ใบรับรองวิทยานิพนธ์

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (เทคโนโลยีการบรรจุ)

ปริญญา

เทคโนโลยีการบรรจุ	เทคโนโลยีการบรรจุ
สาขา	**ภาควิชา**

เรื่อง การปรับปรุงสมบัติการต้านทานน้ำของกระดาษแข็งโดยพลาสมาซัลเฟอร์เฮกซะฟลูออไรด์

The Improvement of Water Resistance Property of Paperboard by SF_6 Plasma

นามผู้วิจัย นางสาวสุชาดา ถาวรวิริยะนันท์

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจาย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก ....

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ธัญญารัตน์ จิญกาญจน์, Ph.D.)

อาจาย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ....

(อาจารย์อำพร เสน่ห์, Ph.D.)

อาจาย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ....

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์พรชัย ราชตนะพันธุ์, Ph.D.)

อาจาย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ....

(รองศาสตราจารย์ธีรวรรณ บุญญวรรณ, วท.ด.)

รักษาราชการแทนหัวหน้าภาควิชา ....

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ธัญญารัตน์ จิญกาญจน์, Ph.D.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

....

(รองศาสตราจารย์กัญจนา ธีระกุล, D.Agr.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

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

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การปรับปรุงสมบัติการต้านทานน้ำของกระดาษแข็งโดยพลาสมาซัลเฟอร์เฮกซะฟลูออไรด์

The Improvement of Water Resistance Property of Paperboard by SF_6 Plasma

โดย

นางสาวสุชาดา ถาวรวิริยะนันท์

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (เทคโนโลยีการบรรจุ)

พ.ศ. 2551

สุชาดา ถาวรวิริยะนันท์ 2551: การปรับปรุงสมบัติการต้านทานน้ำของกระดาษแข็งโดยพลาสมาซัลเฟอร์เฮกซะฟลูออไรด์ ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (เทคโนโลยีการบรรจุ) สาขาเทคโนโลยีการบรรจุ ภาควิชาเทคโนโลยีการบรรจุ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ผู้ช่วยศาสตราจารย์ธัญญารัตน์ จิญกาญจน์, Ph.D. 112 หน้า

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเพิ่มความสามารถในการต้านทานน้ำของกระดาษแข็ง เพื่อใช้งานทางการบรรจุ โดยการประยุกต์ด้วยพลาสมาซัลเฟอร์เฮกซะฟลูออไรด์ในกระดาษแข็งประเภทดูเพล็กบอร์ด น้ำหนักมาตรฐาน 300 กรัมต่อตารางเมตร ซึ่งเป็นกระดาษเคลือบผิวหน้าเดียว งานวิจัยประกอบ ด้วย 3 ส่วน ส่วนแรก คือ การศึกษาอิทธิพลของสภาวะพลาสมาต่อความสามารถในการต้านทานน้ำของกระดาษ โดยสภาวะพลาสมาที่ศึกษาได้แก่ กำลังคลื่นวิทยุที่ 25, 50 และ 75 วัตต์ และความดันแก๊สที่ 20, 50, 100 และ 200 มิลลิทอร์ โดยกำหนดเวลาในการประยุกต์พลาสมาที่ 10 นาที การศึกษาในส่วนที่ 2 คือ การศึกษาอิทธิพลของเวลาในการประยุกต์พลาสมาต่อสมบัติในการต้านทานน้ำ สมบัติทางกายภาพ สมบัติเชิงกล และสมบัติการสกัดกั้นการซึมผ่านของกระดาษ โดยเลือกเวลาในการประยุกต์พลาสมาที่ 2, 10, 60 และ 600 วินาที ตามลำดับ และใช้สภาวะพลาสมาที่ดีที่สุดจากการศึกษาในส่วนแรก การศึกษาในส่วนที่ 3 คือ การศึกษาอิทธิพลของระยะเวลาในการเก็บกระดาษภายหลังการประยุกต์พลาสมาในสภาวะของคลังสินค้าในเขตร้อนชื้นทั่วไป (อุณหภูมิ 25-32 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 48-74 เป็นเวลา 28 วัน) ต่อความสามารถในการต้านทานน้ำของกระดาษ ผลการศึกษาในส่วนแรก พบว่า กำลังคลื่นวิทยุ 50 วัตต์ และความดันแก๊ส 100 มิลลิทอร์ เป็นสภาวะที่ดีที่สุดในการปรับปรุงสมบัติการต้านทานน้ำของกระดาษ และจากการศึกษาอิทธิพลของเวลาในการประยุกต์พลาสมา พบว่า การประยุกต์พลาสมาด้วยเวลาเพียง 2 วินาที สามารถเพิ่มความสามารถในการต้านทานน้ำของกระดาษได้อย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) โดยเมื่อเวลาในการประยุกต์พลาสมาเพิ่มขึ้น กระดาษจะมีความสามารถในการต้านทานน้ำมากขึ้น นอกจากนี้ผลการทดสอบสมบัติทางกายภาพ พบว่า การประยุกต์พลาสมาไม่มีผลต่อน้ำหนักมาตรฐาน ความหนา และความชื้นของกระดาษ แต่ทำให้ความสว่างและสีของกระดาษเปลี่ยนแปลงไป ผลการทดสอบสมบัติเชิงกล พบว่า การประยุกต์พลาสมาไม่มีผลต่อความต้านทานแรงดึงของกระดาษ แต่มีผลให้ความต้านทานแรงกดวงแหวนในแนว MD และความต้านทานต่อการพับในแนว MD และ CD ของกระดาษมีค่าลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) และผลการทดสอบสมบัติการสกัดกั้นการซึมผ่าน พบว่า การประยุกต์พลาสมาสามารถเพิ่มความสามารถในการต้านทานการซึมผ่านของน้ำมันได้อย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) อย่างไรก็ตาม พบว่าสมบัติการสกัดกั้นการซึมผ่านของไอน้ำและแก๊สออกซิเจนของกระดาษลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) นอกจากนี้การประยุกต์พลาสมาจะมีประสิทธิภาพดีเมื่อกระดาษที่จะนำมาประยุกต์ไม่ผ่านการเคลือบผิวมาก่อน ส่วนผลการเก็บกระดาษภายหลังการประยุกต์พลาสมา พบว่า เมื่อเวลาผ่านไปกระดาษมีความสามารถในการต้านทานน้ำลดลง ยกเว้นกระดาษที่ประยุกต์พลาสมา 60 วินาที ซึ่งความสามารถในการต้านทานน้ำของกระดาษไม่มีการเปลี่ยนแปลง

____________________ ____________________ ___ / ___ / ___

ลายมือชื่อนิสิต ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

Suchada Thawornwiriyanan 2008: The Improvement of Water Resistance Property of Paperboard by SF_6 Plasma. Master of Science (Packaging Technology), Major Field: Packaging Technology, Department of Packaging Technology. Thesis Advisor: Assistant Professor Tunyarut Jinkarn, Ph.D. 112 pages.

The objective of this research was to improve water resistance property of paperboard for packaging application by SF_6 plasma. 300 g/m^2 single-side coated Duplex board was selected for the study. The study composed of three sections. First section was to investigate effects of plasma conditions on water resistance property of paperboard. Three plasma conditions to be studied were RF power at 25, 50 and 75 W with gas pressure of 20, 50, 100 and 200 mTorr. Treatment time was fixed at 10 minute for this point of the study. The second section was the study on effects of treatment times on physical, mechanical and barrier properties of treated paperboard. Treatment times proposed for the study were at 2, 10, 60 and 600 second respectively where as plasma condition was fixed according to the best plasma condition derived from the first part of the study. The last section was the study on effects of storage times on water resistance property of treated paperboard. For the study, storage times were set for 28 days at regular warehouses of tropical regions (25-32°C, 48-74 %RH). According to the result of the first past, plasma condition at 50 W at 100 mTorr provided the best water resistance properties on paperboard surface. For the second part of the study, results showed that SF_6 plasma treatments significantly improved water resistance property of treated paperboards started from only 2 second treatment time ($p \leq 0.05$) and longer treatment time showed better water resistance properties. Further, plasma treatment had no affect on basis weight, thickness and moisture content of paperboard. However, brightness and colors of treated paperboard were slightly changed. Effects of plasma treatment on mechanical properties showed that plasma treatment had no effect on tensile strength of treated paperboards; however, MD compression strength as well as MD and CD folding endurance of treated paperboards were significantly lower than untreated sample ($p \leq 0.05$). For barrier property, plasma treatment significantly improved oil resistance property of treated paperboard ($p \leq 0.05$). However, water vapor and oxygen permeability of treated paperboard were significantly higher than untreated sample ($p \leq 0.05$). Moreover, the results showed that plasma treatment was more effective on uncoated paperboard surface. For the last section of the study, the results showed that water resistance of treated paperboards was decreased with longer storage time. However, for 60 second treatment sample, water resistance property remained unchanged.

____________________ ____________________ ___ / ___ / ____

Student's signature Thesis Advisor's signature

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ธัญญารัตน์ จิญกาญจน์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก ที่ให้คำแนะนำและเป็นที่ปรึกษาในทุกๆ เรื่อง ตลอดจนสนับสนุนทุนวิจัยทั้งด้านการเดินทางและที่พักในเชียงใหม่ ขอกราบขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์พรชัย ราชตนะพันธุ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม สำหรับคำแนะนำและการติดต่อประสานงานต่างๆ ขอกราบขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ธีรวรรณ บุญญวรรณ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่คอยให้ความรู้และคำแนะนำ ตลอดจนสนับสนุนทุนวิจัยในการดำรงชีพที่เชียงใหม่ และขอกราบขอบพระคุณอาจารย์อำพร เสน่ห์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม สำหรับคำปรึกษาและคำแนะนำระหว่างการดำเนินงานวิจัย นอกจากนี้ ขอกราบขอบพระคุณรองศาสตราจารย์วาณี ชนเห็นชอบ ประธานสอบวิทยานิพนธ์ และอาจารย์สุพจน์ ประทีปถิ่นทอง ผู้ทรงคุณวุฒิจากภายนอกมหาวิทยาลัย ที่กรุณาตรวจทานแก้ไขและให้คำแนะนำเพิ่มเติมจนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เสร็จสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณบริษัท กระดาษสหไทย จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์กระดาษแข็งสำหรับใช้ในการวิจัย และขอขอบพระคุณศูนย์วิจัยนิวตรอนพลังงานสูง มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ สำหรับความอนุเคราะห์สถานที่ สารเคมี และเครื่องมือต่างๆ ที่ใช้ในงานวิจัยนี้

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ภาควิชาเทคโนโลยีการบรรจุทุกท่านที่ให้ความเมตตากรุณาอบรมสั่งสอนและให้ความรู้ตลอดการศึกษา รวมทั้งเจ้าหน้าที่ภาควิชาเทคโนโลยีการบรรจุทุกท่านสำหรับคำแนะนำและการอำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องมือสำหรับทดสอบ ขอขอบพระคุณเจ้าหน้าที่ศูนย์วิจัยนิวตรอนพลังงานสูงและภาควิชาเทคโนโลยีการบรรจุ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ทุกท่าน สำหรับน้ำใจอันดีงามและความช่วยเหลือในทุกๆ ด้าน และขอบคุณเพื่อนๆ ภาควิชาเทคโนโลยีการบรรจุทุกท่าน โดยเฉพาะอย่างยิ่ง นายเกตุพิสิษฐ์ อนวัชชสุข ที่มีน้ำใจให้กันเสมอมา

ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อทวิช และคุณแม่นงลักษณ์ ถาวรวิริยะนันท์ ที่คอยให้กำลังใจ ความเข้าใจ และห่วงใยอยู่เสมอ ทั้งหมดนี้เป็นแรงผลักดันช่วยให้ข้าพเจ้ามีกำลังใจในการทำงานวิจัยจนสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

สุชาดา ถาวรวิริยะนันท์

กันยายน 2551

สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(4)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	3
การตรวจเอกสาร	4
อุปกรณ์และวิธีการ	40
อุปกรณ์	40
วิธีการ	41
ผลและวิจารณ์	47
สรุปและข้อเสนอแนะ	73
สรุป	73
ข้อเสนอแนะ	75
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	77
ภาคผนวก	86
ภาคผนวก ก วิธีการทดสอบ	87
ภาคผนวก ข ระบบการทำงานของเครื่องผลิตพลาสมาความดันต่ำระบบ ICP	104
ภาคผนวก ค ค่าทดสอบมุมสัมผัสแบบต่อเนื่อง (dynamic contact angle) ของกระดาษประยุกต์พลาสมา	107
ภาคผนวก ง ค่าทดสอบอิทธิพลของระยะเวลาในการเก็บต่อความสามารถในการต้านทานน้ำของกระดาษ	110
ประวัติการศึกษา และการทำงาน	112

สารบัญตาราง

ตารางที่ **หน้า**

ตารางที่		หน้า
1	พลังงานของโฟตอนในช่วงสเปกตรัมต่างๆ	25
2	ตัวอย่างแก๊สและของเหลวที่ใช้ในการสร้างพลาสมา	28
3	ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในพลาสมาซัลเฟอร์เฮกซะฟลูออไรด์	33
4	สมบัติของกระดาษก่อนการประยุกต์พลาสมา	48
5	มุมสัมผัส งานของการยึดติด และเวลาในการดูดซึมน้ำของกระดาษประยุกต์พลาสมา ที่กำลังคลื่นวิทยุและความดันแก๊สแตกต่างกัน	50
6	มุมสัมผัส งานของการยึดติด และเวลาในการดูดซึมน้ำของกระดาษประยุกต์พลาสมา ที่เวลาในการประยุกต์พลาสมาแตกต่างกัน	53
7	ลักษณะหยดน้ำบนพื้นผิวกระดาษที่ใช้เวลาในการประยุกต์พลาสมาแตกต่างกัน	55
8	น้ำหนักมาตรฐาน ความหนา และปริมาณความชื้นของกระดาษประยุกต์พลาสมา	56
9	สีของกระดาษประยุกต์พลาสมา	57
10	สีของกระดาษหลังผ่านการอบความร้อน	58
11	ความต้านทานแรงกดวงแหวน ความต้านทานต่อการพับ และความต้านทานแรงดึงของกระดาษประยุกต์พลาสมา	59
12	มุมสัมผัส งานของการยึดติด การดูดซึมน้ำ และเวลาในการดูดซึมน้ำของกระดาษประยุกต์พลาสมา	61
13	มุมสัมผัส การดูดซึมน้ำมัน และเวลาในการดูดซึมน้ำมันของกระดาษประยุกต์พลาสมา	65
14	อัตราการซึมผ่านของไอน้ำ และอัตราการซึมผ่านของแก๊สออกซิเจนของกระดาษประยุกต์พลาสมา	67
15	ธาตุองค์ประกอบบนพื้นผิวของกระดาษประยุกต์พลาสมา	72

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่ **หน้า**

ค1	มุมสัมผัสของหยดน้ำเมื่อเวลาผ่านไปของกระดาษหลังประยุกต์พลาสมา	108
ง1	เวลาในการดูดซึมน้ำของกระดาษด้านหลังภายหลังการประยุกต์พลาสมา เมื่อเก็บในอุณหภูมิ 25-32 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 48-74 เป็นเวลา 28 วัน	111

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	ลักษณะพื้นผิวของกระดาษ	4
2	โครงสร้างของโมเลกุลเซลลูโลส	5
3	มุมสัมผัส	14
4	เครื่องวัดมุมสัมผัส goniometer	15
5	ชุดลูกรีดของเครื่องจักรผลิตกระดาษ	17
6	สถานะทั้งสี่ของสสาร	20
7	ประเภทของพลาสมา	21
8	การเกิดแก๊สดิสชาร์จ	22
9	กระบวนการพลาสมาพอลิเมอร์ไรเซชัน	26
10	การปรับสภาพผิววัสดุพอลิเมอร์ด้วยพลาสมา	27
11	การประยุกต์พลาสมาในระบบสุญญากาศ	30
12	filamentary volume barrier discharge treatment	31
13	plasma jet	32
14	โมเลกุลของแก๊สซัลเฟอร์เฮกซะฟลูออไรด์	33
15	ลักษณะตัวอย่างกระดาษ (ก) ด้านหน้า และ (ข) ด้านหลัง	43
16	ลักษณะปรากฏของกระดาษ (ก) ด้านหน้า และ (ข) ด้านหลัง	47
17	การลดลงของมุมสัมผัสของหยดน้ำเมื่อเวลาผ่านไปของกระดาษประยุกต์พลาสมา (ก) กระดาษด้านหน้า และ (ข) กระดาษด้านหลัง	62
18	เวลาในการดูดซึมน้ำของกระดาษด้านหลังภายหลังการประยุกต์พลาสมา เมื่อเก็บในอุณหภูมิ 25-32 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 48-74 เป็นเวลา 28 วัน	64
19	ลักษณะพื้นผิวของกระดาษด้านหน้า ก่อนและหลังการประยุกต์พลาสมา ด้วยเครื่อง scanning electron microscope (SEM) กำลังขยาย 5,000 เท่า (ก) ไม่ประยุกต์ (ข) 2 วินาที (ค) 10 วินาที (ง) 60 วินาที และ (จ) 600 วินาที	69
20	ลักษณะพื้นผิวของกระดาษด้านหลัง ก่อนและหลังการประยุกต์พลาสมา ด้วยเครื่อง scanning electron microscope (SEM) กำลังขยาย 5,000 เท่า (ก) ไม่ประยุกต์ (ข) 2 วินาที (ค) 10 วินาที (ง) 60 วินาที และ (จ) 600 วินาที	70

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่ **หน้า**

21 ลักษณะความขรุขระของพื้นผิวกระดาษด้านหลัง ก่อนและหลังการประยุกต์พลาสมา ด้วยเครื่อง atomic force microscope (AFM) ในพื้นที่ 30×30 ไมโครเมตร (ก) ไม่ประยุกต์ (ข) 2 วินาที และ (ค) 600 วินาที 71

ภาพผนวกที่

ก1 ลักษณะการวัดมุมสัมผัสด้วยโปรแกรม AutoCAD 2006 98

ข1 เครื่องผลิตพลาสมาความดันต่ำของศูนย์วิจัยนิวตรอนพลังงานสูง มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ 105

ข2 ไดอะแกรมของเครื่องผลิตพลาสมาความดันต่ำ 106

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

SF_6	=	Sulferhexafluoride
MD	=	Machine direction
CD	=	Cross machine direction
ICP	=	Inductively coupled plasma discharge
SEM	=	Scanning electron microscopy
AFM	=	Atomic force microscopy
EDS	=	Energy dispersive X-ray spectrometry
XPS	=	X-ray photo electron spectrometry

การปรับปรุงสมบัติการต้านทานน้ำของกระดาษแข็งโดยพลาสมา ซัลเฟอร์เฮกซะฟลูออไรด์

The Improvement of Water Resistance Property of Paperboard by SF_6 Plasma

คำนำ

ในปัจจุบันอุตสาหกรรมภาชนะบรรจุมีมูลค่าโดยรวมทั่วโลกมากกว่า 5 แสนล้านดอลลาร์สหรัฐ โดยภาชนะบรรจุประเภทกระดาษมีสัดส่วนการผลิตคิดเป็นร้อยละ 36 ของการผลิตภาชนะบรรจุทั้งหมด (แนวหน้า, 2551) การที่ภาชนะบรรจุประเภทกระดาษเป็นที่นิยมใช้กันอย่างกว้างขวางและมีอัตราการขยายตัวค่อนข้างสูงเนื่องจากมีคุณสมบัติเด่นในเรื่องความแข็งแรง น้ำหนักเบา ราคาถูก สามารถออกแบบขนาดและรูปทรงตามความต้องการใช้งาน สามารถนำกลับมาใช้ใหม่และย่อยสลายโดยจุลชีพในธรรมชาติ จึงสามารถลดต้นทุนในการกำจัดภายหลังการใช้งาน อีกทั้งยังไม่ก่อให้เกิดมลพิษต่อสิ่งแวดล้อม (กรมส่งเสริมการส่งออก, 2545) อย่างไรก็ตามภาชนะบรรจุประเภทกระดาษมีข้อจำกัดที่สำคัญ คือ ความแข็งแรงจะลดลงเมื่อสัมผัสน้ำหรืออยู่ในสภาวะที่มีความชื้นสูง ส่งผลให้ภาชนะบรรจุเสียหายและไม่สามารถปกป้องผลิตภัณฑ์ที่อยู่ภายในได้ ดังนั้น การปรับปรุงสมบัติของกระดาษเพื่อเพิ่มความสามารถในการต้านทานน้ำให้ดีขึ้นจึงเป็นสิ่งจำเป็น

กระบวนการที่นิยมใช้ในการปรับปรุงสมบัติด้านการต้านทานน้ำของกระดาษโดยทั่วไป คือ การรีดประกบ (laminating) หรือการเคลือบ (coating) กระดาษด้วยสารหรือวัสดุที่มีสมบัติการต้านทานน้ำ เช่น พลาสติกหรือแวกซ์ ซึ่งส่งผลเสียต่อสิ่งแวดล้อมเนื่องจากพลาสติกเป็นพอลิเมอร์สังเคราะห์ จึงต้องใช้ระยะเวลานานในการย่อยสลายตามธรรมชาติ และยังต้องเพิ่มค่าใช้จ่ายในการกำจัดหลังการใช้งาน เนื่องจากต้องทำการแยกชั้นกระดาษออกจากวัสดุอื่นก่อนนำกลับไปบดเป็นเยื่อ ส่วนกระดาษเคลือบแวกซ์ไม่สามารถแยกชั้นได้และปัจจุบันยังไม่มีสถานที่สำหรับการรีไซเคิลกระดาษเคลือบแวกซ์ อีกทั้งยังไม่เป็นที่ยอมรับในบางประเทศ (ดวงทิพย์, 2550; Vaswani, 2005)

ปัจจุบันมีการตระหนักถึงปัญหาด้านสิ่งแวดล้อมมากขึ้น เริ่มมีการหันมาใช้สารหรือกระบวนการที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมเข้ามาใช้ในการปรับปรุงสมบัติของกระดาษมากขึ้น เช่น การเคลือบกระดาษด้วยพอลิเมอร์ที่ย่อยสลายได้ในธรรมชาติ (biopolymer) (Rhim *et al.*, 2006)

หรือการใช้เทคโนโลยีสะอาด เช่น เทคโนโลยีพลาสมา (plasma technology) ในการปรับสภาพผิวกระดาษ (Mukhopadhyay *et al.*, 2002; Vaswani, 2005; Wang and He, 2005)

เทคโนโลยีพลาสมา เป็นเทคโนโลยีปรับสภาพผิววัสดุที่กำลังได้รับความสนใจ เนื่องจากมีข้อดีหลายประการ เช่น สามารถใช้ได้กับวัสดุที่มีโครงสร้างซับซ้อน มีประสิทธิภาพสูงในการกระตุ้นปฏิกิริยาบนผิววัสดุในระดับนาโนเมตร เป็นกระบวนการแบบแห้งจึงไม่มีความชื้นที่อาจส่งผลเสียต่อวัสดุที่เป็นเส้นใย ประหยัดสารเคมี และเป็นเทคโนโลยีสะอาด เป็นต้น (Ellinghorst, n.d.; Kim *et al.*, 2006) จึงมีความเป็นไปได้สูงที่จะนำเทคโนโลยีพลาสมามาใช้ปรับสภาพผิวกระดาษให้สามารถต้านทานน้ำได้ดีขึ้นเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการใช้ในงานทางการบรรจุ

วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาอิทธิพลของกำลังคลื่นวิทยุและความดันแก๊สของพลาสมาซัลเฟอร์เฮกซะฟลูโอไรด์ต่อความสามารถในการต้านทานน้ำของกระดาษแข็ง

2. เพื่อศึกษาผลของเวลาในการประยุกต์พลาสมาซัลเฟอร์เฮกซะฟลูโอไรด์ต่อสมบัติทางกายภาพ (physical properties) สมบัติเชิงกล (mechanical properties) และสมบัติการสกัดกั้นการซึมผ่าน (barrier properties) ของกระดาษแข็ง

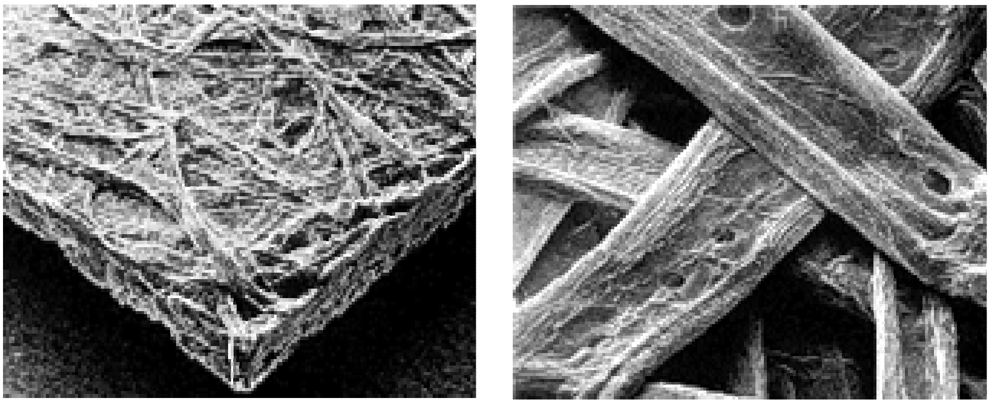
3. เพื่อศึกษาอิทธิพลของระยะเวลาการเก็บต่อความสามารถในการต้านทานน้ำของกระดาษแข็งภายหลังการประยุกต์ด้วยพลาสมาซัลเฟอร์เฮกซะฟลูโอไรด์

การตรวจเอกสาร

กระดาษ

1. โครงสร้างกระดาษ

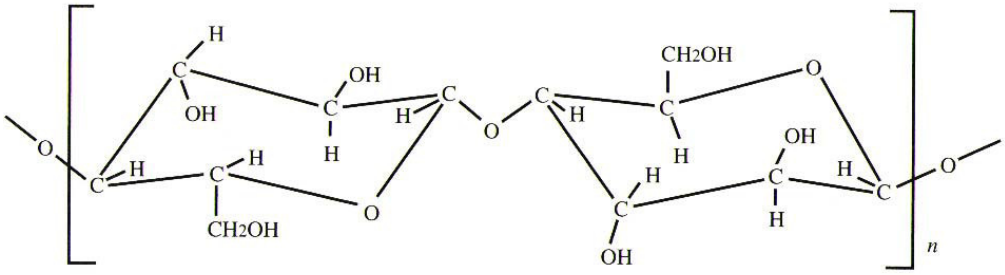
โครงสร้างกระดาษประกอบด้วยเส้นใยเซลลูโลส (cellulose fibers) จำนวนมากที่ซ้อนทับกันหลายๆ ชั้น ซึ่งจะยึดจับเป็นเนื้อเดียวกัน (homogeneous sheet) โดยการสานตัว (interweaving) หรือเกิดพันธะ (bonding) ระหว่างเส้นใยด้วยพันธะไฮโดรเจน (hydrogen bond) กระดาษเป็นวัสดุที่มีความเป็นรูพรุนสูง (สมหวัง, 2546) โดยลักษณะพื้นผิวของกระดาษแสดงดังภาพที่ 1



ภาพที่ 1 ลักษณะพื้นผิวของกระดาษ
ที่มา: College of Natural Resources (2002)

เซลลูโลส (cellulose) เป็นองค์ประกอบหลักของผนังเซลล์พืช เป็นพอลิแซคคาไลด์เชิงเส้น (linear polysaccharide) ที่ประกอบไปด้วยหน่วยของกลูโคส (glucose) จำนวนมากเชื่อมต่อกันเป็นโซ่ตรงด้วยพันธะบีตา-1-4 (ภาพที่ 2) ร้อยละ 70 ของเส้นใยเซลลูโลสเป็นโครงสร้างผลึก (crystalline structure) และร้อยละ 30 เป็นโครงสร้างอสัณฐาน (amorphous structure) (Vrajová and Krčma, 2006) ความแข็งแรงของเส้นใยเซลลูโลสเกิดขึ้นเนื่องจากการจัดเรียงตัวของหน่วยกลูโคสในสายพอลิเมอร์และพันธะไฮโดรเจนที่ยึดเส้นใยไว้ โดยพันธะไฮโดรเจนจะสูญเสียความแข็งแรงเมื่อเส้นใยเซลลูโลสสัมผัสกับน้ำ เนื่องจากโมเลกุลของน้ำเข้าไปแทรกระหว่างหมู่ไฮดรอกซิล (hydroxyl group) และออกซิเจน (oxygen) ในกระบวนการผลิตกระดาษ เมื่อน้ำถูกกำจัดออกไป

จะทำให้สายโซ่โมเลกุลอยู่ชิดกันและมีโอกาสที่หมู่ไฮดรอกซิลบนผิวหน้าของเส้นใยจะมาอยู่ใกล้กันและเกิดพันธะไฮโดรเจนขึ้นโดยตรง (ดวงทิพย์, 2550)



ภาพที่ 2 โครงสร้างของโมเลกุลเซลลูโลส
ที่มา: Humphries (2004)

2. องค์ประกอบของกระดาษ

กระดาษเป็นแผ่นวัสดุซึ่งได้จากการนำวัสดุหลายๆ ชนิดมาผสมให้เข้ากันแล้วนำไปทำเป็นแผ่น วัสดุที่ใช้เป็นส่วนผสมเหล่านี้ ได้แก่ เยื่อใยสั้น เยื่อใยยาว และสารเคมี โดยสามารถแบ่งเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนที่เป็นองค์ประกอบหลักของกระดาษ ได้แก่ ส่วนที่เป็นเส้นใย (fiber) หรือ เยื่อ (pulp) ซึ่งเป็นโครงสร้างของแผ่นกระดาษ และส่วนที่ไม่ใช่เส้นใย ซึ่งเป็นสารเติมแต่ง (additive) ใช้เติมผสมลงไปในส่วนเส้นใยเพื่อปรับปรุงสมบัติกระดาษให้ได้ตามวัตถุประสงค์การใช้งาน ซึ่งกระดาษส่วนใหญ่มีเยื่อผสมอยู่ในปริมาณร้อยละ 70-95 ของน้ำหนักกระดาษ นอกจากเยื่อใยสั้นและเยื่อใยยาวแล้ว ยังมีการนำเยื่อหมุนเวียน (recycle pulp) มาเป็นส่วนผสมในการผลิตกระดาษด้วย ซึ่งอัตราส่วนของเยื่อจะแตกต่างกันไปตามคุณภาพของกระดาษที่ต้องการใช้งาน (ดวงทิพย์, 2550)

2.1 ส่วนที่เป็นเส้นใย (fiber)

2.1.1 เยื่อใยยาว (needle pulp) ได้จากไม้ใบแคบ (softwood) เป็นไม้ที่ขึ้นบริเวณที่สูงอากาศเย็น โตช้า ใบมีลักษณะแคบเรียวยาว (needle) เส้นใยมีลักษณะหยาบ มีความแข็งแรงสูง มีความยาวประมาณ 3 มิลลิเมตร กว้างประมาณ 20-40 ไมครอน (1 ไมครอน = 0.001 มิลลิเมตร) ไม้ในกลุ่มนี้ได้แก่ สน (Pine) และสปรู๊ซ (Spruce) เป็นต้น

2.1.2 เยื่อใยสั้น (leaf pulp) ได้จากไม้ใบกว้าง (hardwood) เป็นไม้ที่ขึ้นในบริเวณเขตร้อน โตเร็ว ใบมีลักษณะกว้าง (leaf) เส้นใยมีลักษณะเล็ก ละเอียด ความแข็งแรงต่ำ มีความยาวประมาณ 1 มิลลิเมตร กว้างประมาณ 10-20 ไมครอน ไม้ในกลุ่มนี้ได้แก่ ยูคาลิปตัส (Eucalyptus) กระถินเทพา (Acacia) เบิร์ช (Birch) และแอสเพน (Aspen) เป็นต้น

ในประเทศไทยไม่มีแหล่งวัตถุดิบประเภทไม้ใบแคบ เนื่องจากภูมิประเทศไม่อำนวย แต่สำหรับไม้ใบกว้างมีการปลูกสวนป่ายูคาลิปตัสกันมากในบริเวณภาคตะวันออกและทางตอนใต้ของภาคตะวันออกเฉียงเหนือ เพื่อใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตเยื่อกระดาษ โดยเส้นใยของยูคาลิปตัสนั้นได้รับการยอมรับว่าเหมาะสมที่สุดในการนำมาผลิตเป็นกระดาษ
(แอ๊ดวานซ์ อะโกร, ม.ป.ป.)

2.1.3 เยื่อหมุนเวียน (recycle pulp) ได้จากเศษกระดาษที่ผ่านการใช้งานแล้วและเศษกระดาษที่เหลือจากการผลิตกระดาษ เศษกระดาษเหล่านี้จะถูกย่อยให้มีขนาดเล็กและผ่านกระบวนการผลิตเป็นเยื่อ โดยเยื่อที่ได้มีสมบัติตามเส้นใยเริ่มต้น อย่างไรก็ตาม กระบวนผลิตเยื่อส่งผลให้เยื่อหมุนเวียนที่ได้มีคุณภาพลดลงและมีความยาวของเส้นใยสั้นลง (Soroka, 2000)

2.2 ส่วนที่ไม่ใช่เส้นใย (non-fiber)

2.2.1 ตัวเติม (filler) เป็นสารเคมีที่เติมลงไปในกระบวนการผลิตกระดาษเพื่อช่วยอุดช่องว่างระหว่างเส้นใยและลดต้นทุนในการผลิต เนื่องจากสารตัวเติมส่วนมากมีราคาถูกกว่าเส้นใยและยังช่วยเพิ่มสมบัติทางทัศนศาสตร์ (optical properties) ของกระดาษ ทำให้กระดาษสว่างขึ้นและผิวกระดาษเรียบขึ้น ตัวอย่างสารตัวเติม ได้แก่ ดินขาว (kaolin clay) ไททาเนียมไดออกไซด์ (titanium dioxide) และแคลเซียมคาร์บอเนต (calcium carbonate) เป็นต้น

2.2.2 สารกันซึมภายใน (internal sizing agent) เป็นสารที่เติมลงในในขั้นตอนการผลิตเยื่อ เพื่อเพิ่มสมบัติการต้านทานน้ำและของเหลวให้กระดาษ ทำให้กระดาษมีอัตราการดูดซึมความชื้นลดลง ตัวอย่างสารกันซึมภายใน ได้แก่ ชันสน (rosin) ไข (wax) และยางมะตอย (asphalt) เป็นต้น

2.2.3 สารเพิ่มความแข็งแรงเมื่อเริ่มแห้ง (dry strength agent) เป็นสารที่เติมลงไปเพื่อเพิ่มแรงยึดเหนี่ยวของพันธะระหว่างเส้นใย ทำให้กระดาษมีความแข็งแรงเชิงกลเพิ่มขึ้น ตัวอย่าง

สารเพิ่มความแข็งแรงเมื่อเริ่มแห้ง ได้แก่ แป้งดัดแปร (modified starch) และแป้งมันสำปะหลัง เป็นต้น

2.2.4 สารเพิ่มความแข็งแรงเมื่อเปียก (wet strength agent) เป็นสารที่เติมลงไปเพื่อให้กระดาษที่เปียกน้ำมีความแข็งแรงไม่น้อยกว่าร้อยละ 50 ของความแข็งแรงเดิม ตัวอย่างสารเพิ่มความแข็งแรงเมื่อเปียก ได้แก่ เรซินสังเคราะห์ เป็นต้น

2.2.5 สารสีย้อม (dyes) เป็นสารที่เติมลงไปเพื่อให้กระดาษมีสีตามที่ต้องการ

2.2.6 สารฟอกนวล (optical brightening agent) เติมลงไปเพื่อเพิ่มความสว่างและลดการสะท้อนแสงของกระดาษ สารฟอกนวลใช้คู่กับสารสีย้อม โดยจะใช้สารฟอกนวลน้อยที่สุดเนื่องจากมีราคาสูง

2.2.7 สารเติมแต่งอื่นๆ ซึ่งทำหน้าที่ช่วยเสริมให้สารเติมแต่งที่กล่าวมาทำหน้าที่เฉพาะอย่างได้ดีขึ้น เช่น สารเพิ่มการตกค้าง (retention aid) สารควบคุมจุลชีวะ (microbiological control agent) และสารต้านการเกิดฟอง (defoamers) เป็นต้น (บุษกร และคณะ, 2545)

3. สมบัติของเยื่อและกระดาษ

สมบัติของเยื่อและกระดาษเกี่ยวข้องกับขั้นตอนการผลิตและการใช้งานสุดท้ายที่ต้องการ ซึ่งสามารถแบ่งออกได้เป็น 5 กลุ่ม คือ สมบัติทางกายภาพ สมบัติทางทัศนศาสตร์ สมบัติเชิงกล สมบัติการดูดซึม และสมบัติการสกัดกั้นการซึมผ่าน ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

3.1 สมบัติทางกายภาพ (physical properties)

3.1.1 น้ำหนักมาตรฐาน (basis weight) หมายถึง ค่าน้ำหนักต่อพื้นที่ของกระดาษ นิยมรายงานผลเป็นกรัมต่อตารางเมตร (g/m^2) หรือปอนด์ต่อ 1,000 ตารางฟุต ($lb/1000\ ft^2$) น้ำหนักมาตรฐานมีประโยชน์ในการควบคุมการผลิตกระดาษ นิยมใช้เป็นเกณฑ์ในการซื้อขายกระดาษ และเป็นตัวบ่งบอกถึงสมบัติด้านอื่นๆ เช่น กระดาษที่มีน้ำหนักมาตรฐานมากจะมีความแข็งแรง ความหนา และความทึบแสงมากกว่ากระดาษที่มีน้ำหนักมาตรฐานน้อย

3.1.2 ความหนา (thickness) หมายถึง ระยะห่างที่ตั้งฉากระหว่างผิวด้านบนและผิวด้านล่างของกระดาษ นิยมระบุหน่วยเป็นมิลลิเมตร (mm) หรือไมโครเมตร (µm) โดยทั่วไปเมื่อกระดาษมีน้ำหนักมาตรฐานเพิ่มขึ้น ความหนาของกระดาษมักจะเพิ่มขึ้น และทำให้กระดาษมีสมบัติด้านความแข็งแรงเพิ่มขึ้น

3.1.3 ความฟ่ามและความหนาแน่น (bulk and density) ความฟ่าม หมายถึง ปริมาตรของกระดาษต่อน้ำหนัก มีหน่วยเป็นลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม (cm^3/g) ความฟ่ามเป็นค่าที่แสดงส่วนกลับของความหนาแน่น ซึ่งความหนาแน่นแสดงถึงน้ำหนักของกระดาษต่อปริมาตร และมีหน่วยเป็นกรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร (g/cm^3) หรือปอนด์ต่อลูกบาศก์ฟุต (lb/ft^3) กระดาษแต่ละชนิดมีความหนาแน่นไม่เท่ากัน เช่น กระดาษเคลือบไขมีความหนาแน่นสูง กระดาษทิชชู่มีความหนาแน่นต่ำ เป็นต้น

3.1.4 ความชื้น (moisture content) หมายถึง ปริมาณน้ำในกระดาษ สามารถผันแปรได้ตามอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศ เป็นสมบัติที่มีความสำคัญมากตัวหนึ่ง เนื่องจากสัมพันธ์กับความแข็งแรงของกระดาษ ความชื้นในกระดาษมากเกินไป ทำให้กระดาษโค้งงอ เกิดรอยย่น ขนาดเปลี่ยนแปลง และเพิ่มความลำบากในการเคลื่อนย้าย แต่หากความชื้นในกระดาษน้อยเกินไป ส่งผลให้กระดาษกรอบ และขาดความยืดหยุ่น เป็นต้น (Kline, 1991)

3.1.5 ทิศทางของเส้นใย (directionality) หมายถึง แนวหรือทิศทางการเรียงตัวของเส้นใยเซลลูโลสในกระดาษ เมื่อพิจารณาการเกิดเป็นแผ่นกระดาษของน้ำเยื่อบนกระดาษ พบว่าเส้นใยเซลลูโลสส่วนมากมีการเรียงตัวในทิศทางการไหลและการเคลื่อนที่ของตะแกรงบนเครื่องผลิตกระดาษ ดังนั้น แนวการเรียงตัวของเส้นใยหรือแนวเส้นใยของกระดาษจึงอยู่ในแนวขนานเครื่องจักร หรือ machine direction (MD) เป็นส่วนใหญ่ ส่วนแนวของกระดาษที่ตั้งฉากกับแนว machine direction เรียกว่า แนวขวางเครื่องจักร หรือ cross direction (CD) เนื่องจากการเรียงตัวของเส้นใยในกระดาษทั้งสองแนวมีความแตกต่างกัน จึงมีผลให้สมบัติของกระดาษทั้งสองแนวแตกต่างกันด้วย โดยเฉพาะอย่างยิ่งสมบัติเชิงกลของกระดาษ (แอ๊ดวานซ์ อะโกร, ม.ป.ป.)

3.2 สมบัติทางทัศนศาสตร์ (optical properties)

3.2.1 ความสว่าง (brightness) ในวงการอุตสาหกรรมกระดาษ ความสว่าง หมายถึง ค่าการสะท้อนแสงของแสงสีน้ำเงินที่ช่วงคลื่น 457 นาโนเมตร จุดประสงค์ของการวัดความสว่าง

เพื่อต้องการดูผลของการฟอกเยื่อเป็นสำคัญ เยื่อกระดาษที่ยังไม่ได้ฟอกส่วนมากมีสีน้ำตาลเข้มจนถึงเหลืองอ่อน เนื่องจากลิกนินดูดซับแสงสีน้ำเงินไว้ ทำให้ค่าการสะท้อนแสงที่ได้ในช่วงแสงสีน้ำเงินมีค่าต่ำ แต่เมื่อนำเยื่อไปฟอกโดยการขจัดลิกนินออก เยื่อฟอกขาวที่ได้จะให้ค่าการสะท้อนแสงสีน้ำเงินสูงขึ้น

3.2.2 ความทึบแสง (opacity) เป็นคุณสมบัติที่จำเป็นสำหรับกระดาษพิมพ์และเขียน กระดาษต้องทึบแสงเพียงพอที่จะบังภาพหรืออักษรที่อยู่ด้านหลังไม่ให้ปรากฏจนเกิดปัญหาในการอ่านและความชัดเจนของสิ่งพิมพ์ ความทึบแสงสามารถวัดได้โดยเปรียบเทียบค่าการสะท้อนแสงสีเขียวที่ช่วงคลื่น 557 นาโนเมตร ระหว่างกระดาษแผ่นเดียวที่รองด้านหลังด้วยพื้นสีดำสนิทกับกระดาษที่วางซ้อนกันหนาจนแสงไม่ผ่านทะลุ โดยความทึบแสงและความสว่างขึ้นอยู่กับปัจจัยสำคัญ 2 ประการ คือ การกระเจิงแสงและการดูดซับแสง กระดาษที่ใช้เยื่อที่มีความสว่างสูงอาจมีปัญหาด้านความทึบแสง เพราะเยื่อจะมีความทึบแสงน้อยลง การใช้สารเติมแต่งช่วยเพิ่มการกระเจิงแสงในเนื้อกระดาษสามารถช่วยปรับปรุงความทึบแสงของกระดาษให้ดีขึ้น

3.2.3 ความมันวาว (gloss) เป็นลักษณะของผิวกระดาษที่สะท้อนแสง ณ มุมที่กำหนด โดยมุมสะท้อนเท่ากับมุมตกกระทบ สำหรับกระดาษนิยมให้เชิงมุม 75 องศา กับเส้นปกติ ถ้าแสงที่สะท้อนในเชิงมุม (specular) ดังกล่าวมีมากกว่าแสงที่สะท้อนแบบทั่วไป (diffuse) ผิวกระดาษจะดูมันวาวมาก

3.2.4 ความขาว (whiteness) เป็นสมบัติที่แตกต่างจากความสว่าง มนุษย์เราจะรู้สึกว่ากระดาษหรือวัสดุใดมีสีขาวกว่าอีกสิ่งหนึ่ง ถ้ากระดาษนั้นสะท้อนแสงในช่วงคลื่นที่ตามองเห็นออกมาสม่ำเสมอกว่า การย้อม (tinting) กระดาษขาวด้วยสีม่วงหรือสีน้ำเงินสามารถทำให้กระดาษขาวขึ้น เนื่องจากแสงสีเหลืองและแสงสีแดงถูกดูดซับไว้มากขึ้นจึงถูกสะท้อนออกมาน้อยลง เมื่อวัดค่าความสว่างจะพบว่าลดลงเล็กน้อย เนื่องจากสีที่ใส่ลงไปในกระดาษจะถูกดูดกลืนแสงไว้ แต่สีน้ำเงินจะมีผลกระทบต่อค่าความสว่างน้อยกว่าสีอื่น ซึ่งการใช้สารฟอกนวลในกระดาษช่วยทำให้กระดาษมีการสะท้อนแสงในช่วงคลื่นสีม่วงและสีน้ำเงินมากขึ้น กระดาษจึงขาวขึ้นเมื่อดูด้วยแสงแดดหรือแสงที่มีปริมาณรังสีอัลตราไวโอเลตใกล้เคียงกับแสงธรรมชาติในเวลากลางวัน (บุษกร และคณะ, 2545; แอ๊ดวานซ์ อะโกร, ม.ป.ป.)

3.3 สมบัติเชิงกล (mechanical properties)

3.3.1 ความต้านทานแรงดึง (tensile strength) เป็นความสามารถของกระดาษในการต้านทานแรงดึงที่มากระทำที่ปลายทั้งสองด้านของตัวอย่างที่มีขนาดตามมาตรฐานกำหนด วัดค่าออกมาเป็นแรงที่ใช้ดึงให้ตัวอย่างขาด มีหน่วยเป็นกิโลนิวตันต่อเมตร (kN/m) หรือปอนด์ต่อนิ้ว (lb/in) ความต้านทานแรงดึงมีความสำคัญสำหรับกระดาษที่ต้องผ่านการพิมพ์ เนื่องจากในเครื่องพิมพ์จะมีลูกกลิ้งสำหรับดึงให้กระดาษเคลื่อนที่ไปข้างหน้าด้วยความเร็วสูง นอกจากนี้ยังจำเป็นสำหรับภาชนะบรรจุประเภทกระดาษที่ต้องรองรับแรงดึงได้ดี เช่น ถุงกระดาษ โดยปัจจัยที่มีผลต่อความต้านทานแรงดึงของกระดาษ ได้แก่ ชนิดเยื่อ ปริมาณการบดเยื่อ ปริมาณการกดรีดน้ำ น้ำหนักมาตรฐานกระดาษ ปริมาณของสารเติมแต่ง และปริมาณความชื้นในกระดาษ เป็นต้น

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

3.3.3 ความต้านทานแรงกดวงแหวน (ring crush strength) หมายถึง ความสามารถของกระดาษในการต้านทานแรงกดในแนวระนาบเดียวกับกระดาษจนขอบกระดาษหักพับ มีหน่วยเป็นกิโลนิวตันต่อเมตร (kN/m) เป็นค่าที่นิยมใช้ทดสอบกระดาษแข็งและกระดาษกระดาษลูกฟูก

3.3.4 ความต้านทานการพับ (fold strength) หมายถึง จำนวนครั้งของการหักพับไปมาของกระดาษจนกระทั่งกระดาษขาดออกจากกัน โดยการใช้แรงดึงในการทดสอบตามมาตรฐานกำหนด เช่น หนึ่งกิโลกรัม เป็นต้น พับกระดาษด้วยมุม 270 องศา ความต้านทานการพับมีความจำเป็นสำหรับกระดาษที่นำไปผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ที่ต้องมีการพับมาก เช่น ซองจดหมาย และกล่องกระดาษ เป็นต้น (Kline, 1991)

3.4 สมบัติการดูดซึม (absorption properties)

สมบัติการดูดซึมของกระดาษที่พบได้บ่อยและมีความสำคัญต่อการนำกระดาษไปใช้ประโยชน์ได้แก่ การดูดซึมน้ำ น้ำมัน และหมึกพิมพ์ เป็นต้น ซึ่งนิยมวัดเป็นปริมาณของของเหลวที่ถูกดูดซึมทั้งหมดต่อพื้นที่และเวลาที่กำหนด ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับกระดาษว่ามีความสามารถในการดูดซึมของเหลวชนิดนั้นมากน้อยเพียงใด (ดวงทิพย์, 2550)

3.5 สมบัติการสกัดกั้นการซึมผ่าน (barrier properties)

กระดาษเป็นวัสดุที่มีรูพรุนสูง ทำให้กระดาษมีสมบัติการสกัดกั้นการซึมผ่านของแก๊สและไอน้ำต่ำ เนื่องจากแก๊สหรือไอน้ำสามารถซึมผ่านเข้าไประหว่างรูพรุนหรือช่องว่างระหว่างเส้นใยกระดาษได้ดี

นอกจากนี้ เส้นใยหรือเยื่อส่วนใหญ่ที่ใช้ในการผลิตกระดาษมีความสามารถในการดูดคายความชื้น(hygroscopic) ทำให้สมบัติทางกายภาพของเส้นใยเปลี่ยนแปลงไป จึงอาจมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติของกระดาษ เช่น การเพิ่มขึ้นหรือลดลงของน้ำหนักพื้นฐาน และความแข็งแรงของกระดาษ เป็นต้น การที่กระดาษมีความสามารถในการดูดคายความชื้นทำให้กระดาษสามารถดูดความชื้นจากบรรยากาศและสูญเสียความชื้นสู่บรรยากาศได้ โดยอัตราเร็วในการดูดคายความชื้นของกระดาษขึ้นอยู่กับปริมาณความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศและอุณหภูมิในขณะนั้น เมื่อความชื้นสัมพัทธ์หรืออุณหภูมิในอากาศเปลี่ยนแปลงไปเพียงเล็กน้อย ปริมาณความชื้นในกระดาษก็จะเปลี่ยนแปลงเช่นกัน (ดวงทิพย์, 2550) ดังนั้น ในการทดสอบสมบัติต่างๆ ของกระดาษ จึงต้องกำหนดสภาวะที่ใช้ในการทดสอบอย่างชัดเจน คือ ก่อนทำการทดสอบต้องมีการปรับสภาวะของแผ่นตัวอย่างกระดาษ เช่น มาตรฐาน ISO 187 กำหนดให้นำแผ่นตัวอย่างปรับสภาวะที่ 23 ± 1 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 50 ± 2 ส่วนประเทศในเขตร้อนชื้นอาจมีการปรับสภาวะที่ 27 ± 1 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 65 ± 2 เป็นต้น (นวพร, 2549)

4. ประเภทของกระดาษ

กระดาษที่ใช้สำหรับผลิตเป็นภาชนะบรรจุอาจสามารถแบ่งตามความแข็งแรงของกระดาษออกเป็น 3 ประเภท ดังต่อไปนี้ (บุษกร และคณะ, 2545)

4.1 กระดาษ (paper) หมายถึง วัสดุที่ได้จากการสานอัดแน่นของเส้นใยจากพืชจนเป็นแผ่นบาง โดยทั่วไปมีความหนาไม่เกิน 0.012 นิ้ว หรือน้ำหนักมาตรฐาน (basis weight) ไม่เกิน 225 กรัมต่อตารางเมตร นิยมนำมาผลิตเป็นภาชนะบรรจุประเภทซองกระดาษ และถุงกระดาษ เป็นต้น

4.2 กระดาษแข็ง (paperboard) หมายถึง กระดาษที่มีความหนามากกว่า 0.012 นิ้ว มีความแข็งแรงมากกว่ากระดาษทั่วไป นิยมนำมาผลิตเป็นกล่องกระดาษแข็ง ซึ่งเป็นภาชนะบรรจุประเภทขายปลีกที่ได้รับความนิยมสูงสุด กระดาษแข็งที่ใช้ผลิตกล่องสามารถแบ่งย่อยออกเป็น 2 ประเภท (Mew 6 Design, 2003) ดังนี้

4.2.1 กระดาษกล่องขาวเคลือบ (duplex board) เป็นกระดาษแข็งที่เกิดจากการซ้อนกันหลายๆ ชั้นของเยื่อและเศษกระดาษโดยการรีดประกบเป็นแผ่นเดียวกัน พร้อมทั้งมีการเคลือบสารเคมีที่ผิวหน้าเพื่อประโยชน์ในด้านการพิมพ์สอดสีที่สวยงาม นิยมใช้เป็นภาชนะบรรจุชั้นในสำหรับสินค้าต่างๆ เช่น อาหาร เบเกอรี่ เครื่องสำอาง ผงซักฟอก และเครื่องใช้ไฟฟ้า เป็นต้น

4.2.2 กระดาษกล่องขาวไม่เคลือบ (uncoated duplex board) เป็นกระดาษแข็งที่มีลักษณะใกล้เคียงกับกระดาษแข็งเคลือบ แต่มีเนื้อกระดาษหยาบกว่าและสีขาวของกระดาษมีความไม่สม่ำเสมอ

4.3 กระดาษลูกฟูก (corrugated board) เป็นกระดาษที่ประกอบด้วยกระดาษผิว (liner) และกระดาษลอนลูกฟูก (corrugated medium) เรียงประกบติดสลับชั้นกัน นิยมผลิตเป็นกล่องกระดาษลูกฟูกเพื่อใช้ในการขนส่ง มีความแข็งแรงมากกว่ากล่องกระดาษแข็ง กระดาษลูกฟูกสามารถแบ่งย่อยออกเป็น 4 ประเภท ตามความแข็งแรงได้ดังนี้ (ประชิด, 2531)

4.3.1 กระดาษลูกฟูกสองชั้น (single faced corrugated) ประกอบด้วยลอนลูกฟูกหนึ่งลอนปะติดกับกระดาษแผ่นเรียบหนึ่งแผ่น

4.2.2 กระดาษลูกฟูกสามชั้น (single wall corrugated) ประกอบด้วยลอนลูกฟูกหนึ่งลอนปะติดกับกระดาษแผ่นเรียบ 2 แผ่น

4.3.3 กระดาษลูกฟูกห้าชั้น (double wall corrugated) ประกอบด้วยกระดาษแผ่นเรียบ 3 แผ่น สลับกับลอนลูกฟูก 2 แผ่น กระดาษลูกฟูกชนิดนี้จะมีความแข็งแรงมากกว่ากระดาษลูกฟูกสามชั้น

4.3.4 กระดาษลูกฟูกเจ็ดชั้น (triple wall corrugated) ประกอบด้วยกระดาษแผ่นเรียบ 4 แผ่น สลับกับลอนลูกฟูก 3 แผ่น เป็นกระดาษลูกฟูกที่มีความแข็งแรงมากขึ้น นิยมใช้กับการบรรจุขนาดใหญ่และต้องการความแข็งแรงสูง

5. การทดสอบระดับความต้านทานน้ำของกระดาษ

การทดสอบที่ใช้เพื่อวัดระดับความต้านทานน้ำของกระดาษโดยทั่วไปอาจแบ่งเป็น 3 วิธีด้วยกัน ได้แก่

5.1 Cobb test

Cobb test เป็นวิธีที่ง่ายและใช้อุปกรณ์ไม่ยุ่งยาก อีกทั้งยังมีความยืดหยุ่นต่อชนิดของของเหลวที่ใช้ วิธีนี้จึงนิยมใช้ในการทดสอบระดับความต้านทานน้ำของกระดาษมากที่สุด อุปกรณ์ของ Cobb test ประกอบด้วยฐานที่ทำจากโลหะและวงแหวนโลหะ ก่อนการทดสอบจะมีการชั่งน้ำหนักของกระดาษตัวอย่างไว้ โดยตัวอย่างมีขนาดใหญ่กว่าวงแหวนเล็กน้อย นำตัวอย่างวางบนฐานโลหะทับด้วยวงแหวนโลหะ จากนั้นเทของเหลวลงในบริเวณวงแหวนที่รู้พื้นที่แน่นอน ทิ้งไว้เป็นระยะเวลาหนึ่งจึงเทของเหลวออกจากวงแหวน ซับของเหลวส่วนเกินออกจากผิวตัวอย่างและนำตัวอย่างไปชั่งน้ำหนักอีกครั้ง รายงานผลเป็นน้ำหนักของของเหลวที่ถูกกระดาษตัวอย่างดูดซับไว้ต่อพื้นที่กระดาษ (กรัมต่อตารางเมตร) (ดวงทิพย์, 2550)

5.2 absorption time

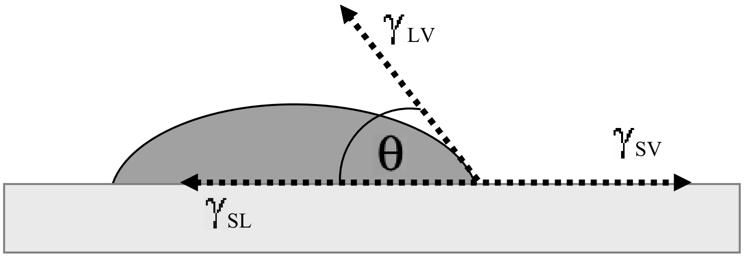
absorption time เป็นการทดสอบสมบัติการดูดซึมของเหลวของวัสดุประเภทเส้นใย โดยการหยดหยดของเหลวที่มีปริมาตรคงที่ลงบนผิววัสดุ และจับเวลาในการที่หยดของเหลวหนึ่งหยดใช้ในการซึมผ่านลงในวัสดุนั้น ซึ่งเวลาที่ได้เป็นตัวบ่งชี้ความสามารถในการดูดซับของเหลวของวัสดุ อย่างไรก็ตาม ในกรณีของน้ำ เวลาที่ใช้ในการดูดซับน้ำหนึ่งหยด (water absorption time)

จะถูกกำหนดไว้สูงสุดที่ 200 นาที เนื่องจากที่ระยะเวลานานกว่านี้จะพิจารณาว่าปริมาตรของหยดน้ำหายไปเนื่องจากเกิดการระเหย (สตรีรัตน์, 2550)

5.3 contact angle

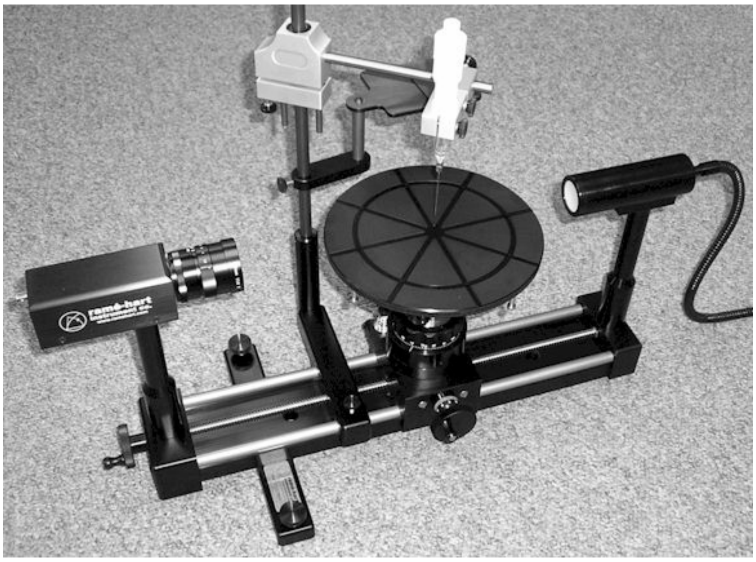
การวัดมุมสัมผัส (contact angle, θ) ของหยดของเหลวบนพื้นผิววัสดุสามารถบ่งบอกถึงพลังงานผิวของวัสดุนั้นๆ ได้ มุมสัมผัส คือ มุมที่เกิดขึ้นระหว่างรอยต่อระหว่างของเหลวและแก๊สกับพื้นผิวของแข็ง มุมสัมผัสเป็นค่าเฉพาะของสารกับพื้นผิว แนวคิดโดยทั่วไป คือ การวัดด้วยหยดของของเหลวบนพื้นผิวของแข็งในแนวระนาบ ซึ่งแสดงให้เห็นถึงสมบัติการเปียกของของแข็งชนิดนั้น (ภาพที่ 3) หยดที่มีมุมสัมผัสขนาดใหญ่จะไม่ชอบน้ำ (hydrophobic) ลักษณะเช่นนี้แสดงว่ามีการเปียก (wettability) การยึดติด (adhesion) และพลังงานผิว (surface energy) ต่ำ ส่วนหยดที่มีมุมสัมผัสขนาดเล็กจะชอบน้ำ (hydrophilic) ลักษณะเช่นนี้แสดงว่ามีการเปียก การยึดติดและพลังงานผิวที่สูงกว่า (พันธวัฒน์, 2547; ประดุง, 2550)

การวัดมุมสัมผัสมีอยู่ 2 แบบ คือ แบบสถิตศาสตร์ (static) เป็นการวัดมุมสัมผัส ณ เวลาใดเวลาหนึ่ง และแบบพลศาสตร์ (dynamic) เป็นการวัดมุมสัมผัสอย่างต่อเนื่องในช่วงเวลาใดเวลาหนึ่ง ในการวัดมุมสัมผัสจะใช้เครื่องมือที่เรียกว่า goniometer (ภาพที่ 4) โดยใช้กล้องที่ติดภายในเครื่องจับภาพลักษณะของของเหลวบนวัสดุที่เป็นของแข็ง และวัดค่ามุมสัมผัสระหว่างหยดของเหลวกับพื้นผิววัสดุ และแปลผลที่ได้ออกมาเป็นค่าพลังงานผิวโดยอัตโนมัติ (Wikipedia, 2008)



ภาพที่ 3 มุมสัมผัส

ที่มา: Wikipedia (2008)



ภาพที่ 4 เครื่องวัดมุมสัมผัส goniometer
ที่มา: Wikipedia (2008)

ค่ามุมสัมผัสมีความสัมพันธ์กับแรงตึงผิว (γ , surface tension) ของวัตถุ ดังนี้

$$\gamma_{LV} \cos\theta = \gamma_{SV} - \gamma_{SL} \quad (1)$$

เมื่อ θ คือ มุมสัมผัส (contact angle) ที่ได้จากการทดลอง
γ_{LV} คือ แรงตึงผิวระหว่างของเหลวกับแก๊ส (liquid/gas)
γ_{SV} คือ แรงตึงผิวระหว่างของแข็งกับแก๊ส (solid/gas)
γ_{SL} คือ แรงตึงผิวระหว่างของแข็งกับของเหลว (solid/liquid)

ค่าที่ต้องการรู้ คือ ค่าแรงตึงผิวระหว่างของแข็งกับแก๊ส (γ_{SV}) หรือ แรงตึงผิวของของแข็ง (γ_{S}) แต่เนื่องจากแรงตึงผิวระหว่างของแข็งกับของเหลว (γ_{SL}) ไม่สามารถวัดหาค่าได้โดยตรง ในขณะที่แรงตึงผิวระหว่างของเหลวกับแก๊ส (γ_{LV}) หรือ แรงตึงผิวของของเหลว (γ_{L}) สามารถวัดค่าได้โดยตรง โดยแรงตึงผิวของน้ำมีค่าเท่ากับ 72.8 ดายน์ต่อเซนติเมตร จากสมการ (1) จะเห็นว่ารูปแบบสมการมี 1 สมการ กับ 2 ตัวแปร จึงเป็นไปไม่ได้ที่จะแก้สมการหาค่าแรงตึงผิวของของแข็งออกมาได้ จึงได้มีการหาวิธีประมาณค่าแรงตึงผิวของของแข็งขึ้นมา ซึ่งในปัจจุบันมีอยู่หลายวิธี โดยแต่ละวิธีให้ค่าแรงตึงผิวของของแข็งที่ต่างกันออกไป ซึ่งอาจต่างกันถึงร้อยละ 25 ดังนั้น จึงยังไม่มีวิธีไหนที่สามารถวัดค่าแรงตึงผิวของของแข็งได้อย่างถูกต้อง (ประดุง, 2550)

อย่างไรก็ตาม นอกจากค่าแรงตึงผิวของของแข็งแล้วยังมีค่าอื่นๆ ที่เกี่ยวข้องกับมุมสัมผัส และสามารถบอกได้ถึงการมีสมบัติการดูดซึมหรือไม่ดูดซึมน้ำของวัสดุ ซึ่งสามารถหาได้โดยตรง เป็นค่าที่แสดงถึงความสัมพันธ์ของการยึดเหนี่ยวกันระหว่างของเหลวกับของแข็ง เช่น ค่างานของการยึดติด (work of adhesion, W_a) ซึ่งเป็นค่าที่บอกถึงแรงที่ต้องใช้ในการแยกของเหลวออกจากของแข็ง ถ้างานของการยึดติดมีค่ามาก แสดงว่าต้องใช้แรงในการแยกของเหลวออกจากของแข็งมาก แต่ถ้างานของการยึดติดมีค่าน้อย แสดงว่าใช้แรงน้อยในการแยกของเหลวออกจากของแข็ง โดยงานของการยึดติดมีหน่วยเป็น ดายน์ต่อเซนติเมตร (dynes/cm) และมีสมการความสัมพันธ์ ดังนี้ (Schroder, 1999)

$$W_a = \gamma_{SV} + \gamma_{LV} - \gamma_{SL} \qquad (2)$$

เมื่อ W_a คือ งานของการยึดติด (work of adhesion) ของหยดของเหลวบนผิวของแข็ง

และเมื่อรวมสมการ (1) กับ (2) จะได้สมการดังนี้

$$W_a = \gamma_{LV}(1 + \cos\theta)$$

หรือเขียนได้ว่า

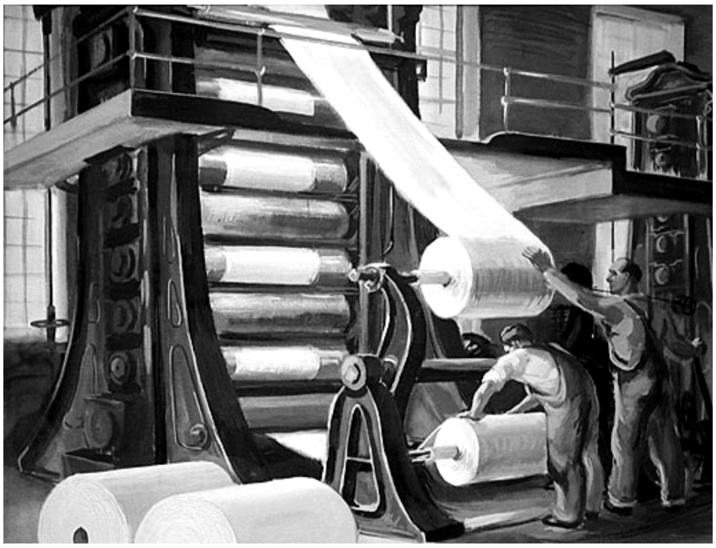
$$W_a = \gamma_{L}(1 + \cos\theta) \qquad (3)$$

การปรับสภาพผิวกระดาษ

การปรับสภาพผิวกระดาษ (paper surface modification) เป็นความต้องการของอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องกับกระดาษที่จะปรับปรุงคุณภาพกระดาษ เพื่อให้สามารถใช้งานได้ตามความต้องการ ในด้านของอุตสาหกรรมภาชนะบรรจุ ต้องการปรับสภาพผิวกระดาษให้สามารถต้านทานน้ำเพิ่มขึ้น เพื่อเพิ่มความแข็งแรงให้กับกล่องกระดาษ ซึ่งความแข็งแรงของกล่องกระดาษจะลดลงเมื่อสัมผัสน้ำหรือความชื้น การปรับสภาพผิวกระดาษมีอยู่ด้วยกัน 2 วิธี คือ การปรับสภาพผิวทางกายภาพ (physical modification) และการปรับสภาพผิวทางเคมี (chemical modification)

1. การปรับสภาพผิวทางกายภาพ

การปรับสภาพผิวกระดาษด้วยวิธีทางกายภาพอยู่ในขั้นตอนของชุดขัดผิว (calender) ในกระบวนการผลิตกระดาษ โดยกระดาษถูกรีดผ่านชุดลูกรีด ซึ่งเป็นชุดลูกกลิ้งโลหะวางเรียงซ้อนกันในแนวตั้ง (ภาพที่ 5) ซึ่งให้แรงกดไปที่กระดาษทำให้กระดาษมีผิวเรียบมากขึ้น มีความหนาสม่ำเสมอ ความมันวาว (gloss) และมีความเหมาะสมในการพิมพ์มากขึ้น (Biermann, 1996)



ภาพที่ 5 ชุดลูกรีดของเครื่องจักรผลิตกระดาษ
ที่มา: Paper Discovery Center (2007)

2. การปรับสภาพผิวทางเคมี

การปรับสภาพผิวทางเคมีมีวัตถุประสงค์เพื่อให้กระดาษมีสมบัติของผิวหน้าตามต้องการ เช่น เพื่อเพิ่มความแข็งแรงของผิวกระดาษ เพื่อเพิ่มความต้านทานน้ำ หรือ เพิ่มความต้านทานไขมันและน้ำมัน เป็นต้น การปรับสภาพผิวทางเคมีสามารถแบ่งเป็น 2 ประเภท (Biermann, 1996) ดังนี้

2.1 การฉาบด้วยสารกันซึม (surface sizing)

การฉาบด้วยสารกันซึมเป็นการทำให้ผิวกระดาษต้านทานการซึมผ่านของน้ำได้มากขึ้น อยู่ในขั้นตอนของชุดฉาบผิว (size press) ในกระบวนการผลิตกระดาษ วัตถุประสงค์หลักเพื่อให้กระดาษมีสมบัติดีขึ้น เหมาะกับการนำไปใช้งาน โดยกระดาษจะผ่านการฉาบด้วยสารกันซึม ความ

พรุนของกระดาษจะลดลงเนื่องจากสารกันซึมไปอุดรูเล็กๆ ที่ผิวกระดาษ ทำให้ความต้านทานการถอนผิว (picking resistance) ความต้านทานการดูดซึมน้ำ (water resistance) และความเรียบ (smoothness) ของกระดาษดีขึ้น

2.2 การเคลือบ (coating)

การเคลือบมีวัตถุประสงค์หลักเพื่อเพิ่มคุณภาพในการพิมพ์และเพิ่มสมบัติบางประการให้เป็นไปตามความต้องการในการใช้งานมากขึ้น นิยมเคลือบผิวกระดาษด้วยสารเติมแต่ง โดยมีสารยึดสารเติมแต่งให้ติดบนผิวกระดาษ เช่น การเคลือบด้วยสารสี และการเคลือบเพื่อปรับสภาพผิว ซึ่งช่วยให้กระดาษมีผิวเรียบและสว่างขึ้น ความสามารถในการพิมพ์ดีขึ้น หรือเพื่อตกแต่งลักษณะปรากฏของงานพิมพ์ การเคลือบเพื่อนำไปใช้งานด้านอื่นๆ เช่น การเคลือบด้วยพอลิเมอร์หรือวัสดุอื่นๆ เพื่อเพิ่มสมบัติการต้านทานน้ำและไขมันสำหรับภาชนะบรรจุอาหารแช่แข็ง เป็นต้น

วิธีการเคลือบสามารถแบ่งเป็น 4 ประเภท (อรสิริ, 2545) ดังนี้

2.2.1 การเคลือบโดยใช้แปรง (brush application) เป็นวิธีการที่เก่าแก่ที่สุด ทำโดยการพาสารเคลือบไปเคลือบกระดาษด้วยแปรงที่หมุนต่อเนื่องหลักการคล้ายการทาสี

2.2.2 การเคลือบโดยลูกกลิ้ง (roll application) ซึ่งมีทั้งแบบควบคุมปริมาณสารเคลือบ (pre-metering) เช่น metering nip, dip roll and doctor blade coater และ gravure coater เป็นต้น ส่วนวิธีที่ไม่ควบคุมปริมาณสารเคลือบได้แก่ การใช้ squeeze roll, upside-down knife และ air knife เป็นต้น

2.2.3 การเคลือบโดยการพ่นฝอย (spray application) ทำได้โดยการพ่นสารเคลือบลงบนผิวกระดาษโดยตรง

2.2.4 การเคลือบโดยวิธี casting วิธีนี้ทำโดยเทสารละลายลงบนกระดาษหรือวัสดุต่างๆ และทำให้สารเคลือบแห้งโดยใช้ความร้อน เช่น ลมร้อนหรือลูกกลิ้งร้อน เป็นต้น

ในช่วงระยะเวลา 10 ปีที่ผ่านมา วิธีต่างๆ ที่ใช้ในการปรับสภาพผิววัสดุได้มีการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง ซึ่งนอกจากวิธีการปรับสภาพผิวกระดาษดังที่กล่าวมาแล้ว วิธีการประยุกต์พลาสมา

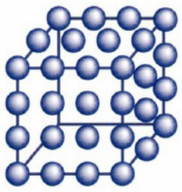
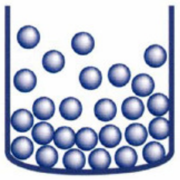
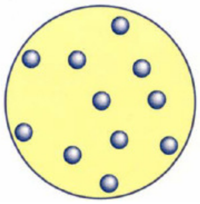
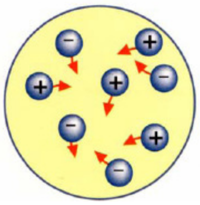
(plasma treatment) ยังเป็นอีกวิธีหนึ่งที่กำลังได้รับความสนใจในการนำมาปรับสภาพผิวกระดาษ ซึ่งเทคโนโลยีการปรับสภาพผิววัสดุด้วยพลาสมานั้น มีข้อดีหลายประการ เช่น สามารถใช้ได้กับวัสดุที่มีโครงสร้างซับซ้อน มีประสิทธิภาพสูงในการกระตุ้นปฏิกิริยาบนผิววัสดุต่างๆ ฟิล์มที่เคลือบมีความบางในระดับนาโนเมตร เป็นกระบวนการแบบแห้งจึงไม่มีความชื้นที่อาจส่งผลเสียต่อวัสดุที่เป็นเส้นใย ประหยัดสารเคมี และเป็นเทคโนโลยีสะอาดจึงไม่ก่อให้เกิดสารเคมีที่เป็นของเสีย เป็นต้น (Ellinghorst, 2006; Kim *et al*, 2006)

พลาสมา

โดยทั่วไปนิยมกล่าวว่าพลาสมาเป็นสถานะที่สี่ของสสาร นั่นคือจากสสารเริ่มต้นในสถานะของแข็ง เมื่อเพิ่มพลังงานหรือความร้อนให้กับสสารจนถึงระดับหนึ่ง สสารในสถานะของแข็งก็จะหลอมกลายเป็นของเหลว เมื่อให้พลังงานต่อไปจากของเหลวก็จะระเหยกลายเป็นแก๊ส และถ้ายังให้พลังงานแก่สสารต่อไปอีก อะตอมของแก๊สก็จะแตกตัวเป็นอิเล็กตรอนอิสระและไอออนกลายเป็นสถานะพลาสมา ซึ่งเป็นสถานะที่มีพลังงานสูง โดยเรียกการเกิดสถานะทั้งสี่นี้ว่า “4 state of matter” (ภาพที่ 6) (Mitsuharu, 1992)

อย่างไรก็ตาม แก๊สที่อยู่ในสภาวะแตกตัวใดๆ ไม่อาจเรียกว่าเป็นพลาสมาได้ทั้งหมด Chen (1984) ได้นิยามความหมายของพลาสมาไว้ว่า “พลาสมา คือ แก๊สซึ่งมีลักษณะประหนึ่งเป็นกลางทางไฟฟ้า (quasineutral gas) ประกอบด้วยอนุภาคประจุและอนุภาคเป็นกลาง โดยแสดงพฤติกรรมร่วม (collective behavior)” โดยคำว่า พฤติกรรมร่วม หมายถึง การเคลื่อนที่ของอนุภาคในพลาสมาในตำแหน่งใดๆ จะส่งผลต่อพลาสมาไม่เฉพาะแต่ในบริเวณนั้นเท่านั้น แต่ยังส่งผลต่อพลาสมาที่อยู่ในตำแหน่งที่ไกลออกไปด้วย ทั้งนี้เพราะเมื่ออนุภาคประจุภายในพลาสมามีการเคลื่อนที่ อนุภาคเหล่านี้จะทำให้ความหนาแน่นของประจุบวกหรือประจุลบในพลาสมาบริเวณนั้นเปลี่ยนแปลงไปจึงทำให้เกิดสนามไฟฟ้าขึ้น สนามไฟฟ้าก่อให้เกิดกระแสไฟฟ้า ซึ่งจะเหนี่ยวนำให้เกิดสนามแม่เหล็กด้วยเช่นกัน ดังนั้น สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นจึงส่งผลต่อการเคลื่อนที่ของอนุภาคประจุตัวอื่นๆ ที่อยู่ไกลออกไป (ธีรวรรณ, 2550)

ศรีเพ็ญ (2547) ได้ให้ความหมายของพลาสมาว่า “พลาสมา คือ ตัวกลางที่สามารถนำไฟฟ้าได้ เป็นแก๊สที่มีประจุ โดยทั่วๆ ไปแล้วพลาสมาจะประกอบด้วยประจุบวกและประจุลบที่มีความหนาแน่นเท่ากัน หรือกล่าวได้ว่าพลาสมาเป็นกลุ่มของอิเล็กตรอนไอออน โมเลกุล อนุมูลอิสระและอะตอมในสถานะกระตุ้น”

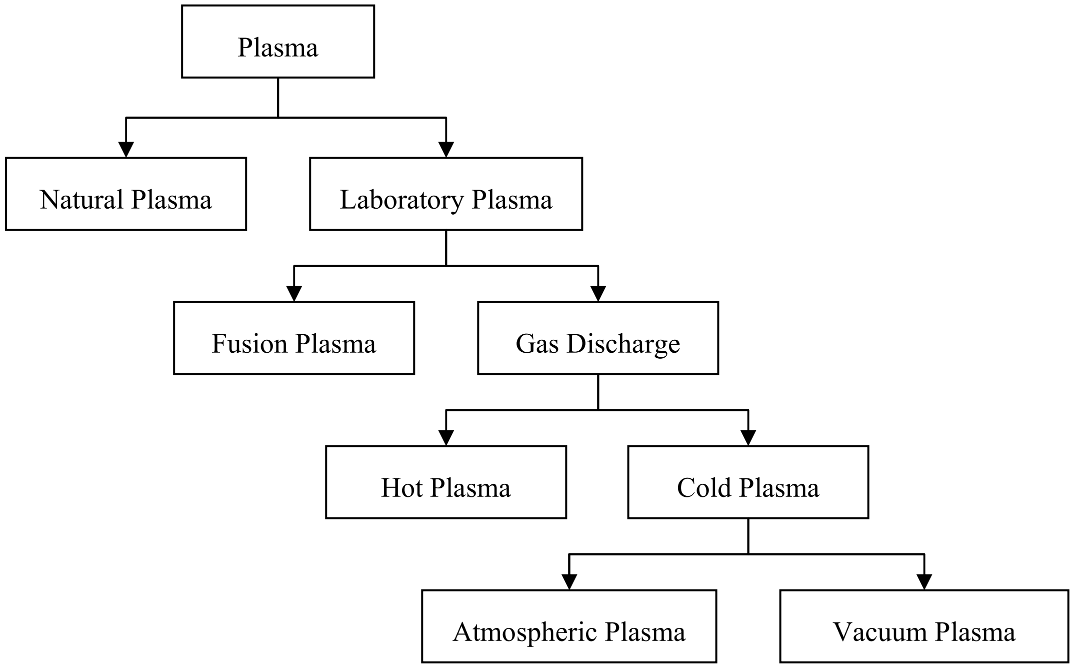
Solid	**Liquid**	**Gas**	**Plasma**
Example Ice H_2O	Example Water H_2O	Example Steam H_2O	Example Ionized Gas H_2 $H^+ + H^+ +$ $+ 2e^-$
Cold T<0°C	Warm 0<T<100°C	Hot T>100°C	Hotter T>100,000°C
			
Molecules Fixed in Lattice	Molecules Free to Move	Molecules Free to Move, Large Spacing	Ions and Electrons Move Independently Large Spacing

ภาพที่ 6 สถานะทั้งสี่ของสสาร

ที่มา: Eastman (2006)

1. ประเภทของพลาสมา

พลาสมาอาจสามารถแบ่งออกเป็นพลาสมาที่มีอยู่ตามธรรมชาติ (natural plasma) เช่น ดาว หรือ interstellar matter และพลาสมาที่สามารถสร้างขึ้นในห้องปฏิบัติการ (laboratory plasma) ซึ่งแบ่งออกเป็น 2 กลุ่มใหญ่ ได้แก่ พลาสมาอุณหภูมิสูง หรือ พลาสมาฟิวชัน (fusion plasma) และ พลาสมาอุณหภูมิต่ำ หรือ แก๊สดิสชาร์จ (gas discharge) โดยอาจสามารถแบ่งประเภทของพลาสมาอย่างกว้างๆ ได้ดังแสดงในภาพที่ 7 (Mitsuharu, 1992; Eastman, 2006)



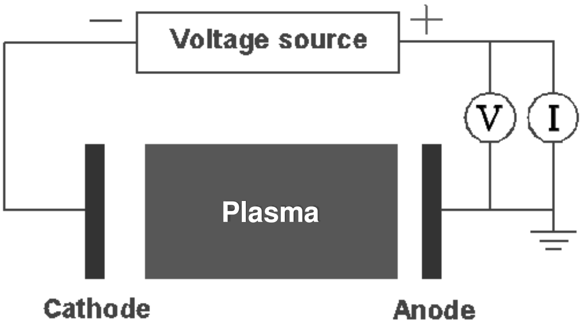
ภาพที่ 7 ประเภทของพลาสมา
ที่มา: Mitsuharu (1992); Eastman (2006)

โดยทั่วไปในแต่ละกลุ่มของพลาสมายังสามารถแบ่งออกไปเป็นพลาสมาที่อยู่ในสมดุลความร้อน และพลาสมาที่ไม่อยู่ในสมดุลความร้อน ซึ่งสมดุลความร้อนหมายความว่า อุณหภูมิของทุกสปีชี (อิเล็กตรอน ไอออน และสปีชีที่เป็นกลาง) มีค่าเท่ากัน ตัวอย่างของพลาสมาประเภทนี้ คือ ดาวและฟิวชันพลาสมา โดยพลาสมาประเภทนี้ต้องการอุณหภูมิสูงเพื่อให้เกิดสมดุลความร้อน ซึ่งจะมีค่าตั้งแต่ 4,000 เคลวิน (สำหรับธาตุที่แตกตัวง่าย เช่น ซีเซียม) ถึง 20,000 เคลวิน (สำหรับธาตุที่แตกตัวยาก เช่น ฮีเลียม) ทั้งนี้เทอม “สมดุลความร้อนเฉพาะที่” (local thermal equilibrium, LTE) นิยมใช้แทน “สมดุลความร้อน” ซึ่งเทอมนี้มีความหมายว่า อุณหภูมิของทุกสปีชีมีค่าเท่ากันในพื้นที่เฉพาะที่ในพลาสมา ส่วนสสาร interstellar matter นั้นจะไม่อยู่ในสมดุลความร้อน ซึ่งเรียกว่า “Non-LTE” มีความหมายว่า อุณหภูมิของสปีชีต่างกันมีค่าไม่เท่ากัน โดยที่อิเล็กตรอนจะมีอุณหภูมิสูงกว่าอนุภาคหนัก (ไอออน อะตอม หรือโมเลกุล) อย่างมาก

เช่นเดียวกัน แก๊สดิสชาร์จสามารถแบ่งออกเป็นพลาสมา LTE และพลาสมา Non-LTE ซึ่งจะขึ้นอยู่กับความดันในพลาสมา ในกรณีความดันแก๊สสูง แสดงว่ามีการชนกันเกิดขึ้นหลายครั้งในพลาสมา เนื่องจากวิถีอิสระเฉลี่ย (mean free path) มีค่าสั้นเมื่อเปรียบเทียบกับระยะดิสชาร์จ (discharge length) ซึ่งจะนำไปสู่การแลกเปลี่ยนพลังงานระหว่างสปีชีในพลาสมาอย่างมี

ประสิทธิภาพ ทำให้มีอุณหภูมิเท่ากัน ส่วนกรณีความดันแก๊สต่ำทำให้มีการชนกันน้อยครั้งใน พลาสมา เนื่องจากวิถีอิสระเฉลี่ยมีค่ายาวเมื่อเปรียบเทียบกับระยะดิสชาร์จ นอกจากนี้ยังทำให้สปีชีต่างกันมีอุณหภูมิต่างกัน เนื่องจากการแลกเปลี่ยนพลังงานไม่มีประสิทธิภาพ แต่จะมีข้อยกเว้นสำหรับกฎนี้ใน dielectric barrier discharge และ atmospheric pressure glow discharges ซึ่งระยะดิสชาร์จมีค่าน้อย (ศรีเพ็ญ, 2547)

แก๊สดิสชาร์จเกิดจากการผ่านแก๊สเข้าไประหว่างขั้วอิเล็กโทรด 2 ชนิด และให้พลังงานไฟฟ้าเพื่อให้เกิดความต่างศักย์ระหว่างขั้วอิเล็กโทรดนั้น กระแสไฟฟ้ามีการส่งผ่านระหว่างขั้วบวก (anode) และขั้วลบ (cathode) ทำให้เกิดเป็นสนามแม่เหล็กไฟฟ้า (electromagnetic fields) แก๊สที่อยู่ในสนามแม่เหล็กไฟฟ้าจะถูกกระตุ้นจากพลังงานและความถี่ที่เกิดขึ้นจนแตกตัวกลายเป็นประจุ ซึ่งเรียกสถานะที่แก๊สแตกตัวกลายเป็นประจุนี้ว่า พลาสมา หรือ แก๊สดิสชาร์จ (ภาพที่ 8) (Goree, n.d.)



ภาพที่ 8 การเกิดแก๊สดิสชาร์จ
ที่มา: Goree (n.d.)

โดยทั่วไปนิยมแบ่งแก๊สดิสชาร์จออกเป็น 2 ประเภทใหญ่ ได้แก่ พลาสมาอุณหภูมิสูงหรือพลาสมาร้อน (hot plasma) และพลาสมาอุณหภูมิต่ำหรือพลาสมาเย็น (cold plasma) มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1.1 พลาสมาร้อน (hot plasma)

พลาสมาร้อน คือ แก๊สดิสชาร์จแบบพลาสมา LTE มีลักษณะการปล่อยประจุแบบอาร์คดิจชาร์จ (arc discharges) ซึ่งจากกระบวนการเกิดแก๊สดิสชาร์จนั้น เมื่อให้กระแสไฟฟ้าแก่

ขั้วอิเล็กโทรด ทำให้เกิดความต่างศักย์ขึ้นระหว่างขั้วบวกและขั้วลบที่สูง จนกระตุ้นให้แก๊สบางส่วนเกิดการแตกตัวอย่างรุนแรงกลายเป็นประจุบวกและอิเล็กตรอนที่มีความหนาแน่นสูง อิเล็กตรอนจะถูกเร่งโดยสนามไฟฟ้าที่อยู่ข้างหน้าขั้วลบและเคลื่อนที่ไปชนกับอะตอมหรือโมเลกุลของแก๊สด้วยความถี่สูงและรุนแรง เกิดการปลดปล่อยประจุในลักษณะของการสปาร์ค (spark) ของประจุเป็นเส้นเล็กๆ จำนวนมาก (filament) ทำให้เกิดสถานะของพลาสมาที่มีความดันและพลังงานความร้อนสูง โดยพลาสมาร้อนนี้จะถูกสร้างที่ความดันใกล้กับความดันบรรยากาศหรือมากกว่านั้น นิยมใช้ในการผลิตพลาสมาสเปรย์ หรือใช้ในการหลอม เชื่อม และตัดโลหะ (ศรีเพ็ญ, 2547; Goree, n.d.)

1.2 พลาสมาเย็น (cold plasma)

พลาสมาเย็น คือ แก๊สดิสชาร์จแบบพลาสมา Non-LTE มีลักษณะการปล่อยประจุแบบโกลว์ดิจชาร์จ (glow discharges) เป็นการสร้างพลาสมาที่พัฒนามาจากพลาสมาร้อน เป็นการลดความดันในการเกิดพลาสมาให้ต่ำลง โดยเกิดที่ความดันประมาณ 10^{-3}-10 ทอร์ โดยอุณหภูมิของอนุภาคหนักจะมีค่าต่ำและมักจะไม่สูงกว่าอุณหภูมิห้อง แต่สำหรับอิเล็กตรอนจะมีอุณหภูมิสูงกว่ามาก เพราะอิเล็กตรอนมีมวลน้อยจึงถูกเร่งในสนามแม่เหล็กไฟฟ้าได้ง่าย การที่อิเล็กตรอนมีอุณหภูมิสูงทำให้เกิดการชนกันแบบไม่ยืดหยุ่น ซึ่งจะไปคงสภาพพลาสมาไว้และมีผลทำให้เกิดกลุ่มอนุภาคที่มีความหลากหลายทางเคมี อิเล็กตรอนจึงเป็นตัวแทนปฐมภูมิในพลาสมา และอนุภาคหนักในพลาสมาจะเป็นตัวทำหน้าที่ในการประยุกต์ ซึ่งจากกระบวนการเกิดแก๊สดิสชาร์จ เมื่อให้กระแสไฟฟ้าแก่ขั้วอิเล็กโทรด ทำให้เกิดความต่างศักย์ขึ้นระหว่างขั้วบวกและขั้วลบที่สูงพอจนกระตุ้นให้แก๊สบางส่วนแตกตัวกลายเป็นประจุบวกและอิเล็กตรอน อิเล็กตรอนจะถูกเร่งโดยสนามไฟฟ้าที่อยู่ข้างหน้าขั้วลบ และเคลื่อนที่ไปชนกับอะตอมหรือโมเลกุลของแก๊ส ทำให้เกิดการกระตุ้นและการแตกตัวเป็นประจุ อนุภาคที่อยู่ในภาวะกระตุ้นจะปลดปล่อยรังสีออกมาและลงมาอยู่ในสถานะที่ต่ำลงมา ทำให้เกิดแสงสว่าง พลาสมาเย็นนิยมใช้สำหรับงานที่ไม่ต้องการความร้อน เช่น การกัด (etching) หรือการทำฟิล์มบาง (thin film) เป็นต้น (ศรีเพ็ญ, 2547)

2. plasma active species

กระบวนการพลาสมาให้ผลในการเปลี่ยนแปลงสมบัติของผิววัสดุที่นำมาประยุกต์เนื่องจากการกระทำของ active species ซึ่งถูกสร้างขึ้นโดยการทำปฏิกิริยากันของแก๊สที่ใช้ในกระบวนการสร้างพลาสมา โดยทั่วไปในสารเคมีบริสุทธิ์จะไม่ค่อยพบ active species ที่มีความ

เข้มข้นและสถานะกระตุ้นเหมือนกับที่พบในเครื่องผลิตพลาสมา โดย active species ในพลาสมามีดังต่อไปนี้ (ธีรวรรณ, 2550)

2.1 species reaching surface

species reaching surface มีอยู่สองแบบที่จะเกิดขึ้นบนผิวของวัสดุที่นำมาประยุกต์พลาสมา แบบแรก คือ แก๊สที่ใช้ ซึ่งอาจจะเกิดการสะท้อน ดูดซับ ดูดซึม หรือเกิดปฏิกิริยาเคมีกับพื้นผิว และแบบที่สอง คือ active species ซึ่งเกิดขึ้นโดยตรงจากการชนกันของอิเล็กตรอนและโมเลกุลที่เป็นกลาง หลังจากที่ปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นในพลาสมาสิ้นสุดลง active species ที่เกิดขึ้นในกระบวนการพลาสมาจะมีปริมาณและความเข้มข้นสูงกว่า active species ชนิดเดียวกันที่เกิดขึ้นในกระบวนการทางเคมี โดย active species มักพบรวมกับโฟตอน (photon) สปีชีที่เป็นกลาง (neutral species) และอนุภาคที่มีประจุ (charged particles)

2.2 โฟตอน (photon)

โฟตอนจะพบได้ตลอดช่วงสเปกตรัมที่มีความยาวคลื่นในช่วงของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (electromagnetic spectrum) (ตารางที่ 1) โฟตอนช่วงอินฟราเรด (infrared) มีพลังงานน้อยกว่า 1.7 อิเล็กตรอนโวลต์ ซึ่งน้อยเกินกว่าที่จะเกิดอันตรกิริยากับแก๊สและเกิดแสงที่มองเห็นได้ โดยส่วนใหญ่จะเกิดอันตรกิริยาทั่วไปคล้ายกับกำแพงร้อน (hot wall) หรือปฏิกิริยาเคมีทั่วไปในกระบวนการพลาสมา ส่วนโฟตอนช่วงแสงขาว (visible) มีพลังงานในช่วง 1.6 - 3.3 อิเล็กตรอนโวลต์ โฟตอนช่วงนี้สามารถทำลายพันธะของโมเลกุลและกระตุ้นอะตอมได้ สำหรับโฟตอนช่วงอัลตราไวโอเล็ต (ultraviolet) มีพลังงานสูงขึ้นมาในช่วง 3.1- 9.5 อิเล็กตรอนโวลต์ และสามารถกระตุ้นอะตอมทำให้เกิดการแตกตัวเป็นไอออน(ionization) รวมทั้งแตกพันธะของโมเลกุลซึ่งทำให้โมเลกุลแตกออกได้

2.3 สปีชีที่เป็นกลาง (neutral species)

จากกระบวนการชนกันระหว่างอิเล็กตรอนและโมเลกุลที่เป็นกลางในพลาสมา รวมทั้งการเกิดปฏิกิริยาทางเคมีทำให้เกิด active species ที่เป็นกลางขึ้นหลายแบบ รวมทั้ง reactive atoms อย่างเช่น H, O, F, Cl และอื่นๆ อะตอมเดี่ยวสามารถสร้างสายพอลิเมอร์ขึ้นบนพื้นผิวที่ได้สัมผัส หรืออะตอมที่เป็นกลางที่เกิดจากการแตกออกของโมเลกุลใหญ่ เช่น CH_2 สามารถสร้างสารประกอบเชิงซ้อนบนพื้นผิวและ/หรือเกิดการ cross-linking กับโมเลกุลที่อยู่ใกล้อะตอมที่อยู่ใน

สภาวะกระตุ้น และโมเลกุลที่แตกออกซึ่งมีอิเล็กตรอนที่ไม่มีคู่ (unpaired electron) ก็พร้อมที่จะเกิดปฏิกิริยากับสารประกอบบนพื้นผิวได้มากขึ้น

ตารางที่ 1 พลังงานของโฟตอนในช่วงสเปกตรัมต่างๆ

ช่วงสเปกตรัม	ความยาวคลื่น (นาโนเมตร)	พลังงาน (อิเล็กตรอนโวลต์)
อินฟราเรด	$730 \leq \lambda \geq 10^6$	$0.00124 \leq \lambda \geq 1.7$
แสงขาว	$380 \leq \lambda \geq 780$	$1.59 \leq \lambda \geq 3.26$
อัลตราไวโอเลต	$13 \leq \lambda \geq 397$	$3.12 \leq \lambda \geq 9.53$

ที่มา: ธีรวรรณ (2550)

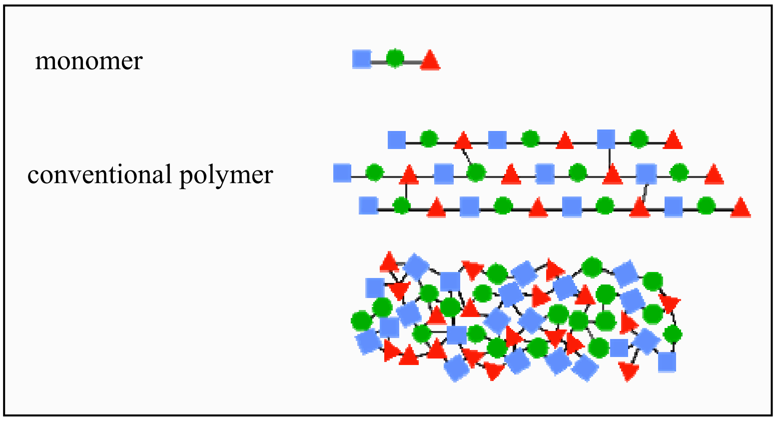
2.4 อนุภาคที่มีประจุ (charged particles)

อนุภาคที่มีประจุจะเกิดขึ้นในกระบวนการ electron-neutral impact ionization ซึ่งถูกเร่งได้ด้วยสนามไฟฟ้าเพื่อให้เข้าสู่พื้นผิวมากขึ้น กระบวนการโกลว์ดิสชาร์จพลาสมาในอุตสาหกรรมส่วนใหญ่มีความเกี่ยวข้องกับอนุภาคประจุบวก ซึ่งอนุภาคประจุบวกเหล่านี้มีแนวโน้มที่จะชนรอบๆ พื้นผิวด้วยพลังงานที่สูงกว่าที่อิเล็กตรอนหรืออนุภาคประจุลบจะสามารถทำได้ อนุภาคประจุที่เกิดขึ้นในพลาสมาซึ่งรวมทั้งอิเล็กตรอน ส่วนใหญ่มีอุณหภูมิจลน์ (kinetic temperatures) อยู่ที่ 1-10 อิเล็กตรอนโวลต์ โดยไอออนสามารถเป็นได้ทั้งไอออนบวกและไอออนลบ แต่เกือบทั้งหมดเป็นไอออนบวก (ธีรวรรณ, 2550)

3. กระบวนการปรับสภาพผิววัสดุด้วยพลาสมา

การปรับสภาพผิววัสดุด้วยพลาสมา หรือ การประยุกต์พลาสมา ทำได้โดยการนำแก๊สที่ต้องการ (monomer) โดยอาจมีแก๊สเฉื่อย (inert gas) เป็นตัวนำ (precursor) เพื่อให้แก๊สเกิดการกระจายตัวอย่างทั่วถึงเข้าไประหว่างขั้วอิเล็กโทรด ซึ่งเป็นสนามแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่และความต่างศักย์สูงที่ความดันต่ำ หรือที่ความดันบรรยากาศที่มีการปรับสภาวะให้เหมาะสม เพื่อให้แก๊สแตกตัวกลายเป็นพลาสมา เกิดเป็นสถานะกระตุ้นของอนุภาคต่างๆ ของไอออน อิเล็กตรอน และอนุมูลอิสระ ซึ่งอนุภาคเหล่านี้จะถูกกระตุ้นอยู่ตลอดเวลา มีความไม่เสถียรสูง จากนั้นนำวัสดุที่

ต้องการปรับสภาพผิวเข้าไปภายในพลาสมา อนุภาคต่างๆ ที่ไม่เสถียรนั้นจะเข้าทำปฏิกิริยากับโมเลกุลของผิววัสดุ ซึ่งอาจเกิดเป็นชั้นฟิล์มบางระดับนาโนเมตร ในการยึดติดระหว่างชั้นฟิล์มและผิววัสดุจะเกิดกระบวนการพลาสมาพอลิเมอร์ไรเซชัน (plasma polymerization) ขึ้น ซึ่งพลาสมาพอลิเมอร์ไรเซชันจะแตกต่างจากการเกิดพอลิเมอร์ไรเซชันของพอลิเมอร์ทั่วไป โดยพอลิเมอร์ของพลาสมาจะเกิดการเชื่อมต่อกัน (cross-linking) ภายในสายพอลิเมอร์อย่างหนาแน่นมากกว่าพอลิเมอร์ทั่วไป (ภาพที่ 9) เนื่องจากโมเลกุลของพลาสมามีอนุภาคที่ไม่เสถียรจำนวนมาก เมื่อเกิดกระบวนการพอลิเมอร์ไรเซชัน ทำให้อนุภาคที่ไม่เสถียรสามารถเข้าทำปฏิกิริยากับอนุภาคใกล้เคียงได้ดีกว่าอนุภาคของพอลิเมอร์ทั่วไปซึ่งมีความเสถียรมากกว่า (Ellinghorst, 2006)

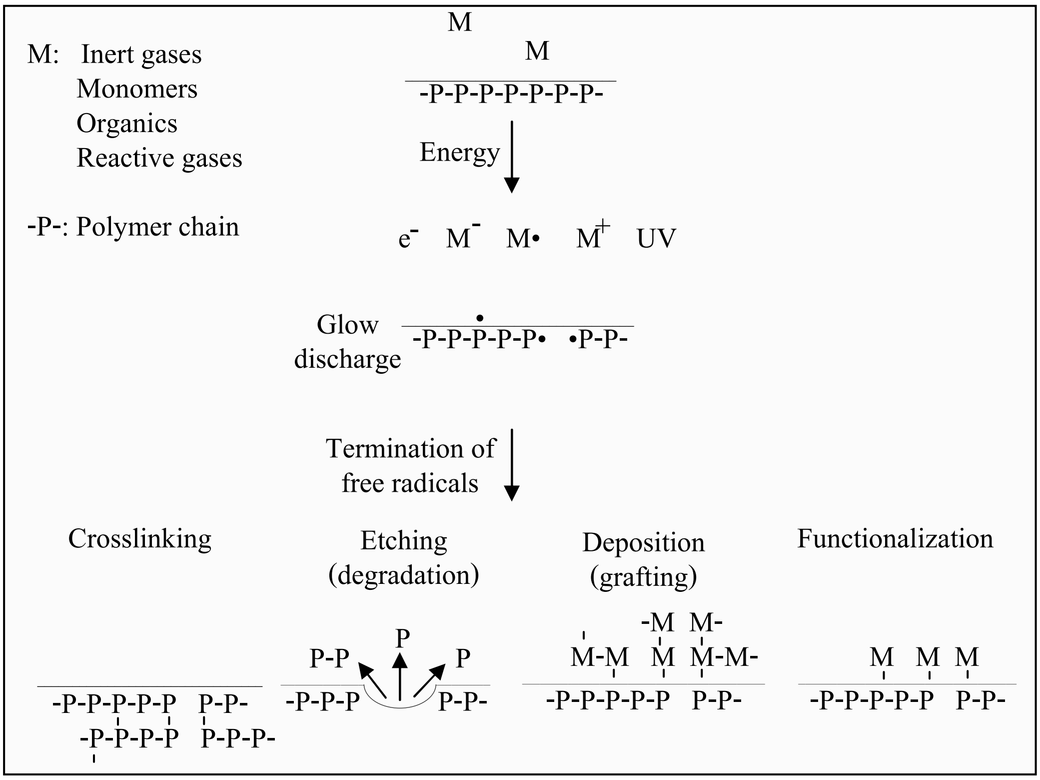


ภาพที่ 9 กระบวนการพลาสมาพอลิเมอร์ไรเซชัน
ที่มา: Ellinghorst (2006)

พลาสมาเย็นถูกใช้ในการปรับสภาพผิวและโครงสร้างทางเคมีของวัสดุพอลิเมอร์ โดยเกิดการ cross-linking, deposition, grafting และ functionalization ของผิววัสดุด้วยไอออนต่างๆ อนุมูลอิสระ และอนุภาคที่อยู่ในสภาวะกระตุ้น (excited state species) ซึ่งถูกสร้างขึ้นในแก๊สดิสชาร์จ (ภาพที่ 10) ดังนั้น ปฏิกิริยาทางเคมีทั้ง homogeneous และ heterogeneous จึงสามารถเกิดขึ้นได้พร้อมกันเป็นจำนวนมากในระบบ ทำให้เกิดความรวดเร็วในการปรับสภาพโมเลกุลของผิวและโครงสร้างทางเคมีของวัสดุพอลิเมอร์ (Denes, 1997)

สมบัติต่างๆ ของผิววัสดุที่ถูกประยุกต์ด้วยพลาสมาขึ้นอยู่กับชนิดของแก๊สที่ใช้ในการสร้างพลาสมา ชนิดของแก๊สจะเป็นตัวกำหนดสมบัติของชั้นฟิล์มบางที่ยึดติดกับผิววัสดุ และสำหรับการประยุกต์พลาสมากับกระดาษ ซึ่งเป็นวัสดุที่มีรูพรุนและมีความชอบน้ำสูง จึงต้องใช้แก๊สที่มีสมบัติ

ความไม่ชอบน้ำ (hydrophobic) เพื่อทำให้ผิวของกระดาษสามารถต้านทานน้ำได้มากขึ้น (Vaswani, 2005; Ellinghorst, 2006)



ภาพที่ 10 การปรับสภาพผิววัสดุพอลิเมอร์ด้วยพลาสมา
ที่มา: Advanced Surface Technology (n.d.)

Yuasa and Yara (1999) กล่าวว่า สารประกอบฟลูออรีน ทำให้ผิววัสดุสามารถต้านทานน้ำได้โดยการไปลดพลังงานผิวของวัสดุ ตัวอย่างสารประกอบฟลูออรีน เช่น tetrafluoride (CF_4), hexafluoroetane (C_2F_6), hexafluoropropylene (CF_3CFCF_2), octafluorocyclobutane (C_4F_8), monochlorotrifluorocarbon ($CClF_3$) และ sulferhexafluoride (SF_6) เป็นต้น ส่วนสารประกอบที่มีออกซิเจนและไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบ ทำให้ผิววัสดุสามารถดูดซึมน้ำได้ดีขึ้น เนื่องจากไปเพิ่มหมู่ฟังก์ชั่นของพอลิเมอร์ เช่น คาร์บอนิล ไฮดรอกซิล และอะมิโน ทำให้พลังงานผิวของวัสดุมีค่าเพิ่มขึ้น ตัวอย่างของสารเหล่านี้ ได้แก่ oxygen, ozone, carbon monoxide, carbon dioxid, nitrogen dioxide, alcohols, ketones และ aldehydes เป็นต้น

สารที่ใช้ในการสร้างพลาสมานั้นสามารถเป็นได้ทั้งแก๊สและของเหลว โดยของเหลวต้องผ่านขั้นตอนการระเหยเป็นไอก่อนจึงจะสามารถสร้างพลาสมาได้ ตัวอย่างแก๊สและของเหลวที่ใช้ในการสร้างพลาสมา แสดงดังตารางที่ 2 (Larner and Kaplan, 2004)

ตารางที่ 2 ตัวอย่างแก๊สและของเหลวที่ใช้ในการสร้างพลาสมา

แก๊ส	ของเหลว
1) Oxygen	1) Methanol
2) Argon	2) Water
3) Helium	3) Allyl Amine
4) Nitrogen	4) Ethylenediamine
5) Ammonia	5) Acrylic Acid
6) Hydrogen	6) Acetone
7) Nitrous Oxide	7) Hydroxyethylmethacrylate
8) Carbon Dioxide	8) Ethanol
9) Air	9) Toluene
10) Methane	10) Diaminopropane
11) Ethane	11) Butylamine
12) Ethylene	12) Gluteraldehyde
13) Acetylene	13) Hexamethyldisiloxane
14) Tetrafluoromethane	14) Tetramethylsilane
15) Hexafluoroethane	15) Polyethylene glycols
16) Hexafluoropropylene	16) Diglymes
	17) Silanes

ที่มา: Larner and Kaplan (2004)

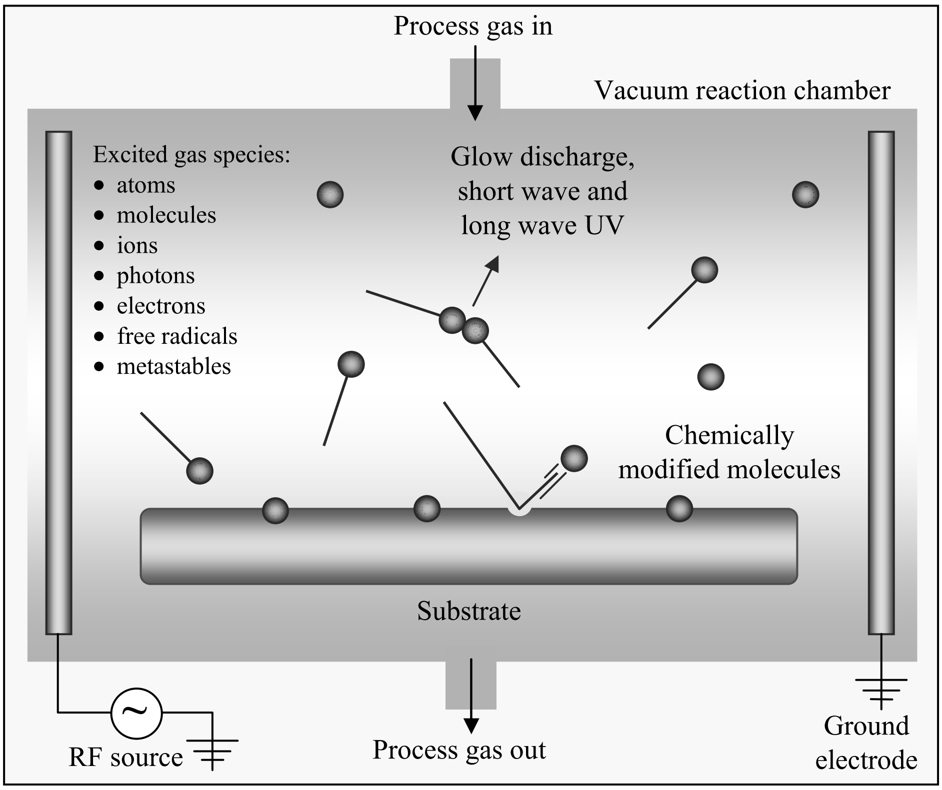
ปัจจุบันอาจแบ่งการประยุกต์พลาสมาโดยใช้พลาสมาเย็นออกเป็น 2 วิธี ตามความดันที่ใช้ ได้แก่ การประยุกต์พลาสมาในระบบสุญญากาศ (vacuum plasma treatment) และการประยุกต์พลาสมาในความดันปกติหรือความดันบรรยากาศ (atmospheric plasma treatment)

3.1 การประยุกต์พลาสมาในระบบสุญญากาศ (vacuum plasma treatment)

การประยุกต์พลาสมาในระบบสุญญากาศ (ภาพที่ 11) เป็นวิธีทั่วไปในการปรับสภาพผิววัสดุต่างๆ โดยพลาสมาจะถูกสร้างขึ้นจากการผ่านแก๊สความดันต่ำเข้าไปภายในแชมเบอร์สุญญากาศ แก๊สจะถูกกระตุ้นด้วยพลังงาน ซึ่งอาจอยู่ในรูปของคลื่นเสียง รังสีไมโครเวฟ หรือพลังงานไฟฟ้า ทำให้โมเลกุลของแก๊สเกิดการแตกตัวเป็นพลาสมา ซึ่งอยู่ในรูปของไอออน อิเล็กตรอน และอนุมูลอิสระต่างๆ โดยพื้นผิวที่มีการสัมผัสพลาสมาจะถูกปกคลุมด้วยอนุภาคเล็กๆ และมีการถ่ายเทพลังงานจากอนุภาคพลาสมาสู่ผิววัสดุ ก่อให้เกิดกระบวนการทางเคมีและฟิสิกส์ของพื้นผิวในลักษณะต่างๆ ซึ่งพื้นผิวจะมีการเปลี่ยนแปลงในระดับนาโนที่มีความหนาหรือความลึกไม่เกิน 10 นาโนเมตร จากผิววัสดุโดยไม่มีการเปลี่ยนแปลงสมบัติหรือไม่มีผลกระทบต่อโครงสร้างของวัสดุในส่วนอื่นๆ (Kim *et al.*, 2006) และการที่ระบบใช้ความดันของแก๊สต่ำ จึงก่อให้เกิดพลาสมาที่คงที่และสม่ำเสมอ ดังนั้น การประยุกต์พลาสมาในระบบสุญญากาศจึงเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพ เนื่องจากสามารถเคลือบผิววัสดุได้อย่างทั่วถึง (Advanced Surface Technology, n.d.; Cernáková *et al.*, 2006)

3.2 การประยุกต์พลาสมาในความดันบรรยากาศ (atmospheric plasma treatment)

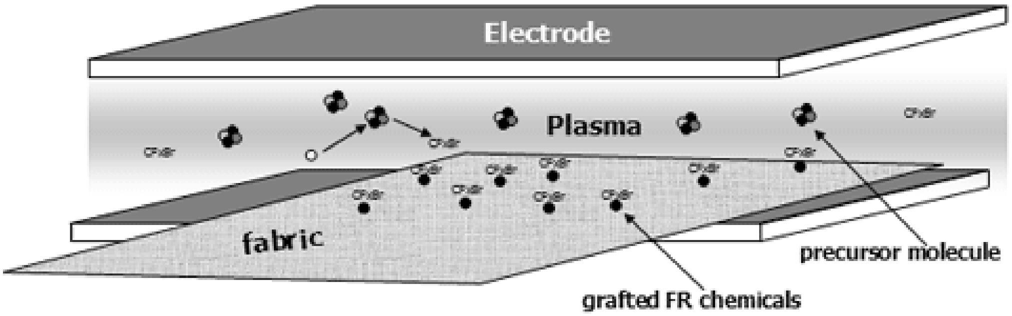
จากพลาสมาในระบบสุญญากาศ ซึ่งเป็นสภาวะความดันต่ำ ได้มีการพัฒนาระบบที่มีลักษณะใกล้เคียงกันในสภาวะความดันปกติหรือความดันบรรยากาศ ซึ่งโดยทั่วไปการสร้างพลาสมาที่ความดันบรรยากาศนั้น พลาสมาที่เกิดขึ้นมีการปล่อยประจุแบบอาร์คดิสชาร์จ ซึ่งมีพลังงาน ความหนาแน่นอิเล็กตรอน และอุณหภูมิสูง ไม่เหมาะในการนำมาปรับสภาพผิววัสดุ เนื่องจากพลาสมาไม่ปกคลุมทั่วพื้นผิว และอุณหภูมิที่สูงทำให้วัสดุเกิดความเสียหาย ดังนั้น การประยุกต์พลาสมาในความดันบรรยากาศจึงต้องมีการปรับสภาวะ เพื่อช่วยให้สามารถนำพลาสมามาปรับสภาพผิววัสดุได้ (Duan and Yu, 2007) ซึ่งการประยุกต์พลาสมาในความดันบรรยากาศสามารถแบ่งได้ดังนี้ (Cernáková *et al.*, 2006)



ภาพที่ 11 การประยุกต์พลาสมาในระบบสุญญากาศ
ที่มา: Advanced Surface Technology (n.d.)

3.2.1 filamentary volume barrier discharge treatment

เป็นการประยุกต์พลาสมาในความดันบรรยากาศบนฐานของ filamentary barrier discharge (ภาพที่ 12) ในทางการค้า อาจเรียกเทคนิคนี้ว่า corona treatment ซึ่งเป็นเทคนิคที่มีการใช้งานอย่างกว้างขวางในอุตสาหกรรมในการเพิ่มพลังงานผิวของฟิล์มพลาสติก อุปกรณ์ประกอบด้วยขั้วอิเล็กโทรด 2 ตัว ซึ่งอย่างน้อยหนึ่งตัวถูกหุ้มด้วยฉนวน (dielectric) เพื่อทำหน้าที่เป็นกราวด์อิเล็กโทรด (ground electrode) ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดอยู่ในระดับมิลลิเมตร ซึ่งเป็นบริเวณที่เกิดพลาสมา และใช้ความต่างศักย์ไฟฟ้า (applied voltage) ที่ 20 กิโลโวลต์ เทคนิคนี้เหมาะกับกระบวนการผลิตอย่างต่อเนื่อง และสามารถใช้ปรับสภาพผิวฟิล์มพลาสติกได้อย่างมีประสิทธิภาพ



ภาพที่ 12 filamentary volume barrier discharge treatment
ที่มา: Apjet (2005)

3.2.2 volumetric diffuse non-thermal plasma treatment

เป็นการรวมข้อดีของการประยุกต์พลาสมาในระบบสุญญากาศ และ corona treatment เข้าไว้ด้วยกัน เป็นเทคนิคที่มีลักษณะใกล้เคียงกับ corona treatment แต่มีการควบคุมสภาวะมากกว่าโดยการสร้างพลาสมาภายในแชมเบอร์ที่เป็นระบบเปิด และมีการใช้แก๊สเฉื่อย เช่น He, Ar, Xn หรือ N_2 เป็น carrier gas ช่วยในการกระจายตัวของพลาสมา หรือการใช้แชมเบอร์ที่มีลักษณะแคบ ตัวอย่างเช่น plasma jet (ภาพที่ 13) ทำให้เกิดพลาสมาที่มีความเข้มข้นสม่ำเสมอ และสามารถปรับสภาพผิววัสดุประเภทพลาสติกและกระดาษได้อย่างมีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น (Duan and Yu , 2007)

3.2.3 diffuse coplanar surface barrier discharge (DCSBD)

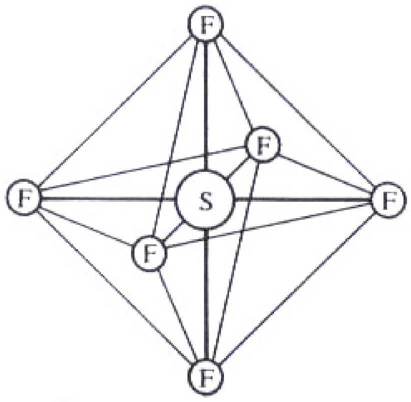
เป็นเทคนิคที่พัฒนาโดย Cernáková *et al.* (2006) โดยการสร้างชั้นบางๆ ของพลาสมาที่มีความหนาแน่นของพลังงานสูงในบริเวณใกล้กับผิววัสดุที่ต้องการประยุกต์พลาสมาอย่างทันทีทันใด และทำให้พลาสมาเข้าจับกับผิววัสดุอย่างรวดเร็ว ซึ่งการที่ชั้นของพลาสมามีการกระจายตัวอยู่เหนือผิววัสดุอย่างใกล้ชิด ทำให้สามารถเชื่อได้ว่ามีข้อดีในเรื่องของการใช้พลังงานและเวลาในการปรับสภาพผิวน้อย

ภาพที่ 13 Plasma Jet
ที่มา: Akishev (2007)

พลาสมาซัลเฟอร์เฮกซะฟลูโอไรด์

แก๊สซัลเฟอร์เฮกซะฟลูโอไรด์ (sulferhexafluoride, SF_6) เป็นสารประกอบของพอลิอะตอมมิคโมเลกุล (polyatomic molecule) ของกำมะถันและฟลูออรีน (sulphur hexafluoride) (ภาพที่ 14) เป็นหนึ่งในแก๊สฉนวนที่ได้รับความนิยมมากที่สุด นิยมนำมาใช้ในอุปกรณ์ป้องกัน เช่น เซอร์กิตเบรกเกอร์ หม้อแปลงไฟฟ้า และตัวเก็บประจุ เป็นต้น เป็นแก๊สที่ไม่มีสี ไม่มีกลิ่น ไม่เป็นพิษ ไม่ติดไฟ ไม่ช่วยให้ไฟติด และเฉื่อยต่อการเกิดปฏิกิริยากับสารอื่น โดย ณ อุณหภูมิปกติจะไม่มีฤทธิ์กัดกร่อน แต่จะสลายตัวที่อุณหภูมิประมาณ 500 องศาเซลเซียส และเกิดเป็นอนุมูลของฟลูออรีนซึ่งไวต่อการเกิดปฏิกิริยากับสารอื่นโดยเฉพาะไอน้ำ (โกวิท และ วีรศักดิ์, 2550)

การใช้แก๊สซัลเฟอร์เฮกซะฟลูโอไรด์เป็นสารตั้งต้นในการผลิตพลาสมา ทำให้ได้พลาสมาของอนุภาคฟลูออรีน ซึ่งสามารถสร้างพันธะกับอะตอมของคาร์บอนในโมเลกุลของวัสดุประเภทเส้นใยเซลลูโลส เช่น สิ่งทอ และกระดาษ โดยการแทนที่อะตอมออกซิเจนและไฮโดรเจน เกิดเป็นพันธะ C-F ทำให้พื้นผิวมีลักษณะคล้ายเทฟลอน (Teflon-like) จึงส่งผลให้วัสดุดูดซับน้ำได้น้อยลง (Selli *et al.*, 2001)



ภาพที่ 14 โมเลกุลของแก๊สซัลเฟอร์เฮกซะฟลูออไรด์
ที่มา: โกวิท และ วีรศักดิ์ (2550)

เมื่อแก๊สซัลเฟอร์เฮกซะฟลูโอไรด์แตกตัวเป็นพลาสมา ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นภายในพลาสมาสามารถก่อให้เกิดอนุภาคย่อยได้เป็นจำนวนมาก ดังแสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในพลาสมาซัลเฟอร์เฮกซะฟลูออไรด์

ชื่อปฏิกิริยา	การเกิดปฏิกิริยา			พลังงาน (อิเล็กตรอนโวลต์)
Dissociation	$e^- + SF_6$	$\rightarrow$	$SF_5 + F + e^-$	$V_d \approx 9.8$
	$e^- + SF_5$	$\rightarrow$	$SF_4 + F + e^-$	
	$e^- + SF_4$	$\rightarrow$	$SF_3 + F + e^-$	
Ionization	$e^- + SF_6$	$\rightarrow$	$SF_5^+ + F + 2e^-$	$V_i = 15.9$
	$e^- + SF_6$	$\rightarrow$	$SF_4^+ + F_2 + 2e^-$	$V_i = 19.6$
	$e^- + SF_6$	$\rightarrow$	$SF_3^+ + F_2 + F + 2e^-$	$V_i = 19.8$
	$e^- + SF_4$	$\rightarrow$	$SF_3^+ + F + 2e^-$	$V_i = 12.7$
	$e^- + F_2$	$\rightarrow$	$F_2^+ + 2e^-$	$V_i = 15.8$
Attachment	$e^- + SF_6$	$\rightarrow$	SF_6^-	$V_a = 0$
	$e^- + SF_6$	$\rightarrow$	$SF_5^- + F$	$V_a = 0.1$
	$e^- + SF_4$	$\rightarrow$	$SF_3^- + F$	$V_a = 0.7$
	$e^- + SF_4$	$\rightarrow$	$SF_3 + F^-$	$V_a = 0.2$
	$e^- + F_2$	$\rightarrow$	$F + F^-$	

ตารางที่ 3 (ต่อ)

ชื่อปฏิกิริยา	การเกิดปฏิกิริยา	พลังงาน (อิเล็กตรอนโวลต์)
Detachment	$e^- + F^- \rightarrow F + 2e^-$	
	$SF_6^{-*} \rightarrow SF_6 + e^-$	
Ion-molecule reactions	$SF_6^- + SF_6 \rightarrow SF_5^- + F + SF_6$	
	$SF_5^- + SF_6 \rightarrow F^- + SF_4 + SF_6$	
	$F^- + SF_6 \rightarrow SF_6^- + F$	
	$F^- + SF_4 \rightarrow SF_5^-$	
	$SF_5^+ + SF_6 \rightarrow S_2F_7^+ + 2F_2$	
	$SF_3^+ + SF_6 \rightarrow S_2F_7^+ + F_2$	
Homogeneous recombinations	$SF_n + F \rightarrow SF_{n+1}$ (n = 3 to 5)	
	$F + F \rightarrow F_2$	
Heterogeneous chemical reaction	$4F + Si \rightarrow SiF_4$	
Other chemical reactions	$F + RH \rightarrow HF + R$	
	$SF_4 + H_2O \rightarrow SOF_2 + 2HF$	
Ion-ion recombination	$F^- + F_2^+ \rightarrow 3F$	

ที่มา: Picard (1985)

จากปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นทั้งหมด สามารถแยกออกเหลือ 3 กระบวนการหลักที่สร้างอนุมูลฟลูออรีนในพลาสมาซัลเฟอร์เฮกซะฟลูออไรด์ ดังนี้ (พันธวัฒน์, 2547)

กระบวนการ dissociative ionization

$$e^- + SF_6 \rightarrow SF_5^+ + F + 2e^-$$

$$e^- + SF_4 \rightarrow SF_3^+ + F + 2e^-$$

กระบวนการ dissociative electron attachment

$$e^- + SF_6 \rightarrow SF_5^- + F$$

$$e^- + SF_4 \rightarrow SF_3^- + F$$

กระบวนการ electron impact dissociation

$$e^- + SF_6 \rightarrow SF_5 + F + e^-$$

และสามารถแบ่งอนุภาคหลักในพลาสมาซัลเฟอร์เฮกซะฟลูออไรด์ที่นอกเหนือจากอนุมูลฟลูออรีนได้ดังนี้

อนุภาคที่เป็นกลาง ได้แก่ SF_6, SF_4, F_2

อนุภาคไอออนบวก ได้แก่ SF_5^+, SF_3^+

อนุภาคไอออนลบ ได้แก่ SF_5^-, SF_3^-

และ อิเล็กตรอน

การประยุกต์พลาสมาบนกระดาษ

ปัจจุบันเริ่มมีการใช้พลาสมาเพื่อปรับปรุงสมบัติของกระดาษหรือวัสดุที่มีองค์ประกอบของเซลลูโลสมากขึ้น ในที่นี้ได้รวบรวมงานวิจัยที่เกี่ยวข้องในการประยุกต์พลาสมาเพื่อปรับปรุงสมบัติต่างๆ ของกระดาษและวัสดุที่มีองค์ประกอบของเซลลูโลส มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

Deslandes *et al.* (1998) ศึกษาการใช้พลาสมาไนโตรเจนประยุกต์บนผิวกระดาษที่ปราศจากสารเติมแต่งใดๆ พบว่า การประยุกต์พลาสมาเพียง 2 วินาที สามารถเพิ่มความสามารถในการดูดซึมน้ำของกระดาษได้อย่างเห็นได้ชัด และเมื่อวิเคราะห์ด้วยเทคนิค time of flight secondary

ion mass spectroscopy (TOF-SIMS) ควบคู่กับ x-ray photoelectron spectroscopy (XPS) สามารถพบการเกิดหมู่ฟังก์ชันระหว่างไนโตรเจนกับเซลลูโลส

Magalhães and Souza (2002) ศึกษาการประยุกต์พลาสมา ethylene, acetylene, 1-butene และไอของ vinyl acetate บนผิว solid softwood เพื่อปรับปรุงสมบัติการต้านทานน้ำ พบว่า พลาสมา 1-butene สามารถเพิ่มสมบัติการต้านทานน้ำของ solid softwood ได้ดีที่สุด โดยอัตราการซึมผ่านของไอน้ำไม่มีการเปลี่ยนแปลง

Ferrero and Bongiovanni (2005) ศึกษาการประยุกต์พลาสมาอากาศบนผิวฟิล์มเซลลูโลสเพื่อปรับปรุงความสามารถในการดูดซับน้ำ การติดสี และการยึดติดของผิวฟิล์มเซลลูโลส พบว่า มุมสัมผัสมีค่าลดลงเรื่อยๆ เมื่อใช้เวลาและกำลังคลื่นวิทยุในการประยุกต์พลาสมามากขึ้น ผลการวิเคราะห์เทคนิค attenuated total reflectance fourier transform infrared spectrometry (ATR-FTIR) พบว่า เกิดการสูญเสียน้ำมากกว่าเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันที่ผิวฟิล์มเซลลูโลส และจากการใช้สีหลายชนิดกันในการทดสอบการติดสี พบว่า ฟิล์มเซลลูโลสสามารถติดสีได้ดีขึ้น ซึ่งเป็นผลจากการที่พลังงานผิวของฟิล์มเซลลูโลสมีค่าเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ พบว่าความสามารถในการยึดติดของผิวฟิล์มเซลลูโลสขึ้นอยู่กับเวลาและกำลังคลื่นวิทยุที่ใช้ในการประยุกต์พลาสมา และจากผลการทดลองทั้งหมด พบว่า การประยุกต์พลาสมาโดยใช้อากาศให้ผลที่ชัดเจนกว่าการใช้แก๊สออกซิเจน

Vrajová and Krčma (2006) ศึกษาการประยุกต์พลาสมาอากาศบนผิวกระดาษ พบว่า ความตึงผิวและอัตราการดูดซึมน้ำของกระดาษมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มเวลาในการประยุกต์พลาสมา การเพิ่มขึ้นของพลังงานผิวเกิดจากการเพิ่มขึ้นขององค์ประกอบที่เป็น acid-base การเปลี่ยนแปลงของความสามารถในการดูดซึมน้ำอาจมีสาเหตุมาจากกระบวนการ implantation และ degradation อีกทั้งการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญในสมบัติของผิวกระดาษสามารถสังเกตได้ในระยะเวลาการประยุกต์พลาสมาไม่เกิน 5 วินาที ซึ่งอาจมีสาเหตุมาจากกระบวนการ implantation นอกจากนี้ยังเกิดผลที่ไม่เป็นที่ต้องการ คือ สีของกระดาษเปลี่ยนเป็นสีเหลืองมากขึ้น และมีการสูญเสียน้ำหนักของกระดาษ

Cernáková *et al.* (2006) ศึกษาการเพิ่มสมบัติการดูดซับน้ำของกระดาษที่ใช้ในการพิมพ์โดยการประยุกต์ด้วยพลาสมาไนโตรเจน พบว่า มุมสัมผัสลดลงจาก 120 องศา เป็นน้อยกว่า 55 องศา โดยใช้เวลาในการประยุกต์พลาสมาเพียง 0.5 วินาที และเมื่อเพิ่มเวลาในการประยุกต์พลาสมามากขึ้น มุมสัมผัสก็ยิ่งลดต่ำลง โดยที่สมบัติเชิงกลและความสว่างของกระดาษไม่มีการเปลี่ยนแปลง อีกทั้งยังได้ศึกษาการเพิ่มสมบัติเชิงกลของกระดาษด้วยการประยุกต์พลาสมา โดยใช้

สารละลายไคโตซานร้อยละ 0.5-2 เป็นเวลา 1 วินาที ในสภาพแวดล้อมของแก๊สไนโตรเจน เมื่อนำกระดาษที่ประยุกต์ด้วยพลาสมาไคโตซานมาทำให้แห้งโดยการอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส และทดสอบสมบัติของกระดาษ พบว่า สามารถเพิ่มสมบัติเชิงกลของกระดาษได้อย่างมีนัยสำคัญ นอกจากนี้ยังได้ศึกษาการเพิ่มสมบัติการต้านทานน้ำของกระดาษโดยการประยุกต์ด้วยพลาสมาไนโตรเจนผสมกับ HMDSO (hexamethyldisiloxane) เป็นเวลา 30 วินาที พบว่า กระดาษมีสมบัติการต้านทานน้ำเพิ่มขึ้น และพลังงานผิวของกระดาษลดลงจาก 53 มิลลิจูลต่อตารางเมตร เป็น 11 มิลลิจูลต่อตารางเมตร

Silva *et al.* (2003) ศึกษาการใช้พลาสมา HMDS (hexamethyl disilazane) กับ n-hexane ประยุกต์บนผิวกระดาษ พบว่า สารประกอบอินทรีย์ที่ได้จากฟิล์มบางนี้สามารถยึดติดกับผิวกระดาษได้ดี มีมุมสัมผัสสูงกว่า 100 องศา และกระดาษสามารถดูดซึมน้ำได้ประมาณ 15 กรัมต่อตารางเมตร อีกทั้งพบว่าความพรุนของกระดาษไม่มีการเปลี่ยนแปลงใดๆ นอกจากนี้ได้ศึกษาความเป็นไปได้ ในการใช้กระดาษประยุกต์พลาสมานี้เป็นเยื่อเลือกผ่านสำหรับการแยกน้ำ สารประกอบมีขั้วและสารประกอบไม่มีขั้วออกจากกัน ซึ่งสารแต่ละชนิดมีความยาวของสายโซ่ที่แตกต่างกัน โดยสารประกอบไม่มีขั้ว ได้แก่ n-hexane, cyclohexane, heptane, dodecane, benzene และ poly (dimethylsiloxane) สารประกอบมีขั้ว ได้แก่ ethanol, 2-propanol, carbon tetrachloride, acetophenone และ phenol ซึ่งผลการทดลองแยกออกเป็น 3 ส่วน ได้แก่ ส่วนแรก เป็นสารผสมระหว่างน้ำกับสารประกอบไม่มีขั้ว พบว่า สารประกอบไม่มีขั้วสามารถซึมผ่านกระดาษได้ทั้งหมด แต่น้ำไม่สามารถซึมผ่านได้ ส่วนที่สอง เป็นสารผสมระหว่างน้ำกับสารประกอบมีขั้ว ได้แก่ acetophenone, phenol และ carbon tetrachloride พบว่า ทั้งน้ำและสารประกอบมีขั้วไม่สามารถซึมผ่านกระดาษได้ และในส่วนที่สาม เป็นสารผสมระหว่างน้ำกับสารละลาย 2-propanol หรือ ethanol พบว่า ทั้งน้ำและแอลกอฮอล์สามารถซึมผ่านกระดาษได้ โดยที่แอลกอฮอล์สามารถซึมผ่านกระดาษได้ก่อน

Sahin *et al.* (2002) ศึกษาการประยุกต์พลาสมา carbon tetrafluoride (CF_4) บนผิวเซลลูโลส โดยใช้กำลังคลื่นวิทยุ ความดันแก๊ส และเวลาในการประยุกต์พลาสมาต่างๆ พบว่า เมื่อเกิดพลาสมาจะเกิดหมู่ฟลูออรีนขึ้นอย่างหนาแน่น แสดงให้เห็นว่าปฏิกิริยาการเกิดฟลูออรีนนั้นถูกควบคุมโดยสภาวะพลาสมา (กำลังคลื่นวิทยุ ความดันแก๊ส และเวลาในการประยุกต์พลาสมา) ภายหลังการประยุกต์พลาสมาบนผิวเซลลูโลส พบว่า ฟลูออรีนปริมาณร้อยละ 51.3 ทำให้เกิดมุมสัมผัสเท่ากับ 147 องศา แสดงว่าเวลาในการประยุกต์พลาสมาน้อยกว่า 30 วินาที ทำให้ผิวเซลลูโลสมีปริมาณฟลูออรีนเข้มข้นมากกว่าร้อยละ 30 และการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค high resolution ESCA และ

ATR-FTIR ชี้ให้เห็นว่าพันธะโควาเลนท์ของหมู่ฟังก์ชัน CF_x เกี่ยวข้องกับการปรับสภาพผิวเซลลูโลส

Cech *et al.* (2005) ศึกษาการประยุกต์พลาสมาไนโตรเจนผสม octafluorocyclobutane (C_4F_8) พบว่า มุมสัมผัสเพิ่มขึ้นจาก 46.3 องศา เป็น 87-144 องศา พลังงานผิวของกระดาษลดลงจาก 52 มิลลิจูลต่อตารางเมตร เป็น 9 มิลลิจูลต่อตารางเมตร นอกจากนี้ยังพบว่าหลังจากประยุกต์พลาสมาบนผิวกระดาษผ่านไปเป็นเวลาหนึ่งวัน อัตราการซึมผ่านของไอน้ำของกระดาษไม่มีการเปลี่ยนแปลง

Tanikella *et al.* (2002) ศึกษาถึงลักษณะการดูดซึมน้ำและการแพร่ผ่านของฟิล์มฟลูออโรคาร์บอนที่ได้จากการประยุกต์พลาสมา pentafluoroethane (CF_3CHF_2) และพลาสมา octafluorocyclobutane (C_4F_8) โดยใช้ quartz crystal microbalance ควบคุมสภาวะแวดล้อม และใช้ x-ray photoelectron spectroscopy และ fourier transform infrared (IR) spectroscopy ใช้ตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงเชิงปริมาณและโครงสร้างทางเคมีของผิววัสดุที่ประยุกต์ด้วยพลาสมา นอกจากนี้ยังใช้ในการตรวจสอบองค์ประกอบของฟิล์มพลาสมา การทดลองพบว่า ฟิล์มที่ได้จากการประยุกต์ของพลาสมา CF_3CHF_2 และ C_4F_8 มีการดูดซึมน้ำสมดุลย์ต่ำกว่าร้อยละ 0.13 โดยน้ำหนัก ที่ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 90 แสดงให้เห็นว่าฟิล์มที่ได้จากการประยุกต์พลาสมานั้นไม่มีการดูดซึมน้ำ ส่วน attenuated total reflectance infrared spectroscopy (ATR-IR) spectra ของฟิล์มที่ได้จากการประยุกต์พลาสมาแสดงให้เห็นว่า ฟิล์มมีการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบทางเคมีเพียงเล็กน้อย ส่วนอัตราการแพร่ของน้ำเข้าสู่ฟิล์มมีค่าประมาณ 10,210 ตารางเซนติเมตรต่อวินาที นอกจากนี้ยังพบว่าฟิล์มที่ได้จากพลาสมา C_4F_8 มีการแพร่ของน้ำเข้าสู่ฟิล์มมากกว่าฟิล์มที่ได้จาก CF_3CHF_2

Vaswani *et al.* (2005) ศึกษาการประยุกต์พลาสมาบนผิวกระดาษ โดยใช้พลาสมา pentafluoroethane (CF_3CHF_2) และพลาสมา octafluorocyclobutane (C_4F_8) เปรียบเทียบกัน พบว่า ฟิล์มบางที่เกิดขึ้นจากพลาสมาของสารฟลูออโรคาร์บอนมีสมบัติการต้านทานน้ำ โดยมุมสัมผัสมีค่าสูง แม้ว่าไอน้ำสามารถซึมผ่านเข้าสู่ฟิล์มได้แต่ฟิล์มก็ยังคงสมบัติการต้านทานน้ำ เมื่อพิจารณาที่ความหนาต่างๆ ของฟิล์มที่เคลือบบนผิวกระดาษ พบว่า ฟิล์มที่ได้จากพลาสมา CF_3CHF_2 ใช้ความหนาน้อยที่สุดในการคงสมบัติการต้านทานน้ำ โดยในการทดลองทั้งหมดพบว่า ฟิล์มที่ได้จากพลาสมา CF_3CHF_2 เหมะสมในการประยุกต์ใช้ในด้านภาชนะบรรจุที่ต้องการความสามารถในการป้องกันน้ำและน้ำมัน ส่วนในด้านการพิมพ์นั้นต้องเป็นฟิล์ม 2 ชั้น ระหว่างพลาสมา CF_3CHF_2 และพลาสมา nisopropylacrylamide (NIPAAM)

Kloc *et al.* (2006) ศึกษาการประยุกต์พลาสมาไนโตรเจนผสม octafluorocyclobutane (C_4F_8) บนผิวกระดาษ พบว่า เมื่อเพิ่มกำลังคลื่นวิทยุทำให้กระดาษสามารถต้านทานน้ำได้มากขึ้น และสีของกระดาษเปลี่ยนเป็นสีเหลืองมากขึ้น การเปลี่ยนสีของกระดาษนั้นเกิดจากความร้อน และรังสีอัลตราไวโอเลต ซึ่งทำให้เกิดการ degradation บนผิวกระดาษระหว่างการประยุกต์พลาสมา

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

1. วัตถุดิบ

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

1.2 แก๊สซัลเฟอร์เฮกซะฟลูโอไรด์ ซึ่งได้รับความอนุเคราะห์จากศูนย์วิจัยนิวตรอนพลังงานสูง มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

2. อุปกรณ์

2.1 เครื่องแก้วที่ใช้ในการทดลอง
2.2 เครื่องชั่งละเอียดทศนิยม 3 ตำแหน่ง (Shimadzu BX300, Japan)
2.3 เครื่องชั่งละเอียดทศนิยม 4 ตำแหน่ง (Sartorius BP110S, Germany)
2.4 เดซิกเคเตอร์
2.5 นาฬิกาจับเวลา
2.6 ไมโครปิเปต (Gilson, France)
2.7 ตู้ควบคุมอุณหภูมิและปริมาณความชื้นสัมพัทธ์ (WTB Binder KBF 240, Germany)
2.8 ตู้อบลมร้อนแบบควบคุมอุณหภูมิ (Contherm, Contherm Scientific Limited)
2.9 เครื่องวัดความหนา (Mitutoyo ID-C112BS, Japan)
2.10 เครื่องทดสอบการซึมผ่านของแก๊สออกซิเจน (Illinois 8500, USA.)
2.11 ชุดทดสอบการซึมผ่านของไอน้ำ
2.12 เครื่องวัดสี (Minolta CR-310, Japan)
2.13 เครื่องทดสอบความต้านทานแรงดึง (Testometric 350, England)
2.14 เครื่องทดสอบความต้านทานแรงกดวงแหวน (Testometric 350, England)
2.15 เครื่องทดสอบความต้านทานต่อการพับ (Toyo seiki, Japan)
2.16 ชุดทดสอบการดูดซึมน้ำ (Cobb test)

2.17 ชุดวัดมุมสัมผัส (contact angle)

2.18 เครื่องผลิตพลาสมาความดันต่ำ (ศูนย์วิจัยนิวตรอนพลังงานสูง มหาวิทยาลัยเชียงใหม่)

วิธีการ

1. ตรวจสอบสมบัติเบื้องต้นของกระดาษ

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

1.1 ทดสอบสมบัติทางกายภาพและสมบัติเชิงกลของกระดาษก่อนประยุกต์พลาสมา

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 สี (ระบบ L* a* b*)
1.1.5 ความต้านทานแรงกดวงแหวน (TAPPI T818-om97)
1.1.6 ความต้านทานแรงดึง (ASTM D828-93)
1.1.7 ความต้านทานต่อการพับ (ASTM D2176-97a)

1.2 ทดสอบสมบัติการต้านทานน้ำของกระดาษก่อนประยุกต์พลาสมา

1.2.1 ทดสอบการดูดซึมน้ำ (Cobb test) (ดัดแปลงจาก ASTM D3285-93)
1.2.2 ทดสอบมุมสัมผัส (ดัดแปลงจาก ASTM D5946-04)
1.2.3 คำนวนค่างานของการยึดติด (อ้างอิงจาก Schroder, 1999)
1.2.4 ทดสอบเวลาในการดูดซึมน้ำ (อ้างอิงจาก สตรีรัตน์, 2550; Selli *et al.*, 2001)

1.3 ทดสอบสมบัติการสกัดกั้นการซึมผ่านของกระดาษก่อนประยุกต์พลาสมา

1.3.1 ทดสอบการดูดซึมน้ำมัน (ดัดแปลงจาก ASTM D3285-93)

1.3.2 ทดสอบมุมสัมผัสของน้ำมัน (ดัดแปลงจาก ASTM D5946-04)

1.3.3 ทดสอบเวลาในการดูดซึมน้ำมัน (อ้างอิงจาก สตรีรัตน์, 2550; Selli *et al.*, 2001)

1.3.4 ทดสอบอัตราการซึมผ่านของไอน้ำ (ASTM E96)

1.3.5 ทดสอบอัตราการซึมผ่านของแก๊สออกซิเจน (ASTM D3985)

1.4 การวิเคราะห์พื้นผิวของกระดาษก่อนประยุกต์พลาสมา

1.4.1 วิเคราะห์ลักษณะพื้นผิว โดยเทคนิค scanning electron microscopy (SEM) ด้วยเครื่อง scanning electron microscope-energy dispersive x-ray spectrometer (JEOL JSM-5600LV, Japan) ด้วยกำลังขยาย 5,000 เท่า

1.4.2 วิเคราะห์ความขรุขระของพื้นผิว โดยเทคนิค atomic force microscopy (AFM) ด้วยเครื่อง atomic force microscope (Shimadzu SPM-9500, Japan) ในพื้นที่ 30×30 ไมโครเมตร

14.3 วิเคราะห์องค์ประกอบบนพื้นผิว โดยเทคนิค energy dispersive x-ray spectrometry (EDS) ด้วยเครื่อง scanning electron microscope-energy dispersive x-ray spectrometer (JEOL JSM-5600LV, Japan)

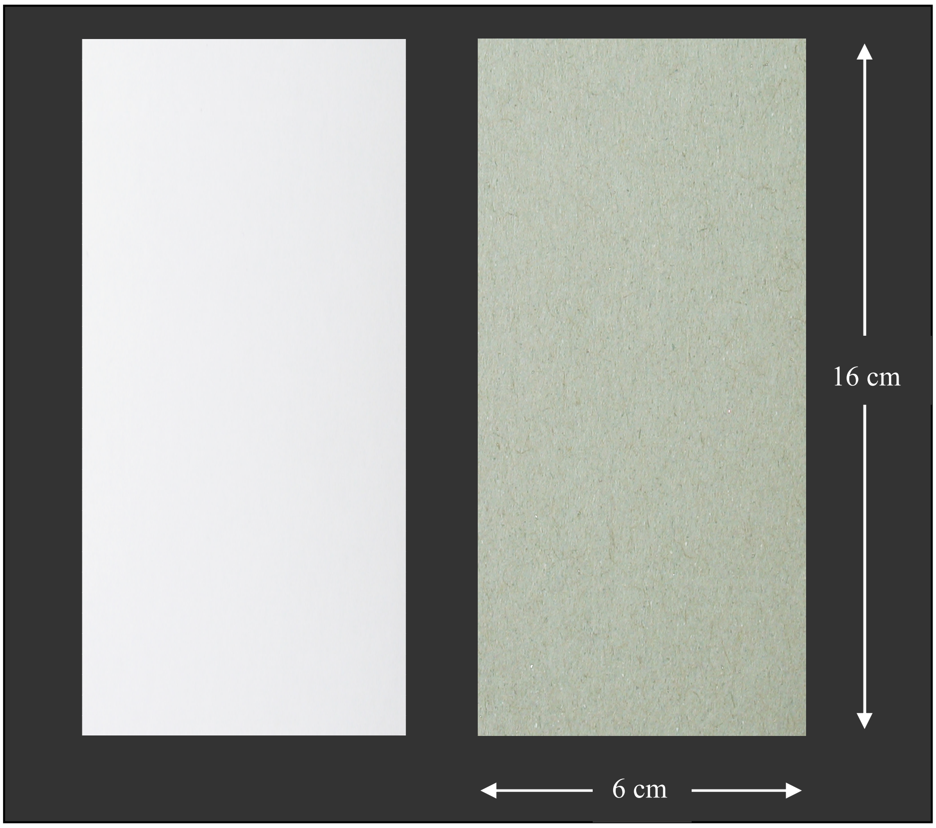
2. ประยุกต์พลาสมาโดยเครื่องผลิตพลาสมาความดันต่ำ

2.1 การเตรียมตัวอย่างกระดาษ

ตัดกระดาษขนาด 6×16 เซนติเมตร ทั้งในแนว MD และแนว CD ดังภาพที่ 15 เพื่อให้สามารถใส่กระดาษลงในแชมเบอร์สุญญากาศของเครื่องผลิตพลาสมาความดันต่ำได้พอดี (รายละเอียดระบบการทำงานของเครื่องผลิตพลาสมาความดันต่ำระบบ ICP สำหรับงานวิจัย แสดงในภาคผนวก ข)

2.2 การประยุกต์พลาสมาบนกระดาษ

ใส่ตัวอย่างกระดาษลงในแชมเบอร์สุญญากาศ และดูดอากาศออกเพื่อให้ความดันภายในแชมเบอร์สุญญากาศค่อยๆ ลดลงจนคงที่ จากนั้นผ่านแก๊สเข้าในแชมเบอร์สุญญากาศจนได้ความดันแก๊สที่ต้องการ ปรับกำลังคลื่นวิทยุตามที่ต้องการ เมื่อระบบทำงาน เครื่องกำเนิดคลื่นวิทยุจะส่งคลื่นรบกวนกระตุ้นให้แก๊สแตกตัวเป็นพลาสมาและเข้าประยุกต์บนผิวกระดาษ เมื่อเสร็จสิ้นการประยุกต์พลาสมา นำกระดาษออกจากแชมเบอร์สุญญากาศเพื่อนำไปทดสอบสมบัติด้านต่างๆ ของกระดาษต่อไป



(ก) ด้านหน้า (ข) ด้านหลัง

ภาพที่ 15 ลักษณะตัวอย่างกระดาษ (ก) ด้านหน้า และ (ข) ด้านหลัง

3. ศึกษาอิทธิพลของสภาวะพลาสมาต่อสมบัติการต้านทานน้ำของกระดาษ

3.1 แผนการทดลอง

วางแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ (completely randomized design, CRD) โดยศึกษา 2 ปัจจัย ได้แก่ กำลังคลื่นวิทยุ 3 ระดับ คือ 25, 50 และ 75 วัตต์ และความดันแก๊ส 4 ระดับ คือ 20, 50, 100 และ 200 มิลลิทอร์ โดยใช้ระยะเวลาในการประยุกต์พลาสมาคงที่ที่ 10 นาที เพื่อศึกษาระดับกำลังคลื่นวิทยุและความดันแก๊สที่เหมาะสมในการปรับปรุงสมบัติการต้านทานน้ำของกระดาษสำหรับการศึกษาในขั้นต่อไป

3.2 การทดลอง

นำกระดาษที่ผ่านการประยุกต์พลาสมาภายใต้สภาวะพลาสมาต่างๆ มาทดสอบสมบัติการต้านทานน้ำ (มุมสัมผัส งานของการยึดติด และเวลาในการดูดซึมน้ำ) ตามวิธีในข้อ 1.2.2, 1.2.3 และ 1.2.4 เปรียบเทียบผลทดสอบกับกระดาษที่ไม่ผ่านการประยุกต์พลาสมา

4. การพิจารณาเลือกระดับเวลาในการประยุกต์พลาสมา

4.1 แผนการทดลอง

วางแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ (completely randomized design, CRD) ศึกษาระยะเวลาในการประยุกต์พลาสมา ได้แก่ 2, 5, 10, 60, 300, 600, 1200 และ 1800 วินาที โดยกำหนดกำลังคลื่นวิทยุและความดันแก๊สที่เหมาะสมที่สุดจากผลการทดลองในข้อ 3 ทั้งนี้เพื่อเลือกระดับเวลาในการประยุกต์พลาสมาที่สนใจ 4 ระดับ โดยพิจารณาจากความสามารถในการต้านทานน้ำของกระดาษภายหลังการประยุกต์พลาสมา ซึ่งเวลาทั้ง 4 ระดับ ที่เลือกมานี้จะใช้ในการประยุกต์พลาสมา เพื่อศึกษาและเปรียบเทียบสมบัติด้านต่างๆ ของกระดาษภายหลังการประยุกต์พลาสมาต่อไป

4.2 การทดลอง

นำกระดาษที่ผ่านการประยุกต์พลาสมาที่ระดับเวลาในการประยุกต์พลาสมาต่างๆ มาทดสอบสมบัติการต้านทานน้ำ (มุมสัมผัส งานของการยึดติด และเวลาในการดูดซึมน้ำ) ตามวิธีในข้อ 1.2.2, 1.2.3 และ 1.2.4 เปรียบเทียบผลทดสอบกับกระดาษที่ไม่ผ่านการประยุกต์พลาสมา

5. ศึกษาอิทธิพลของระยะเวลาในการประยุกต์พลาสมาต่อสมบัติของกระดาษ

5.1 แผนการทดลอง

วางแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ (completely randomized design, CRD) ศึกษาระยะเวลาในการประยุกต์พลาสมา 4 ระดับ ซึ่งเลือกจากผลการทดลองในข้อ 4 โดยใช้ระดับกำลังคลื่นวิทยุและความดันแก๊สที่เหมาะสมที่สุดจากผลการทดลองในข้อ 3 เพื่อศึกษาอิทธิพลของระยะเวลาในการประยุกต์พลาสมาต่อสมบัติทางกายภาพ สมบัติเชิงกล สมบัติการต้านทานน้ำ และสมบัติการสกัดกั้นการซึมผ่านของกระดาษ

5.2 การทดลอง

นำกระดาษที่ผ่านการประยุกต์พลาสมามาตัดตามขนาดที่ต้องการตามวิธีการทดสอบแต่ละชนิด ปรับสภาวะกระดาษในตู้ควบคุมอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ที่สภาวะอุณหภูมิ 27 ± 1 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ 65 ± 2 เป็นเวลา 24 ชั่วโมง (ISO 187) จากนั้นทดสอบสมบัติด้านต่างๆ ของกระดาษที่ผ่านการประยุกต์พลาสมาเปรียบเทียบกับกระดาษที่ไม่ประยุกต์พลาสมา ดังนี้

5.2.1 ทดสอบสมบัติทางกายภาพ และสมบัติเชิงกล ตามวิธีในข้อ 1.1

5.2.2 ทดสอบสมบัติการต้านทานน้ำ ตามวิธีในข้อ 1.2

5.2.3 ทดสอบสมบัติการสกัดกั้นการซึมผ่าน ตามวิธีในข้อ 1.3

5.2.4 การวิเคราะห์พื้นผิว ตามวิธีในข้อ 1.4

6. ศึกษาอิทธิพลของระยะเวลาในการเก็บต่อสมบัติการต้านทานน้ำของกระดาษภายหลังการประยุกต์พลาสมา

เก็บกระดาษประยุกต์พลาสมาภายใต้อุณหภูมิ 25-32 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 48-74 ซึ่งเป็นสภาวะการเก็บกระดาษจริงภายในคลังสินค้าทั่วไปในประเทศแถบร้อนชื้น เป็นเวลา 4 สัปดาห์ ซึ่งเป็นระยะเวลาโดยประมาณที่ผู้ใช้กล่องกระดาษจะเก็บตัวอย่างกล่องไว้ในคลังสินค้าก่อนการใช้งาน (นวพร, 2549) โดยสุ่มตัวอย่าง ณ วันที่ 1, 3, 7, 14, 21 และวันที่ 28 ภายหลังจากการประยุกต์พลาสมา เพื่อนำมาทดสอบสมบัติการต้านทานน้ำของกระดาษ โดยทดสอบเวลาในการดูดซึมน้ำตามวิธีในข้อ 1.2.4 เปรียบเทียบกับกระดาษที่ไม่ประยุกต์พลาสมา

7. วิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

วิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติโดยการทดสอบความแปรปรวน (analysis of variance, ANOVA) และเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยระหว่างทรีตเมนต์โดยวิธี Duncan’s new multiple range test (DMRT) ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ด้วยโปรแกรม SPSS เวอร์ชัน 10

ผลและวิจารณ์

1. สมบัติของกระดาษตัวอย่าง

กระดาษที่ใช้ในการทดลองเป็นกระดาษแข็งประเภท duplex board เคลือบหน้าเดียว น้ำหนักมาตรฐาน 300 กรัมต่อตารางเมตร โดยกระดาษด้านหน้าหรือด้านที่เคลือบผิวมีลักษณะผิวเรียบและมีสีขาว ส่วนกระดาษด้านหลังเป็นด้านที่ไม่ผ่านการเคลือบผิวใดๆ มีลักษณะผิวหยาบและมีสีเทา (ภาพที่ 16) ผลการตรวจสอบค่าสมบัติทางกายภาพ สมบัติเชิงกล สมบัติการต้านทานน้ำ และสมบัติการสกัดกั้นการซึมผ่านของกระดาษก่อนการประยุกต์พลาสมา แสดงดังตารางที่ 4 ทั้งนี้ผลการวิเคราะห์พื้นผิวของกระดาษก่อนประยุกต์พลาสมาจะอธิบายรวมกับผลการทดลองข้อ 9 เรื่องการวิเคราะห์พื้นผิวของกระดาษประยุกต์พลาสมา

(ก) ด้านหน้า (ข) ด้านหลัง

ภาพที่ 16 ลักษณะปรากฏของกระดาษ (ก) ด้านหน้า และ (ข) ด้านหลัง

ตารางที่ 4 สมบัติของกระดาษก่อนการประยุกต์พลาสมา

	สมบัติ	ค่าทดสอบ
สมบัติทางกายภาพ	น้ำหนักมาตรฐาน (กรัม/ตารางเมตร)	296.1 ± 0.3
	ความหนา (มิลลิเมตร)	0.337 ± 0.002
	ความชื้น (ร้อยละ)	8.18 ± 0.08
	ค่าสี L* (ด้านหน้า)	89.62 ± 0.11
	ค่าสี L* (ด้านหลัง)	69.26 ± 0.06
	ค่าสี a* (ด้านหน้า)	0.02 ± 0.01
	ค่าสี a* (ด้านหลัง)	0.50 ± 0.02
	ค่าสี b* (ด้านหน้า)	-0.17 ± 0.04
	ค่าสี b* (ด้านหลัง)	3.21 ± 0.04
สมบัติเชิงกล	ความต้านทานแรงกดวงแหวนแนว MD (กิโลนิวตัน/เมตร)	3.14 ± 0.05
	ความต้านทานแรงกดวงแหวนแนว CD (กิโลนิวตัน/เมตร)	2.28 ± 0.05
	ความต้านทานแรงดึงแนว MD (กิโลนิวตัน/เมตร)	16.64 ± 0.29
	ความต้านทานแรงดึงแนว CD (กิโลนิวตัน/เมตร)	7.31 ± 0.11
	ความต้านทานต่อการพับแนว MD (รอบ)	360 ± 6.3
	ความต้านทานต่อการพับแนว CD (รอบ)	161 ± 5.6
สมบัติการต้านทานน้ำ	มุมสัมผัส (องศา) (ด้านหน้า)	70 ± 2.0
	มุมสัมผัส (องศา) (ด้านหลัง)	25 ± 1.9
	งานของการยึดติด (ดายน์/เซนติเมตร) (ด้านหน้า)	91.6 ± 2.1
	งานของการยึดติด (ดายน์/เซนติเมตร) (ด้านหลัง)	138.7 ± 1.1
	เวลาในการดูดซึมน้ำ (นาที) (ด้านหน้า)	> 200
	เวลาในการดูดซึมน้ำ (นาที) (ด้านหลัง)	1 ± 0.10
	การดูดซึมน้ำ (กรัม/ตารางเมตร) (ด้านหน้า)	1.53 ± 0.06
	การดูดซึมน้ำ (กรัม/ตารางเมตร) (ด้านหลัง)	15.60 ± 0.28

ตารางที่ 4 (ต่อ)

	สมบัติ	ค่าทดสอบ
สมบัติการสกัดกั้นการซึมผ่าน	มุมสัมผัสน้ำมัน (องศา) (ด้านหน้า)	n/a
	มุมสัมผัสน้ำมัน (องศา) (ด้านหลัง)	13 ± 0.8
	เวลาในการดูดซึมน้ำมัน (นาที) (ด้านหน้า)	> 200
	เวลาในการดูดซึมน้ำมัน (นาที) (ด้านหลัง)	101 ± 2.1
	การดูดซึมน้ำมัน (กรัม/ตารางเมตร) (ด้านหน้า)	1.30 ± 0.13
	การดูดซึมน้ำมัน (กรัม/ตารางเมตร) (ด้านหลัง)	5.40 ± 0.11
	อัตราการซึมผ่านของไอน้ำ (กรัม/ตารางเมตร/วัน) (ด้านหน้า)	0.7531 ± 0.060
	อัตราการซึมผ่านของไอน้ำ (กรัม/ตารางเมตร/วัน) (ด้านหลัง)	0.6916 ± 0.049
	อัตราการซึมผ่านของแก๊สออกซิเจน (ลูกบาศก์เซนติเมตร/ตารางเมตร/วัน) (ด้านหน้า)	40,382 ± 543
	อัตราการซึมผ่านของแก๊สออกซิเจน (ลูกบาศก์เซนติเมตร/ตารางเมตร/วัน) (ด้านหลัง)	40,309 ± 370

หมายเหตุ n/a ไม่สามารถวัดค่าได้

2. อิทธิพลของสภาวะพลาสมาต่อสมบัติการต้านทานน้ำของกระดาษ

จากการศึกษาอิทธิพลของกำลังคลื่นวิทยุและความดันแก๊สต่อสมบัติการต้านทานน้ำของกระดาษด้วยการประยุกต์พลาสมาที่กำลังคลื่นวิทยุ 25, 50 และ 75 วัตต์ ความดันแก๊ส 20, 50, 100 และ 200 มิลลิทอร์ เป็นระยะเวลา 10 นาที ผลการทดลองแสดงในตารางที่ 5

ตารางที่ 5 มุมสัมผัส งานของการยึดติด และเวลาในการดูดซึมน้ำของกระดาษประยุกต์พลาสมาที่กำลังคลื่นวิทยุและความดันแก๊สแตกต่างกัน

กระดาษ	กำลังคลื่นวิทยุ (วัตต์)	ความดันแก๊ส (มิลลิทอร์)	ค่าทดสอบ		
			มุมสัมผัส (องศา)	งานของการยึดติด (ดายน์/ซม.)	เวลาในการดูดซึมน้ำ (นาที)
ด้านหน้า	untreated	untreated	75 ± 1.7 [b]	91.6 ± 2.1 [p]	129 ± 3.0 [de]
	25	20	85 ± 1.3 [c]	79.1 ± 1.6 [o]	117 ± 3.1 [b]
		50	101 ± 2.2 [e]	58.7 ± 2.8 [m]	125 ± 2.1 [cd]
		100	105 ± 2.3 [g]	54.2 ± 2.8 [k]	129 ± 2.5 [de]
		200	120 ± 1.4 [kl]	37.0 ± 1.5 [fg]	130 ± 3.0 [de]
	50	20	103 ± 2.1 [f]	56.4 ± 2.6 [l]	127 ± 1.7 [cde]
		50	108 ± 1.2 [h]	49.9 ± 1.5 [j]	130 ± 2.6 [de]
		100	115 ± 1.9 [j]	42.3 ± 2.2 [h]	132 ± 3.1 [e]
		200	130 ± 1.6 [n]	25.9 ± 1.5 [d]	141 ± 2.6 [f]
	75	20	93 ± 2.0 [d]	69.2 ± 2.6 [n]	115 ± 3.0 [b]
		50	93 ± 1.8 [d]	69.6 ± 2.2 [n]	123 ± 3.1 [c]
		100	138 ± 2.2 [q]	18.6 ± 1.9 [a]	129 ± 3.2 [de]
		200	n/a	n/a	n/a
ด้านหลัง	untreated	untreated	25 ±1.9 [a]	138.7 ± 1.1 [q]	1 ± 0.1 [a]
	25	20	112 ± 1.0 [i]	46.1 ± 1.2 [i]	149 ± 2.5 [g]
		50	119 ± 1.2 [k]	37.3 ± 1.3 [g]	150 ± 2.5 [g]
		100	126 ± 1.2 [m]	29.7 ± 1.2 [e]	157 ± 2.6 [h]
		200	131 ± 0.8 [no]	25.4 ± 0.8 [cd]	158 ± 3.0 [h]
	50	20	119 ± 1.0 [k]	37.9 ± 1.2 [g]	149 ± 2.6 [g]
		50	121 ± 0.8 [l]	35.5 ± 0.8 [f]	157 ± 1.2 [h]
		100	128 ± 0.9 [m]	28.0 ± 0.9 [e]	171 ± 2.5 [j]
		200	132 ± 1.4 [o]	23.8 ± 1.3 [c]	174 ± 1.7 [j]

ตารางที่ 5 (ต่อ)

กระดาษ	กำลังคลื่นวิทยุ (วัตต์)	ความดันแก๊ส (มิลลิทอร์)	ค่าทดสอบ		
			มุมสัมผัส (องศา)	งานของการยึดติด (ดายน์/ซม.)	เวลาในการดูดซึมน้ำ (นาที)
ด้านหลัง	75	20	121 ± 0.9 [l]	35.3 ± 1.0 [f]	129 ± 1.7 [de]
		50	135 ± 1.0 [p]	21.6 ± 0.9 [b]	148 ± 2.5 [g]
		100	137 ± 0.8 [q]	19.4 ± 0.6 [a]	162 ± 2.5 [i]
		200	n/a	n/a	n/a

หมายเหตุ [a-q] ตัวอักษรที่ต่างกันในแถวตั้งหมายถึงค่าเฉลี่ยมีความแตกต่างกันทางสถิติ ($p \leq 0.05$)
n/a ไม่สามารถวัดค่าได้

กระดาษที่ผ่านการประยุกต์พลาสมามีมุมสัมผัสสูงกว่ากระดาษไม่ประยุกต์พลาสมาอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) โดยกระดาษด้านหน้ามีมุมสัมผัสเพิ่มขึ้นจาก 75 องศา เป็น 85-138 องศา ส่วนกระดาษด้านหลังมีมุมสัมผัสเพิ่มขึ้นจาก 25 องศา เป็น 112-137 องศา เมื่อนำค่ามุมสัมผัสที่ได้มาคำนวณค่างานของการยึดติด (work of adhesion, W_a) (วิธีการคำนวณแสดงในภาคผนวก ก) พบว่าเมื่อมุมสัมผัสมีค่าเพิ่มขึ้นงานของการยึดติดจะมีค่าลดลง แสดงให้เห็นว่าหยดน้ำสามารถยึดติดกับผิวกระดาษได้น้อยลง

เมื่อพิจารณากำลังคลื่นวิทยุ พบว่า หากกำลังคลื่นวิทยุเพิ่มสูงขึ้น ส่งผลให้มุมสัมผัสมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) อย่างไรก็ตาม กระดาษที่ผ่านการประยุกต์พลาสมาที่กำลังคลื่นวิทยุ 75 วัตต์ มีกลิ่นคล้ายกระดาษไหม้ อาจเนื่องมาจากที่กำลังคลื่นวิทยุ 75 วัตต์ ความร้อนในกระบวนการผลิตพลาสมาสูงขึ้น จึงส่งผลต่อเส้นใยหรือองค์ประกอบของกระดาษ ซึ่งอาจถูกทำลายหรือเกิดการไหม้จากความร้อนที่เกิดขึ้น

เมื่อพิจารณาความดันแก๊ส พบว่า หากความดันแก๊สเพิ่มสูงขึ้น ส่งผลให้มุมสัมผัสของกระดาษมีค่าสูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) เช่นเดียวกัน นอกจากนี้ พบว่าที่ความดันแก๊ส 200 มิลลิทอร์ การเปล่งแสงของพลาสมาที่เกิดขึ้นภายในแชมเบอร์สุญญากาศมีลักษณะไม่สม่ำเสมอ โดยบริเวณด้านบนของแชมเบอร์สุญญากาศนั้นพลาสมามีสีเข้มและสุกสว่างมากกว่าบริเวณด้าน

ล่างของแชมเบอร์สุญญากาศ อีกทั้งในสภาวะที่กำลังคลื่นวิทยุ 75 วัตต์ ความดันแก๊ส 200 มิลลิทอร์ เกิดความร้อนสูงในการประยุกต์พลาสมา จึงต้องยุติการประยุกต์พลาสมาในสภาวะนี้ เพื่อป้องกันไม่ให้เครื่องมือและระบบพลาสมาเกิดความเสียหาย

นอกจากการวัดค่ามุมสัมผัสและการคำนวณค่างานของการยึดติดแล้ว ความสามารถในการต้านทานน้ำอาจพิจารณาได้จากความสามารถในการดูดซึมน้ำลงในเนื้อกระดาษ เมื่อจับเวลาในการดูดซึมน้ำหนึ่งหยดของกระดาษ พบว่า ที่กำลังคลื่นวิทยุ 75 วัตต์ เวลาในการดูดซึมน้ำของกระดาษมีค่าน้อยกว่าที่กำลังคลื่นวิทยุ 25 และ 50 วัตต์ อาจเนื่องมาจากที่กำลังคลื่นวิทยุ 75 วัตต์ เกิดความร้อนสูงในแชมเบอร์สุญญากาศ ซึ่งส่งผลต่อองค์ประกอบของกระดาษ และเมื่อพิจารณาความดันแก๊ส พบว่า หากความดันแก๊สเพิ่มขึ้นทำให้เวลาในการดูดซึมน้ำของกระดาษมีค่าเพิ่มขึ้น แสดงให้เห็นว่า เมื่อความดันแก๊สสูงขึ้นกระดาษสามารถต้านทานน้ำได้นานขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ สตรีรัตน์ (2550) ที่กล่าวว่า เมื่อความดันแก๊สพลาสมาและกำลังคลื่นวิทยุมากขึ้น เวลาที่ใช้ในการดูดซึมน้ำหนึ่งหยดก็มากขึ้นเช่นเดียวกัน โดยถ้ากำลังคลื่นวิทยุมากขึ้นจะมีการแตกตัวของแก๊สซัลเฟอร์เฮกซะฟลูออไรด์เป็นฟลูออรีนที่พร้อมจะเกิดพันธะกับอะตอมอื่นๆ มากขึ้น

ผลการทดลองในขั้นตอนนี้สามารถสรุปได้ว่า ที่กำลังคลื่นวิทยุ 50 วัตต์ และความดันแก๊ส 100 มิลลิทอร์ เป็นสภาวะที่เหมาะสมในการปรับปรุงสมบัติการต้านทานน้ำของกระดาษสำหรับการทดลองนี้ ดังนั้น จึงกำหนดสภาวะพลาสมาที่ 50 วัตต์ และความดันแก๊สที่ 100 มิลลิทอร์ เป็นสภาวะในการประยุกต์พลาสมาสำหรับการศึกษาอิทธิพลของระยะเวลาในการประยุกต์พลาสมาต่อสมบัติของกระดาษในการศึกษาขั้นต่อไป

3. การพิจารณาเลือกระดับเวลาในการประยุกต์พลาสมา

การพิจารณาเลือกระดับเวลาในการประยุกต์พลาสมานั้นจะใช้ระดับกำลังคลื่นวิทยุ 50 วัตต์ ความดันแก๊ส 100 มิลลิทอร์ ซึ่งได้จากผลการทดลองในข้อ 2 และกำหนดระยะเวลาในการประยุกต์พลาสมาแตกต่างกัน 8 ระดับ ได้แก่ 2, 5, 10, 60, 300, 600, 1200 และ 1800 วินาที โดยผลการทดสอบสมบัติการต้านทานน้ำของกระดาษแสดงดังตารางที่ 6

ตารางที่ 6 มุมสัมผัส งานของการยึดติด และเวลาในการดูดซึมน้ำของกระดาษประยุกต์พลาสมาที่เวลาในการประยุกต์พลาสมาแตกต่างกัน

กระดาษ	เวลาในการประยุกต์พลาสมา (วินาที)	ค่าทดสอบ มุมสัมผัส (องศา)	งานของการยึดติด (ดายน์/ซม.)	เวลาในการดูดซึมน้ำ (นาที)
ด้านหน้า	untreated	74 ± 1.5 [b]	92.7 ± 1.8 [h]	127 ± 3.0 [f]
	2	111 ± 1.2 [c]	46.9 ± 1.2 [g]	129 ± 2.1 [fgh]
	5	112 ± 1.3 [c]	45.7 ± 1.6 [g]	129 ± 3.1 [fgh]
	10	122 ± 1.4 [e]	34.2 ± 1.5 [e]	130 ± 2.5 [fghi]
	60	124 ± 0.8 [f]	32.4 ± 0.9 [d]	131 ± 3.2 [ghij]
	300	124 ± 1.2 [f]	31.7 ± 1.3 [d]	133 ± 3.1 [hij]
	600	126 ± 0.8 [g]	29.7 ± 0.8 [c]	134 ± 2.6 [j]
	1200	125 ± 1.3 [fg]	31.1 ± 1.3 [cd]	134 ± 2.5 [j]
	1800	125 ± 1.2 [fg]	33.5 ± 1.3 [cd]	133 ± 2.5 [hij]
ด้านหลัง	untreated	25 ±1.9 [a]	138.7 ± 1.1 [i]	1 ± 0.1 [a]
	2	110 ± 1.0 [c]	47.5 ± 1.2 [g]	47 ± 1.6 [b]
	5	115 ± 1.9 [d]	42.2 ± 2.2 [f]	84 ± 1.7 [c]
	10	126 ± 1.6 [g]	30.0 ± 1.6 [c]	104 ± 1.8 [d]
	60	130 ± 1.6 [h]	25.9 ± 1.6 [b]	106 ± 1.8 [d]
	300	131 ± 1.3 [h]	25.0 ± 1.2 [b]	117 ± 2.0 [e]
	600	134 ± 0.8 [i]	21.8 ± 0.8 [a]	129 ± 1.9 [fgh]
	1200	134 ± 2.1 [i]	21.8 ± 1.9 [a]	130 ± 1.9 [fghi]
	1800	134 ± 0.8 [i]	22.1 ± 0.7 [a]	128 ± 1.6 [fg]

หมายเหตุ [a-j] ตัวอักษรที่ต่างกันในแถวตั้งหมายถึงค่าเฉลี่ยมีความแตกต่างกันทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

จากผลการทดลอง พบว่า กระดาษประยุกต์พลาสมาโดยใช้เวลาเพียง 2 วินาที สามารถต้านทานน้ำได้มากกว่ากระดาษไม่ผ่านการประยุกต์พลาสมาอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) และเมื่อเวลาในการประยุกต์พลาสมานานขึ้น ทำให้สมบัติการต้านทานน้ำของกระดาษเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจนถึงจุดๆ หนึ่ง การทดลองพบว่า เมื่อใช้เวลาในการประยุกต์พลาสมา 60 และ 300 วินาที กระดาษมีความสามารถในการต้านทานน้ำไม่แตกต่างกัน ซึ่งสังเกตได้จากค่ามุมสัมผัส ส่วนการประยุกต์พลาสมาที่เวลา 600, 1200 และ 1800 วินาที พบว่า กระดาษมีความสามารถในการต้านทานน้ำไม่แตกต่างกันเช่นเดียวกัน โดยลักษณะหยดน้ำบนพื้นผิวกระดาษภายหลังการประยุกต์พลาสมาแสดงดังตารางที่ 7

จากผลการทดลองสามารถเลือกระดับเวลาในการประยุกต์พลาสมาสำหรับการศึกษาสมบัติด้านต่างๆ ของกระดาษได้เป็น 4 ทรีตเมนต์ ดังนี้

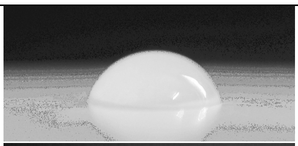
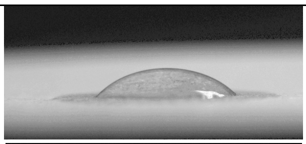
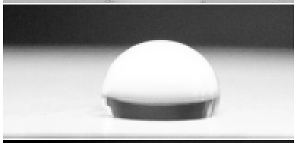
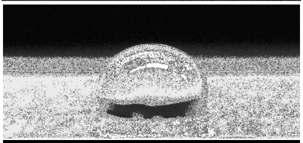
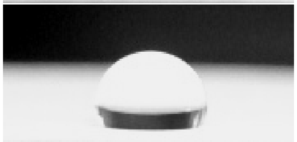
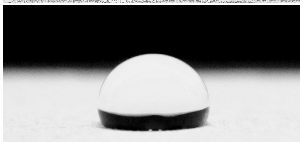
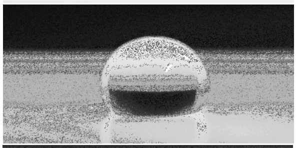
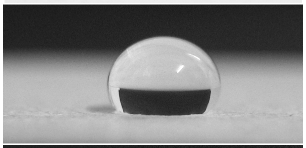
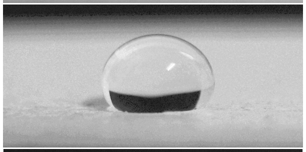
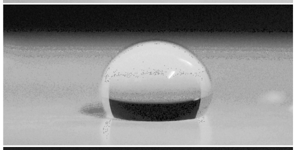
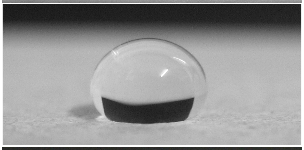
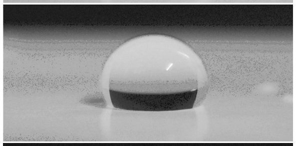
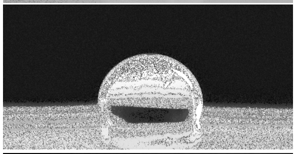
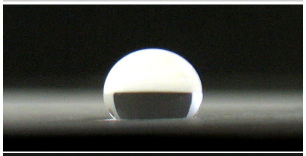
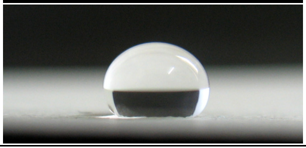
ทรีตเมนต์ที่ 1: เวลาในการประยุกต์พลาสมา 2 วินาที (กำลังคลื่นวิทยุ 50 วัตต์ ความดันแก๊ส 100 มิลลิทอร์) ซึ่งเป็นเวลาน้อยที่สุดที่สามารถเพิ่มสมบัติการต้านทานน้ำของกระดาษได้อย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$)

ทรีตเมนต์ที่ 2: เวลาในการประยุกต์พลาสมา 10 วินาที (กำลังคลื่นวิทยุ 50 วัตต์ ความดันแก๊ส 100 มิลลิทอร์) ซึ่งเป็นเวลาที่ไม่นานเกินไปที่สามารถเพิ่มสมบัติการต้านทานน้ำของกระดาษได้ดี และมีความเป็นไปได้ที่จะประยุกต์ใช้ในระดับอุตสาหกรรม

ทรีตเมนต์ที่ 3: เวลาในการประยุกต์พลาสมา 60 วินาที (กำลังคลื่นวิทยุ 50 วัตต์ ความดันแก๊ส 100 มิลลิทอร์) ซึ่งเป็นเวลาที่ไม่นานเกินไปที่สามารถเพิ่มสมบัติการต้านทานน้ำของกระดาษได้ดี และมีความเป็นไปได้ที่จะประยุกต์ใช้ในระดับอุตสาหกรรม

ทรีตเมนต์ที่ 4: เวลาในการประยุกต์พลาสมา 600 วินาที (กำลังคลื่นวิทยุ 50 วัตต์ ความดันแก๊ส 100 มิลลิทอร์) ซึ่งเป็นเวลาที่สามารถเพิ่มสมบัติการต้านทานน้ำของกระดาษได้ดีที่สุด

ตารางที่ 7 ลักษณะหยดน้ำบนผิวกระดาษที่ใช้เวลาในการประยุกต์พลาสมาแตกต่างกัน

เวลาในการประยุกต์พลาสมา (วินาที)	ลักษณะหยดน้ำบนผิวกระดาษ[1]	
	กระดาษด้านหน้า	กระดาษด้านหลัง
untreated		
2		
5		
10		
60		
300		
600		
1200		
1800		

หมายเหตุ [1] ปริมาตรหยดน้ำ 40 ไมโครลิตร

4. สมบัติทางกายภาพของกระดาษ

น้ำหนักมาตรฐาน ความหนา และปริมาณความชื้นของกระดาษประยุกต์พลาสมาและกระดาษที่ไม่ประยุกต์พลาสมา แสดงดังตารางที่ 8 ผลการทดลองพบว่า กระดาษประยุกต์พลาสมาและกระดาษที่ไม่ผ่านการประยุกต์พลาสมามีน้ำหนักมาตรฐาน ความหนา และปริมาณความชื้นไม่มีความแตกต่างกัน เนื่องจากการประยุกต์พลาสมาส่งผลต่อผิวกระดาษในระดับนาโนเมตรเท่านั้น จึงไม่ส่งผลต่อน้ำหนักมาตรฐาน ความหนา และปริมาณความชื้นของกระดาษ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Vaswani (2005)

ตารางที่ 8 น้ำหนักมาตรฐาน ความหนา และปริมาณความชื้นของกระดาษประยุกต์พลาสมา

เวลาในการประยุกต์พลาสมา (วินาที)	ค่าทดสอบ		
	น้ำหนักมาตรฐาน (กรัม/ตร.ม.)	ความหนา (มม.)	ปริมาณความชื้น (ร้อยละ)
untreated	296.1 ± 0.3^{ns}	0.337 ± 0.002^{ns}	8.18 ± 0.08^{ns}
2	295.4 ± 0.2^{ns}	0.337 ± 0.003^{ns}	8.15 ± 0.06^{ns}
10	296.3 ± 0.3^{ns}	0.337 ± 0.004^{ns}	8.17 ± 0.07^{ns}
60	295.1 ± 0.3^{ns}	0.338 ± 0.003^{ns}	8.19 ± 0.06^{ns}
600	295.8 ± 0.3^{ns}	0.337 ± 0.003^{ns}	8.18 ± 0.09^{ns}

หมายเหตุ ^{ns} ตัวอักษรในแถวตั้งหมายถึงค่าเฉลี่ยไม่มีความแตกต่างกัน

ผลการวัดสีของกระดาษประยุกต์พลาสมาแสดงดังตารางที่ 9 โดยเมื่อพิจารณาค่าสี L* ซึ่งแสดงถึงความสว่างของกระดาษ พบว่า ภายหลังการประยุกต์พลาสมา กระดาษด้านหน้า L* มีค่าลดลง ในขณะที่กระดาษด้านหลัง L* ไม่มีการเปลี่ยนแปลง ส่วนค่าสี a* พบว่า กระดาษด้านหน้า a* มีค่าเพิ่มขึ้น ในขณะที่กระดาษด้านหลัง a* มีค่าลดลง และเมื่อพิจารณาค่าสี b* พบว่า กระดาษด้านหน้า b* มีค่าลดลง ในขณะที่กระดาษด้านหลัง b* มีค่าเพิ่มขึ้น แสดงให้เห็นว่าภายหลังการประยุกต์พลาสมาทำให้ความสว่างของกระดาษลดลง และสีมีการเปลี่ยนแปลง

ตารางที่ 9 สีของกระดาษประยุกต์พลาสมา

กระดาษ	เวลาในการประยุกต์พลาสมา (วินาที)	ค่าทดสอบ		
		L*	a*	b*
ด้านหน้า	untreated	89.62 ± 0.11 [d]	0.02 ± 0.01 [a]	-0.17 ± 0.04 [c]
	2	88.65 ± 0.11 [b]	0.31 ± 0.02 [c]	-0.83 ± 0.02 [a]
	10	88.75 ± 0.03 [c]	0.32 ± 0.01 [c]	-0.80 ± 0.06 [a]
	60	88.68 ± 0.06 [cb]	0.31 ± 0.06 [c]	-0.49 ± 0.10 [b]
	600	88.68 ± 0.10 [cb]	0.30 ± 0.03 [bc]	-0.51 ± 0.08 [b]
ด้านหลัง	untreated	69.26 ± 0.06 [a]	0.50 ± 0.02 [e]	3.21 ± 0.04 [d]
	2	69.26 ± 0.04 [a]	0.34 ± 0.02 [d]	3.25 ± 0.08 [d]
	10	69.27 ± 0.03 [a]	0.35 ± 0.02 [d]	3.26 ± 0.05 [d]
	60	69.25 ± 0.06 [a]	0.32 ± 0.02 [c]	3.46 ± 0.06 [e]
	600	69.20 ± 0.08 [a]	0.28 ± 0.01 [b]	3.86 ± 0.13 [f]

หมายเหตุ [a-f] ตัวอักษรที่ต่างกันในแถวตั้งหมายถึงค่าเฉลี่ยมีความแตกต่างกันทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

เมื่อทดลองนำกระดาษที่ไม่ผ่านการประยุกต์พลาสมาไปอบความร้อนที่อุณหภูมิ 105 และ 130 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที ทิ้งไว้ให้กระดาษเย็นตัวลง และนำมาวัดสีเพื่อใช้ในการเปรียบเทียบผลกับกระดาษประยุกต์พลาสมา ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 10 พบว่า เมื่ออบกระดาษด้วยความร้อน ทำให้สีของกระดาษเกิดการเปลี่ยนแปลง ซึ่งกระดาษอบความร้อนและกระดาษประยุกต์พลาสมามีแนวโน้มการเปลี่ยนสีที่เหมือนกันทั้งกระดาษด้านหน้าและด้านหลัง แสดงให้เห็นว่าการเปลี่ยนสีของกระดาษประยุกต์พลาสมาเกิดขึ้นเนื่องจากความร้อนขณะประยุกต์พลาสมาบนกระดาษ โดยความร้อนอาจทำให้สารเติมแต่งหรือเส้นใยเซลลูโลสเกิดการ degradation ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของสีที่เป็นองค์ประกอบของสารเติมแต่งหรือเส้นใยเซลลูโลสนั้น ซึ่งสอดคล้องกับหลายงานวิจัยที่พบว่า ภายหลังการประยุกต์พลาสมาบนกระดาษ กระดาษจะมีความสว่างลดลง และมีสีเหลืองเพิ่มขึ้น ซึ่งเกิดจากอิทธิพลของความร้อนและรังสีอัลตราไวโอเลตที่เกิดขึ้นขณะทำการประยุกต์พลาสมา (Sahin *et al.*, 2002; Kloc *et al.*, 2006; Vrajova and Krčma, 2006)

ตารางที่ 10 สีของกระดาษหลังผ่านการอบความร้อน

กระดาษ	อุณหภูมิในตู้อบ (องศาเซลเซียส)	ค่าทดสอบ[1]		
		L*	a*	b*
	untreated	89.62 ± 0.11 [c]	0.02 ± 0.01 [a]	-0.17 ± 0.04 [c]
ด้านหน้า	105	89.15 ± 0.04 [b]	0.33 ± 0.02 [c]	-0.86 ± 0.02 [a]
	130	89.16 ± 0.06 [b]	0.28 ± 0.02 [b]	-0.55 ± 0.03 [b]
	untreated	69.26 ± 0.06 [a]	0.50 ± 0.02 [e]	3.21 ± 0.04 [d]
ด้านหลัง	105	69.27 ± 0.04 [a]	0.37 ± 0.02 [d]	3.39 ± 0.02 [e]
	130	69.29 ± 0.03 [a]	0.32 ± 0.01 [c]	3.61 ± 0.02 [f]

หมายเหตุ [a-f] ตัวอักษรที่ต่างกันในแถวตั้งหมายถึงค่าเฉลี่ยมีความแตกต่างกันทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

[1] อบความร้อนนาน 30 นาที ด้วยตู้อบลมร้อนแบบควบคุมอุณหภูมิ (Contherm, Contherm Scientific Limited)

5. สมบัติเชิงกลของกระดาษ

ผลการทดสอบความต้านทานแรงกดวงแหวน ความต้านทานต่อการพับ และความต้านทานแรงดึงในแนว MD และ CD ของกระดาษประยุกต์พลาสมาแสดงดังตารางที่ 11 เมื่อพิจารณาความต้านทานแรงกดวงแหวนของกระดาษแนว MD พบว่า กระดาษประยุกต์พลาสมามีความต้านทานแรงกดวงแหวนน้อยกว่ากระดาษไม่ประยุกต์พลาสมาอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) อย่างไรก็ตาม สำหรับกระดาษแนว CD พบว่า กระดาษประยุกต์พลาสมาและกระดาษไม่ประยุกต์พลาสมามีความต้านทานแรงกดวงแหวนไม่แตกต่างกัน เมื่อพิจารณาความต้านทานการพับ พบว่า กระดาษประยุกต์พลาสมาทั้งแนว MD และ CD มีความต้านทานการพับน้อยกว่ากระดาษไม่ประยุกต์พลาสมาอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) อย่างไรก็ตาม พบว่า กระดาษประยุกต์พลาสมาและกระดาษไม่ประยุกต์พลาสมามีความต้านทานแรงดึงไม่แตกต่างกัน

ตารางที่ 11 ความต้านทานแรงกดวงแหวน ความต้านทานต่อการพับ และความต้านทานแรงดึงของกระดาษประยุกต์พลาสมา

ทิศทาง	เวลาในการประยุกต์พลาสมา (วินาที)	ค่าทดสอบ		
		ความต้านทานแรงกดวงแหวน (กิโลนิวตัน/ม.)	ความต้านทานการพับ (รอบ)	ความต้านทานแรงดึง (กิโลนิวตัน/ม.)
MD	untreated	3.14 ± 0.05^{c}	360 ± 6.3^{f}	16.64 ± 0.29^{b}
	2	2.91 ± 0.05^{b}	269 ± 5.3^{e}	16.75 ± 0.56^{b}
	10	2.90 ± 0.03^{b}	271 ± 6.3^{e}	16.84 ± 0.54^{b}
	60	2.91 ± 0.05^{b}	272 ± 6.0^{e}	16.80 ± 0.38^{b}
	600	2.91 ± 0.03^{b}	263 ± 8.3^{d}	16.71 ± 0.40^{b}
CD	untreated	2.28 ± 0.05^{a}	161 ± 5.6^{c}	7.11 ± 0.11^{a}
	2	2.26 ± 0.04^{a}	137 ± 7.7^{b}	7.43 ± 0.15^{a}
	10	2.26 ± 0.04^{a}	141 ± 8.0^{b}	7.46 ± 0.13^{a}
	60	2.27 ± 0.05^{a}	136 ± 6.4^{b}	7.31 ± 0.14^{a}
	600	2.28 ± 0.05^{a}	113 ± 6.8^{a}	7.35 ± 0.21^{a}

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

ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า การประยุกต์พลาสมาทำให้ความแข็งแรงของกระดาษลดลง ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Sahin *et al.* (2002) โดยสาเหตุอาจเนื่องมาจากสายโซ่ของโมเลกุลเซลลูโลสบริเวณผิวกระดาษเกิดการแตกออกจากกันภายใต้อิทธิพลของ particle bombardment และ vacuum ultraviolet (VUV) irradiation ที่มีพลังงานสูงในขณะประยุกต์พลาสมา ส่งผลให้ความแข็งแรงของกระดาษลดลง (Deslandes *et al.*, 1998; Vohrer *et al.*, 2001; Vrajova and Krčma, 2006) ซึ่งการแตกออกของสายโซ่โมเลกุลเซลลูโลส ทำให้ความยาวของสายโซ่สั้นลง ส่งผลให้ความสามารถในการต้านทานแรงกดในแนวดิ่งและการต้านทานการพับลดลงได้ โดยเฉพาะกระดาษแนว MD ส่วนกระดาษแนว CD นั้น องค์ประกอบของเส้นใยไม่ได้มีส่วนช่วยในการรับแรงมากนักจึงเกิดการเปลี่ยนแปลงน้อยกว่ากระดาษแนว MD

6. สมบัติการต้านทานน้ำของกระดาษ

ค่ามุมสัมผัส งานของการยึดติด การดูดซึมน้ำ และเวลาในการดูดซึมน้ำของกระดาษประยุกต์พลาสมาแสดงดังตารางที่ 12 เมื่อพิจารณากระดาษด้านหน้าและด้านหลังพบว่า ได้ผลเป็นแนวโน้มเดียวกัน โดยกระดาษประยุกต์พลาสมามีความสามารถในการต้านทานน้ำเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน เห็นได้จากการดูดซึมน้ำที่ลดลง มุมสัมผัส และเวลาในการดูดซึมน้ำที่เพิ่มขึ้น และเมื่อนำมุมสัมผัสที่ได้มาคำนวณค่างานของการยึดติด พบว่า เมื่อมุมสัมผัสเพิ่มขึ้นงานของการยึดติดจะมีค่าลดลง แสดงว่าใช้พลังงานน้อยลงในการแยกน้ำออกจากผิวกระดาษ

เมื่อพิจารณาอัตราการลดลงของมุมสัมผัสของกระดาษ โดยการวัดมุมสัมผัสแบบต่อเนื่อง (dynamic contact angle) ของหยดน้ำปริมาตร 40 ไมโครลิตร ในนาทีที่ 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 20 และนาทีที่ 30 ภายหลังการหยดหยดน้ำลงบนผิวกระดาษ เพื่อศึกษาลักษณะการเปลี่ยนแปลงของมุมสัมผัสของหยดน้ำเมื่อเวลาผ่านไป ผลการทดลองแสดงดังภาพที่ 17 (รายละเอียดของค่าทดสอบแสดงในภาคผนวก ค)

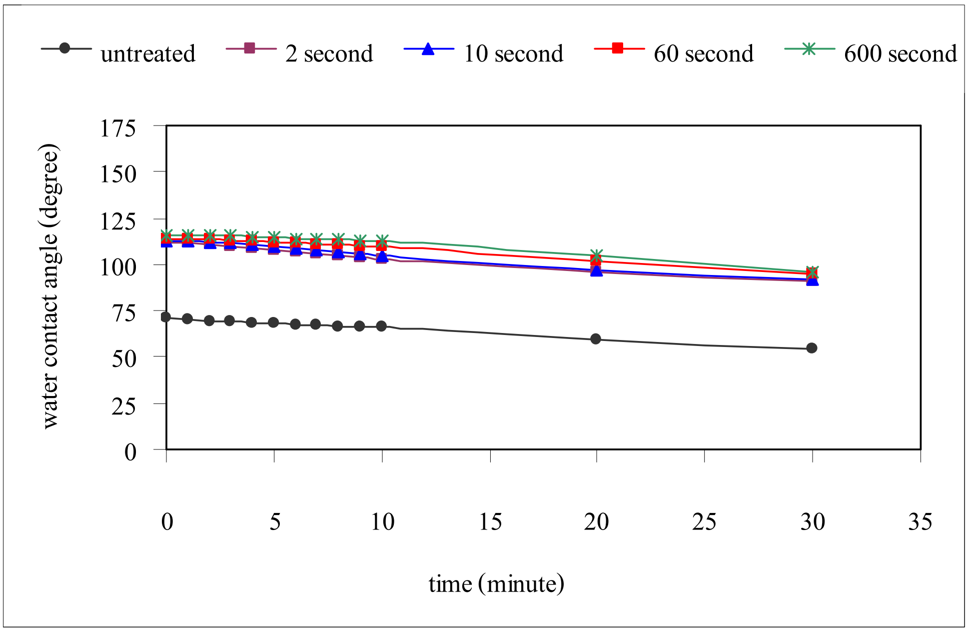
กระดาษประยุกต์พลาสมามีอัตราการลดลงของมุมสัมผัสของหยดน้ำน้อยกว่ากระดาษไม่ประยุกต์พลาสมาอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) อย่างไรก็ตาม พบว่าในกรณีของกระดาษด้านหน้าอัตราการลดลงของมุมสัมผัสของกระดาษประยุกต์พลาสมาและกระดาษไม่ประยุกต์พลาสมามีความแตกต่างกันเพียงเล็กน้อย อาจเป็นเพราะว่าผิวกระดาษด้านหน้ามีสารเคลือบผิวเกาะอยู่ ทำให้พื้นที่ในการเกิดปฏิกิริยาระหว่างอนุมูลฟลูออรีนกับเส้นใยเซลลูโลสมีน้อยกว่ากระดาษด้านหลัง ทำให้ผลการทดลองของกระดาษด้านหน้ามีความชัดเจนน้อยกว่ากระดาษด้านหลัง

เมื่อพิจารณากระดาษด้านหลังพบว่า หากใช้เวลาในการประยุกต์พลาสมานานขึ้น อัตราการลดลงของมุมสัมผัสก็จะน้อยลงจนถึงจุดๆ หนึ่ง เนื่องจากเมื่อเวลานานขึ้นพลาสมาจะมีเวลาในการทำปฏิกิริยากับผิวกระดาษได้มากขึ้น ซึ่งการทดลองพบว่า กระดาษที่ผ่านการประยุกต์พลาสมานาน 2 วินาที มีอัตราการลดลงของมุมสัมผัสมากที่สุด เนื่องจากเป็นเวลาที่น้อยเกินไป ทำให้พลาสมาไม่สามารถเข้าทำปฏิกิริยากับผิวกระดาษได้อย่างเต็มที่ (Dreux *et al.*, 2002) ส่วนกระดาษที่ผ่านการประยุกต์พลาสมานาน 60 และ 600 วินาที มีอัตราการลดลงของมุมสัมผัสไม่แตกต่างกัน แสดงให้เห็นว่า การเกิดปฏิกิริยาระหว่างอนุมูลฟลูออรีนกับเส้นใยเซลลูโลสเริ่มคงที่ แม้ให้เวลานานขึ้นก็ไม่สามารถทำปฏิกิริยาได้มากขึ้น สำหรับการทดลองนี้ การประยุกต์พลาสมานาน 60 วินาที ถือได้ว่าเป็นเวลาที่สั้นที่สุดที่ทำให้กระดาษสามารถต้านทานน้ำได้ดีที่สุด

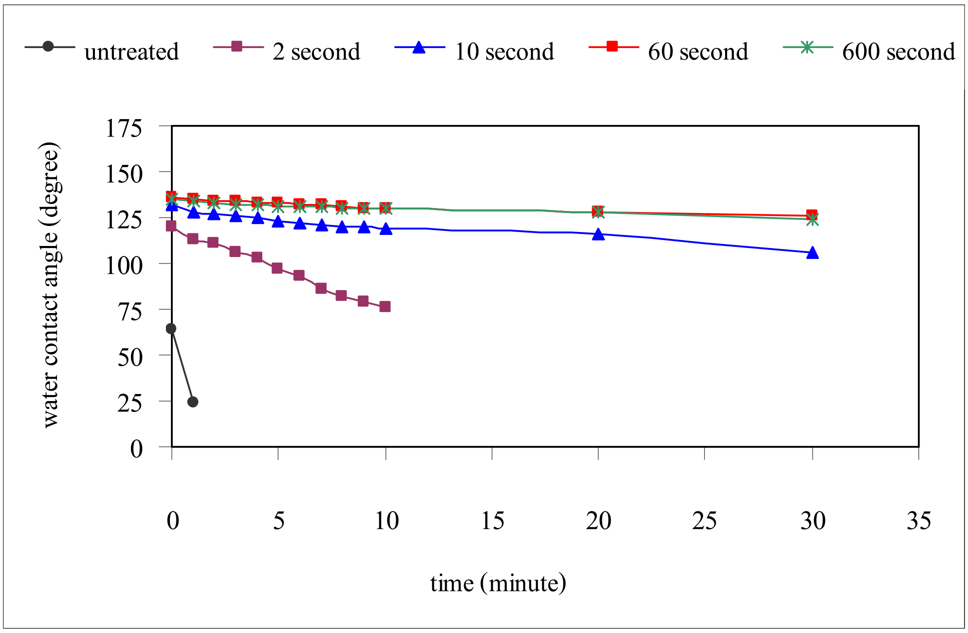
ตารางที่ 12 มุมสัมผัส งานของการยึดติด การดูดซึมน้ำ และเวลาในการดูดซึมน้ำของกระดาษประยุกต์พลาสมา

กระดาษ	เวลาในการประยุกต์พลาสมา (วินาที)	ค่าทดสอบ			
		มุมสัมผัส (องศา)	งานของการยึดติด (ดายน์/ซม.)	การดูดซึมน้ำ (กรัม/ตร.ม.)	เวลาในการดูดซึมน้ำ (นาที)
ด้านหน้า	untreated	70 ± 2.0 [b]	97.7 ± 2.38 [f]	1.53 ± 0.06 [d]	> 200 [f]
	2	111 ± 1.9 [c]	46.3 ± 2.20 [e]	1.12 ± 0.17 [c]	> 200 [f]
	10	112 ± 1.0 [cd]	44.9 ± 1.23 [de]	0.65 ± 0.27 [b]	> 200 [f]
	60	119 ± 1.9 [d]	43.4 ± 2.25 [d]	0.24 ± 0.06 [a]	> 200 [f]
	600	116 ± 1.5 [e]	40.7 ± 1.68 [c]	0.16 ± 0.06 [a]	> 200 [f]
ด้านหลัง	untreated	25 ± 1.9 [a]	138.7 ± 1.07 [g]	15.60 ± 0.28 [h]	1 ± 0.10 [a]
	2	113 ± 1.9 [cd]	44.4 ± 2.22 [de]	14.18 ± 0.49 [g]	14 ± 1.82 [b]
	10	128 ± 2.0 [f]	27.8 ± 2.04 [b]	3.47 ± 0.61 [f]	141 ± 2.4 [c]
	60	135 ± 0.9 [g]	21.3 ± 0.81 [a]	2.97 ± 0.31 [e]	159 ± 2.2 [d]
	600	134 ± 0.8 [g]	22.4 ± 0.69 [a]	3.63 ± 0.38 [f]	175 ± 2.7 [e]

หมายเหตุ [a-h] ตัวอักษรที่ต่างกันในแถวตั้งหมายถึงค่าเฉลี่ยมีความแตกต่างกันทางสถิติ ($p \leq 0.05$)



(ก) กระดาษด้านหน้า



(ข) กระดาษด้านหลัง

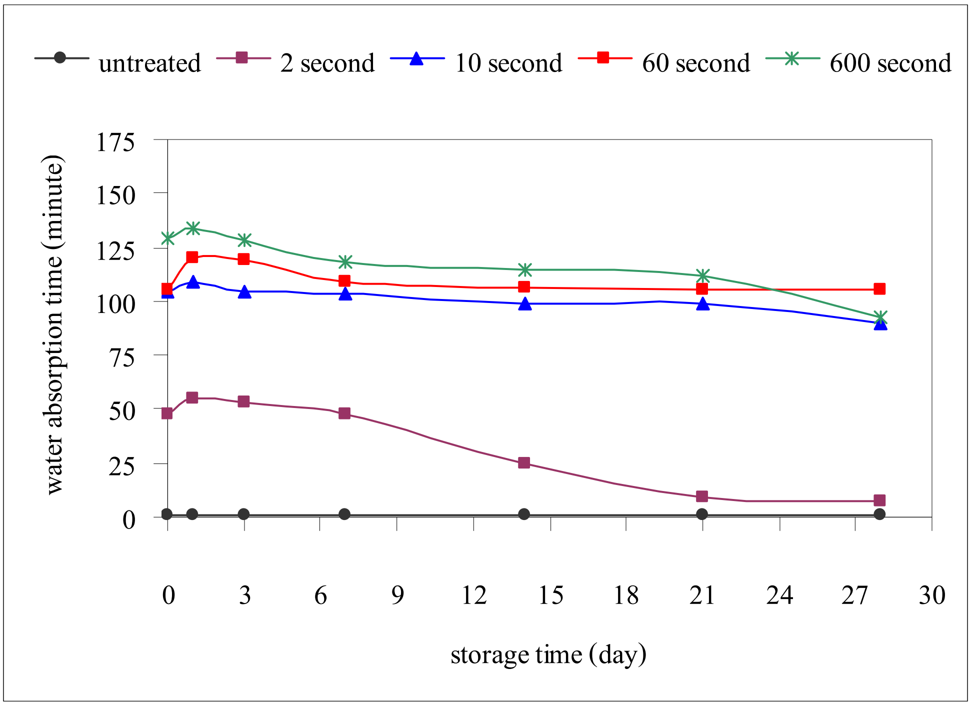
ภาพที่ 17 การลดลงของค่ามุมสัมผัสของหยดน้ำเมื่อเวลาผ่านไปสำหรับกระดาษประยุกต์พลาสมา (ก) กระดาษด้านหน้า และ (ข) กระดาษด้านหลัง

7. ศึกษาอิทธิพลของระยะเวลาในการเก็บต่อสมบัติการต้านทานน้ำของกระดาษ

เวลาในการดูดซึมน้ำของกระดาษประยุกต์พลาสมาเมื่อเก็บในสภาวะอุณหภูมิ 25-32 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 48-74 ซึ่งเป็นสภาวะของคลังสินค้าในประเทศเขตร้อนชื้นทั่วไป ผลการทดลองแสดงดังภาพที่ 18 (รายละเอียดของค่าทดสอบแสดงในภาคผนวก ง) การทดลองนี้ใช้กระดาษด้านหลังซึ่งเป็นด้านที่ไม่มีการเคลือบผิวในการศึกษา เนื่องจากสามารถเห็นผลการต้านทานน้ำได้ชัดเจน จึงน่าจะใช้เป็นตัวแทนในการศึกษาอิทธิพลของระยะเวลาในการเก็บได้ดีกว่ากระดาษด้านหน้า ผลการทดลอง พบว่า เมื่อเวลาผ่านไปความสามารถในการต้านทานน้ำของกระดาษประยุกต์พลาสมามีแนวโน้มลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) เนื่องจากความชื้นในอากาศสามารถซึมผ่านเข้าไปในกระดาษได้ ทำให้กระดาษมีขั้ว (polar) มากขึ้น ความสามารถในการต้านทานน้ำของกระดาษจึงลดลงเมื่อเวลาผ่านไป (Dreux *et al.*, 2002) โดยเวลาในการดูดซึมน้ำของกระดาษประยุกต์พลาสมาภายหลังออกจากแชมเบอร์สุญญากาศทันทีมีค่าน้อยกว่าเวลาในการดูดซึมน้ำเมื่อผ่านไปหนึ่งวัน ซึ่งอาจเป็นเพราะว่าในกระบวนการประยุกต์พลาสมา กระดาษสูญเสียความชื้นเนื่องจากระบบสุญญากาศ จึงใช้เวลาในการดูดซึมน้ำเร็วกว่ากระดาษประยุกต์พลาสมาที่เก็บไว้หนึ่งวัน ซึ่งมีความชื้นในกระดาษมากกว่าเนื่องจากมีการดูดคายความชื้นจากสภาวะแวดล้อม

เมื่อเก็บครบ 28 วัน กระดาษที่ใช้เวลาในการประยุกต์พลาสมานาน 2 วินาที มีความสามารถในการต้านทานน้ำไม่แตกต่างกับกระดาษไม่ประยุกต์พลาสมา เนื่องจากเวลา 2 วินาที พลาสมาเกิดปฏิกิริยากับเส้นใยเซลลูโลสได้น้อยดังที่ได้กล่าวข้างต้น และเมื่อเวลาผ่านไปความชื้นในอากาศสามารถซึมผ่านเข้าไปในกระดาษได้มากขึ้น จึงทำให้กระดาษไม่สามารถต้านทานน้ำได้ ส่วนความสามารถในการต้านทานน้ำของกระดาษที่ใช้เวลาในการประยุกต์พลาสมานาน 10 วินาที มีแนวโน้มลดลงเพียงเล็กน้อย และที่ 60 วินาที ความสามารถในการต้านทานน้ำไม่แตกต่างกับวันแรกที่เริ่มเก็บ เนื่องจากเมื่อใช้เวลาในการประยุกต์พลาสมานานขึ้น พลาสมาสามารถทำปฏิกิริยากับเส้นใยเซลลูโลสได้มากขึ้น พื้นที่ของเส้นใยเซลลูโลสที่จะสร้างพันธะกับโมเลกุลของน้ำในอากาศจึงน้อยลง ทำให้กระดาษยังคงต้านทานน้ำได้ดีเมื่อเวลาผ่านไป อย่างไรก็ตาม กระดาษที่ใช้เวลาในการประยุกต์พลาสมานาน 600 วินาที พบว่า ความสามารถในการต้านทานน้ำของกระดาษมีแนวโน้มลดลงมากกว่าที่ 10 และ 60 วินาที เนื่องจากเมื่อใช้เวลาในการประยุกต์พลาสมานานขึ้นจะเกิดการ etching มากขึ้นด้วย ทำให้ผิวกระดาษเกิดรูพรุนขนาดเล็กระดับนาโนเมตรเพิ่มมากขึ้น ซึ่งทำให้ผิวกระดาษมีลักษณะคล้ายฟองน้ำ (Hopkins and Badyal, 1996) ส่งผลให้ผิวกระดาษมีพื้นที่รับความชื้นจากอากาศมากขึ้น ดังนั้น เมื่อเวลาผ่านไปความสามารถในการต้านทานน้ำของกระดาษที่ใช้เวลาในการประยุกต์พลาสมานาน 600 วินาที จึงมีแนวโน้มลดลงมากกว่าที่

10 และ 60 วินาที ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Selli *et al.* (2001) ที่ประยุกต์พลาสมาซัลเฟอร์เฮกซะฟลูออไรด์บนผ้าไหมและพบว่าเมื่อเก็บผ้าไหมที่ผ่านการประยุกต์พลาสมาเป็นเวลาหนึ่งเดือน มุมสัมผัสและเวลาในการดูดซึมน้ำของผ้าไหมมีค่าน้อยลง



ภาพที่ 18 เวลาในการดูดซึมน้ำของกระดาษด้านหลังภายหลังการประยุกต์พลาสมา เมื่อเก็บในสภาวะอุณหภูมิ 25-32 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 48-74 เป็นเวลา 28 วัน

8. สมบัติการสกัดกั้นการซึมผ่านของกระดาษ

สมบัติการสกัดกั้นการซึมผ่านที่ทดลองได้แก่ การซึมผ่านของน้ำมัน อัตราการซึมผ่านของไอน้ำ และอัตราการซึมผ่านของแก๊สออกซิเจนของกระดาษประยุกต์พลาสมา ผลการทดลองดังต่อไปนี้

8.1 การซึมผ่านของน้ำมัน

มุมสัมผัสของน้ำมัน การดูดซึมน้ำมัน และเวลาในการดูดซึมน้ำมันของกระดาษประยุกต์พลาสมา แสดงดังตารางที่ 13 โดยงานวิจัยนี้ใช้น้ำมันปาล์มในการทดลอง เนื่องจากน้ำมันปาล์มเป็นน้ำมันพืชที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมอาหารมากที่สุด

ตารางที่ 13 มุมสัมผัส การดูดซึมน้ำมัน และเวลาในการดูดซึมน้ำมันของกระดาษประยุกต์พลาสมา

กระดาษ	เวลาในการประยุกต์พลาสมา (วินาที)	ค่าทดสอบ		
		มุมสัมผัส (องศา)	การดูดซึมน้ำมัน (กรัม/ตร.ม.)	เวลาในการดูดซึมน้ำมัน (นาที)
ด้านหน้า	untreated	n/a	1.30 ± 0.13^{a}	$> 200^{d}$
	2	n/a	1.36 ± 0.16^{a}	$> 200^{d}$
	10	15.2 ± 1.5^{b}	1.35 ± 0.13^{a}	$> 200^{d}$
	60	65.5 ± 1.2^{e}	1.32 ± 0.07^{a}	$> 200^{d}$
	600	66.0 ± 1.7^{e}	1.36 ± 0.18^{a}	$> 200^{d}$
ด้านหลัง	untreated	12.7 ± 0.8^{a}	5.40 ± 0.11^{c}	101 ± 2.1^{b}
	2	13.7 ± 1.2^{a}	5.63 ± 0.12^{d}	86 ± 1.9^{a}
	10	43.7 ± 1.4^{c}	5.68 ± 0.12^{d}	105 ± 2.0^{c}
	60	61.0 ± 1.6^{d}	5.64 ± 0.18^{d}	$> 200^{d}$
	600	70.8 ± 1.8^{f}	2.05 ± 0.17^{b}	$> 200^{d}$

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

กระดาษด้านหน้าและด้านหลังภายหลังการประยุกต์พลาสมามีมุมสัมผัสของน้ำมันมากกว่ากระดาษไม่ประยุกต์พลาสมาอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) โดยกระดาษที่ใช้เวลาในการประยุกต์พลาสมาตั้งแต่ 10 วินาที ขึ้นไป มีมุมสัมผัสของน้ำมันและเวลาในการดูดซึมน้ำมันมากกว่ากระดาษไม่ประยุกต์พลาสมาอย่างชัดเจน แสดงให้เห็นว่ากระดาษประยุกต์พลาสมาสามารถต้านทานการซึมผ่านของน้ำมันได้ อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาการดูดซึมน้ำมัน พบว่ามีเพียงกระดาษด้านหลังที่ใช้เวลาในการประยุกต์พลาสมานาน 600 วินาที เท่านั้น ที่มีการดูดซึมน้ำมันน้อยกว่ากระดาษไม่ประยุกต์พลาสมาอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า การประยุกต์พลาสมาโดยใช้เวลานานกว่า 10 วินาที ขึ้นไป ทำให้กระดาษสามารถต้านทานการซึมผ่านของน้ำมันเพิ่มขึ้น เนื่องจากเมื่อใช้เวลาในการประยุกต์พลาสมานานขึ้น ทำให้พลาสมาสามารถสร้างพันธะกับเส้นใยเซลลูโลสได้มากขึ้น กระดาษจึงต้านทานการซึมผ่านของน้ำมันได้ดีกว่าการประยุกต์พลาสมาเพียงเวลาสั้นๆ แต่หากต้องการให้กระดาษสามารถต้านทานการซึมผ่านของน้ำมันที่มีปริมาณมากได้ ควรประยุกต์พลาสมาโดยใช้เวลานานกว่า 60 วินาที ขึ้นไป โดยผลการทดลอง

สอดคล้องกับงานวิจัยของ Vaswani *et al.* (2005) ซึ่งกล่าวว่า กระดาษที่ประยุกต์ด้วยพลาสมาฟลูออรีนมีความสามารถในการต้านทานน้ำมันมากขึ้น

8.2 อัตราการซึมผ่านของไอน้ำ และอัตราการซึมผ่านของแก๊สออกซิเจน

อัตราการซึมผ่านของไอน้ำ และอัตราการซึมผ่านของแก๊สออกซิเจนของกระดาษประยุกต์พลาสมา แสดงดังตารางที่ 14 ผลการทดลองพบว่า กระดาษด้านหน้าและด้านหลังภายหลังการประยุกต์พลาสมามีอัตราการซึมผ่านของไอน้ำมากกว่ากระดาษไม่ประยุกต์พลาสมาอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) และพบว่ากระดาษที่ใช้เวลาในการประยุกต์พลาสมาตั้งแต่ 60 วินาที ขึ้นไปมีอัตราการซึมผ่านของแก๊สออกซิเจนมากกว่ากระดาษไม่ประยุกต์พลาสมาอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) โดยเมื่อเวลาในการประยุกต์พลาสมานานขึ้น ทำให้อัตราการซึมผ่านของแก๊สออกซิเจนมีค่ามากขึ้น ดังนั้น ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าการประยุกต์พลาสมาทำให้กระดาษมีความสามารถในการต้านทานการซึมผ่านของไอน้ำและแก๊สออกซเจนลดลง ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Hopkins and Badyal (1996); Magalhães and Souza (2001) และ Dreux *et al.* (2002) สาเหตุที่เป็นเช่นนี้เนื่องจาก การประยุกต์พลาสมาอาจทำให้เกิดการ etching ซึ่งไปกัดกร่อนผิวกระดาษและทำให้ผิวกระดาษมีความเป็นรูพรุนระดับนาโนมากขึ้น จึงทำให้ไอน้ำและแก๊สสามารถซึมผ่านได้ง่ายขึ้น

9. การวิเคราะห์พื้นผิวของกระดาษ

เป็นการวิเคราะห์พื้นผิวของกระดาษที่อาจเปลี่ยนแปลงไปหลังจากประยุกต์พลาสมาและเพื่อหาปริมาณฟลูออรีนบนผิวกระดาษ ซึ่งอนุมูลฟลูออรีนเป็นตัวแปรสำคัญในการเกิดการเปลี่ยนแปลงสมบัติการต้านทานน้ำของกระดาษประยุกต์พลาสมา โดยเทคนิค scanning electron microscopy (SEM) ถูกใช้ในการตรวจดูลักษณะพื้นผิวของกระดาษ และเทคนิค atomic force microscopy (AFM) ถูกใช้ในการตรวจดูความขรุขระของพื้นผิวของกระดาษ นอกจากนี้ เทคนิค energy dispersive x-ray spectrometry (EDS) ถูกใช้ในการวิเคราะห์หาปริมาณฟลูออรีนบนพื้นผิวของกระดาษภายหลังการประยุกต์พลาสมา โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

ตารางที่ 14 อัตราการซึมผ่านของไอน้ำ และอัตราการซึมผ่านของแก๊สออกซิเจนของกระดาษประยุกต์พลาสมา

กระดาษ	เวลาในการประยุกต์พลาสมา (วินาที)	ค่าทดสอบ	
		อัตราการซึมผ่านของไอน้ำ (กรัม/ตร.ม./วัน)	อัตราการซึมผ่านของแก๊สออกซิเจน (ลบ.ซม./ตร.ม./วัน)
ด้านหน้า	untreated	0.7531 ± 0.060 ^{ab}	40,382 ± 543 ^{a}
	2	0.8183 ± 0.081 ^{bc}	41,505 ± 646 ^{a}
	10	0.8699 ± 0.093 ^{cde}	43,923 ± 453 ^{a}
	60	0.8587 ± 0.028 ^{cd}	93,683 ± 2,230 ^{b}
	600	0.8839 ± 0.074 ^{cde}	123,745 ± 3,150 ^{c}
ด้านหลัง	untreated	0.6916 ± 0.049 ^{a}	40,309 ± 370 ^{a}
	2	0.9006 ± 0.034 ^{cde}	42,509 ± 923 ^{a}
	10	0.8883 ± 0.070 ^{cde}	42,063 ± 1,087 ^{a}
	60	0.9684 ± 0.088 ^{e}	159,525 ± 2,963 ^{d}
	600	0.9356 ± 0.079 ^{de}	205,507 ± 1,063

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

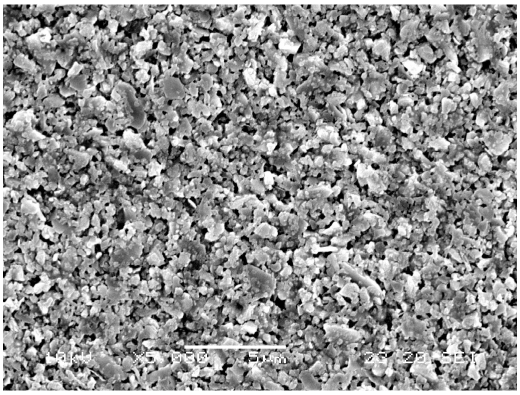
ลักษณะพื้นผิวของกระดาษด้านหน้าและด้านหลังภายหลังการประยุกต์พลาสมา แสดงดังภาพที่ 19 และ 20 จากการถ่ายภาพด้วยเครื่อง SEM กำลังขยาย 5,000 เท่า พบว่า ลักษณะพื้นผิวของกระดาษประยุกต์พลาสมาและกระดาษไม่ประยุกต์พลาสมาไม่มีความแตกต่างกัน ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Vaswani *et al.* (2005) ที่ปรับปรุงสมบัติการต้านทานน้ำของกระดาษโดยการประยุกต์ด้วยพลาสมาของสารประกอบฟลูออโรคาร์บอน

ลักษณะความขรุขระของพื้นผิวกระดาษประยุกต์พลาสมา แสดงดังภาพที่ 21 ซึ่งถ่ายภาพลักษณะพื้นผิวเป็น 3 มิติ ในพื้นที่ 30×30 ไมโครเมตร ด้วยเครื่อง AFM โดยใช้กระดาษด้านหลังเป็นตัวแทนในการวิเคราะห์ เนื่องจากเป็นด้านที่ไม่มีสารเคลือบผิว จึงน่าจะเป็นตัวแทนในการวิเคราะห์ได้ดีกว่ากระดาษด้านหน้า เมื่อพิจารณาการภาพถ่ายด้วยเครื่อง AFM พบว่า กระดาษที่ใช้เวลาในการประยุกต์พลาสมานาน 600 วินาที มีความขรุขระของพื้นผิวมากกว่ากระดาษไม่ประยุกต์

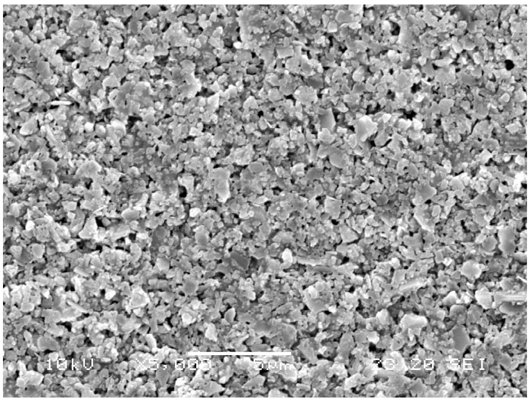
พลาสมาอย่างชัดเจน แสดงให้เห็นว่าการประยุกต์พลาสมาทำให้พื้นผิวของกระดาษมีความขรุขระในระดับนาโนเพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับหลายงานวิจัย (Sahin *et al.*, 2002; Navarro *et al.*, 2003; Bente *et al.*, 2004 and Kim *et al.*, 2006) กระดาษประยุกต์พลาสมามีความขรุขระเพิ่มขึ้น เนื่องจากการ etching ที่เกิดขึ้นในกระบวนการประยุกต์พลาสมา ซึ่งการที่ผิวกระดาษมีความขรุขระระดับนาโนเพิ่มขึ้นทำให้ผิวกระดาษมีลักษณะคล้ายใบบัว (lotus effect) (สมศร, 2549) จึงทำให้กระดาษประยุกต์พลาสมาสามารถต้านทานน้ำได้มากขึ้น อย่างไรก็ตาม ลักษณะเช่นนี้อาจทำให้การซึมผ่านของไอน้ำและแก๊สเป็นไปได้ดียิ่งขึ้น เนื่องจากเป็นการเพิ่มพื้นที่ในการรับไอน้ำและแก๊สบนผิวกระดาษ

องค์ประกอบบนพื้นผิวกระดาษภายหลังการประยุกต์พลาสมา ซึ่งวิเคราะห์ได้จากเทคนิค EDS แสดงดังตารางที่ 15 จากผลการวิเคราะห์ไม่พบปริมาณธาตูฟลูออรีนบนผิวกระดาษ เนื่องจากเทคนิค EDS มีความสามารถในการวิเคราะห์องค์ประกอบของพื้นผิววัสดุที่ความลึกในระดับ 0.5-5.0 ไมโครเมตร (Conners and Banerjee, 1995) ดังนั้นจึงไม่สามารถตรวจพบปริมาณฟลูออรีนบนผิวกระดาษได้ เนื่องจากการประยุกต์พลาสมาส่งผลต่อผิวกระดาษในระดับนาโนเมตรเท่านั้น

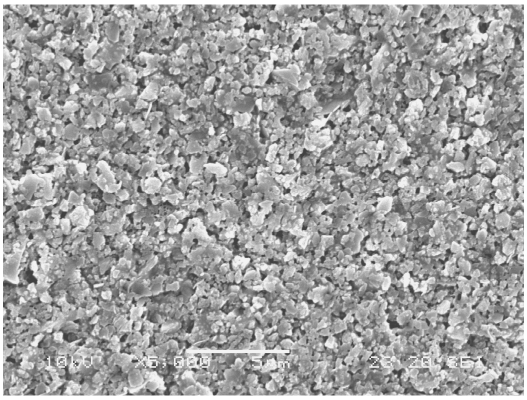
อย่างไรก็ตาม พบว่ากระดาษด้านหลังมีปริมาณธาตุคาร์บอน (C) ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักของเซลลูโลสมากกว่ากระดาษด้านหน้าอย่างชัดเจน จึงทำให้การประยุกต์พลาสมาบนกระดาษด้านหลังให้ผลที่ชัดเจนกว่ากระดาษด้านหน้า เพราะว่ากระดาษด้านหลังมีปริมาณธาตุคาร์บอนมากกว่าจึงสามารถสร้างพันธะกับอนุมูลฟลูออรีนในพลาสมาเกิดเป็นพันธะ C-F ได้มากกว่ากระดาษด้านหน้า นอกจากนี้เป็นที่น่าสังเกตว่ากระดาษด้านหน้ามีองค์ประกอบของธาตุโซเดียม (Na) แมกนีเซียม (Mg) ซิลิกา (Si) และแคลเซียม (Ca) ค่อนข้างมาก ซึ่งธาตุเหล่านี้อาจเป็นส่วนประกอบของสารเติมแต่งในกระดาษ ซึ่งการกระจายตัวของธาตุเหล่านี้อาจไปกีดขวางการเกิดพันธะระหว่างอนุมูลฟลูออรีนกับเส้นใยเซลลูโลสได้ จึงทำให้กระดาษด้านหน้าเห็นผลการต้านทานน้ำของกระดาษไม่ชัดเจนเท่ากับกระดาษด้านหลัง



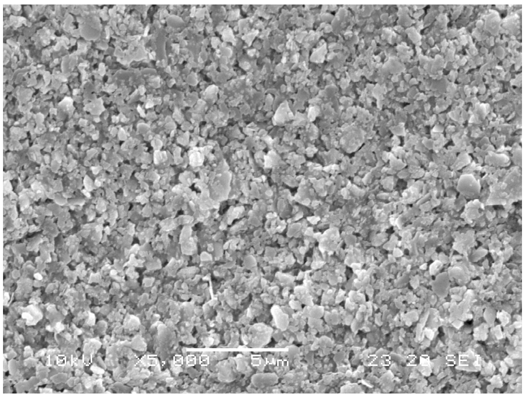
(ก) untreated



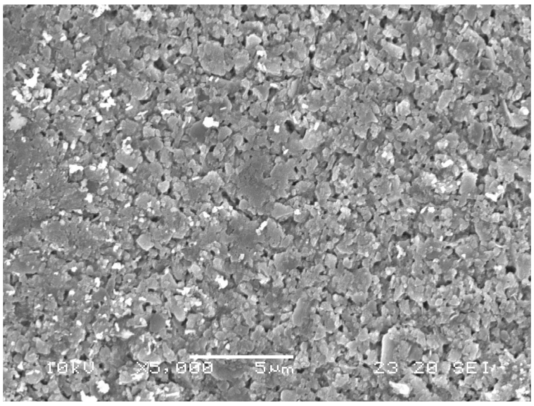
(ข) 2 วินาที



(ค) 10 วินาที

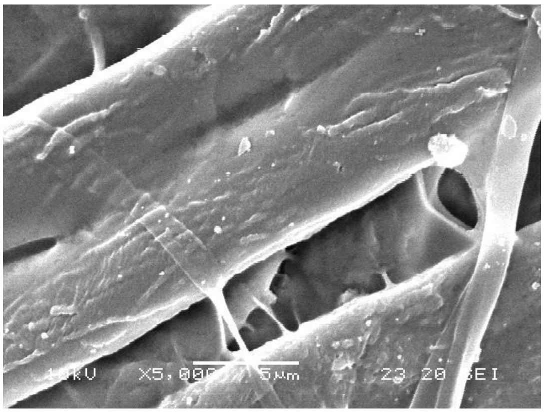


(ง) 60 วินาที

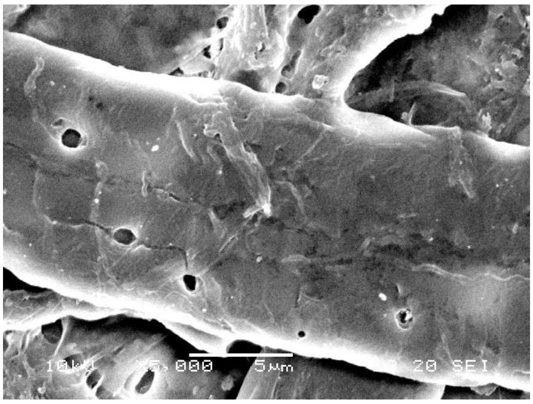


(จ) 600 วินาที

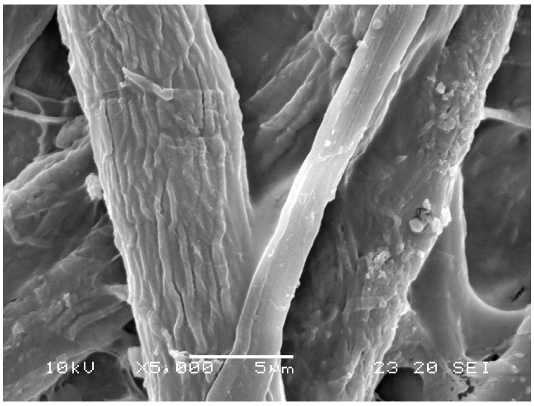
ภาพที่ 21 ลักษณะพื้นผิวของกระดาษด้านหน้า ก่อนและหลังการประยุกต์พลาสมา ด้วยเครื่อง scanning electron microscope (SEM) กำลังขยาย 5,000 เท่า (ก) ไม่ประยุกต์ (ข) 2 วินาที (ค) 10 วินาที (ง) 60 วินาที และ (จ) 600 วินาที



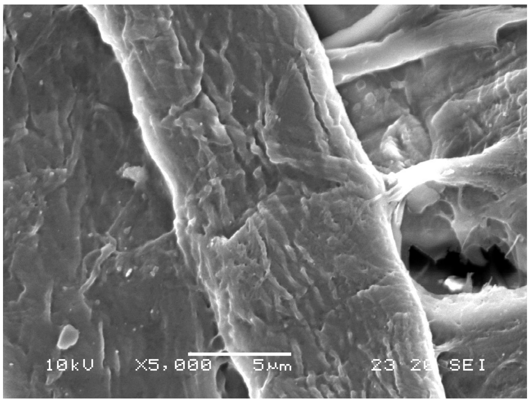
(ก) untreated



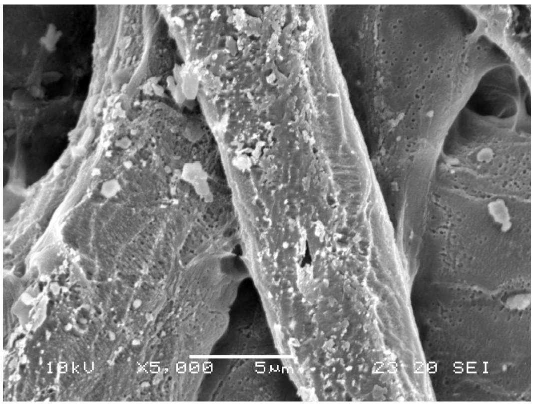
(ข) 2 วินาที



(ค) 10 วินาที

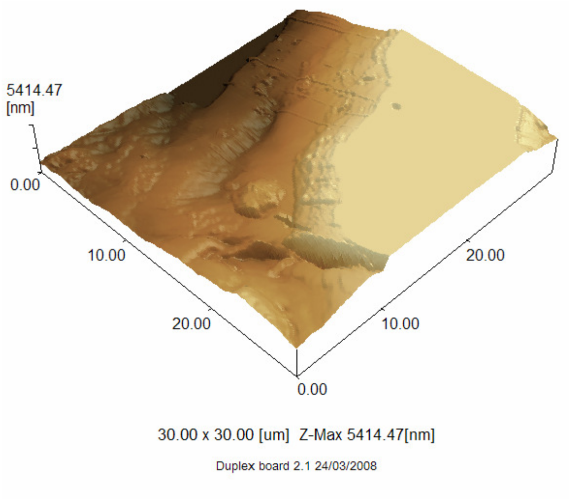


(ง) 60 วินาที

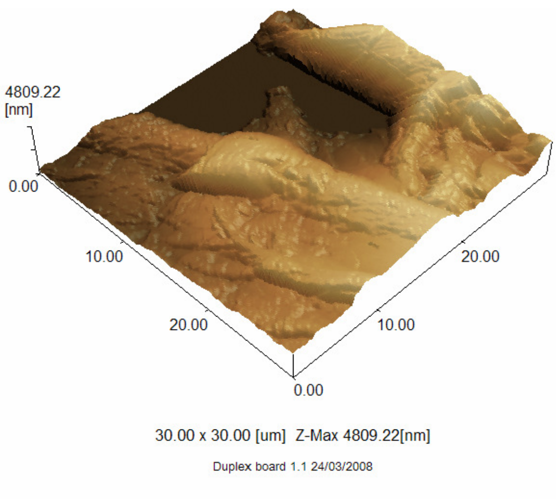


(จ) 600 วินาที

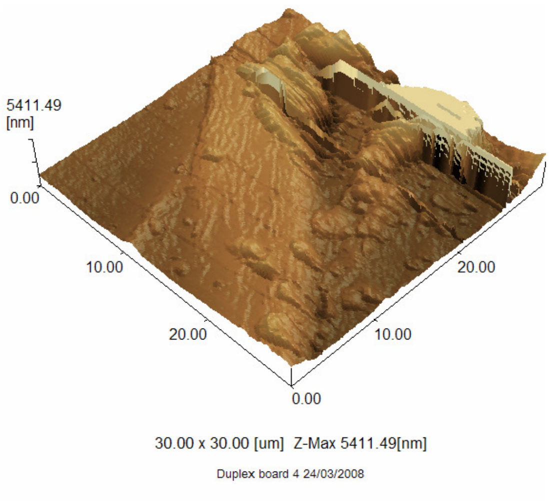
ภาพที่ 22 ลักษณะพื้นผิวของกระดาษด้านหลัง ก่อนและหลังการประยุกต์พลาสมา ด้วยเครื่อง scanning electron microscope (SEM) กำลังขยาย 5,000 เท่า (ก) ไม่ประยุกต์ (ข) 2 วินาที (ค) 10 วินาที (ง) 60 วินาที และ (จ) 600 วินาที



(ก) untreated



(ข) 2 วินาที



(ค) 600 วินาที

ภาพที่ 23 ลักษณะความขรุขระของพื้นผิวกระดาษด้านหลัง ก่อนและหลังการประยุกต์พลาสมาด้วยเครื่อง atomic force microscope (AFM) ในพื้นที่ 30×30 ไมโครเมตร (ก) ไม่ประยุกต์ (ข) 2 วินาที และ (ค) 600 วินาที

ตารางที่ 15 ธาตุองค์ประกอบบนพื้นผิวของกระดาษประยุกต์พลาสมา

กระดาษ	เวลาในการประยุกต์พลาสมา (วินาที)	ธาตุองค์ประกอบ[1] (ร้อยละ)							
		C	O	Na	Mg	Si	S	Ca	รวม
ด้านหน้า	untreated	26.18	52.60	0.19	0.17	3.89	0.07	16.90	100.00
	2	23.77	52.00	0.19	0.19	4.23	0.09	19.53	100.00
	10	25.45	53.94	0.20	0.17	3.89	0.09	16.26	100.00
	60	23.62	51.10	0.15	0.17	4.26	0.11	20.59	100.00
	600	24.25	51.07	0.16	0.17	4.36	0.07	19.92	100.00
ด้านหลัง	untreated	46.31	51.66	0	0.09	0.84	0	1.10	100.00
	2	43.04	55.74	0	0.07	0.67	0.04	0.45	100.00
	10	46.78	52.10	0	0.06	0.53	0.03	0.51	100.00
	60	44.81	53.57	0	0.09	0.97	0.03	0.53	100.00
	600	44.97	53.78	0.10	0.07	0.60	0.03	0.45	100.00

หมายเหตุ [1] เป็นธาตุองค์ประกอบบนผิวกระดาษที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค energy dispersive x-ray spectrometry (EDS)

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

การศึกษาการปรับปรุงสมบัติการต้านทานน้ำของกระดาษแข็งโดยการประยุกต์ด้วยพลาสมาซัลเฟอร์เฮกซะฟลูออไรด์ พบว่า สมบัติการต้านทานน้ำและน้ำมันของกระดาษเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) และพบว่าพลาสมาไม่มีผลต่อสมบัติทางกายภาพ แต่มีผลต่อสมบัติเชิงกล และสมบัติการสกัดกั้นการซึมผ่านของกระดาษ โดยสามารถสรุปประเด็นสำคัญจากการทดลองได้ดังนี้

1. อิทธิพลของสภาวะพลาสมาต่อสมบัติการต้านทานน้ำของกระดาษ

สมบัติการต้านทานน้ำของกระดาษประยุกต์พลาสมามีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มกำลังคลื่นวิทยุ ความดันแก๊ส และเวลาในการประยุกต์พลาสมามากขึ้น โดยกำลังคลื่นวิทยุ ความดันแก๊ส และเวลาในการประยุกต์พลาสมาที่เหมาะสมสำหรับเครื่องผลิตพลาสมาระบบ ICP ที่ใช้ในงานวิจัยนี้กับกระดาษแข็ง คือ กำลังคลื่นวิทยุ 50 วัตต์ ความดันแก๊ส 100 มิลลิทอร์ และเวลาในการประยุกต์พลาสมา 60 วินาที

2. อิทธิพลของระยะเวลาในการเก็บต่อสมบัติการต้านทานน้ำของกระดาษ

สมบัติการต้านทานน้ำของกระดาษประยุกต์พลาสมาลดลงเมื่อเวลาผ่านไป (สภาวะการเก็บที่อุณหภูมิ 25-32 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 48-74 ซึ่งเป็นสภาวะของคลังสินค้าทั่วไปในประเทศเขตร้อนชื้น เป็นระยะเวลา 28 วัน) โดยกระดาษประยุกต์พลาสมาที่เวลา 2 วินาทีไม่สามารถคงสมบัติการต้านทานน้ำไว้ได้ เนื่องจากพลาสมาฟลูออรีนมีเวลาในการสร้างพันธะเคมีกับเส้นใยเซลลูโลสบนผิวกระดาษน้อยเกินไป สมบัติการต้านทานน้ำของกระดาษประยุกต์พลาสมาที่เวลา 600 วินาที มีแนวโน้มลดลงเร็วกว่ากระดาษประยุกต์พลาสมาที่เวลา 10 และ 60 วินาที เนื่องจากเกิดการ etching บนผิวกระดาษมากกว่า จึงทำให้เมื่อเวลาผ่านไปความชื้นในอากาศสามารถซึมผ่านได้มากกว่า โดยกระดาษประยุกต์พลาสมาที่เวลา 60 วินาที สามารถคงสมบัติการต้านทานน้ำได้ดีที่สุด

3. สมบัติทางกายภาพของกระดาษ

การประยุกต์พลาสมาไม่มีผลต่อน้ำหนักมาตรฐาน ความหนา และปริมาณความชื้นในกระดาษ เนื่องจากการประยุกต์พลาสมาส่งผลต่อผิวกระดาษในระดับนาโนเมตรเท่านั้น อย่างไรก็ตาม ความร้อนและรังสีอัลตราไวโอเลตที่เกิดขึ้นขณะประยุกต์พลาสมาทำให้กระดาษมีความสว่างลดลง และสีของกระดาษเกิดการเปลี่ยนแปลง

4. สมบัติเชิงกลของกระดาษ

ความต้านทานแรงกดวงแหวนในแนว MD ความต้านทานการพับในแนว MD และ CD ของกระดาษประยุกต์พลาสมามีค่าลดลง เนื่องจากการเกิด partical bombardment และรังสีอัลตราไวโอเลตซึ่งมีพลังงานสูงไปทำลายพันธะและแตกสายโซ่โมเลกุลของเซลลูโลส ทำให้ความยาวของสายโซ่สั้นลง ส่งผลให้ความแข็งแรงของกระดาษลดลง

5. สมบัติการสกัดกั้นการซึมผ่านของกระดาษ

การประยุกต์พลาสมาสามารถเพิ่มความสามารถในการต้านทานน้ำมันของกระดาษได้ แต่ทำให้สมบัติการสกัดกั้นการซึมผ่านของไอน้ำและแก๊สออกซิเจนลดลง เนื่องจากการ etching ในกระบวนการประยุกต์พลาสมา ทำให้ผิวกระดาษมีรูพรุนระดับนาโนเมตรเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นการเพิ่มพื้นที่ในการซึมผ่านของไอน้ำและแก๊ส ทำให้ไอน้ำและแก๊สสามารถซึมผ่านผิวกระดาษได้ดีขึ้น

6. การวิเคราะห์พื้นผิวของกระดาษ

การวิเคราะห์ด้วยเทคนิค SEM ไม่พบความแตกต่างระหว่างกระดาษประยุกต์พลาสมากับกระดาษไม่ประยุกต์พลาสมา เมื่อวิเคราะห์ด้วยเทคนิค AFM พบว่า พื้นผิวของกระดาษประยุกต์พลาสมามีความขรุขระเพิ่มขึ้น และเมื่อวิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDS ไม่พบธาตุฟลูออรีนบนผิวกระดาษประยุกต์พลาสมา เนื่องจากเป็นเทคนิคที่ไม่สามารถวิเคราะห์พื้นผิวที่มีความบางระดับนาโนเมตรได้ อย่างไรก็ตาม สามารถบ่งบอกได้ว่าการที่ประยุกต์พลาสมาบนกระดาษด้านหลังให้ผลที่ชัดเจนกว่ากระดาษด้านหน้า เนื่องจากกระดาษด้านหลังมีปริมาณคาร์บอนมากกว่ากระดาษด้านหน้า ซึ่งคาร์บอนเป็นส่วนที่เกิดพันธะเคมีกับอนุมูลฟลูออรีนในพลาสมา อีกทั้งพบว่ากระดาษ

ด้านหน้ามีองค์ประกอบของสารเคลือบและสารเติมแต่งของกระดาษมากกว่ากระดาษด้านหลัง ซึ่งสารเหล่านี้จะไปกีดขวางการเกิดพันธะทางเคมีของอนุมูลฟลูออรีน

ข้อเสนอแนะ

1. เครื่องผลิตพลาสมาในงานวิจัยนี้ เป็นระบบพลาสมาในสุญญากาศ มีแชมเบอร์ขนาดเล็ก ทำให้การประยุกต์พลาสมาในแต่ละครั้งต้องเสียเวลาในการปั๊มสุญญากาศเป็นเวลานาน จึงไม่สามารถประยุกต์พลาสมากับกระดาษในปริมาณมากได้ นอกจากนี้ยังไม่สามารถใช้กับกระดาษที่มีขนาดใหญ่กว่า 9×16 เซนติเมตร ได้ เนื่องจากข้อจำกัดของขนาดแชมเบอร์ ซึ่งในการทดสอบสมบัติของกระดาษบางอย่าง ได้แก่ การทดสอบน้ำหนักมาตรฐาน การทดสอบการดูดซึมน้ำหรือน้ำมัน (Cobb test) และการทดสอบอัตราการซึมผ่านของแก๊สออกซิเจนจึงต้องมีการดัดแปลงมาตรฐานโดยใช้ขนาดตัวอย่างกระดาษเล็กลง และดัดแปลงเครื่องมือบางอย่าง เช่น Cobb test เพื่อให้สามารถทดสอบกับตัวอย่างที่มีขนาดเล็กกว่ามาตรฐานกำหนดได้ ดังนั้น ในอนาคตจึงควรมีการพัฒนาเครื่องผลิตพลาสมาเป็นระบบพลาสมาในบรรยากาศ เพื่อไม่ต้องเสียเวลาในการปั๊มสุญญากาศ และสามารถประยุกต์พลาสมาบนผิววัสดุที่มีลักษณะเป็นแผ่นบางเรียบได้ดีขึ้น

2. กระดาษเป็นวัสดุที่ไวต่อความชื้น และปริมาณความชื้นมีผลต่อความแข็งแรงของกระดาษ นอกจากนี้การประยุกต์พลาสมาในแต่ละครั้งใช้เวลานานและได้กระดาษประยุกต์พลาสมาจำนวนน้อย เนื่องจากข้อจำกัดของระบบและขนาดของเครื่องผลิตพลาสมา รวมทั้งไม่สามารถนำกระดาษที่ประยุกต์พลาสมาแล้วมาทดสอบได้ทันที เนื่องจากข้อจำกัดด้านสถานที่และความพร้อมของเครื่องมือทดสอบ จึงต้องเก็บตัวอย่างกระดาษทั้งก่อนและหลังประยุกต์พลาสมาให้มิดชิดก่อนนำไปทดลอง เพื่อลดความคลาดเคลื่อนของผลการทดลอง และในการทดสอบแต่ละครั้งควรใช้กระดาษที่ประยุกต์พลาสมาในวันที่ใกล้เคียงกันในการทดสอบ นอกจากนี้ควรทดสอบตัวอย่างควบคุม (กระดาษไม่ประยุกต์พลาสมา) ควบคู่ไปกับกระดาษประยุกต์พลาสมาด้วยทุกครั้ง เนื่องจากค่าทดสอบของกระดาษอาจมีการเปลี่ยนแปลงไปตามระยะเวลาของการทดลอง

3. การวัดมุมสัมผัสในงานวิจัยนี้ เป็นการประยุกต์วิธีการทดสอบมาจากเครื่องวัดมุมสัมผัสตามมาตรฐานโดยการวัดมุมของหยดน้ำหรือน้ำมันจากภาพที่ถ่ายด้วยกล้องดิจิตอล ดังนั้น ค่ามุมสัมผัสที่ได้อาจเกิดความคลาดเคลื่อน เนื่องจากสายตาของผู้ทดสอบเกิดอาการล้าเมื่อต้องวัดมุมสัมผัสเป็นเวลานาน ดังนั้น จึงควรเซ็ตเครื่องมือและสภาวะในการทดสอบ เช่น ระยะมาโครของกล้อง มุมระหว่างเลนส์กล้องกับตัวอย่างกระดาษ แสงสว่าง อุณหภูมิ และความชื้นภายในสถานที่

ทดสอบให้เหมือนกันทุกครั้ง รวมทั้งผู้วัดมุมควรเป็นบุคคลเดียวกันตลอดการทดสอบ และไม่ควรวัดมุมสัมผัสเป็นเวลานานเกินไป เพื่อทำให้ผลการทดลองที่ได้มีความเที่ยงตรงมากที่สุด

4. ควรมีการศึกษาถึงเทคนิคที่สามารถวิเคราะห์หาปริมาณธาตุฟลูออรีนและพันธะ C-F ที่เกิดขึ้นบนผิวกระดาษประยุกต์พลาสมาให้มากขึ้น เนื่องจากการประยุกต์พลาสมาเป็นปฏิกิริยาที่เกิดบนผิวระดับนาโนเมตรเท่านั้น ทำให้ยากต่อการหาเทคนิควิเคราะห์ที่เหมาะสม ซึ่งในการตรวจเอกสารที่เกี่ยวข้อง พบว่า ส่วนใหญ่มีเพียงเทคนิค x-ray photo electron spectrometry (XPS) เท่านั้นที่สามารถตรวจพบการเกิดพันธะระหว่างคาร์บอนกับฟลูออรีนของพลาสมาซัลเฟอร์เฮกซะฟลูออไรด์บนผิวของวัสดุประเภทเส้นใยได้

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

กรมส่งเสริมการส่งออก. 2545. **อุตสาหกรรมบรรจุภัณฑ์ในประเทศไทย**. เอกสารวิเคราะห์. แหล่งที่มา: http://www.ryt9.com/news/2001-05-10/24853257/, 14 มิถุนายน 2550.

โกวิท และ วีรศักดิ์. 2550. **การใช้แก๊สซัลเฟอร์เฮกซะฟลูออไรด์ (SF_6) กับเซอร์กิตเบรกเกอร์**. วิทยาลัยการอาชีพบ้านแพ้ว. แหล่งที่มา: http://www.bvc7.com/20070726up/eaumpan/22550/6.pdf, 11 มีนาคม 2551.

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

ธีรวรรณ บุญญวรรณ. 2550. **เทคโนโลยีพลาสมา**. ศูนย์วิจัยนิวตรอนพลังงานสูง ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.

นวพร วรรณวิศาล. 2549. **ผลของการเคลือบสตาร์ชดัดแปรที่มีต่อสมบัติด้านความแข็งแรงของกระดาษคราฟท์**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

แนวหน้า. 2551. **กรมการข้าวรื้อใหญ่ “บรรจุภัณฑ์” แปรรูปข้าวเพิ่มมูลค่าแข่งตลาดโลก**. แนวหน้า ประจำวันที่ 14 มีนาคม 2551. แหล่งที่มา: http://www.safetybio.agri.kps.ku.ac.th/index.php?option=com_content&task=view&id=1877&Itemid=42, 26 มีนาคม 2551.

บุษกร ประดิษฐนิยกุล, วสันต์ ตุ่นคำ, พัชทรา มณีสินธุ์, จีระวรรณ สุทธิลักษณ์ และ ละออ เซี่ยงหวอง. 2545. **คู่มือการใช้กระดาษเพื่อการหีบห่อ**. พิมพ์ครั้งที่ 1. ห้างหุ้นส่วนจำกัด อรุณการพิมพ์, กรุงเทพฯ.

ประดุง สวนพุฒ. 2550. **รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์ โครงการวิเคราะห์คุณสมบัติเชิงผิวของเส้นใยของสิ่งทอที่อาบด้วยพลาสมาโดยเทคนิคโฟโตอิมิชชั่น**. ศูนย์วิจัยนิวตรอนพลังงานสูง ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.

ประชิด ทิณบุตร. 2531. **การออกแบบบรรจุภัณฑ์**. พิมพ์ครั้งที่ 1. สำนักพิมพ์โอเดียนสโตร์, กรุงเทพฯ.

พันธวัฒน์ ไชยวรรณ์. 2546. **การใช้พลาสมาอุณหภูมิต่ำเพื่อการปรับปรุงสมบัติการไม่ซึมน้ำของผ้าไหม**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.

ศรีเพ็ญ ท้าวตก. 2547. **กระบวนการผลิตพลาสมาเพื่อปรับเปลี่ยนสมบัติของสิ่งทอ (ปีที่ 2)**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.

สตรีรัตน์ โฮดัค. 2550. **ทำผ้ากันน้ำด้วยพลาสมา**. วิชาการดอทคอม. แหล่งที่มา: http://www.electron.rmutphysics.com/teaching-glossary/index.php?option=com_content&task=view&id=3335&Itemid=11, 24 มกราคม, 2551.

สมศร สังขรัตน์. 2549. กลิ้งไว้ก่อน ธรรมชาติสอนไว้. **วารสารฟิสิกส์ไทย** 23 (3): 10-11.

สมหวัง ขันตยานุวงศ์. 2546. **เอกสารประกอบการสอนวิชาโครงสร้างและคุณสมบัติของกระดาษ**. ภาควิชาวนผลิตภัณฑ์ คณะวนศาสตร์, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

อรสิริ เสมรสุต. 2545. **การพัฒนากระดาษสาเพื่อการพิมพ์และการนำไปใช้ประโยชน์**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

แอ๊ดวานซ์ อะโกร. ม.ป.ป. **สมบัติที่สำคัญของกระดาษ**. รู้เฟื่องเรื่องกระดาษ. แหล่งที่มา: http://www.doubleapaper.com/knowing/paper_properties1.pdf, 3 กรกฎาคม 2550.

_______. **องค์ประกอบของกระดาษ**. รู้เฟื่องเรื่องกระดาษ. แหล่งที่มา: http://www.doubleapaper.com/knowing/paper_element1.pdf, 3 กรกฎาคม 2550.

Akishev, Y. 2007. **Plasmas: Introduction and Characterization**. Acteco Co., Ltd., Russia.

Advanced Surface Technology. n.d. **Plasma Applications**. AST Products, Inc. Available Source: http://www.astp.com/plasma/pl_examples.html, July 12, 2007.

Apjet. 2005. **Technology Surface Modification**. APJeT, Inc. Available Source: www.apjet.com/techsurfacemod.html, December 5, 2006.

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

_______. 2003b. **Standard Test Methods for Water Vapor Transmission of Materials**. ASTM E96.

_______. 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).

_______. 2004e. **Standard Test Method for Tensile Properties of Paper and Paperboard Using Constant-Rate-of-Elongation Apparatus with Attachment for Use on Hi-Vol Filters**. ASTM D828-93.

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

_______. 2004g. **Standard Test Methods for Water Absorptiveness of Nonbibulous Paper and Paperboard (Cobb Test)**. ASTM D3285-93 (Reapproved 1999).

Bente, M., G. Avramidis, S. Ferster, E. G. Rohwer and W. Viel. 2004. Wood Surface Modification in Dielectric Barrier Discharges at Atmospheric Pressure for Creating Water Repellent Characteristics. **Holz Roh Werkst** 62:157-163.

Biermann, C. J. 1996. **Handbook of Pulping and Papermaking**. 2nd ed. Academic Press, Inc., California.

Brown, P. F. 1971. **The Role of Surface Chemistry in the Bonding of a Cellulose Substrate Treated in a Corona Discharge**. The Institute of Paper Chemistry.

Cech, J., P. Kloc, M. Sira, Z. Navratil, P. Stahel, V. Bursikova and J. Janca. 2005. Plasma Modification of Paper by Means of Surface Barrier Discharge, pp. 332-336. **WDS'05 Proceedings of Contributed Papers, Part II**. Czech Republic.

Cernáková P. L., D. Kivácik, K. Johansson and M. Cernák. 2006. **Low Cost High-Speed Plasma Treatment of Paper Surface**. TAPPI Advanced Coating Fundamentals Symposium.

Chen, F. F. 1984. **Introduction to Plasma Physics and Controlled Fusion**. Plenum Pub Corp, United States.

College of Natural Resources. 2002. **Paper Structure**. NC state university. Available Source: http://cnr.ncsu.edu/wps/k12activities/ppts/forest/sld004.htm, September 1, 2007.

Conners, T. E. and S. Bamerjee. 1995. **Surface of Analysis of Paper**. Copyright Clearance Center, United States.

Denes, F. 1997. Trends Polymer. **Science** 5 (1): 23.

Deslandes Y., G. Pleizier, E. Poire, S. Sapieha, R. M. Wertheimer and E. Sacher. 1998. The Surface Modification of Pure Cellulose Paper Induced by Low-Pressure Nitrogen Plasma Treatment. **Plasmas and Polymers** 3 (2): 61-76.

Dreux, F., S. Marais, F. Poncin-Epaillard, M. Métayer and M. Labbe. 2002. Surface Modification by Low-Pressure Plasma of Polyamide 12 (PA12). Improvement of the Water Barrier Properties. **Langmuir** 18 (26): 10,411-10,420.

Duan, Y. and Q. Yu. 2007. **Polymer Treatment Using a Plasma Brush**. U.S. Patent 0,113,867.

Eastman, T. 2006. **What is a Plasma**. Los Alamos National Security, LLC. Available source: http://public.lanl.gov/alp/plasma/ubiquitous.html#what, January 21, 2007.

Ellinghorst, G. n.d. **Low-Pressure Plasma Technique**. Institut Fertigungstechnik Materialforschung (IFAM). Available Source: http://www.eurobonding.org/Englisch/Oberflaechen/Low_pressure.htm, December 5, 2006.

Ferrero, F. and R. Bongiovanni. 2005. Improving the Surface Properties of Cellophane by Air Plasma Treatment. **Surface & Coatings Technology** 200: 4,770-4,776.

Goree, J. n.d. **Biomedical Applications of Plasma Treatment**. Department of Physics, University of Iowa. Available Source: dusty.physics.uiowa.edu/~goree/talks/JG-UI-Physics-colloquium-biomedical-applications-of-plasma-treatment.ppt, July 12, 2007.

Hansen, F.K. n.d. **The Measurement of Surface Energy of Polymer by Means of Contact Angles of Liquids on Solid Surfaces**. Department of Chemistry University of Oslo.

Hopkins, J. and J. P. S. Badyal. 1996. CF_4 Plasma Treatment of Asymmetric Polysulfone Membranes. **Langmuir** 12 (15): 3,666-3,670.

Hozumi, A. and O. Takai. 1997. Preparation of Ultra Water-Repellent Films by Microwave Plasma-Enhanced CVD. **Thin Solid Films** 303 (1-2): 222-225.

_______. 1998. Preparation of Silicon Oxide Films Having a Water-Repellent Layer by Multiple-Step Microwave Plasma-Enhanced Chemical Vapor Deposition. **Thin Solid Films** 334 (1-2): 54-59.

Humphries, M. 2004. **Fabric Reference**. 3rd ed. Pearson Education, Inc., Upper Saddle River.

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.

Kim, J., G. Liu and S. H. Kim. 2006. Deposition of Stable Hydrophobic Coatings with in-line CH_4 Atmospheric RF Plasma. **J. Mater. Chem.** 16: 977-981.

Kline, J. E. 1991. **Paper and Paperboard Manufacturing and Converting Fundamentals**. 2nd ed. Miller Freeman Publications, inc., San Francisco.

Kloc, P., P. Stahel, V. Buršíková, A. Brablec, Z. Navrátil, M. Šíra and J. Janca. 2006. Deposition of Teflon-like Protective Layers in Surface Discharge at Atmospheric Pressure. **Czech. J. Phys.** 56: B1345-B1350.

Larner, M. and L. S. Kaplan. 2004. The Challenge of Plasma Processing-Its Diversity. **ASM Materials and Processes for Medical Devices Conference**. Pending publication, Minnesota.

Lin H., L. Xu, X. Chen, X. Wang, M. Sheng and F. Stubhan. 2000. Moisture-Resistant Properties of SiN_x Films Prepared by PECVD. **Thin Solid Films** 333 (1-2): 71-76.

Magalhães, W. L. E. and M. F. Souza. 2002. Solid Softwood Coated with Plasma-Polymer for Water Repellence. **Surface and Coatings Technology** 155: 11-15.

Mew 6 Design. 2003. **Paper Package**. Packaging. Available Source: http://www.mew6.com/composer/package/package_20.php, August 2, 2007.

Mitsuharu, K. 1992. **Film Deposition by Plasma Techniques**. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, New York.

Mukhopadhyay, S. M., P. Joshi, S. Datta, J. G. Zhao and P. France. 2002. Plasma Assisted Hydrophobic Coatings on Porous Materials: Influence of Plasma Parameters. **J. Phys. D: Appl. Phys.** 35: 1927-1933.

Navarro, F., F. Dávalos, F. Denes, L. E. Cruz, R. A. Young and J. Ramos. 2003. Highly Hydrophobic Sisal Chemithermomechanical Pulp (CTMP) Paper by Fluorotrimethylsilane Plasma Treatment. **Cellulose** 10: 411-424.

Paper Discovery Center. 2007. **Tomas Deitrich's Fox River Paper Pailings Exhibit**. Exhibits. Available Source: http://www.paperdiscoverycenter.org/exhibits/paintings/calender.shtml, October 1, 2008.

Piccard, A., G. Turban and B. Grolleau. 1986. Plasma Diagnostics of a SF_6 Radiofrequency Discharge used for the Etching of Silicon. **J. Phys. D: Appl. Phys.** 19: 991.

Rhim, J., J. Lee and S. Hong. 2006. Water Resistance and Mechanical Properties of Biopolymer (Alginate and Soy Protein) Coated Paperboards. **LWT** 39: 806-813.

Rose, K. J. and B. A. Bennett. 1999. Cooperative Disassembly of the Cellulose- Xyloglucan Network of Plant Cell Walls: Parallels Between Cell Expansion and Fruit Ripening. **Trends Plant Sci**. 4: 176-83.

Sahin, T. H., S. Manolache, A. R. Young and F. Denes. 2002. Surface Fluorination of Paper in CF_4-RF Plasma Environments. **Cellulose** 9: 171-181.

Schroder, M. E. 1999. Work of Adhesion of a Sessile Drop to a Clean Surface. **Colloid and Interface Science** 213**:** 602-605.

Selli, E., C. Riccardi, M. R. Massafra and B. Marcandalli. 2001. Surface Modification of Silk by Cold SF_6 Plasma. **Macromolecular Chemistry and Physics** 202 (9): 1,672-1,678.

Silva, M. L., N. R. Demarquette and I. H. Tan. 2003. Use of HMDS/hexane Double Layers for Obtaining Low Cost Selective Membrane. **Cellulose** 10: 171-178.

Soroka, W. 2000. **Fundamentals of Packaging Technology**. Institute of Packaging Professionals, Naperville.

Tamikella, R. V., S. Agraharam, S. A. Allen, D. W. Hess and P. A. Kohl. 2002. Moisture Absorption Studies of Fluorocarbon Films Deposited from Pentafluoroethane and Octafluorocyclobutane Plasmas. **Electronic Materiials** 31 (10).

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

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

_______, J. Koskinenb and D. W. Hess. 2005. Surface Modification of Paper and Cellulose by Plasma-assisted Deposition of Fluorocarbon Films. **Surface and Coatings Technology** 195: 121-129.

Vohrer, U., I. Trick, J. Bernhardt, C. Oehr and H. Brunner. 2001. Plasma Treatment - an Increasing Technology for Paper Restoration?. **Surface and Coatings Technology** 142-144: 1,069-1,073.

Vrajová, J. and F. Krčma. 2006. Plasmachemical Modification of Paper, pp. 162-166. **WDS'06 Proceedings of Contributed Papers, Part II**. Czech Republic.

Wang, C. and X. He. 2005. Preparation of Hydrophobic Coating on Glass Surface by Dielectric Barrier Discharge Using a 16 kHz Power Supply. **Applied Surface Science** 252: 8348-8351.

Wikipedia. 2008. **Contact Angle**. Article. Available Source: http://en.wikipedia.org/wiki/Contact_angle, September 10, 2007.

Wu, Y., M. Bekke, Y. Inoue, H. Sugimura, H. Kitaguchi, C. Liu and O. Takai. 1999. Mechanical Durability of Ultra-Water-Repellent Thin Film by Microwave Plasma-Enhanced CVD. **Thin Solid Films**. 457 (1): 122-127.

Yuasa, M. and T. Yara. 1999. **Treatment Method in Glow-Discharge Plasma and Apparatus Thereof**. U.S. Patent 5,968,377.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

วิธีการทดสอบ

การทดสอบน้ำหนักมาตรฐานของกระดาษ

มาตรฐานการทดสอบ ดัดแปลงจาก ASTM D646-96

เครื่องมือ

1. เครื่องชั่งละเอียดทศนิยม 3 ตำแหน่ง
2. ตู้ควบคุมอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์
3. อุปกรณ์สำหรับตัดกระดาษ

วิธีการทดสอบ

1. ตัดกระดาษขนาด 6×16 เซนติเมตร จำนวน 10 แผ่น นำกระดาษไปเก็บไว้ในตู้ควบคุมอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ที่สภาวะอุณหภูมิ 27 ± 1 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 65 ± 2 เป็นเวลา 24ชั่วโมง (IS0 187)

2. ชั่งน้ำหนักตัวอย่างกระดาษครั้งละ 1 แผ่น รายงานค่าน้ำหนักมาตรฐานเฉลี่ยเป็นกรัมต่อตารางเมตร

การคำนวณ

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

การทดสอบความหนาของกระดาษ

มาตรฐานการทดสอบ ASTM D645-97

เครื่องมือ

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

วิธีการทดสอบ

1. เตรียมกระดาษขนาด 30×150 มิลลิเมตร อย่างน้อย 10 แผ่น เก็บไว้ในตู้ควบคุมอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ที่สภาวะอุณหภูมิ 27 ± 1 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 65 ± 2 เป็นเวลา 24 ชั่วโมง (IS0 187)
2. วัดความหนาด้วยไมโครมิเตอร์ แผ่นละ 5 จุด โดยให้ห่างจากขอบของกระดาษอย่างน้อย 6 มิลลิเมตร รายงานค่าความหนาเฉลี่ยเป็นมิลลิเมตร

การทดสอบปริมาณความชื้นในกระดาษ

มาตรฐานการทดสอบ ASTM D644-99

เครื่องมือ

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

วิธีการทดสอบ

1. อบถ้วยอลูมิเนียมพร้อมฝาในตู้อบไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 105 ± 2 องศาเซลเซียส เป็นเวลาหนึ่งชั่วโมง จากนั้นนำไปทิ้งไว้ให้เย็นในเดซิกเคเตอร์เป็นเวลา 30 นาที แล้วนำไปชั่งหาน้ำหนักถ้วยพร้อมฝา

2. สุ่มตัวอย่างกระดาษเพื่อนำไปเก็บในตู้ควบคุมอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ที่สภาวะอุณหภูมิ 27 ± 1 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 65 ± 2 เป็นเวลา 24 ชั่วโมง (IS0 187)

3. ตัดกระดาษให้มีขนาดประมาณ 2×2 เซนติเมตร ใส่ในถ้วยอลูมิเนียมให้มีน้ำหนักประมาณ 3 กรัม บันทึกเป็นค่าน้ำหนักกระดาษก่อนอบ นำไปใส่ในตู้อบที่อุณหภูมิ 105 ± 2 องศาเซลเซียส เป็นเวลาหนึ่งชั่วโมง โดยระหว่างการอบให้เปิดฝาถ้วยเอาไว้เล็กน้อย

4. เมื่อครบเวลา ปิดฝาถ้วยแล้วนำออกมาทิ้งไว้ให้เย็นในเดซิกเคเตอร์เป็นเวลาประมาณ 30 นาที แล้วนำไปน้ำหนัก จากนั้นนำไปอบอีกครั้งเป็นเวลาหนึ่งชั่วโมง ทำซ้ำจนกระทั่งน้ำหนักที่ชั่งสองครั้งติดต่อกัน มีค่าแตกต่างกันไม่เกิน 0.0010 กรัม บันทึกเป็นค่าน้ำหนักกระดาษหลังอบ

5. ทำการทดสอบอย่างน้อย 5 ซ้ำต่อ 1 ตัวอย่าง รายงานผลเป็นค่าเฉลี่ยของความชื้นที่ได้ในหน่วยร้อยละ

การคำนวณ

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

การทดสอบความต้านทานแรงกดวงแหวน

มาตรฐานการทดสอบ TAPPI T818-om97

เครื่องมือ

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

วิธีการทดสอบ

1. ตัดกระดาษขนาด 12.7×152 มิลลิเมตร (0.5×6 นิ้ว) ทั้งแนว MD และ CD โดยตัดตัวอย่างให้ขนานกับแนวทดสอบด้วยเครื่องตัดชิ้นทดสอบ 10 ชิ้นต่อแนว นำกระดาษไปเก็บไว้ในตู้ควบคุมอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ที่สภาวะอุณหภูมิ 27 ± 1 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 65 ± 2 เป็นเวลา 24 ชั่วโมง (IS0 187)

2. นำกระดาษสอดเข้าไปใน specimen holder ที่มีลักษณะเป็นวงกลม

3. กดตัวอย่างด้วยเครื่องทดสอบความต้านทานแรงกดวงแหวน จนขอบชิ้นทดสอบเสียรูปจากแรงกด รายงานค่าเฉลี่ยของค่าความต้านทานแรงกดวงแหวนทั้งแนว MD และ CD เป็นค่าแรงกดต่อความยาวของกระดาษที่รับแรงกด (กิโลนิวตันต่อเมตร)

การทดสอบความต้านทานต่อการพับ

มาตรฐานการทดสอบ ASTM D2176-97a

เครื่องมือ

1. ตู้ควบคุมอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์
2. เครื่องทดสอบความต้านทานการพับ
4. อุปกรณ์สำหรับตัดกระดาษ

วิธีการทดสอบ

1. ตัดกระดาษขนาด 150×15 มิลลิเมตร ทั้งแนว MD และ CD จำนวน 10 ชิ้นตัวอย่างต่อแนว นำกระดาษไปเก็บไว้ในตู้ควบคุมอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ที่สภาวะอุณหภูมิ 27 ± 1 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 65 ± 2 เป็นเวลา 24 ชั่วโมง (IS0 187)
2. นำกระดาษสอดเข้าอุปกรณ์จับชิ้นตัวอย่างบนเครื่องทดสอบ
3. พับตัวอย่างด้วยเครื่องทดสอบจนชิ้นตัวอย่างขาดจากกัน โดยการพับไปและพับกลับมานับเป็น 1 รอบ
3. รายงานค่าเฉลี่ยของค่าความต้านทานต่อการพับทั้งแนว MD และ CD เป็นจำนวนครั้งในการพับที่ตัวอย่างสามารถพับได้

การทดสอบความต้านทานแรงดึง

มาตรฐานการทดสอบ ดัดแปลงจาก ASTM D828-93

เครื่องมือ

1. ตู้ควบคุมอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์
2. เครื่องทดสอบความต้านทานแรงดึงและการยืดตัว (Testometric 350, England)
3. อุปกรณ์สำหรับตัดกระดาษ

วิธีการทดสอบ

1. ตัดกระดาษขนาด 15×100 มิลลิเมตร ทั้งแนว MD และ CD โดยตัดตัวอย่างให้ขนานกับแนวทดสอบด้วยเครื่องตัดชิ้นทดสอบ 10 ชิ้นต่อแนว นำกระดาษไปเก็บไว้ในตู้ควบคุมอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ที่สภาวะอุณหภูมิ 27 ± 1 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 65 ± 2 เป็นเวลา 24 ชั่วโมง (IS0 187)
2. นำชิ้นทดสอบเข้าที่ยึดทั้งสองของเครื่องทดสอบ โดยให้ได้ความยาวระหว่างที่ยึดตัวอย่างเท่ากับ 50 ± 0.5 มิลลิเมตร
3. ทำการทดสอบโดยตั้งเวลาให้ชิ้นทดสอบขาดจากแรงดึง 12.7 มิลลิเมตรต่อนาที โดยใช้ Load cell 5,000 นิวตัน
4. อ่านค่าความต้านทานแรงดึงขาดจากสเกล รายงานค่าเฉลี่ยของความต้านทานแรงดึงของกระดาษทั้งแนว MD และ CD เป็นค่าแรงดึงต่อความกว้างของชิ้นทดสอบ (กิโลนิวตันต่อเมตร)

การทดสอบค่าการดูดซึม (น้ำหรือน้ำมัน)

(Cobb test)

มาตรฐานการทดสอบ ดังแปลงจาก ASTM D3285-93

เครื่องมือ

1. ชุดทดสอบค่า Cobb test (เส้นผ่านศูนย์กลางวงแหวน 6 เซนติเมตร)
2. ลูกกลิ้งโลหะผิวเรียบ น้ำหนัก 10.0 ± 0.5 กิโลกรัม
3. ตู้ควบคุมอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์
4. กระบอกตวงปริมาตร 50 มิลลิลิตร
5. เครื่องชั่งละเอียดทศนิยม 3 ตำแหน่ง
6. นาฬิกาจับเวลา
7. กระดาษทิชชู่อเนกประสงค์ ยี่ห้อ สก๊อต (Scott towel)
8. น้ำกลั่น
9. น้ำมันปาล์ม ยี่ห้อ โอลีน
10. อุปกรณ์สำหรับตัดกระดาษ

วิธีการทดสอบ

1. ตัดกระดาษตัวอย่างให้มีขนาด 6×6 เซนติเมตร นำตัวอย่างไปเก็บในตู้ควบคุมอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ที่สภาวะอุณหภูมิ 27 ± 1 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 65 ± 2 เป็นเวลา 24 ชั่วโมง (IS0 187)

2. ชั่งน้ำหนักตัวอย่างก่อนการทดสอบ จากนั้นนำกระดาษวางบนชุดทดสอบค่า Cobb test โดยหันกระดาษด้านที่จะทดสอบขึ้นด้านบน

3. เทน้ำกลั่น (หรือน้ำมัน) ปริมาตร 22 มิลลิลิตร ลงไปในวงแหวนของชุดทดสอบค่า Cobb test แล้วเริ่มจับเวลาทันที ระวังไม่ให้มีหยดน้ำ (หรือน้ำมัน) หกออกมานอกวงแหวน

4. เมื่อถึงวินาทีที่ 105 ให้เทน้ำ (หรือน้ำมัน) ออกจากวงแหวนอย่างรวดเร็ว โดยไม่ให้มีน้ำ (หรือน้ำมัน) หยดออกนอกพื้นที่วงแหวน นำกระดาษทดสอบวางลงบนกระดาษทิชชู่ โดยให้ผิวกระดาษด้านเปียกอยู่ข้างบน จากนั้นรีบนำกระดาษทิชชู่อีกแผ่นหนึ่งวางบนกระดาษทดสอบ

ใช้ลูกกลิ้งโลหะกลิ้งทับไปบนกระดาษทิชชู่ไปและกลับ จากนั้นนำกระดาษทดสอบไปชั่งน้ำหนักอีกครั้ง

5. ทำการทดสอบทั้งหมด 10 ซ้ำ แบ่งเป็นกระดาษด้านหน้า 5 ซ้ำ และกระดาษด้านหลัง 5 ซ้ำ

การคำนวณ

$$\text{ค่าการดูดซึม (กรัม/ตร.ม.)} = \frac{(\text{น้ำหนักหลังทดสอบ}) - (\text{น้ำหนักก่อนทดสอบ}) \times 28}{\text{น้ำหนักก่อนทดสอบ}}$$

การทดสอบค่ามุมสัมผัส (น้ำหรือน้ำมัน)
(contact angle)

มาตรฐานการทดสอบ ดัดแปลงจาก ASTM D5946-04

เครื่องมือ

1. ตู้ควบคุมอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์
2. กล้องถ่ายภาพดิจิตอล
3. ขาตั้งกล้อง
4. ฉากและพื้น (กระดาษแข็งสีดำ)
5. ไมโครปิเปต ขนาด 100 ไมโครลิตร
6. นาฬิกาจับเวลา
7. น้ำกลั่น
8. น้ำมันปาล์ม ยี่ห้อ โอลีน
9. อุปกรณ์สำหรับตัดกระดาษ

วิธีการทดสอบ

1. ตัดกระดาษตัวอย่างให้มีขนาด 5×5 เซนติเมตร นำตัวอย่างไปเก็บในตู้ควบคุมอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ที่สภาวะอุณหภูมิ 27 ± 1 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 65 ± 2 เป็นเวลา 24 ชั่วโมง (IS0 187)

2. วางตัวอย่างกระดาษบนพื้นสีดำ และให้ฉากด้านหลังเป็นสีดำ

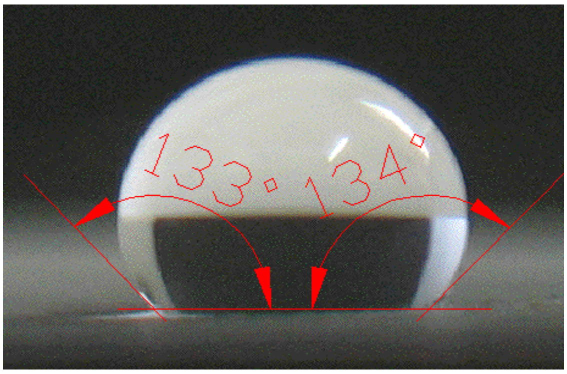
3. ติดกล้องถ่ายภาพดิจิตอลบนขาตั้งกล้อง จากนั้นตั้งขาตั้งกล้องให้เลนส์กล้องอยู่ในแนวระนาบกับตัวอย่างกระดาษ ปรับค่าถ่ายภาพเป็นระบบมาโคร และไม่เปิดแฟลต

4. หยดน้ำกลั่น (หรือน้ำมัน) ปริมาตร 40 ไมโครลิตร ลงบนตัวอย่างกระดาษด้วยไมโครปิเปต โดยให้ไมโครปิเปตอยู่ในแนวตั้งฉากกับพื้น และเริ่มจับเวลา

5. ถ่ายภาพหยดน้ำ (หรือน้ำมัน) บนผิวตัวอย่างกระดาษเมื่อจับเวลาครบหนึ่งนาที ทดสอบทั้งหมด 3 ซ้ำ

6. หากต้องการค่ามุมสัมผัสแบบต่อเนื่อง ให้ถ่ายภาพหยดน้ำ (หรือน้ำมัน) ทุกๆ หนึ่งนาทีจนครบ 10 นาที แรก ต่อจากนั้นถ่ายภาพเฉพาะนาทีที่ 20 และ 30 นาที ทดสอบทั้งหมด 3 ซ้ำ

7. บันทึกภาพถ่ายลงในคอมพิวเตอร์ และวัดค่ามุมสัมผัสโดยใช้โปรแกรม AutoCAD 2006
8. นำค่ามุมสัมผัสทั้งมุมซ้ายและขวาของหยดน้ำ (หรือน้ำมัน) ทั้ง 3 ซ้ำ มาเฉลี่ยกัน
9. นำค่ามุมสัมผัสที่วัดได้ไปคำนวณหาค่างานของการยึดติด (work of adhesion, W_a)



ภาพผนวกที่ ก1 ลักษณะการวัดมุมสัมผัสด้วยโปรแกรม AutoCAD 2006

การคำนวณค่างานของการยึดติดของน้ำ (work of adhesion, W_a)

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

เมื่อ W_a = งานของการยึดติด (ดายน์/ซม.)

θ = มุมสัมผัส (องศา)

γ_L = แรงตึงผิวของของเหลว (แรงตึงผิวของน้ำ = 72.8 ดายน์/ซม.)

ตัวอย่างการคำนวณ

ค่ามุมสัมผัสของน้ำที่ได้จากการทดลอง = 133 องศา

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

$= 72.8 (1 + \cos(133))$

ดังนั้น W_a = 23.15 ดายน์/ซม.

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 โอลีน
6. อุปกรณ์สำหรับตัดกระดาษ

วิธีการทดสอบ

1. ตัดกระดาษตัวอย่างให้มีขนาด 5×5 เซนติเมตร นำตัวอย่างไปเก็บไว้ในตู้ควบคุมอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ที่สภาวะอุณหภูมิ 27 ± 1 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 65 ± 2 เป็นเวลา 24 ชั่วโมง (IS0 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 5 ซ้ำ

การทดสอบอัตราการซึมผ่านของไอน้ำ
(water vapor transmission rate, WVTR)

มาตรฐานการทดสอบ ดัดแปลงจาก ASTM E96

เครื่องมือ

1. ตู้ควบคุมอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์
2. ชุดทดสอบอัตราการซึมผ่านของไอน้ำ
3. พาราฟิน
4. เครื่องชั่งละเอียดทศนิยม 4 ตำแหน่ง
5. สารดูดความชื้น
6. อุปกรณ์สำหรับตัดกระดาษ

วิธีการทดสอบ

1. ตัดกระดาษตัวอย่างให้มีพื้นที่ 0.28 ตารางเมตร ในการซึมผ่านของไอน้ำ (เส้นผ่านศูนย์กลาง 6 เซนติเมตร) นำตัวอย่างไปเก็บในตู้ควบคุมอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ที่สภาวะอุณหภูมิ 27 ± 1 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 65 ± 2 เป็นเวลา 24 ชั่วโมง (IS0 187)
2. ต้มพาราฟินให้เหลว
3. นำสารดูดความชื้นปริมาตร 20 มิลลิลิตร ใส่ลงในถ้วยทดสอบ
4. วางตัวอย่างกระดาษบนถ้วยทดสอบโดยให้อยู่บริเวณกึ่งกลางถ้วย นำตุ้มน้ำหนักวางทับเพื่อป้องกันไม่ให้ตัวอย่างกระดาษเคลือบที่
5. เทพาราฟินเหลวอย่างช้าๆ ลงในขอบถ้วยทดสอบ ค่อยๆ หมุนถ้วยทดสอบขณะเทเพื่อให้พาราฟินติดในขอบถ้วยอย่างทั่วถึง
6. ทิ้งไว้รอให้พาราฟินแห้ง จากนั้นนำตุ้มน้ำหนักออก
7. นำตัวอย่างที่เตรียมเสร็จแล้วไปชั่งน้ำหนัก บันทึกน้ำหนักเริ่มต้น
8. เก็บตัวอย่างในตู้ควบคุมอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ที่สภาวะอุณหภูมิ 37 ± 1 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 80 ± 2

9. นำตัวอย่างออกมาชั่งน้ำหนักและบันทึกน้ำหนักทุกหนึ่งวัน จนน้ำหนักสองครั้งสุดท้ายต่างกันไม่เกิน 0.0010 กรัม

10. ทดลองทั้งหมด 5 ซ้ำ

11. นำค่าน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงไปในแต่ละวันมาวาดกราฟ หาค่าความชันของกราฟ

การคำนวณ

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

การทดสอบอัตราการซึมผ่านของแก๊สออกซิเจน

(oxygen transmission rate, OTR)

มาตรฐานการทดสอบ ดัดแปลงจาก ASTM D3985

เครื่องมือ

1. ตู้ควบคุมอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์
2. เครื่องวัดอัตราการซึมผ่านของแก๊สออกซิเจน
3. แผ่นอลูมิเนียม (aluminum foil)
4. อุปกรณ์สำหรับตัด/ติดกระดาษและแผ่นอลูมิเนียม

วิธีการทดสอบ

1. ตัดแผ่นอลูมิเนียมให้มีขนาดแปดเหลี่ยมเท่ากับ template และเจาะรูตรงกลางแผ่นอลูมิเนียมเป็นวงกลมเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 เซนติเมตร สำหรับนำมาติดกับกระดาษตัวอย่าง โดยแผ่นอลูมิเนียมจะต้องปราศจากรอยย่น รอยพับ หรือหักงอ

2. ตัดกระดาษตัวอย่างให้มีพื้นที่ 0.28 ตร.ม. ในการซึมผ่านของแก๊ส (เส้นผ่านศูนย์กลาง 6 เซนติเมตร) นำตัวอย่างไปเก็บในตู้ควบคุมอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ที่สภาวะอุณหภูมิ 27 ± 1 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 65 ± 2 เป็นเวลา 24 ชั่วโมง (IS0 187)

3. ทา sealant บางๆ บริเวณขอบวงกลมของแผ่นอลูมิเนียม วางกระดาษตัวอย่างให้พอดีวงกลมนั้น ติดขอบกระดาษกับแผ่นอลูมิเนียมให้แนบสนิทด้วยสก๊อตเทป

4. นำตัวอย่างไปทดสอบด้วยเครื่องวัดอัตราการซึมผ่านของแก๊สออกซิเจน

8. ทดสอบทั้งหมด 5 ครั้ง

การคำนวณ

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

การทดสอบค่าสี

(L* a* b*)

เครื่องมือ

1. ตู้ควบคุมอุณหภูมิและความชื้นสัมพันธ์
2. เครื่องวัดสี
3. อุปกรณ์สำหรับตัดกระดาษ

วิธีการทดสอบ

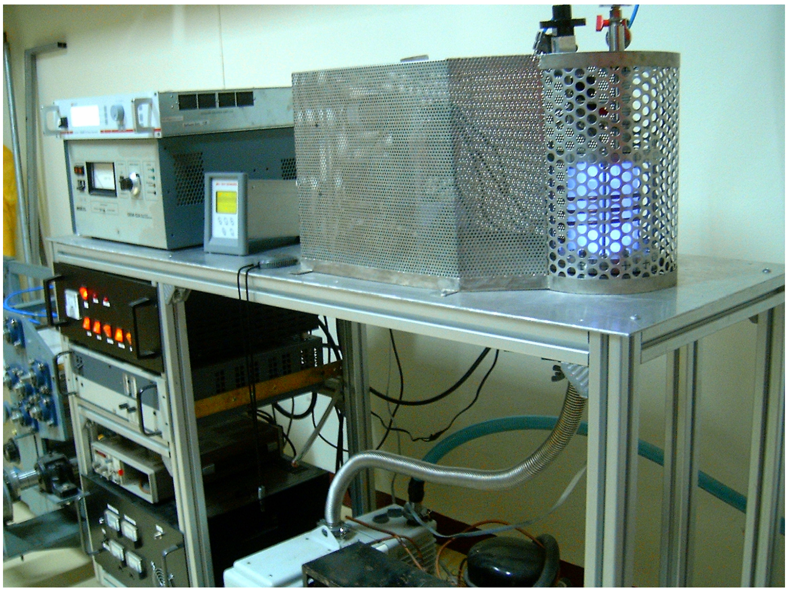
1. ตัวกระดาษตัวอย่างขนาด 6×6 เซนติเมตร นำไปเก็บในตู้ควบคุมอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ที่สภาวะอุณหภูมิ 27 ± 1 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 65 ± 2 เป็นเวลา 24 ชั่วโมง (IS0 187)
2. calibrate เครื่องวัดสี
3. นำหัววัดวางบนตัวอย่างกระดาษ สังเกตไม่ให้มีบริเวณใดของหัววัดเลยออกไปนอกกระดาษตัวอย่าง
4. บันทึกค่าสี L* a* b* ที่ได้
5. ทดสอบทั้งหมด 5 ซ้ำ

ภาคผนวก ข

ระบบการทำงานของเครื่องผลิตพลาสมาความดันต่ำระบบ ICP

ระบบการทำงานของเครื่องผลิตพลาสมาความดันต่ำระบบ inductively coupled plasma discharge (ICP)

งานวิจัยนี้ใช้เครื่องผลิตพลาสมาความดันต่ำภายในห้องวิจัยเทคโนโลยีพลาสมา ศูนย์วิจัยนิวตรอนพลังงานสูง มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ (ภาพผนวกที่ ข1) ในการเคลือบพลาสมาซัลเฟอร์เฮกซะฟลูโอไรด์บนกระดาษ โดยเครื่องผลิตพลาสมาความดันต่ำนี้เป็นการผลิตพลาสมาภายใต้สภาวะความดันแก๊สที่ต่ำกว่าความดันบรรยากาศกว่า 1/100,000 เท่าของความดันบรรยากาศ โดยใช้หลักการทำงานจากการเหนี่ยวนำของคลื่นวิทยุขนาด 13.56 เมกกะเฮิร์ท แบบ inductively coupled plasma discharge (ICP) ซึ่งเป็นหลักการที่คลื่นวิทยุไปรบกวนอะตอมหรือโมเลกุลของแก๊สที่อยู่ในภาชนะปิด (chamber) ผลของการรบกวนจากคลื่นวิทยุทำให้อิเล็กตรอนอิสระที่มีอยู่ทั่วไปภายในกลุ่มแก๊สมีพลังงานมากเพียงพอที่จะไปชนกับอะตอมหรือโมเลกุลของแก๊สจนทำให้เกิดการแตกตัวเป็นไอออนและอยู่ในสถานะของพลาสมา



ภาพผนวกที่ ข1 เครื่องผลิตพลาสมาความดันต่ำของศูนย์วิจัยนิวตรอนพลังงานสูง มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

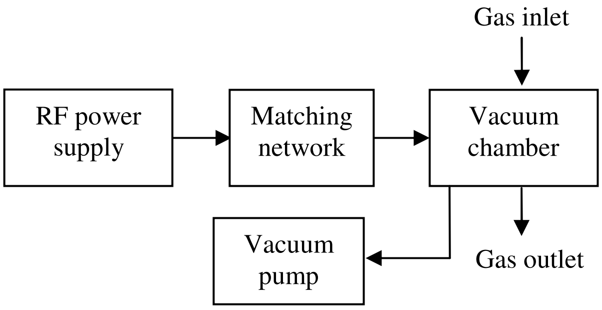
โดยเครื่องผลิตพลาสมาความดันต่ำที่ใช้ในงานวิจัยนี้สามารถจำแนกอุปกรณ์หลักออกเป็น 4 ส่วน (ภาพผนวกที่ ข2) ดังต่อไปนี้

1. ปั๊มสุญญากาศ (vacuum pump) สามารถควบคุมให้สร้างพลาสมาภายใต้ความดันอากาศที่ต่ำ อยู่ในช่วงระหว่าง 1/100,000 ถึง 1/10,000 เท่าของความดันบรรยากาศ (1-1,000 มิลลิทอร์)

2. แหล่งกำเนิดคลื่นวิทยุ (RF power supply) เป็นแหล่งพลังงานที่ใช้ในการผลิตพลาสมา ซึ่งมีกำลังไฟฟ้าที่ใช้อยู่ในช่วง 10-250 วัตต์ โดยการใช้งานจะขึ้นอยู่กับลักษณะและขนาดของพื้นที่ใช้งาน

3. ระบบ matching network มีหน้าที่ปรับความต้านทานรวมของระบบให้มีค่าเท่ากันทั้งระบบ เพื่อป้องกันความเสียหายที่จะเกิดกับแหล่งกำเนิดคลื่นวิทยุ

4. แชมเบอร์สุญญากาศ (vacuum chamber) ปริมาตร 1 ลิตร เป็นบริเวณที่เกิดพลาสมาซึ่งเป็นส่วนที่ใส่ชิ้นงานที่ต้องการประยุกต์พลาสมาลงไป



ภาพผนวกที่ ข2 ไดอะแกรมของเครื่องผลิตพลาสมาความดันต่ำ

ภาคผนวก ค

ค่าทดสอบมุมสัมผัสแบบต่อเนื่อง (dynamic contact angle) ของกระดาษประยุกต์พลาสมา

ตารางผนวกที่ ค1 มุมสัมผัสของหยดน้ำเมื่อเวลาผ่านไปของกระดาษประยุกต์พลาสมา

กระดาษ	เวลาในการประยุกต์พลาสมา (วินาที)	มุมสัมผัส (องศา)					
		นาทีที่ 0	นาทีที่ 1	นาทีที่ 2	นาทีที่ 3	นาทีที่ 4	นาทีที่ 5
ด้านหน้า	untreated	71 ± 2.0^{b}	70 ± 2.0^{b}	69 ± 2.1^{a}	69 ± 1.8^{a}	68 ± 2.2^{a}	68 ± 2.0^{a}
	2	111 ± 1.9^{c}	111 ± 1.9^{c}	110 ± 1.9^{b}	109 ± 1.9^{c}	109 ± 1.8^{c}	108 ± 1.8^{c}
	10	113 ± 1.0^{cd}	113 ± 1.0^{cd}	112 ± 1.0^{b}	112 ± 1.0^{d}	111 ± 1.0^{c}	110 ± 1.3^{d}
	60	114 ± 1.9^{d}	114 ± 1.9^{d}	114 ± 1.9^{c}	113 ± 1.9^{d}	113 ± 1.9^{d}	112 ± 1.9^{e}
	600	116 ± 1.5^{e}	116 ± 1.5^{e}	116 ± 1.5^{d}	116 ± 1.4^{e}	115 ± 1.5^{e}	115 ± 1.4^{f}
ด้านหลัง	untreated	63 ± 1.5^{a}	24 ± 1.0^{a}	n/a	n/a	n/a	n/a
	2	120 ± 1.3^{f}	113 ± 1.9^{cd}	112 ± 1.9^{b}	106 ± 2.1^{b}	103 ± 1.6^{b}	98 ± 1.5^{b}
	10	132 ± 1.9^{g}	128 ± 2.0^{f}	127 ± 1.7^{e}	126 ± 1.8^{f}	125 ± 1.5^{f}	123 ± 1.6^{g}
	60	136 ± 0.9^{h}	135 ± 0.9^{g}	134 ± 0.5^{f}	134 ± 0.8^{g}	133 ± 1.0^{g}	133 ± 0.8^{h}
	600	135 ± 0.9^{h}	134 ± 0.8^{g}	133 ± 0.9^{f}	132 ± 0.5^{g}	132 ± 0.8^{g}	132 ± 0.6^{h}

ตารางผนวกที่ ค1 (ต่อ)

กระดาษ	เวลาในการประยุกต์พลาสมา (วินาที)	มุมสัมผัส (องศา)						
		นาทีที่ 6	นาทีที่ 7	นาทีที่ 8	นาทีที่ 9	นาทีที่ 10	นาทีที่ 20	นาทีที่ 30
ด้านหน้า	untreated	68 ± 2.0 [a]	67 ± 2.1 [a]	67 ± 1.8 [a]	66 ± 1.8 [a]	66 ± 1.8 [a]	60 ± 1.9 [a]	54 ± 1.5 [a]
	2	107 ± 1.8 [c]	106 ± 1.8 [c]	105 ± 1.7 [c]	104 ± 1.7 [c]	103 ± 1.7 [c]	96 ± 1.9 [b]	91 ± 2.3 [b]
	10	109 ± 1.3 [c]	108 ± 1.3 [c]	107 ± 1.3 [c]	106 ± 1.3 [c]	105 ± 1.3 [c]	97 ± 1.6 [b]	92 ± 1.9 [v]
	60	112 ± 1.9 [d]	111 ± 1.9 [d]	111 ± 1.9 [d]	110 ± 1.9 [d]	110 ± 1.9 [d]	102 ± 1.2 [c]	95 ± 2.4 [c]
	600	114 ± 1.5 [e]	114 ± 1.4 [e]	113 ± 1.2 [e]	113 ± 1.6 [e]	113 ± 1.4 [e]	105 ± 2.1 [d]	96 ± 2.0 [c]
ด้านหลัง	untreated	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
	2	93 ± 1.7 [b]	86 ± 1.6 [b]	82 ± 1.6 [b]	79 ± 1.5 [b]	76 ± 1.4 [b]	n/a	n/a
	10	122 ± 2.0 [f]	121 ± 2.1 [f]	120 ± 2.2 [f]	120 ± 2.0 [f]	119 ± 2.3 [f]	116 ± 2.3 [e]	106 ± 1.6 [d]
	60	132 ± 1.0 [g]	132 ± 1.2 [g]	131 ± 0.9 [g]	130 ± 0.8 [g]	130 ± 1.0 [g]	128 ± 1.0 [f]	126 ± 1.0 [e]
	600	131 ± 0.8 [g]	131 ± 0.8 [g]	130 ± 0.8 [g]	130 ± 0.8 [g]	130 ± 0.8 [g]	128 ± 1.0 [f]	124 ± 1.0 [e]

[a-h] ตัวอักษรที่ต่างกันในแถวตั้งหมายถึงค่าเฉลี่ยมีความแตกต่างกันทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

n/a ไม่สามารถวัดค่าได้

ภาคผนวก ง

ค่าทดสอบอิทธิพลของระยะเวลาในการเก็บต่อความสามารถในการต้านทานน้ำของกระดาษ

ตารางผนวกที่ ง1 เวลาในการดูดซึมน้ำของกระดาษด้านหลังภายหลังการประยุกต์พลาสมาเมื่อเก็บในอุณหภูมิ 25-32 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 48-74 เป็นเวลา 28 วัน

เวลาในการประยุกต์พลาสมา (วินาที)	เวลาในการดูดซึมน้ำ (นาที)						
	0 วัน	1 วัน	3 วัน	7 วัน	14 วัน	21 วัน	28 วัน
untreated	1 ± 0.1^{a}	1 ± 0.3^{a}	1 ± 0.1^{a}	1 ± 0.1^{a}	1 ± 0.2^{a}	1 ± 0.3^{a}	1 ± 0.1^{a}
2	47 ± 1.6^{b}	55 ± 1.6^{b}	53 ± 1.3^{b}	48 ± 1.2^{b}	24 ± 1.5^{b}	9 ± 1.4^{b}	7 ± 1.1^{b}
10	105 ± 1.8^{c}	109 ± 1.9^{x}	104 ± 1.3^{c}	103 ± 1.5^{c}	99 ± 1.5^{c}	99 ± 2.1^{c}	90 ± 2.0^{c}
60	106 ± 1.8^{c}	120 ± 1.1^{d}	119 ± 1.5^{d}	109 ± 1.9^{d}	106 ± 1.9^{d}	106 ± 1.5^{d}	105 ± 2.0^{d}
600	129 ± 1.9^{d}	139 ± 1.6^{e}	128 ± 2.1^{e}	119 ± 1.8^{e}	115 ± 1.8^{e}	112 ± 1.8^{e}	92 ± 2.0^{c}

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

ประวัติการศึกษา และการทำงาน

ชื่อ –นามสกุล	นางสาวสุชาดา ถาวรวิริยะนันท์
วัน เดือน ปี ที่เกิด	วันที่ 24 กรกฎาคม 2525
สถานที่เกิด	ระยอง
ประวัติการศึกษา	ปริญญาตรี ภาควิชาเทคโนโลยีการบรรจุ คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
ตำแหน่งหน้าที่การงานปัจจุบัน	-
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	-
ผลงานดีเด่นและรางวัลทางวิชาการ	-
ทุนการศึกษาที่ได้รับ	-