

ผลกระทบของสถานะความคุ้นต่อความต้านทานการแตกหักภายใต้
โหมคผสม 1 และ 3 ของอีพอกซีเรซิน



นายอรรถสิทธิ์ เวียงคำ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกลและระบบกระบวนการ
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ปีการศึกษา 2562

**EFFECT OF STRESS STATE ON FRACTURE
TOUGHNESS UNDER MIXED-MODE I/III
LOADING OF EPOXY RESIN**



**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for
the Degree of Master of Engineering in Mechanical and
Process System Engineering
Suranaree University of Technology
Academic Year 2019**

ผลกระทบของสถานะความกดดันต่อความต้านทานการแตกหักภายใต้
โหมดผสม 1 และ 3 ของอีพอกซีเรซิน

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นักวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



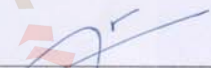
(ผศ. ดร. จิตติวัฒน์ นิธิกาญจนธาร)

ประธานกรรมการ




(อ. ดร. ประเสริฐ เอ่งฉ้วน)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)



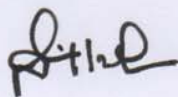
(ผศ. ดร. วรณวนษ์ บุ่งสุด)

กรรมการ



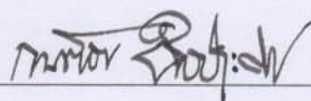
(อ. ดร. สมศักดิ์ ศิวคำรังพงศ์)

กรรมการ



(ศ. ดร. สันติ แม่นศิริ)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและพัฒนาความเป็นสากล



(รศ. ร.อ. ดร. กนดรร ชำนิประศาสน์)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

อรรถสิทธิ์ เวียงคำ : ผลกระทบของสถานะความเค้นต่อความต้านทานการแตกหักภายใต้
โหมคผสม 1 และ 3 ของอีพอกซีเรซิน (EFFECT OF STRESS STATE ON FRACTURE
TOUGHNESS UNDER MIXED-MODE I/III LOADING OF EPOXY RESIN) อาจารย์ที่
ปรึกษา : อาจารย์ ดร. ประเสริฐ เองฉ้วน, 100 หน้า.

อีพอกซีเรซินเป็นวัสดุที่ได้รับความนิยมอย่างแพร่หลายในภาคอุตสาหกรรม ตัวอย่างของ
การใช้งาน อาทิเช่น วัสดุผสมในงาน โครงสร้าง ใช้เป็นสารช่วยยึดติด ใช้ในการเคลือบผิว เป็นต้น การ
ประยุกต์ใช้ที่หลากหลายของอีพอกซีเรซินทำให้อยู่ครั้งอีพอกซีเรซินถูกนำไปใช้ทำชิ้นส่วนที่มี
ความซับซ้อนทั้งในด้านของรูปร่างและลักษณะของภาระที่ได้รับ ในระหว่างกระบวนการผลิตมี
โอกาสที่จะเกิดความไม่ต่อเนื่องขึ้นในเนื้อของวัสดุหรือในระหว่างการใช้งานที่อาจเกิดร้าวหรือ
ร่อยร้าวจากการเสียดสีขึ้นบนพื้นผิวของวัสดุ ความไม่ต่อเนื่องหรือร้าวที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวของ
วัสดุนั้นจะส่งผลให้ชิ้นงานเกิดความเสียหายก่อนถึงภาระที่ได้ทำการออกแบบไว้ เมื่อวัสดุเกิดความ
ไม่ต่อเนื่องหรือร้าวขึ้นปัจจัยสำคัญที่ต้องคำนึงถึงคือความต้านทานการแตกหักของวัสดุ จาก
ลักษณะการใช้งานที่หลากหลายของอีพอกซีเรซินงานวิจัยนี้จึงมุ่งศึกษาพฤติกรรมการแตกหักภายใต้
โหมคผสม 1 และ 3 (ลักษณะการรับภาระแบบเปิดและฉีกร่อยร้าว) ด้วยขั้นตอนแบบมีร่อยร้าว
ข้างเดียวรับแรงดึงและพิจารณาผลกระทบของสถานะความเค้นที่เกิดขึ้นกับวัสดุด้วยการ
เปลี่ยนแปลงอัตราภาระที่ใช้ในการทดสอบตั้งแต่ 0.1 ถึง 1000 มิลลิเมตรต่อนาทีและความหนาของ
ชิ้นทดสอบ สำหรับความต้านทานการแตกหักของอีพอกซีเรซินจะคำนวณด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์
และศึกษากลไกการแตกหักจากพื้นผิวการแตกหักของชิ้นทดสอบควบคู่กันไปด้วย ผลการศึกษา
พบว่าพฤติกรรมการแตกหักของอีพอกซีเรซินภายใต้โหมคผสม 1 และ 3 นั้นจะถูกควบคุมด้วย
สัดส่วนของระยะเปิดที่ปลายร่อยร้าวที่เกิดขึ้นจากการรับภาระ โหมคที่ 1 และ โหมคที่ 3 โดยความ
หนาของชิ้นทดสอบจะไม่ส่งผลต่อสัดส่วนของระยะเปิดที่ปลายร่อยร้าวดังกล่าวตรงกันข้ามกับอัตรา
ภาระที่จะส่งผลต่อขนาดและสัดส่วนของระยะเปิดที่ปลายร่อยร้าวอย่างชัดเจน เมื่อทดสอบที่อัตรา
ภาระต่ำร่อยร้าวจะเปิดตัวได้มากกว่าก่อนเกิดการแตกหักและจะมีขนาดลดลงเมื่ออัตราภาระที่ใช้ในการ
ทดสอบมีค่ามากขึ้น

สาขาวิชา วิศวกรรมการผลิต
ปีการศึกษา 2562

ลายมือชื่อนักศึกษา อรรถสิทธิ์ เวียงคำ
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา ✓

ATTASIT WIANGKHAM : EFFECT OF STRESS STATE ON FRACTURE
TOUGHNESS UNDER MIXED-MODE I/III LOADING OF EPOXY RESIN.
THESIS ADVISOR : PRASERT AENGCHUAN, Ph.D., 100 PP.

EPOXY RESIN/MIXED-MODE FRACTURE/STRESS STATE

Epoxy resin is used in many engineering applications especially as a matrix material in composite structures, used in surface coating and an adhesive for engineering purposes, etc. Moreover, due to a wide range of applications, epoxy resin usually undergoes complex loading during services. During manufacturing processes or services, there is a chance of discontinuity in material or crack from friction on the surface of the material. Discontinuity or crack that occurs on the material will affect in damage to part before the load has been designed. When the part becomes discontinuity or cracked, the important factor to consider is fracture toughness of the material. Based on the various applications of epoxy resin, fractured of epoxy under mixed-mode loading is possible. In this study, fracture behavior of epoxy resin under mixed-mode I and III loadings is investigated (opening mode and tearing mode) using single edge notch tension (SENT) specimen. The effect of stress state was studied by varying two parameters, i.e. loading rate from 0.1 to 1000 mm/min and specimen thickness. Fracture toughness at various modes of loading is determined using finite element analysis. The fracture surfaces of specimen are observed and the fracture mechanisms under various modes of loading are discussed. The results show that the fracture behavior of epoxy resin under mixed-mode I and III are controlled by the proportion of crack tip opening displacement (CTOD) caused by the mode I and mode III loading. The thickness of specimens has not a significant effect on the proportion of the crack tip opening

displacement. On the other hand to the loading rate that will affect the size and the proportion of crack tip opening displacement. When tested at a low loading rate, crack tip opening displacement has been released much more before the breakage and will decrease in value as the loading rate increases.



School of Manufacturing Engineering

Academic Year 2019

Student's Signature อรรถวิทย์ เวชชาคัก

Advisor's Signature ✓

กิตติกรรมประกาศ

การทำงานวิจัยและวิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดีนั้น เกิดจากการได้รับความอนุเคราะห์และความร่วมมือจากบุคคลหลายท่านรวมถึงอาจารย์ที่ปรึกษาที่คอยแนะนำและชี้แนะทางการดำเนินงานวิจัยและสนับสนุนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จนสำเร็จลุล่วง

ขอขอบคุณบริษัท อคิดยา เบอร์ลา เคมีคัลส์ (ประเทศไทย) จำกัด (อีพอกซี ดีวีชั่น) ที่สนับสนุนวัสดุอีพอกซีเรซินสำหรับใช้ในการวิจัยครั้งนี้ ขอขอบคุณศูนย์เครื่องมือมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีและเจ้าหน้าที่ประจำศูนย์เครื่องมือที่ให้ความร่วมมือและให้คำแนะนำในการใช้เครื่องมือหรืออุปกรณ์ในงานวิจัยอย่างดียิ่งเสมอมา สุดท้ายนี้ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณบิดามารดา ที่ให้การอุปการะอย่างดียิ่ง อีกทั้งเพื่อนสนิท มิตรสหาย ที่มีส่วนสนับสนุนในการทำวิจัยชิ้นนี้จนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีในที่สุด

อรรถสิทธิ์ เวียงคำ



สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ง
สารบัญ	จ
สารบัญตาราง	ช
สารบัญรูป	ฉ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	ฐ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของงานวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	2
1.4 วิธีการดำเนินงานวิจัย.....	3
1.5 สถานที่ทำวิจัย	3
1.6 เครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย.....	3
1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
2 บริบทสนั้วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 กล่าวนำ.....	5
2.2 อีพอกซีเรซิน (Epoxy resin).....	5
2.3 ความเสียหายของวัสดุ (Failure of materials)	7
2.4 องค์ประกอบของกลศาสตร์การแตกหัก	9
2.5 กลศาสตร์การแตกหักยืดหยุ่นเชิงเส้น (Linear elastic fracture mechanics)	10
2.6 กลศาสตร์การแตกหักอีลาสติก-พลาสติก (Elastic-plastic fracture mechanics).....	15
2.7 การวิเคราะห์ความเค้นที่ปลายรอยร้าว.....	19
2.8 การหาผลเฉลยพหามิเตอร์ความต้านทานการแตกหักด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์.....	20

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.9	ปริมาตรน้ำรวมที่เกี่ยวข้อ	22
3	วิธีการดำเนินงานวิจัย	25
3.1	กล่าวนำ	25
3.2	การเตรียมชิ้นทดสอบ	25
3.2.1	การเตรียมอีพอกซีเรซิน	25
3.2.2	การเตรียมชิ้นทดสอบแรงดึง	26
3.2.3	การเตรียมชิ้นทดสอบความต้านทานการแตกหัก	27
3.3	การทดสอบวัสดุ	28
3.3.1	การทดสอบแรงดึง	28
3.3.2	การทดสอบความต้านทานการแตกหัก	29
3.4	การคำนวณพารามิเตอร์ความต้านทานการแตกหัก	31
3.4.1	การคำนวณ K ด้วยสมการมาตรฐาน	32
3.4.2	การคำนวณพารามิเตอร์ความต้านทานการแตกหักด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์	32
4	ผลการวิจัยและการอภิปรายผล	42
4.1	กล่าวนำ	42
4.2	ผลการทดสอบแรงดึง	42
4.3	ผลการทดสอบความต้านทานการแตกหักภายใต้โหมดที่ 1	45
4.3.1	ผลกระทบของความหนาต่อความต้านทานการแตกหักภายใต้โหมดที่ 1	45
4.3.2	ผลกระทบของอัตราภาระต่อความต้านทานการแตกหักภายใต้โหมดที่ 1	58
4.4	ผลการทดสอบความต้านทานการแตกหักภายใต้โหมดผสม 1 และ 3	55
4.4.1	ผลกระทบของสถานะความเค้นต่อค่าตัวประกอบความเข้มของ ความเค้น (K)	56
4.4.2	ผลกระทบของสถานะความเค้นต่อค่า J -อินทิกรัล (J_C)	67
4.4.3	ผลกระทบของสถานะความเค้นต่อระยะเปิดที่ปลายรอยร้าว ($CTOD_{45}$)	72
5	สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	77
5.1	สรุปผลการวิจัย	77

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

5.1.1 ผลกระทบของความหนาต่อความต้านทานการแตกหักภายใต้ โมเมนต์ผสม 1 และ 3 ของอีพอกซีเรซิน	77
5.1.2 ผลกระทบของอัตราภาระต่อความต้านทานการแตกหักภายใต้ โมเมนต์ผสม 1 และ 3 ของอีพอกซีเรซิน	77
5.2 ข้อเสนอแนะ	78
รายการอ้างอิง	79
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก. ผลการทดสอบความต้านทานการแตกหัก.....	80
ภาคผนวก ข. บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา.....	92
ประวัติผู้เขียน	100

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1	ตารางแสดงขนาดของชั้นทดสอบแรงดึง26
3.2	ตารางแสดงขนาดของชั้นทดสอบความต้านทานการแตกหัก28
4.1	คุณสมบัติการทดสอบแรงดึงของอีพอกซีเรซิน 44
4.2	ตารางแสดงมุมของโหมคผสมจากการทดสอบ..... 56
4.3	ตารางแสดงสถานะความเค้นของชั้นทดสอบหนา 4 มิลลิเมตร 63
4.4	ตารางแสดงสถานะความเค้นของชั้นทดสอบหนา 8 มิลลิเมตร 63
4.5	สัดส่วนของ $CTOD_{45}$ ในแนวแกน Z และ X ที่อัตราภาระ 0.1 มิลลิเมตรต่อนาที 74
ก.1	ตารางแสดงข้อมูลสำหรับการคำนวณด้วย FEA ของชั้นทดสอบหนา 4 มิลลิเมตร 87
ก.2	ตารางแสดงข้อมูลสำหรับการคำนวณด้วย FEA ของชั้นทดสอบหนา 8 มิลลิเมตร 88
ก.3	ตารางแสดงผลการคำนวณค่า K ของชั้นทดสอบหนา 4 มิลลิเมตร 89
ก.4	ตารางแสดงผลการคำนวณค่า K ของชั้นทดสอบหนา 8 มิลลิเมตร 89
ก.5	ผลการคำนวณค่า J ของชั้นทดสอบหนา 4 มิลลิเมตร 90
ก.6	ผลการคำนวณค่า J ของชั้นทดสอบหนา 8 มิลลิเมตร 90
ก.7	ผลการคำนวณค่า $CTOD_{45}$ ของชั้นทดสอบหนา 4 มิลลิเมตร91
ก.8	ผลการคำนวณค่า $CTOD_{45}$ ของชั้นทดสอบหนา 8 มิลลิเมตร 91

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1	โครงสร้างทางเคมีของ Bisphenol A..... 6
2.2	โครงสร้างทางเคมีของ Epichlorohydrin 6
2.3	โครงสร้างปฏิกิริยาของการสังเคราะห์อีพอกซีเรซิน 6
2.4	กราฟความสัมพันธ์ของความเค้น (Stress) กับความเครียด (Strain)..... 7
2.5	กราฟความสัมพันธ์ของความเค้นกับความเครียดของวัสดุเปราะและเหนียว..... 8
2.6	ผลกระทบของความหนาต่อความต้านทานการแตกหัก..... 14
2.7	ความหมายของสัญลักษณ์ในนิยามของพารามิเตอร์ J -อินทิกรัล 16
2.8	อัตราการปลดปล่อยพลังงานยืดหยุ่นไม่เชิงเส้น 16
2.9	นิยามของพลังงานความเครียด (U) และพลังงานความเครียดเต็มเต็ม (U^*)..... 18
2.10	นิยามของพารามิเตอร์ $CTOD$ 18
2.11	การคำนวณ $CTOD_{45}$ 19
2.12	การคำนวณ DELTA 5..... 19
2.13	รูปแบบการเสีรูปที่ปลายรอยร้าวของวัสดุ..... 20
2.14	เอลิเมนต์รอยร้าวของ Byskov..... 21
2.15	เอลิเมนต์ไอโซพารามेटริก 21
2.16	เอลิเมนต์เอกฐานไอโซพารามेटริก..... 22
3.1	รูปร่างและขนาดของชิ้นทดสอบแรงดึง 26
3.2	รูปร่างและขนาดของชิ้นทดสอบความต้านทานการแตกหัก..... 27
3.3	การติดตั้งชิ้นทดสอบแรงดึงบนเครื่องทดสอบแบบอเนกประสงค์..... 29
3.4	อุปกรณ์ทดสอบความต้านทานการแตกหัก 31
3.5	การติดตั้งชุดอุปกรณ์ทดสอบเข้ากับเครื่องทดสอบ 31
3.6	ลักษณะ โมเดลที่ใช้ในการคำนวณด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์..... 34
3.7	การกำหนดลักษณะการเคลื่อนที่ของโมเดล..... 34
3.8	การเปลี่ยนแปลงของจุดอ้างอิงใน โมเดล 35
3.9	ลักษณะการแบ่งเอลิเมนต์โดยรวมของโมเดล 37

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.10	ลักษณะการแบ่งเอลิเมนต์อุปกรณ์ทดสอบ.....37
3.11	ลักษณะการแบ่งเอลิเมนต์หมุ่คร้อยขึ้นทดสอบ.....38
3.12	การแบ่งเอลิเมนต์ของขึ้นทดสอบกรณีตัวประกอบความเข้มของความเค้น38
3.13	เอลิเมนต์แบบสี่เหลี่ยมสามเหลี่ยม 15 จุดต่อ (C3D15).....38
3.14	การแบ่งเอลิเมนต์ของขึ้นทดสอบกรณีพารามิเตอร์ J -อินทิกรัล.....39
3.15	การแบ่งเอลิเมนต์เพื่อพิจารณาการลู่เข้าของการคำนวณค่า K40
3.16	ผลการคำนวณค่า K ที่จำนวนเอลิเมนต์ต่างๆ ที่บริเวณ Mesh refinement (A).....40
3.17	ผลการคำนวณค่า K ที่จำนวนเอลิเมนต์ต่างๆ ที่บริเวณ Mesh refinement (B).....40
3.18	การแบ่งเอลิเมนต์เพื่อพิจารณาการลู่เข้าของการคำนวณค่า J_c และ $CTOD$41
3.19	ผลการคำนวณค่า J_c ที่จำนวนเอลิเมนต์ต่างๆ ที่บริเวณ Mesh refinement (A).....41
3.20	ผลการคำนวณค่า J_c ที่จำนวนเอลิเมนต์ต่างๆ ที่บริเวณ Mesh refinement (B).....41
4.1	กราฟความสัมพันธ์ของความเค้นกับความเครียดที่อัตราภาระต่างๆ43
4.2	กราฟความสัมพันธ์ของความเค้นแรงดึงและความเค้นครากที่อัตราภาระต่างๆ.....44
4.3	กราฟความสัมพันธ์ของความเครียด ณ จุดแตกหักอัตราภาระต่างๆ44
4.4	กราฟความสัมพันธ์ของความเค้น-ความเครียดจริงของอีพอกซีเรซินที่อัตราภาระต่างๆ45
4.5	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นค่าตัวประกอบความเข้มของความเค้นภายใต้ ภาระโหมด 146
4.6	พื้นผิวการแตกหักขึ้นทดสอบหนา 4 มิลลิเมตรที่อัตราภาระ 10 มิลลิเมตรต่อนาที.....47
4.7	พื้นผิวการแตกหักขึ้นทดสอบหนา 8 มิลลิเมตรที่อัตราภาระ 10 มิลลิเมตรต่อนาที.....48
4.8	กลไกการแตกหักที่พื้นผิวการแตกหักของขึ้นทดสอบ 48
4.9	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราภาระกับค่า K_I ของขึ้นทดสอบหนา 4 มิลลิเมตร49
4.10	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของการเสีรูปร่างบริเวณปลายรอยร้าวกับอัตราภาระ ของขึ้นทดสอบหนา 4 มิลลิเมตร50
4.11	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราภาระกับค่า K_I ของขึ้นทดสอบหนา 8 มิลลิเมตร51
4.12	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของการเสีรูปร่างบริเวณปลายรอยร้าวกับอัตราภาระ ของขึ้นทดสอบหนา 8 มิลลิเมตร51

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.13	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราภาระกับค่า K_I ของชิ้นทดสอบหนา 4 มิลลิเมตรเทียบกับชิ้นทดสอบ 8 มิลลิเมตร 52
4.14	กราฟความสัมพันธ์ของภาระสูงสุดกับระยะยึดตัวของชิ้นทดสอบที่อัตราภาระต่างๆ 54
4.15	พื้นผิวการแตกหักของชิ้นทดสอบหนา 4 และ 8 มิลลิเมตรที่อัตราภาระต่างๆ..... 55
4.16	ผลการเปรียบเทียบการคำนวณด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์กับสมการมาตรฐาน 57
4.17	กราฟความสัมพันธ์ของค่า K_I และ K_{III} กับมุม β ของชิ้นทดสอบหนา 4 มิลลิเมตร..... 58
4.18	กราฟความสัมพันธ์ของค่า K_I และ K_{II} กับมุม β ของชิ้นทดสอบหนา 8 มิลลิเมตร..... 58
4.19	การกระจายตัวของความเค้นบริเวณปลายรอยร้าวชิ้นทดสอบหนา 4 มิลลิเมตรที่อัตราภาระ 0.1 มิลลิเมตรต่อนาที..... 59
4.20	การกระจายตัวของความเค้นบริเวณปลายรอยร้าวชิ้นทดสอบหนา 8 มิลลิเมตรที่อัตราภาระ 0.1 มิลลิเมตรต่อนาที..... 60
4.21	การกระจายตัวของความเค้นบริเวณปลายรอยร้าวชิ้นทดสอบหนา 4 มิลลิเมตรที่อัตราภาระ 1000 มิลลิเมตรต่อนาที..... 61
4.22	การกระจายตัวของความเค้นบริเวณปลายรอยร้าวชิ้นทดสอบหนา 8 มิลลิเมตรที่อัตราภาระ 1000 มิลลิเมตรต่อนาที..... 61
4.23	นิยามการหาขนาดของการเสียรูปบริเวณปลายรอยร้าว (R_p)..... 62
4.24	กราฟความสัมพันธ์ของค่า K กับมุมของโหมดผสมภายใต้สถานะความเค้นระนาบ..... 65
4.25	กราฟความสัมพันธ์ของค่า K กับมุมของโหมดผสมภายใต้สถานะความเค้นระนาบ 66
4.26	กราฟความสัมพันธ์ของค่าตัวประกอบความเข้มของความเค้นสัมบูรณ์กับมุม β 66
4.27	กราฟความสัมพันธ์ของภาระกับระยะยึดตัวของชิ้นทดสอบหนา 8 มิลลิเมตรที่มุมของโหมดผสม 15° 67
4.28	ผลการเปรียบเทียบอัตราการปลดปล่อยพลังงานความเค้น (G) กับ J -อินทิกรัล (J_C) 68
4.29	กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง J_C กับมุม β 69
4.30	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า J_C กับมุม β ภายใต้สถานะความเค้นระนาบ 69
4.31	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า J_C กับมุม β ภายใต้สถานะความเค้นระนาบ 70
4.32	กราฟความสัมพันธ์ของค่า J_C กับมุม β ของชิ้นทดสอบหนา 4 มิลลิเมตรและ 8 มิลลิเมตร .. 71

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.33	72
4.34	72
4.35	73
4.36	74
4.37	75
4.38	76
4.39	76
ก.1	81
ก.2	81
ก.3	82
ก.4	82
ก.5	83
ก.6	84
ก.7	84
ก.8	85
ก.9	85
ก.10	86

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

β	=	มุมของโหมคผสม
θ	=	อัตราภาระ
ϵ	=	ความเครียด
σ	=	ความเค้น
ASTM	=	สมาคมการทดสอบและวัสดุอเมริกัน
CTOD	=	ระยะเปิดที่ปลายรอยร้าว
DGEBA	=	ไดโกลซิซิลอีเทอร์บิฟีนอล-เอ
EPFM	=	กลศาสตร์การแตกหักแบบอิลาสติก-พลาสติก
G	=	อัตราการปลดปล่อยพลังงานความเครียด
J	=	J-อินทิกรัล
K_I	=	ตัวประกอบความเข้มของความเค้นภายใต้โหมค 1
K_{III}	=	ตัวประกอบความเข้มของความเค้นภายใต้โหมค 3
LEFM	=	กลศาสตร์การแตกหักแบบยืดหยุ่นเชิงเส้น
OM	=	กล้องจุลทรรศน์แบบแสง
SENT	=	ชิ้นทดสอบมีรอยร้าวข้างเดียวรับแรงกด
SEM	=	กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด
UTM	=	เครื่องทดสอบแบบอเนกประสงค์

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของงานวิจัย

ปัจจุบันวัสดุกลุ่มพอลิเมอร์ได้เข้ามามีบทบาทต่อชีวิตของมนุษย์มากขึ้น ไม่ว่าจะเป็นการใช้เป็นอุปกรณ์ในชีวิตประจำวัน ด้านอุตสาหกรรม ด้านการแพทย์ ด้านวิศวกรรม ด้านการเกษตรหรือแม้กระทั่งด้านอาหารก็ตาม การที่วัสดุกลุ่มพอลิเมอร์ได้รับความนิยมอย่างแพร่หลายนั้นเนื่องมาจากคุณสมบัติที่ขึ้นรูปง่าย มีน้ำหนักค่อนข้างเบา มีความทนทานต่อการเสียดสีและการกัดกร่อนค่อนข้างสูง โดยวัสดุอีพอกซีเรซินก็จัดอยู่ในกลุ่มของวัสดุพอลิเมอร์ที่ได้รับความนิยมเช่นเดียวกัน

อีพอกซีเรซินเป็นวัสดุในกลุ่มพอลิเมอร์แบบเทอร์โมเซต มีสถานะก่อนการขึ้นรูปเป็นของเหลวที่จะไม่เกิดการแข็งตัวหรือแข็งตัวช้ามากหากไม่เติมสารช่วยแข็ง (Hardener) เพื่อทำปฏิกิริยาให้เกิดการแข็งตัว อีกทั้งยังมีคุณสมบัติทางกลและคุณสมบัติทางไฟฟ้าที่ค่อนข้างสูงเป็นเหตุผลให้อีพอกซีเรซินเป็นที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย ตัวอย่างของการนำอีพอกซีเรซินไปใช้งาน ได้แก่ ส่วนผสมในงานโครงสร้าง สารช่วยยึดติด งานเคลือบผิว เป็นต้น ลักษณะการใช้งานที่หลากหลายของอีพอกซีเรซินทำให้อีพอกซีเรซินถูกใช้งานในอัตราภาระ (Loading rate) หรือความหนาที่หลากหลายตามไปด้วย ระหว่างขั้นตอนการขึ้นรูปหรือระหว่างการใช้งานของอีพอกซีเรซินนั้นมีโอกาสที่จะเกิดความไม่ต่อเนื่องในเนื้อวัสดุหรือรอยร้าวจากการเสียดสีขึ้นบนชิ้นส่วนได้ รอยร้าวหรือความไม่ต่อเนื่องที่เกิดขึ้นบนชิ้นส่วนจะส่งผลให้ชิ้นส่วนเกิดความเสียหายในระหว่างการใช้งานที่ภาระต่ำกว่าภาระที่ออกแบบไว้เนื่องจากการออกแบบไม่ได้คำนึงถึงรอยแตกหรือความไม่ต่อเนื่องที่อาจเกิดขึ้นกับชิ้นส่วน ดังนั้นในกรณีที่ชิ้นส่วนมีรูปร่างซับซ้อนหรือมีลักษณะการใช้งานที่หลากหลายนั้นเพื่อความปลอดภัยในการใช้งานจึงต้องคำนึงถึงปัจจัยที่จะส่งผลต่อชิ้นส่วนที่ออกแบบและพฤติกรรมการใช้งานด้วย

สำหรับชิ้นส่วนที่มีความไม่ต่อเนื่องหรือมีรอยร้าวปัจจัยที่สำคัญที่ต้องคำนึงถึงคือความต้านทานการแตกหัก (Fracture toughness) ของวัสดุที่ใช้ทำชิ้นส่วน เพื่อพิจารณาว่าชิ้นส่วนจะเกิดความเสียหายจากการรับภาระนั้นๆ หรือไม่เมื่อมีความไม่ต่อเนื่องหรือรอยร้าวเกิดขึ้นกับวัสดุ ความต้านทานการแตกหักของวัสดุจะมีค่ามากหรือน้อยขึ้นอยู่กับลักษณะของสถานะความเค้นที่บริเวณรอยร้าวหรือความไม่ต่อเนื่องของชิ้นส่วนเป็นหลัก สำหรับปัจจัยที่ส่งผลต่อสถานะความเค้นที่ปลายรอยร้าวหรือความไม่ต่อเนื่องของชิ้นส่วนนั้นสามารถจำแนกออกได้อีกหลายปัจจัย อาทิเช่น ขนาดของภาระที่กระทำกับชิ้นส่วน ความหนาและอัตราภาระที่กระทำกับชิ้นส่วน เป็นต้น

เมื่อพิจารณาจากความหนาและอัตราภาระในการใช้งานที่หลากหลายของอีพอกซีเรซินนั้น จึงทำให้งานวิจัยนี้มุ่งศึกษาถึงผลกระทบของสถานะความเค้นที่ปลายรอยร้าวต่อความต้านทานการแตกหักของอีพอกซีเรซินภายใต้โหมคผสม 1 และ 3 ซึ่งจำลองจากกรณีที่ชิ้นส่วนถูกนำไปใช้งานกับภาระที่ซับซ้อน โดยภาระ โหมคที่ 1 จะกระทำในทิศทางตั้งฉากกับพื้นผิวรอยร้าวและภาระ โหมคที่ 3 จะกระทำในทิศทางเฉือนพื้นผิวรอยร้าว สำหรับการศึกษผลกระทบของสถานะความเค้นต่อความต้านทานการแตกหักในงานวิจัยนี้ศึกษาบนการเปลี่ยนแปลงขนาดของตัวแปรความหนาของชิ้นทดสอบและอัตราภาระที่ใช้ในการทดสอบ สำหรับชิ้นทดสอบความต้านทานการแตกหักจะใช้ชิ้นทดสอบแบบมีรอยร้าวข้างเดียวรับแรงดึงที่มีความหนาตั้งแต่ 4 ถึง 10 มิลลิเมตรและทดสอบที่อัตราภาระ 0.1 ถึง 1000 มิลลิเมตรต่ออนาที เนื่องจากการคำนวณความต้านทานการแตกหักภายใต้โหมคผสม 1 และ 3 นั้นไม่มีสมการมาตรฐานสำหรับการคำนวณ ดังนั้นในงานวิจัยชิ้นจึงคำนวณความต้านทานการแตกหักภายใต้โหมคผสม 1 และ 3 ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์และเพื่อให้ทราบถึงกลไกการแตกหักภายใต้การรับโหมคผสมพื้นผิวการแตกหักของชิ้นทดสอบภายหลังการทดสอบจะถูกนำไปศึกษาภายใต้การแตกหักด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง (Optical microscope, OM) และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM)

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1.2.1 ศึกษาผลกระทบของความหนาต่อความต้านทานการแตกหักภายใต้โหมคผสม 1 และ 3 ของอีพอกซีเรซิน
- 1.2.2 ศึกษาผลกระทบของอัตราภาระต่อความต้านทานการแตกหักภายใต้โหมคผสม 1 และ 3 ของอีพอกซีเรซิน
- 1.2.3 ศึกษาผลกระทบของสถานะความเค้นต่อกลไกการแตกหักของอีพอกซีเรซินภายใต้โหมคผสม 1 และ 3

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

- 1.3.1 ศึกษาบนอีพอกซีเรซินชนิด Diglycidyl ethers bisphenol A (DGEBA) และสารช่วยแข็งชนิด Polyamine
- 1.3.2 ศึกษาความต้านทานการแตกหักด้วยชิ้นทดสอบแบบมีรอยร้าวข้างเดียวรับแรงดึง (Single edge notch tension, SENT)
- 1.3.3 ศึกษาผลกระทบของความหนาต่อความต้านทานการแตกหักภายใต้ภาระ โหมคที่ 1 ที่ความหนาชิ้นทดสอบ 4 ถึง 10 มิลลิเมตร
- 1.3.4 ศึกษาผลกระทบของความหนาต่อความต้านทานการแตกหักภายใต้โหมคผสม 1

และ 3 ที่ความหนาขึ้นทดสอบ 4 และ 8 มิลลิเมตร

1.3.5 ศึกษาผลกระทบของอัตราภาระต่อความต้านทานการแตกหักภายใต้ภาระโหมดที่ 1 ที่อัตราภาระ 0.1 ถึง 1000 มิลลิเมตรต่อนาที

1.3.6 ศึกษาผลกระทบของอัตราภาระต่อความต้านทานการแตกหักภายใต้โหมดผสม 1 และ 3 ที่อัตราภาระ 0.1, 10 และ 1000 มิลลิเมตรต่อนาที

1.3.7 คำนวณความต้านทานทานแตกหักภายใต้โหมดผสม 1 และ 3 ด้วยโปรแกรมช่วยวิเคราะห์ทางวิศวกรรม ABAQUS V.6.13

1.3.8 ศึกษากลไกการแตกหักภายใต้โหมดผสม 1 และ 3 ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

1.4 วิธีการดำเนินงานวิจัย

1.4.1 ศึกษาข้อมูล งานวิจัย ปริญญาบัตรที่เกี่ยวข้อ

1.4.2 ออกแบบอุปกรณ์การทดสอบและเตรียมชิ้นทดสอบ

1.4.3 ทำการทดสอบการรับแรงดึงและความต้านทานการแตกหักตามการทดลองที่ออกแบบไว้

1.4.4 วิเคราะห์ผลการทดลอง

1.4.5 สรุปผลการทดลอง

1.5 สถานที่ทำวิจัย

1.5.1 อาคารเครื่องมือ 4, 6 และ 10 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

1.6 เครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย

1.6.1 ตู้ผสมแบบสุญญากาศ (Vacuum mixing machine) สำหรับการผสมอีพอกซีเรซิน เข้ากับสารช่วยแข็ง เพื่อช่วยกำจัดฟองอากาศที่เกิดระหว่างขั้นตอนการผสม

1.6.2 ตู้อบลมร้อน (Hot air oven) สำหรับขั้นตอนการเตรียมอีพอกซีเรซิน

1.6.3 เครื่องกัด (Milling machine) สำหรับการเตรียมชิ้นทดสอบให้ได้ขนาดและรูปร่างตามที่ต้องการ

1.6.4 เครื่องทดสอบเนกประสงค์ (Universal Testing Machines, UTM) ยี่ห้อ Instron รุ่น 5565 ภาระการทดสอบสูงสุด 5 kN สำหรับการทดสอบการรับแรงดึงและความต้านทานการแตกหักของวัสดุอีพอกซีเรซิน

1.6.5 อุปกรณ์วัดระยะยืด (Extensometer) ยี่ห้อ Instron ความยาวเกจ 50 มิลลิเมตร

1.6.6 กล้องจุลทรรศน์แบบแสง ยี่ห้อ Leica สำหรับการวัดความยาวรอยร้าวและการศึกษาพื้นผิวการแตกหักของชิ้นทดสอบความต้านทานการแตกหัก

1.6.7 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ยี่ห้อ JEOL รุ่น JSM6010LV สำหรับตรวจสอบและวิเคราะห์พื้นผิวการแตกหักของชิ้นทดสอบความต้านทานการแตกหัก

1.6.8 คอมพิวเตอร์สมรรถนะสูงและโปรแกรมช่วยวิเคราะห์ทางวิศวกรรม ABAQUS V.6.13

1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.7.1 เข้าใจผลกระทบของอัตราภาระต่อพฤติกรรมการรับแรงดึงของอีพอกซีเรซิน

1.7.2 เข้าใจผลกระทบของความหนาและอัตราภาระต่อความต้านทานการแตกหักภายใต้ภาระโหมดที่ 1 ของอีพอกซีเรซิน

1.7.3 เข้าใจผลกระทบของความหนาและอัตราภาระต่อความต้านทานการแตกหักภายใต้โหมดผสม 1 และ 3 ของอีพอกซีเรซิน

1.7.4 เข้าใจถึงขนาดของพารามิเตอร์ของความต้านทานการแตกหักภายใต้โหมดผสม 1 และ 3 ของอีพอกซีเรซิน สำหรับใช้ในการออกแบบชิ้นส่วนทางวิศวกรรม



บทที่ 2

ปริทรรศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

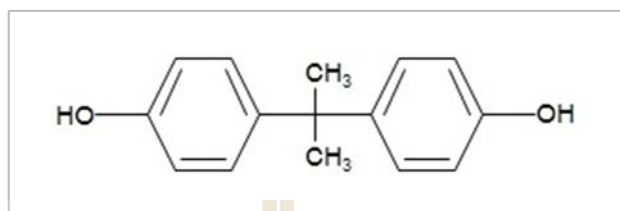
2.1 กล่าวนำ

บทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎี องค์ความรู้และปริทรรศน์วรรณกรรมที่มีความเกี่ยวข้องกับงานวิจัยเรื่องผลกระทบของสถานะความเครียดต่อความต้านทานการแตกหักภายใต้โหมดผสม 1 และ 3 ของอีพอกซีเรซิน โดยการประยุกต์หลักการทางวิศวกรรมศาสตร์ วิทยาศาสตร์และการวิเคราะห์ด้วยคอมพิวเตอร์ เพื่อช่วยในการอธิบายถึงพฤติกรรมที่เกิดขึ้นของวัสดุจากการทดสอบ เนื้อหาที่จะกล่าวต่อไปนี้ได้คัดเลือกทฤษฎีอันเป็นส่วนสำคัญเกี่ยวกับพฤติกรรมของวัสดุ อาทิเช่น ลักษณะของวัสดุ พฤติกรรมการแตกหัก ทฤษฎีและคำจำกัดความของกลศาสตร์การแตกหัก การวิเคราะห์ความต้านทานการแตกหักด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ เป็นต้น ซึ่งทฤษฎีหรืองานวิจัยที่เกี่ยวข้องที่กล่าวมานั้น จะทำให้เกิดความเข้าใจในเนื้อหาของงานวิจัยชิ้นนี้มากยิ่งขึ้น

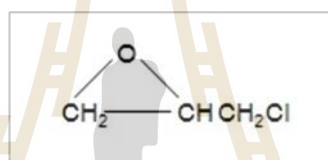
2.2 อีพอกซีเรซิน (Epoxy resin)

อีพอกซีเรซินหรืออีพอกซีเป็นวัสดุที่คุ้นเคยกันเป็นอย่างดีในรูปแบบของกาวยึดติดสิ่งของที่มีความสามารถในการยึดติดที่สูง ใช้งานได้ง่าย โดยอีพอกซีเรซินจัดอยู่ในกลุ่มของเทอร์โมเซตติงพอลิเมอร์ (Thermosetting polymer) ซึ่งเป็นพอลิเมอร์ที่เกิดพันธะโควาเลนต์เป็นโครงข่ายของโครงสร้างโมเลกุลบางชนิดเกิดการเชื่อมในแนวขวาง (Cross-linked) ด้วยความร้อนเพียงอย่างเดียว หรือด้วยความร้อนกับความกดดัน เมื่อการขึ้นรูปเสร็จสิ้นหรือเกิดการแข็งตัวด้วยการให้ความร้อน จะไม่สามารถหลอมนำกลับมาใช้ใหม่ได้เมื่อเย็นตัวแล้ว โดยทั่วไปแล้วเทอร์โมเซตติงพอลิเมอร์จะมีคุณสมบัติเด่นๆที่เหมาะสมจะนำมาใช้ในงานวิศวกรรมดังนี้ คือ มีช่วงอุณหภูมิการใช้งานที่กว้าง มีความแข็งแรงสูง สามารถคงรูปได้ดีเนื่องจากการหดตัวหลังจากการแข็งตัวน้อย มีความเป็นฉนวนทางไฟฟ้าที่ดี ทนต่อการกัดกร่อนได้ดี เป็นต้น อีพอกซีเรซินจะเป็นวัสดุประเภทโคพอลิเมอร์ (Copolymer) หมายถึงเป็นพอลิเมอร์ที่ประกอบด้วยมอนอเมอร์ (Monomer) ตั้งแต่ 2 ชนิดขึ้นไปซึ่งโดยปกติแล้วอีพอกซีเรซินจะเกิดจากการทำปฏิกิริยาของ Bisphenol A (รูปที่ 2.1) กับ Epichlorohydrin monomer (รูปที่ 2.2) และสารช่วยให้แข็งตัวซึ่งจัดอยู่ในกลุ่มของโพลีเอมีน (Polyamine) สำหรับ Bisphenol A จะมีสูตรโมเลกุลเป็น $(\text{CH}_3)_2\text{C}(\text{C}_6\text{H}_4\text{OH})_2$ เป็นสารเคมีประเภทโพลีคาร์บอเนต (Polycarbonate) เป็นของแข็งใส ไม่มีสี ไม่แตกหักง่าย สามารถละลายในตัวทำละลายอินทรีย์ Epichlorohydrin monomer จะมีสูตรโมเลกุลเป็น $\text{C}_3\text{H}_5\text{ClO}$ เป็นของเหลวที่ไม่มีสี มีกลิ่นฉุน ติดไฟ

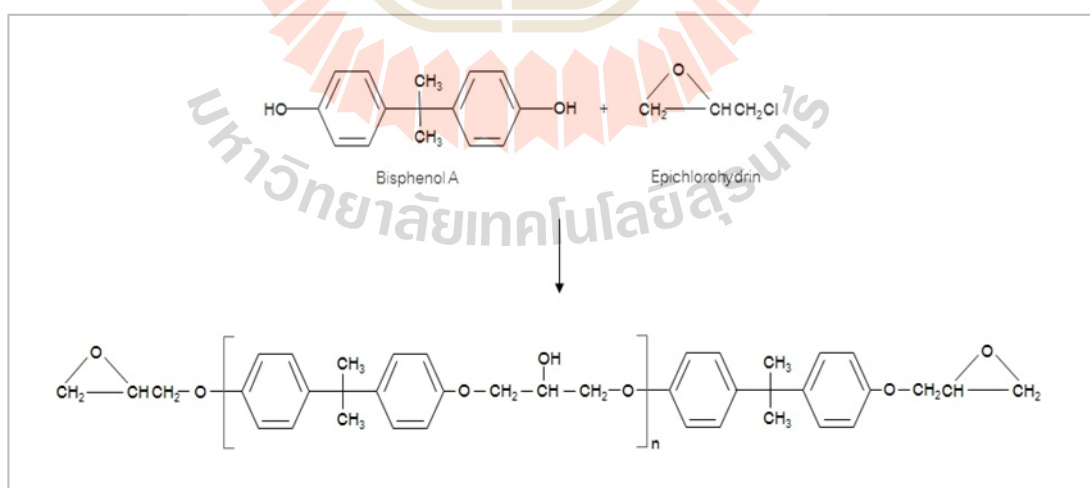
ง่าย สามารถละลายน้ำได้พอประมาณ ตัวอย่างการทำปฏิกิริยาของการสังเคราะห์อีพอกซีเรซินจากสาร Bisphenol A และ Epichlorohydrin monomer จะแสดงดังรูปที่ 2.3 โดยเมื่อ n มีค่าประมาณ 20-30 พอลิเมอร์ที่ได้จากปฏิกิริยาจะเป็นของแข็ง



รูปที่ 2.1 โครงสร้างทางเคมีของ Bisphenol A



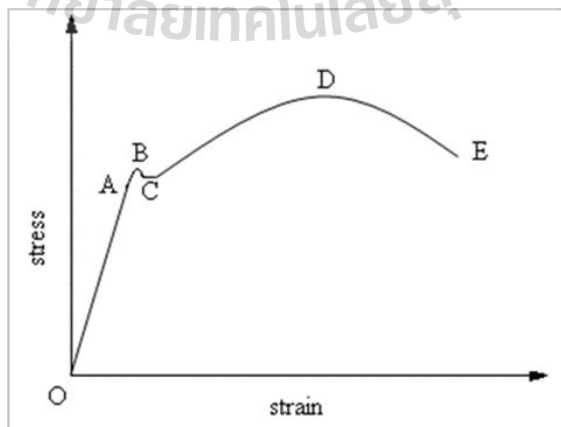
รูปที่ 2.2 โครงสร้างทางเคมีของ Epichlorohydrin



รูปที่ 2.3 โครงสร้างปฏิกิริยาของการสังเคราะห์อีพอกซีเรซิน

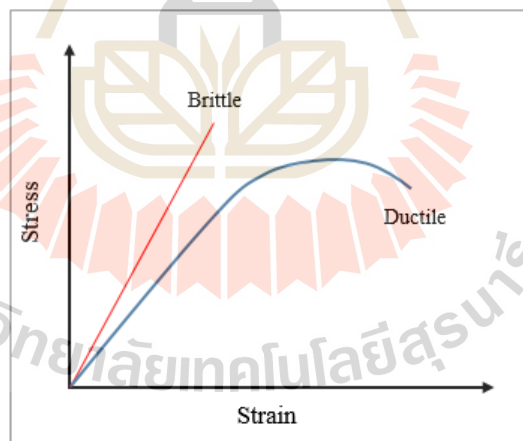
2.3 ความเสียหายของวัสดุ (Failure of materials)

ความเสียหายของวัสดุ (Failure of materials) คือ การเปลี่ยนแปลงรูปร่างหรือขนาดของส่วนต่าง ๆ ของวัสดุที่นำไปสู่ความเสียหายหรือความสูญเสียเช่นการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของวัสดุ (Deformation) เป็นต้น การเปลี่ยนแปลงรูปร่างของวัสดุสามารถแสดงได้จากความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดจากการทดสอบแรงดึง (Tensile test) โดยจะได้กราฟความสัมพันธ์ของความเค้นและความเครียดดังรูปที่ 2.4 จากการศึกษาเส้น โค้งความสัมพันธ์จะพบว่าเมื่อเริ่มดึงขึ้นทดสอบอย่างช้า ๆ ความสัมพันธ์ของความเค้นและความเครียดจะค่อย ๆ เพิ่มขึ้นแบบเชิงเส้นจนถึงจุด A ทำให้ได้เส้น โค้งที่เป็นไปตามกฎของฮุก (Hook's law) ซึ่งกล่าวว่าความเค้นเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเครียดโดยเรียกจุด A ว่าพิภักดิ์สัดส่วน (Proportional limit) และภายใต้สัดส่วนนี้วัสดุจะแสดงพฤติกรรมการเสียรูปแบบยืดหยุ่น (Elastic deformation) คือเมื่อรับแรงกระทำไม่เกินช่วงนี้ หากปล่อยแรงหรือยกเลิกการให้แรงวัสดุจะกลับมามีขนาดเท่าเดิม ไม่เกิดการเสียรูป เมื่อเพิ่มแรงกระทำต่อไปจนถึงจุด A เส้น โค้งความสัมพันธ์จะค่อย ๆ เปลี่ยนจากการเพิ่มขึ้นแบบเชิงเส้นเป็นการเพิ่มขึ้นแบบไม่เป็นเชิงเส้นจนถึงจุด B โดยเรียกจุด B ว่าพิภักดิ์ยืดหยุ่น (Elastic limit) ซึ่งจุดนี้จะ เป็นจุดกำหนดความเค้นสูงสุดที่จะไม่ทำให้เกิดการเสียรูปแบบถาวรของวัสดุ (Plastic deformation) โดยเมื่อความเค้นมีค่าเกินจุด B ไปแล้ววัสดุจะเกิดการเสียรูปอย่างถาวร กล่าวคือเมื่อออกแรงกระทำจนถึงจุด B ไปแล้วหากปล่อยแรงที่กระทำขนาดของวัสดุจะไม่กลับมาเท่ากับขนาดเริ่มต้นอีกแล้ว เนื่องจากเกิดการเสียรูปแบบถาวร โดยจุด B จะขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุ สภาพแวดล้อม อุณหภูมิ เป็นต้น ความเค้นที่จุด B จะเรียกว่าความเค้นคราก (Yield stress) ในวัสดุโลหะหลายชนิดนั้นจะมีการพบ การเกิดขึ้นของจุด C ซึ่งวัสดุจะเกิดการเสียรูปอย่างรวดเร็วโดยความเค้นไม่เพิ่มขึ้นหรือในบางกรณีลดลง



รูปที่ 2.4 กราฟความสัมพันธ์ของความเค้น (Stress) กับความเครียด (Strain)

หลังจากเลยจุดคราก (จุด B) แล้ว วัสดุจะเปลี่ยนรูปแบบพลาสติกโดยความเค้นจะค่อย ๆ เพิ่มขึ้นอย่างช้า ๆ หรืออาจจะคงที่จนถึงจุดสูงสุด (จุด D) ซึ่งค่าความเค้น ณ จุดนี้เรียกว่าความทนทานสูงสุด (Ultimate strength) หรือความเค้นแรงดึง (Tensile strength) ซึ่งเป็นค่าความเค้นสูงสุดที่วัสดุจะทนได้ก่อนที่จะขาดหรือแตกออกจากกัน ณ จุด E สำหรับวัสดุบางชนิดวัสดุจะเสียหายทันทีเมื่อเลยช่วงการเสียรูปแบบอลาสติก (ก่อนจุด D) จะเรียกพฤติกรรมการแตกหักเช่นนี้ว่าการแตกแบบเปราะ (Brittle fracture) ดังรูปที่ 2.5 วัสดุที่แสดงพฤติกรรมการแตกหักเช่นนี้จะเรียกว่าวัสดุเปราะ (Brittle materials) ส่วนมากจะเกิดขึ้นกับวัสดุจำพวก เซรามิก โลหะที่ผ่านกระบวนการทางความร้อน พอลิเมอร์บางชนิด เป็นต้น เมื่อพิจารณาพื้นที่หน้าตัดของผิวรอยแตกจะไม่เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงขนาดหน้าตัดก่อนการแตกหักหรือเปลี่ยนแปลงน้อยมากและไม่แสดงถึงการยืดตัวให้เห็น สำหรับวัสดุที่แสดงพฤติกรรมในเส้นโค้งครบทุกจุดหรือแสดงพฤติกรรมถึงจุด D แล้วจึงแตกหักจะเรียกพฤติกรรมการแตกเช่นนี้ว่าการแตกแบบเหนียว (Ductile fracture) ดังรูปที่ 2.5 เช่นเดียวกัน วัสดุที่แสดงพฤติกรรมเช่นนี้จะเรียกว่าวัสดุเหนียว (Ductile materials) เมื่อพิจารณาพื้นที่หน้าตัดของผิวรอยแตกจะพบถึงการเปลี่ยนแปลงขนาดก่อนเกิดการแตกหักหรือพบการยืดตัวเกิดขึ้นกับวัสดุ



รูปที่ 2.5 กราฟความสัมพันธ์ของความเค้นกับความเครียดของวัสดุเปราะและเหนียว

การเปลี่ยนแปลงรูปร่างของวัสดุเป็นความเสียหายที่ส่งผลให้รูปร่างหรือพื้นที่หน้าตัดของวัสดุเปลี่ยนแปลงไป ทำให้ภาระที่เกิดขึ้นในวัสดุเกิดความคลาดเคลื่อนจากที่ได้ออกแบบและคำนวณไว้ ซึ่งอาจจะเกิดความเสียหายตามมา การเปลี่ยนแปลงรูปร่างแบ่งได้เป็น 2 ประเภท คือ

2.3.1 การเปลี่ยนแปลงรูปร่างที่ไม่ขึ้นอยู่กับเวลา (Time independent) เป็นลักษณะที่การเปลี่ยนแปลงรูปร่างของวัสดุเกิดจากแรงที่กระทำในทันที สามารถแบ่งได้เป็น

2.3.1.1 การเปลี่ยนแปลงรูปร่างแบบยืดหยุ่น (Elastic deformation) เป็นการเปลี่ยนแปลงรูปร่างหรือขนาดที่สามารถกลับคืนรูปร่างหรือขนาดเดิมได้ทันทีเมื่อหยุดหรือยกเลิกแรงที่ทำการกระทำนั้นต่อวัสดุ

2.3.1.2 การเปลี่ยนแปลงรูปร่างแบบถาวร (Plastic deformation) เป็นการเปลี่ยนแปลงรูปร่างหรือขนาดอย่างถาวรของวัสดุที่มีแรงกระทำถึงแม้ว่าจะหยุดหรือยกเลิกแรงที่กระทำนั้นแล้วก็ตามวัสดุจะไม่สามารถกลับคืนรูปร่างหรือขนาดเดิมได้ การเปลี่ยนแปลงรูปร่างเช่นนี้จะเกิดขึ้นเมื่อแรงที่กระทำมีค่ามากกว่า จุดคราก (Yield point) ของวัสดุชนิดนั้น

2.3.2 การเปลี่ยนแปลงรูปร่างที่ขึ้นอยู่กับเวลา (Time dependent deformation) หรือการคืบ (Creep) เป็นการสะสมของการเปลี่ยนแปลงขนาดหรือรูปร่างของชิ้นงานที่เพิ่มขึ้นตามระยะเวลาเมื่อมีแรงกระทำโดยความรุนแรงของความคืบขึ้นอยู่กับความเครียด เวลา อุณหภูมิและคุณสมบัติของวัสดุ เป็นต้น

2.4 องค์ประกอบของกลศาสตร์การแตกหัก

เมื่อวัสดุที่มีรอยร้าวรับภาระ บริเวณปลายรอยร้าวจะเสียดรูปมากกว่าบริเวณที่อยู่ห่างออกไป จึงมีโอกาสเสียหายก่อนบริเวณอื่น การศึกษาผลกระทบของรอยร้าวต่อความแข็งแรงของวัสดุจึงเน้นที่สนามความเค้น-ความเครียดบริเวณปลายรอยร้าวเป็นหลัก นอกจากนี้รอยร้าวยังสามารถเติบโตได้ในสภาวะการใช้งาน สภาพการณ์ทั้งหมดนี้จึงทำให้หลักการของกลศาสตร์การแตกหักประกอบด้วยองค์ประกอบ 4 ส่วนคือ

2.4.1 พารามิเตอร์ปลายรอยร้าว (Crack tip parameter) สำหรับแสดงระดับความรุนแรงที่เกิดกับวัสดุที่บริเวณปลายรอยร้าว

2.4.2 ความต้านทานการแตกหัก (Fracture toughness) หรือค่าวิกฤติของพารามิเตอร์ปลายรอยร้าวสำหรับแสดงความสามารถของวัสดุที่จะต้านทานการเติบโตของรอยร้าวจากขนาดรอยร้าวเริ่มต้น

2.4.3 เกณฑ์การแตกหัก (Fracture criteria) สำหรับตรวจสอบว่าเกิดการแตกหักหรือไม่ หรือใช้คำนวณว่าการแตกหักจะเกิดขึ้นเมื่อรอยร้าวมีขนาดเท่าใดหรือเกิดขึ้นเมื่อรับภาระเท่าใด

2.4.4 สหสัมพันธ์ (Correlation) ระหว่างอัตราการเติบโตของรอยร้าว (ตามรูปแบบความเสียหาย เช่น ความล้า การคืบ การผุกร่อน ฯลฯ) กับพารามิเตอร์ปลายรอยร้าว สำหรับคำนวณเวลาหรือจำนวนรอบที่รอยร้าวเติบโตจากความยาวค่าหนึ่งไปสู่อีกค่าหนึ่ง

พารามิเตอร์ปลายรอยร้าวเป็นฟังก์ชันของ ขนาด รูปร่าง ลักษณะการวางตัวของรอยร้าว ตำแหน่งของรอยร้าวบนวัตถุ ขนาดภาระ ชนิดของภาระ รูปทรงเรขาคณิตของวัตถุ ฯลฯ ความต้านทานการแตกหักขึ้นอยู่กับชั้นของวัสดุ สถานะความเค้นที่ปลายรอยร้าว (ความเค้นระนาบหรือ

ความเครียดระนาบ) รูปแบบของการเสียรูปที่ปลายรอยร้าว อัตราเร็วของการเสียรูป อุณหภูมิ สภาพแวดล้อม กรรมวิธีทางความร้อน เป็นต้น ความต้านทานการแตกหักนับเป็นคุณสมบัติของวัสดุ เพราะว่ามันขึ้นอยู่กับขนาดและรูปร่างของชิ้นทดสอบที่ใช้หาค่าดังกล่าว ดังนั้นความต้านทานการแตกหักจากชิ้นทดสอบจึงสามารถนำไปใช้กับโครงสร้างจริงได้ แต่มีเงื่อนไขว่าสภาวะทดสอบ (รูปแบบของการเสียรูปที่ปลายรอยร้าว สถานะความเค้น อุณหภูมิ สภาพแวดล้อม ฯลฯ) ต้องเหมือนกับสภาวะการใช้งานจริงของโครงสร้าง

2.5 กลศาสตร์การแตกหักยืดหยุ่นเชิงเส้น (Linear elastic fracture mechanics)

กลศาสตร์การแตกหักยืดหยุ่นเชิงเส้น (Linear elastic fracture mechanics, LEFM) (Jirapong 2010) ศึกษาการแตกหักของวัสดุที่มีรอยร้าวที่บริเวณรอยร้าวของวัสดุเกิดการเสียรูปแบบยืดหยุ่นเชิงเส้น (ไม่มีการครากเกิดขึ้น) ดังนั้นโดยหลักแล้วกลศาสตร์การแตกหักยืดหยุ่นเชิงเส้น จึงเหมาะกับการวิเคราะห์วัสดุที่มีพฤติกรรมการแตกหักแบบเปราะเท่านั้น อย่างไรก็ตามก็ตีข้อมูลจากการทดสอบการแตกหักของชิ้นส่วนที่มีรอยร้าว แสดงให้เห็นว่ากลศาสตร์การแตกหักยืดหยุ่นเชิงเส้น สามารถทำนายการแตกหักในกรณีที่ปลายรอยร้าวมีบริเวณครากขนาดเล็กเมื่อเทียบกับความยาวรอยร้าวและมิติระนาบ (Planar dimension) ของวัสดุได้ แต่อาจจะต้องปรับแก้ค่าของพารามิเตอร์ปลายรอยร้าวเนื่องจากผลของบริเวณคราก สำหรับการแตกหักแบบเปราะเมื่อภาระถึงค่าวิกฤติรอยร้าวจะเติบโตจากขนาดเริ่มต้นอย่างรวดเร็วจนทำให้ชิ้นส่วนเสียหาย เนื่องจากอัตราการเติบโตสูงมากจึงเรียกว่าการเติบโตอย่างไร้เสถียรภาพ (Unstable growth) สำหรับวัสดุที่มีความเหนียวพอสมควร เช่น เหล็กกล้าความแข็งแรงสูงหรือวัสดุที่มีสถานะที่ปลายรอยร้าวเป็นแบบความเค้นระนาบ (Plane stress) นั้น เมื่อภาระเพิ่มขึ้นถึงค่าวิกฤติ รอยร้าวจะเติบโตจากความยาวเดิมด้วยอัตราเร็วที่ต่ำกว่ากรณีการแตกหักแบบเปราะอย่างมาก รอยร้าวจะเติบโตเป็นระยะทางหนึ่งแล้วจะหยุด การเติบโตของรอยร้าวในลักษณะนี้เรียกว่า การเติบโตอย่างมีเสถียรภาพ (Stable growth) ขณะที่เพิ่มภาระขึ้นเรื่อยๆ รอยร้าวก็จะเติบโตต่อไปอย่างมีเสถียรภาพ จนกระทั่งภาระเพิ่มขึ้นถึงขีดจำกัดค่าหนึ่งรอยร้าวก็จะเติบโตอย่างไร้เสถียรภาพในที่สุด การวิเคราะห์เสถียรภาพของรอยร้าวในกรณีที่ขนาดบริเวณครากยังไม่ขัดแย้งกับเงื่อนไขของของกลศาสตร์การแตกหักยืดหยุ่นเชิงเส้นนั้นสามารถใช้พารามิเตอร์ปลายรอยร้าวของกลศาสตร์การแตกหักยืดหยุ่นเชิงเส้นได้ ซึ่งสามารถหาพารามิเตอร์ที่ปลายรอยร้าวของกลศาสตร์การแตกหักยืดหยุ่นเชิงเส้นได้ดังนี้

2.5.1 แนวทางพลังงาน

ปีค.ศ. 1921 A.A. Griffith นักวิทยาศาสตร์ชาวอังกฤษได้เสนอวิธีพลังงานสำหรับทำนายความเค้นแตกหักซึ่งเป็นการวิเคราะห์ห้วงกว้าง (Global analysis) เพราะพิจารณาการเปลี่ยนแปลงพลังงานศักย์ของวัตถุทั้งชิ้นเนื่องจากการเติบโตของรอยร้าว โดยกำหนดเกณฑ์การ

แตกหักของวัสดุไว้ดังนี้ เกณฑ์การแตกหักของวัสดุตามกฎทรงพลังงาน (Conservation of energy theorem) ที่กล่าวไว้ว่า สำหรับวัตถุที่ไม่มีรอยร้าว งานของภาระภายนอก (External work: W) ที่กระทำต่อวัตถุ จะไม่สูญหายแต่จะสะสมในรูปพลังงานความเครียด (Strain energy: U) ภายในวัตถุ ดังนั้น

$$W = U \quad (2.1)$$

สำหรับวัตถุที่มีรอยร้าว งานของแรงภายนอก (W) จะสะสมอยู่ในรูปพลังงานความเครียด (U) และใช้ไปกับการสร้างผิวรอยร้าวใหม่ (W_s) เนื่องจากพิจารณาขณะที่รอยร้าวเติบโตจากขนาดเริ่มต้น กฎทรงพลังงานจึงต้องเขียนอยู่ในรูปของการเปลี่ยนแปลงเทียบกับพื้นที่รอยร้าว (dA) ดังนี้

$$\frac{dW}{dA} = \frac{dU}{dA} + \frac{dW_s}{dA} \quad (2.2)$$

$$\frac{d}{dA}(W - U) = \frac{dW_s}{dA} \quad (2.3)$$

ซึ่งสมการที่ (2.3) ใช้คำนวณหาสถานะที่รอยร้าวเริ่มต้นเติบโตจากความยาวเดิม ซึ่งในกรณีของการแตกหักแบบเปราะ สถานะนี้คือสถานะที่ชิ้นส่วนแตกหักโดยสมบูรณ์ ดังนั้นสมการนี้ก็คือ เกณฑ์การแตกหัก (Fracture criteria) จากนิยามของพลังงานศักย์รวม (Total potential energy: Π)

$$\Pi = U - W \quad (2.4)$$

จะเขียนสมการได้เป็น

$$-\frac{d\Pi}{dA} = \frac{dW_s}{dA} \quad (2.5)$$

เนื่องจากเทอมทางขวามือเป็นบวกเสมอ ดังนั้นพลังงานศักย์รวมของระบบจะลดลงเมื่อรอยร้าวเติบโต ในปี ค.ศ.1956 Irwin เรียกเทอมด้านซ้ายของสมการที่ (2.4) หรือสมการที่ (2.5) ว่าอัตราการปลดปล่อยพลังงาน (Energy release rate, G^2) แต่ในปัจจุบันนิยมเรียกว่าแรงขับเคลื่อน

รอยร้าว (Crack driving force) และเรียกเทอมด้านขวามือว่าความต้านทานการเติบโตของรอยร้าว (Crack growth resistance, R) ดังนั้น

$$G = \frac{dW}{dA} - \frac{dU}{dA} = \frac{d\Pi}{dA} \quad (2.6)$$

และ

$$R = \frac{dW_s}{dA} \quad (2.7)$$

เกณฑ์การแตกหัก (Fracture criteria) จึงเขียนได้เป็น

$$G = R \quad (2.8)$$

เมื่อรอยร้าวเริ่มเติบโตจากความยาวเดิมตามเงื่อนไขในสมการที่ (2.8) การเติบโตจะมีเสถียรภาพหรือไม่ขึ้นอยู่กับอัตราการเปลี่ยนแปลงของ G และ R เทียบกับพื้นที่รอยร้าวหรือ dG/dA และ dR/dA โดย

$$\frac{dG}{dA} > \frac{dR}{dA} \quad \text{แล้วการเติบโตจะไร้เสถียรภาพ} \quad (2.9)$$

$$\frac{dG}{dA} < \frac{dR}{dA} \quad \text{แล้วการเติบโตจะมีเสถียรภาพ} \quad (2.10)$$

$$\frac{dG}{dA} = \frac{dR}{dA} \quad \text{แล้วยังบอกไม่ได้ว่าเติบโตแบบใด} \quad (2.11)$$

2.5.2 ตัวประกอบความเข้มของความเค้น (Stress intensity factor)

ตัวประกอบความเข้มของความเค้น (Stress intensity factor, K) เป็นพารามิเตอร์ที่แสดงถึงความรุนแรงหรือขนาดของความเค้นที่เกิดขึ้นในบริเวณใกล้เคียงปลายรอยร้าว พารามิเตอร์นี้จะถูกใช้ในสภาพของกลศาสตร์การยืดหยุ่นเชิงเส้นเท่านั้น ขนาดของตัวประกอบความเข้มของความเค้นขึ้นอยู่กับหลายปัจจัยด้วยกัน อาทิเช่น รูปร่างของชิ้นงาน ขนาดของภาระที่กระทำ รูปแบบ

ของภาระ ขนาดของรอยร้าวเป็นต้น โดยทั่วไปแล้วตัวประกอบความเข้มของความเค้นสามารถคำนวณได้ด้วยสมการต่อไปนี้

$$K = \sigma \cdot F \cdot \sqrt{\pi a} \quad (2.12)$$

เมื่อ σ แทนภาระความเค้นที่กระทำกับรอยร้าว
 F แทนสมการรูปร่างของชิ้นงาน (Geometry function) ซึ่งขึ้นอยู่กับรูปร่างของชิ้นงาน
 a แทนความยาวของรอยร้าว

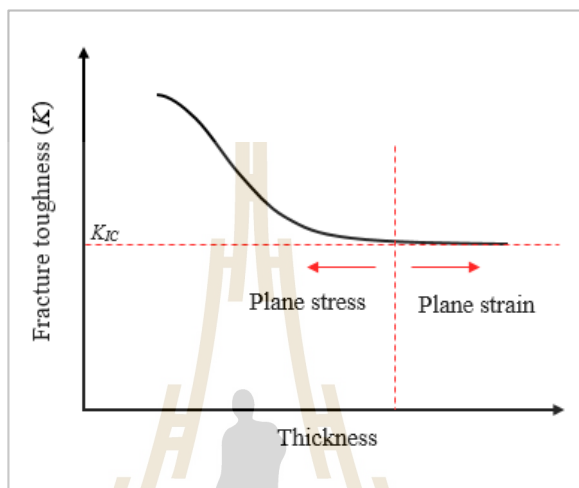
เมื่อขนาดของตัวประกอบความเข้มของความเค้นถึงค่าวิกฤต (Critical stress intensity factor, K_C) จะก่อให้เกิดความไม่เสถียรของการแตกหัก ค่าวิกฤตของตัวประกอบความเข้มของความเค้นนี้เรียกว่า ค่าความต้านทานการแตกหักของวัสดุ (Fracture toughness) โดยความต้านทานการแตกหักจะแสดงถึงความสามารถในการรับภาระของชิ้นงานที่มีรอยร้าวตามทฤษฎีกลศาสตร์การแตกหักยืดหยุ่นเชิงเส้น ความต้านทานการแตกหักสามารถพิจารณาเป็นขีดจำกัดในการออกแบบของขนาดของตัวประกอบความเข้มของความเค้น สำหรับวัสดุที่มีรอยร้าวในลักษณะเช่นเดียวกับการพิจารณาความเค้นครากที่เป็นขีดจำกัดของความเค้นในการออกแบบสำหรับวัสดุภายใต้การรับภาระสถิตย์ (Static load) โดยมีเงื่อนไขในการพิจารณาดังนี้

$$K_I \geq K_{IC} \quad \text{เกิดการแตกหัก} \quad (2.13)$$

$$K_I < K_{IC} \quad \text{ไม่เกิดการแตกหัก} \quad (2.14)$$

ค่าความต้านทานการแตกหักนี้มีความสัมพันธ์กับขนาดความยาวรอยร้าว ขนาดภาระและความเค้นที่กระทำ กล่าวคือ เมื่อความยาวรอยร้าวในชิ้นงานมีค่ามากขึ้น จะทำให้ความสามารถในการรับภาระของชิ้นงานลดน้อยลงและเมื่อรอยร้าวที่มีความยาวถึงความยาวรอยร้าววิกฤต (Critical crack length) ภายใต้ภาระในขณะนั้น จะทำให้ชิ้นงานไม่สามารถรับภาระได้อีกต่อไป โดยก่อให้เกิดการเสียหายของชิ้นงานทันที เมื่อภาระความเค้นที่กระทำต่อชิ้นงานมีค่ามาก จะมีโอกาสทำให้ชิ้นงานเกิดการแตกร้าวได้มากกว่าชิ้นงานที่อยู่ภายใต้ภาระที่ต่ำกว่า สำหรับชิ้นงานที่มีมิติความกว้าง ความสูง และความยาวเท่ากัน เมื่อความหนาของชิ้นงานเปลี่ยนแปลงไป ความต้านทานการแตกหักจะแตกต่างกันออกไป โดยหากทำการทดลองในชิ้นงานที่มีความหนาจากน้อยไปมาก จะพบว่าเมื่อชิ้นงานมีขนาดบางค่าความต้านทานการแตกหักจะมีค่าสูงและค่าความต้านทาน

การแตกหักจะมีค่าลดลงเมื่อความหนาของชิ้นงานเพิ่มขึ้น แต่เมื่อชิ้นงานมีความหนามากขึ้นจนกระทั่งเกิดสภาวะความเครียดระนาบ (Plane strain) แล้วค่าความต้านทานการแตกหักจะมีค่าคงที่ แม้ว่าจะเพิ่มความหนาให้แก่ชิ้นงานอีกก็ตามดังแสดงในรูป 2.6 โดยความต้านทานการแตกหักภายใต้สภาวะความเครียดระนาบนี้จะไม่ขึ้นกับรูปร่างของชิ้นงาน



รูปที่ 2.6 ผลกระทบของความหนาต่อความต้านทานการแตกหัก

สภาพความเค้นแบบระนาบ (Plane stress) เป็นสภาพที่วัสดุมีความเค้นในระนาบ 2 มิติ เท่านั้น ซึ่งมักจะเกิดในกรณีที่วัสดุสามารถเปลี่ยนแปลงขนาดหรือความเครียดได้อย่างอิสระในแนวตั้งฉากกับระนาบจึงส่งผลให้เกิดสภาพความเครียดแบบ 3 มิติขึ้น โดยเกิดในชิ้นส่วนทางวิศวกรรมที่มีลักษณะบาง ขณะที่สภาพความเครียดแบบระนาบเป็นสภาพที่วัสดุมีความเครียดในระนาบ 2 มิติเท่านั้น ซึ่งมักจะเกิดในกรณีที่วัสดุไม่สามารถเปลี่ยนแปลงขนาดหรือความเครียดได้อย่างอิสระในแนวตั้งฉากกับระนาบจึงส่งผลให้เกิดสภาพความเค้นแบบ 3 มิติขึ้น โดยมักเกิดในชิ้นส่วนทางวิศวกรรมที่มีลักษณะหนา การเปรียบเทียบสภาพความเค้นระนาบและสภาพความเครียดระนาบเมื่อพิจารณาค่าตัวประกอบความเข้มของความเค้นภายใต้ภาระโหมดที่ 1 (K_{I0}) ของวัสดุต่างๆ พบว่าค่า K_{I0} จะมีค่าต่ำหรือเกิดการแตกหักแบบเปราะได้ง่าย ในกรณีสภาพความเครียดระนาบหรือชิ้นส่วนทางวิศวกรรมที่มีลักษณะหนา เนื่องจากในสภาพเครียดแบบระนาบจะส่งผลให้เกิดสภาพความเค้นแบบ 3 มิติที่ส่วนปลายของรอยร้าวซึ่งเป็นสภาพที่รุนแรง (ค่า K_{I0} ต่ำ) กว่าสภาพความเค้น 2 มิติ ในกรณีความเค้นระนาบ ดังนั้นค่า K_{I0} ของวัสดุในกรณีความเครียดระนาบจึงถูกใช้ในการออกแบบและวิเคราะห์ความต้านทานการแตกหักของชิ้นส่วน

ขอบเขตของกลศาสตร์แตกหักยืดหยุ่นเชิงเส้นหรือเงื่อนไขที่ทำให้ตัวประกอบความเข้มของความเค้นนั้นไม่สามารถระบุความเค้นหรือความเครียดบริเวณปลายรอยร้าวของวัสดุได้อย่างแม่นยำจะเกิดขึ้นเมื่อขนาดบริเวณเสียดรูปพลาสติก (Plastic zone size) ใหญ่กว่ามิติรูปร่างที่เล็กที่สุดของวัสดุ โดยขอบเขตของตัวประกอบความเข้มของความเค้นจะขึ้นอยู่กับรูปร่างของวัตถุ ความยาวรอยร้าว ชนิดของภาระที่มากกระทำกับวัตถุ เป็นต้น สำหรับการคำนวณหาขอบเขตกลศาสตร์แตกหักยืดหยุ่นเชิงเส้นนั้นมีด้วยกันหลายวิธีทั้งการเปรียบด้วยกราฟหรือการวิเคราะห์ด้วยสมการ โดยสมการที่ใช้สำหรับการคำนวณขอบเขตของกลศาสตร์การแตกหักยืดจะแสดงดังสมการที่ 2.15

$$\left. \begin{matrix} B \\ a \\ b \\ h \end{matrix} \right\} \geq 2.5 \left(\frac{K_I}{\sigma_Y} \right)^2 \quad (2.15)$$

เมื่อ	B	คือความหนาของวัตถุ
	a	คือความยาวรอยร้าว
	b	คือระยะจากปลายรอยร้าวถึงขอบวัตถุ
	h	คือระยะตั้งฉากจากระนาบรอยร้าวถึงขอบวัตถุ

2.6 กลศาสตร์การแตกหักอีลาสติก-พลาสติก (Elastic-plastic fracture mechanics)

กลศาสตร์การแตกหักแบบยืดหยุ่นเชิงเส้นนั้นจะมุ่งศึกษาการแตกหักของวัสดุที่บริเวณการเสียดรูปที่ปลายรอยร้าวในช่วงของการยืดหยุ่นเชิงเส้นเท่านั้นหรือเกิดการครากขึ้นเล็กน้อยจึงเหมาะกับวัสดุเปราะเป็นหลักทำให้กรณีที่วัสดุเกิดการเสียดรูปสูงหรือมีความเหนียวสูง กลศาสตร์การแตกหักแบบยืดหยุ่นเชิงเส้นจึงไม่สามารถที่จะใช้ได้ สำหรับกลศาสตร์การแตกหักอีลาสติก-พลาสติก (Elastic plastic fracture mechanics, EPFM) จึงมุ่งเน้นศึกษาการแตกหักของวัสดุที่มีความเหนียวสูงหรือมีการครากเกิดขึ้นก่อนการแตกหักซึ่งแนวคิดของกลศาสตร์การแตกหักอีลาสติก-พลาสติกนั้นจะคล้ายกับของกลศาสตร์การแตกหักแบบยืดหยุ่นเชิงเส้นแต่จะต่างกันตรงพารามิเตอร์ที่ใช้บ่งบอกความรุนแรงของรอยร้าวที่เกิดขึ้น สำหรับพารามิเตอร์ที่ใช้ในงานวิจัยชิ้นนี้จะแสดงดังหัวข้อต่อไปนี้

2.6.1 พารามิเตอร์ J -อินทิกรัล

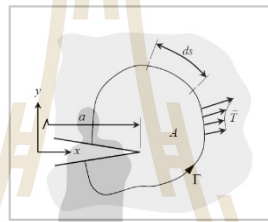
นิยามของพารามิเตอร์ J -อินทิกรัล (J -Integral, J_C) ของรอยร้าวทะลุความหนาในวัสดุที่มีความหนา (B) คงที่จะแสดงดังรูปที่ 2.7 และสมการดังต่อไปนี้

$$J = \int_{\Gamma} \left(U dy - T_i \frac{\partial u_i}{\partial x} ds \right) \tag{2.16}$$

โดย Γ คือเส้นทางจากขอบด้านหนึ่งของรอยร้าวถึงขอบตรงข้าม โดยวนทวนเข็มนาฬิกา
 U คือพลังงานความเครียดหนาแน่นดังสมการที่ (2.17)

$$(U = \int \sigma_{ij} d\varepsilon_{ij}) \tag{2.17}$$

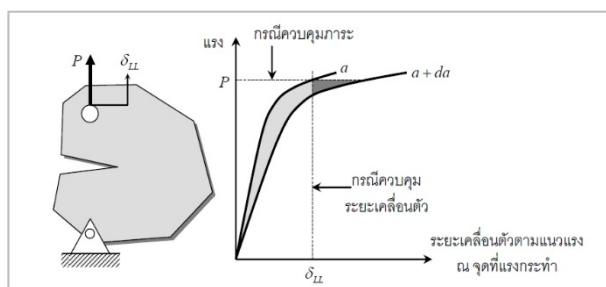
T_i คือแรงผิว (Surface force)



รูปที่ 2.7 ความหมายของสัญลักษณ์ในนิยามของพารามิเตอร์ J -อินทิกรัล

เนื่องจากพารามิเตอร์ J -อินทิกรัลสร้างจากทฤษฎียืดหยุ่นที่ไม่เชิงเส้นจึงเทียบเท่ากับการเสียรูปแบบอีลาสติก-พลาสติกเฉพาะช่วงให้ภาระ (Loading) เท่านั้น ทำให้สมการที่ (2.16) สามารถพิสูจน์ว่าเท่ากับความสัมพันธ์ต่อไปนี้

$$J = - \frac{1}{B} \frac{d\Pi}{da} \tag{2.18}$$



รูปที่ 2.8 อัตราการปลดปล่อยพลังงานยืดหยุ่นไม่เชิงเส้น

รูปที่ 2.8 แสดงการหาค่า J -อินทิกรัลจากสมการที่ (2.18) จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างภาระกับระยะเคลื่อนตัว ณ จุดที่ภาระกระทำของวัตถุสองชิ้นที่มีรอยร้าวยาว a และ $a + da$ ตามลำดับ ถ้าการทดสอบเป็นแบบควบคุมระยะเคลื่อนตัวแล้วงานของแรงภายนอกจะเท่ากับศูนย์ ดังนั้นพลังงานศักย์ของวัตถุ คือ $\Pi = U$ แทนในสมการที่ (2.18) จะได้

$$J = -\frac{1}{B} \frac{dU}{da} \quad (2.19)$$

รูปที่ 2.8 พลังงานความเครียด U คือ $U = \int P d\delta_{LL}$ (2.20)

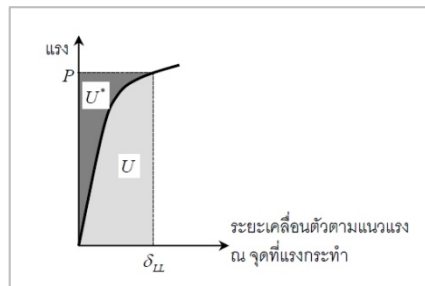
แทนที่ (2.20) ใน (2.19) จะได้ $J = -\frac{1}{B} \int \left(\frac{\partial P}{\partial a} \right)_{\delta_{LL}} d\delta_{LL}$ (2.21)

ถ้าเป็นการทดสอบแบบควบคุมภาระ พลังงานศักย์ของวัตถุคือ $\Pi = U - W$ โดย $W = P\delta_{LL}$ จากรูปที่ 2.8 จะได้ว่า $\Pi = U^*$ โดยที่ U^* คือพลังงานความเครียดเต็มเต็ม (Complementary strain energy)

แทนในสมการที่ (2.18) จะได้ $J = \frac{1}{B} \frac{\partial U^*}{\partial a}$ (2.22)

รูปที่ 2.9 $U^* = \int \delta_{LL} dP$ (2.23)

แทนในสมการที่ (2.22) จะได้ $J = \frac{1}{B} \int \left(\frac{\partial \delta_{LL}}{\partial a} \right)_P dP$ (2.24)



รูปที่ 2.9 นิยามของพลังงานความเครียด (U) และพลังงานความเครียดเต็มเต็ม (U^*)

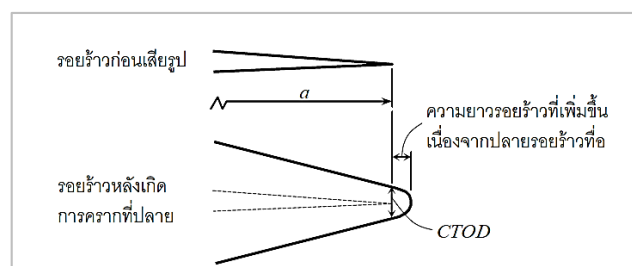
แม้ว่าพลังงานศักย์รวมในการทดสอบทั้งสองแบบจะแตกต่างกันเล็กน้อย โดยที่การทดสอบแบบควบคุมภาระจะมีพื้นที่ที่แรงเพิ่มขึ้น (รูปที่ 2.9) เพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามความแตกต่างของความยาวรอยร้าวมีค่าน้อยแล้ว J -อินทิกรัลจากทั้งสองแบบถือว่ามีค่าเท่ากันและในกรณีที่เป็น การเสีรูปที่ปลายรอยร้าวแบบยึดหยุ่นเชิงเส้นแล้ว

$$J \equiv G$$

(2.25)

2.6.2 ระยะเปิดที่ปลายรอยร้าว (Crack tip opening displacement)

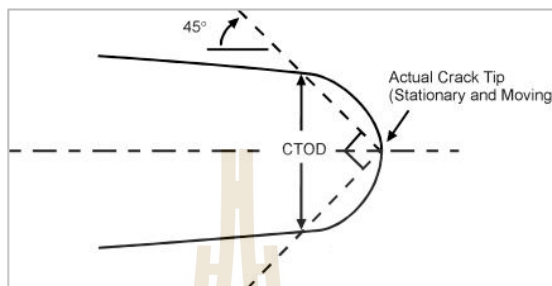
ระยะเปิดที่ปลายรอยร้าว (Crack tip opening displacement, CTOD) จัดเป็น พารามิเตอร์ปลายรอยร้าวอีกตัวหนึ่งที่สามารถบ่งชี้ความรุนแรงในวัสดุที่บริเวณปลายรอยร้าวได้ ขอบเขตการใช้งานของพารามิเตอร์ $CTOD$ จะครอบคลุมตั้งแต่ช่วงยึดหยุ่นเชิงเส้นถึงช่วงการคราก ขนาดใหญ่ (Large-scale yielding) เมื่อบริเวณเสีรูปพลาสติกทำให้รอยร้าวที่อืดและยาวขึ้น (การที่อืด ไม่ใช่การเติบโตรอยร้าว) ดังรูปที่ 2.10 ดังนั้น $CTOD$ จึงหมายถึงระยะระหว่างผิวหน้ารอยร้าวก่อน ครากหรือกล่าวคือระยะที่ปลายรอยร้าวเปิดตัวออกจากกัน



รูปที่ 2.10 นิยามของพารามิเตอร์ $CTOD$

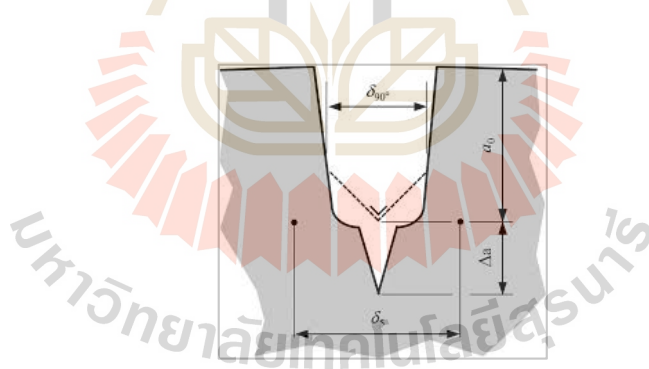
สำหรับพารามิเตอร์ $CTOD$ นั้นมีวิธีการคำนวณหลากหลายแบบด้วยกันแต่ส่วนใหญ่มักจะนิยมใช้การคำนวณหลัก ๆ สองวิธีด้วยกันคือ

2.6.2.1 การคำนวณด้วยการวัดระยะห่างของจุดที่ทำมุม 45° จากปลายรอยร้าวหรือที่เรียกว่า $CTOD_{45}$ ดังรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 การคำนวณ $CTOD_{45}$

2.6.2.2 การคำนวณด้วยการวัดระยะห่างจากจุดสองจุดที่ห่างกัน 5 มิลลิเมตรในแนวเดียวกับปลายรอยร้าวหรือที่เรียกว่า Delta 5 (δ_5) ดังรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 การคำนวณ Delta 5

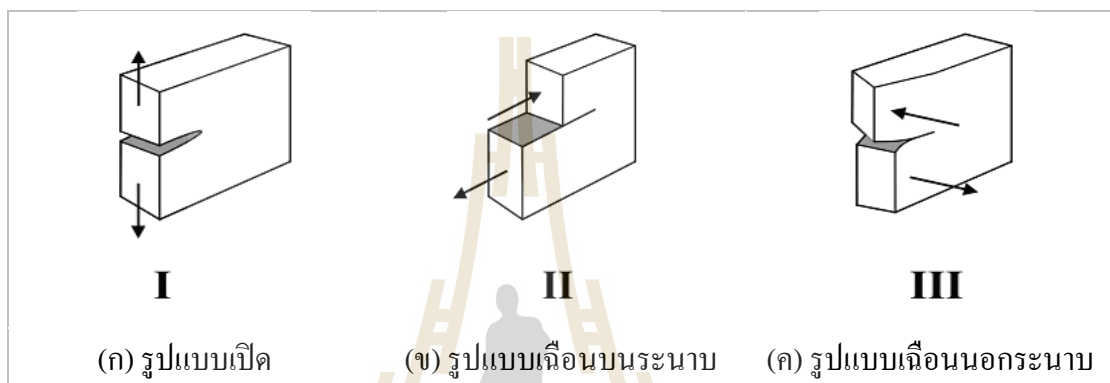
2.7 การวิเคราะห์ความเค้นที่ปลายรอยร้าว

การนิยามรูปแบบของการเสียรูปที่ปลายรอยร้าว พิจารณาจากทิศทางการเคลื่อนตัวของระนาบรอยร้าวเทียบกับระนาบรอยร้าวหรือขอบหน้ารอยร้าวเดิม นิยามดังกล่าวจะแบ่งรูปแบบของการเสียรูปออกเป็น 3 รูปแบบ ดังนี้

2.7.1 รูปแบบที่ 1 (Mode I) หรือรูปแบบเปิด (Opening mode) ในรูปแบบนี้ผิวของรอยร้าวจะเคลื่อนตัวตั้งฉากกับระนาบของรอยร้าวเดิมดังรูปที่ 2.13 (ก)

2.7.2 รูปแบบที่ 2 (Mode II) หรือรูปแบบเฉือนบนระนาบ (In-plane shear mode) หรือรูปแบบการไถล (Sliding mode) ในรูปแบบนี้ผิวของรอยร้าวจะเคลื่อนที่สัมพันธ์กันในทิศตั้งฉากกับขอบหน้ารอยร้าวเดิมดังรูปที่ 2.13 (ข)

2.7.3 รูปแบบที่ 3 (Mode III) หรือรูปแบบเฉือนนอกระนาบ (Out-of-plane shear mode) หรือรูปแบบการฉีก (Tearing mode) ในรูปแบบนี้ผิวของรอยร้าวจะเคลื่อนที่สัมพันธ์กันในทิศทางขนานกันกับขอบหน้ารอยร้าวเดิมดังรูปที่ 2.13 (ค)



รูปที่ 2.13 รูปแบบการเสีรูปที่ปลายรอยร้าวของวัสดุ

2.8 การหาผลเฉลยพารามิเตอร์ความต้านทานการแตกหักด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

ปัจจุบันมีการใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขอย่างเช่น วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อหาผลเฉลยของพารามิเตอร์ความต้านทานการแตกหักอย่างกว้างขวาง วิธีเชิงตัวเลขนั้นจะมีบทบาทสำคัญเมื่อวัตถุมีรูปร่างซับซ้อนหรือมีเงื่อนไขขอบเขตซับซ้อน โปรแกรมช่วยวิเคราะห์ทางวิศวกรรมสำเร็จรูป อย่างเช่น โปรแกรม ANSYS หรือ โปรแกรม ABAQUS จะมีรูทีน (Routine) หาผลเฉลยของความต้านทานการแตกหักบรรจุอยู่แล้ว ผู้ใช้จึงไม่ต้องเสียเวลานำข้อมูลความเค้นหรือระยะเคลื่อนตัวมาหาค่าผลเฉลย อย่างไรก็ตามโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ไม่มีรูทีนนี้ ผู้ใช้สามารถนำผลเฉลยความเค้นหรือระยะเคลื่อนตัวที่จุดต่อ (Node) มาคำนวณหาผลเฉลยของความต้านทานการแตกหักได้ด้วยการแบ่งเอลิเมนต์เป็นส่วน ๆ

เริ่มแรกการหาผลเฉลยความต้านทานการแตกหักด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ร่วมกับการประมาณค่านอกช่วงนั้นใช้เอลิเมนต์สามเหลี่ยมแบบสามจุดต่อ แต่ว่าเอลิเมนต์แบบนี้ไม่สามารถแสดงความเป็นเอกฐานของความเค้นที่จุดปลายรอยร้าวได้ ผลเฉลยความต้านทานการแตกหักจึงไม่ค่อยแม่นยำ (คลาดเคลื่อนประมาณ 4 เปอร์เซ็นต์) แม้จะใช้เอลิเมนต์ขนาดเล็กจำนวนมากที่บริเวณปลายรอยร้าวแล้วก็ตาม ข้อจำกัดนี้ทำให้เกิดการพัฒนาเอลิเมนต์ชนิดใหม่ขึ้นเพื่อใช้สำหรับปลาย

รอยร้าวซึ่งเรียกว่าเอลิเมนต์รอยร้าว (Crack element) หรือเอลิเมนต์ปลายรอยร้าว (Crack-tip element) เป็นเอลิเมนต์ชนิดใหม่ที่สามารถแสดงความเป็นเอกฐาน ณ จุดต่อที่อยู่ปลายรอยร้าวได้ (โดยการเลือกฟังก์ชันประมาณค่าภายในที่เหมาะสม) รูปที่ 2.14 แสดงตัวอย่างเอลิเมนต์รอยร้าวของ Byskov ในเวลาต่อมา Barsoum พบว่าเอลิเมนต์ไอโซพารามेटริกสี่เหลี่ยม 8 จุดต่อในรูปที่ 2.15 (ก) สามารถแสดงความเป็นเอกฐานได้ ถ้าย้ายจุดต่อที่อยู่กึ่งกลางของขอบเอลิเมนต์ด้านที่ชิดกับปลายรอยร้าวมาอยู่ในตำแหน่งห่างจากจุดต่อที่เป็นปลายรอยร้าวเท่ากับ $1/4$ เท่าของความยาวขอบของเอลิเมนต์ดังรูปที่ 2.15 (ข) เอลิเมนต์ที่ได้มีชื่อเรียกว่า เอลิเมนต์เอกฐานไอโซพารามेटริก (Singularity isoparametric element) นอกจากเอลิเมนต์เอกฐานไอโซพารามेटริกในรูปที่ 2.15 แล้วยังมีเอลิเมนต์แบบอื่น ๆ อีก เช่น เอลิเมนต์สามเหลี่ยม 8 จุดต่อในรูปที่ 2.16 (ก) ซึ่งได้จากการยุบขอบด้านหนึ่งของเอลิเมนต์และบังคับให้ระยะเคลื่อนตัวของจุดต่อบนขอบนั้น (ในรูปคือจุดต่อที่ 1, 8 และ 7) เท่ากัน เอลิเมนต์ชนิดนี้มีสมบัติเทียบเท่ากับเอลิเมนต์ในรูปที่ 2.15 (ข) แต่มีข้อดีตรงที่ว่าถ้ายกเลิกเงื่อนไขที่บังคับว่าระยะเคลื่อนตัวของจุดต่อที่ 1, 8 และ 7 ต้องเท่ากันแล้วเอลิเมนต์จะสามารถจำลองความเป็นเอกฐาน (Singularity, r^{-1}) ซึ่งเกิดขึ้นที่ปลายรอยร้าวเมื่อวัสดุเสียรูปแบบพลาสติกสมบูรณ์ (Perfectly plastic) นอกจากนี้ยังมีเอลิเมนต์สามเหลี่ยม 6 จุดต่อในรูปที่ 2.16 (ข) ซึ่งเป็นเอลิเมนต์ได้รับความนิยมมากที่สุด

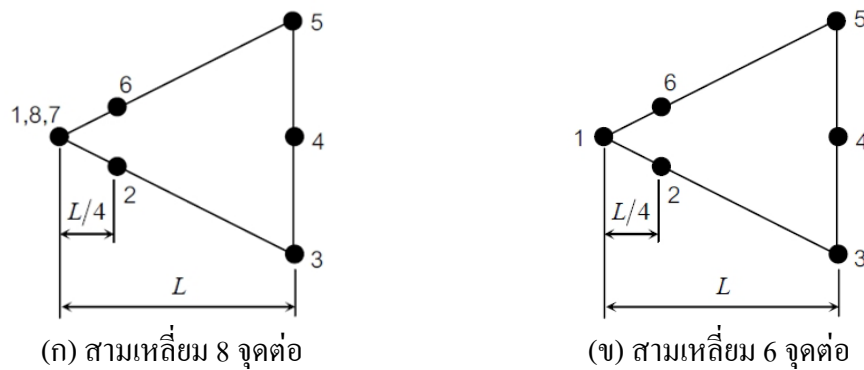
รูปที่ 2.14 เอลิเมนต์รอยร้าวของ Byskov



(ก) ไอโซพารามेटริกสี่เหลี่ยม 8 จุดต่อ

(ข) เอกฐานไอโซพารามेटริกสี่เหลี่ยม 8 จุดต่อ

รูปที่ 2.15 เอลิเมนต์ไอโซพารามेटริก



รูปที่ 2.16 เอลิเมนต์เอกฐานไอโซพารามตริก

2.9 ปริทรรศน์วรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

2.9.1 ความต้านทานการแตกหักภายใต้ภาระโหมคปกติ (Pure mode fracture toughness)

Beguelin and Kausch (1994) ศึกษาถึงผลกระทบของอัตราภาระ (Loading rate) ต่อความต้านทานการแตกหักภายใต้ผลของการรับภาระโหมคที่ 1 (K_I) ของวัสดุ Poly(methyl methacrylate), Polyacetal, Polyetheretherkrtone และ modified PVC ซึ่งทดสอบที่สภาพความเค้นที่ปลายรอยร้าวแบบความเครียดระนาบ โดยทดสอบที่อัตราภาระระหว่าง 10^{-4} ms^{-1} และ 10 ms^{-1} และศึกษากลไกการแตกหักของวัสดุด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบอิเล็กตรอน (Scanning electron microscopy, SEM) การศึกษาจะพบว่าวัสดุจะมีค่า K_I ที่สูงเมื่อทดสอบที่อัตราภาระต่ำและแสดงให้เห็นถึงการเกิดการเสีรูปร่างแบบพลาสติกของชั้นทดสอบอย่างชัดเจน เมื่อเพิ่มอัตราภาระของการทดสอบค่า K_I จึงมีค่าลดลงพร้อมกับการเสีรูปร่างของชั้นทดสอบที่ลดลงอย่างเห็นได้ชัดเจน เช่นเดียวกัน พฤติกรรมดังกล่าวนี้แสดงให้เห็นถึงผลกระทบของอัตราภาระต่อพฤติกรรมกรรมการแตกหักและความต้านทานการแตกหักของวัสดุประเภทพอลิเมอร์ที่มีการรับภาระโหมคที่ 1 อย่างชัดเจน

C. Kanchanomai., et al. (2005) ศึกษาผลกระทบของอัตราภาระต่อพฤติกรรมและกลไกการแตกหักภายใต้ผลของการรับภาระโหมคที่ 1 ของวัสดุอีพอกซีเรซิน โดยทดสอบที่อัตราภาระ 10^{-1} ถึง 10^3 มิลลิเมตรต่อวินาทีด้วยชั้นทดสอบความต้านทานการแตกหักแบบมีรอยร้าวข้างเดียวรับแรงดัด (Single edge-notch bending, SENB) ที่มีความหนา 4 มิลลิเมตร การศึกษาพบว่าที่อัตราภาระต่ำค่าตัวประกอบความเข้มของความเค้น (K_I) และอัตราการปลดปล่อยพลังงานความเครียด (G_I) ของอีพอกซีเรซินจะมีค่าสูงและแสดงให้เห็นถึงลักษณะการเสีรูปร่างแบบพลาสติกอย่างชัดเจน เนื่องจากวัสดุเกิดการแตกหักภายใต้ผลของสถานะความเค้นระนาบ (Plane stress) เมื่อทำการทดสอบที่อัตราภาระสูงขึ้นค่าตัวประกอบความเข้มของความเค้นกับอัตราการปลดปล่อยพลังงานความเครียดจะมีค่าเพิ่มขึ้น อีกทั้งลักษณะการเสีรูปร่างของชั้นทดสอบยังมีขนาดที่ลดลงด้วยเช่นกัน

พฤติกรรมดังกล่าวเกิดขึ้นจากการเปลี่ยนแปลงของสถานะความเค้นที่ปลายรอยร้าวของวัสดุจากสถานะความเค้นระนาบไปเป็นสถานะความเค้นเครียดระนาบ (Plane strain) โดยสำหรับอีพอกซีเรซินจะเริ่มเปลี่ยนสถานะความเค้นจากความเค้นระนาบเป็นสถานะความเค้นเครียดระนาบที่อัตราภาระประมาณ 10 มิลลิเมตรต่อนาที

2.9.2 ความต้านทานการแตกหักภายใต้โหมดผสม (Mixed-mode fracture toughness)

C. Kanchanomai., et al. (2008) ศึกษาผลกระทบของอัตราภาระและความหนาของชั้นทดสอบต่อความต้านทานการแตกหักภายใต้โหมดผสม 1 และ 2 ของวัสดุอีพอกซีเรซินด้วยชั้นทดสอบแบบแบบมีรอยร้าวข้างเดียวรับแรงคด ทดสอบที่เงื่อนไขของชั้นทดสอบหนา 4 มิลลิเมตร อัตราภาระ 0.1 มิลลิเมตรต่อนาทีที่จะเรียกว่าแทนค่า LTLL และเงื่อนไขของชั้นทดสอบหนา 7 มิลลิเมตรอัตราภาระ 1000 มิลลิเมตรต่อนาทีจะเรียกแทนค่า HTHL การศึกษาพบว่าสถานะความเค้นที่ปลายรอยร้าวของเงื่อนไข LTLL อยู่ภายใต้ผลของความเค้นระนาบทำให้มีค่าความต้านทานการแตกหักที่สูงและเกิดการเสี้ยวรูปที่บริเวณปลายรอยร้าวขึ้นมากตรงกันข้ามกับเงื่อนไข HTHL ที่สถานะความเค้นที่ปลายรอยร้าวอยู่ภายใต้ผลของความเครียดระนาบทำให้มีค่าความต้านทานการแตกหักที่ต่ำและเกิดการเสี้ยวรูปที่น้อยกว่า จากทฤษฎีของกลศาสตร์การแตกหักที่กล่าวว่าความต้านทานการแตกหักเป็นคุณสมบัติของวัสดุไม่ขนาดกับขนาดหรือรูปร่าง ทำให้งานวิจัยชิ้นนี้สามารถสรุปผลได้ว่าภายใต้ผลของภาระโหมดที่ 1 ของอีพอกซีเรซินสามารถใช้ค่าความต้านทานการแตกหักของชั้นทดสอบหนา 7 มิลลิเมตรเป็นเกณฑ์การแตกหักได้เช่นเดียวกับภายใต้ผลของภาระโหมดที่ 2 ที่สามารถใช้ค่าความต้านทานการแตกหักของชั้นทดสอบหนา 4 มิลลิเมตรเป็นเกณฑ์การแตกหักได้เช่นเดียวกัน

Fei Ren., et al. (2012) ศึกษากลไกการแตกหักของอีพอกซีเรซินภายใต้ผลของภาระโหมดที่ 1 และ โหมดผสม 1 และ 3 โดยใช้ชั้นทดสอบแบบทรงกระบอกมีรอยร้าวรับแรงบิด (Spiral notch torsion test, SNTT) ด้วยการรับภาระแบบต่อเนื่อง (Monotonic loading) และการรับภาระแบบรอบความล้า (Cyclic fatigue loading) การศึกษาพบว่าทิศทางการขยายตัวหรือกลไกการขยายตัวของรอยร้าวจะขึ้นอยู่กับทิศทางของภาระโหมดที่ 1 เป็นหลักถึงแม้ว่าเงื่อนไขการทดสอบจะอยู่ภายใต้ผลของโหมดผสม 1 และ 3 ก็ตาม สำหรับค่าความต้านทานการแตกหักของชั้นทดสอบจะมีพฤติกรรมที่ต่างจากกลไกการขยายตัวของรอยร้าว กล่าวคือค่าความต้านทานการแตกหักของอีพอกซีเรซินขึ้นอยู่กับโหมดการรับภาระโดยค่าความต้านทานการแตกหักจะเพิ่มขึ้นเมื่อโหมดของภาระเปลี่ยนจากโหมดที่ 1 เป็นโหมดที่ 3 อีกทั้งเมื่อโหมดของภาระเปลี่ยนไปลักษณะของการแตกหักยังเปลี่ยนจากลักษณะการแตกหักด้วยแรงตั้งฉากเป็นลักษณะของการแตกหักด้วยแรงเฉือนอีกด้วย

M.R. Ayatollahi., et al. (2014) ศึกษาชุดการทดสอบแบบใหม่สำหรับการทดสอบความต้านทานการแตกหักภายใต้โหมดผสม 1 และ 3 บนวัสดุอะคริลิกด้วยชั้นทดสอบแบบมีรอยร้าว

ข้างเดียวรับแรงดึง (Single edge-notch tension, SENT) ที่มีทิศทางของรอยร้าวตั้งฉากกับขอบของชิ้นทดสอบเพียงทิศทางเดียว สำหรับการเปลี่ยนโหมดภาระที่กระทำกับชิ้นทดสอบจากภาระโหมดที่ 1 เป็นโหมดที่ 3 จะทำได้ด้วยเปลี่ยนตำแหน่งยึดอุปกรณ์ทดสอบเข้ากับเครื่องทดสอบที่จะให้ผลให้มุมของโหมดผสม (Mode mixity angle, β) เปลี่ยนแปลงตามไปด้วยและเมื่อทำการทดสอบเรียบร้อยแล้วจะทำการเปรียบเทียบผลที่ได้จากการทดสอบกับการคำนวณด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อยืนยันความถูกต้องของชุดทดสอบ การศึกษาพบว่าผลจากการทดสอบด้วยชุดทดสอบแบบใหม่นั้นอยู่ในขอบเขตการเสียหายจากสมการขอบเขตตามทฤษฎีกลศาสตร์การแตกหักยืดหยุ่นเชิงเส้น ลักษณะการเสียหายของชิ้นทดสอบเป็นลักษณะที่เกิดจากภาระโหมดที่ 1 และ 3 ทำให้สามารถประยุกต์ใช้ชุดทดสอบแบบใหม่นี้ในการทดสอบความต้านทานการแตกหักภายใต้โหมดผสม 1 และ 3 บนวัสดุอื่นได้

J. Jamali., et al. (2015) ศึกษาพฤติกรรมและกลไกการแตกหักของอีพอกซีเรซินภายใต้ผลของภาระโหมดที่ 1 และ โหมดผสม 1 และ 2 ด้วยวิธีการทดสอบแบบให้แรงกดเนียนอย่างง่าย (Compact tension shear) ผลการศึกษาพบว่าที่การรับภาระโหมดที่ 1 พบว่าค่าตัวประกอบความเข้มของความเค้น (K_I) และอัตราการผลิตปล่อยพลังงานความเครียด (G_I) มีค่าลดลงเมื่อความหนาของชิ้นทดสอบมากขึ้นและพารามิเตอร์ทั้งสองจะเริ่มคงที่เมื่อความหนาของชิ้นทดสอบเท่ากับ 7.5 มิลลิเมตรซึ่งเป็นความหนาที่ชิ้นทดสอบเกิดการแตกหักภายใต้ผลของสถานะความเครียดระนาบ การศึกษาพฤติกรรมและกลไกการแตกหักของอีพอกซีเรซินภายใต้โหมดผสม 1 และ 2 พบว่าเมื่อโหมดของภาระเริ่มเปลี่ยนไปจากโหมดที่ 1 เป็นโหมดที่ 2 ค่าความต้านทานการแตกหักของชิ้นทดสอบจะมีค่ามากขึ้นและการเพิ่มขึ้นของสัดส่วนภาระโหมดที่ 2 จะส่งผลโดยตรงกับกลไกการแตกหักและการเสีรูปที่พื้นผิวรอยร้าวของชิ้นทดสอบ

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 กล่าวนำ

งานวิจัยเกี่ยวกับการศึกษาผลกระทบของสถานะความเค้นต่อความต้านทานการแตกหักภายใต้โหมดผสม 1 และ 3 ของอีพอกซีเรซิน มุ่งเน้นที่จะนำเสนอถึงพารามิเตอร์ที่บ่งบอกความรุนแรงของรอยร้าวเมื่อรับโหมดผสม โดยจะนำเสนอในรูปแบบของพารามิเตอร์ความต้านทานการแตกหักอันได้แก่ ตัวประกอบความเข้มของความเค้น (K) J -อินทิกรัล (J) และระยะเปิดที่ปลายรอยร้าว ($CTOD$) ซึ่งคำนวณจากข้อมูลของการทดสอบความต้านทานการแตกหักด้วยขั้นตอนทดสอบแบบมีรอยร้าวข้างเดียวรับแรงดึง โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ทางวิศวกรรมมาช่วยในการคำนวณพารามิเตอร์ของความต้านทานการแตกหักเหล่านั้น เมื่อทดสอบเรียบร้อยแล้วจะนำขั้นตอนทดสอบที่เกิดความเสียหายขึ้นมาวิเคราะห์พื้นผิวการแตกหัก เพื่ออธิบายพฤติกรรมที่เกิดขึ้นกับวัสดุควบคู่ไปด้วย สำหรับขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยจะนำเสนอโดยละเอียดตามเนื้อหาต่อไปนี้

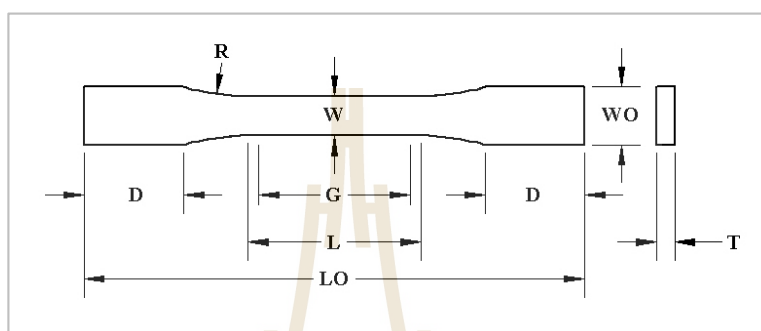
3.2 การเตรียมชิ้นทดสอบ

3.2.1 การเตรียมอีพอกซีเรซิน

งานวิจัยชิ้นนี้จะใช้อีพอกซีเรซินเป็นวัสดุหลักในการทดลองโดยเลือกใช้อีพอกซีเรซินชนิดไดโกลซิไดลอีเทอร์บิสฟีนอล-เอ (Diglycidyl ethers bisphenol-A, DGEBA) และสารช่วยแข็งชนิดโพลีเอมีน (Polyamine) ยี่ห้อ EPOTEC รุ่น YD535LV/TH7257 (อีพอกซีเรซิน/สารช่วยแข็ง) ซึ่งได้รับความอนุเคราะห์จากบริษัท อติดยา เฮอร์ล่า เคมีคัลส์ (ประเทศไทย) จำกัด (อีพอกซี ดีวีชั่น) มีอัตราส่วนการผสมต่อน้ำหนักในหน่วยกรัมเป็น 100 : 35 (อีพอกซี : สารช่วยแข็ง) ขั้นตอนการผสมอีพอกซีเรซินเข้ากับสารช่วยแข็งจะผสมในตู้ผสมแบบสุญญากาศ (Vacuum mixing machine) เพื่อกำจัดฟองอากาศหรือป้องกันสิ่งแปลกปลอมที่อาจเกิดขึ้นหรือปนเปื้อนระหว่างขั้นตอนการผสม เมื่อผสมอีพอกซีเรซินและสารช่วยแข็งเรียบร้อยแล้วจะเทใส่แม่พิมพ์แบบเรียบทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้า ขนาดกว้าง 100 มิลลิเมตร ยาว 100 มิลลิเมตร สูง 20 มิลลิเมตรตามปริมาณความหนาที่ได้คำนวณไว้จากปริมาตรทรงสี่เหลี่ยมและปล่อยให้แข็งตัวในแม่พิมพ์ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง หลังจากนั้นอบที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียสในตู้อบลมร้อนเป็นเวลา 4 ชั่วโมง จึงแกะอีพอกซีเรซินออกจากแม่พิมพ์เพื่อเตรียมสำหรับการตัดให้มีขนาดตามขนาดของชิ้นทดสอบที่ได้ออกแบบไว้

3.2.2 การเตรียมชิ้นทดสอบแรงดึง

รูปร่างและขนาดของชิ้นทดสอบแรงดึงอ้างอิงตามมาตรฐานการทดสอบ ASTM D638:(2015) ซึ่งเป็นมาตรฐานการทดสอบแรงดึงของวัสดุประเภทพอลิเมอร์ที่ได้รับความนิยมและเป็นที่ยอมรับในการทดสอบเชิงวิชาการทั่วไป รูปร่างและขนาดของชิ้นทดสอบแรงดึงโดยละเอียดจะแสดงในรูปที่ 3.1 และตารางที่ 3.1 ดังนี้



รูปที่ 3.1 รูปร่างและขนาดของชิ้นทดสอบแรงดึง

ตารางที่ 3.1 ตารางแสดงขนาดของชิ้นทดสอบแรงดึง

ตัวแปร	ขนาด (มิลลิเมตร)
ความกว้างส่วนคอคอด (W-Width of narrow section)	13±0.5
ความกว้างทั้งหมด (WO-Width overall)	19±6.4
ความยาวส่วนคอคอด (L-Length of narrow section)	57±0.5
ความยาวทั้งหมด (LO-Length overall)	165*
ความยาวเกจ (G-Gage length)	50±0.25
ความหนา (T-Thickness)	6**
รัศมีของส่วนโค้ง (R-Radius of fillet)	76±1
ความยาวส่วนที่จับ (D-Length of grips section)	33±5

*มาตรฐานกำหนดไว้ที่ 165 มิลลิเมตรขึ้นไป (ไม่กำหนดความยาวสูงสุด)

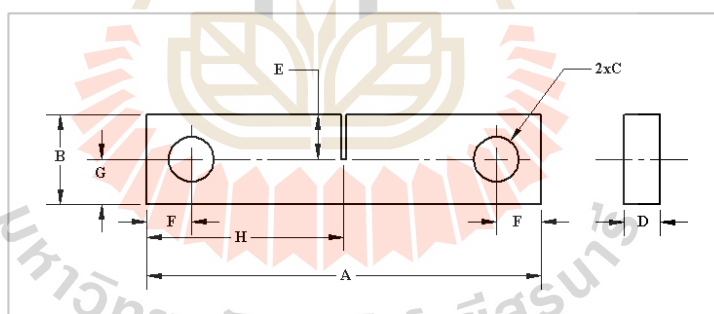
**สำหรับ Type I กำหนดความหนาไว้ 7 มิลลิเมตร หรือ น้อยกว่า

3.2.2 การเตรียมชิ้นทดสอบความต้านทานการแตกหัก

รูปร่างและขนาดของชิ้นทดสอบความต้านทานการแตกหักอ้างอิงตามงานวิจัยของ M.R. Ayatollahi, et al. (2014) โดยใช้ชิ้นทดสอบแบบมีรอยร้าวข้างเดียวกับแรงดึง รูปร่างและขนาดของชิ้นทดสอบจะแสดงในรูปที่ 3.2 และตารางที่ 3.2 การเตรียมรอยบาก (Notch) และรอยร้าวเริ่มต้น (Pre-crack) (การเตรียมในส่วนของตัวอักษร E ในรูปที่ 3.2) อ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM D5045 (2014) สำหรับการเตรียมรอยบากจะเตรียมด้วยการใช้เลื่อยและการเตรียมรอยร้าวเริ่มต้นจะใช้ใบมีดคัดเตอร์ เมื่อเตรียมรอยร้าวเริ่มต้นเรียบร้อยแล้วจะนำชิ้นทดสอบไปวัดความยาวรอยร้าว (ความยาวรวมของรอยบากและรอยร้าวเริ่มต้น) ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง (Optical microscope, OM) ซึ่งกำหนดให้ความยาวรอยร้าวอยู่ในช่วงตามสมการที่ 3.1

$$0.45 \leq \frac{a}{W} \leq 0.55 \quad (3.1)$$

เมื่อ a คือความยาวรอยร้าวของชิ้นทดสอบ
 W คือความกว้างของชิ้นทดสอบ



รูปที่ 3.2 รูปร่างและขนาดของชิ้นทดสอบความต้านทานการแตกหัก

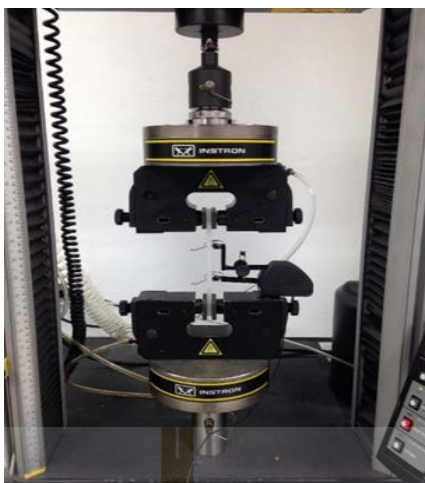
ตารางที่ 3.2 ตารางแสดงขนาดของชิ้นทดสอบความต้านทานการแตกหัก

ตัวแปร	ขนาด (มิลลิเมตร)
ความยาว (A-Length)	88±0.5
ความกว้าง (B-Width)	20±0.5
ขนาดรู (C-Hole diameter)	10±0.2
ความหนา (D-Thickness)	4, 6, 8 และ 10 (±0.5)
ความยาวรอยร้าว (E-Crack length)	10±0.2
ตำแหน่งรู (F-Hole position)	10±0.25
ตำแหน่งรู (G-Hole position)	10±0.25
ตำแหน่งรอยร้าว (H-Crack position)	44±0.25

3.3 การทดสอบวัสดุ

3.3.1 การทดสอบแรงดึง

การทดสอบแรงดึงของอีพอกซีเรซินจะดำเนินการทดสอบตามมาตรฐานการทดสอบ ASTM D638 และทำการทดสอบด้วยเครื่องทดสอบแบบอเนกประสงค์ (Universal testing machine, UTM) ยี่ห้อ Instron รุ่น 5565 กำหนดการทดสอบสูงสุด 5 kN การติดตั้งชิ้นทดสอบเข้ากับเครื่องทดสอบจะแสดงดังรูปที่ 3.3 และยึดชิ้นทดสอบเข้ากับเครื่องทดสอบด้วยอุปกรณ์จับชิ้นทดสอบแบบใช้ลม (Air grips) การบันทึกค่าระยะยืดตัวที่เกิดขึ้นกับชิ้นทดสอบจะใช้เครื่องวัดระยะยืด (Extensometer) ยี่ห้อ Instron ความยาวเกจ 50 มิลลิเมตร ทดสอบที่อัตราการ (Loading rate) 0.1 ถึง 1000 มิลลิเมตรต่อนาที ชิ้นทดสอบจะถูกดึงด้วยอัตราการคงที่จนกระทั่งชิ้นทดสอบขาดออกจากกันจึงหยุดการทดสอบ การทดสอบแต่ละเงื่อนไขจะทดสอบซ้ำอย่างน้อย 5 ครั้ง สำหรับการทดสอบแรงดึงนั้นมีจุดประสงค์หลักเพื่อนำคุณสมบัติที่ได้จากการทดสอบหรือคุณสมบัติการรับแรงดึงที่อัตราการต่าง ๆ ไปใช้ในการคำนวณพารามิเตอร์ความต้านทานการแตกหักด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ในขั้นตอนต่อไป เนื่องจากรูปแบบของภาระที่ในการทดสอบความต้านทานการแตกหักนั้นเป็นการให้ภาระในลักษณะการดึง (Tension) กับรอยร้าวของชิ้นทดสอบที่เงื่อนไขต่างๆ



รูปที่ 3.3 การติดตั้งชิ้นทดสอบแรงดึงบนเครื่องทดสอบแบบอเนกประสงค์

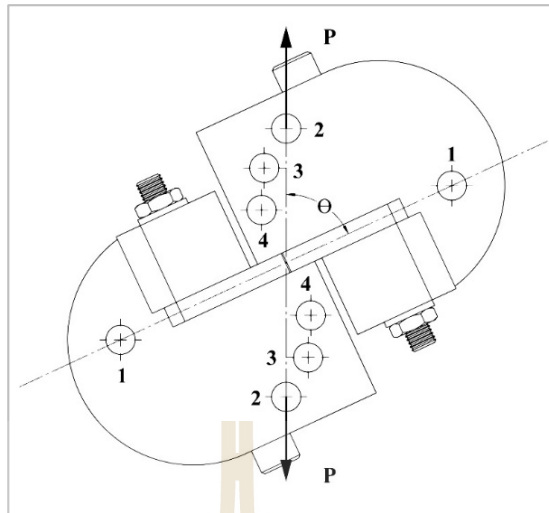
3.3.2 การทดสอบความต้านทานการแตกหัก

การทดสอบความต้านทานการแตกหักภายใต้โหมดผสม 1 และ 3 ของอีพอกซีเรซิน อ้างอิงรูปร่างและขนาดของชิ้นทดสอบ อุปกรณ์การทดสอบและวิธีการดำเนินการทดสอบจากงานวิจัยของ M.R. Ayatollahi., et al. (2014) รูปร่างของอุปกรณ์การทดสอบ (Fixture) จะแสดงดังรูปที่ 3.4 มุมของทิศทางภาระ (Loading angle, θ) และมุมของโหมดผสม (Mode mixity angle, β) จะเปลี่ยนไปตามการเปลี่ยนตำแหน่งของคู่ภาระ โดยการเปลี่ยนตำแหน่งของหมุดยึดอุปกรณ์ทดสอบเข้ากับเครื่องทดสอบดังรูปที่ 3.5 การทดสอบความต้านทานการแตกหักจะดำเนินการทดสอบด้วยเครื่องทดสอบแบบอเนกประสงค์เช่นเดียวกับการทดสอบแรงดึงของวัสดุ สำหรับการทดสอบความต้านทานการแตกหักในงานวิจัยชิ้นนี้จะแบ่งการทดสอบออกเป็น 2 ส่วนดังนี้

3.3.2.1 การทดสอบความต้านทานการแตกหักเพื่อศึกษาผลกระทบของความหนาของชิ้นทดสอบต่อความต้านทานการแตกหักภายใต้ภาระโหมดที่ 1 ของอีพอกซีเรซินจะทำการทดสอบที่อัตราภาระ 10 มิลลิเมตรต่อวินาทีบนชิ้นทดสอบหนา 4, 6, 8 และ 10 มิลลิเมตร ทิศทางของการให้ภาระในการทดสอบจะอยู่ในตำแหน่งของหมุดคู่ที่ 1 บนอุปกรณ์ทดสอบดังรูปที่ 3.4 เท่านั้น สำหรับหมุดคู่ที่ 1 นั้นจะทำให้เกิดมุมของทิศทางภาระ (θ) และมุมของโหมดผสม (β) ซึ่งเป็นสัดส่วนของภาระโหมดที่ 3 ต่อภาระโหมดที่ 1 เท่ากับ 0° (กล่าวคือรับภาระโหมดที่ 1 อย่างสมบูรณ์) ซึ่งอยู่ภายใต้ผลของภาระโหมดที่ 1 โดยสมบูรณ์ ชิ้นทดสอบจะถูกดึงด้วยอัตราภาระ 10 มิลลิเมตรต่อวินาทีอย่างต่อเนื่องจนกระทั่งชิ้นทดสอบแตกหักออกจากกันจึงหยุดการทดสอบโดยในระหว่างการทดสอบจะบันทึกขนาดของภาระกับระยะยืดตัวของชิ้นทดสอบตลอดการทดสอบและการทดสอบความต้านทานการแตกหักจะทดสอบอย่างน้อยความหนาละ 3 ชิ้น สำหรับการทดสอบ

ความต้านทานการแตกหักภายใต้ภาระโหมดที่ 1 นั้นมีจุดประสงค์หลักเพื่อหาความหนาของชั้นทดสอบที่สถานะความเค้นที่ปลายรอยร้าวของอีพอกซีเรซินเปลี่ยนจากสถานะความเค้นระนาบไปเป็นความเค้นระนาบ เพื่อที่จะสามารถเลือกขนาดความหนาที่เหมาะสมสำหรับการแสดงความต่างของสถานะความเค้นที่ปลายรอยร้าวในการทดสอบการรับโหมดผสมต่อไป

3.3.2.2 การทดสอบความต้านทานการแตกหักเพื่อศึกษาผลกระทบของสถานะความเค้นต่อความต้านทานการแตกหักภายใต้โหมดผสม 1 และ 3 ของอีพอกซีเรซิน การเปลี่ยนแปลงของสถานะความเค้นนั้นจะพิจารณาจากปัจจัยของความหนา อัตราภาระและผลกระทบร่วมของความหนาและอัตราภาระ สำหรับผลกระทบของความหนาจะเลือกทดสอบที่ความหนา 4 และ 8 มิลลิเมตรซึ่งเป็นความหนาที่เกิดการแตกหักภายใต้สถานะความเค้นที่แตกต่างกันจากการรับภาระโหมดที่ 1 (ผลจากการทดลองตามหัวข้อที่ 3.3.2.1) สำหรับผลกระทบของอัตราภาระจะทำการทดสอบที่อัตราภาระ 0.1, 10 และ 1000 มิลลิเมตรต่อนาที ลักษณะหรือทิศทางของการให้ภาระจะทำการทดสอบที่หมุดคู่ที่ 1, 2, 3 และ 4 ของอุปกรณ์ทดสอบดังรูปที่ 3.4 โดยหมุดแต่ละคู่จะทำให้เกิดมุมของทิศทางภาระ (θ) เท่ากับ 0° , 65° , 78° และ 90° ตามลำดับและเกิดมุมของโหมดผสม (β) หรือสัดส่วนของภาระโหมดที่ 3 และ 1 เท่ากับ 0° , 30° , 60° และ 90° ตามลำดับ (มุมของโหมดผสมที่กล่าวข้างต้นอ้างอิงจากงานวิจัยของ M.R. Ayatollahi, et al. (2014) เท่านั้นยังไม่ใช่มุมที่เกิดขึ้นจริงบนอีพอกซีเรซิน) ชั้นทดสอบจะถูกดึงด้วยอัตราภาระตามเงื่อนไขของการทดสอบนั้น ๆ จนกระทั่งชั้นทดสอบแตกหักออกจากกันจึงหยุดการทดสอบโดยในระหว่างการทดสอบจะบันทึกขนาดภาระกับระยะยัดตัวของชั้นทดสอบตลอดการทดสอบและการทดสอบความต้านทานการแตกหักในทุกเงื่อนไขจะทดสอบอย่างน้อยเงื่อนไขละ 3 ชั้น สำหรับการทดสอบความต้านทานการแตกหักในขั้นตอนนี้มีจุดประสงค์หลักเพื่อพิจารณาถึงผลกระทบของสถานะความเค้นการเปลี่ยนแปลงสถานะความเค้นที่มีต่อความต้านทานการแตกหักและกลไกการแตกหักของอีพอกซีเรซิน



รูปที่ 3.4 อุปกรณ์ทดสอบความต้านทานการแตกหัก



รูปที่ 3.5 การติดตั้งชุดอุปกรณ์ทดสอบเข้ากับเครื่องทดสอบ

3.4 การคำนวณพารามิเตอร์ความต้านทานการแตกหัก

พารามิเตอร์ความต้านทานการแตกหักสำหรับบ่งบอกความรุนแรงของรอยร้าวในงานวิจัยชิ้นนี้ประกอบด้วย พารามิเตอร์ตัวประกอบความเข้มของความเค้น (K) พารามิเตอร์ J -อินทิกรัล (J_C) และพารามิเตอร์ระยะเปิดที่ปลายรอยร้าว ($CTOD_{45}$) ซึ่งงานวิจัยในส่วนต่อจากนี้ไปจะกล่าวถึงพารามิเตอร์เหล่านี้ด้วยตัวย่อเพียงเท่านั้น การคำนวณพารามิเตอร์ความต้านทานการแตกหักที่กล่าวมาข้างต้นนั้นจะแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ดังนี้

3.4.1 การคำนวณ K ด้วยสมการมาตรฐาน

สำหรับการคำนวณค่า K ภายใต้ผลของการรับภาระ โหมดที่ 1 หรือใช้ตัวย่อว่า K_I นั้นสามารถคำนวณด้วยสมการมาตรฐานตามทฤษฎีของกลศาสตร์การแตกหักยืดหยุ่นเชิงเส้นดังนี้

$$K_I = \left(\frac{P_Q}{BW^{1/2}} \right) f(x) \quad (3.2)$$

เมื่อ	P_Q	คือภาระสูงสุดที่เกิดขึ้นกับชั้นทดสอบ
	B	คือความหนาของชั้นทดสอบ
	W	คือความกว้างของชั้นทดสอบ
	$f(x)$	คือสมการรูปร่างของชั้นทดสอบ

สำหรับชั้นทดสอบแบบมีรอยร้าวข้างเดียวรับแรงดึงจะมีสมการรูปร่างซึ่งอ้างอิงจากหนังสือกลศาสตร์การแตกหักของ Anderson (1994) ตามสมการดังต่อไปนี้

$$f(x) = \frac{\sqrt{2 \tan(\pi a/2W)}}{\cos(\pi a/2W)} [0.752 + 2.02(a/W) + 0.37(1 - \sin(\pi a/2W))^3] \quad (3.3)$$

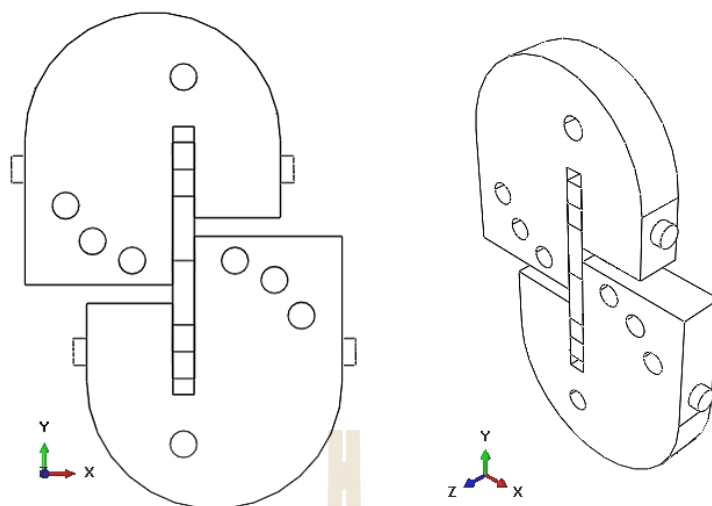
เมื่อ	a	คือความยาวรอยร้าว
-------	-----	-------------------

3.4.2 การคำนวณพารามิเตอร์ความต้านทานการแตกหักด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

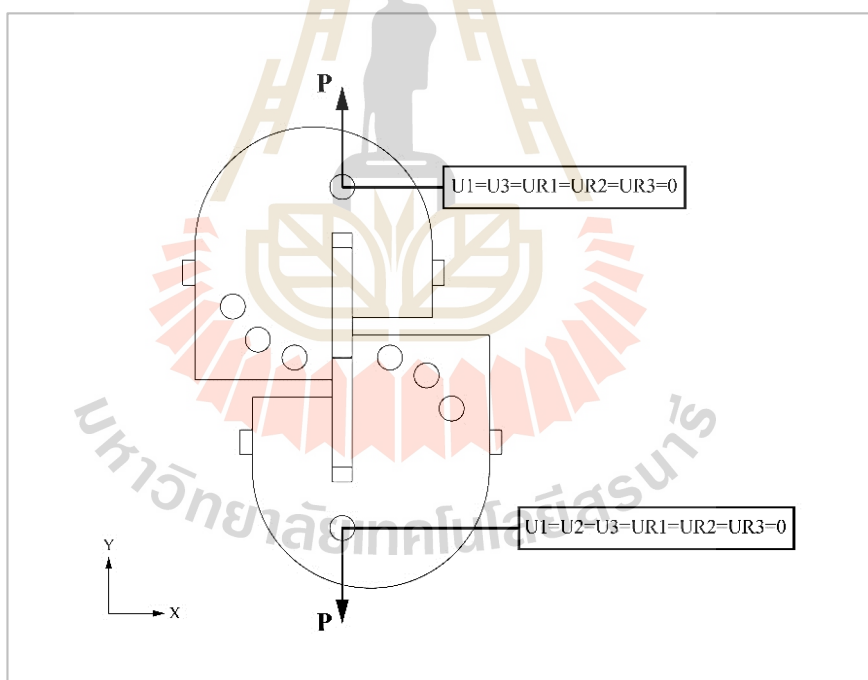
สำหรับพารามิเตอร์ความต้านทานการแตกหักภายใต้โหมดผสม 1 และ 3 ไม่ว่าจะ เป็นค่า K ค่า J_C และค่า $CTOD_{.45}$ นั้นยังไม่มีสมการมาตรฐานที่ใช้สำหรับการคำนวณเหมือนกับพารามิเตอร์ความต้านทานการแตกหักภายใต้การรับภาระ โหมดที่ 1 ดังนั้นงานวิจัยชิ้นนี้จึงเลือกใช้วิธีการคำนวณความต้านทานการแตกหักด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์โดยใช้โปรแกรมช่วยวิเคราะห์ทางวิศวกรรม ABAQUS V.6.13 ที่มีรูทีนสำหรับการคำนวณความต้านทานการแตกหักเรียบร้อยแล้ว สำหรับการกำหนดเงื่อนไขต่าง ๆ ในการคำนวณด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ภายในโปรแกรมจะแสดงตามหัวข้อต่อไปนี้

3.4.2.1 ส่วนประกอบของโมเดลจำลองและการกำหนดเงื่อนไขขอบเขตลักษณะของโมเดลสำหรับการคำนวณด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ในโปรแกรม ABAQUS จะแสดงดังรูปที่ 3.6 โมเดลจะประกอบด้วยอุปกรณ์ทดสอบ หมุดร้อยชั้นทดสอบและชั้นทดสอบ การกำหนดเงื่อนไข

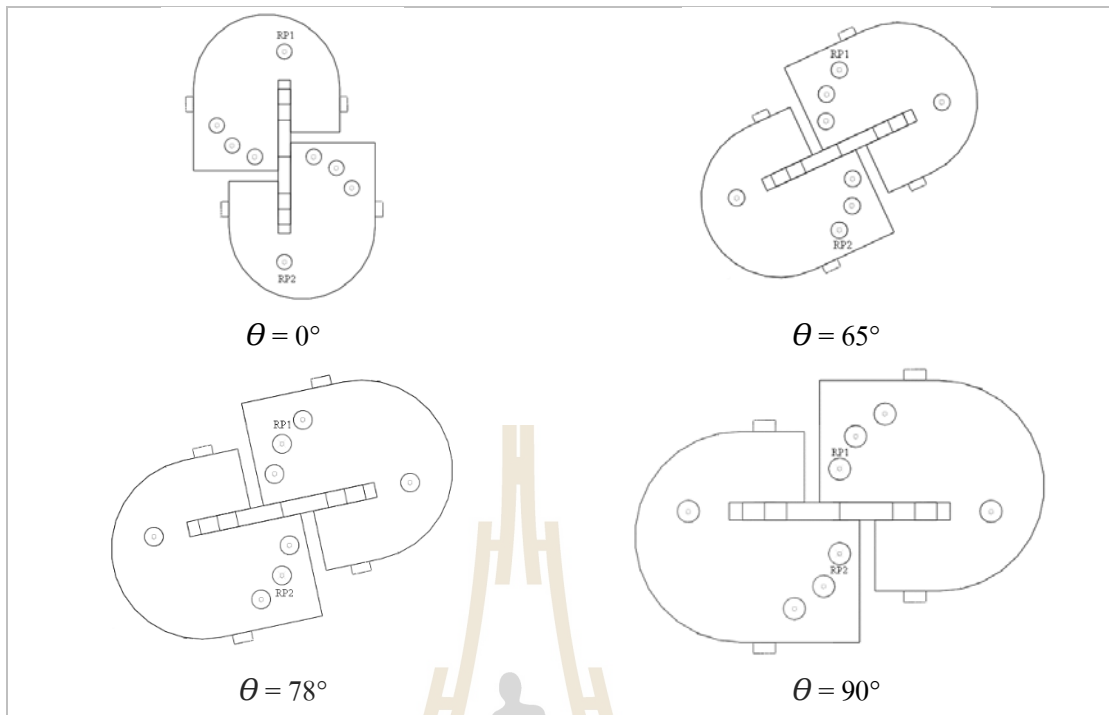
ขอบเขต (Boundary condition) หรือลักษณะการเคลื่อนที่ของโมเดลจะแสดงดังรูปที่ 3.7 โดยลักษณะของการเคลื่อนที่ที่จะถูกกำหนดลงบนจุดอ้างอิง (Reference point, RP) ที่สร้างขึ้นที่จุดศูนย์กลางของรู สำหรับยึดอุปกรณ์ทดสอบเข้ากับเครื่องทดสอบซึ่งจะเปลี่ยนตามตำแหน่งของกลุ่มยึดอุปกรณ์ทดสอบ สำหรับอุปกรณ์ทดสอบขึ้นบนกำหนดลักษณะการเคลื่อนที่ของจุด RP1 (ไม่ว่าจะทดสอบที่มุมยึดคู่ใดก็ตามจุดอ้างอิงที่อุปกรณ์ทดสอบขึ้นบนจะใช้ตัวย่อ RP1 เหมือนกัน) ให้สามารถเคลื่อนที่ได้แนวแกน Y เท่านั้น ($U1=U3=UR1=UR2=UR3=0$) อุปกรณ์ทดสอบขึ้นล่างกำหนดลักษณะการเคลื่อนที่ของจุด RP2 (ไม่ว่าจะทดสอบที่มุมยึดคู่ใดก็ตามจุดอ้างอิงที่อุปกรณ์ทดสอบขึ้นล่างจะใช้ตัวย่อ RP2 เหมือนกัน) ให้ไม่สามารถเคลื่อนที่หรือหมุนได้ในทิศทางใดเลย ($U1=U2=U3=UR1=UR2=UR3=0$) สำหรับการให้ภาระที่ใช้ในการทดสอบซึ่งเป็นภาระในลักษณะการดึงขึ้นทดสอบนั้นกำหนดให้ภาระเกิดขึ้นในจุดอ้างอิงของอุปกรณ์ทดสอบขึ้นบนหรือจุด RP1 และภาระที่เกิดขึ้นจะอยู่ในแกน Y หรือแกน U2 ตามโปรแกรมเพียงทิศทางเดียวเท่านั้น สำหรับการเปลี่ยนตำแหน่งของจุด RP1 และ RP2 จะแสดงดังรูปที่ 3.8 สำหรับคุณสมบัติของการสัมผัสกันของชิ้นส่วนต่าง ๆ ภายในโมเดลจะกำหนดพฤติกรรมในแนวสัมผัสกับพื้นผิว (Tangential behavior) เป็นแบบไม่มีแรงเสียดทาน (Frictionless) พฤติกรรมในแนวตั้งฉากกับพื้นผิว (Normal behavior) เป็นแบบผิวแข็ง (Hard contact) และยอมให้แยกออกจากกันได้หลังจากการสัมผัส (Allow separation after contact) พื้นผิวของชิ้นส่วนที่สัมผัสกันในโมเดลจะเกิดจากการค้นหาคู่ที่สัมผัสกันแบบอัตโนมัติจากการค้นหาแบบเป็นคู่ภายในโปรแกรม (Find contact pairs) เมื่อค้นหาพื้นผิวคู่ที่สัมผัสกันเรียบร้อยแล้ว พื้นผิวสัมผัสแต่ละคู่จะกำหนดชนิดของการสัมผัสเป็นแบบปฏิสัมพันธ์ (Interaction) และเกิดการเลื่อนไถลเมื่อสัมผัสกันน้อยมาก (Small sliding) ยกเว้นคู่พื้นผิวสัมผัสของมุมร้อยขึ้นทดสอบกับอุปกรณ์ทดสอบเท่านั้นที่จะกำหนดชนิดของการสัมผัสเป็นแบบผูกติดกัน (Tie) เนื่องจากลักษณะการประกอบมุมร้อยขึ้นทดสอบเข้ากับอุปกรณ์ทดสอบในความเป็นจริงที่มีการขันยึดเพื่อความแข็งแรงทำให้ไม่สามารถหมุนหรือเคลื่อนที่ได้



รูปที่ 3.6 ลักษณะโมเดลที่ใช้ในการคำนวณด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์



รูปที่ 3.7 การกำหนดลักษณะการเคลื่อนที่ของโมเดล



รูปที่ 3.8 การเปลี่ยนแปลงของจุดอ้างอิงในโมเดล

3.4.2.2 การกำหนดคุณสมบัติทางกลของวัสดุสำหรับชิ้นส่วนต่าง ๆ ภายในโมเดล ในขั้นตอนการทดสอบจริงนั้นจะพบว่าอุปกรณ์ทดสอบและหมุดร้อยชิ้นทดสอบที่ทำจากวัสดุกลุ่มโลหะนั้นเกิดการเสียรูปน้อยมากเมื่อเทียบกับชิ้นทดสอบที่ทำจากอีพอกซีเรซิน ดังนั้นสำหรับอุปกรณ์ทดสอบกำหนดให้มีคุณสมบัติของวัสดุแบบแข็งเกร็ง (Rigid Body) ที่ไม่สามารถเกิดการเสียรูปขึ้นได้ (ทำให้ไม่ต้องกำหนดคุณสมบัติของวัสดุให้กับชิ้นส่วนนี้) สำหรับหมุดร้อยชิ้นทดสอบกำหนดให้มีคุณสมบัติทางกลเทียบเท่ากับเหล็กที่มีค่า Young's Modulus, E เท่ากับ 210 GPa และอัตราส่วนของปัวซอง (Poisson's ratio, ν) เท่ากับ 0.3 สำหรับการกำหนดคุณสมบัติทางกลของชิ้นทดสอบความต้านทานการแตกหักจะแบ่งออกเป็น 2 กรณีดังนี้

3.4.2.2.1 กรณีการคำนวณค่า K ซึ่งเป็นพารามิเตอร์ที่ตั้งอยู่บนทฤษฎีกลศาสตร์การแตกหักยืดหยุ่นเชิงเส้น กำหนดให้ชิ้นทดสอบมีค่า Young's Modulus ที่ได้จากการทดสอบแรงดึงที่อัตราภาเรเดียวกันกับการทดสอบความต้านทานการแตกหักและกำหนดให้อัตราส่วนของปัวซองมีค่าคงที่ทุกอัตราภาเรเท่ากับ 0.36

3.4.2.2.2 กรณีการคำนวณ J_C และ $CTOD_{45}$ ซึ่งเป็นพารามิเตอร์ที่ตั้งอยู่บนทฤษฎีกลศาสตร์การแตกหักอีลาสติก-พลาสติก กำหนดให้ชิ้นทดสอบมีค่า Young's Modulus และอัตราส่วนของปัวซองเช่นเดียวกับกรณีของการคำนวณค่า K แต่สำหรับพารามิเตอร์บนทฤษฎีของ

กลศาสตร์การแตกหักอีลาสติก-พลาสติกนั้นจะพิจารณาในส่วนของ การเสีรูปของชิ้นทดสอบด้วยการคำนวณ J_C และ $CTOD_{45}$ จึงต้องกำหนดคุณสมบัติของวัสดุในช่วงพลาสติกเพิ่มเติมคือความเค้นและความเครียดในช่วงพลาสติก (Plastic stress-strain) สามารถหาได้จากกราฟความสัมพันธ์ของความเค้นและความเครียดของอีพอกซีเรซิน ณ อัตราการะนั้น ๆ ที่พิจารณาเฉพาะข้อมูลที่เลยจุดความเค้นครากไปจนถึงจุดความเค้นสูงสุด สำหรับการใส่ข้อมูลดังกล่าวให้โปรแกรมจะต้องแปลงข้อมูลให้เป็นความเค้นและความเครียดจริง (True stress-strain) ก่อน การแปลงข้อมูลสามารถคำนวณได้ตามสมการที่ 3.3 และ 3.4 ข้อมูลจุดแรกที่ใส่ให้ โปรแกรมจะเป็นค่าความเค้นและความเครียดจริงที่จุดคราก (ความเครียดจริงที่จุดครากจะต้องมีค่าเท่ากับ 0 เสมอสามารถคำนวณได้ตามสมการที่ 3.5)

$$\sigma_{True} = \sigma_{Engineering} (1 + \epsilon_{Engineering}) \quad (3.3)$$

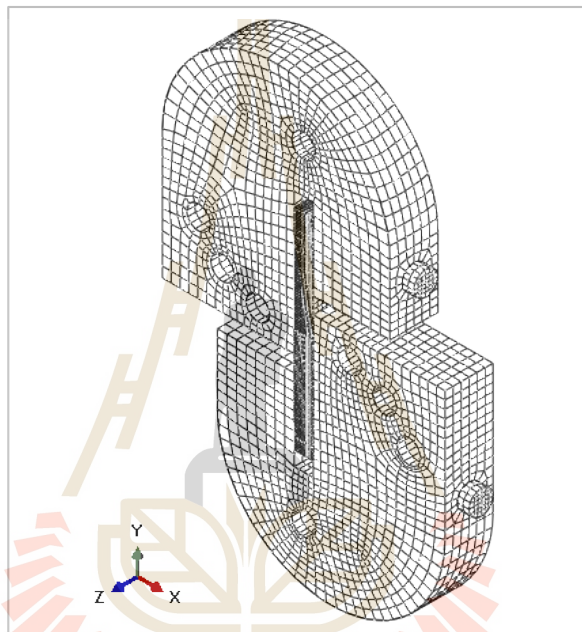
$$\epsilon_{True} = \ln(1 + \epsilon_{Engineering}) \quad (3.4)$$

$$(\epsilon_{plastic})_i = (\epsilon_{plastic})_i - \epsilon_{Yield} \quad (3.5)$$

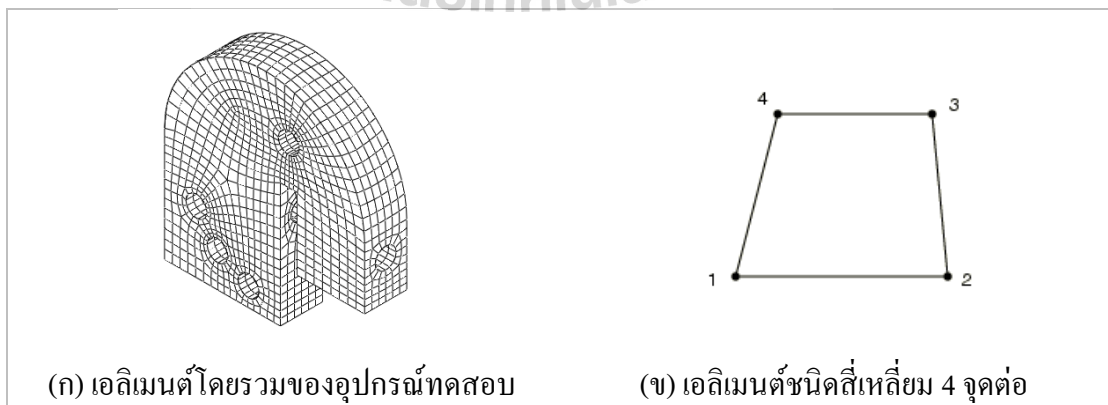
เมื่อ $(\epsilon_{plastic})_i$ คือความเครียดพลาสติกค่าที่ i
 ϵ_{Yield} คือความเครียดที่จุดคราก

3.4.2.3 การแบ่งเอลิเมนต์ของชิ้นส่วนภายในโมเดลจะแบ่งตามลักษณะของการรับภาระหรือการเสีรูปที่เกิดขึ้นโดยลักษณะของการแบ่งเอลิเมนต์โดยรวมของโมเดลจะแสดงดังรูปที่ 3.9 สำหรับการแบ่งเอลิเมนต์ของอุปกรณ์ทดสอบที่มีลักษณะเป็นวัสดุแบบแข็งเกร็งจะแสดงดังรูปที่ 3.10 (ก) มีจำนวนเอลิเมนต์ทั้งหมด 3,431 เอลิเมนต์ต่อชิ้นเป็นเอลิเมนต์ชนิดสี่เหลี่ยม 4 จุดต่อหรือแบบ R3D4 ดังรูปที่ 3.10 (ข) สำหรับการแบ่งเอลิเมนต์ของหมุดร้อยชิ้นทดสอบที่เป็นวัสดุในกลุ่มเหล็กและมีรูปร่างเป็นทรงกระบอกจะแสดงในรูปที่ 3.11 (ก) มีจำนวนเอลิเมนต์ทั้งหมด 1,696 เอลิเมนต์ต่อชิ้นเป็นเอลิเมนต์ชนิดทรงสี่เหลี่ยม 20 จุดต่อหรือแบบ C3D20R ดังรูปที่ 3.11 (ข) สำหรับการแบ่งเอลิเมนต์ของชิ้นทดสอบจะแยกตามกรณีพารามิเตอร์ที่ต้องการคำนวณ สำหรับกรณีคำนวณค่า K จะแสดงดังรูปที่ 3.12 (ก) มีจำนวนเอลิเมนต์ทั้งหมด 19,968 เอลิเมนต์เป็นเอลิเมนต์ชนิดทรงสี่เหลี่ยม 20 จุดต่อหรือแบบ C3D20R ยกเว้นบริเวณปลายรอยร้าวดังรูปที่ 3.12 (ข) ที่ต้องทำการแบ่งเอลิเมนต์ให้มีความละเอียดมากขึ้นเพื่อให้มีค่า K และลักษณะการเสีรูปที่ใกล้เคียงกับความเป็นจริงมากที่สุด โดยที่บริเวณปลายรอยร้าวนี้จะแบ่งการจัดเอลิเมนต์เป็นวงกลมซ้อนกันอย่างน้อย 10 วงแต่ละวงสามารถแบ่งเป็นส่วนย่อยได้อย่างน้อย 24 ส่วนและบริเวณวงในสุดจะใช้เอลิเมนต์แบบลิ้ม

สามเหลี่ยม 15 จุดต่อหรือแบบ C3D15 ดังรูปที่ 3.13 สำหรับกรณีคำนวณค่า J_c และ $CTOD_{45}$ จะใช้การแบ่งเอลิเมนต์ในลักษณะเดียวกันดังรูป 3.14 (ก) มีจำนวนเอลิเมนต์ทั้งหมด 29,600 เอลิเมนต์เป็นเอลิเมนต์ชนิดทรงสี่เหลี่ยม 20 จุดต่อหรือแบบ C3D20R ทั้งชั้นทดสอบ ลักษณะการแบ่งเอลิเมนต์ที่บริเวณปลายรอยร้าวจะแสดงดังรูปที่ 3.14 (ข) ซึ่งปลายรอยร้าวในกรณีนี้จะมีรัศมีเท่ากับ 0.05 มิลลิเมตร การจัดเอลิเมนต์ที่ปลายรอยร้าวจึงมีลักษณะการแบ่งเอลิเมนต์เป็นครึ่งวงกลมซ้อนกันอย่างน้อย 10 วงและแต่ละวงสามารถแบ่งเป็นส่วนย่อยได้อย่างน้อย 14 ส่วน



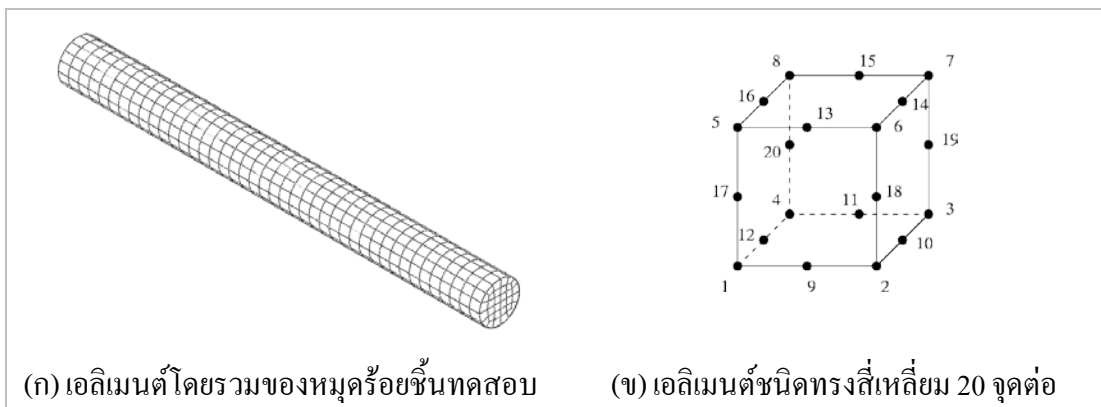
รูปที่ 3.9 ลักษณะการแบ่งเอลิเมนต์โดยรวมของโมเดล



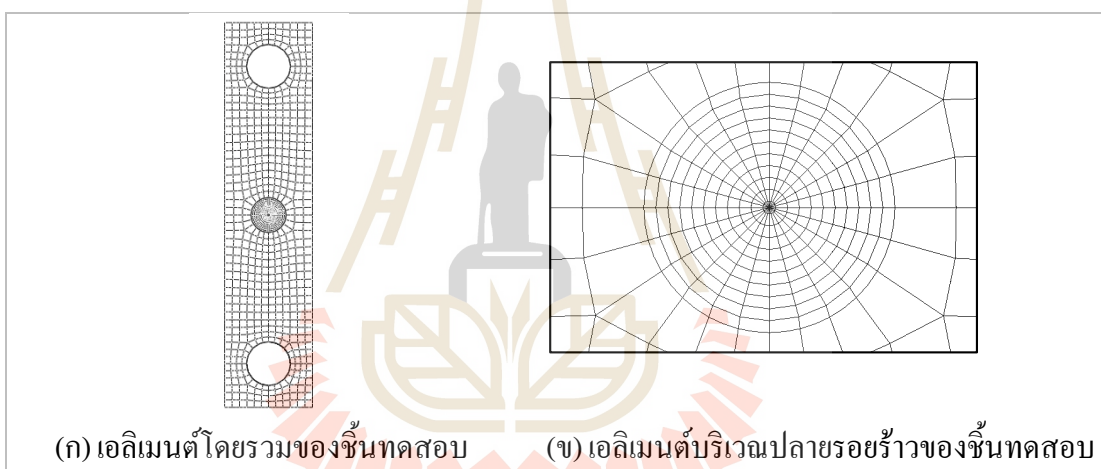
(ก) เอลิเมนต์โดยรวมของอุปกรณ์ทดสอบ

(ข) เอลิเมนต์ชนิดสี่เหลี่ยม 4 จุดต่อ

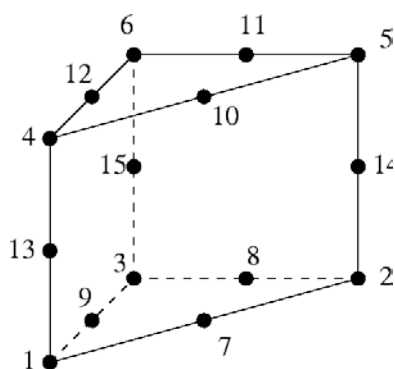
รูปที่ 3.10 ลักษณะการแบ่งเอลิเมนต์อุปกรณ์ทดสอบ



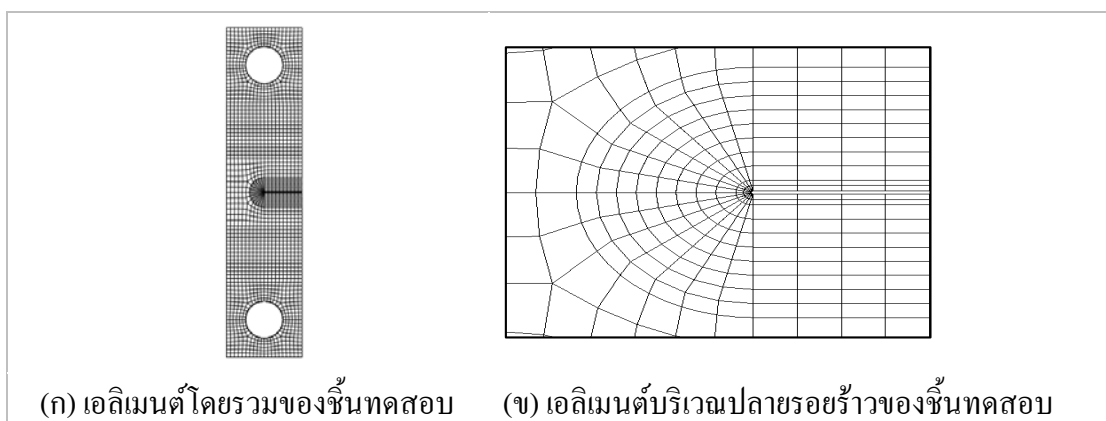
รูปที่ 3.11 ลักษณะการแบ่งเอลิเมนต์หมุดร้อยชั้นทดสอบ



รูปที่ 3.12 การแบ่งเอลิเมนต์ของชั้นทดสอบกรณีตัวประกอบความเข้มของความเค้น

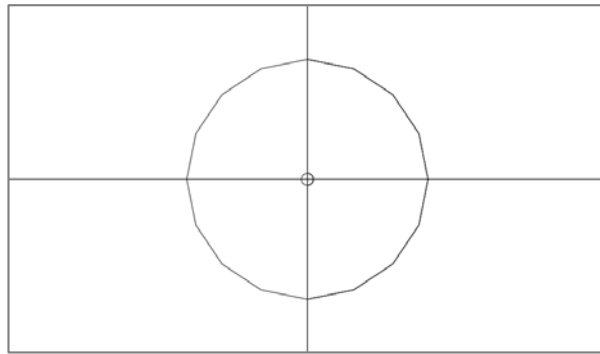


รูปที่ 3.13 เอลิเมนต์แบบลิ้มสามเหลี่ยม 15 จุดต่อ (C3D15)

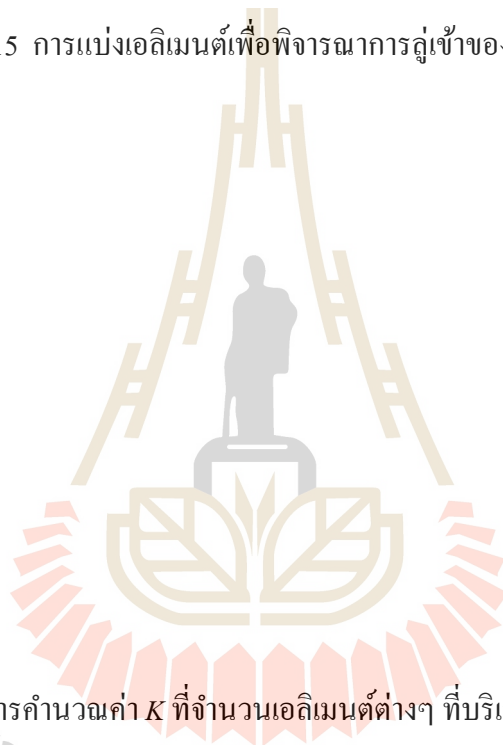


รูปที่ 3.14 การแบ่งเอลิเมนต์ของชิ้นทดสอบกรณีพารามิเตอร์ J -อินทิกรัล

การเลือกจำนวนเอลิเมนต์ที่ปลายรอยร้าวของชิ้นทดสอบในการคำนวณความต้านทานการแตกหักภายใต้โหมดผสม 1 และ 3 ของอีพอกซีเรซินในหัวข้อที่ 3.4.2.3 จะพิจารณาจากการดูเข้าของค่าความต้านทานการแตกหักจากการคำนวณด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ที่เกิดจากเปลี่ยนแปลงจำนวนของเอลิเมนต์ที่ปลายรอยร้าวของชิ้นทดสอบ (Mesh convergence) การเปลี่ยนแปลงขนาดของเอลิเมนต์จะเริ่มจากบริเวณ Mesh refinement (A) เมื่อได้จำนวนเอลิเมนต์ที่ทำให้ค่าจากการคำนวณเริ่มคงที่แล้วจึงจะพิจารณาเปลี่ยนแปลงจำนวนของเอลิเมนต์บริเวณ Mesh refinement (B) ต่อไป (รูปที่ 3.15 และ 3.18) สำหรับชิ้นทดสอบที่ใช้ในการคำนวณค่า K จะพบว่าจำนวนเอลิเมนต์ที่ค่าจากการคำนวณเริ่มคงที่ที่บริเวณ Mesh refinement (A) เท่ากับ 6 เอลิเมนต์ต่อ 1/4 รอบของวงกลม (รูปที่ 3.16) และบริเวณ Mesh refinement (B) เท่ากับ 10 เอลิเมนต์ (รูปที่ 3.17) สำหรับชิ้นทดสอบที่ใช้ในการคำนวณค่า J_c และ $CTOD$ จะพบว่าจำนวนเอลิเมนต์ที่ค่าจากการคำนวณเริ่มคงที่ที่บริเวณ Mesh refinement (A) เท่ากับ 7 เอลิเมนต์ต่อ 1/4 รอบของวงกลม (รูปที่ 3.19) และบริเวณ Mesh refinement (B) เท่ากับ 8 เอลิเมนต์ (รูปที่ 3.20)

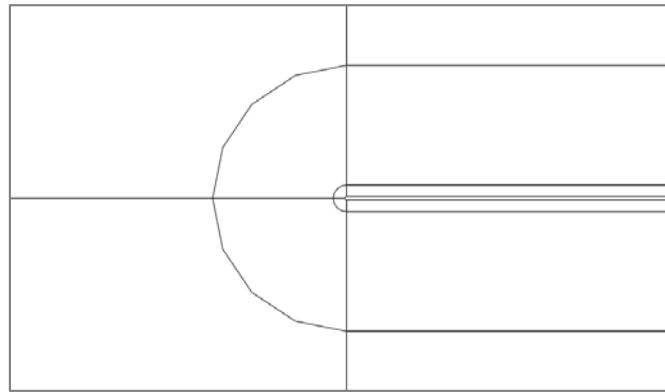


รูปที่ 3.15 การแบ่งเอลิเมนต์เพื่อพิจารณาการลู่เข้าของการคำนวณค่า K



รูปที่ 3.16 ผลการคำนวณค่า K ที่จำนวนเอลิเมนต์ต่างๆ ที่บริเวณ Mesh refinement (A)

รูปที่ 3.17 ผลการคำนวณค่า K ที่จำนวนเอลิเมนต์ต่างๆ ที่บริเวณ Mesh refinement (B)



รูปที่ 3.18 การแบ่งเอลิเมนต์เพื่อพิจารณาการลู่เข้าของการคำนวณค่า J_C และ $CTOD$

รูปที่ 3.19 ผลการคำนวณค่า J_C ที่จำนวนเอลิเมนต์ต่างๆ ที่บริเวณ Mesh refinement (A)

รูปที่ 3.20 ผลการคำนวณค่า J_C ที่จำนวนเอลิเมนต์ต่างๆ ที่บริเวณ Mesh refinement (B)

บทที่ 4

ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

4.1 กล่าวนำ

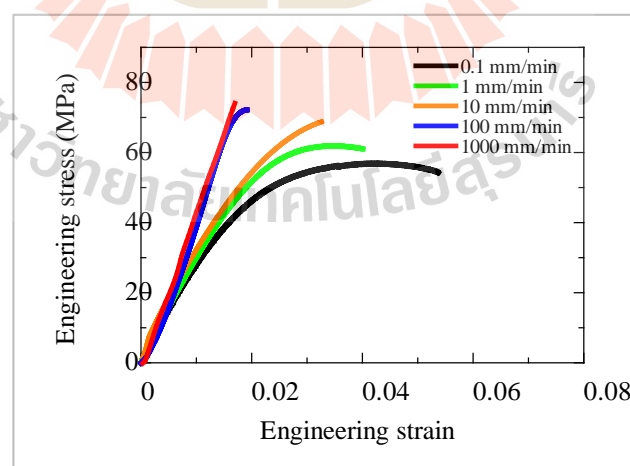
บทนี้จะนำเสนอถึงผลกระทบของความหนาและอัตราภาระต่อการเปลี่ยนแปลงสถานะความเค้นที่ส่งผลโดยตรงต่อความต้านทานการแตกหักและกลไกการแตกหักของอีพอกซีเรซิน บทความส่วนแรกจะนำเสนอถึงผลกระทบของอัตราภาระต่อความสามารถในการรับแรงดึงและพฤติกรรมการแตกหักของวัสดุภายใต้การรับแรงดึง ส่วนต่อมานำเสนอถึงผลกระทบของความหนาและอัตราภาระต่อความต้านทานการแตกหักภายใต้การรับภาระโหมดที่ 1 และ โหมดผสม 1 และ 3 โดยในส่วนนี้จะรวมถึงการอธิบายกลไกการแตกหักด้วยภาพถ่ายพื้นผิวการแตกหักของชิ้นทดสอบความต้านทานการแตกหักด้วย

4.2 ผลการทดสอบแรงดึง

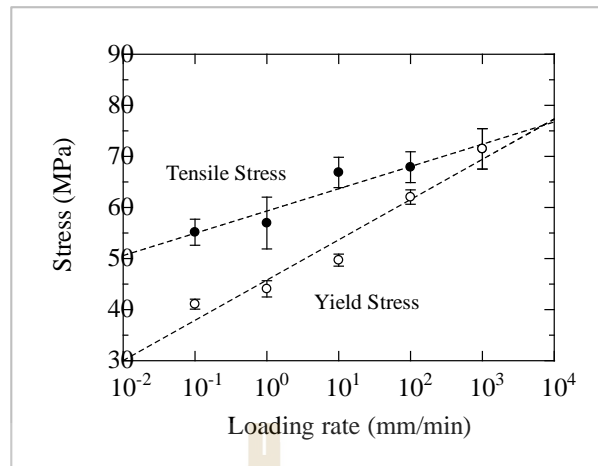
ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของอีพอกซีเรซินจากการทดสอบแรงดึงที่อัตราภาระ 0.1, 1, 10, 100 และ 1000 มิลลิเมตรต่อนาทีที่จะแสดงดังรูปที่ 4.1 จากกราฟความสัมพันธ์พบว่าค่าความเค้นแรงดึง (Ultimate tensile stress) ของอีพอกซีเรซินมีค่าที่ต่ำที่สุดที่อัตราภาระ 0.1 มิลลิเมตรต่อนาทีและสูงสุดที่อัตราภาระ 1000 มิลลิเมตรต่อนาที โดยค่าความเค้นแรงดึงมีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราภาระในการทดสอบเพิ่มขึ้น ตรงกันข้ามกับแนวโน้มของความเครียดแรงดึงที่จะมีค่าลดลงเมื่ออัตราภาระของการทดสอบมีค่าเพิ่มขึ้น สำหรับความเครียดแรงดึงจะมีค่าสูงสุดที่อัตราภาระ 0.1 มิลลิเมตรต่อนาทีและต่ำที่สุดที่อัตราภาระ 1000 มิลลิเมตรต่อนาที

เมื่อนำค่าความเค้นแรงดึงและความเค้นครากที่อัตราภาระ 0.1, 1, 10, 100 และ 1000 มิลลิเมตรต่อนาทีมาสร้างกราฟความสัมพันธ์กับอัตราภาระในการทดสอบดังรูปที่ 4.2 จะพบว่าเมื่ออัตราภาระในการทดสอบมีค่าเพิ่มขึ้นความแตกต่างของค่าความเค้นแรงดึงกับค่าความเค้นครากของอีพอกซีเรซินมีแนวโน้มที่จะลดลงจนมีค่าเท่ากันที่อัตราภาระ 1000 มิลลิเมตรต่อนาที พฤติกรรมดังกล่าวแสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมการแตกหักของวัสดุจากพฤติกรรมการแตกหักแบบเหนียวเป็นพฤติกรรมการแตกหักแบบเปราะ การทดสอบที่อัตราภาระต่ำพฤติกรรมการแตกหักของวัสดุจะเป็นแบบเหนียว เมื่อวัสดุรับภาระจนถึงความเค้นครากของวัสดุแล้ววัสดุจะยังสามารถรับภาระต่อไปได้ด้วยการเปลี่ยนแปลงขนาดพื้นที่หน้าตัดของวัสดุจนกระทั่งเกิดการแตกหักแบบเฉียบพลันในที่สุด

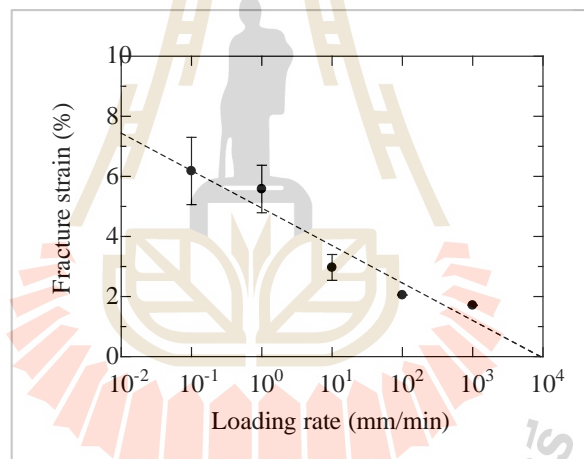
การทดสอบที่อัตราภาระสูงพฤติกรรมการแตกหักของวัสดุจะเป็นแบบเปราะ วัสดุจะสามารถรับภาระต่อไปได้น้อยมากหรือไม่สามารถรับภาระต่อไปได้เลยเมื่อภาระที่กระทำกับวัสดุถึงจุดความเค้นครากแล้ว กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเครียด ณ จุดแตกหักที่มีสูตรคำนวณพื้นฐานจากสัดส่วนของการเปลี่ยนแปลงความยาวของชิ้นทดสอบหลังการทดสอบต่อความยาวเริ่มต้นของชิ้นทดสอบกับอัตราภาระในการทดสอบ (รูปที่ 4.3) แสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงความยาวของชิ้นทดสอบที่ลดลงเมื่ออัตราภาระในการทดสอบเพิ่มขึ้น สำหรับการเปลี่ยนแปลงความยาวของชิ้นทดสอบจะส่งผลให้ขนาดพื้นที่หน้าตัดของชิ้นทดสอบที่มีค่าลดลงตามไปด้วย การลดลงของความเครียด ณ จุดแตกหักเมื่ออัตราภาระในการทดสอบเพิ่มขึ้นนี้เป็นหลักฐานที่สำคัญที่แสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมการแตกหักจากการแตกหักแบบเหนียวที่อัตราภาระในการทดสอบต่ำเป็นการแตกหักแบบเปราะที่อัตราภาระในการทดสอบสูงของอีพอกซีเรซิน สำหรับพฤติกรรมเปลี่ยนแปลงดังกล่าวนี้จะเรียกว่าพฤติกรรมที่ขึ้นอยู่กับเวลา (Time dependent) โดยวัสดุที่แสดงพฤติกรรมที่ขึ้นอยู่กับเวลาจะเรียกว่าวัสดุที่มีคุณสมบัติแบบวิสโคอีลาสติก (Viscoelastic) พฤติกรรมที่ขึ้นอยู่กับเวลาของอีพอกซีเรซินแสดงให้เห็นอย่างชัดเจนเมื่อเปลี่ยนแปลงภาระในการทดสอบ (C. Kanchanomai., et al. (2005) และ M. M. Shokrieh., et al (2017)) สำหรับการทดสอบที่อัตราภาระต่ำนั้นจะหมายถึงการที่ชิ้นทดสอบถูกดึงด้วยเวลาที่มากกว่าการทดสอบที่อัตราภาระ สำหรับคุณสมบัติทางกลที่ใช้ในการคำนวณความต้านทานการแตกหักจะแสดงตารางที่ 4.1 และกราฟความสัมพันธ์ของความเค้นและความเครียดจริงจะแสดงดังรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.1 กราฟความสัมพันธ์ของความเค้นกับความเครียดที่อัตราภาระต่างๆ



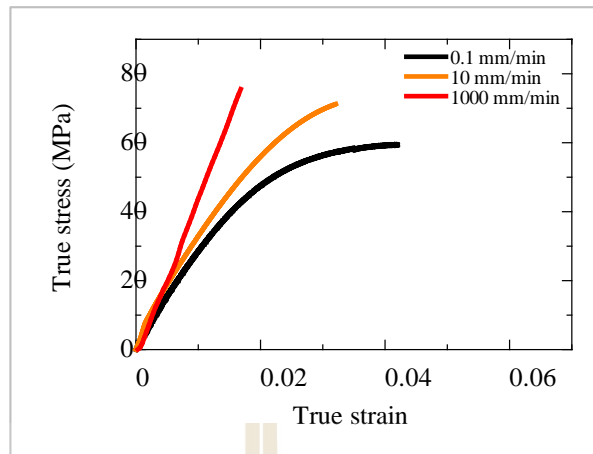
รูปที่ 4.2 กราฟความสัมพันธ์ของความเค้นแรงดึงและความเค้นครากที่อัตราภาระต่างๆ



รูปที่ 4.3 กราฟความสัมพันธ์ของความเค้นจุดแตกหักที่อัตราภาระต่างๆ

ตารางที่ 4.1 คุณสมบัติการทดสอบแรงดึงของอีพอกซีเรซิน

Properties	Loading rate (mm/min)				
	0.1	1	10	100	1000
Modulus (GPa)	3.16±0.08	3.20±0.01	3.38±0.03	3.78±0.04	4.15±0.18
Yield strength (MPa)	41.07±0.98	44.07±1.59	49.69±1.18	62.04±1.41	71.48±3.96
Tensile strength (MPa)	55.15±2.55	56.95±5.07	66.86±2.97	67.89±3.02	71.48±3.96
Fracture strain (%)	6.18±1.12	5.58±0.79	2.97±0.43	2.05±0.01	1.71±0.01

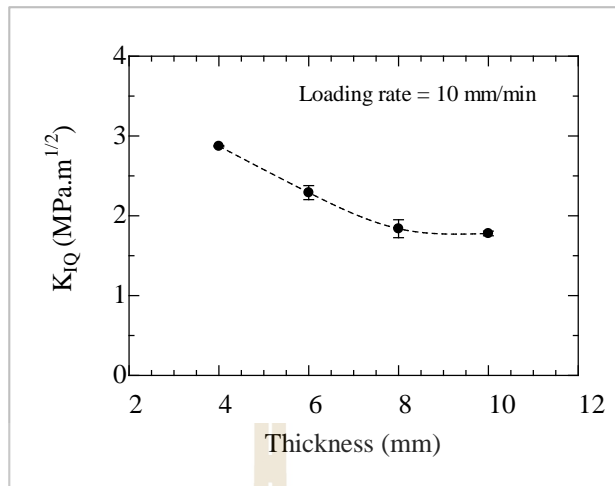


รูปที่ 4.4 กราฟความสัมพันธ์ของความเค้น-ความเครียดจริงของอีพอกซีเรซินที่อัตราเร็วต่างๆ

4.3 ผลการทดสอบความต้านทานการแตกหักภายใต้โหมดที่ 1

4.3.1 ผลกระทบของความหนาต่อความต้านทานการแตกหักภายใต้โหมดที่ 1

กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนากับตัวประกอบความเข้มของความเค้นภายใต้การรับภาระโหมดที่ 1 (K_I) ที่อัตราเร็ว 10 มิลลิเมตรต่อวินาทีจะแสดงดังรูปที่ 4.5 จากกราฟความสัมพันธ์จะพบว่าเมื่อความหนาของชิ้นทดสอบมากขึ้นค่า K_I จะมีค่าลดลงอย่างต่อเนื่องจนเริ่มมีค่าคงที่แม้ความหนาของชิ้นทดสอบจะมากขึ้น สำหรับค่า K_I ของอีพอกซีเรซินในงานวิจัยชิ้นนี้จะเริ่มคงที่ที่ความหนา 8 มิลลิเมตร พฤติกรรมที่ค่า K_I มีค่าคงที่แม้ความหนาของชิ้นทดสอบจะมากขึ้นเกิดจากการเปลี่ยนสถานะความเค้นที่ปลายรอยร้าวของชิ้นทดสอบจากสถานะความเค้นระนาบ (Plane stress) เป็นความเครียดระนาบ (Plane strain) ตามทฤษฎีของกลศาสตร์การแตกหักยืดหยุ่นเชิงเส้นที่ได้นำเสนอไว้ในทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยก่อนหน้านี้



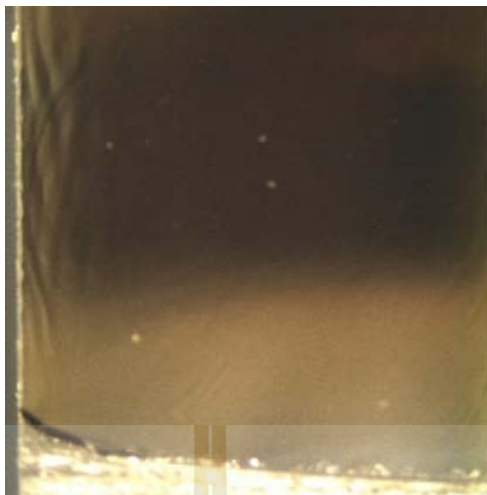
รูปที่ 4.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนา กับค่าตัวประกอบความเข้มของความเค้น ภายใต้ภาระโหมดที่ 1

สำหรับสถานะความเค้นที่ปลายรอยร้าวที่แตกต่างกันของชิ้นทดสอบจะส่งผลต่อลักษณะและพฤติกรรมการแตกหักของชิ้นทดสอบด้วย สำหรับสถานะความเค้นระนาบชิ้นทดสอบ จะเกิดความเค้นแบบ 2 มิติและเกิดความเครียดแบบ 3 มิติขึ้นที่ปลายรอยร้าวส่งผลให้ชิ้นทดสอบสามารถเกิดการยุบตัวในแนวความหนาได้ต่างจากสถานะความเครียดระนาบที่จะเกิดความเค้นแบบ 3 มิติและเกิดความเครียดแบบ 2 มิติทำให้ชิ้นทดสอบไม่สามารถเกิดการยุบตัวในแนวความหนาได้ สำหรับลักษณะและพฤติกรรมการแตกหักของชิ้นทดสอบสามารถศึกษาได้จากพื้นผิวการแตกหักของชิ้นทดสอบดังรูปที่ 4.6 และ 4.7 ซึ่งเป็นพื้นผิวการแตกหักของชิ้นทดสอบหนา 4 และ 8 มิลลิเมตรตามลำดับ (พิจารณาจากความหนาที่เกิดสถานะความเค้นระนาบและความหนาที่เริ่มเข้าสู่ความเครียดระนาบ) รอยร้าวของชิ้นทดสอบจะเริ่มขยายตัวจากกลางชิ้นบนหรือตามทิศทางของลูกศรภายในรูป พื้นผิวการแตกหักของชิ้นทดสอบจะสามารถแบ่งออกเป็นบริเวณต่างๆ ตามกลไกการแตกหักได้ดังรูปที่ 4.8 อันจะได้แก่ บริเวณรอยร้าวเริ่มต้น (Notch) บริเวณจุดเริ่มต้นของรอยร้าว (Crack front) และบริเวณพื้นผิวการแตกหัก (Fracture surface) เมื่อชิ้นทดสอบได้รับภาระรอยร้าวจะเริ่มขยายตัวจากบริเวณจุดเริ่มต้นของรอยร้าวและขยายตัวอย่างต่อเนื่องจนเกิดการแตกหักในที่สุด สำหรับชิ้นทดสอบหนา 4 มิลลิเมตร (รูปที่ 4.6) พื้นผิวการแตกหักสามารถสังเกตเห็นบริเวณที่เกิดการเสียรูป (Deformation zone) จากการยึดตัวได้อย่างชัดเจน บริเวณดังกล่าวเกิดจากผลของแรงในทิศทางตั้งฉากกับผิวรอยร้าว (Principal stress) ที่กระทำกับชิ้นทดสอบจนรอยร้าวเกิดการขยายตัว (ทิศทางของแรงกระทำในลักษณะเปิดรอยร้าวซึ่งเป็นลักษณะของภาระในโหมดที่ 1) บริเวณการเสียรูปที่เกิดขึ้นยังแสดงให้เห็นถึงกระบวนการเสียรูปเมื่อมีภาระมากกระทำซึ่งเป็นลักษณะของการเสียรูป

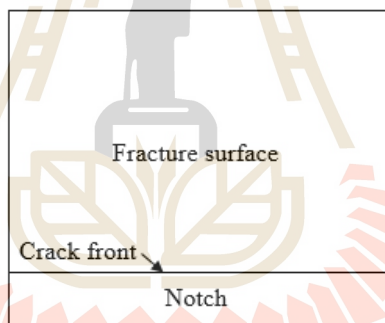
จากสถานะความเค้นระนาบและเมื่อภาระที่กระทำกับชิ้นทดสอบมากขึ้นเกินกว่าจะรับได้ชิ้นทดสอบจึงเกิดการแตกหักแบบเฉียบพลันขึ้นในที่สุด (บริเวณด้านบนของพื้นผิวการแตกหัก) สำหรับพื้นผิวการแตกหักของชิ้นทดสอบหนา 8 มิลลิเมตร (รูปที่ 4.7) แสดงให้เห็นถึงพื้นผิวการแตกหักที่ค่อนข้างเรียบ ลักษณะพื้นผิวการแตกหักดังกล่าวเรียกว่าพื้นผิวคล้ายกระจก (Mirror-like surface) ที่เป็นลักษณะของการแตกหักแบบเปราะที่เกิดจากการขยายตัวของรอยร้าวอย่างรวดเร็วจนเกิดการแตกหักขึ้นแบบเฉียบพลัน การแตกหักแบบเฉียบพลันดังกล่าวเกิดขึ้นเนื่องจากผลของสถานะความเค้นระนาบที่ปลายรอยร้าวที่สามารถเกิดความเค้นขึ้น 2 มิติเท่านั้นทำให้ภาระที่กระทำกับชิ้นทดสอบส่วนใหญ่มุ่งไปขยายรอยร้าว พื้นผิวการแตกหักจึงเสียน้อยกว่าเมื่อเทียบกับชิ้นทดสอบหนา 4 มิลลิเมตรที่แตกหักภายใต้ผลของสถานะความเค้นระนาบที่เกิดความเค้นขึ้น 3 มิติ



รูปที่ 4.6 พื้นผิวการแตกหักของชิ้นทดสอบหนา 4 มิลลิเมตรที่อัตราภาระ 10 มิลลิเมตรต่อวินาที



รูปที่ 4.7 พื้นผิวการแตกหักของชิ้นทดสอบหนา 8 มิลลิเมตรที่อัตราภาระ 10 มิลลิเมตรต่อนาที

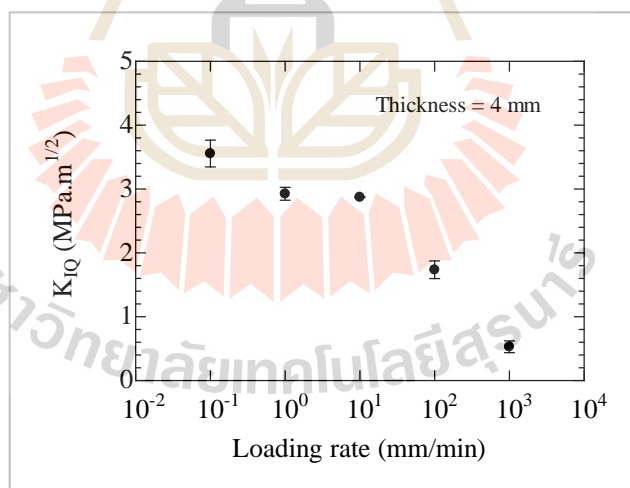


รูปที่ 4.8 กลไกการแตกหักที่พื้นผิวการแตกหักของชิ้นทดสอบ

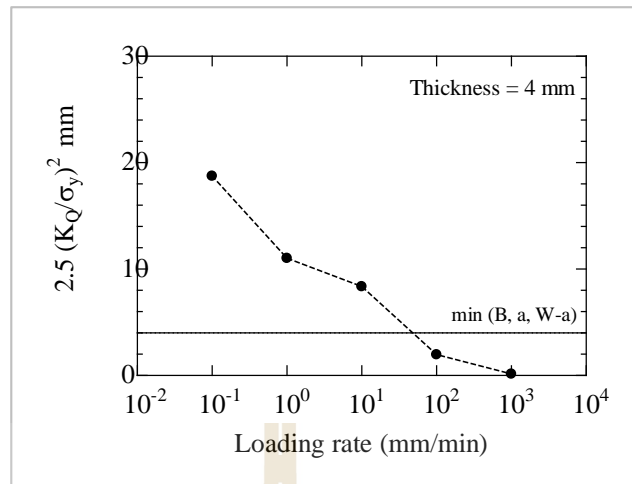
4.3.2 ผลกระทบของอัตราภาระต่อความต้านทานการแตกหักภายใต้โหมดที่ 1

สำหรับผลกระทบของอัตราภาระต่อความต้านทานการแตกหักภายใต้ภาระโหมดที่ 1 (K_I) นั้นจะพิจารณาบนชิ้นทดสอบหนา 4 และ 8 มิลลิเมตรซึ่งเป็นความหนาที่สถานะความเค้นที่ปลายรอยร้าวแตกต่างกันที่อัตราภาระ 10 มิลลิเมตรต่อนาทีดังที่กล่าวไว้ในส่วนก่อนหน้านี้ เพื่อศึกษาผลกระทบของอัตราภาระที่เกิดขึ้นกับชิ้นทดสอบทั้งสองความหนาจะทำการทดสอบที่อัตราภาระ 0.1, 1, 10, 100 และ 1000 มิลลิเมตรต่อนาที กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า K_I กับอัตราภาระในการทดสอบของชิ้นทดสอบหนา 4 มิลลิเมตรจะแสดงดังรูปที่ 4.9 จากกราฟความสัมพันธ์จะแสดงให้เห็นถึงแนวโน้มของค่า K_I ที่ลดลงเมื่ออัตราภาระในการทดสอบเพิ่มขึ้น โดยค่า K_I จะมีค่ามากที่สุดที่อัตราภาระ 0.1 มิลลิเมตรต่อนาทีและมีค่าน้อยที่สุดที่อัตราภาระ 1000 มิลลิเมตรต่อนาที

สำหรับพารามิเตอร์ K_I ที่ตั้งอยู่บนทฤษฎีกลศาสตร์การแตกหักยืดหยุ่นเชิงเส้นที่ใช้บ่งบอกความรุนแรงของรอยร้าวสำหรับวัสดุที่เกิดการเสียดรูปขึ้นน้อยจะมีขีดจำกัดความแม่นยำของพารามิเตอร์ตามขนาดของการเสียดรูปบริเวณปลายรอยร้าวตามสมการที่ 2.15 เมื่อพิจารณาขนาดของการเสียดรูปของชิ้นทดสอบหนา 4 มิลลิเมตรที่อัตราภาระต่างๆ ตามสมการขีดจำกัดดังรูปที่ 4.10 ซึ่งจากรูป $\min(B, a, W-a)$ คือขีดจำกัดของขนาดการเสียดรูปที่มากที่สุดที่ยังอยู่บนทฤษฎีกลศาสตร์การแตกหักยืดหยุ่นเชิงเส้นของชิ้นทดสอบหนา 4 มิลลิเมตร อีกทั้งสมการขีดจำกัดดังกล่าวยังสามารถใช้พิจารณาสถานะความเค้นที่ปลายรอยร้าวของชิ้นทดสอบได้อีกด้วย จากกราฟความสัมพันธ์จะพบว่าที่อัตราภาระ 0.1, 1 และ 10 มิลลิเมตรต่อวินาทีนั้นขนาดของการเสียดรูปบริเวณปลายรอยร้าวของชิ้นทดสอบจะอยู่นอกขีดจำกัดของทฤษฎีกลศาสตร์การแตกหักยืดหยุ่นเชิงเส้นส่งผลให้ชิ้นทดสอบเกิดสถานะความเค้นระนาบขึ้นที่ปลายรอยร้าวต่างจากที่อัตราภาระ 100 และ 1000 มิลลิเมตรต่อวินาทีที่ขนาดของการเสียดรูปบริเวณปลายรอยร้าวยังอยู่ในขีดจำกัดของทฤษฎี ส่งผลให้เกิดสถานะความเค้นระนาบขึ้น การที่ค่า K_I มีค่าลดลงเมื่ออัตราภาระในการทดสอบมากขึ้นแม้จะเกิดสถานะความเค้นที่ปลายรอยร้าวเหมือนกันมีสาเหตุจากการลดลงของขนาดการเสียดรูปที่ปลายรอยร้าวนั่นเอง

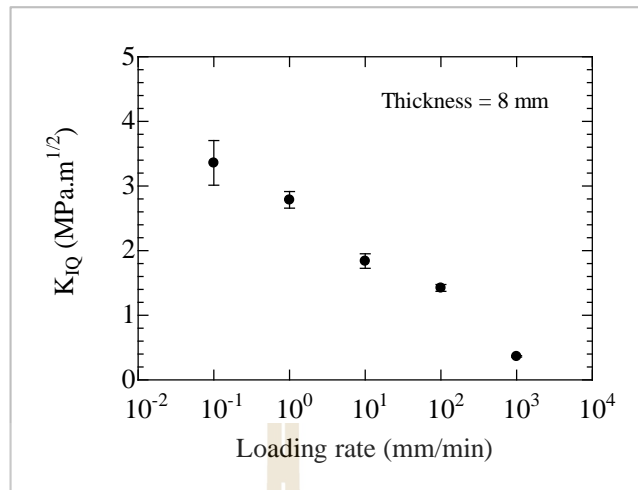


รูปที่ 4.9 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราภาระกับค่า K_I ของชิ้นทดสอบหนา 4 มิลลิเมตร

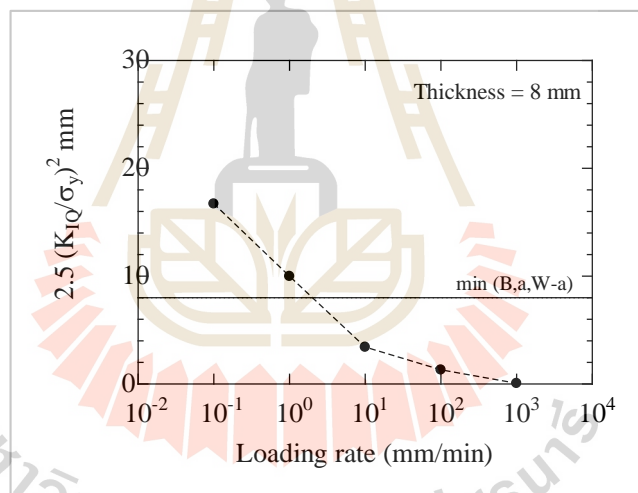


รูปที่ 4.10 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของการเสียรูปบริเวณปลายรอยร้าวกับอัตราการกระของชิ้นทดสอบหนา 4 มิลลิเมตร

กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า K_I กับอัตราการกระในการทดสอบของชิ้นทดสอบหนา 8 มิลลิเมตรจะแสดงดังรูปที่ 4.11 กราฟความสัมพันธ์แสดงให้เห็นถึงแนวโน้มของค่า K_I ที่ลดลงเมื่ออัตราการกระในการทดสอบมากขึ้นเช่นเดียวกับชิ้นทดสอบหนา 4 มิลลิเมตร ค่า K_I ของชิ้นทดสอบหนา 8 มิลลิเมตรจะมีค่ามากที่สุดที่อัตราการกระ 0.1 มิลลิเมตรต่อนาทีและมีค่าลดลงอย่างต่อเนื่องจนมีน้อยที่สุดที่อัตราการกระ 1000 มิลลิเมตรต่อนาที เมื่อพิจารณาขนาดของการเสียรูปบริเวณปลายรอยร้าวเทียบกับขีดจำกัดของทฤษฎีกลศาสตร์การแตกหักที่ยืดหยุ่นเชิงเส้นดังรูปที่ 4.12 จะพบว่าที่อัตราการกระ 0.1 และ 1 มิลลิเมตรต่อนาทีขนาดของการเสียรูปบริเวณปลายรอยร้าวของชิ้นทดสอบจะอยู่นอกขีดจำกัดของทฤษฎีกลศาสตร์การแตกหักที่ยืดหยุ่นเชิงเส้นส่งผลให้ชิ้นทดสอบเกิดสถานะความเค้นระนาบขึ้นที่ปลายรอยร้าวต่างจากที่อัตราการกระ 10, 100 และ 1000 มิลลิเมตรต่อนาทีที่ขนาดของการเสียรูปบริเวณปลายรอยร้าวยังอยู่ในขีดจำกัดของทฤษฎีส่งผลให้เกิดสถานะความเค้นระนาบขึ้น



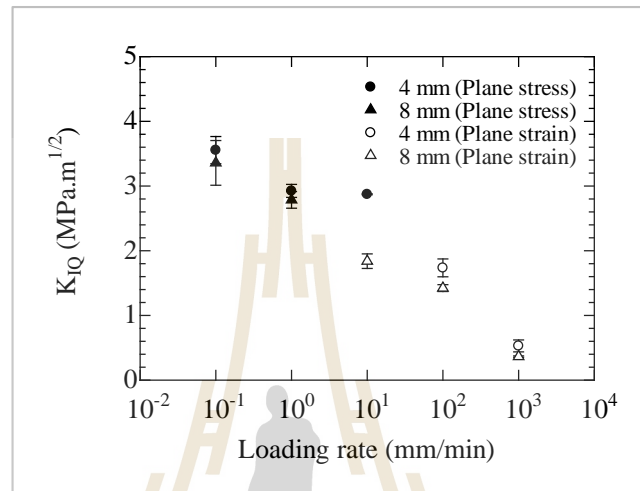
รูปที่ 4.11 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราภาระกับค่า K_I ของชิ้นทดสอบหนา 8 มิลลิเมตร



รูปที่ 4.12 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของการเสียรูปบริเวณปลายรอยร้าวกับอัตราภาระของชิ้นทดสอบหนา 8 มิลลิเมตร

เมื่อเปรียบเทียบค่า K_I ของชิ้นทดสอบหนา 4 และ 8 มิลลิเมตรที่อัตราภาระในการทดสอบต่างๆ ดังรูปที่ 4.13 จากการเปรียบเทียบพบว่าแนวโน้มของค่า K_I ของชิ้นทดสอบทั้งสองความหนาเป็นไปในทิศทางเดียวกันกล่าวคือเมื่ออัตราภาระในการทดสอบเพิ่มขึ้นค่า K_I ของชิ้นทดสอบทั้งสองความหนามีค่าลดลงเช่นเดียวกันและเมื่อเปรียบเทียบค่า K_I ของชิ้นทดสอบทั้งสองความหนาที่อัตราภาระเดียวกันจะพบว่าค่า K_I ของชิ้นทดสอบหนา 4 มิลลิเมตรจะมีค่ามากกว่าชิ้นทดสอบหนา 8 มิลลิเมตรทุกอัตราภาระในการทดสอบ โดยค่า K_I ของชิ้นทดสอบจะมีค่าแตกต่างกัน

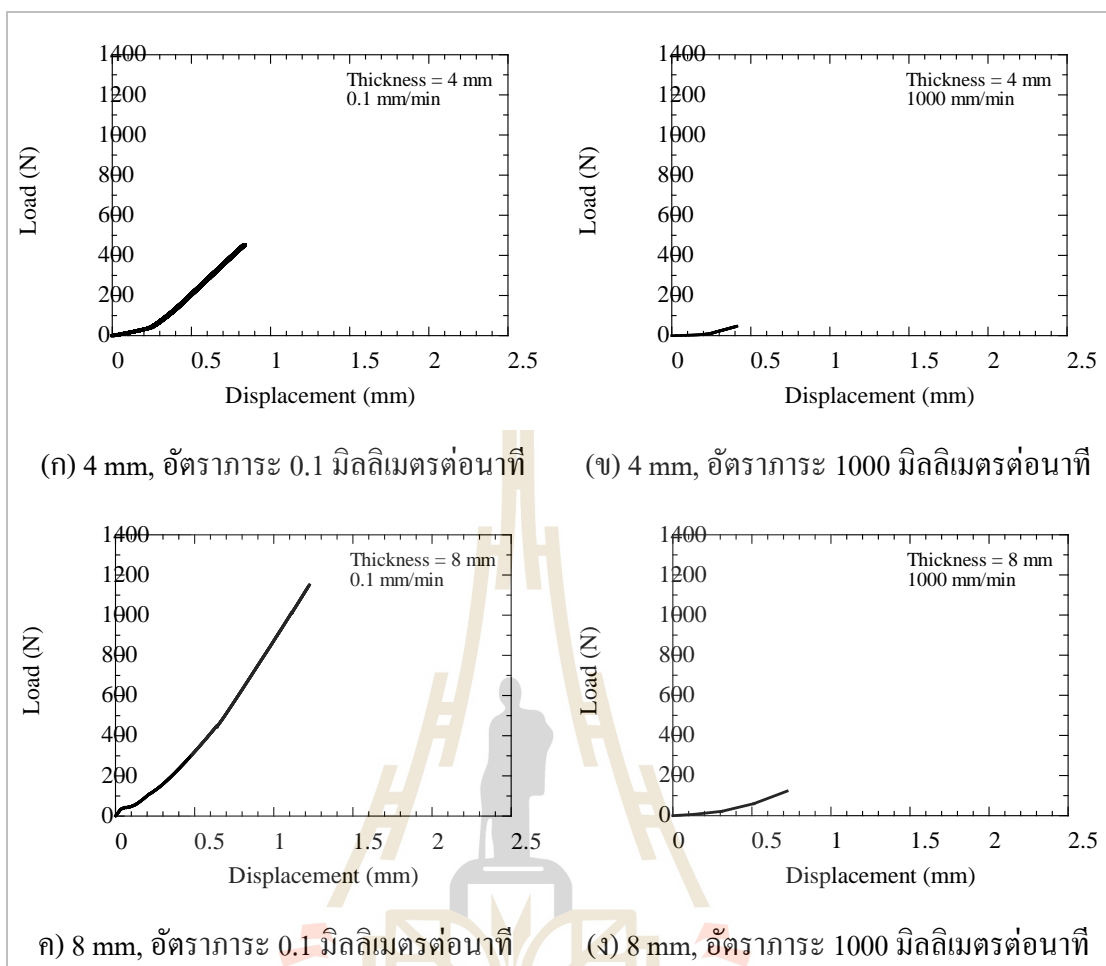
มากที่สุดที่อัตราการกระ 10 มิลลิเมตรต่อนาที เนื่องจากความแตกต่างของสถานะความเค้นที่ปลายรอยร้าวของชิ้นทดสอบ สำหรับอัตราการกระ 10 มิลลิเมตรต่อนาทีชิ้นทดสอบหนา 4 มิลลิเมตรจะเกิดสถานะความเค้นระนาบที่ปลายรอยร้าวส่วนชิ้นทดสอบหนา 8 มิลลิเมตรจะเกิดสถานะความเค้นระนาบทำให้ค่า K_I ของชิ้นทดสอบทั้งสองแตกต่างกันอย่างชัดเจนเมื่อเทียบกับที่อัตราการกระอื่นๆ



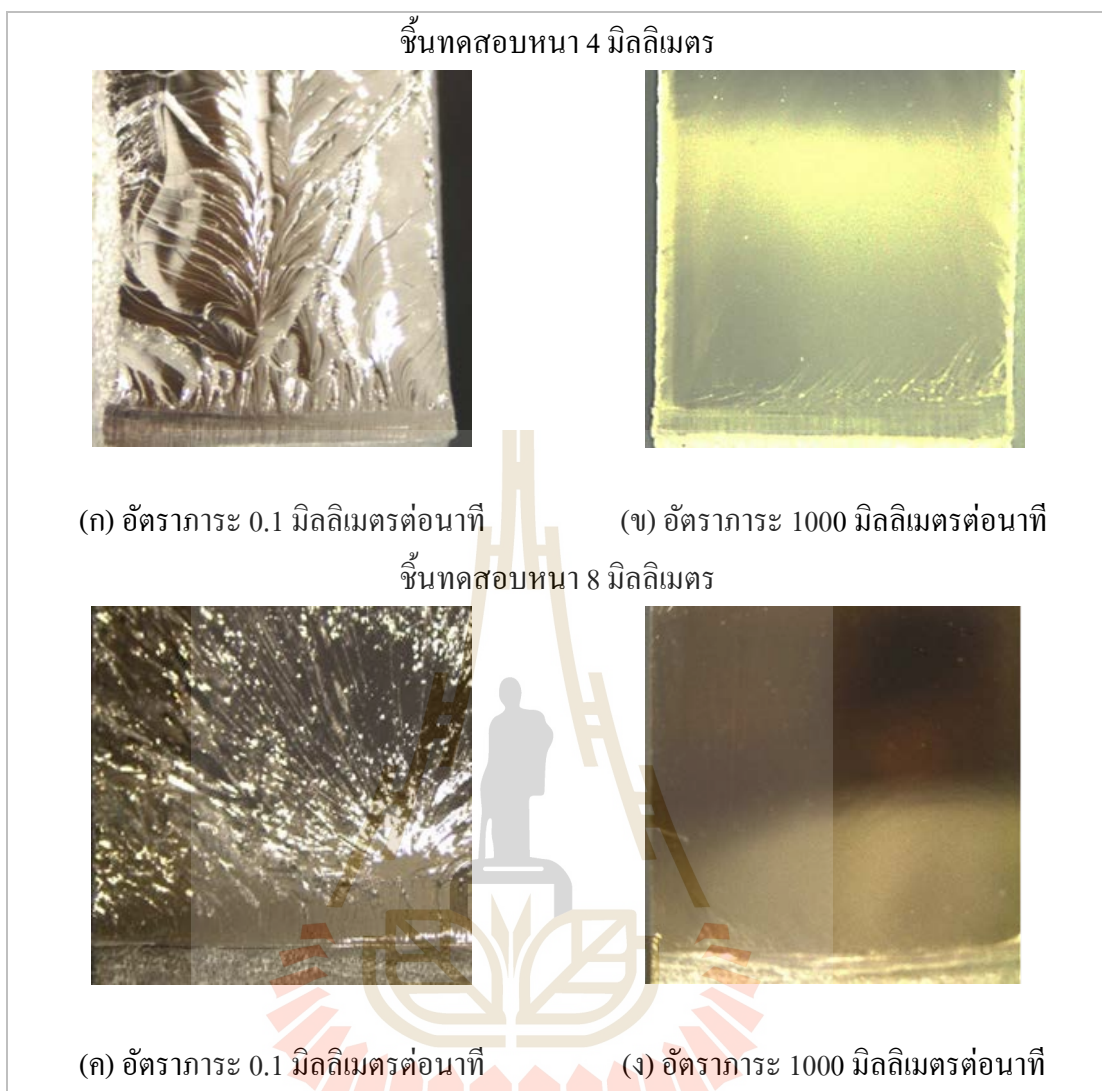
รูปที่ 4.13 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการกระกับค่า K_I ของชิ้นทดสอบหนา 4 มิลลิเมตรเทียบกับชิ้นทดสอบ 8 มิลลิเมตร

เมื่อเปรียบเทียบค่า K_I ของชิ้นทดสอบทั้งสองความหนาที่อัตราการกระเดียวกันจะพบว่าชิ้นทดสอบหนา 4 มิลลิเมตรจะมีค่า K_I ที่มากกว่าแม้จะเกิดสถานะความเค้นที่ปลายรอยร้าวแบบเดียวกันก็ตาม สำหรับพฤติกรรมดังกล่าวนี้สามารถอธิบายได้ด้วยความสัมพันธ์ของภาระสูงสุดกับระยะยึดตัวของชิ้นทดสอบโดยเลือกพิจารณาที่อัตราการกระ 0.1 มิลลิเมตรต่อนาทีที่เกิดการเสียรูปมากที่สุดและอัตราการกระ 1000 ต่อนาทีที่เกิดการเสียรูปน้อยที่สุด กราฟความสัมพันธ์ดังกล่าวจะแสดงดังรูปที่ 4.14 จากกราฟความสัมพันธ์พบว่าที่อัตราการกระ 0.1 มิลลิเมตรต่อนาทีชิ้นทดสอบทั้งสองความหนามีค่าภาระสูงสุดและระยะยึดตัวของชิ้นทดสอบมากกว่าที่อัตราการกระ 1000 มิลลิเมตรต่อนาทีจากพฤติกรรมที่ขึ้นอยู่กับเวลาของอีพอกซีเรซิน (ตามผลจากการทดสอบแรงดึงก่อนหน้านี้) พฤติกรรมที่ขึ้นอยู่กับเวลาของอีพอกซีเรซินนั้นส่งผลโดยตรงกับการเสียรูปของชิ้นทดสอบหรือสามารถกล่าวได้ว่าพฤติกรรมที่ขึ้นอยู่กับเวลานี้ส่งผลต่อการเปลี่ยนสถานะความเค้นที่ปลายรอยร้าวของชิ้นทดสอบนั่นเอง สำหรับการทดสอบที่อัตราการกระ 0.1 มิลลิเมตรต่อนาทีที่จะเกิดสถานะความเค้นระนาบที่ปลายรอยร้าวและที่อัตราการกระ 1000 มิลลิเมตรต่อนาทีที่จะเกิดสถานะความเค้นระนาบที่ปลายรอยร้าว ลักษณะสถานะความเค้นที่เกิดขึ้นกับชิ้นทดสอบสามารถสังเกตได้จากการเสียรูป

ของพื้นผิวการแตกดังรูปที่ 4.15 ที่เปรียบเทียบพื้นผิวการแตกหักของชั้นทดสอบทั้งสองความหนาที่อัตราภาระ 0.1 กับ 1000 มิลลิเมตรต่อนาที พื้นผิวการแตกหักที่อัตราภาระ 0.1 มิลลิเมตรต่อนาทีของชั้นทดสอบทั้งสองความหนา (รูปที่ 4.15 (ก) และ 4.15 (ค)) แสดงให้เห็นถึงพฤติกรรมกรรมการแตกหักแบบเหนียวที่เกิดเสียรูปขึ้นก่อนการแตกหักจนสามารถเห็นได้อย่างชัดเจน อีกทั้งยังแสดงให้เห็นถึงการยุบตัวในแนวความหนา (รูปที่ 4.15 (ก)) ที่เกิดขึ้นเนื่องผลของสถานะความเค้นระนาบที่ปลายรอยร้าวของชั้นทดสอบจึงส่งผลให้ค่า K_I ของชั้นทดสอบที่อัตราภาระ 0.1 มิลลิเมตรต่อนาทีมีค่าสูงเนื่องจากภาระที่กระทำกับชั้นทดสอบส่วนหนึ่งจะถูกแบ่งไปใช้ในกระบวนการเสียรูป เมื่อเปรียบเทียบพื้นผิวการแตกหักของชั้นทดสอบหนา 4 กับ 8 มิลลิเมตรที่อัตราภาระ 0.1 มิลลิเมตรจะพบว่า การเสียรูปที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวการแตกหักของชั้นทดสอบหนา 4 มิลลิเมตรมากกว่าชั้นทดสอบหนา 8 มิลลิเมตร ส่งผลให้ค่า K_I ของชั้นทดสอบหนา 4 มิลลิเมตรมีค่ามากกว่าชั้นทดสอบหนา 8 มิลลิเมตรแม้จะอยู่ภายใต้ผลของสถานะความเค้นระนาบเช่นเดียวกันก็ตาม (รูปที่ 4.13) พื้นผิวการแตกหักของชั้นทดสอบที่อัตราภาระ 1000 มิลลิเมตรต่อนาทีของชั้นทดสอบทั้งสองความหนา (รูปที่ 4.15 (ข) และ 4.15 (ง)) แสดงให้เห็นถึงพฤติกรรมกรรมการแตกหักแบบเปราะที่มีลักษณะพื้นผิวการแตกหักค่อนข้างเรียบอันเกิดมาจากผลกระทบของสถานะความเค้นระนาบที่ปลายรอยร้าวของชั้นทดสอบทำให้ค่า K_I มีค่าที่ต่ำกว่าที่อัตราภาระ 0.1 มิลลิเมตรต่อนาทีเพราะภาระที่เกิดขึ้นกับชั้นทดสอบส่วนใหญ่จะมุ่งไปขยายรอยร้าวและหากเปรียบเทียบพื้นผิวการแตกหักของชั้นทดสอบหนา 4 กับ 8 มิลลิเมตรที่อัตราภาระ 1000 มิลลิเมตรต่อนาทีจะพบว่าลักษณะของการเสียรูปที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวการแตกหักของชั้นทดสอบหนา 4 มิลลิเมตรจะมีการเสียรูปที่มากกว่าพื้นผิวการแตกหักของชั้นทดสอบหนา 8 มิลลิเมตร ส่งผลให้ค่า K_I ของชั้นทดสอบหนา 4 มิลลิเมตรมากกว่าชั้นทดสอบหนา 8 มิลลิเมตรแม้สถานะความเค้นที่ปลายรอยร้าวจะอยู่ภายใต้ผลของสถานะความเค้นระนาบเช่นเดียวกัน (รูปที่ 4.13)



รูปที่ 4.14 กราฟความสัมพันธ์ของภาระสูงสุดกับระยะยึดตัวของชิ้นทดสอบที่อัตราการระต่างๆ



รูปที่ 4.15 พื้นผิวการแตกหักของชั้นทดสอบหนา 4 และ 8 มิลลิเมตรที่อัตราการะต่างๆ

4.4 ผลการทดสอบความต้านทานการแตกหักภายใต้โหมดผสม 1 และ 3

การทดสอบความต้านทานการแตกหักภายใต้โหมดผสม 1 และ 3 นั้นจะทำการทดสอบที่มุมของทิศทางภาระ (θ) เท่ากับ 0° , 65° , 78° และ 90° บนชั้นทดสอบหนา 4 และ 8 มิลลิเมตรที่อัตราการะ 0.1, 10 และ 1000 มิลลิเมตรต่อนาที การทดสอบที่เงื่อนไขดังกล่าวจะเกิดมุมของโหมดผสม (β) ขึ้นกับชั้นทดสอบที่ทำจากวัสดุอีพอกซีเรซินแยกตามความหนาของชั้นทดสอบตามที่สรุปไว้ดังตารางที่ 4.2

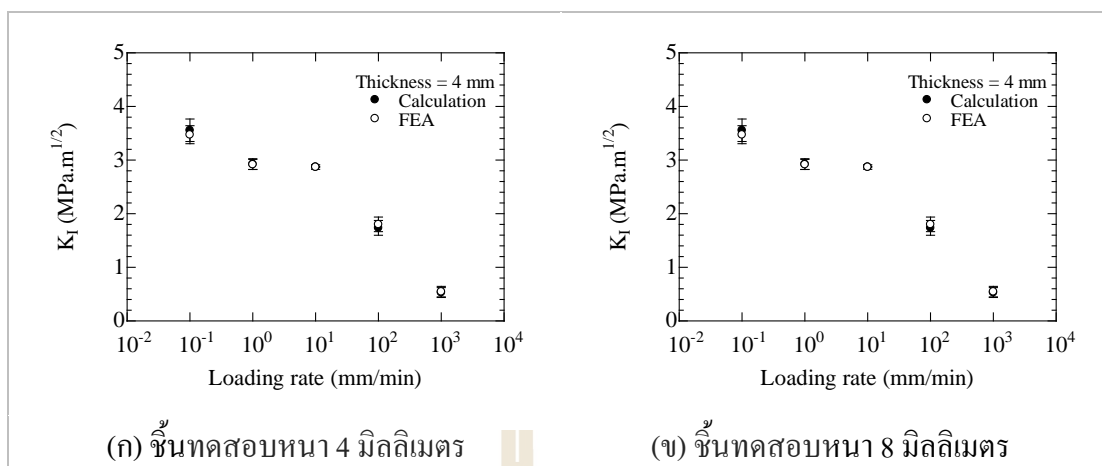
ตารางที่ 4.2 ตารางแสดงมุมของโหมคผสมจากการทดสอบ

Loading angle (θ)	Mode mixity angle (β)	
	Thickness 4 mm	Thickness 8 mm
0°	0.03° ± 0.01°	0.05° ± 0.01°
65°	19.60° ± 0.73°	16.42° ± 1.00°
78°	34.65° ± 0.79°	31.22° ± 1.05°
90°	88.45° ± 0.68°	87.78° ± 1.05°

สำหรับผลกระทบของอัตราภาระต่อความต้านทานการแตกหักภายใต้การรับโหมคผสม 1 และ 3 ของอีพอกซีเรซินจะแยกนำเสนอตามพารามิเตอร์ที่ใช้บ่งบอกความรุนแรงของรอยร้าวตามที่ได้กล่าวไว้ในบทก่อนหน้านี้ได้แก่ พารามิเตอร์ K (K_I และ K_{III}) พารามิเตอร์ J_C และพารามิเตอร์ $CTOD_{45}$ ดังต่อไปนี้

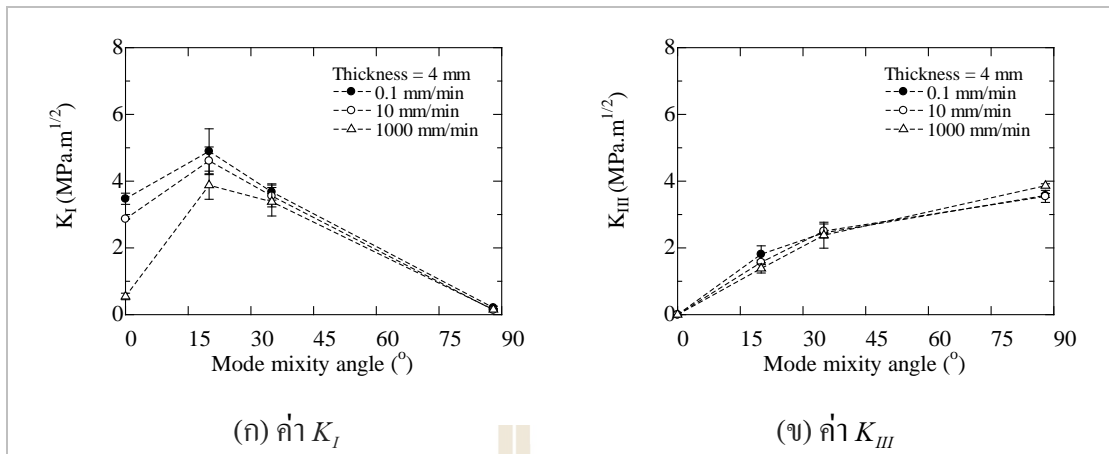
4.4.1 ผลกระทบของสถานะความเค้นต่อค่าตัวประกอบความเข้มของความเค้น (K)

เนื่องจากความต้านทานการแตกหักภายใต้การรับโหมคผสม 1 และ 3 ยังไม่มีสมการมาตรฐานที่ใช้สำหรับการคำนวณเหมือนภายใต้ภาระโหมคที่ 1 จากเหตุผลดังกล่าวทำให้งานวิจัยชิ้นนี้เลือกใช้วิธีการคำนวณความต้านทานการแตกหักด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ การยืนยันความถูกต้องจากวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สามารถทำได้โดยการเปรียบเทียบผลจากการคำนวณค่า K_I จากสมการมาตรฐาน (สมการที่ 3.2) กับค่า K_I ที่ได้จากการคำนวณด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ดังแสดงในรูปที่ 4.16 ผลการเปรียบเทียบค่า K_I จากการคำนวณทั้งสองวิธีจะพบว่าที่ชั้นทดสอบหนา 4 มิลลิเมตรวิธีการคำนวณด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์จะมีความคลาดเคลื่อนเท่ากับ 1.90% (รูปที่ 4.16 (ก)) และมีความคลาดเคลื่อนเท่ากับ 2.34% ที่ชั้นทดสอบหนา 8 มิลลิเมตร (รูปที่ 4.16 (ข)) สำหรับความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นนี้ยังถือว่าอยู่ในช่วงความคลาดเคลื่อนที่สามารถยอมรับได้

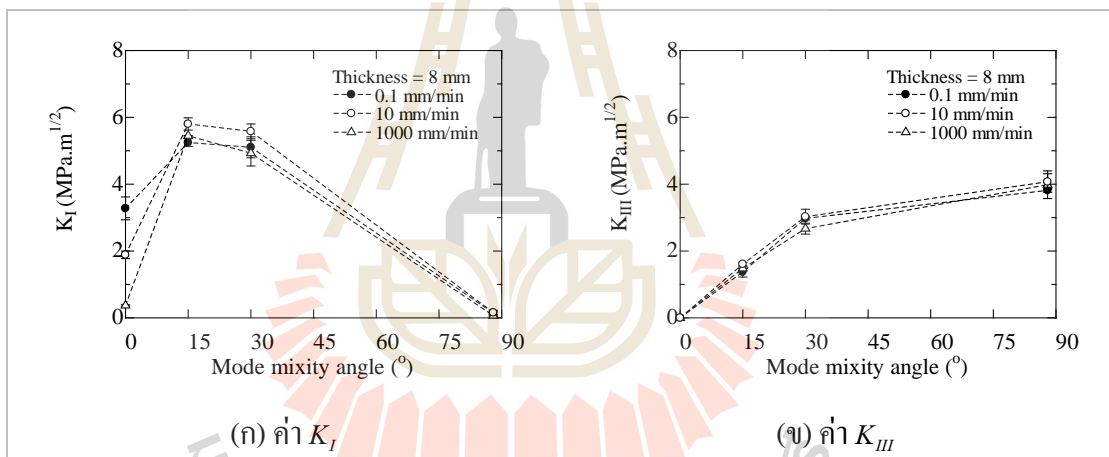


รูปที่ 4.16 ผลการเปรียบเทียบการคำนวณด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์กับสมการมาตรฐาน

ค่าตัวประกอบความเข้มของความเค้นภายใต้การรับโหลดผสม 1 และ 3 จะถูกนำเสนอตามทิศทางของภาระที่กระทำเป็นภาระโหมดที่ 1 (K_I) และภาระโหมดที่ 3 (K_{III}) ตามมุม β ที่เกิดขึ้นกับชั้นทดสอบตามที่ได้อธิบายไว้ก่อนหน้านี้ ความสัมพันธ์ระหว่างค่า K_I และ K_{III} ของชั้นทดสอบหนา 4 และ 8 มิลลิเมตรกับมุม β จะแสดงดังรูปที่ 4.17 และ 4.18 ตามลำดับ จากกราฟความสัมพันธ์พบว่าค่า K_I ของชั้นทดสอบทั้งสองความหนามีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อมุม β เพิ่มขึ้นในช่วงแรก เนื่องจากลักษณะของการรับภาระที่เปลี่ยนจากการรับภาระในโหมดที่ 1 เพียงอย่างเดียวเป็นการรับโหลดผสมทั้งโหมดที่ 1 และโหมดที่ 3 เมื่อ β เพิ่มขึ้น การเพิ่มขึ้นของค่า K_I ในช่วงแรกของชั้นทดสอบทั้งสองความหนาเกิดขึ้นจากสัดส่วนของภาระโหมดที่ 3 ในการทดสอบมีค่าเพิ่มขึ้นจากการเพิ่มขึ้นของ β สำหรับภาระโหมดที่ 3 นั้นจะมีส่วนช่วยให้ชั้นทดสอบเกิดการเสียดรูปมากขึ้นจากลักษณะของภาระที่กระทำที่บรอยร้าวในลักษณะการบิดหรือฉีกบรอยร้าวที่และภาระโหมดที่ 3 ยังมีส่วนช่วยในการเพิ่มความต้านทานการแตกหักที่เกิดจากการรับภาระโหมดที่ 1 ทำให้ค่า K_I มีค่าเพิ่มขึ้นดังรูปที่ 4.17 (ก) และ 4.18 (ก) ต่อมาเมื่อมุม β เพิ่มขึ้นค่า K_I ของชั้นทดสอบทั้งสองความหนาก็มีค่าลดลงเนื่องจากการที่สัดส่วนของภาระโหมดที่ 1 ลดลงจนมีค่าใกล้ศูนย์ที่มุมของโหมดผสมเท่ากับ 90° ที่โหมดของภาระที่กระทำกับชั้นทดสอบเกือบทั้งหมดเป็นภาระโหมดที่ 3 พฤติกรรมที่เกิดขึ้นของค่า K_I ของชั้นทดสอบทั้งสองความหนาก็ตรงกันข้ามกับค่า K_{III} (รูปที่ 4.17 (ข) และ 4.18 (ข)) ที่มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องเมื่อมุม β เพิ่มขึ้น



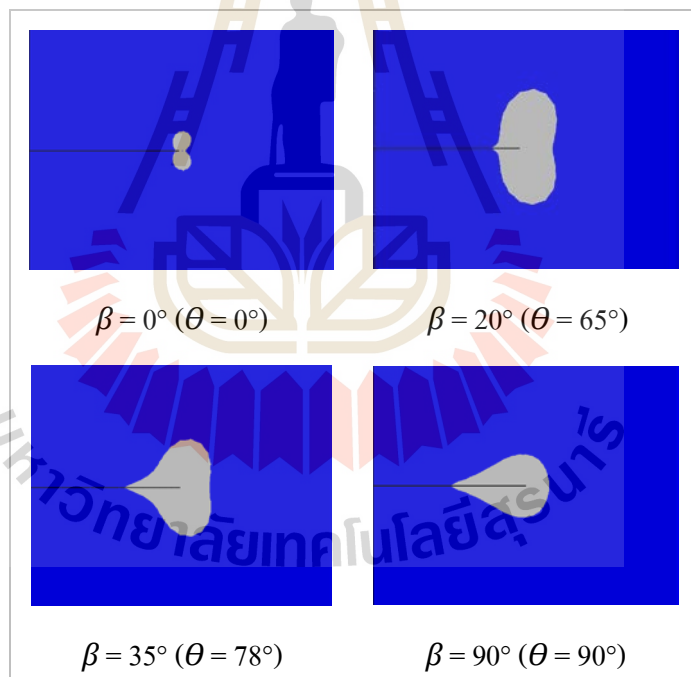
รูปที่ 4.17 กราฟความสัมพันธ์ของค่า K_I และ K_{III} กับมุม β ของชิ้นทดสอบหนา 4 มิลลิเมตร



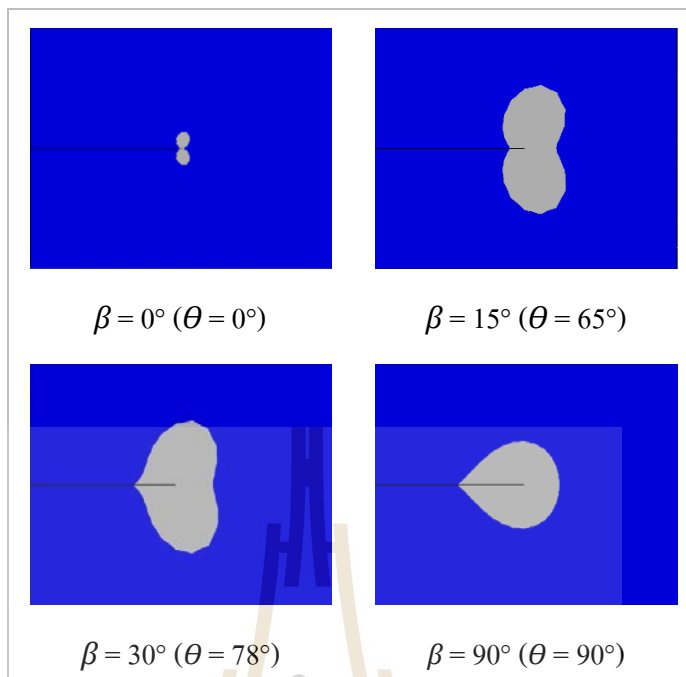
รูปที่ 4.18 กราฟความสัมพันธ์ของค่า K_I และ K_{III} กับมุม β ของชิ้นทดสอบหนา 8 มิลลิเมตร

เมื่อพิจารณาลักษณะของการเสียรูปที่ปลายรอยร้าวของชิ้นทดสอบภายใต้การรับ โหมดผสม 1 และ 3 ซึ่งมาจากการคำนวณด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยบริเวณพื้นที่สีเทาจะเกิดจากการที่ชิ้นทดสอบเกิดความเค้นที่มาจากแรงกระทำภายนอกมากกว่าความเค้นครากของวัสดุ ณ อัตราภาระในการทดสอบนั้นๆ เมื่อเปรียบเทียบลักษณะของการเสียรูปที่ปลายรอยร้าวของชิ้นทดสอบหนา 4 มิลลิเมตรเทียบกับชิ้นทดสอบหนา 8 มิลลิเมตรที่อัตราภาระ 0.1 มิลลิเมตรต่อนาที (รูปที่ 4.19 และ 4.20 ตามลำดับ) พบว่าภายใต้การรับภาระโหมดที่ 1 ($\beta = 0^\circ$) การเสียรูปที่ปลายรอยร้าวจะมีลักษณะคล้ายรูปปีกผีเสื้ออันเป็นลักษณะเฉพาะของการเสียรูปที่เกิดขึ้นจากการรับภาระโหมดที่ 1 และเมื่อพิจารณาขนาดของการเสียรูปของชิ้นทดสอบทั้งสองความหนาจะพบว่าชิ้นทดสอบหนา 4

มิลลิเมตรมีขนาดของการเสียรูปใหญ่กว่าชั้นทดสอบหนา 8 มิลลิเมตร ผลของขนาดการเสียรูปที่ปลายรอยร้าวดังกล่าวสอดคล้องกับพฤติกรรมความต้านทานการแตกหักภายใต้ภาระโหมด 1 (K_I) ที่ชั้นทดสอบหนา 4 มิลลิเมตรจะมีค่าความต้านทานการแตกหักมากกว่าชั้นทดสอบหนา 8 มิลลิเมตรที่อัตราภาระ 0.1 มิลลิเมตรต่อนาที เมื่อรูปแบบของการรับภาระเปลี่ยนไปจากโหมด 1 เป็นโหมดผสม 1 และ 3 (มุม $\beta = 0^\circ$ เพิ่มขึ้น) ลักษณะการเสียรูปที่ปลายรอยร้าวของชั้นทดสอบจะเปลี่ยนไปจากลักษณะคล้ายปีกผีเสื้อไปเป็นลักษณะคล้ายหยดน้ำ ภายใต้การรับโหมดผสม 1 และ 3 จะพบพฤติกรรมที่ตรงกันข้ามกับภายใต้ภาระโหมดที่ 1 โดยพบว่าชั้นทดสอบหนา 8 มิลลิเมตรจะมีขนาดของการเสียรูปที่ปลายรอยร้าวที่ใหญ่กว่าชั้นทดสอบหนา 4 มิลลิเมตรซึ่งพฤติกรรมดังกล่าวสอดคล้องกับค่า K_I และ K_{III} ภายใต้การรับโหมดผสม 1 และ 3 (รูปที่ 4.17 และ 4.18) ที่พบว่าชั้นทดสอบหนา 8 มิลลิเมตรจะมีค่า K_I และ K_{III} ภายใต้โหมดผสม 1 และ 3 ที่มากกว่าชั้นทดสอบหนา 4 มิลลิเมตร

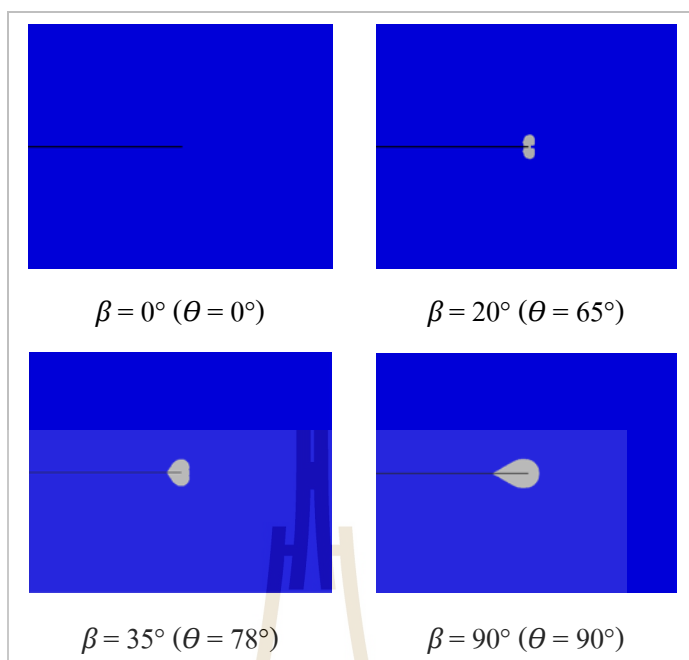


รูปที่ 4.19 การกระจายตัวของความเค้นบริเวณปลายรอยร้าวชั้นทดสอบหนา 4 มิลลิเมตรที่อัตราภาระ 0.1 มิลลิเมตรต่อนาที

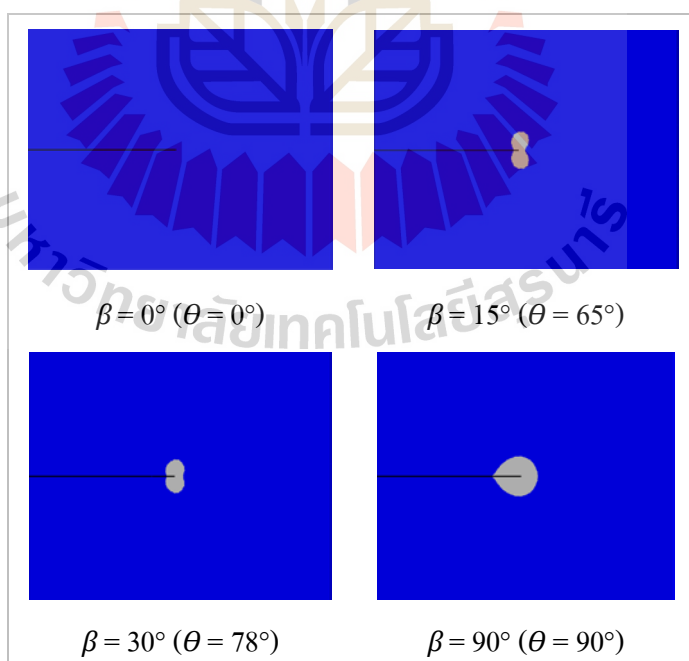


รูปที่ 4.20 การกระจายตัวของความเค้นบริเวณปลายรอยร้าวขึ้นทดสอบหนา 8 มิลลิเมตรที่อัตรา
การะ 0.1 มิลลิเมตรต่อนาที

สำหรับลักษณะของการเสีรูปที่ปลายรอยร้าวของขึ้นทดสอบหนา 4 มิลลิเมตรและ 8 มิลลิเมตรที่อัตราการะ 1000 มิลลิเมตรต่อนาทีจะแสดงดังรูปที่ 4.21 และ 4.22 ตามลำดับ เมื่อพิจารณาลักษณะของการเสีรูปที่ปลายรอยร้าวของขึ้นทดสอบทั้งสองความหนาภายใต้โหมดผสม 1 และ 3 จะพบพฤติกรรมที่เช่นกันที่อัตราการะ 0.1 มิลลิเมตรต่อนาทีที่ขึ้นทดสอบหนา 8 มิลลิเมตรจะมีขนาดของการเสีรูปที่ปลายรอยร้าวที่ใหญ่กว่าขึ้นทดสอบหนา 4 มิลลิเมตรและพฤติกรรมดังกล่าวยังคงสอดคล้องกับพฤติกรรมของค่า K_I และ K_{III} ภายใต้การรับ โหมดผสม 1 และ 3 เช่นเดียวกัน เมื่อเปรียบเทียบขนาดของการเสีรูปของขึ้นทดสอบทั้งสองความหนาที่อัตราการะ 0.1 มิลลิเมตรต่อ นาทีกับอัตราการะ 1000 มิลลิเมตรต่อนาทีจะพบว่าเมื่ออัตราการะที่ใช้ในการทดสอบเพิ่มขึ้นขนาดของการเสีรูปที่ปลายรอยร้าวของขึ้นทดสอบจะลดลงเนื่องจากลักษณะของพฤติกรรมที่ขึ้นอยู่กับเวลาของอีพอกซีเรซิน การลดลงของขนาดการเสีรูปที่ปลายรอยร้าวนี้แสดงให้เห็นว่าอัตราการะส่งผลกระทบต่อความต้านทานการแตกหักของอีพอกซีเรซิน



รูปที่ 4.21 การกระจายตัวของความเค้นบริเวณปลายรอยร้าวซึ่งทดสอบหนา 4 มิลลิเมตรที่อัตรา
 ภาระ 1000 มิลลิเมตรต่อนาที



รูปที่ 4.22 การกระจายตัวของความเค้นบริเวณปลายรอยร้าวซึ่งทดสอบหนา 8 มิลลิเมตรที่อัตรา
 ภาระ 1000 มิลลิเมตรต่อนาที

สำหรับสถานะความเค้นที่ปลายรอยร้าวในการทดสอบที่เงื่อนไขการทดสอบต่างๆ ของชิ้นทดสอบหนา 4 และ 8 มิลลิเมตรจะพิจารณาจากสัดส่วนของขนาดของการเสียรูปบริเวณปลายรอยร้าว (Plastic zone size, r_p) ของชิ้นทดสอบกับมิติรูปร่างที่มีค่าน้อยที่สุดของชิ้นทดสอบ (ในที่นี้คือความหนาของชิ้นทดสอบ) สำหรับขนาดของการเสียรูปบริเวณปลายรอยร้าวภายใต้การรับ โหมดผสม 1 และ 3 จะไม่สามารถคำนวณได้ด้วยสมการขีดจำกัดเหมือนการรับภาระโหมดที่ 1 ดังนั้นขนาดของการเสียรูปบริเวณปลายรอยร้าวจึงวัดจากบริเวณที่เกิดความเค้นขึ้นมากกว่าความเค้นครากซึ่งมาจากการคำนวณด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยนิยามการวัดขนาดของ r_p จะแสดงดังรูปที่ 4.23 การวัดขนาด r_p นั้นจะวัดจากขอบด้านที่กว้างที่สุดไปถึงขอบด้านที่กว้างที่สุดจากบริเวณการเสียรูปที่เกิดขึ้น ขนาดของ r_p จากการทดสอบจะสรุปไว้ในตารางที่ 4.3 และ 4.4 เกณฑ์การพิจารณาสถานะความเค้นที่ปลายรอยร้าว นั้นถ้าสัดส่วนขนาดของการเสียรูปบริเวณปลายรอยร้าวต่อความหนาของชิ้นทดสอบมากกว่า 0.2 จะเกิดสถานะความเค้นระนาบและถ้าน้อยกว่าจะเกิดสถานะความเค้นกระนาบ

รูปที่ 4.23 นิยามการหาขนาดของการเสียรูปบริเวณปลายรอยร้าว (r_p)

ตารางที่ 4.3 ตารางแสดงสถานะความเค้นของชิ้นทดสอบหนา 4 มิลลิเมตร

Loading rate (mm/min)	θ ($^{\circ}$)	β ($^{\circ}$)	r_p (mm)	Plastic zone size ratio	Plane stress	Plane strain
0.1	0	0	2.485	0.62	✓	
	65	20	7.385	1.85	✓	
	78	35	6.265	1.57	✓	
	90	90	6.405	1.61	✓	
10	0	0	1.215	0.30	✓	
	65	20	3.675	0.92	✓	
	78	35	3.500	0.88	✓	
	90	90	4.830	1.21	✓	
1000	0	0	0.071	0.02		✓
	65	20	0.525	0.13		✓
	78	35	0.713	0.18		✓
	90	90	0.813	0.20		✓

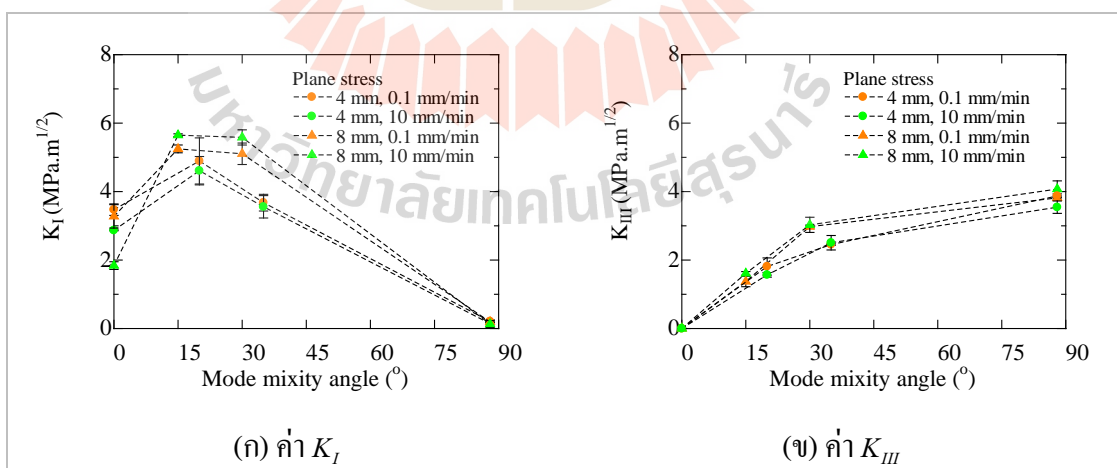
ตารางที่ 4.4 ตารางแสดงสถานะความเค้นของชิ้นทดสอบหนา 8 มิลลิเมตร

Loading rate (mm/min)	θ ($^{\circ}$)	β ($^{\circ}$)	r_p (mm)	Plastic zone size ratio	Plane stress	Plane strain
0.1	0	0	2.359	0.30	✓	
	65	15	7.875	0.98	✓	
	78	30	8.890	1.11	✓	
	90	90	6.825	0.85	✓	
10	0	0	0.35	0.04		✓
	65	15	6.965	0.87	✓	
	78	30	7.175	0.90	✓	
	90	90	5.741	0.72	✓	
1000	0	0	0.098	0.01		✓
	65	15	1.232	0.15		✓
	78	30	1.454	0.18		✓
	90	90	1.585	0.19		✓

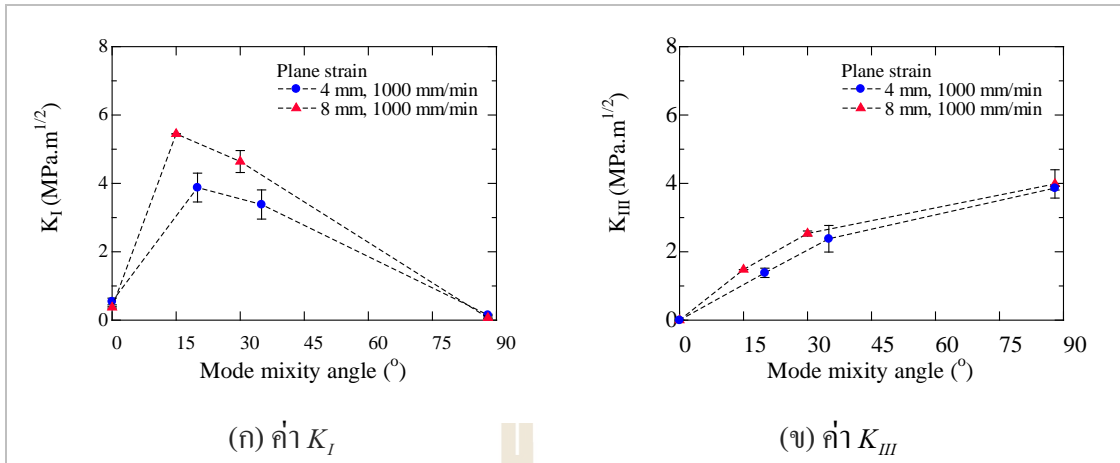
สำหรับขึ้นทดสอบทั้งสองความหนาจะแสดงให้เห็นถึงแนวโน้มของขนาดของบริเวณการเสีรูปร่างพลาสติกที่บริเวณปลายรอยร้าว (r_p) ที่เป็นไปในทิศทางเดียวกัน โดยเมื่ออัตราการของการทดสอบมีค่าเพิ่มมากขึ้นขนาดของบริเวณการเสีรูปร่างพลาสติกมีแนวโน้มที่จะลดลงดังตารางที่ 4.3 และ 4.4 เนื่องจากผลกระทบของอัตราการกระทำต่อสถานะความเค้นของขึ้นทดสอบ พฤติกรรมของเปลี่ยนสถานะความเค้นที่ปลายรอยร้าวจากผลของการเพิ่มอัตราการในการทดสอบนั้นไม่ได้ส่งผลเพียงแค่สถานะความเค้นภายใต้ผลของการรับภาระ โหมดที่ 1 เท่านั้นแต่ยังส่งผลถึงสถานะความเค้นภายใต้การรับโหมดผสม 1 และ 3 ของขึ้นทดสอบทั้งสองความหนาด้วย ตามที่แสดงให้เห็นถึงการลดลงของขนาดของบริเวณการเสีรูปร่างพลาสติกภายใต้การรับโหมดผสมของขึ้นทดสอบทั้งสองความหนาที่อัตราการกระทำ 0.1, 10 และ 1000 มิลลิเมตรต่ออนาที ขนาดของบริเวณการเสีรูปร่างพลาสติกของขึ้นทดสอบภายใต้ผลของภาระ โหมดที่ 1 ($\beta = 0^\circ$) และภายใต้ผลของโหมดผสม 1 และ 3 นั้นจะมีขนาดที่ต่างกันอย่างเห็นได้ชัดตามขนาดของบริเวณการเสีรูปร่างพลาสติกจากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ พฤติกรรมของขึ้นทดสอบดังกล่าวเกิดขึ้นเนื่องจากผลของการเพิ่มขึ้นของภาระ โหมดที่ 3 ที่กระทำในทิศทางฉีกรอยร้าว สำหรับภาระ โหมดที่ 3 นั้นจะส่งผลต่อการเสีรูปร่างของขึ้นทดสอบซึ่งการเสีรูปร่างในวัสดุพอลิเมอร์จะเกิดจากการไถลตัวของสายโซ่โมเลกุลที่สามารถเกิดการไถลตัวได้ดีจากการรับความเค้นเฉือน (Shear stress) ส่งผลให้ขึ้นทดสอบเกิดการเสีรูปร่างขึ้นมากกว่าการรับภาระ โหมดที่ 1 ที่เกิดความเค้นแบบตั้งฉากขึ้น (Normal stress) ซึ่งจะขยายรอยร้าวเพียงอย่างเดียว สัดส่วนของภาระ โหมดที่ 3 ที่เพิ่มขึ้นจากการเพิ่มมุมของโหมดผสมนั้นยังส่งผลกระทบต่อรูปร่างของบริเวณการเสีรูปร่างพลาสติกที่เปลี่ยนจากลักษณะคล้ายเม็ดถั่วหรือปีกผีเสื้ออันเป็นลักษณะเฉพาะตัวของภาระ โหมดที่ 1 ($\beta = 0^\circ$) ไปเป็นลักษณะคล้ายหยดน้ำเมื่อมุมของโหมดผสมเพิ่มขึ้นจนสัดส่วนของการรับภาระเข้าใกล้รูปแบบที่ 3 โดยสมบูรณ์

เมื่อเปรียบเทียบค่า K_I และ K_{III} ของขึ้นทดสอบทั้งสองความหนาที่สถานะความเค้นที่ปลายรอยร้าวเดียวกันดังรูปที่ 4.24 และ 4.25 โดยภายใต้ผลของสถานะความเค้นระนาบและความเครียดระนาบนั้นขึ้นทดสอบหนา 8 มิลลิเมตรจะแสดงให้เห็นถึงค่า K_I และ K_{III} ที่มากกว่าขึ้นทดสอบหนา 4 มิลลิเมตร เมื่อเปรียบเทียบค่าตัวประกอบความเข้มของความเค้นสมบูรณ์ (K_{eff}) ซึ่งเกิดจากผลรวมของการรับภาระ โหมดที่ 1 และภาระ โหมดที่ 3 ของขึ้นทดสอบหนา 4 และขึ้นทดสอบหนา 8 มิลลิเมตร (รูปที่ 4.26) พบว่าขึ้นทดสอบหนา 8 มิลลิเมตรจะมีค่า K_{eff} ที่มากกว่าขึ้นทดสอบหนา 4 มิลลิเมตรเช่นเดียวกันกับค่า K_I และ K_{III} หากพิจารณาถึงผลกระทบของอัตราการที่เกิดขึ้นกับค่า K_{eff} โดยแยกพิจารณาตามความหนาของขึ้นทดสอบจะพบว่าค่า K_{eff} ของขึ้นทดสอบที่อัตราการในการทดสอบต่างกันนั้นมีค่าใกล้เคียงกัน เหตุการณ์ดังกล่าวเกิดขึ้นจากการที่พารามิเตอร์ K ไม่เหมาะที่จะนำมาใช้วิเคราะห์ความต้านทานการแตกหักของวัสดุที่เกิดการเสีรูปร่างค่อนข้างมาก เมื่อพิจารณาสมการมาตรฐานของการคำนวณค่า K_I (K_I มีความรุนแรงมากที่สุด) ตาม

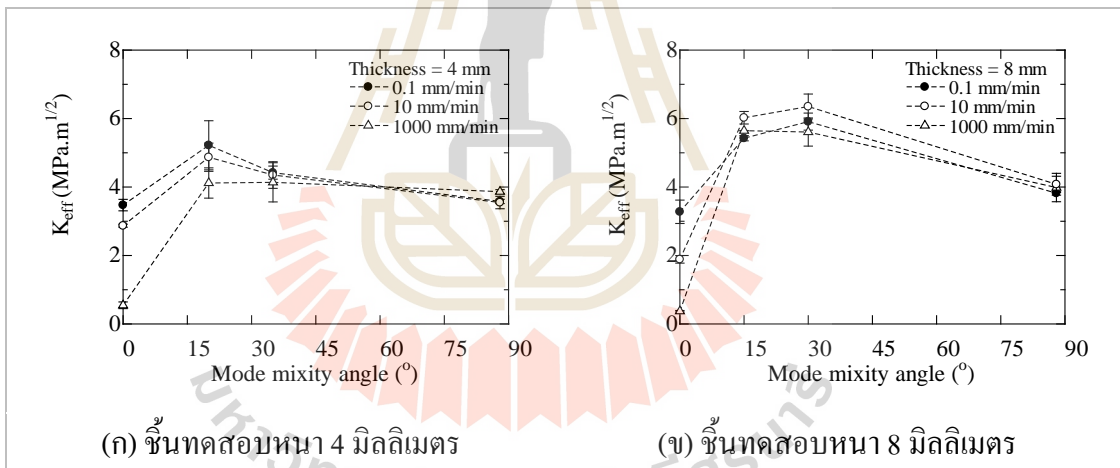
สมการที่ 3.2 จากสมการจะแสดงให้เห็นว่าค่าของพารามิเตอร์ K จะขึ้นอยู่กับภาระสูงสุดที่เกิดขึ้นกับชั้นทดสอบ (P_Q) ซึ่งหากพิจารณากราฟความสัมพันธ์ระหว่างภาระกับระยะยึดตัวของชั้นทดสอบหนา 8 มิลลิเมตรที่มุมของโหมดผสมเท่ากับ 15° ที่อัตราภาระ 0.1 มิลลิเมตรต่อนาทีเทียบกับอัตราภาระ 1000 มิลลิเมตรต่อนาทีดังรูปที่ 4.27 จะพบว่าชั้นทดสอบที่อัตราภาระดังกล่าวจะมีภาระสูงสุดก่อนเกิดการแตกหักใกล้เคียงกันแต่เมื่อพิจารณาถึงขนาดของระยะยึดตัวก่อนเกิดการแตกหักจะพบว่าที่อัตราภาระ 0.1 มิลลิเมตรต่อนาทีเกิดการยึดตัวก่อนเกิดการแตกหักมากกว่าที่อัตราภาระ 1000 มิลลิเมตรต่อนาทีเกือบ 2 เท่าตัวจากพฤติกรรมดังกล่าวทำให้ค่าความต้านทานการแตกหักที่อัตราภาระ 0.1 มิลลิเมตรต่อนาทีควรจะมากกว่าที่อัตราภาระ 1000 มิลลิเมตรต่อนาทีอย่างชัดเจนการที่พารามิเตอร์ K ไม่สามารถอธิบายผลกระทบดังกล่าวได้เนื่องจากการที่พารามิเตอร์ K เป็นพารามิเตอร์ที่ตั้งอยู่บนทฤษฎีของกลศาสตร์การแตกหักยืดหยุ่นเชิงเส้นที่เหมาะสมสำหรับการพิจารณาวัสดุที่เกิดการเสียรูปขึ้นก่อนข้างน้อยก่อนเกิดการแตกหัก เมื่อพิจารณาขนาดของการเสียรูปของอีพอกซีเรซินภายใต้การรับโหมดผสม 1 และ 3 จะพบว่าอีพอกซีเรซินนั้นจะแสดงให้เห็นถึงการเสียรูปที่ค่อนข้างมากจึงไม่เหมาะสมที่จะใช้พารามิเตอร์ K มาอธิบายความต้านทานการแตกหัก ดังนั้นงานวิจัยในส่วนต่อจากนี้ไปจะนำเสนอพารามิเตอร์ J -อินทิกรัล (J_C) และพารามิเตอร์ระยะเปิดที่ปลายรอยร้าว ($CTOD_{45}$) ที่เป็นพารามิเตอร์ที่ตั้งอยู่บนทฤษฎีกลศาสตร์การแตกหักอีลาสติค-พลาสติกที่เหมาะสมสำหรับวัสดุที่เกิดการเสียรูปมากเพื่ออธิบายถึงผลกระทบของอัตราภาระและความหนาที่เกิดขึ้นกับความต้านทานการแตกหักภายใต้โหมดผสม 1 และ 3 ต่อไป



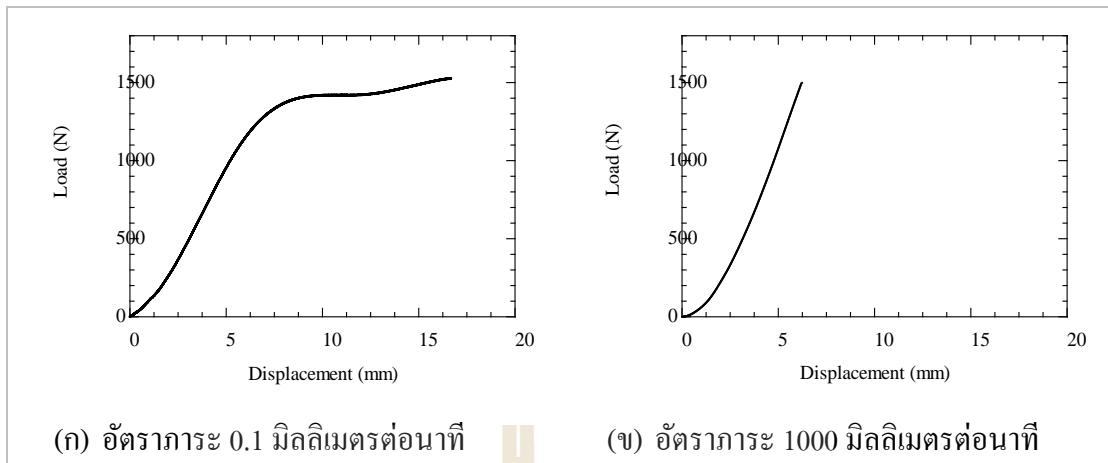
รูปที่ 4.24 กราฟความสัมพันธ์ของค่า K กับมุมของโหมดผสมภายใต้สถานะความเค้นระนาบ



รูปที่ 4.25 กราฟความสัมพันธ์ของค่า K กับมุมของโหมดผสมภายใต้สถานะความเครียดระนาบ



รูปที่ 4.26 กราฟความสัมพันธ์ของค่าตัวประกอบความเข้มของความเค้นสัมบูรณ์กับมุม β



รูปที่ 4.27 กราฟความสัมพันธ์ของภาระกับระยะยืดตัวของชิ้นทดสอบหนา 8 มิลลิเมตรที่มุมของโหมคผสม 15°

4.4.2 ผลกระทบของสถานะความเค้นต่อค่า J -อินทิกรัล (J_C)

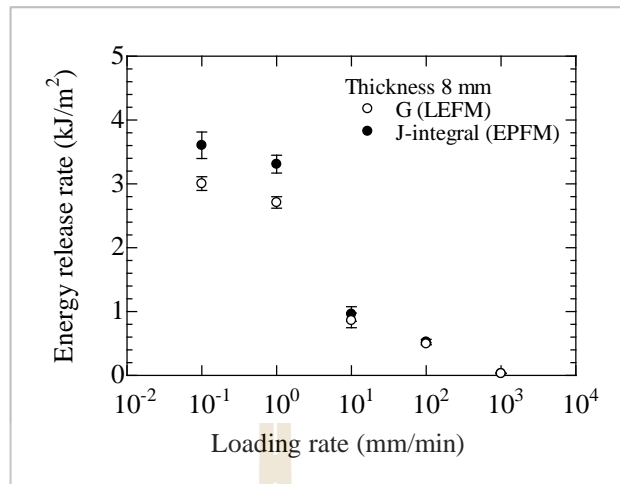
การเปรียบเทียบอัตราการปลดปล่อยพลังงานความเครียด (G) ในช่วงขอบเขตของกลศาสตร์การแตกหักยืดหยุ่นเชิงเส้นกับค่าพารามิเตอร์ J -อินทิกรัล (J_C) ที่มีนิยามเหมือนกันกับอัตราการปลดปล่อยพลังงานความเครียดแต่ค่า J_C จะอยู่ในช่วงขอบเขตของกลศาสตร์การแตกหักแบบอีลาสติก-พลาสติกของชิ้นทดสอบหนา 8 มิลลิเมตรซึ่งค่า J_C นั้นจะถูกคิดรวมมาจากพลังงานสองส่วนดังสมการที่ 4.1 ดังนี้

$$J = J_{Elastic} + J_{Plastic} \quad (4.1)$$

เมื่อ $J_{Elastic}$ คือพลังงานที่ใช้ขยายรอยร้าวในช่วง Elastic

$J_{Plastic}$ คือพลังงานที่ใช้ขยายรอยร้าวในช่วง Plastic

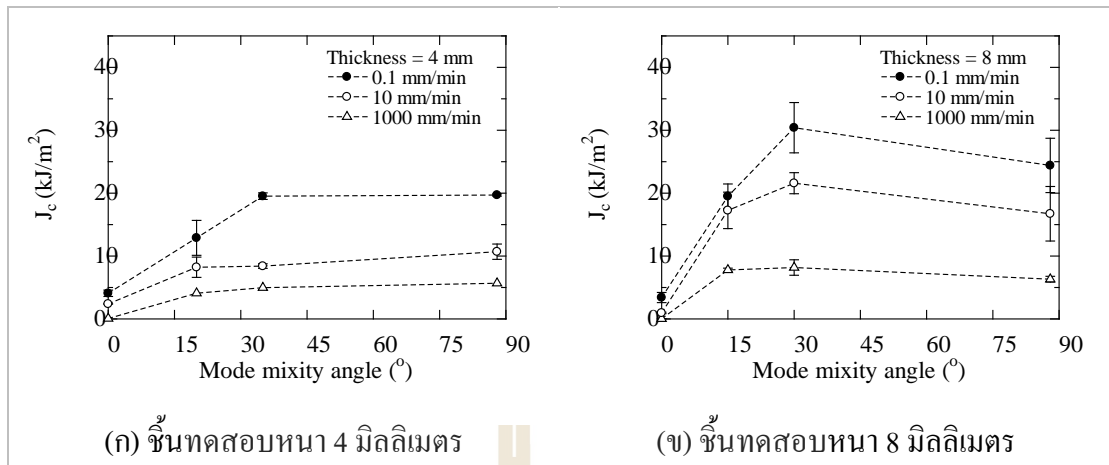
สำหรับอัตราการปลดปล่อยพลังงานความเครียด (G) ที่ตั้งอยู่บนขอบเขตของทฤษฎีกลศาสตร์การแตกหักยืดหยุ่นเชิงเส้นนั้นจะตั้งอยู่บนสมมติฐานที่วัสดุเกิดการเสียรูปน้อย เมื่อพิจารณาสมการของค่า J_C จะพบว่าแท้จริงแล้วค่า $G = J_{Elastic}$ เมื่อทดสอบที่อัตราการต่ำที่เกิดการเสียรูปมากค่า G กับค่า J_C จึงมีค่าแตกต่างกันและเมื่อทำการทดสอบที่อัตราการสูงค่า G กับค่า J_C จึงมีค่าใกล้เคียงกันดังรูปที่ 4.28



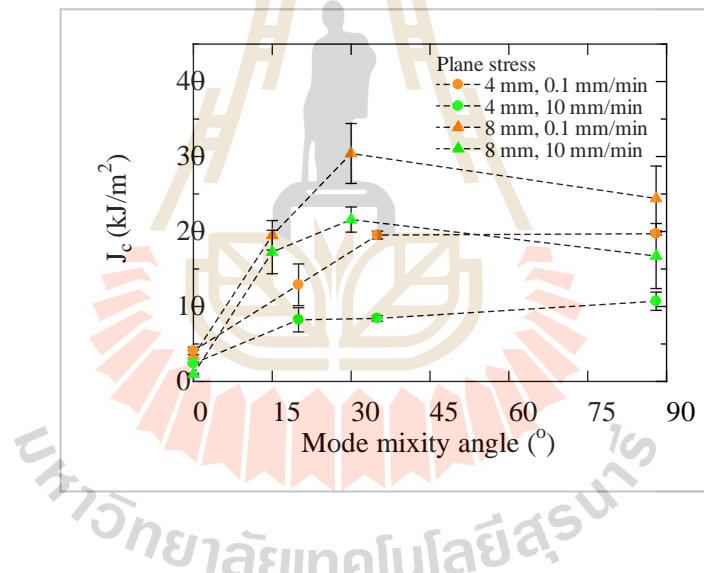
รูปที่ 4.28 ผลการเปรียบเทียบอัตราการปลดปล่อยพลังงานความเครียด (G) กับ J -อินทิกรัล (J_C)

กราฟความสัมพันธ์ของค่า J_C กับมุม β ของชิ้นทดสอบหนา 4 และ 8 มิลลิเมตรจะแสดงดังรูปที่ 4.29 กราฟความสัมพันธ์แสดงให้เห็นถึงผลกระทบของอัตราการที่เกิดขึ้นกับค่า J_C อย่างชัดเจนเมื่อเปรียบเทียบกับค่า K สำหรับชิ้นทดสอบทั้งสองความหนาจะมีค่า J_C สูงสุดที่อัตราภาระ 0.1 มิลลิเมตรต่อนาที การทดสอบที่อัตราภาระ 0.1 และ 10 มิลลิเมตรต่อนาทีนั้นสถานะความเค้นที่ปลายรอยร้าวของชิ้นทดสอบทั้งสองความหนาจะอยู่ภายใต้ผลของสถานะความเค้นระนาบ (รูปที่ 4.30) สำหรับการทดสอบที่อัตราภาระ 1000 มิลลิเมตรต่อนาทีนั้นจะมีค่า J_C ต่ำที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับ การทดสอบที่อัตราภาระอื่น

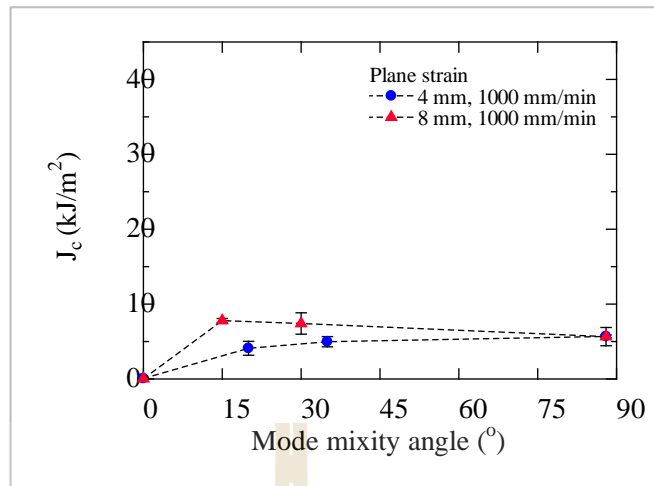
หากพิจารณาสถานะความเค้นที่ปลายรอยร้าวของชิ้นทดสอบทั้งสองความหนาที่อัตราภาระ 1000 มิลลิเมตรจะพบว่าชิ้นทดสอบทั้งสองความหนาอยู่ภายใต้ผลของสถานะความเครียดระนาบ (รูปที่ 4.31) กราฟความสัมพันธ์ยังแสดงให้เห็นถึงการเพิ่มขึ้นของค่า J_C เมื่อมุม β มากขึ้นสามารถสังเกตเห็นแนวโน้มที่เกิดขึ้นนี้ได้อย่างชัดเจนบนชิ้นทดสอบหนา 4 มิลลิเมตร (รูปที่ 4.29 (ก)) พฤติกรรมดังกล่าวเกิดขึ้นจากการที่สัดส่วนของภาระ โหมดที่ 3 ที่เพิ่มมากขึ้นเมื่อมุม β มากขึ้น โดยภาระ โหมดที่ 3 นั้นจะมีส่วนช่วยในการทำให้ชิ้นทดสอบเกิดการแตกหักน้อยมากเมื่อเทียบกับภาระ โหมดที่ 1 แต่ภาระ โหมดที่ 3 จะมีส่วนช่วยในการทำให้ชิ้นทดสอบเกิดการเสียรูปแทน อีกทั้งยังช่วยในการต้านทานการแตกหักที่เกิดจากภาระ โหมดที่ 1 ส่งผลให้ต้องใช้พลังงานที่เพิ่มขึ้นในการที่จะทำให้ชิ้นทดสอบแตกหักเมื่อมุมของโหมดผสมเพิ่มมากขึ้นนั่นเอง



รูปที่ 4.29 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง J_c กับมุม β

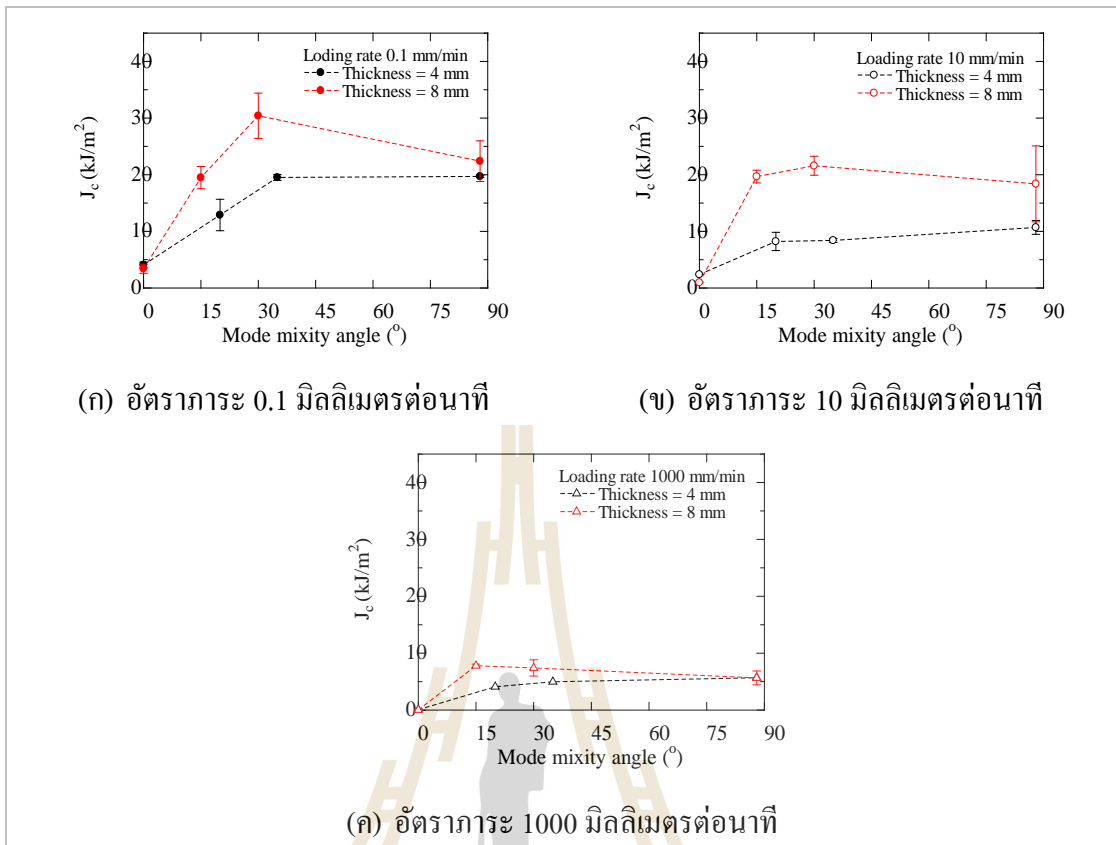


รูปที่ 4.30 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า J_c กับมุม β ภายใต้สถานะความเค้นระนาบ



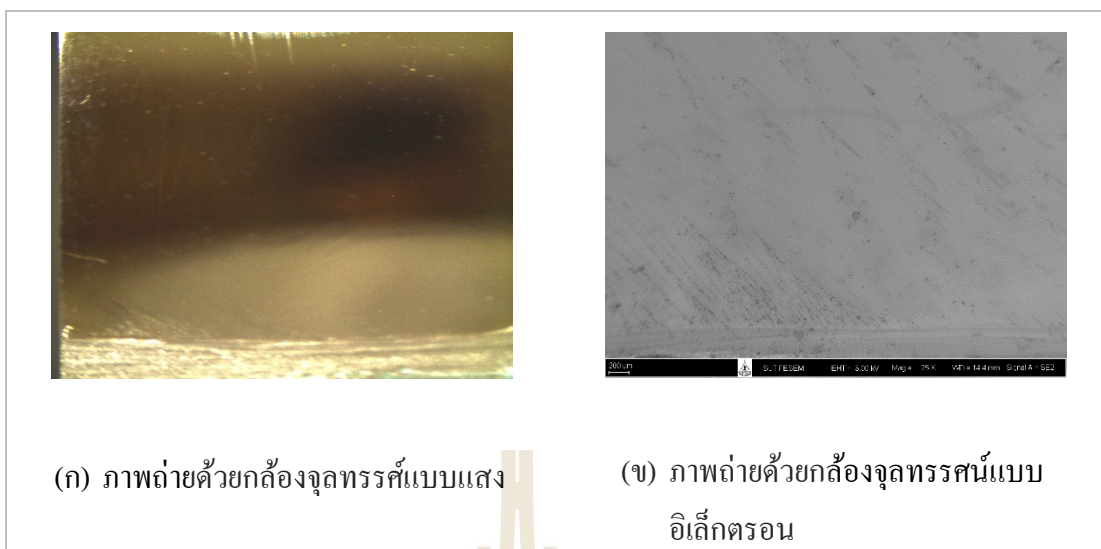
รูปที่ 4.31 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า J_C กับมุม β ภายใต้สถานะความเครียดระนาบ

เมื่อเปรียบเทียบความสัมพันธ์ของค่า J_C กับมุม β ของชิ้นทดสอบหนา 4 มิลลิเมตร และชิ้นทดสอบหนา 8 มิลลิเมตรที่อัตราภาระ 0.1, 10 และ 1000 มิลลิเมตรต่อวินาทีดังรูปที่ 4.32 จะพบว่าค่า J_C ของชิ้นทดสอบหนา 8 มิลลิเมตรมีค่ามากกว่าค่า J_C ของชิ้นทดสอบหนา 4 มิลลิเมตรที่อัตราภาระ 0.1, 10 และ 1000 มิลลิเมตรต่อวินาทีถึงแม้จะอยู่ภายใต้ผลของสถานะความเค้นที่ปลายรอยร้าวแบบเดียวกัน (อัตราภาระ 0.1 และ 10 มิลลิเมตรต่อวินาทีอยู่ภายใต้ผลของความเค้นระนาบ อัตราภาระ 1000 มิลลิเมตรต่อวินาทีอยู่ภายใต้ผลของสถานะความเครียดระนาบ) ค่า J_C ของชิ้นทดสอบหนา 8 มิลลิเมตรจะมากกว่าชิ้นทดสอบหนา 4 มิลลิเมตรอย่างเห็นได้ชัดที่มุม β ประมาณ 15° ถึง 35° ซึ่งเป็นช่วงของมุม β ที่มีการรับภาระโหมด 1 ผสมกับภาระโหมดที่ 3 และเมื่อพิจารณาแยกตามอัตราภาระจะพบว่าที่อัตราภาระ 0.1 มิลลิเมตรต่อวินาทีผลต่างของค่า J_C ของชิ้นทดสอบทั้งสองความหนาจะมีค่าต่างกันมากที่สุดและต่างกันน้อยที่สุดที่อัตราภาระ 1000 มิลลิเมตรต่อวินาที ค่า J_C ของชิ้นทดสอบความหนาจะมีค่าใกล้เคียงกันที่ทุกอัตราภาระที่มุม β เท่ากับ 0° และ 90° โดยที่มุม $\beta = 0^\circ$ นั้นชิ้นทดสอบจะรับภาระโหมดที่ 1 เพียงอย่างเดียวเท่านั้นและที่มุม $\beta = 90^\circ$ ชิ้นทดสอบจะรับภาระโหมดที่ 3 เกือบจะทั้งหมด การที่ค่า J_C ของชิ้นทดสอบทั้งสองความหนามีค่าใกล้เคียงกันที่มุมของโหมดผสมดังกล่าวเนื่องจากการที่ชิ้นทดสอบทั้งสองความหนาเกิดการเสียรูปที่ปลายรอยร้าวขึ้นใกล้เคียงกันดังรูปที่ 4.21 และ 4.22 ที่แสดงลักษณะการเสียรูปแบบพลาสติกที่ปลายรอยร้าวของชิ้นทดสอบทั้งสองความหนาที่อัตราภาระ 1000 มิลลิเมตรต่อวินาทีตามลำดับ

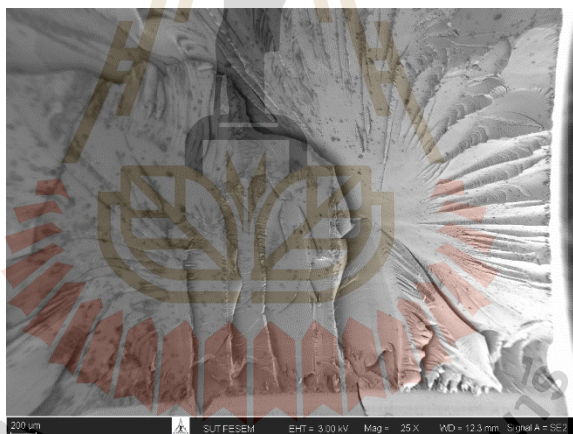


รูปที่ 4.32 กราฟความสัมพันธ์ของค่า J_c กับมุม β ของชั้นทดสอบหนา 4 มิลลิเมตรและ 8 มิลลิเมตร

สำหรับกลไกการแตกหักของชั้นทดสอบภายใต้การรับโหลดผสม 1 และ 3 ของอีพอกซีเรซินนั้น เมื่อเปรียบเทียบลักษณะของการเสียรูปของพื้นผิวการแตกหักของชั้นทดสอบโดยแยกพิจารณาตามมุมโหลดผสมจะพบว่าภายใต้การรับโหลดที่ 1 สมบูรณ์ ($\beta=0^\circ$) ดังรูปที่ 4.33 นั้น ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสงนั้นเพียงพอสำหรับการอธิบายพฤติกรรมการแตกหักของชั้นทดสอบแล้วเมื่อเทียบกับภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบอิเล็กตรอนโดยลักษณะของพื้นผิวการแตกหักแสดงให้เห็นถึงการแตกหักที่เกิดจากความเค้นในแนวตั้งฉาก (Normal stress) เป็นหลัก เมื่อมุมของโหลดผสมเพิ่มมากขึ้นลักษณะของการเสียรูปของพื้นผิวการแตกหักจะเปลี่ยนไปดังรูปที่ 4.34 โดยเมื่ออยู่ภายใต้ผลการรับโหลดผสมนั้นจะพบว่าภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์แบบอิเล็กตรอนจะแสดงให้เห็นถึงลักษณะของการแตกหักที่สมบูรณ์มากกว่ากล้องจุลทรรศน์แบบแสงภายใต้การรับภาระแบบผสม 1 และ 3 นั้นลักษณะของพื้นผิวการแตกหักจะเปลี่ยนไปโดยจะมีการเพิ่มขึ้นของลักษณะการเสียรูปที่เกิดจากการบิดตัวเนื่องภาระรูปแบบที่ 3 (Twist zone) ผสมกันกับลักษณะการเสียรูปที่เกิดจากภาระรูปแบบที่ 1 (Deformation zone)



รูปที่ 4.33 พื้นผิวการแตกหักของชิ้นทดสอบหนา 8 มิลลิเมตรที่ $\beta = 0^\circ$

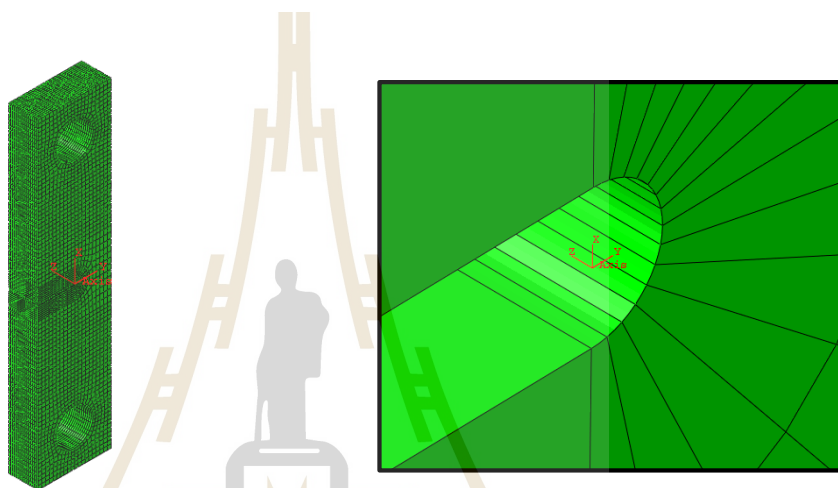


รูปที่ 4.34 พื้นผิวการแตกหักของชิ้นทดสอบหนา 8 มิลลิเมตรที่ $\beta = 30^\circ$

4.4.3 ผลกระทบของสถานะความเค้นต่อระยะเปิดที่ปลายรอยร้าว ($CTOD_{45}$)

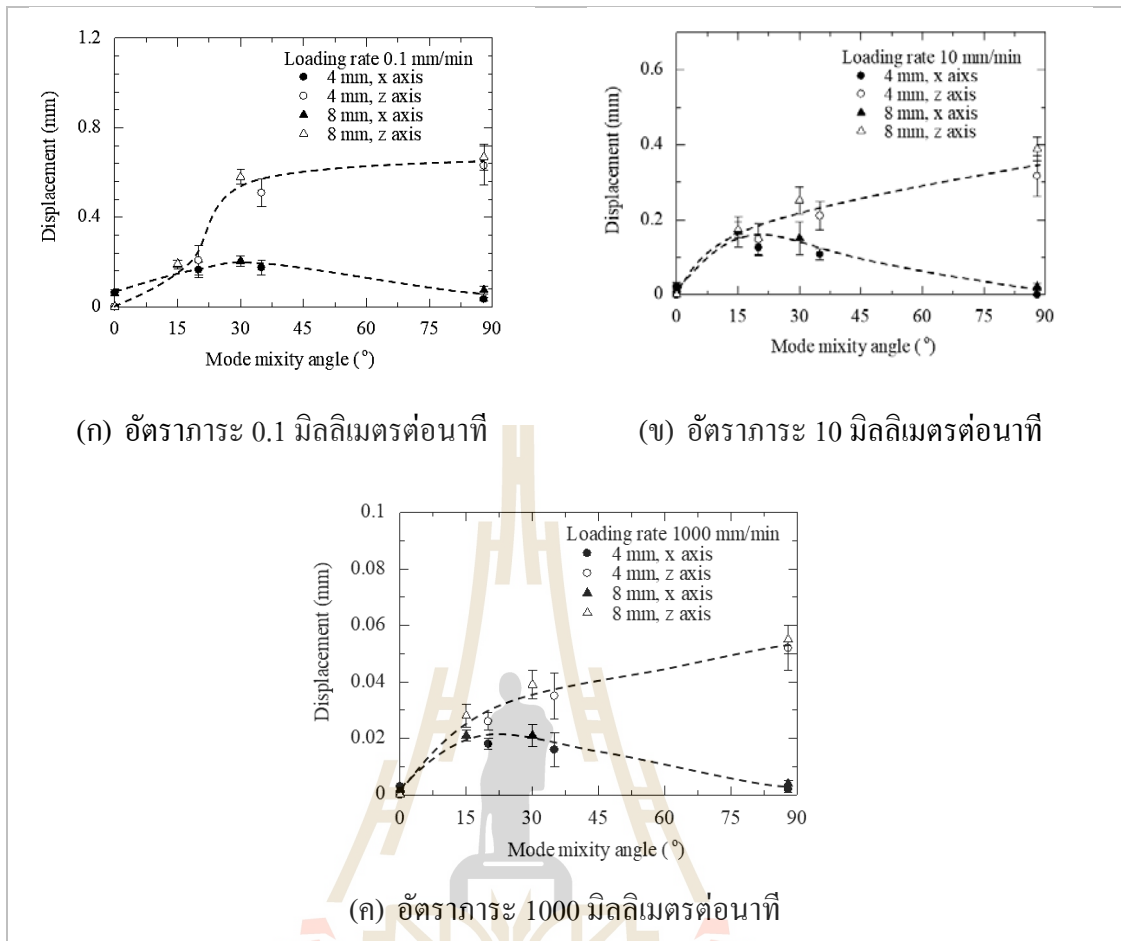
ระยะเปิดที่ปลายรอยร้าว (Crack tip opening displacement, $CTOD$) นับเป็นอีกหนึ่งพารามิเตอร์ที่สามารถใช้บ่งบอกความต้านทานการแตกหักของวัสดุเมื่อมีภาระมากระทำกับวัสดุที่มีรอยร้าว ระยะเปิดที่ปลายรอยร้าวจะพิจารณาจากการขยายตัวหรือการเปิดของผิวหน้ารอยร้าวที่เกิดขึ้นบนวัสดุซึ่งมักจะถูกนำมาพิจารณาบนวัสดุที่เกิดการเสียรูปขึ้นค่อนข้างสูง สำหรับระยะเปิดที่ปลายรอยร้าวของชิ้นทดสอบจากการทดสอบความต้านทานการแตกหักภายใต้การรับโหมดผสม 1 และ 3 ระยะเปิดที่ปลายรอยร้าวหรือค่า $CTOD_{45}$ นั้นจะแยกการพิจารณาออกเป็นสองส่วน

ส่วนแรกคือระยะเปิดที่ปลายรอยร้าวซึ่งเกิดจากการรับภาระโหมดที่ 1 และส่วนที่สองคือระยะบิดหรือฉีกที่ปลายรอยร้าวที่เกิดจากการรับภาระโหมดที่ 3 (ในตอนนี้จะขอเรียกว่า “ระยะฉีกที่ปลายรอยร้าว”) การพิจารณาค่า $CTOD_{45}$ จะพิจารณาจากแกนที่อ้างอิงจุดเริ่มต้น (Origin) บนชั้นทดสอบเพื่อให้ง่ายต่อการวิเคราะห์ดังรูปที่ 4.35 ซึ่งค่าระยะของการเคลื่อนตัวของจุดต่อ (Node) ในแกน X จะหมายถึงระยะการเปิดรอยร้าวและระยะการเคลื่อนตัวของจุดต่อในแกน Z จะหมายถึงระยะฉีกที่ปลายรอยร้าว สำหรับการพิจารณาค่า $CTOD_{45}$ จะพิจารณาจากผลต่างของระยะการเคลื่อนตัวในแนวแกนของจุดต่อ A และ B (รูปที่ 4.35) ซึ่งเป็นจุดที่ทำมุม 45° กับปลายรอยร้าวตามทฤษฎี



รูปที่ 4.35 แกนของชั้นทดสอบสำหรับการพิจารณาค่า $CTOD_{45}$

ความสัมพันธ์ของระยะเปิดที่ปลายรอยร้าวและระยะฉีกที่ปลายรอยร้าวของชั้นทดสอบกับมุมของโหมดผสมที่อัตราภาระ 0.1, 10 และ 1000 มิลลิเมตรต่อนาที่แสดงดังรูปที่ 4.36 สำหรับอัตราภาระ 0.1 และ 10 มิลลิเมตรต่อนาที่ชั้นทดสอบทั้งสองความหนาจะอยู่ภายใต้ผลของสถานะความเค้นระนาบซึ่งจะมีค่าพารามิเตอร์ความต้านทานการแตกหักที่สูงเนื่องจากการเกิดการเสียดรูปค่อนข้างมากและที่อัตราภาระ 1000 มิลลิเมตรต่อนาที่ชั้นทดสอบจะอยู่ภายใต้ผลของสถานะความเค้นระนาบที่เกิดการเสียดรูปขึ้นค่อนข้างน้อย เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ของค่าระยะเปิดที่ปลายรอยร้าวและระยะฉีกที่ปลายรอยร้าวของชั้นทดสอบที่อัตราภาระ 0.1 มิลลิเมตรต่อนาที่พบว่าพฤติกรรมของชั้นทดสอบทั้งสองความหนาจะเป็นไปในทิศทางเดียวกันสังเกตได้จากสัดส่วนของระยะฉีกที่ปลายรอยร้าวกับระยะเปิดที่ปลายรอยร้าวของชั้นทดสอบทั้งสองความหนาดังตารางที่ 4.5 ที่พบว่าชั้นทดสอบทั้งสองความหนาเกิดการแตกหักเมื่อสัดส่วนของ $CTOD_{45}$ ใกล้เคียงกัน แนวโน้มดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าแท้จริงแล้วความต้านทานการแตกหักภายใต้โหมดผสม 1 และ 3 ของวัสดุอีพอกซีเรซินนั้นไม่ได้ขึ้นอยู่กับความหนาของวัสดุแต่ขึ้นอยู่กับสัดส่วนของค่า $CTOD_{45}$ ของวัสดุแทน



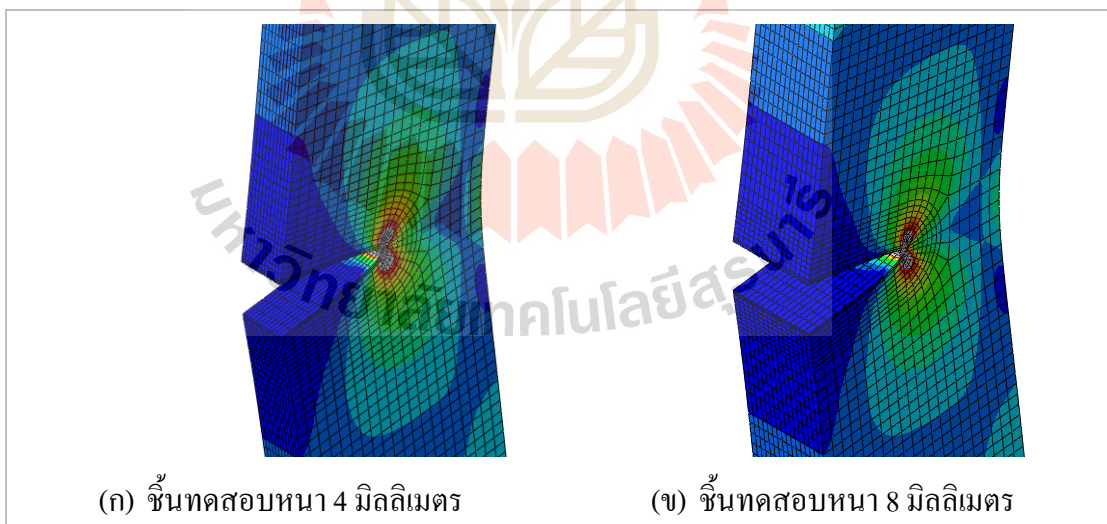
รูปที่ 4.36 กราฟความสัมพันธ์ของค่า $CTOD_{45}$ ตามแนวแกนที่มุม β ต่างๆ

ตารางที่ 4.5 สัดส่วนของ $CTOD_{45}$ ในแนวแกน Z และ X ที่อัตราการะ 0.1 มิลลิเมตรต่อนาที

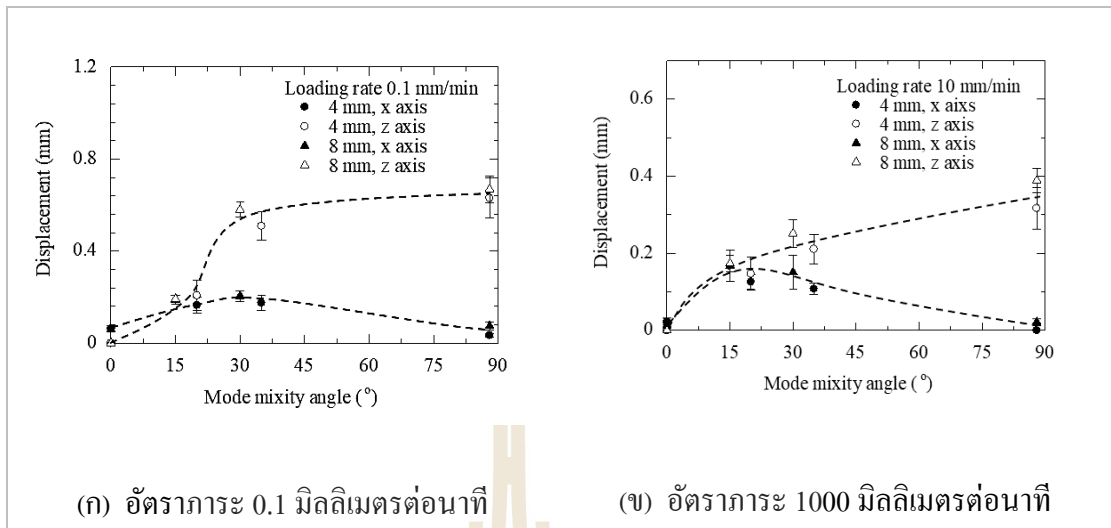
Loading angle (θ)	$CTOD_{45}$ ratio (Z/X axis)	
	4 mm thickness	8 mm thickness
0°	0.00	0.00
65°	1.25	1.02
78°	2.91	2.83
90°	18.53	18.08

การที่ความต้านทานการแตกหักภายใต้โหมดผสม 1 และ 3 ของอีพอกซีเรซินนั้น ถูกควบคุมด้วยค่า $CTOD_{45}$ จึงส่งผลให้ค่าพารามิเตอร์ความต้านทานการแตกหัก (ทั้งค่า K และ J_C) ของชั้นทดสอบหนา 8 มิลลิเมตรมีค่ามากกว่าชั้นทดสอบหนา 4 มิลลิเมตรเนื่องจากการที่ชั้นทดสอบ

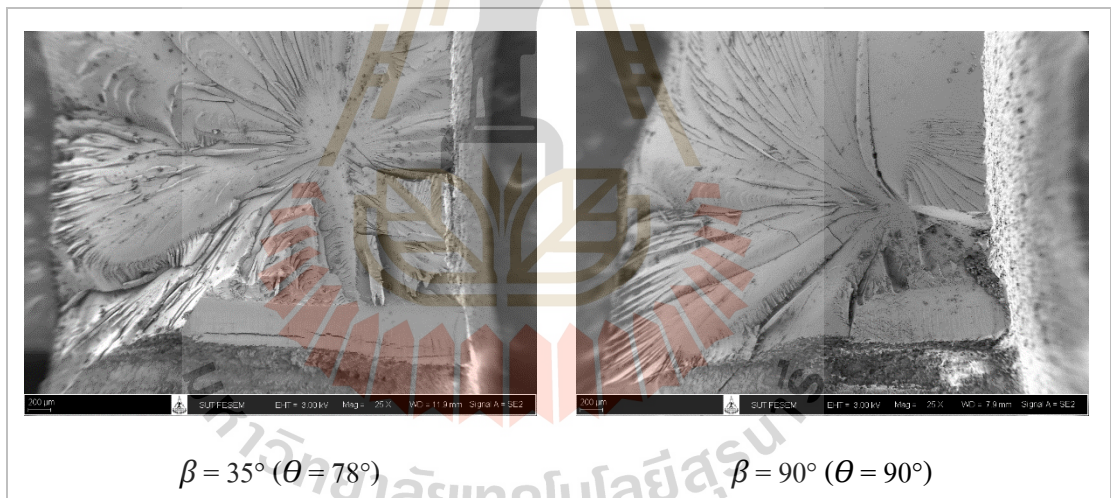
จะเกิดการแตกหักเมื่อค่า $CTOD_{.45}$ ในแนวการเปิดและแนวการฉีกถึงค่าวิกฤตขึ้นทดสอบหนา 4 มิลลิเมตรที่มีขนาดพื้นที่หน้าตัดที่น้อยกว่าขึ้นทดสอบหนา 8 มิลลิเมตรยอมใช้พลังงานหรือภาระที่น้อยกว่าในการเปิดหรือฉีกรอยร้าวให้ถึงสัดส่วนวิกฤตวัสดุรูปที่ 4.37 นอกจากความต้านทานการแตกหักภายใต้โหมดผสม 1 และ 3 ของวัสดุโฟกซีเรซินจะขึ้นอยู่กับค่า $CTOD_{.45}$ แล้วนั้นค่าความต้านทานการแตกหักของวัสดุยังขึ้นอยู่กับอัตราภาระที่วัสดุได้รับซึ่งเมื่อเปรียบเทียบขนาดและสัดส่วนของ $CTOD_{.45}$ ของขึ้นทดสอบที่อัตราภาระ 0.1 มิลลิเมตรต่อนาทีที่เทียบกับอัตราภาระ 1000 มิลลิเมตรต่อนาทีที่รูปที่ 4.38 พบว่าขนาดและสัดส่วนของ $CTOD_{.45}$ ของขึ้นทดสอบจะลดลงเมื่ออัตราภาระเพิ่มขึ้นเนื่องจากพฤติกรรมที่ขึ้นอยู่กับเวลาของวัสดุโฟกซีเรซิน หากพิจารณาถึงพฤติกรรมที่ขึ้นอยู่กับเวลาของวัสดุโฟกซีเรซินนั้นที่อัตราภาระ 1000 มิลลิเมตรต่อนาทีที่ควรจะมีความต้านทานการแตกหัก (ทั้งค่า K และ J_C) ภายใต้การรับ โหมดผสม 1 และ 3 ที่น้อยมากแต่ในความเป็นจริงแล้วค่าความต้านทานการแตกหักที่เกิดขึ้นที่อัตราภาระ 1000 มิลลิเมตรต่อนาทีที่นั้นมีค่าค่อนข้างสูง การที่ค่าความต้านทานการแตกหักที่อัตราภาระ 1000 มิลลิเมตรต่อนาทีที่มีค่าค่อนข้างสูงนั้นเกิดขึ้นเนื่องจากการที่ขึ้นทดสอบยังคงเกิดการเสียรูปขึ้นค่อนข้างมากก่อนที่จะเกิดการแตกหักซึ่งจะสามารถสังเกตได้จากภาพพื้นผิวการแตกหักของขึ้นทดสอบหนา 4 มิลลิเมตรรูปที่ 4.39 ที่แสดงให้เห็นถึงร่องรอยของการเกิดการเสียรูปก่อนที่จะเกิดการแตกหัก



รูปที่ 4.37 ภาพการเปรียบเทียบ $CTOD_{.45}$ วิกฤตกับความหนาของขึ้นทดสอบ



รูปที่ 4.38 ผลการเปรียบเทียบสัดส่วนของ $CTOD_{45}$ ที่อัตราการะต่างๆ



รูปที่ 4.39 พื้นผิวการแตกหักของชิ้นทดสอบหนา 4 มิลลิเมตรที่อัตราการะ 1000 มิลลิเมตรต่อนาที

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

5.1.1 ผลกระทบของความหนาต่อความต้านทานการแตกหักภายใต้โหมดผสม 1 และ 3 ของอีพอกซีเรซิน

การศึกษาผลกระทบของความหนาต่อความต้านทานการแตกหักของอีพอกซีเรซิน พบว่าภายใต้การรับภาระ โหมด 1 ความหนาของชิ้นทดสอบจะส่งผลต่อความต้านทานการแตกหัก (K_I) อย่างชัดเจน เมื่อทำการทดสอบด้วยชิ้นทดสอบแบบบางค่าความต้านทานการแตกหักของวัสดุ จะมีค่าสูงและมีค่าลดลงเมื่อความหนาของชิ้นทดสอบมากขึ้น การที่ค่าความต้านทานการแตกหักของชิ้นทดสอบลดลงนั้นเนื่องจากการเปลี่ยนสถานะความเค้นที่ปลายรอยร้าวของชิ้นทดสอบก่อนเกิดการแตกหักจากสถานะความเค้นระนาบ (Plane stress) ที่ชิ้นทดสอบแบบบางไปเป็นสถานะความเครียดระนาบ (Plane strain) เมื่อความหนาของชิ้นทดสอบเพิ่มขึ้น สำหรับอีพอกซีเรซินจะเริ่มเกิดการแตกหักภายใต้สถานะความเครียดระนาบที่ความหนาประมาณ 8 มิลลิเมตร

สำหรับการรับภาระในโหมดผสม 1 และ 3 นั้นพฤติกรรมที่เกิดขึ้นจะตรงกันข้ามกับการรับภาระ โหมดที่ 1 อย่างชัดเจนซึ่งพบว่าความหนานั้นไม่ส่งผลต่อความต้านทานการแตกหักภายใต้โหมดผสม 1 และ 3 เนื่องจากความต้านทานการแตกหักภายใต้โหมดผสม 1 และ 3 จะถูกควบคุมด้วยสัดส่วนของ $CTOD$ วิกฤต ผลการทดสอบจะชี้ให้เห็นว่าชิ้นทดสอบทั้งสองความหนาที่ใช้ในงานวิจัยเกิดการแตกหักที่สัดส่วนของ $CTOD$ ที่ใกล้เคียงกันแต่หากพิจารณาในมุมของพลังงานที่ใช้ในการขยายรอยร้าวจนชิ้นทดสอบเกิดการแตกหัก (J_C) จะพบว่าชิ้นทดสอบที่หนามากกว่าจะใช้พลังงานในการขยายรอยร้าวที่มากกว่าชิ้นทดสอบที่บาง

5.1.2 ผลกระทบของอัตราภาระต่อความต้านทานการแตกหักภายใต้โหมดผสม 1 และ 3 ของอีพอกซีเรซิน

การศึกษาผลกระทบของอัตราภาระต่อพฤติกรรมรับแรงดึงของอีพอกซีเรซิน จะพบว่าอีพอกซีเรซินมีพฤติกรรมที่ขึ้นอยู่กับเวลาหรือเรียกพฤติกรรมในลักษณะนี้ว่าพฤติกรรมแบบวิสโคอิลาสติก เมื่อทำการทดสอบที่อัตราภาระต่ำชิ้นทดสอบจะเกิดการเสียรูปได้มากกว่าก่อนเกิดการแตกหักต่างจากชิ้นทดสอบที่อัตราภาระสูงที่เกิดการเสียรูปขึ้นเพียงเล็กน้อยเท่านั้นก่อนเกิดการแตกหัก พฤติกรรมแบบวิสโคอิลาสติกนั้นยังคงส่งผลถึงความต้านทานการแตกหักของวัสดุอีกด้วย สำหรับความต้านทานการแตกหักภายใต้การรับภาระ โหมด 1 พบว่าค่าความต้านทานการ

แตกหัก (K_I) จะมีค่าลดลงเมื่ออัตราภาระที่ใช้ในการทดสอบเพิ่มขึ้นเนื่องจากขนาดของการเสียรูปของชิ้นทดสอบที่ลดลงจากพฤติกรรมที่ขึ้นอยู่กับเวลา เมื่อชิ้นทดสอบรับภาระในโหมดผสม 1 และ 3 นั้นพฤติกรรมดังกล่าวยังคงส่งผลกระทบต่ออย่างชัดเจนเช่นเดียวกัน ผลการทดสอบความต้านทานการแตกหักภายใต้โหมดผสม 1 และ 3 แสดงให้เห็นว่าอัตราภาระส่งผลต่อขนาดและสัดส่วนของ $CTOD$ ที่ควบคุมการแตกหักของวัสดุ เมื่อทดสอบที่อัตราภาระต่ำชิ้นทดสอบจะมีขนาดและสัดส่วนของ $CTOD$ สูงก่อนเกิดการแตกหักและขนาดและสัดส่วนดังกล่าวจะลดลงเมื่ออัตราภาระในการทดสอบเพิ่มขึ้น

5.2 ข้อเสนอแนะ

การศึกษาผลกระทบของสถานะความเค้นต่อความต้านทานการแตกหักภายใต้โหมดผสม 1 และ 3 ของอีพอกซีเรซินจากงานวิจัยชิ้นนี้นั้นจะดำเนินการทดสอบบนวัสดุอีพอกซีเรซินชนิด Diglycidyl Ether Bisphenol-A epoxy (DGEBA) และสารช่วยแข็งกลุ่ม Polyamine เท่านั้นซึ่งส่งผลให้ค่าความต้านทานการแตกหักหรือพฤติกรรมการแตกหักที่เกิดขึ้นจากงานวิจัยนี้คลาดเคลื่อนกับพฤติกรรมที่เกิดขึ้นกับวัสดุอีพอกซีเรซินชนิดอื่น อีกทั้งในการใช้งานจริงชิ้นส่วนมีโอกาสที่จะเกิดการรับภาระแบบเฉียบพลันหรือเกิดการกระแทก (Impact) และเกิดการกัดกร่อนจากสภาพแวดล้อมต่างๆ ซึ่งอาจทำให้พฤติกรรมของวัสดุเกิดความคลาดเคลื่อนไปจากงานวิจัยนี้

รายการอ้างอิง

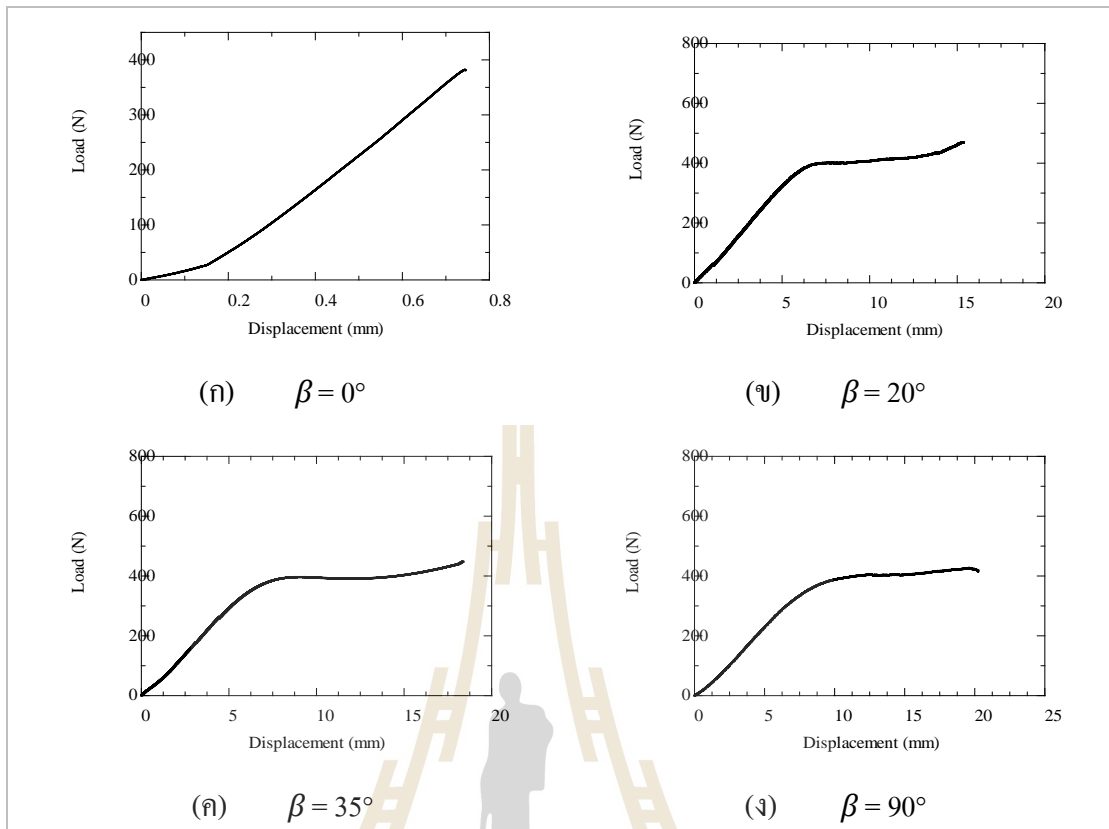
- T. L. Anderson. (1994). **Fracture Mechanics Fundamentals and Applications Book (2nd ed.)**.
- Asst. Prof. Jirapong Kasivitamnuy (2010). **Fracture**. Available: <http://pioneer.netserv.chula.ac.th/~kjirapon/Fracture%20book.pdf>.
- Beguelin, P., & Kausch, H. (1994). The effect of the loading rate on the fracture toughness of Poly (methyl methacrylate), Polyacetal, Polyetheretherketone and modified PVC. **Journal of materials science**, 29(1), 91-98.
- Kanchanomai, C., Rattananon, S., & Soni, M. (2005). Effects of loading rate on fracture behavior and mechanism of thermoset epoxy resin. **Polymer Testing**, 24(7), 886-892.
- Kanchanomai, C., & Rattananon, S. (2008). Effects of loading rate and thickness on mixed-mode I/II fracture toughness of thermoset epoxy resin. **Journal of applied polymer science**, 109(4), 2408-2416.
- Ren, F., Wang, J. J.-A., & Bertelsen, W. D. (2012). Fractographic study of epoxy under mode I and mixed mode I/III loading. **Materials Science and Engineering: A**, 532, 449-455.
- Ayatollahi, M., & Saboori, B. (2014). A new fixture for fracture tests under mixed mode I/III loading. **European Journal of Mechanics-A/Solids**, 51, 67-76.
- Jamali, J., Fan, Y., & Wood, J. (2015). The mixed-mode fracture behavior of epoxy by the compact tension shear test. **International Journal of Adhesion and Adhesives**, 63, 79-86.
- ASTM. (2015). Standard D638. Standard test method for tensile properties of plastics (pp. 151-152): **ASTM International West Conshohocken, PA**.
- ASTM. (2014). Standard test methods for plane-strain fracture toughness and strain energy release rate of plastic materials. **ASTM D5045**.
- Shokrieh, M., Rezvani, S., & Mosalmani, R. (2017). Mechanical behavior of polyester polymer concrete under low strain rate loading conditions. **Polymer Testing**, 63, 596-604.



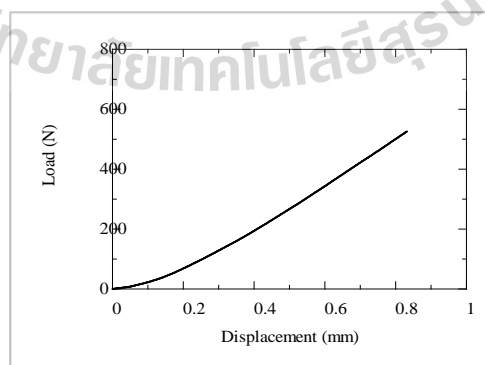
ภาคผนวก ก

ผลการทดสอบความต้านทานการแตกหัก

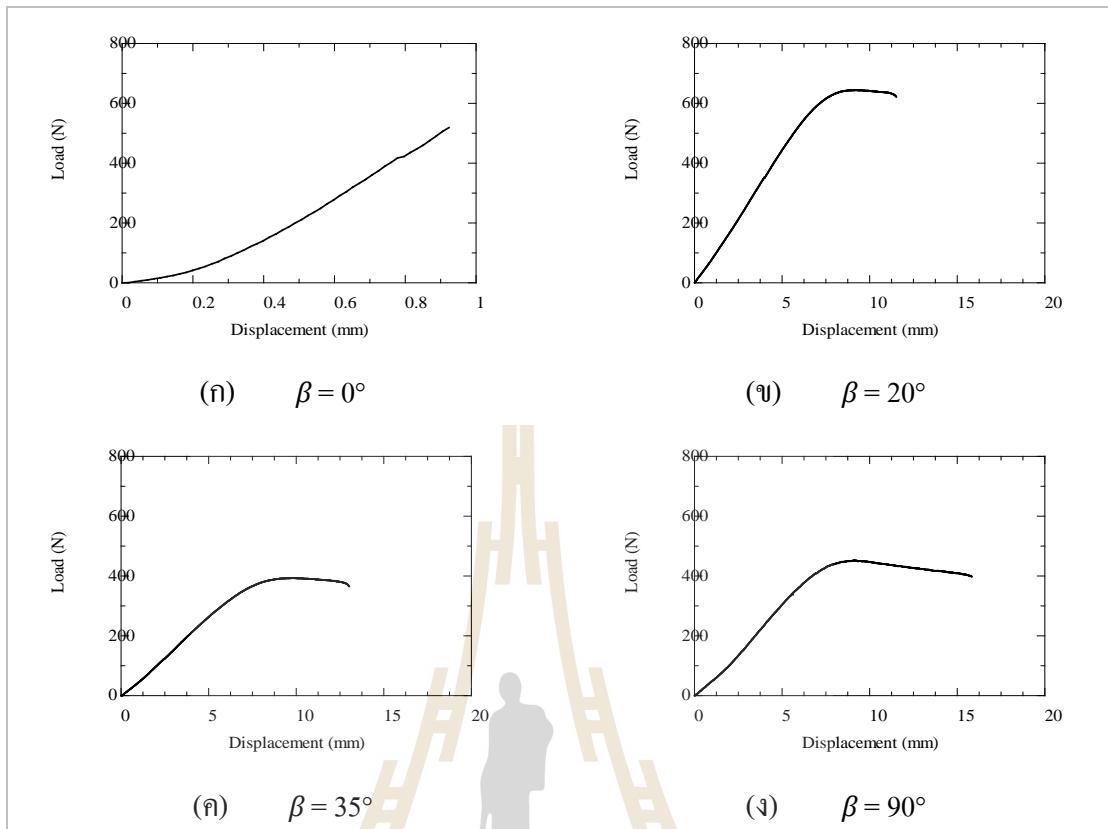
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



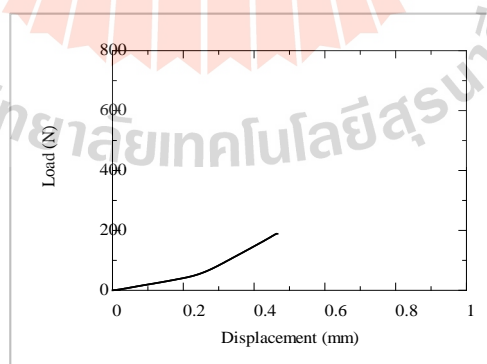
รูปที่ ก.1 ความสัมพันธ์ของอัตราภาระกับระยะยืดตัวของชิ้นทดสอบหนา 4 มิลลิเมตรที่อัตราภาระ 0.1 มิลลิเมตรต่อนาที



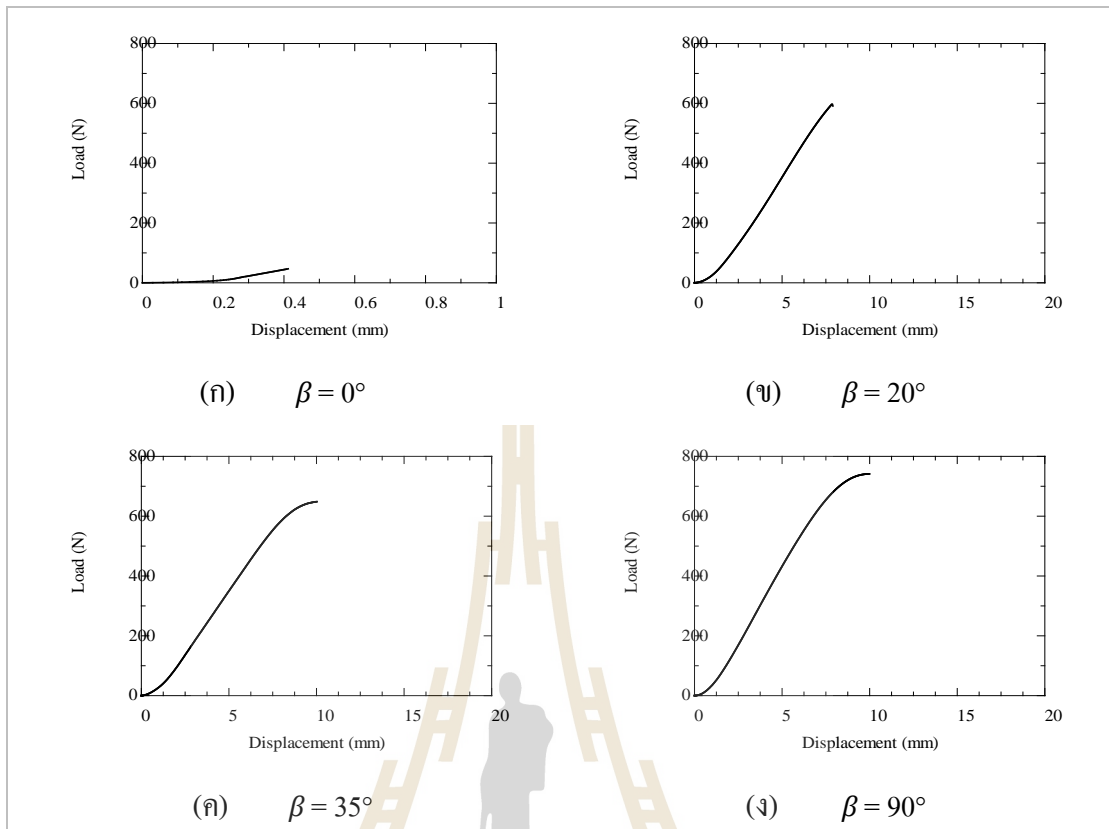
รูปที่ ก.2 ความสัมพันธ์ของอัตราภาระกับระยะยืดตัวของชิ้นทดสอบหนา 4 มิลลิเมตรที่อัตราภาระ 1 มิลลิเมตรต่อนาที



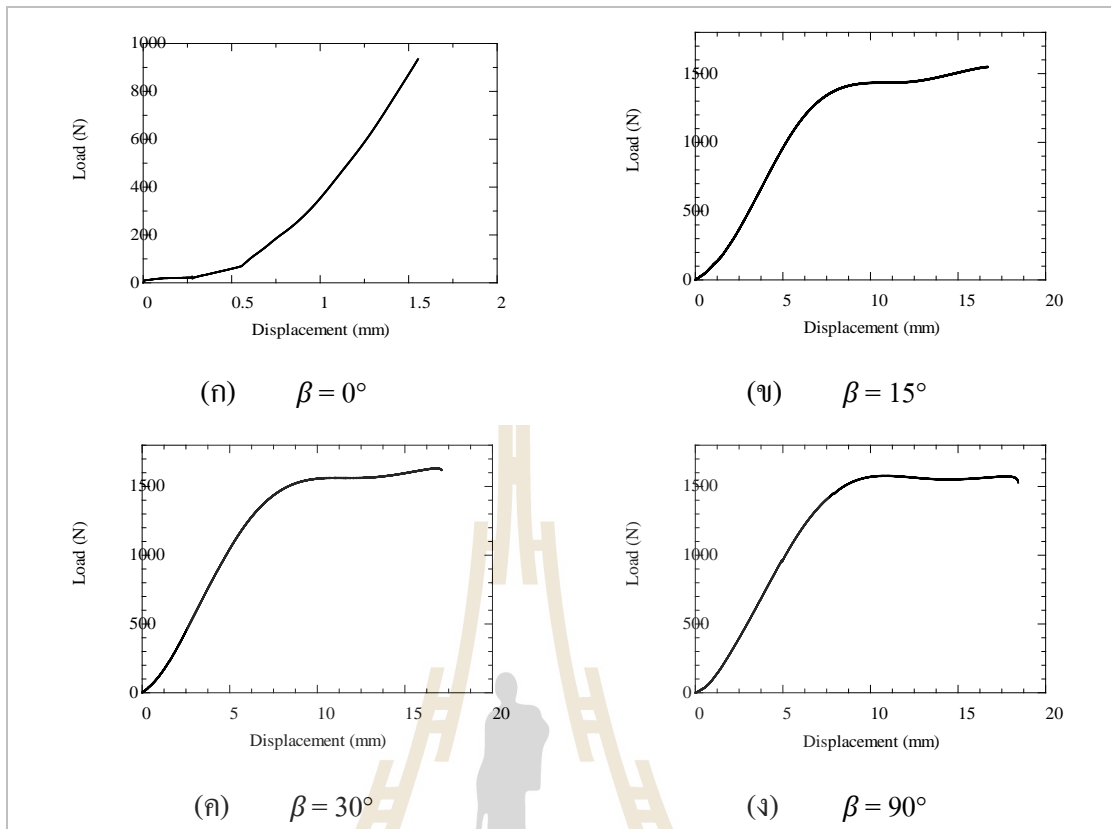
รูปที่ ก.3 ความสัมพันธ์ของอัตราเร่งกับระยะยืดตัวของชิ้นทดสอบหนา 4 มิลลิเมตรที่อัตราเร่ง 10 มิลลิเมตรต่อวินาที



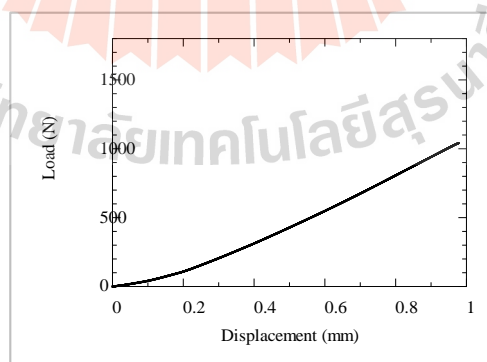
รูปที่ ก.4 ความสัมพันธ์ของอัตราเร่งกับระยะยืดตัวของชิ้นทดสอบหนา 4 มิลลิเมตรที่อัตราเร่ง 100 มิลลิเมตรต่อวินาที



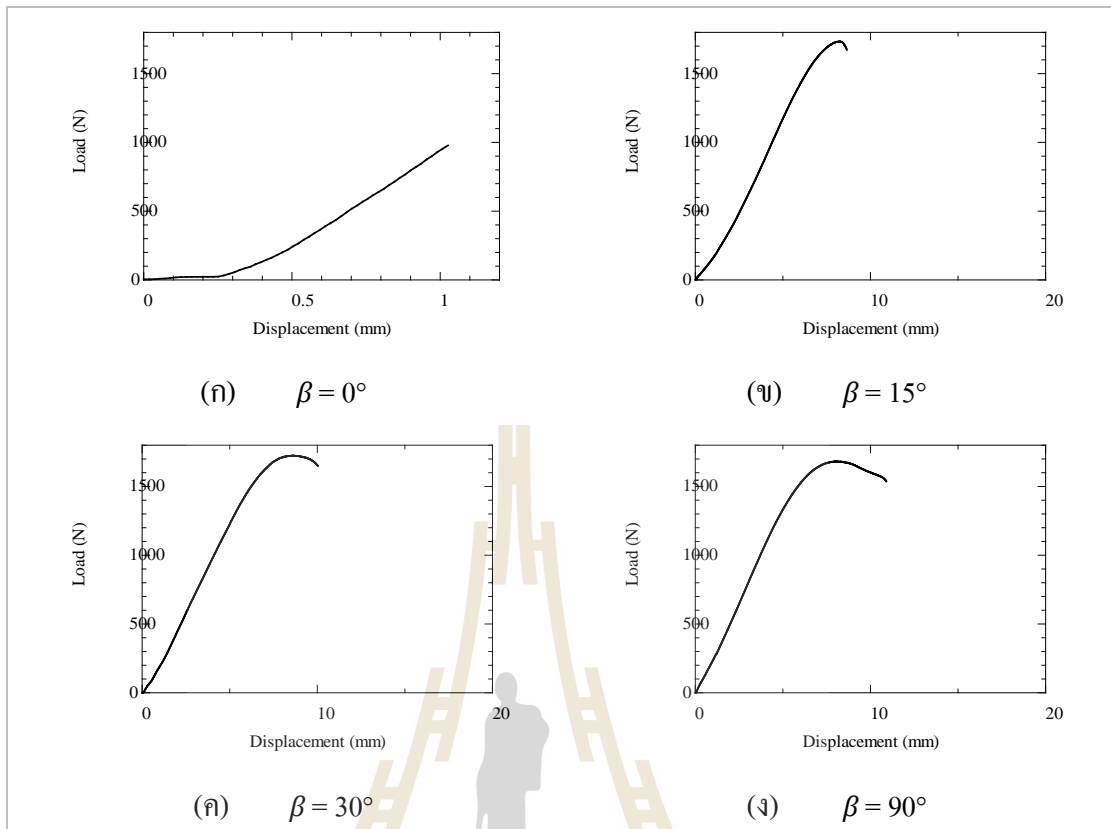
รูปที่ ก.5 ความสัมพันธ์ของอัตราเร่งกับระยะยัดตัวของชิ้นทดสอบหนา 4 มิลลิเมตรที่อัตราเร่ง 1000 มิลลิเมตรต่อวินาที



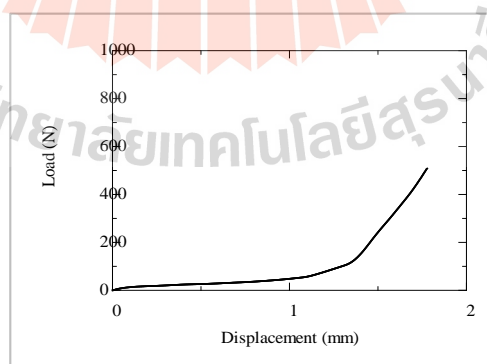
รูปที่ ก.6 ความสัมพันธ์ของอัตราเร่งกับระยะยืดตัวของชิ้นทดสอบหนา 8 มิลลิเมตรที่อัตราเร่ง 0.1 มิลลิเมตรต่อวินาที



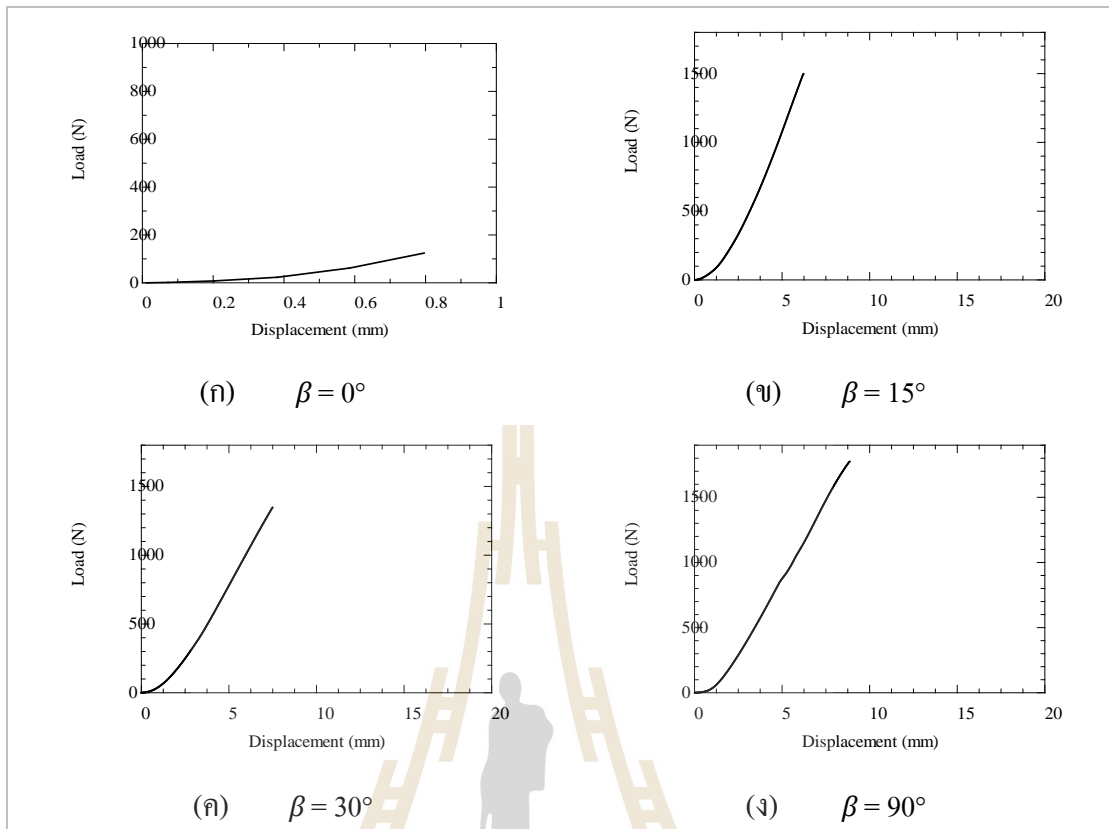
รูปที่ ก.7 ความสัมพันธ์ของอัตราเร่งกับระยะยืดตัวของชิ้นทดสอบหนา 8 มิลลิเมตรที่อัตราเร่ง 1 มิลลิเมตรต่อวินาที



รูปที่ ก.8 ความสัมพันธ์ของอัตราเร่งกับระยะยืดตัวของชิ้นทดสอบหนา 8 มิลลิเมตรที่อัตราเร่ง 10 มิลลิเมตรต่อวินาที



รูปที่ ก.9 ความสัมพันธ์ของอัตราเร่งกับระยะยืดตัวของชิ้นทดสอบหนา 8 มิลลิเมตรที่อัตราเร่ง 100 มิลลิเมตรต่อวินาที



รูปที่ ก.10 ความสัมพันธ์ของอัตราภาระกับระยะยืดตัวของชิ้นทดสอบหนา 8 มิลลิเมตรที่อัตราภาระ 100 มิลลิเมตรต่อนาที

ตารางที่ ก.1 ตารางแสดงข้อมูลสำหรับการคำนวณด้วย FEA ของชิ้นทดสอบหนา 4 มิลลิเมตร

Thickness 4 mm						
Loading rate (mm/min)	Loading angle (°)	No.	a (mm)	W(mm)	a/w	Load (N)
0.1	0	1	10.11	20.00	0.51	578.301
		2	9.84	20.00	0.49	563.158
		3	10.04	20.00	0.50	555.445
	65	1	9.64	20.00	0.48	656.236
		2	9.58	20.00	0.48	783.820
		3	9.86	20.00	0.49	547.852
	78	1	10.02	20.00	0.50	655.873
		2	9.89	20.00	0.49	695.980
		3	9.92	20.00	0.50	651.550
	90	1	10.12	20.00	0.51	621.744
		2	10.01	20.00	0.50	639.253
		3	10.07	20.00	0.50	602.350
10	0	1	10.00	20.00	0.50	460.549
		2	9.52	20.00	0.48	508.664
		3	9.87	20.00	0.49	478.043
	65	1	10.17	20.00	0.51	582.670
		2	9.74	20.00	0.49	546.800
		3	10.07	20.00	0.50	671.460
	78	1	9.88	20.00	0.49	609.408
		2	9.71	20.00	0.49	552.352
		3	9.89	20.00	0.49	542.343
	90	1	10.10	20.00	0.51	633.074
		2	10.10	20.00	0.50	589.586
		3	9.89	20.00	0.49	632.130
1000	0	1	10.07	20.00	0.50	99.497
		2	10.10	20.00	0.51	78.744
		3	10.03	20.00	0.50	71.878
	65	1	9.98	20.00	0.50	422.522
		2	10.13	20.00	0.51	521.250
		3	10.09	20.00	0.50	450.680
	78	1	10.49	20.00	0.52	449.074
		2	10.02	20.00	0.50	552.352
		3	10.23	20.00	0.51	503.522
	90	1	9.99	20.00	0.50	631.264
		2	10.11	20.00	0.51	604.780
		3	9.98	20.00	0.50	612.326

ตารางที่ ก.2 ตารางแสดงข้อมูลสำหรับการคำนวณด้วย FEA ของชิ้นทดสอบหนา 8 มิลลิเมตร

Thickness 8 mm						
Loading rate (mm/min)	Loading angle (°)	No.	a (mm)	W(mm)	a/w	Load (N)
0.1	0	1	9.98	20.00	0.50	935.451
		2	10.13	20.00	0.51	1150.368
		3	10.04	20.00	0.50	1066.863
	65	1	9.91	20.00	0.50	1581.996
		2	9.64	20.00	0.48	1537.120
		3	9.93	20.00	0.50	1515.332
	78	1	9.67	20.00	0.48	1661.547
		2	9.89	20.00	0.49	1711.784
		3	9.97	20.00	0.50	1651.550
	90	1	9.84	20.00	0.49	1582.885
		2	10.21	20.00	0.51	1489.500
		3	10.05	20.00	0.50	1602.350
10	0	1	9.72	20.00	0.49	577.717
		2	9.87	20.00	0.49	627.039
		3	9.95	20.00	0.50	612.970
	65	1	10.11	20.00	0.51	1692.350
		2	9.75	20.00	0.49	1733.040
		3	10.00	20.00	0.50	1550.210
	78	1	9.74	20.00	0.49	1727.277
		2	9.70	20.00	0.48	1800.771
		3	9.88	20.00	0.49	1789.511
	90	1	9.88	20.00	0.49	1881.932
		2	9.85	20.00	0.49	1689.176
		3	9.78	20.00	0.49	1699.890
1000	0	1	10.29	20.00	0.51	105.680
		2	9.73	20.00	0.49	124.188
		3	9.61	20.00	0.48	129.484
	65	1	9.73	20.00	0.49	1381.610
		2	9.95	20.00	0.50	1384.663
		3	9.51	20.00	0.48	1498.173
	78	1	10.15	20.00	0.51	1453.639
		2	9.64	20.00	0.48	1347.385
		3	10.02	20.00	0.50	1502.150
	90	1	10.19	20.00	0.51	1379.088
		2	9.75	20.00	0.49	1774.255
		3	9.68	20.00	0.48	1661.651

ตารางที่ ก.3 ตารางแสดงผลการคำนวณค่า K ของชั้นทดสอบหนา 4 มิลลิเมตร

Thickness 4 mm						
Loading rate (mm/min)	Loading angle (°)	Mode mixity angle (°)	K_I	SD.	K_{III}	SD
0.1	0	0	3.473	0.168	0.000	0.000
	65	20	4.895	0.673	1.811	0.251
	78	35	3.676	0.244	2.452	0.020
	90	90	0.210	0.043	3.573	0.059
10	0	0	2.870	0.043	0.000	0.000
	65	20	4.610	0.414	1.568	0.067
	78	35	3.556	0.327	2.506	0.211
	90	90	0.142	0.034	3.544	0.181
1000	0	0	0.546	0.098	0.000	0.000
	65	20	3.878	0.421	1.384	0.136
	78	35	3.383	0.427	2.381	0.388
	90	90	0.152	0.020	3.864	0.058

ตารางที่ ก.4 ตารางแสดงผลการคำนวณค่า K ของชั้นทดสอบหนา 8 มิลลิเมตร

Thickness 8 mm						
Loading rate (mm/min)	Loading angle (°)	Mode mixity angle (°)	K_I	SD.	K_{III}	SD
0.1	0	0	3.277	0.341	0.001	0.000
	65	15	5.247	0.114	1.374	0.152
	78	30	5.105	0.314	2.976	0.043
	90	90	0.144	0.033	3.816	0.057
10	0	0	1.888	0.112	0.001	0.000
	65	15	5.804	0.183	1.610	0.053
	78	30	5.583	0.222	3.029	0.222
	90	90	0.159	0.069	4.074	0.239
1000	0	0	0.372	0.021	0.000	0.000
	65	15	5.449	0.005	1.480	0.000
	78	30	4.929	0.384	2.670	0.163
	90	90	0.068	0.021	3.985	0.414

ตารางที่ ก.5 ผลการคำนวณค่า J ของชิ้นทดสอบหนา 4 มิลลิเมตร

Thickness 4 mm				
Loading rate (mm/min)	Loading angle (°)	Mode mixity angle (°)	J	SD.
0.1	0	0	4.082	0.510
	65	20	12.894	2.776
	78	35	19.527	0.521
	90	90	19.705	0.171
10	0	0	2.390	0.027
	65	20	8.219	1.611
	78	35	8.405	0.365
	90	90	10.695	1.217
1000	0	0	0.070	0.025
	65	20	4.097	0.928
	78	35	4.979	0.683
	90	90	5.684	0.185

ตารางที่ ก.6 ผลการคำนวณค่า J ของชิ้นทดสอบหนา 8 มิลลิเมตร

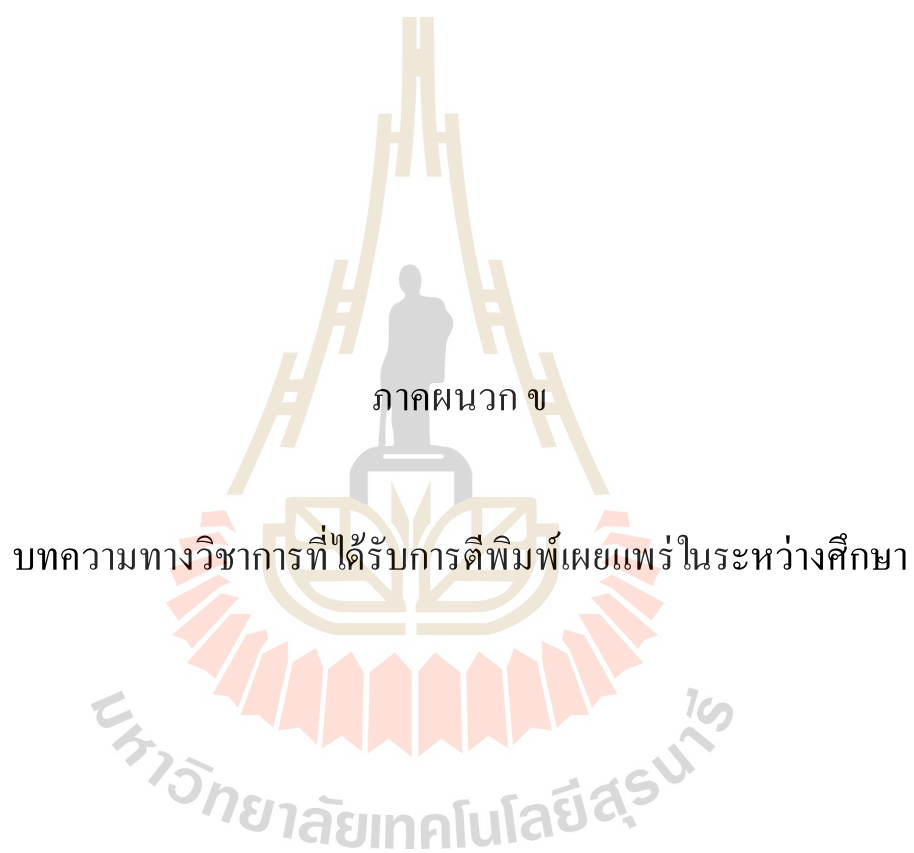
Thickness 8 mm				
Loading rate (mm/min)	Loading angle (°)	Mode mixity angle (°)	J	SD.
0.1	0	0	3.404	0.808
	65	20	19.497	1.965
	78	35	30.409	3.999
	90	90	24.410	4.310
10	0	0	0.962	0.114
	65	20	17.265	2.898
	78	35	21.586	1.675
	90	90	16.727	4.336
1000	0	0	0.032	0.002
	65	20	7.793	0.285
	78	35	8.179	1.232
	90	90	6.322	0.461

ตารางที่ ก.7 ผลการคำนวณค่า $CTOD_{45}$ ของชั้นทดสอบหนา 4 มิลลิเมตร

Loading rate (mm/min)	Mode mixity angle (°)	Crack tip opening displacement ($CTOD_{45}$) [mm]					
		Axis 1 (X)	SD.	Axis 2 (Y)	SD.	Axis 3 (Z)	SD.
0.1	0	0.063	0.015	0.000	0.000	0.000	0.007
	20	0.165	0.034	0.000	0.000	0.207	0.066
	35	0.175	0.034	0.000	0.000	0.509	0.061
	90	0.034	0.008	0.001	0.000	0.630	0.087
10	0	0.023	0.009	0.000	0.000	0.000	0.000
	20	0.126	0.020	0.000	0.000	0.147	0.043
	35	0.108	0.015	0.000	0.000	0.211	0.038
	90	0.000	0.001	0.000	0.000	0.317	0.054
1000	0	0.003	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	20	0.018	0.002	0.000	0.000	0.026	0.003
	35	0.016	0.006	0.000	0.000	0.035	0.008
	90	0.002	0.001	0.000	0.000	0.052	0.008

ตารางที่ ก.8 ผลการคำนวณค่า $CTOD_{45}$ ของชั้นทดสอบหนา 8 มิลลิเมตร

Loading rate (mm/min)	Mode mixity angle (°)	Crack tip opening displacement ($CTOD_{45}$) [mm]					
		Axis 1 (X)	SD.	Axis 2 (Y)	SD.	Axis 3 (Z)	SD.
0.1	0	0.059	0.005	0.000	0.000	0.000	0.001
	15	0.189	0.019	0.000	0.000	0.192	0.014
	30	0.205	0.023	0.000	0.000	0.580	0.032
	90	0.074	0.018	0.000	0.000	0.669	0.058
10	0	0.013	0.006	0.000	0.000	0.000	0.002
	15	0.168	0.041	0.000	0.000	0.174	0.022
	30	0.151	0.045	0.000	0.000	0.252	0.036
	90	0.022	0.009	0.000	0.000	0.389	0.031
1000	0	0.002	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000
	15	0.021	0.002	0.000	0.000	0.028	0.004
	30	0.021	0.004	0.000	0.000	0.039	0.005
	90	0.004	0.001	0.000	0.000	0.055	0.005



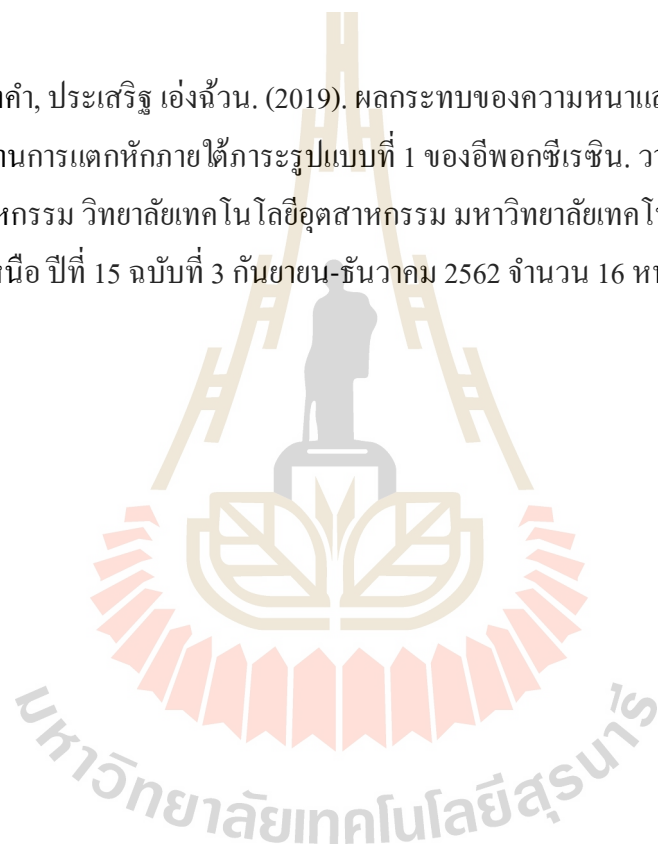
ภาคผนวก ข

บทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา

รายชื่อบทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในขณะศึกษา

Attasit Wiangkham, Piyamon Poapongsakorn. (2017). Effect of loading rate on mixed-mode I/III fracture toughness of epoxy resin. The 11th South East Asian Technical University Consortium (SEATUC) Symposium. 13-14 March 2017, Ho Chi Minh City, Vietnam. 6 Pages.

อรรถสิทธิ์ เวียงคำ, ประเสริฐ เอ่งฉ้วน. (2019). ผลกระทบของความหนาและอัตราภาระต่อความต้านทานการแตกหักภายใต้ภาระรูปแบบที่ 1 ของอีพอกซีเรซิน. วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ปีที่ 15 ฉบับที่ 3 กันยายน-ธันวาคม 2562 จำนวน 16 หน้า



EFFECT OF LOADING RATE ON MIXED-MODE I/III FRACTURE TOUGHNESS OF EPOXY RESIN

Attasit Weingkhum⁽¹⁾, Piyamon Poapongsakorn⁽¹⁾

⁽¹⁾School of Manufacturing Engineering, Institute of Engineering,
Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, Thailand

Email: ppoapong@sut.ac.th

ABSTRACT

Epoxy resin is used in many engineering applications especially as a matrix material in composite structures and an adhesive for engineering purposes. During manufacturing processes and services, flaws may occur in epoxy resin. Moreover, due to a wide range of applications, epoxy resin usually undergoes complex loading during services. Thus, fracture in epoxy under mixed-mode loading is possible. In this study, fracture behavior of epoxy resin under mixed-mode I/III loading (i.e. opening mode and tearing mode) is investigated using modified compact-tension (CT) specimen. And as epoxy resin is a viscoelastic material, the effect of loading rate is also studied by varying the crosshead speed in the range of 0.1 to 1000 mm/min. Critical strain energy release rates (G_c) for fracture at various modes of loading are determined. The fracture surfaces of specimen are observed and the fracture mechanisms under various modes of loading are discussed.

KEYWORDS: Epoxy resin, mixed-mode fracture, loading rate

1. INTRODUCTION

Nowadays polymer materials play a dramatic role on engineering applications. Epoxy resin is one of the most widely used thermosetting polymers. Its applications are such as high-strength adhesive joint and matrix materials in composite structures. During manufacturing processes and services, flaws may occur in epoxy resin. These flaws could coalesce and become a crack leading to failure of the main structure. Moreover, due to a wide range of applications, epoxy resin usually undergoes complex loading during services. Thus, fracture in epoxy under mixed-mode loading between mode I and mode III, i.e. opening mode and tearing mode, is possible. Some

previous works have been done on mixed-mode I/III fracture of polymers [Ren et al. (2011)]. Moreover, as there is no standard test method for the mixed mode I/III fracture toughness, various types of loading configuration have been developed to investigate the mixed mode I/III fracture toughness. The types of specimen used in the previous works are such as circumferentially notched cylindrical bars [Ren et al. (2011)], single edge-notched tension with adjustable loading angle fixture [Jali et al. (2015)], and single edge-notched bending with inclined crack [Pirmohammad and Bayat (2016)].

Besides, since epoxy resin is a viscoelastic material, its mechanical properties depend on time or loading rate. Beguelin and Kansch (1994) investigated mode I fracture toughness of solid PVC and found that fracture toughness of PVC was strongly dependent on time. At low loading rate, high deformation at vicinity of crack tip could reduce the severity of crack tip, which led to high fracture resistance of the solid PVC. While, Kanchanomai and Rattananon (2008) investigated the effect of loading rate on mixed-mode I/II fracture toughness. They found that at high loading rate, fracture occurred in brittle manner and became ductile as the loading rate decreased.

Unfortunately, there is no report of the effect of loading rate on the fracture toughness under mixed-mode I/III loading. Therefore, in this study mixed mode I/III fracture toughness was investigated. The fracture mechanics parameter used to represent the fracture toughness of specimen is the critical strain energy release rate (G_c). To study the effect of loading rate, the fracture toughness tests were carried out at two different loading rates of 0.1 and 1000 mm/min. After the test, fracture surfaces of specimens were observed using an optical microscope and the fracture mechanisms were discussed along with the effects of mixed-mode loading and loading rate.

2. EXPERIMENTAL METHOD

2.1 Specimens and test methods

Thermoset epoxy system used in this study is Epotec YD535LV/TH7257 (epoxy/hardener) supplied by Aditya Birla Chemicals (Thailand) Ltd. The specimen was prepared by mixing epoxy and hardener with the weight ratio of 100:35 (recommended by the manufacturer). After mixing, the epoxy resin was poured into a flat plate mold to achieve a desired thickness. The curing process was done at room temperature for 24 hours followed by the post-curing in an oven at 80°C for 4 hours.

Figure 1 shows tensile and fracture toughness specimens used in this study. The tensile specimen was prepared according to the ASTM D638 (2014). Dog-bone specimen with 6-mm thickness and 50-mm gage length was selected (Fig. 1 (a)). However, since there is no standard for mixed-mode I/III fracture toughness testing, specimen preparation and fixture were designed according to the previous work by Ayatollahi and Saboori (2015), in which the single edge-notch tension (SENT) specimen with 8-mm thickness (Fig 1 (b)) was employed and an adjustable loading-angle fixture was used to apply mixed-mode loading. The specimen and fixture setup is shown in Fig. 2.

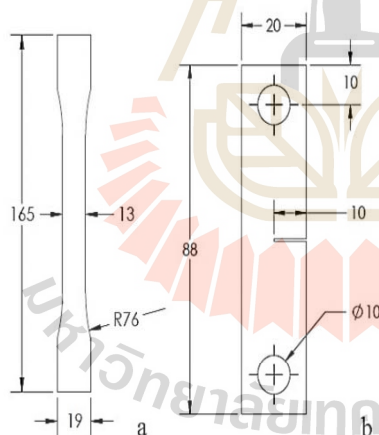


Fig. 1 (a) Tensile specimen and (b) Fracture toughness specimen.

In the mixed-mode fracture test, the loading angle (θ) was adjusted by changing the location of the loading pin to achieve various mode mixities. Noted that, $\theta = 0^\circ$ represents the pure mode I loading and $\theta = 90^\circ$ represents the pure mode III loading. Mode mixity between mode I and mode III fracture toughness (β) can be defined as

$$\beta = \tan^{-1} \left(\frac{K_{III}}{K_I} \right) \quad (1)$$

where K_I and K_{III} are fracture toughnesses under mode I and mode III loading. Four loading angles, i.e. $\theta = 0^\circ, 65^\circ, 78^\circ$, and 90° , were applied in this study, which correspond to the mode mixity (β) of $0^\circ, 30^\circ, 60^\circ$, and 90° , respectively [Ayatollahi and Saboori (2015)].

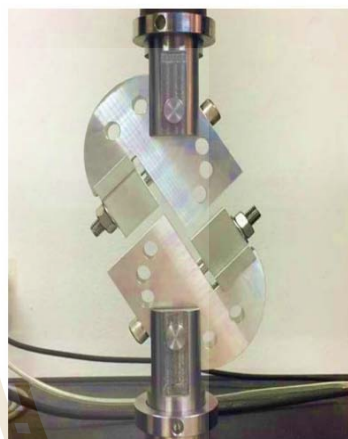


Fig. 2 Fracture toughness specimen with an adjustable loading-angle fixture.

All specimens were cut to achieve the final dimensions by milling machine. For fracture toughness specimen, the preparation of notch was carried out according to ASTM D5045 (2014). A saw-cut notch was made, then a sharp pre-crack was introduced by a fresh razor blade. After preparation, the specimens were kept in a desiccator cabinet, where the relative humidity and the temperature were controlled at 50% and 25°C, respectively, for at least 24 hours prior to the test in order to reduce the moisture effect during specimen preparation process.

Both tensile and fracture toughness tests were performed on a screw-type universal testing machine, Instron 5565 with 5-kN load cell at the relative humidity of 50±5% and the temperature of 25±2°C. To study the effect of loading rate, the tests were carried out at two different loading rates, i.e. 0.1 and 1000 mm/min. All the tests were done up to fracture of the specimen. During the test, load and displacement were collected by the embedded data acquisition unit of the machine. At least three replicates were tested at each condition. After mixed-mode fracture toughness tests, crack growth angle (ϕ_f) of each specimen was measured as defined in Fig. 3. Fracture surfaces of fracture toughness specimens were then observed using optical microscope.

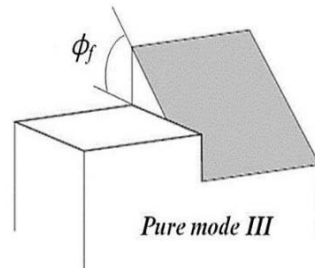


Fig. 3 Method to measure crack growth angle of fracture specimen.

2.2 Calculation of fracture toughness

For pure mode I loading, stress intensity factor (K_I) can be calculated as follow,

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

where P_Q is the maximum applied load, B is the thickness of specimen, W is the width of specimen, and $f(x)$ is the geometry function defined as [Anderson (1994)],

$$f(x) = \sqrt{\frac{2 \tan \frac{\pi a}{2W}}{\cos \frac{\pi a}{2W}}} \left[0.752 + 2.02 \left(\frac{a}{W} \right) + 0.37 \left(1 - \sin \frac{\pi a}{2W} \right)^3 \right] \quad (3)$$

where a is crack length.

For mixed-mode loading, strain energy-released rate (G_Q) was used as the fracture mechanics parameter. The calculation of G_Q is defined as following [Anderson (1994)],

$$G_Q = \frac{\partial U}{\partial A} \quad (4)$$

where ∂U is total strain energy defined as $P_Q|u_Q - u_i|/2$ and ∂A is the crack area of each specimen.

3. RESULTS AND DISCUSSION

3.1 Tensile properties

The stress-strain curves tested at different loading rates are shown in Fig. 4. It can be seen that tensile properties of the epoxy resin are strongly influenced by the loading rate. At high loading rate (1000 mm/min), the relationship between stress and strain is linear up to fracture of specimen. Plastic deformation is not likely at high loading rate, i.e. brittle fracture. At low loading rate (0.1 mm/min), ductile behavior was observed. A linear relationship is observed up to about 10% strain and followed by non-linear relationship until the fracture of specimen. The maximum tensile strength is higher for the test at high loading rate, while the fracture strain is higher for the test at low loading rate. The tensile properties

determined from stress-strain curves at different loading rates are summarized in Table 2.

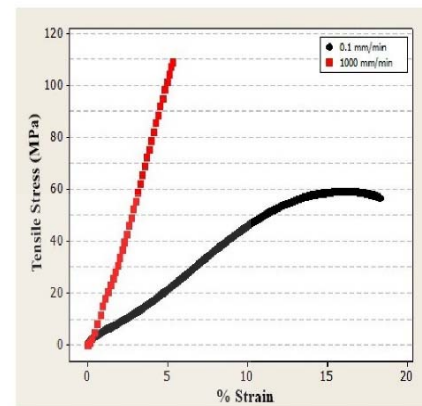


Fig.4 Stress-strain curves at different loading rates.

Since epoxy is a viscoelastic material, its deformation behavior in both elastic and plastic region is time-dependent. At low loading rate epoxy has longer time for deformation process than at high loading rate, thus higher deformation can occur at low loading rate. Moreover, due to the large deformation at low loading rate, the reduction in the cross-section area is possible. Thus, the load required to stretch and break the specimen decreases and results in lower yield strength and ultimate tensile strength. Similar time-dependent deformation of cross-linked polymer was observed by Rattananon and Kanchanomai (2008).

Table 1 Tensile properties of epoxy used in calculate

Properties	0.1 mm/min	1000 mm/min
Modulus (GPa)	0.45±0.02	2.17±0.15
Yield strength (MPa)	48.88±1.26	105.28±2.83
Tensile strength (MPa)	57.26±1.96	105.28±2.83
Fracture strain (%)	18.64±0.28	4.85±1.03

3.2 Load-displacement relationship

Relationships between applied load and displacement collected from the fracture toughness tests at the loading rates of 0.1 and 1000 mm/min are shown in Fig. 5. Under pure mode I loading, the load-displacement relationships are linear for the tests at both low and high loading rates (Fig. 5 a). However, under pure mode III loading, linear relationship is observed only at high loading rate, while non-linear relationship indicating plastic deformation before fracture of specimen is found at low loading rate (Fig 5 (b)). Under both pure mode I and pure mode III loadings, fracture load decreases as the loading rate increases. Moreover, larger scale of

deformation was observed during the tests at low loading rate.

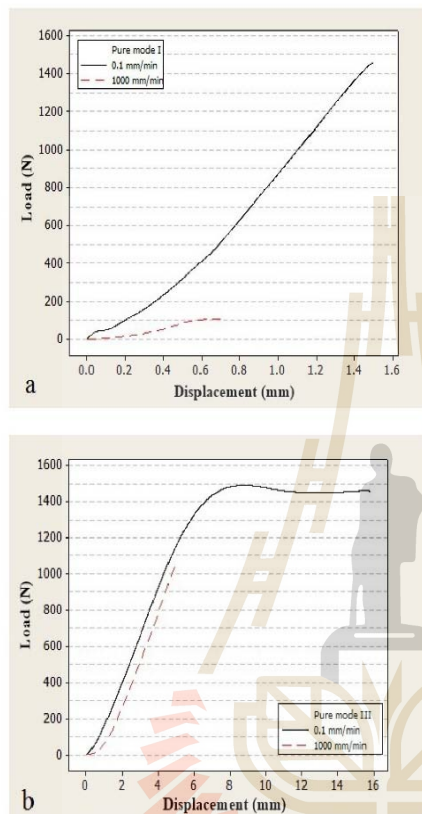


Fig.5 Relationships between applied load and displacement at different loading rates under (a) pure mode I loading (b) pure mode III loading.

3.3 Plain-strain plastic zone size

According to the ASTM D5045 (2014), it is suggested that the validity of plain strain condition under pure mode I loading should be confirmed by the following size criteria,

$$B, a, (W - a) > 2.5 \left(\frac{K_I}{\sigma_y} \right)^2 \quad (4)$$

where K_I is stress intensity factor under pure mode I loading determined from equation (2) and σ_y is yield strength obtained at a corresponding loading rate. The stress intensity factors under pure mode I loading (K_I) are 4.46 and 0.32 $\text{MPa}\cdot\text{m}^{0.5}$ for the loading rates of 0.1 and 1000 mm/min, respectively. Thus, the approximate width and crack size corresponding to equation (4) are 20 and

0.025 mm for the loading rates of 0.1 and 1000 mm/min, respectively. Since in this work B is 8 mm, and a and $(W - a)$ is approximately 10 mm, at low loading rate, fracture occurs under plane stress condition, while, at high loading rate, plain strain condition is met.

3.4 Mixed-mode fracture toughness

Critical strain energy release rates (G_C) at different mode mixities were shown in Fig. 6. The critical strain energy release rate (G_C) increases with increasing mode mixity and reaches the highest value at the mixed-mode angle of 90° i.e. pure mode III loading. Moreover, it can be seen that, at all mode mixities, fracture toughnesses at low loading rate are significantly higher than those at high loading rate.

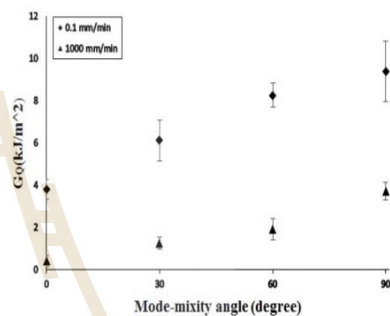


Fig.6 Critical strain energy release rate (G_C) at various mode mixities.

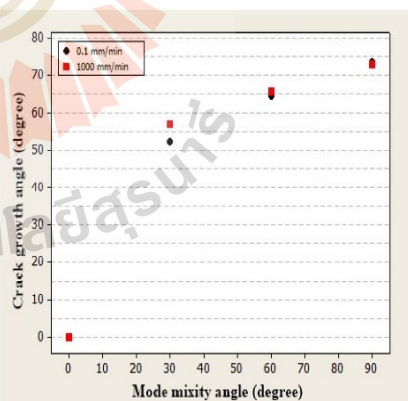


Fig.7 Crack growth angle at various mode mixities.

Crack growth angles (ϕ_f) measured from the specimens tested at each condition are shown in Fig.7. Under pure mode I loading, the crack growth path is parallel to the notch direction. With the mixity of mode III loading, the crack path tends to grow obliquely under

torsion. Thus, the crack growth angle increases as the mode mixity increases. However, unlike the fracture toughness results, crack growth angle is not influenced by the change of loading rate. Similar trend was found in the previous work [Jamali et al. (2015)].

3.5 Fracture surfaces

After the fracture toughness tests, fracture surfaces of specimens tested at various conditions were observed. The fracture surfaces of specimens tested under pure mode I and pure mode III loadings are compared in Fig. 8. Noted that the precrack is located on the right hand side of the figures and the cracks grew from the right to the left.

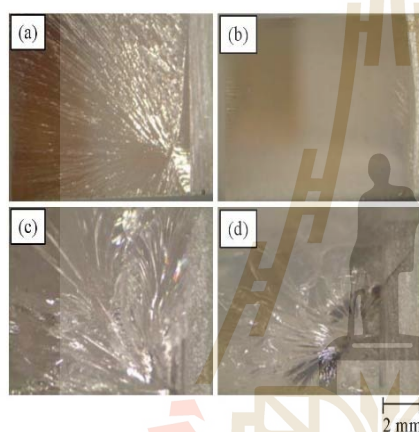


Fig. 8 Fracture surfaces of specimens tested (a)-(b) under pure mode I loading at 0.1- and 1000-mm/min loading rate, respectively (c)-(d) under pure mode III loading at 0.1- and 1000-mm/min loading rate, respectively.

Fig. 8 a and b shows fracture surfaces of the tests under pure mode I loading at low and high loading rates, respectively. A rough surface indicating large amount of deformation in the stretched zone can be observed on the fracture surface from the test at low loading rate (Fig. 8 a). While, at high loading rate, a smooth fracture surface indicating brittle fracture is found. It is consistent with the load-displacement relationship results showing that higher amount of deformation occurred at the loading rate of 0.1 mm/min (Fig. 5 a). Under pure mode III loading, wavy fracture surfaces, i.e. stretched zone, were observed at both 0.1- and 1000-mm/min loading rates. The fracture surface manner of stretched zone like streaky a radial deriving from the twist of specimen under torsion force before failure. However, comparatively larger scale of deformation is shown on the fracture surface from the test at the loading rate of 0.1 mm/min. On the other hand, at high loading rate, slight stretched zone is shown near the notch tip area, then followed by the smooth surface

indicating a fast crack growth until failure. The large deformation at 0.1-mm/min loading rate is also confirmed by the load-displacement relationship of the specimen tested under pure mode III loading represented in Fig. 5 b. Due to the large deformation at low loading rate, the energy required to break the fracture toughness specimen increases, thus the critical strain energy released rate is high. On the other hand, at high loading rate, the specimen is under the plain strain condition and the deformation of the specimen is restricted. Thus, the critical strain energy released rate is low.

4. CONCLUSIONS

In this study, the effect of loading rate on mixed-mode I/III fracture toughness of epoxy resin is investigated. The main conclusions are summarized as follows.

1. The fracture toughnesses (G_C) increased as the mode mixity increased. Under pure mode III loading the fracture toughness reached the highest value. With mixing of mode III loading, the twist of specimen under torsion force is likely to enhance deformation of the specimen and leads to high fracture toughness.
2. The fracture toughnesses (G_C) tested under low loading was substantially higher than those tested at high loading rate. This is due to the large deformation at low loading rate leading to the high energy required to break the specimen i.e. high fracture toughness.
3. The fracture surfaces of specimen tested under pure mode III loading clearly showed the stretched zone indicating large deformation during the tests. On the other hand, for pure mode I loading, the mirror-like surface was observed at high loading rate. While at low loading rate, the evidence of plastic deformation was observed.

REFERENCES

- Ren F., Wang J. J., Bertelsen W. D., Fractographic study of epoxy under mode I and mixed mode I/III loading, *Materials Science and Engineering A*, vol.532, pp.449-455, 2011.
- Jamali J., Fan Y., Wood J. T., The mixed-mode fracture behavior of epoxy by the compact tension shear test, *International Journal of Adhesion & Adhesives*, vol.63, pp.79-86, 2015.
- Pirmahammad S., Bayat A., Characterizing mixed mode I/III fracture toughness of asphalt concrete using asymmetric disc bend (ADB) specimen, *Construction and Building Materials*, vol.120, pp.571-580, 2016.
- Beguclin Ph., Kausch H. H., The effect of the loading rate on the fracture toughness of Poly(methyl methacrylate), Polyacetal, Polyetheretherketone and modified PVC, *Journal of Materials Science*, vol. 29, pp.91-98, 1994.

The 11th SEATUC Symposium

ASTM D638, Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics, West Conshocken, PA:ASTM; 2014.

ASTM D5045, Standard Test Methods for Plane-Strain Fracture Toughness and Strain Energy Release Rate of Plastic Materials, West Conshocken, PA: ASTM, 2014.

Anderson T. L., Fracture Mechanics Fundamentals and Applications second edition book, 1994

Ayatollahi M. R., Saboori B., A new fixture for fracture tests under mixed mode I/III loading, *European Journal of Mechanics A/Solids*, vol.51, pp. 67-76, 2014.

Kanchanomai C., Rattananon S., Effect of Loading Rate and Thickness of Thermoset Epoxy Resin, *Journal of Applied Polymer Science*, 2008.

PHOTOS AND INFORMATION



Attasit Weingkhum received the B.E. (2015) in Manufacturing Engineering from Suranaree University of Technology (Thailand). He is studying master's degree in Mechanical and Process System Engineering at Suranaree University of Technology.



Piyamon Poapongsakorn received the B.E. (2002) in Industrial Engineering from Kasetsart University (Thailand), M.Sc. (2006) in Mechanical Engineering from Leibniz University of Hannover (Germany), and Ph.D. (2012) in Mechanical Engineering from Thammasat University (Thailand). Now she is a lecturer at School of Manufacturing Engineering, Suranaree University of Technology. Her current interests include failure of engineering materials, fracture mechanics, and fatigue of materials.

ประวัติผู้เขียน

นายอรรถสิทธิ์ เวียงคำ เกิดเมื่อวันที่ 15 มิถุนายน พ.ศ. 2536 เกิด ณ อำเภอเมืองสุรินทร์ จังหวัดสุรินทร์ เริ่มการศึกษาในระดับประถมศึกษาชั้นปีที่ 1-6 ณ โรงเรียนหนองโคงสุรวิทยาคม จังหวัดสุรินทร์ ระดับมัธยมศึกษาปีที่ 1-6 ณ โรงเรียนสุรวิทยาคาร จังหวัดสุรินทร์และสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี ณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต (เกียรตินิยมอันดับ 1) เมื่อปีพ.ศ. 2558 จากนั้นได้ศึกษาต่อระดับวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิตสาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกลและระบบกระบวนการ ณ สถาบันการศึกษาเดิม

ประสบการณ์การทำงาน

- สหกิจศึกษาในตำแหน่งผู้ช่วยวิศวกร ณ บริษัท บางกอกแปซิฟิกสตีล จำกัด จังหวัดสมุทรปราการ (ระยะเวลาทั้งสิ้น 4 เดือน)
- ปฏิบัติงานตำแหน่งผู้ช่วยสอนและวิจัย สาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา (ระยะเวลา 2 ปี พ.ศ.2559-2561)

นอกจากนี้ผู้วิจัยยังได้นำความรู้ ความเข้าใจในด้านของกลศาสตร์การแตกหักไปนำเสนอผลงานทางวิชาการในหัวข้อ Effect of loading rate on mixed-mode I/III fracture toughness of epoxy resin ในการสัมมนาวิชาการ South East Asian Technical University Consortium หรือ SEATUC ครั้งที่ 11 เมื่อ 13-14 มีนาคม 2560 ณ นคร โฮจิมินห์ สาธารณรัฐสังคมนิยมเวียดนาม รายละเอียดดังแสดงในภาคผนวก ข.