

การวิเคราะห์การฉีกขาดของยางคงรูปด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ Finite Element Analysis of Tearing Behavior for Vulcanized Rubber

ศิริเทพ พรหมโสภณ^{1*}, อริสรา ชัยกิตติรัตน์¹, ศศิธร พิทักษ์ฐานพงษ์²

¹ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล โทรศัพท์ 02 5870026 ต่อ 402 โทรสาร 02 5869541 *อีเมลล์ acn@kmitnb.ac.th

²ภาควิชาวิศวกรรมการผลิต โทรศัพท์ 02 5870026 ต่อ 8215 โทรสาร 02 5870029 อีเมลล์ sstp@kmitnb.ac.th

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ เขตบางซื่อ กรุงเทพฯ 10800

Siritape Promsopa^{1*}, Arisara Chaikittiratna¹, Sasithon Pitakthapanaphong²

¹ Department of Mechanical Engineering, Tel.02 5870026 Ext.402, Fax.02 5869541, *E-mail: acn@kmitnb.ac.th

² Department of Production Engineering, Tel.02 5870026 Ext. 8215, Fax. 02 5870029, E-mail: sstp@kmitnb.ac.th

Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology North Bangkok, Bangsue, Bangkok, 10800,

บทคัดย่อ

ปัจจุบันได้มีการนำยางคงรูปไปประยุกต์ใช้ในงานวิศวกรรมอย่างหลากหลาย เพราะยางคงรูปมีคุณสมบัติเฉพาะที่เหมาะสมต่อสนองความต้องการในงานวิศวกรรมได้ดี งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาและทำนายพฤติกรรมการฉีกขาดของยางคงรูปผสมคาร์บอนดำ ด้วยแบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ จากการประยุกต์ใช้ทฤษฎีกลศาสตร์การแตกหัก พิจารณาจากอัตราการปล่อยพลังงานความเครียด (G) หรือสำหรับวัสดุยางเรียกว่าพลังงานการฉีกขาด (T) ซึ่งคำนวณได้จากอัตราการเปลี่ยนแปลงพลังงานรวมของชั้นทดสอบต่อพื้นที่รอยฉีกขาดหรือใช้วิธีการอินทิเกรตตามเส้นทางเดิน J-Integral จากการวิเคราะห์แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์เปรียบเทียบกับผลในการทดลองพบว่า การวิเคราะห์ด้วยวิธีการเปลี่ยนแปลงพลังงานรวมจะสามารถใช้แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ที่มีเมชหยาบได้และจะให้ผลที่มีความแม่นยำ ความเครียดต่ำแต่จะไม่สามารถแสดงพฤติกรรมวัสดุบริเวณปลายรอยฉีกขาดได้ดี ส่วนวิธี J-Integral เป็นระเบียบวิธีที่มีความซับซ้อนและจำเป็นต้องมีการเมชที่เหมาะสมจึงจะให้ผลที่ดีและสามารถใช้ได้กับความเค้นความเครียดสูงแต่มีข้อจำกัดในเรื่องการเสีรูปของเอลิเมนต์ที่บริเวณปลายของรอยฉีกขาดเป็นสาเหตุทำให้การวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ไม่ประสบผลสำเร็จ งานวิจัยนี้ได้เสนอแนวทางการประยุกต์ใช้เทคนิควิธี J-Integral ในการคำนวณหาวิเคราะห์หาค่าความแตกต่างของอัตราการปล่อยพลังงาน ΔG ของล้อยางที่มีรอยฉีกขาดเพื่อเป็นข้อมูลพื้นฐานในการวิเคราะห์อัตราการขยายรอยฉีกขาดและทำนายอายุการใช้งานยางต่อไป

Abstract

Rubber vulcanizate is a material which is widely used in many applications because its specific properties are suitable for engineering requirements. The suitable design of rubber product is very important. The objective of this research is to study failure behavior of the carbon black filled rubber vulcanizate by using finite element method and applying Fracture Mechanic analysis in with strain energy release rate (G). Two methods of calculating G were investigated namely : The Global Energy balance and The J-Integral method. When compare with experimental data, the global energy balance method shows good agreement at small strain. The J-Integral method which requires more complicated procedure gives good agreement covering to large strain. The J-Integral method was also applied to calculate ΔG of a crack in a pneumatic tire, for the purpose of predicting its service life.

1. บทนำ

จากอดีตที่ผ่านมาอุตสาหกรรมการผลิต ผลิตภัณฑ์จากยางในประเทศไทย ยังเป็นแบบการลองผิดลองถูกและประยุกต์การออกแบบจากต่างประเทศทำให้การออกแบบผลิตภัณฑ์ที่เหมาะสมไม่ใช่ประเด็นที่ได้รับความสนใจจากผู้ผลิต ส่งผลให้งานวิจัยเกี่ยวกับผลิตภัณฑ์ยางมีทิศทางมุ่งเน้นพัฒนาคุณสมบัติของยาง โดยจะสนใจที่ส่วนประกอบยางและกระบวนการผลิตเป็นหลัก แต่ปัจจุบันยางที่เป็นวัตถุดิบมีราคาเพิ่มสูงขึ้น ทำให้ทิศทางของงานวิจัยเปลี่ยนไปเป็นการวิจัยและ

พัฒนาผลิตภัณฑ์ให้เหมาะสมกับการใช้งาน โดยต้องอาศัยองค์ความรู้ในการวิเคราะห์ความเสียหายและคุณสมบัติทางกลของผลิตภัณฑ์อย่างอย่างมีทฤษฎีและแบบแผน ซึ่งเป็นพื้นฐานที่สำคัญในการพัฒนาคุณภาพของสินค้าที่สามารถตอบสนองความต้องการของลูกค้าได้

ดังนั้นเพื่อเป็นการตอบสนองความต้องการความรู้ในการวิเคราะห์ความเสียหายของยาง ผู้วิจัยได้ทำการศึกษาวิเคราะห์พฤติกรรมการฉีกขาด (Tear Behavior) ของวัสดุประเภทยาง และทำนายค่าพลังงานการฉีกขาดของชิ้นทดสอบวัสดุยางโดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ เพื่อเปรียบเทียบกับเกณฑ์ความเสียหายของวัสดุ สามารถนำมาเป็นข้อกำหนดเบื้องต้นในการออกแบบและการเลือกใช้วัสดุที่เหมาะสมในงานวิศวกรรมต่อไป

1.1 วัตถุประสงค์

1.1.1 ศึกษาพฤติกรรมการฉีกขาดของชิ้นทดสอบยาง

1.1.2 ศึกษาวิธีการคำนวณค่าอัตราการปล่อยพลังงานหรือพลังงานการฉีกขาด

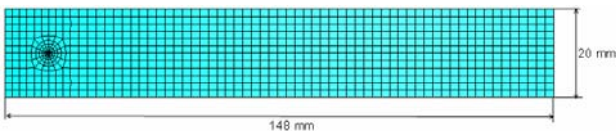
1.1.3 ประยุกต์ความรู้เพื่อหาแนวทางในการทำนายอายุการใช้งานของล้อยางต้น

2. วิธีการดำเนินการ

ในงานวิจัยนี้ได้แบ่งงานออกเป็น 2 ส่วนคือ การจำลองและการทดสอบการฉีกขาดของชิ้นทดสอบด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ และการประยุกต์หาความต่างของพลังงานการฉีกขาดของล้อลมยางในการหมุนครบหนึ่งรอบ เพื่อเป็นข้อมูลเบื้องต้นในการทำนายอายุการใช้งานหรืออัตราการขยายตัวของรอยฉีกขาด

2.1 แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของชิ้นทดสอบ

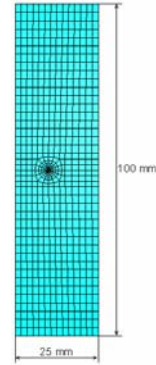
การจำลองพฤติกรรมการรับแรงดึงของชิ้นทดสอบมี 2 แบบ คือแบบความกว้างคงที่และแบบแรงดึง ดังแสดงในรูปที่ 1 และ 2



รูปที่ 1 แบบจำลองชิ้นทดสอบแบบความกว้างคงที่

โดยแบบจำลองชิ้นทดสอบจะมีรอยฉีกขาดเริ่มต้นขนาดต่างๆ กันคือแบบความกว้างคงที่มีขนาด 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35 มม. และแบบแรงดึงมีขนาด 5, 10, 15 มม.

การจำลองการรับโหลดของชิ้นทดสอบ จะพิจารณาให้ชิ้นทดสอบถูกยึดไว้ด้านหนึ่งและมีแรงมากระทำกับอีกด้านของชิ้นทดสอบ โดยจะควบคุมแรงจากระยะยึดที่เพิ่มขึ้นคล้ายการทดลอง การวิเคราะห์เป็นแบบระนาบความเค้น (Plane Stress) ชิ้นทดสอบมีความหนา 2 มม.



รูปที่ 2 แบบจำลองชิ้นทดสอบแบบแรงดึง

การสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ จำลองพฤติกรรมของยางภายใต้แรงดึงจะต้องสอดคล้องกับการวิเคราะห์พลังงานการฉีกขาด ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้เสนอไว้ 2 วิธีคือจากวิธีการเปลี่ยนแปลงพลังงานรวมและวิธี J-Integral [1]

2.1.1 วิธีการหาค่าพลังงานความเครียดรวม

เป็นการนำแรงปฏิกิริยากับ ระยะยึด จากผลจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ มาหาค่าพลังงานความเครียดรวม [1,2]

$$U = \int Fdl \quad (1)$$

โดย F คือแรงที่กระทำกับชิ้นทดสอบและ l คือ ระยะยึด และจะเปลี่ยนระยะรอยฉีกขาดเริ่มต้น (a) โดยเลื่อนจุดปลายรอยฉีกขาดไป แล้วนำมาเขียนกราฟ สร้างความสัมพันธ์ระหว่าง U กับ a

จากนั้นการคำนวณหาค่าอัตราการปลดปล่อยพลังงาน (Strain Energy Release Rate) จากการหาค่าอนุพันธ์ของความสัมพันธ์จะได้ค่า อัตราการปลดปล่อยพลังงาน ที่ระยะยึดต่างๆ ดังแสดงในสมการ

$$G = \left. \frac{dU}{da} \right|_l \quad (2)$$

2.1.2 การคำนวณค่า J-Integral

การคำนวณค่าอัตราการปลดปล่อยพลังงานแบบที่ไม่จำเป็นต้องเลื่อนจุดปลายของรอยฉีกขาดคือการคำนวณค่า J-Integral ดังแสดงในสมการ [1,2]

$$J = \int_{\Gamma} \left(W dy - T_i \frac{du_i}{dx} ds \right) \quad (3)$$

W คือ ความหนาแน่นพลังงานความเครียด

T_i คือ ความเค้นที่กระทำตั้งฉากกับแนวเส้นขอบ

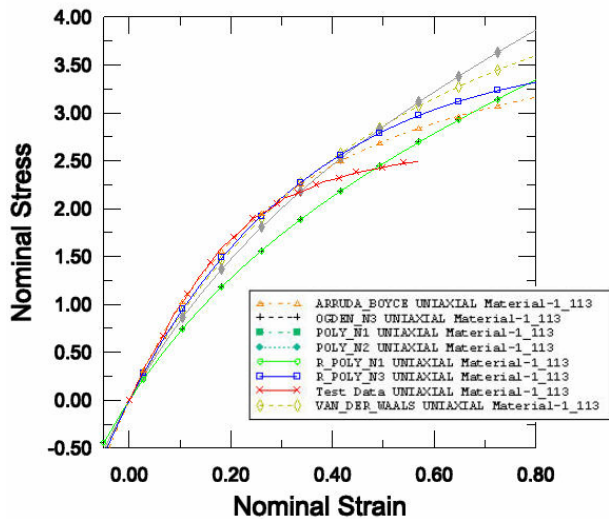
Γ คือ ขอบเขตที่ล้อมรอบจุดปลายรอยฉีกขาด

ds คือ ระยะส่วนย่อยที่เพิ่มขึ้น ตามแนวเส้นขอบ Γ

2.2 แบบจำลองพฤติกรรมวัสดุไฮเปอร์อีลาสติก [3]

เป็นการสร้างสมการแสดงพฤติกรรมวัสดุเพื่อใช้ในการคำนวณไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยนำข้อมูลการทดสอบ มาสร้างแบบจำลองฟังก์ชันพลังงานความเครียด ข้อมูลที่ใช้ในการวิจัยนี้เป็นข้อมูลจากการทดสอบการแบบการดึงในแนวแกนเดียว (Uniaxial Tensile Test) และการ

ทดสอบแบบการดึงแบบความกว้างคงที่ (Planar Tensile Test) จาก การหาสัมประสิทธิ์เมื่อเปรียบเทียบกับแบบจำลองของโยวี่ (Yeoh) สามารถแสดงแทนพฤติกรรมของวัสดุในช่วงที่จะวิเคราะห์ได้ดีที่สุด



รูป 3 การเปรียบเทียบแบบจำลองไฮเปอร์อีลาสติก

ตารางที่ 1 สัมประสิทธิ์แบบจำลองของโยวี่

C ₁₀ (MPa)	C ₂₀ (MPa)	C ₃₀ (MPa)
1.31373254	-0.1141838	8.155E-03

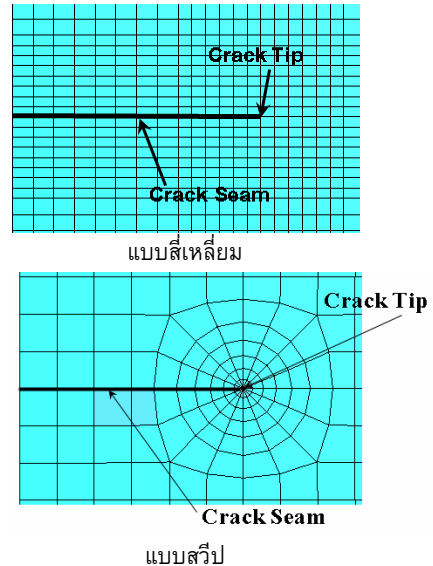
2.3 แบบจำลองการฉีกขาดของชิ้นทดสอบ

หลังจากสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของชิ้นทดสอบในแบบ 2 มิติกระบวนการต่อมาคือการแบ่งแบบจำลองออกเป็นชิ้นส่วนย่อยๆ เรียกว่าการเมชโดยใช้โปรแกรมอะบาคัส ซีอี (ABAQUS/CAE) การเมชลักษณะรูปร่างเอลิเมนต์แบบสี่เหลี่ยมเป็นหลัก โดยให้เอลิเมนต์มีคุณภาพกล่าวคือให้เอลิเมนต์ไม่มีการบิดตัวมากที่สุด ยกเว้นที่บริเวณปลายรอยแตกหักจะใช้การเมชแบบพิเศษ โดยจะทำการแบ่งพาร์ติชัน (Partition) แยกส่วนออกไปโดยจะสนใจการเมชเป็นสามลักษณะส่วน บริเวณรอยฉีกขาด คือการเมชแบบสวีป การเมชแบบสี่เหลี่ยมปกติ และการเมชแบบสามเหลี่ยม

2.3.1 การเมชแบบสวีป

การเมชแบบสวีปจะแบ่งพาร์ติชันออกเป็นวงกลม และทำการเมช ลักษณะเอลิเมนต์แบบพิเศษ ใช้อัลกอริทึมในการเมชแบบสวีป (Sweep Mesh) เอลิเมนต์จะมีลักษณะเป็นสามเหลี่ยม ส่วนที่บริเวณอื่นจะเป็น การเมชแบบฟรี (Free Mesh) รูปที่ 4 การแบ่งจำนวนเอลิเมนต์บริเวณ รอยฉีกขาดใช้แบ่งพาร์ติชันวงกลมออกเป็น 16 ส่วน และในตามแนว รัศมีจะแบ่งออกเป็น 5 ส่วน โดยขนาดแต่ละส่วนจะเป็นสัดส่วนเพื่อให้ เอลิเมนต์มีขนาดที่เหมาะสม ทำได้โดยการใช้เครื่องมือของโปรแกรม ในโมดูลเมช (Mesh Module) ใช้ การแบ่งแบบ ไบแอส (Bias Seed) ให้ทิศทางเข้าสู่จุดศูนย์กลาง มีอัตราส่วนไบแอส (Bias Ratio) [4] เป็น 2 ดังแสดงในรูปที่ 5

ที่บริเวณรอยปลายรอยฉีกขาดของแบบจำลอง จะเป็นเอลิเมนต์ แบบพิเศษแบบซิงกูลาริตีจำนวน 16 เอลิเมนต์ โดยแบ่งเป็น 5 ชั้น แต่ละเอลิเมนต์มีอัตราส่วนของโหนดตรงกลางของเอลิเมนต์เป็น 1/4



รูปที่ 4 การเมชบริเวณปลายรอยฉีกขาด

2.3.2 การเมชแบบสี่เหลี่ยม

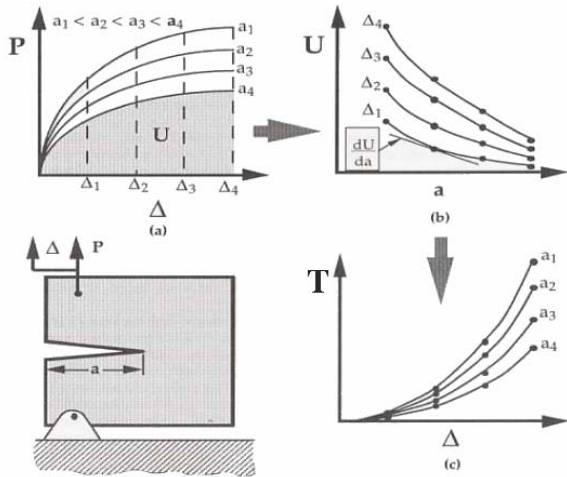
การเมชแบบสี่เหลี่ยมจะแบ่งพาร์ติชันออกเป็นสี่เหลี่ยมล้อมรอบ ปลายรอยฉีกขาด และทำการเมชโดยใช้เอลิเมนต์ลักษณะเป็นสี่เหลี่ยม เป็นการเมชแบบฟรี (Free Mesh) [4] การแบ่งส่วนย่อยให้สี่เหลี่ยมที่ บริเวณล้อมรอบรอยฉีกขาดแบ่งย่อยเป็น 400 ส่วนหรือเป็น 400 เอลิเมนต์โดยแต่ละเอลิเมนต์มีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยม

2.4 การทดสอบการฉีกขาดของยาง

ในการทดสอบการฉีกขาดทำได้โดยนำชิ้นทดสอบทั้ง 2 แบบมาที่มีรอยฉีกขาดเริ่มต้น (a) แบบความกว้างคงที่มีขนาด 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35 มม. และแบบแรงดึงมีขนาด 5, 10, 15 มม. มาติดตั้งด้วย เครื่องทดสอบอเนกประสงค์ Instron โดยกำหนดระยะยึดของชิ้น ทดสอบ โดยข้อมูลที่ได้จะเป็นค่าแรงที่ดึงชิ้นทดสอบที่ระยะยึดต่างๆ ของแต่ละขนาดรอยฉีกขาดเริ่มต้น [5]



รูปที่ 5 การทดสอบการฉีกขาด



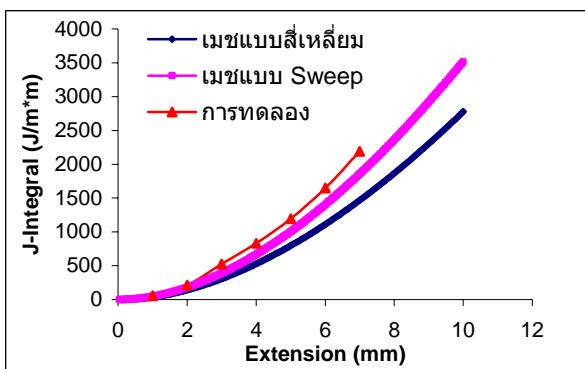
รูปที่ 6 การหาค่าพลังงานการฉีกขาดจากวิธีอัตราการเปลี่ยนพลังงานรวม

ในการคำนวณพลังงานการฉีกขาดสามารถทำได้โดยนำข้อมูลมาหาพื้นที่ใต้กราฟจะได้พลังงาน U ที่ขนาดรอยฉีกต่าง ๆ ตามรูปที่ 6a จากนั้นนำ U มาเขียนกราฟใหม่ที่มีสัมพันธ์กับขนาดรอยฉีกขาด ตามรูปที่ 6b ขั้นตอนต่อไปหาค่าความชันของกราฟที่ได้ในขั้นตอนที่ 2 ที่ระยะยืดใด ๆ จะได้ค่าอัตราการปล่อยพลังงานหรือพลังงานการฉีกขาดตามสมการที่ 2 และนำมาเขียนกราฟพลังงานการฉีกขาดต่อระยะยืดตามรูปที่ 6c ก็จะได้ค่าพลังงานการฉีกขาดที่ระยะยืดต่างๆ

3. ผลการวิเคราะห์การฉีกขาดจากขั้นตอนทดสอบ

3.1 อิทธิพลของลักษณะการเมฆบริเวณปลายรอยฉีกขาด

จากการจำลองการฉีกขาดของขั้นตอนทดสอบที่มีการเมฆบริเวณปลายรอยฉีกขาดลักษณะแตกต่างกันในสองลักษณะคือแบบเอลิเมนต์แบบสวீปและเอลิเมนต์แบบสี่เหลี่ยม ผลที่ได้เปรียบเทียบกับทดลองได้ผลดังนี้



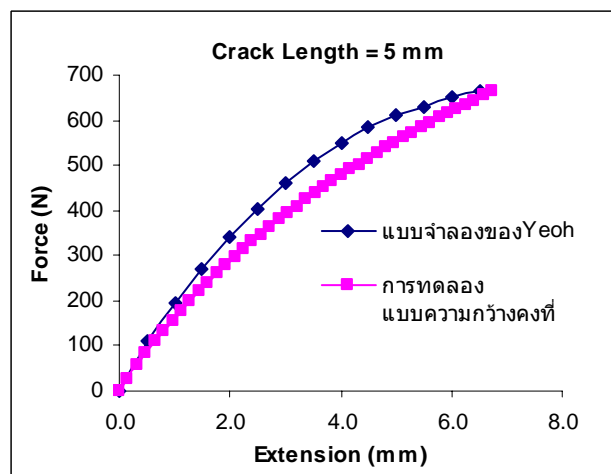
รูปที่ 11 เปรียบเทียบพลังงานการฉีกขาดจากการเมฆที่แตกต่างกัน

จากผลในรูปที่ 11 พบว่าค่า J -Integral จากการเมฆแบบสวี่ปจะได้ค่าที่มากกว่าการเมฆแบบสี่เหลี่ยมและใกล้เคียงกับค่าอัตราการปล่อยพลังงานจากการทดสอบมากกว่า ทำให้สามารถสรุปได้ว่า

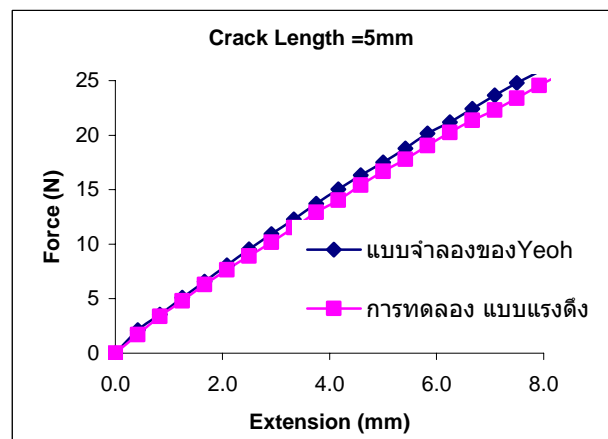
ลักษณะการเมฆมีผลต่อการคำนวณค่า J -Integral แต่ในช่วงที่มีระยะการยืดตัวน้อยอิทธิพลจากการเมฆอาจจะไม่เด่นชัดแต่สำหรับเอลิเมนต์แบบสี่เหลี่ยมจะมีเสถียรภาพในการคำนวณทางไฟไนต์เอลิเมนต์คือจะมีการเสียรูปของเอลิเมนต์ที่บริเวณปลายรอยฉีกขาดน้อยกว่าแบบสวี่ปในงานวิจัยนี้จึงพิจารณาเลือกใช้การเมฆแบบสวี่ปเป็นหลัก

3.2 การยืนยันความถูกต้องของแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์

งานวิจัยนี้ยืนยันความถูกต้องของแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ด้วยการเปรียบเทียบจากผลของแรงที่กระทำกับชิ้นงาน (F) และค่าการเคลื่อนตัวในแนวเดียวกับแรงดึงที่บริเวณขอบของชิ้นทดสอบ (u) ดังแสดงในรูปที่ 7 และรูปที่ 8 เนื่องจากเป็นพารามิเตอร์ที่สามารถวัดได้โดยตรงจากการทดสอบ



รูปที่ 7 เปรียบเทียบค่าเคลื่อนตัวการจำลองกับการทดสอบแบบความกว้างคงที่



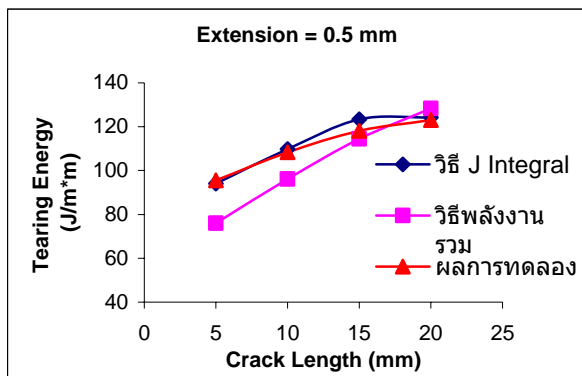
รูปที่ 8 เปรียบเทียบค่าเคลื่อนตัวการจำลองกับการทดสอบแบบแรงดึง

จากการพิจารณาพบว่าค่าแรงและระยะยืดตามแนวแรง ระหว่างการจำลองด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์กับการทดลอง มีแนวโน้มสอดคล้องไปทางเดียวกันทั้งสองการวิเคราะห์ แต่มีข้อแตกต่างที่เกิดจากสมมติฐานในการจำลอง ที่กำหนดให้วัสดุเป็นวัสดุเอกพันธ์ที่มีเนื้อเดียว

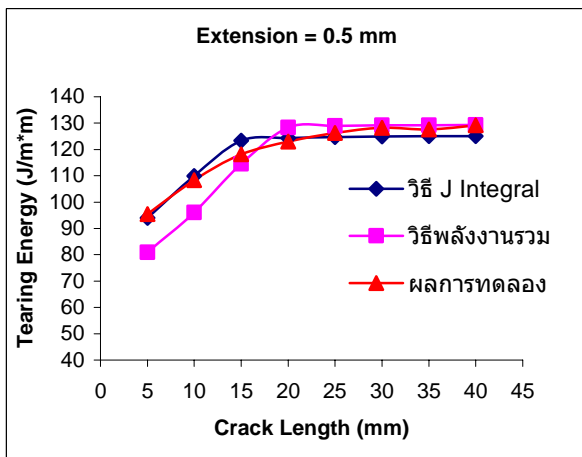
ตลอดทั้งชั้นทดสอบและแบบจำลองวัสดุที่แสดงแทนพฤติกรรมด้วยสมการทางคณิตศาสตร์ไม่สามารถแสดงแทนพฤติกรรมของวัสดุได้ในช่วงความเค้นความเครียดที่มีค่าสูง

3.3 อิทธิพลของวิธีในการคำนวณพลังงานการฉีกขาด

พบว่าวิธี J-Integral จะให้ผลที่ดีกว่าวิธีการเปลี่ยนแปลงพลังงานรวมแต่แบบจำลองจะมีความซับซ้อนมากกว่า และมีข้อจำกัดด้านการเมชแบ่งเป็นเอลิเมนต์บริเวณปลายรอยฉีกขาด เพราะเอลิเมนต์ในบริเวณนี้จะมีการเสียรูปสูงอาจทำให้การคำนวณไม่สามารถเข้าสู่หาค่าผลเฉลยได้ ผลการหาค่าพลังงานการฉีกขาดทั้งสองวิธีเปรียบเทียบกับผลการทดลอง ในรูปที่ 9 และ 10 พบว่าวิธีการหาค่าพลังงานการฉีกขาดจาก J-Integral จะให้ผลที่ใกล้เคียงกับการทดลองมากกว่าวิธีพลังงานรวม



รูปที่ 9 พลังงานการฉีกขาดจากวิธีการที่ต่างกัน จากการวิเคราะห์แบบแรงดึง



รูปที่ 10 พลังงานการฉีกขาดจากวิธีการที่ต่างกัน จากการวิเคราะห์แบบความกว้างคงที่

4. แนวทางการประยุกต์ใช้พลังงานการฉีกขาดในการวิเคราะห์การฉีกขาดของล้อยาง

การศึกษาแนวทางหาค่าพลังงานการฉีกขาดในภาวะเสมือนล้อยาง จุดที่มีค่าสูงสุดและต่ำสุดของพลังงานการฉีกขาด คือตำแหน่งที่ล้อยางสัมผัสกับพื้น และที่จุดด้านตรงข้ามกับด้านที่สัมผัสพื้น โดยจะ

สนใจที่ค่าความต่างของพลังงานการฉีกขาดของทั้งสองตำแหน่ง หากได้ความต่างและทราบพฤติกรรมกรล้อยางวัสดุ ก็จะสามารถทำนายจำนวนรอบอายุการใช้งานของยางได้ ตามสมการที่ 4 [6]

$$\frac{dc}{dn} = A(\Delta G)^m \quad (4)$$

เมื่อ $\frac{dc}{dn}$ คืออัตราการขยายตัวของรอยฉีกขาด (มม.ต่อรอบ) A,m คือค่าคงที่ขึ้นกับคุณสมบัติวัสดุและ ΔG คือค่าความแตกต่างของพลังงานการฉีกขาดในหนึ่งรอบ (จูลต่อเมตร)

ในการพิจารณาวิเคราะห์การฉีกขาด ในล้อยาง จะต้องพิจารณาถึงตำแหน่ง ที่จะเกิดการขยายตัวของรอยฉีกขาดเริ่มต้น ทำให้จากการวิเคราะห์รูปร่างดอกยาง พิจารณาจากการวิเคราะห์การกระจายความเค้นความเครียด จากนั้นทำการกำหนดแบบจำลองการฉีกขาด (Cracking Model) บริเวณที่ได้กำหนดไว้เพื่อทำการวิเคราะห์พฤติกรรมกรล้อยางของล้อยางภายใต้โหลดน้ำหนักบรรทุก โดยการวิเคราะห์การฉีกขาดจะแสดงในรูปพารามิเตอร์พลังงานการฉีกขาด ซึ่งเป็นกรวิเคราะห์ในทางกลศาสตร์การแตกหัก เพื่อหาเกณฑ์การออกแบบที่เหมาะสม

การจำลองจะให้โหลดแก่ล้อยางสองลักษณะคือความดันลมยางขนาด 900 kPa [6] กระทำที่ผิวในของยาง และโหลดจากน้ำหนักบรรทุกกระทำอีก 4 ตัน กำหนดให้การสัมผัสระหว่างพื้นกับล้อยางเป็นแบบ Hard และล้อยางจะประกอบไปด้วยโครงสร้างมีคุณสมบัติดังตารางที่ 2 และในส่วนประกอบประกอบที่เป็นวัสดุยางในตารางที่ 3

ตารางที่ 2 คุณสมบัติวัสดุในองค์ประกอบล้อยาง

Material	E (GPa)	Poission's Ratio ν
ลวดเหล็ก (Bead)	200	0.3
ชั้นผ้าใบ (Plies)	5	0.3

ตารางที่ 3 สัมประสิทธิ์แบบจำลองของโยว์

องค์ประกอบ	C_{10} (MPa)	C_{20} (MPa)	C_{30} (MPa)
แก้มยาง (Sidewall)	1.313732	-0.114183	8.15E-03
ดอกยาง (Tread)	2.124	-0.13515	2.457E-03

การหาค่าความต่างของพลังงานการฉีกขาดของล้อยางที่มีรอยฉีกขาดเริ่มต้นอยู่ที่กลางร่องดอกยาง โดยจะพิจารณาที่ตำแหน่งที่มีความดันลมยางอย่างเดียวและที่มีความดันลมยางกับโหลดบรรทุกน้ำหนัก ในเบื้องต้นได้พิจารณาความเค้นความเครียดที่เกิดขึ้นในหน้าตัดของล้อยางที่มีรอยฉีกขาดเริ่มต้น

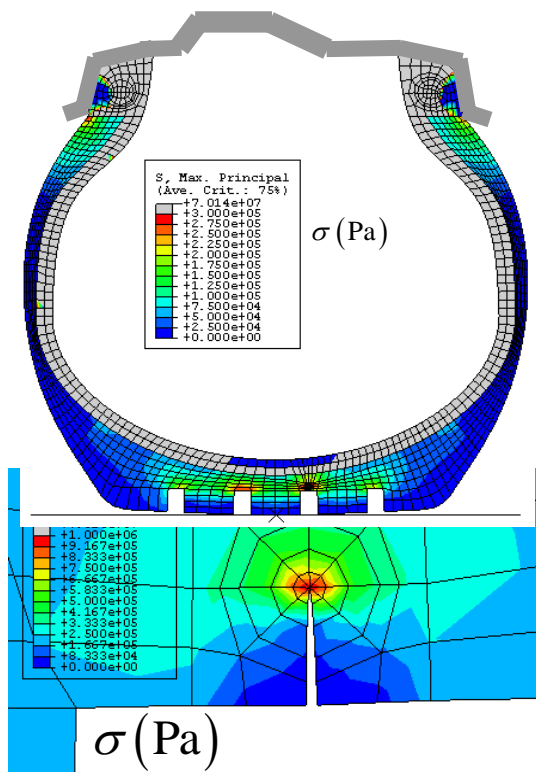
ในส่วนของค่าพลังงานการฉีกขาดผลจากการจำลองจะให้ผลค่า J-Integral ตามเส้นทางเดิน (Contour) ต่างๆ ตามชั้นของเอลิเมนต์ที่ล้อมรอบปลายรอยฉีกขาดที่ทำไว้ในแบบจำลอง สามารถแสดงได้ใน

ตารางที่ 4 โดยจะเปรียบเทียบและหาค่าความแตกต่างของพลังงานการฉีกขาด (ΔT) ขณะมีน้ำหนักรบรรทุกกับความดันลมภายในอย่างเดียวย ของเส้นทางเดินที่ 1-6 ทำการเฉลี่ยค่าความต่างของพลังงานการฉีกขาดเท่ากับ 25.998 J/m^2 เพื่อเป็นข้อมูลในการนำไปวิเคราะห์ทำนายอัตราการขยายตัวของรอยฉีกขาด (Crack Growth) หรือทำนายอายุการใช้งานล้อยางในสมการที่ 4 ต่อไป

ตารางที่ 4 ค่าพลังงานการฉีกขาดตามเส้นทางเดินที่ 1-6 (J/m^2)

	Cont 1	Cont 2	Cont 3	Cont 4	Cont 5	Cont 6	ave.
Inflated	49.257	50.373	50.537	50.980	52.131	50.497	50.629
Load	24.067	24.615	24.740	24.916	24.464	25.046	24.641
Delta T	25.189	25.758	25.797	26.063	27.667	25.450	25.988

การวิเคราะห์ความต่างของพลังงานการฉีกขาดในล้อยางพบว่า จะใช้เส้นทางเดินที่ต้องพิจารณาที่ใกล้ปลายรอยฉีกขาดเพื่อไม่ให้มีผลจากรูปร่างบริเวณอื่น โดยงานวิจัยนี้พิจารณาที่ 6 วงเส้นทางเดินที่อยู่ใกล้ปลายรอยฉีกขาด พบว่า เมื่อทราบค่าและทราบค่าคงที่ซึ่งเป็นสมบัติของวัสดุในสมการที่ 4



รูปที่ 12 การกระจายความเค้นในล้อยางที่ทำกรวิเคราะห์

5. สรุปผลการวิจัย

ในการวิเคราะห์ผลของลักษณะการเมฆที่บริเวณปลายรอยฉีกขาด พบว่าจะมีผลแตกต่างกัน เนื่องจากปลายรอยฉีกขาดจะมีความเค้นความเครียดสูงมีการเสีรูปร่างมากสำหรับวัสดุยาง ทำให้การเมฆแบบสวิปจะเหมาะสมกับการวิเคราะห์นี้มากกว่า แต่ก็มีผลในการคำนวณถ้ามีการแบ่งเมฆที่ละเอียดจนทำให้ Aspect Ratio มากหรือน้อยเกินไปจนเอลิเมนต์มีลักษณะแหลม จะทำให้การคำนวณไฟไนต์เอลิเมนต์ไม่สามารถหาผลเฉลยได้ จึงเลือกใช้การเมฆแบบสวิปในงานวิจัยนี้

ในการยืนยันความถูกต้องแบบจำลองขึ้นทดสอบ เมื่อพิจารณาจากค่าการเคลื่อนตัวที่ได้จากการจำลองเปรียบเทียบกับผลการทดลองซึ่งมีค่าใกล้เคียงและมีแนวโน้มไปในทางเดียวกันทั้งการวิเคราะห์แบบความกว้างคงที่และแบบแรงดึง

จากการศึกษาอิทธิพลของวิธีคำนวณค่าพลังงานการฉีกขาดพบว่าวิธี J-Integral ให้ผลการคำนวณที่ดีกว่าและแสดงพฤติกรรมบริเวณปลายรอยฉีกขาดได้ดีกว่า เมื่อพิจารณาจากรูปร่างการเสีรูปร่างของรอยฉีกขาด แต่ต้องใช้การคำนวณด้วยคอมพิวเตอร์ไม่สามารถใช้กับการทดลองได้ ส่วนวิธีการเปลี่ยนพลังงานรวมจะคำนวณได้ง่ายกว่าแต่ไม่สามารถแสดงพฤติกรรมที่บริเวณปลายรอยฉีกขาดได้ตลอดช่วง เพราะพฤติกรรมวัสดุมีความเค้นความเครียดสูง ในงานวิจัยนี้ยังได้นำเสนอแนวทางการประยุกต์ใช้ค่าพลังงานการฉีกขาด ในการคำนวณอัตราการขยายตัวของรอยฉีกขาดหรืออายุการใช้งานในล้อยางดังที่กล่าวมาแล้ว

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณบัณฑิตวิทยาลัยที่ให้การสนับสนุนทุนอุดหนุนการวิจัยบางส่วนจากทุนอุดหนุนการวิจัยเพื่อทำวิทยานิพนธ์ ในระดับบัณฑิตศึกษา ของบัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] Broek, D. Elementary Engineering Fracture Mechanics. 4th ed. Dordrecht : Kluwer Academic Publishers, 1991.
- [2] Anderson, T. L. Fracture Mechanics : Fundamentals and Applications. 2nd ed. Boca Raton : CRC Press, 1995.
- [3] นิวัตร มูลปา และ อริสรา ชัยกิตติรัตน์, "ไฮเปอร์อีลาสติกของยางเติมผงคาร์บอนดำ." วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ปีที่ 13 ฉบับที่ 4 เดือน ตุลาคม-ธันวาคม 2546
- [4] ABAQUS User's Manual Version 6.4. : ABAQUS, c2004.
- [5] Gent, N. Alan. Engineering with Rubber How to Design Rubber Components. 2nd ed. : Hansers, c2001.
- [6] Yan, Xiangqiao., Wang, Youshan. and Feng, Xijin. "Study for the endurance of radial truck with finite element modeling." Mathematics and Computers in Simulation. 59 (2002) : 471-488.