

อิทธิพลของการตีกระจายเยื่อต่อสมบัติของกระดาษเคลือบพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต

ธนพันธ์ แสนนนท์^{1*}, กุณิณี สุวรรณกิจ^{1,2} และ สมพร ชัยอารีย์กิจ^{1,2}

¹หลักสูตรเทคโนโลยีเยื่อ กระดาษ และบรรจุภัณฑ์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

²ภาควิชาเทคโนโลยีทางภาพและการพิมพ์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

*Thnapan.s29@gmail.com

บทคัดย่อ

ปัจจุบันวัสดุบรรจุภัณฑ์ที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมได้รับความสนใจเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง โดยเฉพาะการนำพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต (Polybutylene Succinate: PBS) ซึ่งเป็นพลาสติกชีวภาพมาใช้เป็นสารเคลือบกระดาษสำหรับบรรจุภัณฑ์ เพื่อเพิ่มสมบัติการต้านทานน้ำ กระดาษเคลือบ PBS โดยทั่วไปสามารถย่อยสลายได้ด้วยการฝังกลบ แต่ในบริบทของการจัดการกระดาษเสียจากกระบวนการแปรรูป บรรจุภัณฑ์เหลือใช้ ตลอดจนบรรจุภัณฑ์หลังการใช้งานด้วยกระบวนการรีไซเคิลนั้นยังมีความท้าทายอย่างมาก เนื่องจากชั้น PBS ยึดติดกับเส้นใย ทำให้การแยกออกจากกันทำได้ยาก งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาสมบัติของเส้นใยและกระดาษที่ได้จากการรีไซเคิลกระดาษเคลือบ PBS เปรียบเทียบกับกระดาษที่ไม่ได้เคลือบ โดยทำการตีกระจายเยื่อเพื่อแยกชั้น PBS ออกจากเส้นใย ซึ่งในงานวิจัยนี้มีการใช้เวลาในการตีกระจายเยื่อแตกต่างกัน ผลการทดลองพบว่ากระดาษเคลือบ PBS สามารถแยกชั้น PBS ออกจากเส้นใยได้ด้วยกระบวนการตีกระจายเยื่อ หากแต่มี PBS บางส่วนที่ยังคงติดค้างอยู่กับเยื่อ และเมื่อนำเยื่อที่เตรียมได้ไปทำการขึ้นเป็นแผ่นกระดาษพบว่า กระดาษที่เตรียมจากการรีไซเคิลกระดาษที่เคลือบ PBS มีค่าความแข็งแรงต่อแรงดึง ความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุ และความต้านทานแรงฉีกสูงกว่ากระดาษที่เตรียมจากการรีไซเคิลกระดาษที่ไม่ได้เคลือบ PBS ทั้งนี้อาจเนื่องมาจาก PBS ที่ตกค้างในเยื่อหลอมตัวและทำหน้าที่เสมือนสารยึดประสานระหว่างเส้นใยในขั้นตอนการอบแห้ง นอกจากนี้ยังพบว่าเมื่อเพิ่มเวลาในการตีกระจายเยื่อ ค่าความแข็งแรงของกระดาษมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น งานวิจัยนี้แสดงให้เห็นว่าการรีไซเคิลกระดาษเคลือบ PBS สามารถทำได้ด้วยการตีกระจายเยื่อภายใต้ภาวะที่เหมาะสม

คำสำคัญ: พลาสติกชีวภาพ พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต การรีไซเคิลกระดาษเคลือบ การตีกระจายเยื่อ สมบัติกระดาษ

The influence of repulping on the properties of polybutylene succinate-coated paper.

Thanaphan Saennon^{1*}, Kuntinee Suvarnakich^{1,2}, and Somporn Chairrekij^{1,2}

¹Pulp, Paper and Packaging Technology Program, Faculty of Science, Chulalongkorn University

²Department of Imaging and Printing Technology, Faculty of Science, Chulalongkorn University

*Thnaphan.s29@gmail.com

Abstract

Environmentally friendly packaging is currently gaining more attention. Polybutylene succinate (PBS) is one of the bioplastics typically used as a coating color for paper packaging with an aim to increase water resistance. PBS-coated paper can usually be degraded by landfilling. However, management of paper waste from converting processes, overproduced packaging, and post-consumer packaging waste by using the recycling process is still challenging. Due to adhesion between PBS layer and fibers, separation of PBS layer from paper is quite difficult. This research aimed to study the properties of fibers and papers recycled from PBS-coated paper and compared the results with those from the uncoated one. Both papers were repulped using varying repulping times. It was found that PBS layer can be separated from fibers just by repulping; however, some PBS remained attached to the pulp. The recycled pulp was then formed into handsheets for paper testing. The results indicated that the handsheets prepared from recycled PBS-coated paper provided better tensile strength, burst strength and tear resistance as compared to handsheets made from recycled uncoated paper. This might be because the small fragments of PBS which remained attached to the pulp after the repulping process may melt and act as an adhesive during the drying process of handsheet making. It was also discovered that longer repulping time was beneficial since paper strength tended to increase. Thus, this research showed that recycling of PBS-coated paper can be done just by repulping under optimal conditions.

Keywords: Bioplastic, Polybutylene succinate, Coated paper recycling, Repulping, paper properties.

1. บทนำ

ปัจจุบันอุตสาหกรรมบรรจุภัณฑ์ถือเป็นหนึ่งในภาคส่วนที่มีความสำคัญอย่างยิ่งในระดับโลก โดยมีแนวโน้มมูลค่าการขยายตัวของตลาดสูงขึ้นจาก 1.14 ล้านล้านดอลลาร์สหรัฐ ในปี ค.ศ. 2024 เป็น 1.38 ล้านล้านดอลลาร์สหรัฐ ในปี ค.ศ. 2029 และมีอัตราการขยายตัวเพิ่มขึ้นเฉลี่ยต่อปีอยู่ที่ร้อยละ 3.89 [1] ซึ่งขยะพลาสติกทั่วโลกในปี ค.ศ. 2023 มีปริมาณ 389.33 ล้านตัน ขยะพลาสติกเหล่านี้ถูกนำไปฝังกลบร้อยละ 49.22 ถูกจัดการอย่างไม่เหมาะสมร้อยละ 21.63 ถูกนำไปเผาร้อยละ 18.85 และถูกนำไปรีไซเคิลเพียงร้อยละ 10.30 [2] พลาสติกเหล่านี้คงอยู่ได้นานกว่า 400 ปี เนื่องจากไม่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ ทำให้เกิดผลกระทบเชิงลบอย่างมากต่อสิ่งแวดล้อม ซึ่งเป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตและสุขภาพของมนุษย์ [3]

ด้วยเหตุนี้กระดาษจึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่งสำหรับบรรจุภัณฑ์แบบใช้ครั้งเดียว เนื่องจากมีต้นทุนต่ำ สามารถนำกลับมารีไซเคิลได้ สอดคล้องกับแนวคิดเศรษฐกิจหมุนเวียน และสามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ อย่างไรก็ตาม การเปลี่ยนมาใช้กระดาษยังคงมีข้อจำกัดหลายประการ โดยเฉพาะอย่างยิ่งกระดาษที่ไม่มีการเคลือบผิวซึ่งมีสมบัติในการดูดซึมน้ำสูง ทำให้ไม่เหมาะต่อการใช้งานทดแทนบรรจุภัณฑ์พลาสติก [4] กระดาษประกอบด้วยเส้นใยเซลลูโลสเป็นหลัก โครงสร้างพื้นฐานเซลลูโลสเป็นพอลิแซ็กคาไรด์สายตรงที่ประกอบด้วยหน่วยกลูโคสซ้ำ ๆ กัน ซึ่งเชื่อมต่อกันด้วยพันธะไกลโคซิดิกที่ตำแหน่ง C1-4 ทำให้เกิดโครงสร้างสายโซ่ตรงยาวที่มีความเป็นระเบียบสูง สายโซ่พอลิเมอร์เซลลูโลสหลายสายจะเชื่อมต่อกันด้วยพันธะไฮโดรเจนและมีหมู่ไฮดรอกซิลเป็นจำนวนมาก ส่งผลให้กระดาษมีสมบัติชอบน้ำและไวต่อความชื้น [5] เพื่อแก้ไขปัญหาดังกล่าวจึงมีการนำพลาสติกฐานปิโตรเลียม เช่น พอลิเอทิลีน (Polyethylene: PE) มาเคลือบผิวกระดาษเพื่อเพิ่มความสามารถในการป้องกันน้ำและน้ำมัน อย่างไรก็ตาม กระดาษที่เคลือบ PE ยังมีปัญหาการรีไซเคิลและการย่อยสลายทางชีวภาพ ด้วยเหตุนี้จึงได้นำพลาสติกฐานชีวภาพ เช่น พอลิบิวทีลีนซัคซิเนต (Polybutelene succinate: PBS) มาเคลือบผิวกระดาษ ซึ่ง PBS มีสมบัติในการต้านทานน้ำและน้ำมันค่อนข้างสูง ความยืดหยุ่นและความเหนียวสูง ความแข็งแรงต่อแรงกระแทกที่ดี สามารถย่อยสลายทางชีวภาพ และอัตราการตกผลึกที่รวดเร็ว ซึ่งเอื้อต่อกระบวนการขึ้นรูปในระดับอุตสาหกรรมให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น [6] PBS จึงได้รับความสนใจมากกว่าพลาสติกฐานชีวภาพชนิดอื่น โดยสะท้อนจากมูลค่าตลาด PBS ทั่วโลกมีมูลค่า 399.4 ล้านดอลลาร์สหรัฐในปี ค.ศ. 2023 และคาดว่าจะเพิ่มขึ้นเป็น 2.0 พันล้านดอลลาร์สหรัฐภายในปี ค.ศ. 2032 โดยมีอัตราการเติบโตเฉลี่ยต่อปีอยู่ที่ร้อยละ 20.2 [7] ซึ่งส่วนหนึ่งในการนำ PBS มาใช้งานคือ การนำมาเคลือบกระดาษเพื่อการบรรจุ เช่น ถ้วยกระดาษ หลอดกระดาษ อย่างไรก็ตาม กระดาษเคลือบ PBS โดยทั่วไปสามารถย่อยสลายได้ด้วยการฝังกลบ แต่ในบริบทของการจัดการกระดาษเสียจากกระบวนการแปรรูป บรรจุภัณฑ์ที่เหลือใช้ ตลอดจนบรรจุภัณฑ์หลังการใช้งานด้วยกระบวนการรีไซเคิลนั้นยังมีความท้าทายอย่างมาก เนื่องจากชั้น PBS ยึดติดกับเส้นใย ทำให้การแยกออกจากกันทำได้ยาก จิราวรรณและนภัสวรรณ [8] ได้ทำการศึกษาความเป็นไปได้ในการนำถ้วย Chula zero waste ที่เคลือบด้วย PBS มาผ่านกระบวนการรีไซเคิลเปรียบเทียบกับกระดาษรีไซเคิลถ้วยกระดาษทั่วไปที่เคลือบด้วย PE พบว่ากระดาษที่เคลือบด้วย PBS เมื่อถูกรีไซเคิลแล้วให้เส้นใยที่มีความสมบูรณ์กว่า PE ถึงแม้สมบัติเชิงกลของกระดาษรีไซเคิลที่ได้จะไม่ดีเท่า ซึ่งพฤติกรรมของ PBS ในกระดาษรีไซเคิลยังมีการศึกษาไม่มากนัก ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาสมบัติของเส้นใยและกระดาษที่ได้จากการรีไซเคิลกระดาษเคลือบ PBS เปรียบเทียบกับกระดาษที่ไม่ได้เคลือบโดยเน้นผลของการกระจายเยื่อเป็นหลัก ซึ่งเป็นขั้นตอนที่สำคัญของการรีไซเคิลกระดาษ

2. วิธีวิจัย

2.1 การเตรียมตัวอย่างกระดาษ

นำกระดาษคัพสต็อก (Cup stock paper) น้ำหนักมาตรฐาน 230 กรัมต่อตารางเมตร ที่ไม่ผ่านการเคลือบและผ่านการเคลือบ PBS โดยมีน้ำหนักสารเคลือบ 25 กรัมต่อตารางเมตร ซึ่งคิดเป็นประมาณร้อยละ 10 ของน้ำหนักมาตรฐานกระดาษ มาตัดให้มีขนาด กว้าง 0.5 เซนติเมตร ยาว 1.6 เซนติเมตร ด้วยเครื่องทำสายเอกซาร์ จากนั้นนำกระดาษที่ผ่านการตัดไปแช่ในน้ำเป็นเวลา 24 ชั่วโมง

2.2 การตีกระจายเยื่อ และการแยก PBS ออกจากเยื่อ

นำกระดาษที่แช่น้ำไว้ไปตีกระจายในเครื่องตีกระจายเยื่อ (High consistency laboratory pulper-Formax) ที่ความเข้มข้นร้อยละ 6 ด้วยความเร็ว 500 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส โดยใช้เวลาตีกระจายเยื่อที่ต่างกันคือ 1 2 และ 3 ชั่วโมง จากนั้นทำการแยก PBS ออกจากเยื่อ โดยนำเยื่อที่ได้จากการตีกระจายในภาวะที่แตกต่างกันมาร่อนด้วยตะแกรงขนาด 30 เมช เพื่อแยกวัตถุที่ไม่สามารถลอดผ่านตะแกรงขนาดใหญ่ (Reject) ซึ่งอาจประกอบด้วยเยื่อที่จับตัวกันเป็นก้อน หรือชิ้นพลาสติกที่ไม่สามารถลอดผ่านตะแกรงดังกล่าวได้ ตามด้วยตะแกรงขนาด 200 เมช โดยเยื่อที่ค้างบนตะแกรง

(Accept) ส่วนนี้ คือ เยื่อส่วนที่จะนำไปวิเคราะห์สมบัติต่าง ๆ ในขั้นตอนต่อไป จากนั้นคำนวณหาผลผลิต (Yield) ที่ได้จากการบดการตีกระจายเยื่อ

2.3 การศึกษาลักษณะเฉพาะของเยื่อจากการรีไซเคิลที่ภาวะต่าง ๆ

นำเยื่อที่เตรียมได้จากภาวะต่าง ๆ มาศึกษาลักษณะเฉพาะของเยื่อ โดยวิเคราะห์ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของเส้นใยตามมาตรฐาน ISO 16065-2 ด้วยเครื่องวิเคราะห์เส้นใย (Fiber image analyzer) (Valmet, Valmet FS5) ลักษณะของเส้นใยและการบดเป็นก้อน PBS โดยการย้อมสีเส้นใยด้วยคองโกเรด (Congo red) และใช้กล้องจุลทรรศน์เชิงแสง (Optical microscope) (Evident corporation, OM-BX53M) และวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันทางเคมีด้วยเครื่อง ATR-FTIR สเปกโตรมิเตอร์ (Attenuated total reflection fourier transform infrared spectrometer) (Bruker, Alpha-P diamond-ATR) โดยตั้งค่าการสแกน 32 ครั้ง ที่ความละเอียดเท่ากับ 4 cm^{-1} และความยาวคลื่น $4000\text{ ถึง }600\text{ cm}^{-1}$

2.4 การศึกษาสมบัติของกระดาษที่มาจากเยื่อรีไซเคิลที่ภาวะต่าง ๆ

นำเยื่อที่เตรียมได้จากข้อ 2.2 ไปขึ้นแผ่นกระดาษตามมาตรฐาน ISO 5269-2 ด้วยเครื่องขึ้นแผ่นแบบ Rapid Köthen (Rapid Köthen sheet former) (FRANK-PTI) ที่น้ำหนักมาตรฐาน 80 กรัมต่อตารางเมตร นำแผ่นกระดาษที่ได้มาปรับสภาพที่อุณหภูมิ 27 ± 1 องศาเซลเซียส และความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 65 ± 2 เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ตามมาตรฐาน ISO 187 ก่อนนำมาหาน้ำหนักมาตรฐานและความหนาเพื่อคำนวณความหนาแน่น (Density) และทดสอบสมบัติ ได้แก่ ความเรียบ (Smoothness) ตามมาตรฐาน TAPPI T479 (Toyoseiki, DIGI-Bekk) ความต้านทานอากาศ (Air resistance) ตามมาตรฐาน TAPPI T460 (Gurley, Model 4190) ความแข็งแรงต่อแรงดึง (Tensile strength) ตามมาตรฐาน TAPPI T494 (Toyoseiki, Stograph E-S) ความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุ (Bursting strength) ตามมาตรฐาน TAPPI T403 (PNSHAR, PN-BSM160) และ ความต้านทานแรงฉีก (Tear resistance) ตามมาตรฐาน TAPPI T414 (Thwing-Albert, Protear) จากนั้นวิเคราะห์ผลการทดลองเพื่อหาเวลาในการตีกระจายเยื่อที่เหมาะสม และอิทธิพลของการตีกระจายเยื่อที่มีต่อสมบัติของเยื่อและกระดาษที่เตรียมได้ ภาพที่ 1 แสดงขั้นตอนการเตรียมเยื่อและการขึ้นแผ่นจากเยื่อที่เตรียมได้



ภาพที่ 1 ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างและขึ้นแผ่นจากเยื่อที่เตรียมได้

3. ผลการวิจัยและอภิปรายผล

3.1 ผลของการตีกระจายเยื่อต่อสัดส่วนของเยื่อที่เตรียมได้

จากการนำเยื่อที่ผ่านการตีกระจายในภาวะที่แตกต่างกันมาร่อนด้วยตะแกรงขนาด 30 เมช และ 200 เมช มาคำนวณหาเยื่อส่วนที่ค้างบนตะแกรง (Reject) เยื่อที่ผ่านตะแกรง (Accept) และปริมาณการสูญเสียระหว่างกระบวนการ (Loss) โดยเยื่อที่ผ่านตะแกรงคือปริมาณผลผลิตที่ได้ (Yield) ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 สัดส่วนของเยื่อที่เตรียมได้จากการตีกระจายเยื่อด้วยภาวะต่าง ๆ

ภาวะที่ใช้ในการทดลอง	Reject (%)	Accept (%)	Loss (%)
กระดาษไม่เคลือบ กระดาษเยื่อ 1 ชั่วโมง	-	97.97	2.03
กระดาษไม่เคลือบ กระดาษเยื่อ 2 ชั่วโมง	-	97.46	2.54
กระดาษไม่เคลือบ กระดาษเยื่อ 3 ชั่วโมง	-	94.27	5.73
กระดาษเคลือบ กระดาษเยื่อ 1 ชั่วโมง	10.74	87.26	2.00
กระดาษเคลือบ กระดาษเยื่อ 2 ชั่วโมง	10.59	87.32	2.09
กระดาษเคลือบ กระดาษเยื่อ 3 ชั่วโมง	10.15	87.53	2.32

จากตารางที่ 1 พบว่าการตีกระจายเยื่อส่งผลต่อร้อยละผลผลิตของเยื่อที่ได้ โดยกระดาษไม่เคลือบให้ร้อยละผลผลิตของเยื่อที่ผ่านตะแกรง (Accept) สูงกว่ากระดาษเคลือบในทุกภาวะการทดลอง ขณะที่กระดาษเคลือบพบว่าเมื่อเยื่อหรือ PBS ค้างบนตะแกรง (Reject) อยู่ประมาณร้อยละ 10 ทุกภาวะการทดลอง แสดงให้เห็นว่าชั้นเคลือบ PBS บางส่วนยังคงจับตัวหรือยึดติดกับเส้นใยหลังจากผ่านการตีกระจายเยื่อแล้ว ส่งผลให้ไม่สามารถผ่านตะแกรงได้และตกค้างอยู่บนตะแกรง ในส่วนของอิทธิพลของเวลาที่ใช้ในการตีกระจายเยื่อนั้นพบว่า ในกรณีของกระดาษเคลือบนั้น ระยะเวลาในการตีกระจายเยื่อส่งผลต่อปริมาณเส้นใย และ/หรือ PBS ที่ลอดผ่านตะแกรงและค้างบนตะแกรงเล็กน้อย ซึ่งอาจเกิดจากแรงเฉือนช่วยให้ชั้นเคลือบ PBS หลุดออกจากเส้นใยและแตกตัวเป็นชิ้นขนาดเล็กมากขึ้น จึงสามารถลอดผ่านตะแกรงได้บางส่วน ในขณะที่เวลาที่ใช้มีผลต่อกระดาษไม่เคลือบค่อนข้างมาก โดยเมื่อใช้เวลาเพิ่มขึ้นส่งผลให้ร้อยละผลผลิตที่ผ่านตะแกรง (Accept) มีแนวโน้มลดลง ปริมาณการสูญเสียระหว่างกระบวนการ (Loss) มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากเส้นใยได้รับแรงเฉือนและการเสียดสีระหว่างเส้นใยเป็นเวลานาน ส่งผลให้สารเติมเต็ม (Filler) ในกระดาษสูญเสียออกไปพร้อมกับน้ำในระหว่างกระบวนการคัดแยกเยื่อและล้างเยื่อ

3.2 ลักษณะเฉพาะของเยื่อที่เตรียมได้จากการตีกระจายเยื่อด้วยภาวะต่าง ๆ

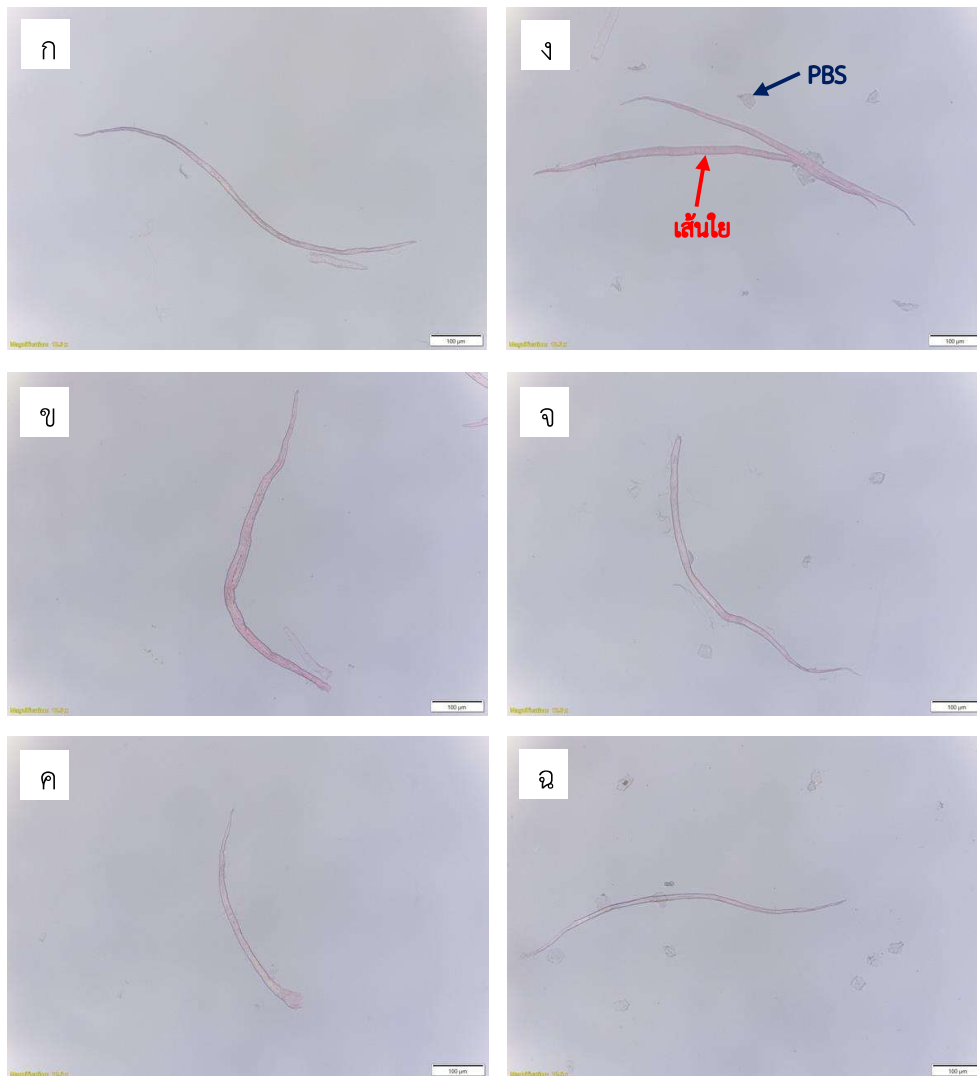
จากการนำเยื่อที่เตรียมได้ (ส่วน Accept) มาวิเคราะห์ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของเส้นใย ได้แก่ ความยาวของเส้นใย (Fiber length) ปริมาณเส้นใยขนาดเล็ก (Fines) และไฟบริลเลชัน (Fibrillation) ซึ่งคือ การแตกแขนงของเส้นใย ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ค่าลักษณะทางสัณฐานวิทยาของเส้นใยจากเยื่อกระดาษที่ผ่านการตีกระจาย

ภาวะที่ใช้ในการทดลอง	Fiber length (mm)	Fines (%)	Fibrillation (%)
กระดาษไม่เคลือบ กระดาษเยื่อ 1 ชั่วโมง	0.661 ± 0.008	57.605 ± 0.629	1.330 ± 0.014
กระดาษไม่เคลือบ กระดาษเยื่อ 2 ชั่วโมง	0.657 ± 0.003	57.750 ± 1.612	1.320 ± 0.014
กระดาษไม่เคลือบ กระดาษเยื่อ 3 ชั่วโมง	0.658 ± 0.004	57.135 ± 0.007	1.335 ± 0.035
กระดาษเคลือบ กระดาษเยื่อ 1 ชั่วโมง	0.662 ± 0.011	59.185 ± 1.775	1.355 ± 0.049
กระดาษเคลือบ กระดาษเยื่อ 2 ชั่วโมง	0.657 ± 0.005	59.315 ± 0.672	1.320 ± 0.028
กระดาษเคลือบ กระดาษเยื่อ 3 ชั่วโมง	0.658 ± 0.009	59.135 ± 1.039	1.370 ± 0.042

จากตารางที่ 2 พบว่าการเพิ่มระยะเวลาในการตีกระจายเยื่อจาก 1 เป็น 3 ชั่วโมง ไม่ส่งผลต่อค่าลักษณะทางสัณฐานวิทยาของเส้นใยอย่างชัดเจนทั้งในกระดาศไม่เคลือบและกระดาศเคลือบ PBS โดยค่าความยาวของเส้นใยมีค่าใกล้เคียงกันอยู่ในช่วง 0.657–0.662 มิลลิเมตร ขณะที่ปริมาณเส้นใยขนาดเล็กมีค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 57.135–59.315 และการแตกแขนงของเส้นใยมีค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 1.320–1.370 แสดงให้เห็นว่าระยะเวลาในการตีกระจายเยื่อที่ใช้ในการทดลองไม่ส่งผลต่อการแตกตัวหรือการเกิดเส้นใยขนาดเล็กของเส้นใยอย่างมีนัยสำคัญ จึงทำให้ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของเส้นใยในทุกภาวะมีค่าใกล้เคียงกัน

จากนั้นนำเยื่อที่เตรียมได้ (ส่วน Accept) มาวิเคราะห์ลักษณะของเส้นใยและการปนเปื้อน PBS โดยการย้อมสีเส้นใยด้วยคองโกเรด (Congo red) และใช้กล้องจุลทรรศน์เชิงแสง ได้ผลดังแสดงในภาพที่ 2 (ก-ฉ) คือ กระดาศไม่เคลือบ กระจ่ายเยื่อ 1 ชั่วโมง (ก) กระดาศไม่เคลือบ กระจ่ายเยื่อ 2 ชั่วโมง (ข) กระดาศไม่เคลือบ กระจ่ายเยื่อ 3 ชั่วโมง (ค) กระดาศเคลือบ กระจ่ายเยื่อ 1 ชั่วโมง (ง) กระดาศเคลือบ กระจ่ายเยื่อ 2 ชั่วโมง (จ) และ กระดาศเคลือบ กระจ่ายเยื่อ 3 ชั่วโมง (ฉ)

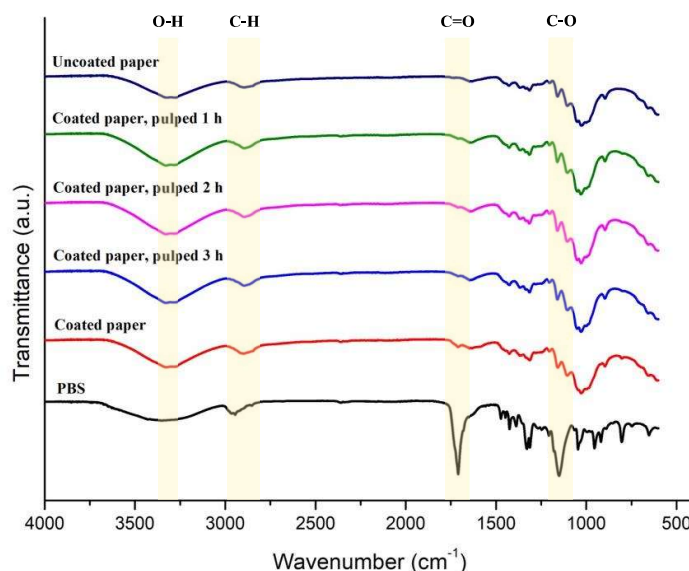


ภาพที่ 2 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์เชิงแสงของเยื่อที่ผ่านการย้อมสีคองโกเรด กระดาศไม่เคลือบกระจ่ายเยื่อ 1 ชั่วโมง (ก) กระดาศไม่เคลือบ กระจ่ายเยื่อ 2 ชั่วโมง (ข) กระดาศไม่เคลือบ กระจ่ายเยื่อ 3 ชั่วโมง (ค) กระดาศเคลือบ กระจ่ายเยื่อ 1 ชั่วโมง (ง) กระดาศเคลือบ กระจ่ายเยื่อ 2 ชั่วโมง (จ) และกระดาศเคลือบ กระจ่ายเยื่อ 3 ชั่วโมง (ฉ)

จากภาพที่ 2 เมื่อย้อมสีเยื่อด้วยคองโกเรดเพื่อใช้แยกความแตกต่างระหว่างเส้นใยกับพลาสติก PBS โดยส่วนที่เป็นเส้นใยจะย้อมติดสีคองโกเรด ในขณะที่ส่วนที่เป็น PBS จะย้อมไม่ติดสี พบว่าเยื่อที่เตรียมได้จากกระดาษไม่เคลือบที่ผ่านการตีกระจายเยื่อเป็นเวลา 12 และ 3 ชั่วโมง ดังแสดงในภาพ (ก)–(ค) พบลักษณะของเส้นใยติดสีคองโกเรดอย่างสม่ำเสมอ และไม่พบสิ่งปนเปื้อนจาก PBS ในขณะที่เยื่อที่เตรียมได้จากกระดาษเคลือบ PBS ที่ผ่านการตีกระจายเยื่อเป็นเวลา 12 และ 3 ชั่วโมง ดังแสดงในภาพ (ง)–(ฉ) พบอนุภาค PBS ที่ไม่ติดสีคองโกเรดตกค้างอยู่ร่วมกับเส้นใย เนื่องจาก PBS เป็นพอลิเมอร์ที่ไม่สามารถดูดซับสีย้อมคองโกเรดได้เหมือนเซลลูโลสของเส้นใย จึงปรากฏเป็นบริเวณที่ไม่ติดสีแตกต่างจากเส้นใยที่ติดสี ส่งผลให้สามารถแยกความแตกต่างระหว่างเส้นใยและ PBS ที่ตกค้างได้อย่างชัดเจน

เมื่อนำเยื่อส่วน Accept ที่เตรียมได้จากการนำกระดาษที่ผ่านการเคลือบ PBS มาตีกระจายเยื่อด้วยเวลาต่าง ๆ กันมาวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันทางเคมีด้วยเทคนิค ATR-FTIR เพื่อดูผลของการตีกระจายเยื่อต่อการตกค้างของ PBS ในเยื่อ โดยมีการศึกษาเปรียบเทียบกับกระดาษไม่เคลือบ กระดาษเคลือบ PBS และ PBS ที่ตกค้างในส่วนของ Reject ได้ผลดังแสดงในภาพที่

3



ภาพที่ 3 กราฟหมู่ฟังก์ชันทางเคมีของกระดาษไม่เคลือบ (Uncoated paper) กระดาษเคลือบ กระดาษเยื่อ 1 ชั่วโมง (Coated paper, pulped 1 h) กระดาษเคลือบ กระดาษเยื่อ 2 ชั่วโมง (Coated paper, pulped 2 h) กระดาษเคลือบ กระดาษเยื่อ 3 ชั่วโมง (Coated paper, pulped 3 h) กระดาษเคลือบ (Coated paper) และ พอลิไวนิลคลอไรด์ (PBS)

จากภาพที่ 3 กราฟหมู่ฟังก์ชันทางเคมีพบว่ากระดาษไม่เคลือบให้ลักษณะสเปกตรัมที่เป็นลักษณะเฉพาะของเซลลูโลสในเส้นใย โดยพบแถบการดูดกลืนบริเวณประมาณ 3345 cm^{-1} ซึ่งสัมพันธ์กับการยืดตัวของหมู่ไฮดรอกซิล (O-H) และบริเวณประมาณ 2908 cm^{-1} ซึ่งสัมพันธ์กับพันธะ C-H ในโครงสร้างของเซลลูโลส [9] สำหรับกระดาษเคลือบ และกระดาษเคลือบที่ผ่านการตีกระจายเยื่อ 1–3 ชั่วโมง พบลักษณะสเปกตรัมที่แตกต่างจากกระดาษไม่เคลือบ โดยการปรากฏของแถบการดูดกลืนที่สอดคล้องกับสเปกตรัมของ PBS คือ แถบการดูดกลืนบริเวณประมาณ $1712\text{--}1713\text{ cm}^{-1}$ ซึ่งสัมพันธ์กับหมู่คาร์บอนิล (C=O) และแถบในช่วงประมาณ $1100\text{--}1200\text{ cm}^{-1}$ ซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะของหมู่เอสเทอร์ (C-O) [10] แสดงให้เห็นว่ายังคงมี PBS ตกค้างอยู่ในเยื่อกระดาษส่วน Accept หลังการตีกระจายเยื่อ

3.3 สมบัติของกระดาษที่เตรียมได้จากการตีกระจายเยื่อด้วยภาวะต่าง ๆ

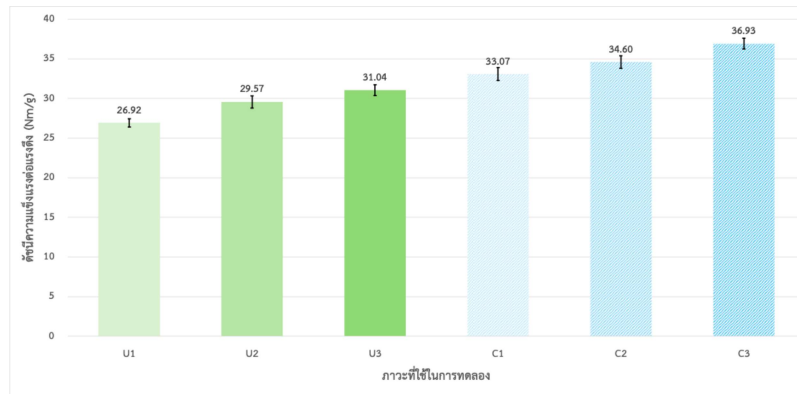
จากการนำแผ่นกระดาษที่เตรียมได้มาคำนวณความหนาแน่น (Density) และทดสอบสมบัติ ได้แก่ ความต้านทานอากาศ (Air resistance) ความเรียบ (Smoothness) ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ความหนาแน่น ความต้านทานอากาศ และความเรียบของแผ่นกระดาษที่เตรียมได้

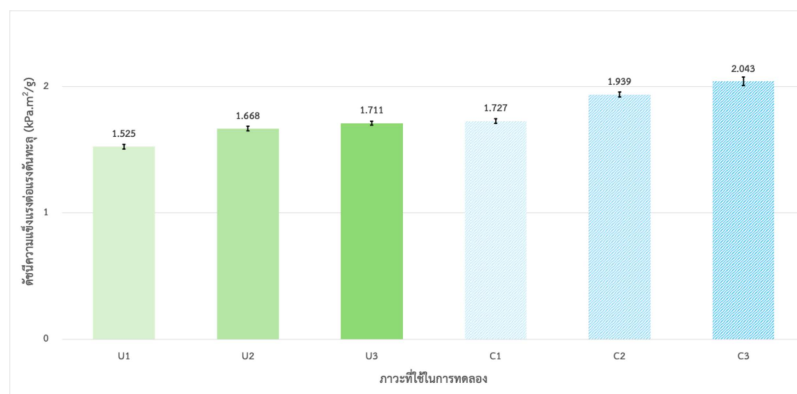
ภาวะที่ใช้ในการทดลอง	Density (g/cm ³)	Air resistance อากาศ (s)	Smoothness (s)	
			ด้านตะแกรง	ด้านสีกหลาด
กระดาษไม่เคลือบ กระดาษเยื่อ 1 ชั่วโมง	0.559 ± 0.007	4.690 ± 0.122	7.19 ± 0.30	9.23 ± 0.21
กระดาษไม่เคลือบ กระดาษเยื่อ 2 ชั่วโมง	0.565 ± 0.007	5.590 ± 0.179	8.20 ± 0.15	10.47 ± 0.12
กระดาษไม่เคลือบ กระดาษเยื่อ 3 ชั่วโมง	0.567 ± 0.005	6.140 ± 0.151	8.80 ± 0.30	11.51 ± 0.55
กระดาษเคลือบ กระดาษเยื่อ 1 ชั่วโมง	0.569 ± 0.005	6.130 ± 0.095	8.66 ± 0.10	11.85 ± 0.40
กระดาษเคลือบ กระดาษเยื่อ 2 ชั่วโมง	0.569 ± 0.007	7.750 ± 0.196	9.23 ± 0.19	12.50 ± 0.27
กระดาษเคลือบ กระดาษเยื่อ 3 ชั่วโมง	0.574 ± 0.003	9.430 ± 0.383	10.39 ± 0.21	13.45 ± 0.22

จากผลการทดลองที่แสดงในตารางที่ 3 พบว่าความหนาแน่นของกระดาษที่เตรียมได้ทั้งจากกระดาษที่ไม่เคลือบและเคลือบ PBS มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อใช้เวลาในการตีกระจายเยื่อมากขึ้น และกระดาษเคลือบ PBS มีแนวโน้มให้ค่าความหนาแน่นที่สูงกว่ากระดาษไม่เคลือบ ส่วนค่าความต้านทานอากาศของกระดาษที่เตรียมได้จากกระดาษที่ไม่เคลือบและเคลือบ PBS เพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนเมื่อเพิ่มระยะเวลาในการตีกระจายเยื่อเพิ่มขึ้น โดยกรณีกระดาษไม่เคลือบมีค่าความต้านทานอากาศเพิ่มขึ้นจาก 4.69 เป็น 6.14 วินาที และกรณีกระดาษเคลือบมีค่าความต้านทานอากาศเพิ่มขึ้นจาก 6.13 เป็น 9.43 วินาที สำหรับค่าความเรียบของกระดาษที่เตรียมได้จากกระดาษที่ไม่เคลือบและเคลือบ PBS ทั้งด้านตะแกรงและด้านสีกหลาดนั้นพบว่า มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มระยะเวลาในการตีกระจายเยื่อ แสดงให้เห็นว่าโครงสร้างของแผ่นกระดาษที่เตรียมได้มีความหนาแน่นและเรียบมากขึ้นทำให้อากาศสามารถผ่านได้ยากขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่ากรณีของกระดาษเคลือบให้ค่าความเรียบของกระดาษที่เตรียมได้สูงกว่ากระดาษไม่เคลือบในทุกภาวะการทดลอง ทั้งนี้เนื่องมาจากอนุภาค PBS ที่ตกค้างอยู่ในเยื่อกระดาษอาจมีส่วนช่วยอุดช่องว่างระหว่างเส้นใย ทำให้กระดาษมีความเรียบและแน่นมากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับกระดาษไม่เคลือบ

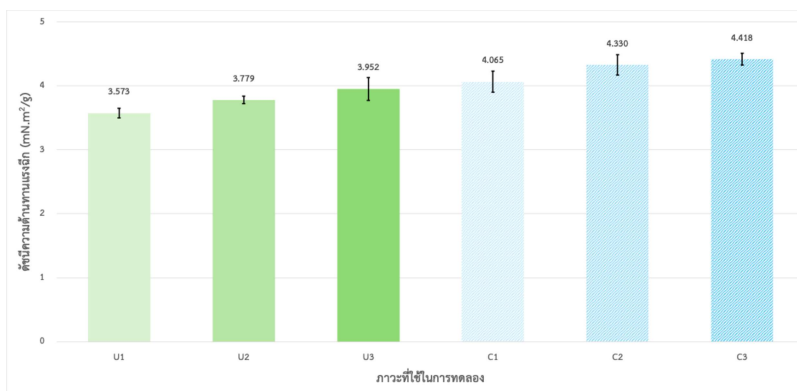
ในส่วนของความแข็งแรงต่อแรงดึง (Tensile strength) ความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุ (Bursting strength) และความต้านทานแรงฉีก (Tear resistance) ของกระดาษที่เตรียมได้จากการตีกระจายเยื่อได้แสดงไว้ในภาพที่ 4 ถึง ภาพที่ 6 โดยมีภาวะในการทดลอง คือ กระดาษไม่เคลือบ กระดาษเยื่อ 1 ชั่วโมง (U1) กระดาษไม่เคลือบ กระดาษเยื่อ 2 ชั่วโมง (U2) กระดาษไม่เคลือบ กระดาษเยื่อ 3 ชั่วโมง (U3) กระดาษเคลือบ กระดาษเยื่อ 1 ชั่วโมง (C1) กระดาษเคลือบ กระดาษเยื่อ 2 ชั่วโมง (C2) และกระดาษเคลือบ กระดาษเยื่อ 3 ชั่วโมง (C3)



ภาพที่ 4 ดัชนีความแข็งแรงต่อนแรงดึง โดยมีภาวะในการทดลอง คือ กระดาษไม่เคลือบ กระดาษเยื่อ 1 ชั่วโมง (U1) กระดาษไม่เคลือบ กระดาษเยื่อ 2 ชั่วโมง (U2) กระดาษไม่เคลือบ กระดาษเยื่อ 3 ชั่วโมง (U3) กระดาษเคลือบ กระดาษเยื่อ 1 ชั่วโมง (C1) กระดาษเคลือบ กระดาษเยื่อ 2 ชั่วโมง (C2) และกระดาษเคลือบ กระดาษเยื่อ 3 ชั่วโมง (C3)



ภาพที่ 5 ดัชนีความแข็งแรงต่อนแรงดันทะลุ โดยมีภาวะในการทดลอง คือ กระดาษไม่เคลือบ กระดาษเยื่อ 1 ชั่วโมง (U1) กระดาษไม่เคลือบ กระดาษเยื่อ 2 ชั่วโมง (U2) กระดาษไม่เคลือบ กระดาษเยื่อ 3 ชั่วโมง (U3) กระดาษเคลือบ กระดาษเยื่อ 1 ชั่วโมง (C1) กระดาษเคลือบ กระดาษเยื่อ 2 ชั่วโมง (C2) และกระดาษเคลือบ กระดาษเยื่อ 3 ชั่วโมง (C3)



ภาพที่ 6 ดัชนีความต้านทานแรงฉีก โดยมีภาวะในการทดลอง คือ กระดาษไม่เคลือบ กระดาษเยื่อ 1 ชั่วโมง (U1) กระดาษไม่เคลือบ กระดาษเยื่อ 2 ชั่วโมง (U2) กระดาษไม่เคลือบ กระดาษเยื่อ 3 ชั่วโมง (U3) กระดาษเคลือบ กระดาษเยื่อ 1 ชั่วโมง (C1) กระดาษเคลือบ กระดาษเยื่อ 2 ชั่วโมง (C2) และกระดาษเคลือบ กระดาษเยื่อ 3 ชั่วโมง (C3)

จากภาพที่ 4 ถึง ภาพที่ 6 ซึ่งแสดงผลการทดสอบสมบัติเชิงกลของกระดาษ พบว่า ระยะเวลาในการตีกระจายเยื่อส่งผลต่อสมบัติเชิงกลของกระดาษ โดยเมื่อเพิ่มระยะเวลาในการตีกระจายเยื่อจาก 1 เป็น 3 ชั่วโมง ค่าดัชนีความแข็งแรงต่อน้ำดึง (ภาพที่ 4) ดัชนีความแข็งแรงต่อน้ำดึง (ภาพที่ 5) และดัชนีความต้านทานแรงฉีก (ภาพที่ 6) มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นทั้งในกรณีกระดาษไม่เคลือบและกระดาษเคลือบ PBS แสดงให้เห็นว่าการตีกระจายเยื่อเป็นเวลานานขึ้นช่วยเพิ่มความแข็งแรงให้กับกระดาษรีไซเคิล เนื่องมาจากการตีกระจายเยื่อที่นานขึ้นส่งผลให้ปริมาณสารเติมเต็ม เช่น แคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) และไททาเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) ถูกชะล้างออกไปบางส่วนระหว่างกระบวนการตีกระจายเยื่อ การกรองเยื่อ และการล้างเยื่อ ซึ่งผลดังกล่าวสอดคล้องกับการวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุด้วยรังสีฟลูออเรสเซนซ์เอกซ์เรย์ (X-ray Fluorescence Spectroscopy) ดังแสดงในตารางที่ 4 ซึ่งพบว่าปริมาณแคลเซียม (Ca) มีแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่มระยะเวลาในการตีกระจายเยื่อ ทั้งในกระดาษที่เตรียมได้จากกระดาษไม่เคลือบและกระดาษเคลือบ PBS ขณะที่ปริมาณไททาเนียม (Ti) มีแนวโน้มลดลงเช่นกัน การลดลงของสารเติมเต็ม ดังกล่าวอาจส่งผลให้เส้นใยสามารถสัมผัสและสร้างพันธะไฮโดรเจนระหว่างกันได้มากขึ้น จึงช่วยเพิ่มความแข็งแรงของกระดาษ

ตารางที่ 4 การวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุด้วยรังสีฟลูออเรสเซนซ์เอกซ์เรย์ของกระดาษที่มาจากเยื่อรีไซเคิลที่ภาวะต่าง ๆ

ภาวะการทดลอง	องค์ประกอบธาตุ (%)		
	Cl	Ca	Ti
กระดาษไม่เคลือบตีกระจายเยื่อ 1 ชั่วโมง	85.13 ± 0.32	12.04 ± 0.19	2.83 ± 0.18
กระดาษไม่เคลือบตีกระจายเยื่อ 2 ชั่วโมง	86.65 ± 0.35	11.04 ± 0.35	2.31 ± 0.52
กระดาษไม่เคลือบตีกระจายเยื่อ 3 ชั่วโมง	88.12 ± 0.75	9.47 ± 0.55	2.41 ± 0.42
กระดาษเคลือบตีกระจายเยื่อ 1 ชั่วโมง	85.32 ± 0.41	12.25 ± 0.32	2.43 ± 0.12
กระดาษเคลือบตีกระจายเยื่อ 2 ชั่วโมง	86.92 ± 0.25	10.99 ± 0.12	2.09 ± 0.34
กระดาษเคลือบตีกระจายเยื่อ 3 ชั่วโมง	87.77 ± 0.91	9.98 ± 0.65	2.25 ± 0.37

นอกจากนี้การทดลองยังพบว่าค่าความแข็งแรงเชิงกลของกระดาษที่เตรียมมาจากกระดาษเคลือบสูงกว่ากระดาษไม่เคลือบในทุกภาวะการทดลอง ทั้งนี้อาจเป็นเพราะว่าอนุภาคของ PBS ที่ตกค้างในเยื่อถูกหลอมในขั้นตอนการอบแห้งระหว่างการขึ้นแผ่นกระดาษ โดย PBS ที่ถูกหลอมตัวอาจทำหน้าที่เสมือนสารยึดประสานระหว่างเส้นใย ส่งผลให้พันธะระหว่างเส้นใยดีขึ้น จึงช่วยเพิ่มสมบัติเชิงกลของกระดาษได้ เพื่อพิสูจน์ว่า PBS มีการหลอมตัวระหว่างการอบแห้งแผ่นกระดาษหรือไม่นั้น จึงได้ทำการทดลองเพิ่มเพื่อเปรียบเทียบผลของการอบแห้งแผ่นกระดาษโดยใช้ความร้อน (ขึ้นแผ่นกระดาษตามมาตรฐาน ISO) และการตากแห้งแผ่นกระดาษที่ภาวะอุณหภูมิห้อง (ขึ้นแผ่นกระดาษตามมาตรฐาน TAPPI) โดยเลือกภาวะการตีกระจายเยื่อที่ใช้เวลา 2 ชั่วโมงมาทำการศึกษาเปรียบเทียบ และคำนวณร้อยละการเพิ่มของสมบัติเชิงกล ดังสมการที่ (1) ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 5

$$\text{ร้อยละการเพิ่มของสมบัติเชิงกล} = \left(\frac{\text{สมบัติเชิงกลของกระดาษเคลือบ} - \text{สมบัติเชิงกลของกระดาษไม่เคลือบ}}{\text{สมบัติเชิงกลของกระดาษไม่เคลือบ}} \right) \times 100 \quad (1)$$

ตารางที่ 5 ร้อยละการเพิ่มของสมบัติเชิงกลของแผ่นกระดาษ

วิธีการขึ้นแผ่นกระดาษ	Tensile index increase (%)	Burst index Increase (%)	Tear index increase (%)
แบบ ISO (แห้งตัวด้วยความร้อน)	17.03	16.23	14.57
แบบ TAPPI (แห้งตัวที่อุณหภูมิห้อง)	4.64	5.15	0.31

จากตารางที่ 5 จะเห็นได้ว่าแผ่นกระดาษที่เตรียมได้จากการขึ้นแผ่นตามมาตรฐาน ISO ให้ร้อยละการเพิ่มขึ้นของค่าความแข็งแรงสูงกว่าการขึ้นแผ่นตามมาตรฐาน TAPPI ทั้งดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึง ดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุ และดัชนีความต้านทานแรงฉีก สะท้อนให้เห็นว่าความร้อนในขั้นตอนการอบแห้งของการขึ้นแผ่นแบบ ISO มีส่วนช่วยเพิ่มการยึดเกาะระหว่างเส้นใย เนื่องจาก PBS มีจุดหลอมเหลวอยู่ในช่วง 90-120 องศาเซลเซียส [11] การอบแห้งแผ่นกระดาษด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 93 ± 4 องศาเซลเซียส ตามมาตรฐาน ISO 5269-2 ซึ่งใกล้เคียงกับจุดหลอมเหลวของ PBS อาจทำให้อนุภาค PBS ที่ตกค้างเกิดการอ่อนตัวหรือหลอมตัว ประกอบกับแรงกดที่ใช้ในช่วงอบแห้งของเครื่องขึ้นแผ่นกระดาษ อาจทำให้ PBS ทำหน้าที่เป็นสารยึดประสานระหว่างเส้นใย ส่งผลให้โครงสร้างของแผ่นกระดาษมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น ในทางตรงกันข้ามวิธีการขึ้นแผ่นแบบ TAPPI ซึ่งเป็นการทำแห้งที่อุณหภูมิห้อง จึงไม่ก่อให้เกิดการหลอมตัวของ PBS ทำให้สมบัติเชิงกลของกระดาษต่ำกว่า

นอกจากนี้การลดลงของสารเติมเต็มยังทำให้การสัมผัสกันระหว่างเส้นใยและการสร้างพันธะไฮโดรเจนระหว่างเส้นใยดีขึ้น ซึ่งอาจเป็นส่วนเสริมทำให้โครงสร้างของกระดาษมีความแข็งแรงมากขึ้น นอกเหนือไปจากการทำหน้าที่เป็นสารยึดประสานระหว่างเส้นใยของอนุภาค PBS ที่ตกค้างอยู่ในเยื่อกระดาษ

ในงานวิจัยนี้ยังได้มีการทดสอบสมบัติการต้านทานน้ำของกระดาษที่เตรียมได้หลังจากผ่านกระบวนการรีไซเคิลแล้ว ซึ่งจากการทดลองวัดมุมสัมผัสของหยดน้ำ (Water contact angle) ด้วยเครื่อง Pocket Goniometer PGX พบว่ากระดาษรีไซเคิลที่เตรียมได้ทั้งจากกระดาษไม่เคลือบและกระดาษเคลือบ PBS ล้วนให้ค่ามุมสัมผัสของหยดน้ำเท่ากับ 0 และหยดน้ำถูกดูดซึมเข้าสู่โครงสร้างของกระดาษอย่างรวดเร็ว รวมถึงการทดสอบการดูดซึมน้ำแบบคอบบ์ (Cobb test) พบว่าไม่สามารถวัดได้ เนื่องจากน้ำซึมเข้าสู่เนื้อกระดาษอย่างรวดเร็วและแพร่ออกมาจนครบบริเวณทดสอบ แสดงให้เห็นว่ากระดาษรีไซเคิลที่เตรียมได้ทั้งจากกระดาษไม่เคลือบและเคลือบ PBS มีความชอบน้ำสูง และไม่มีความสามารถในการต้านทานน้ำ แม้ว่าผลการวิเคราะห์ในหัวข้อ 3.2 จะยืนยันการตกค้างของ PBS ในเยื่อกระดาษรีไซเคิลก็ตาม

4. สรุปผลการทดลอง

การตีกระจายเยื่อส่งผลต่อปริมาณผลผลิตรวมถึงสมบัติของเยื่อและกระดาษที่เตรียมได้จากการรีไซเคิลกระดาษที่เคลือบและไม่เคลือบ PBS อย่างชัดเจน โดยกระดาษไม่เคลือบให้ร้อยละผลผลิตเยื่อ (Accept) สูงกว่ากระดาษเคลือบ PBS ทุกภาวะการทดลอง ขณะที่กระดาษเคลือบ PBS มีเยื่อหรือ PBS ค้างบนตะแกรง (Reject) ประมาณร้อยละ 10 เนื่องจากชั้น PBS ยังยึดติดกับเส้นใยบางส่วน แม้การเพิ่มเวลาตีกระจายเยื่อจะช่วยให้ PBS แตกตัวและหลุดผ่านตะแกรงได้มากขึ้น แต่ก็ทำให้เกิดการสูญเสีย (Loss) เพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตาม เวลาที่ใช้ในการตีกระจายเยื่อไม่ส่งผลต่อลักษณะทางสัณฐานวิทยา ได้แก่ ความยาวเส้นใย ปริมาณเส้นใยขนาดเล็ก และไฟบริลเลชันของเส้นใยอย่างชัดเจน การย้อมสีเส้นใยด้วยคองโกเรดและการวิเคราะห์ ATR-FTIR ยืนยันว่าแม้ผ่านการตีกระจายเยื่อแล้ว ยังคงมี PBS ตกค้างอยู่ในเยื่อกระดาษที่เตรียมได้จากกระดาษเคลือบ PBS โดยพบหมู่ฟังก์ชันเฉพาะของ PBS ซึ่งแตกต่างจากเยื่อที่เตรียมได้จากกระดาษไม่เคลือบ สำหรับสมบัติของกระดาษพบว่าเมื่อเพิ่มเวลาตีกระจายเยื่อ ความหนาแน่น ความต้านทานอากาศ และความเรียบของกระดาษที่เตรียมได้เพิ่มขึ้น เนื่องจากโครงสร้างกระดาษมีความแน่นมากขึ้น โดยกระดาษเคลือบ PBS ให้ค่าดังกล่าวสูงกว่ากระดาษไม่เคลือบเนื่องจาก

