et al.* (2011) พบว่าวัสดุที่ไม่ผ่านการประยุกต์พลาสมานั้น น้ำจะสามารถแทรกซึมเข้าไปในโครงสร้าง ส่วนวัสดุที่ผ่านการประยุกต์พลาสมา จะมีการดูดซึมน้ำน้อยลงอาจเนื่องมาจากเกิดจากการทับถมของชั้นฟิล์มบางฟลูออโรคาร์บอน

นอกจากมุมสัมผัส งานการยึดติด และการดูดซึมน้ำของวัสดุ เพื่อบ่งบอกสมบัติการต้านทานน้ำของวัสดุได้แล้ว อีกสองการวิเคราะห์ที่เกี่ยวกับการต้านทานน้ำ การวิเคราะห์ประการที่หนึ่งคือ

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ความสามารถในการเปียกผิว (wettability) โดยวิเคราะห์ปริมาตรของหยดน้ำขณะทำการวัดมุมสัมผัส เพื่อหาอัตราการลดลงของปริมาตรหยดน้ำบนพื้นผิวของกระดาษและแผ่นชีทพอลิเมอร์ชีวภาพผสม ที่ผ่านการประยุกต์พลาสมาที่กำลังคลื่นวิทยุและระยะเวลาในการประยุกต์พลาสมาที่แตกต่างกันแล้วเทียบกับอัตราการลดลงของปริมาตรหยดน้ำบนกระจก ซึ่งเป็นวัสดุที่กันการซึมผ่านของน้ำได้ดี ตามตารางที่ 10 ประการที่สองคือการวิเคราะห์ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของหยดน้ำบนพื้นผิวของกระดาษและแผ่นชีทพอลิเมอร์ชีวภาพผสม ณ เวลาต่างๆ ตามตารางที่ 11 และ 12 โดยเลือกสภาวะประยุกต์พลาสมาที่กำลังคลื่นวิทยุ 200 250 และ 300 วัตต์ ระยะเวลาการประยุกต์ 5 และ 10 นาที ซึ่งเป็นสภาวะที่เห็นผลการทดสอบมุมสัมผัส งานการยึดติด และการดูดซึมน้ำที่ชัดเจน

จากการวัดอัตราการเปลี่ยนแปลงปริมาตรหยดน้ำบนกระจก พบว่าปริมาตรหยดน้ำลดลงเล็กน้อยอันเนื่องการระเหยของหยดน้ำและสามารถวัดค่าได้ประมาณ 0.0185 ไมโครลิตรต่อนาที โดยการวัดปริมตรของหยดน้ำบนผิวกระดาษและแผ่นชีทพอลิเมอร์ชีวภาพ รวมทั้งกระจกซึ่งเป็นพื้นผิวอ้างอิงนั้นเป็นการวัดทันที ที่หยดน้ำตกกระทบบนพื้นผิวเทียบกับค่าที่วัดได้ ณ เวลาหลังการสัมผัสเป็นเวลา 20 นาที ค่าปริมาตรที่วัดได้ไม่ใช่การวัดโดยตรงแต่เป็นการคำนวณอ้างอิงจากขนาดภาพของหยดน้ำโดยเครื่องทดสอบ

ตามตารางที่ 10 พบว่า กระดาษที่ไม่ผ่านการประยุกต์พลาสมา และกระดาษประยุกต์พลาสมาที่สภาวะ 200/5 ไม่สามารถวัดค่ามุมสัมผัสได้ จึงทำให้ไม่สามารถคำนวณอัตราการลดลงของหยดน้ำได้ ส่วนกระดาษที่ประยุกต์พลาสมาที่ 250/10 มีอัตราการลดลงของปริมาตรหยดน้ำที่ไม่แตกต่างทางนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) กับกระจกคือที่ 0.0141 ไมโครลิตรต่อนาที โดยกระดาษที่ผ่านการประยุกต์พลาสมาที่ 300/5 และ 300/10 มีอัตราการลดลงของปริมาตรหยดน้ำที่แตกต่างทางนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) กับกระจกคือที่ 0.0072 และ 0.0062 ไมโครลิตรต่อนาที ตามลำดับ แสดงว่าน้ำส่วนหนึ่งแทรกซึมลงในพื้นผิวด้วยนอกจากการระเหยของหยดน้ำ

ในส่วนอัตราการลดลงของปริมาตรหยดน้ำของแผ่นชีทพอลิเมอร์ชีวภาพผสมก่อนและหลังการประยุกต์พลาสมา พบว่ามีความแตกต่างทางนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) โดยแผ่นชีทพอลิเมอร์ชีวภาพก่อนการประยุกต์พลาสมามีอัตราการลดลงของปริมาตรหยดน้ำ คือ 0.0162 ไมโครลิตรต่อนาที และหลังการประยุกต์พลาสมามีอัตราการลดลงของปริมาตรหยดน้ำอยู่ในช่วง 0.0059 -0.0070 จะเห็นได้ว่าอัตราการลดลงของปริมาตรหยดน้ำของแผ่นชีทพอลิเมอร์ชีวภาพน้อยกว่ากระจก เนื่องมาจากหยดน้ำบนกระจกเกิดการแผ่เป็นวงกว้างมากกว่าหยดน้ำบนแผ่นชีทพอลิเมอร์ชีวภาพ ส่งผลให้มีการระเหยของน้ำมากกว่า

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางที่ 9 มุมสัมผัส งานของการยึดติด และการดูดซึมน้ำของแผ่นชีทพอลิเมอร์ชีวภาพผ่านประยุกต์พลาสมาที่กำลังคลื่นวิทยุและระยะเวลาในการประยุกต์พลาสมาที่แตกต่างกัน

condition		values		
RF power (watt)	Treatment time (min)	Contact angle (degree)	Work on adhesion (dyne/cm)	Water absorption (g/m^2)
untreated		57.6 ± 4.8^{a}	112.1 ± 5.8^{a}	0.32 ± 0.05^{a}
200	5	62.3 ± 3.1^{b}	106.7 ± 3.5^{ab}	0.29 ± 0.04^{ab}
	10	65.8 ± 2.1^{bc}	102.8 ± 9.6^{bc}	0.30 ± 0.04^{abc}
250	5	68.7 ± 5.0^{bc}	97.3 ± 5.5^{bc}	0.30 ± 0.03^{abc}
	10	65.6 ± 10.7^{bc}	92.4 ± 2.3^{dc}	0.29 ± 0.04^{abc}
300	5	70.4 ± 3.7^{c}	88.6 ± 7.1^{bc}	0.29 ± 0.04^{abc}
	10	80.2 ± 3.1^{c}	86.3 ± 18.4^{d}	0.27 ± 0.03^{bc}

หมายเหตุ $^{a-d}$ ตัวอักษรที่ต่างกันในแนวตั้ง หมายถึงค่าเฉลี่ยมีความแตกต่างกันทางสถิติ ($p\leq0.05$)

ในส่วนของการวิเคราะห์เกี่ยวกับขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของหยดน้ำ ทำโดยหยดน้ำปริมาตร 40 ไมโครลิตรบนกระดาษและแผ่นชีทพอลิเมอร์ชีวภาพ ทำการจับเวลาที่ 0 3 7 และ 10 นาที จากนั้นดูดน้ำกลับตามเวลาที่กำหนด แล้วทำการวัดขนาดของเส้นผ่าศูนย์กลางของหยดน้ำที่แผ่กระจาย พบว่า กระดาษก่อนประยุกต์พลาสมาและหลังประยุกต์พลาสมาทุกสภาวะ มีขนาดเส้นผ่าศูนย์ของหยดน้ำที่ขนาดใหญ่ขึ้นเมื่อเวลาผ่านไป ซึ่งที่สภาวะ 200/5 มีการแผ่กระจายของหยดน้ำที่เวลาต่างๆ กว้างมากที่สุด เนื่องจากหยดน้ำแทรกซึมเข้าไปในเนื้อกระดาษอย่างรวดเร็ว อย่างไรก็ตามที่สภาวะประยุกต์พลาสมาอื่น คือ 200/10 250/5 250/10 300/5 และ 300/10 ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของหยดน้ำมีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยที่เวลาต่างๆ โดยในตอนแรกหยดน้ำมีการแผ่กระจายออกไปน้อย และยังไม่แทรกซึมลงไปในกระดาษ ต่อมาจึงมีการแผ่กระจายของหยดน้ำ ทั้งนี้เป็นไปได้ว่าการประยุกต์พลาสมาส่งผลให้หยดน้ำซึมลงในกระดาษได้ยากขึ้น จึงเกิดการกระจายของหยดน้ำแทน ลักษณะเช่นนี้อาจพบในการวัสดุที่มีการเคลือบผิวมาก่อนเพื่อป้องกันการดูดซึมน้ำ เช่น กระดาษเคลือบพลาสติก เป็นต้น การวัดขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของหยดน้ำนั้นจะวัดขนาดของหยดน้ำที่อยู่บนพื้นผิวโดยไม่วัดรวมถึงขนาดพื้นที่ที่หยดน้ำแทรกซึมลงไปในพื้นผิว กระดาษก่อนประยุกต์พลาสมาและกระดาษประยุกต์พลาสมาที่ 200/5 ที่เวลาประยุกต์พลาสมา 7 และ 10 นาที ลักษณะ

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เส้นผ่าศูนย์กลางของหยดน้ำไม่มีความแตกต่างทางนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) แต่กระดาษประยุกต์พลาสมาที่ 300/10 ลักษณะเส้นผ่าศูนย์กลางของหยดน้ำมีความแตกต่างทางนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) กับกระดาษประยุกต์พลาสมาที่สภาวะอื่นๆ ตามตารางที่ 11 ทั้งนี้จากภาพที่ 16 ซึ่งแสดงการกระจายตัวของหยดน้ำบนกระดาษหลังประยุกต์พลาสมา พบว่าสภาวะประยุกต์พลาสมาที่ 300/10 หยดน้ำมีการกระจายตัวน้อยที่สุด หยดน้ำไม่มีการแผ่กระจายอาจเนื่องจากการมีพลังงานพื้นผิวของกระดาษที่ต่ำหลงประยุตก์พลาสมา และไม่มีน้ำซึมลงในกระดาษ ซึ่งตรงข้ามกับกระดาษก่อนประยุกต์พลาสมา ที่น้ำซึมเข้าไปในกระดาษอย่างรวดเร็ว เมื่อเพิ่มกำลังคลื่นวิทยุและระยะเวลาประยุกต์พลาสมามาก จะส่งผลให้เกิดการกระจายของหยดน้ำ และมีน้ำซึมเข้าไปในกระดาษน้อยลงด้วยเช่นกัน

ตารางที่ 10 อัตราการลดลงของปริมาตรหยดน้ำของกระดาษและแผ่นชีทพอลิเมอร์ชีวภาพที่ผ่านการประยุกต์พลาสมาที่กำลังคลื่นวิทยุและระยะเวลาในการประยุกต์พลาสมาที่แตกต่างกัน

condition		Reduction rate of water droplet volume (µl/min)	
RF power (watt)	Treatment time (min)	paper	TPS/PBAT
untreated		-	0.0162 ± 0.001[a]
200	5	-	0.0070 ± 0.001[b]
	10	0.1275 ± 0.032[a]	0.0080 ± 0.003[b]
250	5	0.1288 ± 0.072[a]	0.0071 ± 0.001[b]
	10	0.0141 ± 0.003[b]	0.0056 ± 0.009[b]
300	5	0.0072 ± 0.001[c]	0.0059 ± 0.004[b]
	10	0.0062 ± 0.001[c]	0.0059 ± 0.004[b]

หมายเหตุ ทั้งนี้อัตราการลดลงของปริมาตรหยดน้ำบนผิวกระจกเท่ากับ 0.0185 ± 0.002 ไมโครลิตรต่อนาที

[a-c] ตัวอักษรที่ต่างกันในแนวตั้ง หมายถึงค่าเฉลี่ยมีความแตกต่างกันทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางที่ 11 เส้นผ่าศูนย์กลางของหยดน้ำบนกระดาษ (เซนติเมตร) ที่ดูดกลับในระยะเวลาต่างๆ โดยใช้กำลังคลื่นวิทยุและระยะเวลาประยุกต์พลาสมาแตกต่างกัน

condition		Time (min)			
RF power (watt)	time (min)	0	3	7	10
Untreated		1.47 ± 0.09^{a}	2.10 ± 0.09^{a}	2.24 ± 0.18^{a}	2.35 ± 0.09^{a}
200	5	1.27 ± 0.10^{b}	2.18 ± 0.13^{b}	2.18 ± 0.10^{a}	2.38 ± 0.10^{a}
	10	0.79 ± 0.03^{c}	0.86 ± 0.05^{c}	0.93 ± 0.06^{b}	0.96 ± 0.08^{b}
250	5	0.66 ± 0.05^{d}	0.81 ± 0.08^{c}	0.81 ± 0.04^{c}	0.82 ± 0.07^{c}
	10	0.67 ± 0.02^{d}	0.83 ± 0.07^{c}	0.83 ± 0.01^{c}	0.84 ± 0.02^{c}
300	5	0.67 ± 0.02^{d}	0.81±0.04c	0.81 ± 0.04^{c}	0.81 ± 0.04^{c}
	10	0.52 ± 0.02^{e}	0.62 ± 0.02^{d}	0.66 ± 0.04^{d}	0.67 ± 0.04^{d}

หมายเหตุ $^{a-e}$ ตัวอักษรที่ต่างกันในแนวตั้ง หมายถึงค่าเฉลี่ยมีความแตกต่างกันทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

สำหรับแผ่นชีทพอลิเมอร์ชีวภาพ แสดงผลขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของหยดน้ำ ตามตารางที่ 12 พบว่าแผ่นชีทพอลิเมอร์ก่อนและหลังการประยุกต์พลาสมามีขนาดเส้นผ่าศูนย์ของหยดน้ำที่ขนาดใหญ่ขึ้นเมื่อเวลาผ่านไป ซึ่งแผ่นชีทพอลิเมอร์ชีวภาพ ก่อนประยุกต์พลาสมากับหลังประยุกต์พลาสมาที่สภาวะ 200/5 200/10 250/5 ที่ระยะเวลา 0 3 7 และ 10 นาที มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของหยดน้ำไม่มีความแตกต่างทางนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) แต่แผ่นชีทพอลิเมอร์ชีวภาพก่อนและหลังประยุกต์พลาสมาที่สภาวะ 300/5 300/10 ที่ระยะเวลา 0 3 7 และ 10 นาที มีความแตกต่างทางนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) อย่างไรก็ตามการประยุกต์พลาสมาทุกสภาวะที่เวลา 10 นาที พบว่าขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของทุกสภาวะไม่มีความแตกต่างทางนัยสำคัญเลย

นอกจากนี้พบว่าการเพิ่มระยะเวลาการประยุกต์พลาสมาส่งผลให้ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของหยดน้ำบนแผ่นชีทพอลิเมอร์ชีวภาพมีค่าสูงกว่ากระดาษ เนื่องจากก่อนการประยุกต์พลาสมาแผ่นชีทพอลิเมอร์ชีวภาพมีความเรียบมากกว่ากระดาษ และมีความเรียบเพิ่มมากขึ้นเมื่อแผ่นชีทพอลิเมอร์ชีวภาพผ่านการประยุกต์พลาสมา ส่งผลให้หยดน้ำบนกระดาษมีการแทรกซึมเข้าไปภายในมากกว่าแผ่นชีทพอลิเมอร์ชีวภาพ จากภาพที่ 17 แสดงการกระจายตัวของหยดน้ำบนแผ่นชีทพอลิเมอร์

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ชีวภาพหลังประยุกต์พลาสมา จึงพบว่าลักษณะการกระจายตัวของหยดน้ำของทุกสภาวะมีการเปลี่ยนแปลงไม่ชัดเจนเมื่อเทียบกับการเปลี่ยนแปลงของการกระจายตัวหยดน้ำบนกระดาษ

ตารางที่ 12 เส้นผ่าศูนย์กลางของหยดน้ำบนพอลิเมอร์ชีวภาพ (เซนติเมตร) ที่ดูดกลับในระยะเวลาต่างๆ โดยใช้กำลังคลื่นวิทยุและระยะเวลาประยุกต์พลาสมาแตกต่างกัน

condition		Time (min)			
RF power (watt)	time (min)	0	3	7	10
Untreated		0.66 ± 0.02^{a}	0.85 ± 0.05^{a}	0.88 ± 0.05^{a}	0.93 ± 0.05^{ns}
200	5	0.65 ± 0.07^{a}	0.88 ± 0.05^{a}	0.88 ± 0.03^{a}	0.86 ± 0.03^{ns}
	10	0.71 ± 0.06^{a}	0.90 ± 0.05^{ab}	0.92 ± 0.08^{a}	0.92 ± 0.07^{ns}
250	5	0.65 ± 0.06^{a}	0.85 ± 0.03^{ab}	0.89 ± 0.07^{a}	0.92 ± 0.06^{ns}
	10	0.73 ± 0.04^{b}	0.86 ± 0.04^{ab}	0.89 ± 0.04^{a}	0.89 ± 0.02^{ns}
300	5	0.73 ± 0.07^{b}	0.84 ± 0.05^{b}	0.84 ± 0.05^{b}	0.87 ± 0.05^{ns}
	10	0.74 ± 0.05^{b}	0.83 ± 0.07^{b}	0.86 ± 0.08^{b}	0.89 ± 1.10^{ns}

หมายเหตุ $^{a\text{-}d}$ ตัวอักษรที่ต่างกันในแนวตั้ง หมายถึงค่าเฉลี่ยมีความแตกต่างกันทางสถิติ ($p\leq0.05$)
^{ns} ตัวอักษรที่ต่างกันในแนวตั้ง หมายถึงค่าเฉลี่ยไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ

จากตารางที่ 13 และ 14 แสดงลักษณะหยดน้ำบนกระดาษและแผ่นชีทพอลิเมอร์ชีวภาพที่ใช้กำลังคลื่นวิทยุและระยะเวลาประยุกต์พลาสมาแตกต่างกัน พบว่าหยดน้ำบนวัสดุทั้งสองหลังการประยุกต์พลาสมามีการเปลี่ยนแปลงความสูงของหยดน้ำ ซึ่งความสูงของหยดน้ำบนวัสดุทั้งสองมีค่าสูงขึ้นเมื่อผ่านการประยุกต์พลาสมา ทั้งนี้เมื่อเพิ่มสภาวะประยุกต์พลาสมา คือ กำลังคลื่นวิทยุและระยะเวลาการประยุกต์พลาสมา ส่งผลให้ความสูงของหยดน้ำที่เพิ่มสูงขึ้นด้วย สอดคล้องกับ Andrade *et al.* (2005) ที่พบว่าความสูงและแผ่กระจายตัวของหยดน้ำที่เปลี่ยนแปลงหลังการประยุกต์พลาสมา สัมพันธ์กับค่ามุมสัมผัสและการดูดซึมน้ำของวัสดุ ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดสอบมุมสัมผัส และการดูดซึมน้ำข้างต้น

ทั้งนี้จะเห็นได้ว่าการประยุกต์พลาสมาบนพื้นผิวของกระดาษและแผ่นชีทพอลิเมอร์ชีวภาพส่งผลต่อความสามารถในการเปียกผิว โดยหยดน้ำบนกระดาษที่ผ่านการประยุกต์พลาสมาที่สภาวะ

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

300/10 จะมีลักษณะกลม ไม่แผ่กระจายและไม่ค่อยซึมเข้าไปในกระดาษ ซึ่งต่างจากแผ่นชีทพอลิเมอร์ชีวภาพ ที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของหยดน้ำไม่แตกต่างจากก่อนประยุกต์พลาสมา โดยหยดน้ำบนแผ่นชีทพอลิเมอร์ชีวภาพ จะมีการแผ่กระจาย และไม่เป็นทรงกลมอย่างชัดเจน แสดงให้เห็นว่ากระดาษมีพลังงานยึดติดกับหยดน้ำมากกว่าแผ่นชีทพอลิเมอร์ชีวภาพ (Duncan, 2005) ซึ่งจะสอดคล้องกับค่ามุมสัมผัส และงานของการยึดติด ดังนั้นการกระจายตัวของหยดน้ำบนพื้นผิววัสดุสามารถบอกสมบัติไม่ชอบน้ำหรือชอบน้ำของวัสดุได้ ซึ่งสามารถประเมินได้จากความสามารถในการเปียกผิวของวัสดุนั้นเอง (Marengo *et al.*, 2012) นอกจากนี้ Sorrentino *et al.* (2004) ยังพบว่าการเพิ่มกำลังไฟฟ้าในสภาวะการประยุกต์พลาสมาของวัสดุ จะส่งผลทำให้วัสดุมีความสามารถเปียกผิวของวัสดุมากขึ้น

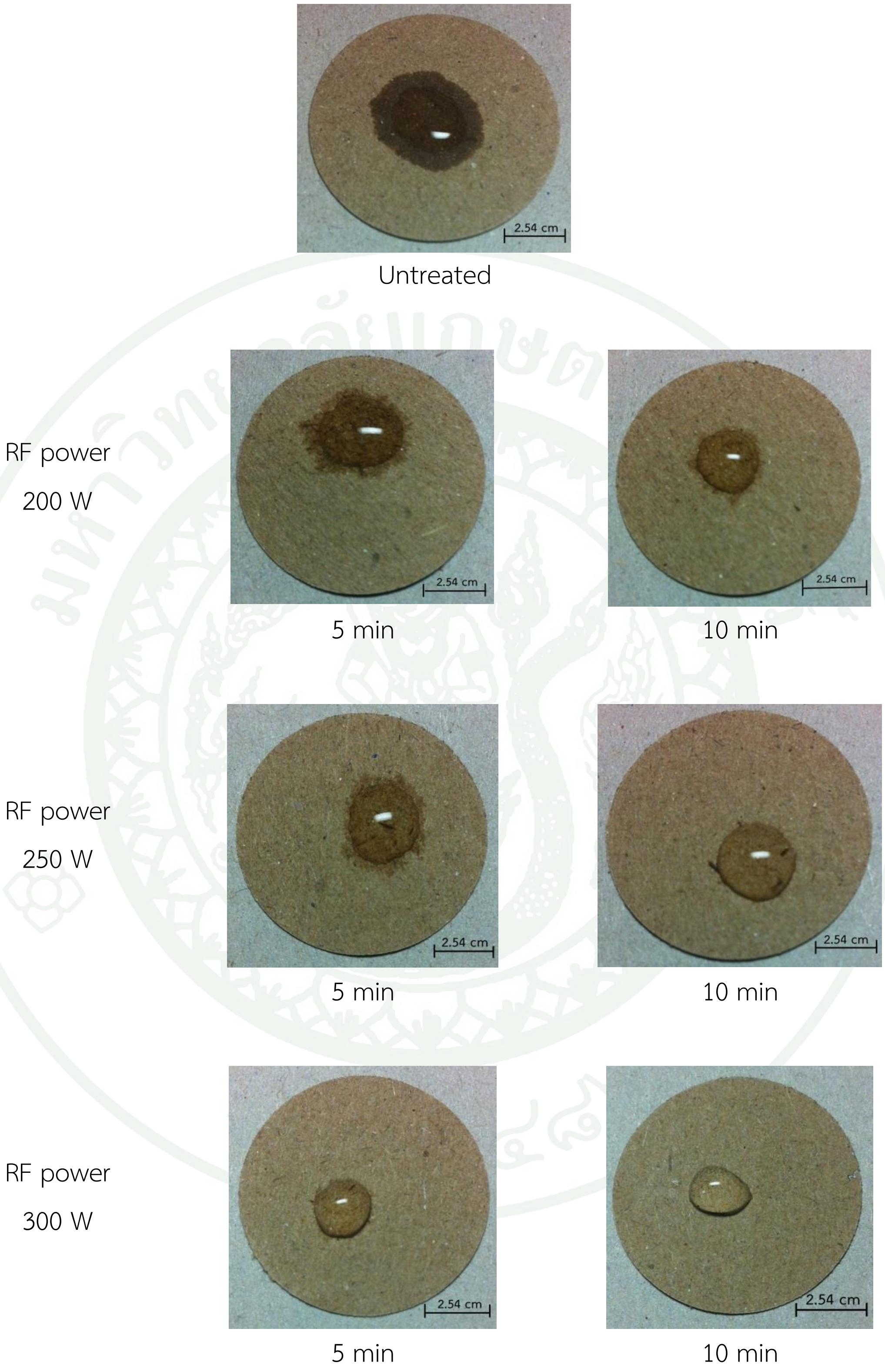
4. อิทธิพลของสภาวะพลาสมาต่อสมบัติทางกายภาพ สมบติเชิงกล และสมบัติการกีดขวาง ของกระดาษและพอลิเมอร์ชีวภาพผสม

4.1 สมบัติทางกายภาพ (Physical properties)

การทดสอบน้ำหนักมาตรฐาน (basis weight) ความหนา(thickness) และปริมาณความชื้น (moisture content) เป็นการทดสอบเพื่อบอกถึงสมบัติทางกายภาพพื้นฐานของกระดาษ ผลการทดลองแสดงตามตารางที่ 14 พบว่า กระดาษที่ผ่านการประยุกต์พลาสมาในทุกสภาวะมีสมสบัติทางกายภาพไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) สำหรับค่าน้ำหนัก ความหนาและปริมาณความชื้นของแผ่นชีทพอลิเมอร์ชีวภาพผสม พบว่าไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$)เช่นกัน ผลการทดลองในส่วนนี้แสดงดังตารางที่ 16 เพราะการกัดกร่อนผิวของแผ่นชีทพอลิเมอร์ชีวภาพผสมอาจเกิดขึ้นน้อย จึงไม่ส่งผลต่อความหนา (Friedrich, 2012) การที่ปริมาณความชื้นในตัวอย่างวัสดุทั้งสองประเภทไม่มีความแตกต่างกันนั้นเนื่องจากอุณหภูมิในระบบไม่สูงนักเนื่องจากเป็นระบบพลาสมาอุณหภูมิต่ำระยะเวลาสัมผัสสั้น จึงไม่ส่งผลกระทบต่อการระเหยออกของโมเลกุลน้ำในตัวอย่าง ทั้งนี้อุณหภูมิในระบบระหว่างประยุกต์พลาสมา แสดงดังภาคผนวก ก

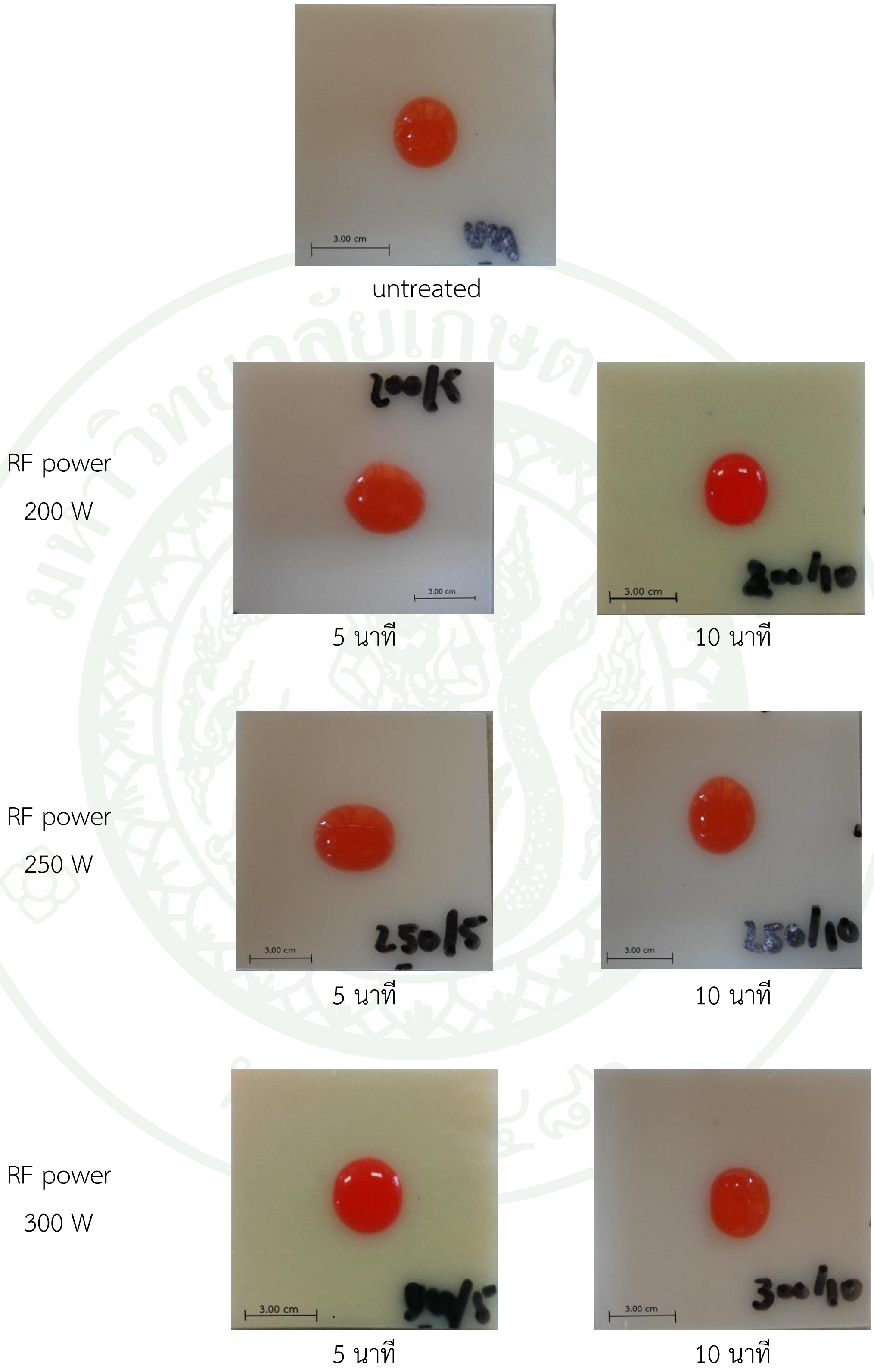
สำหรับทดสอบการวัดสี ด้วยระบบ L*-a*-b* ตามตารางที่ 17 โดยเปรียบเทียบกับกระดาษก่อนและหลังประยุกต์พลาสมา พบว่ากระดาษและแผ่นชีทพอลิเมอร์ชีวภาพ ก่อนและหลังการประยุกต์พลาสมามีความแตกต่างทางนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) ซึ่งค่า b* บ่งบอกถึงสีจากน้ำเงิน (-b*) ไปเหลือง (+b*) สอดคล้องกับผลการทดลองที่พบว่าทั้งกระดาษและแผ่นชีทพอลิเมอร์ชีวภาพ มีสีเหลืองขึ้นเมื่อผ่านการประยุกต์พลาสมา ทั้งนี้พบว่ากระดาษและแผ่นชีทพอลิเมอร์ชีวภาพ ที่ผ่านการ

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 16 การกระจายตัวของหยดน้ำบนกระดาษก่อนและหลังประยุกต์พลาสมา

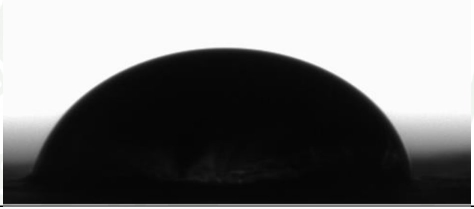
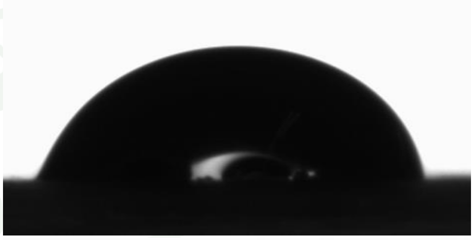
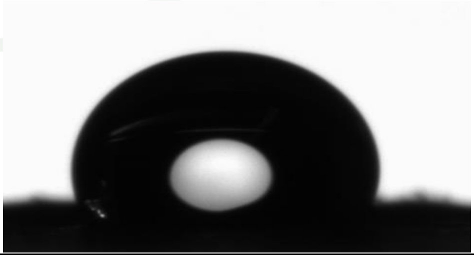
ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 17 การกระจายตัวของหยดน้ำบนพอลิเมอร์ชีวภาพก่อนและหลังประยุกต์พลาสมา

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

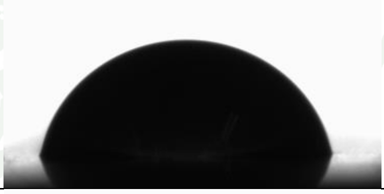
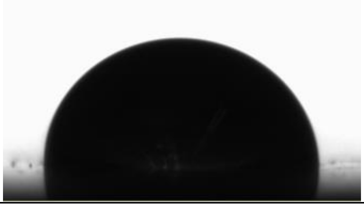
ตารางที่ 13 ลักษณะหยดน้ำบนกระดาษที่ใช้กำลังคลื่นวิทยุและระยะเวลาประยุกต์พลาสมาแตกต่างกัน

Condition		Droplet water on surface[1]
RF power (watt)	Treatment time (min)	
Untreated		n/a
200	5	n/a
	10	
250	5	
	10	
300	5	
	10	

หมายเหตุ [1] ปริมาตรหยดน้ำ 5 ไมโครลิตร

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางที่ 14 ลักษณะหยดน้ำบนพอลิเมอร์ชีวภาพที่ใช้กำลังคลื่นวิทยุและระยะเวลาประยุกต์พลาสมาแตกต่างกัน

Condition		Droplet water on surface[1]
RF power (watt)	RF power (watt)	
Untreated		
200	5	
	10	
250	5	
	10	
300	5	
	10	

หมายเหตุ [1] ปริมาตรหยดน้ำ 5 ไมโครลิตร

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ประยุกต์พลาสมาเป็นเวลา 10 นาที ส่งผลให้ชิ้นวัสดุมีสีเหลืองเพิ่มมากขึ้น โดยเฉพาะที่สภาวะกำลังคลื่นวิทยุ 250 และ300 วัตต์ สำหรับกระดาษ แต่สำหรับแผ่นชีทพอลิเมอร์ชีวภาพ พบว่าที่สภาวะ 200/10 เป็นต้นไป ชิ้นวัสดุมีสีเหลืองเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับแผ่นชีทพอลิเมอร์ชีวภาพ ก่อนประยุกต์พลาสมา ส่วนค่า L* บ่งบอกถึงความสว่าง เห็นได้ว่าหลังการประยุกต์พลาสมาทั้งกระดาษและแผ่นชีทพอลิเมอร์ชีวภาพ มีค่า L* ที่น้อยลง แสดงว่ามีค่าความสว่างน้อยลง โดยกระดาษที่ประยุกต์พลาสมาที่สภาวะ 250/10 และ 300/10 มีค่าความสว่างน้อยกว่าที่สภาวะอื่นๆ และแผ่นชีทพอลิเมอร์ชีวภาพที่สภาวะ 300/5 และ 300/10 มีค่าความสว่างน้อยกว่าที่สภาวะอื่นๆ ดังนั้นจะเห็นได้ว่าปัจจัยของเวลาในการประยุกต์พลาสมามีผลต่อกระดาษมากกว่ากำลังคลื่นวิทยุ ในทางตรงข้ามปัจจัยด้านกำลังคลื่นวิทยุในการประยุกต์พลาสมามีผลต่อแผ่นชีทพอลิเมอร์ชีวภาพมากกว่าระยะเวลาการประยุกต์พลาสมา

ตารางที่ 15 น้ำหนักมาตรฐาน ความหนา และปริมาณความชื้นของกระดาษประยุกต์พลาสมา

Condition		Values		
RF power (watt)	Treatment time (min)	Basis weight (g/m^2)	Thickness (mm)	Moisture content (%)
Untreated		127.7±2.8^{ns}	0.124±0.096^{ns}	7.66±0.17^{ns}
200	5	126.9±3.7^{ns}	0.126±.0.097^{ns}	7.52±1.78^{ns}
	10	125.7±2.8^{ns}	0.123±0.095^{ns}	7.34±0.33^{ns}
250	5	125.4±7.4^{ns}	0.127±0.098^{ns}	7.59±1.52^{ns}
	10	125.3±4.3^{ns}	0.125±0.097^{ns}	7.41±1.17^{ns}
300	5	125.5±1.9^{ns}	0.128±0.099^{ns}	7.56±1.23^{ns}
	10	125.5±4.2^{ns}	0.125±0.097^{ns}	7.26±1.47^{ns}

หมายเหตุ ^{ns} ตัวอักษรที่ต่างกันในแนวตั้ง หมายถึงค่าเฉลี่ยไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางที่ 16 ความหนา และปริมาณความชื้นของพอลิเมอร์ชีวภาพประยุกต์พลาสมา

Condition		Values	
RF power (watt)	Treatment time (min)	Thickness (mm)	Moisture content (%)
Untreated		0.827±0.06[ns]	13.13±0.05[ns]
200	5	0.821±0.07[ns]	13.02±0.04[ns]
	10	0.837±0.06[ns]	13.05±0.04[ns]
250	5	0.803±0.05[ns]	13.08±0.03[ns]
	10	0.877±0.07[ns]	13.10±0.04[ns]
300	5	0.862±0.08[ns]	13.08±0.04[ns]
	10	0.892±0.08[ns]	13.12±0.03[ns]

หมายเหตุ [ns] ตัวอักษรที่ต่างกันในแนวตั้ง หมายถึงค่าเฉลี่ยไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ

ตารางที่ 17 สีของกระดาษและพอลิเมอร์ชีวภาพประยุกต์พลาสมา

Samples	Condition		value		
	RF power (watt)	time (min)	L*	a*	b*
paper	Untreated		59.60±0.48[a]	5.52±0.16[a]	16.30±0.29[a]
	200	5	59.44±0.14[bc]	5.47±0.73[ab]	17.25±0.09[b]
		10	60.02±0.1[b]	5.38±0.04[ab]	17.50±0.10[c]
	250	5	59.15±0.16[c]	5.46±0.04[ab]	17.48±0.08[c]
		10	58.81±0.12[d]	5.68±0.04[c]	17.64±0.10[d]
	300	5	59.16±0.63[c]	5.46±0.16[ab]	17.47±0.08[c]
		10	58.61±0.09[d]	5.65±0.06[c]	17.74±0.07[d]

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางที่ 17 (ต่อ)

Samples	Condition		value		
	RF power (watt)	time (min)	L*	a*	b*
TPS/PBAT	Untreated		70.76 ± 2.89^{a}	2.00 ± 1.10^{a}	12.26 ± 2.98^{a}
	200	5	71.13 ± 3.96^{ab}	1.87 ± 1.25^{a}	12.04 ± 3.96^{a}
		10	68.49 ± 1.86^{c}	0.77 ± 0.57^{b}	8.48 ± 2.27^{b}
	250	5	68.78 ± 1.84^{bc}	0.74 ± 0.36^{b}	8.49 ± 1.78^{b}
		10	68.65 ± 1.42^{bc}	0.66 ± 0.39^{b}	8.37 ± 1.26^{b}
	300	5	68.49 ± 1.86^{d}	0.77 ± 0.57^{b}	8.48 ± 2.27^{b}
		10	66.38 ± 1.12^{d}	0.45 ± 0.28^{b}	8.82 ± 1.19^{b}

หมายเหตุ $^{a-d}$ ตัวอักษรที่แตกต่างในแนวตั้งหมายถึงค่าเฉลี่ยมีความแตกต่างกันทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

4.2 สมบัติการกีดขวาง (Barrier properties)

การทดสอบสมบัติการกีดขวางของกระดาษและแผ่นชีทพอลิเมอร์ชีวภาพ ประกอบด้วยการทดสอบอัตราการซึมผ่านไอน้ำ (Water Vapor Transmittion Rate, WVTR) เป็นปริมาณไอน้ำที่ผ่านวัสดุหนึ่งหน่วยพื้นที่ ภายใต้สภาวะที่กำหนด (Andersson, 2008) โดยใช้สภาวะดัดแปลงที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียสและความชื้นสัมพัทธ์ 85% และอัตราการซึมผ่านของแก๊สออกซิเจน (Oxygen Transmittion Rate, OTR)

จากตารางที่ 18 พบว่า กระดาษก่อนและหลังผ่านการประยุกต์พลาสมามีอัตราการซึมผ่านของไอน้ำแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ($p \leq 0.05$) ซึ่งกระดาษก่อนและหลังประยุกต์พลาสมาที่สภาวะ 200/5 ค่าอัตราการซึมผ่านของไอน้ำไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งสอดคล้องกับการทดสอบอื่นๆ เช่น มุมสัมผัสที่ไม่สามารถวัดค่าได้ ปริมาณการดูดซึมน้ำที่ไม่มีความแตกต่างทางนัยสำคัญ รวมทั้งการเปลี่ยนแปลงขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของหยดน้ำเมื่อเวลาผ่านไป เป็นต้น โดยกระดาษมีอัตราการซึมผ่านไอน้ำลดลงจาก 1,718 เป็น 1,446 -1,546 กรัมต่อตร.ม.ต่อวัน ส่วนแผ่นชีทพอลิเมอร์ชีวภาพ ก่อนและหลังการประยุกต์พลาสมามีอัตราการซึมผ่านของไอน้ำลดลงนัยสำคัญ เช่นกัน โดยมีอัตราการซึมผ่านลดลงจาก 90 เป็น 80-65 กรัมต่อตร.ม.ต่อวัน

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

การประยุกต์พลาสมาส่งผลให้อัตราการซึมผ่านของไอน้ำลดลง เนื่องจากการประยุกต์พลาสมาอาจทำให้เกิดชั้นฟิล์มบางบนผิวของวัสดุ และโครงสร้างดั้งเดิม (bulk properties) ของวัสดุไม่ได้รับความเสียหายมากนัก (Kylián *et al.,* 2013; Cullena *et al.,* 2014; Giannelis *et al.,* 2013) ซึ่งจากผลการทดสอบ XPS พบว่าหลังการประยุกต์พลาสมากระดาษมีพันธะ C-F มากขึ้น แต่ในทางกลับกันพบว่าพันธะ C-OH ลดลง อาจเป็นเพราะเกิดจากอะตอมฟลูออรีนแทนที่ตำแหน่งพันธะ –OH บนโครงสร้างของกระดาษ หรืออาจเป็นเพราะฟิลเลอร์ที่ใช้เป็นสารเติมแต่งในกระดาษเกิดการหลอมแล้วอุดช่องว่างของกระดาษ สำหรับแผ่นชีทพอลิเมอร์ชีวภาพ พบว่าก่อนการประยุกต์พลาสมาความร้อนที่เกิดขึ้นในระหว่างการประยุกต์พลาสมาส่งผลให้

โดยในวิจัยของ Fatyeyva *et al.* (2012) กล่าวว่า การซึมผ่านของวัสดุนั้นขึ้นกับการละลาย (solubility) ของวัสดุ ซึ่งวัสดุแต่ละชนิดจะมีความสามารถในการละลายที่แตกต่างกัน ทั้งนี้ทั้งนั้นขึ้นอยู่กับสภาพขั้ว (polarity) และค่า solubility parameter ของวัสดุและตัวทำละลายที่นำมาพิจารณาว่ามีค่าใกล้เคียงกันมากแค่ไหน ซึ่งการแพร่ผ่านของไอน้ำก็เป็นอีกหนึ่งปัจจัยที่ส่งผลต่อการซึมผ่านของไอน้ำด้วย นอกจากนี้พบว่าอัตราการซึมผ่านของไอน้ำลดลงเมื่อกำลังคลื่นวิทยุและระยะเวลาการประยุกต์พลาสมาเพิ่มขึ้น สอดคล้องกับงานวิจัยของ Majee *et al.* (2013) และ Kim *et al.* (2013) ที่กล่าวว่า เมื่อใช้กำลังคลื่นวิทยุและระยะเวลาในการประยุกต์พลาสมานานมากขึ้นส่งผลให้เกิดชั้นฟิล์มบางที่ไม่ชอบน้ำมากขึ้น และทำให้อัตราการซึมผ่านไอน้ำลดลงด้วย นอกจากนี้ Marais *et al.* (2006) กล่าวว่าการซึมผ่านของไอน้ำเป็นผลมาจากการเปลี่ยนแปลงที่พื้นผิวของวัสดุ เช่น ความขรุขระเพิ่มมากขึ้น หรือความเป็นขั้วลดลง เนื่องจากการใช้แก๊สประเภทฟลูออโรคาร์บอนมาทำการประยุกต์พลาสมา จะส่งผลทำให้พอลิเมอร์มีความเป็นขั้วลดลง เนื่องจากอนุภาคพลาสมาฟลูออรีนเอาไปแทนที่หมู่ไฮดรอกซิลที่ผิวของวัสดุ ทำให้วัสดุมีความเป็นขั้วลดลง จึงทำให้มีซึมผ่านน้ำที่ลดลงด้วย

ในส่วนของอัตราการซึมผ่านของแก๊สออกซิเจน ตามตารางที่ 19 พบว่า กระดาษก่อนและหลังผ่านการประยุกต์พลาสมามีอัตราการซึมผ่านของแก๊สออกซิเจนลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) ยกเว้นที่สภาวะพลาสมา 200/5 ที่ค่าอัตราการซึมผ่านของแก๊สออกซิเจนไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญเทียบกับกระดาษไม่ประยุกต์พลาสมา อัตราการซึมผ่านของแก๊สออกซิเจนในกระดาษลดลงจาก 242,918 เป็นค่าต่ำสุดประมาณ 62,221-67,737 ลูกบาศก์เซนติเมตร/ตร.ม./วัน สำหรับแผ่นชีทพอลิเมอร์ชีวภาพ มีอัตราการซึมผ่านของแก๊สออกซิเจนที่ไม่แตกต่างทางนัยสำคัญในทุกสภาวะการประยุกต์พลาสมา

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางที่ 18 อัตราการซึมผ่านไอน้ำ (กรัม/ตร.ม./วัน) ของกระดาษและพอลิเมอร์ชีวภาพที่ผ่านประยุกต์พลาสมาที่กำลังคลื่นวิทยุและระยะเวลาในการประยุกต์พลาสมาที่แตกต่างกัน

Condition		Water vapor transmission rate, WVTR (g/m^2/day)	
RF power (watt)	Treatment time (min)	Paper	TPS/PBAT
untreated		1719 ± 29[a]	91 ± 8[a]
200	5	1706 ± 53[a]	81 ± 4[b]
	10	1536 ± 87[b]	67 ± 7[c]
250	5	1546 ± 34[b]	66 ± 7[c]
	10	1420 ± 19[b]	66 ± 5[c]
300	5	1424 ± 37[b]	67 ± 8[c]
	10	1446 ± 22[b]	66 ± 8[c]

หมายเหตุ [a-b]ตัวอักษรที่แตกต่างในแนวตั้งหมายถึงค่าเฉลี่ยมีความแตกต่างกันทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

อัตราการซึมผ่านของแก๊สออกซิเจนของกระดาษที่ลดลงหลังการประยุกต์พลาสมา เนื่องจากการประยุกต์พลาสมาส่งอาจผลให้เกิดชั้นฟิล์มบางบนพื้นผิวของกระดาษ หรืออาจเกิดจากองค์ประกอบในเนื้อกระดาษเปลี่ยนแปลงจากการได้รับความร้อนขณะประยุกต์พลาสมา จึงทำให้เกิดการกีดขวางต่อแก๊สออกซิเจนที่ซึมผ่านวัสดุ (Chen *et al.*, 2009; Sahin, 2013) สำหรับแผ่นชีทพอลิเมอร์ชีวภาพ พบว่า การประยุกต์พลาสมาไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงอัตราการซึมผ่านของแก๊สออกซิเจน เนื่องสภาวะการประยุกต์พลาสมาในการทดลองอาจยังไม่มีผลกระทบมากพอ จนทำให้องค์ประกอบของเนื้อวัสดุเกิดการเปลี่ยนแปลง

ทั้งนี้เพื่อศึกษาผลกระทบของความร้อนในระบบพลาสมาที่มีต่อสมบัติการกีดขวางของกระดาษสำหรับแก๊สออกซิเจนและไอน้ำ จึงได้ออกแบบการทดลองเพิ่มเติมโดยนำกระดาษที่ไม่ได้ประยุกต์พลาสมาไปอบในตู้อบลมร้อน เพื่อจำลองสภาวะของความร้อนที่เกิดขึ้นระหว่างประยุกต์พลาสมา โดยอบกระดาษที่อุณหภูมิ 190 – 120 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นระดับความร้อนที่เกิดขึ้นระหว่างการประยุกต์พลาสมา ใช้เวลา 5 และ 10 นาที พบว่ากระดาษที่ผ่านการอบด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิต่างๆมีค่าอัตราการซึมผ่านของไอน้ำมากกว่ากระดาษที่ผ่านการประยุกต์พลาสมา ซึ่ง

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

กระดาษที่ผ่านการอบที่อุณหภูมิสูงเป็นระยะเวลานาน มีอัตราการซึมผ่านของไอน้ำไม่แตกต่างจากกระดาษที่ไม่ผ่านการประยุกต์พลาสมา ดังนั้นอิทธิพลของความร้อนในสภาวะพลาสมาจึงไม่ใช่ปัจจัยหลักที่ทำให้ค่าอัตราการซึมผ่านของไอน้ำลดลง แต่น่าจะเป็นผลมาจากการที่อะตอมฟลูออรีนที่แตกตัวจากสภาวะพลาสมา C_3F_6 เข้าแทนที่หมู่ไฮดรอกซิลบนโครงสร้างของกระดาษ หรืออาจเกิดกระบวนการพอลิเมอร์ไรเซชันเป็นฟิล์มบางเคลือบเส้นใยกระดาษและโครงสร้างในบางตำแหน่ง จึงส่งผลให้กระดาษที่ผ่านการประยุกต์พลาสมามีอัตราการซึมผ่านของไอน้ำดีขึ้น สำหรับอัตราการซึมผ่านของแก๊สออกซิเจนของกระดาษที่ผ่านการอบมีค่าน้อยกว่ากระดาษที่ผ่านการประยุกต์พลาสมา แสดงให้เห็นว่าความร้อนที่เกิดขึ้นในระหว่างการประยุกต์พลาสมาอาจส่งผลให้สารเติมแต่งในกระดาษ เช่น แป้ง หรือสารเติมเต็ม เกิดการเปลี่ยนแปลง มีการหลอม และเข้าไปอุดตามรูพรุนของกระดาษ ส่งผลให้ค่าอัตราการซึมผ่านของแก๊สออกซิเจนลดลงได้ อีกทั้งสารเติมเต็มเหล่านี้มักมีสมบัติการดูดซึมน้ำที่ดี เมื่อกระจายตัวอาจเป็นผลให้ค่า อัตราการซึมผ่านของไอน้ำ เพิ่มขึ้นได้

4.3 สมบัติเชิงกล (Machanical properties)

สำหรับสมบัติเชิงกล ในงานวิจัยนี้ได้ทดสอบค่าความต้านทานแรงดึง (tensile strength) ของกระดาษและแผ่นชีทพอลิเมอร์ชีวภาพ ก่อนและหลังการประยุกต์พลาสมา การทดสอบในกระดาษจะเลือกทดสอบในแนวตามเครื่องจักร (machine direction, MD) เนื่องจากเป็นแนวที่แข็งแรงกว่า แนวขวางเครื่องจักร (cross machine direction, CD) ในการทดสอบนั้นจะพิจารณาค่ามอดุลัส ความต้านทานแรงดึง และค่าร้อยละการยืดตัว ณ จุดที่ขาด

ค่ามอดุลัส (modulus) ของกระดาษและแผ่นชีทพอลิเมอร์ชีวภาพ ก่อนและหลังการประยุกต์พลาสมามีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ($p \leq 0.05$) ซึ่งค่ามอดุลัสเป็นอัตราส่วนของความเค้นตามยาว (σ) ต่อความเครียดตามความยาว (ε) ถ้าวัสดุที่มีค่ามอดุลัสมาก แสดงว่าวัสดุนั้นทนต่อการเปลี่ยนแปลงความยาว โดยความเค้นสามารถหาได้จากค่าความต้านทานแรงดึงของวัสดุ และความเครียดสามารถหาได้จากระยะการยืดตัว ณ จุดที่ขาดนั่นเอง ตามตารางที่ 20 พบว่า มอดุลัสของกระดาษก่อนและหลังประยุกต์พลาสมามีความแตกต่างทางนัยสำคัญ โดยสภาวะการประยุกต์พลาสมาที่กำลังคลื่นวิทยุสูงในเวลานานขึ้น ส่งผลให้ค่ามอดุลัสกระดาษลดลง ชี้ให้เห็นว่าการประยุกต์พลาสมาส่งผลให้กระดาษมีค่าความต้านทานแรงดึงลดลง ส่วนแผ่นชีทพอลิเมอร์ชีวภาพ ซึ่งได้ทดลองปรับสภาวะตัวอย่าง โดยแบ่งออกเป็นที่สภาวะไม่อิ่มตัว คือ เก็บในสภาวะ ที่อุณหภูมิ $23\pm1^{\circ}C$ ความชื้นสัมพัทธ์ $50\pm2\%$ นาน 24 ชั่วโมง และที่สภาวะอิ่มตัว คือ เก็บในสภาวะที่อุณหภูมิ $23\pm1^{\circ}C$ ความชื้นสัมพัทธ์ $50\pm2\%$ นาน 48 ชั่วโมง เพื่อศึกษาผลของความชื้นต่อสมบัติเชิงกลของวัสดุ พบว่า

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ค่ามอดุลัสของแผ่นชีทพอลิเมอร์ชีวภาพที่สภาวะไม่อิ่มตัว ก่อนและหลังประยุกต์พลาสมามีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ โดยมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 313 เป็น 356-479 MPa ในทางกลับกันพบว่าค่ามอดุลัสของแผ่นชีทพอลิเมอร์ชีวภาพที่สภาวะอิ่มตัว ก่อนและหลังประยุกต์พลาสมา มีค่าลดลงจาก 22 เป็น 17-20 MPa

ตารางที่ 19 อัตราการซึมผ่านแก๊สออกซิเจน (ลูกบาศก์เซนติเมตร/ตร.ม./วัน) ของกระดาษและพอลิเมอร์ชีวภาพ ที่ผ่านประยุกต์พลาสมาที่สภาวะการประยุกต์พลาสมาที่แตกต่างกัน

Condition		Oxygen transmission rate, OTR ($cm^3/m^2/day$)	
RF power (watt)	Treatment time (min)	Paper	TPS/PBAT
untreated		242,918±4463^{a}	3,625.51±51^{ns}
200	5	228,135±3835^{a}	3,641.38±29^{ns}
	10	202,046±1568^{b}	3,612.59±314^{ns}
250	5	135,999±1396^{c}	3,657.71±296^{ns}
	10	114,604±7492^{d}	3,605.78±11^{ns}
300	5	67,737±2309^{e}	3,635.37±201^{ns}
	10	62,221±6465^{e}	3,676.87±11^{ns}

หมายเหตุ $^{a-e}$ตัวอักษรที่แตกต่างในแนวตั้งหมายถึงค่าเฉลี่ยมีความแตกต่างกันทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

จากการทดสอบความต้านทานแรงดึงของกระดาษ ก่อนและหลังการประยุกต์พลาสมา แสดง ตารางที่ 21 เห็นได้ว่าเมื่อกระดาษผ่านการประยุกต์พลาสมา มีความต้านทานแรงดึงในแนว MD น้อยกว่ากระดาษที่ไม่ผ่านการประยุกต์พลาสมาอย่างมีนัยสำคัญ จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าการลดลงของความต้านทานแรงดึงของกระดาษหลังการประยุกต์พลาสมา เกิดจากผลกระทบทางความร้อน (thermal effect)ในระหว่างการประยุกต์พลาสมา และการเกิดกัดกร่อนเนื่องจากกระแสพลาสมา (plasma etching) ที่ผิวของกระดาษ ส่งผลเสียต่อเส้นใยของกระดาษ (Bismarck *et al.*, 2008; Sinha, 2009) นอกจากนี้การใช้กำลังคลื่นวิทยุ และเวลาที่ใช้ในการประยุกต์พลาสมาที่ไม่เหมาะสม ก็ส่งผลเสียต่อความต้านทานแรงดึงของกระดาษด้วย (Demir *et al.*, 2008) ส่วนการยืดตัว ณ จุดที่ขาดของกระดาษ พบว่าก่อนและหลังการประยุกต์พลาสมาไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) เนื่องจากการประยุกต์พลาสมาอาจยังไม่กระทบต่อโครงส่วนใหญ่ของกระดาษ

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางที่ 20 มอดุลัสของกระดาษและแผ่นชีทพอลิเมอร์ชีวภาพ ที่ผ่านประยุกต์พลาสมาที่กำลังคลื่นวิทยุและระยะเวลาในการประยุกต์พลาสมาที่แตกต่างกัน

condition		Modulus (MPa)		
RF power (watt)	Treatment time (min)	paper	TPS/PBAT	
			unsaturated	saturated
untreated		3618±324^{a}	313±37^{a}	22±1^{a}
200	5	3443±161^{ab}	363±16^{bc}	18±1^{b}
	10	3414±260^{ab}	407±44^{c}	20±1^{b}
250	5	3200±367^{bc}	385±75^{bc}	19±1^{b}
	10	3158±203^{bc}	356±39^{bc}	19±.1^{b}
300	5	3319±185^{bc}	348±47^{bc}	19±1^{b}
	10	2859±878^{bc}	479±65^{d}	18±5^{b}

หมายเหตุ $^{a-d}$ ตัวอักษรที่แตกต่างในแนวตั้งหมายถึงค่าเฉลี่ยมีความแตกต่างกันทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

สำหรับความต้านแรงดึงของแผ่นชีทพอลิเมอร์ชีวภาพ พบว่าแผ่นชีทพอลิเมอร์ชีวภาพมีค่าความต้านแรงดึงที่ดีขึ้นหลังการประยุกต์พลาสมา และพบว่าที่สภาวะอิ่มตัวมีค่าความต้านทานแรงดึงน้อยกว่าที่สภาวะไม่อิ่มตัว เนื่องจากแผ่นชีทพอลิเมอร์ชีวภาพ มีสัดส่วนของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชถึงร้อยละ 60 ซึ่งโดยธรรมชาติของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชนั้นจะไวต่อความชื้น ทำให้ความแข็งแรงลดลง และมีสมบัติค่อนข้างแข็งเปราะ (brittles) (Ebnesajjad, 2013) สอดคล้องกับผลค่าการยืดตัว ณ จุดที่ขาดที่พบว่า ที่สภาวะอิ่มตัวจะมีค่าการยืดตัว ณ จุดขาดมากกว่าที่สภาวะไม่อิ่มตัว เพราะว่าความชื้นที่เข้าในวัสดุส่งผลให้แผ่นชีทพอลิเมอร์ชีวภาพมีความยืดหยุ่นมากขึ้น (Janssen and Moscicki, 2010; Huang *et al.*, 2014)

กระดาษและแผ่นชีทพอลิเมอร์ชีวภาพที่ผ่านการประยุกต์พลาสมาส่งผลให้เกิดสมบัติเชิงกลที่แตกต่างกัน สำหรับแผ่นชีทพอลิเมอร์ชีวภาพนั้น หลังการประยุกต์พลาสมามีสมบัติเชิงกลแตกต่างจากกระดาษ เนื่องจากสภาวะการประยุกต์พลาสมา และความร้อนอาจส่งผลให้เกิดการเชื่อมต่อของสายโซ่พอลิเมอร์ในโครงสร้าง และส่งผลให้แผ่นชีทพอลิเมอร์ชีวภาพมีสมบัติเชิงกลที่ดีขึ้น

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางที่ 21 ความต้านทานแรงดึงของกระดาษและแผ่นชีทพอลิเมอร์ชีวภาพที่ผ่านประยุกต์พลาสมาที่กำลังคลื่นวิทยุและระยะเวลาในการประยุกต์พลาสมาที่แตกต่างกัน

condition		tensile strength (MPa)		
RF power (watt)	Treatment time (min)	paper	TPS/PBAT	
			unsaturated	saturated
untreated		38.53± 2.64[a]	11.77±0.47[a]	5.74±0.35[a]
200	5	38.49 ± 1.63[bc]	11.86±0.59[a]	5.66±0.47[a]
	10	37.72 ± 1.55[b]	12.81±0.85[bc]	5.07±1.17[a]
250	5	36.58 ± 1.49[b]	12.35±1.00[ab]	5.60±0.70[a]
	10	35.07 ± 1.27[cd]	11.86±0.80[bc]	5.33±1.23[a]
300	5	36.09 ± 1.24[d]	11.29±0.75[ab]	5.07±0.62[a]
	10	33.23 ± 1.77[d]	13.10±1.75[c]	4.70±0.45[b]

หมายเหตุ [a-d]ตัวอักษรที่แตกต่างในแนวตั้งหมายถึงค่าเฉลี่ยมีความแตกต่างกันทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

ตารางที่ 22 การยืดตัว ณ จุดที่ขาดของกระดาษและแผ่นชีทพอลิเมอร์ชีวภาพที่ผ่านประยุกต์พลาสมาที่กำลังคลื่นวิทยุและระยะเวลาในการประยุกต์พลาสมาที่แตกต่างกัน

condition		Elongation at break (%)		
RF power (watt)	Treatment time (min)	paper	TPS/PBAT	
			unsaturated	saturated
untreated		2.36 ± 0.22[a]	12.93±1.37[a]	558.8±29.8[a]
200	5	2.51 ± 0.14[a]	14.69±2.66[a]	685.1±83.3[b]
	10	2.46 ± 0.11[a]	9.36±1.56[b]	695.1±53.1[b]
250	5	2.55 ± 0.08[a]	14.21±1.16[a]	685.1±48.1[b]
	10	2.55 ± 0.21[a]	9.00±2.60[b]	651.7±68.1[b]
300	5	2.47 ± 0.25[a]	8.41±2.48[b]	697.5±89.4[b]
	10	2.49 ± 1.77[a]	7.98±1.27[b]	708.0±31.1[c]

หมายเหตุ [a-b] ตัวอักษรที่แตกต่างในแนวตั้งหมายถึงค่าเฉลี่ยมีความแตกต่างกันทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

5. การวิเคราะห์พื้นพื้นผิวของวัสดุชีวฐาน

การวิเคราะห์พื้นผิวของวัสดุชีวฐาน เป็นการวิเคราะห์เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงลักษณะพื้นผิวของวัสดุหลังการประยุกต์พลาสมา และเพื่อวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบเชิงเคมีบนผิวของวัสดุ การเปลี่ยนแปลงเหล่านี้เป็นปัจจัยสำคัญต่อสมบัติต่างๆที่เปลี่ยนไปของวัสดุชีวฐานทั้งสองชนิด เทคนิคที่ศึกษาประกอบด้วย เทคนิค Scanning Electron Microscopy (SEM) เพื่อศึกษาลักษณะพื้นผิวที่เปลี่ยนแปลงไป เทคนิค Atomic Frequency Microscopy (AFM) เพื่อศึกษาความขรุขระของพื้นผิววัสดุชีวฐาน และเทคนิค X-ray photoelectron spectroscopy (XPS) เพื่อศึกษาองค์ประกอบเชิงเคมีที่เปลี่ยนแปลงภายหลังการประยุกต์พลาสมา โดยมีรายละเอียด ดังนี้

5.1 เทคนิค X-ray photoelectron spectroscopy (XPS)

ผลการสอบด้วยเทคนิค XPS เพื่อตรวจสอบองค์ประกอบเชิงเคมีโดยเฉพาะอย่างยิ่ง หมู่ฟังก์ชันทางเคมีที่เปลี่ยนแปลงบนผิวกระดาษหลังการประยุกต์พลาสมา พบว่าส่วนประกอบทางเคมีและสัดส่วนของธาตุต่างๆที่พบก่อนและหลังการประยุกต์พลาสมาบนกระดาษ แสดงตามตารางที่ 23 โดยก่อนประยุกต์พลาสมา พบปริมาณออกซิเจนและคาร์บอน คือ 34.53 และ 65.63 เปอร์เซนต์ตามลำดับ แต่หลังการประยุกต์พลาสมาพบว่าหลังการประยุกต์พลาสมาพบว่าปริมาณของออกซิเจนและคาร์บอนลดลงเหลือ 19.05-34.48 และ 60.35-65.47 เปอร์เซนต์ ตามลำดับ แต่พบว่าหลังการประยุกต์พลาสมา มีปริมาณฟลูออรีนเพิ่มขึ้นประมาณ 2.43-10.59 เปอร์เซนต์ นอกจากนี้เมื่อพิจารณาสัดส่วนของธาตุออกซิเจนต่อคาร์บอนหลังการประยุกต์พลาสมาลดลงจาก 0.70 เป็น 0.34-0.57 แต่สัดส่วนของฟลูออรีนต่อคาร์บอน และฟลูออรีนต่อออกซิเจนเพิ่มขึ้น คือ จาก 0 เป็น 0.01-0.26 และ 0.01-0.71 ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าการประยุกต์พลาสมาส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนองค์ประกอบทางเคมีบนพื้นผิวของกระดาษ เนื่องจากพบการเปลี่ยนแปลง ปริมาณธาตุคาร์บอน ออกซิเจน และฟลูออรีนหลังการประยุกต์พลาสมา

จากภาพที่ 18 (a) แสดงสเปกตรัม XPS ที่ได้จากการวิเคราะห์พื้นผิวของกระดาษโดยรวม (survey spectrum) พบว่าก่อนการประยุกต์พลาสมาไม่พบสเปกตรัมหมู่ที่มีฟลูออรีนเป็นองค์ประกอบ (F1s) แต่พบแค่สเปกตรัมของหมู่ที่มีคาร์บอน(C1s)และออกซิเจน(O1s)เป็นองค์ประกอบเท่านั้นที่ 530.40 eV และ 284.40 eV ตามลำดับ ซึ่งธาตุออกซิเจนและคาร์บอนเป็นธาตุหลักของเซลลูโลสในกระดาษ แต่หลังการประยุกต์พลาสมา พบสเปกตรัมหมู่ฟลูออรีนเป็นองค์ประกอบเพิ่มขึ้นมาที่ 685.20 eV แสดงตามภาพที่ 18 (b-g)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

จากภาพที่ 19 แสดงสเปกตรัมที่วัดด้วยความละเอียดสูง (high resolution spectrum) แสดงให้เห็นได้ว่ากระดาษก่อนการประยุกต์พลาสมาพบสเปกตรัมของพันธะ C-H, C-C, C-OH และ O-C-O ที่ตำแหน่ง binding energy ที่ 283.409 285.045 286.570 และ 287.764 eV ตามลำดับ สำหรับกระดาษหลังการประยุกต์พลาสมา ตามภาพที่ 20 พบสเปกตรัมของพันธะ C-C, C-OH, O-C-O และ C-F ที่ตำแหน่ง binding energy โดยประมาณที่ 285.0 286.5 288.2 และ 289.5 eV ตามลำดับ ซึ่งหลังการประยุกต์พลาสมาพบว่าปริมาณพันธะ C-OH ลดลงจาก 43.8 เป็น 23.3 เปอร์เซ็นต์ ส่วนหมู่ O-C-O เพิ่มขึ้นจาก 2.5 เป็น 3.5-9.4 เปอร์เซ็นต์

ในส่วนของแผ่นชีทพอลิเมอร์ชีวภาพ พบว่าองค์ประกอบทางเคมีและสัดส่วนของธาตุต่างๆ ที่พบก่อนและหลังการประยุกต์พลาสมาไม่แตกต่างกันดังแสดงตามตารางที่ 24 โดยก่อนและหลังประยุกต์พลาสมาพบปริมาณออกซิเจนและคาร์บอนเท่านั้น มีปริมาณประมาณ 24.50-27.61 และ 72.39-74.90 เปอร์เซนต์ ตามลำดับ ซึ่งไม่พบปริมาณฟลูออรีนบนพื้นผิวของแผ่นชีทพอลิเมอร์ชีวภาพ เมื่อวิเคราะห์พื้นผิวของแผ่นชีทพอลิเมอร์ชีวภาพโดยรวม (survey spectrum) แสดงดังภาพที่ 21 (a-g) แสดงสเปกตรัม XPS พบว่าก่อนและหลังการประยุกต์พลาสมาไม่พบสเปกตรัมหมู่ที่มีฟลูออรีนเป็นองค์ประกอบ (F1s) แต่พบแค่สเปกตรัมของหมู่ที่มีคาร์บอน(C1s)และออกซิเจน (O1s)เป็นองค์ประกอบเท่านั้นที่ 530.70 eV และ 284.70 eV ตามลำดับ เมื่อวิเคราะห์พื้นผิวของแผ่นชีทพอลิเมอร์ชีวภาพด้วยความละเอียดสูงก่อนและหลังประยุกต์พลาสมา แสดงตามภาพที่ 22 และ 23 พบว่าแผ่นชีทพอลิเมอร์ชีวภาพก่อนและหลังการประยุกต์พลาสมา พบสเปกตรัมของพันธะ C-C C-OH O-C-O และ C=O เหมือนกัน ที่ตำแหน่ง binding energy ที่ 285.0 286.5 287.7 และ 288.9 eV ตามลำดับ

จากผลการทดสอบ XPS พบว่าองค์ประกอบทางเคมีบนพื้นผิวของกระดาษและแผ่นชีทพอลิเมอร์ชีวภาพเกิดการเปลี่ยนแปลงภายหลังการประยุกต์พลาสมา ซึ่งกระดาษมีองค์ประกอบหลัก คือเซลลูโลส ส่วนแผ่นชีทพอลิเมอร์ชีวภาพ มีองค์ประกอบหลักคือแป้ง (starch) ซึ่งทั้งเซลลูโลสและแป้ง มาจากการเชื่อมต่อของสายโซ่ของน้ำตาลกลูโคส จึงส่งผลให้พบสเปกตรัมของพันธะ C-C C-OH และ O-C-O ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักของกลูโคสเหมือนกัน โดยเซลลูโลสซึ่งเป็นองค์ประกอบของกระดาษ มีการจัดเรียงตัวของกลูโคสที่เชื่อมต่อพันธะบีตา 1,4 ไกลโคซิดิก มีการเรียงตัวของสายโซ่เป็นเส้นตรง ตามภาพที่ 24

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

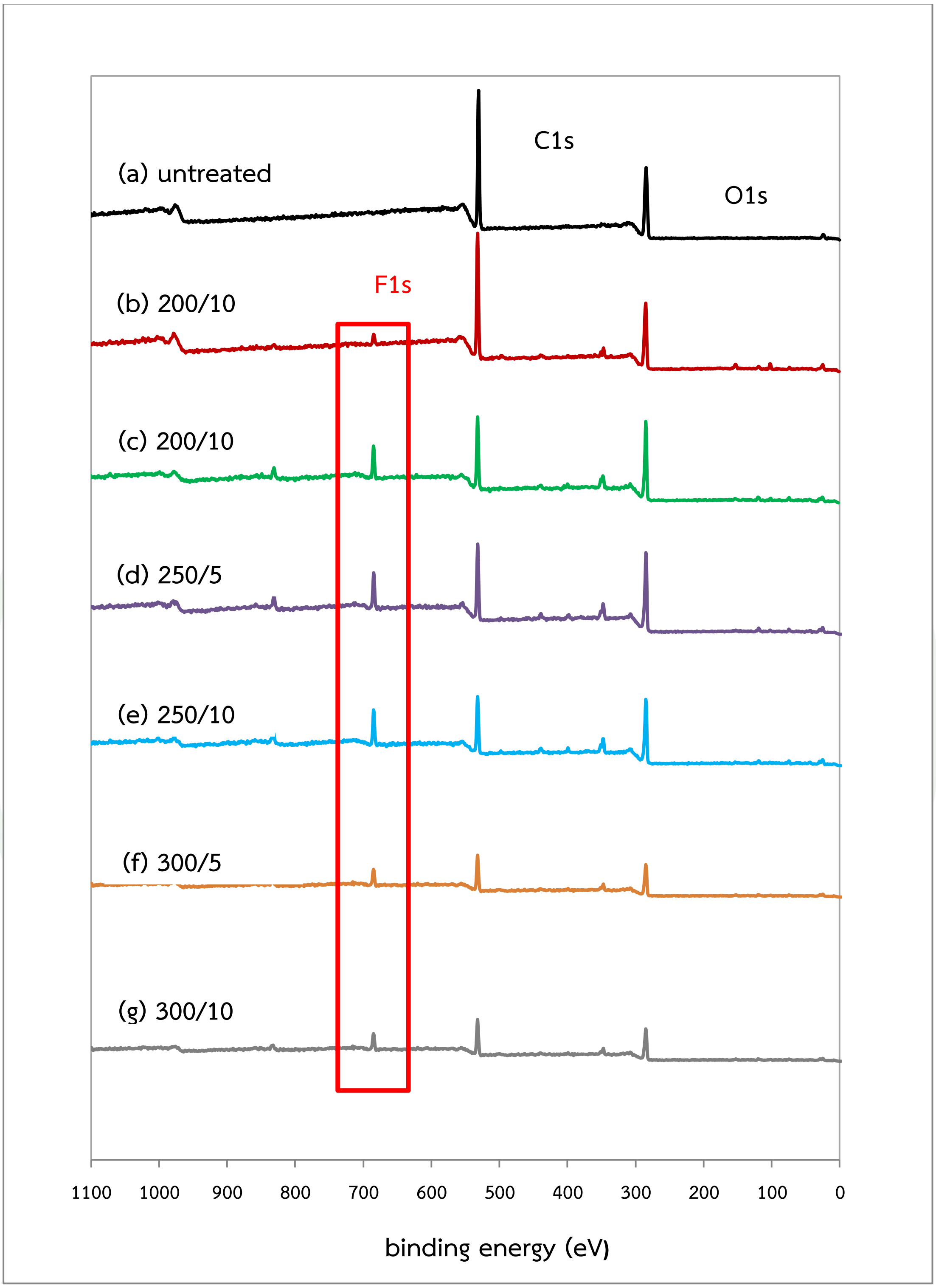
ตารางที่ 23 ส่วนประกอบทางเคมีของกระดาษที่ผ่านประยุกต์พลาสมาที่กำลังคลื่นวิทยุและระยะเวลาในการประยุกต์พลาสมาที่แตกต่างกัน

condition		Chemical composition (%)				Atomic ratio		
RF power(W)	Treatment time (min)	O1s	C1s	F1s	others	O/C	F/C	F/O
untreated		34.53	65.63	-	-	0.70	-	-
200	5	34.48	60.35	0.43	4.74	0.57	0.01	0.01
	10	19.05	64.64	8.07	7.24	0.39	0.19	0.50
250	5	21.32	61.59	9.66	7.43	0.46	0.25	0.54
	10	17.74	65.47	10.59	6.04	0.36	0.26	0.71
300	5	20.77	62.35	9.95	6.93	0.44	0.25	0.57
	10	16.42	65.15	9.15	9.28	0.34	0.22	0.66

ตารางที่ 24 ส่วนประกอบทางเคมีของแผ่นชีทพอลิเมอร์ชีวภาพที่ผ่านประยุกต์พลาสมาที่กำลังคลื่นวิทยุและระยะเวลาในการประยุกต์พลาสมาที่แตกต่างกัน

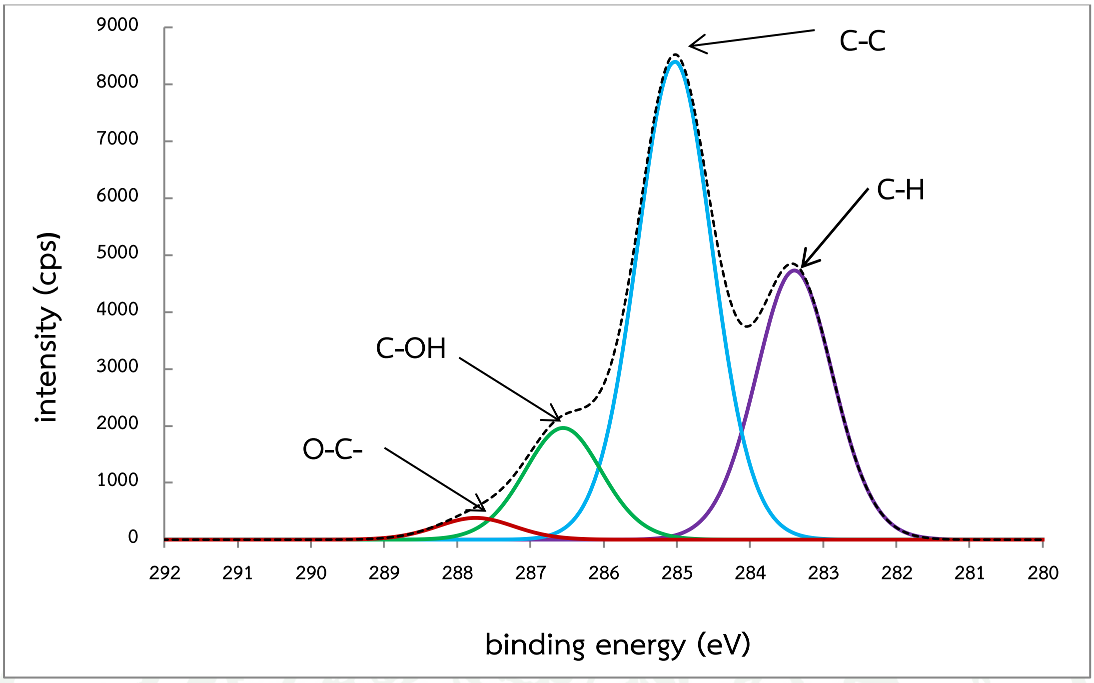
condition		Chemical composition (%)			Atomic ratio	
RF power(W)	Treatment time (min)	O1s	C1s	F1s	O/C	F/O
untreated		24.50	75.50	-	0.32	-
200	5	27.18	72.81	-	0.37	-
	10	27.61	72.39	-	0.38	-
250	5	26.57	73.43	-	0.36	-
	10	26.34	73.66	-	0.36	-
300	5	25.18	74.82	-	0.34	-
	10	25.10	74.90	-	0.34	-

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

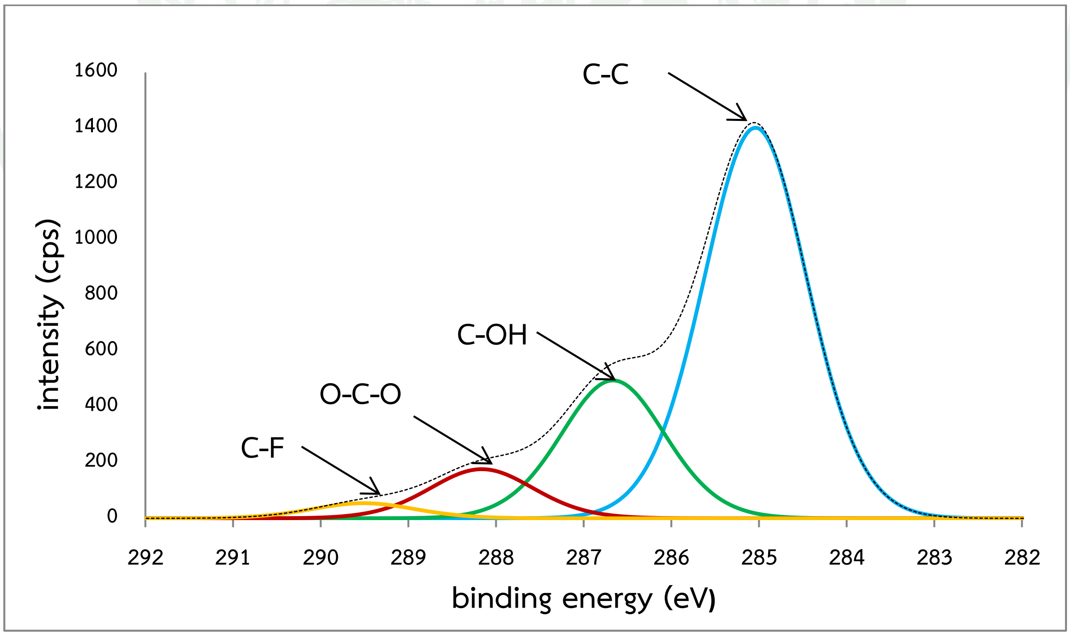


ภาพที่ 18 สเปกตรัม XPS ที่ได้จากการวิเคราะห์พื้นผิวของกระดาษ (a) ก่อนประยุกต์พลาสมา (b-g) หลังการประยุกต์พลาสมา

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 19 สเปกตรัม XPS ที่ได้จากการวิเคราะห์พื้นผิวของกระดาษก่อนประยุกต์พลาสมาด้วยความละเอียดสูง



ภาพที่ 20 สเปกตรัม XPS ที่ได้จากการวิเคราะห์พื้นผิวของกระดาษหลังผ่านการประยุกต์พลาสมาด้วยความละเอียดสูงที่สภาวะกำลังคลื่นไฟฟ้า 250 วัตต์ ระยะเวลาประยุกต์ 10 นาที

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ส่วนแป้งซึ่งเป็นองค์ประกอบของพอลิเมอร์ชีวภาพ มีการจัดเรียงตัวของกลูโคสที่เชื่อมต่อกันด้วยพันธะแอลฟา 1,4 ไกลโคซิดิก แต่แผ่นชีทพอลิเมอร์ชีวภาพ ซึ่งเป็นพอลิเมอร์ผสม ยังมีองค์ประกอบอื่นอีก คือ พอลิพอลิบิวทิลีนอะดิเพท-โค-เทเรฟทาเลท (PBAT) และใช้กลีเซอรอลเป็นพลาสติกไซเซอร์ ทำให้พบสเปกตรัมของพันธะ C=O บนพื้นผิวของแผ่นชีทพอลิเมอร์ชีวภาพ เพิ่มเข้ามา และเกิดการเชื่อมต่อของพันธะของแผ่นชีทพอลิเมอร์ชีวภาพผสมแสดงตามภาพที่ 25

โดยการประยุกต์พลาสมาด้วยแก๊ส C_3F_6 ทำให้เกิดการแตกตัวของแก๊ส C_3F_6 ซึ่งสามารถแบ่งออกเป็น 3 กลุ่ม กลุ่มที่หนึ่งคือ กลุ่มอนุภาคที่มีประจุ (charged particles) เช่น ไอออนและอิเล็กตรอน ทำให้เกิดการขาดของสายโซ่โมเลกุล กลุ่มที่สองคือ กลุ่มสปีชีร์ที่เป็นกลาง (neutral species) โดยเกิดจากปฏิกิริยาทางเคมีระหว่างอิเล็กตรอนและโมเลกุลที่เป็นกลางในพลาสมา เช่น อะตอมฟลูออรีน (F) ซึ่งส่งผลทำให้เกิดกัดกร่อนที่ผิวของวัสดุ และกลุ่มที่สามคือกลุ่มอนุมูลอิสระของคาร์บอนและฟลูออรีน (CF_x radicals) ซึ่งในแก๊สฟลูออโรคาร์บอนแต่ละชนิด จะสามารถผลิตกลุ่ม CF_x radicals ได้จำนวนและชนิดที่แตกต่างกัน (Agostino, 1990) เมื่อเกิดการแตกตัวของการแตกตัวของแก๊ส C_3F_6 จะพบกลุ่ม CF_x radicals คือ CF CF_2 และ CF_3 (Silverstein, 1996) ซึ่งกลุ่ม CF_x radicals ที่เกิดขึ้นนั้นสามารถทำให้เกิดหมู่ฟังก์ชันใหม่ (functional groups) เกิดการเชื่อมต่อของสายโซ่ (crosslinking) และเกิดการพลาสมาพอลิเมอร์ไรเซชันได้ (plasma polymerization) (Khaymapanya, 2005)

ปฏิกิริยาที่คาดว่าจะเกิดขึ้นในระหว่างการประยุกต์บนกระดาษ หนึ่งคือ กลุ่มอะตอมของฟลูออรีนจะเข้าไปกัดกร่อนส่งผลให้ผิวของวัสดุมีการเปลี่ยนแปลง โดยเกิดความขรุขระที่พื้นผิวของกระดาษมากขึ้นและบนพื้นผิวของกระดาษเกิดเป็นอนุมูลอิสระ โดยกลไกที่คาดว่าสามารถเกิดขึ้นได้ที่ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงที่บนผิวของกระดาษ ส่วนใหญ่จะเกิดการตัดของพันธะของคาร์บอนตำแหน่งที่ 1 และทำให้เกิดอนุมูลอิสระตรงตำแหน่งต่างๆ แสดงตามภาพที่ 26 สองคือ เมื่อแก๊สแตกตัวจากสภาวะพลาสมา เกิดกลุ่ม CF_x radicals :ซึ่งคาดว่าจะเกิดพอลิเมอร์ไรเซชัน แล้วเกิดการเชื่อมต่อกันระหว่างกลุ่ม กลุ่ม CF_x radicals กลายเป็นสายโซ่ แต่อาจมีความยาวของสายโซ่ไม่มากนัก แล้วทับถมลงไปที่พื้นผิวของกระดาษกลายเป็นชั้นฟิล์มบาง สามคือ เมื่อเกิดกลุ่มอนุมูลอิสระที่ผิวกระดาษ ส่งผลให้กลุ่ม CF_x radicals บางส่วนที่ไม่ได้เกิดพอลิเมอร์ไรเซชัน เข้าทำปฏิกิริยาบนพื้นผิวของวัสดุที่มีกลุ่มอนุมูลอิสระอยู่เกิดเป็นหมู่ฟังก์ชันใหม่ คือ หมู่ C-F

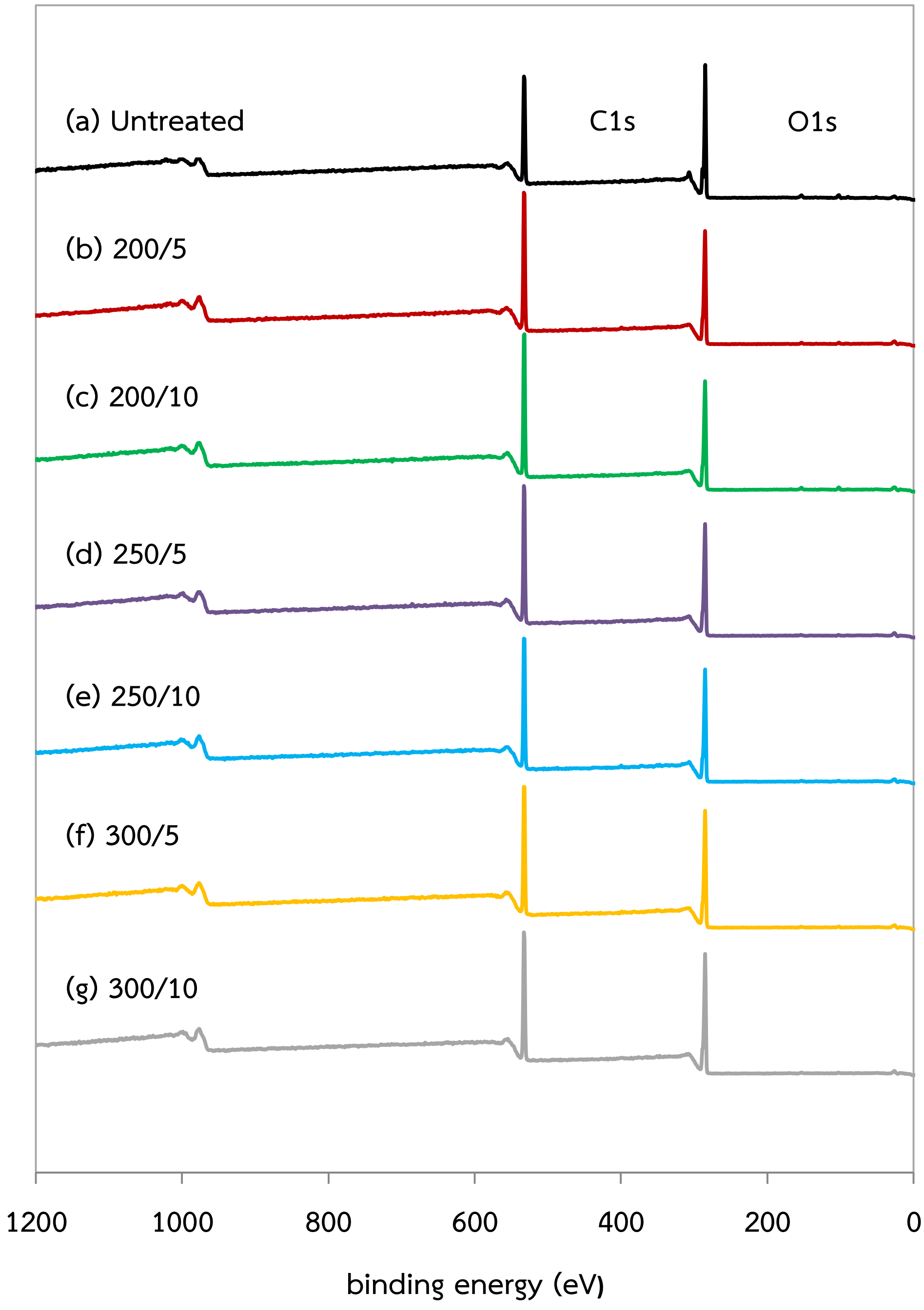
นอกจากนี้การเปลี่ยนแปลงของปริมาณพันธะต่างๆบนพื้นผิวของกระดาษหลังการประยุกต์พลาสมา พบว่าปริมาณพันธะ C-OH มีปริมาณลดลงหลังการประยุกต์พลาสมา แต่ปริมาณ

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

พันธะ O-C-O และ C-F มีปริมาณเพิ่มขึ้น เนื่องจาก CF_x radicals เข้าทำปฏิกิริยาบนพื้นผิวของวัสดุที่มีกลุ่มอนุมูลอิสระอยู่จนเกิดเป็นพันธะใหม่ คือ พันธะ C-F ซึ่งพันธะ C-F เข้าแทนที่พันธะ –OH บนพื้นผิวของกระดาษ จึงส่งผลให้พันธะ C-OH มีปริมาณลดลงหลังการประยุกต์พลาสมา (Li and Jinjin, 2007; Chaiwong *et al.*, 2010) นอกจากนี้การประยุกต์พลาสมาส่งผลให้เกิดการตัดสายโซ่ของสายโซ่ไกลโคซิดิก และพันธะคาร์บอนที่เชื่อมระหว่างออกซิเจนทั้งสองข้าง ทำให้ตรงตำแหน่งของพันธะ O-C-O เกิดเป็นอนุมูลอิสระบนพื้นผิวของวัสดุ ซึ่งตรงตำแหน่งที่เกิดอนุมูลอิสระนี้อาจเกิดปฏิกิริยากับกลุ่ม CF_x radicals และพันธะ O-C-O ซึ่งเกิดเป็นอนุมูลอิสระ เกิดการเชื่อมต่อของสายโซ่ (crosslinking) ระหว่างพันธะ ส่งผลให้มีปริมาณพันธะ O-C-O เพิ่มมากขึ้น (Mccord *et al*., 2003) โดยเมื่อเปรียบเทียบปริมาณของพันธะทั้ง

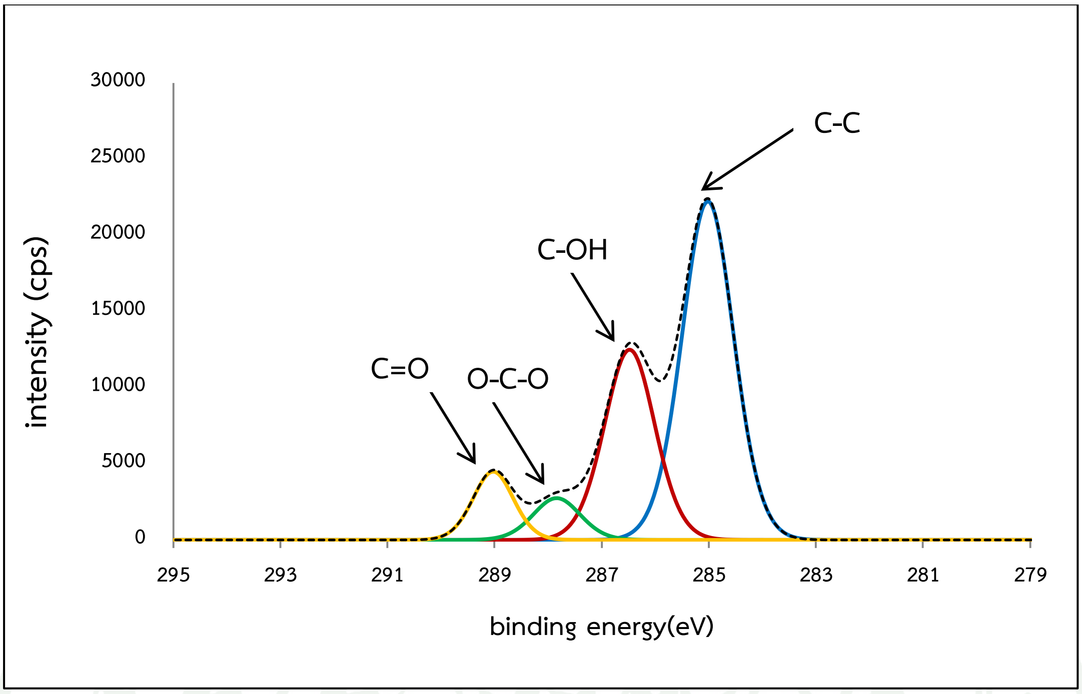
สำหรับการเปลี่ยนแปลงปริมาณพันธะบนแผ่นชีทพอลิเมอร์ชีวภาพหลังการประยุกต์พลาสมา แสดงตามตารางที่ 25 พบว่าปริมาณพันธะ C-OH เพิ่มขึ้น เป็นเพราะความชื้นที่เพิ่มมากขึ้นในระหว่างการเก็บตัวอย่าง ส่งผลเกิดพันธะ C-OH เพิ่มมากขึ้น แต่ปริมาณพันธะ C-O-C และ C=O ลดลง เนื่องจากวัสดุที่มีสายโซ่ที่มีพันธะคู่เป็นองค์ประกอบ ทำให้เกิดการเข้าทำปฏิกิริยากับกลุ่ม CF_x radicals เกิดจากสภาวะพลาสมาได้ง่าย และส่งผลให้เกิดการขาดของสายโซ่ของพันธะ C-O-C และเมื่อพิจารณาสัดส่วนของพอลิเมอร์ชีวภาพที่มีแป้งเป็นองค์ประกอบมากกว่าพอลิบิวทิลีนอะดิเพท-โค-เทเรฟทาเลท (PBAT) พบว่าสัดส่วนพันธะของ C-O-C และ C=O มีสัดส่วนน้อยกว่าพันธะ C-OH จึงพบว่าการแตกตัวของแก๊สC_3F_6 ในสภาวะพลาสมา แล้วได้มาเป็นกลุ่มอนุมูลอิสระต่างๆไม่สามารถเข้าทำปฏิกิริยาบนพื้นผิวของแผ่นชีทพอลิเมอร์ชีวภาพได้มากนัก จึงคาดว่าส่งผลให้ไม่เห็นปริมาณของฟลูออรีนที่เพิ่มขึ้นนั่นเอง นอกจากนี้ Simão (2012) ได้กล่าวเกี่ยวกับปัจจัยที่ส่งผลต่อต่อการปรับสภาพผิวด้วยพลาสมาของฟิล์มที่มาจากแป้งข้าวโพดว่าการ incorporation ของหมู่ฟังก์ชันที่เกิดจากสภาวะพลาสมาขึ้นอยู่กับกำลังไฟฟ้า โดยถ้าใช้กำลังไฟฟ้าต่ำเกินไปจะส่งผลให้พลังงานที่ให้แก๊สแตกตัวน้อย และไม่เกิดการ incorporation ของหมู่ฟังก์ชันที่เกิดจากสภาวะพลาสมา ส่วนอีกปัจจัยหนึ่งคือ ระยะเวลาการประยุกต์ โดยถ้าใช้ระยะเวลาประยุกต์น้อยเกินไปส่งผลให้ความเข้ม (intensity)ของหมู่ฟังก์ชันที่เกิดจากสภาวะพลาสมามีค่าน้อย (Denes et al., 2002)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

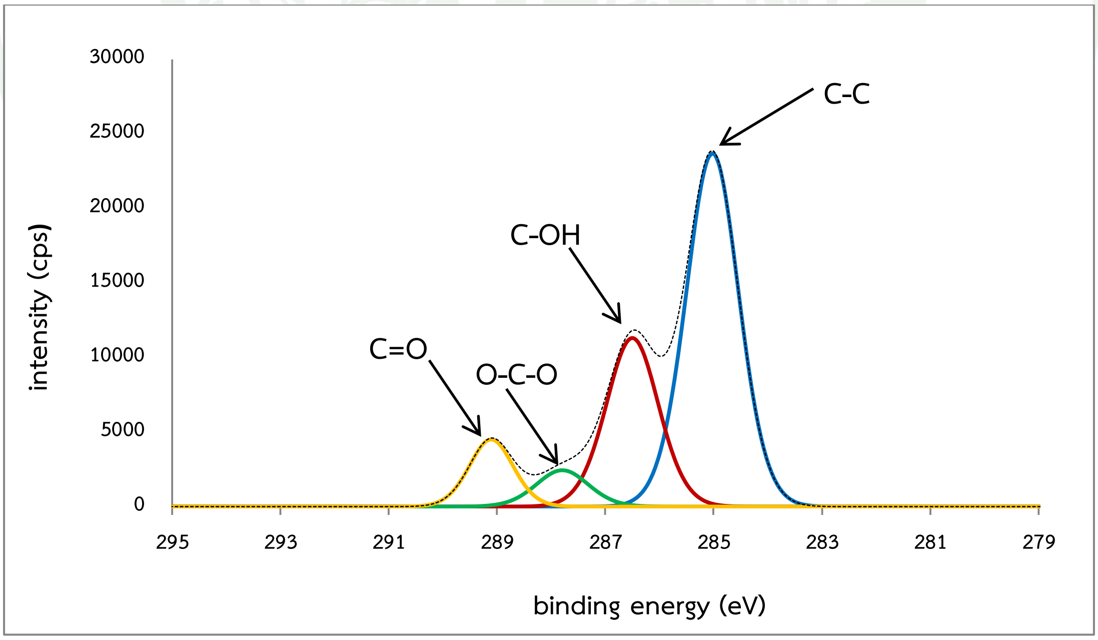


ภาพที่ 21 สเปกตรัม XPS ที่ได้จากการวิเคราะห์พื้นผิวของแผ่นชีทพอลิเมอร์ชีวภาพ (a) ก่อนประยุกต์พลาสมา (b-g) หลังการประยุกต์พลาสมา

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

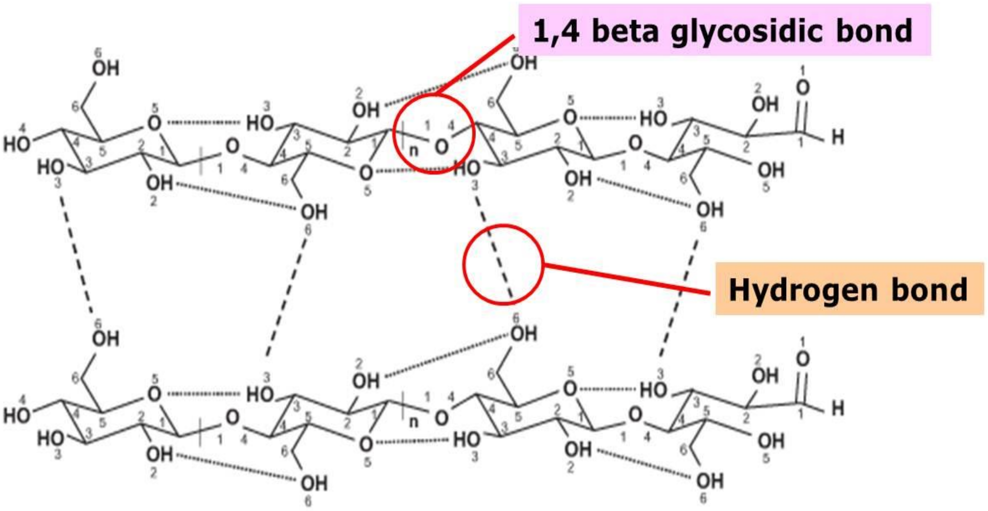


ภาพที่ 22 สเปกตรัม XPS ที่ได้จากการวิเคราะห์พื้นผิวของแผ่นชีทพอลิเมอร์ชีวภาพก่อนประยุกต์พลาสมาด้วยความละเอียดสูง



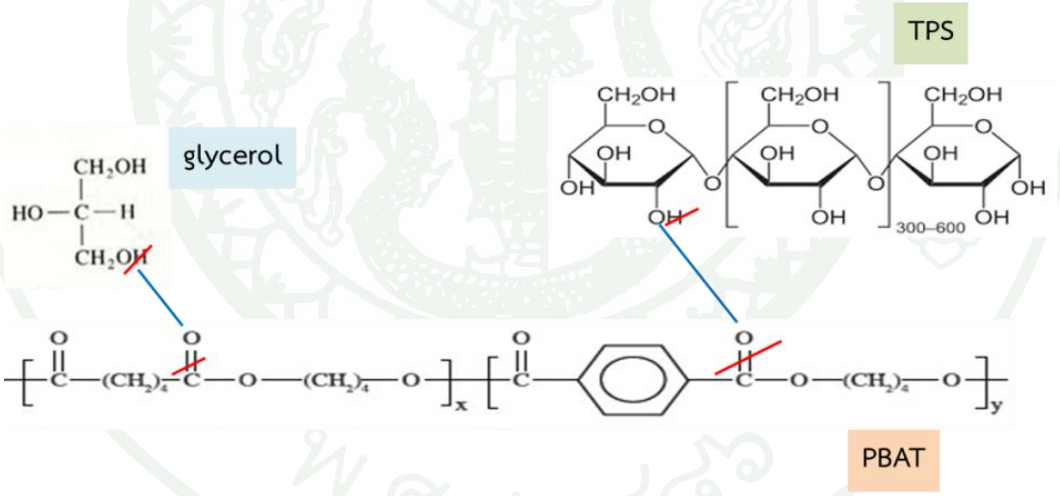
ภาพที่ 23 สเปกตรัม XPS ที่ได้จากการวิเคราะห์พื้นผิวของแผ่นชีทพอลิเมอร์ชีวภาพหลังประยุกต์พลาสมาด้วยความละเอียดสูง

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 24 การจัดเรียงตัวของกลูโคสที่เชื่อมต่อพันธะบีตา 1,4 ไกลโคซิดิกของเซลลูโลส

ที่มา: ดัดแปลงจาก Festucci-Buselli (2007)

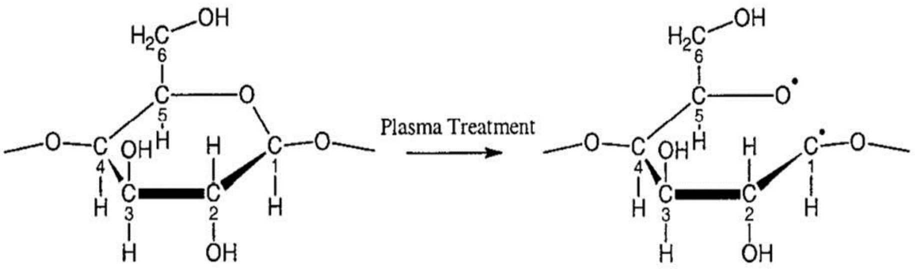


ภาพที่ 25 การเชื่อมต่อของพันธะของแผ่นชีทพอลิเมอร์ชีวภาพผสม

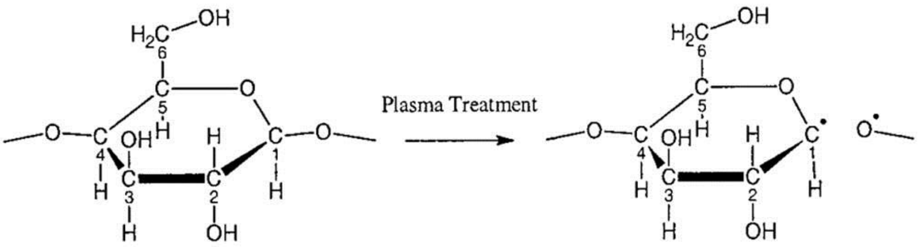
ที่มา: ดัดแปลงจาก Chen (2008) และ BeMiller and Whistler (2009)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

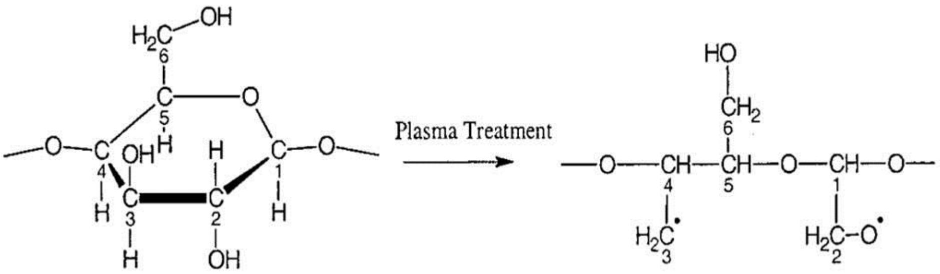
(a) Bond breakage between C_1 and ring oxygen



(b) Bond breakage between C_1 and glycosidic bond oxygen



(c) Dehydrogenation and dehydroxylation between C_2 and C_3 after ring opening of anhydroglucose



ภาพที่ 26 กลไกการสร้างกลุ่มอนุมูลอิสระบนพื้นผิวของวัสดุระหว่างการประยุกต์พลาสมา

ที่มา: Ward (1979)

5.2 เทคนิค Atomic Frequency Microscopy (AFM)

การใช้เทคนิค AFM เพื่อศึกษาความขรุขระพื้นผิวของกกระดาษและแผ่นชีทพอลิเมอร์ชีวภาพ หลังการประยุกต์พลาสมาเทียบกับก่อนการประยุกต์พลาสมา ซึ่งจากภาพที่ 27 และ 28 ชี้ให้เห็นว่าเมื่อกระดาษและแผ่นชีทพอลิเมอร์ชีวภาพ ผ่านการประยุกต์พลาสมา พื้นผิวของกระดาษมีความขรุขระมากขึ้น โดยแสดงค่า RMS (root mean square) ตามตารางที่ 26 ซึ่งเพิ่มขึ้นจาก 170 เป็น 412 นาโนเมตร การที่กระดาษมีความขรุขระเพิ่มขึ้นหลังการประยุกต์พลาสมา เป็นเพราะสภาวะพลาสมาทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงที่พื้นผิวของกระดาษ (Meenan *et al*., 2013) โดยภายใต้

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สภาวะพลาสมานั้นเกิดกลุ่มอนุมูลอิสระของฟลูออรีน ซึ่งทำให้เกิดการกัดกร่อนที่ผิวหน้าวัสดุ ส่วนกลุ่มอนุมูลอิสระของคาร์บอนและฟลูออรีนทำให้เกิดการทับถมของชั้นฟิล์มบาง

ตารางที่ 25 ปริมาณของพันธะของกระดาษและแผ่นชีทพอลิเมอร์ชีวภาพที่ผ่านประยุกต์พลาสมาที่กำลังคลื่นวิทยุและระยะเวลาในการประยุกต์พลาสมาที่แตกต่างกัน

samples	condition		Relative chemical bond area (%)				
	RF power(W)	Treatment time (min)	-C-C	-C-OH	-C-O-C	-C=O-	-C-F
paper	untreated		53.7	43.8	2.5	-	-
	200	5	59.6	33.7	3.5	-	3.2
		10	59.1	30.7	5.9	-	4.3
	250	5	59.2	23.3	8.9	-	8.6
		10	59.7	23.7	8.8	-	7.8
	300	5	59.4	23.0	9.4	-	8.2
		10	59.5	23.3	8.3	-	8.9
TPS/PBAT	untreated		55.0	21.2	10.8	13.0	-
	200	5	54.9	30.2	6.2	8.7	-
		10	52.9	31.9	6.7	8.5	-
	250	5	53.8	30.7	6.9	8.5	-
		10	54.2	30.3	6.7	8.8	-
	300	5	56.3	29.4	6.2	8.1	-
		10	56.6	28.4	5.9	9.1	-

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางที่ 26 ความขรุขระของกระดาษและพอลิเมอร์ชีวภาพ ที่ผ่านประยุกต์พลาสมาที่กำลังคลื่นวิทยุ ระยะเวลาในการประยุกต์พลาสมาที่แตกต่างกัน

condition		RMS (nm)	
RF power (watt)	Treatment time (min)	paper	TPS/PBAT
untreated		170±104[a]	166±40[ns]
200	5	1906±190[a]	157±68[ns]
	10	287±62[b]	159±38[ns]
250	5	164±47[a]	158±67[ns]
	10	267±27[b]	157±40[ns]
300	5	204.±54[a]	158±50[ns]
	10	412±177[b]	157±75[ns]

หมายเหตุ [a-b] ตัวอักษรที่ต่างกันในแนวตั้ง หมายถึงค่าเฉลี่ยมีความแตกต่างกันทางสถิติ ($p \le 0.05$)

[ns] ตัวอักษรที่ต่างกันในแนวตั้ง หมายถึงค่าเฉลี่ยไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ

ในงานวิจัยของ Yasuda *et al.* (1990) พบว่าการประยุกต์พลาสมาด้วยแก๊ส C_3F_6 สามารถทำให้เกิดการปรับสภาพผิวแบบพลาสมาพอลิเมอร์ไรเซชัน แล้วส่งผลให้เกิดชั้นฟิล์มบางทั่วทั้งผิววัสดุ แต่เนื่องจากสภาวะพลาสมาในงานวิจัยของแก๊ส C_3F_6 ยังไม่เหมาะสม ที่จะทำให้เกิดกลุ่มอนุมูลอิสระของคาร์บอนและฟลูออรีนหลายชนิด ซึ่งกลุ่มอนุมูลอิสระของคาร์บอนและฟลูออรีนแบบ CF_3 จะมีประสิทธิภาพมากที่สุดในการเกิดการทับถมกันจนเกิดเป็นชั้นฟิล์ม และจากผล XPS ข้างต้นพบว่าปริมาณอะตอมของฟลูออรีนมากกว่าปริมาณกลุ่มอนุมูลอิสระของคาร์บอนและฟลูออรีน จึงทำให้เกิดการกัดกร่อนที่ผิวหน้าของกระดาษมากกว่าการเกิดชั้นฟิล์มบางทั่วทั้งพื้นผิวของกระดาษ ซึ่งการเปลี่ยนแปลงความขรุขระที่พื้นผิวของกระดาษที่เกิดขึ้น จะสอดคล้องกับผลการทดสอบค่ามุมสัมผัส การดูดซึมน้ำ และขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของหยดน้ำด้วย ซึ่งเกี่ยวกับสมบัติไม่ชอบน้ำของวัสดุ (Andrade *et al.*, 2005; Simão *et al.*, 2009) ในทางกลับกันหลังการประยุกต์พลาสมาพบว่าแผ่นชีทพอลิเมอร์ชีวภาพ มีความขรุขระลดลง โดยค่า RMS ลดลงจาก166 เป็น 157นาโนเมตร ซึ่งไม่มีความแตกต่างทางนัยสำคัญ ($p \le 0.05$) เนื่องจากความร้อนที่เกิดขึ้นขณะเกิดพลาสมาที่ส่งผลให้ผิวหน้าของแผ่นชีทพอลิเมอร์ชีวภาพ มีความเรียบมากขึ้น โดยจากผลการทดลองด้วยเครื่อง Differential Scanning Calorimeters (DSC) เพื่อศึกษาสมบัติทางความร้อนของวัสดุ ซึ่งพบว่า

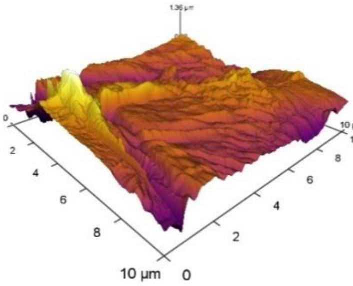
ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

อุณหภูมิที่เกิดขึ้นในระหว่างการประยุกต์พลาสมามีค่าสูงกว่าอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (glass transition temperature, T_g) ของแผ่นชีทพอลิเมอร์ชีวภาพหลังการประยุกต์พลาสมา จึงส่งผลสายโซ่ภายในโครงสร้างของแผ่นชีทพอลิเมอร์ชีวภาพเคลื่อนที่ได้เล็กน้อย ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงที่ผิวหน้าของแผ่นชีทพอลิเมอร์ชีวภาพ และวัสดุมีความคล้ายยาง (rubbery)มากขึ้น แต่อุณหภูมิที่เกิดขึ้นในระหว่างการประยุกต์มีค่าน้อยกว่าอุณหภูมิหลอมเหลว (Melting Temperature : T_m) จึงไม่ทำให้แผ่นชีทพอลิเมอร์ชีวภาพกลายเป็นของไหลได้ นอกจากการเกิดความขรุขระที่ส่งผลต่อสมบัติไม่ชอบน้ำของวัสดุแล้ว ยังปัจจัยอื่นๆที่เกี่ยวข้อง เช่น องค์ประกอบทางเคมี และความเข้มข้นของสารบนพื้นผิววัสดุด้วย (Kylián *et al*., 2014; Sane and Ratcharak 2014)

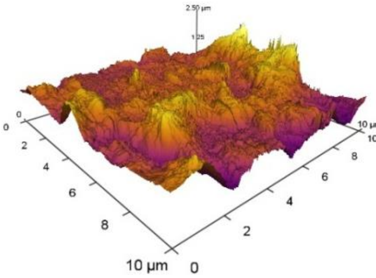
5.3 เทคนิค Scanning Electron Microscopy (SEM)

จากผลการทดสอบพบว่าลักษณะพื้นผิวของกระดาษและแผ่นชีทพอลิเมอร์ชีวภาพ ก่อนและหลังการประยุกต์พลาสมามีการเปลี่ยนแปลง โดยใช้เทคนิค SEM ด้วยกำลังขยาย 3,000 เท่า แสดงดังภาพที่ 29 พบว่าหลังการประยุกต์พลาสมากระดาษเกิดการเปลี่ยนแปลง คือมีความขรุขระมากขึ้น สอดคล้องกับผลการทดสอบ AFMข้างต้น ซึ่งการที่กระดาษเกิดความขรุขระมากขึ้น เป็นผลมาจากไอออนที่ได้รับพลังงานกระตุ้นในสภาวะพลาสมาของ C_3F_6 เกิดการกัดกร่อนที่ผิวของเส้นใย ส่วนแผ่นชีทพอลิเมอร์ชีวภาพนั้น (ภาพที่ 30) พบว่าพื้นผิวของแผ่นชีทพอลิเมอร์ชีวภาพ ก่อนประยุกต์พลาสมา มีลักษณะไม่เป็นเนื้อเดียวกัน มีช่องว่างขนาดเล็กอยู่ทั่วทั้งพื้นผิวของแผ่นชีท เกิดจากเทอโมพลาสมาติกสตาร์ชไม่ได้กระจายตัวในแมทริกซ์ของพอลิบิวทิลีนอะดิเพท-โค-เทเรฟทาเลทอย่างสม่ำสมอ (Seo *et al*., 2012) แต่หลังการประยุกต์พลาสมา พบว่าพื้นผิวของแผ่นชีทพอลิเมอร์ชีวภาพ มีลักษณะหลอมเชื่อมติดกันจนไม่เกิดช่องว่างขนาดเล็ก เพราะความร้อนที่เกิดขึ้นในขณะประยุกต์พลาสมา ทำให้เกิดการเชื่อมกันของพื้นผิวนั้นเอง (Liu *et al*., 2004) สอดคล้องกับผลการทดสอบ AFM ข้างต้นอีกด้วย

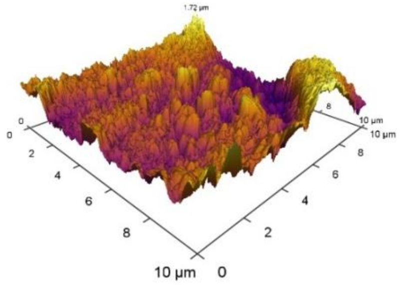
ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



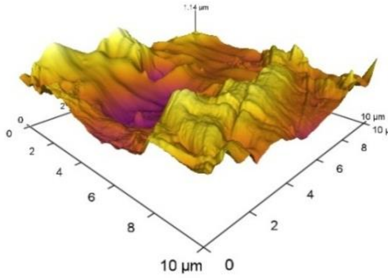
(a) untreated



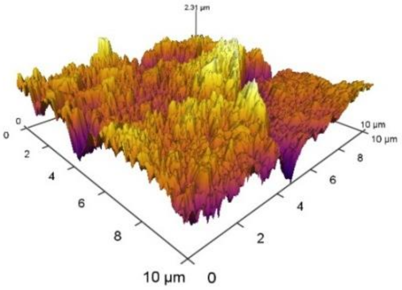
(b) 200 W 5 min



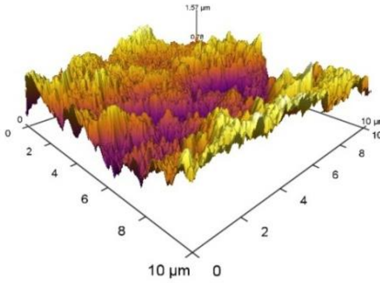
(e) 200 W 10 min



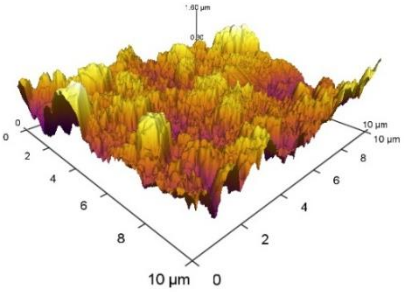
(c) 250 W 5 min



(f) 250 W 10 min



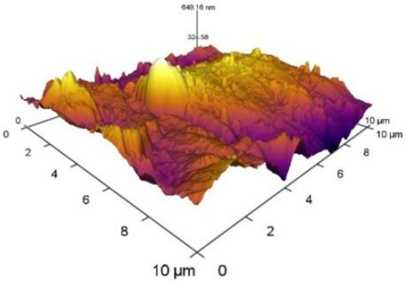
(d) 300 W 5 min



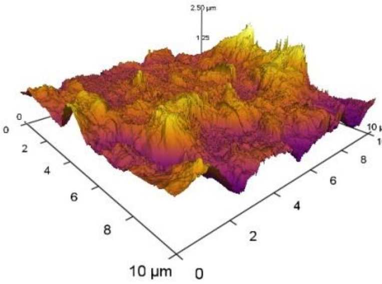
(g) 300 W 10 min

ภาพที่ 27 ลักษณะพื้นผิวของกระดาษ โดย (a) ก่อนประยุกต์พลาสมา (b-d) ที่ระยะเวลาประยุกต์พลาสมา 5 นาที และ (e-g) ที่ระยะเวลาประยุกต์พลาสมา 10 นาที ด้วยเทคนิค Atomic Force microscope (AFM) ในพื้นที่ 10×10 ไมโครเมตร

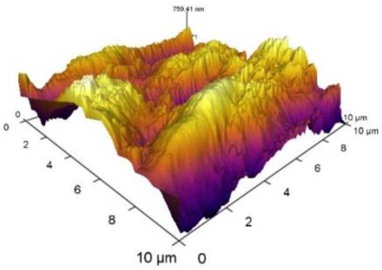
ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



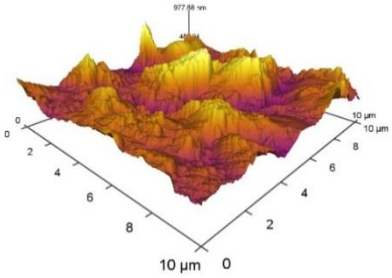
(a) untreated



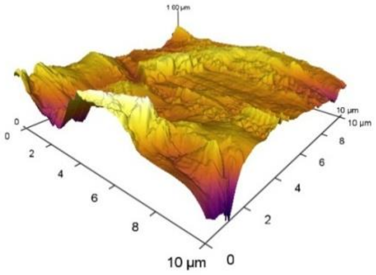
(b) 200 W 5 min



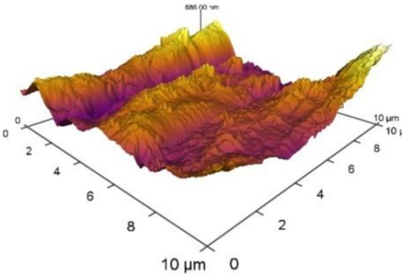
(e) 200 W 10 min



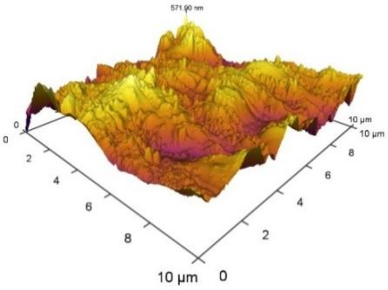
(c) 250 W 5 min



(f) 250 W 10 min



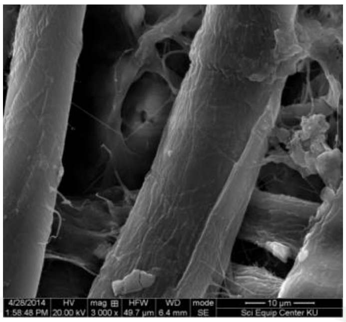
(d) 300 W 5 min

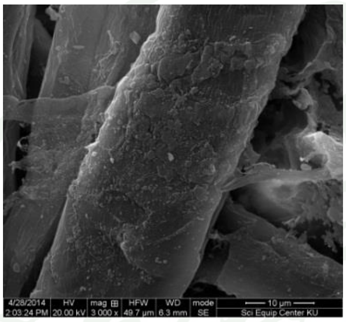


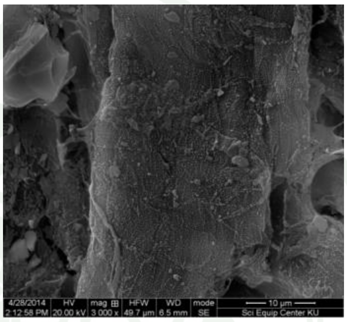
(g) 300 W 10 min

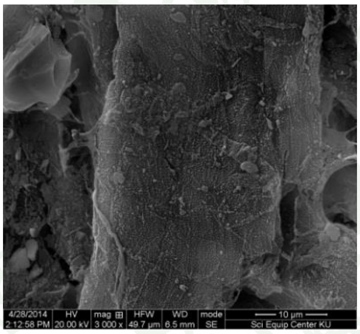
ภาพที่ 28 ลักษณะพื้นผิวของแผ่นชีทพอลิเมอร์ชีวภาพ โดย (a) ก่อนประยุกต์พลาสมา (b-d) ที่ระยะเวลาประยุกต์พลาสมา 5 นาที และ (e-g) ที่ระยะเวลาประยุกต์พลาสมา 10 นาที ด้วยเทคนิค Atomic Force microscope (AFM) ในพื้นที่ 10×10 ไมโครเมตร

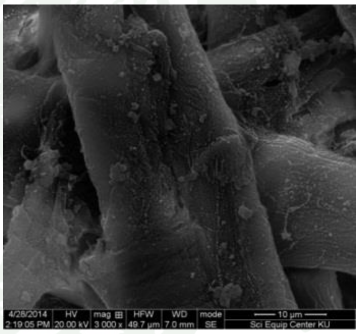
ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

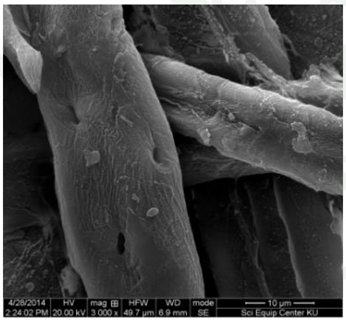

(a) untreated

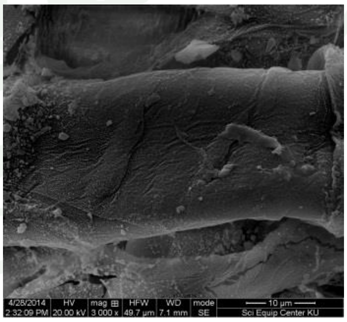

(b) 200 W 5 min


(f) 200 W 10 min


(c) 250 W 5 min

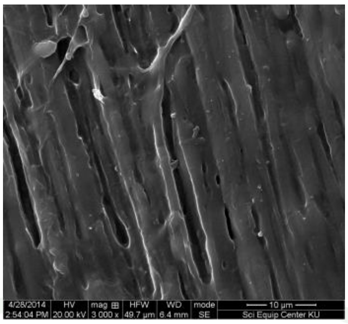

(g) 250 W 10 min


(d) 300 W 5 min

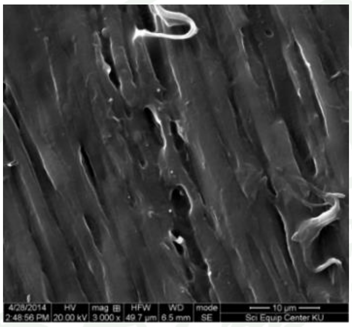

(h) 300 W 10 min

ภาพที่ 29 ลักษณะพื้นผิวของกระดาษโดย (a) ก่อนประยุกต์พลาสมา (b-d) ที่ระยะเวลาประยุกต์พลาสมา 5 นาที และ (e-g) ที่ระยะเวลาประยุกต์พลาสมา 10 นาทีด้วยเทคนิค Scanning Electron Microscopy (SEM) ที่กำลังขยาย 3,000 เท่า

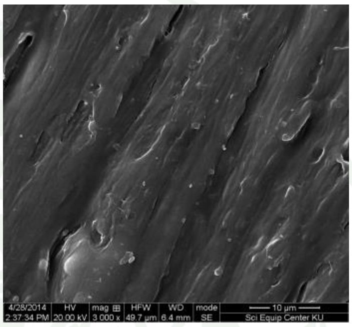
ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



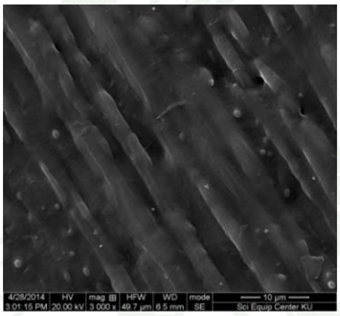
(a) untreated



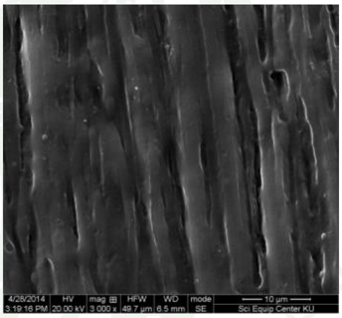
(b) 200 W 5 min



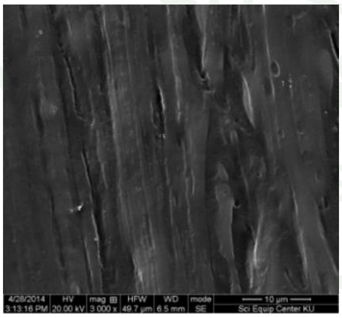
(f) 200 W 10 min



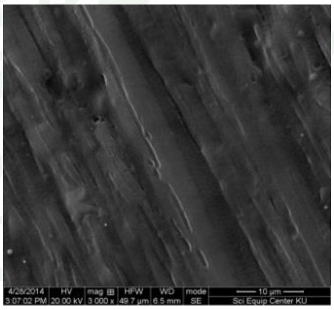
(c) 250 W 5 min



(g) 250 W 10 min



(d) 300 W 5 min



(h) 300 W 10 min

ภาพที่ 30 ลักษณะพื้นผิวของแผ่นชีทพอลิเมอร์ชีวภาพโดย (a) ก่อนประยุกต์พลาสมา (b-d) ที่ระยะเวลาประยุกต์พลาสมา 5 นาที และ (e-g) ที่ระยะเวลาประยุกต์พลาสมา 10 นาที ด้วยเทคนิค Scanning Electron Microscopy (SEM) ที่กำลังขยาย 3,000 เท่า

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

6. ศึกษาอิทธิพลของระยะเวลาในการเก็บต่อสมบัติการต้านทานน้ำ

เมื่อนำกระดาษและพอลิเมอร์ชีวภาพที่ผ่านการประยุกต์พลาสมา เก็บในสภาวะอุณหภูมิ 25-30 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 60-70 ซึ่งเป็นสภาวะของคลังสินค้าในประเทศเขตร้อนชื้น เช่น ประเทศไทย โดยเก็บตัวอย่างเป็นระยะเวลา 28 วัน จากนั้นทำการทดสอบวัดค่ามุมสัมผัสในวันที่ 3 7 14 21 และ 28 ซึ่งจากผลการทดลองพบว่าเมื่อเวลาผ่านไปความสามารถในการต้านทานน้ำของทั้งกระดาษและพอลิเมอร์ชีวภาพมีแนวโน้มที่ลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) โดยค่ามุมสัมผัสของกระดาษและพอลิเมอร์ชีวภาพที่วัดได้แสดงผลการทดสอบดังตารางที่ 27 และ 28 ตามลำดับ สำหรับกระดาษพบว่าค่ามุมสัมผัสของแต่ละสภาวะประยุกต์พลาสมาแตกต่างกันอย่างชัดเจนในแต่ละวัน ซึ่งตรงข้ามกับพอลิเมอร์ชีวภาพที่พบว่าสภาวะการประยุกต์พลาสมาที่ต่างๆมีค่ามุมสัมผัสไม่ค่อยแตกต่างกันมากนัก

เมื่อเวลาผ่านไปเกิดการลดลงของค่ามุมสัมผัสภายหลังการประยุกต์พลาสมาเนื่องจากในสภาวะการเก็บมีความชื้นสูง และตัวอย่างที่ผ่านการประยุกต์พลาสมายังคงหลงเหลือหมู่ที่มีขั้ว ซึ่งยังสามารถเข้าทำปฏิกิริยากับความชื้นที่อยู่รอบๆตัวอย่าง (Phykönen *et al.,* 2008) เมื่อเก็บตัวอย่างเป็นเวลา 28 วัน พบว่ากระดาษและพอลิเมอร์ชีวภาพที่ผ่านการประยุกต์ที่สภาวะการประยุกต์พลาสมาที่กำลังคลื่นวิทยุ 300 วัตต์ ระยะเวลา 10 นาที มีค่ามุมสัมผัสเปลี่ยนแปลงน้อยที่สุดเมื่อเทียบกับการประยุกต์พลาสมาที่สภาวะอื่นๆ เนื่องจากที่สภาวะดังกล่าวนั้นมีปริมาณฟลูออรีนที่เข้ากับปฏิกิริยาบนผิววัสดุมากในระดับหนึ่งที่ชะลอการดูดซึมน้ำได้ (Shao *et al.,* 2014)

Vasel and Mozetic (2012) กล่าวว่าปัจจัยที่ส่งต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติของวัสดุภายหลังการประยุกต์พลาสมา คือ ปัจจัยด้านอุณหภูมิ เนื่องจากการเก็บตัวอย่างไว้ที่อุณหภูมิสูง สายโซ่โมเลกุลภายในโครงสร้างของวัสดุจะสามารถเคลื่อนที่ได้ง่าย จึงทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสมบัติของวัสดุอย่างรวดเร็ว อีกปัจจัยหนึ่งคือการเปลี่ยนแปลงภายในโครงสร้างของวัสดุ โดยถ้าในระหว่างการเก็บเกิดการตัดขาดของสายโซ่พอลิเมอร์หรือเกิดการทำลายโครงสร้าง ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสมบัติของวัสดุอย่างรวดเร็วเช่นกัน

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางที่ 27 ค่ามุมสัมผัสของกระดาษหลังการประยุกต์พลาสมา เมื่อเก็บที่สภาวะอุณหภูมิ 25-30 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 60-70 เป็นเวลา 28 วัน

condition		Contact angle (degree)				
RF power	time	3 day	7 day	14 day	21 day	28 day
untreated		n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
200	5	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
	10	70.0±1.6^{a}	62.8±2.7^{a}	61.6±0.8^{a}	58.0±4.0^{a}	57.9±1.9^{a}
250	5	77.9±5.5^{b}	65.4±2.3^{a}	64.6±2.4^{ab}	62.2±1.3^{b}	61.9±2.3^{b}
	10	84.3±2.5^{c}	80.2±4.2^{b}	66.8±5.5^{b}	65.3±3.7^{b}	63.7±4.5^{b}
300	5	109.9±4.4^{d}	85.7±2.4^{c}	84.9±3.7^{c}	84.9±3.7^{c}	83.3±2.7^{c}
	10	125.2±4.0^{e}	122.8±2.7^{d}	120.8±0.7^{d}	117.6±2.3^{d}	117.5±2.9^{d}

ตารางที่ 28 ค่ามุมสัมผัสของพอลิเมอร์ชีวภาพหลังการประยุกต์พลาสมา เมื่อเก็บที่สภาวะอุณหภูมิ 25-30 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 60-70 เป็นเวลา 28 วัน

condition		Contact angle (degree)				
RF power	time	3 day	7 day	14 day	21 day	28 day
untreated		65.7±10.4^{a}	65.0±8.0^{a}	62.6±4.7^{a}	60.5±4.3^{a}	60.4±3.5^{a}
200	5	72.0±5.2^{ab}	70.9±4.8^{a}	69.6±10.9^{ab}	66.1±3.7^{ab}	65.2±9.2^{ab}
	10	73.1±8.6^{ab}	70.5±6.7^{ab}	67.9±7.0^{ab}	67.1±4.6^{ab}	65.7±9.0^{ab}
250	5	73.6±5.9^{ab}	69.9±3.7^{ab}	69.6±10.9^{ab}	67.3±3.7^{ab}	66.2±9.2^{ab}
	10	74.2±5.6^{ab}	70.6±3.5^{ab}	67.6±4.7^{ab}	67.4±7.5^{ab}	67.3±7.4^{ab}
300	5	78.3±6.2^{b}	70.8±3.4^{ab}	67.5±5.0^{ab}	67.9±7.5^{bcc}	67.3±6.5^{ab}
	10	76.8±8.1^{b}	76.8±7.0^{ab}	73.2±6.8^{ab}	72.9±4.8^{c}	72.6±3.4^{c}

หมายเหตุ n/a ไม่สามารถวัดค่าได้

$^{a-e}$ ตัวอักษรที่ต่างกันในแนวตั้ง หมายถึงค่าเฉลี่ยมีความแตกต่างกันทางสถิติ($p \leq 0.05$)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

จากการศึกษาเกี่ยวกับการปรับสภาพพื้นผิวของกระดาษและแผ่นชีทพอลิเมอร์ชีวภาพ โดยการประยุกต์พลาสมาด้วยแก๊สเฮกซะฟลูออโรพรอพิลีน พบว่า สมบัติการต้านทานน้ำและสมบัติการกีดขวางของทั้งกระดาษและแผ่นชีทพอลิเมอร์ชีวภาพ เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) นอกจากนี้พบว่าการประยุกต์พลาสมายังส่งผลต่อสมบัติทางกายภาพ สมบัติเชิงกล และพื้นผิวของวัสดุที่แตกต่างกันซึ่งสามารถสรุปได้ดังนี้

1. อิทธิพลของสภาวะพลาสมาต่อสมบัติการต้านทานน้ำของกระดาษและแผ่นชีทพอลิเมอร์ชีวภาพ

จากการทดลองพบว่าการประยุกต์พลาสมาบนกระดาษและแผ่นชีทพอลิเมอร์ชีวภาพ ส่งผลให้กระดาษและแผ่นชีทพอลิเมอร์ชีวภาพ มีสมบัติการต้านทานน้ำเพิ่มมากขึ้น ซึ่งสามารถสังเกตุได้จากค่ามุมสัมผัส การดูดซึมน้ำ อัตราการลดลงของปริมาตรหยดน้ำ ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของหยดน้ำ และการคำนวณงานการยึดติด ซึ่งสภาวะการประยุกต์พลาสมาที่เหมาะสมเพื่อเพิ่มสมบัติการต้านทานน้ำสำหรับเครื่องกำเนิดพลาสมาความดันต่ำ ระบบ Inductively Coupled Plasma (ICP) และใช้แก๊สเฮกซะฟลูออโรพรอพิลีนในการประยุกต์พลาสมา คือ สภาวะที่กำลังคลื่นวิทยุ 300 วัตต์ ระยะเวลา 10 นาที สำหรับกระดาษ และสำหรับแผ่นชีทพอลิเมอร์ชีวภาพ คือ กำลังคลื่นวิทยุ 300 วัตต์ ระยะเวลา 10 นาที

2. อิทธิพลของสภาวะพลาสมาต่อสมบัติทางกายภาพของกระดาษและแผ่นชีทพอลิเมอร์ชีวภาพ

จากกการทดลองสมบัติทางกายภาพ ได้แก่ น้ำหนักมาตรฐาน ความหนา ปริมาณความชื้น และสีของตัวอย่างหลังการประยุกต์พลาสมา สำหรับกระดาษพบว่าการประยุกต์พลาสมาไม่ส่งผลต่อน้ำหนักมาตรฐานโดยภาพรวม และแผ่นชีทพอลิเมอร์ชีวภาพ ก็พบว่าการประยุกต์พลาสมาไม่ส่งผลต่อความหนา และปริมาณความชื้น เช่นกัน นอกจากนี้พบการเปลี่ยนแปลงของสีกระดาษและแผ่นชีทพอลิเมอร์ชีวภาพหลังการประยุกต์พลาสมา คือ ทั้งกระดาษและแผ่นชีทพอลิเมอร์ชีวภาพมีสีเหลืองเพิ่มขึ้น

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

3. อิทธิพลของสภาวะพลาสมาต่อสมบัติการกีดขวางต่อไอน้ำและแก๊สออกซิเจนของกระดาษและแผ่นชีทพอลิเมอร์ชีวภาพ

จากการทดสอบพบว่าการประยุกต์พลาสมาส่งผลให้อัตราการซึมผ่านไอน้ำทั้งกระดาษและแผ่นชีทพอลิเมอร์ชีวภาพ ลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) ซึ่งผลการประยุกต์พลาสมาต่ออัตราการซึมผ่านของไอน้ำของพอลิเมอร์ชีวภาพให้ผลที่ดีกว่ากระดาษ เนื่องจากการประยุกต์พลาสมาด้วยแก๊สเฮกซะฟลูออโรพรอพิลีน อาจทำให้เกิดชั้นฟิล์มบางๆของฟลูออโรคาร์บอนที่ผิวทั้งกระดาษและแผ่นชีทพอลิเมอร์ชีวภาพ จึงส่งผลให้อัตราการซึมผ่านของไอน้ำลดลง ในส่วนของอัตราการซึมผ่านแก๊สออกซิเจน พบว่าการประยุกต์พลาสมาทำให้อัตราซึมผ่านของแก๊สออกซิเจนในกระดาษลดลง เนื่องจากการหลอมขององค์ประกอบในดครงสร้างที่อุดช่องว่างรูพรุนในกระดาษ ส่วนแผ่นชีทพอลิเมอร์ชีวภาพนั้นไม่มีการเปลี่ยนแปลง เนื่องจากการประยุกต์พลาสมาในการทดลองนี้อาจไม่กระทบต่อโครงสร้างภายในที่ก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงอัตราการซึมผ่านของแก๊สออกซิเจนได้

4. อิทธิพลของสภาวะพลาสมาต่อสมบัติเชิงกลของกระดาษและแผ่นชีทพอลิเมอร์ชีวภาพ

หลังการประยุกต์พลาสมา พบว่ากระดาษมีสมบัติเชิงกลลดลง เนื่องจากเกิดกัดกร่อนที่ผิวของกระดาษ ส่งผลเสียต่อเส้นใย จึงทำให้สมบัติเชิงกลลดลง ส่วนแผ่นชีทพอลิเมอร์ชีวภาพ พบว่าการปรับสภาวะตัวอย่างจนความชื้นเข้าสู่จุดสมดุล ส่งผลให้ค่าความต้านทานแรงดึงลดลง และค่าการยืดตัว ณ จุดที่ขาด เพิ่มขึ้น ในทางกลับกันพบว่าเมื่อเก็บตัวอย่างในการปรับสภาวะที่ระยะเวลาสั้นๆ ทำให้ค่าความต้านทานแรงดึงเพิ่มขึ้น และค่าการยืดตัว ณ จุดที่ขาด ลดลง เนื่องจากพอลิเมอร์ชีวภาพมีสัดส่วนของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชถึงร้อยละ 60 ซึ่งเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชนั้นจะไวต่อความชื้น และความแข็งแรงจะลดลงหากรับความความชื้นที่มากเกินไป และเมื่อมีความชื้นน้อยจะมีสมบัติค่อนข้างแข็งเปราะ (brittles) ยืดตัวน้อย ซึ่งความแข็งแรงของแผ่นชีทพอลิเมอร์ชีวภาพโดยภาพรวมแล้วจะลดลงมากกว่ากระดาษเมื่อได้รับความชื้น

5. การวิเคราะห์พื้นผิวของกระดาษและแผ่นชีทพอลิเมอร์ชีวภาพ

ในส่วนการวิเคราะห์พื้นผิวของกระดาษ พบว่าการประยุกต์พลาสมาทำให้กระดาษเกิดความขรุขระเพิ่มขึ้นเป็นผลจากการกัดกร่อนผิวของกระแสพลาสมา เมื่อวิเคราะห์ความขรุขระพื้นผิวของวัสดุทั้งสองด้วยเทคนิค AFM พบว่าเมื่อเพิ่มกำลังคลื่นวิทยุและระยะเวลาการประยุกต์พลาสมา ทำให้พื้นผิวกระดาษมีความขรุขระมากยิ่งขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ อีกทั้งหลังการประยุกต์พลาสมาบนผิวของ

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

กระดาษยังพบพันธะ C-F บนพื้นผิว ส่วนแผ่นชีทพอลิเมอร์ชีวภาพ เบื้องต้นไม่พบหมู่ฟังก์ชันของฟลูออรีน หลังการประยุกต์พลาสมา คาดว่าจะเกิดกลไกอื่น เช่น เกิดการหลอมของวัสดุบริเวณผิวหน้าเนื่องจากมีผิวเรียบขึ้น และอาจเกิดการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบเชิงโมเลกุลภายในโครงสร้าง

ข้อเสนอแนะ

1. เนื่องจากเครื่องผลิตพลาสมาในงานวิจัยนี้ เป็นระบบพลาสมาในสุญญากาศ จึงต้องมีการดูดอากาศออกก่อนให้หมด จนภายในแชมเบอร์อยู่ในสภาวะสุญญากาศ เพื่อให้เกิดสภาวะพลาสมาอย่างสมบูรณ์ แต่แผ่นชีทพอลิเมอร์ชีวภาพ ที่มาใช้ประยุกต์พลาสมามีความชื้นสูง จึงทำให้เสียเวลาปั๊มสุญญากาศเป็นเวลานาน ประกอบกับเกิดการรั่วที่ขอบประตูตู้แชมเบอร์ ยิ่งส่งผลให้ใช้เวลานานมากขึ้นในการเกิดสภาวะสุญญากาศ ดังนั้นตัวอย่างก่อนนำมาพลาสมาควรอบไล่ความชื้นให้มากกว่านี้ ทั้งนี้ควรมีการซ่อมบำรุงหรือเปลี่ยนประตูตู้แชมเบอร์ เพื่อใช้เวลาเกิดสภาวะพลาสมาน้อยลง

2. เนื่องจากขนาดแชมเบอร์มีขนาดเล็ก จึงทำให้การเตรียมตัวอย่างทีละมากเป็นไปได้ยากและเสียเวลา เช่น การเตรียมตัวอย่างเพื่อทดสอบสมบัติเชิงกล และสมบัติการสกัดกั้นการซึมผ่านของไอน้ำ ดังนั้นควรมีการดัดแปลงหรือปรับปรุงให้ภายในแชมเบอร์สามารถประยุกต์พลาสมาได้คราวละมากๆ เช่น เพิ่มชั้นของการวางตัวอย่างภายในแชมเบอร์

3. การลดความหนาของแผ่นชีทพอลิเมอร์ให้น้อยลงเหลือประมาณ 0.050-0.070 มิลลิเมตร เนื่องจากความหนาของแผ่นชีทพอลิเมอร์ที่ใช้ทดสอบคือ 0.070-0.090 มิลลิเมตร มีความหนามากเกินไป จึงทำให้มีความชื้นสูง ส่งผลให้เสียเวลาในการสร้างสภาวะสุญญากาศนาน

4. ศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับผลของการประยุกต์พลาสมาต่อสมบัติทางความร้อนของแผ่นชีทพอลิเมอร์ชีวภาพ เนื่องจากคาดว่าการประยุกต์พลาสมาจะส่งผลกระทบกับสมบัติทางความร้อนของวัสดุ

5. ศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับรูปแบบหรือกลไกที่เกิดขึ้นภายหลังการประยุกต์พลาสมาด้วย C_3F_6 และหาแนวทางในการพิสูจน์เพื่อให้เห็นความชัดเจนมากยิ่งขึ้น

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

กล้าณรงค์ ศรีรอต และเกื้อกูล ปิยะจอมขวัญ. 2546. **เทคโนโลยีของแป้ง**. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

งามทิพย์ ภู่วโรดม. 2550. **การบรรจุอาหาร**. เอส พี เอ็ม การพิมพ์, กรุงเทพฯ.

________. 2557. **วัสดุอ่อนตัวสำหรับการบรรจุ.** อัฟโฟรเอป, กรุงเทพฯ.

จริยา บัวเจริญ. 2552. มาตรฐานความหยาบผิว. **วารสารมาตรวิทยา** 11 (48): 3-5.

ชญาภา นิ่มสุวรรณ. 2553. ยางฟลูออโรอิลาสโทเมอร์. **วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยียาง** 4(1): 18.

ดวงทิพย์ กู้เกียรติกุลชัย. 2550. **ผลการเคลือบสตาร์ชดัดแปรและสารกันซึมต่อสมบัติของกระดาษคราฟท์ทำผิวกล่องเพื่อใช้งานในสภาวะห้องเย็น**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

ธีรวรรณ บุญญวรรณ. 2549. ผ้าพลาสมานาโนกับเทคนิควิเคราะห์เชิงนิวเคลียร์. **วารสารฟิสิกส์ไทย** 23(3): 6-9.

บุษกร ประดิษฐนิยกุล, วสันต์ ตุ่นคำ, พัชทรา มณีสินธุ์, จีระวรรณ สุทธิลักษณ์ และ ละออ เซี่ยงหวอง. 2545. **คู่มือการใช้กระดาษเพื่อการหีบห่อ**. ห้างหุ้นส่วนจำกัด อรุณ การพิมพ์, กรุงเทพฯ.

ปิ่นสุภา ปิติรักษ์สกุล. 2545. **การวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะของพอลิเมอร์**. สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยรามคำแหง, กรุงเทพฯ.

เพ็ญโฉม พจนธารี. 2554. เทคโนโลยีพลาสมาการพัฒนาฟิล์ม. **วารสารการบรรจุภัณฑ์** 19(4): 7-11.

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วรายุทธ สะโจมแสง. 2553. Starch nanoparticles. **จุลสารโพลิเมอร์ไทย** 10(2) : 4-6.

เยาวภา สุวัตถิ. 2554. พลาสติกชีวภาพ. **วารสารเพื่อการวิจัยและพัฒนา องค์การเภสัช** 18(4): 2-3.

ศูนย์วิจัยทางฟิสิกส์ของลำอนุภาคและพลาสมา. 2554. **เครื่องวิเคราะห์ผิววัสดุ XPS**. ศูนย์ความเป็นเลิศด้านฟิสิกส์, เชียงใหม่.

สำนักงานเศรษฐกิจอุตสาหกรรม. 2554. **รายงานสรุปภาวะเศรษฐกิจอุตสาหกรรมปี 2554 และแนวโน้ม ปี 2555**. 134 หน้า

สุชาดา ถาวรวิริยะนันท์. 2551. **การปรับปรุงการต้านทานน้ำของกระดาษแข็งโดยพลาสมาซัลเฟอร์เฮกซะฟลูออไรด์**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

Agostino, R. 1990. **Plasma deposition, treatment and etching of polymer**. Academic press, USA.

Ataeefard, M., S. Moradian, M. Mirabedini, M. Ebrahimi and S. Asiaban. 2009. Investigating the effect of power/time in the wettability of Ar and O_2 gas plasma-treated low-density polyethylene. **Progress in Organic Coatings** 64 (4):482–488.

Amaral, M.E., C. Gaiolas, A.P. Costa, M.S. Silva and W. Thielemans. 2013. Cold plasma-assisted paper recycling. **Industrial crops and products** 43: 114-118.

Andersson, C. 2008. New ways to enhance the functionality of paperboard by surface treatment-a review. **Packaging technology and science**21 (6): 339-373.

Andradea C.T., R.A. Simão, R.M.S.M. Thiréa and C.A. Acheteb. 2005. Surface modification of maize starch films by low-pressure glow 1-butene plasma. **Carbohydrate polymers** 61(4): 407-413.

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ASTM International. 2003a. **Standard Method for Oxygen Gas Transmission Rate Through Plastic film and Using a Coulometric Sensor**. ASTM D3985.

_____. 2003b. Standard Test Methods for Water Transmission of Materials. ASTM E96.

_____. 2004a. **Standard Test Methods for Corona-Treated Polymer Films Using Water Contact Angle Measurement**. ASTM D5946-04.

_____. 2004c. Standard **Test Methods for Grammage of Paper and Paperboard (Mass per Unit Area)**. ASTM D646-96 (Reapproved 2001).

_____. 2004d. **Standard Test Methods for Moisture Content of Paper and Paperboard by Oven Drying**. ASTM D644-99 (Reapproved 2002).

_____. 2004f. **Standard Test Methods for Thickness of Paper and Paperboard**. ASTM D645/D645M-97 (Reapproved 2002).

ASTM International. 2004f. Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics. ASTM D638.

_____. 2004g. **Standard Method for Water Absorptiveness of Nonbibulous Paper and Paperboard**. ASTM D3285-93 (Reapproved 2002).

Atav, R. 2013. **Eco-friendly textile dyeing and finishing**. InTech, Croatia.

Auras, R., B. Harte and S. Selke. 2004. An Overview of Polylactides as Packaging Materials. **Macromolecular bioscience** 4: 835-864.

Avérous, L. 2004. Biodegradable Multiphase Systems Based on Plasticized Starch: A Review. **Journal of Macromolecular Science** 44 (3): 231-274.

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

Avérous, L. Bélard, F. Poncin-Epaillard and P. Dole. 2013. Plasma-polymer coating onto different biodegradable polyesters surfaces. **European polymer Journal** 49 (4): 882-892

Badyal, J.P.S., L.J. Ward and W.C.E. Schofield. 2003. Atmospheric Pressure Glow Discharge Deposition of Polysiloxane and SiO_x Films. **Langmuir** 19(6):2110-2114.

BeMiller J.N. and R.L. Whistler. 2009. **Starch: Chemistry and Technology**. 3 rd ed. Academic Press, USA.

Bierman, C.J. 1996. **Handbook of pulping and papermaking**. 2nd ed. Academic Press, Inc., California.

Bismarck, A., A.B. Jimenez, M. Bistritz and E. Schulz. 2008. Atmospheric air pressure plasma treatment of lignocellulosic fibres: Impact on mechanical properties and adhesion to cellulose acetate butyrate. **Composites Science and Technology** 68(1): 215–227.

Bogaertsa, A., E. Neytsa, R. Gijbelsa and J. van der Mullenb. 2002. Gas discharge plasmas and their applications. **Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy** 57(4): 609-658.

Burm, K.T.A.L. 2012. Plasma: the fourth state of matter. **Plasma Chemistry and Plasma Processing** 32(2): 401-407.

Campo, A., J.P Fernández-BláZquez., D. Fell, E. Bonaccurso. 2011. Superhydrophilic and superhydrophobic nanostructured surface via plasma treatment. **Journal of colloid and interface science** 357 (1): 234-238.

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

Carlmark, A. and E. Malmström. 2013. Controlled grafting of cellulose fibers–an outlook beyond paper and cardboard. **Polymer Chemistry** 3:1702–1713.

Cernáková, P.L., D. Kivácik, K. Jonhansson and M. Cernák. 2006. **Low cost High Speed Plasma treatment of paper surface**. TAPPI Advanced Coating Fundamentals Symposium.

Chaiwong, C., P. Rachtannapun, P. Wongchaiya, R. Auras and D. Boonyawan. 2010. Effect of plasma treatment on hydrophobicity and barrier property of polylactic acid. **Surface and coatings technology** 204(3): 2933-2939.

Chan, C.M., T.M. Koa and H. Hiraoka. 1996. Polymer surface modification by plasmas and photons. **Surface Science Reports** 24 (1–2): 1–54.

Chandra, R. and R. Rustgi. 1998. Biodegradable Polymers. **Progress in Polymer Sciences** 23: 1273–1335.

Chen, Y., L. Tan; L. Chen; Y. Yang and X. Wang. 2008. Study on biodegradable aromatic/aliphatic copolyesters. **Brazilian Journal of chemical engineering** 25 (2): 321-335.

Chen Q., J. Zhang, Y. Zhang, F. Liu and Z. Liu. 2009. The power source effect on SiOx coating deposition by plasma enhanced chemical vapor deposition. **Thin Solid Films** 517(14): 3850–3853.

Chen P., C. Mingxin, D. Liu, Q. Yu and C. Lu. 2011. Effects of argon plasma treatment on the interfacial adhesion of PBO fiber/bismaleimide composite and aging behaviors. **Applied Surface Science** 257 (23): 10239–10245.

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

Chen P., D. Liu, Q. Yu, K. Ma and Z. Ding. 2014. Improved mechanical performance of PBO fiber-reinforced bismaleimide composite using mixed O_2/Ar plasma. **Applied Surface Science** 305: 630–637.

Chang, S.H. and C.H. Chian. 2013. Plasma surface modification effects on biodegradability and protein adsorption properties of chitosan films. **Applied Surface Science** 282: 735–740.

Coburn, J.W. and H.F. Winters. 1979. Plasma etching—A discussion of mechanisms. **Journal of vacuum Science and Technology** 16 (2):391-403.

Coffin, D.R. and M.L. Fishman. 1994. Physical and mechanical properties of highly plasticized pectin/starch films. **Journal of Applied Polymer Science** 54(9): 1311–1320.

Cullena, P.J., S.K. Pankaja, C. Bueno-Ferrera, N.N. Misraa, L. O'Neillb, A. Jiménezc and P. Bourkea. 2014. Characterization of polylactic acid films for food packaging as affected by dielectric barrier discharge atmospheric plasma. **Innovative Food Science & Emerging Technologies** 21: 107–113.

Demir, A., Y. Seki, E. Bozaci, M. Sarikanat, S. Erden, K. Sever and E. Ozdogan. 2011. Effect of the atmospheric plasma treatment parameters on jute fabric: The effect on mechanical properties of jute fabric/polyester composites. **Journal of Applied Polymer Science** 121 (2): 634–638.

Denes, F., L.E. Cruz-Barba and S. Manolache. 2002. Novel Plasma Approach for the Synthesis of Highly Fluorinated Thin Surface Layers. **Langmuir**18 (24): 9393–9400.

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

Diener electronic . 2009. **Comparison chart low pressure plasma vs. Atmosphere plasma**. Diener electronic company. Available source: http://www.plasma.de/en /plasmatechnique/comparison_chart.html, May 15, 2014.

Dufresne, A., D.L. Corre and Julien Bras. 2010. Starch Nanoparticles: A Review. **Biomacromolecules** 11 (5):1139–1153.

Duncan, B., R. Mera, D. Leatherdale, M. Taylor and R. Musgrove. 2005. **Techniques for characterising the wetting, coating and spreading of adhesives on surfaces**. NPL REPORT.

Ebnesajjad, S. 2013. **Handbook of biopolymer and biodegradable plastic: properties, processing and application**. elsivers, Netherlands.

Ebnesajjad, S. 2014. **Surface materials for adhesive bonding**. 2nd. William Andrew Appiled Science Pubisher, USA.

Ellinghorst, G. nd. **Low Pressure Plasma Technique**. Institut Fertigungstechnik Materialforschung (IFAM). Available Source: http://www.eurobonding.org/ Englisch/Oberflaechen/Low_pressure.htm, 10 January, 2014.

Fatyeyeva, K., N. Tenn, N. Follain, J.M. Valleton, F.P. Epaillard, N. Delpouve and S. Marais. 2012. Improvement of Water Barrier Properties of Poly(ethylene-co-vinyl alcohol) Films by Hydrophobic Plasma Surface Treatments. **Journal of Physic Chemistry** 116 (23): 12599–12612.

Favia, P., G. Cicala, A. Milella, F. Palumbo, P. Rossini and R. d'Agostino. 2003. Deposition of super-hydrophobic fluorocarbon coatings in modulated RF glow discharges. **Surface and Coatings Technology** 169-170: 609-612.

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

Feast, W.J., W.J. Brennan, H.S. Munro and S.A. Walker. 1991. Investigation of the ageing of plasma oxidized peek. **Polymer** 32(8):1527–1530.

Festucci-Buselli, R.A., W.C. Otoni, and C.P. Joshi. 2007. Structure, organization, and functions of cellulose synthase complexes in higher plants. **Brazilian Journal of Plant Physiology** 19 (1): 1-13.

Fracassi, F. and R. Agostino. 1999. Contribution to global warming of plasma polymerization and treatment processes fed with fluorinated compounds. **Plasma and polymer** 4 (2/3): 147-158.

Friedrich, J. 2012. **The plasma chemistry of polymer surface**. Markono Print Media Pte, Singapore.

Getty, J.D. 2002. How plasma enhanced surface modification improves the production of microelectronics and optoelectronics. **Chip scale review** 1(6): 72-75.

Gamelas, J.A.F., M.S. Saraiva, A.P.M. Sousa, B.M. Reis, J.L. Amaral and P.J. Ferreira. 2010. A New Approach for the Modification of Paper Surface Properties Using Polyoxometalates. **Materials** 3: 201-215.

Giannelis, E.P., V. Bugatti, S. Livi, S. Hayrapetyan, Y. Wang, L. Estevez and V. Vittoria. 2013. Deposition of LDH on plasma treated polylactic acid to reduce water permeability. **Journal Colloid Interface Science** 396: 47-52.

Grace, J.M. and Gerenser L.J. 2003. Plasma treatment of polymer. **Journal of dispersion science and technology** 24(3-4): 305-341.

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

Griesser, H.J., K.S. Siow, L. Britcher and S.Kumar. 2006. Plasma Methods for the Generation of Chemically Reactive Surfaces for Biomolecule Immobilization and Cell Colonization - A Review. **Plasma Processes and Polymers** 3(6-7): 392–418.

Guittard, F. and T. Darmanin, 2014. Wettability of conducting polymers: From superhydrophilicity to superoleophobicity. **Progress in Polymer Science** 39(4): 656–682.

Han, Y., S.O. Manolach, F. Denes and R. M. Rowelld. 2011. Cold plasma treatment on starch foam reinforced with wood fiber for its surface hydrophobicity. **Carbohydrate Polymers** 86 (2): 1031–1037.

Hana, Y., S.O. Manolach, F. Denes and R.M. Rowell. 2014. Cold plasma treatment on starch foam reinforced with wood fiber for its surface hydrophobicity. **Carbohydrate Polymers** 86(2): 1031–1037.

Hanania, Z.A., Y.H. Roos and J.P. Kerry. 2014. Use and application of gelatin as potential biodegradable packaging materials for food products. **International Journal of Biological Macromolecules**, *In press.*

Hare, E.F., E.G. Shafrin and W.A. Zisman. 1954. Properties of Films of Adsorbed Fluorinated Acids. **Journal of Physic Chemistry** 58(3): 236-239.

Haugaard, V., C.J. Webery, R. Festersen and G. Bertelsen. 2002. Production and applications of biobased packaging materials for the food industry. **Food Additives and Contaminants** 19: 172 – 177.

Hess, D.W., S. Vaswani and J. Koskinen. 2004. Surface modification of paper and cellulose by plasma-assisted deposition of fluorocarbon films. **Surface and coating technology** 195: 121-129.

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

Hess, D.W., B. Balu and V. Breedveld. 2008. Fabrication of "Roll-off" and "Sticky" Superhydrophobic Cellulose Surfaces via Plasma Processing. Langmuir 24(9): 4785-4790.

________, B. Balu, J.S. Kim and V. Breedveld. 2009. Design of Superhydrophobic Paper/Cellulose Surfaces Via Plasma Enhanced Etching And Deposition. **Contact Angle, Wettability and Adhesion** 6: 235-250.

Hodak, K., T. Supasai, B.Paosawatyanyong, K.Kamlangkla and V.Pavarajarn. 2008. Enhancement of the hydrophobicity of silk fabrics by SF_6 plasma. **Applied Surface Science** 254 (15): 4744-4749.

Hotta, A., S. Yoshid, K. Hagiwara and T. Hasebe. 2013. Surface modification of polymers by plasma treatments for the enhancement of biocompatibility and controlled drug release. **Surface and Coatings Technology** 233: 99–107.

Huang, C., W.C. Ma and C.Y. Tsai. 2014. Investigation of atmospheric-pressure plasma deposited hexafluorobenzene fluorocarbon film. **Surface and coating technology**, *in press.*

Inagaki, N., K. Narushima and S.K. Lim. 2003. Effect of aromatic groups in polymer chains on plasma surface modification. **Journal of Applied polymer science** 89 (1): 96-103.

ISO International. 2008. **Paper and board - Determination of tensile properties - Part 2: Constant rate of elongation method (20 mm/min)**. ISO 1924-2:2008.

Jafari, R., S. Asadollahi and M. Farzaneh. 2013. Applications of plasma technology in development of superhydrophobic surfaces. **Plasma chem plasma process** 33 (1): 177-200.

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

Janssen, L. and L. Moscicki. 2010. **Thermoplastic starch**. John Wiley&Son, USA.

Jassal, M., K.K. Samant, A.G. Joshi and A.K. Agrawal. 2012. Study of hydrophobic finishing of cellulosic substrate using He/1,3-butadiene plasma at atmospheric pressure. **Surface and Coatings Technology** 213: 65–76.

Jianping, G., Y. Jingao and W. Wei. 1997. The structure of thermoplastic starch. **Transactions of Tianjin University** 3(2): 138-143.

Jordá-Vilaplana, A., V. Fombuena, D. García-García, M.D. Samper and L. Sánchez-Nácher. 2014. Surface modification of polylactic acid (PLA) by air atmospheric plasma treatment. **European Polymer Journal** 58: 23-33.

Khan, M.A., S.K. Bhattacharia, M.A. Kader and K. Bahari. 2006. Preparation and characterization of ultra violet (UV) radiation cured bio-degradable films of sago starch/PVA blend. **Carbohydrate Polymers** 63 (4): 500–506.

Kharitonov, A.P., G.V. Simbirtseva, A. Tressaud, E. Durand, C. Labrugère and M. Dubois. 2014. Comparison of the surface modifications of polymers induced by direct fluorination and rf-plasma using fluorinated gases. **Journal of Fluorine Chemistry** 165: 49–60.

Khwaldia, K., A.H. Basta, H. Aloui and H. El-Saied. 2014. Chitosan–caseinate bilayer coatings for paper packaging materials. **Carbohydrate Polymers** 99: 508–516.

Khaymapanya, P. 2005. **Surface Modification of Synthetic and Natural-Fiber Fabrics Using a Theta-Pinch Device**. Master Science (Applied Polymer Science and Textile Technology), Chulalongkorn University.

Kim, M.C. and T. Masuokab. 2009. Degradation properties of PLA and PHBV films treated with CO_2-plasma. **Reactive and Functional Polymers** 69(5): 287-292.

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

Kim, S.S., J.G. Leea and H.G. Kimb. 2013. Enhancement of barrier properties of aluminum oxide layer by optimization of plasma-enhanced atomic layer deposition process. **Thin solid films** 534: 515-519.

Kostov, K.G., T.M.C. Nishime, A.H.R. Castro, A. Toth and L.R.O. Hein. 2014. Surface modification of polymeric materials by cold atmospheric plasma jet. **Applied Surface Science** 314: 367–375.

Kusano, Y., H. Mortensen, B. Stenum, S. Goutianos, S. Mitra, A. Ghanbari-Siahkali, P. Kingshott, B.F. Sørensen and H. Bindslev. 2007. Atmospheric pressure plasma treatment of glassy carbon for adhesion improvement. **International Journal of Adhesion and Adhesives** 27 (5):402–408.

Kylián, O., O.P. Petr, A. Choukourov, J. Hanuš and H. Biederman. 2013. gas barrier properties of hydrogenated amorphous carbon films coated on polyethylene terephthalate by plasma polymerization in argon/n-hexane gas mixture. **Thin Solid Films** 540: 65-68.

Lejeune, A. and T.Deprez. 2010**. Cellulose: Structure and Properties, Derivatives and Industrial uses**. Nova Science Pubishers Inc. United State.

Lejeune, M., L.M. Lacroix, L. Ceriotti, M. Kormunda, T. Meziani, P. Colpo and F. Rossi. 2005. Tuneable rough surfaces: A new approach for elaboration of superhydrophobic films. **Surface Science** 592(1-3): 182-188.

Lommatzsch, U. and J. Ihde. 2009. Plasma Polymerization of HMDSO with an Atmospheric Pressure Plasma Jet for Corrosion Protection of Aluminum and Low-Adhesion Surfaces. **Plasma Processes and Polymers** 6(10): 642-648.

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

Li, S. and D. Jinjin. 2006. Improvement of hydrophobic properties of silk and cotton by hexafluoropropylene plasma treatment. **Applied Surface Science** 253 (11): 5051-5055.

Liu, C.J., J.J. Zoua and B. Eliasson. 2004. Modification of starch by glow discharge plasma. **Carbohydrate Polymers** 55 (1):23–26.

Maia, J.V., F.P. Pereira, J.C.N. Dutra, S.A.C. Mello, E.A.O. Becerra, M. Massi and A.S. da Silva Sobrinho. 2013. Influence of gas and treatment time on the surface modification of EPDM rubber treated at afterglow microwave plasmas. **Applied Surface Science** 285 (Part B): 918–926.

Majee, S., M.F. Cerqueira, D. Tondelier, B. Geffroy, Y. Bonnassieux, P. Alpuim and J.E. Bourée. 2013. The effect of argon plasma treatment on the permeation barrier properties of silicon nitride layers. **Surface and coating** 235: 361-366.

Mano, J.F., C.G. Obeso, M.P.Sousa, W. Song, M.A. Rodriguez-Pérez and B.Bhushan. 2013. Modofocation of paper using polyhydroxybutyrate to obtamin biomimetic superhydrophobic substrates. **Colloids and Surfaces A**416: 51-55.

Marengo, M., C. Antonini and A.Amirfazli. 2012. Drop impact and wettability: From hydrophilic to superhydrophobic surfaces. **Physical of Fluid** 24(10): 1-13.

Marais, S., Y. Hirataa, C. Cabota, S. Morin-Grognetb, M.-R. Gardaa, H. Atmanib and F. Poncin-Epaillardc. 2006. Effect of a low-pressure plasma treatment on water vapor diffusivity and permeability of poly(ethylene-co-vinyl alcohol) and polyethylene films. **Surface and Coatings Technology** 201 (3–4): 868–879.

McCord, M. G., Y.J. Hwang, Y. Qiu, L.K. Hughes and M.A. Bourham. 2003. Surface analysis of cotton fabrics fluorinated in radio-frequency plasma. **Journal of Applied Polymer Science** 88 (8): 2038–2047.

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

Meenan, B.J., C.N. Flynn and C.P. Byrne. 2013. Surface modification of cellulose via atmospheric pressure plasma processing in air and ammonia–nitrogen gas. **Surface and Coatings Technology** 233: 108–118.

Mercado-Cabrera, A., B. Jaramillo-Sierra, R. López-Callejas, R. Valencia-Alvarado, A. de la Piedad-Beneitez, R. Peña-Eguiluz, S. Barocio-Delgado, Muñoz-Castroa and B. Rodríguez-Méndeza. 2013. Surface modification of polypropylene fiber for hydrophilicity enhancement aided by DBD plasma. **Progress in Organic Coatings** 76 (12): 1858–1862.

Milella, A., R.D. Mundo, F. Palumbo, P. Favia, F. Fracassi1and R. d'Agostino. 2009. Plasma Nanostructuring of Polymers: Different Routes to Superhydrophobicity. **Plasma Processes and Polymers** 6(6-7): 460-466.

Mitrus, M. and L. Moscicki. 2014. Extrusion-cooking of starch protective loose-fill foams. **Chemical Engineering Research and Design** 92(4): 778-783.

Mohanty, A.K., M. M. Reddy, S. Vivekanandhan, M. Misraa and S.K. Bhatiac. 2013. Biobased plastics and bionanocomposites: Current status and future opportunities. **Progress in Polymer Science** 38 (10–11):1653–1689.

Morent, R., N. De Geytera, J. Verschurenb, K. De Clerckb, P. Kiekensb and C. Leysa. 2008. Non-thermal plasma treatment of textiles. **Surface and Coatings Technology** 202(14): 3427-3449.

Nakamura, S., M. Itano, H. Aoyama, K. Shibahara, S. Yokoyama and M. Hirose. 2003. Comparative Studies of Perfluorocarbon Alternative Gas Plasmas for Contact Hole Etch. **The Japan Society of Applied physics** 42(9A): 5759-5764.

Nehra, V., A. Kumar and H.K. Dwivedi. 2008. Atmospheric Non-Thermal Plasma Sources. International **Journal of Engineering** 2(1): 53-68.

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

Ohkubo, J. and N. Inagaki. 1990. Influences of the system pressure and the substrate temperature on plasma polymers. **Journal of Applied Polymer Science** 41(1-2) :349–359.

Ooij, W.J.V. and S. Luo. 2002. Surface modification of textile fibers for improvement of adhesion to polymeric matrices: a review. **Journal of Adhesion Science and Technology** 16(13): 1715-1735.

Park, W.H., Y.I. Yoon, H.S. Moon, W.S. Lyoo and T. S. Lee. 2009. Superhydrophobicity of cellulose triacetate fibrous mats produced by electrospinning and plasma treatment. **Carbohydrate Polymers** 75 (2): 246–250.

Petersen, K., P.V. Nielsen, G. Bertelsen, M. Lawther, M.B. Olsen, N.H. Nilsson and G. Mortensen. 1990. Potential of biobased materials for food packaging. **Trends in Food Science & Technology** 10 (2): 52–68.

Pykönen, M., H. Sundqvist, O.V. Kaukoniemi, M. Tuominen, J. Lahti, P. Fardim and M. Toivakka. 2008. Ageing effect in atmospheric plasma activation of paper substrates. **Surface and Coatings Technology** 202 (16): 3777–3786.

Podgorski, L., C. Bousta, F. Schambourg, J. Maguin, and B. Chevet. 2001. Surface modification of wood by plasma polymerization. **Pigment & Resin Technology** 31 (1): 33 – 40.

Pulpyte, J.,V. Kumar, P. Peng, V. Micheli, N. Laidani and F.Arefi-Khonsari. 2011. Deposition of Organosilicon Coatings by a Non-Equilibrium Atmospheric Pressure Plasma Jet: Design, Analysis and Macroscopic Scaling Law of the Process. **Plasma Processes and Polymers** 8(7): 664-675.

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

Qiu Y., Y.Li, J. Zhang, P. Chenga, J. Shic and L. Yaoa. 2014. Helium plasma treatment voltage effect on adhesion of ramie fibers to polybutylene succinate. **Industrial Crops and Products** 61:16–22.

Ragaert, P., N. Peelman, A. Vandemoortele, E. Verguldt, B. De Meulenaer and F. Devlieghere. 2014. Use of biobased materials for modified atmosphere packaging of short and medium shelf-life food products. Innovative Food Science & Emerging Technologies, ***In press.***

Rhim, J., J. Lee and S.Hong. 2007. Increase in water resistance of paperboard by coating with poly(lactide). **Packaging technology and science**20 (6): 393-402.

Rhim, J.W. 2013. Preparation and characterization of vacuum sputter silver coated PLA film. **LWT - Food Science and** Technology 54 (2): 477–484.

Rubio, L., M. Santos and J.A. Torresano. 2001. Laser induced fluorescence detection of CF, CF_2 and CF_3 in the infrared multiphoton dissociation of C_3F_6. **Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry** 146(1-2): 1-8.

Saiah, R., P. A. Sreekumar, N. Leblanc, M. Castandet and J.M. Saiter. 2007. Study of Wheat-Flour-Based Agropolymers: Influence of Plasticizers on Structure and Aging Behavior. **Cereal Chemistry** 84(3): 276-281.

______. 2009. Structure and thermal stability of thermoplastic films based on wheat flour modified by monoglyceride. **Industrial Crops and Products** 29(1): 241-243.

Sahin, H.T. 2007. RF-CF_4 plasma surface modification of paper: Chemical evaluation of two sidedness with XPS/ATR-FTIR. **Applied Surface Science** 253 (9): 4367–4373.

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

Sahin, H.T. 2011. Application of RF argon plasma to enhance hydrophobic properties of floropolymer pre-deposited paper. **Journal of adhesion science and technology** 2 (6-7): 685-697.

_______. 2013. RF-plasma vapor deposition of siloxane on paper. Part 1: Physical evolution of paper surface. **Applied Surface Science** 265: 558–563.

_______. 2013. RF-plasma vapor deposition of siloxane on paper. Part 2: chemical evolution of paper surface. **Applied Surface Science** 265: 564–569.

A. and O. Ratcharaka. 2014. Surface coating with poly(trifluoroethyl methacrylate) through rapid expansion of supercritical CO_2 solutions. **The Journal of Supercritical Fluids** 89: 106–112.

Sarmadi, M. 2013. Advantages and Disadvantages of Plasma Treatment of Textile Materials. International symposium of plasma chemistry

Scaffaro, R., A. Maio, S. Agnello and A. Glisenti. 2012. Plasma Functionalization of Multiwalled Carbon Nanotubes and Their Use in the Preparation of Nylon 6-Based Nanohybrids. **Plasma Processes and Polymers** 9 (5): 503–512.

Seo, H.K., H. Y. Park, S.S. Kim and S.G. Kim. 2012. Modification of Physical Properties of PBAT by Using TPS. **2012 3rd International Conference on Biology, Environment and Chemistry** 46(15): 67-71.

Shao, T., C. Zhang, Y. Zhou, Q. Xie, J. Xua and W. Yang. 2014. Hydrophobic treatment on polymethylmethacrylate surface by nanosecond-pulse DBDs in CF_4 at atmospheric pressure. **Applied Surface Science** 311: 468–477.

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

Shen, J., X. Huang and X. Qian. 2013. Filler modification for papermaking with starch/oleic acid complexes with the aid of calcium ions. **Carbohydrate Polymers** 98 (1): 931–935.

Simão, R.A., M.L.V.J. Da Silva, M. Martins, R.M.S.M. Thiré and C.T. Andrade. 2006. Sulphur hexafluoride plasma treatment to enhance the hydrophobicity of CVD carbon coatings produced on cornstarch plasticized films. **Macromolecular Symposia** 245-246: 519-524.

_______, D.C. Bastos, A.E.F. Santos and M.L.V.J. Silva. 2009. Hydrophobic corn starch thermoplastic films produced by plasma treatment. **Ultramicroscopy** 109 (8): 1089-1093.

_______, A.E.F. Santos, D.C. Bastos, M L.V.J. da Silva and R.M.S.M. Thiré. 2012. Chemical analysis of a cornstarch film surface modified by SF_6 plasma treatment. **Carbohydrate Polymers** 87 (3): 2217–2222.

Slavutskya, A.M. and Bertuzzib M.A. 2014. Water barrier properties of starch films reinforced with cellulose nanocrystals obtained from sugarcane bagasse. **Carbohydrate Polymers** 110: 53–61.

Silverstein, M.S., R. Chen and V. Gorelik. 1995. Plasma polymerization of hexafluoropropylene: Film deposition and structure. **Journal of Applied Polymer Science** 56 (5): 615–623.

Sorrentino, L., L. Carrino and W. Polini. 2004. Ageing time of wettability on polypropylene surfaces processed by cold plasma. **Journal of Materials Processing Technology** 153–154: 519–525.

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

Subedi, D. P., R.B. Tyata and D. Rimal. 2009. Effect of UV treatment on the wettability of polycarbonate. **Journal of science, engineering and technology of Kathmandu university** 5 (2): 37-41.

Takahashi, K., A. Itoh, T. Nakamura and K. Tachibana. 2000. Radical kinetics for polymer film deposition in fluorocarbon (C_4F_8, C_3F_6 and C_5F_8) plasmas. **Thin Solid Films** 374 (2): 303–310.

Tatarka, P.D. and R.L. Cunningham. 1998. Properties of Protective Loose-Fill Foams. **Journal of Applied Polymer Science** 67 (7):1157–1176.

Teodoru, S., Y. Kusano, N. Rozlosnik and P.K. Michelsen. 2009. Continuous Plasma Treatment of Ultra-High-Molecular-Weight Polyethylene (UHMWPE) Fibers for Adhesion Improvement. **Plasma Processes and Polymers** 6: S375–S381.

Thorvaldsson, A., P. Edvinsson, A. Glantz, K. Rodriguez, P. Walkenström and P.Gatenholm. 2012. Superhydrophobic behaviour of plasma modified electrospun cellulose nanofiber-coated microfibers. **Cellulose19** (5): 1743-1748.

Tighe, B., W. Amass and A. Amass. 1998. A review of biodegradable polymers: Uses, current developments in the synthesis and characterization of biodegradable polyesters, blends of biodegradable polymers and recent advances in biodegradation studies. **Polymer International** 47 (2):89-144.

Vesel, A. and M. Mozetic. 2012. Surface modification and ageing of PMMA polymer by oxygen plasma treatment. **Vacuum** 86(6): 634–637.

Wang, S., Y. Wan, C. Tu, J. Yang and J. Bei. 2006. Influences of ammonia plasma treatment on modifying depth and degradation of poly(l-lactide) scaffolds. **Biomaterials** 27 (13): 2699–2704.

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

Ward, T.L., H.Z. Jung, O. Hinojosa and R.R. Benerito. 1979. Characterization and use of radio frequency plasma-activated natural polymers. **Journal of Applied Polymer Science** 23 (7):1987–2003.

Weber, C.J.; V. Haugaard, R. Festersen, and G. Bertelsen. 2002. Production and Applications of Biobased PackagingMaterials for the Food Industry. **Food Additives and Contaminants** 19 Supplement: 172-177.

Xiao, H., Z. Song and J. Tang. 2013. Plasma induced polymerization for enhancing paper hydrophobicity. **Carbohydrate polymers** 92(1): 928-933.

Xie, F., P.J. Halley and L. Avérous. 2012. Rheology to understand and optimize processibility, structures and properties of starch polymeric materials. **Progress in Polymer Science** 37 (4): 595–623.

Yaganawa, Y., Y. Masutani, M. Kogoma and K. Tanaka. 2007. Deposition of hexafluropropene by atmospheric pressure glow plasma on an elastic polymer: Application to release coating on pressure-sensitive adhesive tapes. **Thin solid film** 519(9): 4116-4120.

Yang, J.H., J.G. Yu and X.F. Ma. 2006. Preparation and properties of ethylenebisformamide plasticized potato starch (EPTPS). **Carbohydrate polymers** 63(2): 218-223.

Yang, K., L.Tan, X. Yu and P.Wan. 2013. Biodegradable Materials for Bone Repairs: A Review. **Journal of Materials Science & Technology** 29 (6): 503–513.

Yasuda, H., Y. Iriyama, T. Yasuda and D. L. Cho. 1990. Plasma surface treatment on nylon fabrics by fluorocarbon compounds. **Journal of Applied Polymer Science** 39 (2): 249–264.

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

Yuasa, M. and T. Yara. 1999. **Treatment method in glow discharge plasma and apparatus thereof**. U.S. Patent 5,968,377

Zhu, X., S. Ma, L. Fan, Z. Tang, R. Zhang, H. Na and J. Zhu. 2014. Surface hydrophobic modification of starch with bio-based epoxy resins to fabricate high-performance polylactide composite materials. **Composites Science and Technology** 94: 16–22.

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ภาคผนวก

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

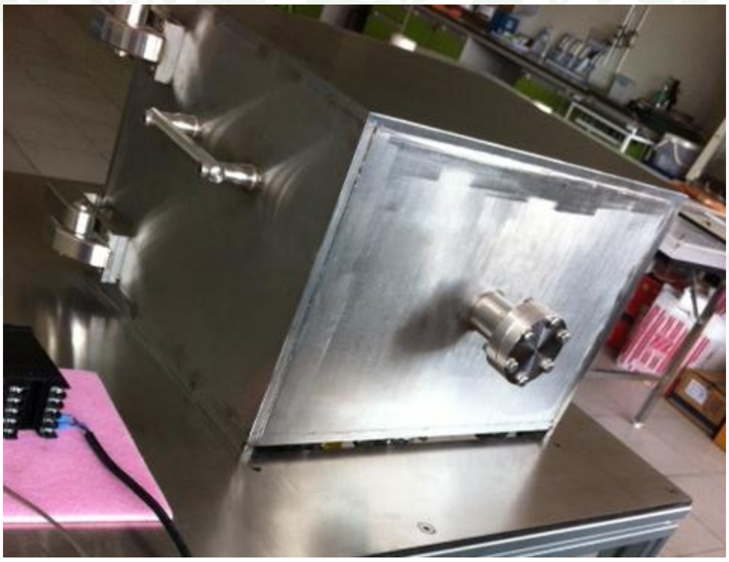
ภาคผนวก ก

การทำงานของเครื่องพลาสมาแบบความดันต่ำ และอุณหภูมิที่เกิดขึ้นขณะเกิดพลาสมา

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

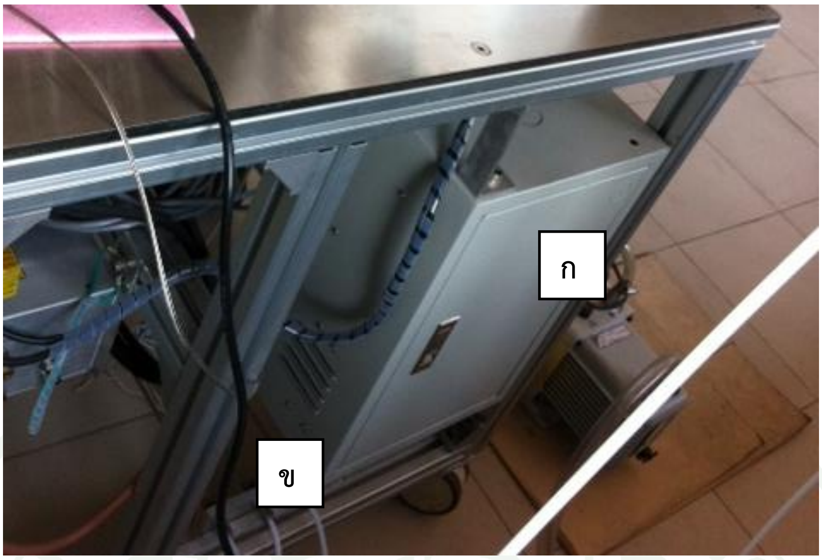
ส่วนประกอบเครื่องพลาสมาแบบความดันต่ำ

ภาพผนวกที่ ก1 ด้านหน้าของเครื่องพลาสมาแบบความดันต่ำ

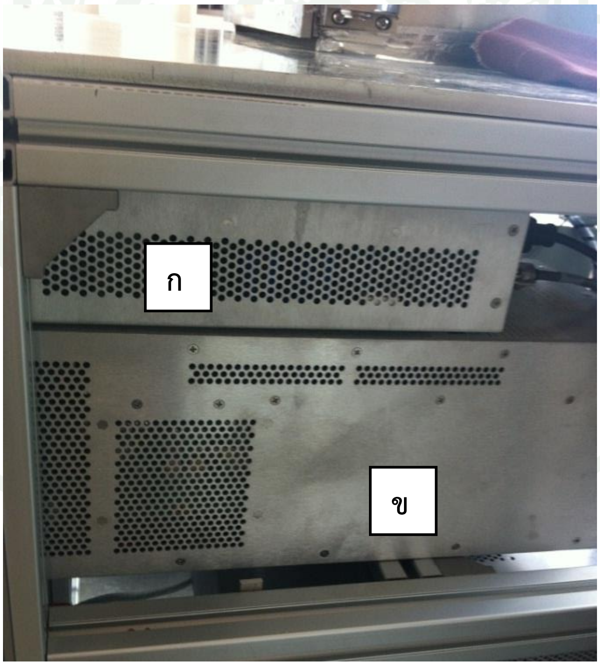


ภาพผนวกที่ ก2 แชมเบอร์ทรงสี่เหลี่ยม ด้านหน้าเป็นฝาซึ่งสามารถเปิดปิดในลักษณะบานพับได้

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพผนวกที่ ก3 ด้านหลังของเครื่องกำเนิดพลาสมาแบบความดันต่ำ ซึ่งประกอบด้วย (ก) ตู้จ่ายกระแสไฟฟ้าให้แก่เครื่องพลาสมา โดยรองรับแหล่งกำเนิดไฟฟ้าชนิด 220 VACและ (ข)มีท่อสำหรับแก๊ส เพื่อส่งเข้าแชมเบอร์ ซึ่งสามารถรองรับแก๊สได้สามชนิด



ภาพผนวกที่ ก4 แหล่งกำเนิดพลังงานชนิดพลาสมา ประกอบด้วย (ก) ตัวปรับสัญญาณแบบอัตโนมัติ และ(ข) แหล่งจ่ายไฟฟ้าแบบคลื่นความถี่วิทยุ

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิธีการใช้เครื่องพลาสมาแบบความดันต่ำ

1. เปิดสวิตซ์ควบคุมระบบ โดยกดที่ปุ่ม ON ด้านหน้าเครื่อง
2. ตรวจสอบให้เวน์วาล์วและระบบจ่ายแก๊สอยู่ในตำแหน่งปิดจนสุด
3. เปิดแชมเบอร์ นำชิ้นตัวอย่างใส่เข้าไปในแชมเบอร์ และเปิดฝาแชมเบอร์ให้แนบสนิท
4. เปิดปั๊มกลโรตารี (rotary pump)
5. เมื่อระบบทำความดันได้ต่ำกว่า 10^{-2} มิลลิบาร์ ทำการเปิดวาล์วแก๊ส เพื่อป้อนแก๊สที่ต้องการใช้ในการทำพลาสมา โดยหมุนไปทิศทวนเข็มนาฬิกา
6. เมื่อได้ความดันตามสภาวะที่ต้องการ ทำการเปิดแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบคลื่นความถี่วิทยุ และเปิดตัวปรับสัญญาณอัตโนมัติ พร้อมทั้งตั้งค่ากำลังไฟฟ้าที่ต้องการ โดยสามารถตั้งค่าได้สูงสุด 300 วัตต์ จากนั้นกดปุ่มจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบคลื่นความถี่วิทยุ เพื่อจ่ายกำลังไฟฟ้าไปยังตัวแผ่นรองรับชิ้นงาน โดยตำแหน่งตั้งค่าต่างๆ
7. หลังจากสิ้นสุดการใช้งานชุดกำเนิดพลังงานชนิดพลาสมาแล้ว ทำการปิดแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบคลื่นวิทยุ ปิดวาล์วแก๊ส เปิดเวนท์วาล์ว รอจนความดันในภาชนะสุญญากาศเท่ากับความดันภายนอก จึงทำการเปิดฝาภาชนะสุญญากาศพร้อมนำชิ้นงานออก

ตารางผนวกที่ ก1 อุณหภูมิที่เกิดขึ้นในระหว่างประยุกต์พลาสมา

สภาวะประยุกต์พลาสมา		**อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)**
กำลังคลื่นวิทยุ	**ระยะเวลาประยุกต์**	
200	5	88±2
	10	101±2
250	5	102±4
	10	114±10
300	5	114±6
	10	126±7

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ภาคผนวก ข

วิธีการทดสอบของกระดาษ

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

การทดสอบน้ำหนักมาตรฐานของกระดาษ

มาตรฐานการทดสอบ ดัดแปลงจาก ASTM D646-96

เครื่องมือ

1. เครื่องชั่งละเอียดทศนิยม 4 ตำแหน่ง
2. ตู้ควบคุมอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์
3. อุปกรณ์สำหรับตัดกระดาษ

วิธีการทดสอบ

1. ตัดกระดาษขนาด 6×16 เซนติเมตร จำนวน 10 แผ่น นำกระดาษไปเก็บไว้ในตู้ควบคุมอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ ที่สภาวะอุณหภูมิ 27±1 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 65±2 เป็นเวลา 24 ชั่วโมง (ISO 187)

2. ชั่งน้ำหนักตัวอย่างกระดาษครั้งละ 1 แผ่น รายงานค่าน้ำหนักมาตรฐานเฉลี่ยเป็นกรัมต่อตารางเมตร

การคำนวณ

$$\text{น้ำหนักมาตรฐาน (กรัม/ตร.ม.)} = \frac{\text{น้ำหนักของกระดาษ (กรัม)} \times 10{,}000}{\text{พื้นที่ของกระดาษ (ตร.ซม.)}}$$

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

การทดสอบความหนาของกระดาษ

มาตรฐานการทดสอบ ASTM D645-97

เครื่องมือ

1. ไมโครมิเตอร์ (Mitutoyo, Japan)
2. ตู้ควบคุมอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์
3. อุปกรณ์สำหรับตัดกระดาษ

วิธีการทดสอบ

1. ตัดกระดาษขนาด 30×150 มิลลิเมตร จำนวน 10 แผ่น นำกระดาษไปเก็บไว้ในตู้ควบคุมอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ ที่สภาวะอุณหภูมิ 27±1 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 65±2 เป็นเวลา 24 ชั่วโมง (ISO 187)
2. วัดความหนาด้วยไมโครมิเตอร์ แผ่นละ 5 จุด โดยให้ห่างจากขอบกระดาษอย่างน้อย 6 มิลลิเมตร รายงานค่าความหนาเฉลี่ยเป็นมิลลิเมตร

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

การทดสอบความชื้นในกระดาษ

มาตรฐานการทดสอบ ASTM D644-99

เครื่องมือ

1. เครื่องชั่งละเอียด ทศนิยม 4 ตำแหน่ง
2. ตู้อบลมร้อนแบบควบคุมอุณหภูมิ
3. ตู้อบลมร้อนแบบควบคุมอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์
4. ภาชนะอะลูมิเนียมพร้อมฝาปิด (moisture can)
5. เดซิเคเตอร์บรรจุสารดูดความชื้น

วิธีการทดสอบ

1. อบถ้วยอะลูมิเนียมในตู้อบที่อุณหภูมิ 105±2 องศาเซลเซียส เป็นเวลาหนึ่งชั่วโมง จากนั้นทิ้งให้เย็นในเดซิเคเตอร์เป็นเวลา 30 นาที แล้วนำไปชั่วน้ำหนักถ้วยพร้อมฝา
2. สุ่มตัวอย่างกระดาษเพื่อนำไปเก็บในตู้ควบคุมอุณหูมิและความชื้นสัมพัทธ์ที่สภาวะอุณหภูมิ 27±1 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 65±2 เป็นเวลา 24 ชั่วโมง
3. ตัดกระดาษให้มีขนาด 2×2 เซนติเมตร ใส่ลงไปในถ้วยอะลูมิเนียมให้แต่ละถ้วยมีน้ำหนักประมาณ 3 กรัม บันทึกเป็นค่าน้ำหนักก่อนอบ นำไปใส่ในตู้อบที่อุณหภูมิ 105±2 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง โดยในการอบมีการเปิดฝาอะลูมเนียมไว้เล็กน้อย
4. เมื่อครบเวลา ปิดฝาถ้วยอะลูมิเนียมแล้วนำมาใส่ในเดซิเคเตอร์เป็นเวลา 30 นาที เพื่อทิ้งให้เย็น จากนั้นนำไปอบอีกครั้งเป็นเวลา 1 ชั่วโมง ทำซ้ำจนกระทั่งน้ำหนักที่ชั่ง มีค่าแตกต่างกันไม่เกิน 0.0010 กรัม บันทึกเป็นน้ำหนักหลังอบ
5. ทำการทดสอบอย่างน้อย 5 ซ้ำต่อ 1 ตัวอย่าง รายงานผลเป็นค่าเฉลี่ยของความชื้นที่ได้เป็นหน่วยร้อยละ

การคำนวณ

$$\text{ปริมาณความชื้น (ร้อยละ)} = \frac{(\text{น้ำหนักของกระดาษก่อนอบ} - \text{น้ำหนักกระดาษหลังอบ}) \times 100}{\text{น้ำหนักกระดาษก่อนอบ}}$$

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

การทดสอบความต้านทานแรงดึงของกระดาษ

มาตรฐานการทดสอบ ดัดแปลง ISO 1924-2: 2008

เครื่องมือ

1. ตู้ควบคุมอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์
2. เครื่องทดสอบความต้านทานแรงดึงและการยืดตัว (Tensile tester, Instron 5965, USA)
3. อุปกรณ์สำหรับตัดกระดาษ

วิธีการทดสอบ

1. ตัดกระดาษขนาด 20×150 มิลลิเมตร ทั้งแนว MD และ CD โดยตัดตัวอย่างให้ขนานกับแนวทดสอบด้วยเครื่องตัดชิ้นทดสอบ 10 ชิ้นต่อแนว พร้อมทั้งวัดความหนา แล้วนำกระดาษไปเก็บไว้ในตู้ควบคุมอุณหภูมิ27±1 องศาเซลเซียสและความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 65±2 เป็นเวลา 24 ชั่วโมง
2. นำชิ้นทดสอบเข้าที่ยึดทั้งสองของเครื่องทดสอบ โดยให้ได้ความยาวระหว่างที่ยึดตัวอย่างเท่ากับ 10±1 มิลลิเมตร
3. ทำการทดสอบโดยตั้งความเร็วในการดึงเท่ากับ 20 มิลลิเมตรต่อนาที ใช้ load cell 5 กิโลนิวตัน
4. ทำ 10 ซ้ำต่อ 1 ตัวอย่างต่อ 1 แนวกระดาษ
5. อ่านค่าความต้านทานแรงดึง รายงานผลเป็นเมกะปาสคาล และค่าการยืดตัว ณ จุดขาด รายงานเป็นร้อยละ

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

การทดสอบการดูดซึมน้ำของกระดาษ

มาตรฐานการทดสอบ ดัดแปลง ASTM D3285-93

เครื่องมือ

1. ชุดทดสอบค่า Cobb test (เส้นผ่าศูนย์กลางวงแหวน 6 เซนติเมตร)
2. ลูกกลิ้งโลหะผิวเรียบ น้ำหนัก 10.0±0.5 กิโลกรัม
3. ตู้ควบคุมอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์
4. กระบวงตวงปริมาตรขนาด 50 มิลลิลิตร
5. เครื่องชั่งละเอียดทศนิยม 3 ตำแหน่ง
6. นาฬิกาจับเวลา
7. กระดาษทิชชู่อเนกประสงค์ ยี่ห้อ เซลล็อคซ์ (cellox towel)
8. น้ำกลั่น
9. อุปกรณ์สำหรับตัดกระดาษ

วิธีการทดสอบ

1. ตัดกระดาษขนาด 3×3 เซนติเมตร แล้วนำกระดาษไปเก็บไว้ในตู้ควบคุมอุณหภูมิ27±1 องศาเซลเซียสและความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 65±2 เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

2. ชั่งน้ำหนักกระดาษก่อนการทดสอบ จากนั้นนำกระดษวางบนชุดทดสอบค่า cobb test โดยวางกระดาษด้านที่ต้องการทดสอบไว้ด้านบน

3. เทน้ำกลั่น ปริมาตร 10 มิลลิลิตรลงไปในวงแหวนของชุดทดสอบ แล้วเริ่มจับเวลาทันที ระวังไม่ให้มีหยดน้ำหยดออกมานอกวงแหวน

4. เมื่อถึงวินาทีที่ 105 ให้เทน้ำออกจากวงแหวนอย่างรวดเร็ว โดยไม่ให้น้ำหยดออกมานอกพื้นที่วงแหวน นำกระดาษทดสอบวางลงบนกระดาษทิชชู่ โดยให้กระดาษด้านเปียกน้ำอยู่ด้านบน จากนั้นใช้กระดาษทิชชู่อีกแผ่นวางลงบนกระดาษทดสอบ จากนั้นใช้ลูกกลิ้งโลหะกลิ้งไปบนกระดาษทิชชู่ไปและกลับ แล้วนำกระดาษกระทดสอบไปชั่งน้ำหนักอีกครั้ง ทำการทดสอบทั้งหมด 10 ซ้ำ

การคำนวณ

$$\text{ค่าการดูดซึม (กรัม/ตร.ม.)} = \frac{(\text{น้ำหนักกระดาษหลังทดสอบ-น้ำหนักกระดาษก่อนทดสอบ}) \times 10{,}000}{5(\text{ตารางเซนติเมตร})}$$

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

การทดสอบค่ามุมสัมผัสน้ำของกระดาษ

มาตรฐานการทดสอบ ดัดแปลง ASTM D5946-04

เครื่องมือ

1. เครื่องวัดมุมสัมผัส
2. ตู้ควบคุมอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ (Contact angle Dataphysics, German)
3. นาฬิกาจับเวลา
4. น้ำกลั่น
5. อุปกรณ์สำหรับตัดกระดาษ

วิธีการทดสอบ

1. ตัดกระดาษขนาด 5×1 เซนติเมตร แล้วนำกระดาษไปเก็บไว้ในตู้ควบคุมอุณหภูมิ 27±1 องศาเซลเซียสและความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 65±2 เป็นเวลา 24 ชั่วโมง
2. วางกระดาษบนแท่นวางตัวอย่าง
3. หยดน้ำกลั่นปริมาตร 5 ไมโครลิตร ลงบนกระดาษ และเริ่มจับเวลา
4. ถ่ายภาพหยดน้ำบนผิวกระดาษทันที ทั้งหมด 10 ซ้ำ
5. ถ้าหากต้องการถ่ายภาพมุมสัมผัสแบบต่อเนื่อง ตั้งค่าเป็นโหมดการถ่ายภาพแบบต่อเนื่อง ให้ถ่ายภาพทุกๆ 12 เฟรมต่อนาที จับเวลา 30 นาที ทำซ้ำ 10 ซ้ำ
6. โปรแกรมจะทำการวัดมุมสัมผัส หน่วยเป็นองศส และบันทึกภาพถ่ายลงในคอมพิวเตอร์

การคำนวณค่างานการยึดติดของน้ำ (work of adhesion, W_a)

$W_a = \gamma_L (1+\cos\theta)$

เมื่อ W_a คือ งานของการยึดติด (work of adhesion)

θ คือ มุมสัมผัส (contact angle) ที่ได้จากการทดลอง

γ_{SL} คือ แรงตึงผิวของของเหลว (แรงตึงของน้ำ คือ 72.8 ดายน์ต่อเซนติเมตร)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

การทดสอบอัตราการซึมผ่านของไอน้ำ

มาตรฐานการทดสอบ ดัดแปลง T464 om-01

เครื่องมือ

1. ตู้ควบคุมอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์
2. ชุดทดสอบอัตราการซึมผ่านของไอน้ำ
3. ถ้วยทดสอบ
4. พาราฟิน
5. เครื่องชั่งน้ำหนักละเอียดทศนิยม 4 ตำแหน่ง
6. สารดูดความชื้น (silica gel)
7. อุปกรณ์สำหรับตัดกระดาษ

วิธีการทดสอบ

1. ตัดกระดาษให้พื้นที่ 0.28 ตารางเมตร ตามชุดทดสอบการซึมของไอน้ำ (เส้นผ่าศูนย์กลาง 6 เซนติเมตร) แล้วนำกระดาษไปเก็บไว้ในตู้ควบคุมอุณหภูมิ27±1 องศาเซลเซียสและความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 65±2 เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

2. ต้มพาราฟินให้เหลว

3. นำสารดูดความชื้นปริมาตร 20 มิลลิลิตร ลงในถ้วยทดสอบ

4. วางกระดาษบนถ้วยทดสอบ โดยวางให้กระดาษอยู่ตรงกลางของถ้วยทดสอบ นำตุ้มน้ำหนักวางทับเพื่อป้องกันไม่ให้กระดาษเคลื่อนที่

5. เทพาราฟินเหลวรอบๆของถ้วยทดสอบ ค่อยๆหมุนถ้วยทดสอบขณะเทพาราฟิน เพื่อให้พาราฟินกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอทั่วถ้วยทดสอบ

6. ทิ้งให้พาราฟินแห้ง จากนั้นนำลูกตุ้มออกนำตัวอย่างที่เตรียมเสร็จไปชั่งน้ำหนัก บันทึกเป็นน้ำหนักเริ่มต้น

7. เก็บตัวอย่างในตู้ควบคุมอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ ที่อุณหภูมิ37±1 องศาเซลเซียสและความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 80±2

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

8. นำตัวอย่างออกมาชั่งน้ำหนักและบันทึกน้ำหนักทุกวัน จนน้ำหนักสองครั้งสุดท้ายต่างไม่เกิน 0.0010 กรัม

9. ทดลอง 5 ซ้ำ

10.นำค่าน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงในแต่ละวันมาวาดกราฟ เพื่อหาความชันของกราฟ

การคำนวณ

$$\text{อัตราการซึมผ่านของไอน้ำ (กรัม/ตร.ม./วัน)} = \frac{\text{ความชันของกราฟ}}{\text{พื้นที่กระดาษ(ตร.ม.)}}$$

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

การทดสอบอัตราการซึมผ่านของแก๊สออกซิเจน
(oxygen transmission rate, OTR)

มาตรฐานการทดสอบ ดัดแปลงจาก ASTM D3985

เครื่องมือ

1. ตู้อบลมร้อนแบบควบคุมอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์
2. เครื่องวัดอัตราการซึมผ่านของแก๊สออกซิเจน
3. แผ่นอะลูมิเนียม
4. อุปกรณ์สำหรับตัดกระดาษและแผ่นอะลูมิเนียม

วิธีการทดสอบ

1. ตัดแผ่นอะลูมิเนียมให้เป็นวงกลมเท่ากับขนาดของแท่นที่ใส่ตัวอย่างภายในเครื่องวัดอัตราการซึมผ่านของแก๊สออกซิเจน และเจาะรูตรงกลางแผ่นอะลูมิเนียมเป็นวงกลม ที่มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 5 เซนติเมตร สำหรับนำกระดาษมาติดใส่แผ่นอะลูมีเนียม
2. ตัดกระดาษให้มีพื้นที่ 26 ตารางเซนติเมตร นำตัวอย่างกระดาษเพื่อนำไปเก็บในตู้ควบคุมอุณหูมิและความชื้นสัมพัทธ์ที่สภาวะอุณหภูมิ 27±1 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 65±2 เป็นเวลา 24 ชั่วโมง
3. ทา sealant บางๆบริเวณขอบของแผ่นอะลูมิเนียมที่ตัดเป็นวงกลม แล้วนำไปติดที่แท่นใส่ตัวอย่าง เพื่อทดสอบวัดอัตราการซึมผ่านของแก๊สออกซิเจน
4. ทดสอบทั้งหมด 5 ซ้ำ

การคำนวณ

$$\text{อัตราการซึมผ่านของแก๊สออกซิเจน (ลบ.ซม./ตร.ม./วัน)} = \frac{\text{ค่าที่ได้จากเครื่องทดสอบ}}{\text{พื้นที่กระดาษ (ตร.ม.)}}$$

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

การทดสอบค่าสีของกระดาษ (L*a*b*)

เครื่องมือ

1. เครื่องวัดสี
2. ตู้ควบคุมอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์
3. อุปกรณ์สำหรับตัดกระดาษ

วิธีการทดสอบ

1. ตัดกระดาษขนาด 6×6 เซนติเมตร นำไปเก็บไว้ในตู้ควบคุมอุณหภูมิ27±1 องศาเซลเซียส และความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 65±2 เป็นเวลา 24 ชั่วโมง
2. Calibrate เครื่องวัดสี
3. นำหัววางบนตัวอย่างกระดาษ สังเกตไม่ให้บริเวณใดของหัววัดเลยออกไปนอกพื้นที่กระดาษ
4. บันทึกค่าสี L*a*b* ทีได้
5. ทดสอบทั้งหมด 10 ซ้ำ

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ภาคผนวก ค

วิธีการขึ้นรูปและการทดสอบของพอลิเมอร์ชีวภาพ

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

การขึ้นรูปของพอลิเมอร์ชีวภาพ

อุปกรณ์

1. **วัตถุดิบและสารเคมี**

1.1 สตาร์ชมันสำปะหลัง (cassava starch, CS) (Dragon Fish brand, Tong Chan Registered Ordinary Partnership, Thailand)

1.2 พอลิบิวทิลีนอะดิเพททโคเทเรฟทาเลท (poly(butylene adipate-co-terephthalate, PBAT), Ecoflex® F Blend C1200, BASF Corporation, United States of America)

1.3 กลีเซอรอล (glycerol) (commercial grade, Siam Chemicals Solutions, Thailand).

1.4 แมกนีเซียมไนเตรต ($Mg(NO_3)_2$) (Ajax Finechem, Ajax Finechem Ltd., New Zealand)

1.5 น้ำกลั่น

2. **อุปกรณ์และเครื่องมือ**

2.1 เครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ (Twin-screw extruder) (LTE-20-40, Labtech Engineering, Labtech Engineering, Thailand)

2.2 เครื่องรีดฟิล์มและชีท (cast film and sheet attachment) (LBCR 150, Labtech Engineering, Thailand)

2.3 เครื่องผสม (all-purpose planetary mixer) (20-L mixer, Mitsubishi, Japan)

2.4 เครื่องตัดเม็ด (pelletizer) (LZ-120, Labtech Engineering, Thailand)

2.5 เครื่องป้อนแบบสกรูคู่ (Twin screw feeder) (LSF 20-10 side feeders, Labtech Engineering, Thailand)

2.7 เครื่องชั่งสาร (analytical balance 2 ตำแหน่ง) (TP 4000, OHAUS Corporation, United States of America)

2.10 ตู้อบลมร้อน (hot air oven) (Binder FD 53, Scientific promotion Co., Ltd., United States of America)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิธีการ

1. การเตรียมเส้นและเม็ดเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช และวัสดุผสมผสมเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช/พอลิบิวทิลีนอะดิเพทโคเทเรฟทาเลท โดยกระบวนการเอ็กซ์ทรูชัน

ผสมสตาร์ชมันสำปะหลัง และพลาสติไซเซอร์ (น้ำ และกลีเซอรอล ด้วยเครื่องผสม (20-L mixer, Mitsubishi, Japan) ที่ระดับความเร็ว 2 เป็นเวลา 20 นาที โดยคงที่ปริมาณกลีเซอรอลเท่ากับ 35 phr จากนั้นนำส่วนผสมที่ได้ไปขึ้นรูปเป็นเส้นโดยกระบวนการเอ็กซ์ทรูชัน ด้วยเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ (LTE-20-40, Labtech scientific twin-screw extruder, Labtech Engineering Co., Ltd., Thailand) ที่มีความยาวของสกรูต่อเส้นผ่านศูนย์กลางของสกรู (L/D) เท่ากับ 40 ต่อ 1 และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของสกรู เท่ากับ 20 มิลลิเมตร และขนาดศูนย์กลางของหัวดายเท่ากับ 3 มิลลิเมตร โดยสกรูหมุนในทิศทางเดียวกันแบบสกรูขบกันสมบูรณ์ (fully intermeshing co-rotating twin-screw extruder) อัตราการป้อนของแข็ง (feed rate) เท่ากับ 30 รอบต่อนาที อุณหภูมิจากโซนป้อน (hopper) ถึงหัวดายอยู่ในช่วง 85 ถึง 140 องศาเซลเซียส และความเร็วรอบของสกรูเท่ากับ 200 รอบต่อนาที เส้นที่ได้จากกระบวนการเอ็กซ์ทรูชันถูกตัดเป็นเม็ดที่มีความยาว 2.32 มิลลิเมตร ด้วยเครื่องตัดเม็ด (LZ-120, Labtech scientific pelletizer, Labtech Engineering Co., Ltd., Thailand) ที่ความเร็วรอบเท่ากับ 30 เมตรต่อนาที จากนั้นนำไปอบแห้งในตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส และเก็บไว้ในภาชนะปิดที่มีการบรรจุซิลิกาเจลที่อุณหภูมิห้องเพื่อรอการทดสอบต่อไป

2. การเตรียมชีทเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช/พอลิบิวทิลีนอะดิเพทโคเทเรฟทาเลท

ผสมเม็ดเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช (TPS) ที่เตรียมได้จากข้อ 1 และเม็ดพอลิบิวทิลีนอะดิเพทโคเทเรฟทาเลท (PBAT) ที่ผ่านการอบในตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ในอัตราส่วนโดยน้ำหนัก TPS ต่อ PBAT เท่ากับ 60:40 จากนั้นนำส่วนผสมไปขึ้นรูปเป็นชีทพอลิเมอร์ผสม TPS/PBAT โดยเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ซึ่งมีหัวดายแบบชีทต่อกับเครื่องรีดฟิล์มและชีท ซึ่งมีลูกกลิ้ง 9 ลูกวางเรียงกันเพื่อใช้ในการขึ้นรูปชีทพอลิเมอร์ผสม โดยสภาวะของกระบวนการเอ็กทรูชันมีดังนี้ อัตราการป้อนส่วนประกอบที่เป็นของแข็งอยู่ในช่วง 10-12 รอบต่อนาที อุณหภูมิจากโซนป้อนของแข็งถึงหัวดายอยู่ในช่วง 90-195 องศาเซลเซียส ความเร็วรอบของสกรูอยู่ในช่วง 170 รอบต่อนาที ความเร็วของลูกกลิ้งลูกที่ 1 (casting roll) 0.9 เมตรต่อนาที และความเร็วของลูกกลิ้งลูกที่ 2

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เท่ากับ 1.1 เมตรต่อนาที อุณหภูมิลูกกลิ้งเท่ากับ 60 องศาเซลเซียส โดยชีทที่เตรียมได้มีความหนาอยู่ในช่วง 0.4-0.5 มิลลิเมตรและเก็บไว้ภาชนะปิดเพื่อรอการทดสอบต่อไป

3. **การทดสอบของพอลิเมอร์ชีวภาพ**

3.1 การหาปริมาณการดูดซับน้ำ (water absorption) ของวัสดุผสมเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช/พอลิบิวทิลีนอะดิเพททโคเทเรฟทาเลท

ตัดตัวอย่างชีทขนาด 30 × 30 มิลลิเมตร นำไปอบในตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นรอให้เย็นในเดซิเตอร์ และชั่งน้ำหนักหลังอบ (น้ำหนักเริ่มต้น) และนำตัวอย่างไปเก็บไว้ในภาชนะปิดที่บรรจุ สารละลายอิ่มตัวของแมกนีเซียมไนเตรท (ความชื้นสัมพัทธ์ 52 % RH) ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส นำตัวอย่างใส่ในน้ำกลั่น 10 มิลลิลิตร จับเวลา 3 นาที นำชีทมาชั่งน้ำหนัก โดยทำการทดลองตัวอย่างละ 10 ซ้ำ (ดัดแปลงจาก Andrade et al., 2005)

3.2 การวิเคราะห์ปริมาณความชื้น โดย method 44-15A (AACC, 2000)

อบถ้วยอลูมิเนียมสำหรับหาปริมาณความชื้น (moisture can) พร้อมฝาปิดในตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง จากนั้นรอให้เย็นในเดซิเคเตอร์ และชั่งน้ำหนักชั่งตัวอย่างปริมาณ 2-3 กรัม (ทศนิยม 4 ตำแหน่ง) ใส่ในถ้วยอลูมิเนียมที่ทราบน้ำหนักที่แน่นอน จากนั้นนำไปอบในตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 130 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง รอให้เย็นในเดซิเคเตอร์ และชั่งน้ำหนัก และอบซ้ำอีกนานครั้งละ 1 ชั่วโมง จนได้น้ำหนักคงที่

คำนวณหาปริมาณความชื้นในตัวอย่างจากสมการด้านล่าง โดยทำการทดลองตัวอย่างละ 5 ซ้ำ

$$\text{ปริมาณความชื้นในตัวอย่าง (ร้อยละ)} = \frac{\text{น้ำหนักแห้ง (กรัม)} - \text{น้ำหนักเริ่มต้น (กรัม)}}{\text{น้ำหนักเริ่มต้น (กรัม)}} \times 100$$

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

3.3 การทดสอบสมบัติเชิงกลการต้านแรงดึง

การทดสอบสมบัติเชิงกลในโหมดแรงดึง อ้างอิงตามวิธีมาตรฐาน ASTM D638 โดยเตรียมตัวอย่างชีทวัสดุผสม TPS/PBAT ให้มีความกว้าง 20 มิลลิเมตร และความยาว 100 มิลลิเมตร จากนั้นนำมาปรับสภาวะในภาชนะปิดที่สภาวะความชื้นสัมพัทธ์ 52 เปอร์เซ็นต์ ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส เป็นเวลาอย่างน้อย 48 ชั่วโมง จากนั้นนำมาทดสอบโดยใช้เครื่องทดสอบสมบัติเชิงกล (Tensile tester, Instron 5965, United States of America) โดยสภาวะที่ใช้ในการทดสอบเป็นดังนี้ ความเร็วในการในเคลื่อนที่ของคานทดสอบ (crosshead speed) เท่ากับ 100 มิลลิเมตรต่อนาที ขนาดโหลดเซลล์ (load cell) เท่ากับ 50 กิโลนิวตัน และระยะห่างระหว่างตัวจับ (grip separation distance) เท่ากับ 50 มิลลิเมตรโดยทำการทดลองตัวอย่างละ 10 ซ้ำ

3.4 การตรวจสอบอัตราการซึมผ่านของไอน้ำ

ตรวจสอบอัตราการซึมผ่านของไอน้ำ ด้วยวิธี Desiccant Method อ้างอิงตามวิธีมาตรฐาน ASTM E96 โดยนำตัวอย่างชีทวัสดุผสม TPS/PBAT มาตัดให้มีรูปร่างวงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3.5 เซนติเมตร ใส่ซิลิกาเจล (silica gel) ประมาณ 20 มิลลิลิตร ในถ้วยทดสอบ หลังจากนั้นวางชีทที่เตรียมได้ลงบนถ้วย และเทพาราฟินรอบๆ ขอบถ้วยเพื่อยึดถ้วยชีทกับถ้วยและไม่ให้อากาศผ่านเข้าออกได้ นำถ้วยทดสอบที่ได้ไปชั่งน้ำหนักเริ่มต้นและเก็บถ้วยทดสอบในตู้ควบคุมสภาวะที่มีความชื้นสัมพัทธ์เท่ากับ 80 เปอร์เซ็นต์ และอุณหภูมิเท่ากับ 30 องศาเซลเซียส บันทึกน้ำหนักของถ้วยทดสอบ จนได้น้ำหนักคงที่ จากนั้นพล็อตกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงไป

3.4 การตรวจสอบมุมสัมผัสที่พื้นผิว (Contact angle analysis)

นำตัวอย่างชีทวัสดุผสม TPS/PBAT ตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยมขนาดกว้างเท่ากับ 10 มิลลิเมตร และยาว 50 มิลลิเมตร จากนั้นนำไปตรวจด้วยเครื่องวิเคราะห์มุมสัมผัสบนพื้นผิว (Contact angle measuring instrument) (OCA 20, Dataphysis Instrument, Germany) ในรูปแบบที่มุมสัมผัสแบบต่อเนื่อง(dynamic contact angle) และรูปแบบที่มุมสัมผัสแบบสถิตย์ (static contact angle) โดยใช้น้ำกลั่นปริมาตร 5 ไมโครลิตรต่อหยดในการวัดมุมสัมผัสที่พื้นผิว และทำการทดลองตัวอย่างละ 10 ซ้ำ

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ภาคผนวก ง

ค่าทดสอบมุมสัมผัสแบบจับเวลาของกระดาษประยุกต์พลาสมาและพอลิเมอร์ชีวภาพ

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ง1 มุมสัมผัสของหยดน้ำเมื่อเวลาผ่านไปของกระดาษประยุกต์พลาสมา

สภาวะการประยุกต์พลาสมา		**มุมสัมผัส (องศา)**						
กำลังคลื่นวิทยุ (วัตต์)	**ระยะเวลา (นาที)**	นาทีที่ 0	นาทีที่ 1	นาทีที่ 2	นาทีที่ 3	นาทีที่ 4	นาทีที่ 5	นาทีที่ 6
ก่อนประยุกต์พลาสมา		38.08±4.08^{a}	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
200	5	67.56±8.04^{b}	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
	10	102.38±5.21^{d}	53.22±8.09^{a}	37.27±8.51^{a}	n/a	n/a	n/a	n/a
250	5	92.26±6.86^{c}	23.09±4.16^{a}	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
	10	106.34±4.06^{d}	82.90±5.46^{b}	79.88±5.76^{b}	77.86±5.79^{a}	76.10±5.90^{a}	74.54±6.00^{a}	73.09±6.00^{a}
300	5	105.45±8.65^{d}	87.88±10.30^{b}	85.70±11.10^{b}	83.61±11.30^{a}	82.16±11.52^{a}	81.14±11.68^{a}	80.07±11.8^{a}
	10	124.90±6.79^{e}	118.26±8.41^{c}	117.30±8.55^{c}	116.20±8.20^{b}	115.41±8.16^{b}	114.75±8.14^{b}	114.04±8.15^{b}

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ง1 (ต่อ)

สภาวะการประยุกต์พลาสมา		มุมสัมผัส (องศา)					
กำลังคลื่นวิทยุ (วัตต์)	**ระยะเวลา (นาที)**	นาทีที่ 7	นาทีที่ 8	นาทีที่ 9	นาทีที่ 10	นาทีที่ 20	นาทีที่ 30
ก่อนประยุกต์พลาสมา		n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
200	5	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
	10	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
250	5	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
	10	71.82±6.00[a]	70.54±6.00[a]	69.16±6.00[a]	67.89±6.02[a]	52.42±6.76[a]	36.53±7.60[a]
300	5	79.18±11.88[a]	78.10±12.00[a]	77.21±12.00[a]	76.22±12.25[a]	65.11±14.34[b]	50.07±20.13[b]
	10	113.50±8.15[b]	112.92±8.19[b]	112.29±8.21[b]	111.75±8.27[b]	105.33±9.05[c]	98.18±9.95[c]

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ง2 มุมสัมผัสของหยดน้ำเมื่อเวลาผ่านไปของพอลิเมอร์ชีวภาพประยุกต์พลาสมา

สภาวะการประยุกต์พลาสมา		มุมสัมผัส (องศา)						
กำลังคลื่นวิทยุ (วัตต์)	ระยะเวลา (นาที)	นาทีที่ 0	นาทีที่ 1	นาทีที่ 2	นาทีที่ 3	นาทีที่ 4	นาทีที่ 5	นาทีที่ 6
ก่อนประยุกต์พลาสมา		57.61±4.78^{a}	38.10±3.55^{a}	34.40±3.36^{a}	33.82±2.80^{a}	31.68±1.75^{a}	30.75±2.60^{a}	29.23±3.00^{a}
200	5	62.25±3.08^{a}	48.54±6.58^{ab}	48.41±5.44^{b}	47.04±5.48^{ab}	45.33±5.82^{b}	42.33±1.12^{ab}	40.93±1.31^{ab}
	10	68.71±5.04^{ab}	66.90±5.30^{bc}	65.84±5.22^{c}	64.55±4.85^{b}	63.53±4.78^{c}	62.64±4.80^{d}	61.81±4.85^{d}
250	5	70.39±3.72^{ab}	56.98±0.18^{bc}	53.93±1.61^{bc}	51.79±0.06^{ab}	49.86±1.23^{bc}	47.96±2.46^{bc}	47.12±2.39^{bc}
	10	65.79±2.05^{ab}	52.85±7.13^{bc}	49.68±8.30^{bc}	48.13±7.75^{ab}	47.22±8.86^{b}	46.18±8.99^{b}	44.21±9.56^{b}
300	5	65.56±10.72^{bc}	59.00±9.55^{bcd}	56.70±10.81^{bc}	54.90±10.78^{b}	54.20±11.69^{bc}	53.70±10.90^{bcd}	52.70±11.30^{bcd}
	10	80.17±13.07^{c}	67.01±16.28^{d}	62.65±20.09^{c}	61.36±20.39^{b}	60.55±20.09^{c}	58.47±19.41^{cd}	57.08±19.77^{dc}

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ง2 (ต่อ)

สภาวะการประยุกต์พลาสมา		มุมสัมผัส (องศา)				
กำลังคลื่นวิทยุ (วัตต์)	ระยะเวลา (นาที)	นาทีที่ 7	นาทีที่ 8	นาทีที่ 9	นาทีที่ 10	นาทีที่ 20
ก่อนประยุกต์พลาสมา		27.04±2.01^{a}	26.37±4.36^{a}	24.37±4.22^{a}	22.96±4.08^{a}	n/a
200	5	40.11±1.29^{b}	39.13±1.35^{ab}	38.01±1.64^{ab}	37.42±1.45^{ab}	29.15±2.55^{a}
	10	60.98±4.86^{d}	60.14±4.89^{bc}	59.32±4.92^{bc}	58.41±4.95^{bc}	47.61±6.86^{ab}
250	5	45.86±2.84^{bc}	44.87±2.71^{b}	43.42±3.49^{bc}	41.91±4.20^{bc}	33.70±2.12^{a}
	10	43.55±9.47^{bc}	42.88±9.39^{b}	41.98±8.46^{bc}	41.51±8.89^{bc}	33.40±6.11^{ab}
300	5	51.29±12.24^{bcd}	50.93±11.92^{bc}	49.62±11.92^{bc}	47.06±11.77^{bc}	34.65±5.39^{ab}
	10	55.91±20.09^{cd}	53.43±21.47^{c}	52.68±22.77^{d}	51.91±23.01^{c}	36.60±22.34^{b}

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ประวัติการศึกษาและการทำงาน

ชื่อ-นามสกุล นางสาวสมาภรณ์ โรจน์ทองคำ

วัน เดือน ปี ที่เกิด วันที่ 3 พฤศจิกายน 2532

สถานที่เกิด นนทบุรี

ประวัติการศึกษา ปริญญาตรี ภาควิชาเทคโนโลยีการบรรจุและวัสดุ คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตำแหน่งหน้าที่การงานปัจจุบัน -

สถานที่ทำงานปัจจุบัน -

ผลงานดีเด่นและรางวัลทางวิชาการ ***Rojthongkam, S.***, J. Tunyarut and S. Amporn. 2014. Effect of C_3F_6 Plasma Treatment on Water Resistance of Recycled Paper. In Proceedings of the 16th Food Innovation Asia Conference 2014. 12 -13 June 2014, Bitec Bangna, Bangkok, Thailand.

ทุนการศึกษาที่ได้รับ ทุนศูนย์วิทยาการขั้นสูงเพื่อเกษตรและอาหาร

ทุนผู้ช่วยสอนจากบัณฑิตวิทยาลัย ประจำปีการศึกษา 2556

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์