

<http://journal.rmutp.ac.th/>

การออกแบบรูปแบบล้อรันแฟลทที่เหมาะสมสำหรับรถยนต์บรรทุกทุกประเภท ขนาดเล็กติดเการะด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

นุชนาถ ทองใหญ่ และ ประกอบ ชาติภักต์*

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

1381 ถนนประชากรราษฎร์ 1 แขวงวงศ์สว่าง เขตบางซื่อ กรุงเทพมหานคร 10800

รับบทความ 6 เมษายน 2565 แก้ไขบทความ 19 พฤษภาคม 2565. ตอรับบทความ 20 พฤษภาคม 2565

บทคัดย่อ

ล้อรันแฟลทสำหรับรถยนต์บรรทุกทุกประเภทขนาดเล็กติดเการะ ได้รับการพัฒนาขึ้นใหม่จากวัสดุเดิมที่เป็นโลหะ เปลี่ยนเป็นวัสดุเชิงประกอบที่มีสารตั้งต้นสำคัญเป็นวัสดุกลุ่มโพลิเมอร์และเพิ่มผงวัสดุลูมิเนียมออกไซด์เพื่อให้เกิดความแข็งแรงและสามารถต้านทานการสึกหรอได้สูงขึ้น โดยใช้กระบวนการวิศวกรรมย้อนรอย ออกแบบและวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ด้วยโปรแกรม SolidWorks Simulation เปรียบเทียบผลที่วิเคราะห์ได้กับการทดลอง การออกแบบและการวิเคราะห์ต้องพิจารณาตัวแปรหลายตัว ประกอบด้วย 1) ความหนาที่เหมาะสมของล้อรันแฟลท ทั้งในส่วนที่ติดกับกระทะล้อและส่วนที่จะต้องสัมผัสกับพื้นผิวยางด้านใน 2) รัศมีภายในและภายนอก ซึ่งรัศมีภายในขึ้นอยู่กับขนาดของกระทะล้อ และรัศมีภายนอกเป็นตัวแปรที่กำหนดค่าความสูงของล้อรันแฟลท 3) การออกแบบรูปทรงเพื่อป้องกันล้อรันแฟลทกินผิวยางภายใน และรูปทรงของวงล้อรันแฟลทในส่วนที่ต้องสัมผัสกับกระทะล้อ ซึ่งกระทะล้อไม่เรียบมีพื้นที่ที่เอียง ยากต่อการจับยึด 4) การออกแบบชุดอุปกรณ์การล็อกให้สามารถตรึงล้อรันแฟลทเข้ากับกระทะล้อได้อย่างแน่นหนา 5) วัสดุที่ใช้ในการสร้างล้อรันแฟลท และ 6) ความดันลมยาง ล้อรันแฟลทได้รับการออกแบบและสร้างขึ้นในรูปแบบแยกส่วนจำนวน 3 ชิ้นส่วน เพื่อความสะดวกในการประกอบเข้ากับกระทะล้อ โดยต้องมีรูปแบบที่สามารถเข้าได้กับลักษณะของกระทะล้อรถยนต์บรรทุกทุกประเภทขนาดเล็กติดเการะ มีความสะดวกในการประกอบเข้ากับกระทะล้อ การประกอบต้องแนบสนิท ไม่หลวมคลอน ไม่เสียรูปเมื่อได้รับแรงกระแทก อุปกรณ์การจับยึดล้อรันแฟลทได้รับการออกแบบใหม่ให้สามารถล็อกชิ้นส่วนล้อรันแฟลททั้ง 3 ชิ้นเข้าด้วยกัน ด้านทานแรงกระแทกจากน้ำหนักรถที่วิ่งด้วยความเร็ว 50 กิโลเมตรต่อชั่วโมง

คำสำคัญ : ล้อรันแฟลท; การวิเคราะห์ด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์; รถยนต์บรรทุกทุกประเภทขนาดเล็กติดเการะ

<http://journal.rmutp.ac.th/>

A Pattern Design for Run Flat Wheel Suitable for Small Regular Armored Truck Using Finite Element Method

Nutchanat Tongyai and Prakorb Chartpuk*

Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Phra Nakhon

1381 Pracharat 1 Road, Wongsawang Sub-district, Bang Sue District, Bangkok, 10800 Thailand

Received 6 April 2022; Revised 19 May 2022; Accepted 20 May 2022

Abstract

Run flat wheels for small armored regular trucks have been re-developed by transformation from the original metallic material to compound materials, polymer group materials as important raw materials, then added with aluminum oxide powder to achieve higher strength and wear resistance. The research was performed by using reverse engineering processes including designing, and analysis with finite element methodology with the SolidWorks Simulation program and comparing the analyzed results with outcome experiments. Several variables used for the design and analysis were 1) the optimal width of the run flat wheel at the parts both attached to the wheel pan and contacted with the inner rubber surface 2) internal and external radiuses. The internal radius is depending on the size of the wheel pan and the external radius is a variable that determines the height of the Run flat wheel. 3) the shape designed to prevent wearing of the inner tire surface of the run flat wheel and the shape of the run flat reel in the part contacted with the wheel pan. This wheel pan part is such uneven inclined area which is difficult to hold. 4) a design locking kit for tightly fastening the run flat reels to the wheel pan 5) the material used to create the run flat wheel and 6) tire pressure. The run-flat wheels were then designed and constructed in a modular form of 3 parts for ease of the wheel pan assembly. In designing pattern, the assembling run flat reels had to be fit into the characteristics of a small armored regular truck wheel pan, convenient to assemble with a wheel pan, and tightly attached without looseness or deformation when impacted. The run flat reel gripping device has been redesigned to lock all three run flat parts together. It brought up the impact resistance from body weight was at 50 km/hr.

Keywords : Run Flat Wheel; Finite Element Analysis; Small Armored Regular Trucks

* Corresponding Author. Tel.: +669 8279 5855, E-mail Address: prakorb.c@rmutp.ac.th

1. บทนำ

ยางรันแฟลท (Run Flat Tires, RFT) คือ ยางรถยนต์ที่จะทำให้รถยนต์สามารถเคลื่อนที่ต่อไปได้แม้ว่ายางจะแบนด้วยการถูกเจาะหรือไม่มีลมยางด้วยเหตุผลต่างๆ ยางรันแฟลทได้ถูกนำเสนอขึ้นในช่วงกลางทศวรรษ 1980 หลังจากนั้นก็จะได้รับความนิยมมากขึ้นและผู้ผลิตรถยนต์ในบางยี่ห้อก็ได้กำหนดมาตรฐานสำหรับรถยนต์ใหม่ เช่น ยางรันแฟลทของ Bridgestone ถึงแม้ว่าจะไม่มีลมยางก็จะสามารถวิ่งได้เป็นระยะทางถึง 80 กิโลเมตร ด้วยความเร็วไม่เกิน 80 กิโลเมตรต่อชั่วโมง

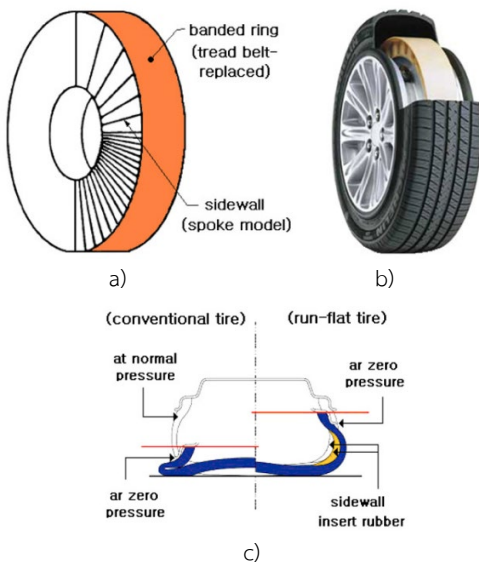
TAC Composite Run Flat (หรือเรียกว่า TAC CRF Run Flat) เป็นอุปกรณ์เสริมโพลิเมอร์ที่มีน้ำหนักเบาออกแบบมาเพื่อให้สามารถขับยานหุ้มเกราะที่มีน้ำหนักสูงต่อไปได้ CRF Run Flat ประกอบด้วยสองหรือสามส่วนล้อมรอบกระโหลก และมีชุดล้อยึด CRF Run flat เข้าด้วยกัน วัสดุผสมสูตรพิเศษซึ่งเป็นความลับทางการค้าอย่างหนึ่ง ให้ผลที่ดีในการลดแรงเสียดทานและความร้อนสะสมภายในขณะยางแบน ใช้วัสดุที่สามารถทนต่อการโจมตีทั้งอาวุธปืนและตะปูเรือใบ [1] จากการนำเสนอของ Dieter Kuerten [2] กล่าวถึงร้อยละ 30 ของความเสียหายจะเกิดขึ้นกับล้อของรถหุ้มเกราะ เช่น การเจาะยาง การวิจัยจึงถูกดำเนินการในการประเมินความเสียหายในสนามรบ การซ่อมแซมยางแบนและการเปลี่ยนล้ออย่างรวดเร็ว แต่ทางออกที่ดีที่สุดในช่วงเวลาปัจจุบันคือการใช้ยางรันแฟลท ซึ่งจะช่วยให้รถสามารถขับเคลื่อนต่อไปได้ แม้ว่ายางได้รับการเจาะอย่างหนัก ล้อรันแฟลทมีสองระบบคือ Vorwerk NLR และ Michelin ACM ได้ใส่ห่วงเหล็กลงในล้อและได้รับการทดสอบโดยกองทัพเยอรมัน และในการทดลองเดียวกันนี้ได้ผ่านการทดสอบที่กองทัพสหรัฐอเมริกา ซึ่งเป็นล้อที่เติมโพมยางลงไป Dieter Kuerten [2] ยังได้นำเสนอระบบ NLR เป็นล้อรันแฟลทที่ใส่ลงในยางเรเดียลในขณะที่ยังไม่แบน ล้อรันแฟลททำมาจากยางที่แข็ง ภายใต้สมมติฐานที่เป็นวัสดุที่มีเนื้อเดียวกันทั้งชิ้น

(Homogeneous) และใส่ห่วงเหล็กลงใน ล้อรันแฟลท จากนั้นติดตั้งลงในยางแบบเรเดียล การติดตั้งไม่ได้ส่งผลกระทบต่อถนนปกติหรือการขับรถ หากมีการเจาะยางในทางใดทางหนึ่ง รถยังคงสามารถขับเคลื่อนต่อไปได้โดยไม่ต้องหยุด หากล้อยางหนึ่งวงหรือมากกว่านั้นแบนอย่างสมบูรณ์ รถจะยังสามารถเคลื่อนที่ต่อไปได้ด้วยความเร็วต่ำเพื่อออกจากเขตอันตราย แล้วดำเนินการขับเคลื่อนที่ความเร็วปานกลาง ซึ่งจะได้ระยะทางมากขึ้น และขับจนกว่าจะถึงจุดที่สามารถทำการซ่อมแซมได้ ข้อดีของการใช้ NLR Run flat คือน้ำหนักเบา, วงล้อแบนสมดุลและติดตั้งง่าย เมื่อยางถูกเจาะ รูปร่างของล้อยางแบนจะยังคงใช้งานต่อไปได้ และยังคงไว้ซึ่งความนุ่มนวลประสิทธิภาพของระบบเบรกจะไม่ได้รับผลกระทบ

J. Stearns [3] ได้ทำการศึกษาตัวแปรของความดันและความเค้นในล้อ ดำเนินการที่ University of Akron โดยใช้ซอฟต์แวร์ ALGOR FEA เพื่อตรวจสอบความเสียหายของล้อเมื่อแรงดันลมยางต่ำ โดยสร้างโมเดลล้อที่ทำจากอลูมิเนียมใน Pro/ENGINEER ให้กับ Goodyear และถ่ายโอนโมเดลเข้าสู่โปรแกรม ALGOR ด้วยเทคโนโลยี InCAD Algor ผ่านไฟล์ IGES เลือกชนิดเอลิเมนต์เป็นเตตระฮีดรอล (Tetrahedral) จำนวน 35,000 เอลิเมนต์ น้ำหนักของรถกระทำลงบนยางสองวงเท่ากับ 1,000 lb ซึ่งเป็นภาระสูงสุด น้ำหนักนี้ถูกนำไปใช้เป็นความดันโหลดลงบนส่วนด้านล่างของล้อ ที่มีการกระจายแรงในรูปแบบพาราโบลา ผลคือ ล้อรันแฟลทสามารถทำงานได้โดยไม่ต้องมีแรงดันลมยางอย่างน้อย 80 กิโลเมตร (50 ไมล์) และสูงสุด 150 กิโลเมตร (93 ไมล์) ที่ 80 กิโลเมตร/ชั่วโมง (50 ไมล์ต่อชั่วโมง) (กรณีรถยนต์ส่วนบุคคลธรรมดา) ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของรถที่ติดตั้งแก้มยางเสริมด้วยยางที่ออกแบบพิเศษสามารถต้านทานความร้อนและความเครียดเมื่อไม่มีแรงดันลมยาง

นอกจากนี้ J. R. Cho และคณะ [4] ได้ทำการออกแบบยางรันแฟลทที่ใช้ยางอยู่ด้านในที่เหมาะสม

กล่าวว่า เมื่อความดันภายในยางลดลงหรือแม้จนถึงศูนย์ จะทำให้ตัวล้อยางทรุดตัวลงมาและแก้มยางจะเกิดความเสียหาย เนื่องจากน้ำหนักของรถที่ส่งผ่านมายังกระทะล้อจะกดลงไปบนแก้มยางที่มีพื้นถนนรองรับ ความคิดพื้นฐานของล้อรันแฟลท คือการปกป้องผนังยางหรือแก้มยางจากการถูกกดให้แบน แม้ในขณะที่ระดับความดันภายในจะกลายเป็นศูนย์ โดยทั่วไปการประเมินผลการใช้งานของล้อรันแฟลทจะประเมินด้วยความเร็วในการขับที่สูงสุด ระยะทาง ความสะดวกสบายในการขับ และความทนทาน [4]



รูปที่ 1 ล้อรันแฟลทที่นำเสนอโดย J. R. Cho, a) banded type b) support ring type และ c) sidewall reinforcement type [4]

จากรูปที่ 1 a) แสดงให้เห็นรูปแบบของยางรันแฟลทที่ประกอบด้วย Sidewall และวงล้อ Banded Ring ภายในจะเสริมความแข็งแรงด้วยวงแหวนโลหะแล้วนำใส่เข้ากับล้อดังรูปที่ 1 b) รูปแบบแบบนี้มีความสามารถในการทำงานมากกว่า 160 กิโลเมตร ผลกระทบหลักคือการขาดของความทนทานในระยะยาวและไม่ปลอดภัยกับกระแทกแบบไดนามิก ยางรันแฟลทแสดงในรูปที่ 1 c) จะเป็นแบบที่มีการเสริมเนื้อยางแข็ง

เข้าไปที่แก้มยางด้านใน ข้อได้เปรียบที่โดดเด่นที่สุดของประเภทนี้คือการเปลี่ยนแปลงของลมยางมาตรฐานคือไม่มีผลกระทบหากลมยางลดลงบ้าง แต่ความนุ่มนวลในการขับขี่อาจจะลดลง และไม่เหมาะสมในกรณีที่ได้รับกระแทกสูง ๆ [4], [5]

จากรายงานวิจัยเรื่อง การวิจัยและพัฒนา รถยนต์บรรทุกทุกประเภทขนาดเล็กติดเกาะ โดยกรมการขนส่งทางบก กองทัพบก ร่วมกับภาคเอกชน ได้ทำการสร้าง Run flat สำหรับล้อทั้ง 4 ล้อ ด้วยวงล้อเหล็กที่ออกแบบเป็นพิเศษ เพื่อให้เข้ากับล้ออูมิเนียมอัลลอยด์ ซึ่งเป็นล้อรถที่มาจากโรงงานผู้ผลิตโดยตรง เริ่มต้นจากการตัดแผ่นเหล็กและนำมาเชื่อมประกอบเข้าด้วยกันตามแบบที่ออกแบบไว้ ทำการตัดโค้งด้วยเครื่องอัดเพื่อให้ได้ Run flat ที่มีรัศมีวงที่ จากนั้นทำการกัดพื้นผิวด้านในและด้านนอกของวงล้อ Run flat ด้วยเครื่อง CNC เพื่อให้มีรัศมีวงที่ทั้งด้านในและด้านนอกและนำมาประกอบเข้ากับกระทะล้อรันแฟลทหนึ่งวงมีน้ำหนักโดยประมาณ 11.36 กิโลกรัม

จากบทความวิจัยโดย N. Chalo and P. Chartpuk [6] นั้นได้มีการนำเสนอสูตรส่วนผสมของวัสดุเชิงประกอบสองชนิด คือ ผงพอลิเอทิลีนน้ำหนักโมเลกุลสูงยิ่งยวด (UHMWPE) กับผงอลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) ด้วยกระบวนการอัดขึ้นรูปร้อน (Hot Compression Molding Process) เพื่อใช้เป็นวัสดุเชิงประกอบในการผลิตวงล้อรันแฟลท ที่ให้สมบัติทางกลที่ดีและสมบัติความต้านทานการสึกหรอสูง สภาวะที่เหมาะสมในการอัดขึ้นรูปอยู่ภายใต้ความดัน 100 บาร์ และอุณหภูมิ 140 องศาเซลเซียส จากการวิจัยได้เลือกใช้เกรดของ Al_2O_3 เป็น Al_2O_3 HTM 30 มีขนาดอนุภาคผงไม่สม่ำเสมอเคล้ากันไปอยู่ในช่วง 2 ถึง 5 μm และปริมาณการผสม Al_2O_3 ที่เหมาะสมสำหรับการปรับปรุงสมบัติทางกล และสมบัติในการต้านทานการสึกหรอของวัสดุเชิงประกอบ UHMWPE Composite คือ UHMWPE+ Al_2O_3 HTM 30 ที่อัตราส่วนร้อยละ

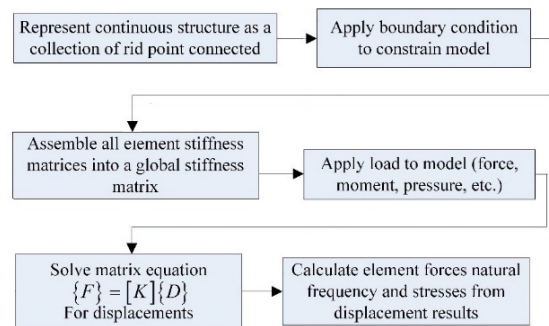
95:5 โดยพิจารณาทั้งในด้านสมบัติของวัสดุและต้นทุน ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้ออกแบบและวิเคราะห์ความแข็งแรงของวงล้อรันแพลทด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์โดยใช้โปรแกรม SolidWorks Simulation เพื่อให้ได้รูปแบบวงล้อรันแพลทที่เหมาะสมสำหรับรถยนต์บรรทุกปกติขนาดเล็กติดเกราะที่กรมการขนส่งทหารบก กองทัพบก ได้วิจัยไว้ร่วมกับภาคเอกชนดังกล่าว

2. ระเบียบวิธีวิจัย

ระเบียบวิธีวิจัยจะใช้กระบวนการวิศวกรรมย้อนรอย (Reverse Engineering) เป็นกระบวนการพัฒนาและสร้างชิ้นส่วนเครื่องจักรกลขึ้นมาใหม่ให้มีประสิทธิภาพด้านการใช้งานที่ดีกว่าเดิม หรือเพื่อแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้นกับชิ้นส่วนเดิม โดยปกติจะเป็นชิ้นส่วนเครื่องจักรกล ชิ้นส่วนเครื่องมือ อุปกรณ์ หรือตัวผลิตภัณฑ์ก็ได้ จัดได้ว่าเป็นกระบวนการพัฒนาผลิตภัณฑ์ และชิ้นส่วนเดิมที่มีอยู่โดยใช้หลักการออกแบบทางวิศวกรรม ที่ได้รับความนิยมของนักวิศวกรการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method: FEM) เป็นเครื่องมือสำคัญในการวิเคราะห์หาความแข็งแรงของล้อรันแพลท แสดงการกระจายของความเค้นและความเครียด และการเสียรูปมีกระบวนการวิเคราะห์ดังรูปที่ 2 [7], [8] โดยกำหนดสมบัติของวัสดุเป็น UHMWPE+Al₂O₃ ที่อ้างอิงจากบทความวิจัยของ N. Chalo and P. Chartpuk [6] กระบวนการวิเคราะห์ที่ตั้งอยู่บนสมมติฐาน คือ เป็นวัสดุที่เป็นเนื้อเดียวกัน (Homogeneous Material) มีการกระจายตัวของอนุภาค Al₂O₃ ทั่วทั้งปริมาตรของชิ้นทดสอบ มีสมบัติเหมือนกันในทุกทิศทุกทาง (Isotropic Materials) และการวิเคราะห์ความเค้นและความเครียดรวมทั้งการเสียรูปอยู่ในช่วงขีดจำกัดยืดหยุ่นเชิงเส้น (Linear Elastic Region)

ในกระบวนการวิจัยประกอบด้วย 2 วิธี คือ 1. การวิเคราะห์ด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ และ 2. การทดลอง โดยเปรียบเทียบผลของทั้งสองวิธีด้วยค่าความเค้นใน

ตำแหน่งเดียวกันที่เกิดขึ้นบนล้อรันแพลท ภายใต้แรงกระทำภายนอกที่หยุดนิ่ง (Static Loading) สำหรับการวิเคราะห์ด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์เริ่มจากการสร้างโมเดล 3 มิติด้วยโปรแกรม SolidWorks ที่มีขนาด และรูปร่างเป็นไปตามรูปแบบล้อรันแพลทสำหรับรถยนต์บรรทุกปกติขนาดเล็กติดเกราะที่ออกแบบและสร้างไว้โดยกรมการขนส่งทหารบก กองทัพบก และนำเข้าสู่โปรแกรม SolidWorks Simulation เพื่อวิเคราะห์ทางด้านไฟไนต์เอลิเมนต์ และบันทึกค่าความเครียด จากนั้นทำการทดลองโดยใช้เครื่องทดสอบสัมประสิทธิ์ความต้านทานการหมุนของยางล้อและอุปกรณ์จัดเก็บข้อมูล Data Logger ผ่านอุปกรณ์สแตนด์เบจ โดยเก็บค่าความเครียดที่เกิดขึ้นในกระทะล้อและวงล้อรันแพลท และทำการเปรียบเทียบค่าความเครียดระหว่างวิธีการทดลองและวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ เพื่อทดสอบขีดจำกัดและความสามารถของโปรแกรมว่าสามารถวิเคราะห์และจำลองสภาพของโจทย์ปัญหานี้ได้



รูปที่ 2 กระบวนการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ [7], [8]

2.1 วัสดุและเครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

1. วัสดุที่ใช้ในการทดลองและวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์แสดงดังตารางที่ 1 โดยวัสดุ Aluminum Alloy ใช้กำหนดให้กับกระทะล้อ วัสดุ AISI 1020 ใช้กำหนดให้กับล้อรันแพลทโลหะ (ล้อรันแพลทแบบเดิม) และวัสดุ UHMWPE Composite [6] ใช้กำหนดวัสดุให้กับล้อรันแพลทแบบใหม่ของงานวิจัยนี้

2. เครื่องทดสอบสัมประสิทธิ์ความต้านทานการหมุนของยางล้อ

3. KYOWA Data Logger รุ่น EDX-200A และ DCS-100A Program และ Strain Gages

ตารางที่ 1 สมบัติของวัสดุสำหรับการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

Properties	Aluminum alloy	AISI 1020	UHMWPE Composite [6]
Elastic Modulus, MPa	69x10 ³	200x10 ³	784.46
Poisson's Ratio	0.303	0.29	0.30
Shear Modulus, GPa	26	77	-
Mass Density, kg/m ³	2,700	7,900	1,246.46
Tensile Strength, MPa	310	420	29.96
Yield Strength, MPa	275	351	20.52

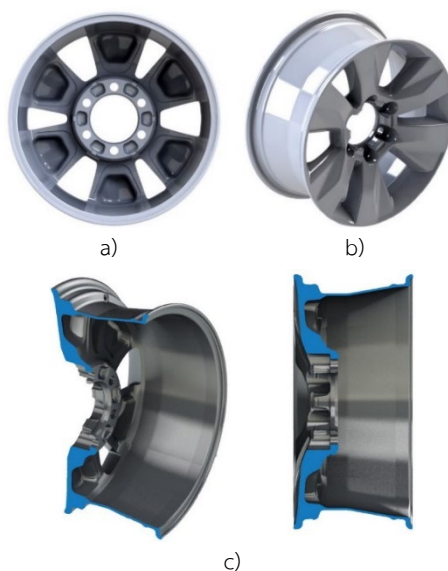
2.2 กระบวนการเตรียมโมเดล 3 มิติ และการออกแบบล้อรีนแฟลท

การทำวิศวกรรมย้อนรอยต้องอาศัยข้อมูลทางเทคนิคและอื่นๆ ของชิ้นส่วนผลิตภัณฑ์เดิมนำมาขึ้นรูปใหม่ให้เป็นโมเดล 3 มิติ ด้วยเครื่องสแกน 3 มิติ ตรวจสอบและตกแต่งผิวโมเดล และทำการจำลองทางคอมพิวเตอร์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อตรวจสอบขีดความสามารถในการใช้งานได้ของชิ้นส่วนนั้น ๆ และทำการออกแบบโมเดลใหม่ โดยอาศัยข้อมูลเดิมพัฒนาต่อยอด และทำการจำลอง ทดสอบการใช้งานภายใต้ตัวแปรต่าง ๆ จนกระทั่งได้โมเดลที่ดีที่สุดตามต้องการ ดังนั้น การทำวิศวกรรมย้อนรอยอย่างเต็มรูปแบบจึงเกี่ยวข้องกับการสืบค้นหาข้อมูลทางเทคนิค การย้อนรอยขนาดและรูปร่างของต้นแบบ วัสดุและกรรมวิธีการผลิตชิ้นส่วนแต่ละชิ้น การประกอบชิ้นส่วนต่างๆ เป็นอุปกรณ์หรือระบบ รวมทั้งการตรวจสอบสมบัติ และพัฒนาสมรรถนะทั้งในระหว่างการผลิตและระหว่างการใช้งาน การเตรียมโมเดลสำหรับการวิเคราะห์เริ่มต้นจากการนำกระทะล้อไปสแกนด้วยเครื่องสแกนเลเซอร์ FARO Messurement FARO

P06-05 ดังรูปที่ 3 เพื่อให้ได้โมเดลสำหรับการออกแบบแม่พิมพ์และออกแบบล้อรีนแฟลทโดยใช้โปรแกรมออกแบบชิ้นส่วนเครื่องจักรกลด้วย SolidWorks จากนั้นทำการสร้างพื้นผิวโมเดลด้วยคำสั่ง Surface และแปลงเป็น Solid Model และดำเนินการแก้ไขพื้นผิวของกระทะล้อ เนื่องด้วยการสแกนนั้นจะไม่ได้พื้นผิวโค้งที่เรียบอย่างแท้จริง จนได้รูปแบบโมเดล 3 มิติ ดังรูปที่ 4 จากนั้นจึงนำไปจำลองความแข็งแรงและหาค่าความเค้นและความเครียดด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์โดยโปรแกรม SolidWorks Simulation



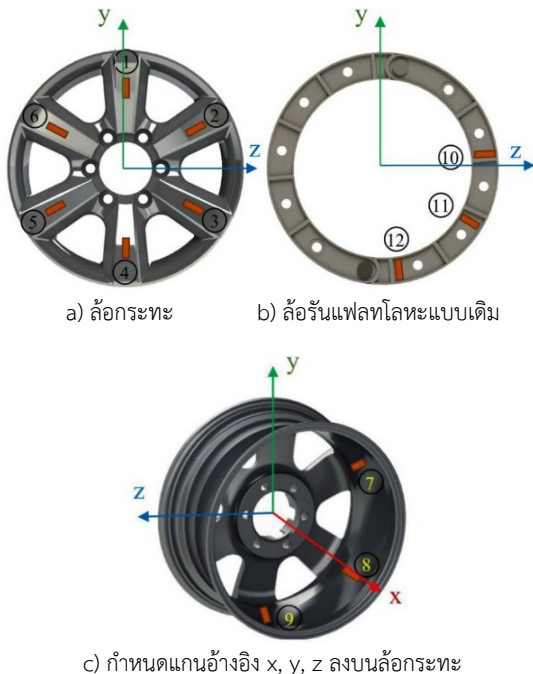
รูปที่ 3 การสแกนกระทะล้อด้วยเครื่องสแกนเลเซอร์ FARO Messurement FARO P06-05



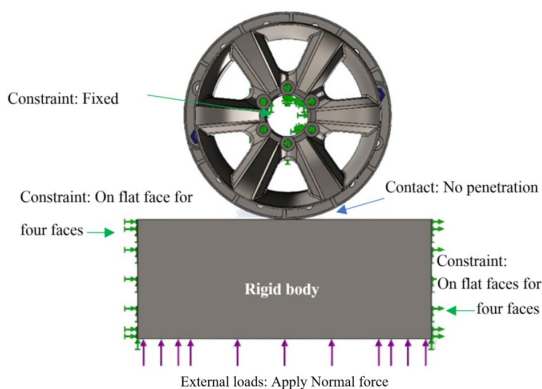
รูปที่ 4 โมเดล 3 มิติ a) มุมมองด้านหลัง b) มุมมองไอโซเมตริก และ c) มุมมองภาคตัดขวาง

2.3 การวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

จากการสร้างกระทะล้อและล้อรันแฟลทขึ้นมาด้วยโปรแกรม SolidWorks ที่มีลักษณะในมุมมองต่าง ๆ ดังรูปที่ 2



รูปที่ 5 ส่วนประกอบชุดล้อรันแฟลท และตำแหน่งติดตั้งสเตรนเกจลงบนกระทะล้อและล้อรันแฟลท



รูปที่ 6 กระบวนการ Pre-Processing สำหรับการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

จากโมเดล 3 มิติของแต่ละชิ้นส่วนและนำมาประกอบเข้าด้วยกันเป็นชิ้นงานประกอบ (Assembly)

จากนั้นได้นำเข้าสู่กระบวนการวิเคราะห์ด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อทำการวิเคราะห์และจำลองสภาพการเสียรูปกระบวนการวิเคราะห์จะถูกต้องได้นั้นต้องระมัดระวังในขั้นตอนการ Pre-Processing โดยเฉพาะอย่างยิ่งการกำหนดค่าคู่สัมผัส (Contact) และการควบคุมขนาดเอลิเมนต์ (Mesh Control) ดังรูปที่ 6 ด้วยเอลิเมนต์ชนิด 10 Nodes Tetrahedral ที่มีขนาดเฉลี่ย 15 มิลลิเมตร จำนวน 170,328 เอลิเมนต์ 261,846 โหนด ทำการกำหนดการจับยึด (Fixtures) ด้วย Fixed ลงไปที่ดุมล้อกระทะ และใส่แรงกระทำด้วยแรงกด (Normal Force) สำหรับกระบวนการ Solve-Processing จะต้องทำการจำลองและปรับค่าตัวแปรในการวิเคราะห์จนกระทั่งได้รูปแบบที่เหมาะสม จากนั้นจึงทำการอ่านค่าความเครียดที่เกิดขึ้น โดยต้องปรับเปลี่ยนการแสดงผลออกมาในแนวแกน x, y และ z (ดูรูปที่ 5 ทิศทางของแกน x, y และ z) เนื่องด้วยทิศทางและตำแหน่งที่ติดตั้งสเตรนเกจในการทดลองจะต้องตรงกันกับทิศทางของค่าความเครียดที่วิเคราะห์ได้



รูปที่ 7 การติดตั้งสเตรนเกจเข้ากับกระทะล้อและล้อรันแฟลท

2.4 การเตรียมการทดลอง

ในการทดลองจะเริ่มต้นจากการนำกระทะล้อมาทำความสะอาดและติดตั้งสเตรนเกจ KFG-5-120-C1-11L3M2R ลงไปที่กระทะล้อ และที่ล้อรันแฟลท ดังรูปที่ 7 มีจำนวนตำแหน่งที่ติดตั้งสเตรนเกจทั้งหมด 12 จุด

แต่จากการทดสอบจะใช้เพียง 7 จุดเท่านั้น เพื่อให้การอ่านค่าสามารถอ่านได้อย่างถูกต้องที่สุด โดยพิจารณาจากทิศทางของแกนอ้างอิง x, y, z ทำการติดตั้งตุ้มล้อเข้ากับล้อรีนแพลท จากนั้นนำไปติดตั้งลงบนแท่นเครื่องทดสอบสัมประสิทธิ์ความต้านทานการหมุนของยางล้อรูปที่ 8 ซึ่งมีรูปแบบการทดสอบเช่นเดียวกับ Ch. Dechwayukul และคณะ [9] ที่สามารถดันชุดล้อเข้าไปสัมผัสกับวงล้อหมุนขนาดใหญ่ที่เปรียบเสมือนถนน และสามารถตั้งค่าแรงกดที่เป็นแรงมาจากระบบไฮดรอลิค



รูปที่ 8 การติดตั้งเครื่องมือทดสอบเข้ากับล้อรีนแพลทและกระทะล้อ

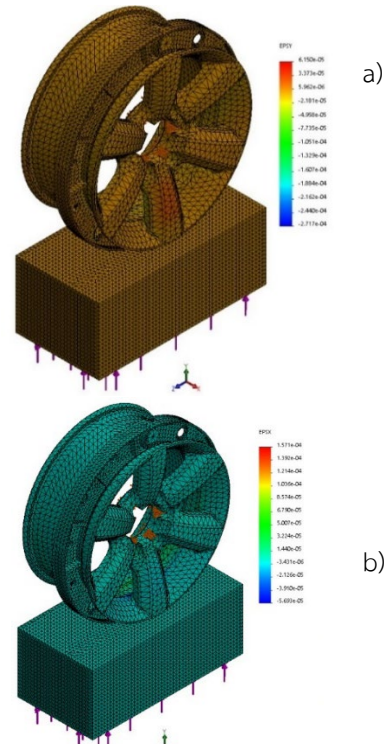
จากนั้นติดตั้งสายสัญญาณเข้ากับเครื่องอ่านและบันทึกค่าความเครียดด้วย KYOWA EDX-200A ที่ผ่านการสอบเทียบมาก่อนแล้ว ในการทดลองได้กระทำด้วยแรงกดภายนอกจำนวน 2 ค่า คือ แรงกด 4,905 และ 7,848 N จากนั้นทำการควบคุมอุณหภูมิ ซึ่งมีผลต่อการอ่านค่า และเริ่มต้นปรับค่าความเครียดให้เป็นศูนย์ (Set Zero) แล้วจึงเริ่มการอ่านค่าความเครียด และบันทึกผล

3. ผลการวิเคราะห์และผลการทดสอบ

3.1 เปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์กับผลการทดลอง

ผลการวิเคราะห์ความเครียดแสดงดังรูปที่ 9 ที่แสดงทั้งค่าความเค้น ความเครียด และการเสียรูปสำหรับผลการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ (FEA) และผลการ

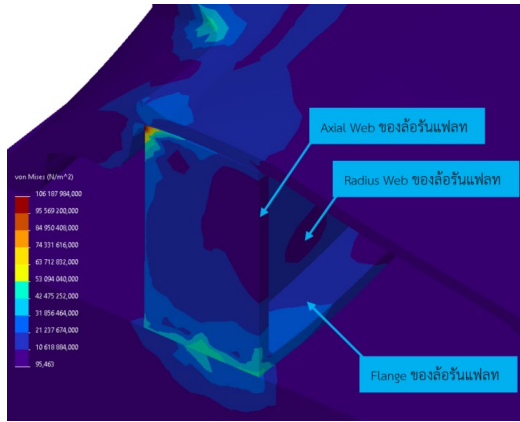
ทดลอง (Experimental) แสดงในตารางที่ 2 ซึ่งพบว่าความแตกต่างของทั้งสองวิธี มีค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 10-16 เนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและค่าความชื้นในห้องทดสอบ ซึ่งจะส่งผลต่อค่าความไวและความถูกต้องของความเครียด



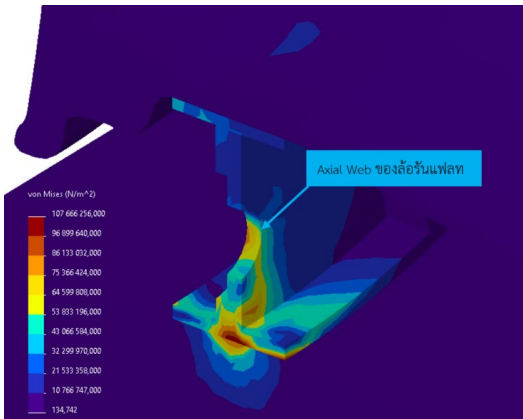
รูปที่ 9 ตัวอย่างการแสดงผลของ a) ความเค้นและ b) ความเครียดในแนวแกน x และ y

ตารางที่ 2 เปรียบเทียบค่าความเครียดในแนวแกนระหว่างวิธีการทดลองกับไฟไนต์เอลิเมนต์

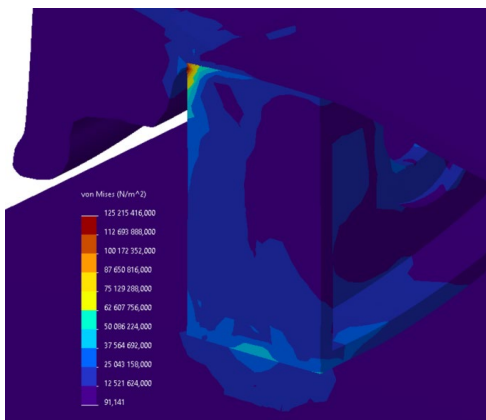
point No.	Strain (x10 ⁻⁶)				% Diff.		Remark
	Exp. result		FEA result				
	F=500 kg	F=800 kg	F=500 kg	F=800 kg	F=500 kg	F=800 kg	
1	0.57	0.91	0.50	0.80	11.88	11.67	y direction
4	22	35.73	18.83	30.12	14.41	15.70	y direction
7	0.38	0.93	32	0.83	15.69	10.66	x direction
8	-1.98	2.46	-1.66	-2.14	16.31	12.99	x direction
9	-1.80	2.86	-1.51	-2.41	16.39	15.65	x direction
10	0.30	41	27	-0.35	11.37	13.95	z direction
12	-4.99	-93	-4.44	-0.80	11.03	14.03	y direction



รูปที่ 15 การกระจายความเค้นที่เกิดขึ้นบริเวณ ล้อรับแรงสำหรับกรณีที่ 2 ด้วยแรงกด 10,000 N



รูปที่ 16 การกระจายความเค้นที่เกิดขึ้นบริเวณ ล้อรับแรงสำหรับกรณีที่ 3 ด้วยแรงกด 10,000 N



รูปที่ 17 การกระจายความเค้นที่เกิดขึ้นบริเวณ ล้อรับแรงสำหรับกรณีที่ 1 ด้วยแรงกด 10,000 N

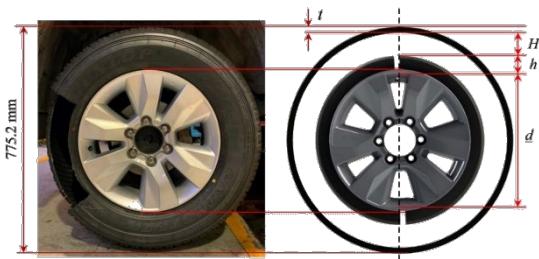
จากการวิเคราะห์ผลดังรูปที่ 14-17 โดยอ้างอิงมุมการติดตั้งล้อรับแรงและกระทะล้อเข้าด้วยกันและอ้างอิงตำแหน่งพื้นผิวที่สัมผัสกับถนน (กำหนดให้ฐานเป็นวัตถุแข็งเกร็ง) พบว่า เกิดการกระจายความเค้นในล้อรับแรง ณ ตำแหน่งที่ล้อรับแรงสัมผัสกับถนน และความเค้นที่เกิดขึ้นไม่เกินความเค้นที่จุดคราก แต่ล้อรับแรงโลหะนี้ยังต้องได้รับการพัฒนาไปสู่ล้อรับแรงด้วยวัสดุใหม่ โดยใช้วัสดุ UHMWPE Composite [6] ที่ต้องออกแบบด้วยการลดความสูงของหน้าตัดรับแรงใหม่และเพิ่มความหนาของรับแรง ให้ความเค้นที่เกิดขึ้นกระจายตัวได้มาก และความเค้นจะลดลงมากกว่าที่แสดงในรูปที่ 14-17 และความเค้นสูงสุดที่ล้อรับแรงแบบเดิมแสดงดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ความเค้นสูงสุดที่ล้อรับแรงแบบเดิม

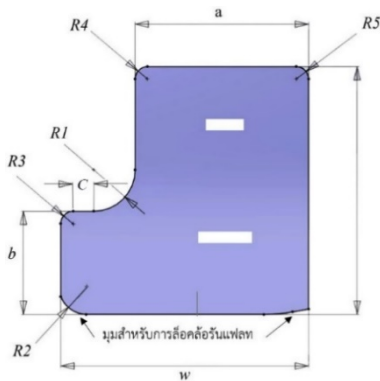
กรณี	ความเค้นสูงสุด (Max.Von-Mises, MPa) เทียบกับแรงกระทำ					
	$\frac{F}{A}$	$\frac{F}{A}$	$\frac{F}{A}$	$\frac{F}{A}$	$\frac{F}{A}$	$\frac{F}{A}$
1	53.5	64.3	75.0	85.7	96.2	107.1
2	53.1	63.7	74.3	84.95	95.6	106.2
3	53.8	64.6	75.3	86.1	96.9	107.6
4	62.6	75.2	87.6	100.2	112.7	125.2

3.3 ผลการออกแบบวงล้อรับแรงใหม่

จากรูปที่ 18 เป็นรูปที่แสดงมิติสำคัญต่างๆ โดยเฉพาะตัวแปรช่องว่าง (H) ที่เป็นระยะความสูงระหว่างผิวทางด้านในของยางมาถึงผิวของล้อรับแรง ในการออกแบบต้องให้มีระยะห่างนี้มากที่จะไม่ทำให้เกิดการกระแทกกันระหว่างสองพื้นผิวดังกล่าวจากการที่ล้อรถยนต์เกิดการกระแทกอันเนื่องมาจากพื้นผิวนถนนที่ไม่ราบเรียบ โดยปกติแล้วล้อยางเป็นล้อเสริมใยเหล็ก หากความดันลมยางภายในอยู่ในเกณฑ์กำหนดและยางนอกยังคงเป็นยางมาตรฐานเดิมของโรงงานผู้ผลิตก็จะไม่เกิดปัญหาการกระแทกนี้ จากรูปที่ 18 ร่วมกับรูปที่ 19 จะทำให้มองเห็นการออกแบบตัวแปรด้วยระยะต่างๆ ที่สอดคล้องกัน แสดงความสัมพันธ์ดังตารางที่ 4



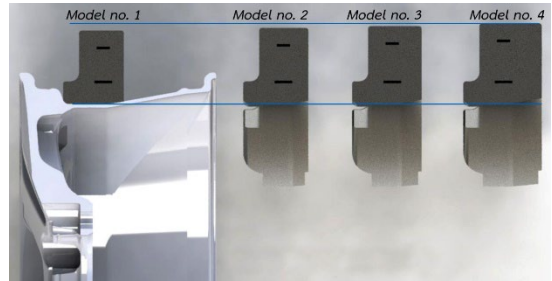
รูปที่ 18 การกำหนดตัวแปรที่สัมพันธ์ระหว่างล้อรถ
แพลตฟอร์ม กระดาษล้อ และยางรถยนต์



รูปที่ 19 การกำหนดตัวแปรควบคุมหน้าตัดของล้อรถ
แพลตฟอร์มใหม่

ตารางที่ 4 กำหนดค่าพารามิเตอร์สำหรับออกแบบหน้า
ตัดล้อรถแพลตฟอร์ม

Parameter	Model no. 1	Model no. 2	Model no. 3	Model no. 4	Remark
a	50	55	60	70	$50 \leq a \leq 85$
h	82	85	87	90	$82 \leq h \leq 90$
w	68	73	78	88	$w = a + R1 + R3 + c$
b	25	25	25	25	-
c	5	5	5	5	fix
R1	10	10	10	10	fix
R2	6.77	6.77	6.77	6.77	fix
R3	3	3	3	3	fix
R4	3	3	3	3	$R4 = R5$
R5	3	3	3	3	$R4 = R5$
d	401.2	401.2	401.2	401.2	fix
t	20	20	20	20	fix
H	85	82	80	77	height for tire collapse



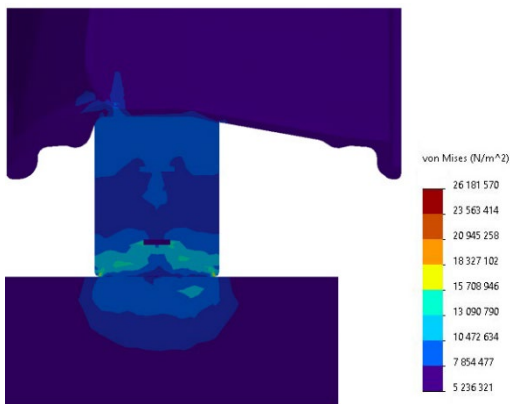
รูปที่ 20 รูปแบบหน้าตัดล้อรถแพลตฟอร์มแบบต่าง ๆ

ส่งผลให้ได้โมเดลของล้อรถแพลตฟอร์มที่มีหน้าตัดขนาดต่างๆ ดังรูปที่ 20 ซึ่งประกอบด้วยโมเดลจำนวน 4 โมเดลด้วยกัน ขนาดของโมเดลล้อรถแพลตฟอร์มจากโมเดลที่ 1 ไปโมเดลที่ 4 จะมีขนาดหน้าตัดใหญ่จากการวิเคราะห์ด้วยไฟไนต์โมเดลที่ 1-4 พบว่าโมเดลที่ 4 เป็นรูปแบบที่กระจายแรงกดและส่งผลให้ความเค้นที่เกิดขึ้นกระจายตัวออกได้มากดังรูปที่ 21-22 ล้อรถแพลตฟอร์มสำหรับรถยนต์บรรทุกทุกปดขนาดเล็กนี้ และรูปแบบของล้อรถแพลตฟอร์มสามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้กับรถยนต์นั่งส่วนบุคคล สำหรับขนาดของอุปกรณ์การล้อที่เป็โครงเหล็กสแตนเลส ภายในสามารถใช้ร่วมกันได้โดยไม่ต้องปรับเปลี่ยนขนาดความหนาของสายรัด แต่อาจต้องเปลี่ยนแปลงขนาดของหน้าแปลนและรัศมีความโค้ง ในกรณีที่เป็นการประยุกต์ใช้กับรถยนต์นั่งส่วนบุคคลนั้น สามารถกระทำได้ เนื่องด้วยการออกแบบและสร้างที่ผ่านมาทั้งหมดใช้ได้กับรถยนต์บรรทุกทุกปดขนาดเล็กติดเกราะที่มีน้ำหนักมากกว่ารถยนต์นั่งส่วนบุคคลทั่วไป 2 เท่าตัว ดังนั้นจึงไม่ใช่ปัญหาด้านความแข็งแรง แต่จะเป็นปัญหาด้านมิติของล้อรถแพลตฟอร์มกับกระโหลกรถยนต์ กรณีที่รถยนต์นั่งส่วนบุคคลที่ใช้ยางแบบแก้มเตี้ย เช่น รถยนต์ BMW หรือ BENZ จะต้องได้รับการพิจารณาให้ความสูง (h) ของวงล้อรถแพลตฟอร์มเตี้ยลงด้วย และเพิ่มความหนาของวงล้อรถแพลตฟอร์มให้มากขึ้นเพื่อกระจายแรงกด

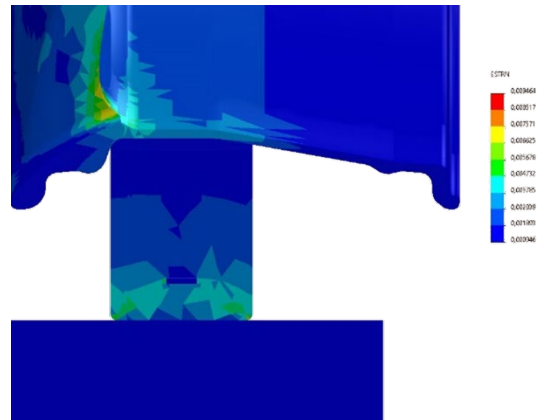
จากการการนำเสนอของ D. Kuerten, [2] นั้นพบว่า การเสริมวงล้อรถแพลตฟอร์มแบบแยกชิ้นนี้ จะมีความ

สะดวกกว่าการสร้างยางรถยนต์ที่แก้มยางมีการเสริมเนื้อยางลงไปให้แข็งแรงเป็นรันแฟลทในตัวดังรูปที่ 18 วงล้อรันแฟลทสามารถใช้งานได้อย่างยาวนานและต้นทุนไม่สูงเกินไป รูปแบบวงล้อรันแฟลท NLR และ ACM Run Flat จะเป็นรูปแบบตัวอย่างในการพัฒนางวงล้อรันแฟลทใหม่ของบทความนี้ ซึ่งจะเลือกรูปแบบ NLR Run Flat เป็นหลักแต่จะเพิ่มเติมเป็นวงล้อตันไม่มีช่องว่างภายในเพื่อให้เกิดเสถียรภาพและความแข็งแรงในการควบคุมขณะวิ่งบนถนนจริง

Ch. Dechwayukul และคณะ [9] ได้นำเสนอรายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์เรื่อง “พัฒนาล้อยางเสริมชั้นโฟมยาง” เป็นการสร้างรันแฟลทที่ทำจากวัสดุยางประกอบด้วยรันแฟลทที่แบ่งออกเป็น 3 ชั้น มีการสร้างแม่พิมพ์เพื่อหล่อยางรันแฟลท พบว่าช่องว่างของล้อยางรันแฟลทกับกระทะล้อหากไม่แนบแน่นจะส่งผลให้เกิดการสั่นสะเทือนขณะใช้งาน ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้ออกแบบการยึดวงล้อรันแฟลทให้แนบสนิทด้วยการเสริมโครงเหล็กเข้าไปภายในของวงล้อรันแฟลท และจำเป็นต้องนำชุดล้อที่ประกอบเข้าด้วยกันทั้งหมดไปทำการติดตั้งตะกั่วถ่วงล้อ เพื่อให้เกิดความสมดุลของมวลล้อขณะทำการวิ่งใช้งาน งานวิจัยนี้ได้เลือกใช้การออกแบบวงล้อรันแฟลทใหม่ให้มี 3 ชั้นส่วนด้วยเช่นกันเพื่อให้สะดวกต่อการประกอบเข้ากับกระทะล้อ และรูปที่ 23 คือ นวัตกรรมล้อรันแฟลทแบบใหม่ที่ได้จากงานวิจัย



รูปที่ 21 ผลการวิเคราะห์ความเค้นของล้อรันแฟลท โมเดลที่ 4 แบบใหม่



รูปที่ 22 ผลการวิเคราะห์ความเครียดของล้อรันแฟลท โมเดลที่ 4 แบบใหม่



รูปที่ 23 รูปแบบวงล้อรันแฟลทที่ประกอบเข้ากับกระทะล้อ

4. สรุปและอภิปรายผล

วิศวกรรมย้อนรอยเป็นกระบวนการพัฒนาและสร้างชิ้นส่วนเครื่องจักรกลขึ้นมาใหม่ให้มีประสิทธิภาพด้านการใช้งานที่ดีกว่าเดิม ในกระบวนการวิศวกรรมย้อนรอยประกอบด้วย การทดลองและการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ผลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์และวิธีการทดสอบจริงจะเป็นค่าความเครียด หากนำผลค่าความเครียดของทั้งสองวิธีมาเปรียบเทียบกัน ณ ตำแหน่งต่าง ๆ ของกระทะล้อและตำแหน่งต่าง ๆ ของล้อรันแฟลท แล้วให้ผลที่สอดคล้องกันจะถือได้ว่าการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธี

ไฟไนต์เอลิเมนต์โดยใช้คอมพิวเตอร์นั้นสามารถเป็นตัวแทนแทนการทดลองได้ จากนั้นจึงทำการออกแบบโมเดลล้อรันแพลทขึ้นมาใหม่ในรูปแบบต่าง ๆ และหาแบบที่ดีที่สุด ระหว่างการออกแบบในแต่ละรูปแบบนั้นก็จะต้องทำการวิเคราะห์ความแข็งแรงด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ทั้งหมด โดยการพิจารณาความแข็งแรงนั้นคือค่าความเค้นที่เกิดขึ้นและค่าความخمของความเค้น ณ ตำแหน่งต่าง ๆ ของล้อรันแพลท สำหรับ J. Stearns [3] ก็ได้ทำการวิเคราะห์ความแข็งแรงของกระทะล้อโดยเลือกใช้วิธีการทดลอง และระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ด้วยโปรแกรม ALGOR เปรียบเทียบผลต่าง ๆ เช่น ค่าความเครียดและการเสียรูป ทำให้ได้การกระจายของความเค้นตามมา ซึ่งบทความวิจัยนี้ก็ใช้วิธีการเดียวกัน เพียงแต่มีล้อรันแพลทเพิ่มเติมเข้ามา และโปรแกรมที่เลือกใช้คือ SolidWorks Simulation จากการวิเคราะห์ ทดสอบและเปรียบเทียบผล พบว่าความแตกต่างของทั้งสองวิธี มีค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 10-16 เนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและค่าความขึ้นในห้องทดสอบ ซึ่งจะส่งผลต่อค่าความไวและความถูกต้องของความเครียด แม้ว่าค่าที่ได้จะแตกต่างกันแต่มีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน และเพียงพอที่จะใช้ผลนี้รับรองกระบวนการวิเคราะห์ด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์

ล้อรันแพลทได้รับการออกแบบและสร้างขึ้นเป็นวงล้อแบบแยกส่วน จึงมีความสะดวกและต้นทุนต่ำกว่าการสร้างยางรันแพลทที่แก้มยางมีการเสริมเนื้อยางลงไปให้เกิดความแข็งแรงหรือที่เรียกว่าเป็นรันแพลทในตัว วงล้อรันแพลทแบบแยกส่วนจะสามารถใช้งานได้ยาวนานและต้นทุนไม่สูงเกินไป วงล้อรันแพลทของนี้มีโครงโลหะกันสนิมทำหน้าที่เปรียบเสมือนเป็นโครงกระดูกในร่างกายมนุษย์ให้เกิดความแข็งแรงและสามารถทำให้วงล้อรันแพลทแนบแน่นเข้ากับกระทะล้อได้เป็นอย่างดี อีกทั้งยังได้นำเสนอรูปแบบหน้าตัดและขนาดของวงล้อรันแพลท สำหรับรูปแบบและเทคนิค

การผลิตรวมทั้งวัสดุคอมพิวเตอร์จากงานวิจัยนี้สามารถนำไปประยุกต์สร้างวงล้อรันแพลทสำหรับรถยนต์นั่งส่วนบุคคลได้ ในกรณีรถยนต์นั่งส่วนบุคคลที่ใช้ยางแบบแก้มเตี้ยที่ต้องพิจารณาให้ความสูงของวงล้อรันแพลทเตี้ยลงด้วย และเพิ่มความหนาของวงล้อรันแพลทให้มากขึ้น ทั้งนี้ เพื่อให้สามารถนำวงล้อรันแพลทประกอบเข้าไปในกระทะล้อได้นั้น การเพิ่มความหนาของวงล้อรันแพลทจะต้องไม่เกินความสูงระหว่างขอบยางกับกระทะล้อ ความหนาของวงล้อรันแพลทที่ออกแบบสามารถใช้งานได้กับรถยนต์บรรทุกทุกประเภทขนาดเล็กติดกระทะที่วิ่งด้วยความเร็ว 50 กิโลเมตรต่อชั่วโมง ได้ระยะทางไกลกว่า 50 กิโลเมตร ล้อรถยนต์หนึ่งล้อจะใช้วงล้อรันแพลทหนึ่งวง ซึ่งแบ่งออกเป็นสามตอนแล้วประกอบเข้าด้วยกัน เพื่อให้เกิดความสะดวกในการประกอบและถอดนอกเหนือจากรถบรรทุกทุกประเภทขนาดเล็กติดกระทะแล้ว ก็สามารถประยุกต์ใช้ได้กับรถยนต์นั่งส่วนบุคคลทั่วไปซึ่งมีใช้ในชีวิตประจำวัน แต่รูปแบบของพื้นผิวกระทะล้อด้านในที่ต้องสัมผัสกับวงล้อรันแพลทของรถยนต์แต่ละยี่ห้อและแต่ละรุ่นจะแตกต่างกันออกไป จึงจำเป็นต้องออกแบบและสร้างล้อรันแพลทให้เหมาะสมในแต่ละยี่ห้อและแต่ละรุ่นด้วย สำหรับการพัฒนาล้อรันแพลทไปสู่ระดับอุตสาหกรรมจำเป็นต้องประเมินต้นทุนในการผลิตภาพรวมและเปรียบเทียบความคุ้มค่าอีกครั้งหนึ่ง

5. กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากสำนักงานการวิจัยแห่งชาติ พ.ศ. 2561 ตามสัญญาเลขที่ กบง./2559-194 คณะผู้วิจัยขอขอบพระคุณสำนักงานการวิจัยแห่งชาติเป็นอย่างสูง ขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร ที่ให้ความอนุเคราะห์สถานที่ เครื่องมือ เครื่องจักร และสาธารณูปโภคต่าง ๆ ในการทำงานวิจัย และขอขอบคุณ ดร.ศุภชัย หลักคำ สำหรับความช่วยเหลือในการทดสอบและบันทึกผลด้วยเครื่องทดสอบสัมประสิทธิ์ ความเสียดทานยางล้อ

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

6. บรรณานุกรม

- [1] Texas Armoring Corporation. (2018, 22 Aug). Bulletproof Armoring Materials. [Online] . Available: <https://www.texasarmoring.com/armoring/materials/>
- [2] D. Kuerten, “Run-flat tires” in *Proceedings Annual Reliability and Maintainability Symposium*, IEEE. USA, 1988, pp. 62-67.
- [3] J. Stearns, “Reinventing the tire,” *International News / Materials and Design*, vol. 22, pp. 591–593, 2001.
- [4] J.R. Cho et.al, “Optimum design of run-flat tire insert rubber by genetic algorithm,” *J. Finite Elements in Analysis and Design*, vol. 52, pp. 60-70, 2012.
- [5] E.G. Markow, “Evolving the banded radial tire,” *Tire Sci. Technol. TSTCA*, vol. 15, no. 1, pp. 30–41, 1987.
- [6] N. Chalo and P. Chartpuk, “Mechanical Properties of UHMWPE Composite with Al_2O_3 for Application in Engineering,” *RMUTP Research Journal*, vol. 16, no. 1, pp. 191-201, Jan.-Jun. 2022.
- [7] V. Voranavin, S. Luangsod and P. Chartpuk, “Analysis of Stress Concentration that occurs in the Reform with Finite element method,” *RMUTP Research Journal*, vol. 5, no. 1, pp. 13-23, Mar. 2011.
- [8] T. Fongsamootr and P. Chartpuk, “Analyses of Stress Distribution in Overhanging Traffic Sign Pole Using Finite Element Method,” *KKU Engineering Journal*, vol. 33, no. 6, pp. 587 – 597, Nov. – Dec. 2006.
- [9] Ch. Dechwayukul, W. Thongruang, P. bunnaul and W. Wisutmethangoon, “Developed pneumatic rubber wheels to add rubber foam layer,” Faculty of Engineering, Prince of Songkla University, Hatyai Campus, 2011.