การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 21 17-19 ตุลาคม 2550 จังหวัดชลบุรี

พฤติกรรมการแตกหักของเทอร์โมเซทอิพอกซีเรซินภายใต้ภาระแบบผสม Fracture Behavior of Thermoset Epoxy Resin under Mixed-mode Loading (I/II)

สุภารัตน์ รัตนานนท์ และ ชาวสวน กาญจโนมัย*้

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ อ.คลองหลวง จ.ปทุมธานี 12120 โทร 0-2564-3001-9 ต่อ 3150 โทรสาร 0-2564-3010 ^{*}อีเมล์ kchao@engr.tu.ac.th

Suparat rattananon and Chaosuan Kanchanomai

Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Thammasat University, Klong-Luang, Pathumthani, Thailand 12120

Tel: 0-2564-3001-9 ext 3150, Fax: 0-2564-3010, *E-mail: kchao@engr.tu.ac.th

บทคัดย่อ

อิพอกซีเรซินได้ถูกใช้เป็นวัสดุหลักในวัสดุผสม (composite materials) เนื่องจากโครงสร้างระดับจุลภาคที่เป็นวงของอิพอกซี (epoxy ring) สามารถยึดจับวัสดุเพิ่มความแข็งแรง เช่น เส้นใยแก้วและ เส้นใยคาร์บอนได้ดี ส่งผลให้มีความแข็งแรงสูงขึ้น และสามารถนำไปใช้ สร้างชิ้นส่วนทางวิศวกรรมได้อย่างหลากหลาย เช่น รถยนต์ เรือ วงจร อิเล็กทรอนิกส์ อุปกรณ์กีฬา เป็นตัน ในงานวิจัยนี้ ผลกระทบของภาระ แบบผสม (mixed mode I/II) ที่มีต่อความต้านทานการแตกหัก (fracture toughness) ของเทอร์โมเซทอิพอกซีเรซินที่ใช้โพลีเอมีนเป็น สารที่ทำให้แข็งตัวได้ถูกศึกษาโดยใช้ชิ้นทดสอบบาง/อัตราภาระต่ำ (low thickness and low loading rate, LTLL) และชิ้นทดสอบหนา/ อัตราภาระสูง (high thickness and high loading rate, HTHL) พบว่า ้ค่าความต้านทานการแตกหักของ HTHL อยู่ภายใต้สภาพความเครียด ระนาบในทุก ๆ ค่าภาระแบบผสมที่ศึกษา ในขณะที่ค่าความต้านทาน การแตกหักของ LTLL ที่ทดสอบในช่วงภาระแบบเปิดเด่น (dominated mode I) อยู่ภายใต้สภาพความเค้นระนาบ และการทดสอบในช่วง อัตราภาระแบบเฉือนเด่น (dominated mode II) อยู่ภายใต้สภาพ ความเครียดระนาบ โดยภายใต้รูปแบบภาระแบบเปิดเด่น ค่าความ ้ต้านทานการแตกหักของ HTHL ถูกใช้เป็นเกณฑ์ความปลอดภัยการ แตกหัก (fracture criteria) ในขณะที่ภายใต้รูปแบบภาระแบบเฉือนเด่น ้ค่าความต้านทานการแตกหักของชิ้นงานที่ LTLL ถูกใช้เป็นเกณฑ์ ความปลอดภัยการแตกหัก

Abstract

Epoxy resins are currently used as a matrix in a large number of polymer-matrix fibre composites due to the large number of compounds can react with the epoxy ring to form resin systems with a very wide range of properties. They are being used for fibre-reinforced polymer (FRP) composite industries with various reinforcements, e.g. automobile, ships, sports, aerospace, and windmill blades. In the present work, The influences of mixed mode (mode I/II) loading on fracture behavior and mechanism of thermoset epoxy resin with polyamine hardener have been studied at low thickness/low loading rate (LTLL), and at high thickness/high loading rate (HTHL). The fracture toughness of HTHL specimens tested at variation of mixed-mode loading were under plane-strain condition. On the other hand, the fracture toughness of LTLL specimens tested at dominated mode I loading were under plane-stress condition, while those tested at dominated mode II loading were under plane-strain condition. Under the dominated mode I loading, the fracture toughness of HTHL specimens could be used as the fracture criteria, while the fracture toughness of LTLL specimens were used as the fracture criteria under the dominated mode II loading.

1. บทนำ

อิพอกซีเรซินเป็นวัสดุโพลิเมอร์ที่ใช้ในงานทางวิศวกรรม ซึ่งเป็น วัสดุที่มีความทนทานสูง มีการหดตัวในระหว่างการบ่มและการดูดซับ ความชิ้นด่ำ และสามารถใช้งานได้ในช่วงอุณหภูมิที่กว้าง (25 ถึง 150 °C) เนื่องจากโครงสร้างระดับจุลภาคที่เป็นวงของอิพอกซี (epoxy ring) สามารถยึดจับวัสดุเพิ่มความแข็งแรง เช่น เส้นใยแก้วและเส้นใย คาร์บอนได้ดี ส่งผลให้มีความแข็งแรงสูง [1-3] และสามารถนำไปใช้งาน ทางวิศวกรรมได้อย่างหลากหลาย เช่น เครื่องบิน รถยนต์ เรือ อุปกรณ์ กีฬา เป็นด้น

ในระหว่างการใช้งานชิ้นส่วนโพลิเมอร์สามารถเกิดการเสียหาย เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงรปร่างมากเกินปกติ หรือเกิดการแตกหักขึ้น จาก พื้นฐานของหลักการความเสียหายทางกลนั้น วัสดุที่มีสภาพความ ยึดหยุ่นเชิงเส้นจะมีค่าที่บ่งบอกความต้านทานการแตกหักที่เรียกว่า ้ค่าวิกฤตของตัวประกอบความเข้มของความเค้น (K_c, critical stress intensity factor) การแตกหักจะเกิดขึ้นเมื่อค่าตัวประกอบความเข้มของ ีดวามเด้น (K, stress intensity factor) บนชิ้นส่วนทางวิศวกรรมมีค่า เท่ากับหรือมากกว่า K_ซึ่งเป็นค่าของวัสดุนั้น ๆ โดยค่า K คือ พารามิเตอร์การแตกหักทางกลบริเวณปลายรอยร้าว ขึ้นอยู่กับขนาด ของรอยร้าว รูปร่างของชิ้นส่วนทางวิศวกรรม และภาระที่มากระทำ ในขณะที่ K_c จะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของวัสดุและมีการผันแปรไปตาม สภาวะต่างๆ เช่น อัตราภาระ รูปร่าง รูปแบบภาระที่กระทำ อุณหภูมิ สิ่งแวดล้อมและความเค้นที่เกิดขึ้น รูปแบบภาระที่ส่งผลให้เกิดการ แตกหักจะสามารถแบ่งได้ 3 ประเภท ได้แก่ รูปแบบที่1 แบบเปิด (mode l-opening mode) คือ ภาระที่มากระทำจะตั้งฉากกับผิวหน้าของ รอยร้าว (crack surface) ซึ่งทำให้ผิวหน้าของรอยร้าวเปิดแยกออกจาก กัน โดยทั่วไปจะพบว่า ลักษณะภาระในรูปแบบนี้จะเป็นรูปแบบที่ ้ก่อให้เกิดความเสียหายต่อชิ้นงานมากกว่าภาระในรูปแบบอื่น รูปแบบที่ 2 แบบเฉือน (mode II-sliding/shearing mode) คือ ภาระจะกระทำใน ทิศทางตั้งฉากกับขอบหน้าของรอยร้าว (leading edge) รปแบบที่ 3 แบบฉีก (mode III-tearing mode) คือ ภาระกระทำในทิศทางขนานกับ ขอบหน้าของรอยร้าวและขนานกับผิวหน้าของรอยร้าว รูปแบบภาระทั้ง แบบเปิด (mode I) แบบเฉือน (mode II) และแบบฉีก (mode III) แสดง ในรูปที่ 1 นอกจากค่าความต้านทานการแตกหักจะขึ้นอยู่กับวัสดุแล้ว ้ยังขึ้นกับรูปแบบภาระที่มากระทำด้วย นั่นคือ K_{inc} และ K_{inc} จะมีค่าสูง กว่า K_{ic} [4] ภายใต้รูปแบบภาระแบบที่ 1 สภาพของความเครียดระนาบ (plane strain) จะเกิดขึ้นกับชิ้นส่วนที่มีความหนาและรับอัตราภาระสูง ส่งผลให้ความต้านทานการแตกหักต่ำ ในขณะที่สภาพความเค้นระนาบ (plane stress) จะเกิดขึ้นกับชิ้นส่วนบางและรับอัตราภาระต่ำ ส่งผลให้ ค่าความต้านทานการแตกหักสูง [5]

จากการศึกษาความต้านทานการแตกหักของอิพอกซีเรซินชนิด ไบฟีนอลเอ (bisphenol-A) ที่ใช้โพลีเอมีนเป็นสารทำให้แข็งตัวที่อัตรา ภาระ 10⁻¹ ถึง 10³ มม./นาที [6] พบว่าค่าวิกฤติของตัวประกอบความ เข้มของความเค้น (*K_c*) และค่าวิกฤติของอัตราการปลดปล่อยพลังงาน (*G_c*, critical strain energy release rate) จะมีค่าสูงและสม่ำเสมอที่



รูปที่ 1 รูปแบบภาระที่ส่งผลให้เกิดการแตกหัก

้อัตราภาระต่ำ และเปลี่ยนเป็นค่าที่ต่ำและสม่ำเสมอที่อัตราภาระสูง โดย มีจุดเปลี่ยนที่อัตราภาระประมาณ 10 มม./นาที Low และ Mai [7] ได้ ศึกษาถึงกลไกความเสียหายของอิพอกซีเรซินบริสุทธิ์ และอิพอกซีเรซิน เสริมความแข็งแรงด้วยยางภายใต้อัตราความเครียด (strain 10⁻⁶ ถึง 10² วินาที⁻¹ และอุณหภูมิ -80 ถึง 60°C พบว่ากลไกการ ขยายตัวของปลายรอยร้าวจากการเปลี่ยนแปลงขนาดแบบพลาสติก (plastic–induced crack blunting mechanism) ส่งผลให้ค่าวิกฤติของ อัตราการปล่อยพลังงานความเครียดลดลง เมื่ออัตราความเครียด เพิ่มขึ้น Gensler และคณะ [8] ได้ศึกษาพฤติกรรมการแตกหักของ isostatic polypropylene ภายใต้อัตราภาระ 0.1 มม./วินาที ถึง 14 ม./วินาที พบว่าพฤติกรรมการแตกหักวัสดุเปลี่ยนจากพฤติกรรมแบบ ้วัสดุเหนียวไปเป็นวัสดุเปราะเมื่ออัตราภาระสูงขึ้น โดยกลไกการเฉือน เป็นกลไกความเสียหายหลักที่อัตราภาระต่ำ ในขณะที่การเกิดช่องว่าง ้จำนวนมากบริเวณส่วนปลายของรอยร้าว (multiple crazing) เป็นกลไก การเสียหายหลักที่อัตราภาระปานกลาง และการเกิดช่องว่างเดี่ยว บริเวณส่วนปลายของรอยร้าว (single crazing) เป็นกลไกการเสียหาย หลักที่อัตราภาระสูง Araki และคณะ [9] ได้ศึกษาค่าความต้านทานการ แตกหักของอิพอกซีเรซินภายใต้ภาระแบบผสม (mixed mode I/II) ที่ อุณหภูมิห้อง จากการศึกษาพบว่าผลกระทบจากการคลายตัว ที่เกิดกับค่าความต้านทานการแตกหักจะมีความ (relaxation effect) หลากหลายตามสัดส่วนของภาระแบบผสม (mode mixity)

ในปัจจุบันอิพอกซีเรซินและอิพอกซีเรซินที่เสริมความแข็งแรงด้วย เส้นใย และอนุภาคได้ถูกนำมาใช้งานทางด้านวิศวกรรมอย่างแพร่หลาย แต่มีงานวิจัยจำนวนน้อยที่ศึกษาเกี่ยวกับพฤติกรรมและกลไกการ แตกหักของอิพอกซีเรซิน [10-12] และไม่มีงานวิจัยใดที่จะทำการศึกษา ถึงผลกระทบของรูปแบบภาระ อัตราภาระและความหนาที่มีต่อความ ด้านทานการแตกหักของอิพอกซีเรซิน ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้ศึกษา ถึงผลกระทบของภาระแบบผสม (mixed mode I/II) ที่มีต่อพฤติกรรม การแตกหักของเทอร์โมเซทอิพอกซีเรซินที่ใช้โพลีเอมีนเป็นสารทำให้ แข็งตัว โดยศึกษาความด้านทานการแตกหัก (K_{IQ} และ K_{IIQ}) จากการ ทดสอบที่ชิ้นทดสอบบาง/อัตราภาระด่ำ (การเปลี่ยนแปลงรูปร่างมาก) และที่ชิ้นทดสอบหนา/อัตราภาระสูง (การเปลี่ยนแปลงรูปร่างน้อย)

2.วัสดุและวิธีการวิจัย

วัสดุที่ใช้ในงานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากบริษัท ไทยอีพอกซี แอนด์ อัลลายด์ โปรดักส์ จำกัด โดยเป็นวัสดุที่ได้จากการผสม ระหว่างเรซิ่นประเภท DGEBA (diglycidyl ethers bisphenol-A) ชนิด ความหนืดต่ำ กับสารที่ทำให้แข็งตัวประเภท aliphatic amine ด้วย อัตราส่วนระหว่างเรซินและสารทำแข็ง 100:35 โดยน้ำหนัก ปล่อยให้ เย็นตัวในแม่พิมพ์ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นอบต่อที่ อุณหภูมิ 80 °C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง เพื่อเพิ่มความแข็งแรง และเก็บ รักษาที่อุณหภูมิ 25 °C และ ความชิ้นสัมพัทธ์ 55 % โดยจะใช้ชิ้น ทดสอบแบบ single edge-notch bending (SENB) ในการทดสอบหา ค่าความต้านทานการแตกหัก ซึ่งมีขนาดดังรูปที่ 2 เมื่อ *b* คือความหนา ของชิ้นงาน *W* คือความกว้างของชิ้นงาน และ *a*ู คือความยาวรอยร้าว เริ่มต้น ประกอบด้วยรอยบากจากเลื่อย (machine notch) และรอยบาก จาก ใบมีด (razor notch) โดยมีรัศมีที่ปลายรอยร้าวประมาณ 0.1 มม. [13]



รูปที่ 2 ชิ้นทดสอบแบบ Single edge-notch bending (SENB)

ภายใต้ความเสียหายแบบที่ 1 (mode I loading) ค่าความ ้ต้านทานการแตกหักของอิพอกซีเรซิน จะมีค่าสูงและสม่ำเสมอที่อัตรา ภาระต่ำ (สภาพความเค้นระนาบ) และเปลี่ยนเป็นค่าที่ต่ำและสม่ำเสมอ ที่อัตราภาระสูง (สภาพความเครียดระนาบ) โดยมีจุดเปลี่ยนที่อัตรา ภาระประมาณ 10 มม./นาที [6] ดังนั้น การศึกษาผลกระทบของอัตรา ภาระและความหนาที่มีต่อความต้านทานการแตกหักในรูปแบบการ รับภาระแบบผสม (mixed mode I/II) จึงใช้ชิ้นทดสอบที่มีความหนา 4 มม.และอัตราภาระ 10⁻¹ มม./นาที (low thickness and low loading rate, LTLL) และชิ้นทดสอบที่มีความหนา 7 มม. และอัตราภาระ 10³ มม./นาที่ (High thickness and high loading rate, HTHL) การ ทดสอบการแตกหักกระทำบนเครื่อง servo-hydraulic fatigue machine 25 kN load cell) ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 55% (instron 8872 with อุณหภูมิ 25 °C ในระหว่างการทดสอบแรง การเปลี่ยนแปลงขนาดและ เวลาจะถกบันทึกค่าไว้ด้วยเครื่องคอมพิวเตอร์ และเพื่อลดผลกระทบ จากผลของการกระจายของความเข้มข้นของสายโซ่โมเลกุล (crosslink density) ที่ไม่สม่ำเสมอ [14] การทดสอบในแต่ละสภาวะจะถูกกระทำซ้ำ 5 ครั้ง และคำนวณค่าเฉลี่ย

3. การทดสอบความต้านทานการแตกหัก

รูปแบบภาระแบบผสมที่ปลายรอยร้าวเริ่มต้นจะถูกกำหนดโดยมุม ของโหมดมิกซิตี้ (mode mixity, β) ดังนี้

$$\beta = \tan^{-1} \left(\frac{K_{IIQ}}{K_{IQ}} \right) \tag{1}$$

เมื่อ K_{IQ} คือค่าความต้านทานการแตกหักภายใต้รูปแบบภาระแบบเปิด และ K_{IIQ} คือค่าความต้านทานการแตกหักภายใต้รูปแบบภาระแบบ เฉือน ถ้าค่าของ β เป็น 0° เป็นความเสียหายแบบเปิด (pure mode I) และถ้าเปลี่ยนเป็น 90° จะเป็นความเสียหายแบบเฉือน (pure mode II) เพื่อคลอบคลุมความสัมพันธ์ของรูปแบบความเสียหายแบบผสม จึงต้อง ทำการทดสอบค่าความต้านทานการแตกหัก 3 วิธี ดังนี้

3.1 วิธีดัดสามจุดแบบรอยร้าวไม่สมมาตร (3-point bending test of asymmetric pre-cracked specimen ; 3PBTA)

รูปแบบความเสียหายแบบผสมสามารถกำหนดได้โดย การเปลี่ยน แปลงตำแหน่งของรอยร้าว (s) ซึ่งถ้า s เท่ากับ 0 จะเป็นการเสียหาย แบบเปิดทั้งหมด (pure mode l) รายละเอียดของชิ้นทดสอบ 3PBTA แสดงดังรูปที่ 3a และค่าของ *K₁₀* และ *K₁₁₀ ล*ามารถหาได้ดังนี้ [15]

$$K_{IQ} = \sigma_c F_I \sqrt{\pi a_o} \tag{2}$$

$$K_{IIQ} = \sigma_c F_{II} \sqrt{\pi a_o} \tag{3}$$

$$\sigma_c = \frac{3P_c A}{W^2 b} \tag{4}$$

$$F_{I} = F_{I} \cdot \left(1 - \frac{a_{o}}{W}\right)^{-\frac{3}{2}}$$
(5)

$$F_{II} = F_{II} \cdot (1 - \frac{a_o}{W})^{-\frac{1}{2}}$$
(6)

เมื่อ *F*₁ และ *F*₁ คือ ฟังก์ชันรูปร่าง (normalized geometric functions) ของ mode I และ mode II ซึ่งขึ้นอยู่กับความสัมพันธ์ของ *a*₀*W* และ s/A [15] *σ*_c คือ ความเค้นสูงสุดก่อนเกิดการแตกหัก *P*_c คือ แรงสูงสุด ที่ทำให้เกิดการแตกหัก โดยค่าของโหมดมิกซิตี้ (*β*) ที่ได้จะอยู่ในช่วง 10[°]- 40[°] ของทั้งชิ้นทดสอบ LTLL และ HTHL

3.2 วิธีดัดสี่จุดแบบรอยร้าวไม่สมมาตร (4-point bending test of asymmetric pre-cracked specimen ; 4PBTA)

รูปแบบความเสียหายแบบผสม สามารถกำหนดได้โดยการเปลี่ยน แปลงตำแหน่งของรอยร้าว (s) ซึ่งถ้า s เท่ากับ 0 จะเป็นการเสียหาย แบบเฉือนทั้งหมด (pure mode II) รายละเอียดของชิ้นทดสอบ 4PBTA แสดงในรูปที่ 3b และค่าของ *K₁₀* และ *K₁₁₀* สามารถหาได้ดังนี้ [16]

$$K_{IQ} = \sigma_c \sqrt{\pi a_o \cdot F_I} \tag{7}$$

$$K_{IIQ} = \tau_c \sqrt{\pi a_o} \cdot F_{II} \tag{8}$$

เมื่อ F, และ F, คือ ฟังก์ชันรูปร่าง (geometric functions) โดยขึ้นอยู่กับ a, W [17] σ_c คือ ความเค้นสูงสุดก่อนเกิดการแตกหัก และ τ_c คือ ความเค้นเฉือนสูงสุดก่อนเกิดการแตกหัก ซึ่งค่าของ σ_c และ τ_c สามารถหาได้จาก

$$\sigma_c = \frac{A-B}{A+B} \cdot \frac{6sP_c}{bW^2} \tag{9}$$

$$\tau_c = \frac{A-B}{A+B} \cdot \frac{P_c}{bW}$$
(10)

เมื่อ *P*ู คือ แรงสูงสุดที่ทำให้เกิดการแตกหัก โดยค่าของโหมดมิกซิตี้ (β) ที่ได้จะอยู่ในช่วง 20 [°]- 50 [°] สำหรับชิ้นทดสอบ LTLL และ 20 [°]- 60 [°] สำหรับชิ้นทดสอบ HTHL

3.3 วิธีดัดสี่จุด (4-point bending test ; 4PBT)

รูปแบบความเสียหายแบบผสม สามารถกำหนดได้โดยการเปลี่ยน แปลงขนาดของรอยร้าวต่อความกว้างของชิ้นงาน (a,/w) ซึ่งถ้า a,/w เท่ากับ 0.8 จะเป็นการเสียหายแบบเฉือนทั้งหมด (pure mode II) รายละเอียดของชิ้นทดสอบ 4PBT แสดงในรูปที่ 3c และค่าของ K_{io} และ K_{iio} สามารถคำนวณได้โดย [18]

$$K_{IQ} = F_I \tau_c \sqrt{\pi a_o} \tag{11}$$

$$K_{IIQ} = F_{II} \tau_c \sqrt{\pi a}_o \tag{12}$$

เมื่อ *F*, และ *F*" คือ ฟังก์ชันรูปร่าง (geometric functions) โดยขึ้นอยู่กับ a_c/W [18] และ τ_c คือ ความเค้นเฉือนสูงสุดก่อนเกิดการแตกหัก ซึ่งค่า ของ τ_c สามารถหาได้จาก

$$\tau_c = \frac{P_c}{Wb} \left(\frac{1 - B/A}{1 + B/A} \right) \tag{13}$$

เมื่อ *P*ู คือ แรงสูงสุดที่ทำให้เกิดการแตกหัก โดยค่าของโหมดมิกซิตี้ (β) ที่ได้จะอยู่ในช่วง 60 [°]- 90 ° ของทั้งชิ้นทดสอบ LTLL และ HTHL





4. ผลและการวิเคราะห์

4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงและระยะโก่งตัว

้ความสัมพันธ์ระหว่างแรงและระยะโก่งตัวของชิ้นทดสอบ LTLL และ HTHL ภายใต้รูปแบบภาระแบบเปิด (pure mode I) และ แบบ เฉือน (pure mode II) แสดงดังรูปที่ 4a-d โดยจากกราฟจะเห็นช่วงการ เปลี่ยนแปลง 3 ช่วง คือ ช่วงแรกจะเป็นความสัมพันธ์แบบเชิงเส้น (การ เปลี่ยนแปลงแบบอิลาสติก) ช่วงที่สองจะเป็นความสัมพันธ์แบบไม่เชิง เส้น(การเปลี่ยนแปลงแบบพลาสติก) และสุดท้ายแรงจะลดลงทันใดเมื่อ ไปถึงค่าสูงสุด (รอยร้าวเริ่มขยายตัว) ซึ่งการเปลี่ยนแปลงแบบพลาสติก จะเห็นได้อย่างชัดเจนสำหรับชิ้นทดสอบ LTLL (รปที่ 4a และ b) ในขณะที่การลดลงอย่างทันทีทันใดของแรงที่เกิดภายหลังความสัมพันธ์ แบบเชิงเส้น จะสังเกตเห็นได้ในชิ้นทดสอบ HTHL (รูปที่ 4c และ d) ซึ่งลักษณะนี้สอดคล้องกับกลไกการเปลี่ยนแปลงขนาดที่ขึ้นอยู่กับเวลา โดยในกรณีเวลาน้อยหรืออัตราภาระสูง (100 มม./นาที) ระยะโก่งตัว ้ก่อนการแตกหักจะลดลง และจะกลายเป็นกระบวนการที่ไม่ขึ้นกับเวลา [6] ค่าแรงสูงสุด (P) ภายใต้รูปแบบภาระแบบเฉือนจะมีค่าที่สูงกว่า รูปแบบภาระแบบเปิดทั้งชิ้นทดสอบ LTLL และ HTHL ค่าซึ่งยืนยันได้ ้ว่าสภาพความเค้นและความเครียด (stress-strain field) ที่ปลายรอย ้ร้าวภายใต้รูปแบบภาระแบบเปิด จะรุนแรงมากกว่าภายใต้รูปแบบภาระ แบบเฉือน

4.2 ความต้านทานการแตกหัก

ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานการแตกหัก (K_{lo} และ K_{llo}) และ โหมดมิกซิตีแองเกิล (mode mixity angle , β) ของชิ้นทดสอบ LTLL และ HTHL แสดงได้ดังรูปที่ 5a-d ค่าของ K_{lo} จะมีค่าที่สูงที่ รูปแบบภาระแบบเปิด (pure mode I; $\beta = 0^\circ$) และจะมีค่าที่ลดลงเมื่อมี การเพิ่มขึ้นของโหมดมิกซิตีแองเกิล (β) และมีค่าเป็น 0 ที่รูปแบบภาระ แบบเฉือน (pure mode II; $\beta = 90^\circ$) ดังแสดงให้เห็นในรูปที่ 5a และ c ในทางตรงกันข้ามค่า K_{llo} มีค่าเป็น 0 ที่รูปแบบภาระแบบเปิด (pure mode I; $\beta = 0^\circ$) และเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของโหมดมิกซิตีแองเกิล (β) ดังแสดงในรูปที่ 4b และ d อย่างไรก็ตามการลดลงของ K_{llo} ในช่วง โหมดมิกซิตีแองเกิล (β) ระหว่าง 50°-60° ถูกพบในชิ้นทดสอบ LTLL (รูปที่ 5b)

ความสัมพันธ์ระหว่าง K_{μ_0} และ K_{μ_0} ของชิ้นทดสอบ LTLL และ HTHL แสดงได้ดังรูปที่ 6a และ b ตามลำดับ เส้นประซึ่งทำมุม 45° แสดงเขตแบ่งระหว่างรูปแบบภาระแบบเปิดเด่นกับรูปแบบภาระแบบ เฉือนเด่น โดยด้านบนของเส้นประเป็นรูปแบบภาระแบบเปิดเด่นและ ช่วงล่างเป็นรูปแบบภาระแบบเฉือนเด่น เห็นได้ว่าช่วงภาระแบบเปิด เด่น ค่าของ K_{μ_0} ในชิ้นทดสอบ LTLL ไม่เปลี่ยนแปลงตามการเพิ่มขึ้น ของ K_{μ_0} ในช่วงภาระแบบเฉือนเด่นอิทธิพลของ K_{μ_0} ที่มีต่อ K_{μ_0} จะ เด่นชัดทั้งในชิ้นทดสอบ LTLL และ HTHL ในช่วงการเปลี่ยนแปลงจาก รูปแบบภาระแบบเปิดเด่นไปเป็นกับรูปแบบภาระแบบเฉือนเด่น (เส้นประ 45°) ความสัมพันธ์ระหว่าง K_{μ_0} และ K_{μ_0} จะมีการ เปลี่ยนแปลงอย่างชัดเจนในชิ้นทดสอบ LTLL (รูปที่ 6a) การ เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่าง K_{μ_0} และ K_{μ_0} ของชิ้นทดสอบ LTLL และ HTHL แสดงดังรูปที่ 7 ภายใต้ช่วงภาระแบบเปิดเด่น (ด้านบนของ เส้น 45°) ค่าความต้านทานการแตกหักของชิ้นทดสอบ HTHL



์ รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงและระยะโก่งตัว ; (a) ชิ้นงาน LTLL ที่ทดสอบภายใต้รูปแบบภาระแบบเปิด (b) ชิ้นงาน LTLL ที่ทดสอบภายใต้รูปแบบภาระแบบเฉือน (c) ชิ้นงาน HTHL ที่ทดสอบภายใต้รูปแบบภาระแบบเปิด (d) ชิ้นงาน HTHL ที่ทดสอบภายใต้รูปแบบภาระแบบเฉือน



รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความด้านทานการแตกหัก (K_o) และมิกซิตี้แองเกิล (β); (a) K_{io} ของชิ้นงาน LTLL, (b) K_{iio} ของชิ้นงาน LTLL, (c) K_{io} ของชิ้นงาน HTHL และ (d) K_{iio} ของชิ้นงาน HTHL

มีค่าต่ำกว่าค่าความต้านทานการแตกหักของชิ้นทดสอบ LTLL ในขณะ ที่ภายใต้ภาระแบบเฉือนเด่น (ด่านล่างของเส้น 45°) ค่าความต้านทาน การแตกหักของชิ้นทดสอบ HTHL มีค่าที่สูงกว่าค่าความต้านทานการ แตกหักของชิ้นทดสอบ LTLL



รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานการแตกหักภายใต้ รูปแบบภาระแบบเปิด (*K_{io}*) และความต้านทานการแตกหักภายใต้รูป แบบภาระแบบเฉือน (*K_{io}*); (a) ชิ้นงาน LTLL และ (b) ชิ้นงาน HTHL

ในรอยร้าวที่แหลม (sharp crack) สภาพความเค้นและ ความเครียดที่ปลายรอยร้าวภายใต้รูปแบบภาระแบบเปิด จะมีความ รุนแรงมากกว่ารูปแบบภาระแบบเฉือน ค่าความต้านทานการแตกหัก ของวัสดุภายใต้รูปแบบภาระแบบเปิด (*K_{IQ}*) จึงมีค่าที่ต่ำกว่ารูปแบบ ภาระแบบเฉือน (*K_{IIQ}*) [4] ซึ่งสอดคล้องกับค่าความต้านทานการ แตกหักที่ได้จากชิ้นทดสอบ HTHL ดังแสดงในรูปที่ 7 แต่ในกรณีของ ชิ้นทดสอบ LTLL การหดตัวปัวซองค์ (poisson contraction) สามารถ เกิดขึ้นรอบปลายรอยร้าว ภายใต้รูปแบบภาระแบบเปิด เนื่องจากการ เปลี่ยนแปลงขนาดที่ขึ้นกับเวลา ส่งผลให้สภาวะความเครียดที่ปลาย รอยร้าวจะมี 3 มิติ (ความเครียดระนาบ) ในขณะที่ความเค้นที่ปลาย รอยร้าวจะมี 2 มิติ (ความเค้นระนาบ) ในสภาพเช่นนี้การเปลี่ยนแปลง ขนาดแบบพลาสติกที่ปลายรอยร้าวมีค่าสูงขึ้น ซึ่งทำให้รัศมีที่ปลายรอย ร้าวเพิ่มขึ้น (crack blunting) ความเค้นที่ปลายรอยร้าวจะลดลง และค่า ความต้านทานการแตกหักสูงขึ้น ในขณะที่การหดตัวปัวซองค์เกิดขึ้นได้ ยากในช่วงภาระแบบเฉือนเด่น ดังนั้นค่าความต้านทานการแตกหักของ ชิ้นทดสอบ LTLL ภายใต้รูปแบบภาระแบบเปิดเด่นจึงมีค่าที่สูงกว่าค่า ความต้านทานการแตกหักภายใต้ภาระแบบเฉือนเด่น (รูปที่ 7)



รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานการแตกหักภายใต้ รูปแบบภาระแบบเปิด (*K_{IO}*) และความต้านทานการแตกหักภายใต้ รูปแบบภาระแบบเฉือน (*K_{IIO}*)

สำหรับชิ้นทดสอบ HTHL ภายใต้ภาระแบบเปิดเด่น สภาพความ เค้นระนาบบริเวณปลายรอยร้าวเกิดได้ยาก ดังนั้นความต้านทานการ แตกหักภายใต้ภาระแบบเปิดเด่นของชิ้นทดสอบ HTHL จึงมีค่าต่ำกว่า ้ความต้านทานการแตกหักของชิ้นทดสอบ LTLL ในทางตรงข้ามชิ้น ทดสอบแบบ LTLL และ HTHL ภายใต้ภาระแบบเฉือนเด่นถูกควบคุม ้ด้วยความเครียดเฉือน ซึ่งการหดตัวปัวซองค์ (poisson contraction) ้จะไม่มีผลจึงไม่เกิดการยุบตัวด้านข้าง และไม่ทำให้เกิดเพิ่มขึ้นของรัศมี ที่ปลายรอยร้าว (crack blunting) ดังนั้นความต้านทานการแตกหักจะ ลดลงตามการเพิ่มขึ้นของค่าความเครียดเฉือนที่ปลายรอยร้าว เนื่องจากมีเวลาในการเปลี่ยนแปลงขนาดมาก ในกรณีชิ้นทดสอบ LTLL ดังนั้นความต้านทานการแตกหักของ LTLL ภายใต้สภาพภาระเฉือน เด่น จึงมีค่าต่ำกว่าความต้านทานการแตกหักของชิ้นทดสอบ HTHL โดยการเปลี่ยนกลไกการแตกหักของชิ้นทดสอบ LTLL จากการควบคุม การหดตัวปัวซองค์ภายใต้รูปแบบภาระแบบเปิดเด่นไปเป็นการควบคุม ด้วยความเครียดเฉือนภายใต้รูปแบบภาระแบบเฉือนเด่น ส่งผลให้เกิด การเปลี่ยนแปลงในรูปแบบความสัมพันธ์ของพฤติกรรมของ K_{io} และ $K_{\mu
m o}$ ที่ β = 45 $^{\circ}$ แสดงดังรูปที่ 6a

เกณฑ์ความปลอดภัยในการนำไปใช้งาน ซึ่งค่า K, และ K_n ไม่ ส่งผลให้เกิดการแตกหัก ถูกแรเงาในรูปที่ 7 โดยภายใด้รูปแบบภาระ แบบเปิดเด่น ค่าความต้านทานการแตกหักของซิ้นทดสอบ HTHL ถูก ใช้เป็นเกณฑ์ความปลอดภัยจากการแตกหัก ในขณะที่ภายใต้รูปแบบ ภาระแบบเฉือนเด่น ใช้ค่าความต้านทานการแตกหักของชิ้นทดสอบ LTLL เป็นเกณฑ์ความปลอดภัยจากการแตกหัก

สรุป

ผลกระทบของอัตราภาระและความหนาที่มีต่อพฤติกรรมการ แตกหักของเทอร์โมเซทอิพอกซีเรซินที่ใช้โพลีเอมีนเป็นสารทำให้ แข็งตัวภายใต้รูปแบบการรับภาระแบบผสม ที่ศึกษาในสภาวะชิ้น ทดสอบบาง/อัตราภาระต่ำ (LTLL) และชิ้นทดสอบหนา/อัตราภาระสูง (HTHL) สามารถสรุปได้ดังนี้

 ค่าความด้านทานการแตกหักของชิ้นทดสอบ HTHL ภายใต้ ภาระแบบผสม (mixed mode I / II) อยู่ในสภาพความเครียดระนาบ โดยค่าความด้านทานการแตกหักภายใต้รูปแบบภาระแบบเปิดเด่นจะมี ค่าที่ต่ำกว่าภายใต้รูปแบบภาระแบบเฉือนเด่น ในทางตรงกันข้ามค่า ความด้านทานการแตกหักของชิ้นทดสอบ LTLL ภายใต้ภาระแบบเปิด เด่นจะอยู่ในสภาพความเค้นระนาบ โดยจะแสดงสภาพความเครียด ระนาบเมื่อรูปแบบภาระเปลี่ยนเป็นภาระเฉือนเด่น

2) ความด้านทานการแตกหักของชิ้นทดสอบ LTLL ภายใต้รูปแบบ ภาระแบบเปิดเด่นจะมีค่าสูงกว่าภายใต้รูปแบบภาระแบบเฉือนเด่น และภายใต้รูปแบบภาระแบบเปิดเด่นนั้น ค่าความต้านทานการแตกหัก ของชิ้นทดสอบ HTHL มีค่าต่ำกว่าความต้านทานการแตกหักของชิ้น ทดสอบ LTLL ดังนั้นความต้านทานการแตกหักของชิ้นทดสอบ HTHL จึงถูกใช้เป็นเกณฑ์ความปลอดภัยจากการแตกหัก ในขณะที่ภายใต้ รูปแบบภาระแบบเฉือนเด่น ค่าความต้านทานการแตกหักของชิ้น ทดสอบ LTLL มีค่าต่ำกว่าความต้านทานการแตกหักของชิ้น ทดสอบ LTLL มีค่าต่ำกว่าความต้านทานการแตกหักของชิ้น ทดสอบ LTLL มีค่าต่ำกว่าความต้านทานการแตกหักของชิ้น เป็นเกณฑ์ความปลอดภัยจากการแตกหัก

6. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณคำแนะนำและการสนับสนุนจาก สำนักงาน กองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.) และศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (MTEC)

เอกสารอ้างอิง

- Crawford RJ. Plastics Engineering. 3 ed. 1998, Oxford: Butterworth-Heinemann.
- [2] Margolis JM. Advanced Thermoset Composites-Industrial and Commercial Application. 1985, New York: Van Nostrand Reinhold.
- [3] Mills NJ. Plastics: Microstructure and Engineering. 2 ed. 1993, London: Arnold.
- [4] Anderson TL. Fracture Mechanicals: Fundamental and Applications. 2 ed. 1994, New York: CRC Press.
- [5] Dowling NE. Mechanical behavior of materials: engineering methods for deformation, fracture, and fatigue. 1993, New Jersey: Prentice-Hall International.

- [6] Kanchanomai C, Rattananon S, Soni M. Effects of loading rate on fracture behavior and mechanism of thermoset epoxy resin. Polymer Testing 2005; 24(7): 886-892.
- [7] Low IM, Mai YW. Rate and temperature effects on crack blunting mechanisms in pure and modified epoxies. Journal of Materials Science 1989; 24(5): 1634-1644.
- [8] Gensler R, Plummer CJG, Grein C, Kausch HH. Influence of the loading rate on the fracture resistance of isotactic polypropylene and impact modified isotactic polypropylene. Polymer 2000; 41: 3809-3819.
- [9] Araki W, Nemoto K, Adachi T, Yamaji A. Acta. Fracture toughness for mixed mode I/II of epoxy resin. Materialia 2005; 53(3): 869-875.
- [10] Araki W, Adachi T, Yamaji A. Time-temperature dependences of fracture toughnesses of epoxy resin and silica particulate-filled epoxy composite. Materials Science Forum 2003; 426-432(3): 1985-1990.
- [11] Lee DB, Ikeda T, Miyazaki N, Choi NS. Damage zone around crack tip and fracture toughness of rubber-modified epoxy resin under mixed-mode conditions. Engineering Fracture Mechanics 2002; 69(12): 1363-1375.
- [12] Kim HS, Khamis MA. Fracture and impact behaviours of hollow micro-sphere/epoxy resin composites. Composites – Part A: Applied Science and Manufacturing 2001; 32(9): 1311-1317.
- [13] ISO 13586: Plastics Determination of fracture toughness $(G_{IC} \text{ and } K_{IC})$ Linear elastic fracture mechanics (LEFM) approach. 2000.
- [14] Morgan RJ, O'Neal JE. The microscopic failure processes and their relation to the structure of amine-cured bisphenol-A-diglycidyl ether epoxies. Journal of Materials Science Letters 1996; 15(1): 955-958.
- [15] Fett T. Mixed-mode stress intensity factors for three-point bending bars. International Journal of Fracture 1991; 48 : R67-R74.
- [16] Choi SR, Zhu D, Miller RA. Fracture behavior under mixedmode loading of ceramic plasma-sprayed thermal barrier coatings at ambient and elevated temperatures. Engineering Fracture Mechanic 2005; 72(13): 2144-2158.
- [17] He MY, Hutchins on JW. Asymmetric four-point crack specimen. Journal of Applied Machanics 2000; 67: 207-209.
- [18] Murakami I. Stress Intensity Factors Handbook. 1987, New York: Pergamon Press.