

การศึกษาลักษณะพื้นที่สัมผัสของยางล้อตันและผิวทางด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ The Study of Solid Tire-Pavement Contact Patch by Finite Element Method

จุฑาณี พรหมจันทร์^{1,2} และ ชاکริต สุวรรณจรัส^{1,2*}

¹ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล 25/25 ถ. พุทธรณีสถาย 4 ต. ศาลายา อ. พุทธรณีสถาย จ. นครปฐม 73170

² ห้องปฏิบัติการกลศาสตร์เชิงคอมพิวเตอร์เพื่อการออกแบบ (LCMD) ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล

25/25 ถ. พุทธรณีสถาย 4 ต. ศาลายา อ. พุทธรณีสถาย จ. นครปฐม 73170

*ติดต่อ: chakrit.suv@mahidol.ac.th

บทคัดย่อ

พื้นที่สัมผัสระหว่างยางล้อและผิวทางถูกนำมาใช้อธิบายประสิทธิภาพของยางล้อตัน การหาพื้นที่สัมผัสในเบื้องต้นสามารถทดสอบได้โดยการกดยางล้อลงบนพื้นผิวเรียบที่รองด้วยแผ่นฟิล์มวัดแรงกด แล้วนำไปประมวลผลเพื่อหาแรงดันสัมผัสตามระดับความเข้มสีที่เกิดขึ้นบนแผ่นฟิล์ม ในงานวิจัยนี้ได้นำระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบสามมิติมาจำลองลักษณะพื้นที่สัมผัสที่เกิดขึ้นเมื่อยางล้อตันถูกกดลงบนพื้นผิวเรียบ โดยแบบจำลองยางล้อตันที่มีส่วนประกอบเป็นยาง 3 ชั้นที่มีสมบัติแตกต่างกันถูกตรวจสอบความถูกต้องด้วยระยะเยื้องในแนวตั้ง โดยเปรียบเทียบกับผลการทดสอบความแข็งแรง จากผลการเปรียบเทียบพบว่าระยะเยื้องในแนวตั้งมีค่าสอดคล้องกับผลการทดสอบจริง พฤติกรรมการสัมผัสที่เกิดขึ้นกับผิวทางแบบเรียบและยางล้อตันที่ถูกกดลงบนพื้นผิวที่เกาะต่างๆ ได้แก่ พื้นที่สัมผัส พื้นที่หน้ายาง สัมประสิทธิ์พื้นที่หน้ายาง และความเค้นสัมผัสถูกนำมาวิเคราะห์ประสิทธิภาพของยางล้อตันตัวอย่าง แบบจำลองลักษณะพื้นที่สัมผัสในงานวิจัยนี้สามารถนำไปใช้ศึกษาผลกระทบของยางล้อตันและพื้นผิวต่างๆ เพื่อการพัฒนาของยางล้อตันที่มีประสิทธิภาพได้ต่อไป

คำหลัก: ยางล้อตัน; ผิวทาง; พื้นที่สัมผัส; ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

Abstract

The tire-pavement contact patch was used to characterize the performance of solid tire. The contact patch is generally obtained by pressing the tire onto flat surface which the pressure measurement film was attached. The color density appeared on the film was analyzed to estimate the contact pressure level. In this paper, the 3D finite element model of solid tire was used to model the tire-pavement contact patch occurring when the solid tire was pressed on the flat surface. The solid tire model which was three different rubber compound layers was validated with the vertical deformation from the stiffness testing. The vertical deformation of solid tire model had a good agreement with the physical experiment. The tire-pavement contact patch characteristic such as contact area, footprint area, footprint coefficient and contact stress under different load was analyzed. This tire-pavement contact patch model in this study will be used to study the effect of solid tires and pavements for the solid tire development with high performance in the future work.

Keywords: Solid tire; Pavement; Contact patch; Finite element method.

1. บทนำ

ร่องรอยการสัมผัสระหว่างยางล้อบนพื้นผิวทางเป็นปัจจัยสำคัญในการศึกษาและพัฒนาระบบควบคุมการขับเคลื่อนของยานพาหนะและการออกแบบและพัฒนาล้อที่มีประสิทธิภาพสูง ในส่วนของการศึกษาลักษณะพื้นที่สัมผัสของยางล้อและผิวทาง การติดตั้งอุปกรณ์ที่สามารถตรวจจับระยะยุบที่เปลี่ยนแปลงของยางล้อลมไว้ภายในยางล้อลมสามารถทำให้ได้ลักษณะการยุบตัวและพื้นที่สัมผัสที่เกิดขึ้นจริงระหว่างยางล้อลมและพื้นผิวทางขณะขับขี่ [1, 2] ซึ่งวิธีดังกล่าวไม่สามารถนำมาใช้ศึกษากับยางล้อตันที่มีเนื้อยางเต็มตลอดหน้าตัดได้ นอกจากนั้นวิธีการทดสอบบนพื้นทรายซึ่งสามารถแสดงลักษณะโดยภาพรวม เช่น พื้นที่สัมผัส ความลึกของรอยกดยางล้อสามารถนำมาคำนวณค่าแรงที่เกิดขึ้นในเบื้องต้นได้ [3] ซึ่งพบว่าร่องที่เกิดขึ้นบนพื้นทรายจะมีความลึกเพิ่มมากขึ้นเมื่อยางล้อต้องรับภาระน้ำหนักกดมากแต่วิธีการดังกล่าวมีเงื่อนไขที่ต้องควบคุมหลายอย่างเพื่อให้ได้มาซึ่งผลที่แม่นยำ ต่อมาวิธีการทดสอบลักษณะพื้นที่สัมผัสของยางล้อและพื้นผิวบนทรายได้ถูกนำมาพัฒนาให้มีความแม่นยำเพิ่มมากขึ้นโดยการเพิ่มอุปกรณ์หรือเครื่องมือวัดต่างๆ เพื่อที่สามารถเพิ่มความสามารถในการวัดค่าต่างๆ ที่เกิดขึ้นได้แม่นยำมากยิ่งขึ้น เช่นการใช้เทคนิค digital Photogrammetry, 3D Scan หรือ Image Processing เข้ามาเพิ่มความแม่นยำในการเก็บค่าความลึกของรอยกดที่เกิดขึ้น อีกทั้งยังสามารถนำไปต่อยอดโดยการนำไปสร้างแบบจำลองแบบสามมิติได้ [4, 5] Payam และคณะ [6] ได้ใช้วิธีการทดสอบบนทรายร่วมกับ 3D Scan เพื่อเก็บค่าลักษณะการสัมผัสที่เกิดขึ้นระหว่างยางล้อลมที่ความดันลมยาง ภาระน้ำหนักกด และคุณสมบัติของพื้นต่างๆ เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ซึ่งพบว่า พื้นที่สัมผัส ความลึกร่อง และปริมาตรในการสัมผัสที่วัดได้ส่งผลต่อค่าความต้านทานการหมุน (Rolling Resistance) ซึ่งก็เป็นอีกค่าที่ใช้เป็นแนวทางในการออกแบบและพัฒนาล้อได้ อีกวิธีที่ถูกนำมาใช้ในการศึกษาลักษณะพื้นที่สัมผัสของยางล้อและพื้นผิวทางอย่างแพร่หลายคือการใช้วิธีการทดสอบความแข็งแรงโดยการเพิ่มอุปกรณ์ที่วัดแรงกด หรือแรงดันจากการกดลงบนแท่นทดสอบ [7, 8] ที่สามารถวัดลักษณะพื้นที่สัมผัสที่สามารถนำมาศึกษาความสามารถใน

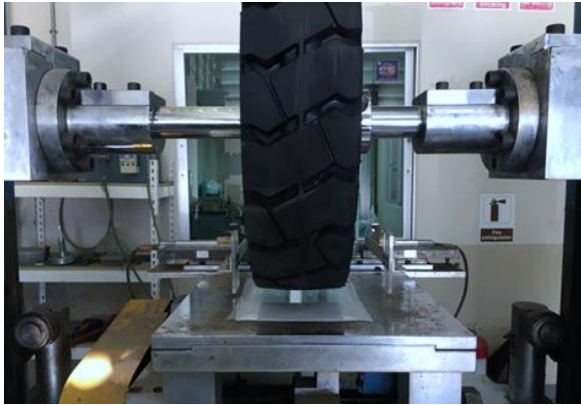
การยึดเกาะถนนหรือความสึกหรอได้จากการเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์พื้นที่หน้ายาง

แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ 3 มิติถูกนำมาใช้จำลองการสัมผัสระหว่างถนนเรียบและยางล้อลมเนื่องมาจากการกีดขวางน้ำหนักรถในแนวตั้งเพื่อศึกษาค่าความแข็งที่เหมาะสมของชั้นผ้าใบของยางล้อลม [9] และแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ 3 มิติของยางล้อลมถูกนำมาศึกษาการสัมผัสพื้นที่สัมผัส และไม่มีสิ่งกีดขวางซึ่งพบว่าผลการวิเคราะห์มีความสอดคล้องกับผลการทดสอบจริง [10] นอกจากนี้การศึกษาลักษณะพื้นที่สัมผัสด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ยังสามารถใช้ศึกษาพฤติกรรมการเคลื่อนที่ของยางลมบนทรายได้โดยการศึกษาถึงผลกระทบของความดันลมยาง ความเร็วในการเคลื่อนที่และความเสียหายระหว่างยางล้อลมขณะล้อขับเคลื่อนบนพื้นทราย [11] ซึ่งลดทรัพยากรในการศึกษาลดได้

ในงานวิจัยนี้จึงได้นำระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบ 3 มิติมาจำลองศึกษาลักษณะพื้นที่สัมผัสของยางล้อตันตัวอย่างขนาด 6.00-9 นิ้วที่ประกอบขึ้นด้วยยางที่มีสมบัติแตกต่างกัน 3 ชั้นถูกกดลงบนแบบจำลอง 3 มิติของผิวทางเรียบเพื่อพัฒนาล้อตันที่มีประสิทธิภาพ และพื้นที่ใช้งานที่เหมาะสมต่อไป

2. การทดสอบความแข็งแรง

ยางล้อตันตัวอย่างขนาด 6.00-9 นิ้ว ถูกนำมาทดสอบความแข็งแรงในแนวตั้งภายใต้สภาวะการใช้งานซึ่งรับน้ำหนักที่แตกต่างกัน การทดสอบจะใช้เครื่องทดสอบความแข็งแรง (Tire Stiffness Tester) ยี่ห้อ EKTRON TEK รุ่น PL-2003 (รูปที่ 1) ของห้องปฏิบัติการทดสอบยางล้อ ศูนย์วิจัยเทคโนโลยียาง คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล (RTEC) เครื่องทดสอบสามารถกำหนดและวัดแรงที่กระทำบนยางล้อจากแท่นวัดแรงกดที่ทำหน้าที่เคลื่อนที่กดยางล้อ ความคลาดเคลื่อนของการวัดระยะยุบยางล้อขณะถูกกดมีค่าน้อยกว่า ± 0.1 มิลลิเมตร การแสดงลักษณะพื้นที่สัมผัสระหว่างยางล้อและแท่นกดทำได้โดยการใช้แผ่นฟิล์มรองรับล้อยางเพื่อบันทึกรอยและนำไปประมวลผลเป็นความเข้มแรงดันสัมผัส ลักษณะรอยสัมผัสที่ได้จากการทดสอบยังสามารถแสดงพื้นที่สัมผัส (Contact Area, CA) และพื้นที่หน้ายาง



รูปที่ 1 การทดสอบความแข็งแรง

(Footprint Area, FA) ซึ่งมีขนาด $a \times b$ ดังแสดงในรูปที่ 2 ที่ใช้ในการวิเคราะห์ประสิทธิภาพ หรือการสึกหรอของยางล้อต้นได้ต่อไป

3. แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์

3.1 แบบจำลองยางล้อต้น

ยางล้อต้นตัวอย่างขนาด 6.00-9 นิ้ว ซึ่งมีโครงสร้าง 3 ชั้นที่คุณสมบัติแตกต่างกัน ดังแสดงในรูปที่ 3 ซึ่งประกอบไปด้วยยางชั้นไส้ (M058) ยางชั้นกลาง (M047) ยางชั้นดอก (M067) และลวดเสริมแรง ถูกนำมาจำลองแบบสามมิติด้วยเครื่องสแกนสามมิติ (Artec 3D, Eva) ร่วมกับโปรแกรมช่วยงานออกแบบ (CAD) และถูกนำมาสร้างเป็นแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ด้วยเอลิเมนต์แบบสามมิติ (Solid Element) เอลิเมนต์ของยางแต่ละชั้น ได้แก่ ยางชั้นไส้ ชั้นกลาง และชั้นดอกแสดงด้วยเอลิเมนต์ที่มีสีแตกต่างกัน ได้ถูกกำหนดให้เชื่อมต่อกันโดยใช้โหนดที่บริเวณหน้าสัมผัสระหว่างชั้นยางแต่ละชั้นร่วมกัน ในขณะที่เอลิเมนต์ของยางชั้นดอกได้กำหนดให้มีการสัมผัสแบบติดแน่น (Glue Contact) กับเอลิเมนต์ของดอกยาง ดังแสดงในรูปที่ 4 แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของยางล้อต้นจะประกอบด้วยเอลิเมนต์ของยางชั้นไส้ ยางชั้นกลาง ยางชั้นดอก และลวดจำนวน 16,623, 8,448, 14,366 และ 7,040 เอลิเมนต์ ตามลำดับ ดังนั้นแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของยางล้อต้นที่ได้สร้างขึ้นมาทดสอบจะมีเอลิเมนต์สามมิติรวมทั้งหมด 46,477 เอลิเมนต์ และมีขนาดเอลิเมนต์เฉลี่ย 11.74 มิลลิเมตร สมการไฮเปอร์อีลาสติกของออกเดน (Ogden Hyperelastic Constitutive Model) ดังแสดงในสมการที่ 1 ถูกนำมา

อธิบายพฤติกรรมการยุบตัวของส่วนประกอบอย่างแต่ละชั้น

$$U = \sum_{i=1}^n \frac{\mu_i}{\alpha_i} (\bar{\lambda}_1^{\alpha_i} + \bar{\lambda}_2^{\alpha_i} + \bar{\lambda}_3^{\alpha_i} - 3) + 4.5K(J^{1/3} - 1)^2 \quad (1)$$

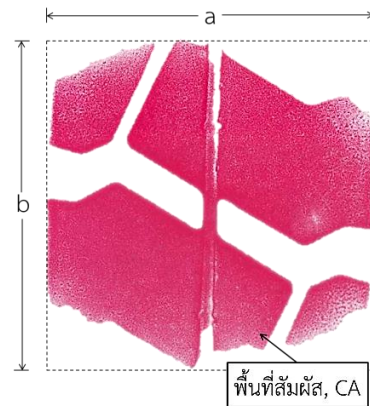
และ $\bar{\lambda}_i = J^{-1/3} \lambda_i$, $J = \lambda_1 \lambda_2 \lambda_3$

เมื่อ λ_i คือ The deviatoric principle stretches,

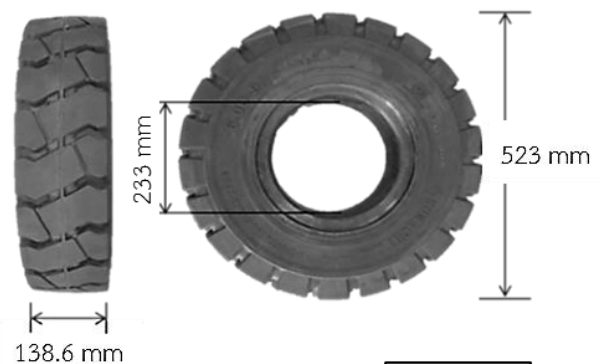
J คือ The Jacobean determinant,

K คือ The initial bulk modulus และ

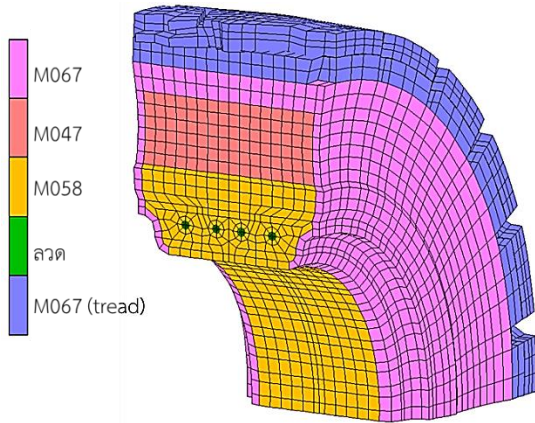
μ_i, α_i คือค่าคงที่



รูปที่ 2 ลักษณะรอยสัมผัสที่ได้จากการทดสอบ



รูปที่ 3 ยางล้อต้นตัวอย่างขนาด 6.00-9 นิ้ว



รูปที่ 4 แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์สามมิติของยางล้อต้นตัวอย่าง

ตารางที่ 1 แสดงค่าคงที่ของออกเดนที่ได้จากการหาค่าถดถอยแบบเชิงเส้นด้วยซอฟต์แวร์ MSC.Marc ด้วยความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด (Stress-Stain Relationship) จากการทดสอบคุณสมบัติของยางตามมาตรฐาน ASTM D412 ของยางทั้ง 3 ชั้นที่ต่างกันตามโครงสร้างของยางล้อต้นตัวอย่าง [12]

ตารางที่ 1 ค่าคงที่ภายในสมการไฮเปอร์อีลาสติกของออกเดน

ชั้นยาง	μ_1	μ_2	α_1	α_2	K
M067	1.0749	154.616	2.927	1.14e-7	7,866.61
M047	0.36179	510.855	3.233	0.0056	10,078
M058	3,615.31	2,915.36	0.0028	0.0024	42,449

3.2 แบบจำลองการทดสอบความแข็งแรง

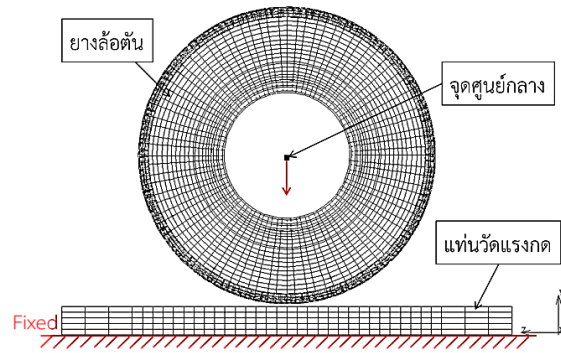
แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของยางล้อต้นที่ถูกกล่าวในหัวข้อก่อนหน้าถูกนำมาจำลองการทดสอบความแข็งแรงโดยการกำหนดเงื่อนไขแบบ Multi-Point Constraint (MPC) ระหว่างขอบล้อด้านในกับจุดศูนย์กลางของแบบจำลองซึ่งเป็นจุดยึดยางล้อต้นกับเครื่องทดสอบ แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์แบบสามมิติขนาดความกว้าง x ความยาว x ความสูงเท่ากับ 400 x 800 x 50 มิลลิเมตร ถูกสร้างเพื่อนำมาจำลองแทนวัดแรงกด (Measurement Table) เพื่อที่จะสามารถศึกษา

ลักษณะทางกลที่เกิดขึ้นกับผิวทางซึ่งไม่สามารถศึกษาได้จากเครื่องทดสอบความแข็งแรง ด้วยเอลิเมนต์ชนิด 8 จุดจำนวน 2,880 เอลิเมนต์และกำหนดให้มีคุณสมบัติเป็นเหล็กที่มีค่ามอดูลัสความยืดหยุ่น (Modulus of Elasticity) และอัตราส่วนปัวซอง (Poisson's Ratio) 200 GPa และ 0.3 ตามลำดับ แบบจำลองยางล้อต้นถูกกำหนดให้เคลื่อนที่และกดลงบนแท่นวัดแรงกดด้วยน้ำหนักกด 400, 500 และ 600 กิโลกรัม ด้วยค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานระหว่างแท่นวัดแรงกดและยางล้อต้นมีค่าเท่ากับ 0.8 ดังแสดงในรูปที่ 5 ซึ่งแบบจำลองนี้จะถูกตรวจสอบความถูกต้องกับระยะยุบในแนวตั้งที่ได้จากการทดสอบความแข็งแรง การวิเคราะห์ลักษณะพื้นที่สัมผัสของยางล้อต้นและผิวทางด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ในกายวิจยนี้ถูกวิเคราะห์ด้วยซอฟต์แวร์ MSC.Marc ซึ่งติดตั้งในคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคลที่มีหน่วยประมวลผลกลาง Intel Core i7 ความเร็ว 3.40 GHz

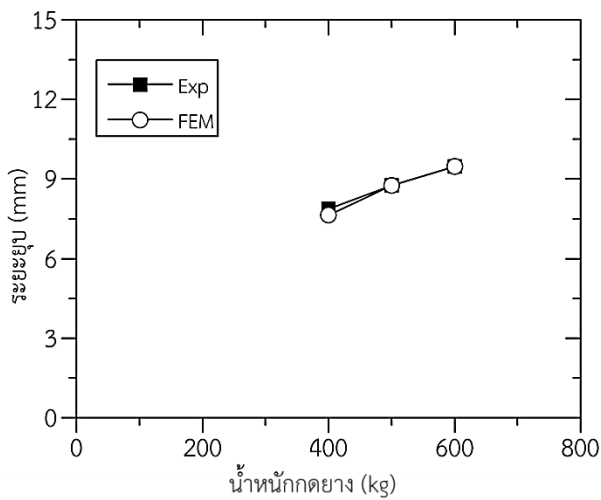
4. ผลการทดสอบและวิจารณ์

4.1 การทดสอบความแข็งแรง

ผลการจำลองการทดสอบความแข็งแรงของยางล้อต้นขนาด 6.00-9 นิ้วด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ค่าระยะยุบในแนวตั้งเมื่อยางล้อต้นต้องรับน้ำหนัก 400, 500 และ 600 กิโลกรัมถูกนำมาตรวจสอบความถูกต้องเปรียบเทียบกับผลการทดสอบความแข็งแรงแสดงเป็นกราฟได้ในรูปที่ 6 พบว่าลักษณะการยุบตัวของแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์สอดคล้องกับผลการทดสอบเป็นอย่างดี ผลการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์แสดงระยะยุบได้ต่ำกว่าการทดสอบจริง โดยมีค่าความคลาดเคลื่อน 2.88, 0.81 และ 1.56% เมื่อยางรับน้ำหนัก 400, 500 และ 600 กิโลกรัม ตามลำดับ ความคลาดเคลื่อนของแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์นี้เกิดมาจากขนาดของเอลิเมนต์ของดอกยางมีขนาดเล็กไม่เพียงพอนั่นเอง แต่ถึงอย่างไรหากพิจารณาค่าเบี่ยงเบนแล้วก็ยอมรับได้ว่ามีค่าน้อยมากและยอมรับได้



รูปที่ 5 แบบจำลองการทดสอบความแข็งแรงยางลือตัน
ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์



รูปที่ 6 กราฟระยะยุบและน้ำหนักถ่วงยาง

4.2 ลักษณะพื้นที่สัมผัส

ผลการวิเคราะห์ลักษณะพื้นที่สัมผัสที่เกิดขึ้นระหว่างยางลือตันและผิวทางด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ด้วยน้ำหนักถ่วง 400, 500 และ 600 กิโลกรัมแสดงในตารางที่ 2 พบว่าน้ำหนักถ่วงที่มากขึ้นส่งผลให้พื้นที่สัมผัสระหว่างยางลือตันและผิวทางมีค่าเพิ่มขึ้นส่งผลให้อัตราส่วนระหว่างพื้นที่สัมผัสต่อพื้นที่หน้ายาง (CA/FA) มีค่าเพิ่มขึ้นด้วย โดยถ้าอัตราส่วนนี้มีค่าเข้าใกล้หนึ่งนั่นคือยางลือตันมีความสามารถในการยึดเกาะกับพื้นได้ดีมาก และเมื่อพิจารณาที่ค่าแรงดันสัมผัสที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ที่เกิดขึ้นทั้งกับยางลือตันและผิวทางพบว่าค่าเพิ่มมากขึ้นเมื่อยางลือตันรับภาระน้ำหนักถ่วงที่มากขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 7 โดยค่าแรงดันสัมผัสสูงสุดที่เกิดขึ้นที่ดอกยางมีค่า 1.01, 1.09 และ 1.22

ตารางที่ 2 พื้นที่สัมผัสระหว่างยางลือตันและผิวทาง

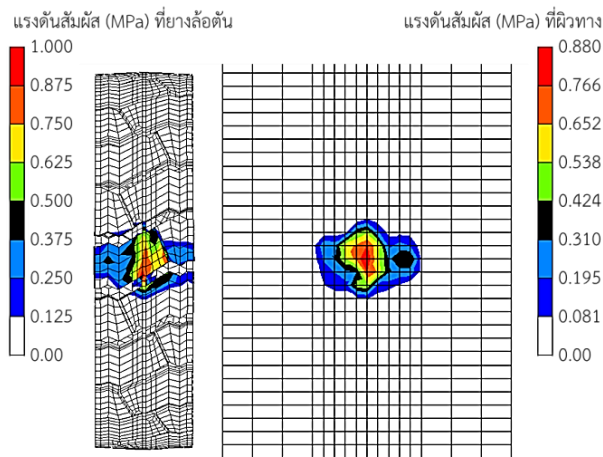
น้ำหนักถ่วง (kg)	พื้นที่หน้ายาง (FA)	พื้นที่สัมผัส (CA)	CA/FA
หน่วย	cm ²	cm ²	-
400	157.75	81.32	0.515
500	174.01	93.62	0.538
600	174.90	108.69	0.621

MPa และเกิดขึ้นที่ผิวทาง 0.766, 0.963 และ 1.032 MPa ที่น้ำหนักถ่วง 400, 500 และ 600 กิโลกรัมตามลำดับการจำลองการเกิดแรงดันสัมผัสของยางลือตันขนาด 6.00-9 นิ้ว พบว่ายางลือตันตัวอย่างมีอัตราส่วนพื้นที่สัมผัสต่อพื้นที่หน้ายางมากกว่า 0.5 และมีค่าแรงดันสัมผัสเกิดขึ้นน้อยกว่าความเค้นฉีกขาดของยาง [12] ซึ่งทำให้ดอกยางไม่เกิดความเสียหายโดยทันทีเมื่อยางลือตันต้องรับภาระน้ำหนักถ่วง 600 กิโลกรัม ซึ่งเป็นภาระน้ำหนักถ่วงที่ครอบคลุมการใช้งานของยางลือตันตัวอย่างขนาด 6.00-9 นิ้ว

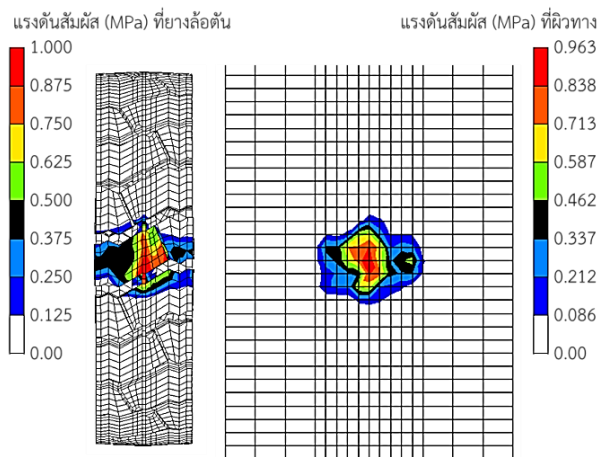
5. สรุปผล

ยางลือตันตัวอย่างขนาด 6.00-9 นิ้ว ได้ถูกนำมาสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อศึกษาลักษณะพื้นที่สัมผัสระหว่างยางลือตันและผิวทางภายใต้ภาระน้ำหนักถ่วง 400, 500 และ 600 กิโลกรัม ตามการทดสอบความแข็งแรงยางลือ พบว่าแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์มีผลการจำลองต่ำกว่าผลการทดสอบคิดเป็นค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย 1.75% แบบจำลองการทดสอบความแข็งแรงของยางลือตันสามารถแสดงพื้นที่สัมผัสและการกระจายของแรงดันสัมผัสที่เกิดขึ้นได้ ซึ่งสามารถนำมาวิเคราะห์ประสิทธิภาพในการยึดเกาะถนนของยางลือตันได้เพื่อเป็นแนวทางในการออกแบบและผลิตยางลือตันที่มีความสามารถในการยึดเกาะพื้นผิวที่จะช่วยเพิ่มความปลอดภัยในการเคลื่อนย้ายสิ่งของเพิ่มมากขึ้น อีกทั้งยังสามารถวิเคราะห์ผลกระทบที่เกิดขึ้นกับผิวทางเพื่อใช้เป็นแนวทางในการระบุพื้นผิวที่เหมาะสมในลักษณะการใช้งานต่างๆ แบบจำลองยางลือตันสัมผัสผิวทางด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ในงานวิจัยนี้สามารถนำไปต่อยอดเพื่อศึกษาลักษณะพื้นที่สัมผัสเมื่อยางลือตันเคลื่อนที่ไปบนผิว

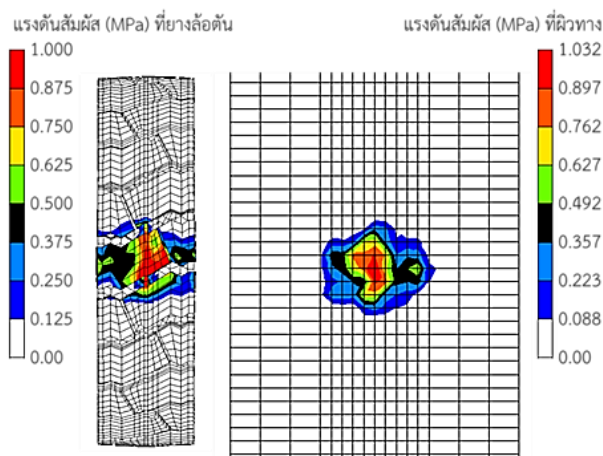
ทางเพื่อศึกษาพฤติกรรมการที่เกิดขึ้นกับยางล้อและผิวทางใน
อนาคตได้ต่อไป



(ก)



(ข)



(ค)

รูปที่ 7 ค่าแรงดันสัมผัสที่เกิดขึ้นกับยางล้อตันและผิวทาง
ที่น้ำหนักกด (ก) 400, (ข) 500 และ (ค) 600 กิโลกรัม

6. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยฉบับนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากสำนักงาน
กองทุนสนับสนุนการวิจัย ภายใต้โครงการปริญญาเอก
กาญจนาภิเษก (คปก.) สัญญาเลขที่ PHD/0049/2561

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] Xiong, Y. and Tuononen, A. (2015). Rolling deformation of truck tire: Measurement and analysis using a tire sensing approach. *Journal of Terramechanics*. vol. 61, July 2015, pp. 33-42.
- [2] Guthrie, A. Botha, T. and Els, P. (2017). 3D contact patch measurement inside rolling tyres. *Journal of Terramechanics*. vol. 69, September 2016, pp. 13-21.
- [3] Naranjo, S. Sandu, C. Taheri, S. and Taheri, S. (2014). Experimental testing of an off-road instrumented tire on soft soil. *Journal of Terramechanics*. vol. 56, September 2014, pp. 119-137.
- [4] Kenarsari, A. Vitton, S. and Beard, J. (2017). Creating 3D model of tractor tire footprints using close-range digital photogrammetry. *Journal of Terramechanics*. vol. 74, June 2017, pp. 1-11.
- [5] Taghavifar, H. and Mardani, A. (2013). Potential of functional image processing technique for the measurements of contact area and contact pressure of a radial ply tire in a soil bin testing facility. *Journal of Measurement*. vol. 46, July 2013, pp. 4038-4044.
- [6] Farhadi, P. Golmohammadi, A. Sharifi, A. and Shahgholi, G. (2018). Potential of three-dimensional footprint mold in investigating the effect of tractor tire contact volume changes on rolling resistance. *Journal of Terramechanics*. vol. 78, May 2018, pp. 63-72.
- [7] Chen, L. Guolin, W. Dengfeng, A. and Yinwei, M. (2013). Tread wear and footprint geometrical characters of truck bus radial tires. *Chinese*

Journal of Mechanical Engineering. Vol. 26(3),
February 2013, pp. 506-511.

[8] Polasik, J. Walus, K. and Wargula, L. (2017).
Experimental studies of the size contact area of
a summer tire as a function of pressure and the
load. *Procedia Engineering*. Vol. 177, 2017, pp.
347-351.

[9] Namjoo, M. and Golbakhshi, H. (2015). An
efficient design tool based on FEM for evaluating
effects of components properties and operating
conditions on interaction of the tire with rigid
road. *Journal of Cent. South University*, vol. 22(1),
January 2015, pp. 189-195.

[10] Alkan, V., Karamihas, S. M. and Anlas, G.
(2011). Finite element modeling of static tire
enveloping characteristics. *International Journal
of Automotive Technology*, vol. 12(4), August
2011, pp. 529–535.

[11] Xia, K. (2011). Finite element modeling of
tire/terrain interaction: Application to predicting
soil compaction and tire mobility. *Journal of
Terramechanics*, vol. 48(2), April 2011, pp. 113-
123.

[12] Phromjan, J. and Suvanjumrat, C. (2018).
Material Characteristic for capability analysis of
solid tire by finite element method. *Key
Engineering Materials*. Vol. 777, May 2018, pp.
416-420.