

ผลของอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ ต่อสมบัติทางแสงและสมบัติเชิงกลของกระดาษสา

EFFECT OF NANO TITANIUM DIOXIDE ON SAA PAPER'S OPTICAL
AND MECHANICAL PROPERTIES

รองศาสตราจารย์วิไลพร ลักษณะิวนิชย์ และจักรพันธ์ จอมแสนปิง

Vol. 15 No. 2 April-September

CHIANGMAI
RAJABHAT
UNIVERSITY

ผลของอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ ต่อสมบัติทางแสงและสมบัติเชิงกลของกระดาษสา

EFFECT OF NANO TITANIUM DIOXIDE ON SAA PAPER'S OPTICAL AND MECHANICAL PROPERTIES

รองศาสตราจารย์วิไลพร ลักขมามีวนิชย์* และจักรพันธ์ จอมแสนปิง**

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ต่อสมบัติทางแสง สมบัติเชิงกลของกระดาษสา และวิเคราะห์หาค่าใช้จ่ายเพิ่มเติมในการเติมอนุภาคดังกล่าวบนกระดาษสา สมบัติทางแสงที่ศึกษาเป็นสมบัติการกันแสงสีขาวและรังสีอัลตราไวโอเล็ต (Ultraviolet: UV) ส่วนสมบัติเชิงกลที่ทดสอบ ได้แก่ สมบัติการต้านแรงดึงจนขาด การต้านการหักพับ การต้านแรงฉีกขาด และการต้านแรงดันทะลุ ผลการศึกษา พบว่า การเคลือบสารผสมของน้ำตะโกและอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ทำให้สมบัติการกันแสงสีขาวและรังสี UV ดีขึ้น การเคลือบสารผสมซ้ำสองครั้งทำให้แรงดึงจนขาดมีค่าต่ำสุด สมบัติการต้านแรงฉีกขาดและการต้านแรงดันทะลุดีขึ้นตามจำนวนครั้งที่ทาเคลือบ แต่การเคลือบซ้ำทำให้สมบัติการต้านการหักพับลดลง การผสมอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ปริมาณ 2 กรัม กับน้ำตะโกปริมาณ 100 มิลลิลิตร เคลือบบนกระดาษสาหนึ่งครั้ง ทำให้ได้สมบัติเชิงกลที่เหมาะสมที่สุด การเติมอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ปริมาณ 1 กรัม ในน้ำตะโก 100 มิลลิลิตร ทาเคลือบบนกระดาษสาหนึ่งตารางเมตรจำนวนหนึ่งครั้ง มีค่าใช้จ่ายประมาณ 5 บาท ภายใต้งบประมาณที่ไม่พิจารณามูลค่าคงตัวของอุปกรณ์ที่ใช้ในการผลิต

คำสำคัญ: อนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ กระดาษสา สมบัติเชิงกล ค่าใช้จ่ายเพิ่ม

ABSTRACT

This research was aimed to study the effect of Nano Titanium Dioxide (TiO_2) on optical properties, mechanical properties and additional cost evaluation. White light and UV blocks were tested and defined as optical properties. Four mechanical properties tested were tensile strength, folding durance, tearing resistance and bursting strength. As a painting number of ebony mixed with Nano Titanium Dioxide solution on Saa Paper was increased, better block of both UV and white light were clearly seen. Twice of painting gave a maximum value of tensile strength. Rising of TiO_2 amount or number of painting made better values of tearing resistance and bursting strength, but folding durance was decline. It was found that one time of painting and 2 grams of Nano TiO_2 mixed with 100 milliliter of ebony solution was the

* คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงใหม่

** ครุศาสตร์บัณฑิต คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงใหม่

optimum condition. Without taken any equipment cost, the additional cost of this optimum condition was around 5 baths per square meter of Saa Paper.

Keywords: Nano Titanium Dioxide, Saa Paper, Mechanical Properties, Additional Cost

บทนำ

กระดาษสาเป็นกระดาษทำมือ (Handmade Paper) ที่มีการผลิตมาแต่โบราณ ส่วนมากผลิตจากเยื่อของต้นปอสา ด้วยกระบวนการผลิตแบบภูมิปัญญาท้องถิ่นที่มีความแตกต่างกันตามท้องที่ เดิมกระดาษสา มักพบในลักษณะที่มีสีขาวตามเยื่อของต้นปอสา ทำให้สามารถสังเกตเห็นเยื่อของต้นปอสาได้ด้วยตาเปล่า ปัจจุบันนิยมเติมสีตามความต้องการของผู้ใช้ ผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากกระดาษสาเป็นผลิตภัณฑ์ชุมชนมีหลากหลายรูปแบบ เช่น ร่ม กระดาษห่อหุ้มผลิตภัณฑ์ ถุง ของชำร่วย หรือกรอบรูป เป็นต้น กระดาษสาที่ใช้เป็นส่วนประกอบหลักของร่มกันแดดหรือกันฝน ใช้การทาเคลือบกระดาษสาด้วยน้ำตะโก (น้ำหมักจากผลตะโกผสมน้ำแป้ง) ส่วนแนวความคิดการนำวัสดุนาโนมาทาเคลือบผิวของกระดาษสาเพื่อยืดอายุการใช้งาน ด้านความคงทน และความสวยงามของสีสันมีการศึกษาต่อเนื่องด้วยนักศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิชาฟิสิกส์ มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงใหม่ (กมลพรรณ ลาคนันท์, 2554; ทิพวรรณ เทพวงศ์, 2554; ปกรณ์พิสิษฐ์ เลิศวิริยกุล, 2554 และจักรพันธ์ จอมแสนปิง, 2556) นอกจากนั้นยังมีผลการศึกษายืนยันว่าอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์สามารถถนอมกระดาษได้ (Afsharpour M. & et al., 2011) ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงใช้วิธีการผสมอนุภาคนาโนไทเทเนียมลงในน้ำตะโกแล้วทาเคลือบบนกระดาษสา เลียนแบบภูมิปัญญาท้องถิ่นที่ใช้ทำร่ม จากนั้นจึงนำไปศึกษาผลของอนุภาคนาโนไทเทเนียมต่อสมบัติทางแสงและสมบัติเชิงกล โดยมุ่งหวังที่จะนำอนุภาคนาโนดังกล่าวไปใช้ในกระบวนการผลิตกระดาษสาที่เป็นภูมิปัญญาพื้นบ้านท้องถิ่นต่อไป

วัตถุประสงค์

เพื่อศึกษาผลของอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ต่อสมบัติทางแสงและสมบัติเชิงกล ซึ่งได้แก่ สมบัติการต้านแรงดึง การต้านต่อการหักพับ การต้านแรงฉีกขาด และการต้านแรงดันทะลุ ตลอดจนวิเคราะห์หาค่าใช้จ่ายในการผลิตอนุภาคนาโนดังกล่าวที่เงื่อนไขการให้สมบัติเชิงกลที่เหมาะสมที่สุด

ระเบียบวิธีวิจัย

1. การเตรียมชิ้นตัวอย่างกระดาษสาและการเตรียมสารผสม

ตัวอย่างกระดาษสาที่ใช้เป็นผลิตภัณฑ์จากชุมชนบ้านปอส้าง อำเภอสันกำแพง จังหวัดเชียงใหม่ เงื่อนไขชิ้นตัวอย่างที่นำมาทดสอบ ประกอบด้วย

- 1.1 กระดาษสาเปล่าที่ไม่เคลือบสารใดๆ
- 1.2 กระดาษสาที่เคลือบ¹ น้ำตะโกเป็นจำนวน 1, 3 และ 5 ชั้น

¹ การเคลือบกระดาษสาตลอดงานวิจัยนี้ใช้วิธีการทาด้วยแปรงทาสีขนาดกว้างประมาณ 6.5 เซนติเมตร

1.3 กระดาษสาที่ทาเคลือบสารผสมของน้ำตะโก (100 มิลลิลิตร) กับอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ ที่มีปริมาณต่างกัน 3 ค่า คือ 1 กรัม 2 กรัม และ 3 กรัม สารผสมทั้ง 3 เจือปนไขก้นนำไปเคลือบบนชิ้นตัวอย่างกระดาษสา ที่เตรียมไว้ เพื่อศึกษาผลของจำนวนครั้งที่ทา 5 เจือปนไข ซึ่งได้แก่การทาเคลือบจำนวน 1, 2, 3, 4 และ 5 ครั้ง

1.4 กระดาษ A4 ขนาด 80 แกรม เพื่อใช้เป็นสมบัติเปรียบเทียบกับกระดาษสาที่เจือปนไขต่างๆ

สัญลักษณ์และเงื่อนไขของชิ้นตัวอย่างกระดาษสาและกระดาษ A4 ที่ทดสอบทั้งหมด จำนวน 20 ชิ้น ไขแสดงในตารางที่ 1

2. การทดสอบสมบัติทางแสง

สมบัติทางแสงของกระดาษที่ทดสอบ ได้แก่ ความสามารถในการกั้นแสงสีขาวยและรังสีอัลตราไวโอเล็ตของ ชิ้นตัวอย่างกระดาษสา ประเมินจากค่าความเข้มแสงที่วัดด้วย Lux Meter และหัววัดรังสีอัลตราไวโอเล็ต² ตามลำดับ การทดสอบจัดให้ชิ้นตัวอย่างและหัววัดแสงสีขาวยหรือหัววัดรังสีอยู่ภายในบริเวณที่กั้นแสงจากแหล่งอื่นทะลุผ่าน ดังแสดงด้วย แผนภาพในรูปที่ 1 การวิจัยใช้แหล่งกำเนิดแสงเป็นหลอดไฟแบบไส้ทั้งสแตนขนาด 100 วัตต์ อยู่สูงกว่าชิ้นตัวอย่างกระดาษสา ประมาณ 12 เซนติเมตร ข้อมูลที่ได้เป็นค่าเฉลี่ยของความเข้มแสงจากการทดลอง 5 ซ้ำ ของแต่ละเงื่อนไขของชิ้นตัวอย่าง ผลการวิจัยแสดงด้วยการเปรียบเทียบค่าร้อยละของความสามารถในการกั้นแสงสีขาวยหรือรังสี UV เทียบกับความเข้มแสง ที่ตกกระทบกระดาษ คำนวณได้ดังสมการที่ (1) (ดูรูปที่ 1 ประกอบ) จำนวนทั้งหมด 19 เงื่อนไข

$$\text{ร้อยละของการกั้นแสง} = \frac{(I_0 - I)}{I_0} \times 100 \quad (1)$$

3. การทดสอบสมบัติเชิงกล

สมบัติเชิงกลของกระดาษสาที่ทดสอบมี 4 ประเภท³ ได้แก่

3.1 สมบัติการต้านแรงดึงจนขาด (Tensile Strength) ทดสอบด้วยเครื่องทดสอบการต้านแรงดึง (Tensile Machine; HOUNSFIELD TEST EQUIPMENT Serial No.0072 รุ่น H1KS)

3.2 สมบัติการต้านการหักพับ (Folding Durance) ทดสอบด้วยเครื่องทดสอบสมบัติการต้านการหักพับ (Folding Machine; GOTECH TESTING MACHINES Inc. Serial No.9000610 รุ่น GT-6014-A)

3.3 สมบัติการต้านแรงฉีกขาด (Tear Resistance) ทดสอบด้วยเครื่องทดสอบการฉีกขาด (Elmendorf Tearing Tester; GOTECH TESTING MACHINES Inc. Serial No.9000162 รุ่น GT-7055)

3.4 สมบัติการต้านแรงดันทะลุ (Bursting Strength) ทดสอบด้วยเครื่องทดสอบการต้านแรงดันทะลุ (Bursting Strength Tester; TEST TECHNO CONSULTANTS M/C Serial No.0802)

ขนาดของชิ้นตัวอย่าง⁴ เงื่อนไขการทดสอบ ผลการทดสอบ และจำนวนชิ้นตัวอย่างของการทดสอบแต่ละประเภท สรุปในตารางที่ 2 โดยชิ้นตัวอย่างที่ทดสอบแต่ละเงื่อนไขของกระดาษสา มีจำนวนไม่น้อยกว่า 5 ตัวอย่าง จากนั้นจึงนำเอา ข้อมูลที่ได้ไปวิเคราะห์หาค่าเฉลี่ย และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน ส่วนอุปกรณ์และแผนภาพการทดสอบแสดงในรูปที่ 2

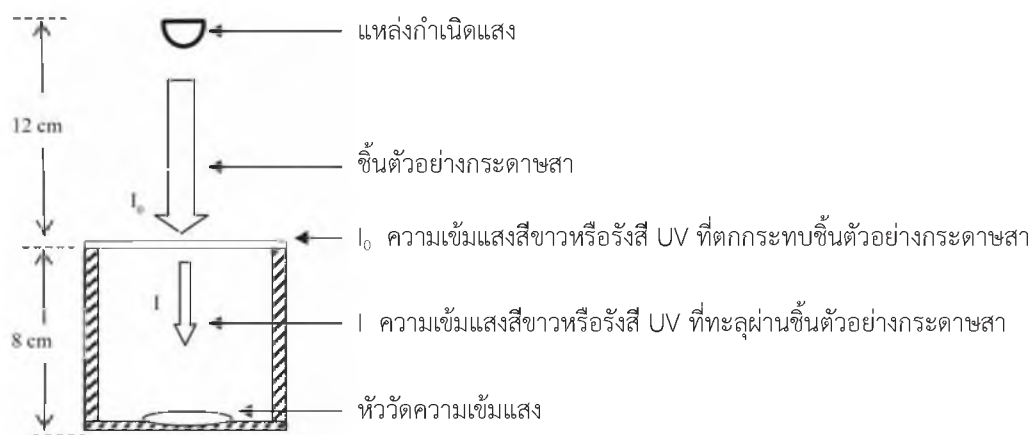
² ผลิตภัณฑ์บริษัท LT Lutron รุ่น UV-340A สามารถวัดรังสีช่วงความยาวคลื่น 290-390 nm ในหน่วย $\mu\text{W}/\text{cm}^2$

³ อุปกรณ์ทั้งสี่อยู่ในความดูแลของภาควิชาการบรรจุและวัสดุ คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

⁴ ขนาดของชิ้นตัวอย่างเป็นไปตามมาตรฐานการทดสอบของ TAPPI (วิชั่นท์ อรรถนพานุรักษ์, 2545)

ตารางที่ 1 สัญลักษณ์และเงื่อนไขของชิ้นตัวอย่างกระดาษสา

เงื่อนไขที่	สัญลักษณ์	เงื่อนไข
1	S	กระดาษสาที่ไม่เคลือบน้ำตะโกหรืออนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์
2-4	ST_01/ST_03/ST_05	กระดาษสาที่เคลือบน้ำตะโกจำนวน 1, 3 และ 5 ครั้ง ตามลำดับ
5-9	STTi1G_01/STTi1G_02/STTi1G_03/ STTi1G_04/STTi1G_05	กระดาษสาที่เคลือบด้วยสารผสมของน้ำตะโก (100 มิลลิลิตร) กับอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ปริมาณ 1 กรัม จำนวน 1, 2, 3, 4 และ 5 ครั้ง ตามลำดับ
10-14	STTi2G_01/STTi2G_02/STTi2G_03/ STTi2G_04/STTi2G_05	กระดาษสาที่เคลือบด้วยสารผสมของน้ำตะโก (100 มิลลิลิตร) กับอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ปริมาณ 2 กรัม จำนวน 1, 2, 3, 4 และ 5 ครั้ง ตามลำดับ
15-19	STTi3G_01/STTi3G_02/STTi3G_03/ STTi3G_04/STTi3G_05	กระดาษสาที่เคลือบด้วยสารผสมของน้ำตะโก (100 มิลลิลิตร) กับอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ปริมาณ 3 กรัม จำนวน 1, 2, 3, 4 และ 5 ครั้ง ตามลำดับ
20	A4	กระดาษมาตรฐาน A4 ขนาด 80 กรัมต่อตารางเมตร ไม่เคลือบสารใดๆ



รูปที่ 1 แผนภาพการจัดอุปกรณ์การกันแสงขาวหรือรังสี UV

ตารางที่ 2 ขนาดและเงื่อนไขการทดสอบสมบัติเชิงกล

ชนิดการทดสอบ	ขนาดและเงื่อนไขของตัวอย่าง
การต้านแรงดึง	- ชิ้นตัวอย่างมีขนาด (กว้าง x ยาว) ประมาณ 1.5x10 เซนติเมตร - อัตราการผิดรูป 12.5 เซนติเมตรต่อนาที - ผลการทดสอบเป็นแรงดึงจนขาดต่อความกว้างของกระดาษ นิวตันต่อเมตร (N/m) - จำนวนเงื่อนไขของตัวอย่าง 20 เงื่อนไข: ชิ้นตัวอย่าง 5 ชิ้นต่อเงื่อนไข
การต้านการหักพับ	- ขนาด (กว้าง x ยาว) ประมาณ 1.5x10 เซนติเมตร - มวลถ่วง 1.0 กิโลกรัม - ผลการทดสอบเป็นจำนวนครั้งของการหักพับก่อนขาด - จำนวนเงื่อนไขของตัวอย่าง 20 เงื่อนไข: ชิ้นตัวอย่าง 10 ชิ้นต่อเงื่อนไข
การต้านแรงฉีกขาด	- ขนาด (กว้าง x ยาว) ประมาณ 7x10 เซนติเมตร - ผลการทดสอบเป็นค่าแรงต้านการฉีกขาด มีหน่วยเป็นกรัม (gram-force) - จำนวนเงื่อนไขของตัวอย่าง 20 เงื่อนไข: ตัวอย่าง 5 ชิ้นต่อหนึ่งเงื่อนไข

ชนิดการทดสอบ	ขนาดและเงื่อนไขของตัวอย่าง
การต้านแรงดันทะลุ	- ขนาด (กว้าง x ยาว) ประมาณ 10x10 เซนติเมตร - ทดสอบภายใต้ความดันที่ปั๊มกลีเซอรีนให้ดันขึ้นตัวอย่างในอัตรา 95 ± 5 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที - ผลการทดสอบรายงานในรูปของความดัน (ขณะที่กระดาษขาด) มีหน่วยเป็นกิโลปาสกาล (kPa) - จำนวนเงื่อนไขของตัวอย่าง 20 เงื่อนไข: ตัวอย่าง 5 ชิ้นต่อหนึ่งเงื่อนไข

4. การวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายในการผลิตอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์

จากขั้นตอนการผลิตอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยเทคนิคไมโครเวฟที่แสดงในรูปที่ 3 (กมลพรรณ ลาสนันท์, 2554) พบว่าการเตรียมอนุภาคหนึ่งครั้งต้องใช้สารไทเทเนียมไดออกไซด์เกรดห้องปฏิบัติการ⁵ ปริมาณ 30 กรัม (บรรจุในขวดรูปชมพู่ขวดละ 10 กรัม จำนวน 3 ขวด) จากนั้นเติมน้ำปราศจากไอออน ขวดละ 20 มิลลิลิตร แล้วนำไปเขย่าด้วยเครื่องอัลตราโซนิกเป็นเวลา 15 นาที และให้ความร้อนแก่สารด้วยเครื่องไมโครเวฟขนาด 1,100 วัตต์ เป็นเวลา 60 นาที การวิเคราะห์หาค่าใช้จ่ายในการผลิตอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์เบื้องต้น โดยไม่พิจารณามูลค่าของเตาไมโครเวฟ และเครื่องอัลตราโซนิก



(ก)



(ข)

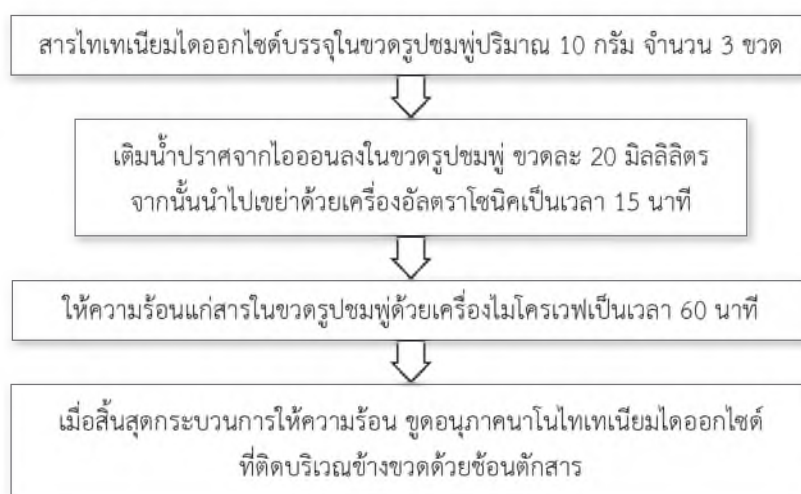


(ค)



(ง)

รูปที่ 2 ภาพอุปกรณ์ทดสอบสมบัติเชิงกลของกระดาษ (ก) เครื่องทดสอบแรงดึง (ข) เครื่องทดสอบการหักพับ (ค) เครื่องทดสอบการฉีกขาด และ (ง) เครื่องทดสอบแรงดันทะลุ



รูปที่ 3 แผนภาพการผลิตอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยเทคนิคไมโครเวฟ

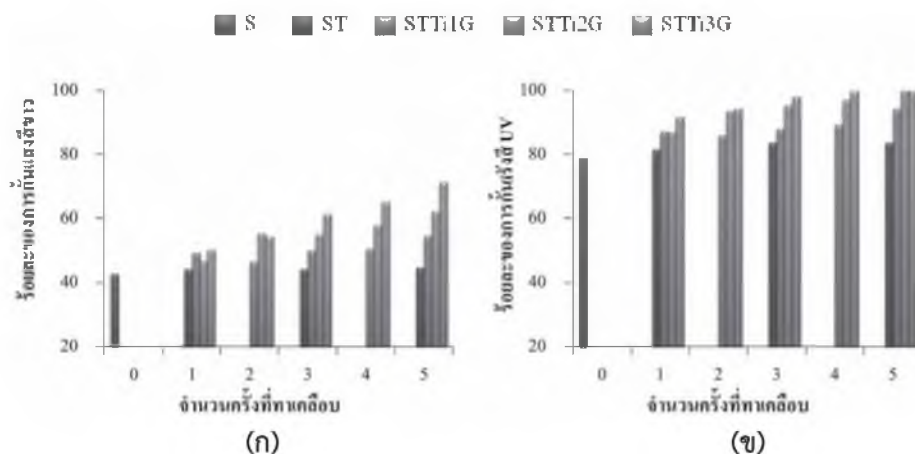
⁵ UNILAB reagent TiO_2 , Molecular Weight=79.90, Assay min 99.0% max 100.5%, Ajax Finechem Pty Ltd.

ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

ผลของการทดสอบแสดงการเปลี่ยนแปลงด้วยแผนภูมิแท่งที่ใช้สัญลักษณ์แทนเงื่อนไข ขึ้นตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบ เป็น S แทนกระดาษสาที่ไม่ได้ทาสารใดๆ เคลือบ ST แทนกระดาษสาที่ทาเคลือบด้วยน้ำตะโก A4 คือ กระดาษมาตรฐาน A4 ขนาด 80 แกรม ส่วนกรณีกระดาษสาที่ทาเคลือบด้วยน้ำตะโกผสมสารไทเทเนียมไดออกไซด์ปริมาณ 1, 2 และ 3 กรัม ใช้สัญลักษณ์ STTi1G, STTi2G และ STTi3G ตามลำดับ

1. สมบัติทางแสง

ความสามารถในการกันแสงสีขาวยและรังสี UV หรือค่าอัตราส่วนของปริมาณแสงที่ทะลุผ่านกระดาษต่อปริมาณแสงที่ตกกระทบกระดาษในรูปร้อยละ แสดงในรูปที่ 4 พบว่ากระดาษสาที่ไม่ทาสารเคลือบสามารถกันแสงสีขาวยได้ประมาณร้อยละ 43 เมื่อทาสารละลายน้ำตะโกเคลือบบนกระดาษสาจำนวน 1, 3 และ 5 ชั้น ไม่ทำให้ความสามารถในการกันแสงดีขึ้น ค่าเฉลี่ยของร้อยละการกันแสงสีขาวยในกรณีนี้มีค่าประมาณ 44 ในขณะที่การทาสารละลายน้ำตะโกผสมอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ลงบนกระดาษสาทำให้ความสามารถในการกันแสงสีขาวยดีขึ้น โดยร้อยละของการกันแสงสีขาวยแปรตามปริมาณของอนุภาคนาโนไทเทเนียมที่ผสมในสารละลายและจำนวนครั้งที่ทา และมีร้อยละของการกันแสงสีขาวยอยู่ในช่วง 46 ถึง 70 ส่วนความสามารถในการกันรังสี UV ของกระดาษสาที่ไม่ทาสารเคลือบมีค่าสูงถึงประมาณร้อยละ 79 การทาสารละลายน้ำตะโกเคลือบซ้ำบนกระดาษสาจาก 1 ถึง 5 ครั้ง ไม่ทำให้ความสามารถในการกันรังสี UV ดีขึ้น ค่าเฉลี่ยของร้อยละการกันรังสี UV มีค่าอยู่ในช่วงประมาณร้อยละ 81 ถึง 84 ในขณะที่การทาซ้ำสารละลายน้ำตะโกผสมอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ทำให้ความสามารถในการกันรังสี UV ดีขึ้น ค่าร้อยละของการกันรังสี UV แปรตามปริมาณอนุภาคนาโนไทเทเนียมที่ผสมในสารละลายและจำนวนครั้งที่ทา ค่าสูงสุดของการกันรังสี UV มีค่าสูงถึงร้อยละ 100 ซึ่งพบเมื่อใช้สารละลายน้ำตะโกผสมสารนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ 2 กรัม ทาซ้ำ 5 ครั้ง และกรณีสารผสม 3 กรัม ทาซ้ำ 4 และ 5 ครั้ง สมบัติการกันแสงสีขาวยที่ทดสอบที่ได้สอดคล้องกับผลการศึกษาของทิพวรรณ เทพวงศ์ (2554)



รูปที่ 4 ผลของน้ำตะโกและน้ำตะโกผสมอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ ปริมาณและจำนวนครั้งที่ทาต่อ

(ก) ร้อยละของการกันแสงสีขาวย และ (ข) ร้อยละของการกันรังสี UV

หมายเหตุ จำนวนครั้งที่ทาเคลือบเท่ากับ 0 คือกระดาษสาเปล่าที่ไม่ได้ทาสารใดๆ

2. สมบัติเชิงกล

ผลการทดสอบแรงดึงจนขาด การต้านการหักพับ การต้านแรงฉีกขาด และการต้านแรงดันทะลุ แสดงด้วยแผนภูมิแท่ง ดังแสดงในรูปที่ 5 สามารถแยกอธิบายตามเงื่อนไขของตัวอย่างและสมบัติเชิงกลที่ทดสอบได้ดังนี้

2.1 กระดาษสาที่ไม่ทาสารเคลือบใดๆ มีค่าแรงดึงจนขาด ความสามารถในการหักพับ การต้านแรงฉีกขาด และการต้านแรงดันทะลุ ประมาณ 250 kN/m 170 ครั้ง 40 กรัม และ 50 kPa ตามลำดับ เมื่อนำค่าเหล่านี้ไปเปรียบเทียบกับกระดาษมาตรฐาน A4 พบว่า สมบัติที่สอดคล้องกันมีค่าสูงมาก ได้แก่ 5,240 kN/m 230 ครั้ง 560 กรัม และ 260 kPa ตามลำดับ

2.2 การเคลือบน้ำตะโกบนกระดาษสาทำให้ความสามารถทนแรงดึงจนขาดเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน โดยมีค่าแรงดึงจนขาดประมาณ 760 ถึง 1,460 kN/m เมื่อการเคลือบเพิ่มจำนวนจาก 1 ถึง 5 ชั้น ตามลำดับ การเคลือบน้ำตะโกผสมอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีปริมาณเพิ่มขึ้นในช่วง 1-3 กรัม ทำให้กระดาษสาสามารถทนแรงดึงจนขาดได้ดีที่สุดที่ 2 กรัม โดยค่าการทนแรงดึงมีแนวโน้มต่ำสุดเมื่อทาซ้ำ 2 ครั้ง จากนั้นจึงมีค่าเพิ่มขึ้นแบบไม่เป็นเชิงเส้น การเพิ่มปริมาณอนุภาคนาโนไทเทเนียมเป็น 3 กรัม ทำให้การทนแรงดึงช่วงที่เคลือบ 1-4 ครั้ง ต่ำกว่ากรณีที่มีอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ 1 และ 2 กรัม และกลับเพิ่มมากกว่ากรณีอื่นๆ เมื่อทาซ้ำ 5 ครั้ง

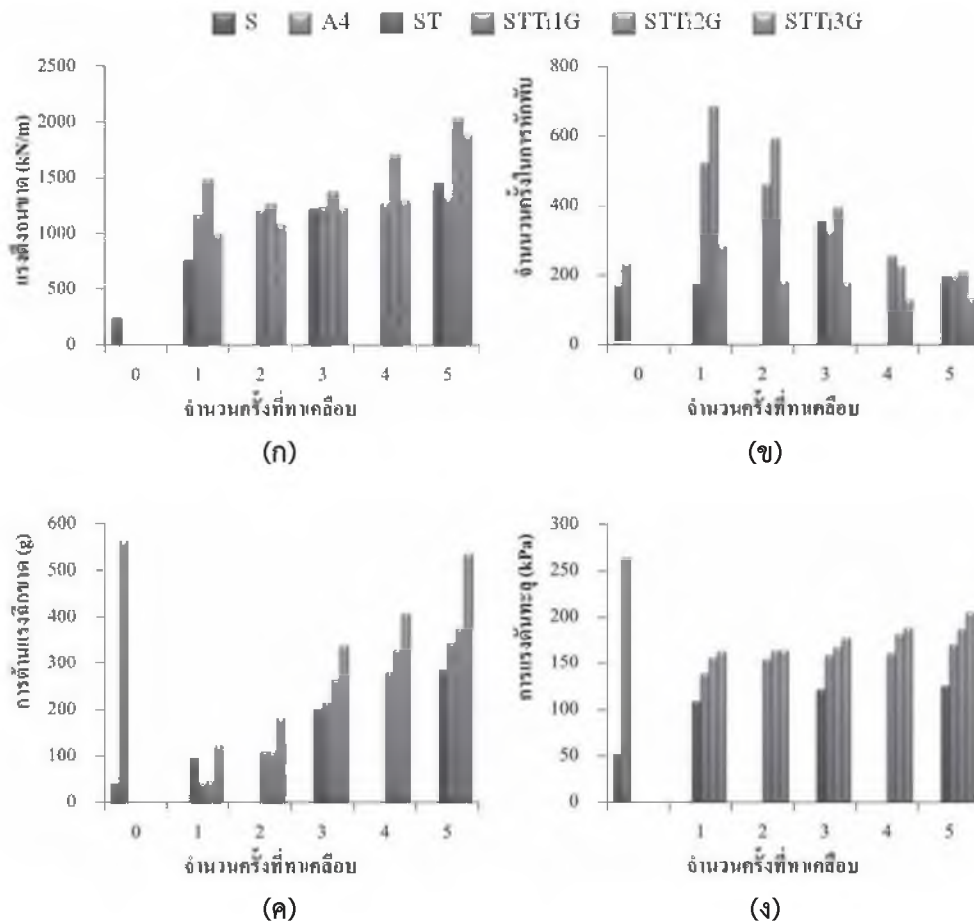
2.3 การเคลือบน้ำตะโกบนกระดาษสาทำให้ความสามารถในการต้านการหักพับเพิ่มขึ้นสูงสุดเมื่อเคลือบซ้ำ 3 ครั้ง ด้วยค่าประมาณ 360 ครั้ง ในขณะที่กระดาษสาเปล่าหรือกรณีเคลือบ 1 และ 5 ครั้ง มีค่าอยู่ประมาณ 170-200 ครั้ง การเคลือบน้ำตะโกผสมอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีปริมาณเพิ่มขึ้นในช่วง 1-3 กรัม ทำให้กระดาษสามารถต้านการหักพับได้ดีที่สุดที่ 2 กรัม โดยค่าการต้านการหักพับมีแนวโน้มลดลงตามจำนวนครั้งที่เคลือบซ้ำจาก 1 ถึง 5 ครั้ง ด้วยค่าประมาณ 690 ถึง 210 ครั้ง และการเคลือบน้ำตะโกผสมอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์จำนวน 1 กรัม ทำให้การต้านหักพับสูงกว่าการเคลือบน้ำตะโกผสมอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์จำนวน 3 กรัม

2.4 ค่าการต้านแรงฉีกขาดของกระดาษที่เคลือบด้วยน้ำตะโกมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน (จาก 40 กรัม กรณีกระดาษสาเปล่า) ประมาณ 100 ถึง 290 กรัม ผลของการเคลือบซ้ำและการเพิ่มปริมาณอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์มีผลต่อการต้านแรงฉีกขาดคล้ายกัน โดยค่าการต้านแรงฉีกขาดเพิ่มขึ้นตามจำนวนครั้งที่เคลือบและปริมาณสารที่เพิ่ม ค่าการต้านแรงฉีกขาดมีค่าประมาณ 110 ถึง 350 กรัม

2.5 ความสามารถในการต้านแรงดันทะลุของกระดาษสาที่ทาเคลือบด้วยน้ำตะโกมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 50 kPa (กระดาษสาเปล่า) เป็น 110 ถึง 125 kPa เมื่อเคลือบจำนวน 1 ถึง 5 ชั้น ตามลำดับ การทาน้ำตะโกผสมอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีปริมาณเพิ่มขึ้นในช่วง 1-3 กรัม ทำให้กระดาษสามารถต้านแรงดันทะลุได้เพิ่มขึ้น โดยขึ้นกับทั้งปริมาณอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เพิ่ม และจำนวนครั้งในการเคลือบซ้ำ

2.6 ผลการทดสอบสมบัติเชิงกลทั้งสี่ประเภทมีค่าร้อยละของความแปรปรวนสูงกว่า 10% จนถึงประมาณร้อยละ 45% โดยมีการทดสอบขึ้นตัวอย่างกระดาษสูงสุด 10 ชิ้น สาเหตุอาจเกิดจากความไม่สม่ำเสมอของการทาสารเคลือบ ตลอดจนไม่สม่ำเสมอของความหนาเดิมของกระดาษสาที่ขึ้นรูปด้วยมือ

ความแข็งแรงของสมบัติการดึงจนขาดของกระดาษที่พบ สอดคล้องกับผลการศึกษาของ Afsharpour & *et al.* (2011) และจากข้อมูลข้างต้นทำให้กล่าวได้ว่า อนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ 2 กรัม ผสมในน้ำตะโกปริมาณ 100 มิลลิลิตร เคลือบบนกระดาษสา 1 ครั้ง ทำให้สมบัติเชิงกลของกระดาษสาอยู่ในสภาพเหมาะสมที่สุด



รูปที่ 5 สมบัติเชิงกลของกระดาษสา กระดาษ A4 กระดาษสาทาเคลือบด้วยน้ำตะโก และกระดาษสาที่ทาเคลือบด้วยน้ำตะโกผสมอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ ที่แปรค่ากับจำนวนครั้งที่ทาและปริมาณสาร แยกเป็น (ก) สมบัติการทนแรงดึงจนขาด (ข) การต้านการหักพับ (ค) การต้านแรงฉีกขาด และ (ง) การต้านแรงดันทะลุ
หมายเหตุ ค่าแรงดึงจนขาดของกระดาษ A4 มีค่าเฉลี่ย 5,244 kN/m จึงไม่เขียนลงบนกราฟ

3. การวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายในการผลิตอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์

จากขั้นตอนการผลิต และเงื่อนไขเบื้องต้นที่ไม่คำนึงถึงต้นทุนคงตัวในการผลิตจากมูลค่าของเตาไมโครเวฟและเครื่องอัลตราโซนิก ทำให้สามารถแยกมูลค่าการต้นทุนการผลิตอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ได้เป็น 2 จำพวก ได้แก่ 1) สารไทเทเนียมไดออกไซด์ (เกรดห้องทดลอง) ราคา 2,000 บาท/กิโลกรัม 2) ค่าไฟฟ้าที่ใช้ในการสังเคราะห์อนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ ยูนิตละ 5 บาท เพื่อใช้กับเตาไมโครเวฟขนาด 1,100 วัตต์ เป็นเวลา 60 นาที และเครื่องอัลตราโซนิกขนาด 660 วัตต์ เป็นเวลา 15 นาที จากข้อมูลการวิเคราะห์ห้มูลค่าเพิ่มในการผลิตอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ แสดงในตารางที่ 3 พบว่าเมื่อผสมอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ปริมาณ 1 กรัม ลงในน้ำตะโก 100 มิลลิลิตร ทาด้วยแปรงทาสี (กว้างประมาณ 6.5 เซนติเมตร) จำนวน 1 ครั้ง ซึ่งเคลือบกระดาษสาได้พื้นที่ 0.45 ตารางเมตร มีต้นทุนการผลิตประมาณ 4.80 บาทต่อกระดาษสา 1 ตารางเมตร และจากเงื่อนไขที่เหมาะสมที่สุดของการผสมอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ปริมาณ 2 กรัม (เคลือบ 1 ครั้ง) ทำให้มีค่าใช้จ่ายเพิ่มประมาณ 10 บาทต่อตารางเมตรของกระดาษสา

บทสรุปและข้อเสนอแนะ

การเคลือบสารผสมของน้ำตะโกและสารนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์บนกระดาษสาทำให้สมบัติการกันแสงสีขาวยและรังสี UV ดีขึ้นอย่างชัดเจนเทียบกับกระดาษสาที่เคลือบด้วยน้ำตะโกอย่างเดียวหรือกระดาษสาเปล่า การเคลือบซ้ำหรือเพิ่มปริมาณของอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นการเพิ่มความสามารถในการกันแสงและรังสี UV ให้ดียิ่งขึ้น ในขณะที่การเคลือบซ้ำด้วยน้ำตะโกไม่แสดงผลการเพิ่มขึ้นของการกันแสงดังกล่าว ร้อยละในการกันแสงสีขาวยของกระดาษสาเปล่ากับกระดาษสาที่เคลือบด้วยน้ำตะโกมีค่าประมาณร้อยละ 40 เมื่อเพิ่มปริมาณอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ส่งผลให้ร้อยละของการกันแสงสีขาวยเพิ่มอยู่ในช่วงประมาณร้อยละ 50 ถึง 70 ส่วนสมบัติการกันรังสี UV ของกระดาษสาที่เคลือบด้วยน้ำตะโกช่วง 1 ถึง 5 ซ้ำ มีค่าคงตัวประมาณร้อยละ 80 การเพิ่มอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ทำให้ความสามารถในการกันรังสี UV เพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 100 เมื่อเคลือบซ้ำตั้งแต่ 3 ครั้งขึ้นไป สมบัติเชิงกล 4 ชนิดที่ทดสอบ ได้แก่ การทนแรงดึงจนขาด การต้านการหักพับ การทนแรงฉีกขาด และการทนแรงดันทะลุของกระดาษสาเปล่า ต่ำกว่ากระดาษที่ทาเคลือบด้วยน้ำตะโกหรือน้ำตะโกผสมอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ทุกกรณี การทนแรงดึงจนขาดมีลักษณะวกกลับเมื่อเพิ่มจำนวนครั้งในการทำ และมีค่าต่ำสุดอยู่ที่การทำสองครั้ง ความแข็งแรงสูงสุดปรากฏเมื่อมีอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ผสมอยู่ในปริมาณ 2 กรัม สมบัติการทนแรงฉีกขาดและการทนแรงดันทะลุ มีค่าเพิ่มขึ้นตามจำนวนครั้งที่เคลือบและปริมาณอนุภาคนาโนไทเทเนียมที่เพิ่มขึ้น นั่นหมายความว่าปริมาณอนุภาคนาโนไทเทเนียมที่เพิ่มขึ้นไปเสริมให้การต้านการฉีกขาดและทนแรงดันทะลุได้ดีกว่าเดิม ในทางกลับกัน ปริมาณอนุภาคนาโนไทเทเนียมที่เพิ่มขึ้นกลับทำให้กระดาษเปราะเนื่องจากมีวัสดุที่เป็นของแข็งไปเคลือบทับทำให้สมบัติการต้านการหักพับด้อยลงเรื่อยๆ ตามปริมาณอนุภาคที่เพิ่มขึ้นจากการเคลือบซ้ำหรือปริมาณที่เพิ่มในน้ำเคลือบ การทดลองสามารถสรุปได้ว่า เจือปนปริมาณและจำนวนครั้งที่เคลือบกระดาษที่เหมาะสมคืออนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ 2 กรัม ผสมในน้ำตะโก 100 มิลลิลิตร และทาเคลือบ 1 ครั้ง

เนื่องจากอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์เตรียมจากสารตั้งต้นเกรดห้องปฏิบัติการ ทำให้มีราคาแพง ควรมีการทดลองหาความแตกต่างของสมบัติข้างต้นจากสารตั้งต้นเกรดการค้า (Commercial Grade) เพื่อลดต้นทุนในการผลิตตลอดจนหาแนวทางในการเคลือบสารดังกล่าวในระดับอุตสาหกรรมกระดาษสาที่เป็นอุตสาหกรรมพื้นบ้านตามภูมิปัญญาไทย

ตารางที่ 3 การคำนวณมูลค่าการผลิตอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์

รายการ	มูลค่าต่อหน่วย	มูลค่า (บาท/Batch)/เงื่อนไข
(I) การผลิตอนุภาคนาโน เงื่อนไข: 1 Batch ผลิตสารได้ 30 กรัม		
1. สารตั้งต้น (TiO ₂)	2,000 บาท/กิโลกรัม	มูลค่า = (0.030 kg) x (2,000 บาท/kg) = 60 บาท/30 กรัม
2. พลังงานไฟฟ้า	5.0 บาท/หน่วยไฟฟ้า	
2.1 เตาไมโครเวฟ 1.1 kW, 60 นาที หรือ 1 ชั่วโมง		พลังงานไฟฟ้า = (1.1 kW) (1 hr) = 1.1 Unit ค่าพลังงานไฟฟ้า = (1.1 x 5.0) = 5.50 บาท
2.2 เครื่องอัลตราโซนิก 0.660 kW, 15 นาที หรือ 0.25 ชั่วโมง		พลังงานไฟฟ้า = (0.66 kW) (0.25 hr) = 0.165 Unit ค่าพลังงานไฟฟ้า = (0.165 x 5.0) = 0.825 บาท
รวมมูลค่าเพิ่มทั้งหมด		= 60 + 5.50 + 0.825 = 66.325 บาท/Batch
นั่นคือ อนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์มีมูลค่า		= $\frac{66.325}{30}$ = 2.21 บาท/กรัม
(II) อนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เคลือบบนพื้นที่ 1 ตารางเมตร		
เงื่อนไข: จากการทดลองพบว่า เมื่อผสมอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ 1 กรัม ในน้ำตะโก 100 มิลลิลิตร เคลือบบนกระดาษสาได้พื้นที่ 0.45 ตารางเมตร (เคลือบ 1 ครั้ง)		
ดังนั้น ถ้าต้องการทำสารละลายบนพื้นที่ 1 ตารางเมตร ต้องใช้สารนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์จำนวน = $\frac{0.45}{30}$ = 2.23 กรัม (น้ำตะโก 222.22 มิลลิลิตร) คิดเป็นมูลค่า = (2.23 กรัม) (2.21 บาท/กรัม) = 4.93 บาท		

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้เป็นส่วนหนึ่งของการฝึกทักษะวิจัยของนักศึกษาระดับปริญญาตรีสาขาวิชาฟิสิกส์ ภาคใต้โครงการวิจัยเรื่องโครงการวิจัยเพื่อพัฒนาครู มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงใหม่ด้วยภูมิปัญญากระดาษสา ที่ได้รับการสนับสนุนงานวิจัยจากสำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา ประจำปีงบประมาณ 2554 ที่มี ดร.ศุภกฤษ เมธีโกคพงษ์ เป็นหัวหน้าโครงการวิจัย (ศุภกฤษ เมธีโกคพงษ์ และคณะ, 2555) และได้รับความอนุเคราะห์ให้ใช้อุปกรณ์ทดสอบสมบัติเชิงกลจากคณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

เอกสารอ้างอิง

- กมลพรรณ ลาสนันท์. 2554. **การสังเคราะห์อนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยเทคนิคไมโครเวฟ**. รายงานการวิจัยระดับปริญญาตรี คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงใหม่.
- จักรพันธ์ จอมแสนปิง. 2556. **อิทธิพลของอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ต่อสมบัติทางแสง สมบัติเชิงกล และการยับยั้งแบคทีเรียที่มีต่อกระดาษสา**. รายงานการวิจัยระดับปริญญาตรี คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงใหม่.
- ทิพวรรณ เทพวงศ์. 2554. **อิทธิพลของอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ผสมในน้ำเคลือบตะโกต่อการส่องผ่านแสง และความคงทนของกระดาษสา**. รายงานการวิจัยระดับปริญญาตรี คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงใหม่.
- ปกรณพิสิษฐ์ เลิศวิริยกุล. 2554. **ผลของอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีต่อการติดสีย้อมและการยับยั้งแบคทีเรียของเส้นใยผ้าฝ้ายพื้นเมือง**. รายงานการวิจัยระดับปริญญาตรี คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงใหม่.
- วิวัฒน์ อรรถนพานุรักษ์. 2545. **การตรวจสอบและควบคุมคุณภาพเยื่อและกระดาษสา**. งานวิจัยและพัฒนาเกี่ยวกับการผลิตเยื่อและกระดาษจากปอสา สถาบันค้นคว้าและพัฒนาผลิตผลทางการเกษตรและอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- ศุภกฤษ เมธีโกคพงษ์ และคณะ. 2555. **โครงการวิจัยเพื่อพัฒนาครุ มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงใหม่ด้วยภูมิปัญญากระดาษสา**. สถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงใหม่.
- Afsharpour, M., Rad, F. T., Malekian, H. 2011. New cellulosic titanium dioxide nanocomposite as a protective coating for preserving paper-art-works. **Journal of Cultural Heritage**. 12, 380-383.