*บทความวิจัย*

# การพัฒนากระดาษต้านการดูดซึมน้ำโดยการผสมด้วยยางธรรมชาติ

**สุฤกษ์ คงทอง* และ อรสา พัฒน์จันทร์**


## บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้แสดงให้เห็นความเป็นไปได้ในการพัฒนาคุณสมบัติทางด้านการต้านการดูดซึมน้ำของกระดาษ โดยการผสมยางธรรมชาติในรูปน้ำยางข้นในสัดส่วนของเปอร์เซ็นต์น้ำหนักแห้งที่แตกต่างกันลงในเยื่อกระดาษรีไซเคิล โดยพบว่าสามารถเตรียมแผ่นกระดาษที่มีค่าน้ำหนักมาตรฐาน ความหนา และความหนาแน่นเสมือน ในระดับที่ใกล้เคียงกันได้แม้จะมีสัดส่วนของกระดาษและยางที่แตกต่างกัน จากนั้นเมื่อนำแผ่นกระดาษตัวอย่างไปทดสอบคุณสมบัติการต้านทานน้ำพบว่า กระดาษผสมยางธรรมชาติสามารถต้านทานน้ำได้ดีขึ้น กล่าวคือกระดาษมีค่าการดูดซึมน้ำที่ลดลงและพื้นผิวกระดาษมีความต้านทานน้ำเพิ่มสูงขึ้น (จากการที่ค่ามุมสัมผัสของหยดน้ำบนพื้นผิวกระดาษเพิ่มขึ้น)ตามปริมาณยางธรรมชาติที่เพิ่มขึ้นในเนื้อกระดาษ นอกจากนั้นยังพบว่ากระดาษผสมยางธรรมชาติมีค่าความต้านทานต่อแรงดึงสูงขึ้นกว่ากระดาษที่ไม่ผสมยาง


**คำสำคัญ:** กระดาษต้านการดูดซึมน้ำ ยางธรรมชาติ กระดาษผสมยาง

สาขาวิทยาศาสตร์และวิศวกรรมวัสดุ สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์และทรัพยากร มหาวิทยาลัยวลัยลักษณ์
*ผู้นิพนธ์ประสานงาน, e-mail: ksureurg@wu.ac.th

# Developing of Water Resistant Paper by the Addition of Natural Rubber

**Sureurg Khongtong* and Orasa Patjun**

## ABSTRACT

This research illustrates the possibility of developing of water resistant paper by adding of natural rubber (concentrated latex) with different ratios of dry weight basis (%) into recycled paper pulp. The values of grammage, caliper and apparent density of the sample sheets were found at about the same levels even though the ratios of paper pulp and rubber in each sample were varied. The values of water absorption and contact angles were then monitored to evaluate the improvement of water resistance properties. It was found that samples with higher amounts of natural rubber revealed better results, lower levels of water absorption and greater hydrophobicity (higher contact angle values) at the interfaces. Additionally, natural rubber added samples displayed higher tensile strength than the bared one.

**Keywords:** water resistance paper, natural rubber, rubber-added paper

Materials Science and Engineering Programs, School of Engineering and Resources, Walailak University
*Corresponding author, e-mail: ksureurg@wu.ac.th

## บทนำ

ปัจจุบันมีการใช้บรรจุภัณฑ์กระดาษอย่างกว้างขวาง เนื่องจากสามารถออกแบบได้หลากหลาย มีราคาถูกและมีน้ำหนักเบา โดยทั่วไปกระดาษจะยอมให้น้ำซึมผ่านได้ง่ายจึงไม่แข็งแรงทนทานและไม่สามารถคงรูปร่างอยู่ได้ในสภาวะเปียกชื้น เนื่องจากโครงสร้างของกระดาษประกอบด้วยชั้นบางๆ ของเส้นใยเซลลูโลสซึ่งซ้อนทับกันและยึดติดกันด้วยพันธะไฮโดรเจน พันธะไฮโดรเจนดังกล่าวเกิดขึ้นเนื่องจากโครงสร้างของโมเลกุลเซลลูโลสที่ประกอบด้วยหมู่ไฮดรอกซิล (-OH) จำนวนมาก [1] ในขั้นตอนการผลิตกระดาษสำหรับใช้งานทั่วไปจึงมีการเติมสารต้านการซึมน้ำ (sizing agents) เพื่อลดการดูดซับน้ำของกระดาษ เมื่อกระดาษสัมผัสน้ำจึงไม่เปียกน้ำในทันทีทันใด ส่วนกระดาษที่ไม่เติมสารต้านการซึมน้ำจะเปียกน้ำและดูดซับน้ำได้ง่าย เช่น กระดาษชำระและกระดาษซับ (blotting paper) [2] ในปัจจุบันได้มีการพัฒนากระดาษต้านการดูดซึมน้ำโดยการเคลือบผิวกระดาษด้วยสารที่มีคุณสมบัติที่ไม่ชอบน้ำ (มีความเป็นขั้วต่ำ) เช่น ฟิล์มของพอลิเมอร์ และอนุภาคของพอลิเมอร์ชนิดต่างๆ ซึ่งวิธีการดังกล่าวช่วยให้กระดาษมีคุณสมบัติต้านการดูดซึมน้ำได้ดี [3-8]

อนึ่งการพัฒนาคุณสมบัติของกระดาษให้มีการต้านการดูดซึมน้ำที่ดี เพื่อให้สามารถนำกระดาษไปประยุกต์ใช้งานได้อย่างก้าวขวางมากยิ่งขึ้นนั้นจำเป็นต้องคำนึงถึงกระบวนการเตรียมที่ต้องไม่ยุ่งยากซับซ้อน มีต้นทุนต่ำ และวัสดุที่ใช้เป็นส่วนประกอบของกระดาษต้องส่งผลผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมน้อยที่สุด งานวิจัยนี้จึงได้ศึกษาความเป็นไปได้ของการใช้ยางธรรมชาติในรูปน้ำยางผสมกับกระดาษ เนื่องจากยางธรรมชาติเป็นวัตถุดิบจากแหล่งการผลิตที่ยั่งยืนและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม ทั้งนี้โมเลกุลยางธรรมชาติเป็นพอลิเมอร์ที่มีความเป็นขั้วต่ำจึงมีการต้านการดูดซึมน้ำได้ดี นอกจากนั้นยางธรรมชาติในรูปน้ำยางมีสภาพเป็นคอลลอยด์ซึ่งประกอบด้วยอนุภาคเล็กๆ ในระดับไมครอนของยางธรรมชาติ (สายโซ่ cis-1,4-polyisoprene) แขวนลอยอยู่ในน้ำ [9] จึงน่าจะสามารถผสมเข้ากับเยื่อกระดาษซึ่งเป็นเส้นใยเซลลูโลสที่บวมอิ่มด้วยน้ำได้ง่าย และเมื่อนำไปผ่านขั้นตอนการเตรียมแผ่นกระดาษโดยการอบระเหยน้ำจะช่วยลดโอกาสของการเกิดการแยกวัฏภาค (phase separation) ระหว่างยางธรรมชาติกับเส้นใยเซลลูโลสในแผ่นกระดาษที่เตรียมได้ ส่งผลให้กระดาษมีคุณสมบัติด้านการดูดซึมน้ำและมีความแข็งแรงทนทานดีขึ้น

## อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

### 1. วัสดุวิจัย

กระดาษปรู๊ฟที่มีน้ำหนักมาตรฐาน (grammage) ในช่วง 40-50 g/m$^2$ สำหรับเตรียมเป็นเยื่อกระดาษรีไซเคิล การเลือกใช้กระดาษปรู๊ฟในงานวิจัยนี้เนื่องจากเป็นกระดาษที่มีสารเติมอยู่ในปริมาณต่ำที่สุด ทั้งนี้เพื่อลดอิทธิพลขององค์ประกอบอื่นๆ ในกระดาษที่อาจจะมีผลต่อคุณสมบัติการดูดซึมน้ำและความแข็งแรงของกระดาษที่เตรียมได้ให้ต่ำที่สุด, น้ำยางข้นที่มีปริมาณเนื้อยางแห้ง (dry rubber content, DRC) 60% ชนิดแอมโนเนียสูง (HA) (จากองค์การสวนยางนาบอน จ.นครศรีธรรมราช)

### 2. การเตรียมเยื่อกระดาษรีไซเคิล

ชั่งน้ำหนักกระดาษปรู๊ฟให้ทราบค่าที่แน่นอน ตัดกระดาษเป็นชิ้นเล็กๆ ขนาดประมาณ 2-3 ตารางเซนติเมตร แล้วนำไปแช่น้ำเป็นเวลา 24 ชั่วโมงเพื่อให้เนื้อกระดาษอ่อนตัวและอิ่มตัวด้วยน้ำ จากนั้นนำไปปั่นด้วยเครื่องปั่นที่ความเร็วรอบประมาณ 700 รอบ/นาที เป็นเวลา 1 นาที เก็บเยื่อกระดาษรีไซเคิลที่ปั่นได้ในภาชนะ เพื่อใช้ผสมกับน้ำยางต่อไป

**3. การเตรียมน้ำยาง**

คนน้ำยางข้นช้าๆ ในภาชนะเปิดเป็นเวลาอย่างน้อย 30 นาที เพื่อให้แอมโมเนียระเหยออกจากน้ำยาง

**4. การเตรียมกระดาษตัวอย่าง**

**4.1 การผสมเยื่อกระดาษรีไซเคิลกับน้ำยางข้น**

เทเยื่อกระดาษจากข้อ 2 ลงในภาชนะตามสัดส่วนน้ำหนักแห้งที่แสดงในตารางที่ 1 เติมน้ำประมาณ 300 มล.เพื่อให้เยื่อกระดาษกระจายตัวได้ดีขึ้น ชั่งน้ำยางข้นที่ได้จากข้อ 3 ให้ได้ปริมาณเนื้อยางแห้งตามสัดส่วนที่แสดงในตารางที่ 1 แล้วเทลงในภาชนะที่มีเยื่อกระดาษอยู่ คนด้วยแท่งแม่เหล็กที่ความเร็ว 300 รอบ/นาที เป็นเวลา 20 นาทีเพื่อให้อนุภาคยางผสมกับเยื่อกระดาษที่อิ่มตัวด้วยน้ำ

**4.2 การขึ้นรูปแผ่นกระดาษ**

ปล่อยส่วนผสมจากข้อ 4.1 ไว้นิ่งๆ เพื่อให้เยื่อกระดาษผสมยางธรรมชาติลอยขึ้นสู่ผิว แล้วเทใส่ตะแกรงขนาด 25 เมช โดยเกลี่ยให้เยื่อกระดาษกระจายอย่างสม่ำเสมอ จากนั้นนำไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส ความเร็วลม 0.7 เมตรต่อวินาที เป็นเวลา 6 ชั่วโมง ลอกแผ่นกระดาษออก แล้วนำไปเก็บในห้องควบคุมสภาวะที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ 60% เป็นเวลาอย่างน้อย 96 ชม. เพื่อใช้สำหรับทดสอบคุณสมบัติต่างๆ ต่อไป

**ตารางที่ 1** อัตราส่วนผสม (เปอร์เซ็นต์) ระหว่างเยื่อกระดาษและน้ำยาง

| น้ำหนักเยื่อกระดาษแห้ง | น้ำหนักเนื้อยางแห้ง |
|---|---|
| 100 | 0 |
| 90 | 10 |
| 80 | 20 |
| 70 | 30 |
| 60 | 40 |
| 50 | 50 |

**5. การทดสอบคุณสมบัติของกระดาษตัวอย่าง**

**5.1 น้ำหนักมาตรฐานของกระดาษ (ตามมาตรฐาน ISO536:1995)**

โดยตัดตัวอย่างกระดาษขนาด 20 ซม. × 25 ซม. จำนวน 12 ชิ้น ชั่งน้ำหนักชิ้นตัวอย่างแต่ละชิ้นจำนวน 5 ครั้ง บันทึกค่าที่ได้และคำนวณหาค่าน้ำหนักมาตรฐานของกระดาษ (grammage) โดยสมการ

$$\text{grammage} = \text{น้ำหนักเฉลี่ย/พื้นที่ของแผ่นกระดาษ } (g/m^2)$$

**5.2 ความหนาและความหนาแน่นเสมือนของกระดาษ (ตามมาตรฐาน ISO534: 1988)**

โดยใช้ตัวอย่างกระดาษชุดเดียวกับข้อ 5.1 จำนวน 12 ชิ้น วัดค่าความหนา (caliper) ของแต่ละชิ้นที่ 8 ตำแหน่งต่างๆ กัน หาค่าเฉลี่ยของความหนาที่วัดได้ แล้วนำค่าเฉลี่ยที่ได้ไปคำนวณหาค่าปริมาตรของกระดาษ เพื่อนำไปหาค่าความหนาแน่นเสมือน (apparent density, D) ของกระดาษโดยสมการ

$$\text{ความหนาแน่นเสมือน (D)} = m/v \ (g/cm^3)$$

เมื่อ m คือ น้ำหนักเฉลี่ยของกระดาษ (ใช้ค่าจากข้อ 1)
v คือ ปริมาตรของกระดาษ

**5.3 การดูดซึมน้ำของกระดาษ (ตามมาตรฐาน ISO535:1991)**

ทำโดยเตรียมชิ้นกระดาษตัวอย่างขนาด 10 ซม. × 10 ซม. บันทึกค่าน้ำหนักแห้งก่อนแช่น้ำ แช่ชิ้นตัวอย่างในน้ำกลั่นเป็นระยะเวลานาน 2 นาที แล้วผึ่งให้เสด็จน้ำเป็นระยะเวลาประมาณ 45 วินาที บันทึกค่าน้ำหนักขณะเปียกหลังแช่น้ำ จากนั้นเปลี่ยนชิ้นตัวอย่างใหม่สำหรับใช้แช่ในน้ำกลั่นเป็นระยะเวลานาน 4, 6, 8 และ 10 นาที บันทึกค่าน้ำหนักขณะแห้งและเปียก ตามลำดับ หาค่าเฉลี่ยของน้ำหนักเพื่อใช้ในการคำนวณค่าการดูดซึมน้ำ (% water absorption และ water absorption) ของกระดาษตามสมการ โดยค่าที่รายงานเป็นค่าเฉลี่ยจาก 3 ตัวอย่าง

$$\% \text{ water absorption} = (M_i - M_0 / M_i) \times 100 \quad (\%)$$

$$\text{water absorption} = (M_i - M_0 / A) \quad (g/m^2)$$

เมื่อ $M_0$ คือ น้ำหนักแห้งก่อนแช่น้ำ
$M_i$ คือ น้ำหนักเปียกหลังแช่น้ำ
A คือ พื้นที่ของแผ่นกระดาษ

**5.4 การทดสอบการเปียกน้ำของพื้นผิวกระดาษ (มาตรฐาน ASTM D724)**

ตัดตัวอย่างกระดาษให้ได้ขนาด 2.5 ซม. × 1 ซม. สำหรับใช้วัดหาค่ามุมสัมผัสของหยดน้ำกลั่นบนพื้นผิวกระดาษ (ใช้ sessile drop) ด้วยเครื่อง contact angle meter (Rame-Hart Model 100) ที่ระยะเวลา 5, 10, 15, 20, 25, 30 และ 60 วินาที โดยวัดชิ้นละ 4 ตำแหน่ง จำนวน 3 ชิ้นตัวอย่าง ซึ่งค่ามุมสัมผัสที่รายงานในงานวิจัยเป็นค่าเฉลี่ยจากชิ้นตัวอย่างทั้ง 3 ชิ้น

**5.5 ความต้านทานต่อแรงดึงในสภาวะแห้ง (มาตรฐาน ISO3781:1983)**

ตัดกระดาษขนาด 1.5 ซม. × 14 ซม. จำนวน 5 ชิ้น เพื่อใช้สำหรับวัดค่าความต้านทานต่อแรงดึงด้วยเรื่อง universal testing machine (Lloyd) โดยใช้ loadcell ขนาด 500 N

## ผลการทดลอง

### 1. การทดสอบความสม่ำเสมอของคุณสมบัติพื้นฐานของกระดาษที่ผสมกับยางธรรมชาติ

การทดลองนี้เป็นการทดสอบหาค่าน้ำหนักมาตรฐาน ความหนา และความหนาแน่นเสมือนของกระดาษที่ผสมยางธรรมชาติด้วยอัตราส่วนต่างๆ เพื่อยืนยันว่ากระดาษที่เตรียมได้มีคุณสมบัติพื้นฐานที่ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญนอกจากสัดส่วนของกระดาษและยางธรรมชาติที่ผสมอยู่ในแต่ละตัวอย่างเท่านั้น ซึ่งได้แสดงคุณสมบัติต่างๆ ดังกล่าวของกระดาษตัวอย่างไว้ในตารางที่ 2

**ตารางที่ 2** ค่าน้ำหนัก น้ำหนักมาตรฐาน ความหนา และความหนาแน่นเสมือนของกระดาษตัวอย่างที่มีสัดส่วน (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักแห้ง) ของกระดาษและยางธรรมชาติต่างๆ กัน

| อัตราส่วน กระดาษ: ยาง | น้ำหนัก (g) | น้ำหนักมาตรฐาน ($g/m^2$) | ความหนา (cm) | ความหนาแน่นเสมือน ($g/cm^3$) |
|---|---|---|---|---|
| 100: 0 | 7.4 ± 0.3 | 148 ± 5 | 0.05 ± 0.01 | 0.3 ± 0.02 |
| 90: 10 | 7.4 ± 0.2 | 147 ± 5 | 0.04 ± 0.01 | 0.4 ± 0.04 |
| 80: 20 | 7.4 ± 0.1 | 149 ± 1 | 0.05 ± 0.01 | 0.3 ± 0.02 |
| 70: 30 | 7.6 ± 0.3 | 152 ± 5 | 0.05 ± 0.01 | 0.3 ± 0.03 |
| 60: 40 | 7.6 ± 0.2 | 151 ± 3 | 0.05 ± 0.01 | 0.3 ± 0.02 |
| 50: 50 | 7.5 ± 0.3 | 151 ± 5 | 0.05 ± 0.01 | 0.3 ± 0.03 |

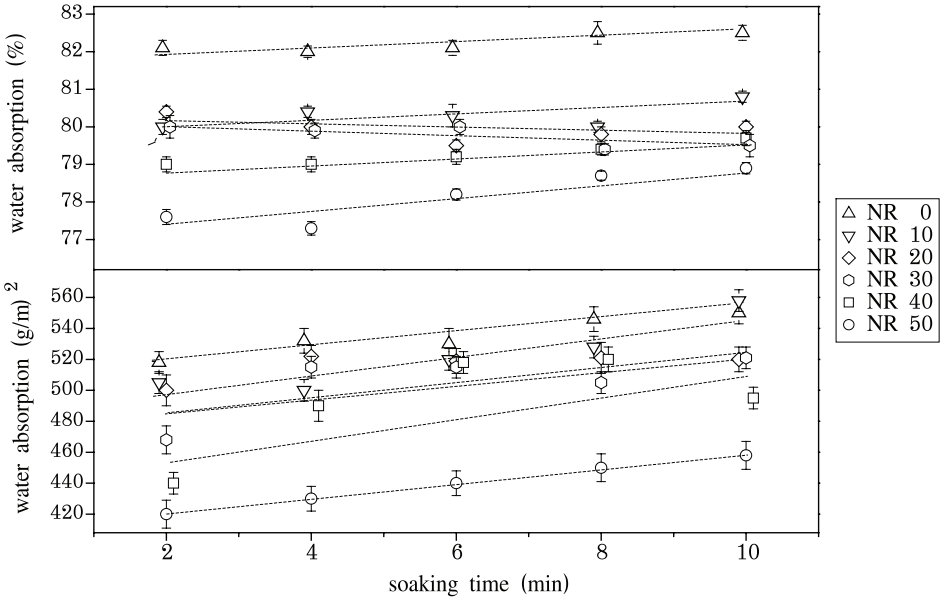
อนึ่งผลการทดลองที่แสดงในตารางที่ 2 บ่งชี้ว่า การเตรียมแผ่นกระดาษผสมยางธรรมชาติโดยใช้วิธีผสมน้ำยางลงในเยื่อกระดาษที่บวมอิ่มน้ำ สามารถช่วยให้อนุภาคของยางธรรมชาติ (ที่มีขนาดในระดับไมครอน) ที่แขวนลอยอยู่ในน้ำยาง [9] เกิดการกระจายผสมกับเส้นใยเซลลูโลสในเยื่อกระดาษได้อย่างสม่ำเสมอ

### 2. การทดสอบการต้านการดูดซึมน้ำของกระดาษตัวอย่างผสมยางธรรมชาติ

#### 2.1 การดูดซึมน้ำของกระดาษผสมยางธรรมชาติ

เพื่อตรวจสอบว่ายางธรรมชาติ (ซึ่งเป็นโมเลกุลที่มีขั้วต่ำ) ที่ผสมอยู่กับเส้นใยเซลลูโลสจะสามารถช่วยลดการดูดซึมน้ำของเนื้อกระดาษได้หรือไม่ จึงทำการทดลองโดยนำกระดาษตัวอย่างที่มียางธรรมชาติผสมอยู่ในสัดส่วนที่แตกต่างกัน ไปแช่ในน้ำกลั่นเป็นระยะเวลา 2, 4, 6, 8 และ 10 นาที พบว่าที่ระยะเวลา 2 นาที กระดาษตัวอย่างที่ไม่ผสมยางธรรมชาติ (NR 0) ให้ค่าเปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำและค่าการดูดซึมน้ำต่อหน่วยพื้นที่ (% water absorption และ water absorption) สูงที่สุดคือประมาณ 82% และ 520 $g/m^2$ ตามลำดับ (รูปที่ 1) ส่วนกระดาษตัวอย่างที่มียางธรรมชาติผสมอยู่ (NR 10-NR 50) มีการดูดซึมน้ำลดลงอย่างมีนัยสำคัญ โดยกระดาษที่มียางธรรมชาติผสมอยู่ในปริมาณที่สูงขึ้นแสดงแนวโน้มการดูดซึมน้ำที่ลดลง และพบว่ากระดาษที่มียางธรรมชาติผสมอยู่ในสัดส่วน 50% (NR 50) สามารถลด

การดูดซึมน้ำของกระดาษได้สูงที่สุด โดยมีค่า % water absorption ลดลงประมาณ 5% และมีค่า water absorption ลดลงประมาณ 100 g/m$^2$ อย่างไรก็ตามอัตราการดูดซึมน้ำระหว่างกระดาษที่ผสมยางธรรมชาติและไม่ผสมยางธรรมชาติ (ซึ่งแสดงโดยความชันของกราฟ) แสดงแนวโน้มที่ใกล้เคียงกันเมื่อผ่านการแช่ในน้ำเป็นระยะเวลานานทั้งสิ้น 10 นาที ดังแสดงผลการทดลองในรูปที่ 1



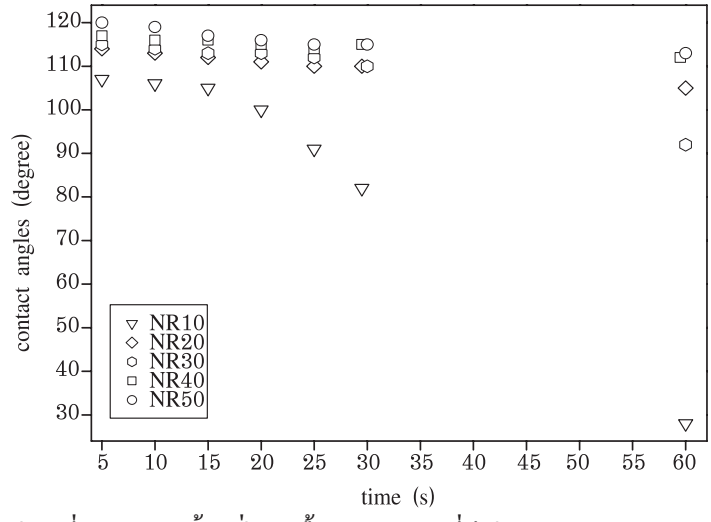

**รูปที่ 1** ผลการทดสอบการดูดซึมน้ำของกระดาษที่มีสัดส่วนยางธรรมชาติ (NR) แตกต่างกัน เส้นประในรูปแสดงแนวโน้มของข้อมูล

### 2.2 การเปียกน้ำของผิวกระดาษผสมยางธรรมชาติ

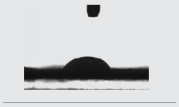
การเปียกน้ำของพื้นผิว เป็นอีกคุณสมบัติหนึ่งที่ใช้บ่งชี้ความสามารถในการต้านทานน้ำของวัสดุ พื้นผิวของวัสดุที่เปียกน้ำได้ยากจะแสดงค่ามุมสัมผัสของหยดน้ำบนผิวที่มีค่าสูงกว่าค่ามุมสัมผัสของหยดน้ำบนพื้นผิวที่เปียกน้ำได้ง่ายกว่า วัสดุที่พื้นผิวมีความเป็นขั้วต่ำจะเปียกน้ำได้ยาก เนื่องจากมีความสามารถในการเข้ากับน้ำได้น้อย (hydrophilicity ต่ำ) ส่วนวัสดุที่พื้นผิวมีความเป็นขั้วสูงจะแสดงคุณสมบัติตรงกันข้าม [10, 11]

ผลการทดลองที่แสดงในรูปที่ 2 ได้จากการวัดค่ามุมสัมผัสของหยดน้ำกลั่นบนพื้นผิวของแผ่นกระดาษที่มียางธรรมชาติผสมอยู่ในสัดส่วนที่แตกต่างกัน โดยได้เริ่มสังเกตการเปลี่ยนแปลงของค่ามุมสัมผัสตั้งแต่ที่ระยะเวลา 5 วินาที ที่หยดน้ำสัมผัสกับผิวกระดาษไปเรื่อยๆ จนครบ 60 วินาที พบว่าเมื่อหยดน้ำลงบนพื้นผิวกระดาษที่ไม่ผสมยางธรรมชาติ (NR 0) หยดน้ำได้ซึมผ่านผิวกระดาษลงไปอย่างรวดเร็วจนไม่สามารถวัดค่ามุมสัมผัสได้ (จึงไม่มีข้อมูลของตัวอย่างนี้แสดงในรูป) ส่วนกระดาษที่มียางธรรมชาติผสมอยู่แสดงแนวโน้มการลดลงของการเปียกผิว (ค่ามุมสัมผัสของน้ำกลั่นเพิ่มสูงขึ้น) ตามปริมาณของยางธรรมชาติในเนื้อกระดาษ โดยกระดาษที่มียางธรรมชาติผสมอยู่ในสัดส่วนที่เพิ่มขึ้นจาก 10 เป็น 50% แสดงค่ามุมสัมผัส ณ เวลา 5 วินาทีเพิ่มขึ้นมากกว่า 10 องศา นอกจากนั้นเมื่อระยะเวลาที่หยดน้ำ

สัมผัสกับผิวกระดาษผ่านไปนานขึ้น กระดาษที่มีสัดส่วนของยางธรรมชาติผสมอยู่มากกว่ามีแนวโน้มการลดลงของค่ามุมสัมผัสที่ช้ากว่าด้วย นั้นคือน้ำซึมผ่านพื้นผิวของกระดาษได้น้อยลง โดยเฉพาะในตัวอย่างที่มียางธรรมชาติ 30, 40 และ 50% นั้น น้ำสามารถซึมผ่านพื้นผิวกระดาษได้เพียงเล็กน้อยแม้ระยะเวลาที่หยดน้ำสัมผัสกับผิวกระดาษจะผ่านไปถึง 1 นาที เพื่อให้เห็นแนวโน้มที่กล่าวถึงนี้ชัดเจนยิ่งขึ้น ได้แสดงภาพเปรียบเทียบลักษณะการเปลี่ยนแปลงของหยดน้ำกลั่นบนผิวกระดาษที่มีสัดส่วนยางธรรมชาติต่างๆ กันไว้ในรูปที่ 3 ด้วย



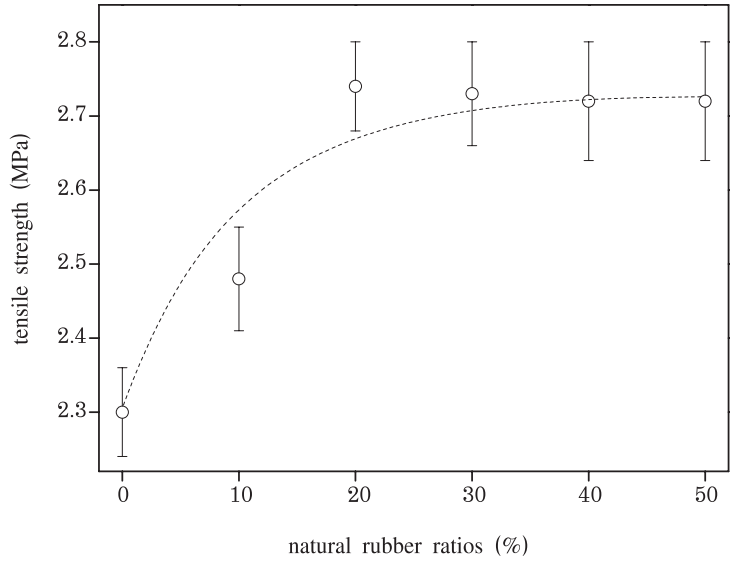

**รูปที่ 2** ค่ามุมสัมผัสเฉลี่ยของหยดน้ำกลั่นบนพื้นผิวกระดาษที่มีสัดส่วนยางธรรมชาติ (NR) แตกต่างกัน ณ ระยะเวลาที่ 5-60 วินาที โดยความสูงของสัญลักษณ์แต่ละจุดมีค่าใกล้เคียงกับค่าความแปรปรวนของข้อมูล

| อัตราส่วน กระดาษ: ยาง | 5 วินาที | 30 วินาที | 60 วินาที |
|---|---|---|---|
| 90: 10 | |  | |
| 70: 30 | | | |
| 50: 50 | | | |

**รูปที่ 3** ลักษณะของหยดน้ำกลั่นบนพื้นผิวของกระดาษบางตัวอย่าง (สัดส่วนของกระดาษต่อยางธรรมชาติเท่ากับ 90: 10, 70: 30 และ 50: 50%) ที่ระยะเวลา 5, 30 และ 60 วินาที

**3. การทดสอบความแข็งแรงของกระดาษตัวอย่างผสมยางธรรมชาติ**

การทดลองนี้ทำเพื่อตรวจสอบค่าความต้านทานต่อแรงดึง (tensile strength) ของกระดาษที่มียางธรรมชาติผสมอยู่ในสัดส่วนที่แตกต่างกัน พบว่ากระดาษที่ไม่ผสมยางธรรมชาติมีค่าความต้านทานต่อแรงดึงที่ต่ำ คือประมาณ 2.3 MPa (รูปที่ 4) และความต้านทานต่อแรงดึงมีค่าเพิ่มสูงมากขึ้นตามปริมาณยางธรรมชาติในกระดาษ คาดว่าเนื่องจากตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองเป็นกระดาษที่เตรียมจากเยื่อกระดาษรีไซเคิลที่เส้นใยเซลลูโลสถูกตัดจนสั้น ดังนั้นแรงอันตรกิริยาระหว่างเส้นใยอันเนื่องมาจากการพันเกี่ยวกันของเส้นใย (entanglement) และพันธะไฮโดรเจนจึงมีน้อย จากนั้นเมื่อผสมยางธรรมชาติซึ่งเป็นโมเลกุลที่มีลักษณะเป็นสายโซ่ยาวลงไป ส่งผลให้เกิดการพันเกี่ยวกันระหว่างสายโซ่ (chain entanglement) ของยางธรรมชาติกับเส้นใยเซลลูโลส [12] ส่งผลให้กระดาษมีค่าความต้านทานต่อแรงดึงสูงขึ้นตามปริมาณยางธรรมชาติ และได้พบว่าค่าความต้านทานต่อแรงดึงมีแนวโน้มเข้าสู่สมดุลเมื่อมียางธรรมชาติในกระดาษในสัดส่วนตั้งแต่ 20% ขึ้นไป เนื่องจากการมียางธรรมชาติในปริมาณดังกล่าวขึ้นไปในกระดาษ ส่งผลให้การพันเกี่ยวระหว่างสายโซ่ที่เกิดขึ้นเป็นการพันเกี่ยวของสายโซ่ยางธรรมชาติกันเอง ดังนั้นผลการทดลองนี้บ่งชี้ว่ายางธรรมชาติสามารถช่วยเพิ่มความทนทานต่อแรงดึงให้แก่กระดาษได้ด้วยการเกิดการพันเกี่ยวกันระหว่างสายโซ่ยางกับเส้นใยเซลลูโลส และระหว่างสายโซ่ยางกันเอง ซึ่งส่งผลให้กระดาษที่ผสมยางธรรมชาติมีค่าความต้านทานต่อแรงดึงที่สมดุลสูงกว่ากระดาษที่ไม่ผสมยางธรรมชาติประมาณ 20% ดังผลการทดลองในรูปที่ 4




**รูปที่ 4** ค่าความต้านทานต่อแรงดึงของกระดาษตัวอย่างที่มีสัดส่วนยางธรรมชาติแตกต่างกัน โดยเส้นประแสดงแนวโน้มของการเปลี่ยนแปลงข้อมูล

## สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง

ผลงานวิจัยนี้บ่งชี้ว่า แม้กระดาษที่เตรียมขึ้นจะมีสัดส่วนระหว่างกระดาษและยางธรรมชาติที่แตกต่างกันตั้งแต่ 100: 0 ถึง 50: 50% แต่ปัจจัยดังกล่าวมิได้ส่งผลให้แผ่นกระดาษที่เตรียมได้มีคุณสมบัติพื้นฐาน ได้แก่ ค่าน้ำหนักมาตรฐาน ความหนา และค่าความหนาแน่นเสมือน แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ คาดว่าเนื่องจากการใช้น้ำยางข้นผสมกับเยื่อกระดาษที่บวมอิ่มน้ำนั้น อนุภาคเล็กๆ ระดับไมครอนของยางธรรมชาติที่แขวนลอยในน้ำยางสามารถผสมเข้ากับเส้นใยเซลลูโลสของเยื่อกระดาษได้อย่างสม่ำเสมอ และเมื่อนำกระดาษผสมยางธรรมชาติในสัดส่วนที่ต่างกันดังกล่าวไปทดสอบคุณสมบัติต่างๆ พบว่าความสามารถในการต้านการดูดซึมน้ำของกระดาษมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณยางธรรมชาติ กล่าวคือ % water absorption ของกระดาษผสมยางธรรมชาติมีค่าลดลงสูงสุดประมาณ 5% และ water absorption มีค่าลดลงสูงสุดประมาณ 100 $g/m^2$ เมื่อกระดาษมียางธรรมชาติผสมอยู่ 50% นอกจากนั้นพื้นผิวของกระดาษผสมยางธรรมชาติยังเปียกน้ำได้ยากขึ้นด้วย โดยพื้นผิวของกระดาษที่มียางธรรมชาติผสมอยู่ในสัดส่วนตั้งแต่ 30% ขึ้นไปมีการเปียกน้ำเพียงเล็กน้อยเท่านั้นเมื่อสัมผัสกับหยดน้ำกลั่น แม้กระทั่งเมื่อระยะเวลาที่หยดน้ำสัมผัสกับผิวของกระดาษผ่านไปนานถึง 1 นาที พื้นผิวของกระดาษผสมยางดังกล่าวก็เกือบจะไม่มีการเปียกน้ำเพิ่มขึ้น ซึ่งเนื่องมาจากสายโซ่ที่มีความเป็นขั้วต่ำของยางธรรมชาติที่ผสมอยู่กับเส้นใยเซลลูโลส อนึ่งผลการทดสอบความต้านทานต่อแรงดึงบ่งชี้ว่า นอกจากกระดาษผสมยางธรรมชาติที่ได้จากงานวิจัยนี้จะมีการต้านการดูดซึมน้ำที่ดีขึ้นแล้ว ยังมีความสามารถในการรับแรงดึงจนขาดที่สูงขึ้นด้วย โดยกระดาษที่ผสมยางธรรมชาติในปริมาณ 20-50% ให้ค่าความต้านทานต่อแรงดึงสูงที่สุด ซึ่งมีค่าสูงกว่าค่าของกระดาษที่ไม่ผสมยางประมาณ 20% ดังนั้นข้อมูลทั้งหมดนี้จึงแสดงให้เห็นโอกาสที่จะพัฒนากระดาษผสมยางธรรมชาติสำหรับใช้เป็นบรรจุภัณฑ์ต่อไป

## กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณมหาวิทยาลัยวลัยลักษณ์ที่กรุณาให้การสนับสนุนเงินทุนแก่โครงงานวิจัยของนักศึกษาชั้นปีที่ 4 ครุภัณฑ์วิจัย ตลอดจนสถานที่สำหรับทำการวิจัยครั้งนี้

## เอกสารอ้างอิง

1. Smith, W. 1993. Foundation of Materials Science and Engineering. 2th Edition. Singapore. McGraw-Hill Companies. Inc. p. 625.
2. สมเจตน์ อิงคธีรวัฒน์. 2549. TQA Winner 2003: บริษัท ผลิตภัณฑ์กระดาษไทย จำกัด. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพ. สำนักเลขานุการคณะกรรมการรางวัลคุณภาพแห่งชาติ. หน้า 38.
3. Edwards, R. 1999. Coating Layer Formation in Dry Surface Treatment of Paper Substrates. In: Bezigian, T., Editor. Extrusion Coating Manual. 4th Edition. Atlanta. Tappi Press. p. 173-179.
4. Villberg, K., and Veijanen, A. K. 1998. Volatile Organic Compounds in LDPE Films and Air During Extrusion Coating. *Tappi Journal* 81(8): 165-171.

5. Pawde, S. M., and Deshmukh Kalim, A. R. 2006. Studies on Surface Properties of Polymeric Coated Paper Material. *Journal of Apply Polymer* Science 101(6): 4167-4171.
6. Dooley, J, and Hughes, K. 1996. Thickness Variation in Coextruded Layers-Effect of Polymer Viscoelasticity on Layer Uniformity. *Tappi Journal* 79(4): 235-243.
7. ศูนย์บรรจุภัณฑ์ กรมส่งเสริมสหกรณ์. 2556. บรรจุภัณฑ์กระดาษ. ได้จาก http://it4.cpd.go.th/products. 22 กุมภาพันธ์ 2556.
8. ผู้จัดการออนไลน์. 2550. กันน้ำให้กระดาษสาด้วยเทฟลอนนาโน. ได้จาก http://www.manager.com/science/ viewnews. 22 กุมภาพันธ์ 2556.
9. บุญธรรม นิธิอุทัย พรพรรณ นิธิอุทัย และ ปรีชา ป้องภัย. 2533. เทคโนโลยีน้ำยางข้น. ปัตตานี. ภาควิชาเทคโนโลยียางและพอลิเมอร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์. หน้า 1.
10. Khongtong, S., and Ferguson, G. S. 2001. The Integration of Bulk and Interfacial Properties in a Polymeric System: Rubber Elasticity at the Polybutadiene/Water Interface. *Journal of the American Chemical Society* 123(15): 3588-3594.
11. Khongtong, S. 2006. A Smart Surface from Natural Rubber: the Mechanism of Entropic Control at the Surface Monitored by Contact Angle Measurement. *Songklanakarin Journal of Science and Technology* 28(2): 351-359.
12. Gent, A. N. 1978. Strength of Elastomer. In: Eirich, F. R., Editor. Science and Technology of Rubber. New York. Academic Press. p. 472-509.

*ได้รับบทความวันที่ 4 มีนาคม 2556*
*ยอมรับตีพิมพ์วันที่ 20 พฤษภาคม 2556*