

การศึกษาผลกระทบของมุมเอียงของร่องล้อยางตีนตะขาบที่มีต่อการกระจายตัวของพลังงานความเครียดภายใต้การรับภาระแบบสถิตย์

Study on an Effect of the Inclination Angle of the Rubber Track on the Strain Energy Density Distribution under Static Loading

ศุภสิทธิ์ รอดขวัญ^{*1,2} ชุตินา ศักดิ์ชินบุตร^{1,2} ชนะ รัศมีศิริ³

¹ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

² ศูนย์เชี่ยวชาญเฉพาะทางแม่พิมพ์ยาง สถาบันค้นคว้าและพัฒนาเทคโนโลยีการผลิตทางอุตสาหกรรม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

³ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เขตจตุจักร กรุงเทพฯ 10900

Supasit Rodkkwan^{* 1,2} Chutima Sakchinbud^{1,2} Chana Raksin³

¹ Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University,

² Center of Excellence in Rubber Mould, Research and Development Institute of Industrial Production Technology, Faculty of Engineering, Kasetsart University,

³ Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Bangkok, Thailand 10900

Tel: 0-2942-8555 Ext: 1810 E-mail: fengssr@ku.ac.th

บทคัดย่อ

ล้อตีนตะขาบที่ใช้ในงานด้านการเกษตรกรรมในประเทศไทยมีอยู่ 2 แบบ ได้แก่ ล้อเหล็กตีนตะขาบและล้อยางตีนตะขาบ ปัจจุบันมีการพัฒนาล้อยางตีนตะขาบเพื่อให้มีความคล่องตัวมากขึ้น และมีเสียงรบกวนน้อยลง จึงทำให้ภาคการเกษตรในประเทศไทยเริ่มหันมาใช้ล้อยางตีนตะขาบประเภทนี้ยิ่งขึ้น อย่างไรก็ตามก็เกิดเกษตรกรไทยก็ยังประสบปัญหาสำคัญ คือ ล้อยางตีนตะขาบรูปแบบที่นิยมใช้อยู่ในปัจจุบัน ที่มีมุมเอียงของร่อง 45 องศา มักจะเกิดความเสียหายขณะใช้งาน ประกอบกับผู้ผลิตล้อยางตีนตะขาบในประเทศไทยยังขาดองค์ความรู้ในการออกแบบและผลิตอยู่ ทำให้ต้องนำเข้าผลิตภัณฑ์ดังกล่าวจากต่างประเทศเป็นส่วนใหญ่ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้นำคอมพิวเตอร์ช่วยงานวิศวกรรมที่ใช้การจำลองพฤติกรรมของวัสดุที่เป็นไฮเปอร์อีลาสติคของยางธรรมชาติ ตามฟังก์ชันพลังงานความเครียดของฮ็อกเคน โดยอาศัยค่าความหนาแน่นของพลังงานความเครียดในการวิเคราะห์และ

ทำนายความเสียหายของล้อยางตีนตะขาบ ภายใต้การรับภาระแบบสถิตย์ ที่มีมุมเอียงของร่องเป็น 35 45 55 และ 65 องศา ตามลำดับ ผลการจำลองทำให้ทราบว่าค่าของพลังงานความเครียดหนาแน่นจะลดลงเมื่อล้อยางตีนตะขาบมุมเอียงของร่องลดลง ดังนั้นมุมเอียงของร่องที่เหมาะสมในการพัฒนาการออกแบบจึงเป็น 35 องศา ซึ่งจะทำให้เกิดค่าความหนาแน่นของพลังงานความเครียด 20.00 MJ/m³

คำหลัก: ล้อตีนตะขาบ ล้อเหล็กตีนตะขาบ ล้อยางตีนตะขาบ ความหนาแน่นของพลังงานความเครียด มุมเอียงของร่อง

Abstract

In general, agricultural tracks can be classified into metal track and rubber track types. It becomes more common that rubber tracks are widely used in the agricultural industry. Nevertheless, there are damages occurred for the track of the inclination angle of 45 degrees. In

addition, there is a lack of fundamental understanding in the design of the agricultural rubber track which leads to poor quality of the track. In this work, the effect of the inclination angle, which varies 35 45 55 and 65 degrees, of the rubber track on the strain energy density distribution under static loading was studied. The simulation work was carried out based on Ogden hyperelastic model for the natural rubber used in this work. The results reveal that the strain energy density decreases when an inclination angle is reduced. In summary, within the range of parameters studied, the inclination angle of 35 degrees was selected and the resulting strain energy density was found as 20 mJ/m^3 .

Keywords: Agricultural track, metal track, rubber track, strain energy density, inclination angle

1. บทนำ

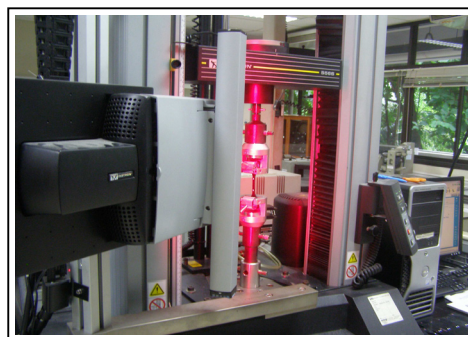
ผลิตภัณฑ์ยางในปัจจุบันมีบทบาทกับการดำรงชีวิตของมนุษย์มากขึ้น ไม่ว่าจะเป็นอุตสาหกรรมยานยนต์ อุตสาหกรรมอุปกรณ์ไฟฟ้า-อิเล็กทรอนิกส์ อุตสาหกรรมเครื่องสุขภัณฑ์ และอุตสาหกรรมเกษตรกรรม ซึ่งนับว่ายังเป็นพืชที่สร้างรายได้และเป็นหนึ่งในพืชเศรษฐกิจของประเทศไทย เนื่องจากประเทศไทยมีความพร้อมที่สุดในด้านผลิตรายธรรมชาติ และได้เป็นอันดับหนึ่งของโลก แนวโน้มในปี 2554 คาดว่าอุตสาหกรรมยางและผลิตภัณฑ์ยางจะขยายตัวได้อย่างต่อเนื่องตามภาวะเศรษฐกิจที่เติบโตขึ้น [1] แต่อย่างไรก็ตามสัดส่วนการใช้ยางดิบแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ในประเทศยังต่ำ อาทิเช่น ผลิตภัณฑ์ยางดินตะขบจากยางธรรมชาติซึ่งปัจจุบันมีผู้ผลิตอยู่ในหลายประเทศในแถบเอเชีย เช่น จีน เกาหลี ญี่ปุ่น และศรีลังกา [2] ส่วนภาคการเกษตรในประเทศไทยก็เริ่มหันมาใช้ล้อยางประเภทนี้เริ่มมากยิ่งขึ้น แต่การแปรรูปยางเพื่อเป็นผลิตภัณฑ์ล้อยางดินตะขบยังไม่สามารถทำได้โดยง่าย เนื่องจากมีข้อจำกัดทั้งในด้านเวลาและเทคโนโลยี ทำให้ต้องนำเข้าล้อยางดินตะขบจากต่างประเทศเป็นจำนวนมาก จากเหตุผลข้างต้น

คณะผู้วิจัยจึงนำคอมพิวเตอร์ช่วยในงานวิศวกรรม (Computer Aided Engineering, CAE) [3] เข้ามาประยุกต์ใช้กระบวนการออกแบบผลิตภัณฑ์ล้อยางดินตะขบ โดยทำการศึกษาเกี่ยวกับผลกระทบที่มีผลต่อมุมมองสายตาของดอกยาง [4] แทนการออกแบบเดิมซึ่งเป็นการลองผิดลองถูก (trial and error) ทำให้ช่วยลดเวลาและลดต้นทุนในการออกแบบผลิตภัณฑ์ ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับงานได้อีกหลากหลาย

2. อุปกรณ์และวิธีการ

2.1 การทดสอบสมบัติยาง

2.1.1 การทดสอบสมบัติการรับแรงดึงในแนวแกนเดียว (ดังแสดงในรูปที่ 1) โดยทั่วไปขั้นทดสอบต้องมีขนาดตามแนวยาวมากกว่าตามแนวกว้างและความหนาอย่างน้อย 10 เท่า [5] เพื่อให้การเปลี่ยนแปลงรูปร่างในแนวแรงดึงไม่มีผลของการเปลี่ยนรูปร่างในแนวแกนอื่นๆ มาเกี่ยวข้อง



รูปที่ 1 การทดสอบหนึ่งแนวแกน

สำหรับรูปร่างของชิ้นทดสอบนั้นไม่จำเป็นที่จะต้องเป็นรูปดัมป์เบลล์ (ดังแสดงในรูปที่ 2) และไม่ได้มีการกำหนดขนาดที่แน่นอนไว้ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความเหมาะสมของเครื่องมือทดสอบ ซึ่งข้อมูลที่ได้จากการทดสอบการรับแรงดึงในแนวแกนเดียวคือ ความเค้นกับความเครียด [6]



รูปที่ 2 ชิ้นทดสอบการดึงในแนวแกนเดียว

ลักษณะการเกิดความเค้นและการเปลี่ยนรูปในการทดสอบการรับแรงดึงในแนวแกนเดียว [6] สามารถคำนวณจากสมการที่ (1) และ (2) ตามลำดับ

- ลักษณะในการเกิดความเค้น :

$$\sigma_1 = \sigma = \frac{P}{A_0}, \sigma_2 = \sigma_3 = 0 \quad (1)$$

- ลักษณะในการเปลี่ยนรูป :

$$\lambda_1 = \lambda = \frac{l}{l_0}, \lambda_2 \approx \lambda_3 \approx \frac{1}{\sqrt{\lambda}} \quad (2)$$

σ คือ ความเค้นในการรับแรงดึงในแนวแกนเดียว

λ คือ อัตราส่วนการยืดในแนวการดึง

l คือ ความยาวขณะยืด ณ แรงใดๆ

l_0 คือ ความยาวเริ่มต้นของชิ้นตัวอย่าง

สำหรับการทดสอบนั้นจะต้องทำการดึงจนกระทั่งผลของของเหลวหนืด (viscous effect) หดไป ทำให้ยางอยู่ในภาวะสมดุล ซึ่งสามารถทำได้โดยการดึงชิ้นทดสอบไปกลับหลายๆ รอบหรืออาจดึงชิ้นทดสอบค้างไว้ที่ระยะที่ต้องการแล้วปล่อยให้ยางคลายตัวเข้าสู่ภาวะสมดุลเอง หลังจากนั้นจึงนำเฉพาะผลการทดสอบรอบสุดท้ายซึ่งยางเข้าสู่ภาวะสมดุลแล้วมาใช้

2.1.2 การทดสอบสมบัติการรับแรงกดอัดในแนวแกนเดียว (ดังแสดงในรูปที่ 3) จะมีความยุ่งยากเนื่องจากสาเหตุหลัก 2 ประการคือ ประการแรกเนื่องจากชิ้นงานมีลักษณะเป็นทรงกระบอกที่มีความหนาแน่น จึงต้องใช้แม่พิมพ์ในการขึ้นรูปแยกต่างหากซึ่งอาจจะทำให้ชิ้นทดสอบที่ได้มีสมบัติแตกต่างไปจากชิ้นทดสอบที่ใช้ในการทดสอบสมบัติอื่นๆ เมื่อเทียบกับการตัดชิ้นทดสอบในยางแผ่นทดสอบอันเดียวกัน

ประการที่สอง แรงเสียดทานระหว่างชิ้นทดสอบกับแผ่นรองเครื่องมือทำให้ชิ้นทดสอบไม่สามารถเคลื่อนตัวได้อย่างอิสระเมื่อมีการขยายตัวหลังจากกดชิ้นทดสอบ ดังนั้นในการทดสอบจึงนิยมใช้สารหล่อลื่นเพื่อลดแรงเสียดทานระหว่างชิ้นทดสอบกับแผ่นรองเครื่องมือ [2]



รูปที่ 3 การทดสอบการกดอัดในแนวแกนเดียว [7]

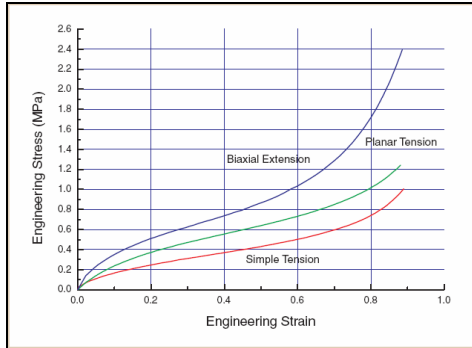
ลักษณะการเกิดความเค้นและการเปลี่ยนรูปในการทดสอบการกดในแนวแกนเดียว [6] สามารถคำนวณจากสมการที่ (1) และ (2) ตามลำดับ

2.1.3 การทดสอบการรับแรงเฉือนในแนวระนาบ ขนาดของชิ้นทดสอบควรมีขนาดความกว้างมากกว่าขนาดในแนวการดึงอย่างน้อย 10 เท่า โดยใช้เครื่องทดสอบแบบรับแรงเฉือนในแนวระนาบ (planar shear test) (ดังแสดงในรูปที่ 4) การทดสอบแรงเฉือนเป็นการใส่แรงกระทำในแนวขนานกับแนวระนาบของชิ้นทดสอบซึ่งเป็นแรงเฉือนจะเกิดขึ้นถ้ามีการใส่แรงสวนทางกันสองทิศทาง จากนั้นนำค่าที่ได้จากการทดสอบทั้งสามค่ามาพล็อตกราฟ (ดังรูปที่ 5)



รูปที่ 4 การทดสอบการรับแรงเฉือนในแนวระนาบ [6]

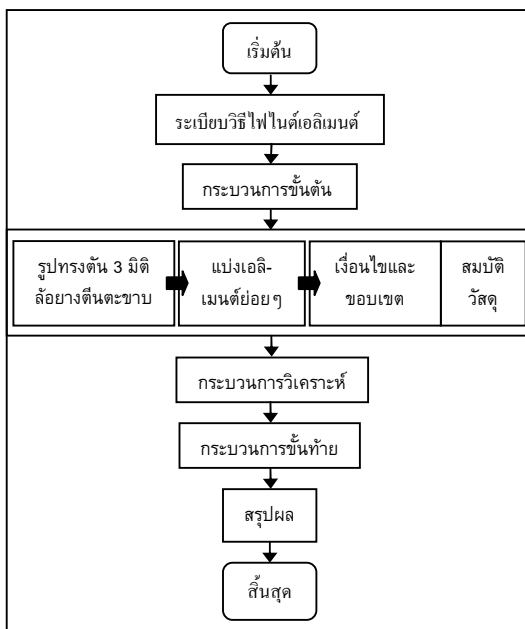
ลักษณะการเกิดความเค้นและการเปลี่ยนรูปในการทดสอบการรับแรงเฉือนในแนวระนาบ [6] สามารถคำนวณจากสมการที่ (1) และ (2) ตามลำดับ



รูปที่ 5 โดอะแกรมความเค้น-ความเครียดสำหรับการทดสอบทั้ง 3 กรณี [8]

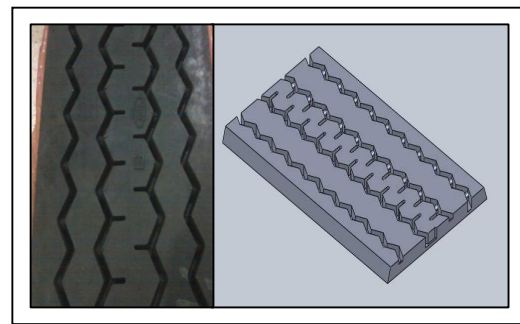
2.2 การใช้คอมพิวเตอร์ช่วยงานวิศวกรรมในการออกแบบผลิตภัณฑ์ล้อยางตีนตะขา

การใช้คอมพิวเตอร์ช่วยงานวิศวกรรมในการออกแบบผลิตภัณฑ์ล้อยางตีนตะขา ด้วยการนำระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ [9] แสดงขั้นตอนดังแสดงในรูปที่ 6

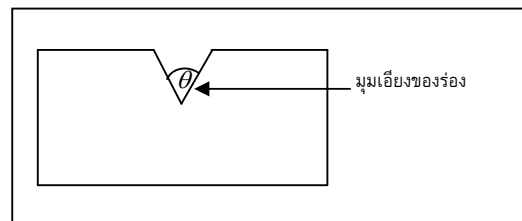


รูปที่ 6 ขั้นตอนการใช้คอมพิวเตอร์ช่วยงานวิศวกรรม

2.2.1 กระบวนการขั้นต้น (pre-processing): การสร้างรูปทรงตัน 3 มิติ ของล้อยางตีนตะขา (ดังแสดงในรูปที่ 7) จะมีมุมเอียงของร่องยาง θ คล้ายรูปตัววี ดังแสดงในรูปที่ 8 ล้อยางตีนตะขาที่ใช้ในการเกษตรสำหรับเครื่องยนต์ที่มีขนาดไม่เกิน 80 กำลังม้า ส่วนใหญ่มีค่าประมาณ 45 องศา จากข้อมูลการออกแบบเบื้องต้น พบว่ามุมเอียงร่องแคบๆ ทำให้เกิดปัญหาการคายเศษกวาดและดินได้ยากขึ้น [10] ในบทความนี้จึงได้ยกตัวอย่างกรณีศึกษาของมุมเอียงของร่องที่มีค่าใกล้เคียงกับมุมที่นิยมใช้งานดังกล่าวข้างต้น โดยเริ่มตั้งแต่ 35 45 55 และ 65 องศา ตามลำดับ

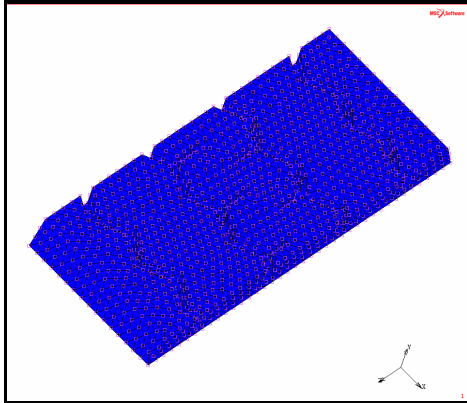


รูปที่ 7 ล้อยางตีนตะขาต้นแบบ



รูปที่ 8 ภาคตัดขวาง (cross section) มุมร่องดอกยาง

แบ่งรูปทรงนั้นออกเป็นเอลิเมนต์ย่อยๆ เอลิเมนต์เหล่านี้จะต่อเชื่อมกันที่จุดต่อใดๆที่อยู่บนขอบผิวล้อยางตีนตะขา (ดังแสดงในรูปที่ 9) จึงจะก่อให้เกิดรูปแบบไฟไนต์เอลิเมนต์ (finite element model) ที่ใกล้เคียงของจริงมากที่สุด โดยทำการหาเอลิเมนต์ที่เหมาะสมกับล้อยางตีนตะขา



รูปที่ 9 การแบ่งเอลิเมนต์ย่อยๆ ล้อย่างตีนตะขาบ

กำหนดสมบัติวัสดุของยางในการทำนายพฤติกรรม การเสียหายของล้อยางตีนตะขาบจากโปรแกรม MSC.Marc Mentat โดยเลือกแบบจำลอง อ็อกเดน (ogden model) แสดงดังสมการที่ (3) (4) ตามลำดับ [11] และแสดงดังตารางที่ 1

$$W = \sum_{n=1}^N \frac{\mu_n}{\alpha_n} \left[(\lambda_1^{\alpha_n} + \lambda_2^{\alpha_n} + \lambda_3^{\alpha_n}) - 3 \right] \quad (3)$$

$$\text{โดยที่ } \lambda_1 = \lambda \text{ และ } \lambda_2 = \lambda_3 = \frac{1}{\sqrt{\lambda}}$$

$$W = \sum_{n=1}^N \frac{\mu_n}{\alpha_n} \left(\lambda_1^{\alpha_n} + 2\lambda_2^{\frac{-\alpha_n}{2}} - 3 \right) \quad (4)$$

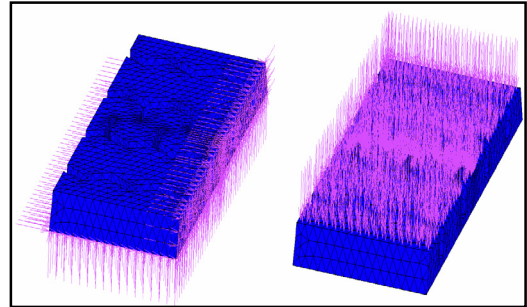
ตารางที่ 1 สมบัติวัสดุของแบบจำลองอ็อกเดน

ค่าสัมประสิทธิ์	ค่าที่ใช้
Bulk modulus	5820.180
Modulus 1, μ_1	3.794×10^{-5}
Exponent 1, α_1	701.086
Modulus 2, μ_2	15.892
Exponent 2, α_2	0.003

เมื่อ μ, α เป็นค่าสัมประสิทธิ์ของแบบจำลองที่ได้จากการ curve fitting จากโปรแกรม MSC.Marc Mentat

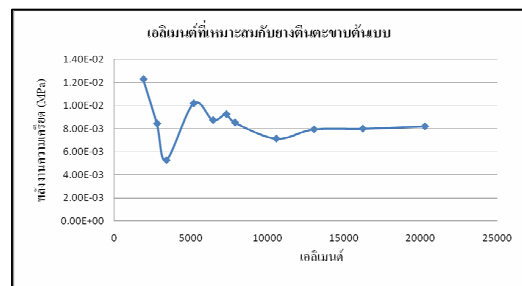
กำหนดเงื่อนไขและขอบเขต (boundary condition) โดยรถมีมวล 45,000 kg ที่กระทำบนหน้าตัดของล้อขนาด $62,468 \text{ mm}^2$ จะได้ความดันต่อล้อที่กระทำในแนวตั้งจากผิวของล้อยางตีนตะขาบด้วย

ความดันที่เกิดขึ้นภายใต้ล้อยางตีนตะขาบ [12 - 15] มีค่าเท่ากับ 0.320 MPa โดยงานวิจัยนี้เป็นการจำลองการรับโหลดของรถที่มีล้อเป็นยางตีนตะขาบและจอดอยู่บนถนนที่ราบเรียบ จึงมีการกำหนดพื้นผิวอีกด้านให้ยึดติดแน่นทุกทิศทุกทาง แสดงดังรูปที่ 10



รูปที่ 10 การกำหนดขอบเขตและเงื่อนไข

สำหรับชนิดเอลิเมนต์ที่เหมาะสมกับแบบจำลองล้อยางตีนตะขาบ คือ โซลิดเอลิเมนต์ (solid element) เหมาะกับการวิเคราะห์ปัญหาทั้งแบบเชิงเส้นและไม่เชิงเส้น ซึ่งแบบจำลองล้อยางตีนตะขาบสามารถแบ่งเอลิเมนต์ที่เหมาะสมกับล้อยางตีนตะขาบ ดังแสดงรูปที่ 11

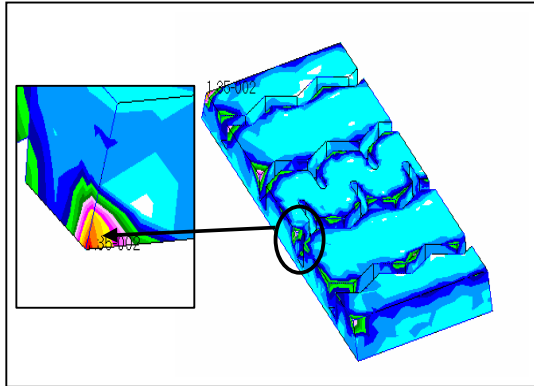


รูปที่ 11 การหาเอลิเมนต์ที่เหมาะสมกับแบบจำลองล้อยางตีนตะขาบ

2.2.2 กระบวนการวิเคราะห์ (analysis): เมื่อสร้างข้อมูลของรูปแบบไฟไนต์เอลิเมนต์ เงื่อนไขขอบเขตและข้อมูลอื่นๆที่จำเป็นแล้ว ซึ่งมาถึงในกระบวนการวิเคราะห์เพื่อหาผลลัพธ์ ในกระบวนการนี้จะให้เครื่องคอมพิวเตอร์ทำการคำนวณให้

2.2.3 กระบวนการขั้นท้าย (post-processing): หลังจากกระบวนการวิเคราะห์เสร็จแล้ว จากการ

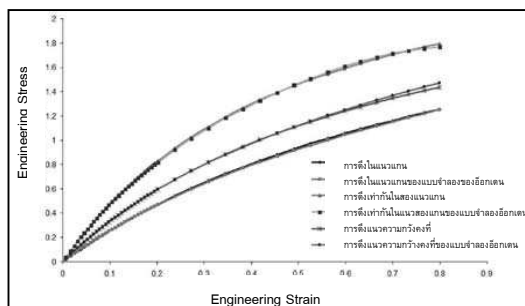
วิเคราะห์สามารถสรุปได้ว่า ล้อยางตีนตะขามีระยะการยุบตัวจากการพิจารณาพลังงานความเครียดส่วนใหญ่เกิดขึ้นบริเวณขอบรอบร่องของล้อยางตีนตะขาสองชุด ดังแสดงในรูปที่ 12



รูปที่ 12 พลังงานความเครียดที่เกิดขึ้นบริเวณขอบรอบร่องของล้อยางตีนตะขาม

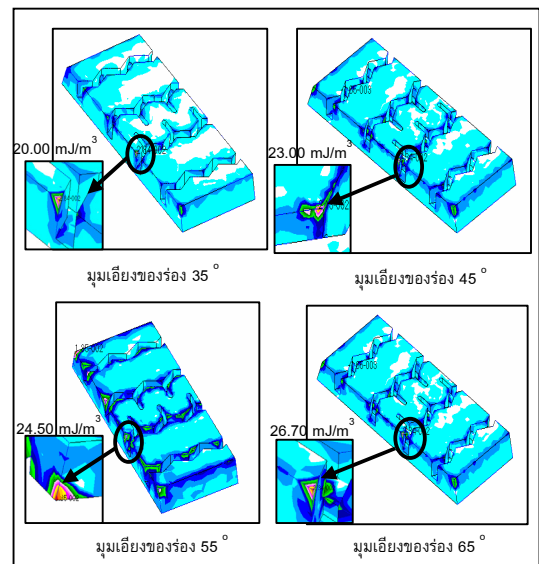
3. ผลและวิจารณ์

ผลจากการทดสอบคุณสมบัติยางข้างต้นได้ถูกนำไปใช้ในการหาค่าสัมประสิทธิ์ของแต่ละแบบจำลองไฮเปอร์อีลาสติกด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ MSC.Marc Mentat แบบจำลองไฮเปอร์อีลาสติกที่ใช้ในการศึกษานี้ที่มีความสามารถให้ผลจำลองใกล้เคียงกับผลการทดสอบ คือ แบบจำลองอ็อกเดน อันดับที่ 2 และแสดงดังรูปที่ 13

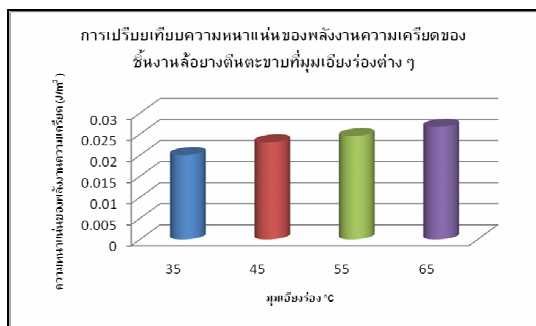


รูปที่ 13 ผลการทำนายการทดสอบการดึงทั้ง 3 แบบ โดยใช้แบบจำลองอ็อกเดน

สำหรับผลการวิเคราะห์การใช้คอมพิวเตอร์ช่วยงานวิศวกรรมของล้อยางตีนตะขาม ในการทำนายความเสียหายของล้อยางตีนตะขาม ภายใต้การรับภาระแบบสถิต ซึ่งการเกิดความเสียหายนั้นอาจมีได้หลายปัจจัย เช่น ความเครียดจากการสัมผัส ความดันจากการสัมผัส และพลังงานความเครียด เป็นต้น โดยงานวิจัยนี้จะพิจารณาพฤติกรรมกระจายตัวของความหนาแน่นของพลังงานความเครียด [13 - 14, 16 - 17] เมื่อล้อยางตีนตะขามีมุมเอียงของร่องเป็น 35 45 55 และ 65 องศา ตามลำดับ ผลจากการจำลองพบว่า การกระจายตัวของความหนาแน่นของพลังงานความเครียดเกิดบริเวณขอบรอบร่องของล้อยางตีนตะขาม 20.00, 23.00, 24.50 และ 26.70 mJ/m^3 ตามลำดับ แสดงดังรูปที่ 14 ผลการจำลองทำให้ทราบว่า ค่าของพลังงานความเครียดหนาแน่นจะมีค่าลดลงเมื่อล้อยางตีนตะขามมุมเอียงของร่องลดลง ดังนั้นมุมเอียงของร่องที่เหมาะสมในการพัฒนาการออกแบบจึงเป็น 35 องศา ซึ่งจะทำให้เกิดค่าความหนาแน่นของพลังงานความเครียด 20.00 mJ/m^3 ดังแสดงในรูปที่ 15 และตารางที่ 2



รูปที่ 14 การกระจายตัวของความหนาแน่นของพลังงานความเครียดล้อยางตีนตะขามมีมุมเอียงของร่องเป็น 35 45 55 และ 65 องศา



รูปที่ 15 การเปรียบเทียบความหนาแน่นของพลังงานความเครียดที่มุมเอียงของล้อต่าง ๆ ของล้อยางดินตะขบ

ตารางที่ 2 การเปรียบเทียบความหนาแน่นของพลังงานความเครียดสูงสุดที่มุมเอียงของล้อต่าง ๆ

มุมเอียงของล้อ (degree)	u ($\times 10^{-3} \text{ J/m}^3$)	u/u _{max}
35	20.00	0.75
45	23.00	0.86
55	24.50	0.92
65	26.70	1.00

u คือ ความหนาแน่นของพลังงานความเครียด

u_{max} คือ ความหนาแน่นของพลังงานความเครียดสูงสุด มีค่าเท่ากับ 26.70 mJ/m³

u/u_{max} คือ พลังงานความเครียดที่ไร้หน่วยเพื่อให้ผลลัพธ์สามารถใช้ได้กับขนาดการอื่น หรือขนาดอื่น ๆ ของยางล้อ

4. สรุป

จากการศึกษาผลกระทบของมุมเอียงของล้อล้อยางดินตะขบที่มีผลต่อการกระจายตัวของความหนาแน่นของพลังงานความเครียดภายใต้การรับภาระแบบสถิต เมื่อนำระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ที่ใช้การจำลองพฤติกรรมของวัสดุที่เป็นไฮเปอร์อีลาสติก ตามฟังก์ชันพลังงานความเครียดของฮ็อกเกน ผลการจำลองทำให้ทราบว่า ค่าของพลังงานความเครียดหนาแน่นมีผลกระทบจากมุมเอียงของล้อล้อยางดินตะขบเมื่อมุมเอียงของล้อแควลงพลังงานความเครียดหนาแน่นจะมีค่าลดลง ซึ่งมุมเอียงของล้อ

ที่เหมาะสมในการพัฒนาการออกแบบจึงเป็น 35 องศา ซึ่งจะทำให้เกิดค่าความหนาแน่นของพลังงานความเครียด คือ 20.00 mJ/m³ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงเป็นกรณีศึกษาเกี่ยวกับการนำคอมพิวเตอร์ช่วยทางวิศวกรรมมาประยุกต์ใช้ในการทำนายพฤติกรรม เพื่อเป็นแนวทางหรือเป็นวิธีการที่ใช้ช่วยในการพัฒนาการออกแบบล้อยางดินตะขบที่เหมาะสมต่อไป และหากต้องการการวิเคราะห์ที่แม่นยำและเสมือนจริงมากกว่านี้ คือ การวิเคราะห์การสัมผัสด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (finite element contact analysis) ซึ่งจะสามารถพิจารณาแรงเสียดทานระหว่างถนนกับล้อยางได้อีกด้วย

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณมูลนิธิส่งเสริมการวิจัยในมหาวิทยาลัยเพื่ออุตสาหกรรมไทย (Thailand University Research Promotion for Industries Foundation: TURPIF) สำหรับการสนับสนุนทุนวิจัยร่วมอุตสาหกรรม KU-TURPIF ประจำปี 2554 และ ขอขอบคุณศูนย์เชี่ยวชาญเฉพาะทางแม่พิมพ์ยาง สถาบันค้นคว้าและพัฒนาเทคโนโลยีการผลิตทางอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่ได้เอื้อเฟื้อเอกสารข้อมูล และสถานที่ทำวิจัยที่เป็นประโยชน์ต่อการดำเนินงานวิจัย

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] สำนักงานเศรษฐกิจอุตสาหกรรม. 2553. สรุปภาวะเศรษฐกิจอุตสาหกรรมปี 2553 และแนวโน้มปี 2554. แหล่งที่มา: www.oie.go.th, 22 ธันวาคม 2554.
- [2] กรุงเทพฯธุรกิจ. 2553. นวัตกรรมยางดินตะขบ จากวัด ฤติบ ธรรมชาติ แหล่งที่มา: www.creativeenterprise.in.th, 5 กุมภาพันธ์ 2555.
- [3] Wang, L. R., Z. H. Lu and Hagiwara I. 2002. Finite element simulation of the static characteristics of a vehicle rubber mount. Proceedings of the Institution of Mechanical

- Engineers, part D: Journal of Automobile Engineering 216(12): 965-973.
- [4] Dwyer, M. J., Okello, J. A. and Scarlet, A. J. 1993. A theoretical and experimental investigation of rubber tracks for agriculture. Journal of Terramechanics 30(4): 285-298.
- [5] Miller, K. 2000. Testing elastomers for hyperelastic material models in finite element analysis: testing for hyperelastic. Technical Paper Report, pp. 1-8.
- [6] Marc analysis research corporation. 1998. Experimental elastomer analysis: experimental elastomer course. MSC. Software Corporation, The United States of America.
- [7] Day J. and Miller, K. 2000. Compression or biaxial: testing for hyperelastic. Technical Paper Report, pp. 1-13.
- [8] Gent, A. N. 2001. Engineering with rubber, Oxford University Press, New York.
- [9] Korunović, N., Trajanović, M. and Stojković, M. 2007. Finite element model for steady-state rolling tire analysis. Journal of the Serbian Society for Computational Mechanics, Vol. 1, No. 1: pp. 63-79.
- [10] นัย บำรุงเวช. 2544. รถฟาร์มแทรกเตอร์: ล้อและยาง. สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น), กรุงเทพฯ.
- [11] ยุพา ตาวัน, ชนะ รัชศิริ และจักรพันธ์ อร่ามพงษ์พันธ์. 2553. การศึกษาขนาดของยางรองแท่นเครื่องที่มีผลต่อพฤติกรรมเชิงกลภายใต้ภาระแบบพลวัต. วิศวกรรมสารมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. ปีที่ 23 (74), หน้า 61-74.
- [12] H.L.M. du Plessis, T. Yu. 2006. Modelling the traction of a prototype tack based on soil rubber friction and adhesion. Journal of Terramechanics 43.
- [13] ศิริเทพ พรหมโสภา. 2549. การวิเคราะห์การขยายตัวของรอยแตกร้าวในยางด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.
- [14] อุทิศ สุริภา. 2548. การกระจายตัวของความเค้นและความเครียดในล้อยางต้นภายใต้สภาวะที่รับโหลดแบบสถิต. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.
- [15] Chang, J., Chenyuan, H., and Xiaoxiong, J. 2011. FE simulation of tire wear with complicated tread pattern. 2011 International Conference on Advanced in Control Engineering and Information Science (CEIS 2011), China, August 18-19, 2011.
- [16] Gdoutos, E. E., Danial, I. M. and Schubel, P. 2003. Fracture mechanics of rubber. Facta Universitatis Series: Mechanics, Automatic Control and Robotics. 3: 497-510.
- [17] Gdoutos, E. E., Danial, I. M. and Schubel, P. 2004. Determination of critical tearing energy of tire rubber. The 15th European Conference of Fracture, 15: 497-510.