พฤติกรรมและกลไกการแตกหักของเทอร์โมเซทอีพ็อกซี่เรซิ่น ภายใต้สภาพความเค้นระนาบและความเครียดระนาบ Fracture Behavior and Mechanism of Thermoset Epoxy Resin under Plane Stress and Plane Strain Conditions

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

อีพ็อกซึ่เรซิ่นได้ถูกใช้เป็นวัสดุหลักในวัสดุผสม (composite materials) เนื่องจากโครงสร้างระดับจุลภาคที่เป็นวงของอีพ็อกซึ่ (epoxy ring) สามารถยึดจับวัสดุเพิ่มความแข็งแรง เช่น เส้นใยแก้วและ เส้นใยคาร์บอนได้ดี ส่งผลให้มีความแข็งแรงสูงขึ้น และสามารถนำไปใช้ สร้างชิ้นส่วนทางวิศวกรรมได้อย่างหลากหลาย เช่น รถยนต์ เรือ วงจร อิเล็กทรอนิกส์ อุปกรณ์กีฬา เป็นต้น ในงานวิจัยนี้อิทธิพลของสภาพ ความเค้นระนาบ (plane stress) และความเครียดระนาบ (plane strain) ที่มีต่อพฤติกรรมของความต้านทานการแตกหัก (fracture toughness และกลไกการแตกหักของเทอร์โมเซทอีพ็อกซึ่เรซิ่น behavior) (thermoset epoxy resin) ที่ใช้โพลีเอมีน (polyamine) เป็นสารที่ทำให้ แข็งตัวได้ถูกศึกษาด้วยวิธีดัดสามจุด (3-point bending) ภายใต้อัตรา ภาระต่างๆ (10⁻¹ ถึง 10³ มม./นาที) และความหนาชิ้นทดสอบขนาด ต่างๆ (4 ถึง 10 มม.) จากผลการศึกษาพบว่าค่าวิกฤติของตัวประกอบ ความเข้มของความเค้น (critical stress intensity factor, K_{io}) จะลดลง เมื่อมีการเพิ่มขึ้นของอัตราภาระและความหนา โดยจะมีขนาดสม่ำเสมอ ที่อัตราภาระสูง (> 10 มม./นาที) และชิ้นทดสอบหนา(> 7 มม.) การ เปลี่ยนแปลงขนาดแบบพลาสติก และสภาพความเค้นแบบระนาบเป็น กลไกความเสียหายที่เกิดขึ้นในชิ้นทดสอบขนาดบาง/อัตราภาระต่ำ ในขณะที่ความเสียหายแบบเปราะ (brittle fracture) และสภาพ ้ความเครียดแบบระนาบเป็นกลไกความเสียหายที่เกิดขึ้นกับชิ้นทดสอบ หนา/อัตราภาระสูง

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 plane stress and plane strain on fracture toughness behavior and mechanism of thermoset epoxy resin with polyamine hardener were investigated using 3-point bending fracture toughness tests under various displacement rates $(10^{-1} - 10^3 \text{ mm/min})$ and thicknesses (4-10 mm). The critical stress intensity factor (K_{io}) decreased with increasing displacement rate and thickness, and became stable at high displacement rate (> 10 mm/min) and thickness (> 7 mm). The blunting of crack due to a localized plastic deformation process, i.e. the formation of stretched zone and crazes, and the condition of plane stress were dominated mechanisms for thin specimens tested under low displacement rate, while brittle fracture and the condition of plane

18-20 October 2006, Mandarin Golden Valley Hotel & Resort Khao Yai, Nakhon Ratchasima

AMM029

strain were dominated mechanisms for thick specimens tested under high displacement rate.

1. บทนำ

อีพ็อกซึ่เรชิ่นได้ถูกใช้เป็นวัสดุหลักในวัสดุผสม (composite materials) เนื่องจากโครงสร้างระดับจุลภาคที่เป็นวงของอีพ็อกซึ่ (epoxy ring) สามารถยึดจับวัสดุเพิ่มความแข็งแรง เช่น เส้นใยแก้วและ เส้นใยคาร์บอนได้ดี ส่งผลให้มีความแข็งแรงสูงขึ้นและสามารถนำไปใช้ สร้างชิ้นส่วนทางวิศวกรรมได้อย่างหลากหลาย เช่น รถยนต์ เรือ วงจรอิเล็กทรอนิกส์ อุปกรณ์กีฬา เป็นต้น [1] ความต้านทานการ แตกหัก (fracture toughness) เป็นปัจจัยหนึ่งที่ต้องคำนึงถึงในการ ้ออกแบบชิ้นส่วนทางวิศวกรรม โดยเฉพาะชิ้นส่วนที่มีลักษณะซับซ้อน จนทำให้เกิดการกระจายตัวของความเค้นไม่สม่ำเสมอ ขนาดความ ้ต้านทานการแตกหักในวัสดุต่างๆ ขึ้นอยู่กับสภาพของความเค้น/ ความเครียดที่จุดวิกฤติ ชิ้นส่วนที่มีสภาพความเค้นแบบระนาบ (plane stress) จะสามารถต้านทานการแตกหักได้ดีกว่าชิ้นส่วนที่มีสภาพ ความเครียดแบบระนาบ (plane strain) โดยสภาพของความเค้น/ ความเครียดที่จุดวิกฤติของชิ้นส่วนทางวิศวกรรมขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย เช่น ขนาดของชิ้นส่วน อัตราภาระ อุณหภูมิ ทิศทางของภาระ เป็น ต้น [2]

และคณะ [3] ได้ศึกษาถึงอิทธิพลของความหนาและ Gearv ผลกระทบของการทดสอบแบบ dynamic rates ที่เกิดขึ้นกับพฤติกรรม การแตกหัก (fracture toughness behavior) ของ glass-reinforced plastic (GRP materials) พบว่าภายใต้การทดสอบด้วย dynamic rates ้ค่าของความต้านทานการแตกหัก (fracture toughness) จะเพิ่มขึ้นเมื่อ ้ความหนาเพิ่ม และขึ้นอยู่กับความยาวของเส้นใย (fibre) ที่ใช้ Bastida และคณะ [4] ได้ศึกษาถึงค่าของ modulus of elasticity polycarbonate (PC) และ poly(ether imide) (PEI) จากการทดสอบ แรงดึง (tensile test) ที่เกิดขึ้นกับวัสดุที่ความหนาต่างกัน (0.1-2 มม.) พบว่าค่าของ modulus of elasticity จะมีค่าที่ลดลงเมื่อความหนา เพิ่มขึ้น ในช่วงความหนา 0.1-2 มม.เนื่องจากผลกระทบของสภาพ ้ความเครียดแบบระนาบ (plane strain) ในชิ้นทดสอบหนา Low และ Mai [5] ได้ศึกษาถึงกลไกความเสียหายของอีพ็อกซี่เรซิ่นบริสุทธิ และ อีพ็อกซึ่เรซิ่นเสริมความแข็งแรงด้วยยางภายใต้อัตราความเครียด (strain rate) 10⁻⁶ ถึง 10² วินาที⁻¹ และ อุณหภูมิ -80 ถึง 60°C พบว่า กลไกการขยายตัวของปลายรอยร้าวจากการเปลี่ยนแปลงขนาดแบบ พลาสติก (plastic–induced crack blunting mechanism) ส่งผลให้ค่า วิกฤติของอัตราการปล่อยพลังงานความเครียด (critical strain energy release rate, G, ลดลง เมื่ออัตราความเครียดเพิ่มขึ้น Gensler และ คณะ [6] ได้ศึกษาพฤติกรรมการแตกหักของ isostatic polypropylene ภายใต้อัตราภาระ 0.1 มม./วินาที ถึง 14 ม./วินาที พบว่าพฤติกรรมการ แตกหักวัสดุเปลี่ยนจากพฤติกรรมแบบวัสดุเหนียวไปเป็นวัสดุเปราะเมื่อ ้อัตราภาระสูงขึ้น โดยกลไกการเฉือนเป็นกลไกความเสียหายหลักที่ อัตราภาระต่ำ ในขณะที่การเกิดช่องว่างจำนวนมากบริเวณส่วนปลาย ของรอยร้าว (multiple crazing) เป็นกลไกการเสียหายหลักที่อัตราภาระ ปานกลาง และการเกิดช่องว่างบริเวณส่วนปลายของรอยร้าว (single

crazing) เป็นกลไกการเสียหายหลักที่อัตราภาระสูง D'Almeid และ Monteiro [7] ได้ศึกษาพื้นผิวการแตกหัก (fracture surface) ของอีพ็อก ซึ่เรซิ่นที่มีอัตราส่วนระหว่างเรซิ่นและสารทำแข็ง (resin/hardener) ต่างๆ พบว่าบริเวณสารทำแข็ง (amine-rich) มีการเปลี่ยนแปลงขนาด และร่องรอยการฉีก (tear zone) ในขณะที่บริเวณเนื้ออีพ็อกซี่เรซิ่น (epoxy-rich) ไม่แสดงร่องรอยความเสียหาย โดยพื้นผิวการแตกหักมี ลักษณะเรียบ

เนื่องจากคุณสมบัติเชิงกลของโพลิเมอร์ เช่น โมดูลัสอิลาสติก และจุดครากเป็นคุณสมบัติที่ขึ้นกับเวลา อัตราภาระและขนาดของ ชิ้นส่วนจึงส่งผลกระทบต่อสภาพของความเค้น/ความเครียดที่จุดวิกฤติ รวมถึงพฤติกรรมการแตกหักของชิ้นส่วนทางวิศวกรรมที่สร้างจาก ้อีพ็อกซี่เรซิ่นมากกว่าชิ้นส่วนที่สร้างจากโลหะหรือเซรามิก ดังนั้นความ เข้าใจถึงผลกระทบของสภาพความเค้นระนาบ (plane stress) และ ้ความเครียดระนาบ (plane strain) ที่มีต่อพฤติกรรมและกลไกการ แตกหักของอีพ็อกซี่เรซิ่นที่อัตราภาระและขนาดต่างๆ จึงมีความจำเป็น ในการออกแบบ ผลิต และใช้งานทางวิศวกรรม ในขณะที่อีพ็อกซี่เรซิ่น เสริมความแข็งแรงด้วยเส้นใย และอนุภาคได้ถูกนำมาใช้งานทางด้าน ้วิศวกรรมอย่างแพร่หลาย มีงานวิจัยจำนวนน้อยได้ศึกษาเกี่ยวกับ ผลกระทบของสภาพความเค้นระนาบ (plane stress) และความเครียด strain) ที่มีต่อพฤติกรรมและกลไกการแตกหักของ ระนาบ (plane เทอร์โมเซทอีพ็อกซึ่เรซิ่น ดังนั้นผลกระทบของสภาพความเค้นระนาบ stress) และความเครียดระนาบ (plane (plane strain) ที่มีต่อ พฤติกรรมและกลไกการแตกหักของเทอร์โมเซทอีพ็อกซึ่เรซิ่น (thermoset epoxy resin) ที่ใช้โพลีเอมีน (polyamine) เป็นสารที่ทำให้ แข็งตัวได้ถูกศึกษาด้วยวิธีดัดสามจุด (3-point bending) ภายใต้อัตรา ภาระต่างๆ (10⁻¹ ถึง 10³ มม./นาที) และความหนาชิ้นทดสอบต่างๆ (4 ถึง 10 มม.) พื้นผิวการแตกหัก (fracture surface) ได้ถูกศึกษาเพื่อ อธิบายถึงกลไกการแตกหักของอีพ็อกซึ่เรซิ่นภายใต้อัตราภาระและ ความหนาชิ้นทดสอบต่างๆ

2. ขั้นตอนการวิจัย

วัสดุที่ใช้ในงานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากบริษัท ไทยอีพอกซึ่ แอนด์ อัลลายด์ โปรดักส์ จำกัด โดยเป็นวัสดุที่ได้จากการผสม ระหว่างเรซิ่นประเภท DGEBA (diglycidyl ethers bisphenol-A) ชนิด ความหนืดต่ำ กับสารที่ทำให้แข็งดัวประเภท aliphatic amine ด้วย อัตราส่วนระหว่างเรซิ่นและสารทำแข็ง 100:35 ปล่อยให้เย็นตัวใน แม่พิมพ์ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นอบต่อที่อุณหภูมิ 80 °C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง เพื่อเพิ่มความแข็งแรง และเก็บรักษาที่ อุณหภูมิ 25 °C และ 55 % ความชื้นสัมพัทธ์ เป็นเวลาประมาณ 45 วัน ก่อนทำการศึกษา

ชิ้นทดสอบแบบ dumbell-shaped สำหรับการทดสอบแรงดึง (tensile test) [8] ถูกตัดจากแผ่นวัสดุให้มีขนาดดังรูปที่ 1 โดยทำการ ทดสอบที่อัตราภาระ 10⁻¹ ถึง 10³ มม./นาที การทดสอบแรงดึงกระทำ บนเครื่อง servo-hydraulic fatigue machine ในขณะที่ชิ้นทดสอบ แบบ single edge-notch bending (SENB) ซึ่งมีความหนา 4, 7, 10 มม ถูกใช้ในการทดสอบการแตกหักแบบ three-point bending

ME NETT 20th | หน้าที่ 114 | AMM029

18-20 October 2006, Mandarin Golden Valley Hotel & Resort Khao Yai, Nakhon Ratchasima

AMM029

fracture toughness test [9] รอยร้าวเริ่มต้น (precrack, a) ประกอบด้วยรอยบากจากเลื่อย (machine notch) และรอยบากจาก ใบมีด (razor notch) โดยควบคุมความยาวรวมของรอยร้าวเริ่มต้นอยู่ ในช่วง 0.45 < a/w < 0.55 โดย w คือ ความกว้างของชิ้นทดสอบ ลักษณะของชิ้นทดสอบ SENB แสดงในรูปที่ 2 การทดสอบการ แตกหักกระทำบนเครื่อง servo-hydraulic fatigue machine ที่ ความชิ้นสัมพัทธ์ 55% อุณหภูมิ 25 °C และอัตราภาระ 10⁻¹ ถึง 10³ มม./นาที ในระหว่างการทดสอบ แรง การเปลี่ยนแปลงขนาดและเวลา จะถูกบันทึกค่าไว้ด้วยเครื่องคอมพิวเตอร์ ชิ้นทดสอบที่แตกหักถูก นำไปศึกษาพื้นผิวการแตกหักด้วยกล้องจุลทรรศน์



รูปที่ 1 ชิ้นทดสอบการดึงแบบ dumbell-shaped [8] (หน่วยเป็น มม.)



รูปที่ 2 ชิ้นทดสอบการแตกหักแบบ single edge-notch bending (SENB) [9]

3. การคำนวณตัวประกอบความเข้มของความเค้น

จากทฤษฏีกลศาสตร์การแตกหัก วัสดุที่แสดงพฤติกรรมแบบ อิลาสติกเซิงเส้น (linear elastic material) จะมีค่าความด้านทานการ แตกหัก ซึ่งเรียกว่า ค่าวิกฤติของตัวประกอบความเข้มของความเค้น (critical stress intensity factor, K_{lo}) ซึ่งค่าวิกฤตินี้เป็นค่าเฉพาะตัว ของวัสดุที่สภาพใดสภาพหนึ่ง และสามารถหาได้จากการทดสอบ โดย รอยร้าวบนชิ้นส่วนเครื่องจักรกลจะขยายตัวอย่างรวดเร็วหรือเกิดการ แตกหักแบบเปราะ (brittle fracture) เมื่อตัวประกอบความเข้มของ ความเค้น (stress intensity factor, K_l) บนชิ้นส่วนนั้น ซึ่งเป็นตัวแปรที่ อยู่ในความสัมพันธ์ระหว่างขนาดรอยร้าว รูปร่าง และภาระที่กระทำ มี ขนาดเท่ากับหรือมากกว่า K_{lo} ค่าวิกฤติของตัวประกอบความเข้มของ ความเค้นของชิ้นทดสอบแบบ SENB ภายใต้สภาวะความเครียดแบบ ระนาบ (plane strain) [9] สามารถคำนวณได้จาก

$$K_{IQ} = \frac{F_Q}{h\sqrt{w}} \cdot f(a/w)$$

$$f(a/w) = 6\alpha^{1/2} \cdot \frac{\left[1.99 - \alpha(1-\alpha)(2.15 - 3.93\alpha + 2.7\alpha^2)\right]}{(1+2\alpha)(1-\alpha)^{3/2}}$$
(2)

โดยที่ F_o คือ แรงสูงสุดขณะที่รอยร้าวเริ่มขยายตัว (kN), h คือ ความ หนาของชิ้นทดสอบ (cm), w คือ ความกว้างของชิ้นทดสอบ (cm), a คือ ความยาวของรอยร้าว (cm), และ α คือ อัตราส่วนระหว่างความ ยาวรอยร้าวและความกว้างชิ้นทดสอบ (a/w)

สภาพความเค้นแบบระนาบ (plane stress) เป็นสภาพที่วัสดุมี ้ความเค้นในระนาบ (2 มิติ) เท่านั้น ซึ่งมักจะเกิดในกรณีที่วัสดุสามารถ เปลี่ยนแปลงขนาดหรือความเครียด (strain) ได้อย่างอิสระใน แนวตั้งฉากกับระนาบ จึงส่งผลสภาพความเครียดแบบ 3 มิติขึ้น โดย เกิดในชิ้นส่วนทางวิศวกรรมที่มีลักษณะบาง ในขณะที่สภาพ ้ความเครียดแบบระนาบ (plane strain) เป็นสภาพที่วัสดุมีความเครียด ในระนาบ (2 มิติ) เท่านั้น ซึ่งมักจะเกิดในกรณีที่วัสดุไม่สามารถ เปลี่ยนแปลงขนาดหรือความเครียด (strain) ได้อย่างอิสระใน แนวตั้งฉากกับระนาบ จึงส่งผลสภาพความเค้นแบบ 3 มิติขึ้น โดยมัก เกิดในชิ้นส่วนทางวิศวกรรมที่มีลักษณะหนา เมื่อพิจารณาค่า K_{io} ของ ้ วัสดุต่างๆ พบว่าค่า K_{io} จะมีค่าต่ำหรือเกิดการแตกหักแบบเปราะได้ ้ง่าย ในกรณีสภาพเครียดแบบระนาบหรือชิ้นส่วนทางวิศวกรรมที่มี ้ลักษณะหนา เนื่องจากในสภาพเครียดแบบระนาบ จะส่งผลให้เกิด สภาพความเค้นแบบ 3 มิติที่ส่วนปลายของรอยร้าว ซึ่งเป็นสภาพที่ รุนแรง (ค่า K₁₀ ต่ำ) กว่าสภาพความเค้น 2 มิติ ในกรณีความเค้นแบบ ระนาบ ดังนั้นค่า K₁₀ ของวัสดุในกรณีความเครียดแบบระนาบจึงถูกใช้ ในการออกแบบ และวิเคราะห์ความต้านทานการแตกหักของชิ้นส่วน

โดยทั่วไปวัสดุจะไม่สามารถทนต่อภาระที่เป็นอนันต์ (stress singularity) ที่ปลายรอยร้าวได้ จึงทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงขนาดแบบ ถาวร (plastic deformation) ที่ส่วนปลายของรอยร้าว (crack tip) ใน การทดสอบหาค่าวิกฤติของตัวประกอบความเข้มของความเค้น (critical stress intensity factor, *K_{io}*) จึงจำเป็นจะต้องควบคุมขนาดของ plastic deformation zone เพื่อให้วัสดุแสดงพฤติกรรมแบบอิลาสติกเซิงเส้น และอยู่ในสภาพความเครียดแบบระนาบ ซึ่งสภาพดังกล่าวจะเกิดขึ้น เมื่อ [9]

$$h, a, (w-a) > 2.5 (K_{IQ} / \sigma_y)^2$$
 (3)

โดย *σ*_y คือความเค้นคราก (yield stress) ซึ่งจาก ISO 527-1 :Plastic-Determination of tensile properties (part1:general principles) [8] ได้นิยามของจุดคราก (yield stress) ของพลาสติก เป็นความเค้น (stress) แรกที่ค่าความเครียด (strain) เพิ่มขึ้นโดยที่ค่าความเค้น (stress) คงที่หรือลดลง

4. ผลและการวิเคราะห์

4.1 คุณสมบัติการดึง (tensile property)

ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นคราก (yield stress) และอัตรา ภาระ (loading rate) แสดงได้ดังรูปที่ 3 ซึ่งพบว่าความเค้นครากมีค่าที่ เพิ่มขึ้นแบบเชิงเส้นตามอัตราภาระ พฤติกรรมเช่นนี้สามารถอธิบายได้

(1)

จากลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคของอีพ็อกซี่เรซิ่น ซึ่งประกอบด้วย สายโซ่โมเลกุลซึ่งเชื่อมต่อกันด้วยพันธะโควาเลนซ์ การเปลี่ยนแปลง ขนาดแบบพลาสติก (plastic deformation) จะเกิดขึ้นเมื่อพันธะเหล่านี้ ถูกทำลาย ที่อัตราภาระด่ำมีเวลามากพอที่จะทำให้สายโซ่โมเลกุลเกิด การไถลและทำลายพันธะภายใน แรงที่ใช้จึงมีขนาดด่ำ ส่งผลให้ค่า ความเค้นครากด่ำ ในขณะที่อัตราภาระสูง มีเวลาให้สายโซ่โมเลกุลไถล น้อย จำเป็นต้องใช้แรงขนาดสูงในการทำลายพันธะ ค่าความเค้น ครากที่ได้จึงมีขนาดสูง



รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นคราก (yield stress) และ อัตราภาระ (loading rate)

4.2 ความต้านทานการแตกหัก (fracture toughness)

4.2.1 ค่าวิกฤติของตัวประกอบความเข้มของความเค้น

จากค่าของแรงสูงสุดที่ทำให้เกิดการแตกหักที่ได้จากการทดสอบที่ อัตราภาระ และความหนาต่าง ๆ พบว่าที่อัตราภาระด่ำค่าของแรงสูงสุด จะมีค่าสูง ในขณะที่อัตราภาระสูงแรงสูงสุดจะมีค่าต่ำ ซึ่งพฤติกรรมนี้ เกิดที่ทุก ๆ ความหนาของชิ้นทดสอบ ค่าความเค้นที่บริเวณส่วนปลาย ของรอยร้าว (crack tip) จะมีค่าสูงขึ้นเมื่อรัศมีของปลายรอยร้าว (crack tip radius) ลดลง และมีค่าอนันต์เมื่อรัศมีของปลายรอยร้าว (crack tip radius) ลดลง และมีค่าอนันต์เมื่อรัศมีของปลายรอยร้าว (crack tip radius) ลดลง และมีค่าอนันต์เมื่อรัศมีของปลายรอยร้าว (crack tip radius) ลดลง และมีค่าอนันต์เมื่อรัศมีของปลายรอยร้าวเป็นศูนย์ อย่างไรก็ตามสภาพเช่นนี้ไม่สามารถเกิดขึ้นกับวัสดุจริง โดยเฉพาะ อย่างยิ่งในวัสดุเหนียว เช่น โพลิเมอร์ เนื่องจากการเกิดการ เปลี่ยนแปลงขนาดแบบพลาสติกที่บริเวณปลายรอยร้าว ส่งผลให้รัศมี ของปลายรอยร้าวเพิ่มขึ้น ความเค้นที่ปลายรอยร้าวลดลง และความ ด้านการขยายตัวของรอยร้าวสูงขึ้น ซึ่งส่งผลให้แรงที่ทำให้รอยร้าว เกิดการขยายตัวสูงขึ้นด้วย ดังนั้นชิ้นทดสอบที่หนาจะมีขนาดของแรง สูงสุดที่ทำให้เกิดการแตกหักสูงกว่าชิ้นทดสอบบาง

ความสัมพันธ์ระหว่างค่าวิกฤติของตัวประกอบความเข้มของความ เค้น (K_ρ) และอัตราภาระ ที่ความหนาต่าง ๆ แสดงดังรูปที่ 4 โดยความ แปรปรวนของค่า K_ρ เนื่องจาก crosslink density [10] สามารถแสดง ได้ด้วยขอบเขตการกระจายสูงสุดและต่ำสุด ผลการศึกษาพบว่า K_ρ ของชิ้นทดสอบภายใต้อัตราภาระด่ำ/ชิ้นทดสอบบาง จะมีค่าสูงกว่าชิ้น ทดสอบภายใต้อัตราภาระสูง/ชิ้นทดสอบหนา ซึ่งทุก ๆ ความหนา จะมีค่า K_ρ สูงที่อัตราภาระด่ำ มีค่าลดลงเมื่ออัตราภาระเพิ่มขึ้น โดยมีแนวโน้ม ที่จะคงที่เมื่ออัตราภาระสูง โดยชิ้นทดสอบที่มีความหนา 7 และ 10 มม. จะมีค่า K_ρ คงที่เมื่ออัตราภาระสูงกว่า 10 มม./นาที ในขณะที่ชิ้น ทดสอบหนา 4 มม. ค่า K_{/o} ลดลงอย่างต่อเนื่องเมื่อเพิ่มอัตราภาระตั้งแต่ 10⁻¹ ถึง 10³ มม./นาที โดยซิ้นทดสอบทุกความหนาจะมีค่า K_{/o} ต่ำที่สุด ประมาณ 1-1.3 MPa.m^{1/2}



รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าวิกฤติของดัวประกอบความเข้มของ ความเค้น (*K_{io}*) และอัตราภาระที่ความหนาต่างๆ



รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างขีดจำกัดของขนาดสำหรับสภาพ ความเครียดระนาบ (2.5 $(K_{IQ}/\sigma_y)^2$) และอัตราภาระของชิ้นทดสอบที่ ความหนาต่างๆ: (a) 4 มม., (b) 7 มม., และ (c) 10 มม.

ME NETT 20th หน้าที่ 116 AMM029



รูปที่ 6 พื้นผิวความเสียหายของของชิ้นทดสอบที่ความหนาและอัตราภาระต่าง ๆ: (a) 4 มม. และ 0.1 มม./นาที, (b) 4 มม. และ 10³ มม./นาที, (c) 10 มม. และ 0.1 มม./นาที, (b) 10 มม. และ 10³ มม./นาที

้จากการที่ค่า K_{lo} ของวัสดุในกรณีความเครียดแบบระนาบถูกใช้ใน การออกแบบ และวิเคราะห์ความต้านทานการแตกหักของชิ้นส่วน ดังนั้นขีดจำกัดของขนาดสำหรับสภาพความเครียดระนาบที่อัตราภาระ และความหนาต่างๆ จึงถูกคำนวณตามสมการที่ (3) และเปรียบเทียบ ้กับค่าต่ำสุดของฟังก์ชันรูปร่าง (*h,a,w-a*) แสดงดังรูปที่ 5 พบว่าชิ้น ทดสอบขนาด 4 มม. (ชิ้นทดสอบบาง) แสดงสภาพความเค้นแบบ ระนาบและความเครียดแบบระนาบ (รูปที่ 5a) โดยสภาพความเค้นแบบ ระนาบจะเกิดขึ้นในอัตราภาระต่ำประมาณ 0.1 มม./นาที ซึ่งสภาพ เช่นนี้จะไม่เกิดขึ้นที่ความหนา 7 และ10 มม. (ชิ้นทดสอบหนา) ซึ่ง แสดงสภาพความเครียดแบบระนาบในทุกอัตราภาระ (10⁻¹ ถึง 10³ มม./นาที) โดยทั่วไป K_{lo} ที่มีขนาดด่ำสุด จะถูกใช้ในการออกแบบเพื่อ ประโยชน์ทางด้านความปลอดภัย แต่เมื่อพิจารณาค่า K_{io} ภายใต้สภาพ ความเครียดแบบระนาบ (1 ถึง 10³ มม./นาที ในกรณีชิ้นทดสอบหนา 4 มม. และ 10⁻¹ ถึง 10³ มม./นาที ในกรณีชิ้นทดสอบหนา 7 และ 10 ี มม.) พบว่า K_{lo} มีขนาดลดลงตามอัตราภาระที่เพิ่มขึ้น (รูปที่ 4) ดังนั้น การตัดสินใจเลือก K_{io} เพื่อการออกแบบโดยพิจารณาจากขีดจำกัดของ ้ขนาดสำหรับสภาพความเครียดระนาบ (สมการที่ 3) อาจไม่เพียงพอ การพิจารณาเลือก K_{IO} ที่มีขนาดต่ำที่สุดโดยคำนึงถึงผลกระทบของ

อัตราภาระและความหนา ภายใต้สภาพความเครียดแบบระนาบ จึง น่าจะเป็นแนวทางที่เหมาะสมกว่าในการออกแบบ

4.2.2 พื้นผิวการแตกหัก

ลักษณะพื้นผิวการแตกหักแสดงได้ดังรูป 6a-d ขอบการเฉือน (shear lip) ปรากฏที่ด้านข้างของชิ้นทดสอบภายใต้อัตราภาระต่ำ/ชิ้น ทดสอบบาง (รูป 6a) ในขณะที่ไม่ปรากฏหลักฐานของขอบการเฉือนใน ชิ้นทดสอบภายใต้อัตราภาระสูง/ชิ้นทดสอบหนา (รูป 6b-c) ซึ่งขอบ การเฉือนเกิดจากการเปลี่ยนแปลงขนาดแบบพลาสติกขณะเกิดการ แตกหัก โดยจะเกิดในแนว 45° เทียบกับภาระที่มากระทำ ส่งผลให้เกิด การยุบตัวในแนวด้านข้าง (lateral contraction) และแสดงสภาพความ เค้นแบบระนาบ (plane stress) ดังนั้นการเกิดขอบการเฉือนในชิ้น ทดสอบ ภายใต้อัตราภาระด่ำแสดงให้เห็นว่า กลไกการแตกหักได้รับ ผลกระทบหลักจากสภาพความเค้นแบบระนาบ ซึ่งสอดคล้องกับผลการ คำนวณขีดจำกัดของขนาดสำหรับสภาพความเครียดแบบระนาบ (รูปที่ 5a) ในขณะที่กลไกการแตกหักภายใต้อัตราภาระสูง ได้รับผลกระทบ จากความเครียดแบบระนาบ (plane strain) คือไม่เกิดการยุบตัวในแนว ด้านข้าง ซึ่งสอดคลองกับการที่ค่า K_{เo} ที่มีขนาดลดลงเมื่ออัตราภาระสูง/ ชิ้นทดสอบหนา (รูปที่ 4)

ME NETT 20th หน้าที่ 117 AMM029

Thickness (mm)	Loading rate (mm/min)	¹ Stress-strain condition	² Fracture surface appearance	Average <i>K_{IQ}</i> (MPa.m ^{1/2})
4	10 ⁻¹	plane stress	ductile fracture	2.44
4	10 ⁰	plane strain	ductile / brittle fracture	2.03
4	10 ¹	plane strain	ductile / brittle fracture	1.70
4	10 ²	plane strain	³ brittle fracture	1.52
4	10 ³	plane strain	³ brittle fracture	1.19
7	10 ⁻¹	plane strain	ductile / brittle fracture	2.01
7	10 ⁰	plane strain	³ brittle fracture	1.71
7	10 ¹	plane strain	³ brittle fracture	1.09
7	10 ²	plane strain	brittle fracture	1.07
7	10 ³	plane strain	brittle fracture	1.09
10	10 ⁻¹	plane strain	ductile / brittle fracture	2.10
10	10 ⁰	plane strain	³ brittle fracture	1.63
10	10 ¹	plane strain	³ brittle fracture	1.28
10	10 ²	plane strain	brittle fracture	0.99
10	10 ³	plane strain	brittle fracture	1.10

ิตารางที่ 1 ลักษณะพื้นผิวการแตกหัก สภาพความเค้นระนาบ/ความเครียดระนาบ และค่าเฉลี่ยของ K_{io} ของชิ้นทดสอบ

1- Condition shown in Eq. 3 and Fig. 5

 $2-\mbox{Observation}$ from fracture surface as shown in Fig. 6

3 - Area of ductile fracture was less than 5% of total fracture area

บนพื้นผิวแตกหักของชิ้นทดสอบหนา 4 มม. ภายใต้อัตราภาระ 10⁻¹ ม.ม./นาที (รูปที่ 6a) จะปรากฏบริเวณยึดตัว (stretched zone) อย่างชัดเจน ในขณะที่พื้นผิวการแตกหักเมื่อทดสอบภายใต้อัตราภาระ 10³ ม.ม./นาที (รูปที่ 6b) มีลักษณะเป็นผิวเรียบ โดยพื้นที่ของบริเวณ ยึดตัวลดลงเมื่ออัตราภาระเพิ่มขึ้นและความหนาของชิ้นทดสอบที่ เพิ่มขึ้น การเกิดของขอบการเฉือน (shear lip) บริเวณยึดตัว (stretched zone) เป็นหลักฐานแสดงกลไกการเปลี่ยนแปลงขนาดแบบ พลาสติก การสังเกตพบหลักฐานเหล่านี้บนพื้นผิวการแตกหักของชิ้น ทดสอบบาง/อัตราภาระต่ำ บ่งชี้ถึงกลไกการแตกหักที่ขึ้นกับเวลาซึ่งเกิด พร้อมกับการเปลี่ยนแปลงขนาดแบบพลาสติก (ductile fracture) ส่งผล ให้เกิดในสภาพความเด้นแบบระนาบ และมีค่า K_{io} สูง ในขณะที่พื้นผิว การแตกหักของชิ้นทดสอบหนา/อัตราภาระสูง แสดงให้เห็นถึงการ แตกหักที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างแบบพลาสติก บ่งชี้ถึงกลไกการ แตกหักแบบไม่ขึ้นกับเวลา ไม่มีการเปลี่ยนแปลงขนาดแบบพลาสดิก
(brittle fracture) และเกิดสภาพความเครียดแบบระนาบ ส่งผลให้ค่า K_{lo}
ต่ำ โดยระหว่างการเปลี่ยนแปลงจากสภาพความเค้นระนาบ (ชิ้น
ทดสอบบาง/อัตราภาระต่ำ) ไปเป็นสภาพความเครียดระนาบ (ชิ้น
ทดสอบหนา/อัตราภาระสูง) พื้นผิวของการแตกหักจะแสดงลักษณะ
ผสมระหว่างการแตกหักแบบเหนียว (ductile fracture) และการแตกหัก
แบบเปราะ (brittle fracture) ซึ่งจะส่งผลให้ค่า K_{lo} มีขนาดสูงกว่า K_{lo}
ในกรณีที่ความเครียดแบบระนาบเป็นลักษณะเด่น (อัตราภาระสูงกว่า
10 มม./นาที และความหนามากกว่า 7 มม.) โดยพื้นผิวการแตกหักจะ
แสดงลักษณะการแตกหักแบบเปราะ สรุปลักษณะพื้นผิวการแตกหัก
ของชิ้นทดสอบ สภาพความเค้นระนาบ/ความเครียดระนาบ และ
ค่าเฉลี่ยของ K_{lo} ถูกแสดงดังตารางที่ 1

5. สรุป

ผลกระทบของสภาพความเค้นระนาบ (plane stress) และ ความเครียดระนาบ (plane strain) ที่มีต่อพฤติกรรมและกลไกการ แตกหักของเทอร์โมเซทอีพ็อกซี่เรซิ่น (thermoset epoxy resin) ที่ใช้ โพลีเอมีน (polyamine) เป็นสารที่ทำให้แข็งตัวได้ถูกศึกษาด้วยวิธีดัด สามจุด (3-point bending) ภายใต้อัตราภาระต่าง ๆ (10⁻¹ ถึง 10³ มม./นาที) และความหนาชิ้นทดสอบ ขนาดต่าง ๆ (4 ถึง 10 มม.) จากผลการศึกษาสามารถสรุปได้ดังนี้

 ความเค้นครากของเทอร์โมเซทอีพ็อกซี่เรชิ่นเป็นคุณสมบัติ เชิงกลที่ขึ้นกับเวลา โดยมีขนาดเพิ่มขึ้นแบบเชิงเส้นตามอัตราภาระ เนื่องจากที่อัตราภาระต่ำมีเวลามากพอที่จะทำให้สายโซ่โมเลกุลเกิดการ ไถลและทำลายพันธะภายใน แรงที่ใช้จึงมีขนาดด่ำ ส่งผลให้ค่าความ เค้นครากต่ำ ในขณะที่อัตราภาระสูง มีเวลาให้สายโซ่โมเลกุลไถลน้อย จำเป็นต้องใช้แรงขนาดสูงในการทำลายพันธะ ค่าความเค้นครากที่ได้ จึงมีขนาดสูง

 2) ค่าวิกฤติของตัวประกอบความเข้มของความเค้น (K_{IQ}) ของชิ้น ทดสอบลดลงเมื่ออัตราภาระและความหนาเพิ่มขึ้น โดยมีขนาดต่ำและ คงที่ เมื่ออัตราภาระสูงกว่า 10 มม./นาที ในชิ้นทดสอบที่มีความหนา 7 และ 10 มม. ในขณะที่ K_{IQ} ของชิ้นทดสอบที่มีความหนา 4 มม. ลดลงอย่างต่อเนื่องเมื่อเพิ่มอัตราภาระตั้งแต่ 10⁻¹ ถึง 10³ มม./นาที โดยชิ้นทดสอบทุกความหนามีค่า K_{IQ} ต่ำที่สุดอยู่ในช่วง 1-1.3 MPa.m^{1/2}

3) พื้นผิวการแตกหักของชิ้นทดสอบที่อัตราภาระด่ำ/ชิ้นทดสอบ บาง แสดงขอบการเฉือน (shear lip) และบริเวณยึดตัว (stretched zone) ซึ่งเป็นลักษณะของกลไกการแตกหักที่ขึ้นกับเวลาที่มีการ เปลี่ยนแปลงขนาดแบบพลาสติก (ductile fracture) และสภาพความ เค้นแบบระนาบ ส่งผลให้ K_{I0} สูง ในขณะที่พื้นผิวการแตกหักของชิ้น ทดสอบภายใต้อัตราภาระสูง/ชิ้นทดสอบหนา แสดงถึงกลไกการแตกหัก ที่ไม่ขึ้นกับเวลา ไม่มีการเปลี่ยนแปลงขนาดแบบพลาสติก (brittle fracture) เกิดในสภาพความเครียดแบบระนาบ และมีค่า K_{I0} ด่ำ

6. กิตติกรรมประกาศ

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

เอกสารอ้างอิง

- Margolis, J.M., Advanced Thermoset Composites Industrial and Commercial Applications. 1985, New York: Van Nostrand Reinhold.
- [2] Dowling, N.E., Mechanical behavior of materiasl: engineering methods for deformation, fracture, and fatigue. 1993, New Jersey: Prentice-Hall International.
- [3] Geary, W., J. Dutton, and D.M. Shuter, The influence of size effects and dynamic loading on the fracture toughness of

commercial GRP materials. Composites Science and Technology, 2000. 60(4): p. 633-638.

- [4] Bastida, S., et al., On the Thickness Dependence of the Modulus of Elasticity of Polymers. Polymer Testing, 1998. 17(2): p. 139-145.
- [5] Low, I.M. and Y.W. Mai, Rate and temperature effects on crack blunting mechanisms in pure and modified epoxies. Journal of Materials Science, 1989. 24(5): p. 1634-1644.
- [6] Gensler, R., et al., Influence of the loading rate on the fracture resistance of isotactic polypropylene and impact modified isotactic polypropylene. Polymer, 2000. 41: p. 3809–3819.
- [7] D'Almeida, J.R.M. and S.N. Monteiro, Analysis of the fracture surface morphology of an epoxy system as a function of the resin/hardener ratio. Journal of Materials Science Letters, 1996. 15(1): p. 955-958.
- [8] ISO 527-1: Plastics Determination of tensile properties, Part 1: General principles. 1993.
- [9] ISO 13586: Plastics Determination of fracture toughness (GIC and KIC) - Linear elastic fracture mechanics (LEFM) approach. 2000.
- [10] Morgan, R.J. and J.E. O'Neal, The microscopic failure processes and their relation to the structure of amine-cured bisphenol-A-diglycidyl ether epoxies. Journal of Materials Science, 1977. 12: p. 1966-1980.