

พอลิเมอร์จำรูปและพอลิเมอร์คอมโพสิตจำรูปการกระตุ้นด้วย สิ่งเร้า 5 แบบ

ปสุตา สังข์ศรี^{1*} และ ประภัสสร กุลทอง²

ได้รับบทความ: 16 กุมภาพันธ์ 2563

ได้รับบทความแก้ไข: 3 มิถุนายน 2563

ยอมรับตีพิมพ์: 8 มิถุนายน 2563

บทคัดย่อ

พอลิเมอร์จำรูป (SMPs) และพอลิเมอร์คอมโพสิตจำรูป (SMPCs) เป็นวัสดุที่กลับคืนรูปร่างเดิมด้วยการกระตุ้นจากสิ่งเร้าภายนอกและมีส่วนประกอบสำคัญคือ โครงสร้างร่างแหที่มีความเสถียรและส่วนที่มีการเปลี่ยนแปลงกลับไปมาได้ บทความนี้อธิบายกลไกการกระตุ้น การกลับคืนรูป และสมบัติเชิงกลของ SMPs และ SMPCs กระตุ้นด้วยอุณหภูมิ แสงอินฟราเรด สนามแม่เหล็ก สนามไฟฟ้า และสารเคมี งานวิจัยที่ผ่านมารายงานผลเสริมฤทธิ์กันของโบรอนไนไตรด์/ท่อนาโนคาร์บอน และสมบัติดีเยี่ยมของกราฟีนออกไซด์ที่ผ่านกระบวนการรีดักชันด้วยความร้อนที่ใช้เป็นสารเสริมแรงในพอลิเมอร์จำรูปฐานอีพอกซี กระตุ้นด้วยอุณหภูมิและแสงอินฟราเรด ตามลำดับ โลหะผสมสนามแม่เหล็กจำรูป และท่อนาโนคาร์บอน ดัดแปลงถูกใช้เป็นสารตัวเติมในคอมโพสิตจำรูปฐานอีพอกซีกระตุ้นด้วยสนามแม่เหล็กและคอมโพสิตจำรูปฐานพอลิยูรีเทน/พอลิแลคติกแอซิดที่กระตุ้นด้วยสนามไฟฟ้า ตามลำดับ การกระจายตัวของสารตัวเติมในเมทริกซ์และอันตรกิริยาระหว่างสารตัวเติมกับเมทริกซ์ส่งผลต่อการกลับคืนรูปและสมบัติเชิงกล ปรากฏการณ์การจำรูปของ SMPCs กระตุ้นด้วยอุณหภูมิ แสงอินฟราเรดและสนามไฟฟ้าขึ้นอยู่กับการนำความร้อน และการคืนรูปของ SMPs กระตุ้นด้วยสารเคมีขึ้นอยู่กับเปลี่ยนแปลงโครงสร้างเคมี

คำสำคัญ: พอลิเมอร์จำรูป พอลิเมอร์คอมโพสิตจำรูป อีพอกซี พอลิยูรีเทน การกระตุ้น

¹สาขาวิชาเทคโนโลยีการผลิต คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏนครศรีธรรมราช

²สาขาวิชาเทคโนโลยีโยธา คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏนครศรีธรรมราช

*ผู้นิพนธ์ประสานงาน, email: nuruks@hotmail.com

Shape Memory Polymers and Shape Memory Polymer Composites Stimulated by 5 Stimuli Types

Pasuta Sungsee^{1*} and Prapatsorn Kulthong²

Received: 16 February 2020

Revised: 3 June 2020

Accepted: 8 June 2020

ABSTRACT

Shape memory polymers (SMPs) and shape memory polymer composites (SMPCs) are materials recovered by external stimulations, and contain important components which are stable network and reversible switching transition. This review explains stimulation mechanism, shape recovery and mechanical properties of SMPS and SPMCs induced by temperature, infrared-light, magnetic field, electrical field and chemical. The previous research works reported the synergistic effect of boron nitride/carbon nanotube and excellent properties of thermally reduced graphite oxide which were the reinforcement in epoxy-based SMP stimulated by temperature and infrared-light, respectively. Ferromagnetic shape memory alloys and modified carbon nanotubes were used as filler in epoxy-based SMPC induced by magnetic field and polyurethane/poly(lactic acid)-based SMPC induced by electrical field, respectively. The dispersion of fillers in polymer matrix and filler-matrix interaction affects to shape recovery and mechanical properties. Shape memory effect of SMPCs stimulated by temperature, infrared-light and electrical field depends on thermal conductivity, and shape recovery of SMPs stimulated by chemical depends on chemical structure change.

Keywords: Shape memory polymers, shape memory polymer composites, epoxy, polyurethane, stimulations

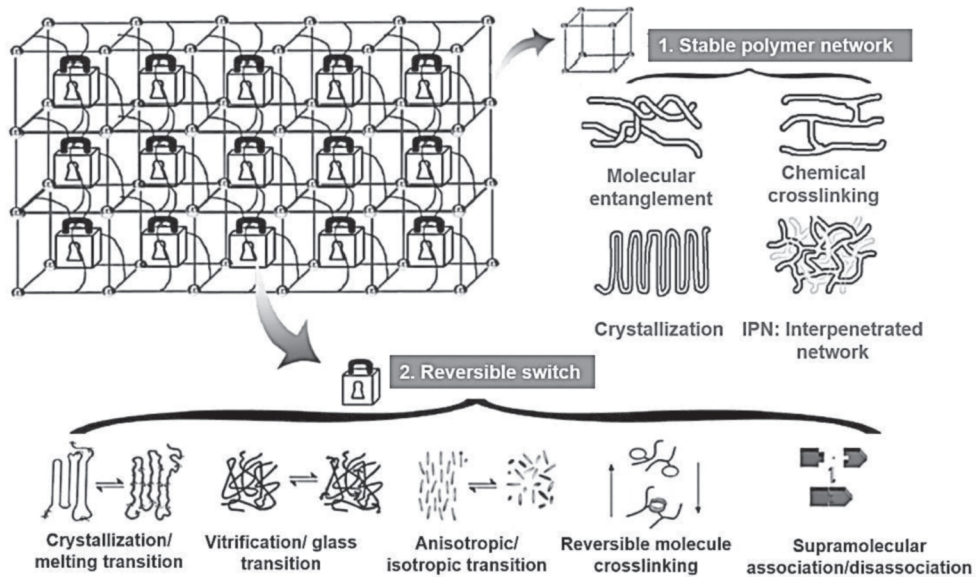
¹Production Technology Programs, Faculty of Industrial Technology, Nakhon Si Thammarat Rajabhat University

²Civil Technology Programs, Faculty of Industrial Technology, Nakhon Si Thammarat Rajabhat University

*Corresponding author, email: nuruks@hotmail.com

บทนำ

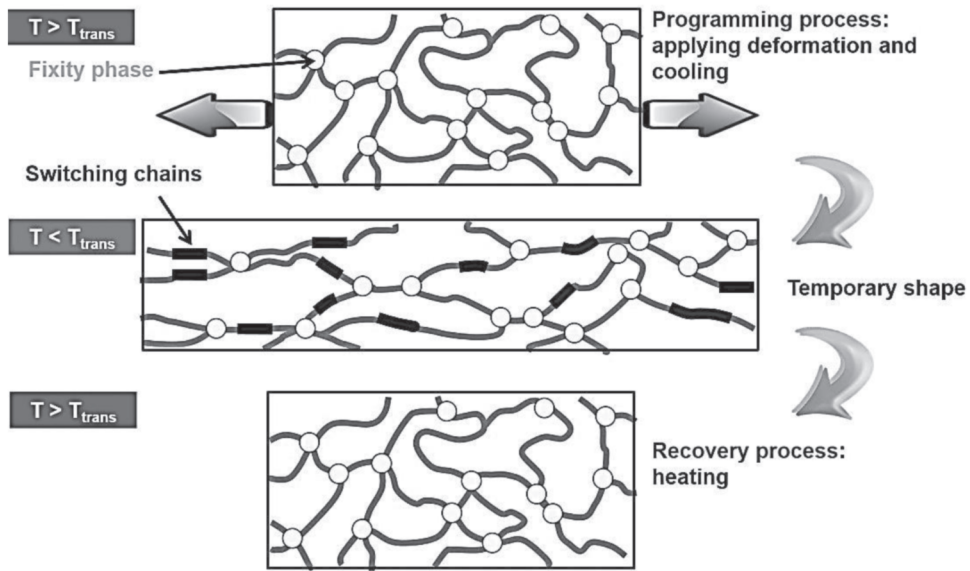
วัสดุจำรูปเป็นวัสดุที่มีความสามารถในการคืนรูปจากการเสียรูปแบบถาวรด้วยการรับภาระกระตุ้นจากภายนอก ปรากฏการณ์ดังกล่าวเรียกว่า “ปรากฏการณ์จำรูป (shape memory effect, SME) วัสดุจำรูปสามารถแบ่งออกได้เป็น พอลิเมอร์จำรูป โลหะผสมจำรูป เซรามิกส์จำรูปและคอมโพสิตจำรูป ซึ่งมีการใช้งานอย่างกว้างขวางในงานด้านการแพทย์ วิศวกรรมอากาศยาน อุปกรณ์เครื่องใช้ในบ้าน อุปกรณ์ไฟฟ้า อิเล็กทรอนิกส์และชิ้นส่วนรถยนต์ เป็นต้น สำหรับพอลิเมอร์จำรูป (shape memory polymer, SMPs) ปรากฏการณ์จำรูปจะเกิดขึ้นได้จากองค์ประกอบ 2 ส่วนคือ ส่วนโครงสร้างร่างแหพอลิเมอร์ที่เสถียร และส่วนที่สามารถเปลี่ยนกลับไปมาได้ดังรูปที่ 1 [1] ส่วนโครงสร้างร่างแหพอลิเมอร์ที่เสถียร เช่น โครงสร้างการพันกันของสายโซ่โมเลกุล (molecule entanglement) การเชื่อมขวางทางเคมี (chemical cross-linking) และการเกิดผลึก (crystalline phase) เป็นต้น ตัวลอคอินรูปที่ 1 คือบริเวณที่สามารถเกิดการเปลี่ยนกลับไปมาได้ เช่น การเปลี่ยนกลับไปมาของการเกิดผลึกและการหลอมตัว การเปลี่ยนกลับไปมาของการเชื่อมขวาง เป็นต้น [1] พอลิเมอร์จำรูปสามารถเกิดปรากฏการณ์จำรูปจากการกระตุ้นด้วย อุณหภูมิ ความชื้น สารเคมี การฉายแสง สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก [2] และมีจุดเด่นคือ น้ำหนักเบา ต้นทุนการผลิตต่ำ ชิ้นงานสามารถเสียรูปและคืนรูปได้ดี แต่ก็มีจุดด้อยคือมีความเสถียรต่อความร้อน มีความแข็งแรงและการดูดซับแรงที่ค่อนข้างต่ำซึ่งสามารถแก้ไขได้โดยการผสมสารเสริมแรงเข้าไป โดยสามารถผสมได้ทั้งแบบเชิงกายภาพ การผสมแบบเกิดพอลิเมอร์เซชันในระหว่างผสม หรือการผสมผ่านการเชื่อมขวางทางเคมีจนได้เป็น พอลิเมอร์คอมโพสิตจำรูป (shape memory polymer composites, SMPCs) [3] มีสารเสริมแรงหลายชนิดที่มีรายงานการนำไปใช้เพื่อให้ได้เป็นพอลิเมอร์คอมโพสิตจำรูป ยกตัวอย่างเช่น ท่อนาโนคาร์บอน (carbon nanotubes, CNTs) [4] เส้นใยนาโนคาร์บอน (carbon nanofibers, CNFs) [5] นาโนเคลย์ที่มีโครงสร้างแบบเอ็กซีฟลิเอต (exfoliated nanoclay) [6] เป็นต้น บทความวิชาการฉบับนี้ต้องการอธิบายถึงปรากฏการณ์จำรูปที่ถูกกระตุ้นด้วยอุณหภูมิ แสง สนามแม่เหล็ก สนามไฟฟ้าและสารเคมีของพอลิเมอร์จำรูปและพอลิเมอร์คอมโพสิตจำรูปที่มีอีพอกซีและพอลิยูรีเทนเป็นเมทริกซ์จากการเติมสารตัวเติมชนิดต่างๆ ลงไปโดยจะอธิบายกลไกการกระตุ้นแบบต่างๆ กลไกการคืนรูปและสมบัติต่างๆ ที่สำคัญเช่น สมบัติเชิงกลและสมบัติการคืนรูปที่ถูกกระตุ้นด้วยสิ่งเร้าทั้ง 5 แบบ



รูปที่ 1 โครงสร้างโมเลกุลที่หลากหลายของ SMPs ที่สำคัญต่อการเกิดปรากฏการณ์จำรูป ประกอบด้วย โครงสร้างร่างแหพอลิเมอร์ที่เสถียร และส่วนที่สามารถเปลี่ยนกลับไปมาได้ (ที่มาจาก [1])

พอลิเมอร์จำรูปและพอลิเมอร์คอมโพสิตจำรูปกระตุ้นด้วยความร้อน กลไกการเกิดปรากฏการณ์จำรูปกระตุ้นด้วยความร้อน

กลไกการเกิดปรากฏการณ์จำรูปจากการกระตุ้นด้วยความร้อนของพอลิเมอร์จำรูปแสดงดังรูปที่ 2 ปรากฏการณ์จำรูปจะเกิดผ่านอุณหภูมิการเปลี่ยนแปลง (T_{trans}) จากรูปโครงสร้างของพอลิเมอร์จำรูป ประกอบด้วย 2 ส่วนสำคัญคือ เฟสที่ทำให้โครงสร้างร่างแหพอลิเมอร์อยู่กับที่ (fixity phase) และสายโซ่ที่เปลี่ยนกลับไปมาได้ (switching chains) กลไกการเกิดปรากฏการณ์จำรูปเริ่มที่อุณหภูมิสูงกว่า T_{trans} ($T > T_{trans}$) ชิ้นงานได้รับแรงทางกลจนเกิดการเสียรูปและเปลี่ยนรูปร่างจากการยืดออกของสายโซ่ที่เปลี่ยนกลับไปมาได้ หลังจากนั้นลดอุณหภูมิลงจนมีค่าต่ำกว่า T_{trans} ($T < T_{trans}$) จนได้ชิ้นงานที่มีรูปร่างชั่วคราว (temporary shape) และชิ้นงานสามารถกลับสู่รูปร่างเดิมได้เองจากการเพิ่มอุณหภูมิให้สูงกว่า T_{trans} ในกระบวนการคืนรูป (recovery process) [2]

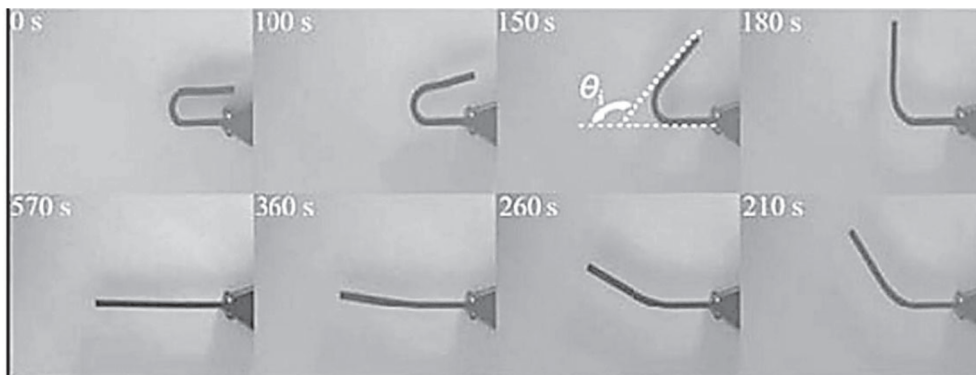


รูปที่ 2 กลไกการเกิดปรากฏการณ์จำรูปของพอลิเมอร์จำรูปกระตุ้นด้วยความร้อน (ดัดแปลงจาก [2])

พอลิเมอร์คอมโพสิตจำรูปกระตุ้นด้วยความร้อน

คาร์บอนแบล็ค ท่อนาโนคาร์บอน เส้นใยสั้น และเส้นใยต่อเนื่อง เป็นสารเสริมแรงที่นำมาใช้เพื่อให้ได้พอลิเมอร์คอมโพสิตจำรูปที่มีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น [4-5] สารเสริมแรงอีกหนึ่งชนิดที่น่าสนใจคือ กราไฟต์ออกไซด์ที่ผ่านกระบวนการรีดักชันด้วยความร้อน (thermally reduced graphite oxide) หรือ TrGO ที่สังเคราะห์ขึ้นได้จากการรีดักชันด้วยกระบวนการทางความร้อนอย่างรวดเร็วของกราฟต์ออกไซด์ [3, 8] ทำให้ TrGO มีรูพรุนที่มีพื้นที่ผิวจำเพาะสูง มีสมบัติการนำไฟฟ้าและนำความร้อนได้ดี มีสมบัติทางกลที่ดี และสามารถเข้ากันได้กับพอลิเมอร์หลายๆ ชนิด Chen และคณะ [3] เตรียมนาโนคอมโพสิตระหว่างพอลิเมอร์จำรูปฐานพอกซี (epoxy-based SMP) หรือ ESMP กับ TrGO กระบวนการเตรียมนาโนคอมโพสิตเริ่มจากผสมเรซินอีพอกซี ฮาร์ดเดนเนออร์ มอนอเมอร์อีพอกซีสายโซ่ตรงกับ TrGO (ปริมาณ 1 2 และ 3 wt%) ผ่านเครื่องผสม 3 ลูกกลิ้ง (three raw mills, TRM) ที่มีช่องว่างระหว่างลูกกลิ้งที่ลดลงจาก 100 μm จนถึง 5 μm และนำไปหล่อขึ้นรูปบนแม่พิมพ์แก้วและบ่มที่อุณหภูมิ 80 $^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 1 ชั่วโมง และบ่มต่อที่อุณหภูมิ 150 $^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 6 ชั่วโมง จนได้เป็นแผ่นคอมโพสิตของ TrGO/ESMP Chen และคณะ [3] พบว่าความมีขี้ของ TrGO สามารถส่งเสริมการเกิดพันธะระหว่างพื้นผิวของ TrGO กับ ESMP และกระบวนการขึ้นรูปโดยใช้เทคนิค TRM จะเหนี่ยวนำให้แผ่นนาโนกราฟต์ใน TrGO เกิดการแยกกระจายออกซึ่งสามารถยืนยันได้ด้วยผลการทดสอบด้วยเทคนิควิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD) ที่ไม่ปรากฏพิกัดแสดงการเกิดผลึกของ TrGO ในคอมโพสิต ผลการทดสอบสมบัติเชิงกลพบว่าค่า Young's modulus ค่าความแข็งแรงดึงและค่ามอดูลัสตัดโค้งของคอมโพสิตเพิ่มขึ้นตามปริมาณของ TrGO ซึ่งเป็นผลจากยึดติดได้ดีระหว่างพื้นผิวของ ESMP และ TrGO ส่งผลให้เกิดการส่งผ่านแรงจากเนื้อพื้นของ ESMP สู่ TrGO ได้เป็นอย่างดี [3]

Chen และคณะ [8] ทำการทดสอบปรากฏการณ์การจำรูปของคอมโพสิต TrGO/ESMP มี 4 ขั้นตอนเริ่มจาก (1) ตัดตัวอย่างทดสอบเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า (ยาว x กว้าง xหนา: 82 mm x 10 mm x 3 mm) และให้ความร้อนแก่ตัวอย่างทดสอบจนถึงอุณหภูมิ 140°C (2) ตัดตัวอย่างทดสอบเป็นรูปตัวยูรอบแกนกลางที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 mm โดยบันทึกมุมการดัดสูงสุดเป็นค่า θ_{max} (3) ลดอุณหภูมิตัวอย่างทดสอบภายจนถึงอุณหภูมิห้องภายใต้แรงทางกลคงที่ หลังจากนั้นหลายนาทีเอาแรงทางกลออก การคืนรูปเกิดขึ้นเล็กน้อยและมุมการโค้งของตัวอย่างลดลงและกำหนดไว้เป็นค่ามุมที่ถูกกำหนดไว้ θ_{fixed} และขั้นสุดท้าย (4) วัดและบันทึกมุมการงอของตัวอย่างที่แปรผันกับเวลาที่เพิ่มขึ้น (θ_t) ตัวอย่างการเปลี่ยนแปลงมุม θ_t ของชิ้นตัวอย่างคอมโพสิต TrGO/ESMP แสดงดังรูปที่ 3 [8]



รูปที่ 3 ตัวอย่างการเปลี่ยนแปลงมุม θ_t ของชิ้นงานที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา (ดัดแปลงจาก [8])

Chen และคณะ [8] ได้นำผลการทดสอบที่ได้มาคำนวณหาค่าอัตราส่วนการคงรูป (shape retention ratio; R) และค่าอัตราส่วนการคืนรูป (shape recovery ratio; R_r) จากสมการที่ 1 และ 2 ตามลำดับ

$$R = \frac{\theta_{fixed}}{\theta_{max}} \times 100\% \quad (1)$$

$$R_r = \frac{(\theta_{max} - \theta_t) \times 100\%}{\theta_{max}} \quad (2)$$

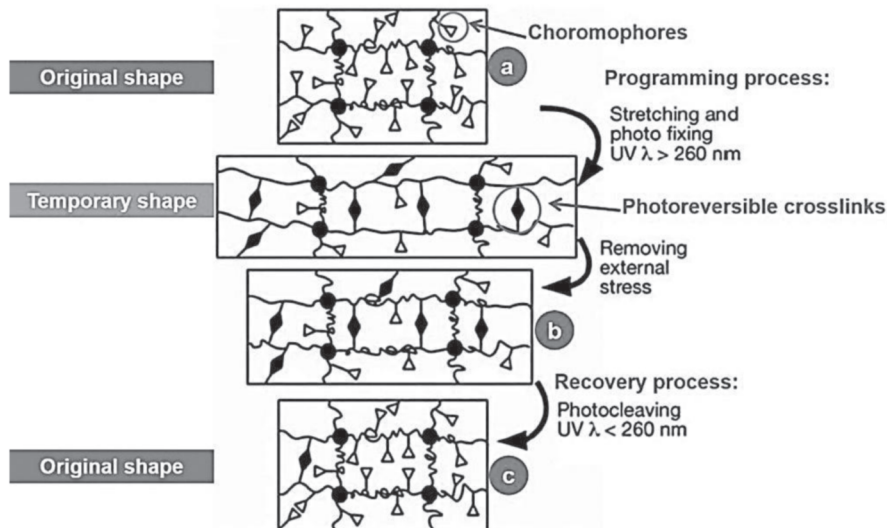
จากการทดสอบพบว่าความแตกต่างระหว่างมุมที่ถูกกำหนดไว้ (θ_{fixed}) และมุมการดัดสูงสุด (θ_{max}) มีค่าแตกต่างกันน้อยกว่า 2° เสมอ ดังนั้นชิ้นตัวอย่างทดสอบทุกชิ้นจะมีค่าอัตราส่วนการคงรูปหรือค่า R มากกว่า 99% จากรูปที่ 3 เป็นการคืนรูปของชิ้นงานคอมโพสิตรูปตัวยูพบการลดลงของมุมการงอ (θ_t) ตามเวลาที่เพิ่มขึ้น โดยการเพิ่มเฟส TrGO ลงใน ESMP เพิ่มเวลาในการคืนรูปจากเดิม 170 ± 10 s ไปเป็นค่าที่สูงที่สุดที่ 570 ± 15 s นั้นอาจเป็นผลมาจากการกระจายตัวอย่างเป็นรูปแบบของ TrGO ใน ESMP และอันตรกิริยาที่ีระหว่างพื้นผิวของ TrGO และ ESMP ส่งผลให้อนุภาคของ TrGO เข้าไปขัดขวาง

การเคลื่อนที่อย่างอิสระของสายโซ่พอลิเมอร์ และเป็นเหตุผลเดียวกันที่ทำให้ค่า T_g ของ ESMP ที่ได้จากการทดสอบด้วยเทคนิค DSC เพิ่มขึ้นจาก 90.6°C เป็นค่าสูงสุดที่ 97.3°C เมื่อมีการเพิ่มเฟส TrGO ลงไป ผลการทดสอบด้วยเทคนิค DMA พบว่าการเพิ่มเฟส TrGO เพิ่มค่ามอดูลัสสะสมของ ESMP จาก 1.3 GPa เป็น 1.8 GPa นอกจากนี้การเติม 1% TrGO ยังสามารถเพิ่มแรงในการคืนรูป (recovery force) ได้อย่างมีนัยสำคัญ [8]

พอลิเมอร์จำรูปและพอลิเมอร์คอมโพสิตจำรูปกระตุ้นด้วยแสง

กลไกการเกิดปรากฏการณ์จำรูปกระตุ้นด้วยแสง

พอลิเมอร์จำรูปกระตุ้นด้วยแสงจะมีการเติมโครโมฟอร์ (chromophores) ซึ่งเป็นโมเลกุลของสารอินทรีย์ที่มีหมู่ฟังก์ชันที่ไม่เสถียรที่สามารถดูดกลืนแสงยูวี-วิสิเบิลได้ ตัวอย่างกลไกการเกิดปรากฏการณ์จำรูปของพอลิเมอร์ชนิดดังกล่าวแสดงในรูปที่ 4 เมื่อชิ้นงานที่มีรูปร่างเดิม (original shape) ได้รับแรงทางกลและมีการฉายแสงที่มีความยาวคลื่นมากกว่า 260 nm โครโมฟอร์จะถูกกระตุ้นให้เกิดการเชื่อมขวางจนพอลิเมอร์มีโครงสร้างแบบร่างแหและชิ้นงานเปลี่ยนแปลงรูปร่างจนได้รูปร่างแบบชั่วคราว (temporary shape) หลังจากเอาแรงดึงออก จากนั้นการคืนรูปของชิ้นงานจะเกิดจากการฉายแสงที่มีความยาวคลื่นที่เหมาะสมเพื่อกระตุ้นให้ชิ้นงานเปลี่ยนแปลงกลับสู่รูปร่างเดิม [9]



รูปที่ 4 กลไกการเกิดปรากฏการณ์จำรูปกระตุ้นด้วยแสงของพอลิเมอร์จำรูป (ดัดแปลงจาก [9])

พอลิเมอร์คอมโพสิตจำรูปกระตุ้นด้วยแสง

พอลิเมอร์คอมโพสิตจำรูปกระตุ้นด้วยแสง หรือ “photoactive SPMCs” พัฒนาขึ้นมาบนพื้นฐานของการเติมสารตัวเติมที่สามารถตอบสนองต่อแสงและก่อให้เกิดปรากฏการณ์จำรูปลงไป เช่น (1) “photoisomerizable molecules” เป็นโมเลกุลที่สามารถเกิดไอโซเมอร์ริซึมจากการกระตุ้นด้วยแสง เช่น เอโซเบนซีน [10] (2) “photo-induced reversible dimerization molecule” เป็นโมเลกุลที่สามารถ

เกิดกระบวนการไคโมเมอร์ไรเซชันกลับไปได้ เช่น cinnamates หรือ coumarin [11] (3) สารที่สามารถทำให้เกิดการเติม- การแยกกระจายของปฏิกิริยาการย้ายสายโซ่ เช่น Allyl sulfide [12] (4) สารที่ทำให้เกิดการแยกตัวของไอออนกลับไปมาจากการกระตุ้นด้วยแสง เช่น trienphylmethane leuco [12] (5) สารประกอบเชิงซ้อนที่สามารถเกิดพันธะโคออดิเนชันระหว่างโลหะกับลิแกนด์จากการกระตุ้นด้วยแสง (photoactive metal-ligand coordination bonds) [13] และ (6) สารที่ทำให้เกิดผลทางความร้อนจากการกระตุ้นด้วยแสง (photothermal effect) เช่น อนุภาคทอง คาร์บอนแบล็ค และท่อนาโนคาร์บอน เป็นต้น [1] มีงานวิจัยมากมายที่แสดงถึงความสำเร็จของการเกิดปรากฏการณ์จํารูปจากการกระตุ้นด้วยรังสีอินฟราเรดของคอมโพลิตจํารูปที่ใช้พื้นฐานของการเกิดผลทางความร้อนจากการกระตุ้นด้วยแสง สารตัวเติมที่กล่าวไว้ข้างต้นถูกเติมลงไปเพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพทางความร้อน ขนาดอนุภาคของสารตัวเติมจะมีผลต่อประสิทธิภาพทางความร้อนอย่างมีนัยสำคัญ การเลือกความยาวคลื่นของแสงอย่างมีเหมาะสมเป็นขั้นตอนสำคัญที่ทำให้เกิดการคืนรูปร่างได้อย่างมีประสิทธิภาพ [1] Lu และคณะ [14] ศึกษาปรากฏการณ์คืนรูปจากการกระตุ้นด้วยแสงรังสีอินฟราเรดของนาโนคอมโพลิตของอีพอกซีผสมท่อนาโนคาร์บอน (CNTs) และ/หรือ โบรอนไนไตรด์ (BN) โดยมีการแปรปริมาณของ CNTs ที่ 0 2 6 8 และ 10 wt% ผลปรากฏว่าการเติม CNTs หรือ BN เพิ่มความสามารถในการดูดซับรังสีอินฟราเรด และการเติม CNTs ร่วมกับ BN มีผลเสริมฤทธิ์กันในการปรับปรุงสมบัติการนำความร้อนและการส่งผ่านความร้อนส่งผลให้คอมโพลิตมีค่าอุณหภูมิกลาสทรานซิชัน (T_g) สูงขึ้น โดยนาโนคอมโพลิตจํารูปที่มีการเติม BN ปริมาณ 4 wt% ร่วมกับ CNTs ปริมาณ 4 wt% แสดงค่า T_g สูงที่สุดที่ 107.8°C ซึ่งเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเปรียบเทียบกับอีพอกซีจํารูปที่ไม่มีการเติมสารดังกล่าวที่มีค่า T_g 73.25°C การเติม CNTs เพิ่มค่ามอดูลัสสะสมและค่ามอดูลัสยืดหยุ่นแก่นาโนคอมโพลิตและสมบัติการทนแรงดึงของนาโนคอมโพลิตเพิ่มขึ้นตามปริมาณของ CNTs นอกจากนี้การทดสอบหาอัตราส่วนการคืนรูป (recovery ratio, %) ที่แปรผันตามเวลาของนาโนคอมโพลิตพบว่า นาโนคอมโพลิตที่มีการเติม BN ปริมาณ 4 wt% ร่วมกับ CNTs ปริมาณ 4 wt% แสดงอัตราการคืนรูปภายใต้การกระตุ้นด้วยรังสีอินฟราเรดได้อย่างสมบูรณ์ที่ 100 % ภายในเวลา 60 s

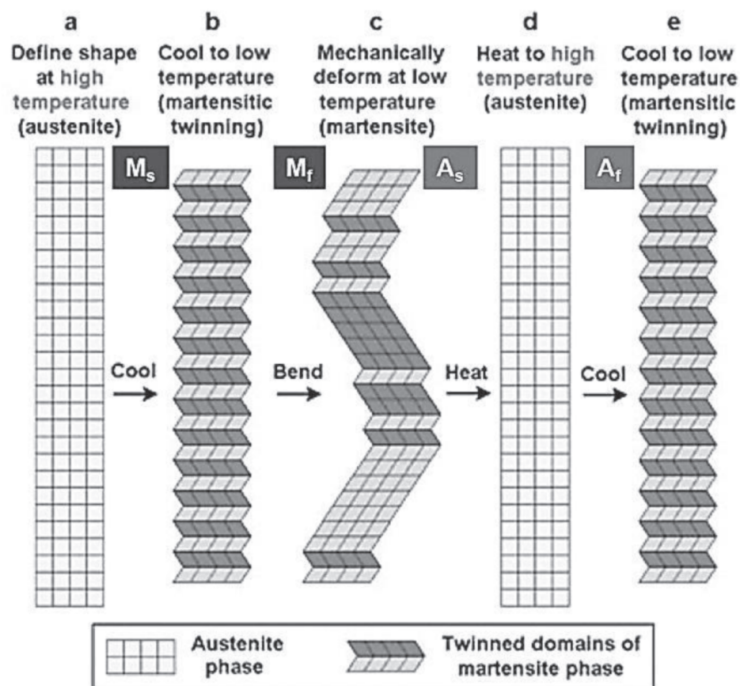
พอลิเมอร์คอมโพลิตจํารูปกระตุ้นด้วยสนามแม่เหล็ก

คอมโพลิตจํารูปกระตุ้นด้วยสนามแม่เหล็กได้รับความสนใจในการใช้งานด้านการแพทย์ เช่น การปลูกถ่าย การส่งผ่านยา และเครื่องมืออัจฉริยะ เนื่องจากเมื่อฝังคอมโพลิตจํารูปลงไปแล้วจะสามารถกระตุ้นด้วยสนามแม่เหล็กหรือสนามไฟฟ้าโดยใช้ตัวควบคุมหรือรีโมทแบบไม่สัมผัส พอลิเมอร์ที่ใช้ในการผลิตคอมโพลิตจํารูปดังกล่าวจะเป็นพอลิเมอร์ย่อยสลายได้ทางชีวภาพและพอลิเมอร์เข้ากันได้ทางชีวภาพ เช่น พอลิแลคติกแอซิด [15] พอลิคาโพรแลคโตนแบบเชื่อมขวาง พอลิเอทิลีนไกลคอล มอนอเมทิลอีเทอร์ มอนอเมทาคริเลท หรือ PEGMA กราฟต์พอลิเมอร์ของพอลิคาโพรแลคโตนและไดไอโซไซยาโตเมทิลเมทาคริเลท หรือ PCLDIMA เป็นต้น [1]

กลไกการเกิดปรากฏการณ์จํารูปกระตุ้นด้วยสนามแม่เหล็ก

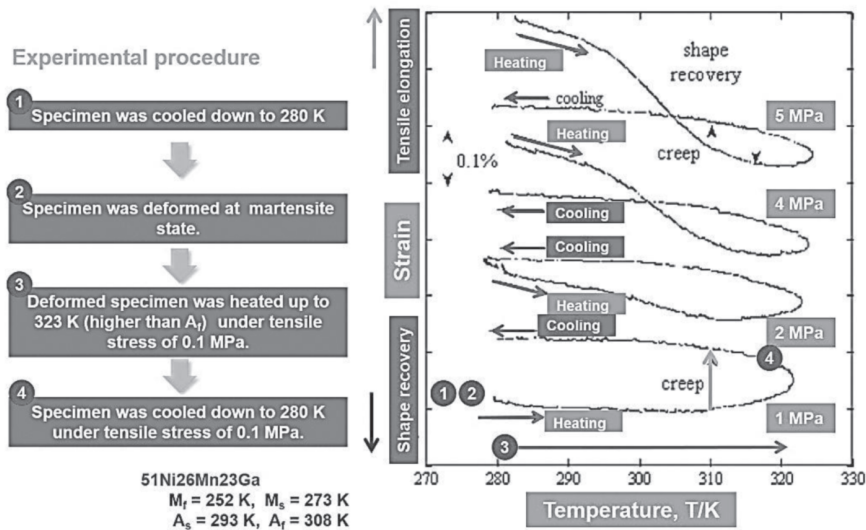
การกระตุ้นด้วยสนามแม่เหล็กของคอมโพลิตจํารูปจะได้รับการเติมสารตัวเติมที่มีประโยชน์สูง (functional fillers) เช่น อนุภาคโลหะ [16] อนุภาคสารแม่เหล็ก [17] อนุภาคเหล็กออกไซด์ [18] และ Ni-Mn-Ga แบบผลึกเดี่ยว [1] เป็นต้น สำหรับ Ni-Mn-Ga แบบผลึกเดี่ยวเป็นโลหะผสมจํารูป

กระตุ้นด้วยสนามแม่เหล็ก (ferromagnetic shape memory alloys, FSMA) ชนิดหนึ่งที่มีรายงานการนำไปใช้เป็นสารตัวเติมในพอลิเมอร์คอมโพสิตจำรูป ปรัชญาการจำรูปของโลหะผสมจำรูปเกิดขึ้นผ่านการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างที่เรียกว่า “martensitic transformation” ซึ่งเป็นการเปลี่ยนแปลงกลับไปมาของโครงสร้างออสเทนไนต์ (austenite, A) ที่มีความเสถียรที่อุณหภูมิสูงไปเป็นโครงสร้างมาร์เทนไซต์ (martensite, M) ที่มีความเสถียรที่อุณหภูมิต่ำโดยมีจุดอุณหภูมิที่เกี่ยวข้อง 4 จุด สามารถอธิบายได้ดังรูปที่ 5 เริ่มจากโครงสร้างออสเทนไนต์ที่เสถียรอุณหภูมิสูง (รูปที่ 5a) เกิดการลดอุณหภูมิลงจนถึงจุด M_s ที่เป็นอุณหภูมิเริ่มเปลี่ยนโครงสร้างออสเทนไนต์เป็นมาร์เทนไซต์ และลดอุณหภูมิลงเรื่อยๆ จนถึงจุด M_f ที่เป็นอุณหภูมิที่เปลี่ยนเป็นโครงสร้างมาร์เทนไซต์ได้อย่างสมบูรณ์ ในช่วงดังกล่าวจะเกิดโครงสร้างมาร์เทนไซต์ที่เกิดตำหนิแบบทวิน (twinned martensite) ที่มีโครงสร้างผลึกแบบมอนอคลินิกที่สามารถเปลี่ยนแปลงรูปร่างด้วยแรงทางกลได้ง่ายดังรูปที่ 5b และ 5c ถ้ามีการเพิ่มอุณหภูมิแก่โลหะผสมจำรูปจนถึงจุด A_s ที่เป็นอุณหภูมิเริ่มเปลี่ยนโครงสร้างมาร์เทนไซต์เป็นออสเทนไนต์ และเพิ่มอุณหภูมิต่อไปจนถึงจุดเพิ่มอุณหภูมิต่อไปจนถึง A_f ที่เป็นอุณหภูมิที่เปลี่ยนเป็นโครงสร้างออสเทนไนต์ได้อย่างสมบูรณ์ นั่นคือโลหะผสมจำรูปสามารถกลับสู่รูปร่างเดิมได้ (รูปที่ 5d) [19]



รูปที่ 5 แบบจำลองปรากฏการณ์จำรูปของ ferromagnetic shape memory alloy: Ni-Mn-Ga (ดัดแปลงจาก [19])

Hosoda และคณะ [20] เตรียมคอมโพสิตผลลวดของอีพอกซีและอนุภาคโลหะผสมจำรูป (FSMA particles; FSMAP) อีพอกซีที่ใช้จะเตรียมจากเรซินอีพอกซีเกรด Epikote 828 และตัวเร่งแข็งเกรด Tohmid 280-B และ FSMAP ที่ใช้คืออนุภาคโลหะผสมจำรูปของ Ni-Mn-Ga ที่มี % โมลแตกต่างกันที่เตรียมได้จากการนำโลหะผสมของ Ni-Mn-Ga มาผ่านกระบวนการทางความร้อนและบดจนด้วยแรงทางกลจนได้เป็นอนุภาคโลหะผสมจำรูป Ni-Mn-Ga ที่มีขนาดผลึกอยู่ในช่วง 25 ถึง 150 μm โดยมีการแปรปริมาณอนุภาคโลหะผสมจำรูป Ni-Mn-Ga จาก 0-50 vol% การทดสอบสมบัติเชิงกลที่อุณหภูมิห้องพบว่าค่าความเค้นจุดครากและค่าความทนแรงดึงสูงสุดของคอมโพสิตเพิ่มขึ้นตามปริมาณอนุภาคโลหะผสมจำรูป และจะมีค่าลดลงเมื่อเติมอนุภาคโลหะผสมจำรูปมากกว่า 10wt% ปรากฏการณ์จำรูปของคอมโพสิตชนิดนี้เกิดขึ้นได้จากอนุภาคโลหะผสมจำรูป Ni-Mn-Ga ที่เติมลงไป รูปที่ 6 แสดงกระบวนการทดสอบการคืนรูปของคอมโพสิตระหว่างอีพอกซีกับอนุภาคโลหะผสมจำรูปชนิด $51\text{Ni}26\text{Mn}23\text{Ga}$ ที่มีค่าอุณหภูมิ M_s , M_f , A_s และ A_f เท่ากับ 273 253 293 และ 308 K ตามลำดับ (รูปทางซ้ายมือ) ที่สัมพันธ์กับกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการความเครียด (strain) และอุณหภูมิ (รูปทางขวามือ) กระบวนการทดสอบเริ่มจาก (1) การลดอุณหภูมิชิ้นงานตัวอย่างไปที่ 280 K และ (2) ให้แรงทางกลจนชิ้นงานที่มีโครงสร้างมาร์เทนไนต์เกิดการเปลี่ยนรูปร่าง โดยมีการให้แรงทางกลที่ 1 2 4 และ 5 MPa ในขั้นตอนที่ (3) เพิ่มอุณหภูมิให้ชิ้นงานตัวอย่างไปที่ 323 K ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่สูงกว่า A_f ของอนุภาคโลหะผสมจำรูปภายใต้การความเค้นแรงดึงที่ 0.1 MPa ในขั้นตอนนี้การคืนรูปจะเกิดขึ้นก็ต่อเมื่อค่าความเครียดลดลง (นั่นคือไม่เกิดการยืดจากแรงดึง (tensile elongation) ในระหว่างการให้ความร้อนแก่ชิ้นงาน และสุดท้าย (4) ลดอุณหภูมิชิ้นงานไปที่ 280 K ภายใต้การความเค้นแรงดึงที่ 0.1 MPa จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการความเครียดและอุณหภูมิ (รูปทางขวามือ) จะเห็นได้ว่าชิ้นงานจะไม่เกิดการคืนรูปเมื่อให้แรงเค้นดึงที่ 1 MPa ดูได้จากเกิดการยืดจากแรงดึง (tensile elongation) และความเครียดเพิ่มขึ้น แต่การคืนรูปจะเกิดขึ้นและสังเกตเห็นได้ชัดขึ้นเมื่อความเค้นแรงดึงเพิ่มขึ้นที่ 2 4 และ 5 MPa สังเกตได้จากการลดลงของค่าความเครียดในระหว่างการให้ความร้อนแก่ชิ้นงาน โดยการคืนรูปเริ่มเกิดขึ้นที่อุณหภูมิ 290-300 K ซึ่งใกล้เคียงกับค่า A_s ของอนุภาคโลหะผสมจำรูปชนิด $51\text{Ni}26\text{Mn}23\text{Ga}$ จากการทดสอบ Hosoda และคณะ [20] พบว่าค่าความเครียดในการคืนรูป (shape recovery strain) สูงสุดคือ ประมาณ 2% สำหรับการทดสอบความเค้น-ความเครียดและ 0.4% สำหรับการทดสอบความเค้นคงที่ในระหว่างวงจรการให้ความร้อน นอกจากนี้ขนาดอนุภาคของ FSMAP มีอิทธิพลต่อสมบัติการจำรูปของคอมโพสิต โดยสมบัติการจำรูปของคอมโพสิตสามารถปรับปรุงได้โดยการลดขนาดอนุภาคของ FSMAP [20]



รูปที่ 6 กระบวนการทดสอบการคืนรูปและกราฟแสดงความสัมพันธ์ของความเครียดและอุณหภูมิของคอมโพสิตระหว่างอีพอกซีกับ 50 vol% ของอนุภาคโลหะผสม 51Ni26Mn23Ga (ดัดแปลงจาก [20])

พอลิเมอร์คอมโพสิตจำรูปกระตุ้นด้วยสนามไฟฟ้า

หลักการเบื้องต้นของการเกิดปรากฏการณ์จำรูปการกระตุ้นด้วยสนามไฟฟ้าคือ เมื่อมีการให้แรงดันไฟฟ้าแก่พอลิเมอร์คอมโพสิตจำรูป ความร้อนจากความต้านทานไฟฟ้า (joule heating) จะไปกระตุ้นให้เกิดปรากฏการณ์จำรูป สารตัวเดิมที่มีรายงานการใช้เพื่อให้เกิดปรากฏการณ์จำรูปจากสนามไฟฟ้าในคอมโพสิตจำรูป เช่น คาร์บอนแบล็ค [21] ท่อนาโนคาร์บอน [22] และกระดาษนาโนคาร์บอน [23] เป็นต้น ข้อดีของพอลิเมอร์คอมโพสิตจำรูปกระตุ้นด้วยสนามไฟฟ้าคือ ไม่จำเป็นต้องมีอุปกรณ์ใดๆ ติดตั้งบนชิ้นงานในช่วงของการทำงาน ให้การตอบสนองที่ค่อนข้างเร็วและมีการไล่ระดับอุณหภูมิที่น้อยที่สุดและเกิดขึ้นผ่านการให้ความร้อนที่เป็นเนื้อเดียว โดยมีการนำไปใช้งานด้านโครงสร้างในยานอวกาศ ใช้งานเป็นอุปกรณ์ชีวการแพทย์สำหรับการฝัง ใช้เป็นตัวกระตุ้น (actuators) และตัวตรวจจับ (sensor) Rogers และ Khan [21] ศึกษาการเสียรูปจากการเปลี่ยนแปลงค่าการนำไฟฟ้าในพอลิเมอร์คอมโพสิตจำรูปของอีพอกซี/คาร์บอนแบล็ค คาร์บอนแบล็คที่ใช้มี 2 แบบคือ คาร์บอนแบล็ค (CB) และคาร์บอนแบล็คที่ผ่านการกระจายตัวในสารลดแรงดึงผิว (CB-TX) โปรแกรมการทดสอบชิ้นงานแสดงดังรูปที่ 7 จะแบ่งออกเป็น 4 ขั้นตอน คือ

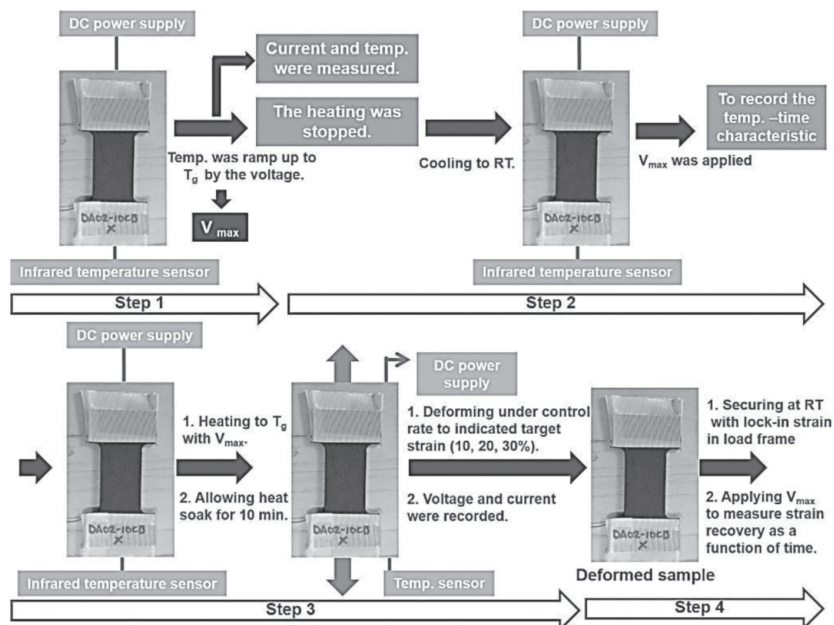
(1) การวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าตามเวลาที่เปลี่ยนแปลงไป ดังรูปที่ 7 (step 1) โดยนำชิ้นตัวอย่างต่อกับแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง (DC power supply) และตัวตรวจจับอุณหภูมิอินฟราเรด (infrared temperature sensor) โดยแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง จะทำหน้าที่เป็นตัวควบคุมอุณหภูมิโดยค่อยๆ เพิ่มแรงดันไฟฟ้าเพื่อให้ชิ้นงานมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นจนถึงค่า T_g และค่าแรงดันไฟฟ้าที่ทำให้ชิ้นงานมีอุณหภูมิเท่ากับค่า T_g จะเรียกว่า V_{max} ส่วนตัวตรวจจับอุณหภูมิอินฟราเรดจะทำหน้าที่วัดอุณหภูมิของชิ้นงาน โดยวัดอุณหภูมิมบนพื้นผิวตัวอย่างเป็นพื้นที่วงกลมมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 mm บันทึกค่าแรงดันไฟฟ้ากระแสไฟฟ้าและอุณหภูมิเมื่อเวลาเปลี่ยนแปลงไปเพื่อนำไปคำนวณค่าความต้านทานไฟฟ้าตามสมการที่ 3

$$\rho = \frac{wtV}{II} \tag{3}$$

ค่า w และ l คือความกว้างและความยาวของส่วน gauge ของชิ้นงาน ตามลำดับ t คือความหนาของชิ้นงาน V คือแรงดันไฟฟ้าและ I คือกระแสไฟฟ้า จากการทดลองในขั้นตอนดังกล่าวพบว่าคอมโพสิตที่มีการเติม CB ลงไปที่ปริมาณ 2.5 และ 5% ให้ค่าความต้านทานไฟฟ้าที่สูง ซึ่งไปขัดขวางการเพิ่มอุณหภูมิจนถึงค่า T_g ของคอมโพสิตในขณะที่การเติม CB ปริมาณ 10% ทำให้คอมโพสิตมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นจนถึงค่า T_g ได้ง่าย

(2) การวัดค่าอุณหภูมิตามเวลาที่เปลี่ยนแปลงไป หลังจากขั้นตอนที่ 1 แรงดันไฟฟ้าที่ทำให้เกิดความร้อนจะหยุดลงและปล่อยให้ชิ้นงานตัวอย่างเย็นตัวจนถึงอุณหภูมิห้อง หลังจากนั้นให้แรงดันไฟฟ้าคงที่ที่ค่า V_{max} ที่ได้จากขั้นตอนที่ 1 เพื่อบันทึกอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นตามเวลาดังรูปที่ 7 (step 2) จากการเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิตามเวลาที่เปลี่ยนแปลงไปของคอมโพสิตที่มีการเติมคาร์บอนแบล็คสองชนิดคือ CB และ CB-TX ที่ 10% พบว่าคอมโพสิตที่เติม CB-TX แสดงค่าความต้านทานไฟฟ้าที่สูงกว่าจากการใช้เวลามากกว่าในการเพิ่มอุณหภูมิจากการเหนี่ยวนำด้วยกระแสไฟฟ้า

(3) การวัดการเสียวรูปจากค่าความต้านทานไฟฟ้า จากขั้นตอนที่ 2 ให้ความร้อนแก่ชิ้นตัวอย่างผ่านแรงดันไฟฟ้าคงที่ (V_{max}) จนชิ้นงานมีอุณหภูมิสูงจนถึง T_g และยังคงให้ความร้อนต่อไปอีก 10 นาที หลังจากนั้นดึงชิ้นงานตัวอย่างด้วยอัตรา 0.002 in/s หรือ 24 %/s จนชิ้นงานเกิดการยืดขยายออกที่ 10% 20% และ 30% ของค่าความเครียดและทำการวัดค่าแรงดันไฟฟ้าและค่ากระแสไฟฟ้าเพื่อคำนวณหาค่าความต้านทานไฟฟ้าจากสมการที่ 3 (รูปที่ 7 (step 3))

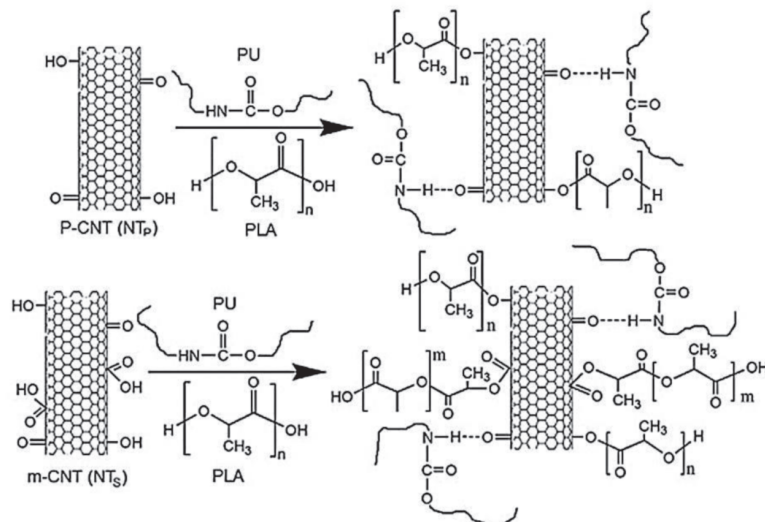


รูปที่ 7 ขั้นตอนการทดสอบการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานไฟฟ้าและการคืนรูปคอมโพสิตจํารูป (ดัดแปลงจาก [21])

(4) การประเมินพฤติกรรมการคืนรูป ซึ่งงานที่เกิดการเสียรูปจากขั้นตอนที่ 3 จะคงการเสียรูปดังกล่าวไว้จนถึงอุณหภูมิห้อง หลังจากนั้นให้แรงดันไฟฟ้าที่ค่า V_{max} แก่ชิ้นงานตัวอย่างเพื่อดูการคืนรูปจากความเครียดตามเวลาที่เปลี่ยนไปดังรูปที่ 7 (step 4) [21]

Rogers และ Khan [21] พบว่าการเติม CB ที่ 10 wt% ลดค่าความแข็งแรงดึงของคอมโพลีเมอร์อย่างมีนัยสำคัญ คอมโพลีเมอร์ที่เติม CB-TX แสดงค่าความต้านทานไฟฟ้าที่สูงกว่าคอมโพลีเมอร์ที่เติม CB แสดงให้เห็นว่าการใช้สารลดแรงดึงกับ CB ไม่ได้ปรับปรุงสมบัติทางไฟฟ้าให้แก่คอมโพลีเมอร์ การทดสอบขั้นตอนที่ 4 พบว่าชิ้นงานตัวอย่างที่เกิดการเสียรูปที่ 10% ของค่าความเครียดแสดงพฤติกรรม การคืนรูปได้ดี การคืนรูปจะเกิดได้มากที่สุดในช่วง 100s และแสดงการคืนรูปสูงสุดที่ 85%

Raja และคณะ [24] ใช้ท่อนาโนคาร์บอนแบบหลายชั้น (multiwalled carbon nanotube, MWCNT) และท่อนาโนคาร์บอนดัดแปลง (modified carbon nanotube, m-CNT) เป็นสารตัวเติมที่มีประโยชน์สูงที่ทำให้เกิดปรากฏการณ์จำรูปเหนี่ยวนำด้วยสนามไฟฟ้าในนาโนคอมโพลีเมอร์ที่มีเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทน (TPU) ผสมพอลิแลคติกแอซิด (PLA) เป็นเนื้อพื้น นาโนคอมโพลีเมอร์เตรียมได้ด้วยการผสม TPU/PLA (ที่อัตราส่วน 90/10) และท่อนาโนคาร์บอน (แปรปริมาณที่ 2-10 wt%) ในเครื่องผสมแบบปิดและขึ้นรูปเป็นแผ่นชีทนาโนคอมโพลีเมอร์ด้วยการอบการอัดขึ้นรูป Raja และคณะ [24] เปรียบเทียบนาโนคอมโพลีเมอร์ที่เติม MWCNT หรือ P-CNT และ m-CNT พบว่ากลไกที่เป็นไปได้ของอันตรกิริยาระหว่าง P-CNT และ m-CNT ที่เติมใน TPU/PLA แสดงดังรูปที่ 8 จะเห็นว่าคอมโพลีเมอร์ที่เติม P-CNT ที่ประกอบด้วยหมู่ไฮดรอกซิลและหมู่คาร์บอนิลทำให้เกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างหมู่เอมีน (-NH) ของ TPU กับหมู่คาร์บอนิลของ P-CNT และเกิดเอสเทอร์ลิงค์เกิดจากการเกิดอันตรกิริยาทางเคมีระหว่างหมู่ไฮดรอกซิลของ P-CNT และหมู่คาร์บอกซิลิก (-COOH) ของ PLA สำหรับคอมโพลีเมอร์ที่เติม m-CNT นอกจากจะสามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างหมู่เอมีน (-NH) ของ TPU กับหมู่คาร์บอนิลของ m-CNT แล้วยังสามารถเกิดเอสเทอร์ลิงค์เกิดระหว่างหมู่ไฮดรอกซิลของ m-CNT กับหมู่คาร์บอกซิลิกของ PLA และเอสเทอร์ลิงค์เกิดระหว่างหมู่คาร์บอกซิลิกของ m-CNT กับไฮดรอกซิลของ PLA ได้ กลไกปฏิกิริยาดังกล่าวยืนยันได้ด้วยผลการทดสอบด้วยเทคนิค FTIR

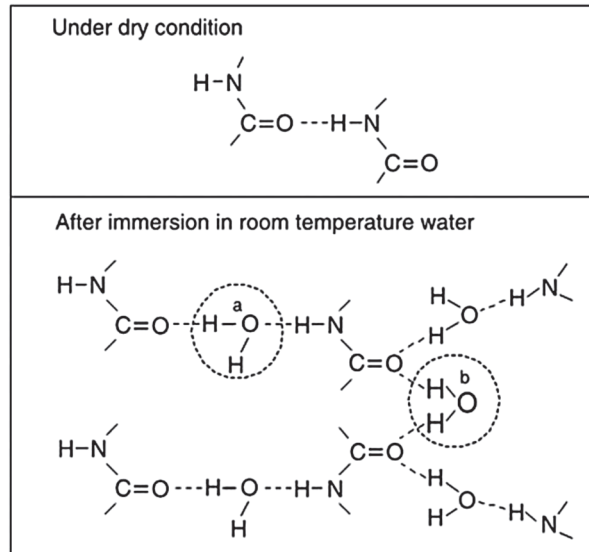


รูปที่ 8 กลไกที่เป็นไปได้ของอันตรกิริยาระหว่าง P-CNT และ m-CNT ที่เติมลงในนาโนคอมโพลีเมอร์ของ PU/PLA (ที่มาจาก [24])

ผลการทดสอบลักษณะสัณฐานวิทยาพบว่า m-CNT สามารถกระจายตัวในพอลิเมอร์ผสมของ TPU/PLA ได้ดีกว่า P-CNT ส่งผลให้นาโนคอมโพสิตที่เติม m-CNT แสดงสมบัติความแข็งแรงดึงและมอดูลัสสูงที่สุด การกระจายตัวที่ดีของ m-CNT ส่งผลต่อการนำไฟฟ้าของคอมโพสิต โดยนาโนคอมโพสิตที่เติม m-CNT ต้องการปริมาณของ m-CNT เพียง 4 wt% เพื่อแสดงสมบัติการนำไฟฟ้า ในขณะที่นาโนคอมโพสิตที่เติม P-CNT ต้องการปริมาณของ P-CNT 4.8 wt% นอกจากนี้สมบัติการนำความร้อนของนาโนคอมโพสิตที่เติม m-CNT เพิ่มขึ้นตามปริมาณ m-CNT และค่อนข้างสูงกว่านาโนคอมโพสิตที่เติม P-CNT ที่ปริมาณเดียวกัน การตรวจสอบสมบัติการจํารูปของนาโนคอมโพสิตโดยการตัดชิ้นตัวอย่างเป็นรูปตัวยูและใช้กระแสไฟฟ้าที่มีความต่างศักย์คงที่ที่ 40 V กระตุ้นให้เกิดการคืนรูปพบว่านาโนคอมโพสิตสามารถคืนรูปได้ค่อนข้างเร็วโดยนาโนคอมโพสิตที่เติม m-CNT สามารถคืนรูปได้ในเวลา 15 s และนาโนคอมโพสิตที่เติม P-CNT คืนรูปได้ในเวลา 40 s เนื่องจาก CNT กระจายตัวได้ดี โดยนาโนคอมโพสิตที่เติม CNT ทั้งสองแบบสามารถคืนรูปได้ประมาณ 95% [24]

พอลิเมอร์จํารูปกระตุ้นด้วยน้ำและสารเคมี

ถึงแม้ว่ามีการศึกษาและพัฒนาพอลิเมอร์จํารูปกระตุ้นด้วยความร้อนอย่างกว้างขวาง แต่อุณหภูมิในการคืนรูปที่ค่อนข้างสูงอาจจะเป็นสาเหตุในการทำลายเนื้อเยื่อหรืออวัยวะเป้าหมายได้ซึ่งนั่นเป็นข้อจำกัดในการนำพอลิเมอร์จํารูปกระตุ้นด้วยความร้อนไปใช้งานทางด้านการแพทย์ พอลิเมอร์จํารูปกระตุ้นด้วยน้ำหรือสารเคมีที่ไม่เป็นพิษจึงเป็นสิ่งที่น่าสนใจในการใช้งานพอลิเมอร์จํารูปทางด้านการแพทย์ [25] สำหรับพอลิเมอร์จํารูปกระตุ้นด้วยน้ำ น้ำที่พอลิเมอร์จํารูปดูดซับไว้จะถูกแบ่งออกเป็นน้ำอิสระ (free water) และน้ำที่อยู่ร่วมกับสารอื่น (bound water) น้ำอิสระจะไม่มีอิทธิพลใดๆ กับพอลิเมอร์จํารูปและจะถูกกำจัดออกได้อย่างสมบูรณ์จากการให้ความร้อนจนถึงอุณหภูมิ 120°C ในขณะที่น้ำที่อยู่ร่วมกับสารอื่นจะถูกกำจัดออกได้จากการให้ความร้อนที่อุณหภูมิสูงกว่า 120°C และจะทำให้พันธะไฮโดรเจนอ่อนแอลงส่งผลให้อุณหภูมิกลาสทรานซิชันลดลงและไปกระตุ้นให้เกิดการคืนรูป [26] Yang และคณะ [27] ได้อธิบายผลของน้ำต่อพันธะไฮโดรเจนของพอลิยูรีเทนจํารูปดังรูปที่ 9 ซึ่งแสดงโครงสร้างของพอลิยูรีเทนจํารูปในสภาวะแห้งและหลังจากจุ่มในน้ำที่อุณหภูมิห้อง โดยมีน้ำบางโมเลกุลที่พอลิยูรีเทนจํารูปดูดซับไว้ว่าจะเชื่อมช่องว่างระหว่างพันธะไฮโดรเจนของหมู่เอมีน (-NH) และหมู่คาร์บอนิล (-C=O) ไว้ดังบริเวณ a และน้ำที่อยู่ร่วมกับสารอื่นอย่างหลวมๆ (loosely bound water) จะทำให้พันธะไฮโดรเจนอ่อนแอได้โดยตรงประกอบกับการทำหน้าที่เป็นพลาสติกไซเซอร์ของน้ำทำให้ของพอลิยูรีเทนจํารูปมี T_g ลดลง นอกจากนี้ น้ำบางโมเลกุลเกิดการฟอร์มตัวเป็นคู่ของพันธะไฮโดรเจนกับพันธะไฮโดรเจนที่มีอยู่แล้วของหมู่คาร์บอนิลดังบริเวณ b โดยผลการเกิดพันธะไฮโดรเจนที่บริเวณ a และ b ดังกล่าวสามารถยืนยันได้ผลการทดสอบด้วยเทคนิค FTIR ที่แสดงการเคลื่อนเลขคลื่นของพีคที่แสดงลักษณะเฉพาะของพันธะไฮโดรเจนในพอลิยูรีเทนจํารูป [27]

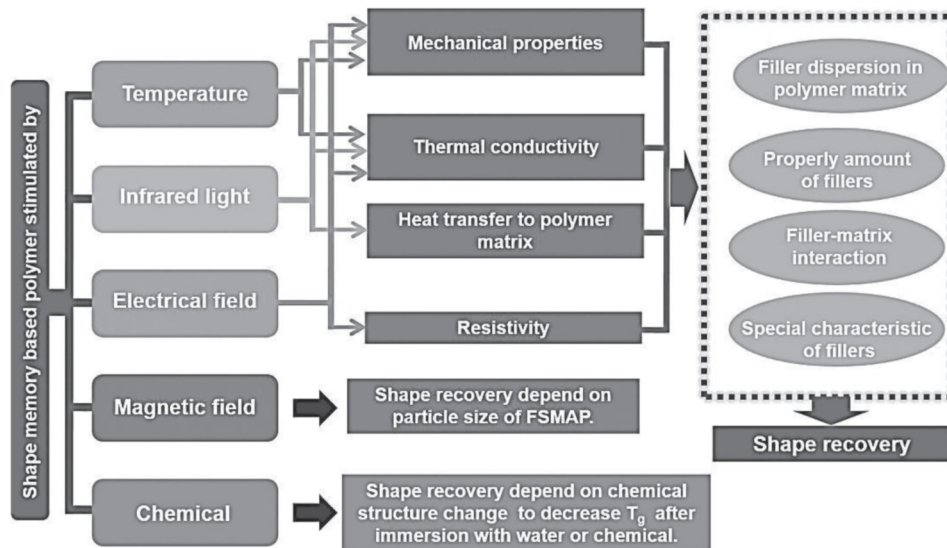


รูปที่ 9 ผลกระทบของน้ำต่อพันธะไฮโดรเจนในพอลิยูรีเทนจำรูป (ที่มาจาก [27])

ต่อมา Wang และคณะ [28] ได้เตรียมไมโครไฟเบอร์และไมโครสปริงจำรูปจากเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทน (TPU) 2 เกรดคือ MM3520 ที่มีค่า T_g 35°C และ MM5520 ที่มีค่า T_g 55°C และทดสอบปรากฏการณ์จำรูปเหนียวนำด้วยน้ำและสารเคมีอื่นๆ คือ เอทานอล เมทานอล และไอโซโพรพานอล ไมโครไฟเบอร์และไมโครสปริงจำรูปเตรียมได้จากการหลอมเม็ดเรซิน TPU ในสถานะอะลูมิเนียมเนียนจนการหลอมเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์และใช้คีมหนีบ TPU หลอมอย่างนุ่มนวลจนได้เส้น TPU บางๆ ออกมาจนกระทั่งเส้นที่ดึงออกมาขาดจะได้ไมโครไฟเบอร์และจะได้ไมโครสปริงตรงจุดที่เกิดการขาด ทั้งไมโครไฟเบอร์และไมโครสปริงแสดงปรากฏการณ์จำรูปเหนียวนำด้วยความร้อนได้เป็นอย่างดีจากการคืนรูปของไมโครสปริงที่ถูกยืดออกก่อนนำไปให้ความร้อนบนเครื่องให้ความร้อนเมื่อเวลาผ่านไป นอกจากนี้ผลการจุ่มไมโครไฟเบอร์และไมโครสปริงลงในน้ำและสารเคมีอื่นๆ ทำให้พันธะไฮโดรเจนอ่อนแอลงส่งผลให้อุณหภูมิกลาสทรานซิชันลดลงและไปกระตุ้นให้เกิดการคืนรูปตามที่ Yang และคณะ [27] ได้อธิบายไว้

บทสรุป

การพิจารณารายการงานวิจัยของการเตรียมพอลิเมอร์จำรูปและพอลิเมอร์คอมโพสิตจำรูป กระตุ้นด้วยการกระตุ้นทั้ง 5 รูปแบบ สามารถสรุปปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับปรากฏการณ์การคืนรูปกระตุ้นด้วยสิ่งเร้าแต่ละแบบแตกต่างกันดังรูปที่ 10 จะเห็นได้ว่าปัจจัยที่ใช้พิจารณาใน SMPCs กระตุ้นด้วยความร้อน แสงและสนามไฟฟ้าคือ สมบัติเชิงกล การนำความร้อน การส่งผ่านความร้อนสู่พอลิเมอร์เนื้อพื้น และสมบัติความต้านทานไฟฟ้า โดยปัจจัยดังกล่าวขึ้นอยู่กับการกระจายตัวของสารเติมแต่งในพอลิเมอร์เนื้อพื้น ปริมาณของสารตัวเติมที่เหมาะสม อันตรกิริยาระหว่างสารตัวเติมกับเนื้อพื้น และลักษณะเฉพาะของสารตัวเติมซึ่งมีผลต่อการเกิดการคืนรูปของ SMPC ด้วยเช่นกัน สำหรับ SMPC กระตุ้นด้วยสนามแม่เหล็กการคืนรูปขึ้นอยู่กับขนาดอนุภาคของสารตัวเติม FSMAP สำหรับพอลิเมอร์จำรูปกระตุ้นด้วยสารเคมีการคืนรูปจะขึ้นอยู่กับเปลี่ยนแปลงโครงสร้างเคมีที่มีผลให้ T_g ลดลงจากการจุ่มในน้ำหรือสารเคมี



รูปที่ 10 ปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับปรากฏการณ์การคืนรูปของพอลิเมอร์จำรูปและพอลิเมอร์คอมโพสิตจำรูป กระตุ้นด้วยสิ่ง เร้าทั้ง 5 แบบ

เอกสารอ้างอิง

1. Harper, H. M., & Li, G. (2013). A review of stimuli-responsive shape memory polymer composites. *Polymer*, *54*, 2199-2221.
2. Peponi, L., Navarro-Baena, I., & Kenny, J. M. (2014). Shape memory polymers: properties, synthesis and applications. In M. R. Aguilar, & J. S. Román (Eds.), *Smart Polymers and Their Applications*, (pp. 204–236). Woodhead Publishing Limited.
3. Chen, L., Li, W., Liu, Y., & Leng, J. (2016). Nanocomposites of epoxy-based shape memory polymer and thermally reduced graphite oxide: Mechanical, thermal and shape memory characterizations. *Composites Part B*, *91*, 75-82.
4. Prasomsin, W., Parnklang, T., Sapcharoenkun, C., Tiptipakorn, S., and Rimdusit, S. (2019). Multiwalled carbon nanotube reinforced bio-based benzoxazine/epoxy composites with NIR-laser stimulated shape memory effects. *Nanomaterials*, *9*(881), 1-17.
5. Lu, H., Liu, Y., Gou, J., Leng, J., & Du, S. (2010). Synergistic effect of carbon nanofiber and carbon nanopaper on shape memory polymer composite. *Applied Physics Letters*, *96*(8), 1-3.
6. Cao, F., & Jana, S. C. (2007). Nanoclay-tethered shape memory polyurethane nanocomposites. *Polymer*, *48*, 3790-3800.
7. Lui, Y., Du, H., Liu, L., & Leng, J. (2014). Shape memory polymers and their composites in aerospace applications: A review. *Smart Materials and Structures*, *23*, 1-22.

8. Chen, L., Li, W., Liu, Y., & Leng, J. (2015). Epoxy shape-memory polymer reinforced by thermally reduced graphite oxide: influence of processing techniques. *Journal of Applied Polymer Science*, 42502, 1-10.
9. Behl, M., & Lendlein, A. (2007). Actively moving polymers. *Soft Matter*, 3(1), 58–67.
10. Wang, C., Fadeev, M., Zhang, J., Vázquez-González, M., Davidson-Rozenfeld, G., Tian, H., & Willner, I. (2018). Shape-memory and self-healing functions of DNA-based carboxymethyl cellulose hydrogels driven by chemical or light triggers. *Chemical Science*, 9, 7145-7152.
11. Gao, H., Li, J., Zhang, F., Liu, Y., & Leng, J. (2019). The research status and challenges of shape memory polymer based flexible electronics. *Materials Horizons* 6: 931-944.
12. Hu, J. (2014). *Shape Memory Polymers: Fundamentals, Advances and Applications* (pp. 134-136). United Kingdom. Smithers Rapra Technology Ltd.
13. Habault, D., Zhang, H., & Zhao, Y. (2013). Light-triggered self-healing and shape-memory polymers. *Chemical Society Reviews*, 42(17), 1-13.
14. Lu, H., Yao, Y., Huang, W. M., Leng, J., & Hui, D. (2014). Significantly improving infrared light-induced shape recovery behavior of shape memory polymeric nanocomposite via a synergistic effect of carbon nanotube and boron nitride. *Composites: Part B*, 62, 256–261.
15. Xu, J., & Song, J. (2015). Polylactic acid (PLA)-based shape-memory materials for biomedical applications. In L. Yahia (Eds.), *Shape Memory Polymers for Biomedical Applications* (pp. 198–217). Woodhead Publishing Series in Biomaterials.
16. Yu, K., Westbrook, K. K., Kao, P. H., Leng, J., & Qi, H. J. (2013). Design considerations for shape memory polymer composites with magnetic particles. *Journal of Composite Materials*, 47(1), 51–63.
17. Ze, Q., Kuang, X., Wu, S., Wong, J., S. Montgomery, M., Zhang, R., Kovitz, J. M., Yang, F., Qi, H. J., & Zhao, R. (2019). Magnetic shape memory polymers with integrated multifunctional shape manipulation *Advanced Materials*, 1906657, 1-8.
18. Ubran, M., & Strankowski, M. (2017). Shape memory polyurethane materials containing ferromagnetic iron oxide and graphene nanoplatelets. *Materials*, 10(1083), 1-23.
19. Chang, W/-S. & Araki, Y. (2016). Use of shape-memory alloys in construction A critical review. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Civil Engineering*, 169(2), 87-95.
20. Hosoda, H., Takeuchi, S., Inamura, T., & Wakashima, K. (2004). Material design and shape memory properties of smart composites composed of polymer and ferromagnetic shape memory alloy particles. *Science and Technology of Advanced Materials*, 5, 503–509.

21. Rogers, N., & Khan, F. (2013). Characterization of deformation induced changes to conductivity in an electrically triggered shape memory polymer. *Polymer Testing*, 32, 71–77.
22. Bai, Y., Zhang, Y., Wang, Q., & Wang, T. (2013). Shape memory properties of multi-walled carbon nanotube/polyurethane composites prepared by in situ polymerization. *Journal of Materials Science*, 48(5), 2207–2214.
23. Lu, H., Liu, Y., Gou, J., Leng, J., & Du, S. (2010). Electroactive shape-memory polymer nanocomposites incorporating carbon nanofiber paper. *International Journal of Smart and Nano Materials*, 1(1), 2–12.
24. Raja, M., Ryu, S. H., & Shanmugharaj, A. M. (2013). Thermal, mechanical and electroactive shape memory of polyurethane (PU)/poly (lactic acid) (PLA)/CNT nanocomposites. *European Polymer Journal*, 49, 3492–3500.
25. Chen, H. M., Wang, L., & Zhou, S. B. (2018). Recent progress in shape memory polymers for biomedical applications. *Chinese Journal of Polymer Science*, 36(8), 905–917.
26. Huang, W. M., Yang, B., Zhao, Y., & Ding, Z. (2010). Thermo-moisture responsive polyurethane shape-memory polymer and composites: a review. *Journal of Materials Chemistry*, 20(17): 3367–3381.
27. Yang, B., Huang, W. M., Li, C., & Li, L. (2006). Effects of moisture on the thermomechanical properties of a polyurethane shape memory polymer. *Polymer*, 47, 1348–1356.
28. Wang, C. C., Zhao, Y., Purnawali, H., Huang, W. M., & Sun, L. (2012). Chemically induced morphing in polyurethane shape memory polymer micro fibers/springs. *Reactive and Functional Polymers*, 72(10), 757–764.