

# ผลกระทบของความหนาและอัตราการระต่อความต้านทานการแตกหักภายใต้ภาระรูปแบบที่ 1 ของอีพอกซีเรซิน

อรรถสิทธิ์ เวียงคำ<sup>1</sup> และ ประเสริฐ เอ่งฉ้วน<sup>1\*</sup>

## บทคัดย่อ

ปัจจุบันวัสดุกลุ่มพอลิเมอร์ได้เริ่มเข้ามามีบทบาทในชีวิตของมนุษย์มากขึ้น โดยอีพอกซีเรซินเองก็เป็นหนึ่งในวัสดุกลุ่มพอลิเมอร์ที่นิยมใช้งานกันอย่างแพร่หลายเนื่องจากคุณสมบัติทางกลที่ค่อนข้างสูงและสามารถขึ้นรูปได้ง่ายเนื่องจากมีสถานะเป็นของเหลวก่อนการขึ้นรูป การที่อีพอกซีเรซินง่ายต่อการขึ้นรูปนี้ทำให้อีพอกซีเรซินถูกนำไปใช้งานในอุตสาหกรรมหลายภาคส่วน ลักษณะการใช้งานที่หลากหลายส่งผลให้ลักษณะการรับภาระหรือขนาดของชิ้นส่วนที่ทำจากอีพอกซีเรซินแตกต่างกันไปด้วย ในการใช้งานชิ้นส่วนที่ทำจากอีพอกซีเรซินหรือมีอีพอกซีเรซินเป็นส่วนประกอบจะพบว่าหลายครั้งชิ้นส่วนเกิดการเสียหายภายใต้ภาระที่ต่ำกว่าที่ออกแบบไว้ เนื่องจากการออกแบบชิ้นส่วนที่ซับซ้อนเหล่านั้นไม่ได้คำนึงถึงการเกิดรอยร้าวบนชิ้นส่วนนั่นเอง กรณีที่ชิ้นส่วนมีความซับซ้อนปัจจัยที่สำคัญที่ต้องคำนึงถึงคือความต้านทานการแตกหักของวัสดุที่ใช้ทำชิ้นส่วน ดังนั้นในงานวิจัยชิ้นนี้จึงมุ่งศึกษาถึงความต้านทานการแตกหักของอีพอกซีเรซินภายใต้ภาระรูปแบบที่ 1 ซึ่งจำลองลักษณะการใช้งานที่หลากหลายด้วยการเปลี่ยนแปลงช่วงของตัวแปรอัตราการระและความหนาของชิ้นทดสอบ สำหรับการคำนวณความต้านทานการแตกหักนั้นจะใช้การคำนวณด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ จากการทดสอบจะพบว่าอัตราการระและความหนาของชิ้นทดสอบต่างส่งผลกระทบต่อความต้านทานการแตกหักและพฤติกรรมการแตกหักของอีพอกซีเรซิน

**คำสำคัญ :** อีพอกซีเรซิน, การแตกหักภายใต้ภาระรูปแบบที่ 1, ความหนา, อัตราการระ

<sup>1</sup> สาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

\* ผู้ติดต่อ, อีเมล: prasert.a@sut.ac.th, รับเมื่อ 20 มิถุนายน 2562 ตอบรับ 10 กันยายน 2562

# Effect of Thickness and Loading Rate on Mode I Fracture Toughness of Epoxy Resin

Attasit Wiangkham<sup>1</sup> and Prasert Aengchuan<sup>1\*</sup>

## Abstract

Nowadays, polymer materials have begun to play a greater role in human life. Epoxy resin is one of the most widely used polymer materials because of its relatively high mechanical properties and can be easily molded due to its presence in the liquid state before forming. Epoxy resin has various used in many sections of industries due to its easily forming and making. A wide variety of applications result in different load characteristics or dimension of parts made from epoxy resin. In the use of parts made from epoxy resin or containing epoxy resin, it is found that the parts are mostly damaged under the lower load designed. Due to the design of those complex parts, it does not take into account the crack occur on the part. If the parts are complex, the important factor to consider is the fracture toughness of the material used to make the parts. Therefore, this research aims to study the fracture toughness of epoxy resin under mode I loading, which simulates a variety of applications by changing the range of variables, loading rates, and thickness of the specimen. For calculating the fracture toughness of epoxy resin, it is calculated using the finite element method. From the result, it was found that the loading rate and thickness of the specimen clearly affected the fracture toughness and fracture behavior of the epoxy resin under mode I loading.

**Keywords :** Epoxy resin, Mode I fracture, Thickness, Loading rate

---

<sup>1</sup> School of Manufacturing Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University

\* Corresponding author, E-mail: prasert.a@sut.ac.th, Received:20 July 2019, Accepted:10 September 2019

## 1. บทนำ

ในปัจจุบันนั้นวัสดุกลุ่มพอลิเมอร์ได้เข้ามามีบทบาทกับชีวิตของมนุษย์มากขึ้น ไม่ว่าจะเป็นทั้งในด้านการใช้ชีวิตประจำวัน ด้านอุตสาหกรรม ด้านการแพทย์ ด้านวิศวกรรม ด้านการเกษตรหรือแม้กระทั่งในด้านของอาหารเองก็ตาม การที่วัสดุกลุ่มพอลิเมอร์เข้ามามีบทบาทกับชีวิตของมากขึ้นนั้นเนื่องจากคุณสมบัติที่ขึ้นรูปง่าย มีน้ำหนักเบา ทนทานต่อการเสียดสีหรือการกัดกร่อน อีกทั้งพอลิเมอร์บางชนิดยังสามารถใช้ทดแทนชิ้นส่วนของร่างกายมนุษย์ได้ จากคุณสมบัติที่กล่าวมาข้างต้นทำให้หลายๆ ครั้งวัสดุกลุ่มพอลิเมอร์ถูกใช้เป็นวัสดุโครงสร้างหรือเครื่องมือต่างๆ ซึ่งอีพอกซีเรซินเองก็เป็นหนึ่งในนั้น

อีพอกซีเรซินเป็นวัสดุพอลิเมอร์ที่อยู่ในกลุ่มเทอร์โมเซต มีลักษณะก่อนการแปรรูปเป็นของเหลวที่จะไม่เกิดการแข็งตัวหรือแข็งตัวได้ช้ามากหากไม่เติมสารช่วยแข็ง (Hardener) เพื่อทำปฏิกิริยาให้อีพอกซีเรซินเกิดการแข็งตัวอีกทั้งอีพอกซีเรซินยังมีคุณสมบัติทางกลและทางไฟฟ้าค่อนข้างดี ทำให้อีพอกซีเรซินเป็นหนึ่งในพอลิเมอร์ที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายไม่ว่าจะใช้ในงานโครงสร้าง ใช้เป็นสารช่วยยึดติดหรือใช้เป็นสารเคลือบผิว โดยจากลักษณะการใช้ที่หลากหลายทำให้อีพอกซีเรซินต้องถูกใช้งานในความหนา อัตราภาระ (Loading rate) ที่หลากหลายตามไปด้วยและจากขั้นตอนการใช้งานหรือการขึ้นรูปนั้นมีโอกาสที่รอยร้าวหรือความไม่ต่อเนื่องในเนื้อวัสดุจะเกิดขึ้นได้

สำหรับรอยร้าวหรือความไม่ต่อเนื่องที่เกิดขึ้นในเนื้อวัสดุนั้นจะส่งผลให้ความสามารถในการรับภาระของวัสดุลดลงหรือไม่ได้ตามที่ออกแบบไว้ ดังนั้นในกรณีที่ชิ้นงานอาจมีรอยร้าวหรือความไม่ต่อเนื่องเกิดขึ้นในเนื้อ

วัสดุ ปัจจัยสำคัญที่ต้องคำนึงถึงคือความต้านทานการแตกหักของวัสดุ เพื่อใช้ในการพิจารณาว่าวัสดุจะเกิดความเสียหายที่ภาระนั้นๆหรือไม่เมื่อมีรอยร้าวหรือความไม่ต่อเนื่องในเนื้อวัสดุ สำหรับความต้านทานการแตกหักในวัสดุนั้นจะขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย อาทิเช่น ลักษณะของภาระที่กระทำกับวัสดุ [1] ความหนาของวัสดุ [2] อุณหภูมิ [3] อัตราภาระ หรือขนาดของรอยร้าว เป็นต้น โดยอีพอกซีเรซินนั้นเป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติแบบวิสโคอีลาสติก (Viscoelastic) กล่าวคือมีสมบัติทางกลที่ขึ้นอยู่กับเวลา [4, 5] ความต้านทานการแตกหักจากงานวิจัยก่อนหน้าของ Beguekin และ Kausch [6] ที่ทำการศึกษาผลกระทบของอัตราภาระต่อความต้านทานการแตกหักของ PVC แบบแข็งจะพบว่าพฤติกรรมการแตกหักของ PVC แบบแข็งจะขึ้นอยู่กับเวลาอย่างชัดเจน โดยเมื่อทำการทดสอบที่อัตราภาระต่ำวัสดุจะเกิดการเสียรูปที่บริเวณปลายรอยร้าวสูงซึ่งจะส่งผลทำให้มีความต้านทานการแตกหักที่สูงตามไปด้วย ในขณะที่ Kanchanomai และ Rattananon [7] ศึกษาผลกระทบของอัตราภาระต่อความต้านทานการแตกหักของอีพอกซีเรซินจะพบว่าที่อัตราภาระทดสอบสูงลักษณะการแตกหักของอีพอกซีเรซินจะเป็นแบบเปราะและจะเริ่มเปลี่ยนเป็นการแตกหักแบบเหนียวเมื่ออัตราภาระที่ใช้ในการทดสอบลดลง

J. Jamali, Y. Fan, J.T. Wood [8] ได้ทำการศึกษาพฤติกรรมการแตกหักอีพอกซีเรซินภายใต้การรับภาระแบบผสม 1 และ 2 ด้วยวิธีการทดสอบแบบให้แรงดึงอย่างง่าย งานวิจัยส่วนหนึ่งได้ทำการทดสอบความต้านทานการแตกหักภายใต้การรับภาระรูปแบบที่ 1 ด้วยชิ้นทดสอบแบบ Compact Tension Shear ที่ความหนา 2 ถึง 7.5 มิลลิเมตรและชิ้นทดสอบแบบ Single Edge

notch bending ที่ความหนา 12 ถึง 13.5 มิลลิเมตร โดยจากการศึกษาพบว่าเมื่อความหนาของชิ้นทดสอบมีค่ามากขึ้นค่าความต้านทานการแตกหักและอัตราการปลดปล่อยพลังงานความเครียดของชิ้นทดสอบมีแนวโน้มที่จะลดลงจนคงที่ในที่สุดและเริ่มเข้าสู่เงื่อนไขของสถานะความเครียดระนาบ (Plane Strain) ที่ความหนาประมาณ 7.5 มิลลิเมตร

สำหรับงานวิจัยชิ้นนี้จะมุ่งศึกษาผลกระทบของความหนาและอัตราภาระที่ใช้ในการทดสอบต่อความต้านทานการแตกหักภายใต้การรับภาระรูปแบบที่ 1 หรือการรับภาระแบบเป็ดรอยร้าวของอีพอกซีเรซินด้วยการใช้ชิ้นทดสอบแบบมีรอยร้าวข้างเดียวรับแรงดึง (Single Edge Notch Tension, *SENT*) ที่มีความหนาตั้งแต่ 4 ถึง 10 มิลลิเมตรและทดสอบที่อัตราภาระ 0.1 ถึง 1000 มิลลิเมตรต่ออนาที โดยคำนวณพารามิเตอร์ของความต้านทานการแตกหักด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์และทำการศึกษากลไกการเกิดการแตกหักที่พื้นผิวการแตกหักของชิ้นทดสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง

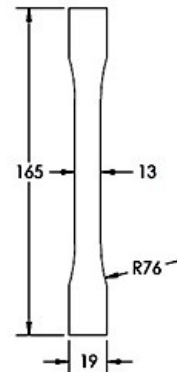
## 2. ขั้นตอนการทดลอง

### 2.1 การเตรียมชิ้นทดสอบและวิธีการทดสอบ

งานวิจัยชิ้นนี้ใช้วัสดุเทอร์โมเซตอีพอกซีเรซินยี่ห้อ EPOTEC รุ่น YD535LV/TH7257 (อีพอกซีเรซิน/สารช่วยแข็ง) จากบริษัท อคติยา เบอรัลล่า เคมีคัลส์ (ประเทศไทย) จำกัด (อีพอกซี ดีวีชัน) ซึ่งเป็นอีพอกซีเรซินชนิด DGEBA (Diglycidylether Bisphenol-A) และสารช่วยแข็งชนิด Aliphatic Amine โดยอีพอกซีเรซินจะถูกเตรียมด้วยการผสมอีพอกซีเรซินเข้ากับสารช่วยแข็งในอัตราส่วนต่อน้ำหนักเป็น 100 ต่อ 35 ตามลำดับ (ตามคำแนะนำของบริษัทผู้ผลิต) ซึ่งขั้นตอนการผสมอีพอกซี

เข้ากับสารช่วยแข็งจะผสมในเครื่องผสมแบบสูญญากาศเพื่อขจัดฟองอากาศที่เกิดขึ้นในระหว่างขั้นตอนการผสม จากนั้นจึงเทใส่แม่พิมพ์ทรงสี่เหลี่ยมกว้าง 100 มิลลิเมตร ยาว 200 มิลลิเมตรและปล่อยให้แข็งตัวที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง เมื่อครบ 24 ชั่วโมงแล้วจะนำอีพอกซีเรซินเข้าอบในตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมงจึงแกะออกจากแม่พิมพ์และตัดเป็นชิ้นทดสอบให้ได้ตามขนาดที่ต้องการ

สำหรับชิ้นทดสอบการรับแรงดึงจะเตรียมการตามมาตรฐาน ASTM D638 [9] ซึ่งเป็นมาตรฐานการเตรียมชิ้นทดสอบการรับแรงดึงสำหรับวัสดุพอลิเมอร์ ขนาดของชิ้นทดสอบการรับแรงดึงจะแสดงดังรูปที่ 1 โดยชิ้นทดสอบจะมีความหนา 6 มิลลิเมตรและความยาวแกน 50 มิลลิเมตร

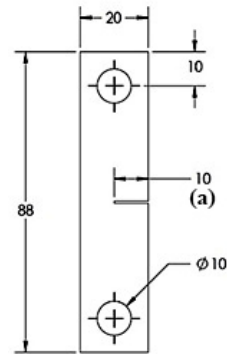


รูปที่ 1 ขนาดของชิ้นทดสอบการรับแรงดึง

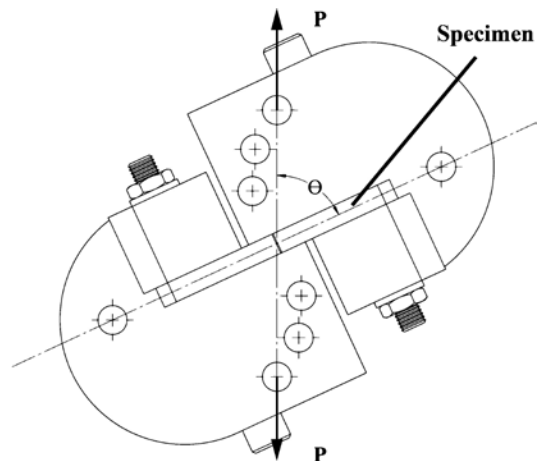
สำหรับชิ้นทดสอบความต้านทานการแตกหักจะเตรียมการตามงานวิจัยของ Ayatollahi M. R. และ Saboori B. [10] โดยจะอ้างอิงทั้งขนาดของชิ้นทดสอบและชุดอุปกรณ์จับยึดสำหรับการทดสอบ (รูปที่ 2

และ 3 ตามลำดับ) สำหรับอุปกรณ์จับยึดสำหรับใช้ในการทดสอบความต้านทานการแตกหักของงานวิจัยข้างต้นนั้นสามารถทำการทดสอบได้ตั้งแต่การรับภาระรูปแบบที่ 1 การรับภาระรูปแบบที่ 3 และการรับภาระรูปแบบผสม 1 และ 3 ด้วยการเปลี่ยนแปลงมุมของการรับภาระ (Loading Angle,  $\theta$ ) บนอุปกรณ์จับยึดสำหรับใช้ในการทดสอบซึ่งในงานวิจัยชิ้นนี้จะทำการทดสอบความต้านทานการแตกหักภายใต้การรับภาระรูปแบบที่ 1 ( $\theta = 0^\circ$ ) เพียงอย่างเดียวเท่านั้น ชิ้นทดสอบความต้านทานการแตกหักสำหรับงานวิจัยชิ้นนี้จะเป็นแบบมีรอยร้าวข้างเดียวรับแรงดึง (Single Edge Notch Tension, *SENT*) โดยมีความหนา 4, 6, 8 และ 10 มิลลิเมตร การทำรอยร้าวเริ่มต้น (Pre-Crack, *a*) ให้กับชิ้นทดสอบความต้านทานการแตกหักจะถูกเตรียมการตามมาตรฐาน ASTM D5045 [11] ขั้นตอนการทำรอยร้าวเริ่มต้นจะถูกแบ่งออกเป็นสองขั้นตอน กล่าวคือในขั้นแรกจะใช้เลื่อยเพื่อทำรอยร้าวเริ่มต้นให้มีความยาวใกล้เคียงกับความยาวที่ต้องการและในขั้นตอนต่อมาจะใช้น้ำมันคัตเตอร์ทำรอยบากต่อจากปลายรอยร้าวเริ่มต้นในขั้นตอนแรกเพื่อให้เกิดรอยร้าวเริ่มต้นที่มีความแหลมคมใกล้เคียงกับทฤษฎีของความต้านทานการแตกหัก

การทดสอบการรับแรงดึงและการทดสอบความต้านทานการแตกหักของอีพอกซีเรซินในงานวิจัยชิ้นนี้จะทำการทดสอบบนเครื่องทดสอบแบบอเนกประสงค์ (Universal Testing Machine, *UTM*) Instron รุ่น 5565 ขนาดภาระ 5 กิโลนิวตันและทำการทดสอบที่อัตราภาระ (Loading Rate) ตั้งแต่ 0.1 ถึง 1000 มิลลิเมตรต่อนาที ทดสอบจนกระทั่งชิ้นทดสอบเกิดความเสียหายหรือแตกหัก (ทุกเงื่อนไขของการทดสอบจะทดสอบซ้ำอย่างน้อย 3 ครั้ง)



รูปที่ 2 ขนาดของชิ้นทดสอบความต้านทานการแตกหัก



รูปที่ 3 อุปกรณ์จับยึดสำหรับใช้ในการทดสอบความต้านทานการแตกหัก

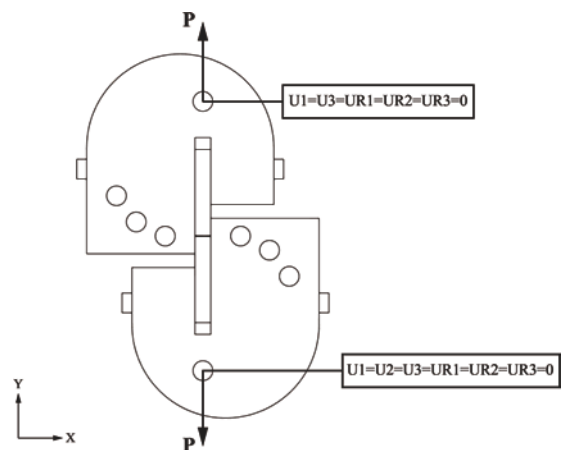
## 2.2 การคำนวณความต้านทานการแตกหัก

สำหรับการคำนวณความต้านทานการแตกหักจะใช้วิธีการคำนวณด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Analysis, *FEA*) ด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ Abaqus 6.13 โมเดลสำหรับการคำนวณด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จะประกอบไปด้วยอุปกรณ์จับยึดสำหรับใช้ในการทดสอบ หมุดร้อยชิ้นทดสอบและชิ้นทดสอบ สำหรับอุปกรณ์จับยึดสำหรับใช้ในการทดสอบจะกำหนด

คุณสมบัติของวัสดุภายใน โมเดลให้เป็นวัสดุแบบแข็งเกร็ง (Rigid Body) เนื่องจากในระหว่างการทดสอบจะเกิดการเสีรูปร่างขึ้นน้อยมากเมื่อเทียบกับการเสีรูปร่างของส่วนประกอบอื่นในโมเดล สำหรับหมุดร้อยชิ้นทดสอบ กำหนดให้ใช้คุณสมบัติของเหล็กกล้าที่มีค่าโมดูลัส 210 จิกะปาสกาลและอัตราส่วนของปัวซอง 0.33 และสำหรับชิ้นทดสอบกำหนดให้ใช้คุณสมบัติของอิพอกซีเรซินจากการทดสอบการรับแรงดึงที่อัตราภาระเดียวกันกับการทดสอบความต้านทานการแตกหัก

ความสัมพันธ์ของส่วนประกอบภายใน โมเดลไฟไนต์เอลิเมนต์จะแบ่งออกเป็นความสัมพันธ์ระหว่างอุปกรณ์จับยึดสำหรับใช้ในการทดสอบกับชิ้นทดสอบ และความสัมพันธ์ระหว่างชิ้นทดสอบกับหมุดร้อยชิ้นทดสอบ บริเวณที่สัมผัสกันภายใน โมเดลจะถูกค้นหาด้วยวิธีการสัมผัสแบบคู่ (Contact Pair) และกำหนดให้ส่วนประกอบทั้งหมดภายใน โมเดล ไม่สามารถเกิดการทะลุหรือจมเข้าหากันได้ (No Penetration) บริเวณที่สัมผัสกันของชิ้นทดสอบและอุปกรณ์จับยึดสำหรับใช้ในการทดสอบจะกำหนดให้มีลักษณะการสัมผัสแบบลื่น (Smoothly) ที่มีคุณสมบัติของการสัมผัสเป็นแบบแข็ง (Hard Contact) และไม่มีแรงเสียดทานในการสัมผัส (Frictionless) โดยในระหว่างการทดสอบหรือรับภาระนั้นอนุญาตให้บริเวณที่สัมผัสกันระหว่างชิ้นทดสอบกับอุปกรณ์จับยึดสำหรับใช้ในการทดสอบสามารถเกิดการเคลื่อนที่หรือเปลี่ยนตำแหน่งได้ตามการเสีรูปร่างของชิ้นทดสอบในการทดสอบจริง ส่วนบริเวณที่สัมผัสกันระหว่างชิ้นทดสอบกับหมุดร้อยชิ้นทดสอบจะกำหนดให้มิลักษณะของการสัมผัสเป็นแบบผูก (Tied) และมีคุณสมบัติของการสัมผัสเป็นแบบแข็งและไม่มีแรงเสียดทานในการสัมผัสเช่นเดียวกัน

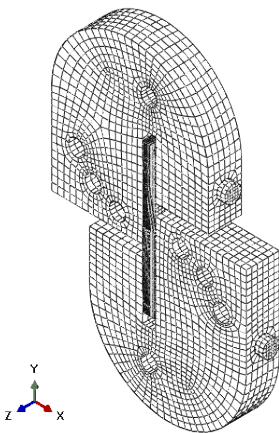
การกำหนดเงื่อนไขหรือลักษณะการเคลื่อนที่ของ โมเดลไฟไนต์เอลิเมนต์จะอ้างอิงจากลักษณะการเคลื่อนที่ตามการทดสอบจริงบนเครื่องทดสอบแบบอเนกประสงค์ซึ่งลักษณะของเคลื่อนที่ของ โมเดลจะแสดงดังรูปที่ 4 ลักษณะการเคลื่อนที่ของ โมเดลจะกำหนดลงบนจุดอ้างอิงที่สร้างขึ้นบริเวณจุดศูนย์กลางของรูบนอุปกรณ์จับยึดสำหรับใช้ในการทดสอบ โดยจุดอ้างอิงจะมีจำนวนสองจุดคือบริเวณอุปกรณ์จับยึดสำหรับใช้ในการทดสอบ ชั้นบนและชั้นล่างโดยจุดอ้างอิงที่ชั้นบนจะกำหนดให้สามารถเคลื่อนที่ได้ในทิศทางตามแนวแกน Y หรือแกน U2 (แกนภายในโปรแกรม) เพียงอย่างเดียวเท่านั้น โดยไม่สามารถหมุนในทิศทางใดได้เลย ส่วนจุดอ้างอิงที่ชั้นล่างกำหนดให้ไม่สามารถเคลื่อนที่หรือเกิดการหมุนในทิศทางใดได้เลย



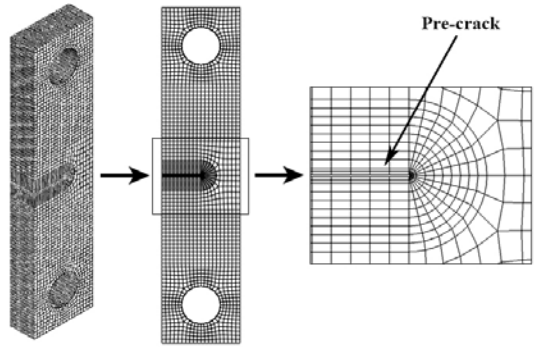
รูปที่ 4 เงื่อนไขการเคลื่อนที่ของโมเดลไฟไนต์เอลิเมนต์

การแบ่งเอลิเมนต์ของ โมเดลไฟไนต์เอลิเมนต์จะแบ่งตามลักษณะของส่วนประกอบภายใน โมเดล ลักษณะของการแบ่งเอลิเมนต์ของ โมเดล โดยรวมจะ

แสดงดังรูปที่ 5 สำหรับอุปกรณ์จับยึดสำหรับใช้ในการทดสอบจะใช้เอลิเมนต์สามมิติแบบแข็งเกร็ง 4 จุดต่อมีจำนวนเอลิเมนต์ทั้งหมดเท่ากับ 3431 เอลิเมนต์ หมุดร้อยขึ้นทดสอบจะใช้เอลิเมนต์สามมิติทรงหกเหลี่ยม 20 จุดต่อมีจำนวนเอลิเมนต์ทั้งหมดเท่ากับ 1696 เอลิเมนต์ ส่วนขึ้นทดสอบความต้านทานการแตกหักจะใช้เอลิเมนต์สองแบบตามรูปที่ 6 คือเอลิเมนต์สามมิติทรงหกเหลี่ยม 20 จุดต่อที่บริเวณส่วนใหญ่ของทดสอบส่วนบริเวณปลายรอยร้าวจะใช้เอลิเมนต์สามมิติแบบลิ้ม 15 จุดต่อเพื่อให้การแบ่งเอลิเมนต์มีความละเอียดมากขึ้น สำหรับปลายรอยร้าวของขึ้นทดสอบภายในโมเดลจะกำหนดให้มีรัศมีขนาด 0.05 มิลลิเมตรตามขนาดของใบมีดคัตเตอร์ซึ่งขึ้นทดสอบจะมีจำนวนเอลิเมนต์ทั้งหมดเท่ากับ 19968 เอลิเมนต์



รูปที่ 5 การแบ่งเอลิเมนต์โดยรวมของโมเดลไฟไนต์เอลิเมนต์



รูปที่ 6 ลักษณะการแบ่งเอลิเมนต์ของขึ้นทดสอบความต้านทานการแตกหัก

เพื่อยืนยันความถูกต้องจากการคำนวณด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ผลจากการคำนวณจะถูกเปรียบเทียบกับ การคำนวณด้วยสมการมาตรฐานของตัวประกอบความเข้มของความเค้น (Stress Intensity Factor,  $K$ ) ซึ่งเป็นพารามิเตอร์ที่แสดงถึงความต้านทานการแตกหักของวัสดุบนทฤษฎีของกลศาสตร์การแตกหักยืดหยุ่นเชิงเส้นที่สามารถคำนวณได้ด้วยสมการดังต่อไปนี้ [11]

$$K_{I0} = \left( \frac{P_Q}{BW^{1/2}} \right) f(x) \quad (1)$$

เมื่อ  $P_Q$  คือ ภาระสูงสุดที่เกิดขึ้นกับขึ้นทดสอบ,  $B$  คือ ความหนาของขึ้นทดสอบ,  $W$  คือ ความกว้างของขึ้นทดสอบและ  $f(x)$  คือ สมการรูปร่างของขึ้นทดสอบซึ่งคำนวณตามสมการดังต่อไปนี้ [12]

$$f(x) = \frac{\sqrt{2 \tan \frac{\pi a}{2W}}}{\cos \frac{\pi a}{2W}} \left[ 0.752 + 0.02 \left( \frac{a}{W} \right) + 0.37 \left( 1 - \sin \frac{\pi a}{2W} \right)^3 \right] \quad (2)$$

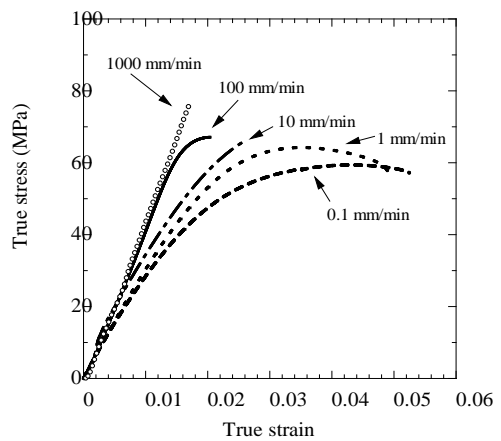
เมื่อ  $a$  คือความยาวรอยร้าวเริ่มต้น

### 3. ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผล

#### 3.1 ผลการทดสอบการรับแรงดึง

กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของอีพอกซีเรซินที่อัตราภาวะต่างๆ จะแสดงดังรูปที่ 7 เส้นกราฟความสัมพันธ์สามารถแบ่งออกเป็นสามช่วงความสัมพันธ์หลักๆ คือ (1) ช่วงความสัมพันธ์ที่เพิ่มขึ้นแบบเชิงเส้น (2) ช่วงความสัมพันธ์ที่เพิ่มขึ้นแบบไม่เป็นเชิงเส้นและ (3) ช่วงความสัมพันธ์ที่ลดลง สำหรับการทดสอบการรับแรงดึงที่อัตราภาวะต่ำนั้นกราฟความสัมพันธ์จะแสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ทั้งสามช่วงโดยเมื่อขึ้นทดสอบการรับแรงดึงรับมีภาวะมากระทำนั้นความสัมพันธ์ของค่าความเค้น (True Stress) และความเครียด (True Strain) จะค่อยๆ เพิ่มขึ้นแบบเชิงเส้น (ช่วงที่ 1) ตามกฎของฮุก (Hook's Law) ซึ่งภายใต้ช่วงความสัมพันธ์นี้ขึ้นทดสอบจะแสดงพฤติกรรมการเสียรูปแบบยืดหยุ่นที่สามารถกลับเข้าสู่สภาวะหรือขนาดเดิมเมื่อยกเลิกการรับภาระและเมื่อภาระกระทำกับขึ้นทดสอบมากขึ้นเรื่อยๆ กราฟความสัมพันธ์จะค่อยๆ เปลี่ยนเข้าสู่ช่วงความสัมพันธ์ที่เพิ่มขึ้นแบบไม่เป็นเชิงเส้น (ช่วงที่ 2) ที่ขึ้นทดสอบจะแสดงพฤติกรรมการเสียรูปแบบพลาสติก กล่าวคือขึ้นทดสอบไม่สามารถกลับสู่สภาวะหรือขนาดเดิมได้แม้จะยกเลิกภาระที่กระทำแล้วก็ตามโดยช่วงความสัมพันธ์นี้จะสิ้นสุดลงเมื่อถึงค่าความเค้นสูงสุดของวัสดุ เมื่อภาระที่กระทำกับขึ้นทดสอบมากขึ้นแม้ความเค้นที่เกิดขึ้นจะเกินค่าสูงสุดแล้วนั้นกราฟความสัมพันธ์จะเข้าสู่ช่วงความสัมพันธ์ที่ลดลง (ช่วงที่ 3) พร้อมกับการเปลี่ยนแปลงขนาดพื้นที่หน้าตัดของขึ้นทดสอบเพื่อคงความสามารถในการรับภาระไว้หรือที่เรียกว่า “ช่วงคอคอด (Necking)” จนเกิดการแตกหักในที่สุด [13]

สำหรับอีพอกซีเรซินเมื่ออัตราภาวะที่ใช้ในการทดสอบเพิ่มมากขึ้นกราฟความสัมพันธ์จึงค่อยๆ แสดงให้เห็นเพียงช่วงความสัมพันธ์ของการเพิ่มขึ้นแบบเชิงเส้นเพียงอย่างเดียวโดยเพิ่มอัตราภาวะที่ใช้ในการทดสอบค่าความเค้นของวัสดุมีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้นต่างจากค่าความเครียดที่จะมีแนวโน้มลดลง พฤติกรรมดังกล่าวแสดงให้เห็นถึงการเกิดการเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมการแตกหักของอีพอกซีเรซินจากการแตกหักแบบเหนียวที่อัตราภาวะต่ำเป็นการแตกหักแบบเปราะเมื่ออัตราภาวะเพิ่มมากขึ้น

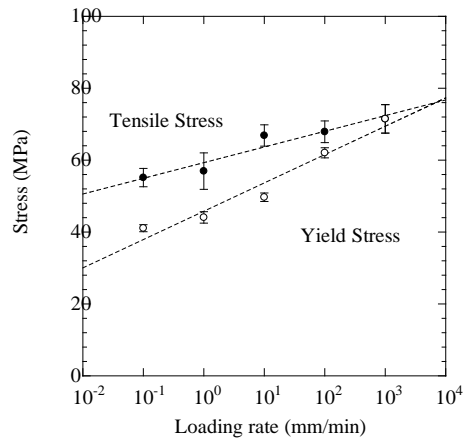


รูปที่ 7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของอีพอกซีเรซินที่อัตราภาวะต่างๆ

การเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมการแตกหักสามารถสังเกตเห็นได้อย่างชัดเจนจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นสูงสุด-ความเค้นครากกับอัตราภาวะที่ใช้ในการทดสอบดังรูปที่ 8 สำหรับความเค้นสูงสุดที่เกิดขึ้นกับขึ้นทดสอบนั้นจะหมายถึงความเค้นสูงสุดที่เกิดขึ้นในช่วงที่ความเค้นของขึ้นทดสอบมีค่าเพิ่มขึ้น



(ช่วงที่ 1 หรือ 2) และความเค้นครากของชิ้นทดสอบจะคำนวณด้วยวิธีวัดที่ระยะห่าง 0.2% ของความเครียด (0.2% Strain Offset) ในกรณีที่วัสดุแสดงพฤติกรรมการแตกหักแบบเปราะที่มีเพียงความสัมพันธ์ช่วงที่ 1 เท่านั้นจะกำหนดให้ความเค้นสูงสุดและความเค้นครากมีค่าเท่ากันตามมาตรฐานการทดสอบการรับแรงดึง ASTM D638 [9] โดยจะพบว่าเมื่ออัตราการกระทำใช้ในการทดสอบมากขึ้นค่าความแตกต่างของความเค้นสูงสุดกับความเค้นครากจะมีค่าที่น้อยลงจนมีค่าเท่ากันในท้ายที่สุด พฤติกรรมดังกล่าวแสดงให้เห็นถึงพฤติกรรมของอีพอกซีเรซินที่เปลี่ยนจากการเกิดการเสียรูปแบบถาวร (Plastic Deformation) ก่อนเกิดการแตกหักที่เป็นสัญญาณของการแตกหักแบบเหนียวไปเป็นการแตกหักทันทีเมื่อภาระที่กระทำกับชิ้นทดสอบเกินช่วงการเสียรูปแบบยืดหยุ่น (Elastic Deformation) ซึ่งเป็นสัญญาณของการแตกหักแบบเปราะเมื่ออัตราการกระทำใช้ในการทดสอบมากขึ้น พฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงลักษณะของการแตกหักนี้มีสาเหตุมาจากคุณสมบัติการเป็นวัสดุวิสโคอีลาสติก (Viscoelastic) ของอีพอกซีเรซินที่พฤติกรรมจะขึ้นอยู่กับเวลา [4,5] เมื่อทดสอบที่ภาระต่ำชิ้นทดสอบจะมีเวลาในกระบวนการเสียรูปมากจึงสามารถเกิดการเสียรูปได้มากตามไปด้วยต่างจากการทดสอบที่อัตราการกระทำสูงเวลาในกระบวนการเสียรูปน้อยจึงเกิดการเสียรูปได้น้อย



รูปที่ 8 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นสูงสุดและความเค้นครากกับอัตราการกระทำที่ใช้ในการทดสอบ

### 3.2 ความต้านทานการแตกหักภายใต้ภาระรูปแบบที่ 1

ผลต่างของการคำนวณตัวประกอบความเข้มของความเค้น ( $K$ ) ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์กับการคำนวณด้วยสมการมาตรฐานจะแสดงดังตารางที่ 1 (โดย  $K_{IQ}$ (Cal.) คือผลจากการคำนวณด้วยสมการมาตรฐาน และ  $K_{IQ}$ (FEA) คือผลการคำนวณจากวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์) จากข้อมูลในตารางจะพบว่าผลต่างของการคำนวณทั้งสองวิธีนั้นอยู่ในเกณฑ์สามารถยอมรับได้ (คลาดเคลื่อนไม่เกิน 4 % [14])

ตารางที่ 1 ความแตกต่างระหว่างการคำนวณด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์กับสมการมาตรฐาน

a (mm)	B (mm)	W (mm)	P <sub>Q</sub> (N)	K <sub>IQ</sub> (Cal.)	K <sub>IQ</sub> (FEA)	Error (%)
10.11	4	20	578.30	3.70	3.65	1.35
9.87	4	20	478.04	2.87	2.82	1.67
9.72	8	20	577.72	1.71	1.73	1.16
9.65	8	20	908.30	2.64	2.68	1.47

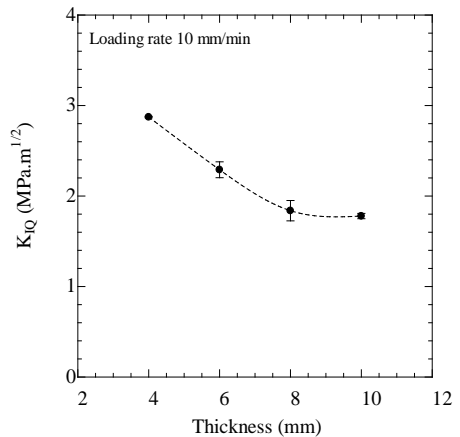
ข้อมูลจากตารางที่ 1 แสดงให้เห็นว่าความยาวรอยร้าวเริ่มต้น ( $a$ ) ของแต่ละชั้นทดสอบนั้นมีขนาดไม่เท่ากันเนื่องจากขั้นตอนการเตรียมการที่ไม่คงที่ แต่ความยาวรอยร้าวทั้งหมดนั้นยังอยู่ในขนาดของความยาวรอยร้าวที่ไม่ส่งผลกระทบต่อทดสอบอย่างมีนัยสำคัญตามงานวิจัยของ Ayatollahi M. R. และ Saboori B. [10] และมาตรฐานการทดสอบความต้านทานการแตกหัก ASTM D5045 [11] ที่กำหนดขอบเขตของความยาวรอยร้าวไว้ดังสมการต่อไปนี้

$$0.45 \leq \frac{a}{W} \leq 0.55 \quad (3)$$

เมื่อ  $a$  คือความยาวรอยร้าวเริ่มต้น  
 $W$  คือความกว้างของชั้นทดสอบ

ความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $K_{I0}$  กับความหนาของชั้นทดสอบที่อัตราภาระ 10 มิลลิเมตรต่อวินาทีจะแสดงดังรูปที่ 9 โดยพบว่าค่า  $K_{I0}$  จะมีค่าที่ลดลงเมื่อความหนาของชั้นทดสอบมากขึ้นจนเริ่มมีค่าคงที่ที่ความหนา 8 มิลลิเมตร เนื่องจากการเปลี่ยนสถานะความเค้นที่บริเวณปลายรอยร้าวของชั้นทดสอบจากการแตกหักภายใต้ผลของสถานะความเค้นระนาบ (Plane Stress) เป็นการแตกหักภายใต้ผลของสถานะความเครียดระนาบ (Plane Strain) เมื่อความหนาของชั้นทดสอบเพิ่มขึ้น สำหรับเกณฑ์การพิจารณาการเปลี่ยนสถานะความเค้นที่ปลายรอยร้าวของชั้นทดสอบภายใต้การรับภาระรูปแบบที่ 1 ตามทฤษฎีของกลศาสตร์การแตกหักนั้นจะพิจารณาจากความสัมพันธ์ของค่า  $K_{I0}$  กับความหนาของชั้นทดสอบ เมื่อชั้นทดสอบมีความหนาเพิ่มขึ้นค่า  $K_{I0}$  จะมีค่าลดลงจนเริ่มคงที่ในที่สุด (ผลกระทบของความหนาจะลดลง

อย่างเห็นได้ชัดจนถึงที่เกิดขึ้นกับชั้นทดสอบหนา 8 มิลลิเมตร และ 10 มิลลิเมตร (รูปที่ 9) ที่มีค่า  $K_{I0}$  ใกล้เคียงกัน) โดยความหนาที่ค่า  $K_{I0}$  เริ่มคงที่นั้นจะเป็นจุดเปลี่ยนของสถานะความเค้นระนาบเป็นความเครียดระนาบ [8, 12, 14]

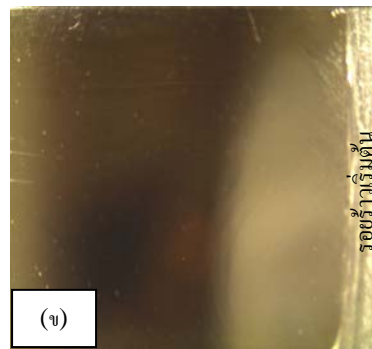
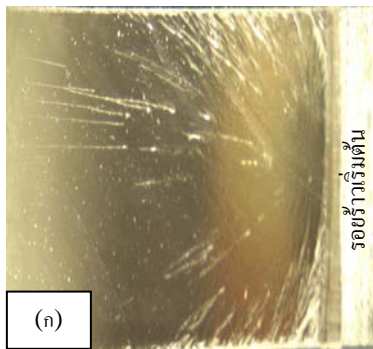


รูปที่ 9 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $K_{I0}$  กับความหนาของชั้นทดสอบ

สำหรับสถานะความเค้นระนาบนั้นชั้นทดสอบสามารถเกิดการเสียรูปขึ้นบริเวณปลายรอยร้าวและเกิดการยุบตัวในแนวความหนาได้ทำให้มีค่า  $K_{I0}$  ที่สูงต่างจากสถานะความเครียดระนาบที่ชั้นทดสอบไม่สามารถเกิดการยุบตัวในแนวความหนาได้ พื้นผิวการแตกหักของชั้นทดสอบหนา 4 และ 8 มิลลิเมตรจะแสดงดังรูปที่ 10 โดยรอยร้าวจะเริ่มขยายตัวจากทางขวาไปทางซ้ายจนกระทั่งเกิดการแตกหัก พื้นผิวการแตกหักของชั้นทดสอบหนา 4 มิลลิเมตร (รูปที่ 10 (ก)) จะแสดงให้เห็นถึงบริเวณที่เกิดการยึดตัวจากการเสียรูปของชั้นทดสอบก่อนเกิดการแตกหักและเมื่อสังเกตที่บริเวณขอบ

ด้านบนและล่างของชั้นทดสอบจะพบร่องรอยของการเกิดการยุบตัวตามแนวความหนาที่เรียกว่า “ปากของแรงเฉือน (Shear Lip)” ต่างจากพื้นผิวการแตกหักของชั้นทดสอบหนา 8 มิลลิเมตร (รูปที่ 10 (ข)) ที่แสดงให้เห็นถึงพื้นผิวการแตกหักที่ค่อนข้างเรียบซึ่งเกิดจากการเสียรูปที่เล็กน้อยก่อนเกิดการแตกหักแบบฉับพลันและเมื่อ

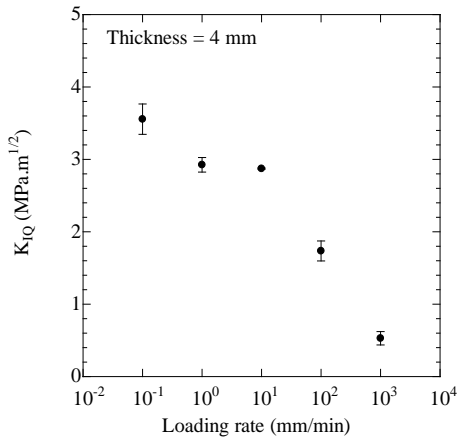
สังเกตที่บริเวณขอบด้านบนและล่างของชั้นทดสอบจะไม่พบร่องรอยของการเกิดการยุบตัวตามแนวความหนาเหมือนกับที่พบบนพื้นผิวการแตกหักของชั้นทดสอบหนา 4 มิลลิเมตร



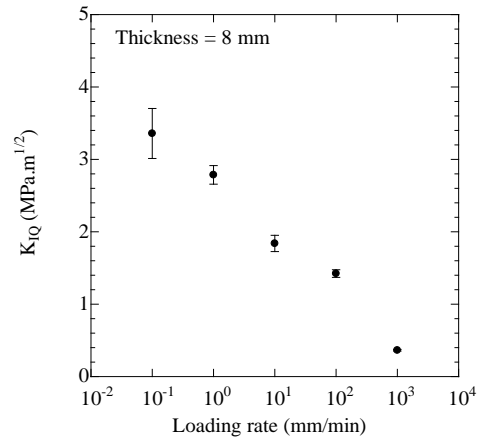
รูปที่ 10 พื้นผิวการแตกหักของชั้นทดสอบที่อัตราภาระ 10 มิลลิเมตรต่อวินาที (ก) ชั้นทดสอบหนา 4 มิลลิเมตร (ข) ชั้นทดสอบหนา 8 มิลลิเมตร

สำหรับงานวิจัยในส่วนต่อจากนี้ไปจะทำการทดสอบความต้านทานการแตกหักบนชั้นทดสอบหนา 4 และ 8 มิลลิเมตรที่เกิดการแตกหักภายใต้ผลของสถานะความเค้นที่แตกต่างกันที่อัตราภาระ 10 มิลลิเมตรต่อวินาที โดยชั้นทดสอบหนา 4 มิลลิเมตรจะเกิดการแตกหักภายใต้สถานะความเค้นระดับบางส่วน ชั้นทดสอบหนา 8 มิลลิเมตรจะแตกหักภายใต้สถานะความเค้นระดับ [7, 8] กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $K_{IQ}$  กับอัตราภาระที่ใช้ในการทดสอบของชั้นทดสอบหนา 4 และ 8 มิลลิเมตรจะแสดงดังรูปที่ 11 และ 12 ตามลำดับซึ่งจะพบว่าเมื่ออัตราภาระที่ใช้ในการทดสอบมากขึ้นค่า  $K_{IQ}$  ลดลงทั้งสองความหนา โดยที่อัตราภาระ 0.1 มิลลิเมตรต่อวินาทีชั้นทดสอบจะ

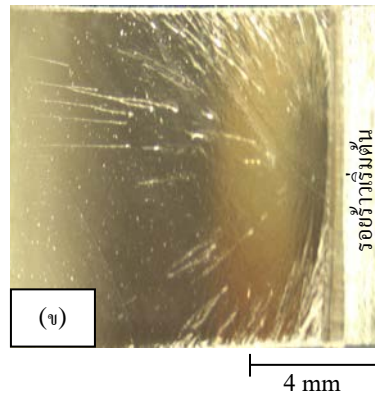
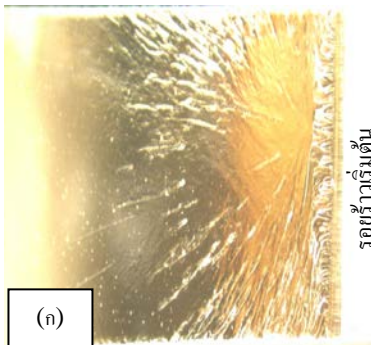
มีค่า  $K_{IQ}$  มากที่สุดจากนั้นจึงมีค่าลดลงเมื่ออัตราภาระที่ใช้ในการทดสอบมีค่ามากขึ้นจนมีค่าน้อยที่สุดที่อัตราภาระ 1000 มิลลิเมตรต่อวินาทีทั้งสองความหนา ความสัมพันธ์ของค่า  $K_{IQ}$  ของชั้นทดสอบหนา 4 มิลลิเมตรที่อัตราภาระ 1 และ 10 มิลลิเมตรต่อวินาที (รูปที่ 11) จะมีค่าที่ใกล้เคียงกัน เมื่อพิจารณาพื้นผิวการแตกหักที่อัตราภาระในการทดสอบทั้งสองดังรูปที่ 13 พบว่าพื้นผิวการแตกหักของชั้นทดสอบที่อัตราภาระในการทดสอบทั้งสองนั้นแสดงให้เห็นถึงการเสียรูปที่ใกล้เคียงกัน ด้วยการเสียรูปที่ใกล้เคียงกันนี้จึงส่งผลให้ค่า  $K_{IQ}$  ของชั้นทดสอบหนา 4 มิลลิเมตรที่อัตราภาระ 1 และ 10 มิลลิเมตรต่อวินาทีมีค่าใกล้เคียงกัน



รูปที่ 11 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $K_{IQ}$  กับอัตราภาระที่ใช้ในการทดสอบของชิ้นทดสอบหนา 4 มิลลิเมตร



รูปที่ 12 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $K_{IQ}$  กับอัตราภาระที่ใช้ในการทดสอบของชิ้นทดสอบหนา 8 มิลลิเมตร



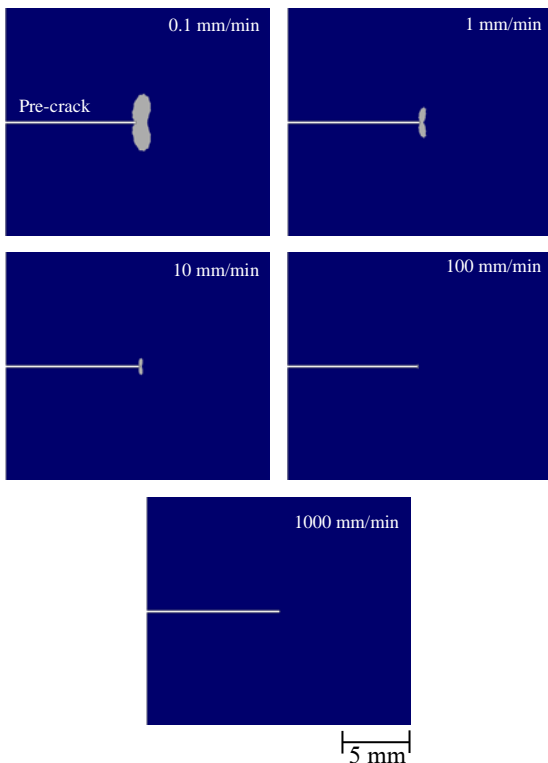
รูปที่ 13 พื้นผิวการแตกหักของชิ้นทดสอบหนา 4 มิลลิเมตรที่อัตราภาระ (ก) 1 มิลลิเมตรต่อนาที (ข) 10 มิลลิเมตรต่อนาที

เมื่อพิจารณาบริเวณเสีรูปที่ปลายรอยร้าวจากการคำนวณด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ของชิ้นทดสอบหนา 4 และ 8 มิลลิเมตรที่อัตราภาระต่างๆ ดังรูปที่ 14 และ 15 ตามลำดับโดยบริเวณเสีรูปที่ปลายรอยร้าวจะเกิดขึ้นในบริเวณที่เกิดความเค้นจากภาระที่กระทำมากกว่าความเค้นครากของอีพอกซีเรซิน ณ อัตราภาระในการ

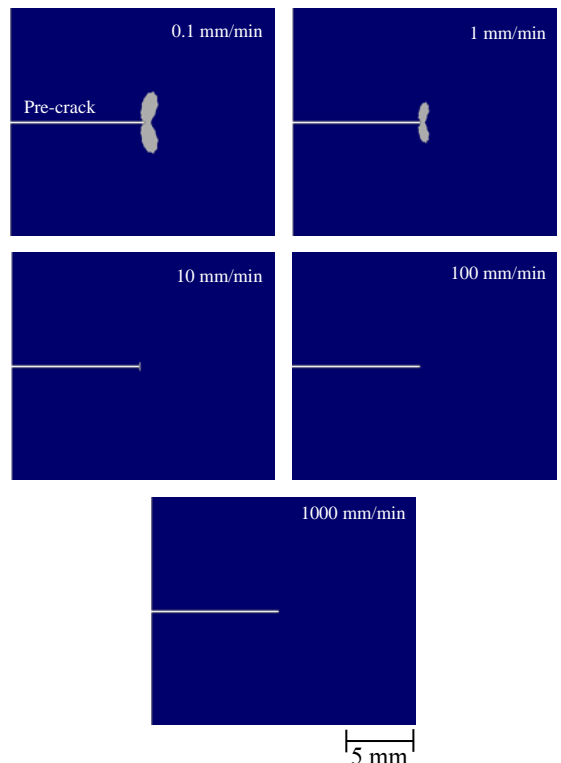
ทดสอบนั้นๆ สำหรับบริเวณที่เกิดการเสีรูปนั้นจะแทนด้วยพื้นที่สีเทา เมื่อพิจารณาขนาดของบริเวณการเสีรูปที่ปลายรอยร้าวจะพบว่าเมื่ออัตราภาระที่ใช้ในการทดสอบเพิ่มขึ้นบริเวณเสีรูปที่ปลายรอยร้าวของชิ้นทดสอบทั้งสองความหนาจะมีขนาดลดลงพฤติกรรมการลดลงของขนาดบริเวณเสีรูปที่ปลาย

รอยร้าวของชิ้นทดสอบเกิดขึ้นจากคุณสมบัติแบบวิสโคอีลาสติกของอีพอกซีเรซินที่พฤติกรรมการแตกหักนั้นขึ้นอยู่กับเวลา เมื่อทำการทดสอบความต้านทานการแตกที่อัตราภาระต่ำชิ้นทดสอบจะแสดงพฤติกรรมการแตกหักแบบเหนียวที่เกิดการเสียดรูปขึ้นมากจึงมีขนาดบริเวณเสียดรูปที่ปลายรอยร้าวที่ใหญ่ และเมื่อเพิ่มอัตราภาระในการทดสอบพฤติกรรมการแตกหักจึงเปลี่ยนเป็นการแตกหักแบบเปราะที่เกิดการเสียดรูปได้น้อยลงขนาดบริเวณเสียดรูปที่ปลายรอยร้าวจึงลดลงตามไปด้วย จากพฤติกรรมที่กล่าวมานี้สามารถอธิบายถึงพฤติกรรมของค่า  $K_{I0}$  (รูปที่ 11 และ

12) ที่ลดลงเมื่ออัตราภาระที่ใช้ในการทดสอบเพิ่มมากขึ้นเนื่องจากภาระที่ถูกแบ่งไปใช้ในการทำให้ชิ้นทดสอบเกิดการเสียดรูปที่ปลายรอยร้าวลดลงและภาระที่ใช้ในการขยายรอยร้าวหรือทำให้รอยร้าวเติบโตเพิ่มขึ้น เมื่อเปรียบเทียบขนาดของบริเวณเสียดรูปที่ปลายรอยร้าวของชิ้นทดสอบทั้งสองความหนาที่อัตราภาระเดียวกันจะพบว่าชิ้นทดสอบหนา 4 มิลลิเมตรจะมีขนาดของบริเวณการเสียดรูปที่ปลายรอยร้าวที่มากกว่าชิ้นทดสอบหนา 8 มิลลิเมตรทุกอัตราภาระที่ใช้ในการทดสอบ



รูปที่ 14 บริเวณการเสียดรูปที่ปลายรอยร้าวจากวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ของชิ้นทดสอบหนา 4 มิลลิเมตร

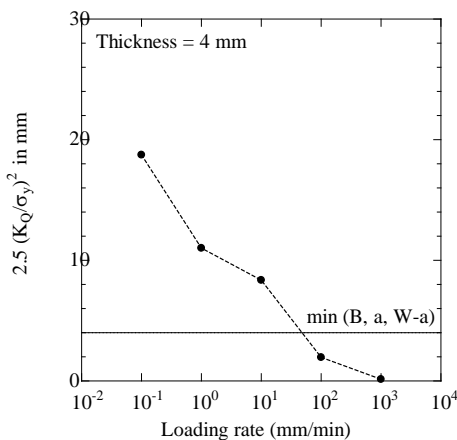


รูปที่ 15 บริเวณการเสียดรูปที่ปลายรอยร้าวจากวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ของชิ้นทดสอบหนา 8 มิลลิเมตร

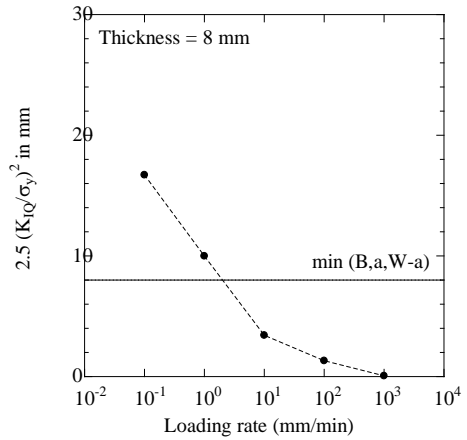
สำหรับขอบเขตการเสีรูปของชิ้นทดสอบภายใต้  
 ทฤษฎีของกลศาสตร์การแตกหักยืดหยุ่นเชิงเส้นจะ  
 กำหนดตามสมการดังต่อไปนี้ [11]

$$2.5(K_{IQ}/\sigma_y)^2 \text{ in mm} < \min(B, a, W-a) \quad (4)$$

โดยชิ้นทดสอบจะเกิดการแตกหักนอกขอบเขตของ  
 กลศาสตร์การแตกหักยืดหยุ่นเชิงเส้นหรือเกิดการ  
 แตกหักภายใต้สถานะความเค้นระนาบ เมื่อค่า  
 ของ  $2.5(K_{IQ}/\sigma_y)^2$  มากกว่าค่าที่น้อยที่สุดของความหนา  
 ( $B$ ) หรือความยาวรอยร้าวเริ่มต้น ( $a$ ) หรือพื้นที่รับภาระ  
 ( $W-a$ ) และจะเกิดการแตกหักภายใต้ผลของสถานะ  
 ความเค้นระนาบเมื่อค่า  $2.5(K_{IQ}/\sigma_y)^2$  น้อยกว่า ผล  
 การคำนวณจากสมการที่ (3) ของชิ้นทดสอบหนา 4 และ  
 8 มิลลิเมตรแยกตามอัตราภาระที่ใช้ในการทดสอบจะ  
 แสดงดังรูปที่ 16 และ 17 ตามลำดับ



รูปที่ 16 ขนาดของการเสีรูปที่ปลายรอยร้าวของชิ้น  
 ทดสอบหนา 4 มิลลิเมตรที่อัตราภาระต่างๆ



รูปที่ 17 ขนาดของการเสีรูปที่ปลายรอยร้าวของชิ้น  
 ทดสอบหนา 8 มิลลิเมตรที่อัตราภาระต่างๆ

สำหรับชิ้นทดสอบหนา 4 มิลลิเมตรจะพบว่าที่อัตรา  
 ภาระ 0.1, 1 และ 10 มิลลิเมตรต่ออนาทีชิ้นทดสอบจะเกิด  
 การแตกหักนอกขอบเขตของทฤษฎีหรือภายใต้ผลของ  
 สถานะความเค้นระนาบและจะเริ่มเกิดการแตกหัก  
 ภายใต้ขอบเขตของทฤษฎีหรือภายใต้ผลของสถานะ  
 ความเค้นระนาบที่อัตราภาระ 100 มิลลิเมตรต่ออนาที  
 ต่างจากชิ้นทดสอบหนา 8 มิลลิเมตรที่จะเกิดการแตกหัก  
 นอกขอบเขตของทฤษฎีหรือภายใต้ผลของสถานะความ  
 เค้นระนาบที่อัตราภาระ 0.1 และ 1 มิลลิเมตรต่ออนาที  
 โดยจะเริ่มเกิดการแตกหักภายใต้ขอบเขตของทฤษฎี  
 หรือภายใต้สถานะความเค้นระนาบที่อัตราภาระ 10  
 มิลลิเมตรต่ออนาทีและหากเปรียบเทียบขนาดของบริเวณ  
 การเสีรูปที่ปลายรอยร้าวของชิ้นทดสอบหนา 4 และ 8  
 มิลลิเมตรที่อัตราภาระที่ใช้ในการทดสอบเดียวกันจะ  
 พบว่าชิ้นทดสอบหนา 4 มิลลิเมตรจะมีขนาดของการ  
 เสีรูปที่ปลายรอยร้าวที่มากกว่าชิ้นทดสอบหนา 8  
 มิลลิเมตรเช่นเดียวกับผลจากวิธีไฟไนต์ (รูปที่ 14 และ

15) แม้จะเกิดการแตกหักภายใต้สถานะความเค้นเดียวกันก็ตาม จากขนาดของการเสียรูปที่เกิดขึ้นจึงเป็นสาเหตุที่ทำให้ค่า  $K_{IQ}$  ของชิ้นทดสอบหนา 4 มิลลิเมตรมากกว่าชิ้นทดสอบหนา 8 มิลลิเมตรที่ทุกอัตราภาระที่ใช้ในการทดสอบ

#### 4. สรุปผลการทดลอง

การศึกษาผลกระทบของความหนาและอัตราภาระต่อความต้านทานการแตกหักภายใต้การรับภาระรูปแบบที่ 1 ของอีพอกซีเรซินพบว่าทั้งความหนาและอัตราภาระที่ใช้ในการทดสอบนั้นต่างส่งผลต่อการรับแรงดึงและความต้านทานการแตกหักของอีพอกซีเรซินสำหรับการทดสอบการรับแรงดึงอัตราภาระที่ใช้ในการทดสอบจะส่งผลให้พฤติกรรมการแตกหักของอีพอกซีเรซินเปลี่ยนพฤติกรรมการแตกหักแบบเหนียวที่อัตราภาระต่ำไปเป็นพฤติกรรมการแตกหักแบบเปราะเมื่ออัตราภาระที่ใช้ในการทดสอบเพิ่มมากขึ้น การเปลี่ยนแปลงของพฤติกรรมการแตกหักดังกล่าวเกิดจากคุณสมบัติแบบวิสโคอิลาสติกของอีพอกซีเรซินที่พฤติกรรมการแตกหักขึ้นอยู่กับเวลาและสำหรับความต้านทานการแตกหักภายใต้การรับภาระรูปแบบที่ 1 จะพบว่าเมื่อความหนาของชิ้นทดสอบมากขึ้นความต้านทานการแตกหักจะมีค่าลดลงเนื่องจากการเปลี่ยนสถานะความเค้นที่ปลายรอยร้าวของชิ้นทดสอบจากการแตกหักภายใต้สถานะความเค้นระนาบบนชิ้นทดสอบแบบบางไปเป็นการแตกหักภายใต้สถานะความเค้นเครียดระนาบบนชิ้นทดสอบแบบหนาเช่นเดียวกับผลกระทบของอัตราภาระที่เกิดขึ้นกับความต้านทานการแตกหักโดยเมื่อทดสอบที่อัตราภาระต่ำชิ้นทดสอบจะสามารถเกิดการเสียรูปได้มากเนื่องจากคุณสมบัติที่ขึ้นอยู่กับ

เวลาของอีพอกซีเรซินจึงเกิดการแตกหักภายใต้ผลของสถานะความเค้นระนาบและเมื่ออัตราภาระที่ใช้ในการทดสอบมีค่ามากขึ้นเวลาในกระบวนการเสียรูปของชิ้นทดสอบจะลดลงทำให้ชิ้นทดสอบเกิดการเสียรูปได้น้อยจึงเกิดการแตกหักภายใต้ผลของสถานะความเค้นเครียดระนาบที่มีความต้านทานการแตกหักที่ต่ำกว่าและเมื่อพิจารณาความต่างของความต้านทานการแตกหักของชิ้นทดสอบสองความหนาที่อัตราภาระเดียวกันจะพบว่าชิ้นทดสอบแบบบางจะมีค่าความต้านทานการแตกหักที่มากกว่าแบบหนาเนื่องจากการเกิดการเสียรูปที่บริเวณปลายรอยร้าวที่มากกว่า

#### 5. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณบริษัท อติติดา เบอร์ลา เคมีคัลส์ (ประเทศไทย) จำกัด (อีพอกซี ดีวีชัน) ที่ให้อุณหภูมิและวัสดุอีพอกซีเรซินและสารช่วยแข็งสำหรับใช้ในงานวิจัยและมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีที่สนับสนุนทุนการศึกษาและค่าใช้จ่ายตลอดการวิจัย

#### 6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Y. Torres, V.K. Sarin, M. Anglada. L. Llanes, "Loading Mode Effects on the Fracture Toughness and Fatigue Crack Growth Resistance of WC-Co Cemented Carbides", *Scripta Materialia* 52, 2005, pp.1087-1091.
- [2] Yi-Lan Kang, Zhi-Feng Zhang, Huai-Wen Wang, Qing-Hua Qin, "Experimental Investigation of the Effect Thickness on Fracture Toughness of Metallic Foils", *Materials Science and Engineering: A* 394, 2005, pp.312-319.

- [3] Yanyun Zhao, Mengtian Liang, Zhenyu Zhang, Man Jiang, Shaojun Liu, "Fracture Toughness and Fracture Behavior of CLAM Steel in the Temperature Range of 450°C-550°C", *Journal of Nuclear Materials* 501, 2018, pp.200-207.
- [4] M. B. Roller, "Characterization of the Time-Temperature-Viscosity Behavior of Curing B-Staged Epoxy Resin", *Plastic Engineering* 15, 1975, pp.406-414.
- [5] N.J. Mills, "Plastics: Microstructure and Engineering (2nd ed.)", Arnold, London, 1993.
- [6] Ph. Beguelin, H. H. Kausch, "The Effect of the Loading Rate on the Fracture Toughness of Poly (methyl methacrylate), Polyacetal, Polyetheretherketone and Modified PVC", *Journal of Materials Science* 29, 1994, pp.91-98.
- [7] C. Kanchanomai, S. Rattananon., "Effect of Loading Rate and Thickness of Thermoset Epoxy Resin", *Journal of Applied Polymer Science* 109, 2008, pp.2408-2416.
- [8] J. Jamali, Y. Fan, J. T. Wood., "The Mixed-Mode Fracture Behavior of Epoxy by the Compact Tension Shear Test", *International Journal of Adhesion & Adhesives* 63, 2015, pp.79-86.
- [9] ASTM D638, "Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics", West Conshocken, PA: ASTM; 2014.
- [10] M.R. Ayatollahi, B. Saboori, "A New Fixture for Fracture Tests Under Mixed Mode I/III Loading", *European Journal of Mechanics A/Solids* 51, 2014, pp. 67-76.
- [11] ASTM D5045, "Standard Test Methods for Plane-Strain Fracture Toughness and Strain Energy Release Rate of Plastic Materials", West Conshocken, PA: ASTM, 2014.
- [12] T. L. Anderson, "Fracture Mechanics Fundamentals and Applications Book (2nd ed.)", 1994.
- [13] Mechanical Engineering, Suranaree University of Technology, "Tensile Testing", Available: [http://eng.sut.ac.th/me/2014/laboratory/document/Tensile\\_Test.pdf](http://eng.sut.ac.th/me/2014/laboratory/document/Tensile_Test.pdf). (in Thai)
- [14] Asst. Prof. Jirapong Kasivittamnuay, "Fracture", Available:<http://pioneer.netserv.chula.ac.th/~kjirapon/Fracture%20book.pdf>. (in Thai)
- [15] F. Ren, J. J. Wang, W. D. Bertelsen, "Fractographic Study of Epoxy Under Mode I and Mixed Mode I/III Loading", *Materials Science and Engineering A* 532, 2011, pp.449-455.