



ใบรับรองวิทยานิพนธ์
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต (เทคโนโลยีการบรรจุ)

ปริญญา

เทคโนโลยีการบรรจุ

เทคโนโลยีการบรรจุและวัสดุ

สาขา

ภาควิชา

เรื่อง อิทธิพลของเทคนิคอิเล็กโตรสเปรย์ด้วยพอลิแลคติกแอซิดต่อสมบัติของกระดาษแข็ง

Influence of Poly (lactic acid) Electrospraying Technique on Properties of Paperboard

นามผู้วิจัย นางสาวทิตา อาชวิบูลย์กุล

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์รัชฎาภรณ์ จิฎกานนท์, Ph.D.)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(อาจารย์อำพร เสน่ห์, Ph.D.)

หัวหน้าภาควิชา

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์รัชฎาภรณ์ จิฎกานนท์, Ph.D.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์กัญญา วีระกุล, D.Agr.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ เดือน พ.ศ.

สิงสิงห์ มทวีสายเกษตรศาสตร์

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

อิทธิพลของเทคนิคอิเล็กโตรสเปรย์ด้วยพอลิแลคติกแอซิดต่อสมบัติของกระดาษแข็ง

Influence of Poly(lactic acid) Electro spraying Technique on Properties of Paperboard

โดย

นางสาวทิตา อาชวีบูลโยบล

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (เทคโนโลยีการบรรจุ)

พ.ศ. 2555

ทิตา อาชวีบูลโยบล 2555: อิทธิพลของเทคนิคอิเล็กทรอนิกส์ด้วยพอลิแลคติกแอซิดต่อสมบัติ
ของกระดาษแข็ง ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (เทคโนโลยีการบรรจุ) สาขาเทคโนโลยีการบรรจุ
ภาควิชาเทคโนโลยีการบรรจุและวัสดุ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก:
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ธัญญารัตน์ จิฎกานูจน์, Ph.D. 172 หน้า

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์หลักเพื่อเพิ่มความสามารถในการต้านทานน้ำและน้ำมันในกระดาษแข็ง เพื่อใช้
งานทางการบรรจุ โดยเทคนิคอิเล็กทรอนิกส์ด้วยสารละลายพอลิแลคติกแอซิด และสารละลายผสมระหว่างพอลิ
แลคติกแอซิดและพอลิবিທີลีนอะดิเพท-โค-เทรฟทาเลท ซึ่งสารเคลือบทั้งสองประเภทเป็นพอลิเมอร์ชีวภาพที่ไม่
กระทบต่อการย่อยสลายของกระดาษ กระดาษแข็งที่เลือกศึกษาคือดูเพล็กซ์บอร์ด น้ำหนักมาตรฐาน 300 กรัมต่อ
ตารางเมตร สมบัติของกระดาษที่ศึกษาประกอบด้วย สมบัติการต้านทานน้ำและน้ำมัน สมบัติเชิงกล สมบัติการกีด
ขวางของไอน้ำและก๊าซออกซิเจน รวมทั้งลักษณะผิวหน้าของกระดาษภายหลังการเคลือบ งานวิจัยประกอบด้วย 3
ส่วนหลักคือ การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการทำอิเล็กทรอนิกส์ การศึกษาอิทธิพลของระดับความเข้มข้นของ
สารละลายพอลิแลคติกแอซิดต่อสมบัติของกระดาษ และงานวิจัยในส่วนสุดท้ายคือการศึกษาอิทธิพลของสัดส่วน
สารละลายผสมระหว่างพอลิแลคติกแอซิดและพอลิবিທີลีนอะดิเพท-โค-เทรฟทาเลทต่อสมบัติของกระดาษ
สภาวะอิเล็กทรอนิกส์ที่ศึกษาประกอบด้วยค่าศักย์ไฟฟ้าสูงกระแสตรงที่ 6, 7, 8 และ 9 กิโลโวลต์ อัตราการไหล
ของสารละลายที่ 3, 4 และ 5 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง และระยะทางระหว่างปลายเข็มถึงแผ่นรองรับอนุภาคที่ 10 และ
20 เซนติเมตร ผลการศึกษาพบว่าสภาวะอิเล็กทรอนิกส์ที่เหมาะสมคือค่าศักย์ไฟฟ้าสูงกระแสตรงที่ 8 กิโลโวลต์
อัตราการไหลที่ 4 มิลลิลิตรต่อชั่วโมงและระยะทางระหว่างปลายเข็มถึงแผ่นรองรับอนุภาคที่ 20 เซนติเมตร
สำหรับการศึกษาในส่วนที่สองพบว่าความเข้มข้นของสารละลายพอลิแลคติกแอซิดที่เหมาะสมที่สุดในการ
ปรับปรุงสมบัติของกระดาษคือที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 1 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ซึ่งสามารถเพิ่มความสมบัติ
ในการต้านทานน้ำและน้ำมันและสมบัติการกีดขวางของไอน้ำและก๊าซออกซิเจนในกระดาษเคลือบได้อย่างมี
นัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) โดยไม่มีผลต่อสมบัติเชิงกล สำหรับการศึกษาในส่วนสุดท้าย ซึ่งกำหนดอัตราส่วนการผสม
พอลิแลคติกแอซิดต่อพอลิবিທີลีนอะดิเพท-โค-เทรฟทาเลทที่ 100:0, 80:20, 50:50, 20:80 และ 0:100 และกำหนด
ระดับความเข้มข้นของสารละลายผสมร้อยละ 1 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ผลการทดลองพบว่าการผสมพอลิবিທີ
ลีนอะดิเพท-โค-เทรฟทาเลทลงในสารละลายพอลิแลคติกแอซิดไม่ทำให้สมบัติการต้านทานน้ำและน้ำมันของ
กระดาษเปลี่ยนแปลงแต่สามารถเพิ่มสมบัติเชิงกลได้อย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) อันเนื่องจากการเสริมแรงของ
เส้นใยจากพอลิবিທີลีนอะดิเพท-โค-เทรฟทาเลท นอกจากนี้สารเคลือบผสมยังสามารถปรับปรุงสมบัติการกีด
ขวางการแพร่ผ่านของไอน้ำและก๊าซออกซิเจนอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) เนื่องจากความเป็นรูพรุนของอนุภาค
จากสารละลายผสมลดลง

Tita Archaviboonyobul 2012: Influence of Poly(lactic acid) Electro spraying Technique on Properties of Paperboard. Master of Science (Packaging Technology), Major Field: Packaging Technology, Department of Packaging and Materials Technology.
Thesis Advisor: Assistant Professor Tunyarut Jinkarn, Ph.D. 172 pages.

The main objective of this research was to improve water and oil resistance properties of paperboard for packaging application by electro spraying technique using poly (lactic acid), PLA, solution and mixture of poly (lactic acid) and poly (butylene adipate-co-terephthalate), PBAT, solution. These two selected coating substances are biodegradable polymers which will not obstruct the biodegradation process of paperboard. Paperboard used for the research was a 300 g/m² single-side coated duplex board. Properties of paperboard that were investigated composed of water and oil resistance properties, mechanical properties and barrier properties to water vapor and oxygen (WVTR and OTR). Surface of coated paperboard was also characterized. The study composed of three sections. First section was to find optimum electro spraying conditions. Four conditions to be studied included high voltage power at 6, 7, 8 and 9 kV, flow rate at 3, 4 and 5 ml/hr and distance between needle to paperboard at 10 and 20 cm. PLA concentration were set at 0.5, 1, 2, 3 and 4 % (w/v). The solution volume was fixed at 10 ml for this section and throughout all electro spraying trails. The second section of the study was to monitor the effects of PLA solution concentration on properties of coated paperboard using optimum condition from first section. Finally, last section of the research was to investigate the effects of adding PBAT into PLA spraying solution on properties of paperboard. According to the results, optimum condition for electro spraying was at high voltage power of 8 kV, flow rate of 4 ml/hr and distance between needle and paperboard at 20 cm. According to the second section of the study, PLA concentration at 1% (w/v) showed the best result. Water and oil resistance as well as barrier properties were significantly improved ($p \leq 0.05$) without any deterioration on mechanical properties. For the last part of the research, mixture ratio of PLA and PBAT solution were set at 100:0, 80:20, 50:50, 20:80 and 0:100. The total solid content of the mixture for each treatment was set constant at 0.1 g in 10 ml chloroform solution. The results showed that adding of PBAT into PLA spraying solution caused no changes in water and oil resistance properties but can significantly increase mechanical and barrier properties of coated paperboard ($p \leq 0.05$). This is because short fiber of PBAT derived from electro spraying can reinforce the paperboard structure. In addition, electro spraying particles derived from mixture of PLA and PBAT also showed less porous structure and this might contribute to less gas and water vapor transmission.

Student's signature

Thesis Advisor's signature

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ รัชฎาภรณ์ จิฎกานัญณ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก ที่ให้คำแนะนำและเป็นที่ปรึกษาในทุกๆ เรื่อง ตลอดจนสนับสนุนทุนวิจัย ขอกราบขอบพระคุณอาจารย์อำพร เสน่ห์ อาจารย์ที่ปรึกษา วิทยานิพนธ์ร่วม สำหรับคำแนะนำและกราบขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ เลอพงศ์ จารุพันธ์ ประธานสอบวิทยานิพนธ์ และอาจารย์สุพจน์ ประทีปถิ่นทอง ผู้ทรงคุณวุฒิจากภายนอก มหาวิทยาลัย ที่กรุณาตรวจทานแก้ไขและให้คำแนะนำเพิ่มเติมจนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เสร็จสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณศูนย์วิทยาการขั้นสูงด้านนาโนเทคโนโลยีเพื่ออุตสาหกรรมเคมี อาหาร และการเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการสนับสนุนทุนวิจัย

ขอขอบพระคุณบริษัท กระดาษสหไทย จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์กระดาษแข็งสำหรับใช้ในการวิจัย และขอบพระคุณภาควิชาเทคโนโลยีการบรรจุและวัสดุ คณะอุตสาหกรรมเกษตร และภาควิชาวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ และสถาบันวิจัยและพัฒนาแห่ง มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ สำหรับความอนุเคราะห์สถานที่ และเครื่องมือต่างๆ ที่ใช้ในงานวิจัยนี้

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ภาควิชาเทคโนโลยีการบรรจุและวัสดุทุกท่านที่ให้ความเมตตา กรุณาอบรมสั่งสอนและให้ความรู้ตลอดการศึกษา รวมทั้งเจ้าหน้าที่ภาควิชาเทคโนโลยีการบรรจุ และวัสดุทุกท่าน สำหรับคำแนะนำและการอำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องมือสำหรับทดสอบ ขอขอบพระคุณเจ้าหน้าที่ทุกท่าน สำหรับน้ำใจอันดีงามและความช่วยเหลือในทุกๆ ด้านและขอบคุณเพื่อนๆ ภาควิชาเทคโนโลยีการบรรจุและวัสดุที่มีน้ำใจให้กันเสมอมา

ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อสมเจตน์และคุณแม่อรทิพย์ อาชวิบูลโยบล ที่คอยให้ กำลังใจ ความเข้าใจและห่วงใยอยู่เสมอ ทั้งหมดนี้เป็นแรงผลักดันช่วยให้ข้าพเจ้ามีกำลังใจในการทำงานวิจัยจนสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

จิตา อาชวิบูลโยบล

พฤษภาคม 2555

สารบัญ

หน้า

สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(4)
คำย่อ	(7)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	4
การตรวจเอกสาร	5
อุปกรณ์และวิธีการ	50
อุปกรณ์	50
วิธีการ	51
ผลและวิจารณ์	58
สรุปและข้อเสนอแนะ	102
สรุป	102
ข้อเสนอแนะ	105
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	106
ภาคผนวก	118
ภาคผนวก ก วิธีการทดสอบ	119
ภาคผนวก ข ระบบการทำงานของเครื่องอิเล็กทรอนิกส์	132
ภาคผนวก ค ลักษณะการกระจายตัวของสารละลายพอลิแลคติกแอซิด ภายใต้สภาวะอิเล็กทรอนิกส์	136
ภาคผนวก ง ค่าทดสอบมุมสัมผัสแบบต่อเนื่อง (dynamic contact angle) ของกระดาษที่ผ่านการอิเล็กทรอนิกส์	159
ประวัติการศึกษา และการทำงาน	172

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	น้ำหนักของพอลิแลคติกแอซิดและพอลิบิวทิลีนอะดิเพท-โค-เทรฟทาเลทตามอัตราส่วนการผสมที่ 100:0, 80:20, 50:50, 20:80 และ 0:100	53
2	สมบัติของกระดาษก่อนผ่านการอิเล็กโทรสเปรย์ด้วยสารละลายพอลิแลคติกแอซิด	58
3	ลักษณะการกระจายตัวของสารละลายพอลิแลคติกแอซิดภายใต้สภาวะอิเล็กโทรสเปรย์	61
4	สภาวะอิเล็กโทรสเปรย์ที่เหมาะสมต่อการเกิดอนุภาคพอลิแลคติกแอซิดที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 0.5, 1, 2, 3 และ 4 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร	64
5	น้ำหนักมาตรฐาน ความหนาและปริมาณความชื้นของกระดาษที่ผ่านการอิเล็กโทรสเปรย์ด้วยสารละลายพอลิแลคติกแอซิด	66
6	ความต้านทานแรงกดวงแหวนและความต้านทานต่อการพับของกระดาษที่ผ่านการอิเล็กโทรสเปรย์ด้วยสารละลายพอลิแลคติกแอซิด	67
7	มุมสัมผัส ปริมาณการดูดซึมน้ำและเวลาในการดูดซึมน้ำของกระดาษที่ผ่านการอิเล็กโทรสเปรย์ด้วยสารละลายพอลิแลคติกแอซิด	69
8	มุมสัมผัส ปริมาณการดูดซึมน้ำมันและเวลาในการดูดซึมน้ำมันของกระดาษที่ผ่านการอิเล็กโทรสเปรย์ด้วยสารละลายพอลิแลคติกแอซิด	73
9	อัตราการแพร่ผ่านของไอน้ำและอัตราการแพร่ผ่านของก๊าซออกซิเจนของกระดาษที่ผ่านการอิเล็กโทรสเปรย์ด้วยสารละลายพอลิแลคติกแอซิด	77
10	น้ำหนักมาตรฐาน ความหนาและปริมาณความชื้นของกระดาษที่ผ่านการอิเล็กโทรสเปรย์ด้วยสารละลายผสมระหว่างพอลิแลคติกแอซิดและพอลิบิวทิลีน อะดิเพท-โค-เทรฟทาเลท	85
11	ความต้านทานแรงกดวงแหวนและความต้านทานต่อการพับของกระดาษที่ผ่านการอิเล็กโทรสเปรย์ด้วยสารละลายผสมระหว่างพอลิแลคติกแอซิดและพอลิบิวทิลีนอะดิเพท-โค-เทรฟทาเลท	86

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
12	มูมสัมพัทธ์ ปริมาณการดูดซึมน้ำและเวลาในการดูดซึมน้ำของกระดาศ ที่ผ่านการอิเล็กโทรสเปรย์ผิวหน้าด้วยสารละลายผสมระหว่าง พอลิแลคติกแอซิดและพอลิบีวทิลีนอะดิเพท-โค-เทเรฟทาเลท	88
13	มูมสัมพัทธ์ ปริมาณการดูดซึมน้ำมันและเวลาในการดูดซึมน้ำมัน ของกระดาศที่ผ่านการอิเล็กโทรสเปรย์ด้วยสารละลายผสมระหว่าง พอลิแลคติกแอซิดและพอลิบีวทิลีนอะดิเพท-โค-เทเรฟทาเลท	91
14	อัตราการแพร่ผ่านของไอน้ำและอัตราการแพร่ผ่านของก๊าซออกซิเจน ของกระดาศที่ผ่านการอิเล็กโทรสเปรย์ด้วยสารละลายผสมระหว่าง พอลิแลคติกแอซิดและพอลิบีวทิลีนอะดิเพท-โค-เทเรฟทาเลท	96
ตารางผนวกที่		
ค1	ลักษณะการกระจายตัวของสารละลายพอลิแลคติกแอซิด ภายใต้สภาวะอิเล็กโทรสเปรย์	137
ง1	มูมสัมพัทธ์ของหยดน้ำเมื่อเวลาผ่านไปของกระดาศ ที่ผ่านการอิเล็กโทรสเปรย์ด้วยสารละลายพอลิแลคติกแอซิด	160
ง2	มูมสัมพัทธ์ของหยดน้ำมันเมื่อเวลาผ่านไปของกระดาศ ที่ผ่านการอิเล็กโทรสเปรย์ด้วยสารละลายพอลิแลคติกแอซิด	163
ง3	มูมสัมพัทธ์ของหยดน้ำเมื่อเวลาผ่านไปของกระดาศ ที่ผ่านการอิเล็กโทรสเปรย์ด้วยสารละลายผสมระหว่าง พอลิแลคติกแอซิดและพอลิบีวทิลีนอะดิเพท-โค-เทเรฟทาเลท	166
ง4	มูมสัมพัทธ์ของหยดน้ำมันเมื่อเวลาผ่านไปของกระดาศ ที่ผ่านการอิเล็กโทรสเปรย์ด้วยสารละลายผสมระหว่าง พอลิแลคติกแอซิดและพอลิบีวทิลีนอะดิเพท-โค-เทเรฟทาเลท	169

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	air leak method	8
2	ประเภทและตัวอย่างของพอลิเอสเทอร์ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ	20
3	การสังเคราะห์พอลิแลคติกแอซิด	21
4	เปรียบเทียบการแพร่ผ่านของไอน้ำของฟิล์มพอลิแลคติกแอซิดกับพอลิเมอร์ ชนิดอื่น	22
5	เปรียบเทียบเวลาการย่อยสลายของฟิล์มพอลิแลคติกแอซิดกับพอลิเมอร์ชนิดอื่น	23
6	โครงสร้างทางเคมีของพอลิบีวทิลินอะดิเพท-โค-เทเรฟทาเลท	29
7	อุปกรณ์การทดลองของ Zeleny	31
8	ค่ามุมเริ่มต้นของกรวย (cone) ที่สามารถทำให้เกิดอิเล็กโตรสเปรย์แบบ cone-jet	32
9	ความสัมพันธ์ของการเกิดอิเล็กโตรสเปรย์แบบ cone-jet ระหว่างความนำไฟฟ้าและอัตราการไหลของของเหลวที่แตกต่างกัน	33
10	รูปแบบลักษณะรูปร่างของสารละลายที่ปลายหลอดโลหะ	34
11	กลไกการเกิดอนุภาคนาโนขนาดเล็กโดยวิธีอิเล็กโตรสเปรย์ (electrospraying)	36
12	อนุภาคที่เป็น encapsulation	42
13	การ encapsulation แบบ impacting of two oppositely charge droplets	42
14	การ encapsulation แบบ electrospraying/ evaporation of colloidal suspension	43
15	การ encapsulation แบบ electrospraying/ gelatinization of colloidal suspension	43
16	การ encapsulation แบบ electro-extrusion	44
17	การผลิตฟิล์มที่มีความหนาในระดับไมโครและนาโนเมตรโดยวิธีอิเล็กโตรสเปรย์	45
18	อิเล็กโตรสปินนิง (Electrospinning)	47
19	การวางตัวอย่างเพื่อการเคลือบด้วยวิธีอิเล็กโตรสเปรย์	54
20	การเคลือบกระดาษด้วยพอลิแลคติกแอซิดโดยเทคนิคอิเล็กโตรสเปรย์	55

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
21	การลดลงของค่ามุมสัมผัสของหยดน้ำเมื่อเวลาผ่านไปสำหรับกระดาษที่ผ่านการอิเล็กโทรสเปรย์ด้วยสารละลายพอลิแลคติกแอซิด (ก) กระดาษด้านหน้าและ(ข) กระดาษด้านหลัง	72
22	การลดลงของค่ามุมสัมผัสของหยดน้ำมันเมื่อเวลาผ่านไปสำหรับกระดาษที่ผ่านการอิเล็กโทรสเปรย์ด้วยสารละลายพอลิแลคติกแอซิด (ก) กระดาษด้านหน้าและ(ข) กระดาษด้านหลัง	76
23	ลักษณะพื้นผิวด้านหน้าของกระดาษที่ผ่านการอิเล็กโทรสเปรย์ด้วยสารละลายพอลิแลคติกแอซิดที่ระดับความเข้มข้นต่างๆ ด้วยเครื่อง scanning electron microscope (SEM) (ก) untreated (ข) PLA 0.5% (w/v) (ค) PLA 1% (w/v) (ง) PLA 2% (w/v) (จ) PLA 3% (w/v) และ (ฉ) PLA 4% (w/v)	80
24	ลักษณะพื้นผิวด้านหลังของกระดาษที่ผ่านการอิเล็กโทรสเปรย์ด้วยสารละลายพอลิแลคติกแอซิดที่ระดับความเข้มข้นต่างๆ ด้วยเครื่อง scanning electron microscope (SEM) (ก) untreated (ข) PLA 0.5% (w/v) (ค) PLA 1% (w/v) (ง) PLA 2% (w/v) (จ) PLA 3% (w/v) และ (ฉ) PLA 4% (w/v)	82
25	การลดลงของค่ามุมสัมผัสของหยดน้ำเมื่อเวลาผ่านไปสำหรับกระดาษที่ผ่านการอิเล็กโทรสเปรย์ด้วยสารละลายผสมระหว่างพอลิแลคติกแอซิดต่อพอลิวิทิลินอะซิเตท-โค-เทรฟทาเลท (ก) กระดาษด้านหน้าและ(ข) กระดาษด้านหลัง	90
26	การลดลงของค่ามุมสัมผัสของหยดน้ำมันเมื่อเวลาผ่านไปสำหรับกระดาษที่ผ่านการอิเล็กโทรสเปรย์ด้วยสารละลายผสมระหว่างพอลิแลคติกแอซิดต่อพอลิวิทิลินอะซิเตท-โค-เทรฟทาเลท (ก) กระดาษด้านหน้าและ(ข) กระดาษด้านหลัง	94

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
27	ลักษณะพื้นผิวด้านหน้าของกระดาษที่ผ่านการอิเล็กทรอนิกส์ด้วยสารละลายผสมระหว่างพอลิแลคติกแอซิดและพอลิบิวทิลีนอะดิเพท-โค-เทเรฟทาเลท ด้วยเครื่อง scanning electron microscope (SEM) (ก) untreated (ข) PLA:PBAT 100:0 (ค) PLA:PBAT 80:20 (ง) PLA:PBAT 50:50 (จ) PLA:PBAT 20:80 และ (ฉ) PLA:PBAT 0:100	98
28	ลักษณะพื้นผิวด้านหลังของกระดาษที่ผ่านการอิเล็กทรอนิกส์ด้วยสารละลายผสมระหว่างพอลิแลคติกแอซิดและพอลิบิวทิลีนอะดิเพท-โค-เทเรฟทาเลท ด้วยเครื่อง scanning electron microscope (SEM) (ก) untreated (ข) PLA:PBAT 100:0 (ค) PLA:PBAT 80:20 (ง) PLA:PBAT 50:50 (จ) PLA:PBAT 20:80 และ (ฉ) PLA:PBAT 0:100	100
ภาพผนวกที่		
ข1	เครื่องอิเล็กทรอนิกส์	134

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

PLA	=	Poly(lactic acid)
PBAT	=	Poly(butyleneadipate-co-terephthalate)
LDPE	=	Low density polyethylene
PHA	=	Polyhydroxyalkanoates
PHB	=	Polyhydroxybutyrate
PHV	=	Polyhydroxyvalerate
PHH	=	Polyhydroxyhexanoate
PCL	=	Polycaprolactone
PEA	=	Polyesteramides
PBS	=	Poly(butylene succinate)
PET	=	Polyethylene terephthalate
MD	=	Machine direction
CD	=	Cross machine direction
SEM	=	Scanning electron microscopy

อิทธิพลของเทคนิคอิเล็กโตรสเปรย์ด้วยพอลิแลคติกแอซิดต่อสมบัติของกระดาษแข็ง

Influence of Poly(lactic acid) Electro spraying Technique on Properties of Paperboard

คำนำ

ปัจจุบันวัสดุกระดาษเป็นที่นิยมนำมาใช้ในการบรรจุสินค้าหลายชนิดในอุตสาหกรรม เนื่องจากมีน้ำหนักเบา ประหยัดค่าขนส่ง สามารถผลิตจากวัตถุดิบทดแทนได้หลายชนิด ต้นทุนต่ำ พิมพ์ง่าย ออกแบบให้มีรูปร่างต่างๆ ได้สวยงาม สามารถหมุนเวียนนำกลับมาใช้ใหม่ และสามารถย่อยสลายได้ตามธรรมชาติ (Kirwan, 2005)

กระดาษแข็ง (paperboard) นิยมนำมาผลิตเป็นกล่องกระดาษแข็ง (folding carton) ใช้บรรจุสินค้าเพื่อการขายปลีก ซึ่งอาจเป็นภาชนะบรรจุชั้นที่ 1 หรือ 2 เพราะคุณสมบัติที่ดีของกระดาษแข็ง คือ มีความคงรูป สามารถออกแบบโครงสร้างและกราฟิกให้เหมาะสมกับสินค้าตามวัตถุประสงค์การใช้งาน พิมพ์ได้สวยงาม อีกทั้งสามารถนำกระดาษแข็งที่ใช้แล้วกลับสู่กระบวนการผลิตกระดาษใหม่ได้ แต่การที่จะนำกล่องกระดาษแข็งไปบรรจุผลิตภัณฑ์อาหาร โดยตรงพบว่ามีข้อจำกัด เพราะกระดาษแข็งไม่สามารถต้านทานน้ำและน้ำมันได้ ความแข็งแรงลดลงเมื่อสัมผัสน้ำหรืออยู่ภายใต้สภาวะอากาศที่มีความชื้นสูง ป้องกันการซึมผ่านของก๊าซ ไอน้ำ กลิ่น ได้ต่ำ และ ถูกทำลายได้ง่ายโดยจุลินทรีย์ แมลง และ สัตว์

กระดาษแข็งสามารถผ่านการปรับปรุงสภาพผิวให้มีคุณสมบัติที่เหมาะสมกับการใช้งาน โดยการเคลือบผิวหรือรีดประกบกับวัสดุอื่น (Kirwan, 2005) พลาสติกที่ผลิตมาจากปิโตรเลียม เช่น พอลิเอทิลีน พอลิพรอไพรีน พอลิเอทิลีนเทอเรพทาเลท ไซ และแผ่นเปลวอะลูมิเนียม (aluminum foil) สามารถนำมาใช้เคลือบหรือประกบติดกับกระดาษเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติของกระดาษแข็งให้สามารถต้านทานน้ำและป้องกันการแพร่ผ่านของก๊าซ ไอน้ำและกลิ่น อย่างไรก็ตามการเคลือบหรือการประกบติดโดยเทคโนโลยีในปัจจุบันอาจต้องใช้วัสดุเคลือบในปริมาณมากทำให้กระดาษมีชั้นเคลือบที่หนาและไม่อาจย่อยสลายได้ตามธรรมชาติ อีกทั้งยังกังวลต่อการหมุนเวียนทำใหม่ของกระดาษและส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ไซ ที่ส่งผลต่อกระบวนการคัดแยกเพื่อ

การนำกระดาษกลับไปใช้ใหม่ เนื่องจากไม่สามารถลอกเพื่อแยกชั้นออกจากกระดาษได้เช่นในกรณีพลาสติกหรือแผ่นเปลวอะลูมิเนียม (Levy, 2000)

ปัญหาด้านสิ่งแวดล้อมอันเนื่องมาจากขยะตกค้างเป็นปัญหาสำคัญยิ่งที่ต้องตระหนักถึงในปัจจุบัน และการแก้ไขปัญหานี้ จะต้องเป็นการแก้ไขปัญหายั่งยืน เริ่มจากการใช้วัสดุหรือกระบวนการที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมเข้ามาใช้ในการปรับปรุงสมบัติของกระดาษมากขึ้น เช่น การเลือกวัสดุเคลือบกระดาษจากพอลิเมอร์ที่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ (biodegradable polymer) หรือพอลิเมอร์ชีวฐาน (biobased polymer) คือพอลิเมอร์ที่ผลิตได้จากพืชหรือสัตว์ที่สามารถปลูกหรือเลี้ยงทดแทนขึ้นได้ในระยะเวลาอันสั้น และสามารถย่อยสลายได้ในธรรมชาติ (Andersson, 2008; Lahtinen et al., 2009; Han et al., 2010; Khwaldia et al., 2010 and Manangan and Shawaphun, 2010) ในการปรับปรุงสมบัติของกระดาษแข็งให้ต้านทานน้ำ พอลิแลคติกแอซิด (poly(lactic acid)) ซึ่งเป็นพอลิเมอร์ที่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพซึ่งมีจำหน่ายทางการค้าในปัจจุบัน จึงได้รับความสนใจในการนำมาเคลือบบนกระดาษแข็ง (Rhim et al., 2007 and Rhim and Kim, 2009)

ในปัจจุบันมีการใช้เทคโนโลยีปรับสภาพผิวกระดาษที่ทันสมัยเพื่อการปรับปรุงสมบัติของกระดาษตามต้องการ โดยสามารถลดปริมาณการใช้สารเคลือบและลดความหนาของชั้นเคลือบบนกระดาษได้ เช่น อิเล็กโตรสเปรย์ (electrospray), เทคโนโลยีพลาสมา (plasma technology) และ super critical fluid เป็นต้น (Mukhopadhyay et al., 2002; Vaswani, 2005; Wang and He, 2005 and Thawornwiriyanan et al., 2008) อย่างไรก็ตามเทคโนโลยีพลาสมาและ super critical fluid ใช้เครื่องมือที่มีความซับซ้อน อาจต้องใช้สารตั้งต้นที่อยู่ในสถานะก๊าซ และไม่สามารถใช้พอลิเมอร์ที่เป็นของแข็งหรือสารละลายในการเคลือบได้ ดังนั้นวิธีอิเล็กโตรสเปรย์จึงเป็นอีกทางเลือกที่น่าสนใจและมีแนวโน้มจะประยุกต์ได้ในระดับอุตสาหกรรม

กระบวนการอิเล็กโตรสเปรย์ (electrospraying) คือกระบวนการที่เกิดจากการให้ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่มีค่าสูงมากกับเข็มโลหะ ทำให้บริเวณเข็มโลหะเกิดเป็นสนามไฟฟ้าที่มีความแรงเมื่อของเหลวไหลผ่านออกจากปลายเข็มโลหะจึงมีลักษณะเป็นหยดของเหลวที่มีประจุอยู่ที่ผิว เมื่อเกิดการระเหยของหยดของเหลว ทำให้หยดของเหลวมีขนาดเล็กลงและประจุที่ผิวเข้าใกล้กันมากขึ้น จึงทำให้แรงจากสนามไฟฟ้าเอาชนะแรงดึงดูดผิวของเหลวได้เกิดการแตกตัวเป็นอนุภาคนาขนาดเล็ก ตกลงบนวัสดุรองรับที่เป็นโลหะ เนื่องจากเครื่องมือที่ใช้ในกระบวนการอิเล็กโตรสเปรย์ ไม่มีความ

ซับซ้อนและราคาไม่แพง จึงสามารถประยุกต์กระบวนการอิเล็กทรอนิกส์กับการเคลือบผิว
กระดาษได้ โดยนำกระดาษวางลงบนวัสดุรองรับที่เป็นโลหะ กระบวนการอิเล็กทรอนิกส์มี
ข้อดีหลายประการเมื่อ เทียบกับการเคลือบแบบดั้งเดิม หรือการเคลือบผิวแบบรีดประกบ
(laminating) เช่น ประหยัดปริมาณสารเคลือบ ประหยัดพลังงานคือไม่สูญเสียพลังงานในการอบ
สารเคลือบให้แห้ง เป็นกระบวนการที่แห้งจึงไม่มีความชื้น และไม่มีแรงกดจากเครื่องมือที่อาจ
ส่งผลเสียต่อความแข็งแรงของกระดาษ เป็นต้น (Morota et al., 2004; Rietveld et al., 2008; Ericka
Ford et al., 2009 and Thian et al., 2011)

วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาสภาวะอิเล็กทรอนิกส์ที่เหมาะสมของสารละลายพอลิแลคติกแอซิดต่อการผลิตอนุภาคเพื่อเคลือบกระดาษแข็ง
2. เพื่อศึกษาอิทธิพลของระดับความเข้มข้นของสารละลายพอลิแลคติกแอซิดเมื่อผ่านกระบวนการอิเล็กทรอนิกส์ต่อสมบัติของกระดาษแข็ง ได้แก่ สมบัติทางกายภาพ (physical properties) สมบัติเชิงกล (mechanical properties) สมบัติการต้านทานน้ำและน้ำมัน (water and oil resistance properties) และสมบัติการกีดขวาง (barrier properties)
3. เพื่อศึกษาอิทธิพลของสารละลายผสมระหว่างพอลิแลคติกแอซิดและพอลิไบิวทิลีนอะดิเพต-โค-เทเรฟทาเลตเมื่อผ่านกระบวนการอิเล็กทรอนิกส์ต่อสมบัติของกระดาษแข็ง ได้แก่ สมบัติทางกายภาพ (physical properties) สมบัติเชิงกล (mechanical properties) สมบัติการต้านทานน้ำและน้ำมัน (water and oil resistance properties) และสมบัติการกีดขวาง (barrier properties)

การตรวจเอกสาร

บรรจุภัณฑ์กระดาษแข็ง

บรรจุภัณฑ์กระดาษแข็ง นับได้ว่าเป็นบรรจุภัณฑ์ที่ได้รับความนิยมมากในปัจจุบัน เมื่อเทียบกับวัสดุที่นำมาทำเป็นบรรจุภัณฑ์ทั้งหมด พบว่าร้อยละ 40 คือบรรจุภัณฑ์ที่ทำมาจากกระดาษ และกระดาษแข็ง (Kirwan, 2005) เนื่องจากกระดาษมีน้ำหนักเบา ประหยัดค่าขนส่ง สามารถผลิตจากวัตถุดิบที่ผลิตใหม่ทดแทนได้ ต้นทุนต่ำ พิมพ์ง่าย สามารถออกแบบโครงสร้างได้ตามวัตถุประสงค์การใช้งาน หมุนเวียนนำกลับมาใช้ใหม่ได้ และสามารถย่อยสลายได้ตามธรรมชาติ

1. กระดาษแข็ง (paperboard)

กระดาษแข็งหมายถึง กระดาษที่มีความหนาตั้งแต่ 0.012 นิ้วขึ้นไป โดย International Organization for Standardization (ISO) ได้ให้คำอธิบายว่ากระดาษแข็งจะมีน้ำหนักต่อหน่วยพื้นที่มากกว่า 200 กรัมต่อตารางเมตร ในขณะที่ Confederation of European Paper Industries (CEPI) กล่าวว่า กระดาษแข็งคือ กระดาษที่มีน้ำหนักมากกว่า 220 กรัมต่อตารางเมตร โดยแต่ละชั้นของกระดาษแข็งอาจมีคุณสมบัติที่แตกต่างหรือเหมือนกันก็ได้ ชั้นบนของกระดาษแข็งมีทั้งชนิดที่มีการเคลือบและไม่เคลือบเพื่อให้เหมาะสมกับการพิมพ์หรือเพิ่มคุณสมบัติอื่นๆ กระดาษแข็งเป็นวัสดุสำคัญในการหีบห่อ ซึ่งมีการใช้กันอย่างกว้างขวาง โดยเฉพาะอย่างยิ่งในรูปของกล่องเพื่อการขายปลีก นิยมใช้บรรจุสินค้าต่างๆ ที่มีน้ำหนักไม่มาก

เยื่อที่นำมาใช้ในการผลิตกระดาษแข็งคือเยื่อฟอกขาว (bleached pulp) ได้แก่ เยื่อใหม่ที่มีทั้งเยื่อใยยาวและเยื่อใยสั้น และเยื่อเศษกระดาษที่มาจากกระดาษที่ใช้แล้ว เช่น กระดาษปอนด์ขาว กระดาษหนังสือพิมพ์ และกล่องกระดาษ เป็นต้น การเตรียมเยื่อสำหรับการผลิตกระดาษแข็ง โดยทั่วไปมี 4 ชั้น ประกอบด้วย เยื่อชั้นบนใช้เยื่อฟอกขาวที่เป็นส่วนผสมของเยื่อใยยาวและเยื่อใยสั้นในอัตราส่วนที่พอเหมาะซึ่งมีการเติมสารเคมีลงไปด้วย ส่วนเยื่อชั้นที่ 2 ส่วนมากใช้เยื่อกระดาษจากกระดาษปรีส์ซึ่งมีการแยกสิ่งสกปรกออกไปแล้ว เยื่อชั้นกลาง (middle side) ใช้เยื่อเศษ

กระดาษจากกล่องหนังสือยกและหนังสือเล่มซึ่งแยกสิ่งสกปรกออกไปแล้วส่วนเยื่อชั้นหลังสุด ส่วนมากเป็นเยื่อเศษกระดาษทั่วไป อย่างไรก็ตามองค์ประกอบของเยื่อกระดาษในแต่ละชั้นอาจแตกต่างกันไปจากนี้ ขึ้นกับวัตถุประสงค์การใช้งาน (Kirwan, 2005)

กระดาษแข็งหนาหลายชั้น (duplex board) คือ กระดาษที่เกิดจากการซ้อนกันหลายชั้นของเยื่อกระดาษ โดยรีดประกบเป็นแผ่นเดียว ผิวหน้ากระดาษผลิตจากเยื่อฟอกบริสุทธิ์ ส่วนด้านหลังโดยส่วนใหญ่จะผลิตจากเยื่อกระดาษใช้แล้ว ผิวหน้ากระดาษอาจจะเคลือบสารสีขาวยให้เหมาะกับการพิมพ์หรือไม่ก็ได้ ราคาไม่แพง แบ่งเป็น กระดาษแข็งไม่เคลือบผิวหน้า คือ ไม่มีการเคลือบสารสีขาวหรือวัสดุใดเป็นพิเศษ ด้านหน้าจะขาวแต่ไม่มีความสม่ำเสมอเวลาพิมพ์สีจะไม่สวย ความแข็งแรงปานกลาง ราคาถูก และกระดาษแข็งเคลือบ คือการนำกระดาษแข็งไม่เคลือบมาฉาบผิวหน้าด้วยสารสีขาวหรือวัสดุพิเศษแล้วนำมาผ่านการขัดมันโดยใช้ลูกกลิ้งโครเมียม 2 ลูกเพื่อให้ผิวหน้าเรียบทำให้สามารถพิมพ์สีได้สวยงาม (สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย กระทรวงวิทยาศาสตร์เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม, 2545)

กระดาษแข็งที่นิยมใช้ในการบรรจุ จำแนกออกเป็น 2 ประเภท ได้แก่ กล่องพับได้ (folding cartons) และกล่องคงรูป (set up boxes) โดยกล่องพับได้เป็นกล่องที่ทำจากกระดาษแข็งที่มีคุณสมบัติหักพับได้ กระดาษที่จะใช้ทำกล่องจะถูกพับรอย จะทำให้หักพับได้ 180 องศาโดยไม่ทำให้ผิวกระดาษแตก กล่องเปล่าสามารถพับแบนได้ ไม่เปลืองเนื้อที่ในการเก็บรักษาและขนส่ง ส่วนกล่องคงรูป (set up boxes) กล่องคงรูปเป็นกล่องที่ทำมาจากกระดาษแข็งที่ไม่สามารถหักพับได้ มักมีความหนาแน่นระหว่าง 0.02-0.12 นิ้ว (0.51- 3.09 มิลลิเมตร) ได้รับการผลิตในลักษณะที่ขึ้นรูปแล้วพร้อมบรรจุผลิตภัณฑ์ได้ทันที เนื่องจากกล่องประเภทนี้พับแบนไม่ได้จึงสิ้นเปลืองพื้นที่ในการเก็บรักษาและขนส่งและไม่ค่อยนิยมใช้ทางการบรรจุมากนัก (ดวงฤทัย, 2550)

สมบัติที่ดีของกล่องกระดาษแข็งคือ มีความคงรูป สามารถออกแบบทั้งโครงสร้างและการพิมพ์ให้เหมาะสมกับสินค้าและตามวัตถุประสงค์การใช้งาน พิมพ์และเคลือบเงาได้สวยงาม บรรจุผลิตภัณฑ์ได้หลากหลายประเภท นิยมนำมาใช้เป็นบรรจุภัณฑ์ชั้นในเพราะสามารถสัมผัสกับผลิตภัณฑ์อาหารได้โดยตรง ทนต่ออุณหภูมิได้เป็นช่วงกว้างเช่น ทนต่อการนำไปบรรจุอาหารแช่

แข็งและเข้าไมโครเวฟหรือเตาอบได้ (Kirwan, 2005) อีกทั้งสามารถนำกระดาษแข็งที่ใช้แล้วกลับสู่กระบวนการผลิตกระดาษใหม่ได้

กระดาษแข็งมีสมบัติที่เป็นข้อด้อยคือ ไม่ทนทานต่อสภาวะอากาศที่มีความชื้นสูง ป้องกันการซึมผ่านของก๊าซ ไอน้ำ กลิ่น ได้ต่ำ และ ถูกทำลายได้ง่ายโดยจุลินทรีย์ แมลง และ สัตว์ แต่กระดาษแข็งสามารถปรับปรุงให้มีคุณสมบัติที่เหมาะสมกับการใช้งานให้มากขึ้น โดยการเคลือบผิวหรือรีดประกบกับวัสดุอื่นเช่น เทอร์โมพลาสติก หรือสารเคลือบอื่น โดยการเคลือบหรือลามิเนตด้วยเทอร์โมพลาสติกทำให้กระดาษสามารถปัดฝุ่นด้วยความร้อนได้

2. สมบัติของกระดาษแข็ง

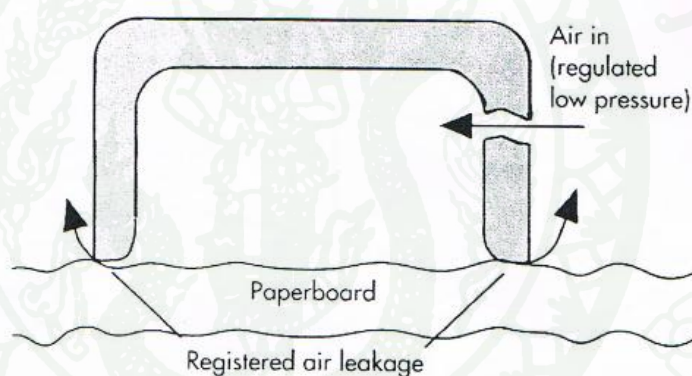
สมบัติของกระดาษแข็ง มีความสำคัญต่อการผลิต การขนส่ง การเก็บรักษาและการใช้งานสุดท้ายของผู้บริโภค ซึ่งส่งผลต่อความสามารถในการปกป้องและเก็บรักษาคุณภาพของผลิตภัณฑ์ สมบัติของกระดาษแข็งทางการบรรจุที่ควรพิจารณาแบ่งออกได้เป็น 5 กลุ่ม คือ ลักษณะปรากฏ สมบัติทางกายภาพ สมบัติเชิงกล สมบัติการต้านทานน้ำและน้ำมันและ สมบัติการกีดขวางดังนี้

2.1 ลักษณะปรากฏ (appearance)

2.1.1 สีของกระดาษ (color) หมายถึง ค่าของสีและความสว่าง (brightness) ของกระดาษอันส่งผลต่อความเชื่อมั่นของผู้บริโภคเช่นการเคลือบผิวหน้าของกระดาษให้มีสีขาวสว่างให้ค่าการสะท้อนแสงของแสงสีน้ำเงินในช่วงคลื่น 457 นาโนเมตร จุดประสงค์ของการวัดความสว่างเพื่อต้องการดูผลของการฟอกเยื่อ ส่วนความขาว (whiteness) เป็นสมบัติที่แตกต่างจากความสว่าง มนุษย์เรารู้สึกว่ากระดาษหรือวัสดุใดมีสีขาวกว่าอีกสิ่งหนึ่ง ถ้ากระดาษนั้นสะท้อนแสงในช่วงคลื่นที่ตามองเห็นออกมาสม่ำเสมอ การย้อม (tinting) กระดาษขาวด้วยสีม่วงหรือสีน้ำเงินทำให้กระดาษขาวขึ้น เพราะแสงสีเหลืองและแสงสีแดงถูกดูดซับไว้มากขึ้นจึงสะท้อนออกมาน้อยลง เนื่องจากสีที่ไล่ลงไปกระดาษจะดูดกลืนแสงไว้แต่สีน้ำเงินจะมีผลกระทบต่อค่าความสว่างน้อยกว่าสีอื่น นอกจากนี้การใช้สารฟอกขาวในกระดาษช่วยทำให้กระดาษสะท้อนแสงในช่วงคลื่นสีม่วงและสีน้ำเงินมากขึ้นทำให้กระดาษขาวขึ้น เยื่อกระดาษที่ไม่ได้ฟอกโดยทั่วไปมีสีน้ำตาลเข้ม

จนถึงเหลืองอ่อน เนื่องจากกลินินดูดซับแสงสีน้ำเงินไว้ ทำให้ค่าการสะท้อนแสงช่วงสีน้ำเงินต่ำ แต่เมื่อนำเยื่อไปฟอกโดยกำจัดกลินินออก เยื่อฟอกขาวที่ได้จะให้ค่าการสะท้อนแสงสีน้ำเงินสูงขึ้น ทำให้ผู้บริโภครู้สึกถึงความปลอดภัย สะอาด เหมาะกับการเป็นบรรจุภัณฑ์อาหาร สามารถจัดวางได้สวยงามภายใต้แสงบนชั้นวางสินค้า (Kirwan, 2005)

2.1.2 ความเรียบของผิวหน้า (surface smoothness) เป็นสมบัติที่มีความสำคัญต่อการพิมพ์ เพราะระบบการพิมพ์บางแบบไม่สามารถพิมพ์ลงบนกระดาษที่มีผิวหน้าขรุขระได้ ซึ่งความเรียบของผิวหน้ากระดาษสามารถทดสอบด้วยวิธี air leak method ดังภาพที่ 1



ภาพที่ 1 air leak method

ที่มา: Kirwan (2005)

2.1.3 ความมันวาว (gloss) ความมันวาวเป็นลักษณะของผิวกระดาษที่สะท้อนแสง ณ มุมที่กำหนด โดยมุมสะท้อนเท่ากับมุมตกกระทบ สำหรับกระดาษนิยมทดสอบที่มุม 75 องศา ถ้าแสงที่สะท้อนในมุม (specular) ดังกล่าวมีมากกว่าแสงที่สะท้อนแบบทั่วไป (diffuse) ผิวกระดาษจะดูมันวาวมาก กระดาษสามารถเพิ่มสมบัติความมันวาวได้จากการรีดโดยลูกกลิ้ง และการเคลือบด้วย mineral pigment เป็นต้น (Kirwan, 2005)

2.1.4 ความทึบแสง (opacity) เป็นสมบัติที่จำเป็นสำหรับกระดาษพิมพ์เขียน โดยกระดาษต้องทึบแสงเพียงพอที่บังภาพหรืออักษรที่อยู่ด้านหลังไม่ให้ปรากฏจนเกิดปัญหาในการอ่านและความชัดเจนของสิ่งพิมพ์ ความทึบแสงยังมีความจำเป็นต่อบรรจุภัณฑ์เพื่อห่อสินค้าอีกด้วย ความทึบแสงสามารถวัดได้โดยใช้ spectrophotometer เปรียบเทียบค่าการสะท้อนแสงระหว่างกระดาษแผ่นเดียวที่รองพื้นด้านหลังด้วยพื้นสีดำสนิทกับกระดาษที่วางซ้อนกัน 100 แผ่น

2.1.5 ความแข็งแรงของผิวหน้า (surface strength) หมายถึงสมบัติความแข็งแรงของแรงยึดเกาะของเส้นใยบนผิวหน้ากระดาษเวลาพิมพ์ผ่านลูกกลิ้ง อาจเกิดการลอก ของผิวหน้ากระดาษออกมาได้ทำให้เกิดความเสียหายระหว่างการพิมพ์ สมบัติความแข็งแรงของผิวหน้าสามารถประเมินได้จากความแข็งแรงของพันธะที่เกาะเกี่ยวกันระหว่างเส้นใยบนผิวหน้ากระดาษ

2.2 สมบัติทางกายภาพ (physical properties)

2.2.1 น้ำหนักมาตรฐาน (basis weight) หมายถึงค่าน้ำหนักต่อพื้นที่ของกระดาษ นิยมรายงานผลเป็น กรัมต่อตารางเมตร หรือปอนด์ต่อ 1,000 2,000 หรือ 3,000 ตารางฟุต น้ำหนักมาตรฐานมีประโยชน์ในการควบคุมการผลิตกระดาษ นิยมใช้เป็นเกณฑ์ในการซื้อขายกระดาษและเป็นตัวบ่งบอกถึงสมบัติด้านอื่นๆ เช่นกระดาษที่มีน้ำหนักมาตรฐานมากกว่า มักจะมีความแข็งแรง ความหนา และความทึบแสงมากกว่ากระดาษที่มีน้ำหนักมาตรฐานที่น้อย

2.2.2 ความหนา (thickness) หมายถึง ระยะห่างที่ตั้งฉากระหว่างผิวด้านบนและผิวด้านล่างของกระดาษ นิยมระบุหน่วยเป็นไมครอนหรือไมโครเมตร ($1\mu\text{m}$ หรือ 1×10^{-6}) หรือ พอยท์ (1 point หรือ 1×10^{-3} นิ้ว) โดยทั่วไปเมื่อกระดาษมีน้ำหนักมาตรฐานเพิ่มขึ้น ความหนาของกระดาษจะเพิ่มขึ้นด้วย และอาจส่งผลให้กระดาษมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น

2.2.3 ความชื้น (moisture content) หมายถึง ปริมาณน้ำในกระดาษ สามารถผันแปรได้ตามอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศ เส้นใยหรือเยื่อส่วนใหญ่ที่ใช้ในการผลิตกระดาษ เมื่อมี

การดูดและคายความชื้น (hygroscopic) ทำให้สมบัติทางกายภาพของเส้นใยเปลี่ยนไปเช่น มีการเพิ่มหรือลดของน้ำหนักมาตรฐาน หรือส่งผลต่อความแข็งแรงของกระดาษ ความชื้นในกระดาษที่มากเกินไป อาจทำให้กระดาษโค้งงอ เกิดรอยย่น ขนาดเปลี่ยนแปลงและยากลำบากต่อการเคลื่อนย้าย แต่หากความชื้นในกระดาษน้อยเกินไป ส่งผลให้กระดาษกรอบและขาดความยืดหยุ่น เพราะโครงสร้างกระดาษประกอบด้วยเส้นใยเซลลูโลสจำนวนมาก ซึ่งภายในเซลลูโลสประกอบไปด้วยหน่วยของกลูโคสที่เชื่อมต่อกันเป็นโซ่ตรงด้วยพันธะบีตา-1-4 และพันธะไฮโดรเจน โดยพันธะไฮโดรเจนจะสูญเสียความแข็งแรงเมื่อเส้นใยเซลลูโลสสัมผัสกับน้ำ เนื่องจากโมเลกุลของน้ำเข้าไปแทรกระหว่างหมู่ไฮดรอกซิล (hydroxyl group) อัตราการดูดคายความชื้นของกระดาษขึ้นอยู่กับปริมาณความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศและอุณหภูมิในขณะนั้น เมื่อความชื้นสัมพัทธ์และอุณหภูมิเปลี่ยนแปลงไปเพียงเล็กน้อย ปริมาณความชื้นและคุณสมบัติของกระดาษขณะนั้นก็เปลี่ยนแปลงตามเช่นกัน (Kirwan, 2005)

การทดสอบสมบัติต่างๆของกระดาษ ต้องกำหนดสภาวะที่ใช้ในการทดสอบ ก่อนการทดสอบต้องมีการปรับสภาวะของแผ่นกระดาษตัวอย่าง เพื่อให้กระดาษทดสอบทุกชิ้นมีปริมาณความชื้นในแผ่นกระดาษที่เท่าเทียมกัน เช่น มาตรฐาน ISO 187 กำหนดให้นำแผ่นตัวอย่างปรับสภาวะที่ 23 ± 1 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 50 ± 2 ส่วนประเทศในเขตร้อนชื้นอาจมีการปรับสภาวะที่ 27 ± 1 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 65 ± 2 เป็นต้น

2.2.4 ทิศทางของเส้นใย (directionality) หมายถึงแนวหรือทิศทางการเรียงตัวของเส้นใยเซลลูโลสในกระดาษ เมื่อพิจารณาการเกิดเป็นแผ่นกระดาษของน้ำเยื่อบนกระดาษ พบว่าเส้นใยเซลลูโลสส่วนมากมีการเรียงตัวในทิศทางการไหลและการเคลื่อนที่ของตะแกรงบนเครื่องผลิตกระดาษ ดังนั้น แนวการเรียงของเส้นใยหรือแนวเส้นใยของกระดาษจึงอยู่ในแนวนานเครื่องจักร หรือ Machine direction (MD) เป็นส่วนใหญ่ ส่วนแนวของกระดาษที่ตั้งฉากกับแนวนานเครื่องจักร เรียกว่า แนวนวนเครื่องจักร หรือ Cross direction (CD) เนื่องจากการเรียงตัวของเส้นใยทั้งสองแนวแตกต่างกัน ดังนั้นแนวของเส้นใยจึงมีผลต่อสมบัติเชิงกลและสมบัติด้านอื่นๆของกระดาษ

2.3 สมบัติเชิงกล (mechanical properties)

2.3.1 ความต้านทานแรงดึง (tensile strength) เป็นความสามารถของกระดาษในการต้านทานแรงดึงที่กระทำที่ปลายทั้งสองด้านของตัวอย่างที่มีขนาดตามมาตรฐานกำหนด วัดค่าออกมาเป็นแรงที่ใช้ดึงให้ตัวอย่างขาด มีหน่วยเป็นกิโลนิวตันต่อเมตร (kN/m) หรือปอนด์ต่อนิ้ว (lb/in) ความต้านทานแรงดึงมีความสำคัญสำหรับกระดาษที่ต้องผ่านการพิมพ์ เนื่องจากในเครื่องพิมพ์จะมีลูกกลิ้งสำหรับดึงให้กระดาษเคลื่อนที่ไปข้างหน้าด้วยความเร็วสูง นอกจากนี้ยังจำเป็นต่อภาชนะบรรจุกระดาษที่ต้องรองรับแรงดึง เช่น ถุงกระดาษ ป้ายที่มีผลต่อความต้านทานแรงดึงของกระดาษ ได้แก่ ชนิดเยื่อและทิศทางของเส้นใย ปริมาณการบดเยื่อ ปริมาณการกรดรีดน้ำ น้ำหนักมาตรฐานของกระดาษ ปริมาณของสารเติมแต่ง และปริมาณความชื้นในกระดาษ เป็นต้น

2.3.2 ความต้านทานแรงดันทะลุ (bursting strength) เป็นความสามารถของกระดาษในการต้านทานแรงดันที่กระทำบนแผ่นกระดาษ วัดค่าออกมาเป็นแรงดันที่ทำให้แผ่นตัวอย่างขาด ทะลุ มีหน่วยเป็นกิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร (kg/cm^2) หรือกิโลปาสกาล (kPa) หรือปอนด์ต่อตารางนิ้ว (lb/in^2) ความต้านทานแรงดันทะลุเกี่ยวข้องกับพันธะที่ยึดกันระหว่างเส้นใยแต่ละเส้น ถ้าแรงยึดเกาะมีค่าสูง กระดาษจะมีความต้านทานต่อแรงดันทะลุดีขึ้น

2.3.3 ความต้านทานแรงกดวงแหวน (ring crush strength) หมายถึงความสามารถของกระดาษในการต้านทานแรงกดในแนวตั้งจนขอบกระดาษเสียหาย มีหน่วยเป็นกิโลนิวตันต่อเมตร (kN/m) เป็นค่าที่นิยมใช้ทดสอบกระดาษแข็งและกระดาษลูกฟูก

2.3.4 ความทนทานต่อการพับ (folding endurance) หมายถึง จำนวนครั้งของการหักพับไปมาของกระดาษจนกระทั่งกระดาษขาดออกจากกัน การหักพับจะใช้แรงกระทำในการทดสอบตามมาตรฐานกำหนด เช่น หนึ่งกิโลกรัม เป็นต้น พับกระดาษด้วยมุม 270 องศา ความต้านทานการพับมีความจำเป็นสำหรับกระดาษที่นำไปผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ที่ต้องมีการพับมาก เช่น ซองจดหมาย และกล่องกระดาษแข็ง เป็นต้น

2.3.5 ความต้านทานต่อการฉีกขาด (tearing resistance) สามารถวัดได้จากค่าเฉลี่ยของแรงที่กระทำต่อกระดาษซึ่งถูกตัดให้ขาดไว้แล้วในเบื้องต้นโดยแรงฉีกดังกล่าวต้องกระทำอย่างต่อเนื่อง มีหน่วยเป็นมิลลินิวตัน (mN) การนำเยื่อใยมาเป็นส่วนผสมในกระบวนการผลิตกระดาษ จะช่วยให้กระดาษมีความต้านทานต่อแรงฉีกได้มากขึ้น ซึ่งสมบัติความต้านทานการฉีกขาดมีความสำคัญต่อการป้องกันความเสียหายต่อสินค้าเนื่องจากการฉีกขาดของภาชนะบรรจุกระดาษ

2.3.6 ความแข็งตึง (stiffness) หมายถึงความสามารถของกระดาษที่ต้านทานต่อการโค้งงอจากแรงกระทำภายนอก ทิศทางการเรียงตัวของเส้นใยมีผลต่อความแข็งตึง กระดาษที่มีแนวเส้นใยที่เรียงขนานกับแนวเครื่องจักรมีความแข็งตึงมากกว่ากระดาษที่มีทิศทางเส้นใยเรียงตัวในแนวขวางกับเครื่องจักร ซึ่งค่าความแข็งตึงมีความสัมพันธ์โดยตรงกับค่าความต้านทานแรงกดของกล่องและแผ่นกระดาษ รวมทั้งสัมพันธ์กับค่าความต้านทานการพับหรือการโค้งงอ

2.4 สมบัติการต้านทานน้ำและน้ำมัน (water and oil resistance properties)

สมบัติการต้านทานน้ำและน้ำมันของกระดาษ มีความสำคัญต่อการนำกระดาษไปใช้ประโยชน์ บรรจุภัณฑ์กระดาษจะต้องสามารถป้องกันน้ำและน้ำมันจากผลิตภัณฑ์โดยเฉพาะผลิตภัณฑ์อาหารไม่ให้เกิดการซึมผ่านเพราะการซึมผ่านของน้ำและน้ำมันจะส่งผลทำให้ความแข็งแรงของบรรจุภัณฑ์กระดาษลดลงและเกิดลักษณะปรากฏที่ไม่เป็นที่ยอมรับของผู้บริโภค อีกทั้งน้ำมันที่ซึมออกมาจะถูกออกซิไดส์ได้ง่ายทำให้ผลิตภัณฑ์เหม็นหืน และการซึมผ่านของน้ำและน้ำมันอาจส่งผลให้สารเติมแต่งในกระดาษมีการถ่ายทอดไปสู่อาหารได้ ซึ่งส่งผลกระทบต่อความปลอดภัยของผู้บริโภค

2.4.1 การดูดซับน้ำและน้ำมัน (water and oil absorption) โดยวิธีการทดสอบอาจใช้ Cobb test อุปกรณ์ประกอบด้วยฐานที่ทำจากโลหะและวงแหวนโลหะ ก่อนการทดสอบจะมีการชั่งน้ำหนักของกระดาษตัวอย่าง โดยตัวอย่างมีขนาดใหญ่กว่าวงแหวนเล็กน้อย นำตัวอย่างวางบนฐาน

โลหะทับด้วยวงแหวน โลหะมีการยึดวงแหวนและฐานให้แน่น จากนั้นเทของเหลวลงในบริเวณวงแหวนที่ทราบขนาดของพื้นที่ ทิ้งไว้เป็นระยะเวลาหนึ่ง อาจเป็นเวลา 60 หรือ 120 วินาที จึงเทของเหลวออกจากวงแหวน ชั้บของเหลวส่วนเกินออกจากผิวตัวอย่างและนำตัวอย่างไปชั่งน้ำหนักอีกครั้ง รายงานผลเป็นน้ำหนักของของเหลวที่กระดาษตัวอย่างดูดซับไว้ต่อพื้นที่กระดาษมีหน่วยเป็นกรัมต่อตารางเมตร

2.4.2 เวลาในการดูดซึมน้ำและน้ำมัน (absorption time) สามารถทำได้โดยการหยดของเหลวที่มีปริมาตรคงที่ลงบนผิววัสดุ และจับเวลาที่หยดของเหลวหนึ่งหยดใช้ในการซึมผ่านอย่างสมบูรณ์ลงในวัสดุนั้น ซึ่งเวลาในการดูดซึมของเหลวนี้เป็นตัวบ่งชี้ความสามารถในการดูดซับของเหลวของวัสดุ จากวิธีการทดลองของ Selli (2001) และ สุชาดา (2551) เวลาที่ใช้ในการดูดซับน้ำหนึ่งหยด (water absorption time) จะถูกกำหนดไว้สูงสุดที่ 200 นาติ เนื่องจากที่ระยะเวลานานกว่านี้จะพิจารณาว่าปริมาตรของหยดน้ำหายไปเนื่องจากเกิดการระเหย

2.4.3 มุมสัมผัสของน้ำและน้ำมัน (contact angle, θ) คือมุมที่เกิดขึ้นระหว่างรอยต่อของเหลวและก๊าซกับพื้นผิวของแข็ง ซึ่งการวัดมุมสัมผัสหยดของเหลวบนพื้นผิวของแข็งในแนวระนาบ แสดงให้เห็นถึงสมบัติการเปียกน้ำของวัสดุนั้น การวัดมุมสัมผัสมี 2 แบบ คือแบบสถิตยศาสตร์ (static) เป็นการวัดมุมสัมผัส ณ เวลาใดเวลาหนึ่ง และแบบพลศาสตร์ (dynamic) เป็นการวัดมุมสัมผัสอย่างต่อเนื่องในช่วงเวลาใดเวลาหนึ่ง ในการวัดมุมสัมผัสจะใช้เครื่องมือที่เรียกว่า goniometer โดยใช้กล้องที่ติดอยู่ภายในเครื่องจับภาพหยดของเหลวบนผิววัสดุที่เป็นของแข็ง และวัดค่ามุมสัมผัสระหว่างหยดของเหลวกับผิววัสดุ

2.5 สมบัติการกีดขวาง (barrier properties)

2.5.1 การกีดขวางการแพร่ผ่านของไอน้ำ (water vapor barrier) กระดาษเป็นวัสดุที่มีรูพรุนสูง จึงมีการแพร่ผ่านของไอน้ำได้สูง ทำให้ส่งผลเสียต่อคุณภาพผลิตภัณฑ์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกลุ่มอาหารที่มีความชื้นสูงจะสูญเสียความชื้นไปกับสิ่งแวดล้อมภายนอกทำให้อาหารแห้ง ในขณะที่อาหารที่ไม่ต้องการความชื้นเช่นอาหารแห้ง จะสูญเสียรสชาติและความกรอบ ส่วน

ผลิตภัณฑ์ที่ไม่ใช่อาหารเช่นเหล็ก เมื่อสัมผัสกับความชื้นจะเป็นสาเหตุทำให้เกิดสนิม นอกจากนั้น การแพร่ผ่านเข้าออกของไอน้ำ ทำให้กระดาษมีความชื้นสูงขึ้นและสมบัติเชิงกลลดลง

2.5.2 การกีดขวางการแพร่ผ่านของก๊าซ (gas barrier) กระดาษมีความสามารถในการกีดขวางก๊าซได้ต่ำ ก๊าซจึงแพร่ผ่านเข้าออกกระดาษได้ง่าย เช่น ก๊าซออกซิเจน ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และก๊าซไนโตรเจน ทำให้ผลิตภัณฑ์ภายในบรรจุภัณฑ์กระดาษเกิดการเสื่อมเสียง่าย โดยเฉพาะอาหารทอด หรือที่ต้องใช้น้ำมันจะทำปฏิกิริยาออกซิเดชันกับก๊าซออกซิเจน ทำให้เหม็นหืน และกระทบต่อกลิ่นรสของอาหาร ดังนั้นการปรับปรุงคุณสมบัติด้านการกีดขวางของบรรจุภัณฑ์กระดาษจึงสำคัญต่อการยืดอายุการเก็บรักษาของผลิตภัณฑ์อย่างยิ่ง

3. การปรับปรุงสมบัติของกระดาษแข็ง

สามารถทำได้โดยการปรับสภาพผิวกระดาษ วัตถุประสงค์เพื่อเพิ่มคุณภาพและคุณสมบัติบางประการให้เป็นไปตามความต้องการที่จะใช้งานมากขึ้น

3.1 การปรับสภาพผิวด้วยการขัดมัน (calendering) อยู่ในขั้นตอนชุดขัดผิว (calender) ในกระบวนการผลิตกระดาษ โดยกระดาษถูกรีดผ่านชุดลูกรีด ซึ่งเป็นชุดลูกกลิ้งวางซ้อนกันในแนวตั้ง ซึ่งให้แรงกดไปที่กระดาษทำให้กระดาษมีผิวเรียบมากขึ้น มีความหนาสม่ำเสมอ มีความมันวาวและเหมาะสมในการพิมพ์มากขึ้น (Biermann, 1996)

3.2 การฉาบด้วยสารกันซึม (surface sizing) อยู่ในขั้นตอนของชุดฉาบผิว (size press) ในกระบวนการผลิตกระดาษ วัตถุประสงค์เพื่อให้กระดาษต้านทานน้ำได้มากขึ้น โดยกระดาษจะผ่านการฉาบด้วยสารกันซึมทำให้รูพรุนของกระดาษลดลง เนื่องจากสารกันซึมไปอุดรูเล็กๆที่ผิวกระดาษ ทำให้สมบัติการต้านทานน้ำ (water resistance) และความเรียบของกระดาษดีขึ้น

3.3 การเคลือบ (coating) เป็นขั้นตอนที่เกิดขึ้นหลังกระบวนการผลิตกระดาษ โดยใช้สารเคลือบในลักษณะของเหลวมาเคลือบลงบนผิวกระดาษแล้วอบให้แห้งก่อนนำไปใช้เป็นบรรจุภัณฑ์

3.3.1 ประเภทของการเคลือบกระดาษสามารถแบ่งเป็น 4 ประเภท (อรศิริ, 2545) ได้แก่

ก. การเคลือบโดยใช้แปรง (brush application) เป็นวิธีเก่าแก่ที่สุด โดยการพาสารเคลือบกระดาษด้วยแปรงที่หมุนต่อเนื่องมีหลักการคล้ายการทาสี

ข. การเคลือบโดยลูกกลิ้ง (roll application) มี 2 แบบ คือแบบควบคุมปริมาณสารเคลือบ(pre-metering) เช่น metering rod, dip roll and doctor blade coater และ gravure coater เป็นต้น และแบบไม่ควบคุมสารเคลือบได้แก่ การใช้ squeeze roll, upside-down knife และ air knife เป็นต้น

ค. การเคลือบโดยการพ่นฝอย (spray application) ทำโดยการพ่นสารเคลือบลงบนผิวกระดาษโดยตรง

ง. การเคลือบโดยวิธี casting ซึ่งทำโดยเทสารละลายลงบนกระดาษ และทำให้สารเคลือบแห้งโดยใช้ความร้อน เช่น ลมร้อนหรือลูกกลิ้งร้อน เป็นต้น

3.3.2 วัสดุที่ใช้ในการเคลือบผิวกระดาษ ได้แก่

ก. พลาสติก (plastic) เทอร์โมพลาสติกที่นิยมในการเคลือบเพราะสามารถทำให้กระดาษมีสมบัติในการปิดผนึกด้วยความร้อนและปรับปรุงสมบัติต่างๆของกระดาษโดยเฉพาะอย่างยิ่งสมบัติในการต้านทานน้ำ เช่น การเคลือบด้วยพอลิเอทิลีน (polyethylene) เป็นการเคลือบเพื่อป้องกันความชื้น การเคลือบด้วยโอเรียนเทตพอลิพรอไพรีน (oriented polypropylene) เพื่อความทนทานต่อไขมัน ความชื้น และสามารถปิดผนึกได้ด้วยความร้อน การเคลือบด้วยพอลิเอทิลีน เทเรพทาเลท (polyethylene terephthalate) เพื่อเพิ่มสมบัติการกีดขวาง การเคลือบด้วยพอลิไวนิลิดีนไดคลอไรด์ (polyvinylidene dichloride) เพื่อสกัดกั้นความชื้น ไขมัน และป้องกันการผ่านเข้าออกของก๊าซ

ข. สารกันซึม (sizing agent) คือสารเติมแต่งที่ทำให้กระดาษหรือกระดาษแข็งต้านทานน้ำและต้านทานต่อการแทรกซึมของของเหลวได้ เช่น สารละลายสตาร์ช (starch solution) และพอลิเมอร์สังเคราะห์ ซึ่งสามารถแบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม (Ranson, 2004) คือ กลุ่มสารละลายและกลุ่มสารแขวนลอย กลุ่มสารละลายตัวอย่างเช่น styrene maleic anhydride solution (SMA) และ styrene acrylic acid solution (SAA) ส่วนกลุ่มสารแขวนลอย ตัวอย่างเช่น styrene acrylic emulsion

(SAE) และ polyurethane dispersion (PUD) เป็นต้น นอกจากนี้มีการใช้กลุ่มสตาร์ชดัดแปรเคลือบบนกระดาษ เพื่อเพิ่มความมันเงาและความสามารถในการพิมพ์ให้กระดาษ ทำให้กระดาษทนต่อการขูดหรือฉีก ด้านทานการแทรกซึมของหมึกหรือของเหลว และเป็นสารช่วยยึดเกาะ (binder) ในองค์ประกอบของสารเคลือบ ตัวอย่างเช่น ไฮดรอกซีเอทิลสตาร์ช (hydroxyethyl starch), คาร์บอกซีเมทิลสตาร์ช (carboxymethyl starch), สตาร์ชแอซิเตต (starch acetate), แคทไอออนิกสตาร์ช (cationic starch) และ สตาร์ชฟอสเฟตโมโนเอสเทอร์ (starch phosphate monoester) เป็นต้น (Maurer, 2001)

ก. ไข (wax) เช่น ไขพาราฟินและส่วนผสมของปิโตรเลียม เป็นการเคลือบผิวกระดาษเพื่อป้องกันความชื้นและการสูญเสียความกรอบและกลิ่นของผลิตภัณฑ์ โดยการเคลือบผิวหน้าด้านเดียวหรือสองหน้า แต่ในการเคลือบต้องทำหลังจากการพิมพ์ เนื่องจากไม่สามารถพิมพ์บนผิวกระดาษที่มีไขได้ (ดวงฤทัย, 2550)

ง. อลูมิเนียม (aluminum) เช่น การทำ metallization บนกระดาษ (Kirwan, 2005) เพื่อปรับสมบัติของกระดาษให้มีความต้านทานน้ำและน้ำมัน สามารถกีดขวางการแพร่ผ่านของไอน้ำและก๊าซได้ดี และป้องกันแสงและความร้อนจากภายนอก อันเป็นสาเหตุที่เร่งการก่อให้เกิดการเสื่อมเสียของผลิตภัณฑ์ได้เร็วยิ่งขึ้น

3.4 การรีดประกบ (laminating)

เป็นการนำกระดาษไปรีดประกบติดกับชั้นแผ่นฟิล์มพลาสติก หรือแผ่นเพลวอะลูมิเนียม (foil) โดยมีทั้งการใช้กาวเป็นตัวประสานและไม่ใช้กาวแต่เป็นการใช้พอลิเมอร์แบบหลอมเหลวในการรีดประกบ สามารถแบ่งกระบวนการรีดประกบได้เป็น 3 วิธีได้แก่ การรีดประกบกับสารละลายฐานน้ำ (lamination with water-based adhesives) การรีดประกบแบบแห้ง (Dry bonding) และการรีดประกบแบบหลอมเหลว (extrusion lamination) (Kirwan, 2005)

ทั้งนี้วิธีการและวัสดุที่นิยมใช้ในการเคลือบอย่างแพร่หลายในปัจจุบันเพื่อปรับปรุงสภาพผิวของกระดาษให้มีคุณสมบัติที่เหมาะสมต่อการใช้งาน มีข้อจำกัดบางประการ เช่น วิธีการเคลือบแบบเดิมต้องใช้สารเคลือบมากทำให้สิ้นเปลืองเวลาและพลังงานในการอบสารเคลือบให้แห้งเพื่อระเหยตัวทำละลายออกไป ทำให้ต้นทุนโดยรวมสูง (Ford et al, 2009) นอกจากนี้วัสดุที่ใช้เคลือบ เช่น พลาสติกที่ผลิตมาจากปิโตรเลียม ไซ และแผ่นเปลวอลูมิเนียม ไม่อาจย่อยสลายได้ตามธรรมชาติ จึงทำให้เกิดเป็นของเสียตกค้างส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและโดยเฉพาะไซ ที่ส่งผลกระทบต่อกระบวนการคัดแยกเพื่อนำกระดาษกลับไปใช้ใหม่ เนื่องจากไม่สามารถลอกเพื่อแยกชั้นออกจากกระดาษได้เช่นในพลาสติกหรือแผ่นเปลวอลูมิเนียม (Levy, 2000)

วิธีอิเล็กโตรสเปรย์ (electrospraying) เป็นเทคนิคหนึ่งในการเคลือบกระดาษโดยใช้ปริมาณสารเคลือบน้อยและไม่เสียเวลาในการอบกระดาษภายหลังการเคลือบ วิธีอิเล็กโตรสเปรย์เป็นวิธีการฉีดพ่นสารละลายโดยใช้การเหนี่ยวนำของไฟฟ้า ซึ่งสารในการเคลือบอาจเป็นสารละลายประเภทต่างๆ โดยสามารถเลือกพอลิเมอร์ชีวฐาน (biobased polymer) ที่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ (biodegradable polymer) (Jon et al., 2005 and Pareta and Edirisinghe, 2006) เพื่อผลิตอนุภาคนาโนขนาดเล็กมากรูปทรงต่างๆหรือเส้นใยขนาดเล็กจากสารละลายดังกล่าวลงบนผิวกระดาษ โดยตัวทำละลายจะระเหยออกไป ทำให้ไม่ต้องสูญเสียเวลาและพลังงานในการระเหยตัวทำละลายออกไป นอกจากนี้ วิธีอิเล็กโตรสเปรย์ (electrospraying) ยังไม่ทำให้กระดาษสูญเสียความแข็งแรงเหมือนวิธีการปรับสภาพผิวทั่วไป เพราะ ไม่เกิดแรงกดอัดบนเส้นใยและกระดาษไม่ต้องสัมผัสกับความเปียกชื้น (Jaworak and Sobczyk, 2008; Ford et al, 2009)

พอลิเมอร์ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ

พอลิเมอร์ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ (biodegradable polymer) โดยทั่วไป สามารถขึ้นรูปได้โดยกระบวนการทางความร้อน แต่จะมีลักษณะเฉพาะที่เมื่อพอลิเมอร์ย่อยสลายได้ทางชีวภาพถูกฝังกลบ ในสภาวะที่เหมาะสมกับการย่อยสลายจะเกิดกลไกการย่อยสลายด้วยเอนไซม์ และแบคทีเรียในธรรมชาติ ซึ่งเมื่อย่อยสลายหมดแล้วจะได้ผลิตภัณฑ์เป็น น้ำ อิมัส (humus) และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งสิ่งเหล่านี้เป็นสิ่งจำเป็นในการเจริญเติบโตและดำรงชีวิตของพืช พอลิเมอร์ย่อยสลายได้ทางชีวภาพสามารถแบ่งออกเป็น 4 ประเภทตามการสังเคราะห์ดังนี้ (Averous et al., 2009)

(ก) กลุ่มที่มาจากธรรมชาติโดยตรง เช่น เทอร์โมพลาสติกสตาซ์ (thermoplastic starch, TPS)

(ข) กลุ่มที่มาจาก การสังเคราะห์โดยปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันของมอนอเมอร์จากธรรมชาติ เช่น พอลิแลคติกแอซิด (poly(lactic acid), PLA)

(ค) กลุ่มที่มาจาก การสังเคราะห์โดยตรงจากจุลินทรีย์ เช่น พอลิไฮดรอกซีอัลคานอยต์ (polyhydroxy alkanoyates, PHAs)

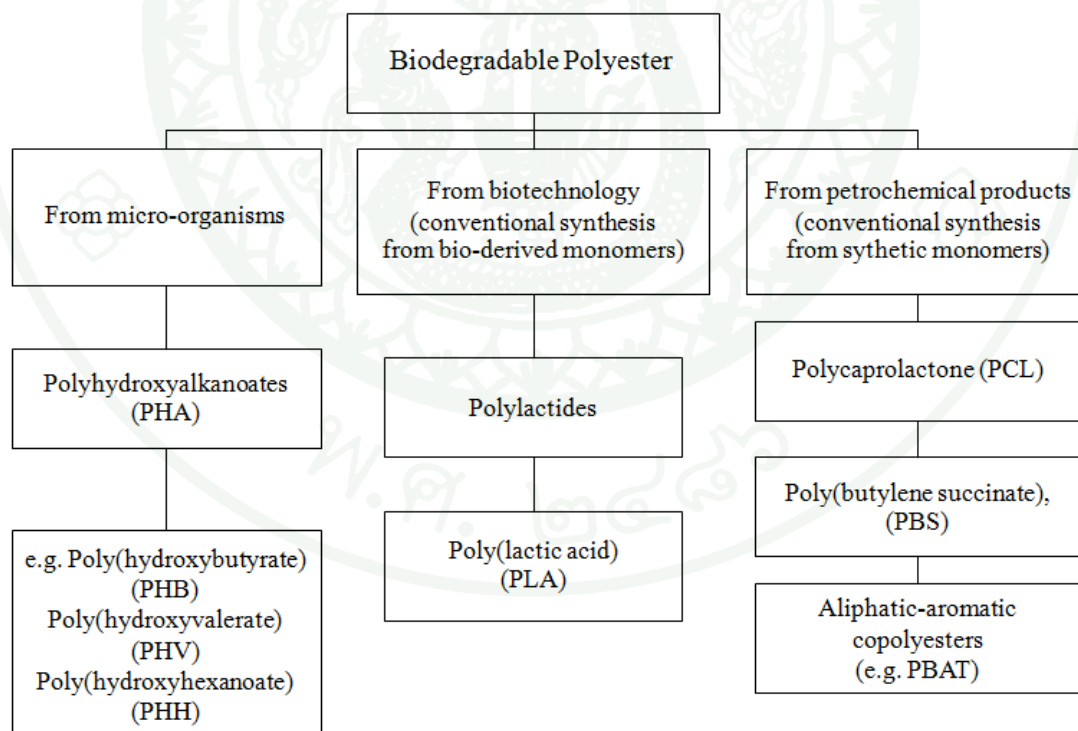
(ง) กลุ่มที่มาจาก การสังเคราะห์ทั้งมอนอเมอร์และพอลิเมอร์จากอุตสาหกรรมปิโตรเคมี เช่น พอลิแคปโรแลคโตน (polycaprolactone, PCL), พอลิเอสเทอร์เอไมด์ (polyesteramides, PEA), aliphatic-aromatic copolyesters

กลุ่ม (ก) - (ค) คือพอลิเมอร์ชีวฐาน (biobased polymer) ที่มาจากธรรมชาติ ไม่เป็นพิษและหาใหม่ทดแทนได้ ซึ่งแตกต่างจากกลุ่ม (ง) คือพอลิเมอร์ที่มีแหล่งกำเนิดจากอุตสาหกรรมปิโตรเคมี นอกจากนี้ยังสามารถแบ่งประเภทของพอลิเมอร์ย่อยสลายได้ทางชีวภาพเป็น 2 กลุ่มหลักคือ กลุ่มที่ไม่ใช่พอลิเอสเทอร์ (ก) และกลุ่มพอลิเอสเทอร์ (ข) - (ง) (Averous et al., 2009)

พอลิเอสเทอร์ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ (biodegradable polyester) คือพอลิเมอร์ที่มีหมู่เอสเทอร์ ($-O-CO-$) ในหน่วยซ้ำเป็นพอลิเมอร์ มีสมบัติไม่ชอบน้ำ (hydrophobic) ตัวอย่างพอลิเมอร์ในกลุ่มนี้ที่เป็นพอลิเมอร์สังเคราะห์ที่ใช้งานกันอย่างแพร่หลายคือ พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต (PET) สามารถนำมาใช้งานได้หลากหลาย เช่น ใช้ทำพลาสติกสำหรับเคลือบผิว ขวดน้ำ เส้นใย ฟิล์มและยาง เป็นต้น แต่พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตที่มีแหล่งกำเนิดจากอุตสาหกรรมปิโตรเคมีไม่สามารถย่อยสลายได้ตามธรรมชาติ ปัจจุบันซึ่งผู้ผลิตตระหนักถึงปัญหาสิ่งแวดล้อมมากขึ้น พอลิเอสเทอร์ย่อยสลายได้ทางชีวภาพนี้มีพันธะเอสเทอร์อยู่ในสายโซ่เป็นจำนวนมาก สามารถแตกตัวได้โดยทำปฏิกิริยากับน้ำ (hydrolysis) ให้เป็นโมเลกุลเล็กลงหลังจากนั้นจึงมีการเข้าย่อยสลายด้วยกระบวนการทางจุลินทรีย์ จึงมีแนวโน้มทางการตลาดที่ดีและมีการนำมาผลิตเป็นผลิตภัณฑ์และบรรจุภัณฑ์เพื่อจำหน่ายแล้วในตลาด (สุวบุญ, 2552)

พอลิเอสเทอร์ที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพสามารถจำแนกตามส่วนประกอบของสายโซ่เป็น 2 ประเภท คือ aliphatic และ aromatic polyester (ปกรณ และ มณฑนา โอภาประกาศิต, 2551) ในปัจจุบันมีการผลิตพอลิเมอร์ที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพในกลุ่มนี้หลายชนิด ซึ่งส่วนใหญ่เป็นพอลิเมอร์ ประเภท aliphatic polyester เพราะสายโซ่ไม่มีโครงสร้างของ benzene ring จึงมีความแข็งแรง

ของสายโซ่น้อยกว่าและเหมาะสมต่อการสลายพันธะดีกว่า ประกอบด้วยพอลิเมอร์ 4 ตระกูลใหญ่ๆ คือ พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต (polybutylene succinate, PBS), พอลิคาร์โพรแลกโตน (polycaprolactone, PCL), พอลิแลคติกแอซิด (poly(lactic acid), PLA), พอลิไฮดรอกซิล อัลคานอยด์ (polyhydroxy alkanoyates, PHA) เป็นต้น ซึ่ง 2 ชนิดแรกต้องใช้น้ำมันจากปิโตรเคมี ส่วนพอลิแลคติกแอซิด ใช้น้ำมันจากวัสดุชีวฐานแต่ยังคงอาศัยปฏิกิริยาเคมีในการสังเคราะห์สายโซ่ของพอลิเมอร์ในขั้นตอนสุดท้าย ในขณะที่พอลิไฮดรอกซิลอัลคานอยด์เป็นพอลิเมอร์ตระกูลเดียวที่กระบวนการสังเคราะห์ทั้งหมดเกิดขึ้นในจุลินทรีย์ แสดงดังภาพที่ 2 ส่วน aromatic polyester จะต้องทำการปรับปรุงโครงสร้างให้เหมาะสมขึ้น โดยต่อสายโซ่กับ aliphatic polyester ให้เป็นโคพอลิเมอร์ (aliphatic-aromatic copolyester) ก่อนจึงจะสามารถย่อยสลายได้ ตัวอย่างเช่น พอลิบิวทิลีนอะดิเพต-เทเรฟทาเลต (poly (butylene adipate-co-terephthalate), PBAT) เป็นต้น ซึ่งเป็นพอลิเมอร์ที่ได้จากวัตถุดิบปิโตรเคมีมีสมบัติที่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพเช่นเดียวกับพอลิเมอร์ซึ่งได้มาจากวัสดุชีวฐาน



ภาพที่ 2 ประเภทและตัวอย่างของพอลิเอสเทอร์ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ

ที่มา: ดัดแปลงจาก Averous et al. (2009)

พอลิแลคติกแอซิด

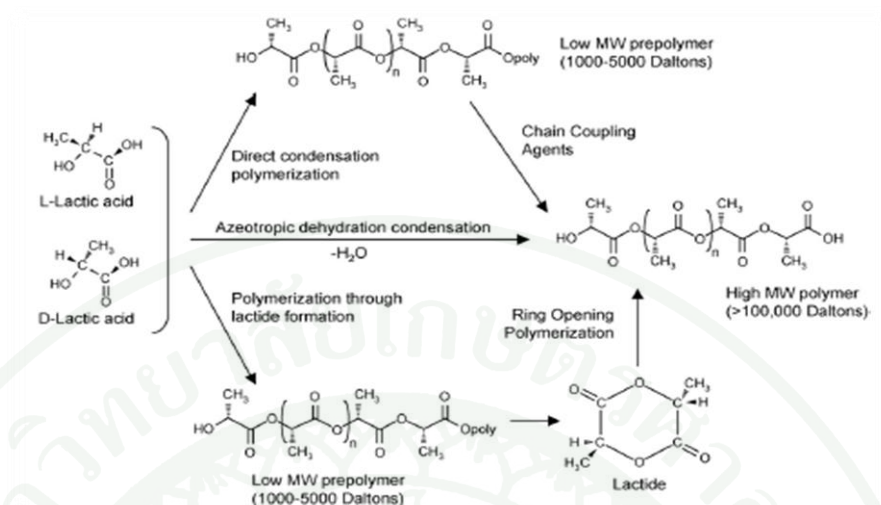
พอลิเมอร์ชีวฐานที่สังเคราะห์ได้จากมอนอเมอร์ชีวฐานที่สำคัญในปัจจุบัน คือ พอลิแลคติกแอซิด (polylactic acid) ซึ่งถูกสังเคราะห์มาจากกรดแลคติกที่ได้จากพืช เช่น ข้าวโพด มันสำปะหลัง อ้อย ซึ่งมีกระบวนการเริ่มต้นโดยการนำแป้งที่ได้จากพืชดังกล่าว มาผ่านกระบวนการหมักโดยจุลินทรีย์ เพื่อให้ได้กรดแลคติก (lactic acid) จากนั้นคัดแยกเอาจุลินทรีย์ออก ทำให้มีกรดแลคติกเพียงอย่างเดียว หรือ dehydrated กรดแลคติกเพื่อให้เป็น แลคไทด์ (lactide) เพื่อเตรียมไปสังเคราะห์พอลิแลคติกแอซิดต่อไป

1. การสังเคราะห์พอลิแลคติกแอซิด

การสังเคราะห์พอลิแลคติกแอซิดสามารถทำได้ 2 วิธี (Lim, 2008)

1.1 การควบแน่นโดยตรง (direct polycondensation of lactic acid) มอนอเมอร์แลคติกแอซิดสามารถควบแน่นได้โดยตรง โดยการกำจัดน้ำออกจากระบบ และเติมตัวเร่งปฏิกิริยา เช่น พี-โทลูอินซัลโฟนิคแอซิด (p-toluene sulfonic acid, PTSA) ภายใต้สภาวะที่รุนแรง เมื่อสิ้นสุดปฏิกิริยาจะได้ พอลิแลคติกแอซิดน้ำหนักโมเลกุลต่ำ

1.2 การพอลิเมอไรเซชันแบบเปิดวงของมอนอเมอร์แลคไทด์ (ring opening polymerization of lactide) มีการกำจัดน้ำออกจากระบบที่อุณหภูมิสูงภายใต้สภาวะสุญญากาศจะได้เป็นโอลิโกเมอร์ จากนั้นเติมตัวเร่งปฏิกิริยาเพื่อให้ออกมาอยู่ในรูปของแลคไทด์ จากนั้นจึงเปิดวงแหวนของแลคไทด์ ดังภาพที่ 3 วิธีนี้เป็นที่นิยมเพราะจะให้พอลิแลคติกแอซิดที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง



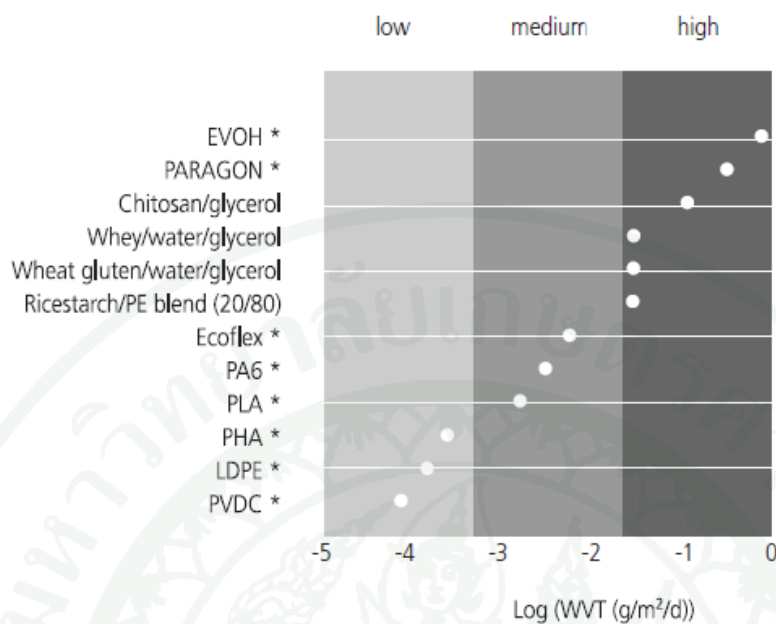
ภาพที่ 3 การสังเคราะห์พอลิแลคติกแอซิด

ที่มา: Lim et al. (2008)

2. สมบัติของพอลิแลคติกแอซิด

พอลิแลคติกแอซิดเป็นเทอร์โมพลาสติกสามารถนำกลับมาหลอมใหม่ได้ พอลิแลคติกแอซิดมีความใสคล้ายพอลิสไตรีน และอยู่ในกลุ่มของพอลิเอสเทอร์จึงมีความเป็น hydrophobic และมีความสามารถในการต้านทานน้ำ ความสามารถในการกีดขวางการแพร่ผ่านของ ไขมันของพอลิแลคติกแอซิดเทียบกับพอลิเมอร์ชนิดอื่นแสดงดังภาพที่ 4 พอลิแลคติกแอซิดมีความสามารถในการป้องกันกลิ่นใกล้เคียงกับพอลิเอทิลีนเทรฟทาเลต (Garlotta1, 2002) ในขณะเดียวกันยอมให้ก๊าซออกซิเจนบางส่วนผ่านเข้าออกได้ (Otles and Otles, 2004)

พอลิแลคติกแอซิด เป็นเทอร์โมพลาสติกที่มีความต้านทานแรงดึงและ โมดูลัสที่สูง ทำให้มีความแข็งแรงค่อนข้างมาก สามารถผลิตและขึ้นรูปได้ง่าย (Havie, 2008) พอลิแลคติกแอซิดที่เป็น โสโมพอลิเมอร์ จะมีอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (glasstransition temperature, T_g) ประมาณ 55 องศาเซลเซียส และจะมีอุณหภูมิหลอมเหลว (melting temperature, T_m) อยู่ที่ประมาณ 175 องศาเซลเซียส (Otles and Otles, 2004) ซึ่งสามารถทำการปิดผนึกด้วยความร้อนได้

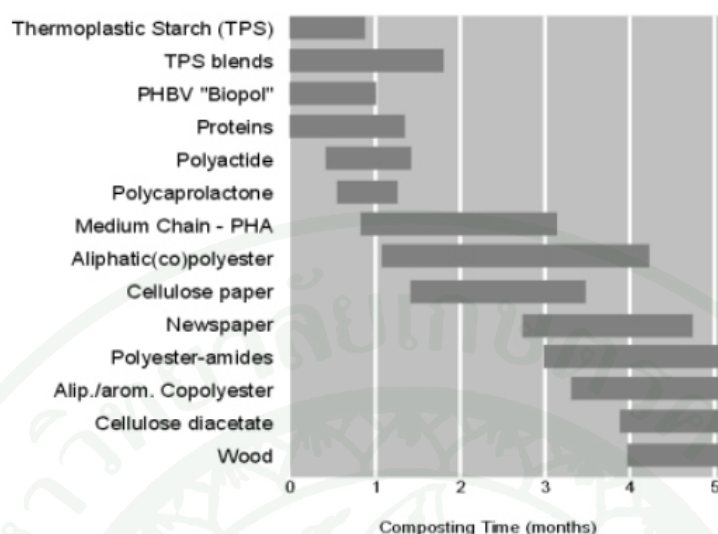


ภาพที่ 4 เปรียบเทียบการแพร่ผ่านของไอน้ำของฟิล์มพอลิแลคติกแอซิดกับพอลิเมอร์ชนิดอื่น

ที่มา: Otles and Otles (2004)

3. การย่อยสลายของพอลิแลคติกแอซิด

การย่อยสลายของพอลิแลคติกแอซิด สามารถเกิดขึ้นตามธรรมชาติได้โดยปฏิกิริยาพื้นฐานของกระบวนการไฮโดรไลซิสของพันธะเอสเทอร์ สามารถย่อยสลายได้ทั้งในระบบที่มีเอนไซม์และไม่มีเอนไซม์ เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา (Chen *et al.*, 2003) อัตราของการย่อยสลายขึ้นอยู่กับ มวลโมเลกุล โครงสร้างของผลึก ขนาดและรูปร่างของวัสดุ อัตราส่วนของไอโซเมอร์และอุณหภูมิในการไฮโดรไลซิส (Lorenzo, 2004) โดยปกติระยะเวลาในการย่อยสลายของพอลิแลคติกแอซิดจะมีระยะเวลาไม่เกิน 6 เดือน ดังภาพที่ 5 แต่การย่อยสลายของพอลิเมอร์ย่อยสลายได้ทางชีวภาพบางชนิดอาจใช้เวลาประมาณ 6 เดือนถึง 2 ปี ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับพอลิเมอร์ที่ผลิตมาจากปิโตรเลียมที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบัน ต้องใช้เวลาในการย่อยสลาย 500-1,000 ปี (Garlotta, 2002)



ภาพที่ 5 เปรียบเทียบเวลาการย่อยสลายของฟิล์มพอลิแลคติกแอซิดกับพอลิเมอร์ชนิดอื่น

ที่มา: Otles and Otles (2004)

4. การประยุกต์ใช้พอลิแลคติกแอซิดและพอลิเมอร์ย่อยสลายได้ทางชีวภาพเพื่อการปรับปรุงสมบัติของบรรจุภัณฑ์กระดาษ

Gallstedt et al. (2005) นำ ไคโตซาน (chitosan), whey protein และ wheat gluten มาเคลือบบนกระดาษkraft (kraft paper) โดย applicator coated sheet, compress moulding และ curtain coating พบว่า กระดาษเคลือบไคโตซานด้วยวิธี applicator coated sheet มีสมบัติเชิงกลและสมบัติการกีดขวางการแพร่ผ่านของก๊าซออกซิเจนดีกว่า กระดาษเคลือบ whey protein และ wheat gluten แต่กระดาษเคลือบ wheat gluten ด้วยวิธี compress moulding และ กระดาษเคลือบไคโตซานด้วยวิธี curtain coating สามารถกีดขวางการแพร่ผ่านของก๊าซออกซิเจนได้ดีกว่ากระดาษที่ผ่านการเคลือบด้วยวิธี applicator coated sheet

Kjellgern et al. (2006) นำไคโตซาน (chitosan) มาเคลือบบนกระดาษ greaseproof paper ด้วยลูกกลิ้ง metered size press พบว่า กระดาษสามารถเพิ่มสมบัติการกีดขวางการแพร่ผ่านของก๊าซออกซิเจนได้ดีที่น้ำหนักของสารเคลือบเท่ากับ 2.4 กรัมต่อตารางเมตร และกระดาษมีสมบัติการกีดขวางการแพร่ผ่านของก๊าซไนโตรเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้ดีที่น้ำหนักของสารเคลือบเท่ากับ 5.2 กรัมต่อตารางเมตร นอกจากนี้พบว่า ค่าความต้านทานต่อแรงดึงของกระดาษเคลือบไม่

แตกต่างกับกระดาษที่ไม่ได้เคลือบ กระดาษ greaseproof paper เคลือบด้วยไคโตซานสามารถ
ต้านทานไขมันได้ดี แต่ไม่สามารถต้านทานน้ำได้

Rhim et al. (2006) นำ alginate และ soy protein มาเคลือบบนกระดาษแข็ง ด้วยแท่งเคลือบ
Mayer rod พบว่า กระดาษที่เคลือบด้วย soy protein สามารถต้านทานการดูดซึมน้ำได้ดีกว่ากระดาษ
ที่เคลือบด้วย alginate แต่เมื่อนำกระดาษที่เคลือบด้วย alginate ไปทำหรีตมันท์ด้วย แคลเซียมคลอ
ไรด์พบว่าสามารถต้านทานการดูดซึมน้ำได้เทียบเท่ากับกระดาษเคลือบด้วย soy protein แต่อย่างไร
ก็ตามทั้งกระดาษที่เคลือบด้วย alginate และ soy protein มีค่าความต้านทานแรงดึงลดลง และมีค่า
ความต้านทานแรงกดงแหวนไม่แตกต่างกับกระดาษที่ไม่ได้เคลือบ

Andersson (2008) ได้เสนอสรุปบทความวิจัยที่มีการนำพอลิเมอร์ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ
มาปรับปรุงผิวหน้าของกระดาษแข็งเพื่อปรับปรุงสมบัติของกระดาษแข็งให้เหมาะสมกับการบรรจุ
อาหาร โดยได้สรุปประเภทสารเคลือบที่มีการใช้ได้แก่ กลุ่มสตาร์ช, กลุ่มเซลลูโลส, xylan,
chitosan, alginate, wheat gluten, whey proteins และ zien ซึ่งถูกนำมาเคลือบผิวหน้ากระดาษแข็ง
เพื่อเพิ่มสมบัติการกีดขวางการและแพร่ผ่านของก๊าซออกซิเจน ในขณะที่ chitosan มีการนำมา
เคลือบกระดาษแข็งเพื่อเพิ่มสมบัติความต้านทานน้ำมันและด้านการเจริญของจุลินทรีย์ ส่วน
กระดาษแข็งที่เคลือบผิวหน้าด้วยพอลิคาร์โพรแลคโตน, พอลิแลคติกแอซิด และพอลิไฮดรอก
ซิลอัลคาโนเอท สามารถเพิ่มสมบัติการต้านทานน้ำได้ นอกจากนั้นการเพิ่มสมบัติการกีดขวางใน
การแพร่ผ่านของไอน้ำและก๊าซออกซิเจน ทำได้ด้วยการเติมอนุภาคนาโนเช่น silicates, metal
oxides, polymers และ zeolites

Butkinaree et al. (2008) ได้ทำการปรับปรุงสมบัติการต้านทานน้ำและน้ำมันของกระดาษ
แข็งด้วยการนำ hydrophobic starch ผสมกับกรดสเตียริก (stearic acid) แล้วเคลือบลงบนกระดาษ
ด้วยแท่งเคลือบของเครื่องเคลือบฟิล์ม พบว่ากระดาษแข็งที่ถูกเคลือบสามารถลดการดูดซึมน้ำ
และน้ำมันได้ แต่อย่างไรก็ตาม พบว่าการต้านทานน้ำและน้ำมันขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของกรดสเตีย
ริกในสารละลาย

Sothronvit (2009) ได้นำ hydroxypropyl methylcellulose ผสมกับ กลีเซอรอล (glycerol) และจีฟี่มาเคลือบบนกระดาษด้วยแท่งเคลือบ wire wound bar พบว่า กระดาษที่ถูกเคลือบมีค่าความต้านทานการพับเพิ่มขึ้นและเพิ่มสมบัติการกีดขวางการแพร่ผ่านไอน้ำได้ดีขึ้น แต่พบว่าค่าความต้านทานแรงดึงลดลง และจะลดลงมากขึ้นเมื่อผสมกลีเซอรอลมากขึ้น

Franco et al. (2010) ต้องการปรับปรุงสมบัติของกระดาษกราฟท์ด้วยการเคลือบไคโตซาน (chitosan) โดยใช้แท่งเคลือบ wire wound bar พบว่ากระดาษเคลือบไคโตซานมีค่าการแพร่ผ่านของไอน้ำลดลงร้อยละ 43 และค่าการดูดซึมน้ำของกระดาษลดลงร้อยละ 35 เมื่อนำไคโตซานผสม palmitic acid มาเคลือบบนกระดาษพบว่า สามารถลดค่าการแพร่ผ่านของไอน้ำและการดูดซึมน้ำลงอีกคิดเป็นร้อยละ 51 และ 41 ตามลำดับ และสามารถปรับปรุงสมบัติการกีดขวางการแพร่ผ่านของก๊าซได้ดีขึ้น 11 เท่า แต่อย่างไรก็ตามพบว่า ค่าความต้านทานแรงดึงของกระดาษเคลือบด้วยไคโตซานลดลง แต่ค่าความต้านทานต่อการฉีกขาดไม่มีความแตกต่าง เมื่อเปรียบเทียบกับกระดาษที่ไม่ได้เคลือบ

Guillaume et al. (2010) ใช้ wheat gluten เคลือบบนผิวกระดาษเพื่อปรับปรุงสมบัติของบรรจุภัณฑ์อาหาร โดยนำ wheat gluten มาเคลือบบนกระดาษ 2 แบบ คือกระดาษที่ผ่านการเคลือบด้วยแคลเซียมคาร์บอเนตกับสตาร์ชมาแล้ว และกระดาษที่ไม่ได้ผ่านการเคลือบ ใช้วิธีเคลือบกระดาษด้วยเครื่องมือ thin film chromatography applicator พบว่า wheat gluten สามารถเคลือบบนผิวหน้าของกระดาษที่ไม่ผ่านการเคลือบได้ดีกว่า จึงสามารถเพิ่มสมบัติการกีดขวางการแพร่ผ่านของไอน้ำ ก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้ดีกว่ากระดาษที่ผ่านการเคลือบด้วยแคลเซียมคาร์บอเนตกับสตาร์ชมาแล้ว แต่พบว่ากระดาษที่เคลือบด้วย wheat gluten ทั้งสองแบบไม่มีความแตกต่างกันในเรื่องของการดูดซึมน้ำและน้ำมัน

Han et al. (2010) นำ polyvinyl butyrol (PVB), zein และจีฟี่ มาเคลือบโดยใช้แปรงทาสารละลายลงบนกระดาษแข็ง เพื่อปรับปรุงสมบัติความต้านทานน้ำของกระดาษแข็ง ผลจากการทดลองพบว่า กระดาษที่เคลือบด้วยสารละลายผสม polyvinyl butyrol (PVB) กับ zein แล้วเคลือบจีฟี่เป็นชั้นที่สอง กระดาษที่เคลือบด้วยจีฟี่เพียงอย่างเดียว และกระดาษที่เคลือบด้วยสารละลายผสม polyvinyl butyrol (PVB) กับ zein เปรียบเทียบกับกระดาษแข็งที่ไม่เคลือบ สามารถลดค่าการแพร่ผ่านของไอน้ำคิดเป็นร้อยละ 92, 87 และ 77 ตามลำดับ

Khwalidia et al. (2011) ได้ปรับปรุงสมบัติเชิงกลและสมบัติการกีดขวางไอน้ำของกระดาษได้นำพอลิเมอร์ย่อยสลายได้ ได้แก่ sodium caseinate, sodium alginate, hydroxypropyl methyl cellulose และไคโตซาน (chitosan) มาทดลองเคลือบบนกระดาษด้วยแท่งเคลือบ wire wound bar พบว่า กระดาษที่ถูกเคลือบมีค่าความต้านทานแรงดึงสูงที่สุดและยอมให้ไอน้ำแพร่ผ่านน้อยที่สุดคือ กระดาษที่มีน้ำหนักของสารเคลือบมากที่สุดและมีการผสมกลีเซอรอล (glycerol) ลงในสารละลาย ในช่วงร้อยละ 18.72 - 26.11 ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของสารเคลือบด้วย เช่น กระดาษที่เคลือบด้วย hydroxypropylmethylcellulose ให้ค่าความต้านทานแรงดึงสูงที่สุด และ กระดาษที่เคลือบด้วย sodium caseinate ให้ค่าการแพร่ผ่านของไอน้ำต่ำที่สุดเมื่อเทียบกับกระดาษที่เคลือบด้วยพอลิเมอร์ตัวอื่น

สารละลายพอลิแลคติกแอซิดสามารถนำมาเคลือบกระดาษเพื่อปรับปรุงสมบัติของกระดาษด้านการต้านทานต่อความชื้นและไอน้ำ ทั้งนี้เพื่อทดแทนการเคลือบพอลิเมอร์ที่ผลิตได้จากปิโตรเลียม เช่น พอลิเอทิลีน และ พอลิพรอไพรีน เป็นต้น เนื่องจากพอลิแลคติกแอซิด เป็นพอลิเมอร์ชีวฐานสามารถผลิตได้จากพืช สร้างใหม่ทดแทนและสามารถย่อยสลายทางชีวภาพได้ นอกจากนี้พอลิแลคติกแอซิดยังสามารถปิดผนึกได้ด้วยความร้อน เพราะเป็นเทอร์โมพลาสติกและมีความปลอดภัยต่อการสัมผัสกับอาหาร จึงมีการนำมาใช้เคลือบผิวกระดาษเพื่อการปรับปรุงสมบัติของกระดาษให้เหมาะสมกับการบรรจุผลิตภัณฑ์อาหารที่มีความชื้น

จากงานวิจัยของ Rhim et al. (2007) ได้นำสารละลายพอลิแลคติกแอซิดในคลอโรฟอร์มมาใช้ในการเคลือบผิวหน้ากระดาษทำผิวกล่องลูกฟูกเพื่อปรับปรุงคุณภาพกระดาษให้ต้านทานต่อความชื้น ใช้วิธีการเคลือบแบบลูกกลิ้งเป็นตัวกำหนดปริมาณสารเคลือบ (metering rod) เพื่อใช้ในการบรรจุผักและผลไม้ ผลที่ได้คือเมื่อกระดาษทำผิวกล่องลูกฟูก ผ่านการเคลือบโดยพอลิแลคติกแอซิดแล้ว ทำให้สามารถต้านทานการดูดซึมน้ำและกีดขวางการแพร่ผ่านไอน้ำได้ดีขึ้น แต่อย่างไรก็ตามพบว่าค่าความต้านทานแรงดึงของกระดาษลดลงเมื่อความเข้มข้นของสารละลายพอลิแลคติกแอซิดเพิ่มมากขึ้น

Rhim and Kim (2009) ได้นำพอลิแลคติกแอซิดมาเคลือบแก้วกระดาษแบบใช้ครั้งเดียวทิ้งเพื่อเป็นทางเลือกทดแทนพอลิเอทิลีน วิธีการเคลือบแก้วกระดาษคือการใช้แท่งแก้วเป็นตัวเคลือบกระดาษสารละลายพอลิแลคติกแอซิดลงบนกระดาษ ผลที่ได้คือ แก้วกระดาษที่เคลือบออกมาแล้วชั้นเคลือบที่เป็นพอลิแลคติกแอซิดมีความใสและเรียบเหมือนพอลิเอทิลีน มีค่าความต้านทานต่อ

แรงดึงที่เพิ่มขึ้น รวมทั้งสามารถปรับปรุงคุณสมบัติของกระดาษด้านการต้านทานน้ำและกีดขวางการแพร่ผ่านไอน้ำได้ดีมาก นอกจากนี้ให้ผลค่าการปิดผนึกด้วยความร้อนที่แข็งแรง เมื่อสารละลายพอลิแลคติกแอซิดมีความเข้มข้นมากกว่าร้อยละ 1 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร และเมื่อวัดค่าความต้านทานแรงดึงของกระดาษขณะเปียกพบว่า แก้วกระดาษที่เคลือบด้วยพอลิแลคติกแอซิดที่มีความเข้มข้นร้อยละ 3 โดยน้ำหนักต่อปริมาตรให้ค่าความต้านทานแรงดึงเทียบเท่าหรือมากกว่ากระดาษที่เคลือบด้วยพอลิเอทิลีน

Lahtinen et al. (2009) นำพอลิแลคติกแอซิดเคลือบบนกระดาษด้วยวิธี extrusion โดยเพื่อปรับปรุงสมบัติการกีดขวางการแพร่ผ่านของไอน้ำ ด้วยการนำกระดาษที่เคลือบด้วยพอลิแลคติกแอซิดแล้วไปอบที่อุณหภูมิ 100 – 150 องศาเซลเซียส พบว่ากระดาษเคลือบด้วยพอลิแลคติกแอซิดที่ผ่านการอบที่ 130 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 40 นาที ให้ผลการแพร่ผ่านของไอน้ำต่ำที่สุด แต่พบว่า ต้องเพิ่มอุณหภูมิให้สูงขึ้นเพื่อปิดผนึกด้วยความร้อน เนื่องมาจากการอบกระดาษเคลือบทำให้เกิด โครงร่างผลึก และเกิดการจัดเรียงตัวใหม่ให้ชิดกันของ โครงร่างอสัณฐานของพอลิแลคติกแอซิด

การเคลือบกระดาษด้วยพอลิเมอร์ชีวฐานที่เป็นกลุ่มพอลิเอสเทอร์ เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติการต้านทานน้ำของกระดาษนั้น นอกจากจะใช้พอลิเมอร์ที่สังเคราะห์ได้จากมอนอเมอร์ชีวฐาน เช่น พอลิแลคติกแอซิดแล้ว ยังมีการทดลองใช้พอลิเมอร์ กลุ่มที่ผลิตโดยจุลชีพธรรมชาติหรือมีการดัดแปลงพันธุกรรม เช่น polyhydroxyalkanoates เพื่อเพิ่มความต้านทานการดูดซึมน้ำและสมบัติการกีดขวางในกระดาษสำหรับเป็นทางเลือกในบรรจุภัณฑ์อาหาร Manangan และ Shawaphun (2010) ได้ทดลองนำกระดาษขานอ้อย ไปจุ่มเคลือบสารละลายพอลิแลคติกแอซิด และ สารละลายพอลิไฮดรอกซีบิวทิเรต (poly-3-hydroxybutyrate) พบว่าสารเคลือบทั้งสองให้ค่าความเรียบของกระดาษขานอ้อยที่เรียบขึ้น และสามารถลดการซึมผ่านของอากาศได้ใกล้เคียงกัน แต่พบว่ากระดาษขานอ้อยที่เคลือบด้วยสารละลายพอลิแลคติกแอซิดให้ค่าความต้านทานการดูดซึมน้ำและน้ำมันได้ดีกว่าเล็กน้อย

ทั้งนี้พบว่าเมื่อนำพอลิแลคติกแอซิดมาเคลือบกระดาษเพียงอย่างเดียวนั้น ส่งผลให้ความแข็งแรงของกระดาษลดลง เนื่องจากสมบัติข้อด้อยของพอลิแลคติกแอซิดคือความเปราะและไม่ยืดหยุ่น ดังนั้นจึงพบว่ามีผลงานวิจัยหลายชิ้นที่ต้องการปรับปรุงสมบัติเชิงกลด้านความสามารถใน

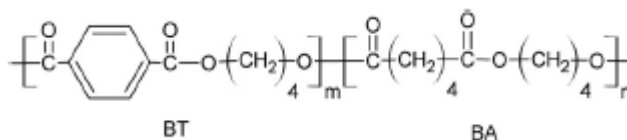
การรับแรงกดและเพิ่มความยืดหยุ่นให้กับพอลิแลคติกแอซิด ด้วยการใช้พอลิเมอร์ชนิดอื่นที่มีสมบัติใกล้เคียงกับพอลิแลคติกแอซิดแต่มีความยืดหยุ่นสูง และมีความเข้ากันได้กับพอลิแลคติกแอซิด เช่น พอลิบิวทิลีนอะดิเพต-โค-เทเรฟทาเลต มาใช้ในการเคลือบกระดาษหรือมาผสมกับพอลิแลคติกแอซิดก่อนการเคลือบ (Zhang et al., 2006; Lee et al., 2007; Gu et al., 2008; Ko et al., 2009; Signori et al., 2009; Zhang et al., 2009; Wang et al., 2012)

พอลิบิวทิลีนอะดิเพต-โค-เทเรฟทาเลต

พอลิเมอร์ชนิด aliphatic-co-aromatic co-polyester ที่มาจากอุตสาหกรรมปิโตรเคมีแต่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ หรือชื่อทางการค้าคือ อีโคเฟล็กซ์ (Ecoflex) จากบริษัท BASF Crop. ซึ่งปัจจุบันมีจำหน่ายและใช้ในอุตสาหกรรม โดยภาพที่ 6 แสดงโครงสร้างทางเคมีของพอลิบิวทิลีนอะดิเพต-โค-เทเรฟทาเลต **poly(butylene adipate-co-terephthalate)**

1. การสังเคราะห์พอลิบิวทิลีนอะดิเพต-โค-เทเรฟทาเลต

พอลิบิวทิลีนอะดิเพต-โค-เทเรฟทาเลต คือ โคพอลิเมอร์สายโซ่ตรงที่เกิดจากไดเมอร์สองชนิด ได้แก่ BT ส่วนที่ให้ความแข็งแรงประกอบด้วยมอนอเมอร์ 1,4 butanediol และ terephthalic acid และ BA ส่วนที่ให้ความยืดหยุ่นประกอบด้วยมอนอเมอร์ 1,4 butanediol และ adipic acid (Auras et al., 2010) การสังเคราะห์พอลิบิวทิลีนอะดิเพต-โค-เทเรฟทาเลต สามารถเตรียมจาก 1,4-butanediol (BDO), dimethylterephthalate (DMT) และ adipic acid มาทำปฏิกิริยา polycondensation กัน โดยมี tetrabutylorthotitanate (TBOT) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา (Zhang et al., 2009)



ภาพที่ 6 โครงสร้างทางเคมีของพอลิบิวทิลีนอะดิเพต-โค-เทเรฟทาเลต

ที่มา: Auras et al. (2010)

2. สมบัติของพอลิบิวทิลีนอะดิเพท-โค-เทเรฟทาเลท

พอลิบิวทิลีนอะดิเพท-โค-เทเรฟทาเลทเป็นเทอร์โมพลาสติกสามารถนำกลับมาหลอมใหม่ได้ มีสมบัติทางกายภาพและเชิงกลคล้ายกับ LDPE จัดอยู่ในกลุ่มของพอลิเอสเตอร์จึงมีความเป็น hydrophobic คล้ายกับพอลิแลคติกแอซิด มีสมบัติการสกัดกั้นการซึมผ่านของไอน้ำน้อยกว่าพอลิแลคติกแอซิดเล็กน้อย ซึ่งได้แสดงก่อนหน้านี้นี้ในภาพที่ 4 ในขณะเดียวกันยอมให้ก๊าซออกซิเจนซึมผ่านเข้าออกได้ดี (Otles and Otles, 2004) แต่อย่างไรก็ตามพอลิบิวทิลีนอะดิเพท-โค-เทเรฟทาเลท มีสมบัติเชิงกล ด้านความยืดหยุ่นและทนทานต่อแรงกระแทกได้ดีมาก (Lee et al., 2007) พอลิบิวทิลีนอะดิเพท-โค-เทเรฟทาเลท มีอุณหภูมิแปรผ่านสภาพแก้ว (glasstransition temperature, Tg) ประมาณ -29 องศาเซลเซียส และมีอุณหภูมิหลอมเหลว (melting temperature, Tm) อยู่ที่ประมาณ 120 องศาเซลเซียส (Otles and Otles, 2004) ซึ่งทำให้สามารถทำการปิดผนึกด้วยความร้อนได้

3. การย่อยสลายของพอลิบิวทิลีนอะดิเพท-โค-เทเรฟทาเลท

การย่อยสลายของพอลิบิวทิลีนอะดิเพท-โค-เทเรฟทาเลทสามารถเกิดขึ้นตามธรรมชาติได้โดยปฏิกิริยาพื้นฐานของกระบวนการไฮโดรไลซิสของพันธะเอสเตอร์ สามารถย่อยสลายได้ภายในในสองถึงสามสัปดาห์ในระบบที่มีเอนไซม์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา (Auras et al, 2010 and Averous et al., 2009) อัตราของการย่อยสลายขึ้นอยู่กับมวลโมเลกุล โครงสร้าง ขนาดและรูปร่างของวัสดุ สภาพแวดล้อม ความชื้น ความเป็นกรดด่าง และอุณหภูมิ โดยทั่วไประยะเวลาในการย่อยสลายของพอลิบิวทิลีนอะดิเพท-โค-เทเรฟทาเลท จะมีระยะเวลายาวนานกว่าพอลิแลคติกแอซิดซึ่งเป็น aliphatic polyester ประมาณ 4-6 เดือน ซึ่งได้แสดงก่อนหน้านี้นี้ในภาพที่ 5 เนื่องจากพอลิบิวทิลีนอะดิเพท-โค-เทเรฟทาเลทมีโครงสร้างที่เป็น aliphatic-co-aromatic co-polyester โดยโครงสร้างที่เป็น aromatic จะถูกย่อยสลายได้ยากกว่า

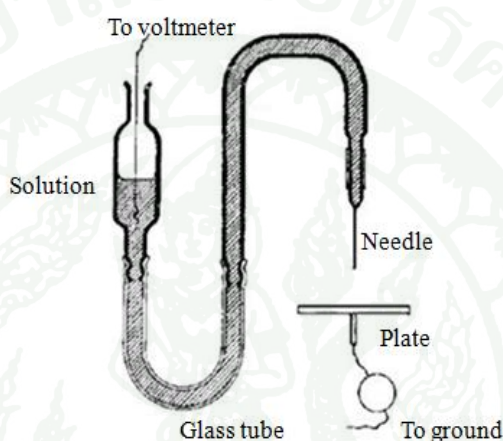
4. การผสมพอลิบิวทิลีนอะดิเพต-โค-เทเรฟทาเลทกับพอลิแลคติกแอซิด

เนื่องด้วยพอลิแลคติกแอซิดมีสมบัติข้อด้อยคือ มีความยืดหยุ่นน้อย เปราะ และไม่ทนทาน ต่อแรงกระแทก พอลิบิวทิลีนอะดิเพต-โค-เทเรฟทาเลทจึงเป็นทางเลือกในการปรับปรุงสมบัติเชิงกลเหล่านี้ โดยพอลิบิวทิลีนอะดิเพต-โค-เทเรฟทาเลทเป็นพอลิเอสเทอร์และสามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพเช่นเดียวกับพอลิแลคติกแอซิด และสามารถเข้ากันได้ โดยการผสมยังคงเป็นวัสดุที่สามารถย่อยสลายได้ตามธรรมชาติ นอกจากนั้นพอลิบิวทิลีนอะดิเพต-โค-เทเรฟทาเลทยังมีสมบัติการสกัดกั้นการซึมผ่านของไอน้ำและก๊าซออกซิเจนใกล้เคียงกับพอลิแลคติกแอซิด (Otles and Otles, 2004) จึงมีความเป็นไปได้ที่จะนำมาผสมกันเพื่อปรับปรุงสมบัติของพอลิแลคติกแอซิด (Zhang et al., 2006; Lee et al., 2007; Gu et al., 2008; Zhang et al., 2009; Ko et al., 2009; Signori et al., 2009 and Wang et al., 2012) งานวิจัยส่วนใหญ่นิยมนำมาผสมด้วยกระบวนการเอ็กทรูชันเป็นฟิล์ม เพราะพอลิบิวทิลีนอะดิเพต-โค-เทเรฟทาเลทมีอุณหภูมิหลอมเหลวที่ต่ำกว่าพอลิแลคติกแอซิด จึงช่วยลดอุณหภูมิในการหลอมเหลวลง แต่ก็พบข้อเสียคือเมื่อผสมพอลิบิวทิลีนอะดิเพต-โค-เทเรฟทาเลทมากขึ้น พบว่าแม้จะทำให้ฟิล์มนั้นดึงยืดได้มากขึ้น แต่ก็ทำให้ความแข็งแรงของฟิล์มนั้นลดลงเช่นกัน (Zhang et al., 2009)

อิเล็กโตรสเปรย์

อิเล็กโตรสเปรย์ (Electrospraying) คือกระบวนการที่เกิดจากการให้ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่มีค่าสูงมากกับเข็มโลหะ ทำให้บริเวณเข็มโลหะเกิดเป็นสนามไฟฟ้าที่มีความแรงมาก เมื่อของเหลวไหลผ่านออกจากปลายเข็มโลหะจึงมีลักษณะเป็นหยดของเหลวที่มีประจุอยู่ที่ผิว เมื่อเกิดการระเหยของหยดของเหลว ทำให้หยดของเหลวมีขนาดเล็กลงและประจุที่ผิวเข้าใกล้กันมากขึ้น จึงทำให้แรงจากสนามไฟฟ้าเอาชนะแรงตึงผิวของเหลวได้เกิดการแตกตัวเป็นอนุภาคนาโนขนาดเล็ก ตกลงบนวัสดุรองรับที่เป็นโลหะ บางครั้งเรียกกระบวนการนี้ว่า Electrohydrodynamic atomization (EHDA) หรือ Electrohydrodynamic spraying (EHS) อิเล็กโตรสเปรย์ถูกคิดค้นและตีพิมพ์เป็นครั้งแรกโดยชาวอเมริกา ได้นำเสนอทำการทดลอง โดยใช้เอทานอลไหลผ่านท่อแก้วที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางด้านในเท่ากับ 0.92 มิลลิเมตร ที่แหล่งกำเนิดศักย์ไฟฟ้าความต่างศักย์ให้ขั้วบวกในช่วง 1-5 กิโลโวลต์ และมีระยะห่างจากวัสดุรองรับที่เป็นโลหะขั้วไฟฟ้าลบประมาณ 20 มิลลิเมตร

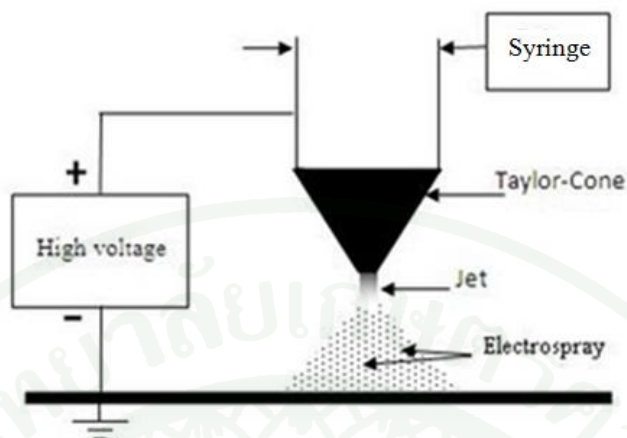
(Zeleny, 1914) ดังแสดงในภาพที่ 7 จากการทดลอง พบว่าเอทานอลที่ไหลผ่านท่อแก้วซึ่งให้ความต่างศักย์สูงนั้นทำให้เกิดอนุภาคนาขนาดเล็กในรูปแบบต่างๆ โดยเรียกวิธีการนี้ว่า อิเล็กโตรสเปร์ย์ โดยรูปทรงของอนุภาคที่แตกต่างกัน เกิดเนื่องจากปัจจัยหลายอย่าง เช่น ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ให้ อัตราการไหลของของเหลว ระยะห่างระหว่างท่อแก้วและวัสดุรองรับที่เป็นโลหะ และคุณสมบัติของสารละลาย



ภาพที่ 7 อุปกรณ์การทดลองของ Zeleny

ที่มา: Zeleny (1914)

ต่อมา Sir Geoffrey Ingram Taylor ชาวอังกฤษได้ศึกษาค่ามุมเริ่มต้นของสารละลายรูปกรวย (cone) ที่ปลายหลอดโลหะที่สามารถทำให้เกิดอิเล็กโตรสเปร์ย์แบบ cone-jet เพื่อที่จะผลิตอนุภาคนาขนาดเล็กที่มีความสม่ำเสมอมากที่สุด พบว่ามุมนั้นต้องมีค่าเท่ากับ 98.6 องศา โดยต่อมาได้เรียกว่า Taylor-cone ดังแสดงในภาพที่ 8 (Taylor, 1964)

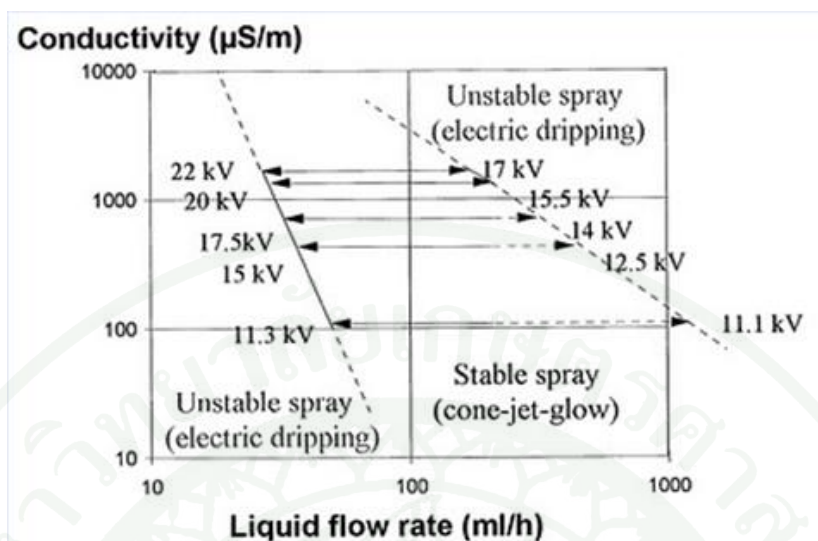


ภาพที่ 8 ค่ำมูมเริ่มต้นของกรวย (cone) ที่สามารถทำให้เกิดอิเล็กโตรสเปรย์แบบ cone-jet

ที่มา: Taylor (1964)

จากนั้นจึงมีการทำการทดลองเพื่อศึกษาความต่างศักย์เริ่มต้นที่สามารถทำให้เกิดอิเล็กโตรสเปรย์แบบ cone-jet ที่มีความสัมพันธ์กับขนาดของหลอดโลหะ แรงตึงผิวของของเหลว ระยะห่างระหว่างหลอดโลหะกับวัสดุรองรับที่เป็นโลหะ โดยทำการทดลองกับของเหลวหลายชนิด เช่น น้ำ บิวทานอล อะซิโตน เอทานอล เป็นต้น โดยใช้หลอดสเตนเลสที่มีรัศมี 225-825 ไมโครเมตร สามารถปรับระยะห่างระหว่างหลอดสเตนเลสและวัสดุรองรับที่เป็นแผ่นโลหะอยู่ในช่วง 0-25 มิลลิเมตร พบว่าเมื่อขนาดของหลอดโลหะเพิ่มขึ้น ระยะห่างระหว่างหลอดโลหะและแผ่นโลหะที่เพิ่มขึ้น และแรงตึงผิวของของเหลวที่มีค่าเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ความต่างศักย์ไฟฟ้าเริ่มต้นที่สามารถทำให้เกิดอิเล็กโตรสเปรย์แบบ cone-jet ต้องมีค่าเพิ่มขึ้นตาม พบว่าความต่างศักย์ไฟฟ้าเริ่มต้นที่สามารถทำให้เกิดอิเล็กโตรสเปรย์แบบ cone-jet มีความสัมพันธ์กับรัศมีของหลอดโลหะ ระยะห่างระหว่างปลายหลอดโลหะกับแผ่นโลหะ และแรงตึงผิว (Smith, 1986) ดังสมการ

ของเหลวที่สามารถทำให้เกิดอิเล็กโตรสเปรย์แบบ cone-jet ในสภาวะบรรยากาศปกติได้นั้น จะต้องมีค่าแรงตึงผิวของของเหลวน้อยกว่า 0.05 N/m และค่าความนำไฟฟ้าน้อยกว่า 0.1 s/m โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ถ้าค่านำไฟฟ้าน้อยยิ่งส่งผลให้ช่วงของการเกิดอิเล็กโตรสเปรย์แบบ cone-jet เพิ่มขึ้นด้วย (Borra et al., 1999) ดังแสดงในภาพที่ 9



ภาพที่ 9 ความสัมพันธ์ของการเกิดอิเล็กโทรสเปรย์แบบ cone-jet ระหว่างความนำไฟฟ้าและอัตราการไหลของของเหลวที่แตกต่างกัน

ที่มา: Borra et al. (1999)

หลังจากนั้นจึงมีการทดลองจัดรูปแบบของ อิเล็กโทรสเปรย์ จากลักษณะรูปร่างของสารละลายที่ปลายหลอดโลหะที่แตกต่างกันออกเป็น 8 รูปแบบ แสดงดังภาพที่ 10 (Laonual, 2006 and Jaworek and Sobczyk, 2008)

แบบที่ 1 microdripping คือขนาดของสารละลายที่ปลายหลอดที่หยดมีขนาดเล็กกว่าขนาดของปลายหลอดโลหะเมื่อให้ความต่างศักย์ ที่มีค่าน้อยและอัตราการไหลของสารละลายต่ำจะเกิดหยดของเหลวขนาดเล็ก

แบบที่ 2 dripping คือขนาดของหยดสารละลายที่ปลายหลอดมีขนาดใหญ่กว่าขนาดของปลายหลอดโลหะ เมื่อเพิ่มอัตราการไหลของสารละลาย โดยให้ความต่างศักย์คงที่จะได้หยดของเหลวที่ใหญ่ขึ้น

แบบที่ 3 spindle คือการเกิดรูปแบบของหยดสารละลายคล้ายวงรีที่ปลายหลอดโลหะ เมื่อเพิ่มความต่างศักย์ไฟฟ้าแต่อัตราการไหลของสารละลายคงที่จากแบบ microdripping

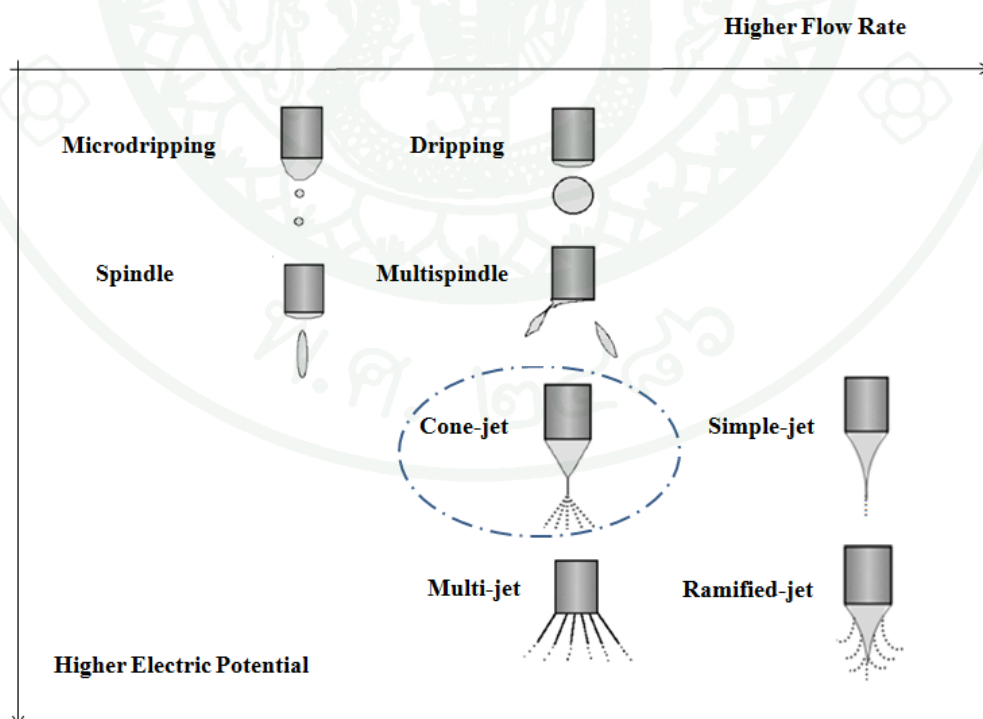
แบบที่ 4 multispindle คือการเกิดรูปแบบของหยดสารละลายคล้ายวงรีพร้อมกันหลายหยดที่ปลายหลอดโลหะ เมื่อเพิ่มอัตราการไหลของสารละลายแต่ความต่างศักย์คงที่เท่ากับแบบ spindle

แบบที่ 5 cone-jet มีลักษณะเฉพาะตัว คือการเกิดรูปแบบของสารละลายที่ปลายหลอดโลหะเป็นรูปกรวยของเทเลอร์ (Taylor-cone) และมีลำของเหลว (jet) ที่ปลายกรวย จากนั้นจะเกิดการแตกตัวเป็นอนุภาคนาโนขนาดเล็ก ที่ปลายสุดของลำของเหลว ลักษณะเด่นของการอิเล็กโตรสเปรย์แบบ cone-jet จะมีการกระจายตัวของอนุภาคที่สม่ำเสมอ มีรูปร่างการเกิดของอนุภาคที่แน่นอนและมีขนาดเล็กมาก การเกิด cone-jet ของสารละลายสามารถทำได้โดยการเพิ่มความต่างศักย์แต่อัตราการไหลของสารละลายคงที่จากแบบ multispindle

แบบที่ 6 simple-jet คือการเกิดสารละลายเป็นรูปกรวยที่ปลายหลอดโลหะ มีลำของเหลวที่ปลายกรวยและหยดของสารละลายขนาดเล็กออกมาจากปลายสุด เมื่อเพิ่มแต่อัตราการไหลของสารละลาย แต่ให้ความต่างศักย์ไฟฟ้าเท่ากับแบบ cone-jet

แบบที่ 7 multi-jet คือการเกิดรูปแบบเป็นลำของเหลวหลายสายที่ปลายหลอดโลหะ เมื่อให้ความต่างศักย์ไฟฟ้าสูงขึ้นแต่อัตราการไหลของสารละลายเท่ากับแบบ cone-jet

แบบที่ 8 ramified-jet คือการเกิดสารละลายเป็นรูปกรวยที่ปลายหลอดโลหะและเกิดเป็นลำของเหลวหลายสายกระจายออกจากกรวยและไม่สามารถกำหนดทิศทางได้ เมื่อให้ความต่างศักย์ที่มีค่ามากแต่อัตราการไหลของสารละลายเท่ากับแบบ simple-jet



ภาพที่ 10 รูปแบบลักษณะรูปร่างของสารละลายที่ปลายหลอดโลหะ

1. ส่วนประกอบของเครื่องอิเล็กโทรสเปรย์ (Electrospraying)

อิเล็กโทรสเปรย์ (Electrospraying) สำหรับระบบพื้นฐาน จัดเป็นระบบที่ไม่มีความซับซ้อน มีค่าใช้จ่ายน้อย และใช้งานได้ง่าย มีส่วนประกอบหลักที่สำคัญเพียง 3 ส่วน (Ford et al., 2009) คือ แหล่งกำเนิดศักย์ไฟฟ้ากำลังสูง (high voltage power supply) หลอดบรรจุสารละลายที่ติดเข็มโลหะ (syringe with needle) และวัสดุรองรับที่เป็นโลหะ (metal collector)

สารละลายที่ใช้ในการทำอิเล็กโทรสเปรย์ (electrospraying) สามารถเลือกใช้สารได้หลากหลายโดยสารที่นำมาใช้จะต้องอยู่ในรูปของเหลวที่มีความใสและหนืดมี 2 วิธี (Stranger et al., 2005) ได้แก่

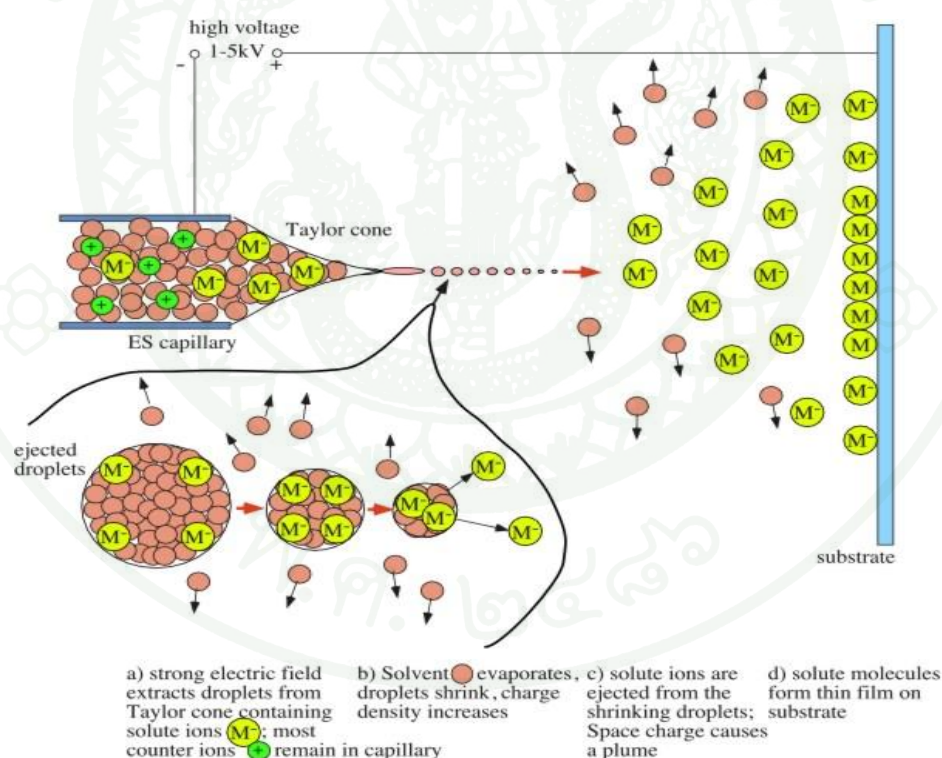
อิเล็กโทรสเปรย์แบบใช้ตัวทำละลาย (solvent used for electrospraying) ด้วยการเตรียมสารละลายที่ประกอบด้วยตัวถูกละลาย ได้แก่ พอลิเมอร์สังเคราะห์ และ พอลิเมอร์ชีวฐาน (biopolymer) และตัวทำละลาย แล้วบรรจุลงในหลอดบรรจุสารละลายที่ติดเข็มโลหะ

อิเล็กโทรสเปรย์แบบหลอมละลาย (melt electrospraying) เลือกใช้พอลิเมอร์ที่สามารถหลอมเหลวได้ (thermoplastic polymer) เพื่อกำจัดการใช้ตัวทำละลาย โดยเฉพาะตัวทำละลายที่เป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตและสิ่งแวดล้อม โดยใช้ลำแสงเลเซอร์เป็นตัวให้ความร้อนโดยตรงกับพอลิเมอร์ (Lim et al., 2008) หรือเพิ่มอุปกรณ์ทำความร้อนที่บริเวณหลอดบรรจุสารละลาย

2. กลไกการเกิดอนุภาคขนาดเล็กโดยวิธีอิเล็กโทรสเปรย์ (Electrospraying)

เมื่อยังไม่ให้ศักย์ไฟฟ้าสูงแก่ระบบ สารละลายจำนวนหนึ่งจะรวมตัวกันเป็นหยดรูปร่างครึ่งทรงกลมที่บริเวณปลายเข็มโลหะอันเป็นผลเนื่องมาจากแรงตึงผิว (surface tension) แต่เมื่อให้ความต่างศักย์ที่มีค่าสูงจะทำให้เกิดสนามไฟฟ้าครอบคลุมส่วนปลายของเข็มโลหะและมีประจุเกิดขึ้นที่ผิวของสารละลาย จึงเกิดแรงผลัทางไฟฟ้าสถิต (electrostatic repulsion) ขึ้นในทิศตรงข้ามกับแรงตึงผิว ดังนั้น ถ้าสนามไฟฟ้ามีค่ามากพอที่จะทำให้เกิดแรงผลัมากกว่าแรงตึงผิว จะส่งผลให้รูปร่าง

ครึ่งทรงกลมของสารละลายที่อยู่ปลายเข็มยึดออกเป็นรูปร่างทรงกรวยที่เรียกว่า “กรวยของเทเลอร์” (Taylor cone) (Jaworek and Sobczyk, 2008) และเมื่อสนามไฟฟ้าที่ให้แก่ระบบมีค่ามากขึ้น จนกระทั่งถึงค่าวิกฤตค่าหนึ่งจะเกิดแรงขับเคลื่อนให้สารละลายพุ่งออกมาเป็นอนุภาคนาขนาดเล็กรูปทรงต่างๆ เช่น เป็นเม็ด รูปทรงต่างๆ หรือเส้นใยสั้น ต่อมาขนาดของอนุภาคสารละลายนี้จะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กลงถึงระดับนาโนเมตร แล้วตกลงบนวัสดุรองรับในลักษณะต่างๆ เมื่อสะสมเพิ่มมากขึ้นจะอยู่ในรูปของแผ่นฟิล์มบางๆ ดังภาพที่ 11 กลไกเหล่านี้เกิดจาก สารละลายถูกเหนี่ยวนำให้เกิดประจุที่ผิวของสารละลาย และด้วยสนามไฟฟ้าภายนอกที่เกิดจากความต่างศักย์ระหว่างปลายเข็มถึงวัสดุรองรับที่เป็นตัวนำ จึงส่งผลให้เกิดประจุภายในอนุภาคนั้น ด้วยเหตุผลดังกล่าวนี้ จึงเกิดแรงที่ไม่สมดุล ทำให้อนุภาคที่เกิดขึ้นมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่เล็กลงอย่างมากและประกอบกับการระเหยออกของตัวทำละลาย ในที่สุดเกิดอนุภาคที่มีลักษณะแตกต่างกันที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กในระดับนาโนเมตร (Schlaf, 2009)



ภาพที่ 11 กลไกการเกิดอนุภาคนาขนาดเล็กโดยวิธีอิเล็กโทรสเปรย์ (electrospraying)

ที่มา: Schlaf (2009)

3. ปัจจัยสำคัญที่ทำให้เกิดผลกระทบต่อลักษณะและขนาดของอนุภาค (Bhardwaj and Kundu, 2010)

3.1 ตัวแปรด้านสารละลาย (solution parameters) สมบัติของสารละลายเป็นตัวแปรที่ส่งผลต่อการประดิษฐ์อนุภาคอย่างมาก เพราะสารละลายที่สามารถนำมาทำอิเล็กโตรสเปรย์ได้จะต้องมีความหนืดและใส

3.1.1 ความเข้มข้นของสารละลาย (solution concentration) ความเข้มข้นของสารละลายที่นำมาใช้จะส่งผลต่อขนาดและรูปร่างของอนุภาค เมื่อความเข้มข้นของสารละลายต่ำจะส่งผลให้สารละลายอิเล็กโตรสเปรย์เป็นอนุภาค แต่เมื่อความเข้มข้นของสารละลายมีค่าสูงจะส่งผลให้เกิดเป็นเส้นใยมากกว่า และขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของเส้นใยยิ่งเพิ่มขึ้น เมื่อความเข้มข้นของสารละลายเพิ่มขึ้น

3.1.2 มวลโมเลกุล (molecular weight) มวล โมเลกุลของพอลิเมอร์เป็ปัจจัยที่สำคัญต่อการเกิดลักษณะของอนุภาค เมื่อมวลโมเลกุลต่ำจะส่งผลกับความหนืดของสารละลายที่ลดลงทำให้ง่ายต่อการเกิดอนุภาค และจะส่งผลให้ก่อเป็นเส้นใยได้เมื่อมวล โมเลกุลสูงขึ้นแม้ว่าสารละลายจะมีความเข้มข้นต่ำ

3.1.3 ความข้นหนืดของสารละลาย (viscosity) สารละลายที่มีความข้นหนืดต่ำจะส่งผลให้เกิดอิเล็กโตรสเปรย์ได้ง่ายและเกิดเป็นอนุภาคสุดท้ายที่แท่นรองรับ แต่เมื่อสารละลายมีความข้นหนืดที่เหมาะสมจะทำให้เกิดเป็นเส้นใยที่ต่อเนื่องและสม่ำเสมอแทนที่แท่นรองรับ และ ความข้นหนืดที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลขนาดของเส้นผ่าศูนย์กลางของเส้นใยจะใหญ่ขึ้น แต่สารละลายที่มีความข้นหนืดสูงเกินไปจะทำให้ไม่สามารถฉีดสารละลายออกมาได้

3.1.4 แรงตึงผิว (surface tension) แรงตึงผิวของสารละลายมีบทบาทต่อการเกิด

อนุภาคมาก เพราะแรงของค่าศักย์ไฟฟ้าที่ให้ต่อสารละลายจำเป็นจะต้องเอาชนะแรงตึงผิวให้ได้ แต่ถ้าสารละลายที่มีค่าแรงตึงผิวดำจะทำให้เกิดเป็นเส้นใยได้ง่ายกว่า ดังนั้นสารละลายที่มีค่าแรงตึงผิวสูงจะก่อให้เกิดอนุภาคที่แทนรองรับ เมื่อให้ค่าแรงศักย์ไฟฟ้าแรงสูงกว่าเข้าสู่ระบบ

3.1.5 การนำไฟฟ้า (conductivity/surface charge density) การนำไฟฟ้าของสารละลาย

ขึ้นอยู่กับ ชนิดของพอลิเมอร์ ชนิดของตัวทำละลายและความมีขั้วของเกลือที่ใช้ เช่น พอลิเมอร์ที่มาจากธรรมชาติบางชนิดมีขั้วอยู่แล้ว หรือการผสมเกลือที่สามารถแตกตัวให้ขั้วทางไฟฟ้าได้เช่น KH_2PO_4 NaH_2PO_4 และ NaCl ลงในสารละลาย ทำให้ค่าการนำไฟฟ้าได้ของสารละลายสูงขึ้นและจะทำให้เกิดเส้นใยที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางที่เล็กลง แต่เมื่อค่าการนำไฟฟ้าของสารละลายลดลงจะทำให้เกิดอนุภาคได้ง่ายกว่า

สามารถอธิบายได้ดังสมการของ Fernandez de la Mora and Loscertales (1994) ที่แสดงให้เห็นว่าขนาดของอนุภาคแปรผันตรงกับ อัตราการไหลของสารละลาย และความชื้นหนืดของสารละลาย แต่แปรผกผันกับ แรงตึงผิวของสารละลายและการนำไฟฟ้าของสารละลาย

$$d = \alpha \frac{Q\varepsilon\rho}{\sigma\gamma} \quad (1)$$

โดยที่ d คือเส้นผ่าศูนย์กลางของอนุภาค, α คือค่าคงที่, Q คือ อัตราการไหลของสารละลาย, ε คือ อัตราความจุกระแสไฟฟ้าของพื้นที่ว่าง, ρ คือ ความชื้นหนืดของสารละลาย, σ คือ แรงตึงผิวของสารละลาย และ γ คือ การนำไฟฟ้าของสารละลาย

3.2 ตัวแปรในระบบ (processing parameters) เป็นปัจจัยที่สำคัญมากอีกกลุ่มหนึ่ง ประกอบด้วย

3.2.1 ค่าศักย์ไฟฟ้า (applied voltage) เมื่อให้ศักย์ไฟฟ้าไม่สูงมากนัก พบว่าแนวโน้มของสารละลายจะกลายเป็นเส้นใยมากกว่า แต่เมื่อให้ค่าศักย์ไฟฟ้าสูงขึ้นจะส่งผลให้สารละลายเกิดเป็นอนุภาคแทน

3.2.2 อัตราการไหลของสารละลาย (feed rate/flow rate) อัตราการไหลของสารละลายมีผลต่อการระเหยของตัวทำละลายอย่างมาก เนื่องจากการเกิดอนุภาคนาโนเล็กจะต้องอาศัยการระเหยออกไปของตัวทำละลายด้วย ถ้าให้อัตราการไหลของสารละลายสูงจะทำให้เกิดการขยายใหญ่ของอนุภาคหรือเส้นใยได้เพราะการระเหยของตัวทำละลายเกิดขึ้นได้น้อย แต่ถ้าอัตราการไหลของสารละลายน้อยไป ก็สามารถทำให้ปลายเข็มตันหรือไม่อาจเกิดอนุภาคได้เพราะตัวทำละลายระเหยมากเกินไป ดังนั้นอัตราการไหลของสารละลายจึงควรเลือกให้เหมาะสม

3.2.3 ชนิดของแท่นรองรับ (types of collectors) โดยปกติแท่นรับอนุภาคจะใช้แผ่นโลหะเช่นทองแดง หรืออลูมิเนียม เพราะสามารถนำไฟฟ้าได้ดีเมื่อต่อวงจรไฟฟ้าชั่วคราวกันข้าม ทำให้เกิดแรงดึงดูดอนุภาคเข้าหา ทั้งนี้แท่นรองรับมีหลายหลากชนิด เช่น กระดาษหรือผ้านำไฟฟ้า และหลอดคาย เป็นต้น ส่วนแท่นรองรับเส้นใยจะมีลักษณะเป็นแท่งแหลม หรือ จาน หรือ ทรงกระบอกที่หมุนได้ จะก่อให้เกิดการจัดเรียงโมเลกุลได้ดีขึ้นและอาจทำให้ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของเส้นใยลดลง

3.2.4 ระยะห่างระหว่างปลายเข็มถึงแท่นรองรับ (tip to collector distance) เป็นปัจจัยที่สำคัญสอดคล้องกับอัตราการไหลของสารละลาย ระยะห่างระหว่างปลายเข็มถึงแท่นรองรับควรมีระยะพอสมควร เพื่อให้ตัวทำละลายระเหยไประหว่างที่อนุภาคกำลังเดินทางยังแท่นรองรับ เนื่องจากการเกิดอนุภาคนาโนเล็กจะต้องอาศัยการระเหยออกไปของตัวทำละลายด้วย แต่ถ้าเป็นเส้นใยเมื่อระยะห่างระหว่างปลายเข็มถึงแท่นรองรับใกล้ขึ้นจะทำให้เส้นใยมีลักษณะกลม แต่ถ้าไกลจะทำให้เส้นใยมีลักษณะแบน

ความสัมพันธ์ของตัวแปรในระบบ สามารถอธิบายได้ดังสมการของ Smith (1986) ที่พบว่าค่าศักย์ไฟฟ้า แปรผันตรงกับ แรงดึงดูดของสารละลาย และระยะทางระหว่างปลายเข็มถึงแท่นรองรับและรัศมีของเข็ม ดังสมการ

$$V_o = A \left[\frac{2Tr \cos\theta}{\epsilon} \right]^{1/2} \ln(4h/r) \quad (2)$$

โดยที่ V_o คือ ค่าศักย์ไฟฟ้า, A คือค่าคงที่, T คือแรงดึงดูดของสารละลาย, ϵ คืออัตราความจุกระแสไฟฟ้าของพื้นที่ว่าง, r คือ รัศมีของเข็มและ h คือระยะทางระหว่างปลายเข็มถึงแท่นรองรับ

3.3 สภาพแวดล้อม (ambient parameters)

สภาพแวดล้อมทั้งความชื้นสัมพัทธ์และอุณหภูมิเป็นส่วนหนึ่งที่มีผลต่อสารละลายและทำให้ลักษณะของอนุภาคเปลี่ยนไป เช่น ถ้าความชื้นสัมพัทธ์ในระบบสูง แล้วสารละลายที่ใช้มีความไวต่อความชื้น จะส่งผลให้อนุภาคที่เคลือบมีลักษณะเหนียวติดกันเป็นกลุ่มก้อน ซึ่งจะส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติของวัสดุที่นำไปเคลือบ แต่ถ้าความชื้นสัมพัทธ์ต่ำจะทำให้สารละลายแห้งเร็ว เกิดปัญหาหัวเข็มตัน ส่วนถ้าในระบบมีอุณหภูมิสูงจะช่วยให้เกิดอนุภาคได้ง่ายขึ้นและส่งผลให้อนุภาคมีขนาดเล็กลง เนื่องจากความร้อนส่งผลต่อความชื้นหน้าของสารละลายโดยตรงคือทำให้สารละลายมีความชื้นหน้าลดลง

4. การประยุกต์ใช้อิเล็กโทรสเปรย์ (Electrospraying)

อิเล็กโทรสเปรย์เป็นระบบไม่มีความซับซ้อนในการผลิตอนุภาคขนาดเล็ก และสามารถดำเนินการได้ในบรรยากาศปกติ ที่อุณหภูมิห้อง ไม่สิ้นเปลืองพลังงานและ ช่วยประหยัดปริมาณการใช้สารตั้งต้น ดังนั้นอิเล็กโทรสเปรย์จึงถูกนำมาประยุกต์เพื่อนำไปใช้ประโยชน์ในหลายอุตสาหกรรม ดังนี้

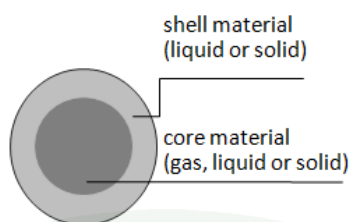
4.1 การประยุกต์ใช้อิเล็กโทรสเปรย์เพื่อผลิตอนุภาค

4.1.1 การผลิตอนุภาคขนาดไมโครและนาโนเมตร อนุภาคขนาดเล็กที่มีขนาดเล็กกว่า 10 ไมโครเมตร มีประโยชน์ต่อการนำไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมต่างๆ เพราะอนุภาคยังมีขนาดเล็ก จะยังมีพื้นที่ผิวสัมผัสมากขึ้น ทำให้เกิดประสิทธิภาพของสารนั้นได้มากขึ้น เช่น การผลิตผงเซรามิกเพื่อใช้ในสีหรืออิมัลชัน การผลิตผงแป้งเพื่อใช้กับเครื่องสำอาง และการผลิตผงยาเพื่อให้สามารถกระจายเข้าอยู่เป้าหมายได้อย่างรวดเร็ว (Nakamura et al., 2010) การเกิดอนุภาคขนาดเล็กสามารถเกิดได้ง่ายโดยวิธีอิเล็กโทรสเปรย์ เพราะเมื่อสารละลายถูกพ่นออกมาแล้ว ตัวทำละลายจะเกิดการระเหยทำให้อนุภาคยิ่งเล็กลงระหว่างการเดินทางของอนุภาคถึงแท่นรองรับ และเมื่อถึงแท่นรองรับอนุภาคจะแห้งพอดี

Deotare (2007) ได้นำพอลิแลคติกแอซิดมาประยุกต์ใช้กับวิธีอิเล็กโทรสเปรย์ เพื่อต้องการประดิษฐ์อนุภาคของพอลิแลคติกแอซิดในขนาดนาโนเมตร เพื่อเป็นตัวยาส่งยา ดังนั้นจึงมีการทดลองเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมของการอิเล็กโทรสเปรย์ในผลิตอนุภาคให้ได้ในระดับนาโนเมตร โดยนำปัจจัยที่ส่งผลต่อขนาดของอนุภาคเข้ามาเป็นตัวแปรได้แก่ ความเข้มข้นของสารละลายพอลิแลคติกแอซิดเท่ากับร้อยละ 0.5, 2, 3, 5 และ 8 ตามลำดับ โดยมีตัวทำละลายคลอโรฟอร์มและไดคลอโรมีเทน กำหนดค่าศักย์ไฟฟ้าในระบบเท่ากับ 4 และ 5 กิโลโวลต์ ตามลำดับ ระยะห่างระหว่างปลายเข็มฉีดสารละลายและแผ่นโลหะที่ใช้รองรับอนุภาคเท่ากับ 7 และ 17 เซนติเมตร ผลที่ได้พบว่า ขนาดอนุภาคของพอลิแลคติกแอซิดจะมีขนาดเล็กลง เมื่อความเข้มข้นของพอลิแลคติกแอซิดลดน้อยลง และระยะห่างระหว่างปลายเข็มฉีดสารละลายและแผ่นโลหะที่ใช้รองรับอนุภาคเพิ่มมากขึ้น ส่วนตัวทำละลายที่เป็นไดคลอโรมีเทนให้ขนาดของอนุภาคที่เล็กและมีความสม่ำเสมอมากกว่าคลอโรฟอร์ม

Han et al. (2012) ได้ผลิตอนุภาคพอลิสไตรีน (polystyrene) ด้วยวิธีอิเล็กโทรสเปรย์ และศึกษาปัจจัยของความเข้มข้นของสารละลายและชนิดของตัวทำละลายได้แก่ N,N-dimethylformamide (DMF) และ tetrahydrofuran (THF) ที่มีผลต่อโครงสร้างของอนุภาคพบว่าระดับความเข้มข้นของสารละลายต่ำทำให้เกิดเป็นอนุภาคนาโนขนาดเล็ก และตัวทำละลายมีผลรูปร่างและความเป็นรูพรุนที่ผิวของอนุภาค

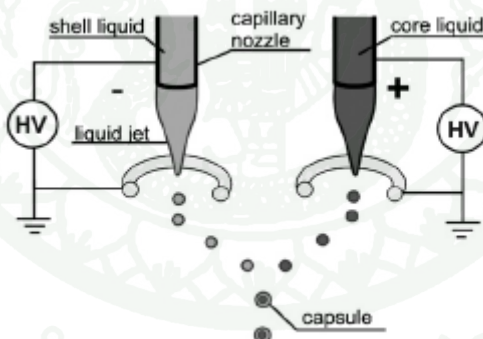
4.1.2 Electroencapsulation หมายถึงการประยุกต์ใช้วิธีอิเล็กโทรสเปรย์ในการสร้างเปลือกหุ้มสาร (shell) ที่ต้องการไว้ภายใน ซึ่งสารนั้นอาจมีสถานะเป็นได้ทั้งของแข็ง ของเหลว และก๊าซคือเป็นรูพรุนอยู่ภายใน ดังภาพที่ 12 ประโยชน์คือการนำไปใช้เป็น ตัวนำยา (drug delivery) ในอุตสาหกรรมยา เครื่องสำอาง และอาหาร โดยที่สภาวะปกติเปลือกจะปกป้องตัวสารที่ต้องการเอาไว้ภายในและเมื่อถึงเป้าหมาย เปลือกถูกทำลายออกไปเมื่อถูกความร้อนหรือตัวทำละลายและสารที่ต้องการจะถูกปลดปล่อยออกมา สารที่ต้องการได้แก่ วิตามิน เอนไซม์ ยา และแร่ธาตุ ซึ่งสามารถสูญเสียประโยชน์ได้ง่ายเมื่อสัมผัสกับอากาศ สารที่เป็นเปลือกได้แก่ สตาร์ช ไขมัน แวกซ์ น้ำมัน พอลิแซ็กคาไรด์ เด็กเทรน โปรตีน หรือกลูโคส เป็นต้น โดยวิธีการผลิตด้วยอิเล็กโทรสเปรย์มี 4 วิธี (Jaworek and Sobczyk, 2008) ได้แก่



ภาพที่ 12 อนุภาคที่เป็น encapsulation

ที่มา: Jaworek and Sobczyk (2008)

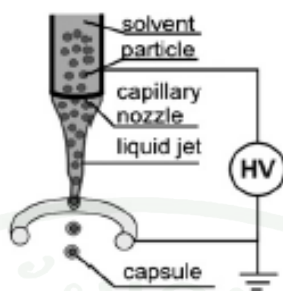
ก. Impacting of two oppositely charge droplets คือ การอิเล็กทรอนิกส์สารที่เป็นสารที่ต้องการและเปลือกพร้อมกันโดยแยกหัวเข็มและใส่ประจุที่เป็นขั้วตรงกันข้ามกัน โดยเปลือกและสารที่ต้องการจะมารวมตัวกัน สารที่มีแรงตึงผิวสูงกว่าจะอยู่ภายในสารที่มีแรงตึงผิวต่ำกว่า ดังภาพที่ 13



ภาพที่ 13 การ encapsulation แบบ impacting of two oppositely charge droplets

ที่มา: Jaworek and Sobczyk (2008)

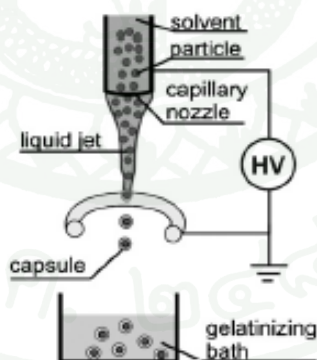
ข. Electrospraying/ evaporation of colloidal suspension คือการอิเล็กทรอนิกส์สารละลายที่เป็นคอลลอยด์ และมีการใส่ surfactant เพื่อป้องกันการรวมตัวกันของอนุภาค ส่วนสารที่เป็นเปลือกจะถูกทำให้แข็งหรือแห้งได้โดยการระเหยของตัวทำละลาย ดังภาพที่ 14



ภาพที่ 14 การ encapsulation แบบ electrospinning/ evaporation of colloidal suspension

ที่มา: Jaworek and Sobczyk (2008)

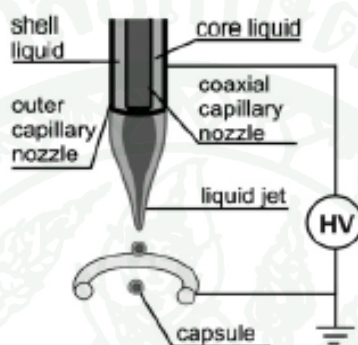
ค. Electrospinning/ gelatinization of colloidal suspension คือการอิเล็กโตรสเปรย์สารละลายที่เป็นคอลลอยด์เหมือนกันแต่แทนรองรับสารคืออ่างผสมของเหลวที่เป็น gelatinizing กับ polymerizing agent สารที่เป็นเปลือกจะถูกทำให้แข็งโดยแสงอัลตราไวโอเล็ตที่จะช่วยทำให้เกิดการพอลิเมอร์ไรเซชันที่ผิวหน้าของเปลือก ดังภาพที่ 15



ภาพที่ 15 วิธีการ encapsulation แบบ electrospinning/ gelatinization of colloidal suspension

ที่มา: Jaworek and Sobczyk (2008)

๓. Electro-extrusion คือการอิเล็กโทรสเปรย์ที่มีหัวสองอันซ้อนกันอยู่ข้างใน ตรงตำแหน่งเดียวกันไม่มีการใช้ตัวทำละลาย แต่ทั้งสารที่ต้องการและเปลือกจะต้องหลอมเหลวได้ด้วยความร้อน โดยสารที่ต้องการจะต้องมีค่าความข้นหนืดสูงกว่าและสารที่เป็นเปลือกจะต้องมีสมบัติการนำไฟฟ้าที่สูงกว่า จึงจะเกิดการ encapsulation ดังภาพที่ 16



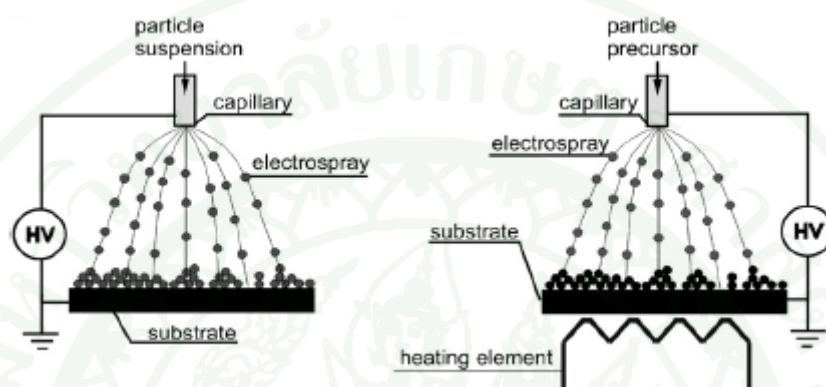
ภาพที่ 16 การ encapsulation แบบ electro-extrusion

ที่มา: Jaworek and Sobczyk (2008)

4.2 การประยุกต์ใช้อิเล็กโทรสเปรย์เพื่อผลิตฟิล์มบางและเคลือบผิววัสดุ

การผลิตฟิล์มที่มีความหนาในระดับไมโครและนาโนเมตร การผลิตฟิล์มที่มีความหนาน้อยกว่า 10 ไมโครเมตร มีสำคัญมากต่อระบบอิเล็กทรอนิกส์ เพราะฟิล์มนั้นจะต้องทำหน้าที่เป็นชั้นที่สามารถนำไฟฟ้า หรือกึ่งตัวนำ และอาจนำไปทำฉนวน หรือนำฟิล์มไปปรับปรุงสมบัติเชิงกลของอุปกรณ์ต่างๆ การผลิตฟิล์มสามารถทำได้หลายวิธี แต่วิธีอิเล็กโทรสเปรย์สามารถควบคุมปริมาณความหนาของฟิล์มได้ดีกว่ามาก เพราะสามารถปรับตั้งอัตราการไหลของสารละลายที่ออกมาจากปลายเข็มได้จึงสามารถควบคุมความหนาของฟิล์มได้ในระดับนาโนเมตร การทำฟิล์มที่มีความหนาในระดับไมโครและนาโนเมตรโดยวิธีอิเล็กโทรสเปรย์มีอยู่สองวิธี ได้แก่ การให้อนุภาคมาตกสะสมที่แท่นรองรับและเกาะกันเป็นกลุ่มจนหนาแน่นทั่วผิวหน้าจนกลายเป็นฟิล์ม

(Morota et al., 2004) หรือการให้อนุภาคมาตกสะสมที่แท่นรองรับและเกาะกันเป็นกลุ่มจนหนาแน่นแล้วให้ความร้อนข้างใต้แท่นรองรับจะทำให้อนุภาคละลายกลายเป็นเนื้อเดียวกันจนเป็นแผ่นฟิล์มบาง ดังภาพที่ 17



ภาพที่ 17 การผลิตฟิล์มที่มีความหนาในระดับไมโครและนาโนเมตรโดยวิธีอิเล็กโตรสเปรย์

ที่มา: Jaworek and Sobczyk (2008)

การประยุกต์ใช้อิเล็กโตรสเปรย์เพื่อผลิตฟิล์มบางและเคลือบผิววัสดุเกิดขึ้นในหลายอุตสาหกรรม เนื่องจากช่วยประหยัดปริมาณสารตั้งต้น และไม่เกิดแรงกดทับบนวัสดุรองรับ

Benitez et al. (2005) เตรียมขั้วไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิง (Proton exchange membrane fuel cell: PEMFC) โดยเคลือบฟ้ายคาร์บอนด้วยเทคนิคอิเล็กโตรสเปรย์ และนำมาเปรียบเทียบด้วยภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscopy: SEM) ผลที่ได้จากงานวิจัยนี้คือผลจากการเคลือบด้วยวิธี Electrospray cone-jet mode ให้ประสิทธิภาพดีที่สุด เพราะได้ละอองที่มีความละเอียดมีความหนาแน่นสม่ำเสมอต่อผิวฟ้ายที่เคลือบมากที่สุดและใช้พลังงานในการเคลือบน้อยสุด อีกทั้งยังทำให้ประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงมีมากที่สุดด้วยเพราะสามารถทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาทางเคมีบริเวณผิวเคลือบได้เพิ่มขึ้น

Pareta and Edirisighe (2006) นำวิธีอิเล็กโตรสเปรย์มาประยุกต์เพื่อนำมาทำเป็นบรรจุภัณฑ์ โดยการทดลองทำฟิล์มและเคลือบผิววัสดุ จากแป้งข้าวโพด (maize starch) ที่เป็นพอลิเมอร์ชีวฐานที่สามารถย่อยสลายได้ (Biodegradable polymer) โดยเตรียมแป้งให้อยู่ในรูปของ

สารละลายโดยตัวทำละลายที่ใช้ ได้แก่ น้ำและเอทานอล แล้วฉีดพ่นออกมาด้วยวิธีอิเล็กโตรสเปรย์ พบว่าขณะที่ละอองอนุภาคของสารละลายแป้งถูกฉีดพ่นออกมา มีขนาดเล็กมากทำให้มีพื้นที่สัมผัสกับอากาศมากตัวทำละลายจึงสามารถระเหยไปอย่างรวดเร็ว จึงทำให้อนุภาคของแป้งสามารถไปตกลงที่แผ่นวัสดุรองรับที่เป็นวงกลมแบบหมุนได้ จากการทดลองพบว่าวิธี อิเล็กโตรสเปรย์ เป็นวิธีที่ให้ความหนาของแผ่นฟิล์มหรือชั้นเคลือบผิวจากแป้งที่มีความสม่ำเสมอและสามารถควบคุมความหนาได้ซึ่งขึ้นอยู่กับระยะเวลาในการอิเล็กโตรสเปรย์ และเมื่อนำฟิล์มที่ผลิตด้วยวิธีการอิเล็กโตรสเปรย์มาทดสอบ ผลที่ได้คือ มีสมบัติเชิงกลเทียบเท่ากับฟิล์มที่ผลิตจากการใช้สารละลายแบบเดิมที่ต้องนำฟิล์มที่ได้ไปอบให้แห้งเพื่อระเหยตัวทำละลายทิ้งไป

Rietveld et al. (2008) ได้เตรียมฟิล์มป้องกันแสงโดยเทคนิคอิเล็กโตรสเปรย์ ด้วยซิลิกอนออกไซด์และอนุภาคทองคำ ผลที่ได้พบว่าสามารถทำฟิล์มหลายชั้นเพื่อป้องกันแสงได้ บนฟิล์มที่มีความประและบาง

Ericka Ford et al. (2009) ได้มีความสนใจนำวิธี อิเล็กโตรสเปรย์ไปประยุกต์ใช้กับสารละลายพอลิเมอร์จากธรรมชาติที่มีสมบัติต้านทานน้ำ ได้แก่ น้ำยางธรรมชาติ(Latex) ผสมกับ 2-โพรพานอล ผลที่ได้คือ สารเคลือบจากน้ำยางธรรมชาติ(Latex) มีความสามารถในการยึดเกาะกับผิวหน้าของกระดาษกราฟที่ดีมาก ช่วยปรับปรุงให้กระดาษกราฟทำผิวกล่องลูกฟูกมีสมบัติการต้านทานน้ำที่ดีขึ้น เป็นวิธีการเคลือบกระดาษกราฟที่ประหยัดปริมาณสารเคลือบ ลดต้นทุน และประหยัดพลังงานคือไม่ต้องสูญเสียพลังงานในการอบสารเคลือบให้แห้ง นอกจากนั้นกระดาษกราฟที่เคลือบด้วยน้ำยางธรรมชาติ (Latex) ด้วยวิธีอิเล็กโตรสเปรย์ (Electrospray) มีการแพร่ผ่านของไอน้ำและก๊าซได้ดี ซึ่งเหมาะสมแก่การนำไปเคลือบกระดาษทำผิวกล่องกระดาษลูกฟูกเพื่อการเก็บรักษาและขนส่งผักและผลไม้สด

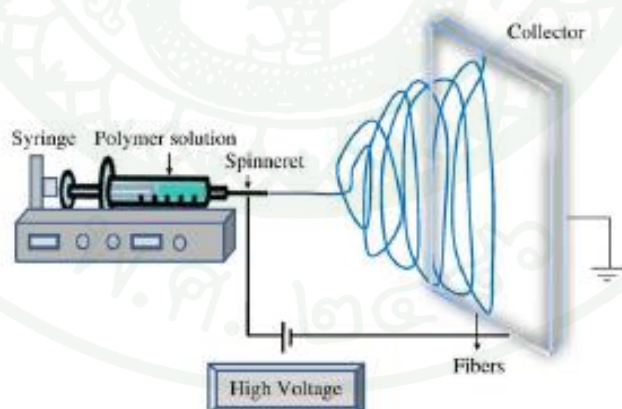
Thian et al. (2011) ทดลองเคลือบผิววัสดุที่เป็นโลหะด้วยสารที่เป็น bioactive โดยเทคนิคอิเล็กโตรสเปรย์ เพื่อนำไปผ่าตัดและฝังทดแทนกระดูกที่สูญเสียไปของมนุษย์

Khan et al. (2012) ต้องการทดลองผลิตฟิล์มต้านทานน้ำเคลือบบนอาหาร จึงนำน้ำมันดอกทานตะวันมาอิเล็กโตรสเปรย์ลงบนแผ่นพาราฟิล์ม (parafilm) พบว่าขนาดของอนุภาคของน้ำมันดอกทานตะวันมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 20 ไมโครเมตร และมุมสัมผัสของหยดน้ำมันจะเพิ่มมากขึ้นเมื่อความเข้มข้นของน้ำมันดอกทานตะวันเพิ่มขึ้น

Wang et al. (2012) ต้องการทดลองทำผ้าพันแผล จึงนำ polyvinyl alcohol (PVA) มาเคลือบด้วยวิธีอิเล็กโตรสเปรย์บน ผ้า polyacrylonitrile (PAN) ที่ขึ้นรูปด้วยวิธีอิเล็กโตรสปินนิงเพื่อเพิ่มสมบัติด้านความชอบน้ำ เพื่อช่วยระบายความชื้น จากผลการทดลองพบว่า ผ้าที่เคลือบด้วยวิธีอิเล็กโตรสเปรย์ช่วยปกป้องแผลจากฝุ่นและสิ่งสกปรกและช่วยระบายไอน้ำและถ่ายเทอากาศเข้าออกได้ดีกว่า ผ้าที่เคลือบโดยตรงกับสารละลาย polyvinyl alcohol (PVA) เพราะสารละลายจะซึมเข้าไปในผ้าไปอุดรูระหว่างเส้นใยทำให้ผ้าพันแผลสูญเสียความสามารถในการถ่ายเทอากาศ

4.3 อิเล็กโตรสปินนิง (Electrospinning)

คือระบบเดียวกับ อิเล็กโตรสเปรย์ (Electrospraying) ที่ใช้ศักย์ไฟฟ้าสูงกระแสตรง และสารละลายพอลิเมอร์ที่มีรูปแบบการฉีดสารละลายแบบ Cone-jet mode แต่จะให้ความแตกต่างตรงที่การเปลี่ยนจากลำของเหลว (Jet) เป็นเส้นใยขนาดเล็ก (Fine fibers) แทนที่จะแตกตัวกลายเป็นอนุภาคนาโนเล็ก (Small droplets) ดังภาพที่ 18 ด้วยปัจจัยทั้งหมดดังที่กล่าวมาแล้ว ผลผลิตที่ได้ออกมาเป็นผ้าไม่ทอ (nonwoven) ที่มีขนาดของเส้นใยในระดับนาโนเมตร นิยมนำไปประยุกต์ใช้ประโยชน์ด้านต่างๆ ดังจะกล่าวในลำดับต่อไป



ภาพที่ 18 อิเล็กโตรสปินนิง (Electrospinning)

ที่มา: Bhardwaj and Kundu (2010)

4.3.1 ผ้าที่ใช้ทางการแพทย์ ได้แก่ ผ้าพันแผล ผ้าที่เพาะเลี้ยงเนื้อเยื่อ (scaffolds for tissue engineering) และตัวนำยา (drug delivery) เพราะเส้นใยมีขนาดเล็กและเรียงตัวกันได้ชิดมาก สามารถป้องกันแบคทีเรียได้แต่ยังคงสมบัติที่ยอมให้อากาศและไอน้ำผ่านได้ เช่นการนำด้วย Acyclovir ที่สามารถรักษาแผลจากโรคงูสวัดได้ลงในเส้นใย polyacrylonitrile เพื่อนำไปทำผ้าพันแผลโดยใช้ตัวทำละลายร่วมกันคือ dimethyl sulfoxide (DMSO) (Hong and Deng, 2010) นอกจากนี้ นักวิจัยพยายามที่จะปรับปรุงและพัฒนาในการผลิตเส้นใยจากสารสกัดจากธรรมชาติ นำมาใช้เป็นเนื้อเยื่อและตัวนำยาเพราะสามารถเข้ากับเนื้อเยื่อได้ดี (biocompatibility) สามารถย่อยสลายได้ตามธรรมชาติและไม่เป็นพิษ เช่น alginate เซลลูโลส ไคติน ไคโตซาน hyaluronic acid สตาร์ช dextran และ heparin เป็นต้น ปัจจุบันมีงานวิจัยเพื่อพัฒนาเส้นใยให้มีขนาดเล็กลงในระดับนาโนเมตร ด้วยการศึกษาอิทธิพลของสารละลาย hyaluronic acid ที่เป็นพอลิแซ็กคาไรด์ประจุลบและค่าศักย์ไฟฟ้ามีผลต่อการขนาดของเส้นใยที่เกิด โดยการใส่กรดฟอร์มิกลงในสารละลายพบว่าได้เส้นใยที่เล็กลง (Liu et al., 2011) และการศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพในการอิเล็กทรอนิกส์สปินนิ่งผ้าพันแผลของ sodium alginate ที่มาจากสาหร่ายสีน้ำตาลด้วยการเติมแคลเซียมคลอไรด์พบว่าประจุของแคลเซียมช่วยลดแรงตึงผิวของสารละลายของ sodium alginate ทำให้สามารถอิเล็กทรอนิกส์สปินนิ่งได้ดีที่ค่าศักย์ไฟฟ้าไม่สูงมาก (Fang et al, in press)

4.3.2 ผ้ากรอง ได้แก่ ผ้ากรองอากาศและผ้าปิดจมูก เพราะการทำอิเล็กทรอนิกส์สปินนิ่งจะทำให้เส้นใยมีขนาดเล็กและเรียงตัวกันได้ชิดมาก จึงสามารถกรองอนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่า 0.5 มิลลิเมตรได้ (Ding and Lu, 2008)

4.3.3 Biosensor ผ้าที่ทำหน้าที่ตรวจจับได้ดีเพราะมีพื้นที่ผิวสัมผัสสูงมาก เช่น silk fibroin membrane-based biosensor เพื่อตรวจวิเคราะห์ กลูโคส ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์และ กรดยูริก (Ding and Lu, 2008)

4.3.4 ผ้าสำหรับป้องกัน (protective clothing) ผ้าที่ได้จะมีน้ำหนักเบา ยอมให้อากาศและไอน้ำผ่านเข้าออกได้ดี ระบายน้ำได้ดี ไม่ละลายในตัวทำละลายและทนต่อสารพิษได้ดี (Greiner and Wendorff, 2007)

4.3.5 ผ้าสำหรับเสริมแรง (reinforcement composites) คือการผลิตผ้าไม่ทอเพื่อเพิ่มสมบัติเชิงกลให้แก้ววัสดุให้ทนทานต่อแรงปะทะได้ดี เช่น การผลิตผ้าไม่ทอจากไพลอน-66 เพื่อเพิ่ม

สมบัติการต้านทานความเสียหายของเส้นใยคาร์บอนด้วยการลามิเนต เป็นวัสดุเสริมแรงให้ทนทานต่อแรงปะทะ (Akangah et al., 2010) ทั้งนี้นักวิจัยยังได้ทดลองการใช้นาโนเป็นแท่นรองรับสารจากการผลิตเส้นใยด้วยวิธีอิเล็กโตรสปินนิงจาก bisphenol A polycarbonate (BPAPC) เพื่อปรับปรุงโครงสร้างโมเลกุลให้เรียงเป็นเส้นตรง เพิ่ม crystalline ทำให้ได้สมบัติเชิงกลของผ้าที่ดีขึ้น จึงสามารถนำไปใช้เพื่อเสริมแรงได้ดีเยี่ยม (Liao et al., 2012)

4.3.6 ผ้าผลิตพลังงาน (energy generation application) คือ polymer batteries และ membrane fuel cell เป็นผ้าที่ให้พลังงานแก่แบตเตอรี่มือถือทดแทน แบตเตอรี่ที่ทำจากลิเทียม เพราะผ้าที่ได้มีรูพรุนและมีผิวสัมผัสสูงจึงทำให้เก็บและจ่ายพลังงานได้มากกว่า (Ding and Lu, 2008)

4.3.7 Affinity membrane ผ้าที่เลือกจับเฉพาะโมเลกุลที่ต้องการ เช่น ผ้าที่ต้องการใช้กำจัดโมเลกุลของสิ่งมีชีวิตบางชนิดในน้ำเสีย โดยนักวิจัยได้มีความสนใจในการผลิตเส้นใยขนาดนาโนจากไคโตซานผสมกับ poly(ethylene oxide) เพื่อใช้เป็นเยื่อที่ต้านทานโปรตีน เป็นการศึกษาไอออนของเกลือที่ให้ออกมามีผลต่อขนาดของเส้นใย พบว่าเมื่อเติมไอออนของแคลเซียมและเหล็กส่งผลให้เส้นใยมีขนาดเล็กลงและเรียบกว่าการเติมไอออนของโซเดียมและโพแทสเซียม (Su et al., 2011)

4.3.8 เครื่องสำอาง ผ้าที่ทำหน้าที่เป็นหน้ากากในการให้สารอาหารแก่ผิวหนังสามารถให้สารเสริมแก่ผิวได้อย่างรวดเร็ว เพราะผ้ามีเส้นใยขนาดเล็กมีพื้นที่ผิวสัมผัสสูงในการเก็บและจ่ายสารได้ดี

4.3.9 ด้านอุตสาหกรรมอาหาร นำเส้นใยจากอิเล็กโตรสปินนิงมาใช้เป็น edible film หรือฟิล์มที่สามารถรับประทานได้ โดยทำมาจากเซลล์ลูโลสอะซิเตด ผสมกับ albumen ของไข่ ที่ได้มาจากเปลือกไข่ที่เหลือทิ้ง แต่เนื่องจาก albumen ของไข่ไม่สามารถทำอิเล็กโตรสปินนิงโดยตรงได้ จึงต้องผสมกับเซลล์ลูโลสอะซิเตด (Wongsasulak et al. 2010)

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

1. วัสดุดิบ

1.1 กระดาษแข็งประเภท duplex board เคลือบหน้าเดียว น้ำหนักมาตรฐาน 300 กรัม/ตร.ม. ซึ่งได้รับความอนุเคราะห์จาก บริษัท กระดาษสหไทย จำกัด

1.2 พอลิแลคติกแอซิด (poly(lactic acid), PLA) Natureworks 2003D จากบริษัท บีซี โพลีเมอร์ส มาร์เก็ตติ้ง จำกัด

1.3 พอลิบิวทิลีนอะดิเพต-โค-เทเรฟทาเลต (poly(butyleneadipate-co-terephthalate), PBAT) Ecoflex F BX7011 จากบริษัท BASF Croporation

1.4 คลอโรฟอร์ม (chloroform) จากห้างหุ้นส่วนจำกัด เอิร์ต เคมี แลป

2. อุปกรณ์

2.1 หลอดชนิดยาแก้วขนาด 10 มิลลิลิตร

2.2 เข็มชนิดยาเส้นผ่าศูนย์กลาง 1.20 มิลลิเมตร ยาว 25 มิลลิเมตร

2.3 เครื่องแก้วที่ใช้ในการทดลอง

2.4 เครื่องชั่งละเอียดทศนิยม 3 ตำแหน่ง (Shimadzu BX300, Japan)

2.5 เครื่องชั่งละเอียดทศนิยม 4 ตำแหน่ง (Sartorius BP110S, Germany)

2.6 เซซิกเคเตอร์

2.7 นาฬิกาจับเวลา

2.8 ไมโครปิเปต (Gilson, France)

2.9 ตู้ควบคุมอุณหภูมิและปริมาณความชื้นสัมพัทธ์ (WTB Binder KBF 240, Germany)

2.10 ตู้อบลมร้อนแบบควบคุมอุณหภูมิ (Contherm, Contherm Scientific Limited)

2.11 เครื่องวัดความหนา (Mitutoyo ID-C112BS, Japan)

2.12 เครื่องทดสอบการแพร่ผ่านของก๊าซออกซิเจน (Illinois 8500, USA.)

2.13 เครื่องทดสอบการแพร่ผ่านของไอน้ำ (Mocon Permatran-W, USA)

- 2.14 เครื่องทดสอบความต้านทานแรงกดวงแหวน (Testometric 350, England)
- 2.15 เครื่องทดสอบความต้านทานต่อการพับ (Toyo seiki, Japan)
- 2.16 ชุดทดสอบการดูดซึมน้ำ (Cobb test)
- 2.17 เครื่องวัดมุมสัมผัส (Contact angle) (Dataphysics, German)
- 2.18 เครื่องอิเล็กทรอนิกส์สเปรย์ (Electrospraying machine)
- 2.19 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Philips: XL30 & EDAX, Netherland)

วิธีการ

1. ตรวจสอบสมบัติเบื้องต้นของกระดาษก่อนเคลือบโดยเทคนิคอิเล็กทรอนิกส์สเปรย์

ตัดกระดาษตามขนาดที่ต้องการตามวิธีการทดสอบแต่ละชนิด ปรับสภาวะกระดาษในตู้ควบคุมอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ที่สภาวะอุณหภูมิ 27 ± 1 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 65 ± 2 (ISO 187) เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำมาทดสอบสมบัติต่างๆ ดังต่อไปนี้ (รายละเอียดของมาตรฐานการทดสอบแสดงในภาคผนวก ก)

1.1 ทดสอบสมบัติทางกายภาพและสมบัติเชิงกลของกระดาษ

- 1.1.1 น้ำหนักมาตรฐานของกระดาษ (ดัดแปลงจาก ASTM D646-96)
- 1.1.2 ความหนาของกระดาษ (ASTM D645-97)
- 1.1.3 ปริมาณความชื้นในกระดาษ (ASTM D644-99)
- 1.1.4 ความต้านทานแรงกดวงแหวน (TAPPI T818-om97)
- 1.1.5 ความต้านทานต่อการพับ (ASTM D2176-97a)

1.2 ทดสอบสมบัติการต้านทานน้ำและน้ำมันของกระดาษ

- 1.2.1 ทดสอบการดูดซึมน้ำและน้ำมัน (Cobb test) (ดัดแปลงจาก TAPPI441-om98)
- 1.2.2 ทดสอบมุมสัมผัสของน้ำและน้ำมัน (ดัดแปลงจาก ASTM D5946-04)

1.2.3 ทดสอบเวลาในการดูดซึมน้ำและน้ำมัน (อ้างอิงจาก สตรีรัตน์, 2550; Selli *et al.*, 2001)

ทดสอบสมบัติการต้านทานน้ำและน้ำมันของกระดาษทั้งด้านหน้าและด้านหลัง เนื่องจากกระดาษแข็งทั้งสองด้านมีลักษณะผิวหน้าที่แตกต่างกัน

1.3 ทดสอบสมบัติการกีดขวางของกระดาษ

1.3.1 ทดสอบอัตราการแพร่ผ่านของไอน้ำ (TAPPI T464 om-01)

1.3.2 ทดสอบอัตราการแพร่ผ่านของก๊าซออกซิเจน (ASTM D3985)

1.4 การวิเคราะห์พื้นผิวของกระดาษ

1.4.1 วิเคราะห์ลักษณะพื้นผิว โดยเทคนิค scanning electron microscopy (SEM) ด้วยเครื่อง scanning electron microscope-energy dispersive x-ray spectrometer (Philips: XL30 & EDAX, Netherland) ด้วยกำลังขยาย 500 และ 5,000 เท่า

วิเคราะห์พื้นผิวของกระดาษทั้งด้านหน้าและด้านหลัง เนื่องจากกระดาษแข็งทั้งสองด้านมีลักษณะผิวหน้าที่แตกต่างกัน

2. การเคลือบกระดาษด้วยสารละลายพอลิแลคติกแอซิดโดยเทคนิคอิเล็กโตรสเปรย์

2.1 การเตรียมสารละลายพอลิแลคติกแอซิด

กำหนดระดับความเข้มข้นของสารละลายพอลิแลคติกแอซิดที่ร้อยละ 0.5, 1, 2, 3 และ 4 โดยน้ำหนักต่อปริมาตรตามลำดับ เริ่มจากนำเม็ดพลาสติกพอลิแลคติกแอซิดไปอบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 8 ชั่วโมง ก่อนนำไปชั่งให้มีน้ำหนัก 0.5 กรัม, 1 กรัม, 2 กรัม, 3 กรัม และ 4 กรัมตามลำดับ แล้วแบ่งแต่ละน้ำหนักมาละลายกับตัวทำละลายคลอโรฟอร์ม 100 มิลลิลิตร เพื่อให้ได้ระดับความเข้มข้นของสารละลายพอลิแลคติกแอซิดตามที่กำหนด

2.2 การเตรียมสารละลายผสมระหว่างพอลิแลคติกแอซิดและพอลิบิวทิลีนอะดิเพต-โค-เทเรฟทาเลต

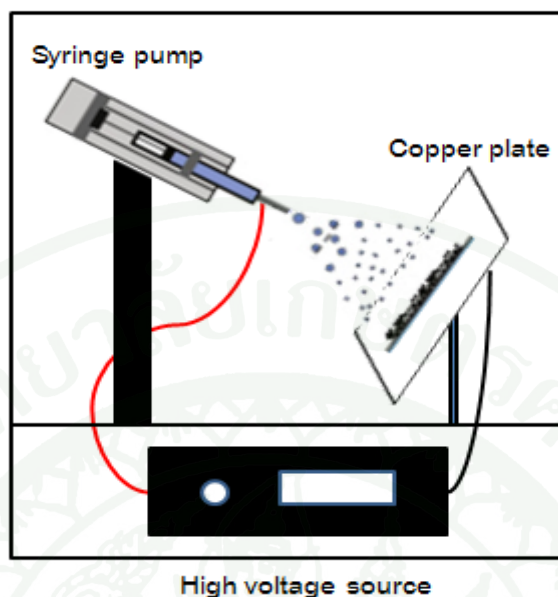
กำหนดระดับความเข้มข้นของสารละลายผสมที่ร้อยละ 1 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร และกำหนดอัตราส่วนการผสมของพอลิแลคติกแอซิดต่อพอลิบิวทิลีนอะดิเพต-โค-เทเรฟทาเลตที่ 100:0, 80:20, 50:50, 20:80 และ 0:100 โดยนำเม็ดพลาสติกพอลิแลคติกแอซิดและพอลิบิวทิลีนอะดิเพต-โค-เทเรฟทาเลตไปอบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 8 ชั่วโมง ก่อนนำไปชั่งตามอัตราส่วนการผสมแสดงดังตารางที่ 1 แล้วแบ่งแต่ละสูตรมาละลายกับตัวทำละลายคลอโรฟอร์ม 100 มิลลิลิตร

ตารางที่ 1 น้ำหนักของพอลิแลคติกแอซิดและพอลิบิวทิลีนอะดิเพต-โค-เทเรฟทาเลตตามอัตราส่วนการผสมที่ 100:0, 80:20, 50:50, 20:80 และ 0:100

อัตราส่วนการผสมที่ PLA : PBAT	พอลิแลคติกแอซิด (กรัม)	พอลิบิวทิลีนอะดิเพต-โค-เทเรฟทาเลต (กรัม)
100 : 0	1.00	-
80 : 20	0.80	0.20
50 : 50	0.50	0.50
20 : 80	0.20	0.80
0 : 100	-	1.00

2.3 การเตรียมตัวอย่างกระดาษ

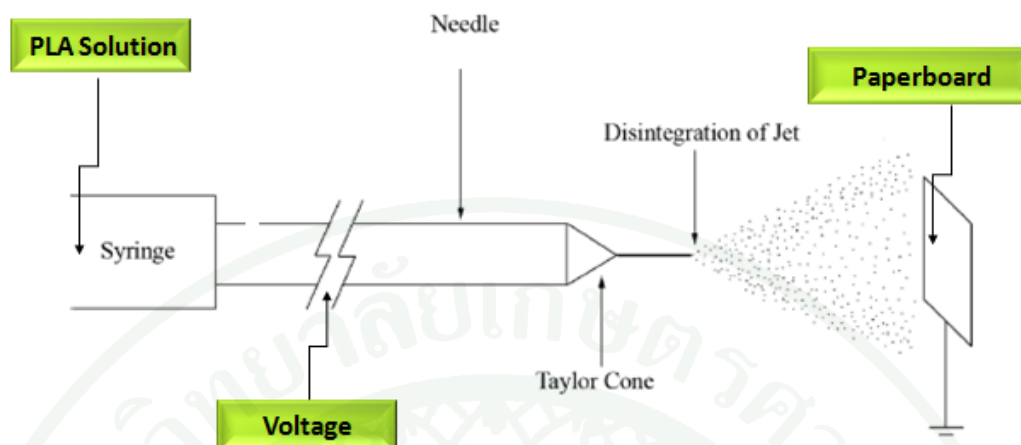
ตัดกระดาษให้มีขนาด 30 x 30 เซนติเมตร เพื่อให้สามารถใส่ลงบนแท่นรองรับที่เป็นโลหะทองแดงที่อยู่ภายในเครื่องอิเล็กทรอนิกส์โทรสเปรย์ได้ ดังภาพที่ 19



ภาพที่ 19 การวางตัวอย่างเพื่อการเคลือบด้วยวิธีอิเล็กโตรสเปรย์

2.4 การเคลือบกระดาษด้วยพอลิแลกติกแอซิดโดยเทคนิคอิเล็กโตรสเปรย์

บรรจุสารละลายพอลิแลกติกแอซิดลงในหลอดบรรจุขนาด 10 มิลลิลิตร แล้วสวมหัวเข็มที่มีปลายแหลมเป็นโลหะ นำหลอดบรรจุสารละลายดังกล่าวไปติดตั้งบนแท่นฉีดสารละลาย ปรับระดับให้ปลายเข็มโลหะตั้งฉากกับแท่นรองรับสารละลายที่เป็นทองแดง จากนั้นนำกระดาษที่เตรียมไว้มาวางบนแท่นรองรับ หุ้มขอบกระดาษด้วยแผ่นอลูมิเนียมเพื่อนำกระแสไฟฟ้าต่อวงจรไฟฟ้าแล้วจ่ายกระแสไฟฟ้าแรงสูงเข้าสู่ระบบ ดังภาพที่ 19 แล้วปรับอัตราการไหลของสารละลายเพื่อหาสภาวะที่ทำให้สารละลายเกิดเป็นกรวยของเทเลอร์ (Taylor cone) ที่ปลายเข็ม และอิเล็กโตรสเปรย์สารละลายออกเป็นละอองอนุภาคพอลิแลกติกแอซิดเคลือบลงบนกระดาษแข็ง ดังภาพที่ 20



ภาพที่ 20 การเคลือบกระดาษด้วยพอลิแลคติกแอซิดโดยเทคนิคอิเล็กโตรสเปรย์

3. พิจารณาเลือกสภาวะอิเล็กโตรสเปรย์ที่เหมาะสมของสารละลายพอลิแลคติกแอซิดต่อการผลิตอนุภาคเพื่อเคลือบกระดาษแข็ง

3.1 หาสภาวะเหมาะสมที่ทำให้สารละลายพอลิแลคติกแอซิดสามารถสเปรย์เป็นอนุภาคมาเคลือบบนกระดาษทั้งสองด้าน โดยกำหนดปรับสภาวะจาก 4 ปัจจัย ได้แก่ การปรับตั้งค่าศักย์ไฟฟ้าสูงกระแสตรงที่ 6, 7, 8 และ 9 กิโลโวลต์ ปรับอัตราการไหลของสารละลายที่ 3, 4 และ 5 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง และปรับระยะทางระหว่างปลายเข็มถึงที่กระดาษที่ 10 และ 20 เซนติเมตร โดยกำหนดความเข้มข้นของสารละลายพอลิแลคติกแอซิดที่ร้อยละ 0.5, 1, 2, 3 และ 4 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร และปริมาตรของสารละลายเท่ากับ 10 มิลลิลิตร

3.2 นำกระดาษที่ผ่านการอิเล็กโตรสเปรย์ด้วยสารละลายพอลิแลคติกแอซิด มาวิเคราะห์การกระจายตัวของสารเคลือบพอลิแลคติกแอซิดบนผิวของกระดาษแข็งทั้งสองด้าน เพื่อเปรียบเทียบและเลือกสภาวะอิเล็กโตรสเปรย์ที่ก่อให้เกิดอนุภาคพอลิแลคติกแอซิดที่มีการกระจายตัวและมีรูปลักษณะที่สม่ำเสมอที่สุดบนผิวกระดาษแข็งทั้งสองด้าน

4. ศึกษาอิทธิพลของระดับความเข้มข้นของสารละลายพอลิแลคติกแอซิดเมื่อผ่านกระบวนการอิเล็กโทรสเปรย์ต่อสมบัติของกระดาษแข็ง

4.1 วางแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ (completely randomized design, CRD) โดยศึกษาจากปัจจัยระดับความเข้มข้นของสารละลายพอลิแลคติกแอซิดที่ร้อยละ 0.5, 1, 2, 3 และ 4 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร โดยเลือกสภาวะอิเล็กโทรสเปรย์ที่เหมาะสมต่อการเกิดอนุภาคและการกระจายตัวของอนุภาคพอลิแลคติกแอซิดจากผลการทดลองที่ได้ในข้อ 3

4.2 นำกระดาษที่ผ่านการอิเล็กโทรสเปรย์ด้วยสารละลายพอลิแลคติกแอซิดที่ความเข้มข้นร้อยละ 0.5, 1, 2, 3 และ 4 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร มาทดสอบสมบัติทางกายภาพ สมบัติเชิงกล สมบัติการต้านทานน้ำและน้ำมัน และสมบัติการกีดขวางของกระดาษ ตามวิธีในข้อ 1.1 1.2 และ 1.3 เปรียบเทียบผลการทดสอบกับกระดาษที่ไม่ผ่านการเคลือบโดยเทคนิคอิเล็กโทรสเปรย์

4.3 นำกระดาษที่ผ่านการอิเล็กโทรสเปรย์ด้วยสารละลายพอลิแลคติกแอซิดมาวิเคราะห์ลักษณะอนุภาคของพอลิแลคติกแอซิดบนพื้นผิวของกระดาษ ตามวิธีในข้อ 1.4

5. ศึกษาอิทธิพลของสารละลายผสมระหว่างพอลิแลคติกแอซิดและพอลิบิวทิลีนอะดิเพต-โค-เทเรฟทาเลตเมื่อผ่านกระบวนการอิเล็กโทรสเปรย์ต่อสมบัติของกระดาษแข็ง

5.1 วางแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ (completely randomized design, CRD) โดยศึกษาจากปัจจัยของสารละลายผสมระหว่างพอลิแลคติกแอซิดและพอลิบิวทิลีนอะดิเพต-โค-เทเรฟทาเลต โดยเลือกความเข้มข้นของสารละลายพอลิแลคติกแอซิดที่เหมาะสมที่สุดในการปรับปรุงสมบัติของกระดาษแข็ง จากการทดลองในข้อ 4 มาปรับอัตราส่วนด้วยการผสมพอลิบิวทิลีนอะดิเพต-โค-เทเรฟทาเลต ลงไปในอัตราส่วนระหว่างพอลิแลคติกแอซิดต่อพอลิบิวทิลีนอะดิเพต-โค-เทเรฟทาเลตที่ 100:0, 80:20, 50:50, 20:80 และ 0:100 ตามลำดับ

5.2 นำกระดาษที่ผ่านการอิเล็กโทรสเปรย์ด้วยสารละลายผสมระหว่างพอลิแลคติกแอซิดและพอลิบิวทิลีนอะดิเพต-โค-เทเรฟทาเลตที่มีอัตราส่วน 100:0, 80:20, 50:50, 20:80 และ 0:100 มาทดสอบสมบัติทางกายภาพ สมบัติเชิงกล สมบัติการต้านทานน้ำและน้ำมัน และสมบัติการกีดขวาง

ของกระดาศ ตามวิธีในข้อ 1.1 1.2 และ 1.3 เปรียบเทียบผลการทดสอบกับกระดาศที่ไม่ผ่านการเคลือบโดยเทคนิคอิเล็กโตรสเปรย์

5.3 นำกระดาศที่ผ่านการอิเล็กโตรสเปรย์ด้วยสารละลายผสมระหว่างพอลิแลคติกแอซิด และพอลิবিທີลีนอะดิเพท-โค-เทเรฟทาเลท มาวิเคราะห์ลักษณะอนุภาคบนพื้นผิวของกระดาศ ตามวิธีในข้อ 1.4

6. วิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

วิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติโดยการทดสอบความแปรปรวน (analysis of variance, ANOVA) และเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยระหว่างทรีตเมนต์โดยวิธี Duncan's new multiple range test (DMRT) ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ด้วยโปรแกรม SPSS เวอร์ชัน 16

ผลและวิจารณ์

1. สมบัติของกระดาษตัวอย่าง

กระดาษที่ใช้ในการทดลองเป็นกระดาษแข็งประเภท duplex board เคลือบด้านเดียว น้ำหนักมาตรฐาน 300 กรัมต่อตารางเมตร โดยกระดาษด้านหน้าหรือด้านที่เคลือบผิวมีลักษณะผิวเรียบและมีสีขาว ส่วนกระดาษด้านหลังเป็นด้านที่ไม่ผ่านการเคลือบผิวใดๆ มีลักษณะผิวหยาบและมีสีคล้ำ ผลการตรวจสอบค่าสมบัติทางกายภาพ สมบัติเชิงกล สมบัติการต้านทานน้ำและน้ำมัน และสมบัติการกีดขวางของกระดาษก่อนการเคลือบด้วยพอลิแลคติกแอซิดโดยเทคนิคอิเล็กโตรสเปรย์ แสดงดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 สมบัติของกระดาษก่อนผ่านการอิเล็กโตรสเปรย์ด้วยสารละลายพอลิแลคติกแอซิด

สมบัติ		ค่าทดสอบ
สมบัติทางกายภาพ	น้ำหนักมาตรฐาน (กรัม/ตารางเมตร)	302.16 ± 2.38
	ความหนา (มิลลิเมตร)	0.337 ± 0.002
	ความชื้น (ร้อยละ)	7.998 ± 0.077
สมบัติเชิงกล	ความต้านทานแรงกดวงแหวนแนว MD (กิโลนิวตัน/เมตร)	3.12 ± 0.05
	ความต้านทานแรงกดวงแหวนแนว CD (กิโลนิวตัน/เมตร)	2.25 ± 0.05
	ความต้านทานต่อการพับแนว MD (รอบ)	351.8 ± 6.5
	ความต้านทานต่อการพับแนว CD (รอบ)	137.2 ± 5.8

ตารางที่ 2 (ต่อ)

สมบัติ		ค่าทดสอบ
สมบัติการ	มุมสัมผัสน้ำ (องศา) (ด้านหน้า)	70.29 ± 0.65
ด้านทานน้ำและ	มุมสัมผัสน้ำ (องศา) (ด้านหลัง)	79.23 ± 0.68
น้ำมัน	เวลาในการดูดซึมน้ำ (นาทิจ) (ด้านหน้า)	> 200
	เวลาในการดูดซึมน้ำ (นาทิจ) (ด้านหลัง)	3.14 ± 0.03
	ปริมาณการดูดซึมน้ำ (กรัม/ตารางเมตร) (ด้านหน้า)	10.24 ± 0.83
	ปริมาณการดูดซึมน้ำ (กรัม/ตารางเมตร) (ด้านหลัง)	245.96 ± 3.08
	มุมสัมผัสน้ำมัน (องศา) (ด้านหน้า)	10.76 ± 0.77
	มุมสัมผัสน้ำมัน (องศา) (ด้านหลัง)	12.86 ± 0.77
	เวลาในการดูดซึมน้ำมัน (นาทิจ) (ด้านหน้า)	>200
	เวลาในการดูดซึมน้ำมัน (นาทิจ) (ด้านหลัง)	100.54 ± 0.73
	ปริมาณการดูดซึมน้ำมัน (กรัม/ตารางเมตร) (ด้านหน้า)	7.20 ± 0.63
	ปริมาณการดูดซึมน้ำมัน (กรัม/ตารางเมตร) (ด้านหลัง)	76.00 ± 2.77
สมบัติการ	อัตราการแพร่ผ่านของไอน้ำ (กรัม/ตารางเมตร/วัน)	528.51 ± 18.30
กีดขวาง	อัตราการแพร่ผ่านของก๊าซออกซิเจน (ลูกบาศก์เซนติเมตร/ตารางเมตร/วัน)	$42,483 \pm 692.78$

จากตารางที่ 2 สังเกตได้ว่า มุมสัมผัสน้ำและน้ำมันของกระดาษด้านหน้าน้อยกว่าด้านหลัง เพราะกระดาษด้านหน้ามีการเคลือบด้วยสารเคลือบและขัดมัน ทำให้มีผิวหน้าเรียบ เมื่อหยดน้ำและน้ำมันสัมผัสกับผิวหน้าที่เรียบหยดน้ำมีการแผ่กระจายจึงมีมุมสัมผัสน้อยกว่า ส่วนด้านหลังที่ไม่มีการเคลือบทำให้มีผิวหน้าไม่เรียบและหยดน้ำยังคงสภาพไม่มีการแผ่กระจาย อีกทั้งการตรวจสอบกระทำทันทีที่หยดน้ำหรือหยดน้ำมันสัมผัสกับผิวของกระดาษ ดังนั้นการลดลงของมุมสัมผัสเนื่องจากการดูดซึมจึงมีผลน้อย

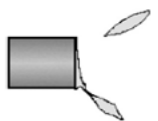
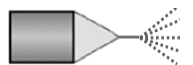
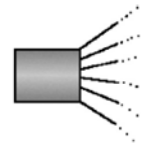
2. สภาวะอิเล็กโทรสเปรย์ที่เหมาะสมของสารละลายพอลิแลคติกแอซิดต่อการผลิตอนุภาคเพื่อเคลือบกระดาษแข็ง

จากการศึกษาสภาวะการเกิดอิเล็กโทรสเปรย์ประกอบด้วย 4 ปัจจัย ได้แก่ ค่าศักย์ไฟฟ้าสูง กระแสตรงที่ 6, 7, 8 และ 9 กิโลโวลต์ อัตราการไหลของสารละลายที่ 3, 4 และ 5 มิลลิเมตรต่อ ชั่วโมง และระยะทางระหว่างปลายเข็มถึงกระดาษที่ 10 และ 20 เซนติเมตร กำหนดความเข้มข้นของสารละลายพอลิแลคติกแอซิดที่ร้อยละ 0.5, 1, 2, 3 และ 4 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ลักษณะการกระจายตัวของสารละลายสำหรับบางสภาวะแสดงดังตารางที่ 3

เมื่อพิจารณาที่ความเข้มข้นของสารละลายพอลิแลคติกแอซิดพบว่า เมื่อสารละลายมีความเข้มข้นเพิ่มมากขึ้นเช่นที่ร้อยละ 3 และ 4 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ส่งผลทำให้ต้องเพิ่มค่าศักย์ไฟฟ้าสูง กระแสตรงด้วย เพราะการจะเกิดสภาวะอิเล็กโทรสเปรย์ได้นั้น แรงดึงดูดจากประจุต่างขั้วที่ได้มาจากศักย์ไฟฟ้าสูง กระแสตรง จะต้องเอาชนะค่าแรงดึงดูดของสารละลายให้ได้ จนเกิดสภาวะสมดุลของลักษณะของสารละลายที่ปลายเข็มเป็น กรวยของเทอร์ (Taylor cone) และสารละลายที่ออกมาจากปลายเข็มเป็นลักษณะของละอองแบบ cone-jet และเปลี่ยนเป็นอนุภาคกระจายตัวเป็นวงกลมตกลงบนผิวกระดาษอย่างสม่ำเสมอ

เมื่อค่าศักย์ไฟฟ้าสูง กระแสตรงที่ให้ในระบบมีค่าต่ำเช่นที่ 6 หรือ 7 กิโลโวลต์ แม้จะทำให้เกิดประจุต่างขั้วจนสามารถเหนี่ยวนำสารละลายให้ไปตกบนผิวกระดาษได้ แต่ไม่สามารถเอาชนะแรงดึงดูดของสารละลายได้ จึงเกิดเป็นลักษณะของหยดสารละลายแบบ multispindle แทนที่การเป็นละอองและทำให้ผิวหน้ากระดาษเปียก ในทางตรงข้าม เมื่อค่าศักย์ไฟฟ้าสูง กระแสตรงมีค่าสูงเกินไปเช่นที่ 9 หรือ 10 กิโลโวลต์ แรงไฟฟ้าอันเกิดจากประจุต่างขั้วจะเหนี่ยวนำสารละลายที่ออกมาจากปลายเข็มในทุกทิศทางแบบ multi-jet ทำให้ละอองสารละลายให้ตกกระจายลงบนผิวกระดาษอย่างไม่มีทิศทางและไม่มีความสม่ำเสมอ แสดงดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ลักษณะการกระจายตัวของสารละลายพอลิแลคติกแอซิดภายใต้สภาวะอิเล็กทรอนิกส์

ลักษณะของสารละลายที่ ปลายเข็ม	ความเข้มข้นของสารละลาย พอลิแลคติกแอซิด (ร้อยละโดยน้ำหนักต่อ ปริมาตร)	ค่าศักย์ไฟฟ้าสูง กระแสตรง (กิโลโวลต์)	อัตราไหลของ สารละลาย (มิลลิลิตรต่อชั่วโมง)	ระยะห่างระหว่างปลาย เข็มถึงกระดาด (เซนติเมตร)	ลักษณะของสารละลายที่กระดาด
 แบบ multispinde	0.5	7	4	10	ผิวหนังกระดาดเปียก
	1	7			
	2	7			
	3	8			
	4	8			
 แบบ cone-jet	0.5	8	4	10	ผิวหนังกระดาดเปียกกระจายเป็น วงกลมรัศมี 3 เซนติเมตร
	1	8			
	2	8			
	3	9			
	4	9			
 แบบ multi-jet	0.5	9	4	10	ผิวหนังกระดาดเปียกกระจายไม่ สม่ำเสมอ
	1	9			
	2	9			
	3	10			
	4	10			

ตารางที่ 3 (ต่อ)

ลักษณะของสารละลายที่ ปลายเข็ม	ความเข้มข้นของสารละลาย พอลิแลคติกแอซิด (ร้อยละโดยน้ำหนักต่อ ปริมาตร)	ค่าศักย์ไฟฟ้าสูง กระแสตรง (กิโลโวลต์)	อัตราไหลของ สารละลาย (มิลลิลิตรต่อชั่วโมง)	ระยะห่างระหว่างปลาย เข็มถึงกระดาษ (เซนติเมตร)	ลักษณะของสารละลายที่กระดาษ
	0.5	8	3	10	ผิวหน้ากระดาษเปียกตำแหน่งเดียว
	1	8			
	2	8			
	3	9			
	4	9			
 แบบ cone-jet	0.5	8	4	10	ผิวหน้ากระดาษเปียกกระจายเป็น วงกลมรัศมี 3 เซนติเมตร
	1	8			
	2	8			
	3	9			
	4	9			
 แบบ simple-jet	0.5	8	5	10	ผิวหน้ากระดาษเปียกตำแหน่งเดียว
	1	8			
	2	8			
	3	9			
	4	9			

สำหรับอัตราการไหลของสารละลาย พบว่า อัตราการไหลของสารละลายที่เข้าเกินไปเช่นที่ 3 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง ในขณะที่ค่าศักย์ไฟฟ้าสูงกระแสตรงมีค่าต่ำหรือสูงเกินไป ทำให้สารละลายไม่สามารถเกิดรูปลักษณะของกรวยที่ปลายเข็มได้ แม้ที่ค่าศักย์ไฟฟ้าที่สามารถเข้าสู่สมดุลที่ 8 หรือ 9 กิโลโวลต์จนสารละลายที่ปลายเข็มสามารถเกิดเป็นรูปกรวยของเทเลอร์ได้ แต่การสเปรย์กลับเกิดในลักษณะของการเป็นจิงหะ คือสเปรย์ละอองสารละลายสลับกับหยดส่งผลให้ละอองที่ออกมามีลักษณะเป็นเส้น อนุภาคที่ไปตกบนผิวกระดาดจึงตกที่ตำแหน่งเดียว ในทางตรงข้ามเมื่ออัตราการไหลของสารละลายสูงเกินไปเช่นที่ 5 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง พบว่า ที่ปลายเข็มเกิดรูปลักษณะของสารละลายเป็นรูปโคนแต่ไม่อาจสเปรย์เป็นละอองได้แบบ simple-jet แสดงดังตารางที่ 3 เนื่องจากมีสารละลายมากเกินไป จึงพิจารณาได้ว่าความสัมพันธ์ระหว่างค่าศักย์ไฟฟ้าสูงกระแสตรงและอัตราการไหลของสารละลายมีความสัมพันธ์กันอย่างมากต่อการเกิดสภาวะที่เหมาะสมของอิเล็กโตรสเปรย์

นอกจากพิจารณาค่าความเข้มข้นของสารละลาย ค่าศักย์ไฟฟ้ากำลังสูง และอัตราการไหลแล้ว อีกปัจจัยหนึ่งซึ่งสำคัญต่อการเกิดเป็นอนุภาคนั้นคือ ระยะห่างระหว่างปลายเข็มกับกระดาดที่อยู่บนแท่นรองรับทองแดงซึ่งเป็นข้อประจูดตรงข้ามกับปลายเข็ม ทำให้เกิดเป็นแรงดึงดูดละอองสารละลายให้เดินทางมาตกลงบนผิวกระดาด เมื่อระยะทางสั้นเกินไปจะทำให้ละอองของสารละลายนั้น ไม่อาจกลายเป็นอนุภาคได้ทัน เนื่องจากเมื่อสารละลายกลายเป็นละออง จะต้องมีการเว้นระยะให้ละอองมีการระเหยของตัวทำละลายให้ทันก่อนตกลงเป็นอนุภาคบนผิวของกระดาด แต่เมื่อระยะห่างระหว่างปลายเข็มกับกระดาดมีมากเกินไป จะทำให้อนุภาคไปไม่ถึงกระดาดนั่นเอง

ลักษณะของการกระจายของสารละลายพอลิแลคติกแอซิดภายใต้สภาวะอิเล็กโตรสเปรย์ในการทดลองนี้มีทั้งหมด 12 รูปแบบ แสดงดังภาคผนวกที่ ค1 สอดคล้องกับผลการวิจัยของ Laoonual (2006) ทั้งหมด 8 รูปแบบ ได้แก่ แบบ microdripping, dripping, spindle, multispindle, cone-jet, simple-jet, multi-jet และ ramified-jet โดยรูปแบบที่เหมาะสมคือที่ลักษณะการกระจายของสารละลายพอลิแลคติกแอซิดที่เป็นแบบ cone-jet ดังนั้นสภาวะที่เหมาะสมของอิเล็กโตรสเปรย์ที่ทำให้สารละลายพอลิแลคติกแอซิดเกิดเป็นอนุภาคที่เคลือบบนผิวหน้ากระดาดได้อย่าง

สมำเสมอ สามารถสรุปได้ว่า ที่ความเข้มข้นของสารละลายพอลิแลกติกแอซิดร้อยละ 0.5, 1 และ 2 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ต้องใช้ค่าศักย์ไฟฟ้ากำลังสูงกระแสตรงที่ 8 กิโลโวลต์ ส่วนที่ความเข้มข้นร้อยละ 3 และ 4 โดยน้ำหนักต่อปริมาตรใช้ค่าศักย์ไฟฟ้าสูงกระแสตรงที่ 9 กิโลโวลต์ โดยกำหนดอัตราการไหลของสารละลายเท่ากับ 4 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง และ ระยะห่างระหว่างปลายเข็มถึงกระดาศ 20 เซนติเมตรในทุกระดับความเข้มข้น ซึ่งสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 4 โดยสภาวะที่ได้นี้จะใช้กำหนดสภาวะอิเล็กโทรสเปรย์ในการศึกษาอิทธิพลของระดับความเข้มข้นของสารละลายพอลิแลกติกแอซิดต่อสมบัติของกระดาศในลำดับต่อไป

ตารางที่ 4 สภาวะอิเล็กโทรสเปรย์ที่เหมาะสมต่อการเกิดอนุภาคพอลิแลกติกแอซิดที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 0.5, 1, 2, 3 และ 4 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร

ความเข้มข้นของ สารละลาย พอลิแลกติกแอซิด (ร้อยละโดยน้ำหนัก ต่อปริมาตร)	ศักย์ไฟฟ้าสูง กระแสตรง (กิโลโวลต์)	อัตราการไหลของ สารละลาย (มิลลิลิตรต่อชั่วโมง)	ระยะห่างระหว่างปลาย เข็มกับกระดาศ (เซนติเมตร)
0.5	8	4	20
1	8	4	20
2	8	4	20
3	9	4	20
4	9	4	20

3. ผลของระดับความเข้มข้นของสารละลายพอลิแลคติกแอซิดเมื่อผ่านกระบวนการอิเล็กโทรสเปรย์ต่อสมบัติของกระดาษแข็ง

ในการทดลองได้กำหนดระดับความเข้มข้นของสารละลายพอลิแลคติกแอซิดที่ 5 ระดับ ได้แก่ที่ร้อยละ 0.5, 1, 2, 3 และ 4 โดยน้ำหนักต่อปริมาตรตามลำดับ กำหนดสภาวะอิเล็กโทรสเปรย์ที่เหมาะสมตามตารางที่ 4 ดังผลการทดลองในข้อ 2

3.1 สมบัติทางกายภาพของกระดาษ

ผลการทดสอบน้ำหนักมาตรฐาน ความหนา และปริมาณความชื้นของกระดาษที่ผ่านการอิเล็กโทรสเปรย์ด้วยพอลิแลคติกแอซิดเทียบกับกระดาษไม่เคลือบ แสดงดังตารางที่ 5 จากการทดลองพบว่า น้ำหนักมาตรฐานของกระดาษมีค่าสูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) เมื่อระดับความเข้มข้นของสารละลายพอลิแลคติกแอซิดเพิ่มขึ้นประมาณร้อยละ 2 โดยน้ำหนักต่อปริมาตรขึ้นไป ในขณะที่ความหนาเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) ที่ระดับความเข้มข้นประมาณร้อยละ 1 โดยน้ำหนักต่อปริมาตรขึ้นไป สอดคล้องกับผลงานวิจัยที่เคลือบกระดาษด้วยพอลิแลคติกแอซิด ที่พบว่า การเพิ่มขึ้นของน้ำหนักมาตรฐานและความหนาขึ้นอยู่กับระดับความเข้มข้นของสารเคลือบหรือปริมาณสารเคลือบในสารละลายที่เพิ่มมากขึ้น (Rhim et al., 2007; Rhim and Kim, 2009)

ภายหลังการเคลือบที่ทุกระดับความเข้มข้นพบว่าความชื้นในกระดาษลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) การอิเล็กโทรสเปรย์ด้วยสารละลายพอลิแลคติกแอซิด ทำให้เกิดอนุภาคไปอุดรูพรุนระหว่างเส้นใยเซลลูโลสบนผิวหน้าของกระดาษ สามารถอธิบายได้ชัดเจนด้วยภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด แสดงดังภาพที่ 23 ซึ่งจะอธิบายในผลการตรวจสอบผิวหน้าของกระดาษในลำดับต่อไป สอดคล้องกับงานวิจัยก่อนหน้านี้ที่พบว่าสารเคลือบที่มีสมบัติไม่ชอบน้ำ เมื่อมีการอุดรูพรุนระหว่างเส้นใย ส่งผลให้กระดาษมีปริมาณความชื้นลดลง (Rhim et al., 2007; Butkinaree et al., 2008 and Manangan and Shawaphun, 2010)

ตารางที่ 5 น้ำหนักมาตรฐาน ความหนา และปริมาณความชื้นของกระดาศที่ผ่านการอิเล็กทรอนิกส์
สเปรย์ด้วยสารละลายพอลิแลคติกแอซิด

น้ำหนักมาตรฐาน พอลิแลคติกแอซิด (ร้อยละโดยน้ำหนัก/ปริมาตร)	ค่าทดสอบ		
	น้ำหนักมาตรฐาน (กรัม/ตร.ม.)	ความหนา (ไมโครเมตร)	ความชื้น (ร้อยละ)
untreated	302.16 ± 2.38 ^a	337.0 ± 2.00 ^a	7.998 ± 0.08 ^b
0.5	304.36 ± 2.07 ^{ab}	339.6 ± 2.30 ^{ab}	7.630 ± 0.09 ^a
1	305.45 ± 2.42 ^{abc}	342.8 ± 4.14 ^{bc}	7.466 ± 0.07 ^a
2	306.63 ± 2.71 ^{bcd}	345.8 ± 3.35 ^c	7.578 ± 0.08 ^a
3	308.38 ± 3.04 ^{cd}	346.4 ± 3.91 ^c	7.546 ± 0.08 ^a
4	310.43 ± 2.13 ^d	346.6 ± 3.36 ^c	7.540 ± 0.09 ^a

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

3.2 สมบัติเชิงกลของกระดาศ

ผลการทดสอบความต้านทานแรงกดวงแหวน และความต้านทานต่อการพับในแนว MD และ CD ของกระดาศที่ผ่านการอิเล็กทรอนิกส์สเปรย์ด้วยสารละลายพอลิแลคติกแอซิด แสดงดังตารางที่ 6 จากผลการทดลองพบว่า ความต้านทานแรงกดวงแหวนของกระดาศแนว MD และ CD ของกระดาศที่ไม่เคลือบและกระดาศที่อิเล็กทรอนิกส์สเปรย์ด้วยสารละลายพอลิแลคติกแอซิดที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 0.5, 1, 2 และ 3 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร มีความต้านทานแรงกดวงแหวนไม่แตกต่างกัน อย่างไรก็ตามสำหรับกระดาศที่อิเล็กทรอนิกส์สเปรย์ด้วยสารละลายพอลิแลคติกแอซิดที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 4 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร พบว่ามีความต้านทานแรงกดวงแหวนลดลงทั้งในแนว MD และ CD อย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) ทั้งนี้เพราะเมื่อความเข้มข้นของสารละลายเพิ่มขึ้นจนถึงระดับหนึ่งจะทำให้กระดาศที่ถูกเคลือบสูญเสียสมบัติเชิงกลไป สอดคล้องกับหลายงานวิจัยที่นำพอลิเมอร์ย่อยสลายได้ทางชีวภาพมาเคลือบบนกระดาศ ทั้งนี้อาจเป็นเพราะปริมาณสารเคลือบที่ผิวหน้ากระดาศมีมาก จึงทำให้สารเคลือบแทรกซึมเข้าไปขัดขวางแรงยึดเกาะระหว่างเซลล์โลสในโครงสร้างของกระดาศจึงทำให้ความแข็งแรงของกระดาศลดลง (Rhim et al., 2006; Rhim et al., 2007; Sothrovit, 2009; Rhim and Kim, 2009 and Franco et al., 2010)

ตารางที่ 6 ความต้านทานแรงกดวงแหวนและความต้านทานต่อการพับของกระดวยที่ผ่านการอิเล็กทรอนิกส์
โทรสเปรย์ด้วยสารละลายพอลิแลคติกแอซิด

ทิศทาง	ความเข้มข้นของสารละลาย พอลิแลคติกแอซิด (ร้อยละโดยน้ำหนักต่อ ปริมาตร)	ค่าทดสอบ	
		ความต้านทานแรง กดวงแหวน (กิโลนิวตัน/ม.)	ความต้านทานการพับ (รอบ)
MD	untreated	3.12 ± 0.05^d	351.8 ± 6.56^d
	0.5	3.13 ± 0.04^d	353.2 ± 6.80^d
	1	3.14 ± 0.06^d	353.6 ± 7.25^d
	2	3.11 ± 0.05^d	350.6 ± 5.84^d
	3	3.08 ± 0.06^d	345.8 ± 7.50^c
	4	2.86 ± 0.04^c	340.2 ± 6.62^c
CD	untreated	2.25 ± 0.05^b	137.2 ± 5.80^b
	0.5	2.25 ± 0.06^b	138.4 ± 6.53^b
	1	2.26 ± 0.04^b	139.0 ± 6.50^b
	2	2.26 ± 0.05^b	136.6 ± 6.54^b
	3	2.17 ± 0.06^b	133.4 ± 5.62^a
	4	2.04 ± 0.05^a	130.2 ± 5.81^a

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

สำหรับสมบัติความต้านทานต่อการพับ พบว่า กระดวยที่ไม่เคลือบและกระดวยที่ผ่านการอิเล็กทรอนิกส์ด้วยสารละลายพอลิแลคติกแอซิดที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 0.5, 1 และ 2 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร มีค่าความต้านทานต่อการพับไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ อย่างไรก็ตาม สำหรับกระดวยที่ผ่านการอิเล็กทรอนิกส์ด้วยสารละลายพอลิแลคติกแอซิดที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 3 และ 4 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร พบว่ามีความต้านทานต่อการพับลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) ทั้งในแนว MD และ CD ซึ่งสามารถอธิบายในทำนองเดียวกันกับการลดลงของค่าความต้านทานแรงกดโดยสารละลายที่แทรกซึมเข้าไปในโครงสร้าง ทำให้สมบัติเชิงกลลดลง อีกทั้ง

พอลิแลคติกแอซิดมีความเปราะและมีความสามารถในการดึงยึดต่ำ (Lim et al., 2008) ทำให้บริเวณรอยพับเกิดเป็นรอยแตกและผสึขาวอย่างชัดเจน โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่ระดับความเข้มข้นสูง สอดคล้องกับผลงานวิจัยของ Rhim และ Kim (2009) ที่พบว่า ค่าการดึงยึดของกระดาษที่เคลือบด้วยพอลิแลคติกแอซิดต่ำกว่ากระดาษที่เคลือบด้วยพอลิเอทิลีนอย่างชัดเจนเมื่อระดับความเข้มข้นของสารละลายเพิ่มสูงขึ้น

ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่ากระดาษที่ผ่านการอิเล็กโทรสเปรย์ด้วยสารละลายพอลิแลคติกแอซิดที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 0.5, 1 และ 2 โดยน้ำหนักต่อปริมาตรไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติเชิงกลเมื่อเปรียบเทียบกับกระดาษที่ไม่เคลือบผิวหน้า ทั้งนี้อาจเป็นเพราะการอิเล็กโทรสเปรย์ผิวหน้ากระดาษด้วยพอลิแลคติกแอซิดเกิดเป็นอนุภาคนาโนเคลือบฟิล์มบนผิวกระดาษ ทำให้มีปริมาณสารที่ผิวนำน้อย และไม่เกิดลักษณะของแผ่นฟิล์มต่อเนื่อง และไม่มี ความชื้นที่อาจทำลายความแข็งแรงของกระดาษ ซึ่งแตกต่างจากการเคลือบสารละลายพอลิแลคติกแอซิดที่ความเข้มข้นเดียวกัน แต่ใช้วิธีเคลือบสารละลายโดยตรงลงบนผิวกระดาษด้วย metering rod พบว่า สารละลายและความชื้นเข้าไปทำลายแรงยึดเกาะระหว่างเส้นใยเซลลูโลสทำให้ความแข็งแรงของกระดาษลดลง (Rhim et al., 2007)

3.3 สมบัติการต้านทานน้ำและน้ำมันของกระดาษ

ค่ามุมสัมผัส ปริมาณการดูดซึมน้ำ และเวลาในการดูดซึมน้ำของกระดาษที่อิเล็กโทรสเปรย์ด้วยพอลิแลคติกแอซิด แสดงดังตารางที่ 7 เมื่อพิจารณากระดาษด้านหน้าและด้านหลังพบว่า ได้ผลเป็นแนวโน้มเดียวกัน โดยกระดาษที่อิเล็กโทรสเปรย์ด้วยพอลิแลคติกแอซิดมีความสามารถในการต้านทานน้ำเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน เห็นได้จากปริมาณการดูดซึมน้ำที่ลดลง มุมสัมผัส และเวลาในการดูดซึมน้ำที่เพิ่มขึ้น

ตารางที่ 7 มุมสัมผัส ปริมาณการดูดซึมน้ำ และเวลาในการดูดซึมน้ำของกระดาษที่ผ่านการอิเล็กโทรสเปรย์ด้วยสารละลายพอลิแลคติกแอซิด

กระดาษ	ความเข้มข้นของ สารละลาย พอลิแลคติกแอซิด (ร้อยละโดยน้ำหนักต่อ ปริมาตร)	ค่าทดสอบ		
		มุมสัมผัส (องศา)	ปริมาณการดูดซึมน้ำ (กรัม/ตร.ม.)	เวลาในการดูดซึมน้ำ (นาทีก)
ด้านหน้า	untreated	70.29 ± 0.65^a	10.24 ± 0.83^d	$> 200^c$
	0.5	90.70 ± 0.65^b	6.02 ± 0.66^c	$> 200^c$
	1	122.42 ± 0.78^f	1.98 ± 0.66^a	$> 200^c$
	2	117.46 ± 0.68^e	1.48 ± 0.68^a	$> 200^c$
	3	109.78 ± 0.68^d	1.31 ± 0.59^a	$> 200^c$
	4	102.44 ± 0.65^c	1.26 ± 0.64^a	$> 200^c$
ด้านหลัง	untreated	79.23 ± 0.68^a	245.96 ± 3.08^c	3.14 ± 0.03^a
	0.5	97.03 ± 0.67^b	11.62 ± 0.78^d	180.58 ± 0.87^b
	1	123.39 ± 0.63^f	2.90 ± 0.70^b	$> 200^c$
	2	117.39 ± 0.67^e	2.48 ± 0.84^b	$> 200^c$
	3	110.68 ± 0.68^d	2.22 ± 0.49^b	$> 200^c$
	4	101.86 ± 0.65^c	2.12 ± 0.64^b	$> 200^c$

หมายเหตุ ^{a-f} ตัวอักษรที่ต่างกันในแต่ละแถวหมายถึงค่าเฉลี่ยมีความแตกต่างกันทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

จากค่ามุมสัมผัส พบว่า ค่ามุมสัมผัสระหว่างหยดน้ำกับกระดาษที่อิเล็กโทรสเปรย์ด้วยสารละลายพอลิแลคติกแอซิดเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) ตั้งแต่ที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร และค่ามุมสัมผัสมากที่สุดคือที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 1 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร จากนั้นพบว่าค่ามุมสัมผัสลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) ตามระดับความเข้มข้นที่เพิ่มขึ้นเหมือนกันทั้งด้านหน้าและด้านหลัง ทั้งนี้อาจเป็นเพราะอนุภาคที่ได้จากการอิเล็กโทรสเปรย์ด้วยสารละลายพอลิแลคติกแอซิดที่ระดับความเข้มข้นที่ต่างกันจะมีรูปร่างที่แตกต่างกัน แสดงถึงภาพที่ 23 และ 24 อนุภาคของพอลิแลคติกแอซิดที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนักต่อ

ปริมาตร มีขนาดเล็กและที่ผิวมีรูพรุน อนุภาคบนผิวหน้าของกระดาษมีจำนวนและความหนาแน่นน้อย ทำให้กระดาษยังคงดูดซับน้ำได้ จึงส่งผลให้มีค่ามุมสัมผัสน้อยกว่า ในขณะที่อนุภาคของพอลิแลคติกแอซิดที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 1 โดยน้ำหนักต่อปริมาตรมีขนาดใหญ่ขึ้นเล็กน้อย แต่มีความสม่ำเสมอและมีจำนวนความหนาแน่นของอนุภาคมาก จึงทำให้มีค่ามุมสัมผัสมากที่สุด เนื่องจากหยดน้ำไม่มีการแผ่กระจาย แต่อนุภาคของสารละลายตั้งแต่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 2 โดยน้ำหนักต่อปริมาตรขึ้นไป พบว่า อนุภาคมีขนาดใหญ่ขึ้นและมีขนาดของอนุภาคไม่สม่ำเสมอ อีกทั้งอนุภาคมีการเรียงซ้อนกันลักษณะคล้ายแผ่นฟิล์มต่อเนื่อง จึงทำให้มุมสัมผัสลดลงตามลำดับ เนื่องจากหยดน้ำมีการแผ่กระจายมากขึ้น

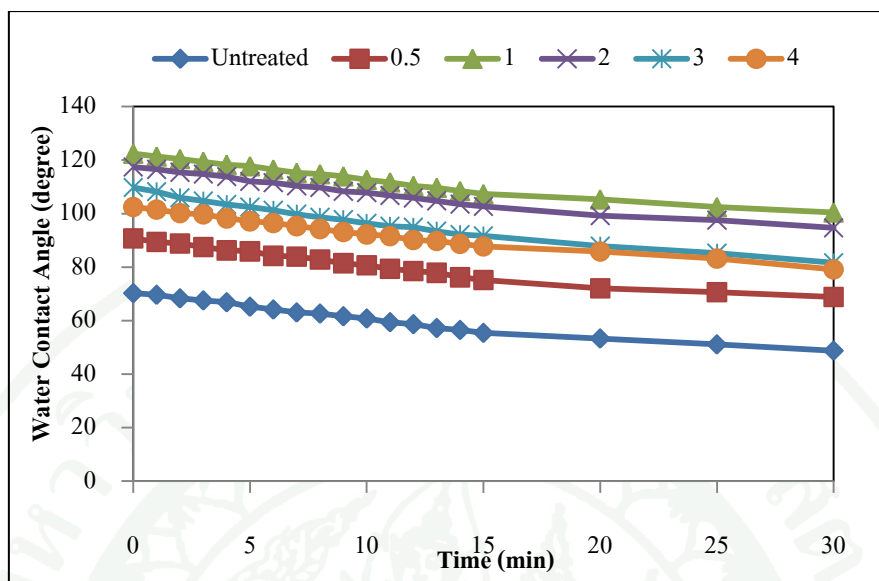
เมื่อพิจารณาปริมาณการดูดซับน้ำของกระดาษทั้งสองด้าน พบว่ากระดาษที่ผ่านการอิเล็กทรอนิกส์ด้วยพอลิแลคติกแอซิดที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร สามารถลดปริมาณการดูดซับน้ำอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) แต่อย่างไรก็ตาม แม้ว่าความเข้มข้นจะเพิ่มขึ้นมากกว่าร้อยละ 1 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร แต่ความสามารถในการดูดซับน้ำไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ทั้งนี้เพราะการดูดซับน้ำอาจขึ้นกับลักษณะของการกระจายตัวของอนุภาคบนกระดาษเป็นสำคัญ ที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 1 โดยน้ำหนักต่อปริมาตรขึ้นไป สารละลายพอลิแลคติกแอซิดสามารถกระจายปกคลุมผิวหน้ากระดาษได้ดี ค่าการดูดซับน้ำจึงไม่ได้เพิ่มขึ้นตามระดับความเข้มข้น สอดคล้องกับผลการทดลองที่นำสารละลายพอลิแลคติกแอซิดที่ระดับความเข้มข้นต่างกันมาเคลือบกระดาษ พบว่าตั้งแต่ที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 3 โดยน้ำหนักต่อปริมาตรขึ้นไป ค่าการดูดซับน้ำของกระดาษก็ไม่แตกต่างกัน (Rhim et al., 2007 and Rhim and Kim, 2009) แต่ในทางตรงกันข้ามเมื่อนำสารละลายจากพอลิเมอร์ย่อยสลายได้ทางชีวภาพที่มีสมบัติชอบน้ำ (hydrophilic) มาเคลือบกระดาษกลับพบว่า กระดาษมีการดูดซับน้ำเพิ่มขึ้นตามระดับความเข้มข้นที่เพิ่มขึ้น (Kjellgren et al., 2006; Rhim et al., 2006)

สำหรับเวลาในการดูดซับน้ำ พบว่า ด้านหน้าของกระดาษที่ไม่เคลือบผิวหน้าและกระดาษที่อิเล็กทรอนิกส์ด้วยสารละลายพอลิแลคติกแอซิดที่ระดับความเข้มข้นต่างๆ มีค่าเวลาในการดูดซับไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากผิวด้านหน้าของกระดาษมีการเคลือบด้วยสารเคลือบและขัดมันมาแล้วจึงต้านทานการดูดซับน้ำได้ดี แต่จากการสังเกตพบว่าบริเวณผิวหน้าของกระดาษที่ไม่เคลือบด้วยสารละลายพอลิแลคติกแอซิดจะเปียกเมื่อสัมผัสกับหยดน้ำเป็นเวลานาน ในขณะที่กระดาษที่ผ่านการอิเล็กทรอนิกส์ด้วยสารละลายพอลิแลคติกแอซิดตั้งแต่ที่ความเข้มข้นร้อยละ 1 โดยน้ำหนักต่อปริมาตรขึ้นไป แม้ต้องสัมผัสกับหยดน้ำเป็นเวลานาน ก็ไม่พบการเปียกอยู่

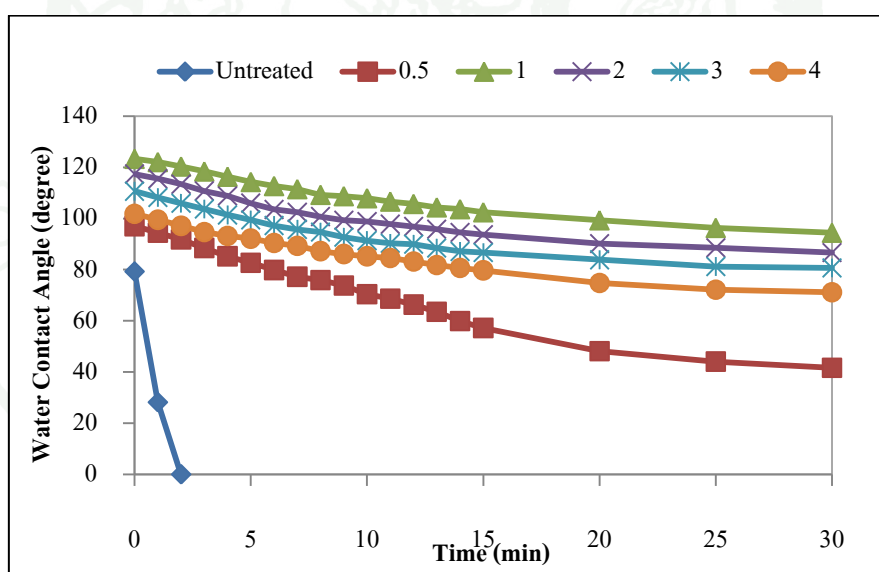
ของผิวหน้ากระดาษ ส่วนด้านหลังของกระดาษที่ผ่านการอิเล็กทรอนิกส์ด้วยพอลิแลคติกแอซิด พบว่า เวลาในการดูดซึมน้ำเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบกับกระดาษไม่เคลือบ โดยระยะเวลาในการดูดซึมน้ำเพิ่มขึ้นที่ระดับความเข้มข้นของสารละลายพอลิแลคติกแอซิดเพียงร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร และสังเกตได้ว่า ที่ระดับความเข้มข้นของสารละลายพอลิแลคติกแอซิดร้อยละ 1 โดยน้ำหนักต่อปริมาตรขึ้นไป เวลาในการดูดซึมน้ำเพิ่มขึ้นเทียบเท่ากับ ด้านหน้าของกระดาษ

จากการพิจารณา ค่ามุมสัมผัส ปริมาณการดูดซึมน้ำและเวลาในการดูดซึมน้ำ แสดงว่า กระดาษที่อิเล็กทรอนิกส์ด้วยสารละลายพอลิแลคติกแอซิดที่ความเข้มข้นร้อยละ 1 โดยน้ำหนักต่อปริมาตรขึ้นไปบนผิวกระดาษมีอนุภาคพอลิแลคติกแอซิดที่เพียงพอต่อการเพิ่มสมบัติการต้านทานน้ำของกระดาษได้ ซึ่งแตกต่างจากผลงานวิจัยที่ใช้วิธีการเคลือบสารละลายโดยตรงลงบนผิวหน้ากระดาษ พบว่าต้องใช้ความเข้มข้นของสารละลายพอลิแลคติกแอซิดที่ร้อยละ 3 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร รวมถึงต้องใช้ปริมาณสารละลายมากกว่า 10 เท่า จึงจะสามารถปรับปรุงสมบัติการต้านทานน้ำของกระดาษได้ดี (Rhim et al., 2007 and Rhim and Kim, 2009)

เมื่อพิจารณาอัตราการลดลงของมุมสัมผัสของกระดาษ โดยการวัดมุมสัมผัสแบบต่อเนื่อง (dynamic contact angle) ของหยดน้ำปริมาตร 5 ไมโครลิตร ในนาที่ที่ 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 15, 20, 25 และนาที่ที่ 30 ภายหลังการหยดหยดน้ำลงบนผิวกระดาษ เพื่อศึกษา ลักษณะการเปลี่ยนแปลงของมุมสัมผัสของหยดน้ำเมื่อเวลาผ่านไป ผลการทดลองแสดงดังภาพที่ 21 (รายละเอียดของค่าทดสอบแสดงในภาคผนวก ง) พบว่าเมื่อเวลาผ่านไปกระดาษที่อิเล็กทรอนิกส์ด้วยสารละลายพอลิแลคติกแอซิดที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 1, 2, 3 และ 4 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร จะมีการลดลงของมุมสัมผัสที่น้อยกว่า กระดาษที่อิเล็กทรอนิกส์ด้วยสารละลายพอลิแลคติกแอซิดที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ที่มุมสัมผัสมีแนวโน้มลดลงอย่างต่อเนื่องตามเวลาที่ผ่านไป ผลการทดลองมีความใกล้เคียงกันทั้งด้านหน้าและด้านหลัง ยกเว้นด้านหลังของกระดาษไม่เคลือบพบว่า มุมสัมผัสลดลงอย่างรวดเร็วภายในระยะเวลา 1 นาที่ จนไม่สามารถวัดค่าได้



(ก) กระจาด้านหน้า



(ข) กระจาด้านหลัง

ภาพที่ 21 การลดลงของค่ามุมสัมผัสของหยดน้ำเมื่อเวลาผ่านไปสำหรับกระจาดที่ผ่านการอิเล็กโทรสเปรย์ด้วยสารละลายพอลิแลกติกแอซิด (ก) กระจาด้านหน้า และ (ข) กระจาด้านหลัง

ค่ามุมสัมพัทธ์ ปริมาณการดูดซึมน้ำมัน และเวลาในการดูดซึมน้ำมันของกระดาษที่ผ่านการอิเล็กโทรสเปรย์ด้วยสารละลายพอลิแลคติกแอซิด แสดงดังตารางที่ 8 เมื่อพิจารณากระดาษด้านหน้าและด้านหลังพบว่า ได้ผลเป็นแนวโน้มเดียวกันกับความสามารถในการต้านทานน้ำ คือกระดาษที่ผ่านการอิเล็กโทรสเปรย์ด้วยพอลิแลคติกแอซิด มีปริมาณการดูดซึมน้ำมันที่ลดลง และค่ามุมสัมพัทธ์รวมถึงเวลาในการดูดซึมน้ำมันที่เพิ่มมากขึ้น

ตารางที่ 8 มุมสัมพัทธ์ การดูดซึมน้ำมัน และเวลาในการดูดซึมน้ำมันของกระดาษที่ผ่านการอิเล็กโทรสเปรย์ด้วยสารละลายพอลิแลคติกแอซิด

กระดาษ	ความเข้มข้นของ สารละลาย พอลิแลคติกแอซิด (ร้อยละโดยน้ำหนักต่อ ปริมาตร)	ค่าทดสอบ		
		มุมสัมพัทธ์ (องศา)	การดูดซึมน้ำมัน (กรัม/ตร.ม.)	เวลาในการดูด ซึมน้ำมัน (นาทิจ)
ด้านหน้า	untreated	10.76 ± 0.77^a	7.20 ± 0.63^b	$> 200^b$
	0.5	20.70 ± 0.74^b	6.46 ± 0.65^b	$> 200^b$
	1	44.28 ± 0.75^f	2.64 ± 0.59^a	$> 200^b$
	2	38.66 ± 0.73^c	2.42 ± 0.63^a	$> 200^b$
	3	32.58 ± 0.83^d	2.38 ± 0.63^a	$> 200^b$
	4	23.70 ± 0.71^c	2.36 ± 0.61^a	$> 200^b$
ด้านหลัง	untreated	12.86 ± 0.77^a	76.00 ± 2.77^d	100.54 ± 0.73^a
	0.5	22.20 ± 0.75^b	15.48 ± 0.67^c	$> 200^b$
	1	46.36 ± 0.77^f	3.14 ± 0.64^a	$> 200^b$
	2	40.86 ± 0.71^c	3.07 ± 0.52^a	$> 200^b$
	3	34.98 ± 0.72^d	2.80 ± 0.68^a	$> 200^b$
	4	28.92 ± 0.77^c	2.70 ± 0.67^a	$> 200^b$

หมายเหตุ ^{a-f} ตัวอักษรที่ต่างกันในแถวตั้งหมายถึงค่าเฉลี่ยมีความแตกต่างกันทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

เมื่อพิจารณาค่ามุมสัมผัสของน้ำมัน พบว่า กระดาษที่ผ่านการทำอิเล็กโทรสเปรย์ด้วยสารละลายพอลิแลคติกแอซิดมีค่ามุมสัมผัสน้ำมันเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) โดยค่ามุมสัมผัสค่าสูงที่สุดสำหรับสารละลายพอลิแลคติกแอซิดที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 1 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร เมื่อระดับความเข้มข้นของสารละลายสูงกว่าร้อยละ 1 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร พบว่ามุมสัมผัสจะค่อยๆ ลดลงทั้งนี้อาจเป็นเพราะ อนุภาคของพอลิแลคติกแอซิดที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร มีขนาดเล็กที่ผิวมีรูพรุน มีจำนวนและความหนาแน่นของอนุภาคน้อย ทำให้กระดาษยังคงดูดซับน้ำมันได้ จึงส่งผลให้มีค่ามุมสัมผัสน้อยกว่า ในขณะที่อนุภาคของพอลิแลคติกแอซิดที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 1 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร มีขนาดใหญ่ขึ้นเล็กน้อย และมีความสม่ำเสมอ มีจำนวนความหนาแน่นของอนุภาคมาก จึงทำให้มีค่ามุมสัมผัสมากที่สุด เนื่องจากหยดน้ำมันแผ่กระจายได้น้อย แต่อนุภาคของสารละลายตั้งแต่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 2 โดยน้ำหนักต่อปริมาตรขึ้นไป พบว่า อนุภาคมีขนาดใหญ่ขึ้นและมีขนาดของอนุภาคไม่สม่ำเสมอ อีกทั้งอนุภาคมีการเรียงซ้อนกันลักษณะคล้ายแผ่นฟิล์มต่อเนื่อง จึงทำให้มุมสัมผัสลดลงตามลำดับ เนื่องจากหยดน้ำมันมีการแผ่กระจายมากขึ้น

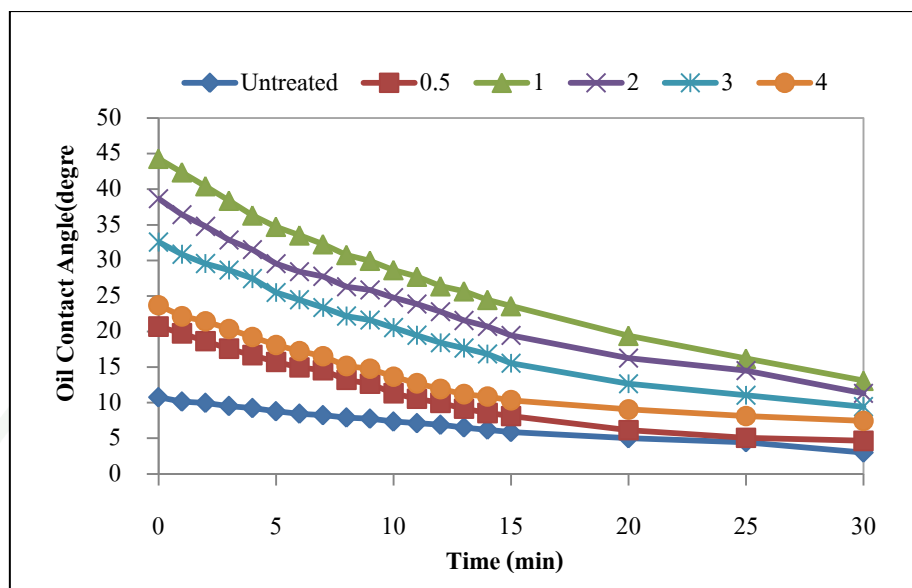
จากผลของค่าปริมาณการดูดซับน้ำมันของกระดาษทั้งสองด้าน พบว่ากระดาษที่ผ่านการอิเล็กโทรสเปรย์ด้วยสารละลายพอลิแลคติกแอซิดที่ระดับความเข้มข้นเพียงร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร สามารถลดการดูดซับน้ำมันอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) โดยเฉพาะอย่างยิ่งกระดาษที่อิเล็กโทรสเปรย์ด้วยสารละลายพอลิแลคติกแอซิดที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 1 โดยน้ำหนักต่อปริมาตรขึ้นไป พบว่าปริมาณการดูดซับน้ำมันลดลงอีกอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) แต่อย่างไรก็ตามแม้ว่าความเข้มข้นจะเพิ่มขึ้น แต่ปริมาณ การดูดซับน้ำมันไม่แตกต่างกันและไม่เพิ่มขึ้นตามระดับความเข้มข้น ทั้งนี้เพราะเมื่ออนุภาคของพอลิแลคติกแอซิดสามารถปกคลุมผิวหน้ากระดาษได้ทั่วถึง แม้ว่าจะเพิ่มความเข้มข้นให้สูงขึ้นอีก พบว่าค่าการดูดซับน้ำมันไม่แตกต่างกัน สอดคล้องกับผลการทดลองของ Manangan และ Shawaphun (2010) ที่นำสารละลายพอลิแลคติกแอซิดและพอลิไฮดรอกซีบิวทิเรตเคลือบกระดาษชานอ้อย พบว่าสามารถลดการดูดซับน้ำมันของกระดาษได้ ตั้งแต่ที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 4 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร และเมื่อเพิ่มระดับความเข้มข้นขึ้นไปพบว่า ค่าการดูดซับน้ำมันของกระดาษก็ไม่แตกต่างกัน

สำหรับเวลาในการดูดซับน้ำมัน พบว่า ด้านหน้าของกระดาษที่ไม่เคลือบผิวหน้าและกระดาษที่ผ่านการอิเล็กโทรสเปรย์ด้วยสารละลายพอลิแลคติกแอซิดที่ระดับความเข้มข้นต่างๆ เวลาในการดูดซับน้ำมันไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากผิวด้านหน้าของกระดาษมีการเคลือบ

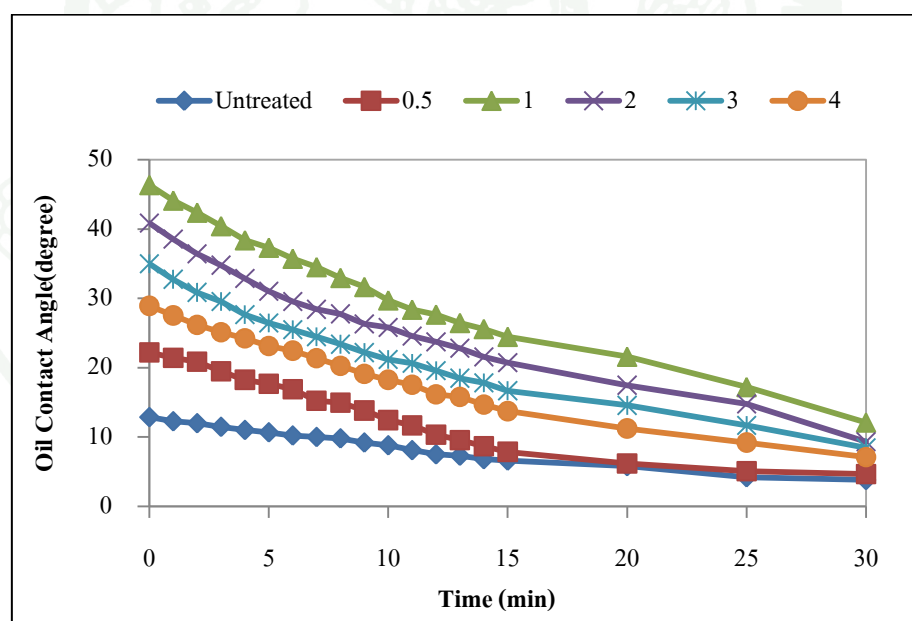
ด้วยสารเคลือบและขัดมันมาแล้ว ส่วนด้านหลังของกระดาษที่ผ่านการอิเล็กทรอนิกส์ด้วยพอลิแลคติกแอซิด พบว่า ที่ระดับความเข้มข้นของสารละลายพอลิแลคติกแอซิดเพียงร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร มีเวลาในการดูดซึมน้ำมันเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบกับกระดาษไม่เคลือบ และสังเกตได้ว่า ที่ระดับความเข้มข้นของสารละลายพอลิแลคติกแอซิดตั้งแต่ร้อยละ 1 โดยน้ำหนักต่อปริมาตรขึ้นไป มีเวลาในการดูดซึมน้ำมันเพิ่มขึ้นใกล้เคียงกับด้านหน้าของกระดาษ

จากการพิจารณา ค่ามุมสัมผัส ปริมาณการดูดซึมน้ำมัน และเวลาในการดูดซึมน้ำมัน พบว่าค่าที่ได้สอดคล้องกับค่าทดสอบสมบัติการต้านทานน้ำ แสดงว่ากระดาษที่ผ่านการอิเล็กทรอนิกส์ด้วยสารละลายพอลิแลคติกแอซิดที่ความเข้มข้นร้อยละ 1 โดยน้ำหนักต่อปริมาตรขึ้นไปบนผิวกระดาษมีอนุภาคพอลิแลคติกแอซิดที่เพียงพอต่อการปรับปรุงสมบัติการต้านทานน้ำและน้ำมันของกระดาษได้ ซึ่งแตกต่างจากผลงานวิจัยที่ใช้วิธีจุ่มกระดาษขานอ้อยลงในสารละลาย พบว่าต้องใช้ความเข้มข้นของสารละลายพอลิแลคติกแอซิดที่ร้อยละ 4 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร และปริมาณสารละลายมากกว่า 20 เท่า จึงจะสามารถปรับปรุงสมบัติการต้านทานน้ำมันของกระดาษได้ดี (Manangan and Shawaphun, 2010)

เมื่อพิจารณาผลการทดลองวัดค่ามุมสัมผัสแบบต่อเนื่อง (dynamic contact angle) ของหยดน้ำมันปริมาตร 5 ไมโครลิตร ในนาที่ที่ 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 15, 20, 25 และนาที่ที่ 30 ภายหลังการหยดหยดน้ำมันลงบนผิวกระดาษ เพื่อศึกษาลักษณะการเปลี่ยนแปลงของมุมสัมผัสของหยดน้ำมันเมื่อเวลาผ่านไป ผลการทดลองแสดงดังภาพที่ 22 (รายละเอียดของค่าทดสอบแสดงในภาคผนวก ง) จากการสังเกต ค่ามุมสัมผัสของหยดน้ำมันอย่างต่อเนื่องทั้งด้านหน้าและด้านหลังของกระดาษพบว่า ค่ามุมสัมผัสของกระดาษที่อิเล็กทรอนิกส์ด้วยพอลิแลคติกแอซิดเมื่อเวลาผ่านไป 30 นาที่ ยังคงมีค่ามากกว่ากระดาษที่ไม่เคลือบ โดยค่ามุมสัมผัสของหยดน้ำมันบนกระดาษที่ผ่านการอิเล็กทรอนิกส์ด้วยสารละลายพอลิแลคติกแอซิดที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 1 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร มีค่ามากที่สุดตลอดช่วงเวลาในการทดลอง ทั้งนี้หยดน้ำมันมีแรงตึงผิวต่ำจึงแผ่กระจายไปบนผิวหน้าของกระดาษ จึงทำให้มุมสัมผัสของหยดน้ำมันลดลง ส่วนกระดาษไม่เคลือบมุมสัมผัสจะลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงแรกเพราะมีการซึมของน้ำมันร่วมด้วย แต่เมื่อเวลาผ่านไปมุมสัมผัสอาจมีการเปลี่ยนแปลงที่น้อยกว่า เนื่องจากมีการแผ่กระจายของหยดน้ำมันที่น้อยกว่า



(ก) กระจาด้านหน้า



(ข) กระจาด้านหลัง

ภาพที่ 22 การลดลงของค่ามุมสัมผัสของหยดน้ำมันเมื่อเวลาผ่านไปสำหรับกระจาดที่ผ่านการโอเลกโตรสเปรย์ด้วยสารละลายพอลิแลกติกแอซิด (ก) กระจาด้านหน้า และ (ข) กระจาด้านหลัง

3.4 สมบัติการกีดขวางของกระดาษ

ผลการทดสอบอัตราการแพร่ผ่านของไอน้ำ และอัตราการแพร่ผ่านของก๊าซออกซิเจนของกระดาษที่ผ่านการอิเล็กโทรสเปรย์ด้วยสารละลายพอลิแลคติกแอซิด แสดงดังตารางที่ 9 จากผลการทดลอง กระดาษที่ผ่านการอิเล็กโทรสเปรย์ด้วยพอลิแลคติกแอซิดมีค่าอัตราการแพร่ผ่านของไอน้ำและก๊าซออกซิเจนลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบกับกระดาษไม่เคลือบ โดยค่าอัตราการแพร่ผ่านของไอน้ำและก๊าซออกซิเจนลดลงที่ระดับความเข้มข้นของสารละลายพอลิแลคติกแอซิดเพียงร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร สอดคล้องกับผลงานวิจัยของ Ford และคณะ (2009) ที่ได้ทดสอบกระดาษที่ผ่านการอิเล็กโทรสเปรย์ด้วยสารละลาย latex และพบว่ากระดาษมีความเป็นรูพรุนลดลงทำให้เกิดขวางการผ่านเข้าออกของก๊าซออกซิเจนและไอน้ำได้ดีขึ้น แต่อย่างไรก็ตาม เมื่อระดับความเข้มข้นสูงเกินร้อยละ 1 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร พบว่าอัตราการแพร่ผ่านของไอน้ำและก๊าซไม่สามารถลดลงได้อีก ทั้งนี้อาจเป็นเพราะลักษณะของอนุภาคบนกระดาษที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 1 โดยน้ำหนักต่อปริมาตรขึ้นไปพบว่า แม้อนุภาคพอลิแลคติกแอซิดสามารถกระจายปกคลุมผิวหน้ากระดาษได้ดี แต่อนุภาคมีขนาดใหญ่และมีรูพรุนที่ผิว จึงอาจทำให้ไอน้ำและก๊าซผ่านเข้าออกได้

ตารางที่ 9 อัตราการแพร่ผ่านของไอน้ำ และอัตราการแพร่ผ่านของก๊าซออกซิเจนของกระดาษที่ผ่านการอิเล็กโทรสเปรย์ด้วยสารละลายพอลิแลคติกแอซิด

ความเข้มข้นของสารละลาย พอลิแลคติกแอซิด (ร้อยละโดยน้ำหนักต่อ ปริมาตร)	ค่าทดสอบ	
	อัตราการซึมผ่าน ของไอน้ำ (กรัม/ตร.ม./วัน)	อัตราการซึมผ่าน ของก๊าซออกซิเจน (ลบ.ซม./ตร.ม./วัน)
untreated	528.51 ± 18.30^c	$42,483 \pm 692.78^c$
0.5	289.00 ± 12.48^b	$34,003 \pm 702.07^b$
1	104.10 ± 8.01^a	$20,686 \pm 697.76^a$
2	103.60 ± 7.21^a	$20,613 \pm 714.24^a$

ตารางที่ 9 (ต่อ)

ความเข้มข้นของสารละลาย	ค่าทดสอบ	
	อัตราการซึมผ่าน ของไอน้ำ (กรัม/ตร.ม./วัน)	อัตราการซึมผ่าน ของก๊าซออกซิเจน (ลบ.ซม./ตร.ม./วัน)
พอลิแลคติกแอซิด (ร้อยละโดยน้ำหนักต่อ ปริมาตร)		
3	103.39 ± 6.32^a	$20,553 \pm 712.89^a$
4	103.22 ± 6.67^a	$20,510 \pm 707.86^a$

หมายเหตุ ^{a-c} ตัวอักษรที่ต่างกันในแถวตั้งหมายถึงค่าเฉลี่ยมีความแตกต่างกันทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

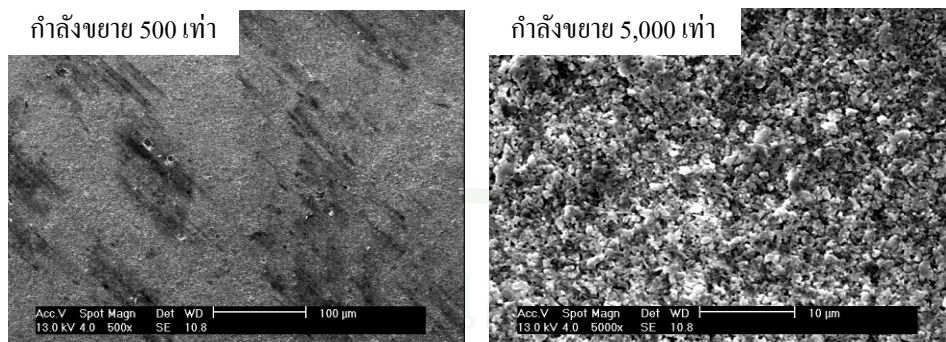
3.5 การวิเคราะห์พื้นผิวของกระดวย

การวิจัยนี้ใช้เทคนิค scanning electron microscopy (SEM) วิเคราะห์พื้นผิวของกระดวยที่ผ่านการอิเล็กโทรสเปรย์ด้วยสารละลายพอลิแลคติกแอซิดเพื่อดูรูปร่างลักษณะของอนุภาคที่ตกลงบนผิวหน้าของกระดวยทั้งด้านหน้าและด้านหลัง โดยเลือกใช้กำลังขยายที่ 500 และ 5,000 เท่า เพื่อดูภาพรวมของอนุภาคที่กระจายอยู่บนผิวของกระดวยและดูลักษณะรายละเอียดของอนุภาคตามลำดับ

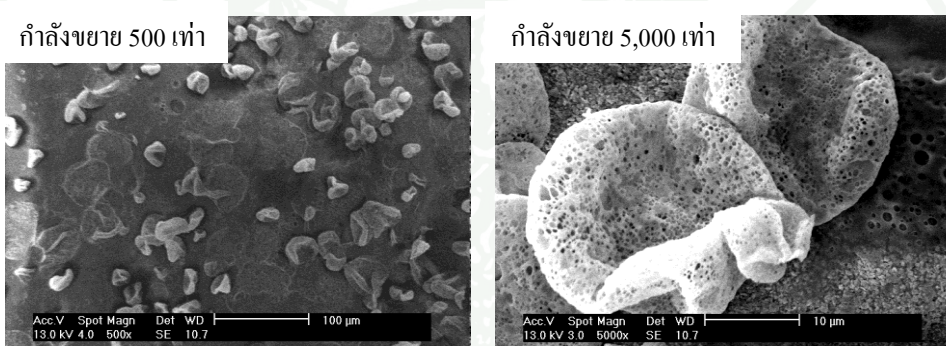
ลักษณะพื้นผิวของกระดวยด้านหน้าและด้านหลังเมื่ออิเล็กโทรสเปรย์ด้วยสารละลายพอลิแลคติกแอซิด แสดงดังภาพที่ 23 และ 24 จากการถ่ายภาพด้วยเครื่อง SEM ที่กำลังขยาย 500 เท่าและ 5,000 เท่าพบว่า บนพื้นผิวกระดวยที่อิเล็กโทรสเปรย์ด้วยสารละลายพอลิแลคติกแอซิดที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร มีจำนวนของอนุภาคพอลิแลคติกแอซิดไม่หนาแน่น โดยสามารถเห็นผิวหน้าของกระดวยได้ทั้งด้านหน้าและหลัง เมื่อเปรียบเทียบกับพื้นผิวของกระดวยที่อิเล็กโทรสเปรย์ด้วยสารละลายพอลิแลคติกแอซิดที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 1 โดยน้ำหนักต่อปริมาตรที่มีความหนาแน่นของอนุภาคมากและขนาดของอนุภาคมีความสม่ำเสมอ จึงสามารถต้านทานน้ำและน้ำมัน รวมถึงสามารถกีดขวางการแพร่ผ่านของไอน้ำและก๊าซออกซิเจนได้ นอกจากนี้สังเกตได้ว่า บนพื้นผิวของกระดวยที่ผ่านการอิเล็กโทรสเปรย์ด้วยสารละลายพอลิแลคติกแอซิดที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 2, 3 และ 4 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร มีลักษณะของอนุภาคที่มีขนาดใหญ่และแผ่เป็นวงกว้างคลุมพื้นผิวของกระดวยคล้ายแผ่นฟิล์มต่อเนื่อง จึงสามารถ

ด้านทานน้ำและน้ำมัน รวมถึงสามารถกีดขวางการแพร่ผ่านของไอน้ำและก๊าซออกซิเจนได้ แต่อย่างไรก็ตามที่ระดับความเข้มข้นของสารละลายพอลิแลคติกแอซิดสูง อนุภาคมีขนาดไม่สม่ำเสมอ ส่งผลให้มุมสัมผัสลดลงเมื่อความเข้มข้นของสารละลายเพิ่มมากขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากเมื่อความเข้มข้นของสารละลายเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ความหนืดและแรงดึงผิวของสารละลายเพิ่มขึ้นด้วย จึงมีผลต่อขนาดของอนุภาคที่ใหญ่ขึ้น อนุภาคที่มีขนาดใหญ่ทำให้ผิวกระดาศไม่สม่ำเสมอและอาจส่งผลให้ค่ามุมสัมผัสลดลงได้จากการกระจายตัวของหยดของเหลวอย่างรวดเร็วบนแผ่นฟิล์มของสารละลายพอลิแลคติกแอซิด

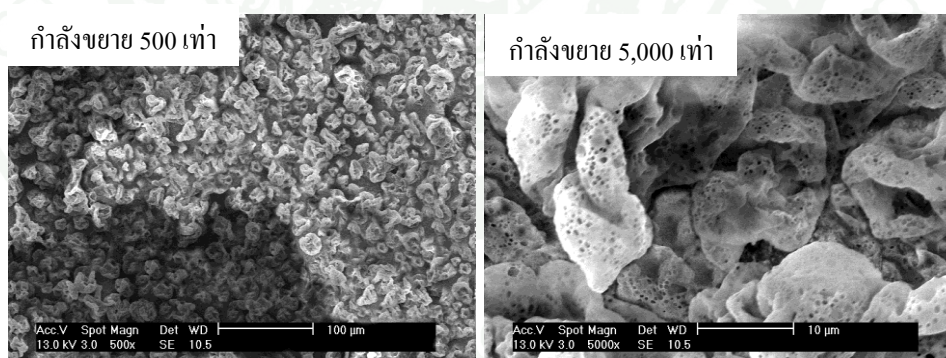
จากการสังเกตเพิ่มเติมพบว่า บนพื้นผิวกระดาศที่อิเล็กโทรสเปรย์ด้วยสารละลายพอลิแลคติกแอซิดที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร มีขนาดของอนุภาคเล็กและมีรายละเอียดไม่มาก ส่วนที่ระดับความเข้มข้นของสารละลายพอลิแลคติกแอซิดเท่ากับร้อยละ 1 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร อนุภาคมีขนาดใหญ่ขึ้นเล็กน้อยมีรายละเอียดมากขึ้น และมีการกระจายสม่ำเสมอและมีความหนาแน่น แต่อย่างไรก็ตามเมื่อความเข้มข้นของสารละลายพอลิแลคติกแอซิดเพิ่มขึ้นที่ร้อยละ 2, 3 และ 4 โดยน้ำหนักต่อปริมาตรตามลำดับ พบว่ามีอนุภาค 2 แบบ คือนอกจากมีอนุภาคขนาดใหญ่ขึ้นและแผ่เป็นวงกว้าง ยังพบอนุภาคอีกแบบคือ อนุภาคคล้ายทรงกลมขนาดเล็ก และมีรูปทรงที่มีรายละเอียดมากขึ้น สอดคล้องกับงานวิจัยของ Deotare (2007) ที่พบว่าเมื่อสารละลายพอลิแลคติกแอซิดมีระดับความเข้มข้นสูงขึ้น ขนาดของอนุภาคจะใหญ่ขึ้นและไม่สม่ำเสมอ และงานวิจัยของ Han และคณะ (2012) ที่พบว่าความเข้มข้นที่มากขึ้นของพอลิสไตรีนส่งผลให้อนุภาคมีขนาดใหญ่และมีโครงสร้างซับซ้อนมากขึ้น นอกจากนั้นสังเกตได้ว่า ผิวของอนุภาคของพอลิแลคติกแอซิดมีรูพรุนขนาดเล็กมากมาย ทั้งนี้อาจเกิดจากตัวทำละลายคลอโรฟอร์มที่ระเหยออกจากผิวของอนุภาคพอลิแลคติกแอซิดอย่างรวดเร็วทำให้อนุภาคเกิดรูพรุนขนาดเล็ก จึงทำให้เกิดลักษณะของอนุภาคที่คล้ายโฟม ซึ่งอาจเป็นส่วนที่ส่งผลให้ค่าการแพร่ผ่านของไอน้ำและก๊าซออกซิเจนของกระดาศที่ผ่านการอิเล็กโทรสเปรย์ด้วยสารละลายพอลิแลคติกแอซิด ยังคงมีค่าสูงแม้ว่าความเข้มข้นของสารละลายจะสูงขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับ การเคลือบพอลิแลคติกแอซิดบนผิวกระดาศด้วยวิธี metering rod หรือเอ็กทราชั่น (Rhim et al., 2007; Lahtinen et al., 2009 and Rhim and Kim 2009)



(ก) untreated



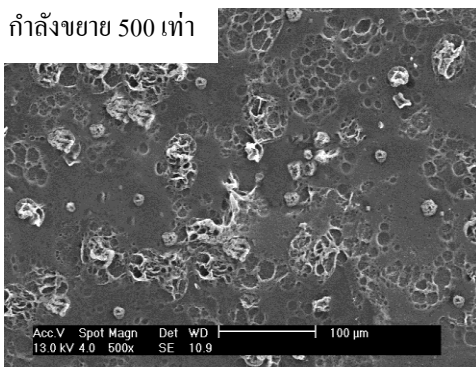
(ข) PLA 0.5% (w/v)



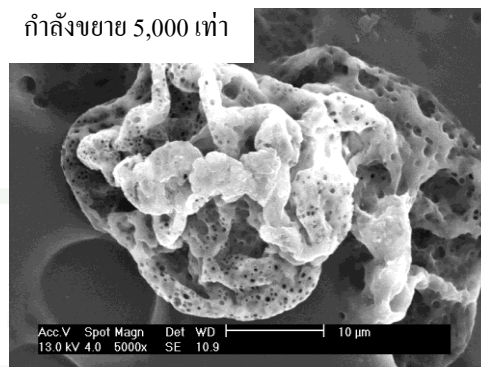
(ค) PLA 1% (w/v)

ภาพที่ 23 ลักษณะพื้นผิวของกระดาษด้านหน้าของกระดาษที่ผ่านการอิเล็กโทรสเปรย์ด้วย สารละลายพอลิแลคติกแอซิดที่ระดับความเข้มข้นต่างๆ ด้วยเครื่อง scanning electron microscope (SEM) (ก) untreated (ข) PLA 0.5% (w/v) (ค) PLA 1% (w/v) (ง) PLA 2% (w/v) (จ) PLA 3% (w/v) และ (ฉ) PLA 4% (w/v)

กำลังขยาย 500 เท่า

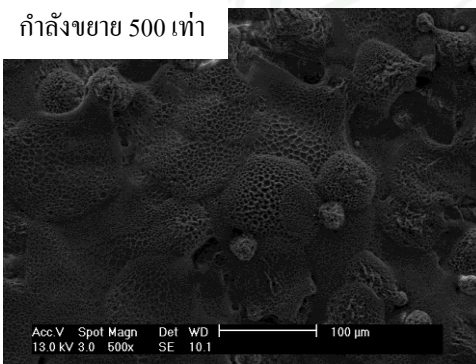


กำลังขยาย 5,000 เท่า

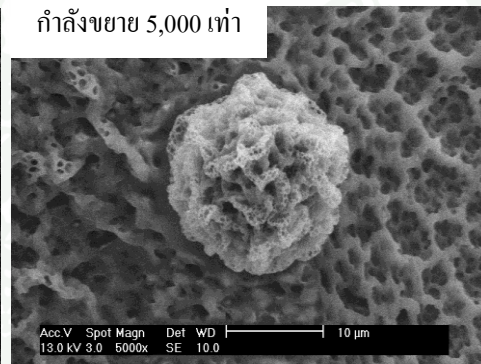


(ง) PLA 2% (w/v)

กำลังขยาย 500 เท่า

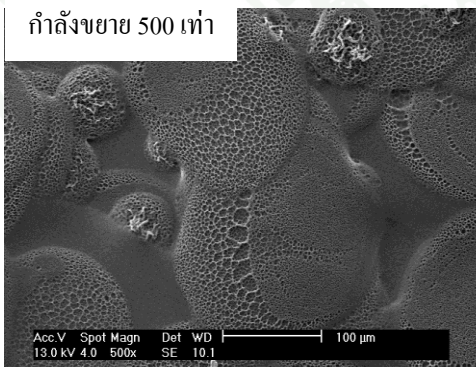


กำลังขยาย 5,000 เท่า

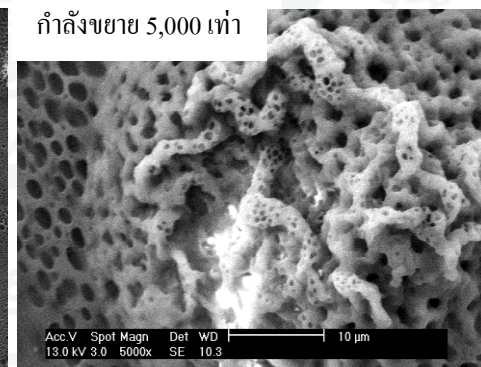


(จ) PLA 3% (w/v)

กำลังขยาย 500 เท่า

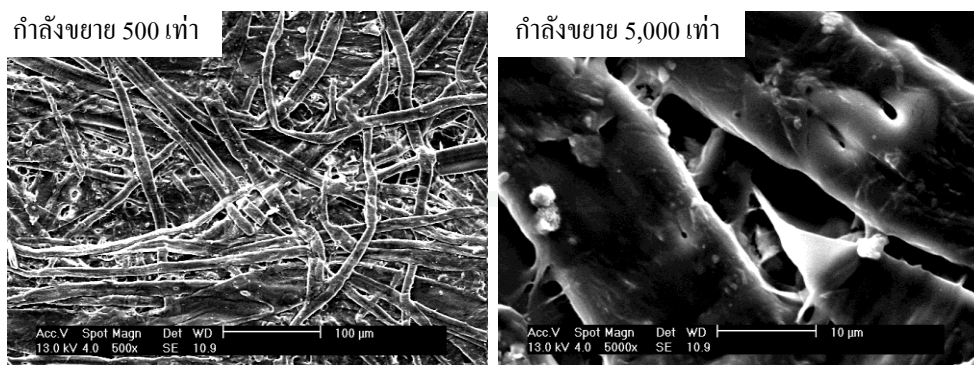


กำลังขยาย 5,000 เท่า

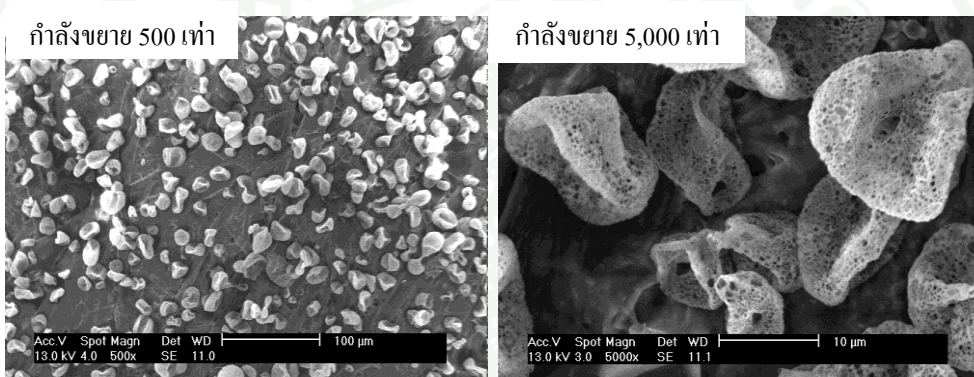


(ฉ) PLA 4% (w/v)

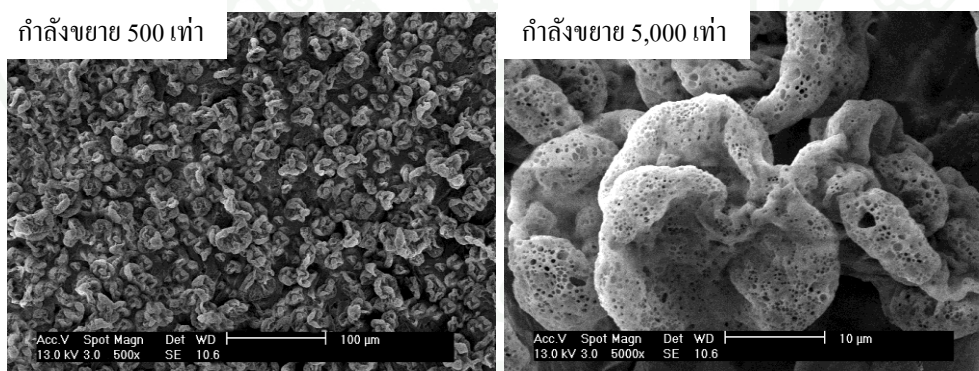
ภาพที่ 23 (ต่อ)



(ก) untreated

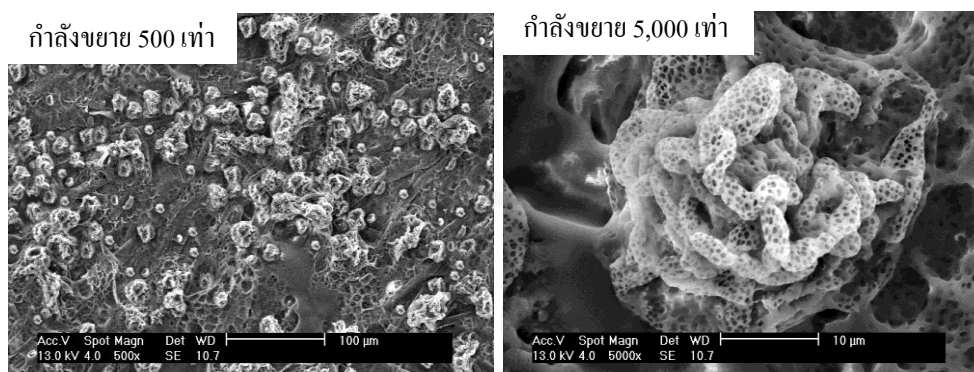


(ข) PLA 0.5% (w/v)

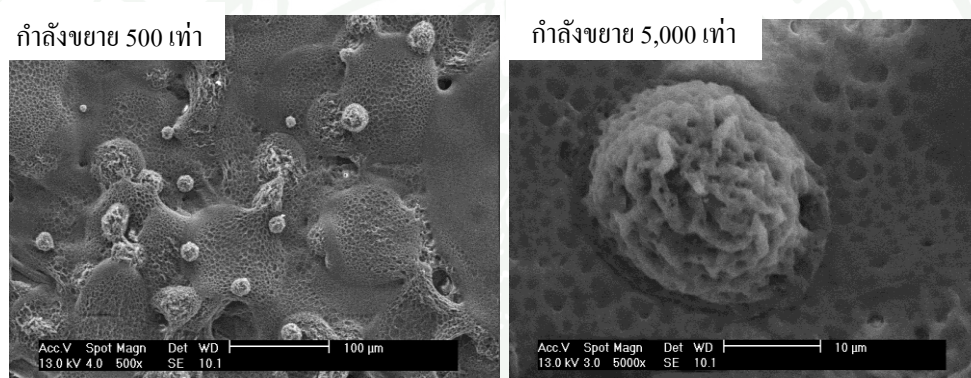


(ค) PLA 1% (w/v)

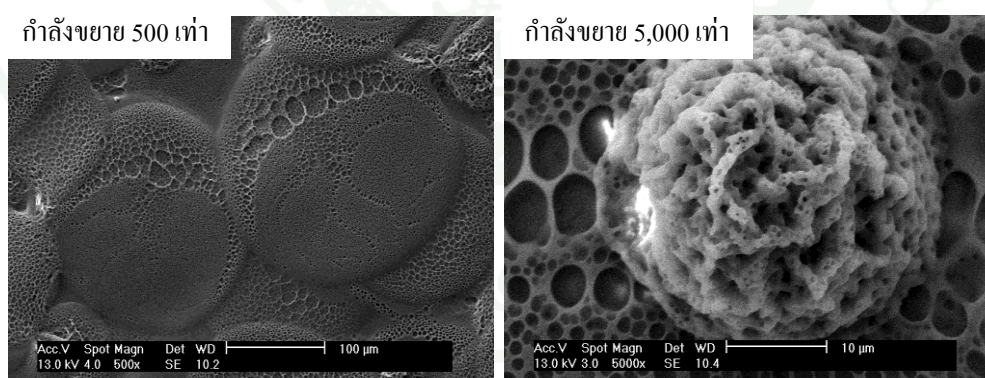
ภาพที่ 24 ลักษณะพื้นผิวของกระดาษด้านหลังของกระดาษที่ผ่านการอิเล็กโทรสเปรย์ด้วยสารละลายพอลิแลคติกแอซิดที่ระดับความเข้มข้นต่างๆ ด้วยเครื่อง scanning electron microscope (SEM) (ก) กระดาษไม่เคลือบ (ข) PLA 0.5% (w/v) (ค) PLA 1% (w/v) (ง) PLA 2% (w/v) (จ) PLA 3% (w/v) และ (ฉ) PLA 4% (w/v)



(ง) PLA 2% (w/v)



(จ) PLA 3% (w/v)



(ฉ) PLA 4% (w/v)

ภาพที่ 24 (ต่อ)

4. ผลของสารละลายผสมระหว่างพอลิแลคติกแอซิดและพอลิบิวทิลีนอะดิเพต-โค-เทเรฟทาเลท เมื่อผ่านกระบวนการอิเล็กโทรสเปรย์ต่อสมบัติของกระดาษแข็ง

จากผลการทดลองในข้อ 3 สามารถสรุปได้ว่า ที่ระดับความเข้มข้นของสารละลาย พอลิแลคติกแอซิดร้อยละ 1 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร สามารถอิเล็กโทรสเปรย์ออกมาเป็นอนุภาค ขนาดเล็กและเคลือบผิวหน้ากระดาษได้อย่างสม่ำเสมอ อีกทั้งสามารถปรับปรุงสมบัติการต้านทาน น้ำและน้ำมันและสมบัติการกีดขวางของกระดาษให้ดีขึ้นได้ อย่างไรก็ตามพบว่าการเคลือบด้วย สารละลายพอลิแลคติกแอซิดเพียงอย่างเดียวนั้น ยังมีจุดบกพร่องบางประการเช่น พบการแตกของ สารเคลือบบนผิวกระดาษ เนื่องจากความเปราะของพอลิแลคติกแอซิด ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงทำการ ทดลองเพิ่มเติม เพื่อเพิ่มความยืดหยุ่นของสารเคลือบ โดยการผสมสารละลายพอลิแลคติกแอซิด (poly(lactic acid), PLA) ด้วยพอลิบิวทิลีนอะดิเพต-โค-เทเรฟทาเลท (poly(butyleneadipate-co-terephthalate), PBAT) และเลือกระดับความเข้มข้นของสารละลายที่ร้อยละ 1 โดยน้ำหนักต่อ ปริมาตรเป็นค่าคงที่ตลอดการทดลอง โดยใช้อัตราส่วนพอลิแลคติกแอซิดต่อพอลิบิวทิลีน อะดิเพต-โค-เทเรฟทาเลทที่ 100:0, 80:20, 50:50, 20:80 และ 0:100 ตามลำดับ

3.1 สมบัติทางกายภาพของกระดาษ

น้ำหนักมาตรฐาน ความหนา และปริมาณความชื้นของกระดาษไม่เคลือบและกระดาษ ที่อิเล็กโทรสเปรย์ด้วยสารละลายผสมที่มีอัตราส่วนของพอลิแลคติกแอซิดต่อพอลิบิวทิลีนอะดิ เพต-โค-เทเรฟทาเลทที่ 100:0, 80:20, 50:50, 20:80 และ 0:100 แสดงดังตารางที่ 10 จากผลการ ทดลองพบว่า กระดาษที่ผ่านการอิเล็กโทรสเปรย์ด้วยสารละลายผสมทุกสูตร มีน้ำหนักมาตรฐาน และความหนาไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ทั้งนี้เพราะน้ำหนักมาตรฐานและความหนาขึ้นอยู่กับ ปริมาณสารเคลือบที่มีอยู่ในสารละลาย (Rhim et al., 2006; Rhim et al, 2007 and Rhim and Kim, 2009) ซึ่งสารละลายผสมทุกสูตรมีระดับความเข้มข้นร้อยละ 1 โดยน้ำหนักต่อปริมาตรเท่ากัน ทั้งหมดและน้ำหนัก โมเลกุลของพอลิแลคติกแอซิดและพอลิบิวทิลีนอะดิเพต-โค-เทเรฟทาเลทมี ความใกล้เคียงกัน (BASF, 2006 and Natureworks, 2010)

กระดาษที่ผ่านการอิเล็กโทรสเปรย์ด้วยสารละลายผสมทุกสูตรพบว่า มีความชื้นลดลง อย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) อย่างไรก็ตามกระดาษที่ผ่านการอิเล็กโทรสเปรย์ด้วยสารละลาย

พอลิบิวทิลีนอะดิเพต-โค-เทเรฟทาเลตเพียงอย่างเดียว (อัตราส่วน 0:100) มีความชื้นสูงกว่า กระดาษที่ผ่านการอิเล็กโทรสเปรย์ด้วยสารละลายผสมระหว่างพอลิแลคติกแอซิดต่อพอลิบิวทิลีนอะดิเพต-โค-เทเรฟทาเลตที่ 50:50 และ 20: 80 ทั้งนี้อาจเป็นเพราะลักษณะของอนุภาคที่ได้จาก สารละลายพอลิบิวทิลีนอะดิเพต-โค-เทเรฟทาเลตเพียงอย่างเดียวมีขนาดใหญ่และลักษณะคล้ายเส้นใยสั้น จึงทำให้มีช่องว่างบนผิวหน้าของกระดาษ ซึ่งแตกต่างจากลักษณะของอนุภาคที่ได้จาก สารละลายผสมระหว่างพอลิแลคติกแอซิดต่อพอลิบิวทิลีนอะดิเพต-โค-เทเรฟทาเลตที่อัตราส่วน 50:50 และ 20:80 อนุภาคมีขนาดเล็กและมีความสม่ำเสมอมากกว่า จึงทำให้อนุภาคเข้าไปอุดช่องว่างระหว่างเส้นใยบนผิวหน้าของกระดาษได้มากกว่า ส่งผลให้กระดาษดูดความชื้นได้ลดลง

ตารางที่ 10 น้ำหนักมาตรฐาน ความหนา และปริมาณความชื้นของกระดาษที่ผ่านการอิเล็กโทรสเปรย์ด้วยสารละลายผสมระหว่างพอลิแลคติกแอซิดและพอลิบิวทิลีนอะดิเพต-โค-เทเรฟทาเลต

อัตราส่วนของ สารละลาย PLA:PBAT	ค่าทดสอบ		
	น้ำหนักมาตรฐาน (กรัม/ตร.ม.)	ความหนา (มม.)	ปริมาณความชื้น (ร้อยละ)
untreated	302.16 ± 2.38^a	337.0 ± 2.00^a	7.998 ± 0.08^c
100 : 0	305.45 ± 2.42^b	342.8 ± 4.10^{ab}	7.466 ± 0.07^{ab}
80 : 20	305.49 ± 2.45^b	341.4 ± 4.39^{ab}	7.434 ± 0.07^{ab}
50 : 50	305.36 ± 2.37^b	340.8 ± 4.20^{ab}	7.392 ± 0.06^a
20 : 80	305.33 ± 2.45^b	341.6 ± 5.96^{ab}	7.388 ± 0.08^a
0 : 100	305.66 ± 2.64^b	345.8 ± 7.12^b	7.516 ± 0.08^b

หมายเหตุ ^{a-c} ตัวอักษรที่ต่างกันแถวตั้งหมายถึงค่าเฉลี่ยมีความแตกต่างกันทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

3.2 สมบัติเชิงกลของกระดาษ

ผลการทดสอบความต้านทานแรงกดวงแหวนและความต้านทานต่อการพับ ในแนว MD และ CD ของกระดาษที่อิเล็กโทรสเปรย์ด้วยสารละลายผสมที่มีอัตราส่วนของพอลิแลคติก

แอซิดต่อพอลิবিทิลีนอะดิเพท-โค-เทรฟทาเลทที่ 100:0, 80:20, 50:50, 20:80 และ 0:100 ตามลำดับ แสดงดังตารางที่ 11

ตารางที่ 11 ความต้านทานแรงกดวงแหวน และความต้านทานต่อการพับของกระดาษที่ผ่านการ อีเล็กโทรสเปรย์ด้วยสารละลายผสมระหว่างพอลิแลคติกแอซิดและพอลิবিทิลีนอะดิ เพท-โค-เทรฟทาเลท

ทิศทาง	อัตราส่วนของ สารละลาย PLA:PBAT	ค่าทดสอบ	
		ความต้านทานแรงกด วงแหวน (กิโลนิวตัน/ม.)	ความต้านทานการพับ (รอบ)
MD	untreated	3.12 ± 0.05^d	351.8 ± 6.56^c
	100 : 0	3.14 ± 0.06^d	353.6 ± 7.22^c
	80 : 20	3.15 ± 0.04^d	354.2 ± 7.00^c
	50 : 50	3.17 ± 0.03^{de}	356.4 ± 6.65^{cd}
	20 : 80	3.27 ± 0.09^{ef}	360.6 ± 7.78^{cd}
	0 : 100	3.34 ± 0.03^f	365.2 ± 7.50^d
CD	untreated	2.25 ± 0.05^a	137.2 ± 5.80^a
	100 : 0	2.26 ± 0.04^a	139.0 ± 6.56^a
	80 : 20	2.26 ± 0.06^a	139.4 ± 6.20^a
	50 : 50	2.35 ± 0.05^{ab}	141.0 ± 5.42^{ab}
	20 : 80	2.43 ± 0.07^b	145.4 ± 6.20^{ab}
	0 : 100	2.61 ± 0.05^c	148.0 ± 6.46^b

หมายเหตุ ^{a-f} ตัวอักษรที่ต่างกันในแถวตั้งหมายถึงค่าเฉลี่ยมีความแตกต่างกันทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

กระดาษที่ผ่านการอีเล็กโทรสเปรย์ด้วยสารละลายผสมทำให้ค่าความต้านทานแรงกดวงแหวนและค่าความต้านทานต่อการพับเพิ่มขึ้น แต่ไม่สามารถเพิ่มขึ้นได้อย่างมีนัยสำคัญ อย่างไรก็ตามพบว่ากระดาษที่ผ่านการอีเล็กโทรสเปรย์ด้วยสารละลายผสมอัตราส่วน 20:80 มีค่าความต้านทานแรงกดวงแหวนเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) เมื่อเทียบกับกระดาษที่ผ่านการอีเล็ก

โทรสเปรย์ด้วยสารละลายผสมที่อัตราส่วน 100:0, 80:20 และกระดาษไม่เคลือบ ในขณะที่กระดาษที่ผ่านการอิเล็กทรอนิกส์โทรสเปรย์ด้วยสารละลายพอลิไบิวทิลีนอะดิเพท-โค-เทเรฟทาเลทเพียงอย่างเดียว (อัตราส่วน 0:100) มีค่าความต้านทานแรงกดวงแหวนและค่าความต้านทานต่อการพับเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) เมื่อเทียบกับกระดาษที่ผ่านการอิเล็กทรอนิกส์โทรสเปรย์ด้วยสารละลายผสมที่อัตราส่วน 100:0, 80:20 และกระดาษไม่เคลือบ ทั้งนี้เพราะอาจเกิดจากสมบัติความเหนียวและยืดหยุ่น รวมทั้งลักษณะของอนุภาคที่คล้ายเส้นใยเส้นของพอลิไบิวทิลีนอะดิเพท-โค-เทเรฟทาเลทที่ช่วยเสริมแรงและทำให้สามารถต้านทานต่อการพับได้มากขึ้น สอดคล้องกับผลงานวิจัยของ Popil และ Joyce (2008) ได้นำสารละลาย poly-acrylonitrile (PAN) มาเคลือบกระดาษด้วยเทคนิคอิเล็กทรอนิกส์โทรสเปรย์พบว่า เส้นใยช่วยทำให้กระดาษสามารถต้านทานแรงกดได้เพิ่มขึ้น

จากผลการทดลอง พบว่าสมบัติที่มีความเหนียวและยืดหยุ่นของพอลิไบิวทิลีนอะดิเพท-โค-เทเรฟทาเลทนั้นช่วยปรับปรุงสมบัติเชิงกลของกระดาษได้ดี อีกทั้งพอลิไบิวทิลีนอะดิเพท-โค-เทเรฟทาเลทสามารถผสมผสานเข้ากับพอลิแลคติกได้ดีในสารละลาย จึงทำให้ช่วยลดความเปราะของชั้นเคลือบอันเกิดจากสมบัติของพอลิแลคติกแอซิดได้ สอดคล้องกับผลการทดลองของหลายงานวิจัยก่อนหน้านี้ (Zhang et al., 2006; Lee et al., 2007; Gu et al., 2008; Zhang et al., 2009; Ko et al., 2009; Signori et al., 2009 and Wang et al., 2012) จากการสังเกตพบว่า กระดาษที่อิเล็กทรอนิกส์โทรสเปรย์ด้วยสารละลายที่มีอัตราส่วนของพอลิแลคติกแอซิดต่อพอลิไบิวทิลีนอะดิเพท-โค-เทเรฟทาเลทที่ร้อยละ 50:50, 20:80 และ 0:100 โดยน้ำหนักตามลำดับ ที่รอยพับจะไม่มีรอยแตกเป็นผงสีขาว

3.3 สมบัติการต้านทานน้ำและน้ำมันของกระดาษ

ค่ามุมสัมผัส ปริมาณการดูดซึมน้ำ และเวลาในการดูดซึมน้ำของกระดาษที่ผ่านการอิเล็กทรอนิกส์โทรสเปรย์ด้วยสารละลายผสมของพอลิแลคติกแอซิดและพอลิไบิวทิลีนอะดิเพท-โค-เทเรฟทาเลท แสดงดังตารางที่ 12 เมื่อพิจารณากระดาษด้านหน้าและด้านหลังพบว่า กระดาษที่ผ่านการอิเล็กทรอนิกส์โทรสเปรย์ด้วยสารละลายผสมทุกสูตรมีสมบัติการต้านทานน้ำดีขึ้น รายละเอียดดังต่อไปนี้

มุมสัมผัส กระดาษที่ผ่านการอิเล็กทรอนิกส์โทรสเปรย์ด้วยสารละลายผสมทุกสูตรทำให้มุมสัมผัสเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบกับกระดาษไม่เคลือบ แต่อย่างไรก็ตาม กระดาษที่ผ่านการอิเล็กทรอนิกส์โทรสเปรย์ด้วยสารละลายพอลิไบิวทิลีนอะดิเพท-โค-เทเรฟทาเลทอย่างเดียว (อัตราส่วน 0:100) มีมุมสัมผัสที่น้อยกว่ากระดาษที่ผ่านการอิเล็กทรอนิกส์โทรสเปรย์ด้วยสารละลายผสม

และกระดาษที่ผ่านการอิเล็กทรอนิกส์ด้วยสารละลายพอลิแลคติกแอซิดอย่างเดียว ทั้งนี้อาจเกิดจากอนุภาคที่ได้จากสารละลายผสมและสารละลายพอลิแลคติกแอซิดอย่างเดียว (อัตราส่วน 100:0) มีลักษณะคล้ายกันและอนุภาคมีขนาดเล็กและมีความสม่ำเสมอ แสดงดังภาพที่ 27 และ 28 จึงทำให้มุลัมผัสมีค่าไม่แตกต่างกัน แต่อนุภาคที่ได้จากสารละลายพอลิบิวทิลีนอะดิเพต-โค-เทเรฟทาเลทเพียงอย่างเดียว มีลักษณะคล้ายเส้นใยสั้นและขนาดของอนุภาคใหญ่และไม่สม่ำเสมอ ส่งผลให้มุลัมผัสลดลง

ตารางที่ 12 มุลัมผัส ปริมาณการดูดซึมน้ำ และเวลาในการดูดซึมน้ำของกระดาษที่ผ่านการอิเล็กทรอนิกส์ด้วยผิวหน้าด้วยสารละลายผสมระหว่างพอลิแลคติกแอซิดและพอลิบิวทิลีนอะดิเพต-โค-เทเรฟทาเลท

กระดาษ	อัตราส่วนของ สารละลาย PLA:PBAT	ค่าทดสอบ		
		มุลัมผัส (องศา)	การดูดซึมน้ำ (กรัม/ตร.ม.)	เวลาในการดูด ซึมน้ำ (นาทิจ)
ด้านหน้า	untreated	70.29 ± 0.65^a	10.24 ± 0.83^b	$> 200^b$
	100 : 0	122.42 ± 0.78^c	1.98 ± 0.66^a	$> 200^b$
	80 : 20	122.32 ± 0.73^c	1.99 ± 0.47^a	$> 200^b$
	50 : 50	122.38 ± 0.69^c	1.97 ± 0.66^a	$> 200^b$
	20 : 80	122.28 ± 0.70^c	1.94 ± 0.54^a	$> 200^b$
	0 : 100	120.34 ± 0.66^c	1.99 ± 0.43^a	$> 200^b$
ด้านหลัง	untreated	79.23 ± 0.68^b	245.96 ± 3.08^c	3.14 ± 0.03^a
	100 : 0	123.39 ± 0.63^f	2.90 ± 0.70^a	$> 200^b$
	80 : 20	123.26 ± 0.66^f	2.87 ± 0.71^a	$> 200^b$
	50 : 50	123.50 ± 0.65^f	2.83 ± 0.70^a	$> 200^b$
	20 : 80	122.96 ± 0.64^f	2.80 ± 0.74^a	$> 200^b$
	0 : 100	121.16 ± 0.63^d	2.98 ± 0.68^a	$> 200^b$

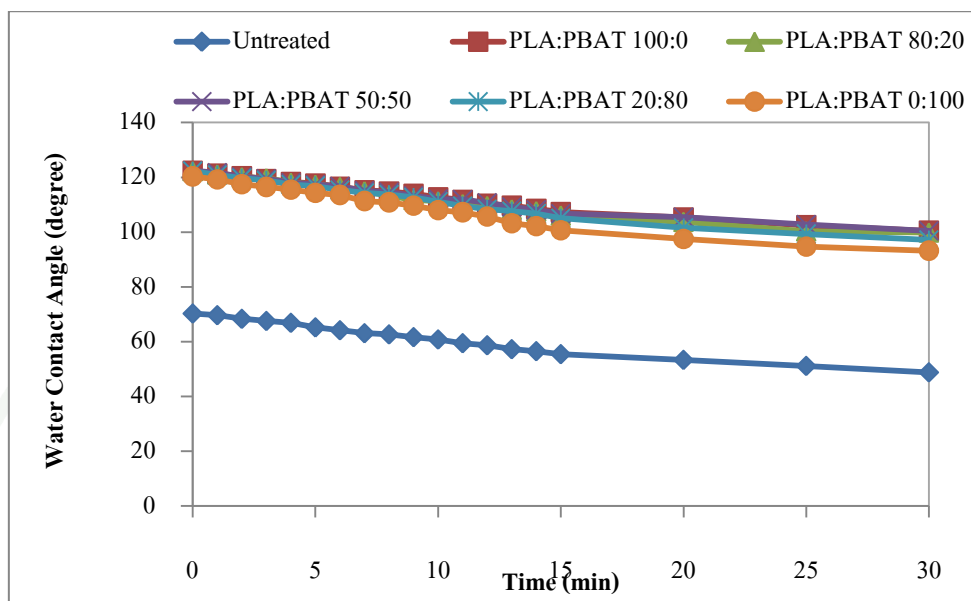
หมายเหตุ ^{a-f} ตัวอักษรที่ต่างกันในแต่ละแถวหมายถึงค่าเฉลี่ยมีความแตกต่างกันทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

ปริมาณการดูดซึมน้ำของกระดาษที่ผ่านการอิเล็กโทรสเปรย์ด้วยสารละลายผสมทุกสูตรพบว่า ปริมาณการดูดซึมน้ำลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบกับกระดาษไม่เคลือบ ทั้งนี้ปริมาณการดูดซึมน้ำของกระดาษที่ผ่านการอิเล็กโทรสเปรย์ด้วยสารละลายผสมแต่ละสูตรไม่มีความแตกต่างกัน อาจเป็นเพราะทั้งพอลิแลคติกแอซิดและพอลิไวนิลีนอะดิเพต-โค-เทรฟทาเลท มีสมบัติไม่ชอบน้ำ (hydrophobic) เหมือนกันจึงให้ผลการดูดซึมน้ำที่ไม่แตกต่างกัน สอดคล้องกับผลการทดลองของ Manangan และ Shawaphun (2010) ที่พบว่ากระดาษชั้นอ้อยที่เคลือบด้วยพอลิแลคติกแอซิดและพอลิไฮดรอกซีไวนิลเรตมีสมบัติไม่ชอบน้ำ (hydrophobic) เหมือนกันที่ระดับความเข้มข้นเดียวกันให้ผลของปริมาณการดูดซึมน้ำใกล้เคียงกัน

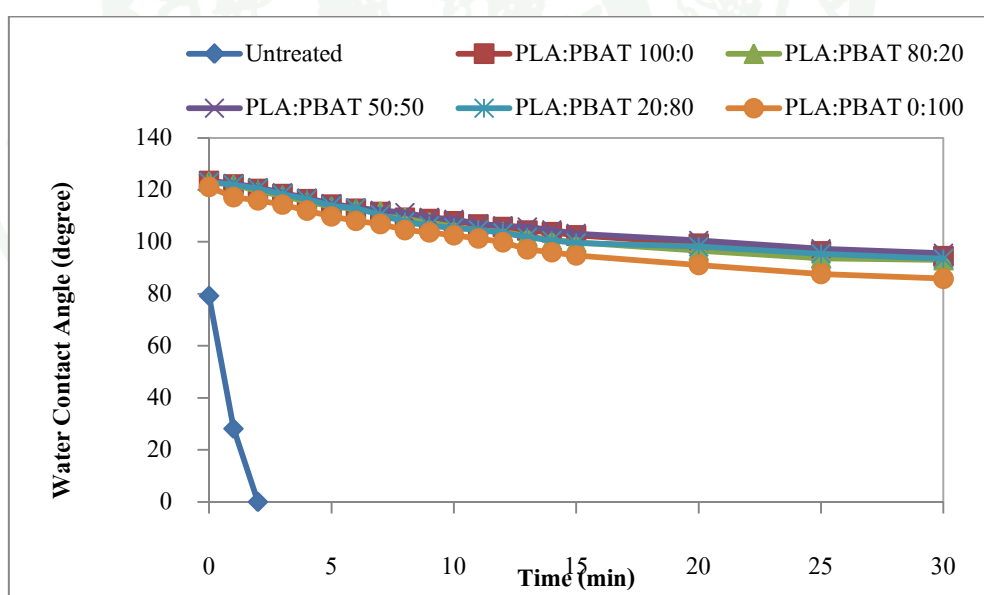
เวลาในการดูดซึมน้ำของกระดาษ เมื่อเปรียบเทียบกับกระดาษที่ผ่านการอิเล็กโทรสเปรย์ในแต่ละสูตรพบว่า เวลาในการดูดซึมน้ำไม่มีความแตกต่างกัน เนื่องจากทั้งพอลิแลคติกแอซิดและพอลิไวนิลีนอะดิเพต-โค-เทรฟทาเลท มีสมบัติไม่ชอบน้ำ (hydrophobic) เหมือนกัน แสดงว่าการผสมของสารละลายไม่ได้ส่งผลให้เวลาในการดูดซึมน้ำลดลงหรือเพิ่มขึ้น

จากการพิจารณา ค่ามุมสัมผัส ปริมาณการดูดซึมน้ำและเวลาในการดูดซึมน้ำ แสดงว่ากระดาษที่อิเล็กโทรสเปรย์ด้วยสารละลายผสมระหว่างของพอลิแลคติกแอซิดต่อพอลิไวนิลีนอะดิเพต-โค-เทรฟทาเลทที่ 100:0, 80:20, 50:50, 20:80 และ 0:100 ตามลำดับ มีสมบัติการต้านทานน้ำใกล้เคียงกัน แสดงให้เห็นว่าพอลิไวนิลีนอะดิเพต-โค-เทรฟทาเลทที่ผสมเข้าไปในสารละลายพอลิแลคติกแอซิดไม่ได้ทำให้สมบัติการต้านทานน้ำของกระดาษที่อิเล็กโทรสเปรย์ด้วยสารละลายพอลิแลคติกแอซิดเปลี่ยนไป

เมื่อพิจารณาอัตราการลดลงของมุมสัมผัสของกระดาษ โดยการวัดมุมสัมผัสแบบต่อเนื่อง (dynamic contact angle) ของหยดน้ำปริมาตร 5 ไมโครลิตร ภายใน 30 นาที เพื่อศึกษา ลักษณะการเปลี่ยนแปลงของมุมสัมผัสของหยดน้ำเมื่อเวลาผ่านไป ผลการทดลองแสดงดังภาพที่ 25 (รายละเอียดของค่าทดสอบแสดงในภาคผนวก ง) จากการสังเกต ค่ามุมสัมผัสของหยดน้ำอย่างต่อเนื่องทั้งด้านหน้าและด้านหลังของกระดาษพบว่า กระดาษที่ผ่านการอิเล็กโทรสเปรย์ด้วยสารละลายผสมทุกสูตร มีค่ามุมสัมผัสสูงกว่ากระดาษที่ไม่เคลือบ และมีค่าเกาะกลุ่มกันตลอดการทดลอง ทั้งนี้อาจเป็นเพราะทั้งพอลิแลคติกแอซิดและพอลิไวนิลีนอะดิเพต-โค-เทรฟทาเลท มีสมบัติไม่ชอบน้ำ (hydrophobic) เหมือนกัน ดังนั้นที่ระดับความเข้มข้นที่เท่ากันจึงมีความสามารถในการต้านทานน้ำได้ใกล้เคียงกัน



(ก) กระดาษด้านหน้า



(ข) กระดาษด้านหลัง

ภาพที่ 25 การลดลงของค่ามุมสัมผัสของหยดน้ำเมื่อเวลาผ่านไปสำหรับกระดาษที่ผ่านการอิเล็กโตรสเปรย์ด้วยสารละลายผสมระหว่างพอลิแลคติกแอซิดและพอลิบิวทิลีนอะดิเพต-โค-เทเรฟทาเลท (ก) กระดาษด้านหน้า และ (ข) กระดาษด้านหลัง

ค่ามุลัมผัส ปริมาณการดูดซึมน้ำมัน และเวลาในการดูดซึมน้ำมันของกระดาษที่ผ่านการอิเล็กโทรสเปรย์ด้วยสารละลายผสมระหว่างพอลิแลคติกแอซิดและพอลิবিทิลีนอะดิเพท-โค-เทเรฟทาเลท แสดงดังตารางที่ 13 เมื่อพิจารณากระดาษทั้งด้านหน้าและด้านหลังพบว่า ได้ผลเป็นแนวโน้มเดียวกันกับความสามารถในการต้านทานน้ำ

ตารางที่ 13 มุลัมผัส ปริมาณการดูดซึมน้ำมัน และเวลาในการดูดซึมน้ำมันของกระดาษที่ผ่านการอิเล็กโทรสเปรย์ด้วยสารละลายผสมระหว่างพอลิแลคติกแอซิดและพอลิবিทิลีนอะดิเพท-โค-เทเรฟทาเลท

กระดาษ	อัตราส่วนของ สารละลาย PLA:PBAT	ค่าทดสอบ		
		มุลัมผัส (องศา)	การดูดซึมน้ำมัน (กรัม/ตร.ม.)	เวลาในการดูด ซึมน้ำมัน (นาทื)
ด้านหน้า	untreated	10.76 ± 0.77^a	7.20 ± 0.63^b	$> 200^b$
	100 : 0	44.28 ± 0.75^b	2.64 ± 0.59^a	$> 200^b$
	80 : 20	44.20 ± 0.79^c	2.65 ± 0.56^a	$> 200^b$
	50 : 50	44.30 ± 0.68^c	2.57 ± 0.51^a	$> 200^b$
	20 : 80	44.12 ± 0.78^c	2.40 ± 0.52^a	$> 200^b$
	0 : 100	38.53 ± 0.71^c	2.73 ± 0.69^a	$> 200^b$
ด้านหลัง	untreated	12.86 ± 0.77^a	76.00 ± 2.77^c	100.54 ± 0.73^a
	100 : 0	46.36 ± 0.77^b	3.14 ± 0.64^a	$> 200^b$
	80 : 20	45.98 ± 0.73^f	2.87 ± 0.71^a	$> 200^b$
	50 : 50	46.42 ± 0.63^f	2.83 ± 0.70^a	$> 200^b$
	20 : 80	46.28 ± 0.71^f	2.80 ± 0.74^a	$> 200^b$
	0 : 100	42.52 ± 0.64^d	3.25 ± 0.72^a	$> 200^b$

หมายเหตุ ^{a-f} ตัวอักษรที่ต่างกันในแถวตั้งหมายถึงค่าเฉลี่ยมีความแตกต่างกันทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

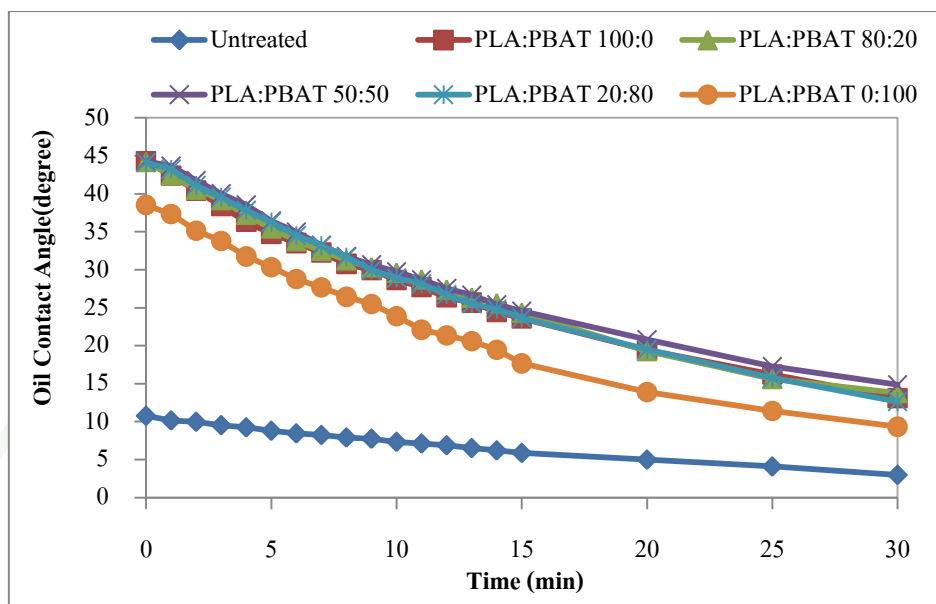
มูมสัมพัทธ์ กระดาษที่ผ่านการอิเล็กทรอนิกส์ด้วยสารละลายผสมทุกสูตรทำให้มูมสัมพัทธ์เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบกับกระดาษไม่เคลือบ แต่อย่างไรก็ตาม กระดาษที่ผ่านการอิเล็กทรอนิกส์ด้วยสารละลายพอลิไบวิตินอะดิเพท-โค-เทเรฟทาเลทเพียงอย่างเดียว (อัตราส่วน 0:100) มีมูมสัมพัทธ์ที่น้อยกว่ากระดาษที่ผ่านการอิเล็กทรอนิกส์ด้วยสารละลายผสมสูตรอื่น ทั้งนี้อาจเกิดจากอนุภาคที่ได้จากสารละลายผสมและสารละลายพอลิแลคติกแอซิดอย่างเดียว (อัตราส่วน 100:0) มีลักษณะคล้ายกันและอนุภาคมีขนาดเล็กและมีความสม่ำเสมอ แสดงดังภาพที่ 27 และ 28 จึงทำให้มูมสัมพัทธ์มีค่าสูงและไม่แตกต่างกัน แต่อนุภาคที่ได้จากสารละลายพอลิไบวิตินอะดิเพท-โค-เทเรฟทาเลทเพียงอย่างเดียว มีลักษณะคล้ายเส้นใยสั้นและขนาดของอนุภาคใหญ่และไม่สม่ำเสมอ ส่งผลให้มูมสัมพัทธ์น้อยกว่า

เมื่อพิจารณาปริมาณการดูดซึมน้ำมันพบว่า กระดาษที่ผ่านการอิเล็กทรอนิกส์ด้วยสารละลายผสมทุกสูตร สามารถต้านทานการดูดซึมน้ำมันได้ดีกว่ากระดาษไม่เคลือบอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) และกระดาษที่ผ่านการอิเล็กทรอนิกส์ด้วยสารละลายผสมทุกสูตรมีปริมาณการดูดซึมน้ำมันไม่แตกต่างกัน สอดคล้องกับผลการทดลองของ Manangan และ Shawaphun (2010) ที่นำสารละลายพอลิแลคติกแอซิดและพอลิไฮดรอกซีไบวิตินเรดเคลือบกระดาษขานอ้อยพบว่าที่ระดับความเข้มข้นของสารเคลือบเท่ากัน กระดาษขานอ้อยสามารถลดการดูดซึมของน้ำมันได้ใกล้เคียงกัน

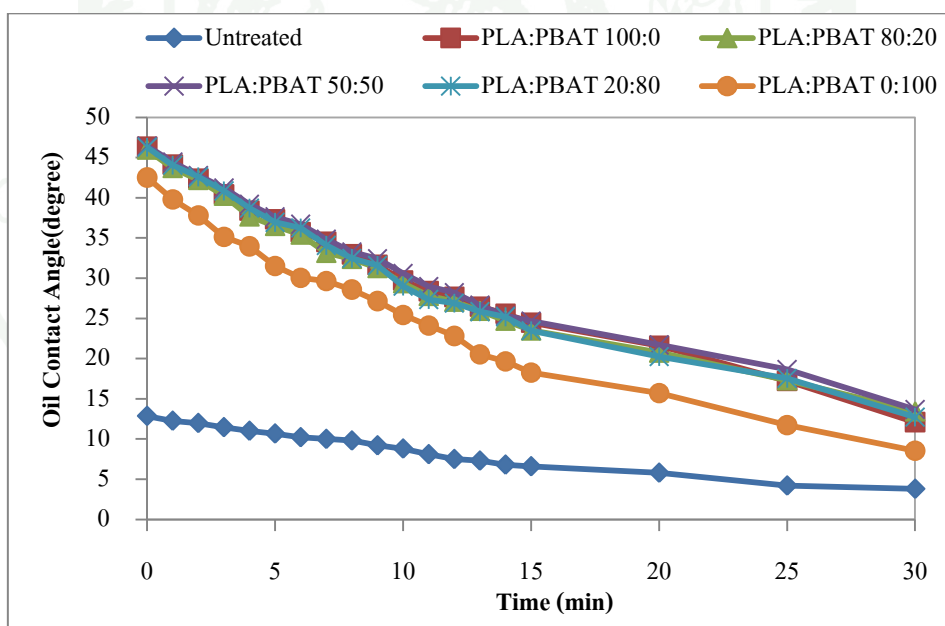
เมื่อพิจารณาเวลาในการดูดซึมน้ำมัน โดยเฉพาะด้านหลังของกระดาษพบว่า กระดาษที่ผ่านการอิเล็กทรอนิกส์ด้วยสารละลายผสมทุกสูตร มีเวลาในการดูดซึมน้ำมันเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบกับกระดาษไม่เคลือบ และกระดาษที่ผ่านการอิเล็กทรอนิกส์ด้วยสารละลายผสมทุกสูตรมีเวลาในการดูดซึมน้ำมันไม่แตกต่างกัน สอดคล้องกับผลการทดลองที่วัดปริมาณการดูดซึมน้ำมันที่ไม่แตกต่างกัน

จากการพิจารณา ค่ามุมสัมผัส การดูดซึมน้ำมันและเวลาในการดูดซึมน้ำมัน พบว่าค่าที่ได้เป็นแนวโน้มเดียวกับค่าทดสอบการต้านทานน้ำ แสดงว่าการเติมพอลิบิวทิลีนอะดิเพท-โค-เทเรฟทาเลทลงไปในสารละลายพอลิแลคติกแอซิดไม่ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสมบัติการต้านทานน้ำและน้ำมันของกระดาษ

เมื่อพิจารณาอัตราการลดลงของมุมสัมผัสของกระดาษ โดยการวัดมุมสัมผัสแบบต่อเนื่อง (dynamic contact angle) ของหยดน้ำมันปริมาตร 5 ไมโครลิตร ในนาทิตี่ 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 15, 20, 25 และนาทิตี่ 30 ภายหลังจากหยดหยดน้ำมันลงบนผิวกระดาษ เพื่อศึกษาลักษณะการเปลี่ยนแปลงของมุมสัมผัสของหยดน้ำมันทั้งด้านหน้าและด้านหลังของกระดาษเมื่อเวลาผ่านไป ผลการทดลองแสดงดังภาพที่ 26 (รายละเอียดของค่าทดสอบแสดงในภาคผนวก ง) พบว่าเมื่อเวลาผ่านไปกระดาษที่ผ่านการอิเล็กโทรสเปรย์ด้วยสารละลายผสมทุกสูตรมีค่ามุมสัมผัสสูงกว่ากระดาษไม่เคลือบและมีแนวโน้มการลดลงของมุมสัมผัสเท่าๆกัน ทั้งนี้เพราะพอลิแลคติกแอซิดและพอลิบิวทิลีนอะดิเพท-โค-เทเรฟทาเลทมีสมบัติการต้านทานน้ำมันที่ใกล้เคียงกัน นอกจากนี้สังเกตพบว่า กระดาษที่ผ่านการอิเล็กโทรสเปรย์ด้วยสารละลายพอลิแลคติกแอซิดและสารละลายผสม มีการค่าลดลงของมุมสัมผัสเกาะกลุ่มกันตลอดเวลา 30 นาที ส่วนกระดาษที่ผ่านการอิเล็กโทรสเปรย์ด้วยสารละลายพอลิบิวทิลีนอะดิเพท-โค-เทเรฟทาเลทเพียงอย่างเดียว (อัตราส่วน 0:100) มีมุมสัมผัสน้อยกว่ากระดาษที่ผ่านการอิเล็กโทรสเปรย์ด้วยสารละลายผสมสูตรอื่น ตลอดช่วงเวลาในการทดลอง ทั้งนี้อาจเกิดจากอนุภาคที่ได้จากสารละลายพอลิแลคติกแอซิดอย่างเดียว (อัตราส่วน 100:0) และสารละลายผสม มีลักษณะคล้ายกันและอนุภาคมีขนาดเล็กและมีความสม่ำเสมอ แสดงดังภาพที่ 27 และ 28 จึงทำให้มุมสัมผัสมีค่าไม่แตกต่างกัน แต่อนุภาคที่ได้จากสารละลายพอลิบิวทิลีนอะดิเพท-โค-เทเรฟทาเลทเพียงอย่างเดียว มีลักษณะคล้ายเส้นใยสั้นและขนาดของอนุภาคใหญ่และไม่สม่ำเสมอ จึงทำให้มุมสัมผัสมีค่าน้อยกว่า



(ก) กระจกด้านหน้า



(ข) กระจกด้านหลัง

ภาพที่ 26 การลดลงของค่ามุมสัมผัสของหยดน้ำมันเมื่อเวลาผ่านไปสำหรับกระจกที่ผ่านการอิเล็กโทรสเปรย์ด้วยสารละลายผสมระหว่างพอลิแลคติกแอซิดและพอลิบิวทิลีนอะดิเพต-โค-เทรฟทาเลต (ก) กระจกด้านหน้า และ (ข) กระจกด้านหลัง

3.4 สมบัติการกีดขวางของกระดาษ

ผลการทดลองอัตราการแพร่ผ่านของไอน้ำ และอัตราการแพร่ผ่านของก๊าซออกซิเจนของกระดาษเคลือบผิวหน้าด้วยพอลิแลคติกแอซิดโดยเทคนิคอิเล็กโทรสเปรย์ แสดงดังตารางที่ 14 จากผลการทดลอง เมื่อเปรียบเทียบกระดาษที่อิเล็กโทรสเปรย์ด้วยสารละลายที่มีอัตราส่วนของพอลิแลคติกแอซิดต่อพอลิบิวทิลีนอะดิเพต-โค-เทเรฟทาเลทที่ 100:0, 80:20, 50:50, 20:80 และ 0:100 กับกระดาษที่ไม่เคลือบ พบว่า กระดาษที่ผ่านการอิเล็กโทรสเปรย์ด้วยสารละลายผสมทุกสูตรสามารถกีดขวางการแพร่ผ่านของไอน้ำและก๊าซออกซิเจนได้มากกว่ากระดาษไม่เคลือบอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) แต่เมื่อเปรียบเทียบผลการทดลองระหว่างสารละลายแต่ละสูตรสามารถแบ่งผลการทดสอบได้เป็น 3 กลุ่ม คือกระดาษที่อิเล็กโทรสเปรย์ด้วยสารละลายที่มีอัตราส่วนของพอลิแลคติกแอซิดต่อพอลิบิวทิลีนอะดิเพต-โค-เทเรฟทาเลทที่ 50:50 และ 20:80 พบว่าสามารถกีดขวางการแพร่ผ่านของไอน้ำและก๊าซออกซิเจนได้มากที่สุด ส่วนกระดาษที่อิเล็กโทรสเปรย์ด้วยสารละลายที่มีอัตราส่วนของพอลิแลคติกแอซิดต่อพอลิบิวทิลีนอะดิเพต-โค-เทเรฟทาเลทที่ 100:0 และ 80:20 สามารถกีดขวางการแพร่ผ่านของไอน้ำและก๊าซออกซิเจนได้มากกว่า กระดาษที่อิเล็กโทรสเปรย์ด้วยสารละลายพอลิบิวทิลีนอะดิเพต-โค-เทเรฟทาเลทเพียงอย่างเดียว (อัตราส่วน 0:100) ทั้งนี้อาจเป็นเพราะลักษณะและขนาดของอนุภาคที่ได้จากการอิเล็กโทรสเปรย์สารละลายผสมระหว่างพอลิแลคติกแอซิดต่อพอลิบิวทิลีนอะดิเพต -โค-เทเรฟทาเลทที่ 100:0, 80:20, 50:50 และ 20:80 พบว่าอนุภาคมีลักษณะคล้ายกันและอนุภาคมีขนาดเล็กและมีความสม่ำเสมอ จึงทำให้ไอน้ำและก๊าซออกซิเจนแพร่ผ่านเข้าออกได้ยากเมื่อเปรียบเทียบกับอนุภาคที่ได้จากสารละลายพอลิบิวทิลีนอะดิเพต-โค-เทเรฟทาเลท ที่อนุภาคมีลักษณะคล้ายเส้นใยสั้น มีขนาดใหญ่ ทำให้เกิดช่องว่างที่ผิวหน้ากระดาษ ทำให้ไอน้ำและก๊าซออกซิเจนแพร่ผ่านได้มากกว่า นอกจากนี้ยังสังเกตได้ว่า อนุภาคที่ได้จากสารละลายผสมระหว่างพอลิแลคติกแอซิดต่อพอลิบิวทิลีนอะดิเพต -โค-เทเรฟทาเลทที่ 50:50 และ 20:80 มีขนาดเล็กและไม่มีรูพรุนที่ผิวของอนุภาค จึงทำให้ไอน้ำและก๊าซออกซิเจนแพร่ผ่านเข้าออกได้น้อยกว่า แตกต่างกับผิวของอนุภาคที่ได้จากสารละลายผสมระหว่างพอลิแลคติกแอซิดต่อพอลิบิวทิลีนอะดิเพต -โค-เทเรฟทาเลทที่ 100:0 และ 80:20 พบว่า ผิวของอนุภาคมีรูพรุนขนาดเล็กจำนวนมาก จึงอาจทำให้ไอน้ำและก๊าซออกซิเจนแพร่ผ่านเข้าออกได้มากกว่า

ตารางที่ 14 อัตราการแพร่ผ่านของไอน้ำและอัตราการแพร่ผ่านของก๊าซออกซิเจนของกระดาศที่ผ่านการอิเล็กโทรสเปรย์ด้วยสารละลายผสมระหว่างพอลิแลคติกแอซิดและพอลิบิวทิลีนอะดิเพท-โค-เทรฟทาเลท

อัตราส่วนของสารละลาย PLA:PBAT	ค่าทดสอบ	
	อัตราการซึมผ่าน ของไอน้ำ (กรัม/ตร.ม./วัน)	อัตราการซึมผ่าน ของก๊าซออกซิเจน (ลบ.ซม./ตร.ม./วัน)
untreated	528.51 ± 18.30 ^d	42,483 ± 692.78 ^d
100 : 0	104.10 ± 8.01 ^b	20,686 ± 697.76 ^b
80 : 20	103.06 ± 8.13 ^b	20,675 ± 685.56 ^b
50 : 50	74.62 ± 8.29 ^a	18,969 ± 620.55 ^a
20 : 80	81.35 ± 8.81 ^a	18,422 ± 725.81 ^a
0 : 100	221.70 ± 11.29 ^c	27,659 ± 612.85 ^c

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

3.5 การวิเคราะห์พื้นผิวของกระดาศ

เป็นการใช้เทคนิค scanning electron microscopy (SEM) วิเคราะห์พื้นผิวของกระดาศที่อิเล็กโทรสเปรย์ด้วยสารละลายผสมระหว่างพอลิแลคติกแอซิดต่อพอลิบิวทิลีนอะดิเพท-โค-เทรฟทาเลท เพื่อดูรูปร่างลักษณะของอนุภาคที่ตกลงบนผิวหน้าของกระดาศทั้งด้านหน้าและด้านหลัง โดยเลือกใช้กำลังขยายที่ 500 และ 5,000 เท่า เพื่อดูภาพรวมของอนุภาคที่กระจายอยู่บนผิวของกระดาศและดูลักษณะรายละเอียดของอนุภาค ลักษณะพื้นผิวของกระดาศด้านหน้าและด้านหลังของกระดาศที่อิเล็กโทรสเปรย์ด้วยสารละลายผสมที่มีอัตราส่วนของพอลิแลคติกแอซิดต่อพอลิบิวทิลีนอะดิเพท-โค-เทรฟทาเลทที่ 100:0, 80:20, 50:50, 20:80 และ 0:100 ตามลำดับ แสดงดังภาพที่ 27 และ 28

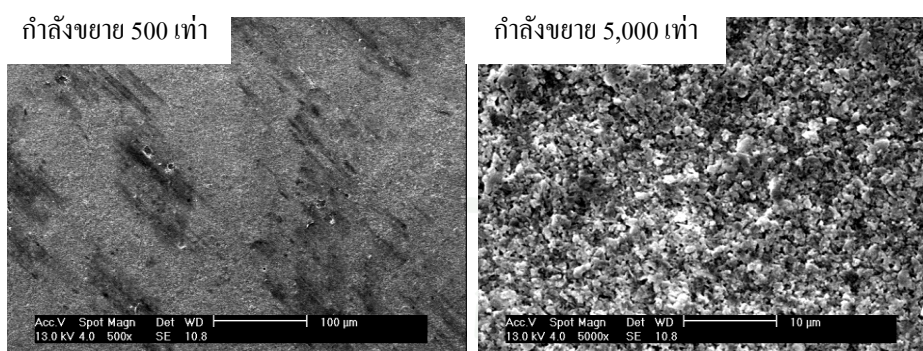
จากการถ่ายภาพด้วยเครื่อง SEM กำลังขยาย 500 เท่า พบว่า บนพื้นผิวกระดาศที่อิเล็กโทรสเปรย์ด้วยสารละลายผสมระหว่างพอลิแลคติกแอซิดต่อพอลิบิวทิลีนอะดิเพท-โค-เทรฟ

ทาเลทที่ 80:20 ให้ลักษณะของอนุภาคคล้ายกับอนุภาคบนพื้นผิวของกระดาษที่ผ่านการอิเล็กโทรสเปรย์ด้วยสารละลายพอลิแลคติกแอซิดเพียงอย่างเดียว (อัตราส่วน 100:0) ส่งผลให้ผลการทดลองของกระดาษที่อิเล็กโทรสเปรย์ด้วยสารละลายผสมที่มีอัตราส่วน 100:0 และ 80:20 ไม่แตกต่างกัน ทั้งในสมบัติด้านกายภาพ เชิงกล การต้านทานน้ำและน้ำมัน และการต้านทานการซึมผ่านของไอน้ำ และก๊าซออกซิเจน

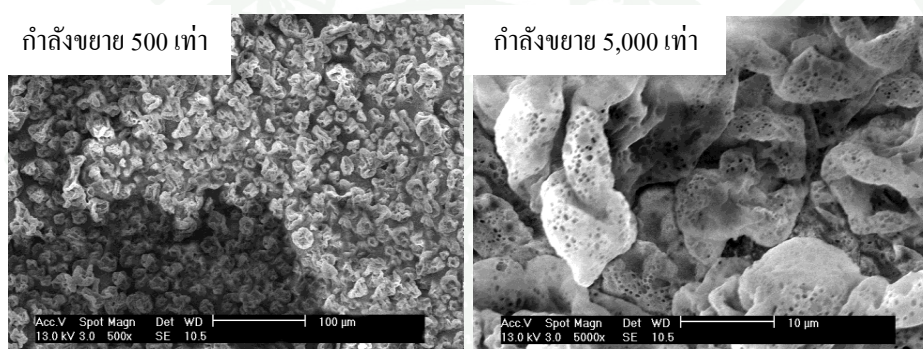
เมื่อมาพิจารณาพื้นผิวกระดาษที่ผ่านการอิเล็กโทรสเปรย์ด้วยสารละลายที่มีอัตราส่วนของพอลิแลคติกแอซิดต่อพอลิบิวทิลีนอะดิเพท-โค-เทเรฟทาเลทที่ 50:50 พบว่า อนุภาคมีขนาดเล็กลงแต่รูปร่างยังเหมือนเดิม และกระจายไปทั่วพื้นผิวของกระดาษอย่างสม่ำเสมอ ส่วนลักษณะของอนุภาคบนพื้นผิวกระดาษที่อิเล็กโทรสเปรย์ด้วยสารละลายที่มีอัตราส่วนของพอลิแลคติกแอซิดต่อพอลิบิวทิลีนอะดิเพท-โค-เทเรฟทาเลทที่ 20:80 พบว่าขนาดของอนุภาคเล็กลง แต่รูปร่างของอนุภาคไม่มีความสม่ำเสมอคือบางอนุภาคให้ลักษณะคล้ายเส้นใยด้วย จึงทำให้มีสมบัติเชิงกลที่ดีขึ้น

จากการวิเคราะห์พื้นผิวกระดาษที่ผ่านการอิเล็กโทรสเปรย์ด้วยสารละลายพอลิบิวทิลีนอะดิเพท-โค-เทเรฟทาเลทอย่างเดียว (อัตราส่วน 0:100) พบว่า อนุภาคมีขนาดใหญ่และมีความยาวต่อเนื่องคล้ายเส้นใย สามารถสังเกตได้ชัดเจนจากการวิเคราะห์พื้นผิวของกระดาษด้านหลัง คือ อนุภาคคล้ายเส้นใยพันไปรอบๆ เส้นใยของกระดาษส่งผลให้กระดาษมีความหนาเพิ่มขึ้นเล็กน้อย มีสมบัติเชิงกลดีขึ้นอย่างชัดเจน และมีผลต่อคุณสมบัติที่ลดลง เนื่องจากอนุภาคมีขนาดใหญ่และไม่สม่ำเสมอและช่องว่างระหว่างอนุภาคมากกว่า ซึ่งทำให้การแพร่ผ่านของไอน้ำและก๊าซออกซิเจนได้มากกว่า

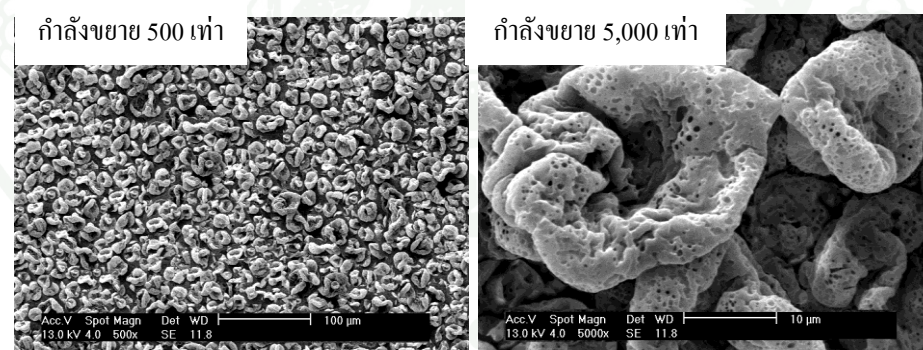
เมื่อพิจารณาที่บริเวณผิวของอนุภาค พบว่าอนุภาคของสารละลายพอลิแลคติกแอซิดอย่างเดียวมีรูพรุนขนาดเล็กจำนวนมาก และเมื่อนำสารละลายพอลิแลคติกแอซิดมาผสมด้วยพอลิบิวทิลีนอะดิเพท-โค-เทเรฟทาเลท พบว่าอนุภาคมีปริมาณของรูพรุนลดลงตามอัตราส่วนที่เพิ่มขึ้นของพอลิบิวทิลีนอะดิเพท-โค-เทเรฟทาเลท จึงสังเกตได้ว่าอนุภาคบนพื้นผิวกระดาษที่อิเล็กโทรสเปรย์ด้วยสารละลายที่มีอัตราส่วนของพอลิแลคติกแอซิดต่อพอลิบิวทิลีนอะดิเพท-โค-เทเรฟทาเลทที่ 50:50 และ 20:80 มีรูพรุนที่ลดลงมากและอนุภาคมีขนาดเล็กลงด้วย จึงสามารถลดการแพร่ผ่านของไอน้ำและก๊าซออกซิเจนได้มากกว่า ทั้งนี้อาจเกิดจากสมบัติของพอลิบิวทิลีนอะดิเพท-โค-เทเรฟทาเลทที่มีความยืดหยุ่นสูง เมื่อคลอโรฟอร์มเกิดการระเหยออกไป จึงส่งผลให้อนุภาคเกิดการหดตัวเต็มเต็มช่องว่างที่เป็นรูพรุน



(ก) untreated

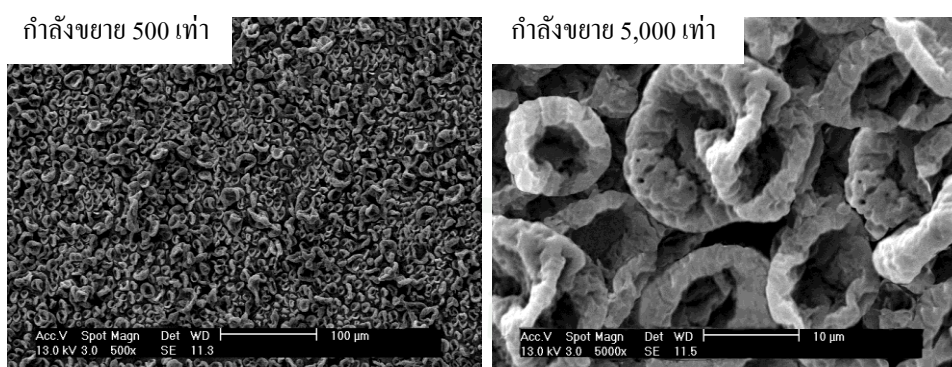


(ข) PLA:PBAT 100:0

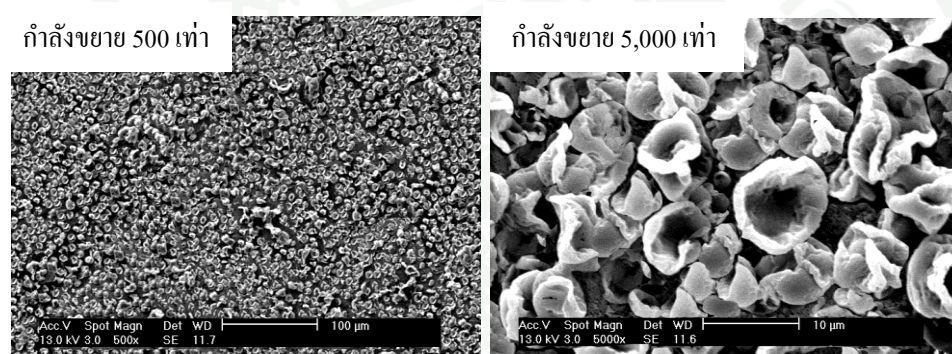


(ค) PLA:PBAT 80:20

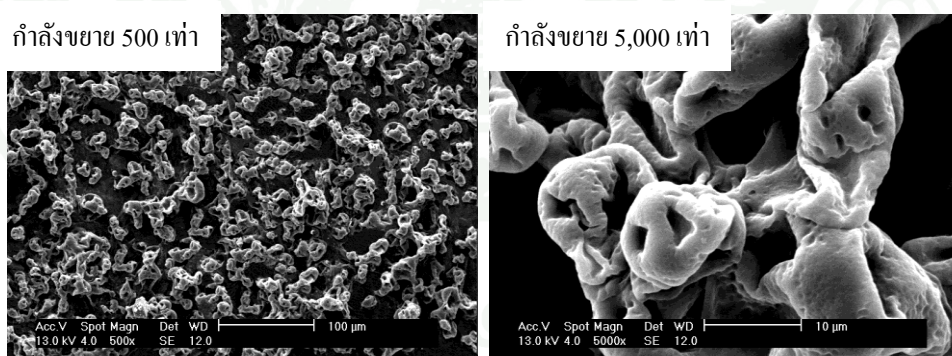
ภาพที่ 27 ลักษณะพื้นผิวของด้านหน้าของกระดาษที่ผ่านการอิเล็กโตรสเปรย์ด้วยสารละลายผสมระหว่างพอลิแลคติกแอซิดและพอลิบิวทิลีนอะดิเพต-โค-เทเรฟทาเลท ด้วยเครื่อง scanning electron microscope (SEM) (ก) untreated (ข) PLA:PBAT 100:0 (ค) PLA:PBAT 80:20 (ง) PLA:PBAT 50:50 (จ) PLA:PBAT 20:80 และ (ฉ) PLA:PBAT 0:100



(ง) PLA:PBAT 50:50

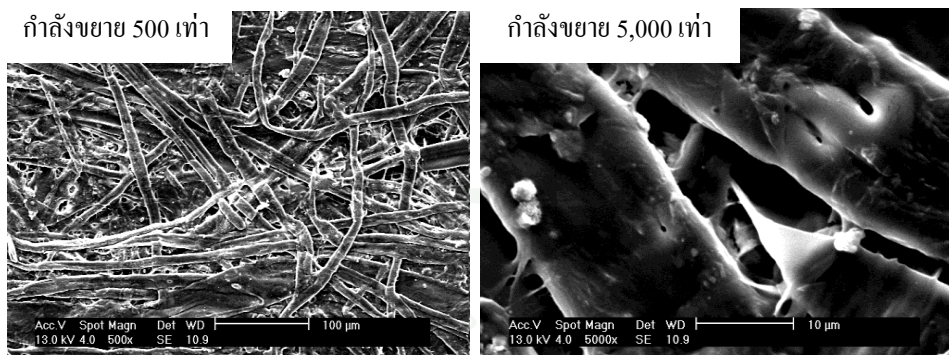


(จ) PLA:PBAT 20:80

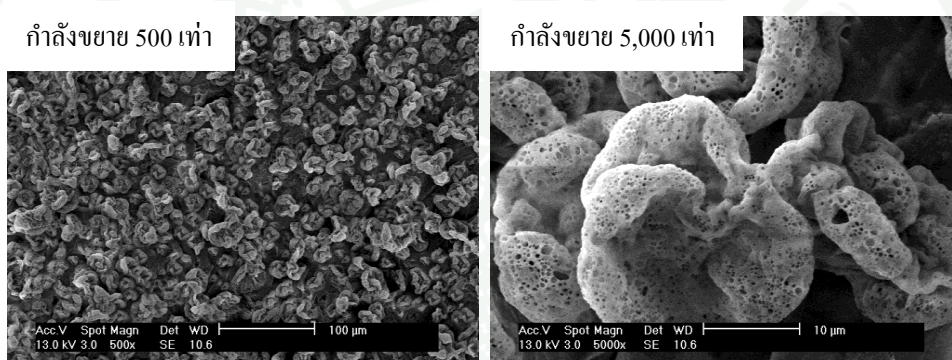


(ฉ) PLA:PBAT 0:100

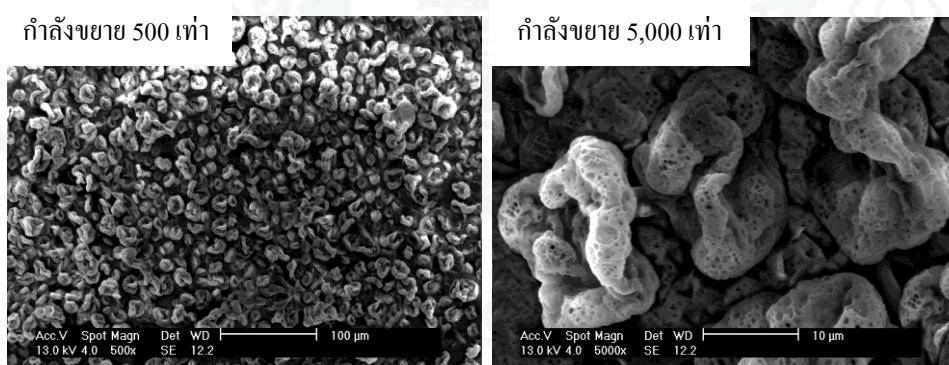
ภาพที่ 27 (ต่อ)



(ก) untreated



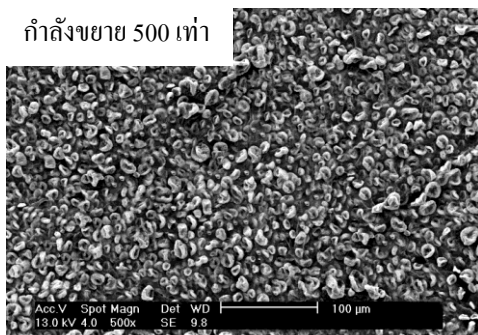
(ข) PLA:PBAT 100:0



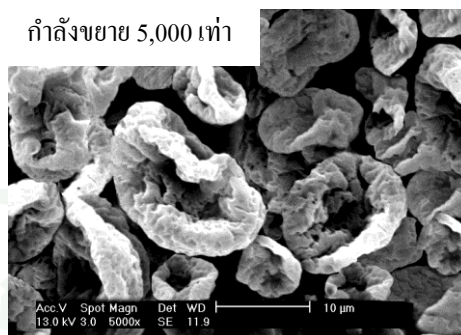
(ค) PLA:PBAT 80:20

ภาพที่ 28 ลักษณะพื้นผิวของด้านหลังของกระดาษที่ผ่านการอิเล็กโทรสเปรย์ด้วยสารละลายผสมระหว่างพอลิแลคติกแอซิดและพอลิบิวทีลีนอะดิเพต-โค-เทเรฟทาเลต ด้วยเครื่อง scanning electron microscope (SEM) (ก) untreated (ข) PLA:PBAT 100:0 (ค) PLA:PBAT 80:20 (ง) PLA:PBAT 50:50 (จ) PLA:PBAT 20:80 และ (ฉ) PLA:PBAT 0:100

กำลังขยาย 500 เท่า

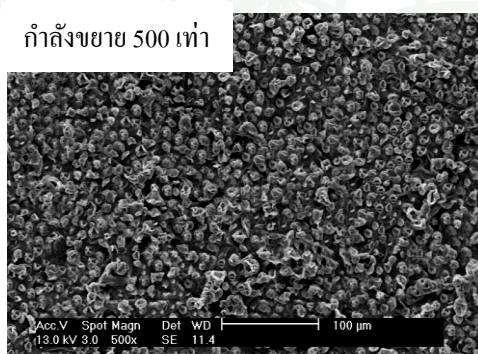


กำลังขยาย 5,000 เท่า

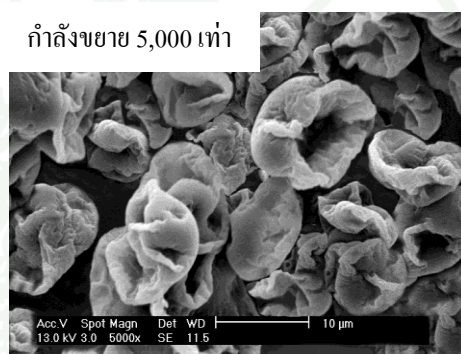


(ง) PLA:PBAT 50:50

กำลังขยาย 500 เท่า

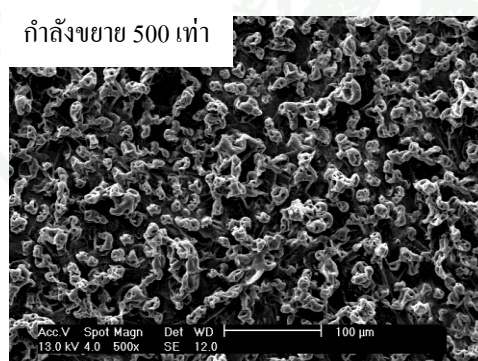


กำลังขยาย 5,000 เท่า

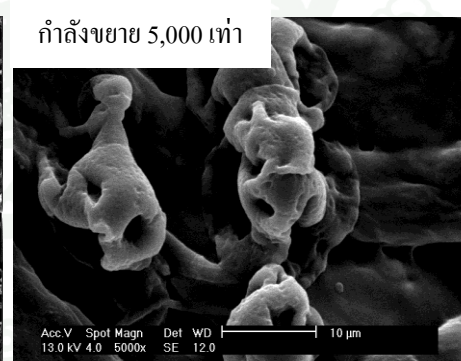


(จ) PLA:PBAT 20:80

กำลังขยาย 500 เท่า



กำลังขยาย 5,000 เท่า



(ฉ) PLA:PBAT 0:100

ภาพที่ 28 (ต่อ)

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

การศึกษาการปรับปรุงสมบัติกระดาษด้วยการเคลือบสารละลายพอลิแลคติกแอซิดโดยเทคนิคอิเล็กโทรสเปรย์ พบว่า สมบัติทางกายภาพ สมบัติเชิงกล สมบัติการต้านทานน้ำและน้ำมัน และสมบัติการกีดขวางของกระดาษเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) โดยสามารถสรุปประเด็นสำคัญจากการทดลองได้ดังนี้

1. สภาวะอิเล็กโทรสเปรย์ที่เหมาะสมของสารละลายพอลิแลคติกแอซิดต่อการผลิตอนุภาคเพื่อเคลือบกระดาษแข็ง

สภาวะอิเล็กโทรสเปรย์ที่เหมาะสมต่อการผลิตอนุภาคที่สม่ำเสมอขึ้นอยู่กับความสัมพันธ์กันของ 4 ปัจจัย ได้แก่ ความเข้มข้นของสารละลาย ค่าศักย์ไฟฟ้าสูงกระแสตรง อัตราการไหลของสารละลายและระยะทางระหว่างปลายเข็มถึงกระดาษ จากการทดลองพบว่าสภาวะอิเล็กโทรสเปรย์ที่เหมาะสมอันเกิดจากความสัมพันธ์ของความเข้มข้นของสารละลาย ค่าศักย์ไฟฟ้าสูงกระแสตรง และอัตราการไหลของสารละลาย จะก่อให้เกิดสารละลายเกิดเป็นรูปกรวยของเทเลอร์ (Taylor cone) ที่ปลายเข็มแล้วส่งผลให้สารละลายแตกเป็นละอองในรูปแบบ cone-jet ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่าสภาวะที่เหมาะสมของอิเล็กโทรสเปรย์ที่ทำให้สารละลายพอลิแลคติกแอซิดเกิดเป็นอนุภาคที่เคลือบบนผิวหน้ากระดาษได้อย่างสม่ำเสมอ คือที่ความเข้มข้นของสารละลายพอลิแลคติกแอซิดร้อยละ 0.5, 1 และ 2 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ต้องใช้ค่าศักย์ไฟฟ้าสูงกระแสตรงที่ 8 กิโลโวลต์ ส่วนที่ความเข้มข้นร้อยละ 3 และ 4 โดยน้ำหนักต่อปริมาตรใช้ค่าศักย์ไฟฟ้าสูงกระแสตรงที่ 9 กิโลโวลต์ โดยใช้อัตราการไหลของสารละลายเท่ากับ 4 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง และ ระยะห่างระหว่างปลายเข็มถึงกระดาษ 20 เซนติเมตร

2. ผลของระดับความเข้มข้นของสารละลายพอลิแลคติกแอซิดเมื่อผ่านกระบวนการอิเล็กโทรสเปรย์ต่อสมบัติของกระดาษแข็ง

จากผลการทดลองของสมบัติทางกายภาพ สมบัติเชิงกล สมบัติการต้านทานน้ำและน้ำมัน สมบัติการกีดขวางการแพร่ผ่าน และการวิเคราะห์พื้นผิวของกระดาษโดยเทคนิค SEM พบว่า กระดาษที่ผ่านการอิเล็กโทรสเปรย์ด้วยสารละลายพอลิแลคติกแอซิดที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 1 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร มีความเหมาะสมต่อการนำมาเคลือบกระดาษโดยเทคนิคอิเล็กโทรสเปรย์มากที่สุด เพราะ อนุภาคพอลิแลคติกแอซิดที่ได้มีความหนาแน่นและสม่ำเสมอปกคลุมอยู่ทั่วพื้นผิวของกระดาษ ส่งผลให้กระดาษที่ผ่านการอิเล็กโทรสเปรย์ด้วยสารละลายพอลิแลคติกแอซิดที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 1 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร มีความชื้นในกระดาษลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) และมีความสามารถต้านทานน้ำและน้ำมัน รวมทั้งกีดขวางการแพร่ผ่านของไอน้ำและก๊าซออกซิเจนได้เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) โดยน้ำหนักมาตรฐานและสมบัติเชิงกลไม่มีความแตกต่างกับกระดาษไม่เคลือบ แต่อย่างไรก็ตามพบว่า ที่ผิวของอนุภาคพอลิแลคติกแอซิดมีรูพรุนขนาดเล็กมาก จึงอาจเป็นสาเหตุทำให้กีดขวางการแพร่ผ่านของไอน้ำและก๊าซออกซิเจนได้ไม่ดีเท่าที่ควร รวมทั้งสามารถสังเกตได้ว่ากระดาษที่อิเล็กโทรสเปรย์ด้วยสารละลายพอลิแลคติกแอซิดที่ระดับความเข้มข้นสูงกว่า ร้อยละ 2 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร หลังการทดสอบสมบัติเชิงกลแล้วจะพบรอยแตกเป็นผงสีขาวที่บริเวณรอยหักพับของกระดาษที่ชัดเจนมากขึ้น อันเนื่องมาจากขนาดของอนุภาคที่ใหญ่มากขึ้นและสมบัติความเปราะของพอลิแลคติกแอซิด

3. ผลของสารละลายผสมระหว่างพอลิแลคติกแอซิดและพอลิบิวทิลีนอะดิเพต-โค-เทเรฟทาเลตเมื่อผ่านกระบวนการอิเล็กโทรสเปรย์ต่อสมบัติของกระดาษแข็ง

จากปัญหาสมบัติความไม่ยืดหยุ่นของพอลิแลคติกแอซิด ทำให้ต้องมีการเลือกผสมพอลิบิวทิลีนอะดิเพต-โค-เทเรฟทาเลต ในอัตราส่วนต่างที่กัน เพื่อศึกษาผลการผสมต่อการเพิ่มสมบัติความยืดหยุ่นของชั้นเคลือบ ผลการทดลองพบว่ากระดาษที่ผ่านการอิเล็กโทรสเปรย์ด้วยสารละลายผสมในทุกะดับ มีความต้านทานการดูดซึมน้ำและน้ำมันไม่แตกต่างกันและสารละลายผสมไม่สามารถเพิ่มความต้านทานน้ำและน้ำมันได้

จากผลการวิเคราะห์พื้นผิวโดยเทคนิค SEM พบว่า บนพื้นผิวของกระดาศที่ผ่านการอิเล็กทรอนิกส์เปรย์ด้วยสารละลายที่มีอัตราส่วนของพอลิแลคติกแอซิดต่อพอลิบิวทิลีนอะดิเพต-โค-เทรฟทาเลทที่ 80:20 มีลักษณะของอนุภาคที่คล้ายกับอนุภาคที่ได้จากสารละลายพอลิแลคติกแอซิดเพียงอย่างเดียว (อัตราส่วน 100:0) การเคลือบกระดาศด้วยสารละลายผสมดังกล่าวจึงไม่เปลี่ยนแปลงสมบัติของกระดาศในด้านต่างๆ

กระดาศที่ผ่านการอิเล็กทรอนิกส์เปรย์ด้วยสารละลายที่มีอัตราส่วนของพอลิแลคติกแอซิดต่อพอลิบิวทิลีนอะดิเพต-โค-เทรฟทาเลทที่ 50:50 พบว่ามีขนาดของอนุภาคที่เล็กลงและมีรูพรุนที่น้อยลงมาก ซึ่งส่งผลสอดคล้องกับผลการซึมผ่านของไอน้ำและก๊าซออกซิเจนที่ลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) นอกจากนี้ยังสังเกตได้ว่าที่สารละลายผสมอัตราส่วนของพอลิบิวทิลีนอะดิเพต-โค-เทรฟทาเลทที่ร้อยละ 50 ขึ้นไปจะไม่มีรอยสีขาวที่บริเวณหักพับของกระดาศ

กระดาศที่ผ่านการอิเล็กทรอนิกส์เปรย์ด้วยสารละลายที่มีอัตราส่วนของพอลิแลคติกแอซิดต่อพอลิบิวทิลีนอะดิเพต-โค-เทรฟทาเลทที่ 20:80 พบว่ามีอนุภาคนาขนาดเล็กมากมายและไม่มีรูพรุนที่บริเวณผิว ส่งผลให้มีการซึมผ่านของไอน้ำและก๊าซออกซิเจนที่ลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) นอกจากนั้นยังพบอนุภาคบางส่วนที่มีลักษณะคล้ายเส้นใยอันเกิดจากอิทธิพลของพอลิบิวทิลีนอะดิเพต-โค-เทรฟทาเลทรวมอยู่ด้วย รวมถึงสมบัติของพอลิบิวทิลีนอะดิเพต-โค-เทรฟทาเลทที่มีความยืดหยุ่นสูง จึงทำให้ความต้านทานแรงกดวงแหวนเพิ่มขึ้นทั้งในแนว MD และ CD อย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$)

กระดาศที่ผ่านการอิเล็กทรอนิกส์เปรย์ด้วยสารละลายพอลิบิวทิลีนอะดิเพต-โค-เทรฟทาเลทอย่างเดียว (อัตราส่วน 0:100) พบว่า อนุภาคที่ได้มีลักษณะคล้ายเส้นใยและไม่มีรูพรุนที่ผิวของอนุภาค โดยเฉพาะพบว่าที่พื้นผิวด้านหลังของกระดาศจะมีอนุภาคของพอลิบิวทิลีนอะดิเพต-โค-เทรฟทาเลทพันเข้ากับเส้นใยของกระดาศ ทำให้ความต้านทานต่อการพับและความต้านทานแรงกดวงแหวนเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) แต่อย่างไรก็ตามอนุภาคที่เป็นลักษณะคล้ายเส้นใยมีขนาดใหญ่และมีช่องว่างระหว่างอนุภาคมาก จึงทำให้มีมุมสัมผัสของของเหลวต่ำและสมบัติการกีดขวางการแพร่ผ่านที่ไม่ดี

ข้อเสนอแนะ

1. เครื่องอิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ มีหัวเข็มเพียงหัวเดียว ดังนั้นในอนาคตจึงควรมีการพัฒนาเครื่องอิเล็กทรอนิกส์ให้สามารถใส่เข็มได้หลายหัว และมีการหมุนของแท่นใส่เข็มเพื่อเวลาพ้นสารละลายจะสามารถกระจายอนุภาคไปยังกระดาษทั่วทั้งแผ่นได้อย่างสม่ำเสมอ
2. ควรทดลองทำอิเล็กทรอนิกส์ในสารละลายพอลิเมอร์ที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพชนิดอื่นๆหรือทดลองในตัวทำละลายตัวอื่น เนื่องจากคลอโรฟอร์มอาจส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและอาจส่งผลกระทบต่อสุขภาพผู้ทำงานหากมีการจัดการที่ไม่ดี
3. อาจนำกระดาษที่ผ่านการอิเล็กทรอนิกส์ไปอบหรือผ่านอุโมงค์ให้ความร้อน เพื่อทำให้อนุภาคของสารละลายเกิดการหลอมเชื่อมต่อไปเป็นแผ่นฟิล์มต่อเนื่องและยึดติดกับผิวหน้าของกระดาษได้ดีขึ้น ซึ่งอาจส่งผลต่อการปรับปรุงสมบัติผิวหน้าของกระดาษให้ดียิ่งขึ้นได้
4. อาจมีการปรับปรุงเครื่องมือให้สามารถให้ความร้อนที่บริเวณหลอดของสารละลายเพื่อให้สามารถหลอมพอลิเมอร์ได้โดยตรงก่อนการทำอิเล็กทรอนิกส์หรือให้ความร้อนเพื่อลดความหนืดของสารละลายซึ่งอาจทำให้อนุภาคที่ได้มีขนาดเล็กลง
5. อาจทดลองผสมพอลิเมอร์ที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพอื่นๆเพิ่มเติมเพื่อปรับปรุงสมบัติในการต้านทานน้ำและน้ำมันของกระดาษรวมทั้งสมบัติเชิงกลและสมบัติการกีดขวางให้ดีขึ้น
6. อาจทดลองใช้เทคนิคอิเล็กทรอนิกส์ด้วยพอลิเมอร์ที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพกับวัสดุที่มีสมบัติชอบน้ำ (hydrophilic) ชนิดอื่นเพื่อปรับปรุงสมบัติดังกล่าวให้ดีขึ้น
7. อาจทดลองศึกษาอิทธิพลของปริมาณพอลิแลคติกแอซิดและพอลิบีวทิลีนอะดิเพต-โค-เทเรฟทาเลท ในช่วงอัตราส่วนของสารละลายผสมระหว่างพอลิแลคติกแอซิดต่อพอลิบีวทิลีนอะดิเพต-โค-เทเรฟทาเลทที่ 20 : 80 ถึง 0 : 100 เนื่องจากพบว่าในช่วงส่วนผสมดังกล่าวมีการเปลี่ยนแปลงลักษณะอนุภาคค่อนข้างมา

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

ดวงฤทัย ชำรงโชติ. 2550. เทคโนโลยีการบรรจุ. พิมพ์ครั้งที่1. สำนักพิมพ์โอเคียนสโตร์จำกัด ,
กรุงเทพฯ.

ปกรณ์ โอภาประกาศิต และ มณฑนา โอภาประกาศิต. 2551. แผนภาพแสดงประเภทและตัวอย่าง
ของพอลิเอสเตอร์ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ. พอลิเมอร์ย่อยสลายได้. แหล่งที่มา:
<http://www.vcharkarn.com/varticle/18774>, 5 มกราคม 2555.

สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย กระทรวงวิทยาศาสตร์เทคโนโลยีและ
สิ่งแวดล้อม. 2545. คู่มือการใช้การกระดาษเพื่อการหีบห่อ. พิมพ์ครั้งที่1. ห้างหุ้นส่วนจำกัด
อรุณการพิมพ์, กรุงเทพฯ.

สุวบุญ จิรชาญ. 2552. แผนภูมิแสดงกำลังการผลิตพอลิเมอร์ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ. ทิศทางและ
แนวโน้มในอุตสาหกรรมด้านพลาสติกชีวภาพไทย. แหล่งที่มา: http://www.ttc.most.go.th/stvolunteer/scitalk/bioplastic_direction.pdf, 3 มกราคม 2555.

สุชาดา ถาวรวิริยะนันท์. 2551. การปรับปรุงสมบัติการต้านทานน้ำของกระดาษแข็งโดยพลาสติก
ซัลเฟอร์เฮกซะฟลูออไรด์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

อรสิริ เสมรสุด. 2545. การพัฒนากระดาษสาเพื่อการพิมพ์และการนำไปใช้ประโยชน์.
วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

Akangah, P., S. Lingaiah and K. Shivakumar. 2010. Effect of Nylon-66 Nano-Fiber Interleaving
on Impact Damage Resistance of Epoxy/carbon Fiber Composite Laminates. **Composite
Structures**. 92: 1432–1439.

Aloui, H., K. Khwaldia, M.B. Slama and M. Hamdi. 2011. Effect of Glycerol and Coating Weight on Functional Properties of Biopolymer-Coated Paper. **Carbohydr. Polym.** 86: 1063-1072.

Andersson, C. 2008. New Ways to Enhance the Functionality of Paperboard by Surface Treatment – a Review. **Packag. Technol. Sci.** 21: 339-373.

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

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

_____. 2004b. **Standard Test Methods for Folding Endurance of Paper by the M. I. T. Tester.** ASTM D2176-97a (Reapproved 2002).

_____. 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).

Auras, R., T. Kijchavengkul, M. Rubino, S. Selke, M. Ngouajio and R. T. Fernandez. 2010. Biodegradation and Hydrolysis Rate of Aliphatic Aromatic Polyester. **Polymer Degradation and Stability.** 95: 2641-2647.

- Averous, L., P. Bordes and E. Pollet. 2009. Nano-Biocomposites: Biodegradable Polyester/Nanoclay Systems. **Progress in Polymer Science**. 34: 125–155.
- BASF. 2006. **Ecoflex F BX7011-Biodegradable polyester for compostable film**. Product Information. Available Source: http://www.bioplastics.basf.com/pdf/Product_information_Ecoflex_F_Blend_A1200V1-3.pdf. January 16, 2012.
- Bastarrachea, L., S. Dhawan, S.S. Sablani, J.H. Mah, D.H. Kang, J. Zhang and J. Tang. 2010. Biodegradable Poly(butyleneadipate-co-terephthalate) Films Incorporated with Nisin: Characterization and Effectiveness against *Listeria innocua*. **J. of Food Sci.** 75(4): 215-224.
- Benitez, R. J. Soler and L. Daza. 2005. Novel Method for Preparation of PEMFC Electrodes by The Electrospray Technique. **Journal of Power Sources**. 151: 108-113.
- Bhardwaj, N. and S.C. Kundu. 2010. A Fascinating Fiber Fabrication Technique. **Biotechnology Advances**. 28: 325-347.
- Biermann, C. J. 1996. **Handbook of Pulping and Papermaking**. 2nd ed. Academic Press Inc., California.
- Borra, J.P., D. Camelot, K.L. Chou, P.J. Kooyman, J.C.M. Marijinissen and B. Scarlett. 1999. Bipolarcoagulation for Power Production: Micro-Mixing Inside Droplets. **J. of Aerosol Sci.** 30(7): 945-958.
- Butkinaree, S., T. Jinkarn and R. Yoksan. 2008. Effects of Biodegradable Coating on Barrier Properties of Paperboard Food Packaging. **Journal of Metals, Materials and Minerals**. 18: 219-222.

- Chen, C.C., J.Y. Chueh, H. Tseng, H.M. Huang and S.Y. Lee. 2003. Preparation and Characterization of Biodegradable PLA Polymeric Blends. **Biomaterials**. 24: 1167-1173.
- Deotare, P.B. 2007. **Fabrication of Organic and Inorganic Nanoparticles Using Electrospray**. Thesis. Texas A&M University.
- Ding, B. and P. Lu. 2008. Applications of Electrospun Fibers. **Recent Patents on Nanotechnology**. 2: 169-182.
- Fang, D., Y. Liu, S. Jiang, J. Nie and G. Ma. In Press. Effect of Intermolecular Interaction on Electrospinning of Sodium Alginate. **Carbohydr. Polym.**
- Fernandez de la Mora, J. and I.G. Loscertables. 1994. The Current Emitted by Highly Conducting Taylor Cones. **J. Fluid Mech.** 260: 155-184.
- Ford, E., P.E. Roman and S. Kumar. 2009. Breathable Water-Resistant Linerboard Coatings by Electrospaying Application. **Bioresources**. 4(2): 714-729.
- Garlotta, D. 2002. A Literature Review of Poly Lactic Acid. **J. of Polymers and The Environment**. 9: 517-526.
- Gällstedt, M., A. Brottman and M.S. Hedenqvist. 2005. Packaging-related Properties of Protein- and Chitosan-coated Paper. **Packag. Technol. Sci.** 18: 161-170.
- Gu, SY., K. Zhang, J. Ren and H. Zhan. 2008. Melt Rheology of Polylactide/ Poly(butylenes adipate-co-terephthalate) Blends. **Carbohydr. Polym.** 74: 79-85.
- Guillaume, C., J. Pinte, N. Gontard and E. Gastaldi. 2010. Wheat Gluten-coated Papers for Bio-based food Packaging: Structure, surface and transfer properties. **Food Res. Int.** 43: 1395-1401.

- Greiner, A. and Wendorff J.H. 2007. Electrospinning: A Fascinating Method for the Preparation of Ultrathin Fibers. **Angew. Chem. Int. Ed.** 46: 5670 – 5703.
- Han, C.C., J. Zheng, H. Zhang and Z. Zhao. 2012. Construction of Hierarchical Structures by Electrospinning or Electrospraying. **Polymer**. 53: 546-554.
- Han, J., S. Salmieris, C.L. Tien and M. Lacroix. 2010. Improvement of Water Barrier Property of Paperboard by Coating Application with Biodegradable Polymers. **J. Agric. Food Chem.** 58: 3125–3131.
- Han, J.H. and J.M. Krochta. 2001. Physical Properties and Oil Absorption of Whey-Protein-coated Paper. **J. of Food Sci.** 66: 294–299.
- Havie, F. 2008. **Poly-L-lactic acid (PLA)**. Poly-L-lactic acid (PLA) in surgery. Available Source: <http://www.endo.smithnephew.com/no/View.asp?guid=%7B88B08131-90EF-4156-B0DA-2500E362441A%7D&b=2-pla.pdf>. January 18, 2012.
- Hirvikorpi, T., M.V. Nissi, A. Harlin, J. Marles, V. Miikkulainen and M. Karppinen. 2010. Effect of Corona Pre-treatment on The Performance of Gas Barrier Layers Applied by Atomic Layer Deposition onto Polymer-coated Paperboard. **Appl. Surf. Sci.** 257: 736–740.
- Hong, M.C. and G.Y. Deng. 2010. An Elevated Temperature Electrospinning Process for Preparing Acyclovir-loaded PAN Ultrafine Fibers. **J. of Materials Processing Technology**. 210: 1551-1555.
- Hu, Z.H., X.Y. Zen, J. Gong and Y. Deng. 2009. Water Resistance Improvement of Paper by Superhydrophobic Modification with Microsized CaCO₃ and Fatty Acid Coating. **Colloids and Surfaces A: Physicochem. Eng.** 351: 65–70.

International Organization for Standardization. 1990. **Paper, Board and Pulps -- Standard Atmosphere for Conditioning and Testing and Procedure for Monitoring the Atmosphere and Conditioning of Samples.** ISO 187.

Jaworek, A. and A.T. Sobczyk. 2008. Electrospraying Route to Nanotechnology: An Overview. **J. of Electrostatic.** 66(3-4): 197-219.

Khan, M.K.I., A.I. Maarten, Schutyser, K. Schroen and R. Boom. 2012. The Potential of Electrospraying for Hydrophobic Film Coating on Foods. **J. of Food Eng.** 108: 410–416.

Khwalidia, K., H. Alouia, M.B. Slama, M. Hamdi. 2011. Effect of Glycerol and Coating Weight on Functional Properties of Biopolymer-Coated Paper. **Carbohy. Polym.** 86: 1063–1072.

Khwalidia, K., E.A. Tehrany, S. Desobry. 2010. Biopolymer Coatings on Paper Packaging Materials. **Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety.** 9: 82-91.

Kirwan, M.J. 2005. **Paper and Paperboard Packaging Technology.** Blackwell Publishing Ltd. Oxford. United Kingdom.

Kjellgren, H. 2008. **Influence of Paper Properties and Polymer Coatings on Barrier Properties of Greaseproof Paper.** Dissertation. Karlstad University. Sweden.

Kjellgren, H., M. Gallstedt, G. Engstrom and L. Jarnstrom. 2006. Barrier and Surface Properties of Chitosan-Coated Greaseproof Paper. **Carbohy. Polym.** 65: 453–460.

Ko, S.W., M.K. Hong, B.J. Park, R. K. Gupta, H.J. Choi and S.N. Bhattachary. 2009. Morphological and Rheological Characterization of Multi-Walled Carbon Nanotube/PLA/PBAT Blend Nanocomposites. **Polym. Bull.** 63:125–134.

- Lahtinen, K., S. Kotkamo, T. Koskinen, S. Auvinen and J. Kuusipalo. 2009. Characterization for Water Vapour Barrier and Heat Sealability Properties of Heat-treated Paperboard/ Polylactide Structure. **Packag. Technol. Sci.** 22: 451–460.
- Laoonual, Y. 2006. **Optical investigation of evaporating spray**. PhD Thesis, Imperial College London.
- Lee, S., Y. Lee and J. Wook Lee. 2007. Effect of Ultrasound on the Properties of Biodegradable Polymer Blends of Poly(lactic acid) with Poly(butylene adipate-co-terephthalate). **Macromolecular Research**. 15(1): 44-50.
- Levy, G.M. 2000. **Packaging, Policy and the Environment**. Aspen Publishers, Inc., Maryland.
- Liao, C.C., C.C. Wang, K.C. Shih and C.Y. Chen. In Press. Electrospinning Fabrication of Partially Crystalline Bisphenol A Polycarbonate Nanofibers: Effects on Conformation, Crystallinity, and Mechanical Properties. **European Polymer Journal**.
- Lim, L.T., R. Auras and M. Rubino. 2008. Processing technologies for poly(lactic acid). **Progress in Polymer Science**. 33: 820–852.
- Lin, S.Y. and Krochta J.M. 2003. Plasticizer Effect on Grease Barrier and Color Properties of Whey-Protein Coatings on Paperboard. **J. of Food Sci.** 68: 229–233.
- Liu, Y., G. Ma, D. Fang, J. Xu, H. Zhang and J. Nie. 2011. Effects of Solution Properties and Electric Field on The Electrospinning of Hyaluronic Acid. **Carbohydrate Polymers**. 83: 1011–1015.
- Lorenzo, M.L.D. 2004. Crystallization behavior of poly(L-lactic acid). **European Polymer Journal**. 41: 569-575.

Maurer, H.W. 2001. **Starch and Starch Products in Surface Sizing and Paper Coating**. 2nd ed. Tappi Press, Atlanta.

Manangan, T. and S. Shawaphun. 2010. PHB and PLA Coated Bagasse Paper for Biodegradable Food Packaging. **The J. of KMUTNB**. 20(2): 215-223.

Morota, K., H. Matsumoto, T. Mizukoshi, Y. Konosu, M. Minagawa, A. Tanioka, Y. Yamagata and K. Inoue. 2004. Poly(ethylene oxide) Thin Films Produced by Electrospray Deposition: Morphology Control and Additive Effects of Alcohols on Nanostructure. **J. Colloid Interf. Sci.** 279: 484-492.

Nakamura, J., Obata A. and Kasuga T. 2010. Preparation of Siloxane-coating Vaterite/ Poly(lactic acid) Hybrid Beads by Electrospraying and HA-coating on their Surface. **Phosphorus Research Bullentin**. 24: 1-5.

Natureworks LLC. 2010. **Ingeo Biopolymer 2003D For Fresh food Packaging and Food Serviceware**. Product Information. Available Source: http://www.natureworkslc.com/Japan/~media/Technical_Resources/Technical_Data_Sheets/TechnicalDataSheet_2003D_FFP-FSW_pdf. January 16, 2012.

Otles, S. and S.Otles. 2004. Focus on Principal Property of Biobased Packaging Materials for Food Industry. **ACTA Sci. Pol. Technologia Alimentaria**. 3(2): 5-12.

Park, H.J., S.H. Kim and S.T. Lim. 2000. Grease Resistance and Mechanical Properties of Isolated Soy Protein-coated Paper. **J. Am. Oil Chem. Soc.** 77: 269–273.

Pareta, R. and M.J. Edirisinghe. 2006. A Novel Method For The Preparation of Starch Films and Coatings. **Carbohydr. Polym.** 63: 425-431.

- Popil, R.E. and M.K. Joyce. 2008. Strategies for Economical Alternatives for Wax Replacement in Packaging. **Tappi Journal**. 4: 1-8.
- Ranson, B.W. 2004. New Surface Size Option Maintains Performance, Lessens Internal Sizing. **Proquest Agriculture Journals**. 78 (7): 50-54.
- Reis, A.B., C.M.P. Yoshida, A.P.C. Reis and T.T. Franco. 2011. Application of Chitosan Emulsion as a Coating on Kraft Paper. **Polym. Int.** 60: 963–969
- Rhim, J.W. and J.H. Kim. 2009. Properties of Poly(lactide)-Coated Paperboard for the Use of 1-Way Paper Cup. **J. of Food Sci.** 74(2): 105-111.
- Rhim, J.W., J.H. Lee and S. Hong. 2006. Water Resistance and Mechanical Properties of Biopolymer (Alginate and Soy Protein) Coated Paperboards. **LWT**. 39: 806-813.
- Rhim, J.W., J.H. Lee and S.I. Hong. 2007. Increase in Water Resistance of Paperboard by Coating with Poly(lactide). **Packag. Technol. Sci.** 20: 393-402.
- Rietveld, I.B., N. Suganuma, K. Kobayashi, H. Yamada and K. Matsushige. 2008. Electrospray Deposition of Photoresist: A Low Impact Method for the Fabrication of Multilayered Films. **Macromol. Mater. Eng.** 293: 387–399.
- Samyn, P., M. Deconinck, G. Schoukens, D. Stanssens, L. Vonck and H.V. Abbeele. 2010. Modifications of paper and paperboard surfaces with a nanostructured polymer coating. **Prog. Org. Coat.** 69: 442-454.
- Stanssens, D., H.V. Abbeele, L. Vonck, G. Schoukens, M. Deconinck and P. Samyn. 2011. Creating water-repellent and super-hydrophobic cellulose substrates by deposition of organic nanoparticles. **Materials Letters**. 65: 1781–1784.

- Schlaf, 2009. **Electrospray Thin Film Deposition of Macro-Molecular Materials under Ambient Pressure**. Electrospray. Available Source: <http://rsl.eng.usf.edu/Pages/ResearchElectrosprayAmbient.html>. January 8, 2011
- Selli, E., C. Riccardi, M. R. Massafra and B. Marcandalli. 2001. Surface Modification of Silk by Cold SF₆ Plasma. **Macromolecular Chemistry and Physics** 202 (9): 1,672-1,678.
- Signori, F., M.B. Coltelli and S. Bronco. 2009. Thermal Degradation of Poly(lactic acid) (PLA) and Poly(butylene adipate-co-terephthalate) (PBAT) and Their Blends upon Melt Processing. **Polymer Degradation and Stability**. 94: 74–82.
- Sothornvit, R. 2009. Effect of Hydroxypropyl Methylcellulose and Lipid on Mechanical Properties and Water Vapor Permeability of Coated Paper. **Food Res. Int.** 42: 307–311.
- Soroka, W. 2000. **Fundamentals of Packaging Technology**. Institute of Packaging Professionals, Naperville.
- Smith, D.P.H. 1986. The Electrohydrodynamic Atomization of Liquids. **IEEE Trans. Ind. Appl.** IA-22 (3): 527
- Stranger, J., N. Tucker and M. Staiger. 2005. **Electrospinning**. Smithers Rapra Technology, Shrophire. United Kingdom.
- Su, P., C. Wang, X. Yang, X. Chen, C. Gao, X.X. Feng, J.Y. Chen, J. Ye and Z. Gou. 2011. Electrospinning of Chitosan Nanofibers: The Favorable Effect of Metal Ions. **Carbohydr. Polym.** 84: 239–246
- Taylor, G. 1969. Electrically Driven Jets. Proceedings of the Royal Society of London A: **Mathematical, Physical and Engineering Sciences** 291: 145-158.

Technical Association of the Pulp and Paper Industry. 2004. **Ring Crush of Paperboard**. TAPPI T818-om97.

Technical Association of the Pulp and Paper Industry. 2004. **Water absorptiveness of sized (non-bibulous) paper, paperboard, and corrugated fiberboard (Cobb test)**. TAPPI T441 om - 98.

Technical Association of the Pulp and Paper Industry. 2004. **Water vapor transmission rate of paper and paperboard at high temperature and humidity**. TAPPI T464 om-01.

Thawornwiriyanan, S., T. Jinkarn, A. Sane, P. Rachtanapun and D. Boonyawan. 2008. The Improvement of Water Resistance Property of Paperboard by SF6 Plasma. **Journal of Metals, Materials and Minerals**. 18: 153-156.

Thian, E.S., X. Li, J. Huang, M.J. Edirisinghe, W. Bonfield and S.M. Best. 2011. Electrospray Deposition of Nanohydroxyapatite Coatings: A Strategy to Mimic Bone Apatite Mineral. **Thin Solid Films**. 519: 2328-2331.

Trezza, T.A. and P.J. Vergano. 1998. Grease resistance of corn zein coated paper. **J. of Food Sci.** 59: 912-915.

Vaswani, S. 2005. **Surface Modification of Paper and Cellulose using Plasma-enhanced Chemical Vapor Deposition employing Fluorocarbon Precursors**. Georgia Institute of Technology.

Wang, B., L. Shan, G. Weinan, C.Y. Chen and J.L. Ma. 2012. Mechanical Properties and Morphology of Biodegradable Poly(lactic acid)/Poly(butylene adipate-co-terephthalate) Blends Compatibilized by Transesterification. **Materials and Design**. 36: 604-608

- Wang, X.F., H. You, Y. Yang, X. Li , K. Zhang, M.F. Zhu and B.S. Hsiao. 2012. Low Pressure High Flux Thin Film Nanofibrous Composite Membranes Prepared by Electrospinning Technique Combined with Solution Treatment. **Journal of Membrane Science**. 394–395: 241– 247.
- Weber, C.J. 2000. **Biobased Packaging Materials for The Food Industry**. The Royal Veterinary and Agricultural University. Denmark.
- Wongsasulak, S., M. Patapeejumruswong, J. Weiss, P. Supaphol and T. Yoovidhy. 2010. Electrospinning of Food-Grade Nanofibers from Cellulose Acetate and Egg Albumen Blends. **J. of Food Eng.** 98: 370–376
- Zhang, J.W., L. Jiang and B. Liu. 2009. Properties of Poly(lactic acid)/Poly(butylene adipate-co-terephthalate)/Nanoparticle Ternary Composite. **Ind. Eng. Chem. Res.** 48: 7594–7602
- Zhang, J.W., L. Jiang and M.P. Wolcott. 2006. Study of Biodegradable Polylactide/ Poly(butylenes adipate-co-terephthalate) Blends. **Biomacromolecules**. 7: 199-207.
- Zeleny, J. 1914. The Electrical Discharge from Liquid Points and A Hydrostatic Method of Measuring The Electric Intensity at Their Surfaces. **Phys.** 3: 69.



ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาคผนวก ก
วิธีการทดสอบ

การทดสอบน้ำหนักมาตรฐานของกระดาษ

มาตรฐานการทดสอบ คัดแปลงจาก ASTM D646-96

เครื่องมือ

1. เครื่องชั่งละเอียดชนิดทศนิยม 3 ตำแหน่ง
2. ตู้ควบคุมอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์
3. อุปกรณ์สำหรับตัดกระดาษ

วิธีการทดสอบ

1. สุ่มตัวอย่างกระดาษ ตัดให้มีขนาด 4×5 เซนติเมตร จำนวนตัวอย่างละ 10 แผ่น แล้วนำกระดาษไปเก็บไว้ในตู้ควบคุมอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ที่สภาวะอุณหภูมิ 27 ± 1 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 65 ± 2 เป็นเวลาอย่างน้อย 24 ชั่วโมง (ISO 187)
2. ชั่งน้ำหนักตัวอย่างกระดาษครั้งละ 1 แผ่น รายงานค่าน้ำหนักมาตรฐานเฉลี่ยเป็นกรัมต่อตารางเมตร

การคำนวณ

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

การทดสอบความหนาของกระดาษ

มาตรฐานการทดสอบ ดัดแปลงจาก ASTM D645-97

เครื่องมือ

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

วิธีการทดสอบ

1. เตรียมกระดาษขนาด 3×6 เซนติเมตร จำนวนตัวอย่างละ 10 แผ่น เก็บไว้ในตู้ควบคุมอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ที่สภาวะอุณหภูมิ 27 ± 1 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 65 ± 2 เป็นเวลาอย่างน้อย 24 ชั่วโมง (ISO 187)
2. วัดความหนาด้วยไมโครมิเตอร์ แผ่นละ 5 จุด ตามความยาวของกระดาษ โดยให้ห่างจากขอบของกระดาษอย่างน้อย 6 มิลลิเมตร รายงานค่าความหนาเฉลี่ยเป็นมิลลิเมตร

การทดสอบปริมาณความชื้นในกระดาศ

มาตรฐานการทดสอบ ASTM D644-99

เครื่องมือ

1. เครื่องชั่งละเอียด ทศนิยม 4 ตำแหน่ง
2. ตู้อบลมร้อนแบบควบคุมอุณหภูมิ
3. ตู้ควบคุมอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์
4. ภาชนะอลูมิเนียมพร้อมฝาปิด (moisture can)
5. เครื่องเคเตอร์บรรจุมวลความชื้น

วิธีการทดสอบ

1. อบถ้วยอลูมิเนียมพร้อมฝาในตู้อบไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 105 ± 2 องศาเซลเซียส เป็นเวลาหนึ่ง ชั่วโมง จากนั้นนำไปทิ้งไว้ให้เย็นในเครื่องเคเตอร์เป็นเวลา 30 นาที แล้วนำไปชั่งน้ำหนักถ้วยพร้อมฝา
2. สุ่มตัวอย่างกระดาศเพื่อนำไปเก็บในตู้ควบคุมอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ที่สภาวะอุณหภูมิ 27 ± 1 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 65 ± 2 เป็นเวลาอย่างน้อย 24 ชั่วโมง (ISO 187)
3. ตัดกระดาศให้มีขนาดประมาณ 2×2 เซนติเมตร ใส่ในถ้วยอลูมิเนียมที่มีน้ำหนักประมาณ 3 กรัม บันทึกเป็นค่าน้ำหนักกระดาศก่อนอบ นำไปใส่ในตู้อบที่อุณหภูมิ 105 ± 2 องศาเซลเซียส เป็นเวลาหนึ่งชั่วโมง โดยระหว่างการอบให้เปิดฝาด้วยเอาไว้เล็กน้อย
4. เมื่อครบเวลา ปิดฝาด้วยแล้วนำออกมาทิ้งไว้ให้เย็นในเครื่องเคเตอร์เป็นเวลาประมาณ 30 นาที แล้วนำไปชั่งน้ำหนัก จากนั้นนำไปอบอีกครั้งเป็นเวลาหนึ่งชั่วโมง ทำซ้ำจนกระทั่งน้ำหนักที่ชั่งสองครั้งติดต่อกัน มีค่าแตกต่างกันไม่เกิน 0.0010 กรัม บันทึกเป็นค่าน้ำหนักกระดาศหลังอบ
5. ทำการทดสอบอย่างน้อย 5 ซ้ำต่อ 1 ตัวอย่าง รายงานผลเป็นค่าเฉลี่ยของความชื้นที่ได้ในหน่วยร้อยละ

การคำนวณ

$$\text{ปริมาณความชื้น(ร้อยละ)} = \frac{(\text{น้ำหนักกระดาศก่อนอบ}-\text{น้ำหนักกระดาศหลังอบ}) \times 100}{\text{น้ำหนักกระดาศก่อนอบ}}$$



การทดสอบความต้านทานแรงกดวงแหวน

มาตรฐานการทดสอบ ดัดแปลงจาก TAPPI T818-om97

เครื่องมือ

1. ตู้ควบคุมอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์
2. เครื่องทดสอบความต้านทานแรงกดวงแหวน (Testometric 350, England)
3. Specimen Holder
4. อุปกรณ์สำหรับตัดกระดาษ

วิธีการทดสอบ

1. ตัดกระดาษขนาด 12.7×120 มิลลิเมตร ทั้งแนว MD และ CD โดยตัดตัวอย่างให้ขนานกับแนวทดสอบด้วยเครื่องตัดขึ้นทดสอบตัวอย่างละ 10 ชิ้นต่อแนว นำกระดาษไปเก็บไว้ในตู้ควบคุมอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ที่สภาวะอุณหภูมิ 27 ± 1 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 65 ± 2 เป็นเวลาอย่างน้อย 24 ชั่วโมง (ISO 187)
2. นำกระดาษสอดเข้าไปใน specimen holder ที่มีลักษณะเป็นวงกลม
3. กดตัวอย่างด้วยเครื่องทดสอบอัตราเร็ว 12.7 เซนติเมตรต่อนาที จนขอบขึ้นทดสอบเสียรูปจากแรงกด รายงานค่าเฉลี่ยของค่าความต้านทานแรงกดวงแหวนทั้งแนว MD และ CD เป็นค่าแรงกดต่อความยาวของกระดาษที่รับแรงกด (กิโลนิวตันต่อเมตร)

การคำนวณ

ความต้านทานแรงกดวงแหวน (kN/m) = ความต้านทานแรงกดวงแหวนที่ได้ (N) x 0.00656

การทดสอบความต้านทานต่อการพับ

มาตรฐานการทดสอบ ดัดแปลงจาก ASTM D2176-97a

เครื่องมือ

1. ตู้ควบคุมอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์
2. เครื่องทดสอบความต้านทานการพับ (Toyo seiki, Japan)
4. อุปกรณ์สำหรับตัดกระดาษ

วิธีการทดสอบ

1. ตัดกระดาษขนาด 15×120 มิลลิเมตร ทั้งแนว MD และ CD จำนวน 10 ชิ้นตัวอย่างต่อแนว นำกระดาษไปเก็บไว้ในตู้ควบคุมอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ที่สภาวะอุณหภูมิ 27 ± 1 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 65 ± 2 เป็นเวลาอย่างน้อย 24 ชั่วโมง (ISO 187)
2. นำกระดาษสอดเข้าอุปกรณ์จับชิ้นตัวอย่างบนเครื่องทดสอบ
3. พับตัวอย่างด้วยเครื่องทดสอบจนชิ้นตัวอย่างขาดจากกัน โดยการพับไปและพับกลับมา นับเป็น 1 รอบ
3. รายงานค่าเฉลี่ยของค่าความต้านทานต่อการพับทั้งแนว MD และ CD เป็นจำนวนครั้งในการพับที่ตัวอย่างสามารถพับได้

การทดสอบค่าการดูดซึม (น้ำหรือน้ำมัน) (Cobb test)

มาตรฐานการทดสอบ ดัดแปลงจาก TAPPI 441om-98

เครื่องมือ

1. ชุดทดสอบค่า Cobb test (มีพื้นที่ภายในวงแหวน 5 ± 0.01 ตารางเซนติเมตร)
2. ลูกกลิ้งโลหะผิวเรียบ น้ำหนัก 10.0 ± 0.5 กิโลกรัม
3. ตู้ควบคุมอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์
4. กระบอกตวงปริมาตร 10 มิลลิลิตร
5. เครื่องชั่งละเอียดทศนิยม 4 ตำแหน่ง
6. นาฬิกาจับเวลา
7. กระดาษทิชชูอ่อนประเภทยี่ห้อ สก็อต (Scott towel)
8. น้ำกลั่น
9. น้ำมันปาล์ม ยี่ห้อ ทับทิม
10. อุปกรณ์สำหรับตัดกระดาษ

วิธีการทดสอบ

1. ตัดกระดาษตัวอย่างให้มีขนาด 3×3 เซนติเมตร จำนวนตัวอย่างละ 20 ชิ้น นำตัวอย่างไปเก็บในตู้ควบคุมอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ที่สภาวะอุณหภูมิ 27 ± 1 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 65 ± 2 เป็นเวลาอย่างน้อย 24 ชั่วโมง (ISO 187)
2. ชั่งน้ำหนักตัวอย่างก่อนการทดสอบ จากนั้นนำกระดาษวางบนชุดทดสอบค่า Cobb test โดยหันกระดาษด้านที่จะทดสอบขึ้นด้านบน
3. เทน้ำกลั่น (หรือน้ำมัน) ปริมาตร 5 มิลลิลิตร ลงไปในวงแหวนของชุดทดสอบค่า Cobb test แล้วเริ่มจับเวลาทันที ระวังไม่ให้มีหยดน้ำ (หรือน้ำมัน) ออกมานอกวงแหวน
4. เมื่อถึงวินาทีที่ 105 ให้เทน้ำ (หรือน้ำมัน) ออกจากวงแหวนอย่างรวดเร็ว โดยไม่ให้มีน้ำ (หรือน้ำมัน) หยดออกนอกพื้นที่วงแหวน นำกระดาษทดสอบวางลงบนกระดาษทิชชู โดยให้ผิวกระดาษด้านเปียกอยู่ข้างบน จากนั้นรับนำกระดาษทิชชูอีกแผ่นหนึ่งวางบนกระดาษทดสอบ

ใช้ลูกกลิ้งโลหะกลิ้งทับไปบนกระดาษทิชชูไปและกลับ จากนั้นนำกระดาษทดสอบไปชั่งน้ำหนักอีกครั้ง

5. ทำการทดสอบทั้งหมด 20 ซ้ำ แบ่งเป็นกระดาษด้านหน้า 10 ซ้ำ และกระดาษด้านหลัง 10 ซ้ำ

การคำนวณ

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

การทดสอบค่ามุมสัมผัส (น้ำหรือน้ำมัน) (contact angle)

มาตรฐานการทดสอบ คัดแปลงจาก ASTM D5946-04

เครื่องมือ

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

วิธีการทดสอบ

1. ตัดกระดาษตัวอย่างให้มีขนาด 1×5 เซนติเมตร นำตัวอย่างไปเก็บในตู้ควบคุมอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ที่สภาวะอุณหภูมิ 27 ± 1 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 65 ± 2 เป็นเวลาอย่างน้อย 24 ชั่วโมง (ISO 187)
2. วางตัวอย่างกระดาษบนแท่นใส่ตัวอย่าง
3. หยดน้ำกลั่น (หรือน้ำมัน) ปริมาตร 5 ไมโครลิตร ลงบนกระดาษ และเริ่มจับเวลา
5. ถ่ายภาพหยดน้ำ (หรือน้ำมัน) บนผิวตัวอย่างกระดาษทันทีทั้งหมด 10 ซ้ำ
6. หากต้องการค่ามุมสัมผัสแบบต่อเนื่อง ให้ถ่ายภาพหยดน้ำ (หรือน้ำมัน) ทุกๆ หนึ่งนาทิจนครบ 15 นาที แรก ต่อจากนั้นถ่ายภาพเฉพาะนาที่ที่ 20 25 และ 30 นาที ทดสอบทั้งหมด 10 ซ้ำ
7. โปรแกรมจะทำการวัดมุมสัมผัสมีหน่วยเป็นองศา บันทึกภาพถ่ายลงในคอมพิวเตอร์
8. นำค่ามุมสัมผัสทั้งมุมซ้ายและขวาของหยดน้ำ (หรือน้ำมัน) ทั้ง 10 ซ้ำ มาเฉลี่ยกัน

การทดสอบเวลาในการดูดซึม (น้ำหรือน้ำมัน) (absorption time)

มาตรฐานการทดสอบ อ้างอิงจาก สตรีรัตน์ (2550) และ Selli *et al.* (2001)

เครื่องมือ

1. ตู้ควบคุมอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์
2. ไมโครปิเปต ขนาด 100 ไมโครลิตร
3. นาฬิกาจับเวลา
4. น้ำกลั่น
5. น้ำมันปาล์ม ยี่ห้อ ทับทิม
6. อุปกรณ์สำหรับตัดกระดาษ

วิธีการทดสอบ

1. ตัดกระดาษตัวอย่างให้มีขนาด 5×5 เซนติเมตร นำตัวอย่างไปเก็บไว้ในตู้ควบคุมอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ที่สภาวะอุณหภูมิ 27 ± 1 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 65 ± 2 เป็นเวลาอย่างน้อย 24 ชั่วโมง (ISO 187)
2. หยดน้ำกลั่น (หรือน้ำมัน) ปริมาตร 40 ไมโครลิตร ลงบนตัวอย่างกระดาษด้วยไมโครปิเปต โดยให้ไมโครปิเปตอยู่ในแนวตั้งฉากกับพื้น และเริ่มจับเวลา
3. บันทึกเวลาที่หยดน้ำ (หรือน้ำมัน) หายไปจากผิวกระดาษ โดยที่เวลาที่ตัวอย่างกระดาษใช้ในการดูดซับน้ำ (หรือน้ำมัน) หนึ่งหยด (absorption time) จะถูกกำหนดไว้สูงสุดที่ 200 นาที เนื่องจากที่ระยะเวลานานกว่านี้จะพิจารณาว่าปริมาตรของหยดน้ำ (หรือน้ำมัน) หายไปเนื่องจากเกิดการระเหย
4. ทดสอบทั้งหมด 10 ซ้ำ

การทดสอบอัตราการซึมผ่านของไอน้ำ (water vapor transmission rate, WVTR)

มาตรฐานการทดสอบ คัดแปลงจาก TAPPI T464 om-01

เครื่องมือ

1. ตู้ควบคุมอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์
2. เครื่องทดสอบอัตราการซึมผ่านของไอน้ำ (Mocon Permatran-W, USA)
3. น้ำกลั่น
4. สติกเกอร์สีเงิน
4. อุปกรณ์สำหรับตัดกระดาษ

วิธีการทดสอบ

1. ตัดกระดาษตัวอย่างให้มีขนาด 3 x 3 เซนติเมตร จำนวนตัวอย่างละ 5 ชิ้นนำตัวอย่างไปเก็บในตู้ควบคุมอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ที่สภาวะอุณหภูมิ 27 ± 1 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 65 ± 2 เป็นเวลาอย่างน้อย 24 ชั่วโมง (ISO 187)
2. ตัดสติกเกอร์สีเงินเป็นรูปหกเหลี่ยมแล้วเจาะตรงกลางด้วยตัวเจาะให้มีขนาด 5 ตารางเซนติเมตร
3. นำตัวอย่างกระดาษมาใส่ในสติกเกอร์ให้พอดีกับรูเจาะและทดสอบด้วยเครื่องวัดอัตราการซึมผ่านของไอน้ำ
4. ทดสอบตัวอย่างละ 5 ชิ้น

การทดสอบอัตราการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจน (oxygen transmission rate, OTR)

มาตรฐานการทดสอบ คัดแปลงจาก ASTM D3985

เครื่องมือ

1. ตู้ควบคุมอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์
2. เครื่องวัดอัตราการซึมผ่านของแก๊สออกซิเจน (Illinois 8500, USA.)
3. สติกเกอร์สีเงิน
4. อุปกรณ์สำหรับตัดกระดาษ

วิธีการทดสอบ

1. ตัดแผ่นสติกเกอร์ให้มีขนาดเท่ากับ template และเจาะรูตรงกลางแผ่นเป็นวงกลมเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 เซนติเมตร สำหรับนำมาติดกับกระดาษตัวอย่าง โดยแผ่นอลูมิเนียมจะต้องปราศจากรอยย่น รอยพับ หรือหักงอ
2. ตัดกระดาษตัวอย่างให้มีพื้นที่ 0.28 ตร.ม. ในการซึมผ่านของก๊าซ (เส้นผ่านศูนย์กลาง 6 เซนติเมตร) นำตัวอย่างไปเก็บในตู้ควบคุมอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ที่สภาวะอุณหภูมิ 27 ± 1 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 65 ± 2 เป็นเวลาอย่างน้อย 24 ชั่วโมง (ISO 187)
3. ทา sealant บางๆ บริเวณขอบวงกลมของแผ่นสติกเกอร์ วางกระดาษตัวอย่างให้พอดีวงกลมนั้น
4. นำตัวอย่างไปทดสอบด้วยเครื่องวัดอัตราการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจน
5. ทดสอบตัวอย่างละ 5 ซ้ำ

การคำนวณ

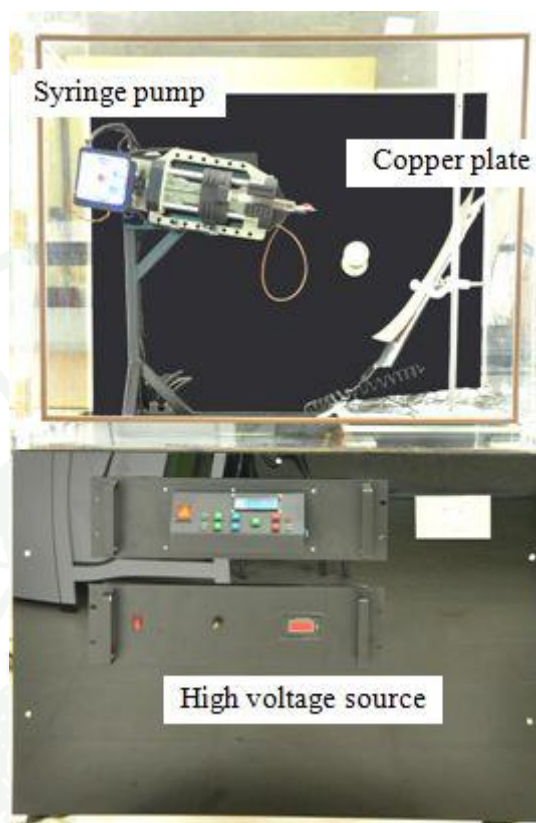
$$\text{อัตราการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจน (ซีซี/ตร.ม./วัน)} = \frac{\text{ผลจากเครื่องทดสอบ} \times 100}{\text{พื้นที่กระดาษ (ตร.ม.)}}$$



ระบบการทำงานของเครื่องอิเล็กทรอนิกส์ทรสเปรย์

งานวิจัยนี้ใช้เครื่องอิเล็กทรอนิกส์ทรสเปรย์หรือเครื่องปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตที่ประดิษฐ์ขึ้นโดย รองศาสตราจารย์ ดร.สันติ แม้นศิริ (ภาพผนวกที่ ข1) โดยนำมาประยุกต์ใช้กับการเคลือบกระดาษ ด้วยสภาวะอิเล็กทรอนิกส์ โดยวิธีการให้ศักย์ไฟฟ้ากำลังสูงกระแสตรงแก่สารละลายที่ปลายเข็ม หลอดฉีดยา ในขณะที่ตัวปั๊มสารละลายออกมา ค่าศักย์ไฟฟ้าจะเอาชนะแรงดึงดูดของสารละลาย จนทำให้เกิดเป็นละอองขนาดเล็ก ขณะที่ละอองเคลื่อนที่ไปด้วยความต่างศักย์ของไฟฟ้าตัวทำละลาย จะระเหยออกไปด้วย และเปลี่ยนละอองให้เป็นอนุภาคที่ตกลงบนผิวหน้าของกระดาษพอดี โดยเครื่องอิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้งานวิจัยนี้มีอุปกรณ์ทำงานหลัก ดังต่อไปนี้

1. ตู้มีขนาด 60 x 60 x 60 เซนติเมตร โดยทำตู้จากพลาสติกอะคริลิกใส มีประตูเปิด-ปิด เพื่อใช้ในการนำตัวอย่างออกจากวัสดุรองรับพร้อม โครงเหล็กรองรับตู้และชุดควบคุมการทำงาน ทั้งหมด
2. ส่วนฉีดสารละลายที่ต่อเข้ากับเครื่องควบคุมอัตราเร็วในการปั่นสารละลายได้ 0.01-9.99 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง เพื่อควบคุมอัตราเร็วในการฉีดอนุภาคและสามารถหมุนได้ 90 องศา พร้อมจอLCD แสดงสถานะของการทำงาน
3. เครื่องกำเนิดไฟฟ้าศักย์สูงกระแสตรง สามารถปรับค่าศักย์ไฟฟ้าได้ 0 - 25 กิโลโวลต์ พร้อมส่วนแสดงผล
4. อุปกรณ์รองรับอนุภาค เป็นแผ่นทองแดงขนาด 30 x 30 เซนติเมตร พร้อมขาตั้งสามารถ หมุนแผ่นรองรับได้ 180 องศา และเลื่อนตำแหน่งที่ตั้งได้
5. โคมไฟส่องสว่าง เพื่อง่ายต่อการสังเกตการณ์ในระหว่างการผลิตอนุภาค
6. พัดลมดูดควัน เพื่อดูดไอหรือควันพิษที่เกิดจากการระเหยของตัวทำละลายที่มีพิษออกจากตู้ เพื่อความปลอดภัยต่อระบบทางเดินหายใจและผิวหนังของผู้ทำวิจัย



ภาพผนวกที่ ข1 เครื่องอิเล็กโตรสเปรย์

ขั้นตอนการใช้งานเครื่องอิเล็กโตรสเปรย์

1. เสียบปลั๊ก
2. เปิดเบรกเกอร์
3. กดสวิทช์เปิดหน้าจอ
4. กดปุ่มสีเขียวล่างหมุนเครื่องป้อนสารละลายให้หมุนลงไปอยู่ในแนวตั้ง
5. กดปุ่มสีแดงบนเพื่อเลื่อนตัวปั๊มสารละลายขึ้น
6. เปิดตู้
7. ใส่หลอดฉีดสารละลายลงบนตำแหน่งตัวจับหลอดฉีดสารละลาย
8. กดปุ่มสีแดงล่างเพื่อเลื่อนตัวปั๊มให้สัมผัสกับก้านหลอดฉีดสารละลาย
9. กดปุ่มเขียวบนเพื่อหมุนเครื่องป้อนสารละลายขึ้นให้อยู่ในตำแหน่งแนวนอน

10. นำสายไฟสีแดงหนีบที่ปลายเข็มหลอดฉีดสารละลาย
11. หุ้มฟลอยด์บนแผ่นรองรับอนุภาค (ทองแดง)
12. นำกระดาศไปวางด้านบนและนำสายไฟสีแดงหนีบที่แผ่นรองรับอนุภาค
13. ปิดตู้
14. หมุนปุ่มสวิตช์ไปทางด้านขวาเพื่อเปิดโคมไฟใช้สังเกตการณ์
15. เปิดสวิตช์พัลลมดุดควัน เพื่อดูดูไอระเหยของตัวทำละลายที่มีพิษออกจากตู้
16. กดปุ่มสวิตช์ไฟบนเพื่อเพิ่ม-ปุ่มล่างเพื่อลดอัตราการความเร็วในการฉีดพ่นของสารตั้งต้น
17. กดปุ่มเขียวอันเดียวที่อยู่ตรงกลางเพื่อเริ่มทำงาน
18. กดสวิตช์เปิดเครื่องกำเนิดไฟฟ้า
19. หมุนปุ่มหมุนสวิตช์ด้านล่างเพื่อปรับค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า

ขั้นตอนการเก็บตัวอย่าง

1. กดปุ่มเขียวเดียวเพื่อหยุดการทำงาน
2. กดสวิตช์ปิดเครื่องกำเนิดไฟฟ้า
3. เปิดตู้
4. นำตัวหนีบสายไฟสีแดงออก
5. นำแผ่นฟรอยด์พร้อมตัวอย่างออก
6. ใช้คีมคีบ (Forceps) หนีบแผ่นตัวอย่างออก
7. กดปุ่มสีเขียวล่างหมุนเครื่องป้อนสารตั้งต้นให้หมุนลงไปในแนวตั้ง
8. กดปุ่มสีแดงบนเพื่อเลื่อนตัวปั๊มสารตั้งต้นขึ้น
9. นำหลอดฉีดสารละลายออก
10. ปิดตู้



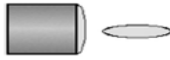
ภาคผนวก ค

ลักษณะการกระจายตัวของสารละลายพอลิแลคติกแอซิดภายใต้สภาวะออสโมติกโพรสเปรย์

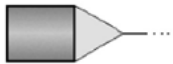
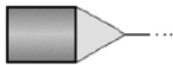
ตารางผนวกที่ ค1 ลักษณะการกระจายตัวของสารละลายพอลิแลคติกแอซิดภายใต้สภาวะอิเล็กโทรสเปรย์

ความเข้มข้นของสารละลาย พอลิแลคติกแอซิด (ร้อยละโดยน้ำหนักต่อ ปริมาตร)	ค่าศักย์ ไฟฟ้าแรงสูง กระแสตรง (กิโลโวลต์)	อัตราไหลของ สารละลาย (มิลลิลิตรต่อ ชั่วโมง)	ระยะห่างระหว่าง ปลายเข็มถึงกระดาด (เซนติเมตร)	ลักษณะของสารละลาย ที่ปลายเข็ม	ลักษณะของสารละลายที่กระดาด
0.5	6	3	10		ฝิวน้ำกระดาดเปียก
			20		สารละลายไม่ถึงกระดาด
		4	10		ฝิวน้ำกระดาดเปียก
			20		สารละลายไม่ถึงกระดาด
	5	5	10		ฝิวน้ำกระดาดเปียก
			20		สารละลายไม่ถึงกระดาด

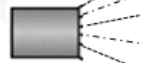
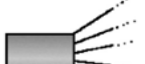
ตารางผนวกที่ 1 (ต่อ)

ความเข้มข้นของสารละลาย พอลิแลคติกแอซิด (ร้อยละโดยน้ำหนักต่อ ปริมาตร)	ค่าศักย์ ไฟฟ้าแรงสูง กระแสตรง (กิโลโวลต์)	อัตราไหลของ สารละลาย (มิลลิลิตรต่อ ชั่วโมง)	ระยะห่างระหว่าง ปลายเข็มถึงกระดาด (เซนติเมตร)	ลักษณะของสารละลาย ที่ปลายเข็ม	ลักษณะของสารละลายที่กระดาด
	7	3	10		ผิวหน้ากระดาดเปียก
			20		สารละลายไม่ถึงกระดาด
	4	4	10		ผิวหน้ากระดาดเปียก
			20		สารละลายไม่ถึงกระดาด
		5	10		ผิวหน้ากระดาดเปียก
			20		สารละลายไม่ถึงกระดาด

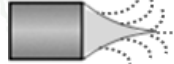
ตารางผนวกที่ ค1 (ต่อ)

ความเข้มข้นของสารละลาย พอลิแลคติกแอซิด (ร้อยละโดยน้ำหนักต่อ ปริมาตร)	ค่าศักย์ ไฟฟ้าแรงสูง กระแสตรง (กิโลโวลต์)	อัตราไหลของ สารละลาย (มิลลิลิตรต่อ ชั่วโมง)	ระยะห่างระหว่าง ปลายเข็มถึงกระดาด (เซนติเมตร)	ลักษณะของสารละลาย ที่ปลายเข็ม	ลักษณะของสารละลายที่กระดาด
	8	3	10		ผิวหน้ากระดาดเปียกตำแหน่งเดียว
			20		อนุภาคนกตกลงบนกระดาดที่ตำแหน่งเดียว
	4	4	10		ผิวหน้ากระดาดเปียกกระจายเป็นวงกลมรัศมี 3 เซนติเมตร
			20		อนุภาคนกตกลงบนกระดาดกระจายเป็นวงกลมรัศมี 6 เซนติเมตร
	5	5	10		ผิวหน้ากระดาดเปียกตำแหน่งเดียว
			20		ผิวหน้ากระดาดเปียกตำแหน่งเดียว

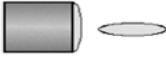
ตารางผนวกที่ ๑1 (ต่อ)

ความเข้มข้นของสารละลาย พอลิแลคติกแอซิด (ร้อยละโดยน้ำหนักต่อ ปริมาตร)	ค่าศักย์ ไฟฟ้าแรงสูง กระแสตรง (กิโลโวลต์)	อัตราไหลของ สารละลาย (มิลลิลิตรต่อ ชั่วโมง)	ระยะห่างระหว่าง ปลายเข็มถึงกระดาด (เซนติเมตร)	ลักษณะของสารละลาย ที่ปลายเข็ม	ลักษณะของสารละลายที่กระดาด
	9	3	10		ผิวหน้ากระดาดเปียกกระจายไม่ สม่ำเสมอ
			20		อนุภาคตกลงบนกระดาดกระจาย ตัวอย่างไม่สม่ำเสมอ
		4	10		ผิวหน้ากระดาดเปียกกระจายไม่ สม่ำเสมอ
			20		อนุภาคตกลงบนกระดาดกระจาย ตัวอย่างไม่สม่ำเสมอ

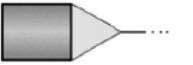
ตารางผนวกที่ ๑1 (ต่อ)

ความเข้มข้นของสารละลาย พอลิแลคติกแอซิด (ร้อยละโดยน้ำหนักต่อ ปริมาตร)	ค่าศักย์ ไฟฟ้าแรงสูง กระแสตรง (กิโลโวลต์)	อัตราไหลของ สารละลาย (มิลลิลิตรต่อ ชั่วโมง)	ระยะห่างระหว่าง ปลายเข็มถึงกระดาด (เซนติเมตร)	ลักษณะของสารละลาย ที่ปลายเข็ม	ลักษณะของสารละลายที่กระดาด
1	6	3	5		ผิวหนังกระดาดเปียกกระจายไม่ สม่ำเสมอ
			10		ผิวหนังกระดาดเปียกกระจายไม่ สม่ำเสมอ
		4	10		ผิวหนังกระดาดเปียก
			20		สารละลายไม่ถึงกระดาด
1	6	3	10		ผิวหนังกระดาดเปียก
			20		สารละลายไม่ถึงกระดาด

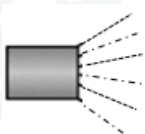
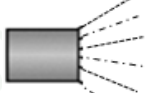
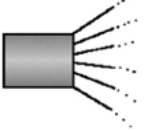
ตารางผนวกที่ 11 (ต่อ)

ความเข้มข้นของสารละลาย พอลิแลคติกแอซิด (ร้อยละโดยน้ำหนักต่อ ปริมาตร)	ค่าศักย์ ไฟฟ้าแรงสูง กระแสตรง (กิโลโวลต์)	อัตราไหลของ สารละลาย (มิลลิลิตรต่อ ชั่วโมง)	ระยะห่างระหว่าง ปลายเข็มถึงกระดาด (เซนติเมตร)	ลักษณะของสารละลาย ที่ปลายเข็ม	ลักษณะของสารละลายที่กระดาด
	7	5	10		ผิวหน้ากระดาดเปียก
			20		สารละลายไม่ถึงกระดาด
		3	10		ผิวหน้ากระดาดเปียก
			20		สารละลายไม่ถึงกระดาด
		4	10		ผิวหน้ากระดาดเปียก
			20		สารละลายไม่ถึงกระดาด

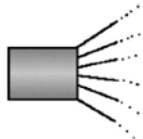
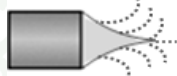
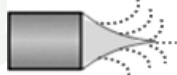
ตารางผนวกที่ 11 (ต่อ)

ความเข้มข้นของสารละลาย พอลิแลคติกแอซิด (ร้อยละโดยน้ำหนักต่อ ปริมาตร)	ค่าศักย์ ไฟฟ้าแรงสูง กระแสตรง (กิโลโวลต์)	อัตราไหลของ สารละลาย (มิลลิลิตรต่อ ชั่วโมง)	ระยะห่างระหว่าง ปลายเข็มถึงกระดาด (เซนติเมตร)	ลักษณะของสารละลาย ที่ปลายเข็ม	ลักษณะของสารละลายที่กระดาด
8	5	10	10		ผิวหน้ากระดาดเปียก
			20		สารละลายไม่ถึงกระดาด
	3	10	10		ผิวหน้ากระดาดเปียกตำแหน่งเดียว
			20		อนุภาคนตกลงบนกระดาดที่ตำแหน่งเดียว
	4	10	10		ผิวหน้ากระดาดเปียกกระจายเป็นวงกลมรัศมี 3 เซนติเมตร
			20		อนุภาคนตกลงบนกระดาดกระจายเป็นวงกลมรัศมี 6 เซนติเมตร

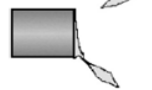
ตารางผนวกที่ 1 (ต่อ)

ความเข้มข้นของสารละลาย พอลิแลคติกแอซิด (ร้อยละโดยน้ำหนักต่อ ปริมาตร)	ค่าศักย์ ไฟฟ้าแรงสูง กระแสตรง (กิโลโวลต์)	อัตราไหลของ สารละลาย (มิลลิลิตรต่อ ชั่วโมง)	ระยะห่างระหว่าง ปลายเข็มถึงกระดาด (เซนติเมตร)	ลักษณะของสารละลาย ที่ปลายเข็ม	ลักษณะของสารละลายที่กระดาด
	9	5	10		ผิวหน้ากระดาดเปียกตำแหน่งเดียว
			20		ผิวหน้ากระดาดเปียกตำแหน่งเดียว
		3	10		ผิวหน้ากระดาดเปียกกระจายไม่ สม่ำเสมอ
			20		อนุภาคตกลงบนกระดาดกระจาย ตัวอย่างไม่สม่ำเสมอ
		4	10		ผิวหน้ากระดาดเปียกกระจายไม่ สม่ำเสมอ

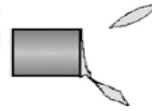
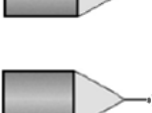
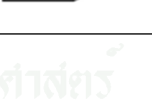
ตารางผนวกที่ 11 (ต่อ)

ความเข้มข้นของสารละลาย พอลิแลคติกแอซิด (ร้อยละโดยน้ำหนักต่อ ปริมาตร)	ค่าศักย์ ไฟฟ้าแรงสูง กระแสตรง (กิโลโวลต์)	อัตราไหลของ สารละลาย (มิลลิลิตรต่อ ชั่วโมง)	ระยะห่างระหว่าง ปลายเข็มถึงกระดาด (เซนติเมตร)	ลักษณะของสารละลาย ที่ปลายเข็ม	ลักษณะของสารละลายที่กระดาด
2	6	3	20		อนุภาคตกลงบนกระดาดกระจาย ตัวอย่างไม่สม่ำเสมอ
			10		ผิวหน้ากระดาดเปียกกระจายไม่ สม่ำเสมอ
			20		ผิวหน้ากระดาดเปียกกระจายไม่ สม่ำเสมอ
		4	10		ผิวหน้ากระดาดเปียก
			20		สารละลายไม่ถึงกระดาด
			10		ผิวหน้ากระดาดเปียก

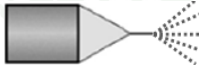
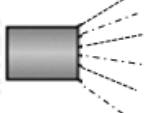
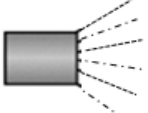
ตารางผนวกที่ 1 (ต่อ)

ความเข้มข้นของสารละลาย พอลิแลคติกแอซิด (ร้อยละโดยน้ำหนักต่อ ปริมาตร)	ค่าศักย์ ไฟฟ้าแรงสูง กระแสตรง (กิโลโวลต์)	อัตราไหลของ สารละลาย (มิลลิลิตรต่อ ชั่วโมง)	ระยะห่างระหว่าง ปลายเข็มถึงกระดวย (เซนติเมตร)	ลักษณะของสารละลาย ที่ปลายเข็ม	ลักษณะของสารละลายที่กระดวย
	7	5	20		สารละลายไม่ถึงกระดวย
			10		ผิวหนังกระดวยเป็ยก
			20		สารละลายไม่ถึงกระดวย
		3	10		ผิวหนังกระดวยเป็ยก
			20		สารละลายไม่ถึงกระดวย
			10		ผิวหนังกระดวยเป็ยก

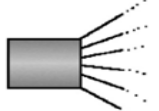
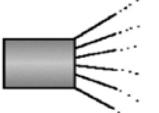
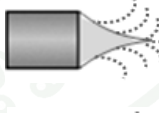
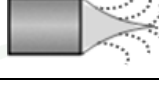
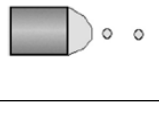
ตารางผนวกที่ 11 (ต่อ)

ความเข้มข้นของสารละลาย พอลิแลคติกแอซิด (ร้อยละโดยน้ำหนักต่อ ปริมาตร)	ค่าศักย์ ไฟฟ้าแรงสูง กระแสตรง (กิโลโวลต์)	อัตราไหลของ สารละลาย (มิลลิลิตรต่อ ชั่วโมง)	ระยะห่างระหว่าง ปลายเข็มถึงกระดาด (เซนติเมตร)	ลักษณะของสารละลาย ที่ปลายเข็ม	ลักษณะของสารละลายที่กระดาด
8	3	5	20		สารละลายไม่ถึงกระดาด
			10		ผิวหน้ากระดาดเปียก
			20		สารละลายไม่ถึงกระดาด
		4	10		ผิวหน้ากระดาดเปียกตำแหน่งเดียว
			20		อนุภาคนตกลงบนกระดาดที่ตำแหน่ง เดียว
			10		ผิวหน้ากระดาดเปียกกระจายเป็น วงกลมรัศมี 3 เซนติเมตร

ตารางผนวกที่ 11 (ต่อ)

ความเข้มข้นของสารละลาย พอลิแลคติกแอซิด (ร้อยละโดยน้ำหนักต่อ ปริมาตร)	ค่าศักย์ ไฟฟ้าแรงสูง กระแสตรง (กิโลโวลต์)	อัตราไหลของ สารละลาย (มิลลิลิตรต่อ ชั่วโมง)	ระยะห่างระหว่าง ปลายเข็มถึงกระดาด (เซนติเมตร)	ลักษณะของสารละลาย ที่ปลายเข็ม	ลักษณะของสารละลายที่กระดาด
9	3	5	20		อนุภาคนกกลบนกระดาดกระจายเป็น วงกลมรัศมี 6 เซนติเมตร
			10		ผิวหนังกระดาดเปียกตำแหน่งเดียว
			20		ผิวหนังกระดาดเปียกตำแหน่งเดียว
			10		ผิวหนังกระดาดเปียกกระจายไม่ สม่ำเสมอ
			20		อนุภาคนกกลบนกระดาดกระจาย ตัวอย่างไม่สม่ำเสมอ

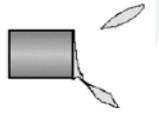
ตารางผนวกที่ 11 (ต่อ)

ความเข้มข้นของสารละลาย พอลิแลคติกแอซิด (ร้อยละโดยน้ำหนักต่อ ปริมาตร)	ค่าศักย์ ไฟฟ้าแรงสูง กระแสตรง (กิโลโวลต์)	อัตราไหลของ สารละลาย (มิลลิลิตรต่อ ชั่วโมง)	ระยะห่างระหว่าง ปลายเข็มถึงกระดาด (เซนติเมตร)	ลักษณะของสารละลาย ที่ปลายเข็ม	ลักษณะของสารละลายที่กระดาด
		4	10		ฝิวน้ำกระดาดเปียกกระจายไม่ สม่ำเสมอ
			20		อนุภาคนกตกลงบนกระดาดกระจาย ตัวอย่างไม่สม่ำเสมอ
		5	10		ฝิวน้ำกระดาดเปียกกระจายไม่ สม่ำเสมอ
			20		ฝิวน้ำกระดาดเปียกกระจายไม่ สม่ำเสมอ
3	7	3	10		ฝิวน้ำกระดาดเปียก

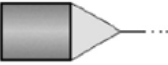
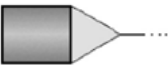
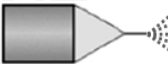
ตารางผนวกที่ 11 (ต่อ)

ความเข้มข้นของสารละลาย พอลิแลคติกแอซิด (ร้อยละโดยน้ำหนักต่อ ปริมาตร)	ค่าศักย์ ไฟฟ้าแรงสูง กระแสตรง (กิโลโวลต์)	อัตราไหลของ สารละลาย (มิลลิลิตรต่อ ชั่วโมง)	ระยะห่างระหว่าง ปลายเข็มถึงกระดาด (เซนติเมตร)	ลักษณะของสารละลาย ที่ปลายเข็ม	ลักษณะของสารละลายที่กระดาด
	4	20	20		สารละลายไม่ถึงกระดาด
			10		ผิวหน้ากระดาดเปียก
		20	20		สารละลายไม่ถึงกระดาด
	5	10	10		ผิวหน้ากระดาดเปียก
			20		สารละลายไม่ถึงกระดาด
		10	10		ผิวหน้ากระดาดเปียก

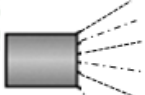
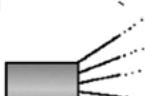
ตารางผนวกที่ 11 (ต่อ)

ความเข้มข้นของสารละลาย พอลิแอสคติกแอซิด (ร้อยละโดยน้ำหนักต่อ ปริมาตร)	ค่าศักย์ ไฟฟ้าแรงสูง กระแสตรง (กิโลโวลต์)	อัตราไหลของ สารละลาย (มิลลิลิตรต่อ ชั่วโมง)	ระยะห่างระหว่าง ปลายเข็มถึงกระดาด (เซนติเมตร)	ลักษณะของสารละลาย ที่ปลายเข็ม	ลักษณะของสารละลายที่กระดาด
		4	20		สารละลายไม่ถึงกระดาด
			10		ผิวหน้ากระดาดเปียก
			20		สารละลายไม่ถึงกระดาด
		5	10		ผิวหน้ากระดาดเปียก
			20		สารละลายไม่ถึงกระดาด

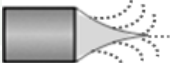
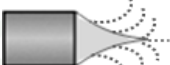
ตารางผนวกที่ 1 (ต่อ)

ความเข้มข้นของสารละลาย พอลิแลคติกแอซิด (ร้อยละโดยน้ำหนักต่อ ปริมาตร)	ค่าศักย์ ไฟฟ้าแรงสูง กระแสตรง (กิโลโวลต์)	อัตราไหลของ สารละลาย (มิลลิลิตรต่อ ชั่วโมง)	ระยะห่างระหว่าง ปลายเข็มถึงกระดวย (เซนติเมตร)	ลักษณะของสารละลาย ที่ปลายเข็ม	ลักษณะของสารละลายที่กระดวย
	9	3	10		ผิวหนังกระดวยเปียกตำแหน่งเดียว
			20		อนุภาคนกตกลงบนกระดวยที่ตำแหน่งเดียว
	4		10		ผิวหนังกระดวยเปียกกระจายเป็นวงกลมรัศมี 3 เซนติเมตร
			20		อนุภาคนกตกลงบนกระดวยกระจายเป็นวงกลมรัศมี 6 เซนติเมตร
	5		10		ผิวหนังกระดวยเปียกตำแหน่งเดียว
			20		ผิวหนังกระดวยเปียกตำแหน่งเดียว

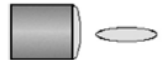
ตารางผนวกที่ 1 (ต่อ)

ความเข้มข้นของสารละลาย พอลิแลคติกแอซิด (ร้อยละโดยน้ำหนักต่อ ปริมาตร)	ค่าศักย์ ไฟฟ้าแรงสูง กระแสตรง (กิโลโวลต์)	อัตราไหลของ สารละลาย (มิลลิลิตรต่อ ชั่วโมง)	ระยะห่างระหว่าง ปลายเข็มถึงกระดาด (เซนติเมตร)	ลักษณะของสารละลาย ที่ปลายเข็ม	ลักษณะของสารละลายที่กระดาด
	10	3	10		ผิวหน้ากระดาดเปียกกระจายไม่ สม่ำเสมอ
			20		อนุภาคนกกลงบนกระดาดกระจาย ตัวอย่างไม่สม่ำเสมอ
		4	10		ผิวหน้ากระดาดเปียกกระจายไม่ สม่ำเสมอ
			20		อนุภาคนกกลงบนกระดาดกระจาย ตัวอย่างไม่สม่ำเสมอ

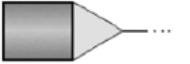
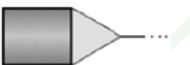
ตารางผนวกที่ 1 (ต่อ)

ความเข้มข้นของสารละลาย พอลิแลคติกแอซิด (ร้อยละโดยน้ำหนักต่อ ปริมาตร)	ค่าศักย์ ไฟฟ้าแรงสูง กระแสดตรง (กิโลโวลต์)	อัตราไหลของ สารละลาย (มิลลิลิตรต่อ ชั่วโมง)	ระยะห่างระหว่าง ปลายเข็มถึงกระดาด (เซนติเมตร)	ลักษณะของสารละลาย ที่ปลายเข็ม	ลักษณะของสารละลายที่กระดาด
4	7	5	10		ผิวหนังกระดาดเปียกกระจายไม่ สม่ำเสมอ
			20		ผิวหนังกระดาดเปียกกระจายไม่ สม่ำเสมอ
		3	10		ผิวหนังกระดาดเปียก
			20		สารละลายไม่ถึงกระดาด
4	7	4	10		ผิวหนังกระดาดเปียก
			20		สารละลายไม่ถึงกระดาด

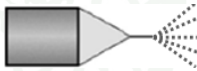
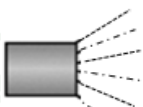
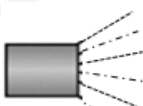
ตารางผนวกที่ 1 (ต่อ)

ความเข้มข้นของสารละลาย พอลิแลคติกแอซิด (ร้อยละโดยน้ำหนักต่อ ปริมาตร)	ค่าศักย์ ไฟฟ้าแรงสูง กระแสตรง (กิโลโวลต์)	อัตราไหลของ สารละลาย (มิลลิลิตรต่อ ชั่วโมง)	ระยะห่างระหว่าง ปลายเข็มถึงกระดูก (เซนติเมตร)	ลักษณะของสารละลาย ที่ปลายเข็ม	ลักษณะของสารละลายที่กระดูก
8	5	10	10		ผิวหนังกระดูกเปื่อย
			20		สารละลายไม่ถึงกระดูก
		10	10		ผิวหนังกระดูกเปื่อย
			20		สารละลายไม่ถึงกระดูก
		4	10		ผิวหนังกระดูกเปื่อย
			20		สารละลายไม่ถึงกระดูก

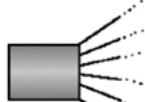
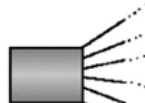
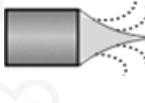
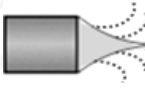
ตารางผนวกที่ 11 (ต่อ)

ความเข้มข้นของสารละลาย พอลิแลคติกแอซิด (ร้อยละโดยน้ำหนักต่อ ปริมาตร)	ค่าศักย์ ไฟฟ้าแรงสูง กระแสตรง (กิโลโวลต์)	อัตราไหลของ สารละลาย (มิลลิลิตรต่อ ชั่วโมง)	ระยะห่างระหว่าง ปลายเข็มถึงกระดาด (เซนติเมตร)	ลักษณะของสารละลาย ที่ปลายเข็ม	ลักษณะของสารละลายที่กระดาด
9		5	10		ผิวหน้ากระดาดเปียก
			20		สารละลายไม่ถึงกระดาด
		3	10		ผิวหน้ากระดาดเปียกตำแหน่งเดียว
			20		อนุภาคตกลงบนกระดาดที่ตำแหน่งเดียว
		4	10		ผิวหน้ากระดาดเปียกกระจายเป็นวงกลมรัศมี 3 เซนติเมตร

ตารางผนวกที่ 1 (ต่อ)

ความเข้มข้นของสารละลาย พอลิแลคติกแอซิด (ร้อยละโดยน้ำหนักต่อ ปริมาตร)	ค่าศักย์ ไฟฟ้าแรงสูง กระแสตรง (กิโลโวลต์)	อัตราไหลของ สารละลาย (มิลลิลิตรต่อ ชั่วโมง)	ระยะห่างระหว่าง ปลายเข็มถึงกระดวย (เซนติเมตร)	ลักษณะของสารละลาย ที่ปลายเข็ม	ลักษณะของสารละลายที่กระดวย
	10	5	20		อนุภาคตกลงบนกระดวยกระจายเป็น วงกลมรัศมี 6 เซนติเมตร
			10		ผิวหนังกระดวยเปียกตำแหน่งเดียว
			20		ผิวหนังกระดวยเปียกตำแหน่งเดียว
		3	10		ผิวหนังกระดวยเปียกกระจายไม่ สม่ำเสมอ
			20		อนุภาคตกลงบนกระดวยกระจาย ตัวอย่างไม่สม่ำเสมอ

ตารางผนวกที่ 11 (ต่อ)

ความเข้มข้นของสารละลาย พอลิแลคติกแอซิด (ร้อยละโดยน้ำหนักต่อ ปริมาตร)	ค่าศักย์ ไฟฟ้าแรงสูง กระแสตรง (กิโลโวลต์)	อัตราไหลของ สารละลาย (มิลลิลิตรต่อ ชั่วโมง)	ระยะห่างระหว่าง ปลายเข็มถึงกระดาด (เซนติเมตร)	ลักษณะของสารละลาย ที่ปลายเข็ม	ลักษณะของสารละลายที่กระดาด
		4	10		ฝัสน้ำกระดาดเปียกกระจ่ายไม่ สม่ำเสมอ
			20		อนุภาคตกลงบนกระดาดกระจ่าย ตัวอย่างไม่สม่ำเสมอ
		5	10		ฝัสน้ำกระดาดเปียกกระจ่ายไม่ สม่ำเสมอ
			20		ฝัสน้ำกระดาดเปียกกระจ่ายไม่ สม่ำเสมอ



ภาคผนวก ง

ค่าทดสอบมุมสัมผัสแบบต่อเนื่อง (dynamic contact angle)
ของกระดาษที่ผ่านการอิเล็กโทรสเปรย์

ตารางผนวกที่ 1 มุมสัมผัสของหยดน้ำเมื่อเวลาผ่านไปของกระดาษที่ผ่านการอิเล็กทรอนิกส์ด้วยสารละลายพอลิแลคติกแอซิด

กระดาษ	ความเข้มข้นของสารละลาย พอลิแลคติกแอซิด	มุมสัมผัส (องศา)					
		นาที่ที่0	นาที่ที่1	นาที่ที่2	นาที่ที่3	นาที่ที่4	นาที่ที่5
ด้านหน้า	untreated	70.29 ± 0.65 ^a	69.67 ± 0.62 ^a	68.34 ± 0.59 ^a	67.56 ± 0.68 ^a	66.88 ± 0.67 ^a	65.21 ± 0.62 ^a
	0.5	90.7 ± 0.65 ^b	89.43 ± 0.67 ^b	88.85 ± 0.70 ^b	87.49 ± 0.69 ^b	86.25 ± 0.63 ^b	85.89 ± 0.67 ^b
	1	122.42 ± 0.78 ^f	121.38 ± 0.69 ^f	120.43 ± 0.65 ^f	119.39 ± 0.70 ^f	118.32 ± 0.62 ^f	117.73 ± 0.74 ^f
	2	117.46 ± 0.68 ^c	116.54 ± 0.65 ^c	115.43 ± 0.67 ^c	114.78 ± 0.68 ^c	113.87 ± 0.63 ^c	112.02 ± 0.62 ^c
	3	109.78 ± 0.68 ^d	108.19 ± 0.63 ^d	105.94 ± 0.70 ^d	104.68 ± 0.63 ^d	103.41 ± 0.65 ^d	102.49 ± 0.67 ^d
	4	102.44 ± 0.65 ^c	101.54 ± 0.59 ^c	100.16 ± 0.63 ^c	99.71 ± 0.60 ^c	98.23 ± 0.72 ^c	97.14 ± 0.62 ^c
ด้านหลัง	untreated	79.23 ± 0.68 ^a	28.16 ± 0.65 ^a	n/a	n/a	n/a	n/a
	0.5	97.03 ± 0.67 ^b	94.43 ± 0.63 ^b	91.85 ± 0.63 ^b	88.49 ± 0.65 ^b	85.25 ± 0.60 ^b	82.69 ± 0.60 ^b
	1	123.39 ± 0.63 ^f	122.12 ± 0.65 ^f	120.38 ± 0.68 ^f	118.43 ± 0.63 ^f	116.39 ± 0.59 ^f	114.32 ± 0.63 ^f
	2	117.4 ± 0.67 ^c	115.54 ± 0.70 ^c	113.43 ± 0.68 ^c	110.78 ± 0.72 ^c	108.87 ± 0.68 ^c	106.02 ± 0.78 ^c
	3	110.68 ± 0.68 ^d	108.19 ± 0.65 ^d	105.94 ± 0.67 ^d	103.68 ± 0.69 ^d	101.41 ± 0.70 ^d	99.49 ± 0.65 ^d
	4	101.86 ± 0.65 ^c	99.54 ± 0.59 ^c	97.16 ± 0.70 ^c	94.71 ± 0.68 ^c	93.23 ± 0.67 ^c	92.14 ± 0.72 ^c

ตารางผนวกที่ 1 (ต่อ)

กระดวย	ความเข้มข้นของ		มุมสัมผัส					
	สารละลาย		(องศา)					
	พอลิแลคติกแอซิด							
	%(w/v)	นาที่ที่6	นาที่ที่7	นาที่ที่8	นาที่ที่9	นาที่ที่10	นาที่ที่11	นาที่ที่12
ด้านหน้า	untreated	64.16 ± 0.65 ^a	63.07 ± 0.59 ^a	62.64 ± 0.63 ^a	61.64 ± 0.63 ^a	60.78 ± 0.65 ^a	59.42 ± 0.65 ^a	58.66 ± 0.59 ^a
	0.5	84.23 ± 0.68 ^b	83.95 ± 0.63 ^b	82.82 ± 0.65 ^b	81.44 ± 0.69 ^b	80.67 ± 0.70 ^b	79.34 ± 0.72 ^b	78.56 ± 0.70 ^b
	1	116.52 ± 0.68 ^f	115.28 ± 0.67 ^f	114.77 ± 0.78 ^f	113.96 ± 0.72 ^f	112.65 ± 0.74 ^f	111.72 ± 0.78 ^f	110.38 ± 0.69 ^f
	2	111.54 ± 0.70 ^c	110.42 ± 0.65 ^c	109.76 ± 0.65 ^c	108.31 ± 0.67 ^c	107.85 ± 0.65 ^c	106.78 ± 0.65 ^c	105.88 ± 0.63 ^c
	3	101.25 ± 0.60 ^d	99.76 ± 0.70 ^d	98.67 ± 0.63 ^d	97.72 ± 0.68 ^d	96.37 ± 0.63 ^d	95.29 ± 0.67 ^d	94.94 ± 0.65 ^d
	4	96.45 ± 0.67 ^c	95.36 ± 0.65 ^c	94.25 ± 0.68 ^c	93.12 ± 0.63 ^c	92.25 ± 0.60 ^c	91.54 ± 0.60 ^c	90.16 ± 0.70 ^c
ด้านหลัง	untreated	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
	0.5	79.89 ± 0.70 ^b	77.23 ± 0.67 ^b	75.95 ± 0.68 ^b	73.82 ± 0.68 ^b	70.44 ± 0.63 ^b	68.67 ± 0.72 ^b	66.34 ± 0.62 ^b
	1	112.73 ± 0.68 ^f	111.52 ± 0.72 ^f	109.28 ± 0.67 ^f	108.77 ± 0.65 ^f	107.96 ± 0.68 ^f	106.65 ± 0.65 ^f	105.72 ± 0.63 ^f
	2	103.54 ± 0.62 ^c	102.42 ± 0.68 ^c	100.76 ± 0.68 ^c	99.31 ± 0.62 ^c	98.85 ± 0.59 ^c	97.78 ± 0.60 ^c	96.88 ± 0.60 ^c
	3	97.25 ± 0.63 ^d	95.76 ± 0.65 ^d	94.67 ± 0.68 ^d	92.72 ± 0.67 ^d	91.37 ± 0.62 ^d	90.29 ± 0.62 ^d	89.94 ± 0.62 ^d
	4	90.45 ± 0.68 ^c	89.36 ± 0.62 ^c	87.25 ± 0.59 ^c	86.12 ± 0.59 ^c	85.25 ± 0.67 ^c	84.54 ± 0.67 ^c	83.16 ± 0.65 ^c

ตารางผนวกที่ ง1 (ต่อ)

กระดวย	ความเข้มข้นของสารละลาย พอลิแลกติกแอซิด	มุ่มสัมผัส (องศา)					
		นาที่ที่13	นาที่ที่14	นาที่ที่15	นาที่ที่20	นาที่ที่25	นาที่ที่30
ด้านหน้า	untreated	57.23 ± 0.65 ^a	56.51 ± 0.62 ^a	55.42 ± 0.68 ^a	53.32 ± 0.60 ^a	51.11 ± 0.62 ^a	48.76 ± 0.60 ^a
	0.5	77.88 ± 0.69 ^b	76.21 ± 0.65 ^b	75.16 ± 0.68 ^b	72.07 ± 0.68 ^b	70.64 ± 0.72 ^b	68.86 ± 0.67 ^b
	1	109.67 ± 0.68 ^f	108.46 ± 0.70 ^f	107.32 ± 0.72 ^f	105.34 ± 0.68 ^f	102.46 ± 0.67 ^f	100.46 ± 0.70 ^f
	2	104.79 ± 0.62 ^c	103.56 ± 0.59 ^c	102.72 ± 0.67 ^c	99.24 ± 0.70 ^c	97.56 ± 0.67 ^c	94.67 ± 0.69 ^c
	3	93.41 ± 0.63 ^d	92.15 ± 0.59 ^d	91.68 ± 0.72 ^d	87.89 ± 0.67 ^d	85.25 ± 0.68 ^d	81.65 ± 0.65 ^d
	4	89.79 ± 0.69 ^c	88.67 ± 0.65 ^c	87.73 ± 0.67 ^c	85.84 ± 0.72 ^c	83.21 ± 0.68 ^c	79.16 ± 0.62 ^c
	untreated	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
ด้านหลัง	0.5	63.56 ± 0.59 ^b	59.88 ± 0.63 ^b	57.21 ± 0.65 ^b	48.16 ± 0.65 ^b	44.07 ± 0.67 ^b	41.64 ± 0.67 ^b
	1	104.38 ± 0.62 ^f	103.67 ± 0.65 ^f	102.46 ± 0.59 ^f	99.32 ± 0.60 ^f	96.34 ± 0.70 ^f	94.46 ± 0.68 ^f
	2	95.79 ± 0.68 ^c	94.56 ± 0.68 ^c	93.72 ± 0.67 ^c	90.24 ± 0.63 ^c	88.56 ± 0.65 ^c	86.67 ± 0.65 ^c
	3	88.41 ± 0.63 ^d	87.15 ± 0.58 ^d	86.68 ± 0.67 ^d	83.89 ± 0.65 ^d	81.25 ± 0.59 ^d	80.65 ± 0.63 ^d
	4	81.79 ± 0.63 ^c	80.67 ± 0.60 ^c	79.73 ± 0.68 ^c	74.84 ± 0.63 ^c	72.21 ± 0.62 ^c	71.16 ± 0.70 ^c
	untreated	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a

^{a-f} ตัวอักษรที่ต่างกันในแถวตั้งหมายถึงค่าเฉลี่ยมีความแตกต่างกันทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

n/a ไม่สามารถวัดค่าได้

ตารางผนวกที่ ๑2 มุมสัมผัสของหยดน้ำมันเมื่อเวลาผ่านไปของกระดาษที่ผ่านการอิเล็กทรอนิกส์ด้วยสารละลายพอลิแลคติกแอซิด

กระดาษ	ความเข้มข้นของสารละลาย พอลิแลคติกแอซิด %(w/v)	มุมสัมผัส (องศา)					
		นาที่ที่0	นาที่ที่1	นาที่ที่2	นาที่ที่3	นาที่ที่4	นาที่ที่5
ด้านหน้า	untreated	นาที่ที่0	นาที่ที่1	นาที่ที่2	นาที่ที่3	นาที่ที่4	นาที่ที่5
	0.5	10.76 ± 0.77 ^a	10.15 ± 0.72 ^a	9.97 ± 0.79 ^a	9.53 ± 0.65 ^a	9.24 ± 0.65 ^a	8.79 ± 0.60 ^a
	1	20.70 ± 0.74 ^b	19.75 ± 0.69 ^b	18.65 ± 0.69 ^b	17.59 ± 0.69 ^b	16.69 ± 0.70 ^b	15.73 ± 0.68 ^b
	2	44.28 ± 0.75 ^f	42.38 ± 0.72 ^f	40.43 ± 0.75 ^f	38.39 ± 0.70 ^f	36.32 ± 0.68 ^f	34.73 ± 0.70 ^f
	3	38.66 ± 0.73 ^e	36.43 ± 0.75 ^e	34.78 ± 0.67 ^e	32.87 ± 0.68 ^e	31.52 ± 0.73 ^e	29.54 ± 0.76 ^e
	4	32.58 ± 0.83 ^d	30.86 ± 0.73 ^d	29.56 ± 0.70 ^d	28.65 ± 0.80 ^d	27.45 ± 0.75 ^d	25.48 ± 0.77 ^d
ด้านหลัง	untreated	23.70 ± 0.71 ^c	22.14 ± 0.79 ^c	21.45 ± 0.83 ^c	20.36 ± 0.70 ^c	19.25 ± 0.72 ^c	18.12 ± 0.82 ^c
	0.5	12.86 ± 0.77 ^a	12.26 ± 0.75 ^a	11.98 ± 0.75 ^a	11.46 ± 0.75 ^a	11.01 ± 0.78 ^a	10.67 ± 0.80 ^a
	1	22.2 ± 0.75 ^b	21.43 ± 0.76 ^b	20.85 ± 0.73 ^b	19.49 ± 0.75 ^b	18.25 ± 0.80 ^b	17.69 ± 0.70 ^b
	2	46.36 ± 0.77 ^f	44.12 ± 0.75 ^f	42.38 ± 0.80 ^f	40.43 ± 0.73 ^f	38.39 ± 0.69 ^f	37.32 ± 0.73 ^f
	3	40.86 ± 0.71 ^e	38.54 ± 0.70 ^e	36.43 ± 0.71 ^e	34.78 ± 0.72 ^e	32.87 ± 0.78 ^e	31.02 ± 0.78 ^e
	4	34.98 ± 0.72 ^d	32.75 ± 0.75 ^d	30.86 ± 0.81 ^d	29.56 ± 0.71 ^d	27.65 ± 0.70 ^d	26.45 ± 0.71 ^d

ตารางผนวกที่ ๓2 (ต่อ)

กระดาศ	ความเข้มข้นของ สารละลาย พอลิแลกติกแอซิด %(w/v)	มุมสัมผัส (องศา)					
		นาที่ที่6	นาที่ที่7	นาที่ที่8	นาที่ที่9	นาที่ที่10	นาที่ที่11
ด้านหน้า	untreated	8.45 ± 0.75 ^a	8.24 ± 0.69 ^a	7.91 ± 0.77 ^a	7.75 ± 0.73 ^a	7.34 ± 0.75 ^a	7.12 ± 0.75 ^a
	0.5	14.95 ± 0.78 ^b	14.55 ± 0.73 ^b	13.21 ± 0.74 ^b	12.67 ± 0.69 ^b	11.34 ± 0.70 ^b	10.56 ± 0.72 ^b
	1	33.52 ± 0.78 ^f	32.28 ± 0.77 ^f	30.77 ± 0.78 ^f	29.96 ± 0.72 ^f	28.65 ± 0.74 ^f	27.72 ± 0.78 ^f
	2	28.42 ± 0.70 ^c	27.76 ± 0.65 ^c	26.31 ± 0.75 ^c	25.85 ± 0.77 ^c	24.78 ± 0.75 ^c	23.88 ± 0.75 ^c
	3	24.47 ± 0.83 ^d	23.38 ± 0.70 ^d	22.18 ± 0.79 ^d	21.62 ± 0.78 ^d	20.65 ± 0.83 ^d	19.48 ± 0.77 ^d
	4	17.25 ± 0.77 ^c	16.54 ± 0.75 ^c	15.16 ± 0.70 ^c	14.79 ± 0.83 ^c	13.67 ± 0.70 ^c	12.73 ± 0.80 ^c
ด้านหลัง	untreated	10.21 ± 0.83 ^a	10.00 ± 0.75 ^a	9.80 ± 0.80 ^a	9.20 ± 0.73 ^a	8.80 ± 0.83 ^a	8.10 ± 0.83 ^a
	0.5	16.89 ± 0.70 ^b	15.23 ± 0.77 ^b	14.95 ± 0.78 ^b	13.82 ± 0.80 ^b	12.44 ± 0.73 ^b	11.67 ± 0.72 ^b
	1	35.73 ± 0.78 ^f	34.53 ± 0.82 ^f	32.96 ± 0.77 ^f	31.65 ± 0.75 ^f	29.72 ± 0.78 ^f	28.38 ± 0.75 ^f
	2	29.54 ± 0.82 ^c	28.42 ± 0.78 ^c	27.76 ± 0.83 ^c	26.31 ± 0.72 ^c	25.79 ± 0.79 ^c	24.56 ± 0.70 ^c
	3	25.48 ± 0.73 ^d	24.47 ± 0.75 ^d	23.38 ± 0.78 ^d	22.18 ± 0.77 ^d	21.18 ± 0.72 ^d	20.62 ± 0.80 ^d
	4	22.45 ± 0.75 ^c	21.36 ± 0.72 ^c	20.25 ± 0.80 ^c	19.12 ± 0.81 ^c	18.25 ± 0.77 ^c	17.54 ± 0.77 ^c

ตารางผนวกที่ ๑2 (ต่อ)

กระดวย	ความเข้มข้นของสารละลาย พอลิแลกติกแอซิด	มูมสัมพัทธ์					
		(องศา)					
	%(w/v)	นาทียที่13	นาทียที่14	นาทียที่15	นาทียที่20	นาทียที่25	นาทียที่30
ด้านหน้า	untreated	6.52± 0.83 ^a	6.21 ± 0.82 ^a	5.88 ± 0.78 ^a	5.00± 0.70 ^a	4.45 ± 0.73 ^a	3.00 ± 0.70 ^a
	0.5	9.16 ± 0.79 ^b	8.56 ± 0.75 ^b	8.12 ± 0.68 ^b	6.16 ± 0.80 ^b	5.07 ± 0.72 ^b	4.64 ± 0.77 ^b
	1	25.67 ± 0.80 ^f	24.46 ± 0.70 ^f	23.59 ± 0.72 ^f	19.42 ± 0.78 ^f	16.21 ± 0.77 ^f	13.10 ± 0.70 ^f
	2	21.56 ± 0.72 ^c	20.72± 0.78 ^c	19.46 ± 0.80 ^c	16.28 ± 0.70 ^c	14.52 ± 0.77 ^c	11.32 ± 0.83 ^c
	3	17.68 ± 0.83 ^d	16.86 ± 0.79 ^d	15.56 ± 0.72 ^d	12.68 ± 0.77 ^d	11.04± 0.78 ^d	9.45 ± 0.71 ^d
	4	11.20 ± 0.79 ^c	10.87 ± 0.75 ^c	10.35 ± 0.77 ^c	9.05 ± 0.72 ^c	8.12 ± 0.80 ^c	7.44 ± 0.73 ^c
ด้านหลัง	untreated	7.30 ± 0.80 ^a	6.80 ± 0.73 ^a	6.60 ± 0.73 ^a	5.80 ± 0.77 ^a	4.20 ± 0.83 ^a	3.80 ± 0.79 ^a
	0.5	9.56 ± 0.70 ^b	8.68 ± 0.73 ^b	7.86 ± 0.75 ^b	6.16 ± 0.75 ^b	5.07 ± 0.77 ^b	4.64 ± 0.80 ^b
	1	26.46 ± 0.82 ^f	25.59 ± 0.85 ^f	24.46 ± 0.69 ^f	21.59 ± 0.70 ^f	17.21 ± 0.70 ^f	12.10 ± 0.78 ^f
	2	22.79 ± 0.78 ^c	21.56 ± 0.78 ^c	20.72 ± 0.77 ^c	17.46 ± 0.83 ^c	14.78 ± 0.75 ^c	9.32 ± 0.75 ^c
	3	18.48 ± 0.73 ^d	17.82 ± 0.83 ^d	16.68 ± 0.77 ^d	14.56 ± 0.75 ^d	11.68± 0.80 ^d	8.45 ± 0.83 ^d
	4	15.79 ± 0.73 ^c	14.67 ± 0.80 ^c	13.73 ± 0.78 ^c	11.23 ± 0.73 ^c	9.20 ± 0.72 ^c	7.10 ± 0.70 ^c

^{a-f} ตัวอักษรที่ต่างกันในแถวตั้งหมายถึงค่าเฉลี่ยมีความแตกต่างกันทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

n/a ไม่สามารถวัดค่าได้

ตารางผนวกที่ 3 มุมสัมผัสของหยดน้ำเมื่อเวลาผ่านไปของกระดาษที่ผ่านการอิเล็กทรอนิกส์ด้วยสารละลายผสมระหว่างพอลิแลคติกแอซิดและพอลิบิวทิลีนอะดิเพต-โค-เทรฟทาเลท

กระดาษ	อัตราส่วนของสารละลาย PLA : PBAT (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	มุมสัมผัส (องศา)					
		นาที่ที่0	นาที่ที่1	นาที่ที่2	นาที่ที่3	นาที่ที่4	นาที่ที่5
ด้านหน้า	untreated	70.29 ± 0.65 ^a	69.67 ± 0.62 ^a	68.34 ± 0.59 ^a	67.56 ± 0.68 ^a	66.88 ± 0.67 ^a	65.21 ± 0.62 ^a
	100 : 0	122.42 ± 0.78 ^c	121.38 ± 0.69 ^c	120.43 ± 0.65 ^c	119.39 ± 0.70 ^c	118.32 ± 0.62 ^c	117.73 ± 0.74 ^c
	80 : 20	122.32 ± 0.73 ^c	121.15 ± 0.70 ^c	120.11 ± 0.75 ^c	119.72 ± 0.70 ^c	118.09 ± 0.75 ^c	117.34 ± 0.75 ^c
	50 : 50	122.38 ± 0.69 ^c	121.68 ± 0.75 ^c	120.15 ± 0.67 ^c	119.44 ± 0.68 ^c	118.05 ± 0.69 ^c	117.33 ± 0.70 ^c
	20 : 80	122.28 ± 0.70 ^c	120.89 ± 0.77 ^c	119.67 ± 0.76 ^c	118.84 ± 0.73 ^c	117.4 ± 0.80 ^c	116.84 ± 0.77 ^c
	0 : 100	120.34 ± 0.66 ^c	119.21 ± 0.59 ^c	117.5 ± 0.65 ^c	116.5 ± 0.65 ^c	115.5 ± 0.70 ^c	114.34 ± 0.69 ^c
ด้านหลัง	untreated	79.23 ± 0.68 ^b	28.16 ± 0.65 ^b	n/a	n/a	n/a	n/a
	100 : 0	123.39 ± 0.63 ^f	122.12 ± 0.65 ^f	120.38 ± 0.68 ^f	118.43 ± 0.63 ^f	116.39 ± 0.59 ^f	114.32 ± 0.63 ^f
	80 : 20	123.26 ± 0.66 ^f	122.05 ± 0.65 ^f	119.5 ± 0.60 ^f	117.68 ± 0.63 ^f	115.45 ± 0.59 ^f	113.58 ± 0.63 ^f
	50 : 50	123.50 ± 0.65 ^f	122.45 ± 0.62 ^f	120.84 ± 0.65 ^f	118.9 ± 0.69 ^f	116.82 ± 0.65 ^f	114.75 ± 0.69 ^f
	20 : 80	122.96 ± 0.64 ^f	121.95 ± 0.65 ^f	120.5 ± 0.67 ^f	118.25 ± 0.65 ^f	116.38 ± 0.70 ^f	113.8 ± 0.65 ^f
	0 : 100	101.86 ± 0.65 ^c	99.54 ± 0.59 ^c	97.16 ± 0.70 ^c	94.71 ± 0.68 ^c	93.23 ± 0.67 ^c	92.14 ± 0.72 ^c

ตารางผนวกที่ 3 (ต่อ)

กระดวย	อัตราส่วนของ สารละลาย PLA : PBAT (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	มุมสัมผัส (องศา)						
		นาที่ที่6	นาที่ที่7	นาที่ที่8	นาที่ที่9	นาที่ที่10	นาที่ที่11	นาที่ที่12
ด้านหน้า	untreated	64.16 ± 0.65 ^a	63.07 ± 0.59 ^a	62.64 ± 0.63 ^a	61.64 ± 0.63 ^a	60.78 ± 0.65 ^a	59.42 ± 0.65 ^a	58.66 ± 0.59 ^a
	100 : 0	116.52 ± 0.68 ^c	115.28 ± 0.67 ^c	114.77 ± 0.78 ^c	113.96 ± 0.72 ^c	112.65 ± 0.74 ^c	111.72 ± 0.78 ^c	110.38 ± 0.69 ^c
	80 : 20	116.55 ± 0.81 ^c	114.97 ± 0.77 ^c	113.33 ± 0.77 ^c	111.78 ± 0.73 ^c	111.32 ± 0.70 ^c	110.27 ± 0.75 ^c	109.56 ± 0.70 ^c
	50 : 50	116.65 ± 0.71 ^c	115.09 ± 0.65 ^c	114.52 ± 0.68 ^c	113.24 ± 0.69 ^c	112.05 ± 0.75 ^c	111.89 ± 0.67 ^c	110.68 ± 0.68 ^c
	20 : 80	115.42 ± 0.69 ^c	114.37 ± 0.70 ^c	113.75 ± 0.73 ^c	112.68 ± 0.70 ^c	111.11 ± 0.77 ^c	109.55 ± 0.76 ^c	108.36 ± 0.73 ^c
	0 : 100	113.57 ± 0.67 ^c	111.34 ± 0.65 ^c	110.87 ± 0.65 ^c	109.67 ± 0.66 ^c	108.00 ± 0.59 ^c	107.25 ± 0.65 ^c	105.65 ± 0.65 ^c
ด้านหลัง	untreated	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
	100 : 0	112.73 ± 0.68 ^f	111.52 ± 0.70 ^f	109.28 ± 0.67 ^f	108.77 ± 0.65 ^f	107.96 ± 0.70 ^f	106.65 ± 0.65 ^f	105.72 ± 0.63 ^f
	80 : 20	112.62 ± 0.68 ^f	111.78 ± 0.72 ^f	109.34 ± 0.67 ^f	107.60 ± 0.65 ^f	105.72 ± 0.68 ^f	104.50 ± 0.60 ^f	103.85 ± 0.65 ^f
	50 : 50	113.10 ± 0.66 ^f	112.15 ± 0.68 ^f	111.25 ± 0.65 ^f	109.45 ± 0.69 ^f	108.65 ± 0.73 ^f	106.98 ± 0.60 ^f	106.24 ± 0.60 ^f
	20 : 80	112.95 ± 0.65 ^d	107.7 ± 0.65 ^d	106.25 ± 0.69 ^d	106.25 ± 0.70 ^f	105.40 ± 0.63 ^f	104.56 ± 0.62 ^f	103.48 ± 0.62 ^f
	0 : 100	108.1 ± 0.68 ^d	106.87 ± 0.62 ^d	104.56 ± 0.60 ^d	103.66 ± 0.62 ^d	102.50 ± 0.67 ^d	101.31 ± 0.67 ^d	99.88 ± 0.65 ^d

ตารางผนวกที่ 3 (ต่อ)

กระดาษ	อัตราส่วนของสารละลาย PLA : PBAT (ร้อยละ โดยน้ำหนัก)	มุมสัมผัส (องศา)					
		นาที่ที่13	นาที่ที่14	นาที่ที่15	นาที่ที่20	นาที่ที่25	นาที่ที่30
ด้านหน้า	untreated	57.23 ± 0.65 ^a	56.51 ± 0.62 ^a	55.42 ± 0.68 ^a	53.32 ± 0.60 ^a	51.11 ± 0.62 ^a	48.76 ± 0.60 ^a
	100 : 0	109.67 ± 0.68 ^e	108.46 ± 0.70 ^e	107.32 ± 0.72 ^e	105.34 ± 0.68 ^e	102.46 ± 0.67 ^e	100.46 ± 0.70 ^e
	80 : 20	108.34 ± 0.75 ^e	107.68 ± 0.75 ^e	106.11 ± 0.81 ^e	103.75 ± 0.77 ^e	100.34 ± 0.77 ^e	99.86 ± 0.70 ^e
	50 : 50	109.21 ± 0.69 ^e	108.14 ± 0.70 ^e	106.72 ± 0.71 ^e	105.44 ± 0.65 ^e	102.76 ± 0.68 ^e	100.45 ± 0.69 ^e
	20 : 80	107.69 ± 0.80 ^e	106.79 ± 0.77 ^e	105.07 ± 0.69 ^e	101.56 ± 0.70 ^e	99.29 ± 0.73 ^e	97.15 ± 0.65 ^e
	0 : 100	103.21 ± 0.70 ^e	102.18 ± 0.69 ^e	100.68 ± 0.67 ^e	97.5 ± 0.65 ^e	94.68 ± 0.65 ^e	93.22 ± 0.62 ^e
	untreated	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
ด้านหลัง	100 : 0	104.38 ± 0.62 ^f	103.67 ± 0.67 ^f	102.46 ± 0.59 ^f	99.32 ± 0.68 ^f	96.34 ± 0.70 ^f	94.46 ± 0.68 ^f
	80 : 20	102.20 ± 0.65 ^f	100.75 ± 0.65 ^f	99.78 ± 0.65 ^f	96.65 ± 0.67 ^f	93.67 ± 0.70 ^f	92.98 ± 0.68 ^f
	50 : 50	105.75 ± 0.68 ^f	104.62 ± 0.68 ^f	103.18 ± 0.67 ^f	100.5 ± 0.63 ^f	97.34 ± 0.65 ^f	95.6 ± 0.65 ^f
	20 : 80	101.78 ± 0.65 ^f	100.55 ± 0.58 ^f	99.52 ± 0.67 ^f	98.15 ± 0.65 ^f	95.42 ± 0.59 ^f	93.50 ± 0.63 ^f
	0 : 100	97.15 ± 0.62 ^d	95.97 ± 0.60 ^d	94.76 ± 0.68 ^d	91.12 ± 0.65 ^d	87.68 ± 0.62 ^d	85.85 ± 0.70 ^d
	untreated	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a

^{a-f} ตัวอักษรที่ต่างกันแถวหนึ่งหมายถึงค่าเฉลี่ยมีความแตกต่างกันทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

n/a ไม่สามารถวัดค่าได้

ตารางผนวกที่ 4 มุมสัมผัสของหยดน้ำมันเมื่อเวลาผ่านไปของกระดาษที่ผ่านการอิเล็กโทรสเปรย์ด้วยสารละลายผสมระหว่างพอลิแลคติกแอซิดและพอลิ บิวทิลีนอะดิเพต-โค-เทเรฟทาเลท

กระดาษ	อัตราส่วนของสารละลาย PLA : PBAT (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	มุมสัมผัส (องศา)					
		นาที่ที่0	นาที่ที่1	นาที่ที่2	นาที่ที่3	นาที่ที่4	นาที่ที่5
ด้านหน้า	untreated	10.76 ± 0.77 ^a	10.15 ± 0.72 ^a	9.97 ± 0.79 ^a	9.53 ± 0.65 ^a	9.24 ± 0.65 ^a	8.79 ± 0.60 ^a
	100 : 0	44.28 ± 0.75 ^c	42.38 ± 0.72 ^c	40.43 ± 0.75 ^c	38.39 ± 0.70 ^c	36.32 ± 0.68 ^c	34.73 ± 0.70 ^c
	80 : 20	44.20 ± 0.79 ^c	42.42 ± 0.73 ^c	40.56 ± 0.75 ^c	39.18 ± 0.70 ^c	37.25 ± 0.82 ^c	35.45 ± 0.74 ^c
	50 : 50	44.30 ± 0.68 ^c	43.65 ± 0.65 ^c	41.76 ± 0.67 ^c	40.00 ± 0.68 ^c	38.56 ± 0.66 ^c	36.42 ± 0.67 ^c
	20 : 80	44.12 ± 0.78 ^c	43.22 ± 0.73 ^c	41.10 ± 0.70 ^c	39.54 ± 0.73 ^c	37.84 ± 0.75 ^c	36.25 ± 0.77 ^c
	0 : 100	38.52 ± 0.71 ^c	37.33 ± 0.79 ^c	35.15 ± 0.73 ^c	33.78 ± 0.80 ^c	31.75 ± 0.72 ^c	30.34 ± 0.82 ^c
ด้านหลัง	untreated	12.86 ± 0.77 ^b	12.26 ± 0.75 ^b	11.98 ± 0.77 ^b	11.46 ± 0.75 ^b	11.01 ± 0.78 ^b	10.67 ± 0.80 ^b
	100 : 0	46.36 ± 0.77 ^f	44.12 ± 0.77 ^f	42.38 ± 0.80 ^f	40.43 ± 0.73 ^f	38.39 ± 0.70 ^f	37.32 ± 0.73 ^f
	80 : 20	45.98 ± 0.73 ^f	43.70 ± 0.75 ^f	42.21 ± 0.78 ^f	40.25 ± 0.73 ^f	37.68 ± 0.79 ^f	36.50 ± 0.73 ^f
	50 : 50	46.42 ± 0.63 ^f	44.45 ± 0.70 ^f	42.78 ± 0.68 ^f	41.21 ± 0.72 ^f	39.20 ± 0.68 ^f	37.62 ± 0.68 ^f
	20 : 80	46.28 ± 0.71 ^f	44.05 ± 0.69 ^f	42.60 ± 0.73 ^f	40.85 ± 0.69 ^f	38.72 ± 0.70 ^f	36.95 ± 0.65 ^f
	0 : 100	42.52 ± 0.64 ^d	39.80 ± 0.59 ^d	37.79 ± 0.65 ^d	35.14 ± 0.65 ^d	33.96 ± 0.67 ^d	31.50 ± 0.65 ^d

ตารางผนวกที่ 4 (ต่อ)

กระดาษ	อัตราส่วนของ สารละลาย PLA : PBAT (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	มุมสัมผัส (องศา)						
		นาที่ที่6	นาที่ที่7	นาที่ที่8	นาที่ที่9	นาที่ที่10	นาที่ที่11	นาที่ที่12
ด้านหน้า	untreated	8.45 ± 0.75 ^a	8.24 ± 0.69 ^a	7.91 ± 0.77 ^a	7.75 ± 0.73 ^a	7.34 ± 0.75 ^a	7.12 ± 0.75 ^a	6.89 ± 0.79 ^a
	100 : 0	33.52 ± 0.78 ^c	32.28 ± 0.77 ^c	30.77 ± 0.78 ^c	29.96 ± 0.72 ^c	28.65 ± 0.74 ^c	27.72 ± 0.78 ^c	26.38 ± 0.69 ^c
	80 : 20	33.78 ± 0.78 ^c	32.50 ± 0.77 ^c	31.25 ± 0.80 ^c	30.35 ± 0.62 ^c	29.63 ± 0.74 ^c	28.75 ± 0.68 ^c	27.41 ± 0.69 ^c
	50 : 50	34.98 ± 0.70 ^c	33.25 ± 0.65 ^c	31.76 ± 0.65 ^c	30.65 ± 0.67 ^c	29.75 ± 0.65 ^c	28.68 ± 0.65 ^c	27.55 ± 0.63 ^c
	20 : 80	34.50 ± 0.80 ^c	33.18 ± 0.70 ^c	31.68 ± 0.83 ^c	29.95 ± 0.78 ^c	28.90 ± 0.73 ^c	28.14 ± 0.77 ^c	26.73 ± 0.75 ^c
	0 : 100	28.78 ± 0.77 ^c	27.67 ± 0.75 ^c	26.44 ± 0.80 ^c	25.50 ± 0.63 ^c	23.89 ± 0.60 ^c	22.10 ± 0.60 ^c	21.37 ± 0.70 ^c
ด้านหลัง	untreated	10.21 ± 0.83 ^b	10.00 ± 0.75 ^b	9.80 ± 0.79 ^b	9.20 ± 0.73 ^b	8.80 ± 0.83 ^b	8.10 ± 0.83 ^b	7.50 ± 0.75 ^b
	100 : 0	35.73 ± 0.78 ^f	34.53 ± 0.72 ^f	32.96 ± 0.76 ^f	31.65 ± 0.75 ^f	29.72 ± 0.78 ^f	28.38 ± 0.75 ^f	27.67 ± 0.73 ^f
	80 : 20	35.42 ± 0.68 ^f	33.15 ± 0.72 ^f	32.40 ± 0.73 ^f	31.26 ± 0.65 ^f	29.38 ± 0.65 ^f	27.80 ± 0.75 ^f	27.07 ± 0.60 ^f
	50 : 50	36.70 ± 0.62 ^f	34.84 ± 0.68 ^f	33.25 ± 0.68 ^f	32.42 ± 0.65 ^f	30.60 ± 0.67 ^f	28.95 ± 0.65 ^f	28.20 ± 0.63 ^f
	20 : 80	34.08 ± 0.69 ^f	32.46 ± 0.70 ^f	32.46 ± 0.67 ^f	31.60 ± 0.67 ^f	29.02 ± 0.72 ^f	27.35 ± 0.72 ^f	26.90 ± 0.71 ^f
	0 : 100	30.04 ± 0.62 ^d	29.63 ± 0.62 ^d	28.58 ± 0.60 ^d	27.15 ± 0.69 ^d	25.43 ± 0.67 ^d	24.10 ± 0.62 ^d	22.82 ± 0.60 ^d

ตารางผนวกที่ 4 (ต่อ)

กระดาษ	อัตราส่วนของสารละลาย PLA : PBAT (ร้อยละ โดยน้ำหนัก)	มุมสัมผัส (องศา)					
		นาที่ที่13	นาที่ที่14	นาที่ที่15	นาที่ที่20	นาที่ที่25	นาที่ที่30
ด้านหน้า	untreated	6.52± 0.83 ^a	6.21 ± 0.82 ^a	5.88 ± 0.78 ^a	5.00± 0.70 ^a	4.45 ± 0.73 ^a	3.00 ± 0.70 ^a
	100 : 0	25.67 ± 0.80 ^c	24.46 ± 0.70 ^c	23.59 ± 0.72 ^c	19.42 ± 0.78 ^c	16.21 ± 0.77 ^c	13.10 ± 0.70 ^c
	80 : 20	26.33 ± 0.68 ^c	25.60 ± 0.70 ^c	24.37 ± 0.72 ^c	19.30 ± 0.68 ^c	15.62 ± 0.67 ^c	13.78 ± 0.73 ^c
	50 : 50	26.68 ± 0.62 ^c	25.41 ± 0.59 ^c	24.55 ± 0.67 ^c	20.82 ± 0.70 ^c	17.28 ± 0.67 ^c	14.85 ± 0.67 ^c
	20 : 80	25.55 ± 0.73 ^d	24.82 ± 0.79 ^c	23.65 ± 0.70 ^c	19.50 ± 0.77 ^c	15.74 ± 0.78 ^c	12.65 ± 0.70 ^c
	0 : 100	20.60 ± 0.69 ^c	19.45 ± 0.65 ^c	17.67 ± 0.67 ^c	13.89 ± 0.62 ^c	11.40 ± 0.68 ^c	9.33 ± 0.60 ^c
ด้านหลัง	untreated	7.30 ± 0.80 ^b	6.80 ± 0.73 ^b	6.60 ± 0.73 ^b	5.80 ± 0.77 ^b	4.20 ± 0.83 ^b	3.80 ± 0.71 ^b
	100 : 0	26.46 ± 0.82 ^f	25.59 ± 0.85 ^f	24.46 ± 0.69 ^f	21.59 ± 0.70 ^f	17.21 ± 0.70 ^f	12.10 ± 0.68 ^f
	80 : 20	25.95 ± 0.61 ^f	24.72 ± 0.62 ^f	23.50 ± 0.63 ^f	20.75 ± 0.59 ^f	17.30 ± 0.67 ^f	13.45 ± 0.63 ^f
	50 : 50	26.63 ± 0.63 ^f	25.35 ± 0.62 ^f	24.67 ± 0.65 ^f	21.70 ± 0.59 ^f	18.65 ± 0.70 ^f	13.68 ± 0.65 ^f
	20 : 80	25.84 ± 0.83 ^f	25.20 ± 0.80 ^f	23.48 ± 0.77 ^f	20.25 ± 0.75 ^f	17.55 ± 0.70 ^f	12.72 ± 0.71 ^f
	0 : 100	20.52 ± 0.63 ^d	19.65 ± 0.60 ^d	18.25 ± 0.62 ^d	15.72 ± 0.63 ^d	11.74 ± 0.62 ^d	8.55 ± 0.62 ^d

^{a-f} ตัวอักษรที่ต่างกันในแต่ละแถวหมายถึงค่าเฉลี่ยมีความแตกต่างกันทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

n/a ไม่สามารถวัดค่าได้

ประวัติการศึกษา และการทำงาน

ชื่อ –นามสกุล	นางสาวทิตา อาชวีบูลโยบล
วัน เดือน ปี ที่เกิด	วันที่ 25 เมษายน 2527
สถานที่เกิด	กรุงเทพมหานคร
ประวัติการศึกษา	ปริญญาตรี ภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีสิ่งทอ คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ตำแหน่งหน้าที่การงานปัจจุบัน	-
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	-
ผลงานดีเด่นและรางวัลทางวิชาการ	-
ทุนการศึกษาที่ได้รับ	ทุนศูนย์วิทยการขั้นสูงด้านนาโนเทคโนโลยีเพื่อ อุตสาหกรรมเคมี อาหาร และการเกษตร ทุนผู้ช่วยสอน จากบัณฑิตวิทยาลัย ทุนสนับสนุนงานวิจัย จากบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์