

บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

วัสดุในทางวิศวกรรมทั่วไปจะมีสามประเภทคือ โลหะ เซรามิกส์ และพอลิเมอร์ ซึ่งมีคุณสมบัติแตกต่างกันไป โลหะมีความเหนียวและความแข็งแรง ใช้งานได้กว้าง แต่หลอมขึ้นรูปทรงได้ซับซ้อนได้ยาก เซรามิกส์มีความแข็งและทนอุณหภูมิสูง ๆ ได้ดี แต่มีความเปราะมาก พอลิเมอร์สามารถขึ้นรูปทรงซับซ้อนได้ง่าย ราคาไม่แพง น้ำหนักเบา แต่ไม่ทนความร้อน ในปัจจุบันพอลิเมอร์เข้ามามีบทบาทสำคัญในวงการอุตสาหกรรมเพราะข้อดีเรื่องน้ำหนักเบา และสามารถขึ้นรูปทรงซับซ้อนได้ดี

2.1 วัสดุพอลิเมอร์

2.1.1 ความหมายและประเภทของพอลิเมอร์

คำว่า “พอลิเมอร์” (polymer) มาจากภาษากรีก คือ poly แปลว่า มาก และ mer แปลว่า ส่วนหรือหน่วย หมายถึง สารที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง ซึ่งประกอบด้วยหน่วยซ้ำ ๆ กันที่เรียกว่า “mer” จำนวนมากมาเชื่อมต่อกันด้วยพันธะโควาเลนต์ เมื่อรวมกันจะแปลความหมายได้ว่าหลายส่วน [21] พอลิเมอร์ส่วนมากประกอบด้วยสารอินทรีย์ (คาร์บอนเป็นองค์ประกอบ) [22] ที่มีโมเลกุลเป็นโซ่ยาว ๆ หรือเป็นโครงข่าย โดยโครงสร้างแล้วพอลิเมอร์ส่วนใหญ่ไม่มีรูปร่างผลึก แต่บางชนิดประกอบด้วยของผสมของส่วนที่มีรูปร่างผลึกและส่วนที่ไม่มีรูปร่างผลึก ความแข็งแรงและความอ่อนเหนียวของวัสดุพอลิเมอร์มีความหลากหลายอย่างมากมาย ลักษณะโครงสร้างภายในพอลิเมอร์เป็นสารอินทรีย์ทำให้เป็นฉนวนทางไฟฟ้าและความร้อนที่ดี มีความหนาแน่นและจุดหลอมเหลวค่อนข้างต่ำตามธรรมชาติ

พอลิเมอร์แบ่งออกเป็น 2 ประเภทใหญ่ ๆ คือ กลุ่มพลาสติก (plastics) และ กลุ่มอีลาสโตเมอร์ (elastomers) หรือพวกรยาง (rubbers) พลาสติกเป็นวัสดุสังเคราะห์กลุ่มใหญ่และอาจมีหมู่ธาตุที่เป็นองค์ประกอบแตกต่างกัน ซึ่งอาจทำให้รวมตัวกันหรือเข้าแบบให้มีรูปร่างตามต้องการ พลาสติกมีหลายแบบ เช่น พอลิเอทิลีน และไนลอน เป็นต้น ส่วนอีลาสโตเมอร์หรือยางเป็นพอลิเมอร์ที่มีลักษณะยืดหยุ่น (elastical) ได้มากเมื่อออกแรงดึงและจะกลับมาอยู่ในสภาพเดิมเมื่อปล่อยแรงดึง

พลาสติกเป็นวัสดุวิศวกรรมที่สำคัญหลายประการด้วยกัน เพราะมีสมบัติกว้างขวาง และมีราคาค่อนข้างต่ำ พลาสติกยังมีข้อได้เปรียบอีกหลายอย่าง ซึ่งเมื่อวิศวกรไปใช้ผลิตชิ้นส่วนทางวิศวกรรม สามารถลดขั้นตอนการทำงานโดยทำให้ง่ายต่อการประกอบ ลดน้ำหนัก ลดเสียงดัง และบางกรณีช่วยลดเรื่องของการหล่อขึ้น บางชิ้นส่วนพลาสติกยังมีประโยชน์อีกมากมายต่อการออกแบบใช้งานทางไฟฟ้า เพราะพลาสติกเป็นฉนวนที่ดี จึงสามารถใช้ทำตัวเชื่อมต่อ (connectors) สวิตช์ รีเลย์ ทำชิ้นส่วนของทีวี ทำแผงวงจรไฟฟ้า และทำชิ้นส่วนของเครื่องคอมพิวเตอร์ การใช้งานพลาสติกที่หลากหลายส่งผลให้ปริมาณการใช้พลาสติกในทางอุตสาหกรรมได้เพิ่มอย่างมากมาในช่วงหลายปีที่ผ่านมา ตัวอย่างที่เห็นได้ชัดจนว่าอุตสาหกรรมใช้พลาสติกมากขึ้น คืออุตสาหกรรมผลิตภัณฑ์ของเล่น ของใช้ในบ้าน เป็นต้น [23]

พลาสติกแบ่งออกเป็น 2 ประเภท ตามพันธะเคมีที่ทำปฏิกิริยากันได้ออกมาเป็นโครงสร้าง และมีลักษณะเฉพาะเมื่อทำให้อุณหภูมิเพิ่มขึ้น คือ เทอร์โมพลาสติก (thermoplastic) และเทอร์โมเซตติงพลาสติก (thermosetting plastic) [22] เทอร์โมพลาสติกเป็นพลาสติกที่สามารถทำให้หลอมเหลวหรือเปลี่ยนรูปร่างได้ด้วยความร้อน และจะแข็งตัวเมื่อทำให้เย็น พลาสติกพวกนี้จึงสามารถถูกรีไซเคิลได้ตลอดโดยสมบัติไม่เปลี่ยนแปลง เทอร์โมพลาสติกโดยมากประกอบด้วยสายโซ่ของคาร์บอนแบบยาว (long chain carbon atoms) ที่เชื่อมกันด้วยพันธะโควาเลนต์ บางครั้งอาจมีธาตุไนโตรเจน ออกซิเจน หรือกำมะถันเข้าไปเกิดพันธะโควาเลนต์ในโมเลกุลและระหว่างโมเลกุลต่อโมเลกุลจะเกิดพันธะทุติยภูมิ (secondary bonds) กันอีกด้วย ในขณะที่เทอร์โมเซตติงพลาสติกหรือเทอร์โมเซต เป็นพลาสติกที่ไม่สามารถทำให้หลอมเหลวได้ด้วยความร้อน พลาสติกชนิดนี้จะคงรูปร่างถาวรด้วยการบ่ม ("set" หรือ "cured") ด้วยปฏิกิริยาเคมี หรือด้วยความร้อน เมื่อให้ความร้อนกับเทอร์โมเซตที่คงรูปร่างถาวรจะเกิดการสลายตัวหรือไหม้ได้ ดังนั้นจึงไม่สามารถรีไซเคิลพลาสติกชนิดนี้ เทอร์โมเซตส่วนใหญ่ประกอบด้วยคาร์บอนอะตอมที่เกิดพันธะโควาเลนต์เข้าด้วยกันเป็นโครงข่าย (network) เป็นของแข็ง บางครั้งในโครงข่ายนั้นจะมีอะตอมของธาตุไนโตรเจน ออกซิเจน กำมะถัน หรืออะตอมอื่นเข้าไปเกิดพันธะโควาเลนต์ร่วมด้วย

2.1.2 เทอร์โมเซตติงพลาสติก (thermosetting plastic)

เทอร์โมเซตติงพลาสติก เป็นพลาสติกที่เกิดพันธะโควาเลนต์เป็นโครงข่ายของโครงสร้างของโมเลกุล เทอร์โมเซตติงบางชนิดเกิดการเชื่อมขวาง (cross-linked) ด้วยความร้อนหรือด้วยความร้อนและความกดดัน ซึ่งจะแข็งตัวเมื่อเย็น นอกจากนี้อาจจะเกิดการเชื่อมขวางได้โดยปฏิกิริยาเคมีที่อุณหภูมิห้อง เทอร์โมเซตติงไม่สามารถหลอมเหลวด้วยความร้อนใหม่ได้เหมือนกับเทอร์โมพลาสติก ถือเป็นข้อเสียเปรียบของเทอร์โมเซตติงที่ไม่สามารถนำเศษพลาสติกที่เกิดขึ้นจากกระบวนการผลิตไปรีไซเคิลและนำไปใช้ใหม่ได้

เทอร์โมเซตติงพลาสติกมีข้อได้เปรียบสำหรับการใช้งานทางด้านวิศวกรรม ซึ่งสามารถพิจารณาจากสมบัติต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

1. มีความเสถียรต่อความร้อนสูง
2. มีความแข็งแรงสูง ไม่งอง่าย
3. มีความเสถียรเชิงมิติสูง
4. มีความทนทานต่อการเกิดคืบและการเปลี่ยนรูปภายใต้การใช้งาน
5. มีน้ำหนักเบา
6. มีสมบัติเป็นฉนวนไฟฟ้าและความร้อนที่ดี

เทอร์โมเซตติงพลาสติก ตามปกติจะใช้กระบวนการผลิตแบบอัดหรือแบบทรานเฟอร์โมลดิ้ง (transfer molding) อย่างไรก็ตามในบางกรณี เทอร์โมเซตติงสามารถใช้กระบวนการผลิตแบบการขึ้นรูปโดยการฉีด (injection molding) ซึ่งเทอร์โมเซตติงจะประกอบด้วยองค์ประกอบหลัก 2 ส่วน คือ

1. เรซินที่มีตัวบ่ม (curing agents) ที่ทำให้แข็งและพลาสติกไซเซอรที่ช่วยทำให้เกิดความเหนียวและยืดหยุ่น
2. ฟิลเลอร์ และ/หรือสารเสริมแรงซึ่งอาจเป็นสารอินทรีย์หรือสารอนินทรีย์ ได้แก่ ซีลีเนียม ไมก้า แก้ว และเซลลูโลส ตามธรรมชาติจะใช้เป็นวัสดุฟิลเลอร์

เนื่องจากเทอร์โมเซตติงเป็นพอลิเมอร์แบบอสัณฐาน (amorphous) ไม่สามารถหลอมเป็นของเหลวทำให้ไม่มีจุดหลอมเหลว (melting point temperature; T_m) แต่จะมีสมบัติทางความร้อนที่สำคัญและเป็นเอกลักษณ์ของพอลิเมอร์ คือ อุณหภูมิการเปลี่ยนจากสถานะคล้ายแก้ว (glass transition temperature; T_g) ซึ่งปรากฏการณ์นี้เกิดจากการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นกับสายโซ่โดยไม่เปลี่ยนสถานะ (พอลิเมอร์ยังคงอยู่ในสถานะของแข็ง) แต่เกี่ยวข้องกับการสั่นของส่วนสั้น ๆ ในสายโซ่ คือ ที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิการเปลี่ยนจากสถานะคล้ายแก้ว พอลิเมอร์ที่เป็นสายโซ่ยาวจะ

เกิดการเคลื่อนไหวส่วนต่าง ๆ ได้ยากมาก (เปรียบเหมือนถูกแช่แข็งไว้) จึงจัดเป็นของแข็งในสถานะคล้ายแก้ว (glassy state) ซึ่งค่อนข้างแข็งแต่เปราะ แต่มื่อเพิ่มอุณหภูมิสายโซ่จะได้รับพลังงานมากขึ้น จนถึงอุณหภูมิเฉพาะของพอลิเมอร์แต่ละชนิด ส่วนสั้น ๆ ของสายโซ่โดยเฉพาะบริเวณปลายโซ่ (chain end) จะรับพลังงานมากพอที่จะเคลื่อนไหวได้ แต่ไม่เคลื่อนที่ (คล้ายกับการสั่นของงูหางกระดิ่ง) พอลิเมอร์จึงยังคงอยู่ในสถานะของแข็ง หากเพิ่มอุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิการเปลี่ยนจากสถานะคล้ายแก้ว พอลิเมอร์จะรับพลังงานไปใช้ในการสั่นนี้เพิ่มขึ้นจนทำให้มีความยืดหยุ่นมากขึ้น จัดเป็นของแข็งสถานะคล้ายยาง (rubbery state) ซึ่งพอลิเมอร์ทุกชนิดจะแสดงอุณหภูมิการเปลี่ยนจากสถานะคล้ายแก้วทั้งหมด แต่บางชนิดอาจจะไม่สามารถตรวจวัดได้หากอุณหภูมิการเปลี่ยนจากสถานะคล้ายแก้วนี้เกิดที่อุณหภูมิที่สูงกว่าอุณหภูมิการสลายตัว (degradable temperature) ทั้งนี้เนื่องจากพอลิเมอร์จะสลายตัวเป็นสายสั้น ๆ หรือเกิดการเผาไหม้ก่อน

สมบัติทางกลของวัสดุมีความสำคัญมากต่อการนำวัสดุไปใช้งาน เนื่องจากการประยุกต์ใช้พลาสติกเป็นผลิตภัณฑ์ใดก็ตาม ผลิตภัณฑ์เหล่านั้นย่อมมีโอกาสรับแรงกระทำไม่มากนัก การที่ผู้ออกแบบทราบถึงสมบัติทางกลของพลาสติก จะช่วยให้ออกแบบผลิตภัณฑ์ได้อย่างถูกต้องและนำไปใช้งานได้เหมาะสม ตารางที่ 2.1 แสดงถึงสมบัติเชิงกลของเทอร์โมเซตพลาสติก

ตารางที่ 2.1

สมบัติของเทอร์โมเซตพลาสติกบางชนิด [24]

Materials	Density,g/cm ³	Tensile strength, x1000 psi*	Impact strength, Izod, ft-lb/in**	Dielectric Strength, V/mil***	Max-use temp. (noload)	
					°F	°C
Phenolic:						
Wood-flour-filled	1.34-1.45	5-9	0.2-0.6	260-400	300-350	150-177
Mica-filled	1.65-1.92	5.5-7	0.3-0.4	350-400	250-300	120-150
Glass-filled	1.69-1.95	5-18	0.3-18	140-400	350-550	177-288
Polyester:						
Glass-filled SMC	1.7-2.1	8-20	8-22	320-400	300-350	150-177
Glass-filled BMC	1.7-2.3	4-10	15-16	300-420	300-350	150-177
Melamine:						
Cellulose-filled	1.45-1.52	5-9	0.2-0.4	350-400	250	120
Flock-filled	1.50-1.55	7-9	0.4-0.5	300-330	250	120
Glass-filled	1.8-2.0	5-10	0.6-18	170-300	300-400	150-200
Urea.cellulose-filled	1.47-1.52	5.5-13	0.2-0.4	300-400	170	77
Alkyd:						
Glass-filled	2.12-2.15	4-9.5	0.6-10	350-450	450	230
Mineral-filled	1.60-2.30	3-9	0.3-0.5	350-450	300-450	150-230
Epoxy(bis A):						
No filler	1.06-1.40	4-13	0.2-10	400-650	250-500	120-260
Mineral-filled	1.6-2-0	5-15	0.3-0.4	300-400	300-500	150-260
Glass-filled	1.7-2.0	10-30		300-400	300-500	150-260

* 1000 psi = 6.9 MPa

*** 1 V/mil = 39.4 V/mm

** Notched Izod test: ft.lb/in = 53.38 J/m

Source: Materials Engineering, May 1972.

พบว่าความหนาแน่นของเทอร์โมเซตติงพลาสติกสูงกว่าวัสดุพลาสติกโดยทั่วไปเล็กน้อย โดยความหนาแน่นจะอยู่ในช่วง 1.34-2.3 กรัม/ลบซม. ความทนทานแรงดึง (tensile strength) ของเทอร์โมเซตติงส่วนมากจะมีค่าค่อนข้างต่ำซึ่งจะอยู่ในช่วงจาก 4,000-15,000 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว (psi) แต่ถ้ามีปริมาณของแก้วเข้าไปผสมในปริมาณมาก ๆ ความทนทานแรงดึงของเทอร์โมเซตติงสามารถเพิ่มได้สูงถึง 30,000 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว เทอร์โมเซตติงที่มีแก้วผสมมีความทนทานต่อการกระแทก (impact strength) สูง และเทอร์โมเซตติงยังมีค่าความทนทานของไดอิเล็กตริก (dielectric strength) สูง โดยอยู่ในช่วง 140-650 V/mil อย่างไรก็ตาม เทอร์โมเซตติงมีขีดจำกัดในการใช้อุณหภูมิเหมือนพลาสติกทั่วไปซึ่งอยู่ในช่วง 170-550°F (77-228°C) [23, 24]

2.1.3 อีพอกซีเรซิน (epoxy resin)

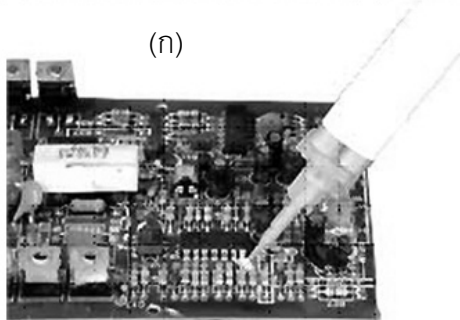
อีพอกซีเรซินเป็นเทอร์โมเซตติงที่มีการใช้งานอย่างกว้างขวาง เนื่องจากอีพอกซีเป็นวัสดุเนื้อยามีสมบัติที่ดีในการยึดติด สามารถขึ้นรูปง่าย จึงเหมาะกับการใช้เคลือบกระเบื้องโลหะเพื่อคงคุณภาพของอาหารและน้ำกระป๋อง เคลือบผิวเพื่อป้องกันการขูดขีด ป้องกันกรด ด่างและสารเคมี รวมทั้งเคลือบเครื่องตกแต่งต่าง ๆ ใช้เคลือบตัวถังรถยนต์ เครื่องมือ ของใช้ที่สำคัญ ๆ และใช้หุ้มเส้นลวดสายไฟฟ้า การใช้งานในทางไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ใช้อีพอกซีในงานที่เกี่ยวข้องกับค่าความทนทานของไดอิเล็กตริก (dielectric strength) เพราะเมื่อแข็งตัว มีการหดตัวน้อย มีแรงยึดที่ดี ทนทานต่อสภาวะแวดล้อมต่าง ๆ เช่น ป้องกันน้ำและความชื้นได้ดี ใช้เป็นฉนวนไฟฟ้าแรงสูง ทำสวิตช์ เกียร์ และหุ้มทรานซิสเตอร์ นอกจากนี้ อีพอกซีเรซินยังถูกเสริมแรงให้แข็งขึ้นด้วยพวกเส้นใยและลามิเนต (laminates) ตัวอย่างการใช้งานอยู่ในภาพที่ 2.1 เป็นต้น



(ก)



(ข)



(ค)



(ง)

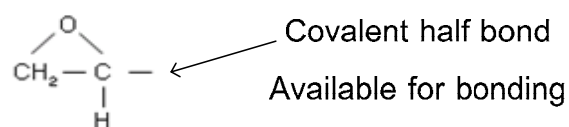
ภาพที่ 2.1

การใช้งานอีพอกซีเรซินในรูปแบบต่าง ๆ

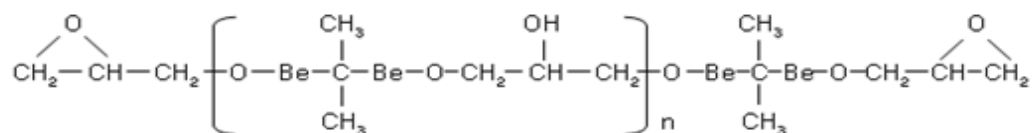
(ก) เคลือบผิวถนนในโรงงาน (ข) กาว

(ค) ฉนวนในวงจรไฟฟ้า (ง) หมวกกันน็อก

อีพอกซีเรซิน เป็นเทอร์โมเซตติงพลาสติก ที่เกิดจากโมโนเมอร์ (monomer) ประเภทอีพอกไซด์ (epoxide) โดยหลังจากการบ่ม [1] หรือการทำให้เกิดการเชื่อมขวาง จะได้อีพอกซีเรซิน โดยลักษณะโครงสร้างทางเคมีของอีพอกซีเรซินประกอบด้วย กลุ่มอีพอกไซด์ 2 กลุ่ม หรือมากกว่าต่อกันเป็นโมเลกุล ดังภาพที่ 2.2 [23] อีพอกซีเรซินยังมีอีกหลายชนิดที่มีโครงสร้างต่างไปจากที่แสดงในภาพ 2.2



(ก)



(ข)

ภาพที่ 2.2

โครงสร้างทางเคมีของอีพอกซีเรซิน [23]

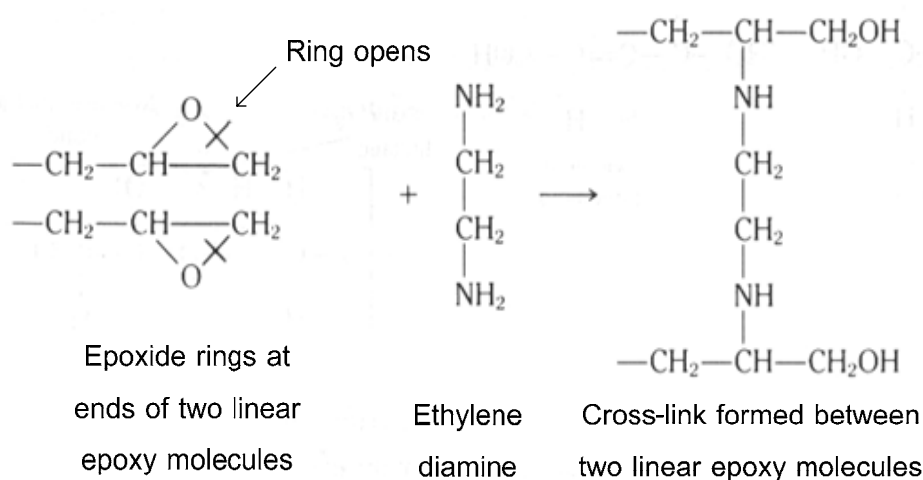
(ก) โครงสร้างทางเคมีของกลุ่มอีพอกไซด์

(ข) สูตรโครงสร้างทางเคมีของอีพอกซีเรซินที่นิยมใช้งาน

โดยที่

Be คือ วงแหวนเบนซีน

n คือ จำนวนหมู่ฟังก์ชันถ้าเป็นของเหลว n ในโครงสร้างจะมีค่าน้อยกว่า 1 แต่ถ้าเป็นเรซินแข็ง
ค่า n จะเป็น 2 หรือ มากกว่า



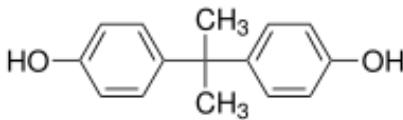
ภาพที่ 2.3

การเกิดเชื่อมขวางของโมเลกุลอีพอกซีกับ
โมเลกุลของเอทิลีนไดอะมีน [23]

อีพอกซีเรซินทำการบ่มด้วยสารที่ทำให้เกิดการเชื่อมขวางเพื่อให้ได้สมบัติที่ต้องการ กลุ่มอีพอกซีหรือไฮดรอกซิล (-OH) เป็นตำแหน่งที่เกิดปฏิกิริยาการเชื่อมขวาง สารที่ทำให้เกิดการเชื่อมขวางได้แก่ อะมีนแอนไฮไดรด์ และพวกอัลดีไฮด์ ในการบ่มที่อุณหภูมิห้องสำหรับอีพอกซีจะใช้อุณหภูมิที่ต่ำ (ต่ำกว่า 100°C) พวกอะมีน เช่น ไดเอทิลีนไตรอะมีน และไตรเอทิลีนเตตระอะมีนจะใช้เป็นสารบ่ม (curing agents) เมื่อมีตัวเร่ง (accelerator) ที่เหมาะสม ในการเกิดปฏิกิริยาระหว่างอีพอกไซด์จะเปิดออก ไฮโดรเจนอะตอมจากอะมีนหรือจากกลุ่มไฮดรอกซิลจะเกิดพันธะกับออกซิเจนอะตอมของอีพอกไซด์ [1] ดังแสดงในภาพที่ 2.3 ในปฏิกิริยานี้ เมื่อเกิดการเชื่อมขวางซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะที่สำคัญคือไม่มีผลพลอยได้เกิดขึ้น จึงทำให้อีพอกซีมีการหดตัวน้อยในระหว่างทำให้แข็งตัว มีความแข็งแรงและทนทานต่อสารเคมี สารอะมีนอีกเป็นจำนวนมากสามารถทำให้อีพอกซีเรซินเกิดการเชื่อมขวางได้ [1, 23]

อีพอกซีเรซินที่มีมวลโมเลกุลต่ำและยังไม่ได้บ่ม ที่มีสภาพเป็นของเหลว จะมี โมเลกุลโมลิบิตี (molecular mobility) สูง ซึ่งสมบัตินี้จะทำให้อีพอกซีเรซินเป็นตัวช่วยทำให้พื้นผิวเปียกได้ดีและเร็ว สมบัติช่วยทำให้เปียก (wetting action) นี้เป็นความสำคัญของอีพอกซีที่ถูกนำไปใช้เป็นวัสดุเสริมแรงและใช้ทำกาว (adhesives) อีพอกซีสามารถทำให้ไหลได้จึงนำมาใช้สำหรับหล่อหุ้มอุปกรณ์ไฟฟ้าต่าง ๆ ได้

จากที่กล่าวมาข้างต้นเป็นลักษณะของอีพอกซีทั่วไป แต่สำหรับในงานวิจัยนี้จะใช้อีพอกซีชนิด bisphenol A ซึ่งมีโครงสร้างทางเคมีและคุณสมบัติทางกายภาพ ดังแสดงในภาพที่ 2.4 bisphenol A เป็นสารเคมีทางอุตสาหกรรมที่ใช้เป็นส่วนประกอบหนึ่งในการผลิตพอลิคาร์บอเนตอีพอกซีเรซิน และผลิตภัณฑ์อื่น ๆ โดยผลิตภัณฑ์ของอีพอกซีชนิด bisphenol A นี้มีมากมาย รวมถึงชิ้นส่วนทางวิศวกรรม เช่น แผงวงจรไฟฟ้า วัสดุผสมต่าง ๆ สี กาว และสารเคลือบผิว

Bisphenol A	
	
IUPAC name	4,4'-dihydroxy-2,2-diphenylpropane
Properties	
Molecular formula	C ₁₅ H ₁₆ O ₂
Molar mass	228.29 g/mol
Appearance	White to light brown flakes or powder
Density	1.20 g/cm ³ , solid
Melting point	150 to 159 °C (430 K)
Boiling point	220 °C (493 K)
Solubility in water	120-300 ppm(at 21.5 °C)
Hazards	
R/S statement	R: 36, 37, 38, 43 S: 24, 26, 37
Flash point	227 °C, autoignition: 600 °C

ภาพที่ 2.4

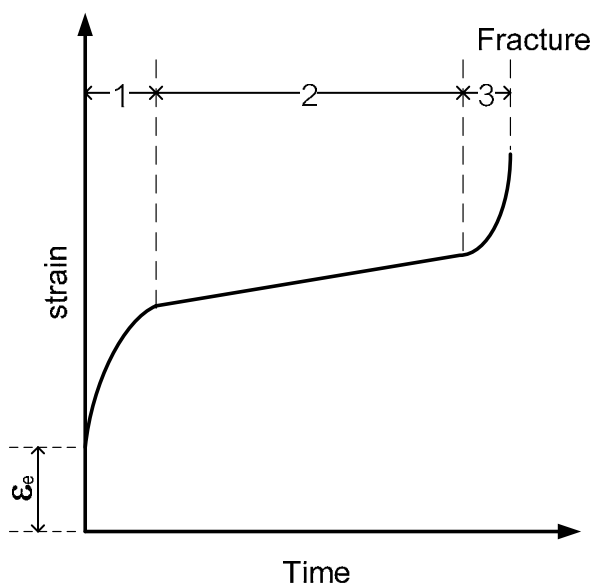
องค์ประกอบทางเคมีและคุณสมบัติของ bisphenol A [www.wikipedia.com]

2.2 การคืบ (creep)

การคืบ (creep) คือกลไกความเสียหายของวัสดุที่ขึ้นกับเวลา เกิดมาจากการที่วัสดุรับภาระค้างไว้ ตามปกติเมื่อใส่ภาระกับวัสดุ วัสดุจะเปลี่ยนแปลงขนาดตอบสนองต่อภาระนั้นเป็นสัดส่วนกับภาระตามแนวเส้นโค้งความเค้น-ความเครียด (stress-strain curve) การเปลี่ยนแปลงความเค้นและความเครียดจะไม่ขึ้นกับเวลา กรณีการคืบวัสดุรับความเค้นคงที่ แต่ว่าความเครียดเปลี่ยนแปลงตามเวลาที่รับความเค้นนั้น ดังนั้นการคืบจึงทำให้เกิดความเสียหายต่อชิ้นส่วนทางวิศวกรรม เพราะในตอนเริ่มต้นใช้งานมีความเครียดค่าหนึ่งเมื่อเวลาผ่านไปใช้งานที่ภาระเท่าเดิมความเครียดจะเพิ่มขึ้น หากมีการใช้งานชิ้นส่วนนี้ต่อไปเป็นเวลานาน ๆ จะเกิดความเสียหายจากการขาดจากกัน (rupture) หรือเกิดความเสียหายจากการเปลี่ยนแปลงขนาดที่เกินกว่าที่ยอมรับได้

วัสดุจะเกิดการคืบ เมื่ออะตอมของวัสดุมีพลังงานสูงพอที่จะไถล (slip) จากกัน เพราะพันธะอ่อนแอ สภาพที่อุณหภูมิสูงจะทำให้อะตอมมีพลังงานมากพอที่จะไถลจากกันได้ อุณหภูมิสูงในที่นี้หมายถึงมากกว่าครึ่งหนึ่งของจุดหลอมเหลวของวัสดุ (melting point) ในหน่วยเคลวิน สำหรับวัสดุโลหะส่วนใหญ่จะเกิดการคืบที่อุณหภูมิสูงเพราะมีจุดหลอมเหลวที่สูง จึงไม่ค่อยพบความเสียหายจากการคืบของโลหะที่อุณหภูมิต่ำ แต่วัสดุพอลิเมอร์มีจุดหลอมเหลวและอุณหภูมิการเปลี่ยนจากสถานะคล้ายแก้วต่ำ เกิดการคืบที่อุณหภูมิต่ำ ทำให้พบความเสียหายจากการคืบที่อุณหภูมิต่ำ

กลไกของการคืบเริ่มจาก วัสดุที่พร้อมจะเกิดการคืบได้รับภาระกระทำ (ให้เป็นแรงดึง) วัสดุจะเกิดการยืดตัวขึ้นทันที จากนั้นให้แรงดึงค้างคงที่ วัสดุจะยืดตัวออกไปตามเวลาและจะยืดออกไปเรื่อย ๆ จนขาด แบ่งช่วงการยืดตัวของวัสดุตั้งแต่รับภาระจนกระทั่งขาดได้เป็นสามช่วง [25] ช่วงแรกเรียกว่า การคืบปฐมภูมิ (primary creep) ช่วงที่สองคือการคืบทุติยภูมิ (secondary creep) ช่วงที่สามเป็นการคืบตติยภูมิ (tertiary creep) ตามภาพที่ 2.5



ภาพที่ 2.5

กราฟแสดงการคืบของวัสดุที่ความเค้น และอุณหภูมิคงที่ประกอบด้วยสามขั้นตอน

(1) การคืบปฐมภูมิ (2) การคืบทุติยภูมิ (3) การคืบตติยภูมิ

การคืบปฐมภูมิ เมื่อวัสดุรับภาระกระทำจะเกิดความเครียดสูงขึ้นฉับพลัน และเพิ่มขึ้นด้วยอัตราที่ช้าลงเนื่องจากวัสดุเกิดการแข็งตัวขึ้นจึงทำให้เกิดความเครียดใหม่ได้ยากขึ้น เป็นกลไกสองกลไกผสมกันคือ การแข็งตัวความเครียดแบบขึ้นกับเวลา (time-dependent strain hardening) กับการคืนตัว (recovery) การคืบปฐมภูมิ (ϵ^c) จะเป็นฟังก์ชันของเวลาดังสมการ (2.1) [25]

$$\epsilon^c = \alpha \ln t \quad (2.1)$$

โดยที่

ϵ^c คือ การคืบปฐมภูมิ

α คือ ค่าสัมประสิทธิ์การคืบ (creep coefficient)

t คือ เวลาที่ต้องการหาความเครียด

การคืบทุติยภูมิ เป็นการคืบต่อจากการคืบปฐมภูมิ อัตราการคืบทุติยภูมิลดลงจากการคืบปฐมภูมิจนคงที่ เนื่องจากการเกิดความเครียดใหม่ในวัสดุเกิดได้ยากขึ้น ความเครียดใหม่ที่เกิดขึ้นจึงต้องใช้เวลานานในการเกิดแต่ละครั้ง ในช่วงนี้ความสัมพันธ์ระหว่างการคืบกับเวลาเป็นเส้นตรง การคืบในช่วงนี้ แบ่งเป็นสองประเภทคือ

1 การคืบเนื่องจากการไหลของดิสโลเคชัน (dislocation-flow creep) กรณีนี้เกิดภายใต้สภาพการใช้งานที่อุณหภูมิไม่สูงมาก และได้รับภาระสูง อะตอมเกิดดิสโลเคชันขึ้นและเคลื่อนที่ไปในบริเวณใกล้เคียงจนเกิดการคืบ

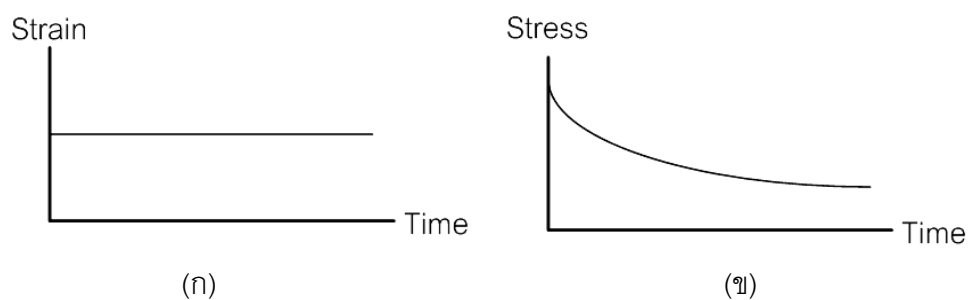
2 การคืบเนื่องจากการแพร่ของอะตอม (diffusional-flow creep) กรณีนี้เกิดภายใต้สภาพการใช้งานที่อุณหภูมิสูงทำให้อะตอมมีพลังงานสูง เมื่อได้รับภาระเพียงเล็กน้อยสามารถเกิดการแพร่ของอะตอมไปไกลจึงเกิดการคืบขึ้น

การคืบตติยภูมิ เป็นการคืบต่อจากการคืบทุติยภูมิหลังจากที่เวลาผ่านไปนานมาก วัสดุจะสะสมการคืบไว้เป็นจำนวนมาก จนพื้นที่หน้าตัดตึงจากกับภาระลดลงเนื่องจากผลกระทบของปัวซอง (Poisson effect) หรืออาจเกิดรอยร้าวขึ้นในเนื้อวัสดุ ทำให้ความเค้นในบริเวณนั้นสูงขึ้น ทำให้ความเครียดเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วอีกครั้ง อัตราการคืบจะสูงขึ้นเรื่อย ๆ แบ่งลักษณะของการเกิดกลไกนี้ได้ 2 กลุ่มในโลหะคือ

1 โลหะเปราะ จะมีอัตราการคืบสูง และ ความเหนียว (ductility) ต่ำ เช่น Nimonic 80A

2 โลหะเหนียว จะมีอัตราการคืบต่ำ และ ความเหนียวสูง เช่น 304 stainless steel

วิธีศึกษาการคืบทั่วไปแบ่งได้สองวิธีคือ วิธีแรกให้ความเค้นคงที่ วิธีที่สองให้ความเครียดคงที่ การศึกษาโดยให้ความเค้นคงที่นั้นจะศึกษาการคืบของวัสดุที่เพิ่มขึ้นตามเวลา โดยควบคุมสภาพแวดล้อมทั้งอุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ รวมถึงความสม่ำเสมอของภาระที่กระทำให้คงที่ตลอดทั้งการทดลอง ส่วนการศึกษาโดยให้ความเครียดคงที่ จะศึกษาความเค้นที่ลดลงตามเวลาที่เพิ่มขึ้น เรียกปรากฏการณ์นี้ว่าการคลายตัวของความเค้น (stress relaxation) ตามภาพที่ 2.6 โดยสภาวะที่ทำการศึกษาจะควบคุมอุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์และความเครียดให้คงที่ตลอดการทดลอง



ภาพที่ 2.6

การคลายตัวของความเค้น

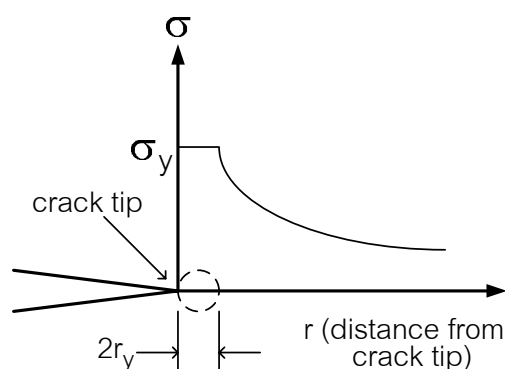
(ก) ความเครียดคงที่ (ข) ความเค้นลดลง

ผลการศึกษาก็ได้ตัวแปรที่ใช้ในการออกแบบที่เกี่ยวข้องกับการคืบคือ เวลาที่ใช้ในการแตกหัก (time to rupture) ซึ่งเป็นเวลาที่รวมกลไกการเกิดการคืบทั้งสามขั้นตอนเข้าไว้ด้วยกันจนวัสดุแตกหัก เมื่อใช้งานเป็นเวลานานจนใกล้ถึงจุดแตกหักก็ควรเปลี่ยนชิ้นส่วนใหม่

2.3 กลศาสตร์การแตกหัก (fracture mechanics)

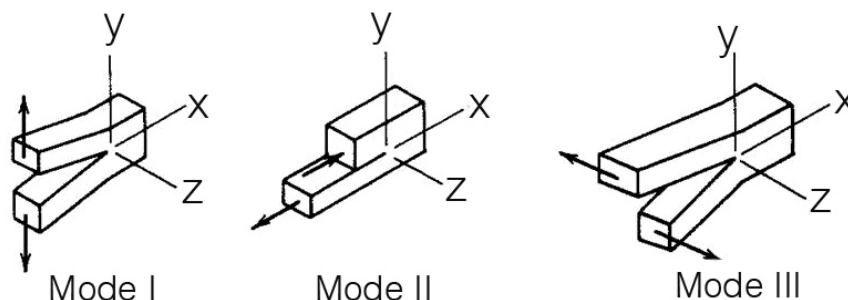
การแตกหัก (fracture) คือ ความเสียหายหรือการแตกร้าวของวัสดุจนไม่สามารถใช้งานได้อีกต่อไป ตามปกติวัสดุเมื่อผ่านการใช้งานจะเกิดรอยร้าวขึ้นโดยยังไม่เกิดการแตกหัก รอยร้าว (crack) หรือตำหนิ (flaw) ต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นในชิ้นงานนั้น จะมีผลกระทบต่อความแข็งแรงของชิ้นงาน เนื่องจากกลไกที่เกิดขึ้นที่ปลายรอยร้าวจะไม่เหมือนกับกลไกในเนื้อวัสดุโดยรวม เพราะที่ปลายรอยร้าวระดับของความเค้นมีค่าสูงกว่าบริเวณอื่น ๆ มาก จึงมีผู้ศึกษาค้นคว้าถึงผลกระทบของแรงกระทำที่ปลายรอยร้าวของวัสดุนี้ และพัฒนามาเป็นวิชากลศาสตร์การแตกหัก [26] กลศาสตร์การแตกหักจึงเป็นศาสตร์ที่ศึกษาความเสียหายของวัสดุที่มีความไม่ต่อเนื่องในชิ้นงานหรือรอยร้าวจากภาระที่มากระทำ เพื่อป้องกันหรือควบคุมการแตกหัก

ปี ค.ศ. 1913 Inglis ได้ค้นพบตัวแปรเชิงปริมาณที่แสดงผลกระทบของรอยร้าวต่อความแข็งแรงของวัสดุ โดยให้รอยร้าวทำหน้าที่เพิ่มความเค้นโดยศึกษาจากแผ่นแบนขนาดใหญ่ (infinite plate) ที่มีรูเจาะเป็นรูปวงรี และถูกกระทำด้วยความเค้นตั้งฉากกับแกนหลักของวงรี เขาได้หาสมการที่ใช้คำนวณความเค้นอยู่ในรูปของรัศมีมีความโค้งที่จุดปลายแกนหลักของรูเจาะรูปวงรีออกมา แต่ในกรณีที่มีรัศมีมีความโค้งมีค่าเข้าสู่ศูนย์ ค่าความเค้นที่คำนวณได้จากสมการของ Inglis จะมีค่าเข้าสู่อนันต์ (stress singularity) แต่ในความเป็นจริงของวัสดุ เมื่อความเค้นไปถึงจุดคราก (yield stress) วัสดุจะสูญเสียความยืดหยุ่นไปเรียกบริเวณนั้นว่า บริเวณพลาสติก (plastic zone) ตามภาพที่ 2.7 รอยร้าวเกิดจากด้านซ้ายความเค้นที่ตำแหน่งปลายรอยร้าวซึ่งเกิดภายในบริเวณพลาสติก จะมีค่าเท่ากับความเค้นครากของวัสดุ (σ_y)



ภาพที่ 2.7

บริเวณพลาสติกที่ปลายรอยร้าว



ภาพที่ 2.8

ลักษณะของภาระกระทำที่ปลายรอยร้าวแบบต่าง ๆ

ในกลศาสตร์การแตกหัก ลักษณะภาระกระทำที่ปลายรอยร้าวทำให้เกิดบริเวณพลาสติกมีสามลักษณะ ตามภาพที่ 2.8 คือ รูปแบบภาระที่หนึ่ง (mode I loading) เป็นความเสียหายที่เกิดขึ้นจากแรงดึงที่ตั้งฉากกับรอยร้าว ส่งผลให้เกิดการเปิดอ้าออกของรอยร้าวโดยตรง และเป็นความเสียหายที่รุนแรงที่สุดในสามแบบ รูปแบบภาระที่สอง (mode II loading) เป็นความเสียหายที่เกิดจากแรงเฉือนให้รอยร้าวไถลสวนทางกันทำให้รอยร้าวกินลึกเข้าไปกว่าเดิม แบบที่สาม (mode III loading) เป็นความเสียหายที่เกิดจากแรงดึงรอยร้าวให้ถ่างออกจากกันโดยทิศทางของแรงจะขนานกับผิวหน้าปลายรอยร้าวของรอยร้าว

กลศาสตร์การแตกหักแบ่งออกได้เป็นสามกลุ่มคือ กลศาสตร์การแตกหักแบบยืดหยุ่นเชิงเส้น (linear elastic fracture mechanics; LEFM) กลศาสตร์การแตกหักแบบอีลาสติกพลาสติก (elastic plastic fracture mechanics; EPFM) และกลศาสตร์การแตกหักแบบขึ้นกับเวลา (time dependent fracture mechanics; TDFM)

2.3.1 กลศาสตร์การแตกหักแบบยืดหยุ่นเชิงเส้น (LEFM)

กลศาสตร์การแตกหักแบบยืดหยุ่นเชิงเส้น คือการศึกษาการแตกหักโดยที่พฤติกรรมโดยรวมของวัสดุที่ตอบสนองต่อภาระยังคงความยืดหยุ่นเป็นเชิงเส้นอยู่ มีบริเวณพลาสติกขนาดเล็กมากเมื่อเทียบกับความยาวของรอยร้าว และเนื้อวัสดุที่ได้รับภาระทั้งหมด

ในการศึกษากลศาสตร์การแตกหักแบบยืดหยุ่นเชิงเส้น ใช้พารามิเตอร์ ตัวประกอบความเข้มข้นของความเค้น (stress intensity factor; K) [2, 3, 23, 26] เพื่อเป็นตัวบอกลักษณะความรุนแรงของปลายรอยร้าว นั้นว่ามีระดับมากเท่าใด พารามิเตอร์นี้พิจารณาจาก ความเค้น ความยาวของรอยร้าว และฟังก์ชันตัวประกอบของรูปร่าง โดยทั่วไปสามารถหาค่าตัวประกอบความเข้มข้นของความเค้นด้วยสมการ (2.2) [2]

$$K = f(\alpha)\sigma\sqrt{\pi a} \quad (2.2)$$

โดยที่

$f(\alpha)$ คือ ตัวประกอบของรูปร่าง (geometry function)

σ คือ ความเค้น

a คือ ความยาวของรอยร้าว (crack length)

โดยทั่วไปชิ้นงานจริงจะรับภาระในสภาพความเครียดระนาบ (plane strain condition) ก็ต่อเมื่อเกิดขึ้นเมื่อบริเวณพลาสติกที่ส่วนปลายของรอยร้าวมีขนาดเล็กเมื่อเทียบกับขนาดของชิ้นงาน (ภาพที่ 2.9) ดังสมการ (2.3)

$$a, (W-a), h \geq 2.5 \cdot \left(\frac{K_I}{\sigma_{ys}} \right)^2 \quad (2.3)$$

โดยที่

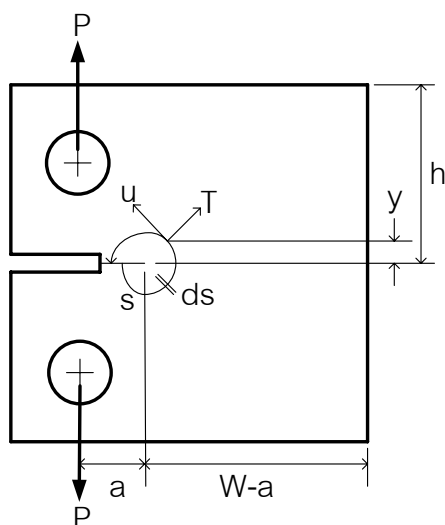
a คือ ความยาวของรอยร้าว

$W-a$ คือ ความยาวของส่วนที่ไม่มีรอยร้าว

h คือ ความสูงของชิ้นงาน

σ_{ys} คือ ค่าความเค้นคราก (yield stress)

K_I คือ ตัวประกอบความเข้มข้นของความเค้น ภายใต้ภาระแบบที่ 1 (mode I loading)



ภาพที่ 2.9

ชิ้นงานทดสอบภายใต้เงื่อนไขการประยุกต์ใช้งานกลศาสตร์การแตกหัก

เมื่อตัวประกอบความเข้มของความเค้นสูงขึ้นถึงค่าวิกฤต (K_c) จะก่อให้เกิดการแตกหัก ของวัสดุ ค่าวิกฤติของตัวประกอบความเข้มของความเค้นนี้เรียกว่า ค่าความต้านทานการแตกหักของวัสดุ (fracture toughness) โดยความต้านทานการแตกหักจะแสดงถึงความสามารถในการรับภาระของชิ้นงานที่มีรอยร้าวตามทฤษฎีกลศาสตร์การแตกหักยืดหยุ่นเชิงเส้น ความต้านทานการแตกหักสามารถพิจารณาเป็นขีดจำกัดในการออกแบบ ของค่าตัวประกอบความเข้มของความเค้นสำหรับวัสดุที่มีรอยร้าว ในลักษณะเช่นเดียวกับการพิจารณาว่าความเค้นคราก (yield stress) เป็นขีดจำกัดของความเค้นในการออกแบบสำหรับวัตถุภายใต้ภาระสถิตย์ (static load) โดยมีเงื่อนไขในการพิจารณาดังนี้

$$K \geq K_c \quad \text{เกิดการแตกหัก}$$

$$K < K_c \quad \text{ไม่เกิดการแตกหัก}$$

ค่าความต้านทานการแตกหักนี้ มีความสัมพันธ์กับขนาดความยาวรอยร้าวและภาระความเค้นที่มากระทำ กล่าวคือเมื่อความยาวรอยร้าวในชิ้นงานมีค่ามากขึ้น จะทำให้ความสามารถ

ในการรับภาระของชิ้นงานลดน้อยลง และเมื่อรอยร้าวนั้นยาวขึ้นถึงความยาวรอยร้าววิกฤต (critical crack length) ภายใต้ภาระในขณะนั้น จะทำให้ชิ้นงานนั้นไม่สามารถที่จะรับภาระได้อีกต่อไป ชิ้นงานจะเกิดความเสียหายทันที และเมื่อภาระที่มากระทำต่อชิ้นงานมีค่ามาก จะมีโอกาสทำให้ชิ้นงานเกิดความแตกร้าวดีกว่าชิ้นงานที่อยู่ภายใต้ภาระที่ต่ำกว่า

2.3.2 กลศาสตร์การแตกหักแบบอีลาสติก-พลาสติก (EPFM)

กลศาสตร์การแตกหักแบบอีลาสติกพลาสติก คือการศึกษาการแตกหักโดยที่พฤติกรรมโดยรวมของวัสดุที่ตอบสนองต่อภาระเลยช่วงยืดหยุ่นเชิงเส้นออกไป เป็นช่วงยืดหยุ่นไม่เป็นเชิงเส้นและช่วงพลาสติก ที่ปลายรอยร้าวมีบริเวณพลาสติกขนาดใหญ่เมื่อเทียบกับความยาวของรอยร้าว

ในการศึกษากลศาสตร์การแตกหักแบบอีลาสติก-พลาสติกใช้พารามิเตอร์ อัตราการเปลี่ยนแปลงพลังงานความเครียด (J-Integral; J) [3] เพื่อเป็นตัวบอกลักษณะความรุนแรงของปลายรอยร้าวว่ามีระดับมากเท่าใด J คือค่าพลังงานศักย์ที่รอยร้าวขยับตัวออกไปต่อพื้นที่หน้าตัด ค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงพลังงานความเครียดมีความครอบคลุมในการอธิบายพฤติกรรม การตอบสนองของวัสดุที่มีรอยร้าวต่อแรงกระทำ ทั้งหมดในช่วงที่ยืดหยุ่น และช่วงที่ไม่ยืดหยุ่น ค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงพลังงานความเครียดหาจากการทำปฏิกิริยานูพันธ์ (อินทิเกรต) รอบบริเวณเส้นทาง Γ (contour) ที่ปลายรอยร้าวจากสมการ (2.4) โดยอาศัยภาพที่ 2.9 ประกอบ

$$J = \int_{\Gamma} \left(w dy - T \frac{\partial u}{\partial x} ds \right) \quad (2.4)$$

โดยที่

w คือ ความหนาแน่นของพลังงานความเครียด (strain energy density)

y คือ ระยะทางตามแนวตั้งฉากกับระนาบของรอยร้าว

T คือ Traction vector ของความยาวของรอยร้าว

U คือ เวกเตอร์ของการเคลื่อนที่ (displacement vector)

s คือ ค่า arc length ไปตามบริเวณเส้นทาง (contour)

โดยทั่วไปจะใช้เทคนิคไฟไนต์เอลิเมนต์ (finite element) มาช่วยในการอินทิเกรต เพื่อให้ได้ค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงพลังงานความเครียด ค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงพลังงานความเครียดนี้อาจอยู่ในรูปของพลังงานของการเปลี่ยนแปลงขนาดของวัสดุ ซึ่งเป็นพื้นที่ใต้กราฟระหว่างภาระกับการเปลี่ยนแปลงระยะทางตามแนวแรง หรือหาได้จากการคำนวณค่าตัวประกอบความเข้มข้นของความเค้นแปลงเป็นค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงพลังงานความเครียดได้

ในกรณีกลศาสตร์การแตกหักแบบอีลาสติก-พลาสติก ก็มีค่าวิกฤตของอัตราการเปลี่ยนแปลงพลังงานความเครียด ใช้สัญลักษณ์ว่า J_c นับว่าเป็นค่าความต้านการแตกหักในกรณีของกลศาสตร์การแตกหักแบบอีลาสติก-พลาสติก ถ้าอัตราการเปลี่ยนแปลงพลังงานความเครียดมากเกินค่านี้วัสดุจะแตกหักทันที และสามารถนำค่านี้มาใช้ในการออกแบบเพื่อความปลอดภัย

2.3.3 กลศาสตร์การแตกหักแบบขึ้นกับเวลา (TDFM)

กลศาสตร์การแตกหักแบบขึ้นกับเวลา คือการศึกษาการแตกหักโดยที่พฤติกรรมโดยรวมของวัสดุที่ตอบสนองต่อการเป็นแบบขึ้นกับเวลา หรือมีการคืบเข้ามาเกี่ยวข้อง ที่ปลายรอยร้าวมีบริเวณพลาสติกขนาดใหญ่ขึ้นเรื่อย ๆ เพราะมีการเปลี่ยนแปลงขนาดตามเวลาที่เปลี่ยนไป

ในการศึกษากลศาสตร์การแตกหักแบบขึ้นกับเวลา ใช้พารามิเตอร์อัตราการเปลี่ยนแปลงกำลัง (modified J-integral; C^*) เพื่อเป็นตัวบอกลักษณะความรุนแรงของปลายรอยร้าว นั้น พารามิเตอร์นี้พิจารณาจาก แรง, อัตราการเปลี่ยนแปลงระยะทางตามแนวแรง นิยามของอัตราการเปลี่ยนแปลงกำลัง มีหลายความหมายแล้วแต่กรณีที่จะใช้ ในกรณีของวัสดุที่มีรอยร้าว ที่ยังไม่ทราบคุณสมบัติที่แน่นอนหรือที่สมมุติว่าเป็นวัสดุเหนียว และอยู่ในช่วงการคืบตามกฎยกกำลัง (power-law creep) ค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงกำลัง [25] คือ พลังงานศักย์ของขึ้นทดสอบที่รอยร้าวขยายตัวออกไปต่อเวลา สามารถใช้ค่านี้ในการทดสอบที่ภาระคงที่ หรือภาระวงรอบ (ภาระสูงสุดคงที่) เพราะว่าการขยายตัวของรอยร้าวเกิดขึ้นเป็นส่วนน้อยของเวลาทั้งหมดโดย มีความเกี่ยวข้องกับค่าคงที่ η (ขึ้นกับรูปทรงและลักษณะของภาระ) คำนวณหาค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงกำลัง ให้อยู่ในรูปสมการได้เป็นสมการ (2.5) [25]

$$C^* = \eta \int \frac{Pd\dot{V}}{B(W-a)} \quad (2.5)$$

สำหรับวัสดุที่มีพฤติกรรมตามกฎยกกำลัง ค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงระยะทาง (displacement rate; $\dot{V}$) จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับ P^n สมการ (2.5) จะลดรูปเป็นสมการ (2.6) [25]

$$C^* = \frac{n}{n+1} \left(\frac{\eta}{B(W-a)} \right)^P P \dot{V} \quad (2.6)$$

โดยที่

P คือ ภาระที่ใช้

$\dot{V}$ คือ อัตราการเปลี่ยนแปลงระยะทางของวัสดุจากภาระต่อเวลา

B คือ ความหนาของวัสดุ

a คือ ความยาวของรอยร้าว (crack length)

n คือ เลขชี้กำลังการคืบ (creep exponent)

W คือ ความกว้างของวัสดุในทิศทางเดียวกับที่รอยร้าวขยายตัว ตามภาพที่ 2.9

ค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงกำลังมีค่าวิกฤตแบบเดียวกับค่าตัวประกอบความเข้มข้นของความเค้น และอัตราการเปลี่ยนแปลงพลังงานความเครียด ใช้สัญลักษณ์ว่า C^*_{crit} ซึ่งหากค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงกำลังที่ปลายรอยร้าวเกินกว่าค่า C^*_{crit} วัสดุก็จะเกิดการแตกหัก

2.4 การล้า (fatigue)

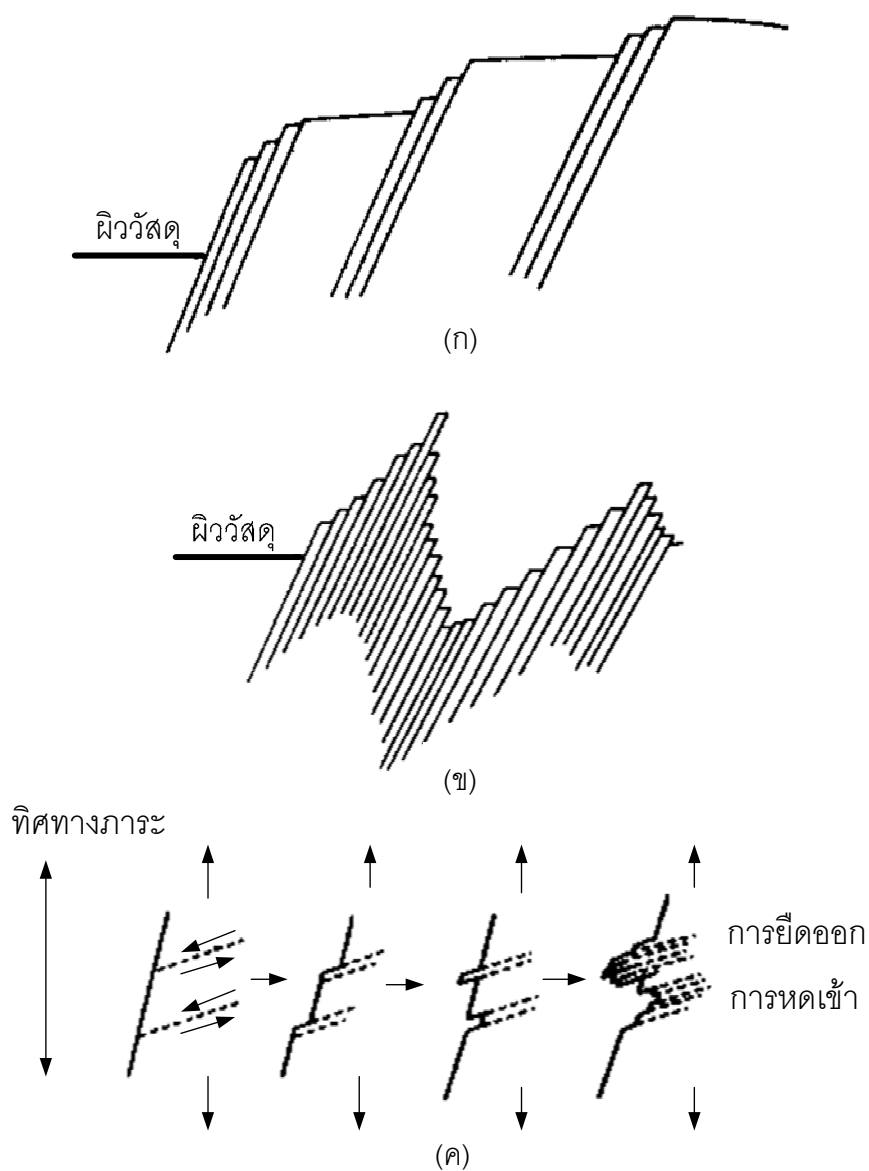
ในปี ค.ศ. 1840 ในอุตสาหกรรมรางรถไฟพบความเสียหายขึ้น จากการศึกษาพบว่าที่แกนของของรางรถไฟมีความเสียหายที่ข้อต่อ เนื่องจากใช้งานด้วยภาระแบบวงรอบ ภาระแบบวงรอบคือภาระกระทำแบบต่อเนื่องและมีการเปลี่ยนแปลงขนาดของภาระอยู่ตลอดเวลาจากน้อยที่สุดไปมากที่สุดและกลับมาน้อยที่สุดอีกครั้งเป็นวงรอบ จึงนิยาม การล้า (fatigue) ว่าเป็นความเสียหายของวัสดุที่เกิดจากการรับภาระวงรอบซ้ำไปซ้ำมา ในช่วงปี ค.ศ. 1850-1860 [2] August Wöhler ทำการทดลองเรื่องการล้า โดยศึกษาความเสียหายของแกนรางรถไฟ ทำให้ Wöhler ได้รับการขนานนามว่าเป็นบิดาของการทดสอบการล้าอย่างเป็นระบบ (father of systematic fatigue testing) Wöhler เสนอ ทฤษฎีแผนภาพเอส-เอ็น (S-N diagram) และแสดงขีดจำกัดการล้าของวัสดุ (fatigue limit) ที่ความเค้นหลายระดับ เขาแสดงให้เห็นถึงความสำคัญของช่วงพิสัยของความเค้นที่มากกระทำ มากกว่าความเค้นสูงสุดที่กระทำต่อวัสดุ [2] ทำให้มีผู้ศึกษาขยายความเรื่องการล้าต่อมาอีกเช่น Gerber, Goodman, Bauschinger เป็นต้น ตัวอย่างการศึกษาเรื่องการล้าที่รู้จักกันดีก็คือ เครื่องบินโคเมท (the comet) ที่ให้บริการในเดือน พฤษภาคม 1954 ซึ่งมีชั่วโมงบินกว่า 300 ชั่วโมง หลังจากผ่านการตรวจสอบสภาพได้ไม่นานเครื่องบินได้ตกลงในทะเลเมดิเตอร์เรเนียน เกิดความสูญเสียชีวิตและทรัพย์สินจำนวนมาก หลังการสืบสวนวิศวกรคาดว่าเกิดความเสียหายขึ้นจากการล้า จึงนำเครื่องบินมาทดสอบด้วยการจำลองเสมือนการบินโดยใช้ความดันต่างกันซ้ำไปซ้ำมา ทำการทดสอบที่ความดันระหว่าง 70 ถึง 110 กิโลปาสคาล (kPa) (ซึ่งค่าที่แนะนำให้ใช้งานคือ 53 kPa คิดเป็นร้อยละ 40 ของความต้านทานแรงดึงสูงสุด) หลังการทดสอบพบว่าเครื่องบินโคเมททั้งหมดที่นำมาทดสอบเกิดรอยร้าวขนาดเล็กขึ้นที่โครงเครื่องบิน (airframe) ก่อนและรอยร้าวขยายตัวออกจนเกิดความเสียหาย ต่อมาทางโคเมทจึงได้มุ่งเน้นการออกแบบเพื่อป้องกันการล้าที่ airframe การออกแบบอุปกรณ์ทางวิศวกรรมในปัจจุบันหาทางป้องกันความเสียหายเนื่องจากการล้า เพราะการล้าส่งผลกระทบต่อความเสียหายของชีวิต และทรัพย์สินเป็นจำนวนมาก

ภาระวงรอบที่ทำให้เกิดการล้ามีอยู่หลายประเภท เช่น ดึง-ปล่อย, ดึง-อัด, ดึง-ดึง เป็นต้น จำเป็นต้องมีปริมาณใช้บอกลักษณะของภาระวงรอบว่าเป็นแบบใด ปริมาณนั้นคือ อัตราส่วนความเค้น (stress ratio; R) นิยามอัตราส่วนความเค้นว่าเป็นความเค้นต่ำสุดของวงรอบหารด้วยความเค้นสูงสุด และให้ความเค้นดึงมีค่าเป็นบวก ความเค้นอัดมีค่าเป็นลบ

การล้าของวัสดุเริ่มจากการสะสมของความเสียหายจากภาระวงรอบจนกระทั่งความเสียหายมากขึ้นจนกลายเป็นรอยร้าวเล็ก ๆ ขึ้นในเนื้อวัสดุ เรียกกลไกนี้ว่าการเกิดของรอยร้าวล้า (crack initiation) [22] เมื่อวัสดุยังรับภาระวงรอบนี้ต่อไป รอยร้าวจะขยายตัวออกไปตามเนื้อวัสดุ เรียกกลไกนี้ว่าการขยายตัวของรอยร้าวล้า (crack propagation) [22] ในตอนแรกรอยร้าวจะขยายตัวออกไปอย่างช้า ๆ แต่เมื่อใช้งานต่อไปรอยร้าวจะขยายตัวเร็วขึ้น เมื่อรอยร้าวขยายตัวออกไปจนกระทั่งถึงความยาวรอยร้าววิกฤต วัสดุจะเกิดการแตกหักในทันที ในการใช้งานจริง บางครั้งการล้าใช้เวลาในช่วงการเกิดของรอยร้าวนานและเมื่อเกิดรอยร้าวขึ้นแล้วใช้เวลาในการขยายตัวสั้น ๆ ก็เกิดความเสียหาย การใช้งานประเภทนี้ขึ้นส่วนมักเสียหายจากรอยร้าวขนาดเล็ก เพราะมองไม่เห็นรอยร้าวที่เกิดขึ้น จนกระทั่งเมื่อรอยร้าวมีขนาดใหญ่แล้วจึงมองเห็น และขึ้นส่วนใกล้จะเสียหาย แต่มีการใช้งานบางประเภทที่ใช้เวลาในการเกิดรอยร้าวล้า ไม่นานนักแต่ใช้เวลาในการขยายตัวของรอยร้าวล้ามากกว่า งานประเภทนี้ถ้าตรวจสอบดูบ่อย ๆ ว่ารอยร้าวขยายตัวออกไปเร็วหรือช้า ก็จะเป็นการช่วยประหยัดค่าบำรุงรักษาได้ เพราะหากรอยร้าวขยายตัวเร็วจำเป็นต้องหยุดการทำงานเพื่อเปลี่ยนชิ้นส่วนใหม่ทดแทน แต่ถ้ารอยร้าวขยายตัวช้ายังสามารถใช้งานชิ้นส่วนนี้ได้ต่อไปโดยไม่ต้องเปลี่ยนชิ้นใหม่

2.4.1 การเกิดของรอยร้าวล้า (crack initiation)

การเกิดขึ้นของรอยร้าวล้า เมื่อมีการใช้งานขึ้นส่วนด้วยภาระแบบวงรอบ วัสดุจะต้องรับความเค้นสูงสุดและความเค้นต่ำสุด ขณะที่วัสดุรับความเค้นสูงสุด จะเกิดการเปลี่ยนแปลงขนาดตั้งแต่เนื้อในของวัสดุออกมาถึงผิวนอก ทำให้เกิดการไถลของอะตอมขึ้นและมีผลมาถึงที่ผิวของวัสดุ จากนั้นเมื่อความเค้นลดลงจนเป็นความเค้นต่ำสุดอะตอมจะไถลกลับคืนตำแหน่ง แต่ว่าจะมีบางตำแหน่งของอะตอมที่ไม่กลับคืนที่ เมื่อความเค้นเพิ่มขึ้นเป็นสูงสุดอีกครั้ง จะเกิดการไถลอีกครั้ง คราวนี้ตำแหน่งการไถลจะไม่เหมือนกับครั้งแรก และมีบางอะตอมที่ไม่ยอมไถลกลับที่ จากความเค้นในรอบที่แล้วมารวมกัน กลไกนี้เกิดขึ้นซ้ำไปซ้ำมาหลายครั้งตามจำนวนรอบที่ใช้งาน สุดท้ายเมื่อวัสดุสะสมความเสียหายขนาดเล็กของการไถลไม่กลับตำแหน่งเดิมของอะตอม วัสดุจะไม่สามารถเกิดการไถลใหม่ได้อีก จะเกิดรอยร้าวขนาดเล็กขึ้น ซึ่งรอยร้าวอาจจะเกิดที่เดียวหรือหลายที่ก็ได้ ในทางปฏิบัติเราสามารถป้องกันความเสียหายจากการเกิดขึ้นของรอยร้าวล้านี้ได้ โดยเมื่อใช้งานไปสักระยะ ผิวนานจะไม่เรียบเนื่องจากการไถลของอะตอม ให้นำชิ้นงานไปทำผิวใหม่ให้เรียบอีกครั้ง ความเสียหายเดิมที่มีอยู่ก็จะหายไปพร้อมกับผิวนอกที่ถูกปาดออก และพร้อมนำมาใช้งานอีกครั้ง ภาพที่ 2.10 แสดงกลไกการไถลที่ผิวดังกล่าว



ภาพที่ 2.10

การไหลของอะตอมที่ผิวของวัสดุ [2]

(ก) เกิดจากภาวะสถิตย

(ข) เกิดจากภาวะวงรอบ

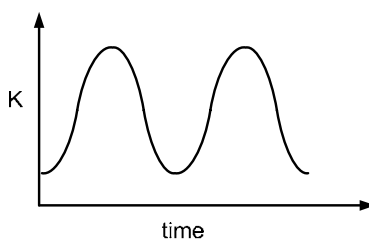
(ค) ขั้นตอนการเกิดความเสียหายแบบการหดเข้าและการยืดออกที่ผิว

2.4.2 การขยายตัวของรอยร้าวล้า (crack propagation)

เมื่อชิ้นส่วนที่มีรอยร้าวอยู่ถูกใช้งานด้วยภาระแบบวงรอบจะเกิดแรงกระทำกระจายไม่สม่ำเสมอทั่วชิ้นงาน ที่บริเวณที่มีพื้นที่หน้าตัดมากจะรับความเค้นน้อย ที่บริเวณพื้นที่หน้าตัดน้อยจะรับความเค้นมากกว่า แต่ที่ปลายของรอยร้าวจะเกิดความเค้นที่มากที่สุด ขณะที่รับความเค้นสูงสุด ปลายของรอยร้าวจะเปิดออกมากที่สุดและรอยร้าวจะขยายตัวออกไป ขณะที่รับความเค้นน้อยสุดรอยร้าวจะเปิดออกน้อยที่สุดหรือปิดตัวสนิทขึ้นอยู่กับภาระที่ต่ำที่สุด เมื่อความเค้นวนมาถึงสูงสุดรอยร้าวจะเปิดออกมากที่สุดและขยายตัวออกไปอีกครั้ง

วิธีศึกษาการล้ามีได้สองวิธีคือ วิธีแผนภาพเอส-เอ็น ซึ่งเป็นวิธีที่รวมทั้งการเกิดขึ้นของรอยร้าวล้าและการขยายตัวของรอยร้าวล้า ทำการศึกษาวัสดุที่มีความต่อเนื่องเป็นเนื้อเดียวกันทั้งวัสดุ และวิธีศึกษาการขยายตัวของรอยร้าวล้า (fatigue crack growth; FCG) จะดูการขยายตัวของรอยร้าวเพียงอย่างเดียว ในการศึกษาแบบแรกข้อมูลสำคัญที่ผู้ออกแบบและผู้ใช้งานต้องการทราบ คือ จำนวนรอบที่ใช้งานและจะเกิดความเสียหาย (N) และในการศึกษาแบบที่สองข้อมูลสำคัญก็คือ อัตราการขยายตัวของรอยร้าวล้า นิยามให้เป็นการเปลี่ยนแปลงความยาวของรอยร้าวต่อจำนวนรอบ (da/dN) เนื่องจากรอยร้าวจะขยายตัวแบบช้า ๆ ก่อน และจะเพิ่มเร็วขึ้นจนกระทั่งวัสดุเกิดการแตกหัก

ในการศึกษาแผนภาพเอส-เอ็น จะใช้ความเค้นหรือความเครียด มาอธิบายจำนวนรอบที่ใช้งานแล้วจะเกิดความเสียหายขึ้น ส่วนในการศึกษาการขยายตัวของรอยร้าวล้า จะใช้พารามิเตอร์กลศาสตร์การแตกหัก มาอธิบายอัตราการขยายตัวของรอยร้าวล้า (FCG rate) ในกรณีของกลศาสตร์การแตกหักแบบยืดหยุ่นเชิงเส้นค่าตัวประกอบความเข้มข้นของความเค้นจะเปลี่ยนแปลงเป็นวงรอบตามภาพที่ 2.11

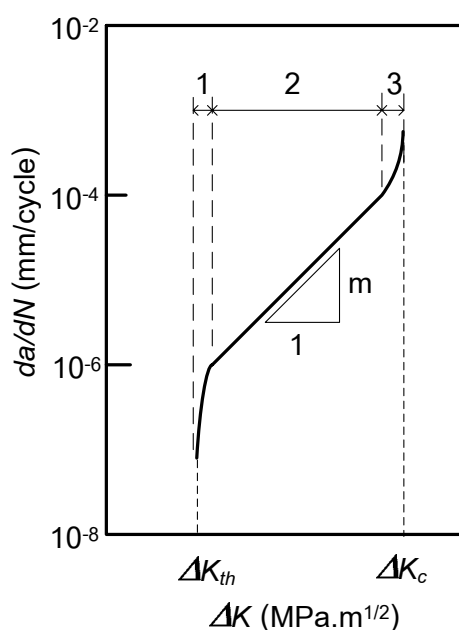


ภาพที่ 2.11

ค่าตัวประกอบความเข้มข้นของความเค้นที่เปลี่ยนแปลงแบบวงรอบ

ค่าตัวประกอบความเข้มข้นของความเค้นจำเป็นต้องเปลี่ยนเป็นค่าพิสัยตัวประกอบความเข้มข้นของความเค้น (ΔK) แทน นิยามให้ $\Delta K = K_{max} - K_{min}$ หรือเขียนในรูปอัตราส่วนความเค้นได้เป็น $R = K_{min}/K_{max}$ กรณีของกลศาสตร์การแตกหักแบบอีลาสติก-พลาสติก ค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงพลังงานความเครียดจะถูกเปลี่ยนเป็นค่าพิสัยอัตราการเปลี่ยนแปลงพลังงานความเครียด นิยามว่าเป็น $\Delta J = J_{max} - J_{min}$ และในกรณีกลศาสตร์การแตกหักแบบขึ้นกับเวลา ใช้ค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงกำลัง

กรณีกลศาสตร์การแตกหักแบบยืดหยุ่นเชิงเส้นเมื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าพิสัยตัวประกอบความเข้มข้นของความเค้นกับอัตราการขยายตัวของรอยร้าวแล้วมาจะได้กราฟการขยายตัวของรอยร้าว (FCG curve) เขียนในสเกลลอการิทึมให้แกนนอนเป็นค่าพิสัยตัวประกอบความเข้มข้นของความเค้น และแกนตั้งเป็นอัตราการขยายตัวของรอยร้าวตามภาพที่ 2.12



ภาพที่ 2.12

กราฟการขยายตัวของรอยร้าว (FCG curve) ของวัสดุ

โดย (2) คือช่วงของ Paris

จะเห็นว่าการขยายตัวของรอยร้าวล้าแบ่งออกได้เป็นสามช่วงคือ ช่วงแรกทางซ้ายมือ หมายเลข 1 (threshold regime) ช่วงที่สองตรงกลางหมายเลข 2 (Paris regime) และช่วงที่สาม หมายเลข 3 (fast fracture regime) [2, 3, 26, 27]

ในช่วงแรกเป็นช่วงอัตราการขยายตัวของรอยร้าวต่ำ รอยร้าวจะขยายตัวไปอย่างช้า ๆ จนอาจตรวจไม่พบว่าขยายตัวหากเครื่องมือไม่ละเอียดพอ ช่วงนี้เมื่อเพิ่มค่าพิสัยตัวประกอบความเข้มข้นของความเค้นเพียงเล็กน้อย อัตราการขยายตัวของรอยร้าวล้าจะเพิ่มขึ้นอย่างมาก อัตราการขยายตัวของรอยร้าวล้าในช่วงนี้มีค่าประมาณ 10^{-6} มม./รอบ ค่า threshold stress intensity factor (ΔK_{th}) ในภาพที่ 2.12 เป็นค่าที่บ่งบอกถึงความต้านทานการล้าของวัสดุได้เป็นอย่างดี เพราะถ้าใช้งานที่ค่าพิสัยตัวประกอบความเข้มข้นของความเค้นต่ำกว่าค่านี้ รอยร้าวจะไม่ขยายตัว หากมีการตรวจสอบพบว่าใช้งานอยู่ในช่วงนี้ก็ถือว่ามีความปลอดภัยในการทำงาน หรือ ในการออกแบบก็ควรออกแบบให้ใช้งานด้วยค่าพิสัยตัวประกอบความเข้มข้นของความเค้นที่ต่ำกว่าค่า ΔK_{th}

ช่วงที่สองคือช่วง Paris กราฟจะมีความสัมพันธ์เป็นเส้นตรงซึ่งหมายถึงการเพิ่มขึ้นอย่างสม่ำเสมอของอัตราการขยายตัวของรอยร้าวล้า รอยร้าวจะขยายตัวออกไปเรื่อย ๆ โดยหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าพิสัยตัวประกอบความเข้มข้นของความเค้นกับอัตราการขยายตัวของรอยร้าวล้าได้ออกมาเป็นกฎของ Paris ดังสมการที่ (2.7) [2, 3]

$$da/dN = C \Delta K^m \quad (2.7)$$

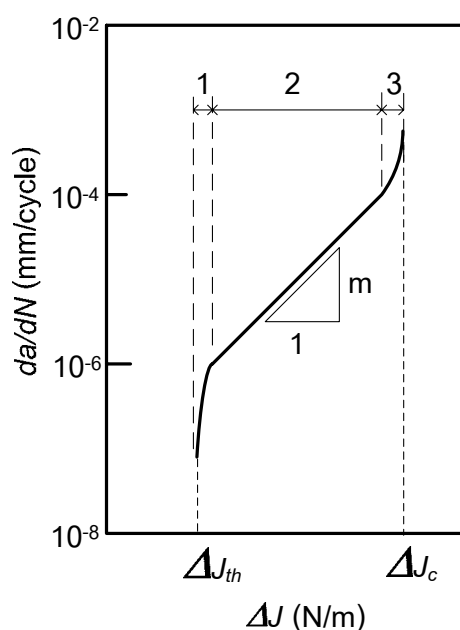
โดยที่ ค่า C และ ค่า m เป็นค่าคงที่ของวัสดุ โดย m จะบอกความชันของกราฟ

ในการใช้งานจริงหากใช้งานอยู่ในช่วง Paris นี้จะสามารถทำนายความเร็วของรอยร้าวได้ว่าเคลื่อนที่ได้เร็วเพียงใด และคาดการณ์ว่าจะต้องหยุดใช้งานเมื่อรอยร้าวขยายตัวไปยาวถึงเท่าใด

ช่วงสุดท้ายรอยร้าวจะขยายตัวออกไปอย่างรวดเร็ว จนกระทั่งเกิดความเสียหายแตกหักขึ้น ในทางปฏิบัติ เป็นการยากที่จะควบคุมการใช้งานในช่วงนี้เพราะ รอยร้าวขยายตัวอย่างรวดเร็วมากจึงควรหยุดทำงาน เพื่อเปลี่ยนชิ้นส่วนใหม่เพื่อความปลอดภัยในการทำงาน ค่าพิสัยตัวประกอบความเข้มข้นของความเค้นสุดท้ายก่อนที่วัสดุจะแตกหัก เรียกว่าค่าพิสัยตัวประกอบความเข้มข้นของความเค้นวิกฤต (ΔK_C)

ถ้าเพิ่มค่าอัตราส่วนความเค้นในการใช้งานให้มากขึ้นจะส่งผลกระทบทำให้วัสดุต้องรับภาระเฉลี่ยที่มากขึ้น ค่าตัวประกอบความเข้มข้นของความเค้นเฉลี่ยก็เพิ่มขึ้นตามค่าอัตราส่วนความเค้น ทำให้ปลายของรอยร้าวมีการเปิดออกมากกว่ากรณีที่อัตราส่วนความเค้นต่ำรอยร้าวจึงขยายตัวได้เร็วขึ้น ส่งผลให้กราฟ FCG curve ของวัสดุเดิมเลื่อนไปทางซ้าย [17, 18, 28-30]

เมื่อปลายรอยร้าวมีการเปลี่ยนแปลงเลยจากช่วงยืดหยุ่นออกไปเกิดเป็นบริเวณพลาสติกขนาดใหญ่ขึ้นเกิดการครากขนาดใหญ่ (large scale yielding) กลายเป็นกรณีกลศาสตร์การแตกหักแบบอิลาสติก-พลาสติก จำเป็นต้องใช้ค่าพิสัยอัตราการเปลี่ยนแปลงพลังงานความเครียดอัตราการขยายตัวของรอยร้าวถ้าโดยเขียนในสเกลลอการิทึม [19, 31] แสดงในภาพที่ 2.13



ภาพที่ 2.13

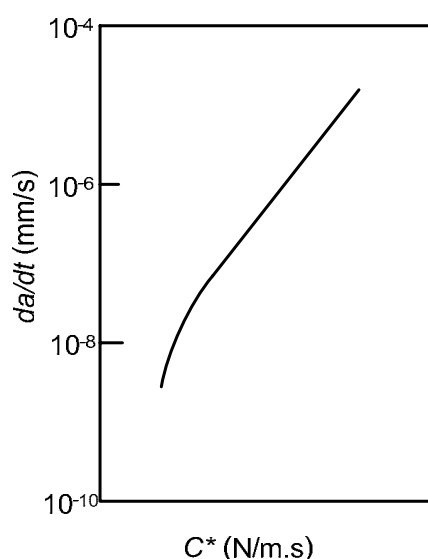
กราฟระหว่าง ΔJ กับ อัตราการขยายตัวของรอยร้าว

จากภาพที่ 2.13 ให้ค่าพิสัยอัตราการเปลี่ยนแปลงพลังงานความเครียดเป็นแกนนอน และอัตราการขยายตัวของรอยร้าวล้าเป็นแกนตั้ง กราฟการขยายตัวของรอยร้าวที่ได้จะมีลักษณะเช่นเดียวกับความสัมพันธ์ของค่าพิสัยตัวประกอบความเข้มข้นของความเค้นกับอัตราการขยายตัวของรอยร้าวล้าโดยแบ่งออกได้เป็นสามช่วงเช่นกัน และในช่วงของ Paris สามารถหาความสัมพันธ์ออกมาเป็นเส้นตรงเช่นกันดังสมการ (2.8)

$$da/dN = C \Delta J^m \quad (2.8)$$

โดยที่ ค่า C และ ค่า m เป็นค่าคงที่ของวัสดุ โดย m จะบอกความชันของกราฟ

การใช้งานพอลิเมอร์ที่สามารถเกิดการคืบที่อุณหภูมิห้อง ทำให้การขยายตัวของรอยร้าวเกิดภายใต้การผสมระหว่างการล้าและการคืบ (creep-fatigue interaction) จึงใช้กลศาสตร์การแตกหักที่ขึ้นกับเวลาหาความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเปลี่ยนแปลงกำลังกับอัตราการขยายตัวของรอยร้าว (da/dt) เขียนอยู่ในสเกลลอการิทึม โดยให้ค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงกำลังเป็นแกนนอน อัตราการขยายตัวของรอยร้าวเป็นแกนตั้ง แสดงในภาพที่ 2.14 (อัตราการขยายตัวของรอยร้าว (da/dt) คืออัตราการเปลี่ยนแปลงความยาวของรอยร้าวต่อเวลา) [19, 31]



ภาพที่ 2.14

กราฟระหว่าง C^* กับ da/dt

เนื่องจากค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงกำลัง พิจารณาปัจจัยที่เกี่ยวกับเวลา ค่าอัตราการขยายตัวของรอยร้าวจึงต้องใช้อัตราการขยายตัวของรอยร้าวเทียบกับเวลา แทนอัตราการขยายตัวของรอยร้าวที่เทียบกับจำนวนรอบ การศึกษาการขยายตัวของรอยร้าวล้าที่สภาพที่ต่างกันแต่มีกลไกที่เกี่ยวข้องกับเวลาเข้ามาผสมใกล้เคียงกัน กราฟระหว่าง C^* กับ da/dt จะได้เส้นกราฟที่ทับหรือใกล้เคียงกันกัน แต่หากศึกษาที่สภาพต่างกัน และมีกลไกที่เกี่ยวข้องกับเวลาเข้ามาผสมต่างกัน กราฟระหว่าง C^* กับ da/dt จะแยกออกจากกัน