บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

วัสดุผสมได้รับการพัฒนามากว่าห้าสิบปีจนเป็นที่ได้รับความไว้วางใจในอุตสาหกรรมผลิตเครื่องบิน เริ่มจากชิ้นส่วนเล็ก ๆ จนเกือบเป็นชิ้นส่วนของเครื่องบินทั้งลำ คุณสมบัติของวัสดุผสมสามารถที่จะตอบสนองความต้องการทางอุตสาหกรรมการบินได้เป็นอย่างดี กอปรกับความก้าวหน้าทางไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์ "วัสดุผสมจะเปลี่ยนวิถีการออกแบบและสร้างเครื่องบินในอนาคตอย่างแน่นอน" จากคำพูดของ Frank Statkus, Boeing's vice president of new technology

แต่การพัฒนาของวัสดุทางวิศวกรรมนั้น สิ่งสำคัญที่จะต้องพัฒนาควบคู่ไปด้วยคือคุณสมบัติที่ถูกต้องและแม่นยำของวัสดุนั้น ๆ ทั้งนี้เนื่องจากลักษณะและรูปร่าง รวมถึงคุณสมบัติที่เมื่อนำมารวมกันแต่ยังคงคุณสมบัติเดิมไว้ของวัสดุผสมนั้น ยิ่งทำให้การทำนายพฤติกรรมต่างๆ เป็นไปได้ยาก และไม่สามารถนำความรู้จากวัสดุแต่ละชนิดที่รวมกันเป็นวัสดุผสมแยกพิจารณาได้ เหตุผลดังกล่าวจึงทำให้นักวิทยาศาสตร์พยายามศึกษา และนำเสนอผลงานต่าง ๆ เกี่ยวกับวัสดุผสมเพิ่มมากขึ้นในปัจจุบัน เพื่อทันต่อความต้องการที่เพิ่มขึ้น และการเปลี่ยนแปลงที่รวดเร็ว ชิ้นส่วนเครื่องจักรกลและโครงสร้างโดยทั่วไปนั้น เมื่อมีการใช้งานไประยะเวลาหนึ่ง มักจะเกิดความเสียหายทางกลขึ้น โดยปรากฏออกมาในรูปแบบของรอยร้าว (Crack) วัสดุผสมก็เช่นเดียวกัน ถ้าชิ้นส่วนดังกล่าวยังคงอยู่ภายใต้ภาระที่กระทำต่อไปจะทำให้เกิดการขยายตัวของรอยร้าวขึ้นจนกระทั่งชิ้นส่วนเกิดความเสียหายในที่สุด

การทำนายค่าภาระวิกฤตที่ทำให้รอยร้าวเติบโตและบริเวณที่จะเกิดความเสียหายเป็นอันดับแรก เป็นสิ่งจำเป็นที่จะช่วยวิศวกรตัดสินใจว่าจะใช้ชิ้นส่วนนั้นได้อย่างปลอดภัยต่อไปหรือไม่ ช่วยซ่อมแซมแก้ไขเครื่องจักรได้ทันท่วงทีก่อนที่จะเกิดความเสียหาย ช่วยลดความสูญเสียทั้งเวลาและค่าใช้จ่าย อีกทั้งยังป้องกันไม่ให้เกิดความเสียหายรุนแรงทั้งชีวิตและทรัพย์สิน

แนวทางที่ใช้ในการแก้ปัญหาชิ้นส่วนที่มีรอยร้าวมีอยู่หลายแนวทาง แนวทางกลศาสตร์การแตกหักยืดหยุ่นเชิงเส้น (Linear elastic fracture mechanics; LEFM) เป็นอีกแนวทางหนึ่งที่เหมาะกับการวิเคราะห์ชิ้นงานที่มีรอยร้าว โดยแนวทางกลศาสตร์การแตกหักยืดหยุ่นเชิงเส้นจะอาศัยค่าพารามิเตอร์ตัวหนึ่งที่เรียกว่าตัวประกอบความเข้มของความเค้น

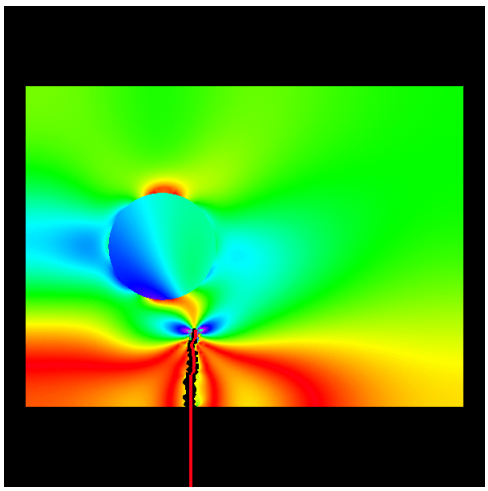
(Stress intensity factor; *K*) [1] ที่ได้พัฒนาขึ้นเพื่อแสดงสถานะความรุนแรงของปลายรอยร้าวที่ขนาดภาระและค่าความยาวรอยร้าวต่าง ๆ บนชิ้นงาน ทำให้เข้าถึงพฤติกรรมการเติบโตของรอยร้าวได้เป็นอย่างดี

ในปัจจุบันนี้การวิเคราะห์ปัญหาชิ้นงานที่มีรอยร้าวมีอยู่หลายวิธีรวมถึงระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์และเทคนิคโฟโตอีลาสติกซิตี้ โดยเฉพาะระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สามารถช่วยในการออกแบบได้โดยไม่จำเป็นต้องมีการสร้างต้นแบบขึ้น และยังสามารถช่วยลดเวลาและต้นทุนที่ใช้ในการออกแบบได้

หลักการของระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์โดยทั่วไปจะเริ่มจากการแบ่งขอบเขตรูปร่างลักษณะของปัญหาที่ต้องการออกเป็นเอลิเมนต์ย่อย ๆ ซึ่งในแต่ละเอลิเมนต์จะประกอบด้วยตัวไม่ทราบค่าที่จุดต่อต่าง ๆ จากนั้นทำการเลือกฟังก์ชันการประมาณภายในแต่ละเอลิเมนต์ (Element interpolation function) นำไปสร้างสมการของแต่ละเอลิเมนต์ แล้วนำสมการที่ได้มาประกอบกันก่อให้เกิดระบบสมการรวม จากนั้นทำการประยุกต์เงื่อนไขขอบเขต (Boundary condition) ที่เหมาะสมแล้วจึงแก้สมการระบบนั้น เพื่อหาตัวไม่ทราบค่าที่จุดต่อต่าง ๆ และเพื่อความแม่นยำของผลลัพธ์จึงจำเป็นต้องใช้เอลิเมนต์ที่มีขนาดเล็กจำนวนมาก

หลักการของเทคนิควิธีโฟโตอีลาสติกซิตี้เป็นวิธีการหนึ่งที่นิยมใช้ โดยชิ้นงานที่นำมาทดสอบจะต้องมีลักษณะเป็นแผ่นใส ผลที่ได้จะช่วยให้เห็นค่าความเค้นที่เกิดขึ้นได้อย่างชัดเจนว่าเกิดขึ้นที่บริเวณใดมากที่สุดแม้ว่าในปัจจุบันจะมีระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite element method) ซึ่งสามารถคำนวณหาความเค้นและความเครียดได้อย่างรวดเร็ว และมีความแม่นยำ แต่ก็ยังมีบางกรณีที่จำเป็นต้องใช้วิธีโฟโตอีลาสติกซิตี้ เช่นในการตรวจสอบคุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่ทำจากวัสดุใสในการตรวจหารอยร้าว หรือตรวจความเค้นตกค้าง เป็นต้น

งานวิจัยนี้ขอเสนอการนำระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์และเทคนิควิธีโฟโตอีลาสติกซิตี้มาประยุกต์ใช้ เพื่อหาค่าตัวประกอบความเข้มของความเค้นในรูปแบบเปิด (K_I) และค่าตัวประกอบความเข้มของความเค้นในรูปแบบเฉือน (K_{II}) ที่แสดงถึงระดับความรุนแรงของปลายรอยร้าวของวัสดุผสม โดยใช้แนวทางกลศาสตร์การแตกหักยืดหยุ่นเชิงเส้นใน 2 มิติ ทั้งนี้ลักษณะของ Inclusion ที่นิยมใช้จะเป็นลักษณะ ทรงกระบอกกลม มีหลายขนาดและหลายทิศทาง ทั้งที่ปลายรอยร้าว และอยู่ห่างจากรอยร้าว ดังตัวอย่างที่แสดงในภาพที่ 1.1



ภาพที่ 1.1

การขยายตัวของรอยร้าวผ่าน Hard Inclusion [17]

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

1.2.1 ศึกษาระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ที่สามารถนำมาใช้ได้อย่างเหมาะสม

1.2.2 ศึกษาและประยุกต์ใช้เทคนิคการปรับขนาดเอลิเมนต์โดยอัตโนมัติ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพ ในการคำนวณ

1.2.3 ศึกษาเทคนิคโฟโตอีลาสติกซิตี้ เพื่อประยุกต์กับปัญหารอยร้าว

1.2.4 ศึกษาความสัมพันธ์ของรอยร้าวกับวัสดุ Inclusion

1.2.5 เป็นงานวิจัยพื้นฐานที่สามารถนำไปพัฒนาต่อในด้านการศึกษาและงานวิชาการระดับสูงขึ้นไป

1.2.6 สามารถนำองค์ความรู้ที่ได้ไปประยุกต์ใช้ในภาคอุตสาหกรรม

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1.3.1 เป็นงานวิจัยที่วิเคราะห์ปัญหาแบบความเครียดในระนาบ (plane strain)

1.3.2 ใช้วัสดุ Polycarbonate (PS-1)

1.3.3 วิเคราะห์ 2 ปัญหา คือ Single edge crack plate tension; SE(T) และ Edge slant cracked rectangular plate

1.3.4 วัสดุ Inclusion มี 2 ชนิดคือ เทฟลอน (Teflon) สำหรับแบบอ่อน (Soft inclusion) และแมกนีเซียมอัลลอย (Magnesium alloy AZ61) สำหรับแบบแข็ง (Hard inclusion)

1.3.5 ศึกษามุมเอียงของแนวรอยร้าวอยู่ 3 กรณี คือ 0º, 30 º, 45 º

1.4 ระเบียบวิธีวิจัย

1.4.1 ศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

1.4.2 ศึกษาทฤษฎีเทคนิคโฟโตอีลาสติกซิตี้

1.4.3 ศึกษาระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ที่เกี่ยวข้องกับปัญหากลศาสตร์การแตกหักยืดหยุ่นเชิงเส้น

1.4.4 ศึกษาและประยุกต์เทคนิคการปรับขนาดเอลิเมนต์โดยอัตโนมัติเข้ากับโปรแกรมคอมพิวเตอร์

1.4.5 ออกแบบขั้นตอนการทดลอง และอุปกรณ์การทดลองให้เหมาะสม

1.4.6 เตรียมวัสดุตามที่ได้ออกแบบไว้

1.4.7 ทำการทดลองด้วยเทคนิคโฟโตอีลาสติก พร้อมทั้งคำนวณหาค่าตัวประกอบความเข้มของความเค้น

1.4.8 วิเคราะห์และเปรียบเทียบผลที่ได้จากเทคนิคโฟโตอีลาสติก กับผลการคำนวณด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

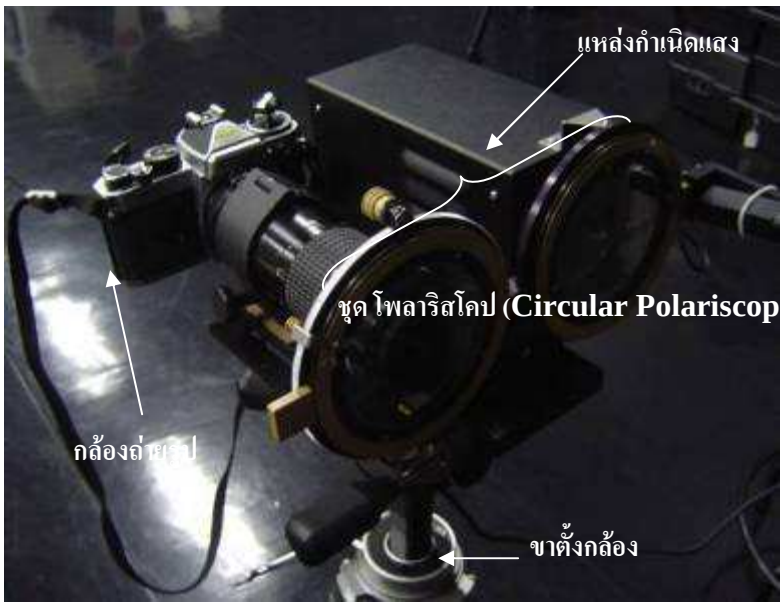
1.4.9 สรุปผลงานวิจัย

1.5 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

1.5.1 โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์

1.5.2 ชุดทดสอบโฟโตอีลาสติก และอุปกรณ์เสริม

1.5.3 อุปกรณ์จับยึดและน้ำหนักมาตรฐาน



ภาพที่ 1.2

ชุดทดสอบโฟโตอีลาสติก และอุปกรณ์เสริม

ภาพที่ 1.3

อุปกรณ์จับยึดและใส่แรงสำหรับการทดสอบด้วยเทคนิคโฟโตอีลาสติกซิตี้

1.6 แผนงานดำเนินงานตลอดโครงการ

ตารางที่ 1.1

แผนการดำเนินงานตลอดโครงการ

หัวข้อ	2551							2552				
	มิ.ย	ก.ค	ส.ค	ก.ย	ต.ค	พ.ย	ธ.ค	ม.ค	ก.พ	มี.ค	เม.ย	พ.ค
ศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้												
ศึกษาทฤษฎีเทคนิคโฟโตอีลาสติกซิตี้												
ศึกษาระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ที่เกี่ยวข้องกับปัญหากลศาสตร์การแตกหักยืดหยุ่นเชิงเส้น												
ศึกษาและประยุกต์เทคนิคการปรับขนาดเอลิเมนต์โดยอัตโนมัติเข้ากับโปรแกรมคอมพิวเตอร์												
ออกแบบขั้นตอนการทดลอง และอุปกรณ์การทดลองให้เหมาะสม												
เตรียมวัสดุตามที่ได้ออกแบบไว้												
ทำการทดลองด้วยเทคนิคโฟโตอิลาสติก พร้อมทั้งคำนวณหาค่าตัวประกอบความเข้มของความเค้น												
วิเคราะห์ และเปรียบเทียบผลที่ได้จากเทคนิคโฟโตอิลาสติก กับผลการคำนวณด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์												
สรุปผลงานวิจัย												

1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัย

1.7.1 เข้าใจพฤติกรรมของวัสดุผสมที่มีรอยร้าว

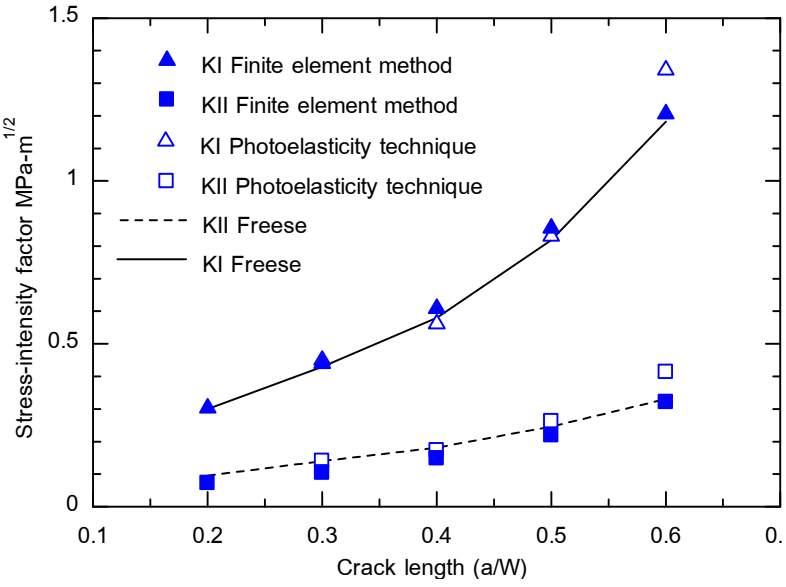
1.7.2 โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ที่ประดิษฐ์ขึ้นสามารถช่วยทำนายพฤติกรรมของวัสดุผสมกับรอยร้าวได้

1.7.3 องค์ความรู้ที่ได้ช่วยในการทำนายอายุของผลิตภัณฑ์ที่มีรอยร้าวได้

1.7.4 เป็นงานวิจัยที่ใช้ในงานวิจัยต่อยอดต่อไปได้

1.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องในอดีต

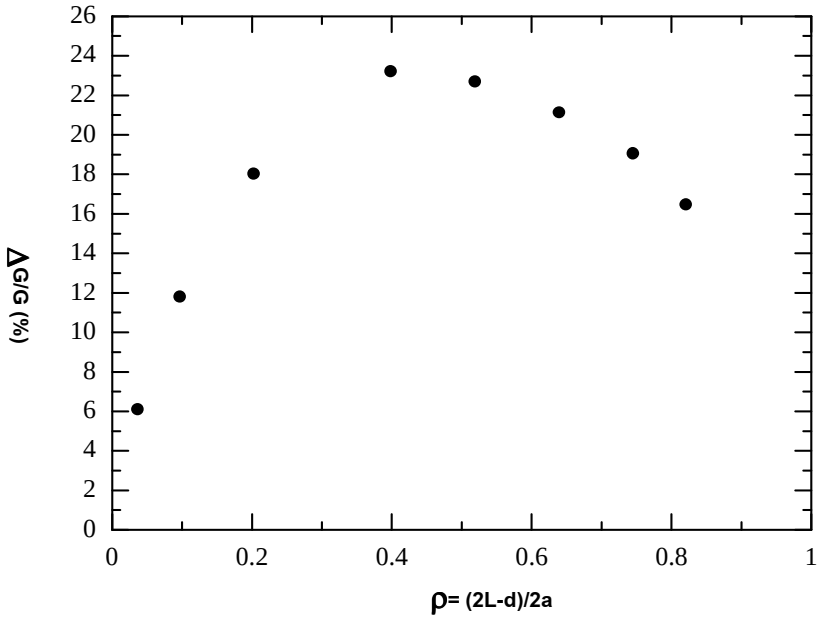
1.8.1 งานวิทยานิพนธ์ของนักศึกษาปริญญาโทเรื่อง “การหาความเค้นบริเวณปลายรอยร้าวด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบปรับขนาดและเทคนิคโฟโตอีลาสติกซิตี้” ของนายอนุวัฒน์ ยอดแสงคำ [2] ที่นำระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบปรับขนาดและเทคนิคโฟโตอีลาสติกซิตี้ มาหาค่าตัวประกอบความเข้มของความเค้นในรูปแบบเปิดและรูปแบบเฉือน โดยนำผลที่ได้ไปเปรียบเทียบกับงานวิจัยต่าง ๆ ซึ่งผลลัพธ์เป็นที่น่าพอใจดังภาพที่ 1.4



ภาพที่ 1.4
กราฟแสดงผลที่ได้จากการคำนวณด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์และเทคนิคโฟโตอีลาสติกซิตี้เปรียบเทียบกับงานวิจัยของ Freese

1.8.2 วารสารวิชาการของ P.C. savalia, engineering fracture Mechanics 75 (2008) 926-942 [12] เรื่อง A numerical study of inclusion-matrix debonding in the presence of a near crack ศึกษาในสองมิติ โดยใช้ three point bending , inclusion คือ แก้ว โดยมีการสร้างปลายรอยร้าวขึ้น และศึกษาการขยายตัวรวมกับ tensile critical stress ถูกใช้เพื่อมาหาความสัมพันธ์กับ Inclusion โดยเปรียบเทียบกับ moiré interferometer โดยโมเดลถูกขยายขนาดเพื่อพิจารณาผลของ inclusion ที่มีต่อค่า young's modulus ของ mismatch ใกล้ ๆ กับปลายรอยร้าว โดยสรุปความสัมพันธ์ได้ดังนี้

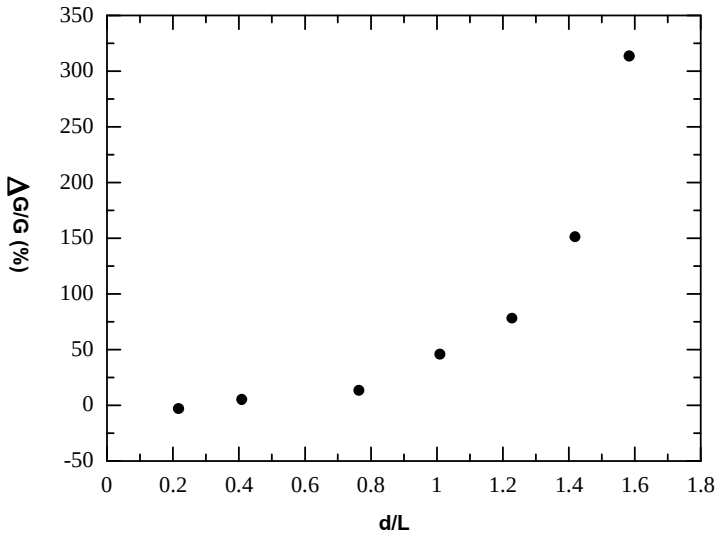
1. ค่าคงที่ของขนาด inclusion กับระยะห่างจากปลายรอยร้าว (d/L) กับความยาวรอยร้าวถูกศึกษาโดยการ fix ค่า young's modulus ratio (Ei/Em) ที่ 20 โดยการกระโดดของค่า G จะเกิดขึ้นอย่างรุนแรงที่ ρ=0.4 ดังแสดงในภาพที่ 1.5



ภาพที่ 1.5

กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง พารามิเตอร์ของรูปร่างกับค่า G

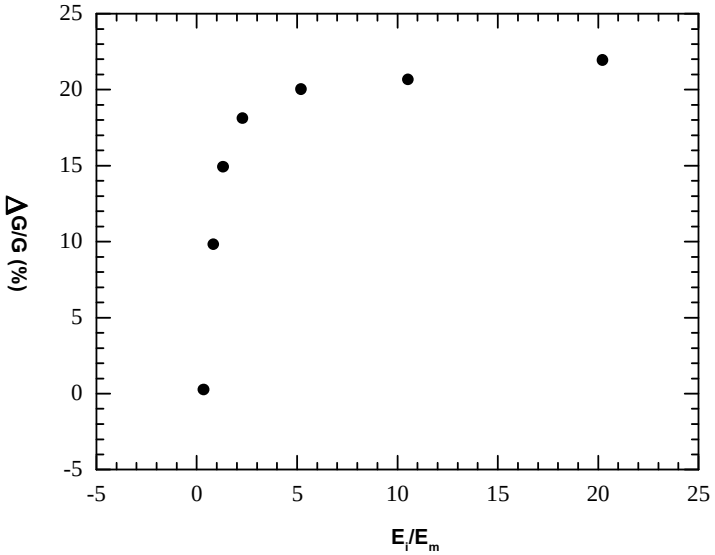
2. อัตราส่วนระหว่างขนาดของ inclusion กับระยะห่างกับรอยร้าวมีความสัมพันธ์ดังภาพที่ 1.6 คือค่า G จะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่ออัตราส่วนมีค่ามากกว่า 0.4



ภาพที่ 1.6

กราฟความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของ Inclusion และระยะห่างจากปลายรอยร้าว

3. อัตราส่วนของค่า Young's modulus มีการเปลี่ยนแปลงอย่างชัดเจน ในช่วง 0.2 – 1 ดังภาพที่ 1.7



ภาพที่ 1.7

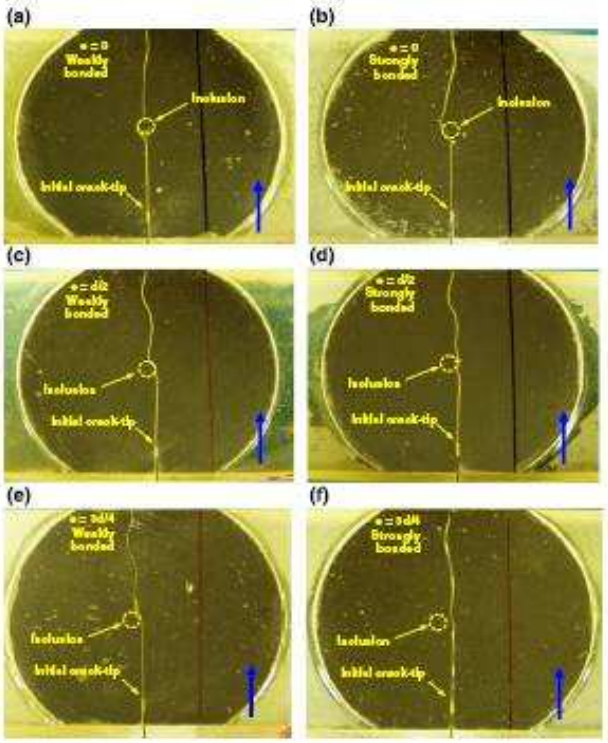
กราฟความสมพันธ์ระหว่างสัดส่วนของค่า Young's modulus กับค่า G

1.8.3 วารสารวิชาการของ Martin Baker, Computation Materials Science 43 (2008) 179-183 [11] เรื่อง Crack propagation calculation using trial cracks เป็นการนำเสนอโดยใช้ standard FEM code คำนวณหาทิศทางของ Crack ใน 2D จาก “trial crack” ที่ crack tip คำนวณหาค่า G เมื่อ crack ถูกเปิดออก ในการคำนวณหลาย ๆ ครั้งของความยาวของ crack ซึ่งอธิบายการหาค่า G ได้ โดย test 2 แบบคือ three point bending ที่มี crack อยู่ตรงกลางและเอียงกับการขยายตัวของ crack ใกล้ inclusion สรุปได้ดังนี้

1. ความยาวของ crack มีผลต่อการศึกษาการขยายตัวของ crack สามารถประยุกต์ใช้ได้ทั้ง mixed mode โดยที่ความยาวของ Crack มาก ยิ่งต้องใช้ mesh และไม่แม่นยำ

2. Crack จะขยายตัวเข้าหา soft inclusion แต่จะขยายตัวออกจาก hard inclusion

1.8.4 วารสารวิชาการของ R. Kitey, Experimental Mechanics (2008) 48:37-53 [13] เรื่อง Dynamic Crack Growth Past a Stiff Inclusion: Optical Investigation of Inclusion Eccentricity and Inclusion-matrix Adhesion Strength ทดลองโดยมี Inclusion แบบแข็ง (แก้ว) แต่มีสาร silane ทาเคลือบผิวทำให้แข็งขึ้นกับไม่มีการทาด้วยสารดังกล่าว โดยวาง Inclusion ทั้งแนวตรงกับรอยร้าวและเยื้อง (e=0, e=d/2 and 3d/4) ศึกษาโดยใช้ Reflection mode Coherent Gradient Sensing (CGS) and high speed photography วัสดุเป็น Particulate Polymer Composites พบว่าการเครื่องที่ของรอยร้าวผ่านวัสดุผสมที่ต่างชนิดกันให้ผลที่ต่างกันภาพที่ 1.8



ภาพที่ 1.8

ผลการเปรียบเทียบการทดลองของ R. Kitey

1.8.5 วารสารวิชาการของ Z.Li and Q.Sheng, Acta Mechanics 187 1-9 (2006) [14] เรื่อง A generally applicable approximate solution for mixed mode crack-inclusion interaction ศึกษาความสัมพันธ์ของรอยร้าวกับ Inclusion ที่มีขนาดใหญ่ โดยทำการทดลองที่หลาย ๆ ค่าของอัตราส่วนค่า Young's modulus และหลาย ๆ มุมของรอยร้าวโดยความสัมพันธ์ดังต่อไปนี้

1. ที่มุมที่เปลี่ยนไป ค่า K จะเปลี่ยนไปโดยมีความสัมพันธ์คือ ยิ่งมุมของรอยร้าวมีค่ามากขึ้น K_I จะมีค่าลดลงในทางตรงกันข้าม K_{II} จะมากขึ้น โดยที่จะเท่ากัน เมื่อรอยร้าวทำมุม 45° กับแนวระนาบ

2. ที่อัตราส่วนของค่า Young's Modulus ระหว่างวัสดุหลักกับวัสดุผสมที่ต่างกัน ส่งผลให้ค่า K ต่างกัน โดยที่มุมของรอยร้าวคือ 60° ค่า K_I จะมีค่าลดลงเมื่อเพิ่มค่า Young's Modulus ของวัสดุผสม ในทางตรงกันข้าม K_{II} กลับเพิ่มขึ้น