



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการวิจัยขนาดเล็กเรื่อง การศึกษากาวผสมยางอียอกซีไดซ์กับ
กาวฟีนอลฟอร์มัลดีไฮด์ในการติดไม้

โดย วันชาติ ปรีชาติวงศ์

พฤษภาคม 2552

สัญญาเลขที่ RDG5150052

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการวิจัยขนาดเล็กเรื่อง การศึกษาความสัมพันธ์ของ
การฟีนอลฟอร์มัลดีไฮด์ในการติดไม้

ผู้วิจัย

วันชาติ ปรีชาติวงศ์

สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์และทรัพยากร มหาวิทยาลัยวลัยลักษณ์

ชุดโครงการยางพารา

สนับสนุนโดยสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.)
(ความเห็นในรายงานนี้เป็นของผู้วิจัย สกว. ไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป)

บทสรุปย่อรายงานสำหรับผู้บริหาร

ชื่อโครงการ การศึกษาการผสมยางอีพอกซีไดซ์กับกาวยีนอลฟอร์มัลดีไฮด์ในการติดไม้

Study on Hybrid Adhesive of Epoxidized Natural Rubber and Phenol-Formaldehyde
as Wood Adhesive

ชื่อหัวหน้าโครงการ หน่วยงานสังกัด และที่อยู่

ชื่อ-สกุล ผศ.ดร. วันชาติ ปรีชาดิวงค์
หน่วยงาน สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์และทรัพยากร มหาวิทยาลัยวลัยลักษณ์
ที่อยู่ อ.ท่าศาลา จ.นครศรีธรรมราช 80160
โทรศัพท์ 084-054-0888 Fax: 075-672399 E-mail wanchart@yahoo.com

นักศึกษา นายวัชร ผลเจริญ และ นางสาวอาทิตย์ ห่วงงาม

ระยะเวลาดำเนินการ 9 เดือน + ขอยายเวลา 1 เดือน 15 วัน

ตั้งแต่วันที่ 15 กรกฎาคม 2551- 29 พฤษภาคม 2552

ปัญหาที่ทำวิจัย และความสำคัญ

เนื่องจากว่าในอุตสาหกรรมไม้ ได้มีการใช้กาวยีนอล formaldehyde (PF) และกาวยีน isocyanate กันอย่างแพร่หลาย แต่การมีราคาค่อนข้างสูง จึงได้มีแนวคิดที่จะใช้ยางธรรมชาติอีพอกซีไดซ์ (Epoxidized Natural Rubber, ENR) มาผสมในกาวยีน PF เพื่อศึกษาค่าความแข็งแรงของกาวยีนผสม และกาวยีนผสมเองน่าจะมีการปลดปล่อยฟอร์มัลดีไฮด์ซึ่งเป็นสารพิษในปริมาณที่น้อยกว่า เนื่องจากได้มีส่วนผสมของกาวยีน PF ในกาวยีนผสม

วัตถุประสงค์

เพื่อศึกษาพฤติกรรมของกาวยีนระหว่าง ยางอีพอกซีไดซ์ กับ กาวยีนอลฟอร์มัลดีไฮด์ โดยจะดูสมบัติเชิงกลของกาวยีนผสม และไม้ที่ติดด้วยกาวยีนผสมนี้

ผลการดำเนินงาน

จากการศึกษาสมบัติการติดประสานของยาง ENR-50 กาวยีนอล formaldehyde และกาวยีนผสม 4 อัตราส่วน ระหว่าง ENR-50 กับ PF ในสัดส่วน 20: 80, 40:60, 60:40, 80: 20 พบว่า กาวยีนที่ cure ที่ 150°C เป็นเวลา 20 นาที เมื่อมีการผสม ENR ลงไปในกาวยีน PF ค่าความแข็งแรงของกาวยีนมีค่า

ลดลงอย่างต่อเนื่องตามปริมาณยาง ENR ที่เติม และพบว่าเมื่อนำกาวผสมไปแช่น้ำ ค่าความแข็งแรงจะลดลงเหลือ 40-90 % ของค่าเริ่มต้น แต่อย่างไรก็ตาม ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานที่ได้มีค่าค่อนข้างมาก ทำให้ไม่สามารถสรุปแนวโน้มของ % ความแข็งแรงหลังแช่น้ำได้อย่างชัดเจน

ในการศึกษาการเพิ่ม cure time พบว่าการใช้เวลา 30 นาทีและ 40 นาที มีผลให้ยาง ENR มีการเชื่อมขวางมากขึ้น แต่ขณะเดียวกัน ด้วยเวลาที่มากขึ้น กาว PF อาจเกิดการเสื่อมสภาพ ทำให้ค่าความแข็งแรงของกาวผสมที่ได้มีค่าไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ แต่สำหรับชิ้นตัวอย่างที่ผ่านการแช่น้ำ พบว่าเมื่อ cure time เพิ่มขึ้น ความแข็งแรงของกาวมีแนวโน้มลดลง

การวิเคราะห์ผิวของกาวหลังจากทดสอบชิ้นตัวอย่างพบว่า กาว PF และยาง ENR ไม่ได้ผสมเป็นเนื้อเดียวกัน ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดสอบด้วยเครื่อง DSC ซึ่งพบ T_g ของยาง ENR มีค่าประมาณ -22°C โดยไม่ขึ้นกับส่วนผสม

สรุปผลการวิจัย

1. เมื่อมีการเติมยาง ENR-50 ลงไปในกาว PF พบว่าค่าความแข็งแรงของกาวลดลง เนื่องจากว่าความแข็งแรงของยาง ENR มีค่าต่ำกว่ากาว PF
2. เมื่อมีการนำชิ้นตัวอย่างไปแช่น้ำ พบว่าความแข็งแรงของกาวลดลง โดยเฉพาะอย่างยิ่งในส่วนผสมที่มียาง ENR ในสัดส่วนที่สูง เพราะยาง ENR สามารถดูดน้ำและเกิดการบวมตัว
3. การเพิ่ม cure time จาก 20 นาทีเป็น 30 นาทีและ 40 นาที ทำให้กาว PF เริ่มเกิด degradation มากขึ้น ซึ่งสังเกตจากสีของกาวที่เปลี่ยนเป็นสีเข้มขึ้นและดำในที่สุด
4. จากการศึกษาด้วยเครื่อง DSC พบว่ากาว PF และยาง ENR ไม่ได้เกิดการผสมกัน

ข้อเสนอแนะ

1. เนื่องจากว่า dicumyl peroxide ใช้เวลานานในการทำให้เกิด crosslinking ในระบบของ ENR-50 ดังนั้นน่าจะมีการศึกษาระบบ curing อื่น เพื่อศึกษาว่าสามารถทำให้ค่า maximum shear strength ของกาวที่ดีกว่านี้
2. ปัญหาอย่างหนึ่งที่พบในการทดสอบกาวที่ใช้ติดไม้คือ การเตรียมชิ้นตัวอย่างที่ต้องมีการบากชิ้นตัวอย่างซึ่งทำได้ค่อนข้างยาก หากมีการบากน้อยเกินไป จะทำให้ชิ้นไม้ที่บากไม่ได้ขาดจากกัน ซึ่งมีผลทำให้ค่า maximum shear stress ที่ได้มีค่าสูงเกินจริง แต่หากบากลึกเกินไป จะไปทำให้ชิ้นไม้ด้านล่างเกิดรอยขาดได้ ซึ่งมีผลให้ค่า strength ที่ได้ต่ำเกินจริง ดังนั้นผลการทดลองที่ได้จึงมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานค่อนข้างสูง วิธีหนึ่งในการศึกษา adhesion strength คือ นำกาวไปติดกับแผ่นฟิล์มพลาสติก เช่น PET film เพื่อดูค่า strength

3. ควรมีการศึกษาว่า กาวผสมระหว่าง PF กับ ENR มีค่าการปลดปล่อยฟอร์มัลดีไฮด์ (Formaldehyde emission) น้อยกว่ากาว PF หรือไม่

ผลงานทางวิชาการที่คาดว่าจะเกิดขึ้น

คาดว่าจะได้บทความทางวิชาการตีพิมพ์ในวารสารภายในประเทศ 1 เรื่อง

บทคัดย่อ

ในอุตสาหกรรมไม้ กาวเป็นวัสดุที่ใช้ในปริมาณไม่มาก แต่มีราคาสูง ในปัจจุบัน กาวที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมไม้ ได้แก่ กาวฟีนอลฟอร์มัลดีไฮด์ (PF) กาวยูเรียฟอร์มัลดีไฮด์ และกาวไอโซไซยานาต งานวิจัยชิ้นนี้ได้ศึกษาความเป็นไปได้ในการผสมยางอีพอกไซด์ (Epoxidized Natural Rubber, ENR) กับกาวฟีนอลฟอร์มัลดีไฮด์ในการติดไม้

งานวิจัยเรื่องนี้ศึกษาสมบัติความเป็นกาวของกาวผสมระหว่าง ENR-50 ซึ่งมีหมู่อีพอกไซด์อยู่ 50% โดยโมล กับ กาว PF ในสัดส่วนต่าง ๆ โดยทำการอัดร้อนที่อุณหภูมิ 150°C เป็นเวลา 20 นาที ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่า ยาง ENR มีสมบัติความเป็นกาวที่ดีกว่ากาว PF ส่งผลให้ความแข็งแรงของกาวผสมลดลงตามปริมาณของยาง ENR ที่เติมเข้าไป นอกจากนี้ยังพบว่าสัดส่วนของยาง ENR ที่มากขึ้นส่งผลให้ความคงทนของกาวเมื่อนำไปแช่น้ำมีค่าลดลง ซึ่งเกิดจากการดูดซับน้ำของยาง ENR

ได้มีการศึกษาผลของเวลาที่ใช้ในการอบสุกของกาวผสม โดยเพิ่มเวลาเป็น 30 นาที และ 40 นาที ผลปรากฏว่า การเพิ่มเวลาไม่ผลความแข็งแรงของกาวมีแนวโน้มลดลง โดยเฉพาะอย่างยิ่งในการทดสอบความทนทานของกาวโดยการแช่น้ำ ซึ่งคาดว่าเกิดจากการที่กาว PF เกิดการเสื่อมสภาพหรือ overcure

การศึกษาผิวของชิ้นตัวอย่างหลังทดสอบแสดงให้เห็นว่า กาว PF และยาง ENR ไม่ได้ผสมเป็นเนื้อเดียวกัน ซึ่งสอดคล้องกับผลที่ได้จากเครื่อง Differential Scanning Calorimeter (DSC) โดยที่ค่าอุณหภูมิคล้ายแก้ว (T_g) ของยาง ENR-50 มีค่าคงที่ประมาณ -22°C ไม่ขึ้นกับส่วนผสมของกาวที่ใช้

Abstract

In wood industries, adhesive is used in a small amount, but high cost. Wood adhesives that are widely used in industries are Phenol-Formaldehyde (PF), Urea- Formaldehyde (UF) and Isocyanate. This research project studied feasibility to use Epoxidized Natural Rubber (ENR) and PF as wood adhesives.

This work studied blend of Epoxidized Natural Rubber having epoxide group of 50% by mole (ENR-50) and Phenol-Formaldehyde (PF) as wood adhesive by compression molding at 150°C for 20 minutes. The results showed that ENR-50 has lower adhesion strength than PF. Adhesive blend having a higher content of ENR-50 has a lower adhesion strength, and also a lower durability of glue after water-immersion since ENR-50 can absorb water. Increasing cure time to 30 and 40 minutes has tendency to decrease the adhesive strength, especially in durability test. This may be due to over-curing of PF. Fractured surfaces showed that phase separation of ENR and PF occurred in the blend. DSC results also showed a constant glass transition temperature at -22°C that is not affected by composition of blend.

2.1 ความสำคัญและความเป็นมาของงานวิจัย

ปัจจุบันมีการเพิ่มมูลค่าทางในรูปของอนุพันธ์ต่าง ๆ ของอีพอกซีไธซ์ (ENR) ที่ได้รับการศึกษา อย่างกว้างขวาง ทั้งในการใช้เป็นกาว ทั้งกาวแบบ Pressure-sensitive adhesive (PSA) หรือใช้เป็น polymer electrolyte เนื่องจากเป็นยางอนุพันธ์ที่มีความยืดหยุ่นสูง และมีความแข็งแรงสูง ประกอบกับเป็นการเพิ่มมูลค่าให้กับยางพารา นอกจากนี้ยังมีการผสมยาง ENR กับ filler ชนิดต่าง ๆ เพื่อเพิ่มความแข็งแรง และประสิทธิภาพ

อุตสาหกรรมไม้มีการใช้กาวยูเรียฟอร์มาลดีไฮด์ กาวฟีนอลฟอร์มาลดีไฮด์ และกาวไดไอโซไซยานาต แต่เนื่องจากกาวในอุตสาหกรรมไม้ทั้ง 3 ชนิด มีราคาสูง แม้ว่าปริมาณกาวที่ใช้ในผลิตภัณฑ์จะมีร้อยละของ น้ำหนักที่ไม่สูง แต่เมื่อคิดเป็นร้อยละของราคาค้นทุนพบว่ามีค่าสูงมาก เนื่องจากกาวไดไอโซไซยานาตมี ราคาสูงกว่ากาวฟีนอลฟอร์มาลดีไฮด์ และได้มีการศึกษากาวผสม พบว่าสามารถลดต้นทุน โดยที่สมบัติ ของกาวผสมด้อยลงเพียงเล็กน้อยเท่านั้น

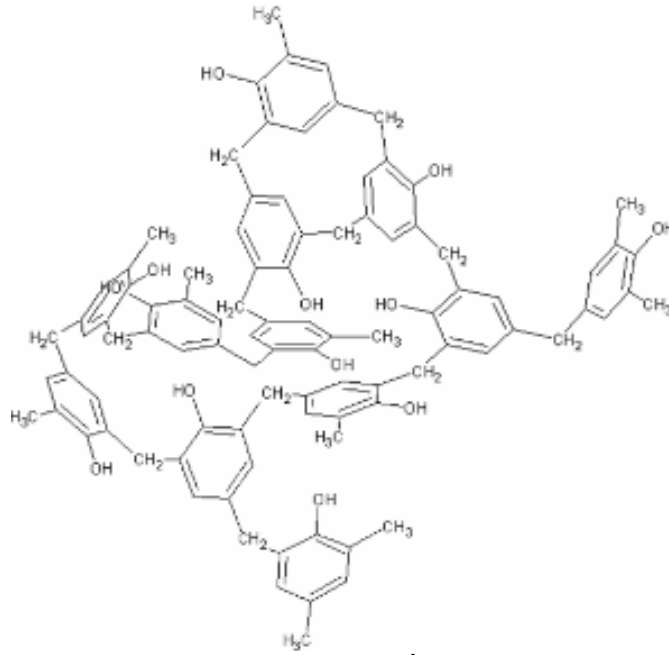
งานวิจัยชิ้นนี้จะศึกษาของกาวผสมระหว่างยาง ENR กับกาวฟีนอลฟอร์มาลดีไฮด์ในการติดไม้ โดยจะศึกษาสมบัติต่าง ๆ ของกาวผสม สมบัติการติดกัน และวิเคราะห์การลดต้นทุน

2.2 วัตถุประสงค์

เพื่อศึกษาพฤติกรรมของกาวผสมระหว่าง ยางอีพอกซีไธซ์ กับ กาวฟีนอลฟอร์มาลดีไฮด์ โดยจะดูสมบัติเชิงกลของกาวผสม และไม้ที่ติดด้วยกาวผสมนี้

2.3 ทฤษฎี แนวคิดในการวิจัย และผลงานที่เกี่ยวข้อง

กาวฟีนอลฟอร์มาลดีไฮด์ได้มีการนำมาใช้ในการติดไม้อย่างแพร่หลาย โครงสร้างของกาวฟีนอลฟอร์มาลดีไฮด์ ดังแสดงในรูปที่ 1 จะเห็นว่า โมเลกุลของกาวมีหมู่ไฮดรอกไซด์ซึ่งสามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนกับโมเลกุลของเซลลูโลสในไม้ได้ นอกจากนี้เนื้อกาวยังสามารถเกิด mechanical interlocking กับไม้ ซึ่งเป็นกลไกการเสริมการติดกัน [Schmidt 1998] โดยที่กาว PF จะเปลี่ยนสถานะจากของเหลวเป็นเจลแล้วกลายเป็นของแข็ง รวมทั้งสามารถเกิดการเชื่อมโยง (crosslinking) ที่อุณหภูมิ 160 °C [Zheng 2001] นอกจากนี้กาว PF เป็นกาวที่ไม่มีไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบ ทำให้มีความต้านทานต่อการเสื่อมสภาพจากความร้อนได้ดี นอกจากนี้ยังต้านทานต่อการกัดกร่อนของสารอินทรีย์ต่าง ๆ ได้ดี แต่เนื่องจากกาวฟีนอลฟอร์มาลดีไฮด์มีราคาค่อนข้างสูง ดังนั้นหากสามารถนำกาวชนิดอื่นที่มีราคาต่ำกว่ามาผสม โดยที่สมบัติไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก น่าจะส่งผลดีต่ออุตสาหกรรมกาว



รูปที่ 1 โครงสร้างสามมิติของ phenol formaldehyde เมื่อเกิดการจับตัวเป็นเครือข่าย

ยางอีพอกซีไดซ์เป็นยางอนุพันธ์ของยางธรรมชาติ โดยมีการเติมหมู่อีพอกไซด์ลงไปในสายโซ่พอลิเมอร์ [Gelling 1991] โดยทั่วไปจะมีการเติมหมู่ดังกล่าวลงไป 25 % หรือ 50 % โดยจะเรียก ENR-25 และ ENR-50 ตามลำดับ โดยที่ยางทั้งสองมีค่าอุณหภูมิกลายแก้ว (glass transition temperature, T_g) ประมาณ -45 และ -20 °C ตามลำดับ เนื่องจากมีการเติมหมู่อีพอกไซด์ไปแบบสุ่มทำให้ยางที่ได้มีโครงสร้างแบบโคพอลิเมอร์แบบสุ่ม ซึ่งสามารถตกผลึกได้ภายใต้ความเครียด (strain-induced crystallization) เช่นเดียวกับยางธรรมชาติ [Davies 1983]

โดยยาง ENR-50 มีความสามารถในการติดสูงกว่ายาง ENR-25 เนื่องจากยาง ENR-50 มีปริมาณหมู่อีพอกไซด์ซึ่งมีขั้วในปริมาณที่มากกว่า ENR-25

ค่า solubility parameter ของยาง ENR ดังแสดงในตารางที่ 1 [Gelling 1991] ซึ่งจะเห็นได้ว่าเมื่อหมู่อีพอกไซด์เพิ่ม ค่า solubility parameter เพิ่มขึ้น แสดงว่า ยาง ENR มีความมีขั้วเพิ่มขึ้น

ตารางที่ 1 ค่า solubility parameter ของ ENR ที่มีหมู่อีพอกไซด์ในปริมาณต่าง ๆ

ENR (% epoxide)	solubility parameter (cal/cm^3) ^{1/2}
0	8.17
26	8.5
48	8.9
71	9.1

การคำนวณค่าทางเทอร์โมไดนามิกส์เพื่อหาความเป็นไปได้ในการผสมกัน

Solubility parameter of PF

ค่า solubility parameter สำหรับกาว PF ที่เกิดการจับตัวเป็นเครือข่ายสามมิติ แล้วสามารถคำนวณได้ โดยใช้ group molar attraction constant มาคำนวณ ดังสมการ

$$\delta = \frac{\rho \sum G}{M}$$

โดยค่า δ = solubility parameter $(\text{cal/cm}^3)^{1/2}$

ρ = density (g/cm^3)

G = group molar attraction constant

M = molecular weight of repeating unit (g/mol)

จากค่า G ในตาราง [Sperling] เราสามารถคำนวณได้ว่า

$$G = 658 (\text{phenylene}) - 2 \times 90 (\text{H}) + 1.5 \times 133 (\text{CH}_2) + 160 (\text{OH}) = 837.5$$

$$M = 74 + 17 + 1.5 \times 14 = 112 \text{ g/mol}$$

$$\text{Density} = 1.20 \text{ g/cm}^3$$

$$\text{ดังนั้นค่า solubility parameter} = 1.20 \times 837.5 / 112 = 8.97 (\text{g/cm}^3)^{1/2}$$

จะเห็นได้ว่าค่า solubility parameter ของ PF กับ ENR-50 มีค่าใกล้เคียงกัน ดังนั้นหากสารทั้งสองชนิดสามารถเกิด Interpenetrating Polymer Network (IPN) สมบัติความเป็นกาวของกาวผสมน่าจะมีค่าที่ดี

จากการศึกษาการผสมระหว่าง PF และกาวไอโซไซเนต [Preechatiwong 2007] พบว่ากาวผสมสามารถลดต้นทุนการผลิตได้ โดยที่สมบัติเปลี่ยนแปลงไม่มากนัก ดังนั้นการผสมยาง ENR-50 ลงไปในกาว PF น่าจะส่งผลในการลดต้นทุนได้ โดยที่หม้อปอกไซค์ในยาง ENR-50 สามารถเกิด ring opening และอาจเกิดปฏิกิริยากับกาว PF ได้ ทำให้มี miscibility อยู่ในระดับหนึ่ง

2.4 วิธีการ

2.4.1 การเตรียมชิ้นตัวอย่าง

1. ศึกษาสมบัติของกาว PF จากคู่มือที่ได้จากบริษัทผลิตกาว Dynea ประเทศสิงคโปร์ ระบุว่า ณ อุณหภูมิ 160°C กาวมีเวลาในการสุกตัว 6-7 นาที
2. ศึกษาสมบัติของยาง ENR-50 (Epoxyrene 50 ของบริษัท DynaThai) โดยการบดยาง ENR-50 ที่ผสม dicumyl peroxide ปริมาณ 2 phr ซึ่งเป็น crosslinking agent ด้วยเครื่อง

two roll mill (การผสมด้วย internal mixer ได้ผลไม่ดี เพราะ dicumyl peroxide ติดอยู่ที่ผนังภายในของห้องเครื่อง ส่งผลต่อระยะเวลาในการสุกตัวคลาดเคลื่อน) จากนั้นทดสอบด้วย Oscillating Disk Rheometer (ODR) ใช้ความร้อนที่อุณหภูมิ 160°C ได้ระยะเวลาในการสุกตัวที่ 41 นาที

3. เตรียมชิ้นไม้(ไม้ยางพารา) ตามแบบ Two-ply tensile shear specimen ให้ได้ขนาดกว้าง 25 ± 0.5 mm. ยาว 80 ± 3 mm. แล้วปรับให้มีความชื้นเท่ากันโดยการนำเข้าห้องควบคุมความชื้นที่มีความชื้นสัมพัทธ์ 65% อุณหภูมิ 20°C เป็นเวลา 7 วัน



รูปที่ 2 การเตรียมชิ้นไม้แบบ Two-ply tensile shear specimen

4. ผสมยาง ENR-50 กับ dicumyl peroxide 2 phr ด้วย two-roll mill หลังจากนั้นจึงละลายใน toluene ในอัตราส่วน 1:5 (weight : volume) ในบีกเกอร์และปิดด้วยแผ่นพาราฟิล์ม เพื่อป้องกันการระเหยของ toluene ตามสัดส่วนของแต่ละส่วนผสม ดังแสดงใน ตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ปริมาณยาง ENR-50 และ toluene ที่ต้องใช้ในการเตรียมสารละลาย ENR

สัดส่วนของกาว	ปริมาณยาง ENR-50 (g)	ปริมาณ toluene (ml)
100% ENR-50	40	200
80% ENR-50 : 20% PF	32	160
60% ENR-50 : 40% PF	24	120
40% ENR-50 : 60% PF	16	80
20% ENR-50 : 80% PF	8	40
100% PF	-	-

หลังจากผสมแล้วทิ้งไว้เป็นเวลา 24 ชั่วโมงเพื่อให้เกิดการละลายเข้ากัน ในสัดส่วนของ 80% , 60% , 40% และ 20% ENR-50 จะผสมกับ PF ในขั้นตอนต่อไป

5. ระบาย Toluene ออกด้วยการเปิดภาชนะออกนาน 3-4 ชั่วโมง นำยาง ENR-50 ที่ละลายด้วย toluene แล้วผสมกับกาว PF (กาว PF ที่ใช้มีความเข้มข้น 40%) ควบคุมปริมาณกาว ในรูปของน้ำหนักกาวแห้ง (กรัม) ต่อพื้นที่ทา กาว ซึ่งใช้ 200 กรัมต่อตารางเมตร

การคำนวณหาปริมาณกาวที่ใช้ต่อพื้นที่ของชิ้นไม้

$$\text{พื้นที่ของชิ้นไม้ โดยประมาณ} = 2.50 \text{ cm} \times 8.00 \text{ cm} = 20.0 \text{ cm}^2$$

จากปริมาณกาวที่ใช้ 200 g/m² จะได้ว่า

$$\text{พื้นที่ } 1 \text{ m}^2 \text{ หรือ } 10,000 \text{ cm}^2 \text{ ใช้กาว } 200 \text{ g}$$

$$\text{ดังนั้นพื้นที่ } 20 \text{ cm}^2 \text{ ใช้กาว } (200 / 10,000) \times 20 = 0.40 \text{ g}$$

สารละลายกาว PF มีปริมาณเนื้อกาว 40% ดังนั้นในการคำนวณส่วนผสมจะคิดปริมาณเนื้อกาวแท้จริง ตัวอย่างการเตรียมกาวสำหรับชิ้นตัวอย่าง 100 ชิ้น ซึ่งต้องใช้ปริมาณกาว 40 กรัม ดังแสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ปริมาณ ENR และ PF ที่ใช้ในการเตรียมสารละลายกาวผสม

สัดส่วนของกาว	ปริมาณยาง ENR-50 ที่ใช้(g)	น้ำหนักกาวแห้ง PF (g)	ปริมาณกาว PF ที่ใช้ (g)
100% ENR-50	40	-	-
80% ENR-50 : 20% PF	32	8	20
60% ENR-50 : 40% PF	24	16	40
40% ENR-50 : 60% PF	16	24	60
20% ENR-50 : 80% PF	8	32	80
100% PF	-	40	100

6. นำชิ้นไม้ออกจากห้องควบคุมความชื้นแล้ววัดขนาดด้วยเวอร์เนียวัดความละเอียด 0.05 mm เพื่อหาพื้นที่ จากนั้นจึงคำนวณหาแรง และความดัน ที่ใช้ในการอัดชิ้นไม้ โดยที่แรงดันที่ต้องใช้ คือ 0.6 MPa
7. ทากาวให้ทั่วชิ้นไม้ตามปริมาณที่คำนวณได้ โดยต้องให้กาวกระจายให้ทั่วทั้งชิ้นไม้ทั้งสองแผ่นที่ต้องการจะติดพร้อมทั้งจับเวลา open assembly time และ closed assembly time

ข้อควรระวังในขั้นตอนนี้ คือ

- 1) ควรใช้เครื่องชั่งน้ำหนักแบบละเอียดในการชั่งกาว
 - 2) ขณะทา กาวไม่ควรใช้อุปกรณ์อื่นช่วย เพราะอาจทำให้ปริมาณกาวคลาดเคลื่อนได้
 - 3) เวลา open assembly time และ closed assembly time ควรใกล้เคียงกัน
8. นำชิ้นไม้ที่ทา กาวแล้ว อัดด้วยเครื่องอัดร้อนที่อุณหภูมิ 150°C (เพราะที่ 160°C เกิดการ fluctuate ของอุณหภูมิค่อนข้างมาก) ใช้เวลาในการอัด 20 นาทีต่อ 1 ชิ้นทดสอบ ซึ่งมีทั้งหมด 6 ส่วนผสม (หรือ 30 และ 40 นาทีในการทดลองหาผลของ cure time โดยใช้เฉพาะส่วนประกอบที่ให้ผลที่ดี) ในขั้นตอนี้ ควรอัดครั้งละ 1 ชิ้นทดสอบ เพื่อไม่ให้ความดันที่ใช้ในการอัดเปลี่ยนแปลง
9. เมื่อทำการอัดแล้ว นำชิ้นทดสอบไปทำการปรับสภาพที่ความชื้นสัมพัทธ์ $65\pm 5\%$ อุณหภูมิ $23\pm 2^{\circ}\text{C}$ ทันทีเพื่อป้องกันการเกิด oxidation เป็นเวลา 7 วัน หรือจนกว่าน้ำหนักจะคงที่

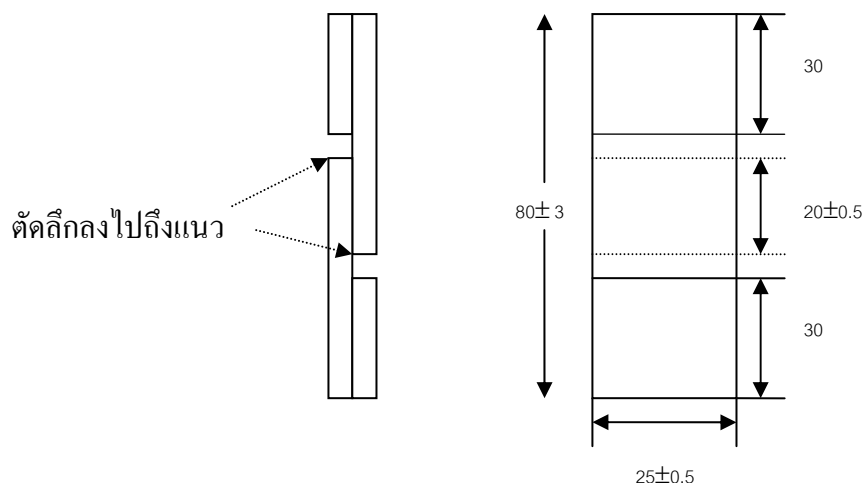
2.4.2 การทดสอบสมบัติความสามารถในการติดไม้

การทดสอบความสามารถในการติดไม้แบ่งออกเป็น 2 ประเภท

1. การทดสอบแรงสูงสุดที่ใช้ในการดึงจนชิ้นไม้ขาดออกจากกัน
2. การทดสอบความทนทานของกาวโดยการแช่น้ำ

การทดสอบแรงสูงสุดที่ใช้ในการดึงจนชิ้นไม้ขาดออกจากกัน

1. นำชิ้นไม้ที่ผ่านการอัดกาวและควบคุมความชื้นเป็นเวลา 7 วัน โดยการเตรียมชิ้นทดสอบแบบ Two-ply tensile shear specimen โดยตัดชิ้นทดสอบตามภาพ กว้าง 25 ± 0.5 mm. ยาว 80 ± 3 mm หนา 2.5 ± 0.5 mm ใช้เลื่อยขนาดเล็กตัดชิ้นทดสอบที่ระดับ 3 cm ลงไปลึกจนถึงแนว กาว ตาม มาตรฐาน ISO 6237:2003 “Adhesives-Wood-to-wood adhesive bonds-Determination of shear strength by tensile loading”



รูปที่ 3 ชิ้นตัวอย่างเพื่อทำการทดสอบการติดกาว

- ทดสอบการดึงโดยใช้เครื่อง Universal Testing Machine(UTM) และต้องดึงให้หลุดออกจากกัน ด้วยอัตราเร็ว (Crosshead speed) สม่ำเสมอ 1.0 mm/min เครื่อง UTM จะรายงานค่า Stress at Maximum Load , Load at Break , Stress at Break และ Maximum Load เมื่อได้ผลจากการทดสอบชิ้นตัวอย่างจำนวน 10 – 20 ตัวอย่าง แล้วนำมาหาค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard deviation) ของค่าดังกล่าว เพื่อที่จะดูความเป็นไปได้ของการทนต่อแรงดึงของชิ้นทดสอบที่ใช้กาวในสัดส่วนต่างๆ

การทดสอบความทนทานของกาวโดยการแช่น้ำ (Durability)

- นำชิ้นทดสอบที่ได้จากการอัดและผ่านการควบคุมความชื้นครบ 7 วัน มาแช่น้ำที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 72 ชั่วโมง จากนั้นปรับสภาวะที่อุณหภูมิห้อง ภายใต้อุณหภูมิชื้นสัมพัทธ์ 85-95% อีก 72 ชั่วโมง และนำชิ้นทดสอบไปทำการปรับสภาวะที่ความชื้นสัมพัทธ์ 65±5% อุณหภูมิ 23±2°C เป็นเวลา 7 วัน
- ทดสอบและรายงานผลแบบเดียวกับการทดสอบแรงเฉือนตามมาตรฐาน ISO 6237:2003 “Adhesives-Wood-to-wood adhesive bonds-Determination of shear strength by tensile loading”

คำนวณค่า อัตราความสามารถในการยึดติดต่อการต้านทานน้ำ (The retention rate of the water resisting adhesion strength , R (%)) โดยสมการดังต่อไปนี้

$$R = \frac{Y}{X} \times 100$$

เมื่อ	R	= อัตราความสามารถในการยึดติดต่อการต้านทานน้ำ
	X	= ความสามารถในการยึดติดภายใต้สภาวะปกติ
	Y	= ความสามารถในการยึดติดต่อการต้านทานน้ำ

เมื่อทดสอบสมบัติความสามารถในการติดไม้ทั้ง 2 ประเภทแล้ว นำมาดูความสามารถในการเข้ากันได้ (Miscibility) ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสงที่กำลังขยาย 50X , 100X และ 200X

การหาอุณหภูมิคล้ายแก้ว (Glass transition temperature)

ใช้เครื่อง Differential Scanning Calorimeter (DSC) ของ Mettler โดยใช้ heating rate 10 °C/min และใช้ช่วงอุณหภูมิ -50 °C ถึง 200 °C หรือใช้แบบ isothermal ในบางกรณีเพื่อศึกษาปฏิกิริยาที่เกิดขึ้น

2.5 ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

การศึกษาการ cure ของ ENR-50

ใช้ dicumyl peroxide 2 phr ผสมกับ ENR-50 และทำการวัดด้วย Oscillating Disk Rheometer (ODR) พบว่า cure time มีค่าประมาณ 40 นาที ดังแสดงในรูป



รูปที่ 4 กราฟระหว่างแรงบิดกับเวลาจากเครื่อง ODR

ผลของกาผสมต่อค่าความแข็งแรงของกา

1. PF 100 % ชินตัวอย่างมีความแข็งแรงสูงมาก และมีกาส่วนเกินอยู่ตามขอบของชินตัวอย่าง เนื้อกามีสีน้ำตาลเข้ม เมื่อนำไปทดสอบความแข็งแรงของกา จะไม่เกิดการ slip ของชินตัวอย่าง เมื่อดึงชินตัวอย่าง จะทำให้ชินตัวอย่างเกิดการแตกหัก
2. PF:ENR = 80: 20 เป็นตัวอย่างที่มี ENR เพียง 20 % ลักษณะชินตัวอย่างมีความแข็งแรงค่อนข้างสูง ในขณะทดสอบไม่เกิดการ slip
3. PF : ENR = 60: 40 เนื้อกามีสีน้ำตาลแดง และเมื่อนำไปดึง เมื่อแรงถึงผ่านจุดสูงสุด แรงจะลดลงอย่างรวดเร็ว
4. PF: ENR = 40: 60 เป็นชินตัวอย่างที่มียาง ENR ในสัดส่วนที่สูงกว่ากา PF ความแข็งแรงของกาไม่สูงมาก ดังนั้นต้องใช้ความระมัดระวังในการยึดชินตัวอย่างกับ clamp
5. PF: ENR = 20: 80 ชินตัวอย่างมีความแข็งแรงไม่มาก และเนื้อกาไม่ค่อยแข็งตัว มีลักษณะ soft และ elastic เพราะมีเนื้อกา PF เพียง 20% เท่านั้น คาดว่าค่า maximum shear strength คงไม่สูง
6. ENR 100% ความแข็งแรงค่อนข้างน้อย และเวลาทดสอบพบว่าเกิดการ slip และให้ค่า strength ที่ต่ำ

สำหรับชินตัวอย่างที่เตรียมโดยการ cure ที่ 150°C เป็นเวลา 20 นาที เมื่อนำไปทดสอบด้วยเครื่อง universal testing machine เพื่อหาค่า maximum shear force ที่ดึงจนชินตัวอย่างหลุดออกจากกัน จากค่า maximum shear stress พบว่าเมื่อมีการเติม ENR50 ลงไปใน PF ค่าความแข็งแรงของกาลดลงอย่างต่อเนื่อง ดังแสดงในตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ค่า maximum shear strength ที่ได้

ส่วนผสม	Maximum shear strength (MPa)	ค่าที่ทำนายจาก rule of mixture (MPa)
PF 100 %	5.72 ± 0.75	
PF 80 : ENR 20	3.89 ± 0.74	4.68
PF 60 : ENR 40	2.86 ± 0.50	3.65
PF 40 : ENR 60	2.42 ± 0.41	2.61
PF 20 : ENR 80	3.20 ± 0.61	1.58
ENR 100 %	0.54 ± 0.25	

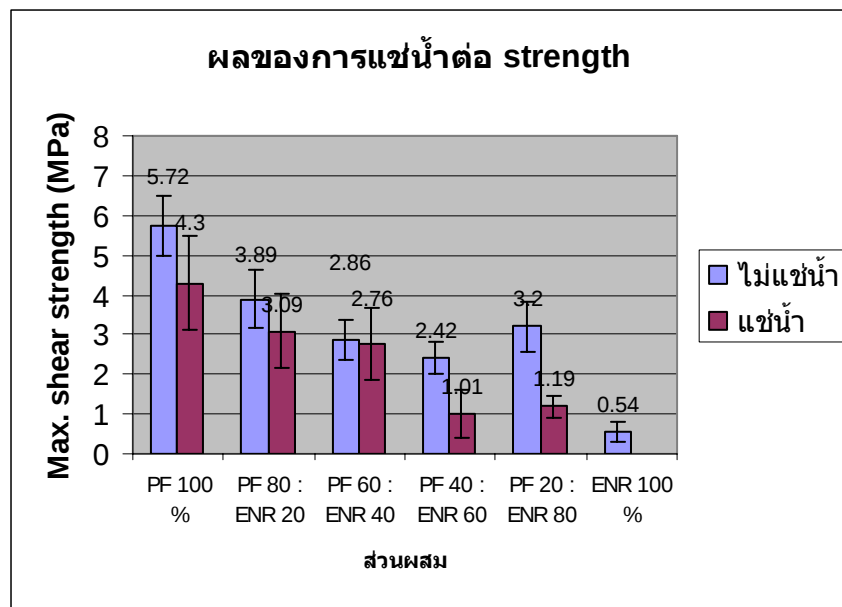
$$\text{Rule of mixture Equation: } \sigma = \sigma_1 v_1 + \sigma_2 v_2$$

จะเห็นว่าเมื่อผสมกาว PF ด้วยยาง ENR-50 ในสัดส่วนต่าง ๆ พบว่า เมื่อมีการเติม ENR ลงไป ค่าความแข็งแรงของกาวจะลดลงอย่างเห็นได้ชัด เนื่องจากว่ายาง ENR 50 มีค่า strength ที่ต่ำมาก เพียง 0.54 MPa ซึ่งมีค่าเพียง 10 % ของค่า strength ของกาว PF นอกจากนี้ยังพบว่าสำหรับ ส่วนผสมที่มี ENR 20 % หรือ 40 % ค่า strength ที่ได้มีค่าต่ำกว่าค่าที่ทำนายโดย Rule of mixture ซึ่งเป็นค่าที่ใช้คำนวณวัสดุเชิงประกอบโดยทั่วไป

หากนำชิ้นตัวอย่างที่ทดสอบแล้วไปดูด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง พบว่าแต่ละ องค์ประกอบแสดงให้เห็นถึงการแยก phase อย่างเห็นได้ชัด โดยเฉพาะที่กำลังขยาย 200 เท่า

การทดสอบ Durability

เมื่อนำชิ้นตัวอย่างไปทดสอบ durability โดยการแช่น้ำ พบว่ากาวมี strength ลดลง เนื่องจากยาง ENR ซึ่งมีหมู่ epoxide สามารถเกิดแรงดึงดูดกับน้ำ ซึ่งเป็นโมเลกุลมีขั้ว ทำให้ที่ ส่วนผสมที่มี ENR อยู่ในสัดส่วนที่สูง เช่น 60 % หรือ 80 % ค่า strength ที่ได้ลดลงอย่างเห็นได้ชัด ในขณะที่ส่วนผสมที่มี ENR เพียง 20 หรือ 40 % มีค่า strength ลดลงไม่มาก ดังแสดงในกราฟ



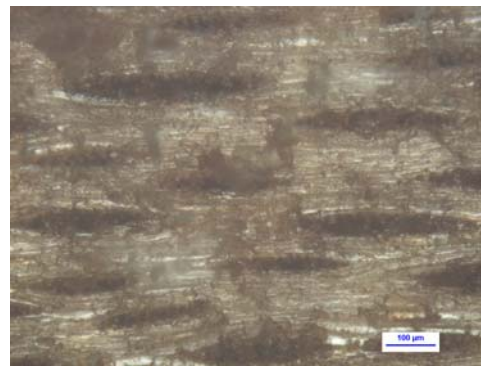
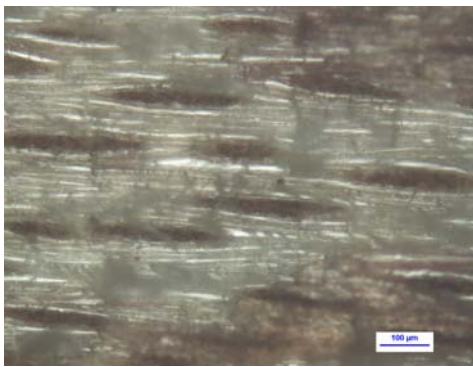
รูปที่ 5 ค่า maximum shear strength ของกาวทั้งสอง และ blend ทั้ง 4 องค์ประกอบ

โดยแท่งด้านซ้ายมือเป็นค่า strength ปกติ แต่แท่งด้านขวามือที่ติดกันเป็นกรณีที่แช่น้ำ จากผลที่ได้ แสดงให้เห็นว่า ส่วนผสมที่มี ENR ในปริมาณสูงไม่เหมาะกับการใช้งานในที่ที่มีความชื้นสูง

ภาพจากกล้องจุลทรรศน์

ชิ้นตัวอย่างที่ถูกทดสอบแล้ว ได้นำมาศึกษา failure locus ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง พบว่า ชิ้นตัวอย่างเกิดการ fail แบบ cohesive failure ในเนื้อกาบ เป็นการแสดงให้เห็นว่า เนื้อกาบมีความแข็งแรงไม่มากนัก สำหรับชิ้นตัวอย่างที่ผ่านการแช่น้ำ พบว่า ยาง ENR-50 เกิดการบวมตัว (swelling) ทำให้เมื่อมองด้วยกล้องจะเห็นการบวมตัวและภาพจะไม่ชัด เนื่องจากความหนาที่เพิ่มทำให้การ focus ที่ผิวทำได้ลำบาก

1. กาบ PF 100 % พบว่าแม้หลังแช่น้ำ กาบ PF ก็ไม่เกิดการบวมตัว

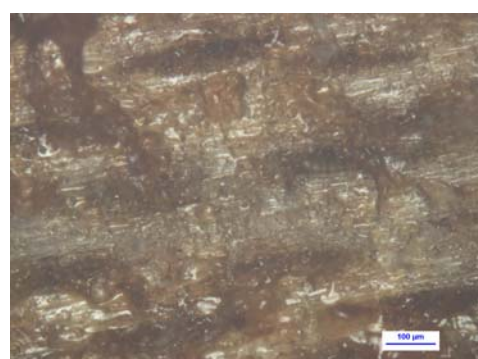
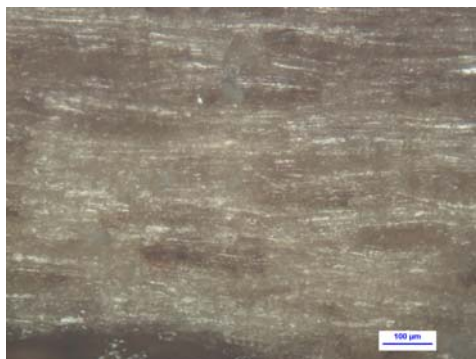


ก่อนแช่น้ำ

หลังแช่น้ำ

รูปที่ 6 ผิวของชิ้นตัวอย่างที่เตรียมจาก กาบ PF 100%

2. PF 80 % : ENR 20 % กรณีแช่น้ำ จะพบว่ากาบมีการบวมตัวและทำให้เห็นลักษณะใส และพองนูน

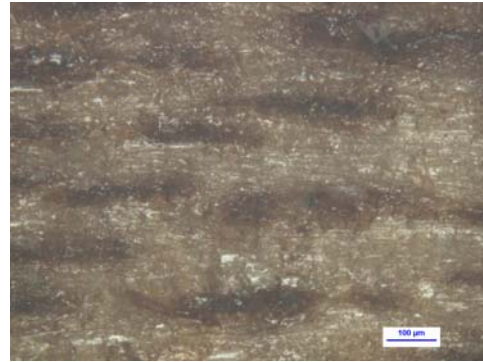
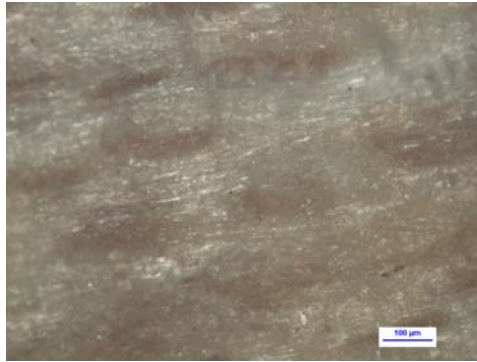


ก่อนแช่น้ำ

หลังแช่น้ำ

รูปที่ 7 ผิวของชิ้นตัวอย่างที่เตรียมจาก กาบ PF : ENR = 80:20

3. PF : ENR = 60: 40 จะเห็นว่าหลังแช่น้ำ ยาง ENR เกิดการบวมตัวอย่างเห็นได้ชัด ซึ่งสังเกตได้จากลักษณะการสะท้อนแสงที่เป็นมันวาว

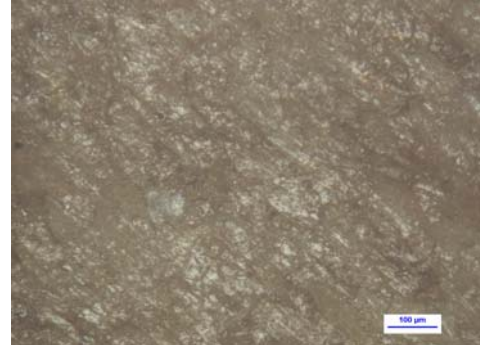
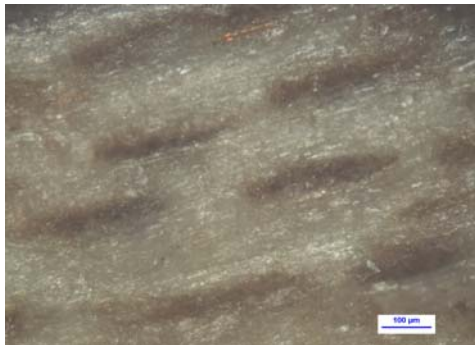


ก่อนแช่น้ำ

หลังแช่น้ำ

รูปที่ 8 ผิวของชิ้นตัวอย่างที่เตรียมจาก กาว PF : ENR = 60:40

4. PF : ENR = 40: 60 เนื่องจากมีสีน้ำตาล และพบว่ากาว PF จะชอบที่จะอยู่ในร่องของไม้

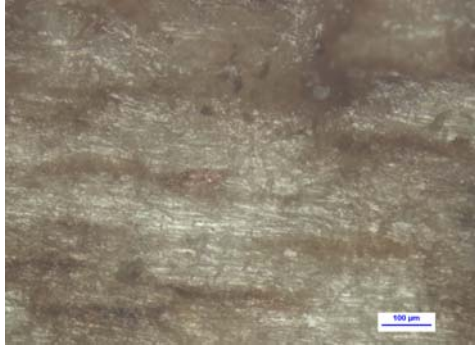


ก่อนแช่น้ำ

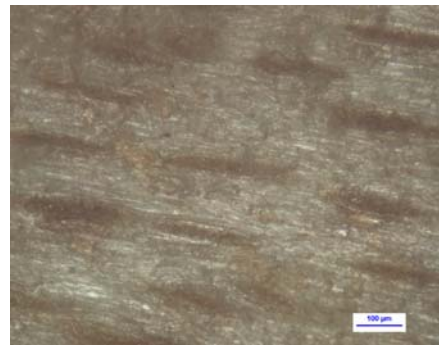
หลังแช่น้ำ

รูปที่ 9 ผิวของชิ้นตัวอย่างที่เตรียมจาก กาว PF : ENR = 40:60

5. PF : ENR = 20: 80 ขาง ENR เกิดการบวมตัว และมีลักษณะขุ่น พบว่าเกิดการแยก phase อย่างเห็นได้ชัด



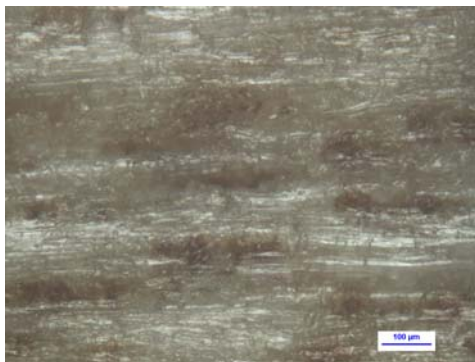
ก่อนแช่น้ำ



หลังแช่น้ำ

รูปที่ 10 ผิวของชิ้นตัวอย่างที่เตรียมจาก กาว PF : ENR = 20:80

6. ENR 100 % เนื้อกาวมีลักษณะใส มีสีเหลืองอ่อน และพบว่าหลังแช่น้ำ เกิดการบวมตัว ทำให้ให้ผิดรูประ



ก่อนแช่น้ำ



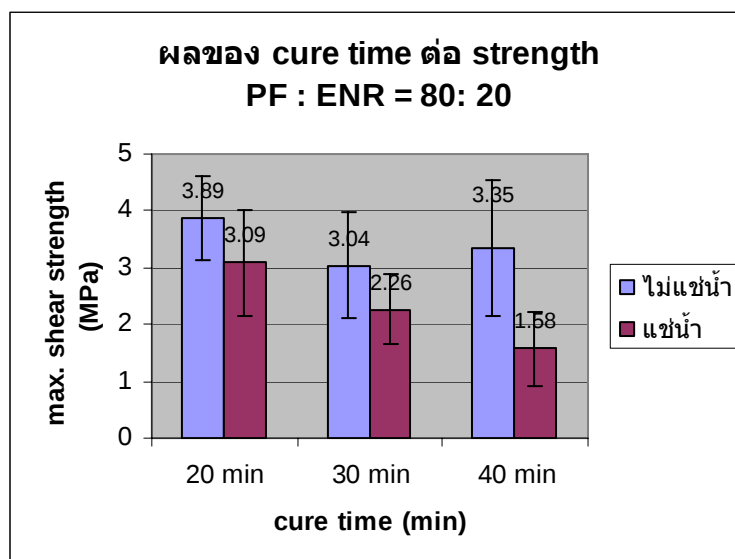
หลังแช่น้ำ

รูปที่ 11 ผิวของชิ้นตัวอย่างที่เตรียมจากยาง ENR-50 100 %

ผลของ cure time ต่อความแข็งแรงของกาวผสม

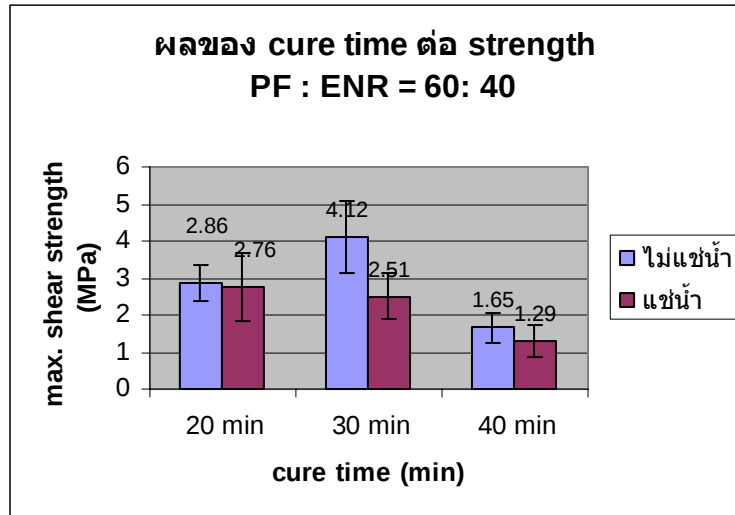
เนื่องจากเวลาที่ใช้ในการ cure กาวผสม คือ 20 นาที ซึ่งโดยวัตถุประสงค์หลักคือ เพื่อป้องกันการ overcure ของ PF แต่เวลาดังกล่าวไม่เพียงพอต่อการทำให้ยาง ENR เกิดการ cure อย่างสมบูรณ์ เพราะต้องใช้เวลาในการ cure ประมาณ 40 นาที ดังนั้น จึงได้ทำการศึกษาผลของ cure time ต่อความแข็งแรงของกาวที่ได้ โดยได้เลือก ส่วนผสม PF : ENR = 80 : 20 และ 60 : 40 มาศึกษา เนื่องจากว่ากาวผสมในอัตราส่วนนี้มีค่า strength ลดลงไม่มากเมื่อเทียบกับกาว PF 100 %

สำหรับกรณี PF: ENR = 80: 20 พบว่า เมื่อเพิ่ม cure time เป็น 30 และ 40 นาทีตามลำดับ ความแข็งแรงของกาวที่ได้ไม่ได้เปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งสังเกตจากแท่ง error bar ที่ค่อนข้างกว้าง โดยค่าความแข็งแรงของกาวสำหรับ 20, 30 และ 40 นาทีมีค่าเท่ากับ 3.89 ± 0.74 , 3.04 ± 0.94 และ 3.35 ± 1.19 MPa ตามลำดับ แต่จากการสังเกตเนื้อกาว พบว่าเมื่อการ cure ที่ระยะเวลานาน กาว PF จะเปลี่ยนจากสีน้ำตาล เป็นสีน้ำตาลเข้ม และสีดำตามลำดับเวลา เพราะกาว PF ไม่สามารถ cure ณ อุณหภูมิดังกล่าวเป็นเวลานานได้ และหากพิจารณา durability ของกาว จะเห็นว่า กาวที่ถูกแช่น้ำ จะมี strength ลดลงตามลำดับ สำหรับ cure time ที่สูงขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 12



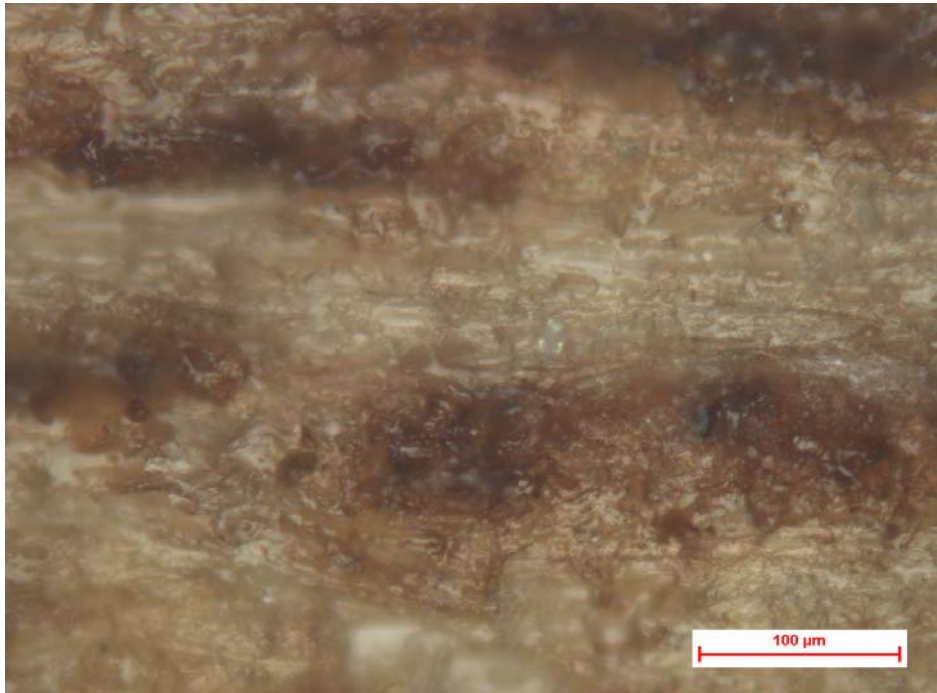
รูปที่ 12 ผลของ cure time ต่อ strength ของกาวผสม PF: ENR = 80:20

ในทำนองเดียวกันกับสูตรกาว PF: ENR ที่ 60 :40 แนวโน้มของ durability ของกาวหลังแช่น้ำเป็นไปในทิศทางเดียวกัน ดังแสดงในรูปที่ 13

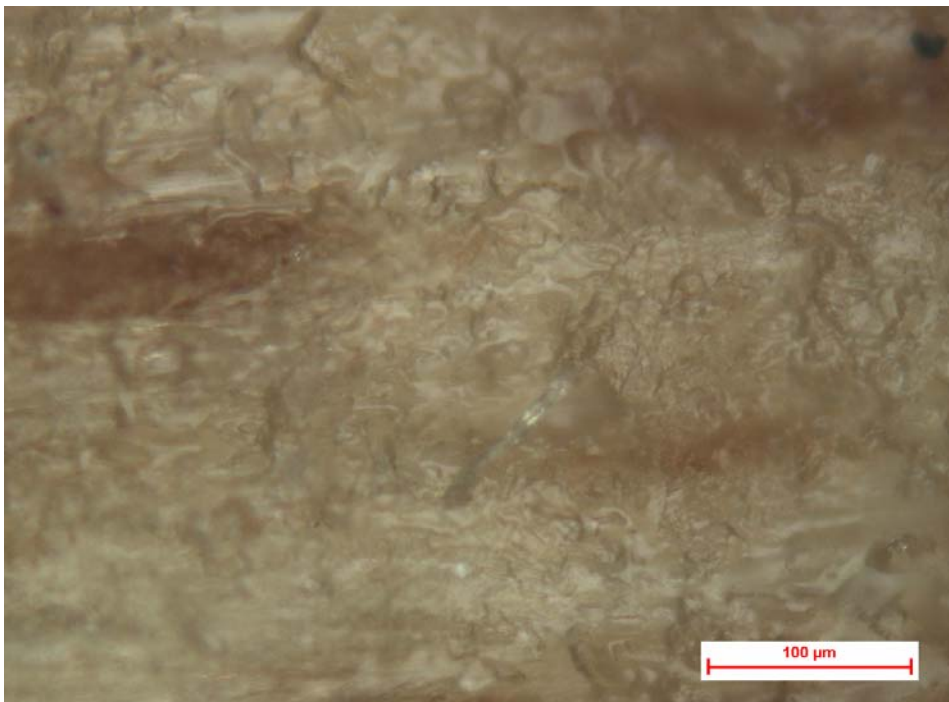


รูปที่ 13 ผลของ cure time ต่อ strength ของกาวผสม PF: ENR = 60:40

เมื่อสังเกตด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง พบว่า กาวทั้งสองไม่เกิดการผสมกัน (immiscible) เมื่อทำการศึกษาที่กำลังขยาย 50X, 100X, และ 200X ภาพจากกล้องจุลทรรศน์สำหรับส่วนผสม PF:ENR = 60: 40

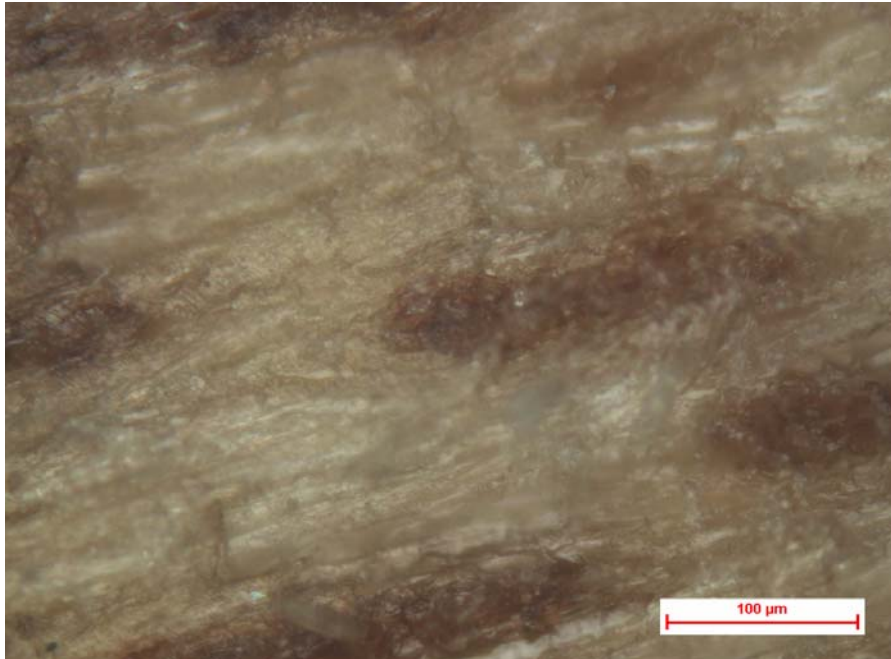


ไม่แช่น้ำ

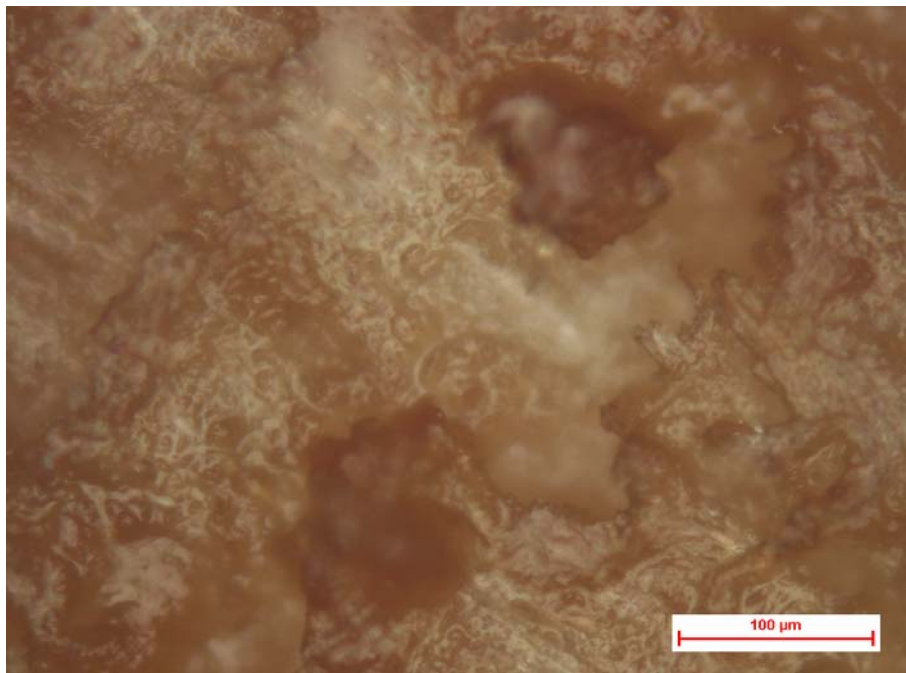


แช่น้ำ

(a) cure time 20 นาที ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการแช่น้ำมีผลต่อการบวมตัวบ้าง

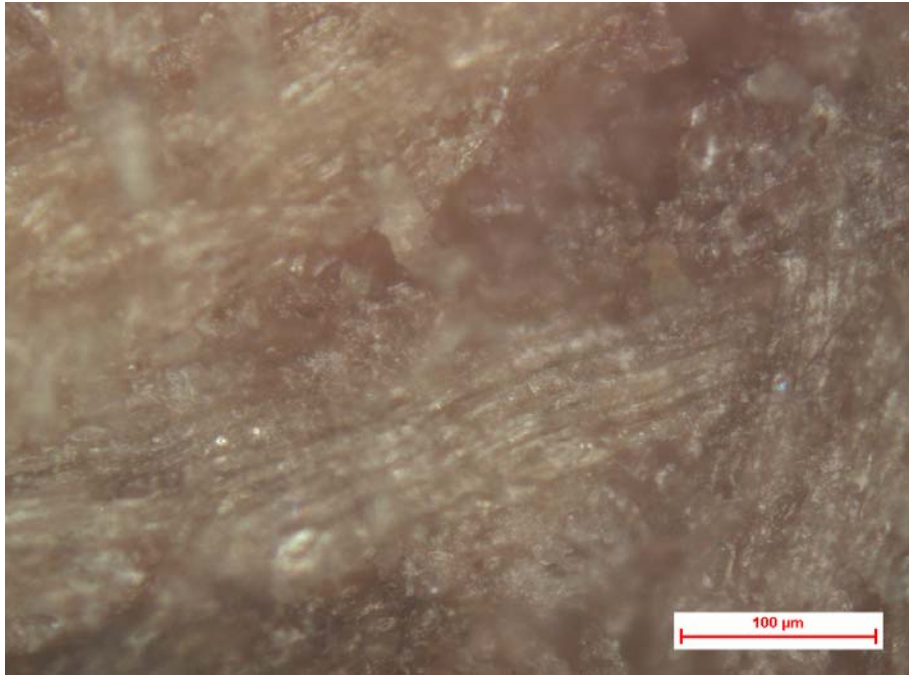


ไม่แช่น้ำ

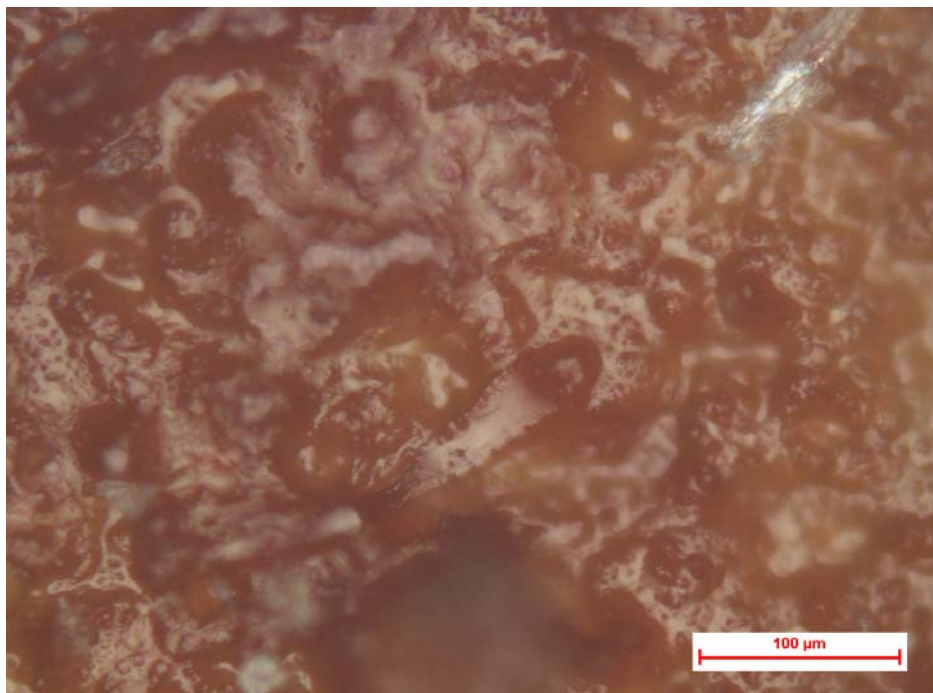


แช่น้ำ

(b) cure time 30 นาที ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการแช่น้ำทำให้เกิดการบวมตัวมาก



ไม่แช่น้ำ



แช่น้ำ

(c) cure time 40 นาที ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการแช่น้ำทำให้เกิดการบวมตัวมาก

รูปที่ 14 กาว PF: ENR = 60:40 ที่ cure โดยใช้เวลา 20, 30 และ 40 นาทีตามลำดับ

% Retention

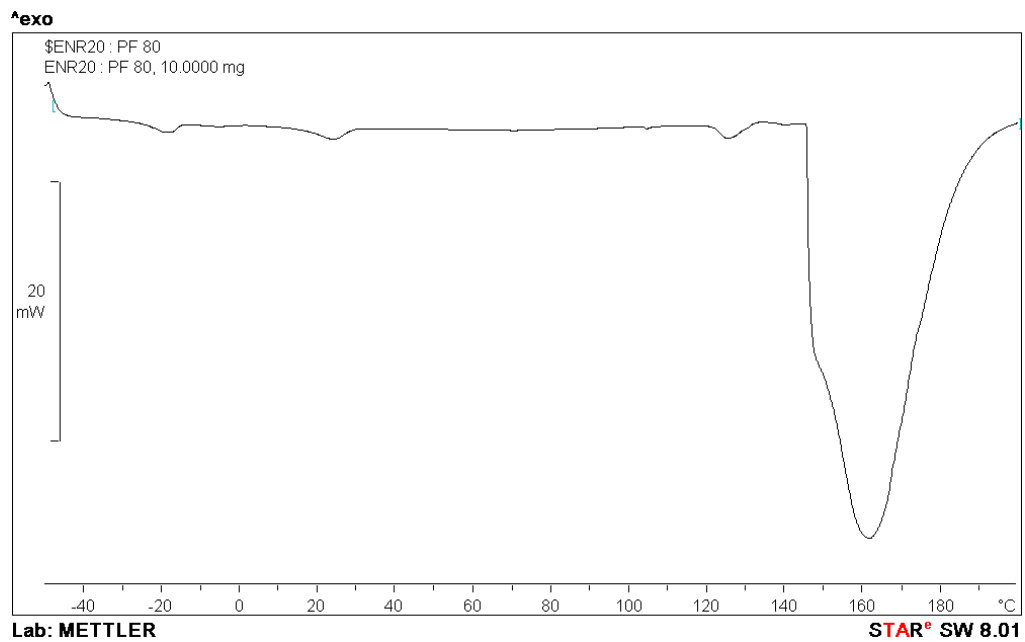
จะเห็นว่า % retention ของกาวมีค่าอยู่ในช่วงประมาณ 40 – 90 % ซึ่งแสดงให้เห็นว่ากาวมีค่าความแข็งแรงลดลงเมื่อนำไปแช่น้ำ โดยที่อาจจะลงเพียง 10 % หรืออาจจะลดลงไปมากถึง 60 % แต่เนื่องจากว่าค่าได้ที่มีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานสูง ทำให้หาข้อสรุปไม่ได้

ตารางที่ 5 % retention ของกาวผสมต่าง ๆ ที่ทำการ cure เป็นเวลา 20 นาที และบางสูตรที่ cure เป็นเวลา 30 และ 40 นาที

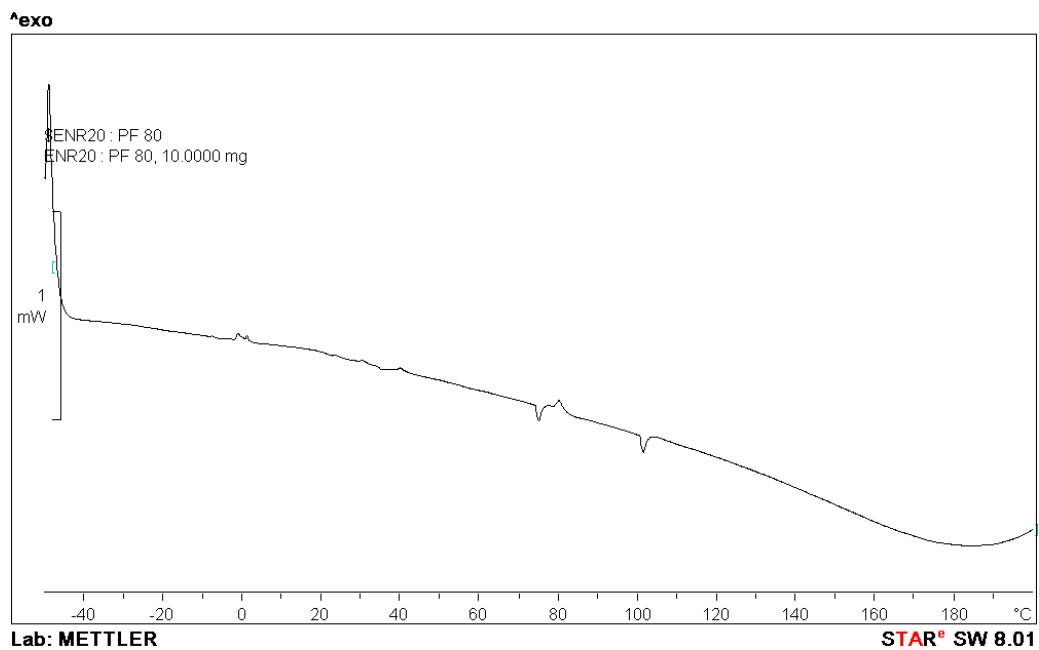
สูตรกาวผสม	% retention ตามเวลาที่ใช้ในการ cure		
	20 นาที	30 นาที	40 นาที
PF 100 %	75.17 $\pm$ 22.71		
PF 80 : ENR 20	79.43 $\pm$ 28.28	74.34 $\pm$ 30.73	47.16 $\pm$ 25.64
PF 60 : ENR 40	96.50 $\pm$ 36.01	60.92 $\pm$ 21.04	78.18 $\pm$ 34.04
PF 40 : ENR 60	41.74 $\pm$ 25.38		
PF 20 : ENR 80	37.19 $\pm$ 11.02		
ENR 100 %	0		

ผลการทดลอง DSC

ในการทดสอบด้วย DSC ในครั้งแรก ระหว่างอุณหภูมิ -50 °C ถึง 200 °C พบว่าที่อุณหภูมิสูงกว่า 160 °C เกิดปฏิกิริยาประเภทดูดความร้อนเป็น peak ขนาดใหญ่ ซึ่งคาดว่าน่าจะเป็นการสลายตัวของกาว PF เนื่องจากตัวกาวไม่สามารถทนความร้อนได้สูงมาก และมีค่าการเปลี่ยนแปลงแบบดูดความร้อนสูงมาก และมีกลิ่นเหมือนสารเกิดการไหม้จากเครื่อง DSC และเมื่อทำการทดสอบไปแล้ว ในการทดสอบซ้ำ พบว่าไม่เกิด peak ดังกล่าว โดยพฤติกรรมดังกล่าวเกิดทั้ง PF:ENR = 80:20 และ 60:40 ดังแสดงในรูปที่ 15



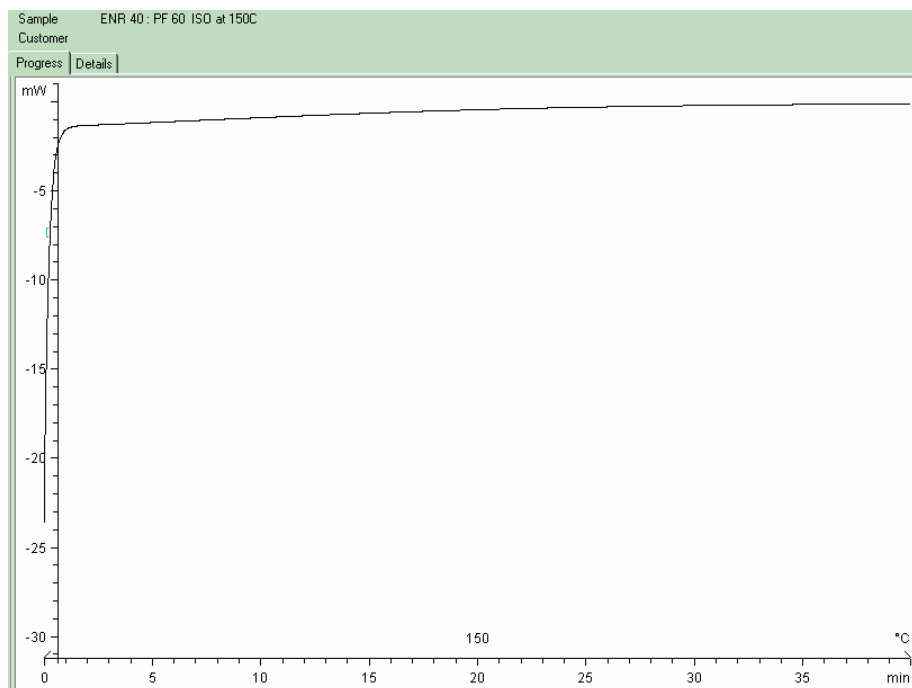
(a)



(b)

รูปที่ 15 DSC Thermogram ของ PF: ENR = 80: 20 (a) สำหรับการ run ครั้งแรก และ (b) เมื่อทำการ run sample เดิมอีกครั้ง

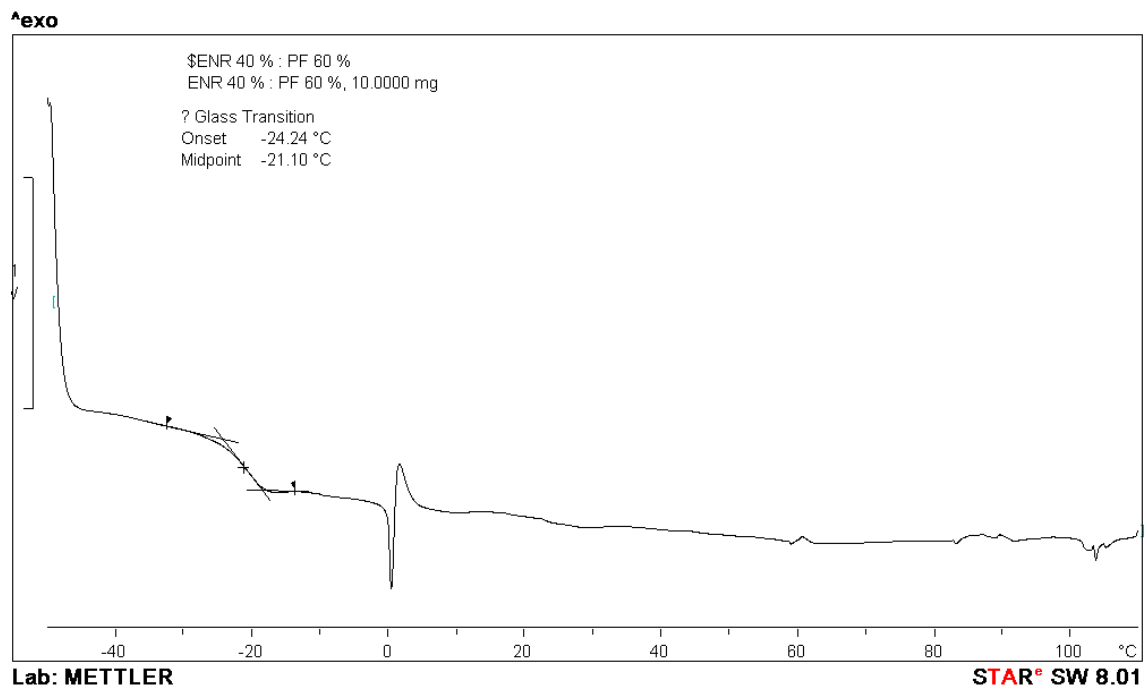
จาก DSC thermogram ข้างต้นทำให้เกิดความสงสัยว่า มีความเป็นไปได้ที่ peak ดังกล่าว อาจจะเป็นปฏิกิริยา crosslinking ของ ENR ที่ยังไม่สมบูรณ์ ดังนั้นจึงได้มีการทดสอบด้วย DSC ในช่วง -50°C ถึง 150°C ด้วย heating rate 10 K/min แล้วทำการ isothermal ที่ 150°C เป็นเวลา 40 นาที พบว่าในช่วง 40 นาทีดังกล่าวไม่พบ peak ใด ๆ ดังแสดงในรูปที่ 16



รูปที่ 16 DSC thermogram ของการ isothermal ที่ 150°C เป็นเวลา 40 นาที

ในการทดลองด้วย DSC เพื่อหาค่า glass transition temperature (T_g) ได้ใช้อุณหภูมิในช่วง -50°C ถึง 110°C แสดง ค่า T_g ของ ENR-50 ที่ชัดเจนในช่วงอุณหภูมิประมาณ -22°C โดยมีค่า onset ประมาณ -24°C ในขณะที่ transition temperature ต่าง ๆ ของ PF ไม่สามารถสังเกตเห็นได้ชัด

ผลการทดลองที่ได้จาก DSC แสดงให้เห็นว่า การผสมกาว PF : ENR ที่อัตราส่วนต่าง ๆ ไม่ได้เกิดการผสมกันจนทำให้มีการเปลี่ยนแปลง T_g อย่างเห็นได้ชัด ในบางตัวอย่าง อาจจะมี ความชื้นปะปนอยู่ ทำให้เกิด peak ที่อุณหภูมิประมาณ 0°C ซึ่งเป็นจุดเยือกแข็งของน้ำ DSC thermogram ตัวอย่าง DSC thermogram ของ PF : ENR = 60:40 สำหรับช่วงอุณหภูมิ -50 ถึง 110°C ซึ่งแสดง glass transition temperature ของ ENR-50 ดังแสดงในรูปที่ 17



รูปที่ 17 DSC thermogram ของ PF : ENR = 60:40 ที่ขูดจากชั้นตัวอย่างที่ cure แล้ว

ตารางที่ 6 ค่า T_g ของกาวผสมหลังจาก cure เป็นเวลา 20 นาที

ส่วนผสม ENR:PF	T_g (onset)	T_g (midpoint)
20 : 80	-22.4	-
40 : 60	-24.24	-21.10
60 : 40	-25.15	-22.34
80 : 20	-24.50	-21.57

Wu ได้รายงานว่า ค่า T_g ของ PF มีค่าเท่ากับ 85 °C [Wu 2003] แต่อย่างไรก็ตามในทดลองด้วย DSC เราไม่พบ T_g ของ PF ในช่วงอุณหภูมิที่ศึกษา

2.6 สรุปผลการวิจัย

1. เมื่อมีการเติมยาง ENR-50 ลงไปในกาว PF พบว่าค่าความแข็งแรงของกาวลดลง เนื่องจากว่าความแข็งแรงของยาง ENR มีค่าต่ำกว่ากาว PF
2. เมื่อมีการนำชิ้นตัวอย่างไปแช่น้ำ พบว่าความแข็งแรงของกาวลดลง โดยเฉพาะอย่างยิ่งในส่วนผสมที่มียาง ENR ในสัดส่วนที่สูง เพราะยาง ENR สามารถดูดน้ำและเกิดการบวมตัว
3. การเพิ่ม cure time จาก 20 นาทีเป็น 30 นาทีและ 40 นาที ทำให้กาว PF เริ่มเกิด degradation มากขึ้น ซึ่งสังเกตจากสีของกาวที่เปลี่ยนเป็นสีเข้มขึ้นและดำในที่สุด

4. จากการศึกษาด้วยเครื่อง DSC พบว่ากาว PF และยาง ENR ไม่ได้เกิดการผสมกัน

2.7 ข้อเสนอแนะ

1. เนื่องจากว่า dicumyl peroxide ใช้เวลานานในการทำให้เกิด crosslinking ในระบบของ ENR-50 ดังนั้นน่าจะมีการศึกษาระบบ curing อื่น เพื่อศึกษาว่าสามารถทำให้ค่า maximum shear strength ของกาวที่ดีกว่านี้
2. ปัญหาอย่างหนึ่งที่พบในการทดสอบกาวที่ใช้ติดไม้คือ การเตรียมชิ้นตัวอย่างที่ต้องมีการบากชิ้นตัวอย่างซึ่งทำได้ค่อนข้างยาก หากมีการบากน้อยเกินไป จะทำให้ชิ้นไม้ที่บากไม่ได้ขาดจากกัน ซึ่งมีผลทำให้ค่า maximum shear stress ที่ได้มีค่าสูงเกินจริง แต่หากบากลึกเกินไป จะไปทำให้ชิ้นไม้ด้านล่างเกิดรอยขาดได้ ซึ่งมีผลให้ค่า strength ที่ได้ต่ำเกินจริง ดังนั้นผลการทดลองที่ได้จึงมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานค่อนข้างสูง วิธีหนึ่งในการศึกษา adhesion strength คือ นำกาวไปติดกับแผ่นฟิล์มพลาสติก เช่น PET film เพื่อดูค่า strength
3. ควรมีการศึกษากว่า กาวผสมระหว่าง PF กับ ENR มีค่าการปลดปล่อยฟอร์มัลดีไฮด์ (Formaldehyde emission) น้อยกว่ากาว PF หรือไม่

2.8 เอกสารอ้างอิง

- ISO Standard 6237: 1987, Adhesive: Wood-to-Wood Adhesive Bonds: Determination of shear strength by tensile loading.
- C.K.L. Davies, S.V. Wolfe, I.R. Gelling, and A.G. Thomas, "Strain Crystallization in Random Copolymers Produced by Epoxidation of cis1,4-polyisoprene", *Polymer*, **24**, 107 (1983)
- I.R. Gelling, "Epoxidized Natural Rubber", *J. Nat. Rubb. Res*, **6**, 184 (1991)
- W. Preechatiwong, W. Yingprasert, and B. Kyokong, "Effects of Phenol formaldehyde / Isocyanate Hybrid Adhesives on Properties of Oriented Strand Lumber (OSL) from Rubberwood Wastes", *Songklanakarin J. Sci. Technol.*, **29 (5)**, 1367 (2007).
- R.G. Schmidt, "Aspects of Wood Adhesion: Application of ^{13}C CP/MAS NMR and Fracture Testing", Ph.D. Dissertation, Virginia Polytechnic Institute and State University (1998)
- C.F. Wu, "Effects of Phenol Resin Additive on Dynamic Mechanical Properties of Acrylate Rubber and its Blends", *Chinese J. Polym. Sci*, **21**, 483 (2003).
- J. Zheng, "Fundamental Studies of Phenol-Formaldehyde (PF) / Polymeric Diphenylmethane Diisocyanate (pDMI) Hybrid Adhesives", Ph.D. Dissertation, Virginia Polytechnic Institute and State University (2001).