

วัสดุจำรูปที่ตอบสนองต่อแสงอินฟราเรดและสารละลายเมทานอลจากโคพอลิเมอร์อีพ็อกซี-น้ำมันเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์/พอลิคาโพรแลคโตนเสริมอนุภาคท่อนาโนคาร์บอน

Infrared Light/Chemo-Responsive Bio-Based Shape Memory Polymer

Nanocomposite From Co-Polymer Epoxy-Cashew Nut Shell

Liquid/Polycaprolactone Blend With Carbon Nanotube

ธนวินท์ บุตรศิริ (Thanawin Butsiri)^{1*} ณัฐวิวัฒน์ ศรีขาว (Natwat Srikhao)**

อัจจิมา อุ่นแก้ว (Artjima Ounkaew)** นฤเบศ หล่อวณิชไพศาล (Narubeth Lorwanishpaisarn)***

(Received: April 4, 2022; Revised: December 15, 2022; Accepted: December 15, 2022)

บทคัดย่อ

วัสดุจำรูปจากวัสดุประกอบพอลิเมอร์จำรูปที่สามารถตอบสนองต่อปัจจัยการกระตุ้นด้วยแสงอินฟราเรด และสารละลายเมทานอลถูกเตรียมขึ้นด้วยโคพอลิเมอร์อีพ็อกซีไดกลีซิดิลอีเทอร์บิสฟีนอล-เอ (EP) ร่วมกับพอลิคาโพรแลคโตน (PCL) โดยใช้สารละลายไดเมทิลฟอร์มมาไมด์ (DMF) เป็นตัวทำละลาย ใช้น้ำมันจากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ (CNSL) เป็นสารเร่งแข็ง และเสริมแรงด้วยอนุภาคท่อนาโนคาร์บอน (CNT) จากผลการทดลองพบว่า EP-CNSL/PCL มีการตอบสนองต่อสารละลายเมทานอล และจากการวิเคราะห์คุณสมบัติเชิงกลทางความร้อน การเติมอนุภาค CNT ลงใน EP-CNSL/PCL ทำให้ชิ้นงานมีความแข็งแรงมากขึ้นและสามารถตอบสนองต่อปัจจัยกระตุ้นจากแสงอินฟราเรดและสารละลายเมทานอล เป็นข้อบ่งชี้ว่าวัสดุประกอบพอลิเมอร์ที่ถูกเตรียมขึ้นสามารถใช้เป็นวัสดุตรวจรับและตอบสนองต่อแสงอินฟราเรดและสารละลายเมทานอลได้ ซึ่งเป็นการเพิ่มความหลากหลายให้แก่การประยุกต์ใช้งานวัสดุจำรูป

ABSTRACT

Shape memory polymer composite of copolymer epoxy diglycidyl ether bisphenol-A (EP) and polycaprolactone (PCL) using dimethylformamide (DMF) as solvent, cashew nutshell liquid (CNSL) as hardener and reinforced by multi-walled carbon nanotubes (CNT). In comparison between EP-CNSL and EP-CNSL/PCL samples, methanol responsibility of the EP-CNSL/PCL were significantly improved. The addition of CNT particles was found that a strength of sample was increased and it have an infrared light and methanol responsibility. It is indicated that the prepared shape memory polymer composite can be used as a sensor and actuator to infrared light and methanol solution which diverse an application of shape memory materials.

คำสำคัญ: วัสดุประกอบพอลิเมอร์จำรูป อีพ็อกซี พอลิคาโพรแลคโตน

Keyword: Shape memory polymer composite, Epoxy, Polycaprolactone

¹Correspondent author: Thanawin_b@kkumail.com

*นักศึกษา หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

Student, Master of Engineering Program in Chemical Engineering, Faculty of Engineering, Khon Kaen University

**นักศึกษา หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

Students, Doctor of Philosophy Program in Chemical Engineering, Faculty of Engineering, Khon Kaen University

***ดุษฎีบัณฑิต หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

Doctor, Doctor of Philosophy Program in Chemical Engineering, Faculty of Engineering, Khon Kaen University

บทนำ

ในปัจจุบันวัสดุจำรูปที่สามารถตอบสนองต่อปัจจัยกระตุ้นภายนอกจากสิ่งแวดล้อมมีความสำคัญในการประยุกต์ใช้งานด้านวัสดุตรวจรับและตอบสนองในระบบการทำงานแบบอัตโนมัติ หนึ่งในวัสดุฉลาดที่เป็นที่รู้จักโดยทั่วไปคือ พอลิเมอร์จำรูป (shape memory polymers : SMPs) ซึ่งเป็นวัสดุที่สามารถตอบสนองต่อปัจจัยกระตุ้นแวดล้อมได้ เช่น ความร้อน แสง ไฟฟ้า น้ำ และการเปลี่ยนแปลงค่า pH [1] ยกตัวอย่างเช่น พฤติกรรมการจำรูปของ SMPs ที่ตอบสนองต่อความร้อน เมื่อถูกกระตุ้นด้วยความร้อนโมเลกุลของโครงสร้างชั่วคราวจะดูดซับเอาความร้อนเอาไว้จนถึงอุณหภูมิคล้ายแก้ว (glass transition temperature : T_g) จากนั้นจึงเกิดการขยายตัวทางความร้อนทำให้เกิดปริมาตรอิสระ (free volume) ภายในโครงสร้างชั่วคราว (temporary structure) [2] ส่งผลให้สายโซ่โมเลกุลสามารถเคลื่อนตัวและเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างเดิมไปเป็นรูปร่างชั่วคราว พฤติกรรมดังกล่าวสามารถเกิดขึ้นได้เช่นเดียวกันใน SMPs ที่ตอบสนองต่อพลังงานแสงหรือพลังงานไฟฟ้า เป็นผลมาจากวัสดุเสริมแรงที่ผสมลงไป เช่น อนุภาคท่อนาโนคาร์บอน (carbon nanotube : CNT) อนุภาคโบรอนไนไตรด์ (boron nitride) [3] และอนุภาคโพลิไดเมทิลซิลิโคน [4] เป็นต้น โดยอนุภาคเสริมแรงเหล่านี้สามารถดูดซับพลังงานจากแสงและเปลี่ยนแปลงเป็นพลังงานความร้อน ส่วนการเกิดพฤติกรรมการจำรูปในสารละลายจะแตกต่างกันออกไปโดยเกิดจากการที่ตัวอย่างถูกลดอุณหภูมิ T_g ลงผ่านการสัมผัสกับสารละลายเคมี เมื่อมีโมเลกุลของสารละลายเข้าแทรกตัวตามโครงสร้างทำให้สายโซ่โมเลกุลของ SMPs สามารถเคลื่อนตัวได้ [5] Ang และคณะ [6] ได้ทำการสังเคราะห์ SMP โคพอลิเมอร์ (co-polymer) ที่ตอบสนองต่อน้ำและความร้อนจากพอลิเอทิลีนไกลคอล (polyethylene glycol : PEG) ร่วมกับพอลิคาโพรแล็คโตน (polycaprolactone : PCL) กล่าวถึงการตอบสนองต่อน้ำ PEG เป็นส่วนพอลิเมอร์ที่ชอบน้ำ (hydrophilic structure) ซึ่งการกระตุ้นด้วยน้ำทำให้เกิดการเรียงตัวใหม่ของผลึก PEG โดยมีพอลิคาโพรแล็คโตน (polycaprolactone : PCL) เป็นโครงสร้างถาวร (permanent structure) ทำหน้าที่คงรูปร่างของชิ้นงานเอาไว้เมื่อไม่มีการกระตุ้น จากผลการทดลองของ Ang พบว่าอัตราการคืนสภาพ (shape recovery ratio) ของตัวอย่างอยู่ในช่วงร้อยละ 51.9 ถึงร้อยละ 63 และค่าคงสภาพ (shape fixity) อยู่ที่ร้อยละ 100 ในงานวิจัยที่ผ่านมาได้มีการทดลองนำสารจากธรรมชาติมาประยุกต์ใช้เป็นสารตั้งต้นเพื่อลดทอนการใช้สารประกอบจากปิโตรเลียมที่เป็นทรัพยากรสิ้นเปลือง Tsujimoto และคณะ [7] ได้พัฒนาและสังเคราะห์ SMP ที่ตอบสนองต่อความร้อนจากอีพ็อกซีน้ำมันถั่วเหลือง (epoxidized soybean oil : ESO) ร่วมกับ PCL ผลการทดสอบพบว่าตัวอย่างทดลองมีค่าคงสภาพอยู่ที่ร้อยละ 99 และอัตราการคืนสภาพอยู่ที่ร้อยละ 100 Kasemsiri และคณะ [8] ได้ทำการเตรียมวัสดุพอลิเมอร์จากอีพ็อกซีไดโกลซิไดลอีเธอร์บิสฟีนอล-เอ (diglycidylether bisphenol-A: DGEBA, EP) โดยใช้สารเร่งแข็งจากธรรมชาติที่เป็นผลพลอยได้ (by-product) จากอุตสาหกรรมคือน้ำมันเปลือกเม็ดมะม่วงหิมพานต์ (cashew nut shell liquid : CNSL) จากผลการทดสอบพบว่าตัวอย่างทดลองที่ได้นั้นมีคุณสมบัติเทียบเท่ากับวัสดุอีพ็อกซีที่บ่มด้วยสารบ่มที่มีทั่วไปโดยมีอัตราการคืนสภาพใกล้เคียงร้อยละ 100 และยังคงใกล้เคียงค่าเดิมหลังผ่านการทดสอบ 5 รอบ ยิ่งไปกว่านั้น Kasemsiri และคณะ [9] ได้เตรียม SMP จากอีพ็อกซีฟีนอลิกโนโวลัค (epoxy phenolic novolac : EPN) ร่วมกับ CNSL และเสริมแรงด้วยอนุภาคท่อนาโนคาร์บอนผนังซ้อน (multi-wall carbon nanotube: CNT) ในปริมาณร้อยละ 0 ถึง 0.5 โดยน้ำหนัก ผลการทดลองพบว่าวัสดุประกอบสามารถตอบสนองต่อแสงอินฟราเรด (infrared light) และมีอัตราการคืนสภาพอยู่ที่ร้อยละ 99 ทั้งนี้ SMPs ส่วนใหญ่ถูกออกแบบมาเพื่อตอบสนองต่อปัจจัยภายนอกได้หนึ่งปัจจัย [10] ทำให้เกิดข้อจำกัดในด้านการประยุกต์ใช้งานในรูปแบบต่างๆ อีกทั้งงานวิจัยที่ผ่านมา ยังไม่มีการสังเคราะห์วัสดุประกอบจากอีพ็อกซีร่วมกับ PCL โดยใช้สารเร่งแข็งจากธรรมชาติ ดังนั้น เพื่อเป็นการแก้ไขข้อจำกัดดังกล่าวของวัสดุประกอบ SMPs และการแก้ไขปัญหาด้านการใช้ทรัพยากรสิ้นเปลืองงานวิจัยนี้จึงเป็นการพัฒนาและศึกษาพร้อมอภิปรายผลการศึกษาคู่สมบัติเชิงกลทางความร้อน ลักษณะสัณฐาน กลไกการบ่ม และการตอบสนองต่อปัจจัยกระตุ้นมากกว่าหนึ่งปัจจัยของวัสดุประกอบพอลิเมอร์จำ

รูปจาก EP โคพอลิเมอร์กับ PCL ที่ทำหน้าที่เป็นโครงสร้างชั่วคราวและสามารถตอบสนองต่อการกระตุ้นจากสารละลายเคมี โดยใช้ CNSL เป็นสารเร่งแข็งและเสริมแรงด้วยอนุภาค CNT ซึ่งเป็นส่วนช่วยในการตอบสนองต่อแสงอินฟราเรดของวัสดุประกอบ

วิธีการดำเนินงานวิจัย

การเตรียมวัสดุประกอบ EP-CNSL/PCL/CNT

สัดส่วนของการเตรียมวัสดุประกอบเป็นไปดังนี้ EP ต่อ CNSL เท่ากับร้อยละ 70 ต่อ 30 โดยน้ำหนัก EP-CNSL ต่อ PCL เท่ากับร้อยละ 80 ต่อ 20 โดยน้ำหนัก และสัดส่วนของ EP-CNSL/PCL ต่อ CNT (Nano generation Co., Ltd.) คือร้อยละ 99.9/0.1 เริ่มจากการนำ CNT ผสมสารละลายไดเมทิลฟอร์มมาไมด์ (dimethylformamide: DMF, Sigma Aldrich) 5 มิลลิลิตร โดยวิธี ultrasonic homogenization ด้วยเครื่อง ultrasonic cell disruptor (Model UCD-P01-250W, BIOBASE) 30 นาทีในอ่างน้ำเย็น จากนั้นทำการละลาย PCL (M_w : 80000, GAP Morph) ใน DMF 5 มิลลิลิตร ผสมบนเตาควบคุมแบบแม่เหล็ก (magnetic heat plate stirrer, Model C-MAG HS7, IKA®) เมื่อได้สารละลายของเหลวใสจึงผสมอีพ็อกซี (EP, DGEBA, YD 128, Aditya Burla) ลงไปให้เข้าเป็นเนื้อเดียวกันแล้วจึงเติมสารผสม CNT/DMF กวนผสม 10 นาที สุดท้ายให้เติมสาร CNSL (Mabonkrong Sirichai 25, Ltd.) ผสมลงไปและกวนจนได้สารผสมที่มีลักษณะสีดำขุ่น นำสารผสมที่เตรียมได้เทลงในเพลทแก้วขนาด 9.14 เซนติเมตร และนำไปอบในตู้อบลมร้อน (hot air oven Model FD-53, FD-56, Binder) โดยใช้ความร้อนและเวลาการอบเป็นลำดับขั้นคือ 100 องศาเซลเซียส 1 ชั่วโมง 130 องศาเซลเซียส 1 ชั่วโมง 160 องศาเซลเซียส 1 ชั่วโมง 180 องศาเซลเซียส 1 ชั่วโมง และ 200 องศาเซลเซียส 2 ชั่วโมง

การวิเคราะห์ตัวอย่างชิ้นงาน

คุณสมบัติเชิงกลทางความร้อน ลักษณะพื้นฐาน และกลไกการบ่ม

ค่ามอดูลัสสะสม (storage modulus) และค่ามอดูลัสสูญเสีย (loss modulus) ของชิ้นงานวิเคราะห์ด้วยเครื่อง dynamic mechanical analyzer (Q-800, TA Instruments, USA) ในโหมดแรงดึงที่ความถี่ 1 เฮิรตซ์ ค่าความเครียดร้อยละ 0.01 เริ่มด้วยการลดอุณหภูมิลงไปที่ -60 องศาเซลเซียสค้างไว้ 1 นาที จากนั้นวัดค่าแรงดึงด้วยอัตราการให้ความร้อนที่ 2 องศาเซลเซียสต่อนาที จากอุณหภูมิ -60 ถึง 100 องศาเซลเซียสภายใต้แก๊สไนโตรเจน ลักษณะพื้นฐานและการกระจายตัวของอนุภาควิเคราะห์ได้จากการถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดภาพตัดขวางชิ้นงาน (cross sectional area, FIB-FESEM FEI, USA) และกลไกการบ่มวิเคราะห์ได้จากเทคนิค differential scanning calorimeter (Model Pyris Diamond, Perkin Elmer instruments, USA) ดำเนินการภายใต้แก๊สไนโตรเจนจากช่วงอุณหภูมิ 30 ถึง 250 องศาเซลเซียส โดยมีอัตราการให้ความร้อนอยู่ที่ 10 องศาเซลเซียสต่อนาที

พฤติกรรมการจำรูป

เตรียมตัวอย่างชิ้นงานขนาด $10 \times 30 \times 1$ มิลลิเมตร นำไปตัดเป็นรูปร่างตัวยู (U) แล้วแช่แข็งที่อุณหภูมิ 5 องศา เป็นเวลา 5 นาทีเพื่อคงรูปร่างของชิ้นงาน จากนั้นนำชิ้นงานมากระตุ้นด้วยแสงจากหลอดไฟอินฟราเรด (PAR38 120W, Eve lighting, BKK) ระยะตั้งฉากห่างจากชิ้นงาน 10 เซนติเมตร ควบคุมอุณหภูมิไม่เกิน 40 องศาเซลเซียส และกระตุ้นด้วยการจุ่มสารละลายเมทานอล (AR1115-P2.5L, RCI Labscan Limited) ที่อุณหภูมิห้อง สังเกตและบันทึกระยะเวลาการคืนสภาพ (recovery time) ด้วยการจับภาพเคลื่อนไหว (video recording) โดยการอัตราคืนรูป (R_r) ของ

ชิ้นงานสามารถวัดจากมุมที่เปลี่ยนแปลงไปตั้งรูปที่ 1 และคำนวณค่าได้จากสมการที่ 1 [11] เมื่อ θ_1 คือมุมเริ่มต้น และ θ_2 คือมุมที่เปลี่ยนแปลงไป

$$R_r = \frac{\theta_1 - \theta_2}{\theta_1} \times 100 \quad (1)$$

ผลการวิจัย

กลไกการบ่ม

จากการศึกษาและวิเคราะห์ปฏิกิริยาการบ่มของตัวอย่างทั้งก่อนบ่มและหลังบ่มด้วยเทคนิค DSC จากรูปที่ 2ก กราฟเอ็กโซเทอร์มิกพีค (exothermic peak) ของ EP-CNSL ประกอบด้วยพีคสองพีค ได้แก่ พีคแรกที่อุณหภูมิ 182.7 องศาเซลเซียส คือพีคจากการเกิดปฏิกิริยาอีเทอร์ิฟิเคชันระหว่างหมู่ไอพอกไซด์จาก EP กับหมู่ไฮดรอกซิลจากคาร์บอนอลคาร์ดอล และกรดแอนาคาร์ดิกของ CNSL และพีคที่ 2 อุณหภูมิ 201.05 องศาเซลเซียส คือพีคจากการเกิดปฏิกิริยาเอสเทอร์ิฟิเคชันระหว่างหมู่ไอพอกไซด์กับหมู่คาร์บอกซิลจากกรดแอนาคาร์ดิกของ CNSL [8, 12–14] ผลการทดสอบชิ้นงาน EP-CNSL/PCL พบว่าพีคของปฏิกิริยามีการเลื่อน (peak shifted) ไปที่อุณหภูมิสูงขึ้น จากการศึกษาพบว่าหมู่เอสเทอร์คาร์บอนิลของ PCL เข้าทำพันธะไฮโดรเจนกับหมู่โปรโตเนตของอีพอกซีในช่วงเริ่มต้นปฏิกิริยาการบ่มส่งผลให้ปฏิกิริยาการบ่มเกิดได้ยากขึ้นหรือเป็นตัวขัดขวางปฏิกิริยาการบ่มทำให้ชิ้นงานต้องใช้อุณหภูมิการบ่มที่สูงขึ้น [15–16] และจากกราฟ 2ก การลดลงของเอนทัลปีเป็นผลมาจากเกิดการแทนที่ปริมาณของ EP-CNSL ด้วย PCL [17] จากผลการทดสอบตัวอย่าง EP-CNSL/PCL/CNT0.1 การเติมอนุภาค CNT ส่งผลให้เกิดการแทนที่เนื้อวัสดุในส่วนของเมทริกซ์ทำให้ค่าเอนทัลปีลดลงเล็กน้อย จากการศึกษาและค้นคว้า งานวิจัยของ Yang และคณะ [18] ระบุผลการทดสอบวัสดุประกอบจากอีพอกซีผสมคาร์บอนนาโนทิวบ์แบบผนังชั้นเดียวพบว่าการมีอยู่ของอนุภาค CNT เป็นการเพิ่มความหนืดให้แก่โมเลกุลของสารตั้งต้นส่งผลให้อัตราการเร็วในการเข้าทำปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไชน์ระหว่างอีพอกซีกับสารเร่งแข็งลดลง เช่นเดียวกันผลการศึกษาและทดสอบคุณสมบัติทางความร้อนและการไหลวัสดุประกอบอีพอกซีผสมอนุภาค CNT ของ Vijayan และคณะ [19] พบว่าการเติมอนุภาค CNT เป็นการเพิ่มความหนืดให้แก่โมเลกุลของอีพอกซีหรือเป็นการขัดขวางการเคลื่อนที่ของโมเลกุลอีพอกซีที่จะเข้าทำปฏิกิริยากับสารเร่งแข็งจึงต้องใช้อุณหภูมิสูงขึ้นเพื่อให้อีพอกซีมีความหนืดลดลงในการเปลี่ยนสถานะของวัสดุประกอบ ทั้งนี้จากงานวิจัยของ Garg และคณะ [20] ระบุไว้ว่าการมีอยู่ของอนุภาค CNT ไม่เกิดปฏิกิริยากับอีพอกซีและเมื่อวิเคราะห์ตัวอย่างที่ทำปฏิกิริยาจากการบ่มที่สภาวะอุณหภูมิ 100, 130, 160, 180 องศาเซลเซียส เป็นเวลาที่อุณหภูมิละ 1 ชั่วโมงและ 200 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 2 ชั่วโมง ส่งผลให้พื้นที่ใต้กราฟหายไปแสดงถึงการบ่มที่สมบูรณ์ของชิ้นงานดังรูปที่ 2ข

คุณสมบัติเชิงกลทางความร้อน

ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติเชิงกลทางความร้อนด้วยเทคนิค DMA พบว่าจากค่ามอดุลัสสะสม (E') ดังรูป 3ก สามารถระบุการเปลี่ยนแปลงสภาวะของชิ้นงานได้ 3 สภาวะโดยสภาวะแรกอยู่ที่อุณหภูมิ -60 ถึง 0 องศาเซลเซียสคือสภาวะคล้ายแก้ว (glassy state) สภาวะที่ 2 อยู่ที่อุณหภูมิ 0 ถึง 55 องศาเซลเซียส คือสภาวะการเปลี่ยนแปลงหรือสภาวะทรานซิชัน (transition state) และสุดท้ายที่อุณหภูมิ 55 ถึง 100 องศาเซลเซียสคือสภาวะคล้ายยาง (rubbery state) เมื่อพิจารณาที่สภาวะคล้ายแก้วเปรียบเทียบระหว่างตัวอย่าง EP-CNSL กับ EP-CNSL/PCL มีค่า E' เท่ากับ 4448.5 และ 1080.4 เมกะปาสคาลตามลำดับ การลดลงของค่า E' มีสาเหตุมาจากการผสม PCL ลงใน EP-CNSL เป็นการเพิ่มส่วนที่สามารถขยับตัวได้โครงสร้างของเมทริกซ์ (mobility-segment) ที่ไม่เกิดปฏิกิริยาการเชื่อมขวางส่งผลให้ชิ้นงานมีความอ่อนตัวลง [14, 21–22] จากผลการทดสอบเมื่อพิจารณาที่สภาวะคล้ายแก้วของตัวอย่าง EP-

CNSL/PCL/CNT0.1 พบว่าค่า E' มีค่าเท่ากับ 5621.8 เมกะปาสคาล เป็นข้อบ่งชี้ว่าการเติมอนุภาค CNT สามารถช่วยเสริมแรงให้แก่ตัวอย่างได้ โดยรูปที่ 4 แสดงภาพการกระจายตัวของอนุภาคเสริมแรง CNT ในเมทริกซ์ จากรูปที่ 3x การเติม PCL เป็นทำหน้าที่เป็นส่วนพลาสติกไซเซอร์ในพอลิเมอร์เมทริกซ์ทำให้ชิ้นงานมีค่า T_g ลดลง เมื่อเปรียบเทียบกับ EP-CNSL/PCL กับ EP-CNSL/PCL/CNT0.1 พบว่าวัสดุประกอบสามารถรับแรงกระทำได้มากขึ้นดังที่เห็นได้จากค่า T_g ที่เพิ่มขึ้นเล็กน้อย

พฤติกรรมการจำรูป

1. จากผลการทดสอบพฤติกรรมการจำรูปในเมทานอลของทุกๆ ตัวอย่างชิ้นงานดังรูปที่ 5ก พบว่าทุกตัวอย่างมีการตอบสนองต่อสารละลายเมทานอลเนื่องจากเมื่อทดสอบชิ้นงานด้วยการแช่ตัวอย่างชิ้นงานลงในสารละลายเมทานอล สารละลายเมทานอลที่ถูกดูดซับโดยตัวอย่างชิ้นงานในระดับโมเลกุล พันธะไฮโดรเจนของเมทานอลส่งแรงกระทำต่อพันธะไฮโดรเจนของโมเลกุลเมทริกซ์ ส่งผลให้แรงกระทำระหว่างโมเลกุลภายในเมทริกซ์ลดลงสายโซ่โมเลกุลเกิดการเคลื่อนตัวได้ง่ายขึ้นและส่งผลให้ค่า T_g ของตัวอย่างลดลงทำให้เกิดการตอบสนองต่อสารละลายเมทานอล [23–25] เมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่าง EP-CNSL กับ EP-CNSL/PCL ที่ระยะเวลา 5 นาที พบว่ามีค่าร้อยละอัตราการคืนสภาพเท่ากับ 17.83 และ 99.51 ตามลำดับ แสดงให้เห็นถึงอัตราการคืนสภาพของตัวอย่างชิ้นงานมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมากเมื่อเติม PCL เนื่องจาก PCL ทำหน้าที่เป็นพลาสติกไซเซอร์ทำให้โมเลกุลของโครงสร้างเมทริกซ์ยับยั้งเคลื่อนตัวได้มากขึ้นและเป็นการเพิ่มปริมาตรอิสระภายในโครงสร้างในเมทริกซ์ โมเลกุลของสารละลายเมทานอลจึงสามารถเข้าแทรกตัวตามปริมาตรอิสระได้มากขึ้นส่งผลให้เกิดพฤติกรรมการจำรูปที่เร็วขึ้น การเติมอนุภาค CNT ส่งผลต่อการตอบสนองต่อสารละลายเมทานอลเพียงเล็กน้อยเนื่องจากการแทนที่เนื้อวัสดุประกอบในส่วนเมทริกซ์

2. การเกิดพฤติกรรมการจำรูปภายใต้แสงอินฟราเรดของตัวอย่างชิ้นงานแสดงดังรูปที่ 5ข เมื่อแสงอินฟราเรดตกกระทบบนตัวอย่างชิ้นงาน EP-CNSL/PCL/CNT0.1 อนุภาค CNT ภายในชิ้นงานจะทำการดูดซับพลังงานจากแสงอินฟราเรดเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อนสะสมแล้วกระจายความร้อนไปทั่วเนื้อเมทริกซ์ของชิ้นงาน [26] จากผลการทดสอบตัวอย่างชิ้นงาน EP-CNSL และ EP-CNSL/PCL มีค่าร้อยละอัตราการคืนสภาพเท่ากับ 0.78 และ 0.87 ตามลำดับ เป็นข้อบ่งชี้ว่าชิ้นงานตัวอย่างที่ไม่มีการผสมอนุภาค CNT ที่ทำหน้าที่ดูดซับพลังงานแสงอินฟราเรดและเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อนทำให้ตัวอย่างชิ้นงานไม่สามารถเกิดการตอบสนองต่อแสงอินฟราเรด เมื่อพิจารณาตัวอย่างที่เติมอนุภาค CNT จากผลการทดสอบพบว่าค่าร้อยละอัตราการคืนสภาพของตัวอย่างชิ้นงาน EP-CNSL/PCL/CNT0.1 มีค่าเท่ากับร้อยละ 99.87

สรุปและอภิปราย

ในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยสามารถเตรียมวัสดุประกอบ EP-CNSL/PCL/CNT ที่สามารถตอบสนองต่อสารละลายเมทานอลและแสงอินฟราเรดโดยใช้สารละลาย DMF เป็นตัวทำละลาย กระบวนการบ่มจากผลการทดสอบด้วยเทคนิค DSC แสดงให้เห็นปฏิกิริยาอีเทอร์ิฟิเคชันและปฏิกิริยาเอสเทอร์ิฟิเคชันระหว่าง EP กับ CNSL ปริมาณการเชื่อมขวางของ EP กับ CNSL ลดลงจากแทนที่เนื้อเมทริกซ์ที่เกิดปฏิกิริยาการเชื่อมขวางด้วยการเติม PCL และอนุภาค CNT ทำให้ค่าเอนทาลปีลดลง อุณหภูมิที่ใช้ในการบ่มสูงขึ้นเนื่องจาก PCL ขัดขวางการเข้าทำปฏิกิริยาของ EP กับ CNSL ส่วนอนุภาค CNT เพิ่มความหนืดให้แก่ EP ในการเข้าทำปฏิกิริยากับสารเร่งแข็งจากผล DSC พบว่าชิ้นงานทุกชิ้นเกิดการบ่มที่สมบูรณ์ การเติม PCL เป็นการเพิ่มความสามารถในการตอบสนองต่อสารละลายเมทานอลเนื่องจาก PCL ทำหน้าที่เป็นพลาสติกไซเซอร์และเพิ่มปริมาณปริมาตรอิสระในเนื้อเมทริกซ์ทำให้สารละลายเมทานอลสามารถแทรกตัวตามโครงสร้างโมเลกุลเมทริกซ์และลดแรงกระทำระหว่างโมเลกุลของสายโซ่พอลิเมอร์ การเติมอนุภาค CNT เพื่อเสริมความแข็งแรง และการตอบสนองต่อแสงอินฟราเรดแก่ชิ้นงาน จากผลการทดลองพบว่าอนุภาค CNT มีการกระจายตัวที่ดีในเนื้อวัสดุประกอบส่งผลต่อการ

กระจายความร้อนที่เปลี่ยนแปลงมาจากแสงอินฟราเรดให้ทั่วถึงในเนื้อชิ้นงาน จากผลการทดสอบคุณสมบัติเชิงกลทางความร้อนบ่งชี้ตัวอย่างชิ้นงานที่ถูกเติมอนุภาค CNT มีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นโดยอนุภาค CNT ไม่เกิดปฏิกิริยากับส่วนเนื้อเมทริกซ์ของชิ้นงาน จากผลการทดสอบการตอบสนองต่อปัจจัยกระตุ้นกายพบว่าเมื่อเติมอนุภาค CNT ตัวอย่างชิ้นงานมีการตอบสนองต่อความร้อนที่เร็วขึ้น ในส่วนการตอบสนองต่อแสงอินฟราเรดของชิ้นงานแสดงให้เห็นว่าอนุภาค CNT สามารถเปลี่ยนพลังงานแสงอินฟราเรดเป็นพลังงานความร้อนเพื่อใช้ในการคืนสภาพของชิ้นงาน โดยตัวอย่างชิ้นงานที่ไม่มีการเติมอนุภาค CNT สามารถกล่าวได้ว่าไม่มีการตอบสนองต่อแสงอินฟราเรด ดังนั้นจากผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่าวัสดุประกอบชนิดนี้เป็นหนึ่งในวัสดุจำรูปที่สามารถใช้งานภายใต้ปัจจัยการกระตุ้นด้วยความร้อน แสงอินฟราเรดและสารละลายเมทานอล การตอบสนองต่อปัจจัยการกระตุ้นอื่นๆ ยังเป็นหัวข้อที่ต้องศึกษาและพัฒนาต่อไปในภายภาคหน้า

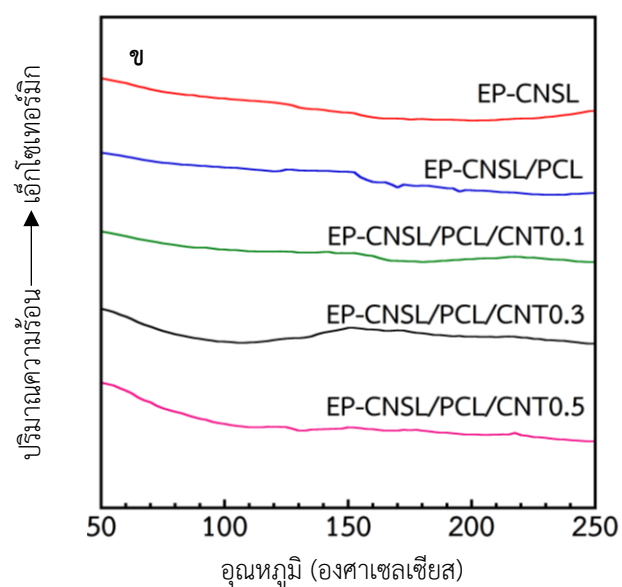
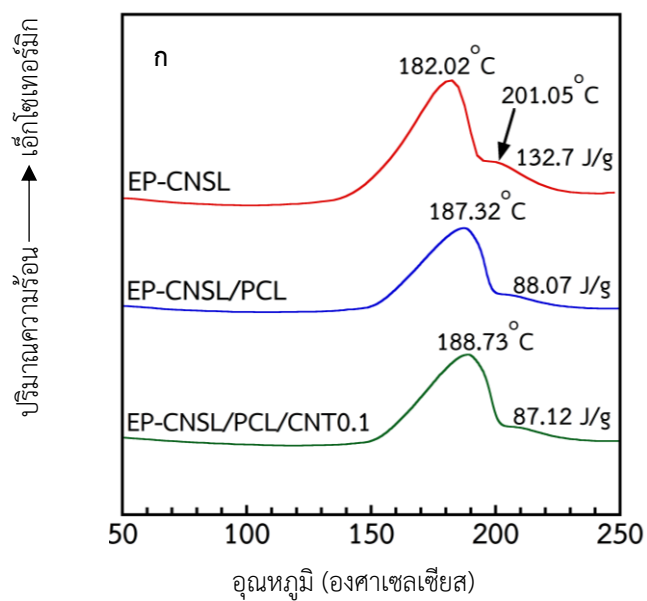
เอกสารอ้างอิง

1. Li Y, Chen H, Liu D, Wang W, Liu Y, Zhou S. PH-Responsive Shape Memory Poly(ethylene glycol)-Poly(ϵ -caprolactone)-based Polyurethane/Cellulose Nanocrystals Nanocomposite. ACS Appl Mater Interfaces. 2015;7(23):12988–12999.
2. Wang Z, Liu J, Guo J, Sun X, Xu L. The study of thermal, mechanical and shape memory properties of chopped carbon fiber-reinforced TPI shape memory polymer composites. Polymers (Basel). 2017;9(11).
3. Lu H, Yao Y, Huang WM, Leng J, Hui D. Significantly improving infrared light-induced shape recovery behavior of shape memory polymeric nanocomposite via a synergistic effect of carbon nanotube and boron nitride. Compos Part B Eng. 2014;62:256–261.
4. Fan X, Khosravi F, Rahneshtin V. MoS₂ actuators : reversible mechanical responses of MoS₂ - polymer nanocomposites to photons. Nanotechnology. 26(26):261001.
5. Lu H, Huang WM. Chemo-responsive shape-memory polymers for biomedical applications. Shape Memory Polymers for Biomedical Applications. 2015. 99–132 p.
6. Ang JY, Chan BQY, Kai D, Loh XJ. Engineering Porous Water-Responsive Poly(PEG/PCL/PDMS Urethane) Shape Memory Polymers. Macromol Mater Eng. 2017;302(9):1–11.
7. Tsujimoto T, Takayama T, Uyama H. Biodegradable shape memory polymeric material from epoxidized soybean oil and polycaprolactone. Polymers (Basel). 2015;7(10):2165–2174.
8. Kasemsiri P, Neramittagapong A, Chindaprasit P. Curing kinetic, thermal and adhesive properties of epoxy resin cured with cashew nut shell liquid. Thermochim Acta. 2015;600:20–27.
9. Kasemsiri P, Lorwanishpaisarn N, Pongsa U, Ando S. Reconfigurable shape memory and self-welding properties of epoxy phenolic novolac/cashew nut shell liquid composites reinforced with carbon nanotubes. Polymers (Basel). 2018;10(5).
10. Mota JA. Ac ce pte d M us pt. Environ Res Lett. 2018;(February 2016):0–39.
11. Du J, Zhang Z, Liu D, Ren T, Wan D, Pu H. Triple-stimuli responsive shape memory effect of novel polyolefin elastomer/lauric acid/carbon black nanocomposites. Compos Sci Technol. 2019;169(October 2018):45–51.

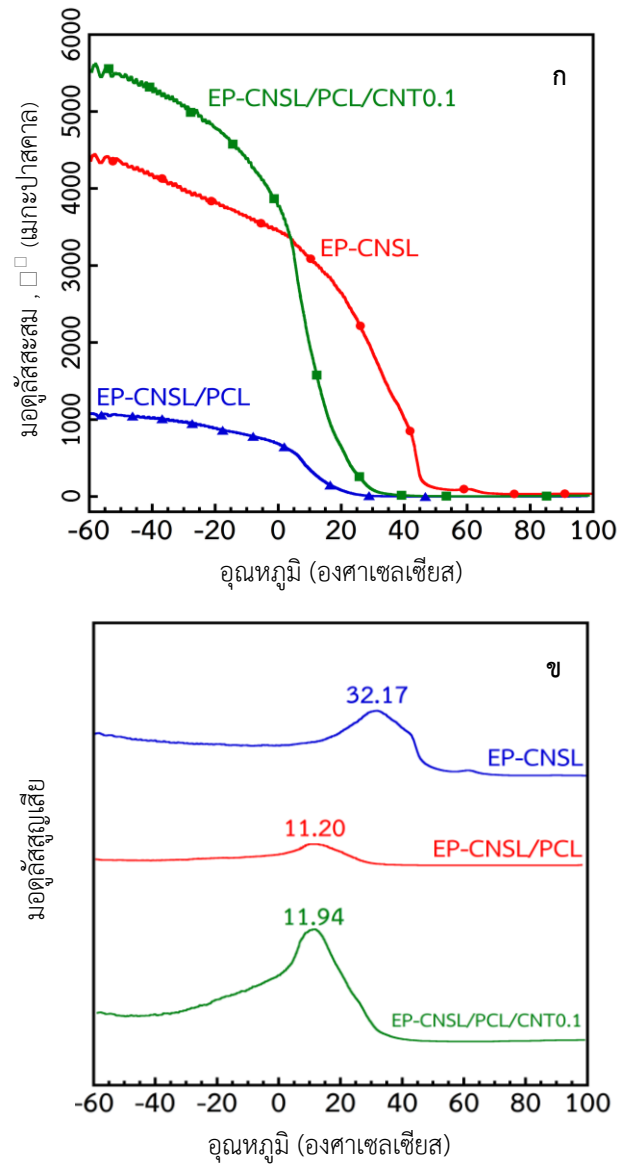
12. Lorwanishpaisarn N, Kasemsiri P, Srikhao N, Jetsrisuparb K, Knijnenburg JTN, Hiziroglu S, et al. Fabrication of durable superhydrophobic epoxy/cashew nut shell liquid based coating containing flower-like zinc oxide for continuous oil/water separation. *Surf Coatings Technol.* 2019;366(February):106–113.
13. Kasemsiri P, Lorwanishpaisarn N, Pongsa U, Ando S. Reconfigurable shape memory and self-welding properties of epoxy phenolic novolac/cashew nut shell liquid composites reinforced with carbon nanotubes. *Polymers (Basel).* 2018;10(5).
14. Lorwanishpaisarn N, Kasemsiri P, Jetsrisuparb K, Jesper T, Knijnenburg N, Hiziroglu S, et al. Dual-responsive shape memory and self-healing ability of a novel copolymer from epoxy / cashew nut shell liquid and polycaprolactone. *Polym Test.* 2019;(September):106159.
15. Arnebold A, Hartwig A. Fast switchable, epoxy based shape-memory polymers with high strength and toughness. *Polymer (Guildf).* 2016;83:40–49.
16. Li X, Kang H lan, Shen J xiang, Zhang L qun, Nishi T, Ito K. Miscibility, intramolecular specific interactions and mechanical properties of a DGEBA based epoxy resin toughened with a sliding graft copolymer. *Chinese J Polym Sci (English Ed.* 2015;33(3):433–443.
17. Ni Y, Zheng S. Influence of intramolecular specific interactions on phase behavior of epoxy resin and poly(ϵ -caprolactone) blends cured with aromatic amines. *Polymer (Guildf).* 2005;46(15):5828–5839.
18. Yang K, Gu M, Jin Y. Cure Behavior and Thermal Stability Analysis of Multiwalled Carbon Nanotube/Epoxy Resin Nanocomposites. *J Appl Polym Sci.* 2008 Dec 5;110:2980–2988.
19. Vijayan PP, Puglia D, Rastin H, Saeb MR, Shojaei B, Formela K. Cure kinetics of epoxy/MWCNTs nanocomposites: Isothermal calorimetric and rheological analyses. *Prog Org Coatings.* 2017;108(April):75–83.
20. Garg P, Singh BP, Kumar G. Effect of dispersion conditions on the mechanical properties of multi-walled carbon nanotubes based epoxy resin composites. 2011;1397–1407.
21. Siddhamalli SK. Toughening of Epoxy / Polycaprolactone Composites via Reaction Induced Phase Separation. 2000;21(October).
22. Guo Q, Groeninckx G. Crystallization kinetics of poly (1 -caprolactone) in miscible thermosetting polymer blends of epoxy resin and poly (1 -caprolactone). 2001;42.
23. Lamm ME, Wang Z, Zhou J, Yuan L, Zhang X, Tang C. Sustainable epoxy resins derived from plant oils with thermo- and chemo-responsive shape memory behavior. *Polymer (Guildf).* 2018;144:121–127.
24. Yang B, Huang WM, Li C, Lee CM, Li L. On the effects of moisture in a polyurethane shape memory polymer. 191:1–6.
25. Du H, Zhang J. Solvent induced shape recovery of shape memory polymer based on chemically cross-linked poly (vinyl alcohol). 2010;3370–3376.
26. Kohlmeyer RR, Lor M, Chen J. Remote, Local, and Chemical Programming of Healable Multishape Memory Polymer Nanocomposites. 2012;



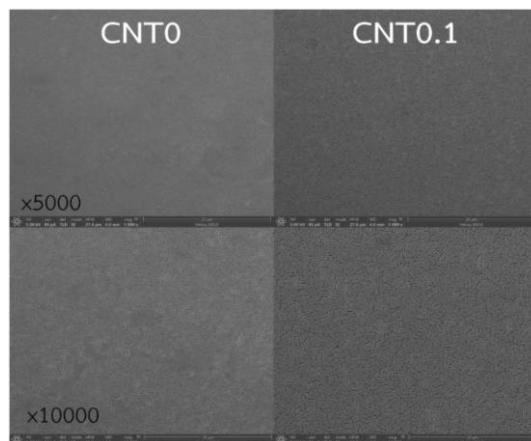
ภาพที่ 1 ค่ามุมที่เปลี่ยนไปของชั้นงานจากการกระตุ้นด้วยปัจจัยภายนอก



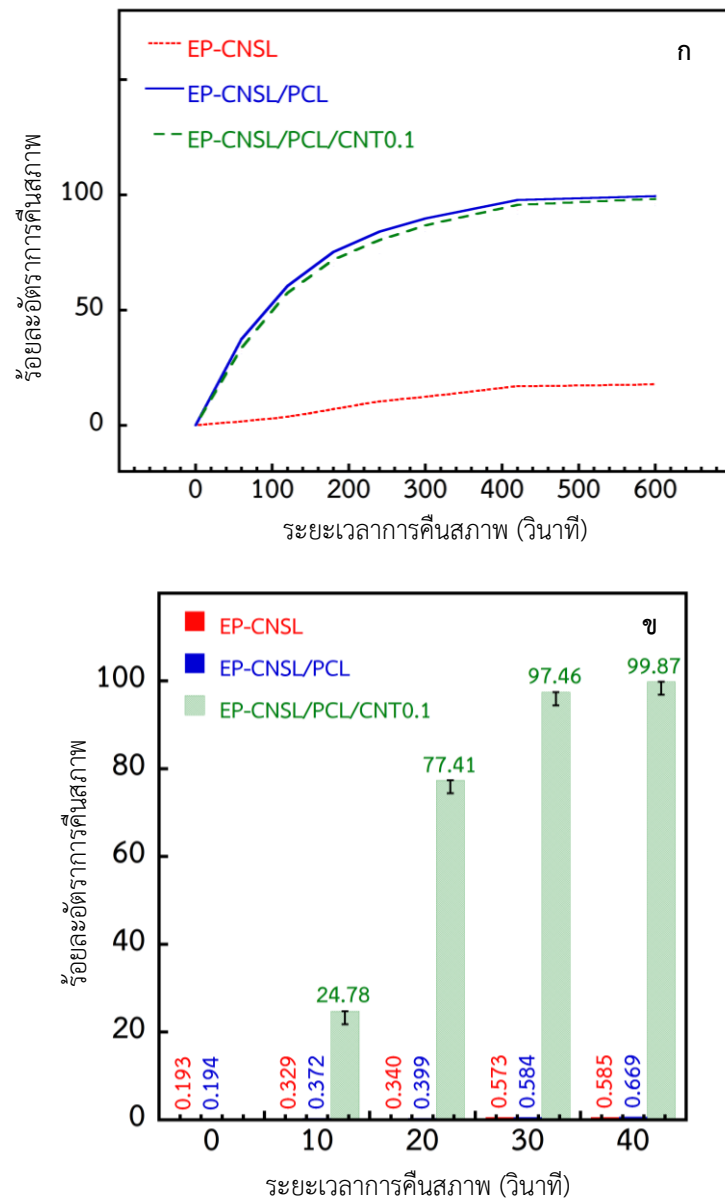
ภาพที่ 2 กราฟ DSC ของตัวอย่างชั้นงาน (ก) ก่อนทำการบ่มและ (ข) หลังการบ่มชั้นงาน ตามลำดับ
(ปริมาณความร้อน: มิลลิวัตต์/มิลลิกรัม)



ภาพที่ 3 กราฟแสดงค่ามอดูลัสสะสม(ก) และค่ามอดูลัสสูญเสีย(ข) ของตัวอย่างชิ้นงาน



ภาพที่ 4 ภาพถ่าย FESEM ตัวอย่างชิ้นงาน EP-CNSL/PCL และ EP-CNSL/PCL/CNT0.1



ภาพที่ 5 อัตราการคืนสภาพต่อเวลา ก) การตอบสนองต่อสารละลายเมทานอล และ ข) การตอบสนองต่อแสงอินฟราเรดของตัวอย่างชิ้นงาน