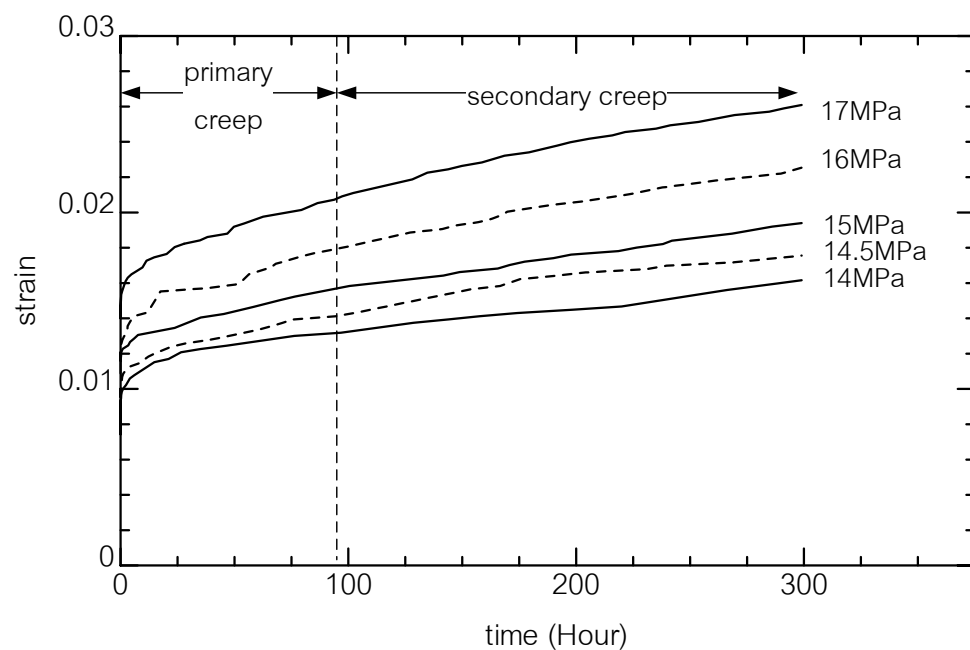


บทที่ 4

ผลและการวิเคราะห์

4.1 การคืบ

ผลการศึกษาการทดสอบการคืบ แรงที่ใช้ในการดึงและระยะที่ยืดออก จะถูกใช้ในการคำนวณค่าของความเค้น และความเครียด โดยแสดงในรูปความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดและเวลา กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดและเวลา ที่ความเค้นร้อยละ 70-85 ของความเค้นคราก (14-17 MPa) ได้แสดงในภาพที่ 4.1



ภาพที่ 4.1

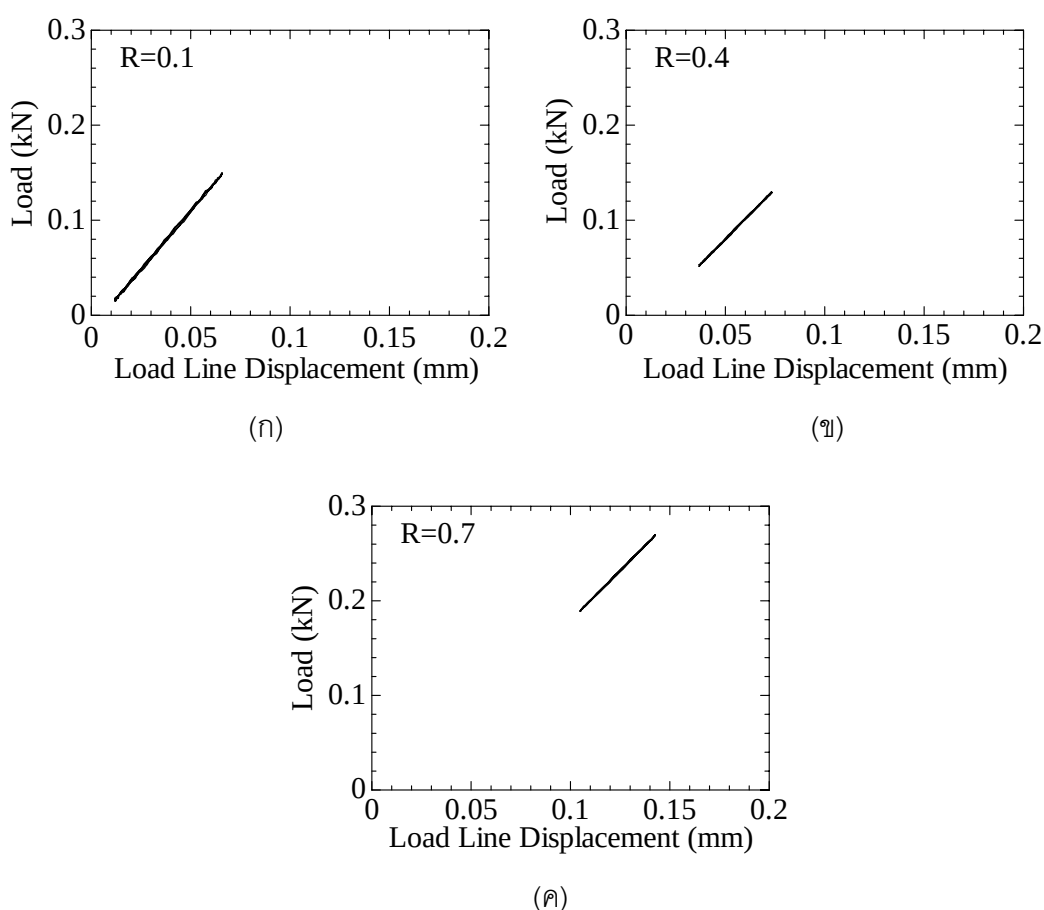
ความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดคืบกับเวลา ของอิพอกซีเรซิน

จากภาพที่ 4.1 จะเห็นได้ว่าความเค้นที่สูงขึ้นทำให้ความเครียดเพิ่มขึ้นตามไปด้วย ผลการศึกษาทำให้ทราบพฤติกรรมการคืบของอิพอกซีเรซิน สองช่วงคือการคืบปฐมภูมิกับการคืบทุติยภูมิ การคืบปฐมภูมิความเครียดมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว กราฟจะมีความชันสูงและความเครียดจะเพิ่มขึ้น โดยมีอัตราความเครียดลดลง เมื่อเข้าสู่การคืบทุติยภูมิความชันของกราฟจะคงที่มีการเกิดดิสโลเคชันในเนื้อวัสดุจากการคืบปฐมภูมิมากแล้ว การเกิดดิสโลเคชันใหม่จึงเกิดได้ยากขึ้น จำเป็นต้องใช้เวลามากขึ้นในการเกิดดิสโลเคชันใหม่ อัตราความเครียดจึงต่ำและคงที่

ผลการศึกษานำไปหาเลขชี้กำลังการคืบ ได้เลขชี้กำลังการคืบปฐมภูมิ 6.05 และเลขชี้กำลังการคืบทุติยภูมิ 2.52 แสดงให้เห็นว่าในการใช้งานที่อุณหภูมิห้อง อิพอกซีเรซินจะเกิดการคืบ เนื่องจากมีอุณหภูมิการเปลี่ยนจากสถานะคล้ายแก้วต่ำ

4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างภาระกับการเปลี่ยนแปลงระยะทางตามแนวแรง

จากการศึกษาการขยายตัวของรอยร้าวล้าพบว่า ความสัมพันธ์ระหว่างภาระกับการเปลี่ยนแปลงระยะทางตามแนวแรงเป็นเส้นตรงทั้งสามอัตราส่วนภาระตามภาพที่ 4.2 การปิดตัวของผิวรอยร้าว (crack closure) จะทำให้เกิดการเปลี่ยนของ เส้นกราฟระหว่างภาระกับการเปลี่ยนแปลงระยะทางตามแนวแรงที่จะหักลงมา ณ ตำแหน่งที่ผิวรอยร้าวปิดลง แต่อย่างไรก็ตาม ไม่พบการปิดตัวของผิวรอยร้าวตามภาพที่ 4.2 ผลการศึกษาแสดงว่าไม่เกิดการปิดตัวของผิวรอยร้าวขึ้น ผลการศึกษาแสดงว่าสามารถใช้ค่าตัวประกอบความเข้มข้นของความเค้นได้



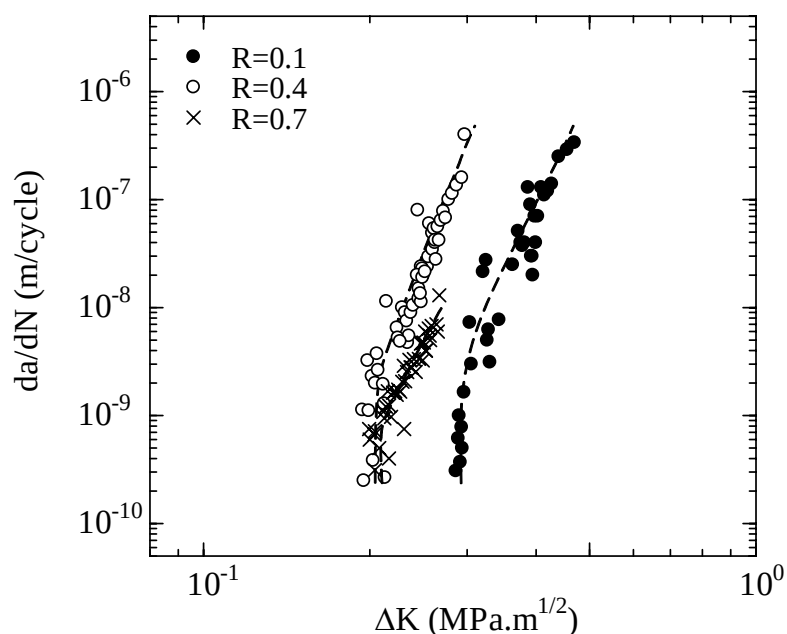
ภาพที่ 4.2

ความสัมพันธ์ระหว่างภาระกับการเปลี่ยนแปลงระยะทางตามแนวแรง

(ก) อัตราส่วนความเค้น 0.1 (ข) อัตราส่วนความเค้น 0.4 (ค) อัตราส่วนความเค้น 0.7

4.3 อัตราการขยายตัวของรอยร้าวล้า

4.3.1 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าพิสัยตัวประกอบความเข้มข้นของความเค้น (ΔK) เทียบกับอัตราการขยายตัวของรอยร้าวล้า (da/dN)



ภาพที่ 4.3

ความสัมพันธ์ระหว่าง ΔK กับ da/dN

ภาพที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าพิสัยตัวประกอบความเข้มข้นของความเค้นกับ อัตราการขยายตัวของรอยร้าวต่อรอบ พบว่า ค่าพิสัยความเข้มข้นตัวประกอบความเค้นที่ค่า อัตราส่วนความเค้นเป็น 0.1 มีค่ามากกว่าที่อัตราส่วนความเค้นเป็น 0.4 และ 0.7 โดยอัตราการ ขยายตัวของรอยร้าวที่อัตราส่วนความเค้น 0.1 และ 0.4 จะเพิ่มขึ้นจาก 10^{-10} ถึง 10^{-7} m/cycle แต่ ที่อัตราส่วนความเค้น 0.7 อัตราการขยายตัวของรอยร้าวมีค่าไม่เกิน 10^{-8} m/cycle เนื่องจากค่า พิสัยตัวประกอบความเข้มข้นของความเค้นเข้าใกล้ค่าวิกฤตจึงเกิดการแตกหักก่อนที่จะขยายตัว ด้วยอัตราที่สูงกว่า 10^{-8} m/cycle

อัตราส่วนความเค้น 0.4 กราฟเลื่อนไปทางซ้ายจากอัตราส่วนความเค้น 0.1 เพราะผลกระทบของค่าอัตราส่วนความเค้นที่เพิ่มขึ้น แต่ที่อัตราส่วนความเค้น 0.7 กราฟในช่วงอัตราการขยายตัวของรอยร้าวต่ำมีค่าใกล้เคียงกับที่อัตราส่วนความเค้น 0.4 แต่พอเลยขึ้นมาสู่ช่วง Paris กราฟกลับแยกตัวออกมาอยู่ทางขวาแสดงถึงผลกระทบของพฤติกรรมที่ไม่ได้ขึ้นอยู่กับจำนวนรอบ

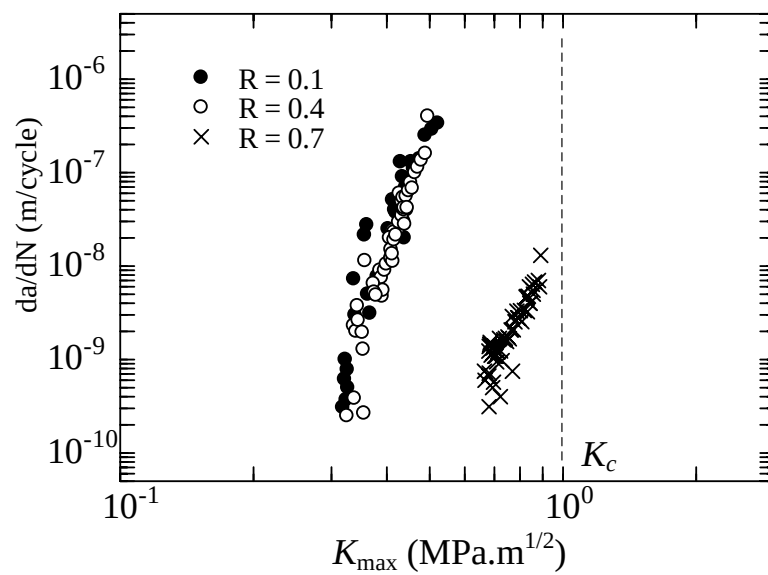
กราฟประกอบด้วยช่วงแรกคือ ช่วงที่รอยร้าวขยายตัวไปอย่างช้า ๆ (threshold) และช่วงที่ขยายตัวไปแบบเสถียร (stable crack growth) เป็นเส้นตรงเรียกว่าช่วง Paris ซึ่งสามารถหาความสัมพันธ์เป็นตามสมการ (4.1)

$$da/dN = C_1(\Delta K)^{m_1} \quad (4.1)$$

ค่า C_1 และ m_1 ของทุกอัตราส่วนความเค้นแสดงในตารางที่ 4.1

ผลกระทบของค่าอัตราส่วนความเค้นนี้ไม่ได้เกิดจากการเกิดการปิดตัวของผิวรอยร้าว (crack closure) (ตามหัวข้อ 4.2) ผลกระทบของค่าอัตราส่วนความเค้นอาจจะมาจากปัจจัยอื่น ค่าพิสัยตัวประกอบความเข้มข้นของความเค้น มีความเหมาะสมในการใช้งานกับการครากขนาดเล็ก (small scale yielding) ขนาดของบริเวณพลาสติกที่ปลายรอยร้าวที่คำนวณได้ก่อนที่รอยร้าวจะขยายตัวอย่างรวดเร็ว (รอยร้าวยาวประมาณ 23 มิลลิเมตร) อยู่ที่ประมาณ 0.35 - 0.43 มิลลิเมตร ของกรณีอัตราส่วนความเค้น 0.1 และ 0.4 ขณะที่บริเวณพลาสติกที่อัตราส่วนความเค้น 0.7 ที่คำนวณได้มีค่า 1.39 มิลลิเมตร ขนาดของบริเวณพลาสติกทุกกรณีเล็กกว่าความยาวของรอยร้าว จึงสรุปได้ว่า การปิดของผิวรอยร้าวและขนาดของบริเวณพลาสติก ไม่ใช่สาเหตุของผลกระทบของค่าอัตราส่วนความเค้น

เนื่องจากค่าตัวประกอบความเข้มข้นของความเค้นสูงสุด (K_{max}) เป็นพารามิเตอร์ที่มีความเหมาะสมที่ใช้อธิบายอัตราการขยายตัวของรอยร้าว (da/dN) ในสภาพการเปลี่ยนรูปแบบพลาสติกขนาดเล็ก หรือสภาพการแตกหักแบบเปราะ จึงนำค่าตัวประกอบความเข้มข้นของความเค้นสูงสุดมาใช้อธิบายอัตราการขยายตัวของรอยร้าวได้ ในภาพที่ 4.4



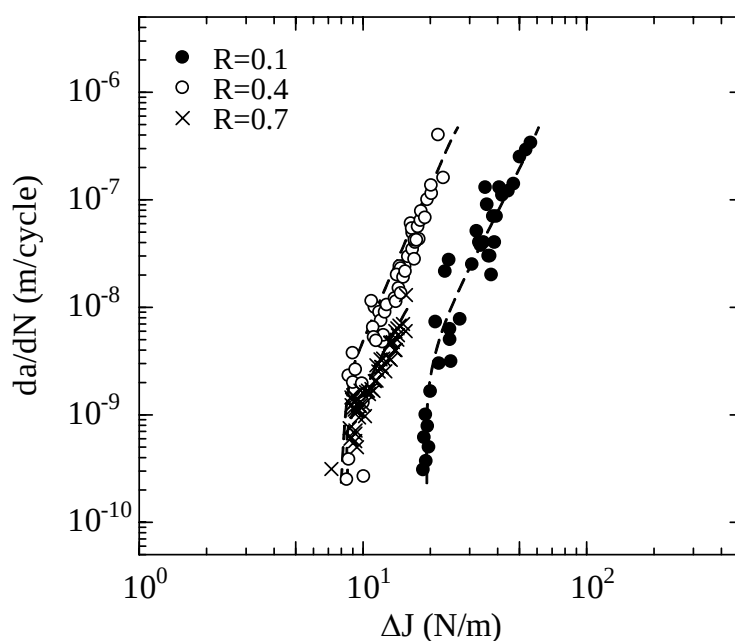
ภาพที่ 4.4

ความสัมพันธ์ระหว่าง K_{max} กับ da/dN

จากภาพที่ 4.4 พบว่าที่อัตราส่วนความเค้น 0.1 และ 0.4 ค่าตัวประกอบความเข้มข้นของความเค้นสูงสุดมีค่าใกล้เคียงกัน ที่อัตราส่วนความเค้น 0.1-0.4 สามารถหาอัตราการขยายตัวของรอยร้าวได้จากค่าตัวประกอบความเข้มข้นของความเค้นสูงสุด ค่าตัวประกอบความเข้มข้นของความเค้นสูงสุดจึงสามารถอธิบายพฤติกรรมการขยายตัวของรอยร้าวได้เป็นอย่างดี แต่ที่อัตราส่วนความเค้น 0.7 พบว่าวัสดุมีพฤติกรรมความเสียหายรูปแบบอื่นเกิดขึ้นด้วย และค่าอัตราการขยายตัวของรอยร้าวล้ามีค่าต่ำกว่าที่อัตราส่วนความเค้น 0.1 และ 0.4 ทำให้กราฟสั้นกว่ากราฟของอัตราส่วนความเค้น 0.1 และ 0.4

4.3.2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าพิสัยอัตราการเปลี่ยนแปลงพลังงานความเครียด (ΔJ) เทียบกับอัตราการขยายตัวของรอยร้าว (da/dN)

อิพอกซีเรซิน มีพฤติกรรมเป็นแบบยืดหยุ่นไม่เป็นเชิงเส้น (nonlinear-elastic) ความไม่เป็นเชิงเส้นอาจจะเพิ่มขึ้นตามค่าอัตราส่วนความเค้นที่เพิ่มขึ้น ค่าพิสัยอัตราการเปลี่ยนแปลงพลังงานความเครียดมีความเหมาะสมมากกว่าในการใช้อธิบายอัตราการขยายตัวของรอยร้าวในสภาพยืดหยุ่นไม่เป็นเชิงเส้น ผลกระทบของค่าอัตราส่วนความเค้นอาจจะมาจากข้อจำกัดของการใช้พารามิเตอร์กลศาสตร์การแตกหักแบบยืดหยุ่นเชิงเส้น (ΔK และ K_{max}) ซึ่งเหมาะสมกับในสภาพที่เป็นแบบยืดหยุ่นเชิงเส้น ดังนั้นเพื่อตรวจสอบผลกระทบของค่าอัตราส่วนความเค้นว่าเกิดจากพฤติกรรมเป็นแบบยืดหยุ่นไม่เป็นเชิงเส้นหรือไม่ จึงหาความสัมพันธ์ระหว่าง พิสัยอัตราการเปลี่ยนแปลงพลังงานความเครียดกับอัตราการขยายตัวของรอยร้าว



ภาพที่ 4.5

ความสัมพันธ์ระหว่าง ΔJ กับ da/dN

ภาพที่ 4.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าพิสัยอัตราการเปลี่ยนแปลงพลังงาน ความเครียดกับอัตราการขยายตัวของรอยร้าว จากกราฟที่ได้พบว่าผลกระทบของค่าอัตราส่วนความเค้นส่งผลแบบเดียวกับกรณีที่ใช้ค่าพิสัยตัวประกอบความเข้มข้นของความเค้นในภาพที่ 4.3 จากคำอธิบายข้างต้นแสดงให้เห็นว่าพฤติกรรมการเปลี่ยนรูปยืดหยุ่นไม่เป็นเชิงเส้นนี้ไม่ใช่สาเหตุของผลกระทบของค่าอัตราส่วนความเค้น ซึ่งกราฟที่ได้ในช่วง Paris สามารถหาความสัมพันธ์ได้เป็นสมการ (4.2)

$$da/dN = C_2(\Delta J)^{m_2} \quad (4.2)$$

ค่า C_2 และ m_2 ของทุกอัตราส่วนความเค้นแสดงในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1

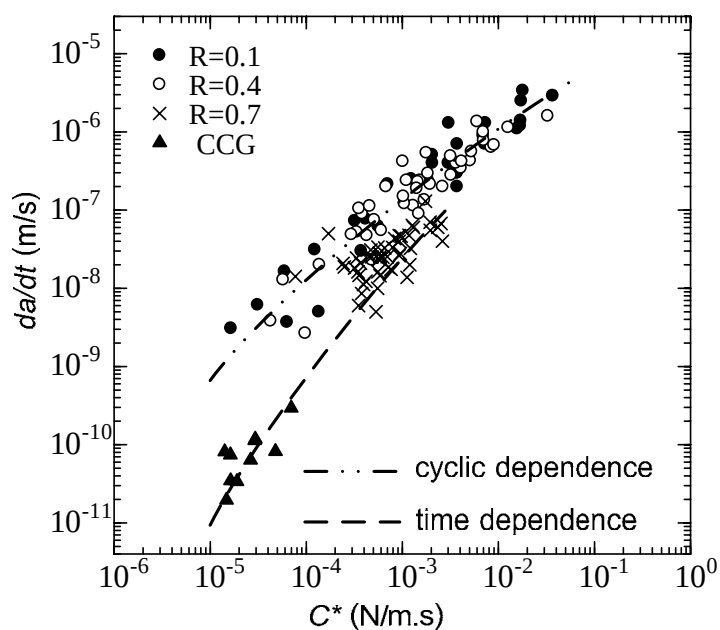
ค่าคงที่ของพฤติกรรมการขยายตัวของรอยร้าวลำของอิพอกซีเรซิน

R	ΔK_{th} (MPa.m ^{1/2})	ΔJ_{th} (N/m)	ΔK_{crit} (MPa.m ^{1/2})	ΔJ_{crit} (N/m)	$da/dN = C_1 \Delta K^{m_1}$		$da/dN = C_2 \Delta J^{m_2}$	
					C_1	m_1	C_2	m_2
0.1	0.30	20.04	0.46	56.34	1.5×10^{-3}	10.91	3.90×10^{-15}	4.55
0.4	0.20	9.05	0.29	21.72	1.22	12.86	4.67×10^{-14}	4.84
0.7	0.20	8.89	0.26	15.56	6.50×10^{-4}	8.57	6.44×10^{-14}	3.37

จากผลที่ผ่านมา การปิดตัวของผิวรอยร้าว ขนาดของบริเวณพลาสติกและพฤติกรรมยืดหยุ่นไม่เป็นเชิงเส้นของอิพอกซีเรซินไม่ใช่ต้นเหตุของผลกระทบของค่าอัตราส่วนความเค้น ดังนั้นเป็นไปได้ว่าอาจเกิดจากพฤติกรรมที่ขึ้นอยู่กับเวลา ซึ่งพารามิเตอร์กลศาสตร์การแตกหักแบบขึ้นอยู่กับเวลา มีความสามารถที่จะแยกข้อมูลที่เป็นพฤติกรรมที่ขึ้นอยู่กับจำนวนรอบ ออกไปจากพฤติกรรมที่ขึ้นอยู่กับเวลาได้ ในขั้นต่อไปจึงจะใช้พารามิเตอร์อัตราการเปลี่ยนแปลงกำลังมาอธิบายอัตราการขยายตัวของรอยร้าว

4.3.3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงกำลัง (C^*) เทียบกับอัตราการขยายตัวของรอยร้าว (da/dt)

อีพอกซีเรซิน เป็นพอลิเมอร์ที่สามารถเกิดการคืบได้ที่อุณหภูมิห้อง อาจเกิดการเปลี่ยนแปลงขนาดที่ขึ้นอยู่กับเวลาระหว่างการขยายตัวของรอยร้าว อัตราการเปลี่ยนแปลงกำลังเป็นพารามิเตอร์ที่มีความเหมาะสมที่จะใช้อธิบายอัตราการขยายตัวของรอยร้าว (da/dt)



ภาพที่ 4.6

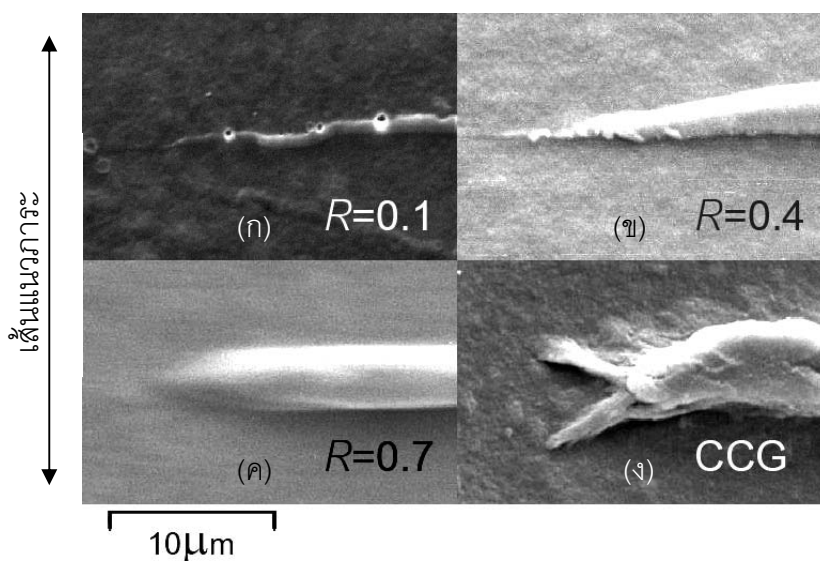
ความสัมพันธ์ระหว่าง C^* กับ da/dt

ในภาพที่ 4.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงกำลังกับอัตราการขยายตัวของรอยร้าวที่อัตราส่วนความเค้น 0.1 ,0.4 ,0.7 และการขยายตัวของรอยร้าวคืบ (CCG) พบว่ากราฟที่ส่วนความเค้น 0.1 และ 0.4 ค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงกำลังกระจายตัวอยู่ในช่วงแถบเดียวกัน เป็นกลไกที่ขึ้นอยู่กับการขึ้นของรอบเด้นซ์ และที่อัตราส่วนความเค้น 0.7 ค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงกำลังกระจายอยู่ทางด้านขวาของแถบ ซึ่งบอกถึงกลไกที่เกิดขึ้นว่าเป็นพฤติกรรมที่ขึ้นกับเวลาเด่นกว่า นอกจากนี้ แม้ผลของ CCG จะบ่งบอกว่า รอยร้าวขยายตัวอยู่ด้วยอัตราที่ต่ำกว่าถึงสองอันดับ แต่ก็มีแนวโน้มของเส้นกราฟที่ต่อเนื่องกับแนวของเส้นกราฟที่อัตราส่วนความเค้น 0.7 ซึ่งสอดคล้องกับข้อสันนิษฐานว่าที่อัตราส่วนความเค้น 0.7 รอยร้าวขยายตัวด้วยกลไกที่ขึ้นอยู่กับการขึ้นของรอบเด้นซ์ ในภาพที่ 4.6 จึงใช้เส้นประแสดงแนวโน้มของกลไกที่ขึ้นอยู่กับการขึ้นของรอบเด้นซ์ และกลไกที่ขึ้นอยู่กับการขึ้นของเวลาเพื่อให้เห็นความแตกต่างได้อย่างชัดเจน

โดยทั่วไปค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงกำลังใช้อธิบาย CCG ภายใต้สภาพภาระสถิตย์ แต่ในงานวิจัยนี้กลับนำมาใช้อธิบายการขยายตัวของรอยร้าวตามจำนวนรอบที่ขึ้นกับเวลา และผลที่ได้เปรียบเทียบระหว่าง FCG กับ CCG ให้ผลที่สอดคล้องกัน แสดงว่าค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงกำลังมีความเหมาะสมที่จะใช้อธิบาย การขยายตัวของรอยร้าวที่ขึ้นกับเวลา

4.3.4 พื้นผิวการแตกหัก

จากการศึกษารอยร้าวโดยใช้เทคนิคแผ่นฟิล์มสำเนา (replication technique) ที่อัตราส่วนความเค้น 0.1, 0.4, 0.7 และ CCG ($K_{max} = 0.45, 0.45, 0.72$ และ $0.75 \text{ MPam}^{1/2}$ ตามลำดับ) นำรอยร้าวไปถ่ายด้วยกล้องกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกนนิ่งในภาพที่ 4.7



ภาพที่ 4.7

ปลายรอยร้าวจากแผ่นฟิล์มสำเนา (replica film)

(ก) $R = 0.1 \Delta K = 0.45 \text{ MPam}^{1/2}$ (ข) $R = 0.4 \Delta K = 0.45 \text{ MPam}^{1/2}$

(ค) $R = 0.7 \Delta K = 0.72 \text{ MPam}^{1/2}$ (ง) CCG $K = 0.75 \text{ MPam}^{1/2}$

พบว่าที่ปลายของรอยร้าวที่อัตราส่วนความเค้น 0.1 และ 0.4 มีลักษณะเดียวกัน คือ รัศมีของปลายรอยร้าว (crack tip radius) มีค่าน้อยกว่าที่อัตราส่วนความเค้น 0.7 และ รัศมีของปลายรอยร้าวที่อัตราส่วนความเค้น 0.7 มีค่าน้อยกว่า รัศมีที่ปลายรอยร้าวของ CCG การขยายตัวของร้าวคือเป็นแบบที่ไม่ต่อเนื่อง แต่เป็นแบบขยายตัวแล้วหยุดแล้วขยายตัวต่อไปเรียกว่าการขยายตัวของรอยร้าวแบบเป็นขั้น (stepwise) รอยร้าวในตอนแรกของ CCG มีความแหลมคม (sharp crack) เมื่อเวลาผ่านไปรอยร้าวจะมีลักษณะอ้วนทู่มากขึ้น (crack blunting) จนกระทั่งเกิดการเปลี่ยนแปลงพื้นจากช่วงพลาสติก รอยร้าวจะขยับตัวออกไปและกลายเป็นรอยร้าวที่แหลมคมอีกครั้ง

เมื่อความเค้นที่ปลายรอยร้าวไปถึงจุดคราก วัสดุจะเกิดการเปลี่ยนรูปพลาสติกขึ้น โดยเฉพาะกับวัสดุอย่างพอลิเมอร์มักจะเกิดการเปลี่ยนรูปพลาสติกขนาดใหญ่ การเปลี่ยนรูปพลาสติกที่ปลายรอยร้าวทำให้รัศมีของปลายรอยร้าวมีค่าเพิ่มขึ้น สภาพนี้ความเค้นที่ปลายรอยร้าวจะลดลงและมีค่าไม่ถึงอนันต์ ทำให้ความต้านทานต่อการขยายตัวของรอยร้าวเพิ่มขึ้น ทั้งของ FCG และ CCG ที่อัตราส่วนความเค้น 0.7 และ CCG เป็นกระบวนการที่ขึ้นกับเวลา รัศมีที่ปลายรอยร้าวของสองกรณีนี้จึงมากกว่ากรณีที่อัตราส่วนความเค้น 0.1 และ 0.4 ซึ่งสอดคล้องกับผลการขยายตัวของรอยร้าวว่า ความต้านทานการขยายตัวของรอยร้าวล้าที่อัตราส่วนความเค้น 0.7 มีค่ามากกว่าที่อัตราส่วนความเค้น 0.1 และ 0.4 รัศมีของปลายรอยร้าววัดจากที่ปลายรอยร้าวเข้ามา 5 ไมครอนด้วยซอฟต์แวร์ Image pro express 5 แสดงในตารางที่ 4.2

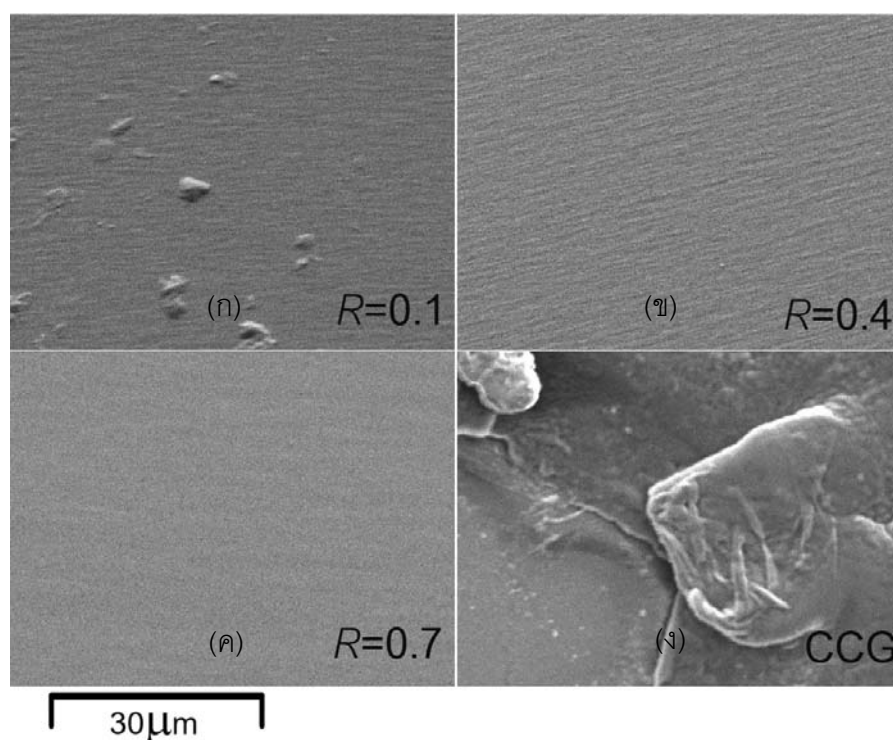
ตารางที่ 4.2

รัศมีของปลายรอยร้าวระหว่างการขยายตัวของรอยร้าวของอีพอกซีเรซิน

R	Crack tip radius ($2r$) (μm)
0.1	0.812
0.4	0.759
0.7	3.797
CCG	4.873

ที่ปลายรอยร้าวของ CCG ยังพบหลักฐานของการเกิด การร้าวจากแรงเฉือน (shear craze) ที่ปลายรอยร้าวแยกออกเป็นสองแฉก การร้าวจากแรงเฉือนเป็นกลไกที่เกิดขึ้นเมื่อรอยร้าวอ่อนขึ้นทำให้รัศมีที่ปลายรอยร้าวเพิ่มขึ้น เนื้อวัสดุในส่วนที่อยู่ตามแนวโค้งของรัศมีรอยร้าวเกิดความเค้นกระทำเป็น ความเค้นเฉือนผสมกับความเค้นตึงฉากซึ่งความเค้นตึงฉากมีค่าน้อยกว่าความเค้นตึงฉากในกรณีที่เป็นรอยร้าวที่แหลมคม ความเค้นเฉือนมากที่สุดทำให้วัสดุเกิดการแตกขึ้นที่ปลายรอยร้าวไปตามแนวแรงเฉือนและกลายเป็นการร้าวจากแรงเฉือนในที่สุด มักพบการร้าวจากแรงเฉือนในพอลิเมอร์เทอร์โมพลาสติกเช่น พอลิเอทิลีน (PE) [35] ซึ่งพบปรากฏการณ์นี้ในการขยายตัวของรอยร้าวคืออีพอกซีเรซินด้วย

ภาพ 4.8 เป็นพื้นผิวการแตกหักที่ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกนนิ่ง โดยรอยร้าวขยายตัวจากด้านซ้ายของรูป ลักษณะการแตกหักของ FCG ที่ทุกอัตราส่วนความเค้นเป็นแบบผิวเรียบ บ่งบอกถึงรอยร้าวที่ขยายตัวออกไปอย่างต่อเนื่องส่งผลให้ผิวเรียบ แต่ลักษณะผิวของการแตกหักของ CCG เป็นผิวที่ไม่เรียบตามลักษณะของปลายรอยร้าวที่มีการร้าวจากแรงเฉือน

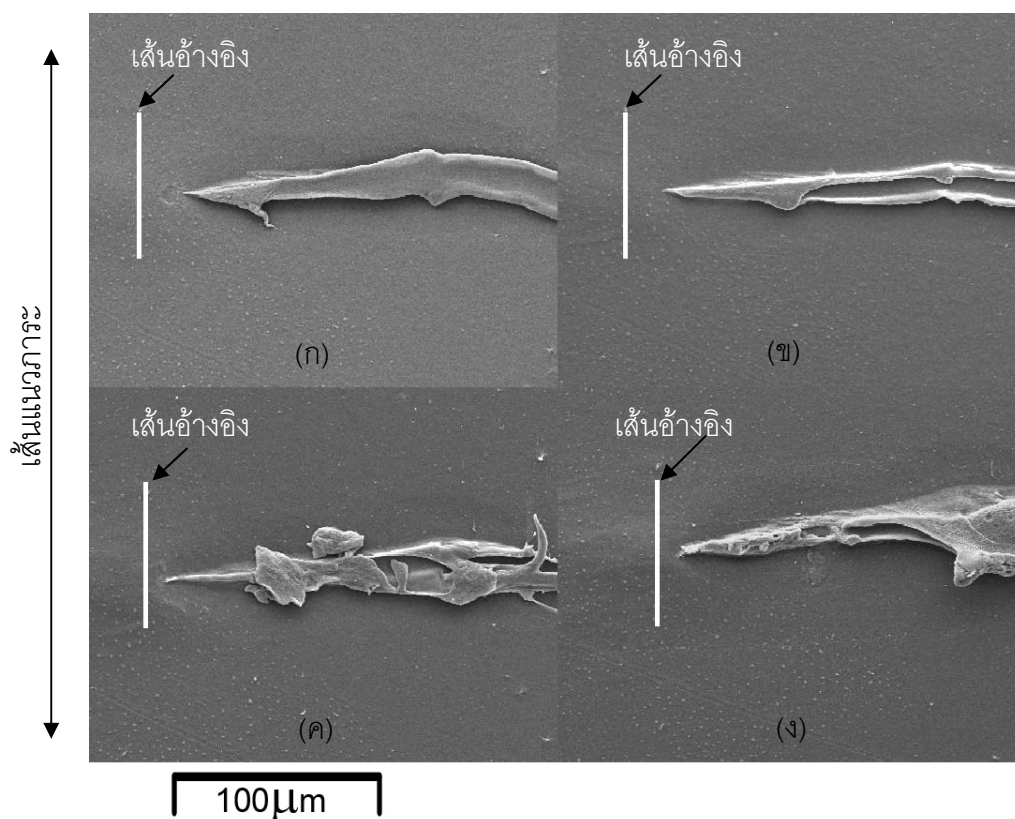


ภาพที่ 4.8

พื้นผิวการแตกหัก (รอยร้าวขยายตัวจากขวาไปซ้าย)

(ก) $R = 0.1$ (ข) $R = 0.4$ (ค) $R = 0.7$ (ง) CCG

กลไกการขยายตัวของรอยร้าวแบบเป็นขั้นของการขยายตัวของรอยร้าวคืบแสดงด้วยภาพถ่ายปลายรอยร้าวจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกนนิ่งในภาพที่ 4.9 เมื่อรอยร้าวยาวขึ้นก็จะขยับเข้ามาใกล้เส้นอ้างอิงเพิ่มขึ้น



ภาพที่ 4.9

ขั้นตอนการขยายตัวของรอยร้าวคืบ (CCG)

- (ก) รอยร้าวสะสมการเปลี่ยนรูปแบบพลาสติกเอาไว้จนกระทั่งพร้อมที่จะขยายตัว มีวัดมีของปลายรอยร้าวมาก ($K = 0.65 \text{ MPam}^{1/2}$)
- (ข) เวลาผ่านไปรอยร้าวในภาพ (ก) ขยายตัวกลายเป็นรอยร้าวที่แหลมคม (sharp crack) ($K = 0.75 \text{ MPam}^{1/2}$)
- (ค) รอยร้าวขยายตัวไปจากภาพ (ข) เป็นรอยร้าวที่แหลมคม ($K = 0.75 \text{ MPam}^{1/2}$)
- (ง) รอยร้าวสะสมการเปลี่ยนรูปแบบพลาสติกเอาไว้จนวัดมีของปลายรอยร้าวมากขึ้นและพร้อมที่จะขยายตัว รอยร้าวในภาพนี้ยังยาวเท่ากับของ ภาพ (ค) ($K = 0.75 \text{ MPam}^{1/2}$)