



การออกแบบล้อรันแฟลทสำหรับรถยนต์นั่งส่วนบุคคลด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์  
Run-flat Wheel Design for Passenger Cars with Finite Element Method

อลงกต ทะจักร์  
Alongkot Thajak

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

2564



การออกแบบล้อรันแฟลทสำหรับรถยนต์นั่งส่วนบุคคลด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์  
Run-flat Wheel Design for Passenger Cars with Finite Element Method

อลงกต ทะจักษ์  
Alongkot Thajak


วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

2564

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

ชื่อวิทยานิพนธ์ การออกแบบล้อรับน้ำหนักสำหรับรถยนต์นั่งส่วนบุคคลด้วยระเบียบวิธี  
ไฟไนต์เอลิเมนต์  
ชื่อ นามสกุล อลงกต ทะจักษ์  
ชื่อปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมเครื่องกล)  
สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล  
คณะ วิศวกรรมศาสตร์  
อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปฏิภาณ ถิ่นพระบาท  
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ดร.ประกอบชาติภักดิ์

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ได้ให้ความเห็นชอบวิทยานิพนธ์ฉบับนี้แล้ว

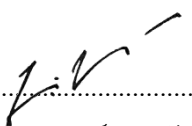
  
..... ประธานกรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กระวี ตรีอำนาจ)

  
..... กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประเสริฐ วิโรจน์ชีวัน)

  
..... กรรมการ  
(ดร.ประกอบ ชาติภักดิ์)

  
..... กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปฏิภาณ ถิ่นพระบาท)

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้  
เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

  
..... รักษาการแทนคณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐพงศ์ พันธุ์นะ)

วันที่ 20 เดือน พฤษภาคม พ.ศ. 2565

ชื่อวิทยานิพนธ์	การออกแบบล้อรถนำพลทสำหรับรถยนต์นั่งส่วนบุคคลด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์
ชื่อ นามสกุล	อลงกต ทะจักษ์
ชื่อปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมเครื่องกล)
สาขาวิชา และคณะ	วิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์
ปีการศึกษา	2564

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบล้อรถนำพลทที่สร้างด้วยอลูมิเนียมสำหรับรถยนต์นั่งส่วนบุคคล และวิเคราะห์ความเค้น ความเครียด รวมทั้งการเสีรูบของล้อรถนำพลทและชิ้นส่วนประกอบต่างๆ ล้อรถนำพลทรูปแบบเดิมที่มีขนาด 17 นิ้ว ที่สร้างด้วยวัสดุ AISI 1020 มีน้ำหนัก 11.36 กิโลกรัม ต่อวงล้อ ปัญหาสำคัญคือน้ำหนักและการประกอบเข้ากับกระทะล้อไม่แนบสนิทและมีช่องว่าง งานวิจัยนี้จึงต้องเปลี่ยนวัสดุจาก AISI 1020 เป็น Aluminum 6063 T6 การทดลองและการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลขโดยการใช้โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ถูกนำมาใช้ในงานวิจัยด้วยการเปรียบเทียบค่าความเครียดที่ตำแหน่งต่างๆ ของล้อรถนำพลทและกระทะล้อ ผลลัพธ์จากทั้งสองวิธีแสดงให้เห็นถึงขีดความสามารถของโปรแกรม SolidWorks Simulation ที่ให้ผลลัพธ์สอดคล้องกับการทดลอง โดยมีความแตกต่างของค่าความเครียดร้อยละ 10-16 โมเดลกระทะล้อขนาด 17 นิ้ว ที่มีความซับซ้อนได้รับการสร้างขึ้นด้วยกระบวนการวิศวกรรมย้อนรอยและกระทะล้อถูกนำมาเป็นชิ้นส่วนอ้างอิงสำคัญเพื่อใช้ออกแบบพื้นที่หน้าตัดของวงล้อรถนำพลทใหม่ที่สร้างด้วย Aluminum 6063 T6 โปรแกรม SolidWorks Simulation เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการออกแบบและวิเคราะห์ความเค้นของล้อรถนำพลทแบบใหม่ที่สร้างด้วยอลูมิเนียมสำหรับกระทะล้อขนาด 17 นิ้ว ไฟไนต์เอลิเมนต์โมเดลของล้อรถนำพลท Aluminum 6063 T6 มีจำนวน 2 ชั้น และน้ำหนักเบา ความเค้นและการเสีรูบได้รับการพิสูจน์ว่ามีค่าไม่เกินค่าความเค้นที่จุดครากอยู่ในช่วงขีดจำกัดยืดหยุ่นเชิงเส้นและมีค่าความปลอดภัย 2-3 เท่า ผลที่ได้คือล้อรถนำพลทจะช่วยให้สามารถขับเคลื่อนต่อไปได้อีก 50 กิโลเมตร ด้วยความเร็ว 50 กิโลเมตรต่อชั่วโมง โดยไม่สูญเสียการควบคุมและช่วยให้สามารถเปลี่ยนยางได้เมื่ออยู่ในสถานที่ที่ปลอดภัย

**คำสำคัญ :** ล้อรถนำพลท, วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์, วิศวกรรมย้อนรอย

<b>Thesis title</b>	Run-flat Wheel Design for Passenger Cars with Finite Element Method
<b>Author</b>	Alongkot Thajak
<b>Degree</b>	Master of Engineering (Mechanical Engineering)
<b>Major program</b>	Mechanical Engineering Faculty of Engineering
<b>Academic Year</b>	2021

## ABSTRACT

The objective of this research was to design run flat wheels made of aluminum for passenger cars and investigate the stress, strain, and deformation of run flat wheels and their components. The original 17 inch run flat wheels were made of AISI 1020 steel with a weight of 11.3 kg per wheel. The main problems were from the high-level weight as well as the untighten connection, together with noticed gaps taking place between the run flat wheel and the wheel. Therefore, in this study, the AISI 1020 material was changed to the Aluminum 6063 T6 material. The Numerical methodology using the finite element program was also chosen to indicate the comparative differences in the strain values engaged at various locations of both run flat wheels and pan wheels. The results obtained from both approaches using SolidWorks Simulation Program uncovered the consistent results of the experiments with a 10-16% difference in strain values. The complicated 17 inch wheel pan model was next built using reverse engineering and employed as a key reference to design the cross-sectional area of the new run flat wheels made of Aluminum 6063 T6. All these two parts could be connected tightly. The SolidWorks Simulation program was employed to design and examine the strength of both designed aluminum run flat wheels made of aluminum and the wheel pan made of 17 inch aluminum alloy to build passenger cars. The finite element model was furthermore applied for the run flat wheels made of aluminum 6063 T6 and it provided run flat wheels composed of 2 light weighted pieces. The stress, strain, and deformation measured were proven and suggested in the test. The output Von Mises stress did not exceed the Yield stress, within the linear elastic limit and 3 times safety integrity value. The results from the study were that the obtained run flat wheels allowed the driver to continuously drive for a further 50 kilometers at a speed of 50 kilometers per hour without losing control. They allowed possible tire repairing or replacing when situated in a safe and convenient location.

**Keywords :** Run-flat Wheel, Finite Element Method, Reverse Engineering

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงได้ด้วยความเมตตากรุณาและอนุเคราะห์จาก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปฎิภาณ ถิ่นพระบาท อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก และอาจารย์ ดร.ประกอบ ชาติภักต์ อาจารย์ที่ปรึกษา ร่วมวิทยานิพนธ์และกรรมการคุมสอบวิทยานิพนธ์ ผู้ซึ่งกรุณามอบความรู้ คำปรึกษา คำแนะนำ ความช่วยเหลือในทุกด้านทั้งการแก้ปัญหาต่างๆ ตลอดจนตรวจสอบวิทยานิพนธ์จนเสร็จสมบูรณ์ ผู้เขียนขอกราบขอบพระคุณอย่างสูงยิ่งไว้ ณ โอกาสนี้

ขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กระวี ตรีอำนรรค ที่กรุณาเป็นประธาน กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ชี้แนะแนวทาง ให้ความรู้ ตรวจสอบแก้ไขวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้สมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประเสริฐ วิโรจน์ชีวัน ที่กรุณาเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ให้ความรู้ ชี้แนะแนวทาง ตรวจสอบแก้ไขวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้สมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณ ดร.ศุภชัย หลักคำ สำหรับคำแนะนำและการทดสอบด้วยเครื่องทดสอบสัมประสิทธิ์ความเสียดทานยางล้อ สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มทร.พระนคร

ขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุรัตน์ วรรณศรี สาขาวิศวกรรมอุตสาหการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ที่ให้ความช่วยเหลือ คำแนะนำ และอำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องมือต่างๆ

ขอขอบพระคุณ ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุและโลหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ที่ให้ความอนุเคราะห์เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบ จนสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา สมาชิกในครอบครัว และครูอาจารย์ทุกท่าน ผู้ที่ให้ความรู้ อนุเคราะห์ ส่งเสริม สนับสนุนด้านทุนทรัพย์และกำลังใจ ค่อยอบรมสั่งสอนจนประสบความสำเร็จในทางการศึกษา

ขอขอบคุณสาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร รวมถึงเจ้าหน้าที่ทุกท่านที่ให้ความอนุเคราะห์สถานที่ อุปกรณ์และเครื่องมือในการทำวิจัย ครั้งนี้ จนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เสร็จสมบูรณ์ดี ท้ายที่สุดนี้ ผู้เขียนหวังเป็นอย่างยิ่งว่าวิทยานิพนธ์เล่มนี้จะมีประโยชน์สำหรับผู้อ่านไม่มากนักน้อยต่อไป

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	ก
Abstract	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญรูป	ช
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย	5
1.3 ขอบเขตของโครงการ	5
1.4 ประโยชน์ที่ได้รับ	5
1.5 สถานที่ทำการทดลอง/เก็บข้อมูล	6
บทที่ 2 ทฤษฎีและการทบทวนวรรณกรรม	
2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	7
2.2 ทฤษฎีเกี่ยวกับยางรถยนต์และล้อรีนแฟลทสำหรับรถยนต์นั่งส่วนบุคคลทั่วไป	14
2.3 การทบทวนวรรณกรรม	18
บทที่ 3 การดำเนินงานวิจัย	
3.1 ระเบียบวิธีวิจัย	33
3.2 การวิเคราะห์ความเค้นและความเครียดของล้อรีนแฟลทด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์	36
3.3 การหาค่าความเครียดของล้อรีนแฟลทด้วยการทดลอง	43
3.4 การออกแบบล้อรีนแฟลทสำหรับรถยนต์นั่งส่วนบุคคล	44
บทที่ 4 ผลการดำเนินงาน	
4.1 ผลการดำเนินงานการทดสอบความเครียดของล้อรีนแฟลทแบบเดิม	47
4.2 ผลการวิเคราะห์ความเครียดของล้อรีนแฟลทแบบเดิมด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์	48
4.3 ผลการออกแบบล้อรีนแฟลทแบบใหม่สำหรับรถยนต์นั่งส่วนบุคคล	51

## สารบัญ (ต่อ)

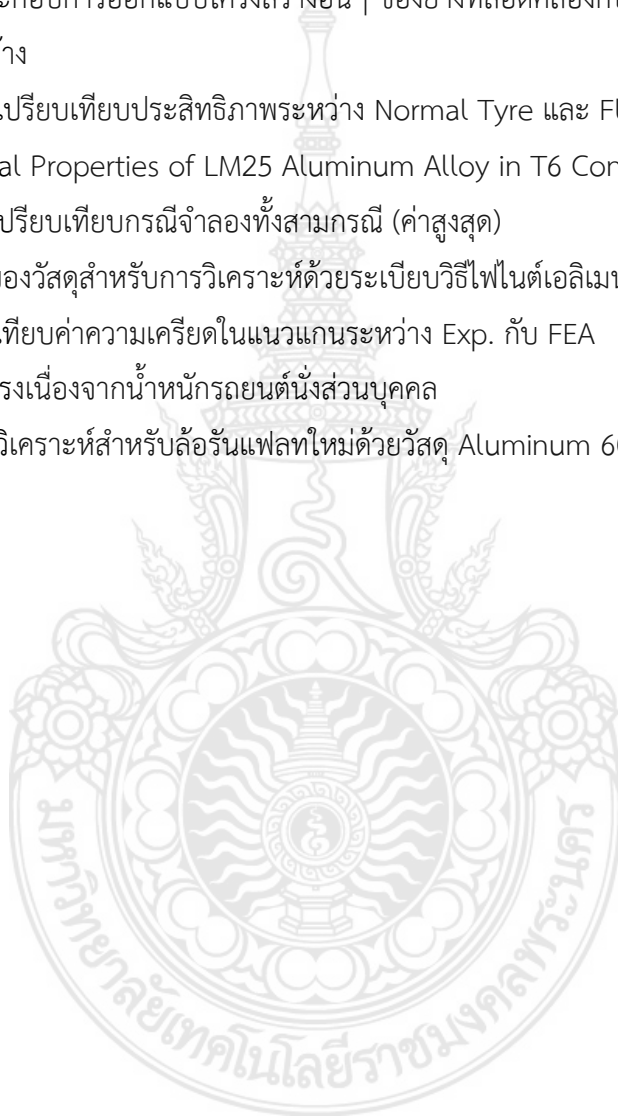
	หน้า
บทที่ 5 สรุปผลและข้อเสนอแนะ	
5.1 สรุปผล	55
5.2 ข้อเสนอแนะ	56
เอกสารอ้างอิง	57
ประวัติการศึกษาและการทำงาน	60





## สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	โครงสร้างแบบจำลองการจำลอง	25
2.2	องค์ประกอบการออกแบบโครงสร้างอื่นๆ ของยางที่สอดคล้องกับการวิเคราะห์เชิงโครงสร้าง	26
2.3	ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพระหว่าง Normal Tyre และ Flat Tyre	29
2.4	Material Properties of LM25 Aluminum Alloy in T6 Condition	30
2.5	ตารางเปรียบเทียบกรณีจำลองทั้งสามกรณี (ค่าสูงสุด)	31
3.1	สมบัติของวัสดุสำหรับการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์	39
4.1	เปรียบเทียบค่าความเครียดในแนวแกนระหว่าง Exp. กับ FEA	49
4.2	ขนาดแรงเนื่องจากน้ำหนักรถยนต์นั่งส่วนบุคคล	51
4.3	ผลการวิเคราะห์สำหรับล้อรันแฟลทที่ใหม่ด้วยวัสดุ Aluminum 6063 T6	54



## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 การเสียหายของยางรถยนต์ที่ผ่านการวิ่งโดยไม่มีลมยาง	2
1.2 การเสียหายของยางรถยนต์โดยไม่มีลมยางแต่มีล้อยันแฟลท	2
1.3 ล้อยันแฟลทโลหะแบบเติมสวมเข้ากับกระทะล้อ	3
1.4 ล้อยันแฟลทสำหรับยานเกราะทางทหาร	4
1.5 ล้อยันแฟลทสำหรับรถยนต์นั่งส่วนบุคคล	4
2.1 ลักษณะความเค้นใน 3 มิติ	8
2.2 เอลิเมนต์รูปทรงสี่หน้า	10
2.3 ส่วนประกอบของยาง	15
2.4 ล้อยันแฟลท ก) Self-supporting Tire และ ข) Supporting Ring System	17
2.5 ล้อยัน ก) ล้อยันธรรมดา ข) ล้อยันแฟลทแบบ Self-supporting Tire และ ค) Self Seal Leakage Tire	18
2.6 ลักษณะรูปร่างยางหลังจากสูญเสียแรงดันอากาศแบบธรรมดาและแบบยาง รันแฟลท	19
2.7 Run Flat Tire System and Device	19
2.8 ภาพการประกอบชิ้นส่วนล้อยันแฟลท	19
2.9 Off Road CRF	20
2.10 ผลการวิเคราะห์ด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์	20
2.11 การวิเคราะห์ความแข็งแรงของกระทะล้อรถยนต์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยใช้โปรแกรม ALGOR	21
2.12 มุมมองการโค้งงอผนังด้านข้างสำหรับยางรันแฟลทและยางซีเรียล 205/55 R16 Bridgestone ยางด้านซ้ายมีแรงดันเล็กน้อย ยางตรงกลางเป็นยางรันแฟลท แบบลดแรงดันและยางด้านขวาเป็นยางอนุกรมแบบลดแรงดัน	21
2.13 ข้อมูลจำเพาะของรัศมีสถิติของยาง 205/55 R16 พร้อมระบบรันแฟลท และยางซีเรียล (NORM) ขึ้นอยู่กับแรงดันใช้งาน	22
2.14 มุมมองยาง KTO Rosomak สำหรับ 0 บาร์ พร้อมระบบรันแฟลท	22
2.15 ยานพาหนะด้วยระบบ Tweel โดย Michelin	23
2.16 ล้อคอมโพสิตที่พัฒนาขึ้นในสวีเดน	23
2.17 ภายในระบบ BIB Mousse สำหรับยางรถจักรยานยนต์	24

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.18 การออกแบบโครงสร้างของยางเม็ดเสริม (หน่วย: มิลลิเมตร) (a) รูนยางรันแพลท (b) B-1 และ (c) B-2	25
2.19 แสดงการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในยางเมื่อทำการอบเป็นเวลา 3 ชั่วโมง ที่ได้จากโปรแกรม Ansys Polyflow	27
2.20 ผลจากการขึ้นรูป a) ชิ้นงานหลังจากการอัด b) ภาพตัดขวางของชิ้นงาน	28
2.21 ล้อยางลมที่สวมล้อรันแพลทสำหรับการทดสอบ	29
2.22 2 มิติ และ 3 มิติ ของขอบล้อและส่วนตัดขวางของ Sourav Das	31
2.23 โครงสร้างภายใน a) ล้อยางเสริมเส้นโพน และ b) ลักษณะล้อยางลม	32
3.1 ขั้นตอนกระบวนการศึกษาวิจัย	34
3.2 กรอบการวิจัย (Conceptual Framework)	35
3.3 ล้อรันแพลทโลหะแบบเดิมของรถบรรทุกขนาดเล็ก 4 ล้อ a) ล้อรันแพลทที่ใช้งาน และ b) โมเดลล้อรันแพลท	36
3.4 กระบวนการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์	36
3.5 โมเดล 3 มิติ ของล้อรันแพลทและกระทะล้อของรถยนต์นั่งส่วนบุคคล	37
3.6 การประกอบล้อรันแพลทเข้ากับกระทะล้อ	37
3.7 ตัวอย่างการเกยกันของชิ้นงานระหว่างกระทะล้อและล้อรันแพลท	37
3.8 การกำหนดหน้าสัมผัส (Contact) ระหว่างพื้นผิวของชิ้นส่วนต่างๆ	38
3.9 ตัวอย่างการกำหนดชนิดวัสดุ SUS304	39
3.10 ตัวอย่างการกำหนดชนิดวัสดุ SUS304	40
3.11 เอลิเมนต์และการกำหนดค่าเพื่อแบ่งเอลิเมนต์	40
3.12 การค่าตัวเลือกการวิเคราะห์เป็นแบบ Direct Sparse Solver	41
3.13 การแสดงผลลัพธ์ (a) หน้าต่างการตั้งค่าความเครียดในทิศทางต่างๆ (b) การใช้ Prove ในการแสดงผลค่าความเครียดที่ตำแหน่งต่างๆ และ (c) คำจำกัดความของ Stress Components	41
3.14 ตำแหน่งติดตั้ง Strain Gage ลงบนกระทะล้อและล้อรันแพลท	43
3.15 โครงสร้างระบบทดสอบหาค่าความเครียดด้วยเครื่องทดสอบการห้ามล้อ	44
3.16 เครื่องสแกนเลเซอร์ FARO Measurement FARO P06-05 3 มิติ	45
3.17 หน้าตัดของล้ออัลลอยเป็นตัวกำหนดในการออกแบบ	45

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.1 ตำแหน่งติดตั้ง Strain Gage ลงบนกระทะลื้อและลื้อรันแพลท	47
4.2 การติดตั้ง Strain Gage เข้ากับกระทะลื้อและลื้อรันแพลท	48
4.3 การติดตั้งกระทะลื้อและลื้อรันแพลทเข้ากับอุปกรณ์การทดสอบ	48
4.4 โมเดล 3 มิติ จากกระบวนการวิศวกรรมย้อนรอย a) กระทะลื้อและลื้อรันแพลทแบบเดิม และ b) กระทะลื้อและลื้อรันแพลทแบบใหม่	49
4.5 ตัวอย่างค่าความเครียดจากวิธีไฟโนเอลิเมนต์เพื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลอง	49
4.6 การกระจายความเค้นที่เกิดขึ้นที่กระทะลื้อและลื้อรันแพลทแบบเดิมภายใต้มวล 800 kg	50
4.7 การกระจายความเค้นที่เกิดขึ้นที่กระทะลื้อและลื้อรันแพลทแบบเดิมภายใต้มวล 500 kg	51
4.8 การสแกนด้วยเครื่องสแกนเลเซอร์ FARO P06-05 a) เครื่องสแกน b) โมเดลลื้อ 17 นิ้ว ภายหลังกระบวนการวิศวกรรมย้อนรอย	52
4.9 โมเดล 3 มิติ จากกระบวนการวิศวกรรมย้อนรอย a) กระทะลื้อและลื้อรันแพลทแบบเดิม และ b) กระทะลื้อและลื้อรันแพลทแบบใหม่	52
4.10 กรณีที่ 1 การกระจายความเค้น Von Mises สำหรับลื้อรันแพลทแบบใหม่ ภายใต้แรงกด 3,000 นิวตัน	53
4.11 กรณีที่ 2 การกระจายความเค้น Von Mises สำหรับลื้อรันแพลทแบบใหม่ ภายใต้แรงกด 3,500 นิวตัน	53
4.12 กรณีที่ 3 การกระจายความเค้น Von Mises สำหรับลื้อรันแพลทแบบใหม่ ภายใต้แรงกด 4,000 นิวตัน	53
4.13 กรณีที่ 4 การกระจายความเค้น Von Mises สำหรับลื้อรันแพลทแบบใหม่ ภายใต้แรงกด 5,000 นิวตัน	54

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

หนึ่งในนวัตกรรมใหม่ทางเทคโนโลยีที่ใช้บทเรียนที่ได้จากการแข่งขันรถยนต์ คือ การช่วยให้ผู้ขับขี่สามารถขับต่อไปได้แม้ยางรั่ว ซึ่งเป็นจุดเริ่มต้นของการทดลองและทดสอบเทคโนโลยีโดยการวิจัยและพัฒนากระบวนการใหม่และวัสดุเพื่อลดอันตรายต่อผู้ขับขี่ให้น้อยลงจนถึงให้ความสบายในระดับเดียวกับยางมาตรฐาน แต่ด้วยข้อได้เปรียบที่สำคัญแม้ไม่มีแรงดันอากาศเพื่อไม่ให้มีผลกระทบต่อสมรรถนะของรถยนต์ที่จะเป็นสาเหตุของการสูญเสียค่าใช้จ่ายเป็นอย่างมากและอาจมีผลกระทบต่อสมรรถนะที่นอกเหนือจากการเสียหายของยาง ซึ่งต่อมาได้รับการยอมรับและติดตั้งในรถยนต์ระดับชั้นนำหลายยี่ห้อด้วยคุณลักษณะที่โดดเด่นและสมรรถนะที่คู่ควรกับรถยนต์ชั้นนำระดับสูง เรียกว่า ล้อรถยนต์นิรภัยหรือรันแฟลท (Run-flat) เป็นเทคโนโลยีที่โดดเด่นและกำลังได้รับความนิยมเป็นอย่างมากในปัจจุบันโดยยางจะออกแบบภายใต้โครงสร้างที่มีความแข็งแรงพิเศษเพื่อป้องกันไม่ให้อากาศไหลออกและสูญเสียแรงดันโดยยางไม่หลุดออกจากล้อรถยนต์ เพื่อสามารถขับรถยนต์ต่อไปได้จะช่วยให้สามารถขับต่อไปได้อย่างปลอดภัยถึงแม้ว่าจะอยู่ในสถานการณ์ที่ไม่มีลมยาง หากถูกของแหลมแทงทะลุยางชั้นนอกเข้าไปถึงยางชั้นในลมยางก็จะรั่วออกอย่างรวดเร็วเพียงไม่กี่วินาทียางก็แบนสนิทหรือยางอาจแตกถึงชั้นยางระเบิดทำให้ช่วยรักษารูปทรงและรองรับน้ำหนักของตัวรถยนต์ที่เสียการทรงตัวได้โดยความไม่คล่องตัวของล้อรถยนต์ คือ ความไวที่ค่อนข้างสูงต่อความเสียหายของยางและกระทะล้อ ช่วยต้านทานการเสียดสีและกระจายความร้อนถึงแม้แรงดันต่ำหรือไม่มีก็ตาม ซึ่งปัญหายางแบน ยางแตก เป็นปัญหาอย่างมากในการปฏิบัติงานของทหารและประชาชนในแถบชายแดนประเทศซึ่งรถยนต์นั่งส่วนบุคคลในปัจจุบันได้รับความนิยมแพร่หลายบนท้องถนนเป็นอย่างมาก

ประเด็นสำคัญสำหรับผู้คนที่ใช้ในชีวิตประจำวันที่เป็นรถยนต์นั่งส่วนบุคคลโดยเฉพาะในพื้นที่สามจังหวัดชายแดนภาคใต้นั้น สืบเนื่องมาจากยางรถยนต์ที่สูญเสียแรงดันอากาศไม่เป็นไปตามมาตรฐานในแง่ของการขับขี่ ความสบาย การยึดเกาะและความทนทานต่อการสึกหรอเพื่อหลีกเลี่ยงความเป็นไปได้ที่จะสูญเสียค่าใช้จ่าย หากยางรถยนต์ได้รับการเจาะทะลุด้วยกระสุนปืน ตะปูหรือใบตะปู หรือวัตถุที่ทำให้ยางทะลุเกิดลมรั่ว จะไม่สามารถขับขี่และวิ่งใช้งานต่อไปได้ หรือถ้ายังขับเคลื่อนต่อไปก็จะขับเคลื่อนได้ในระยะทางที่ไม่มากนักและช้า สุดท้ายยางรถยนต์ก็จะถูกขอบกระทะล้อบดเสียหายดังรูปที่ 1.1 และในบริเวณที่เกิดเหตุนี้ผู้ขับขี่มีความจำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องขับขี่ให้ออกจากพื้นที่เสี่ยงดังกล่าว ดังนั้นการติดตั้งล้อรันแฟลทจะช่วยให้สามารถขับรถยนต์ได้อย่างต่อเนื่องไปได้อย่างปลอดภัย จากงานวิจัยที่ผ่านมาได้มีการวิจัยนวัตกรรมเพื่อออกแบบและสร้างล้อรันแฟลทสำหรับรถยนต์นั่งส่วนบุคคล ซึ่งในงานวิจัยนี้เลือกใช้หลักการออกแบบล้อรันแฟลทสำหรับรถยนต์นั่งส่วน

บุคคล และมีขนาดขอบล้อและมีระยะ Offset ของล้อที่แตกต่างกัน ปัจจุบันมีหลายระบบที่ช่วยให้รถยนต์สามารถขับเคลื่อนได้หลังจากยางเสียหาย สิ่งที่ได้รับนิยมนิยมมากสำหรับความเสียหายเล็กน้อย มีความเป็นไปได้ในการแก้ไขแรงดันลมยางโดยใช้ปั๊มลมเข้า แต่ถ้าเกิดความเสียหายมากโดยไม่สามารถขับเคลื่อนต่อไปได้ล้อรันแฟลทที่เป็นวัสดุแข็งซึ่งมีไว้สำหรับการถ่ายน้ำหนักโดยล้อที่กำหนดแม้ว่าไม่มีแรงดันในยาง (รูปที่ 1.2)



รูปที่ 1.1 การเสียหายของยางรถยนต์ที่ผ่านการวิ่งโดยไม่มีลมยาง [1]



รูปที่ 1.2 การเสียหายของยางรถยนต์โดยไม่มีลมยางแต่มีล้อรันแฟลท [2]

จากการศึกษาลักษณะของกระทะล้ออัลลอยด์ของรถยนต์นั่งส่วนบุคคลโดยในที่นี้เลือกเป็นรถยนต์นั่งส่วนบุคคล เนื่องจากเป็นรถยนต์นั่งส่วนบุคคลที่มีจำนวนการใช้งานมากที่สุดในสามจังหวัดภาคใต้ พบว่าในการออกแบบจำเป็นต้องพิจารณาพารามิเตอร์หลายอย่างประกอบด้วย

- ความกว้างที่เหมาะสมของล้อรันแฟลททั้งในส่วนที่ติดกับกระทะล้อและส่วนที่จะต้องสัมผัสกับผิวยางด้านในล้อ
- รัศมีภายในและภายนอก ซึ่งรัศมีภายในเป็นค่าที่ขึ้นอยู่กับขนาดกระทะล้อและรัศมีภายนอกจะเป็นตัวแปรที่กำหนดค่าความสูงของล้อรันแฟลท
- วัสดุที่ใช้ในการสร้างล้อรันแฟลท
- การออกแบบลักษณะล้อรันแฟลทให้สามารถประกอบและถอดได้อย่างง่าย



- การออกแบบชุดล้อคล้อรันแพลทให้สามารถรัดล้อรันแพลทเข้ากับกระทะล้อได้อย่างแน่นหนา ไม่คลายตัวขณะใช้งานที่ความเร็ว 50 กิโลเมตรต่อชั่วโมง น้ำหนักโดยรวมประมาณ 1,800 กิโลกรัม
- การออกแบบเพื่อป้องกันล้อรันแพลทกินผิวยางภายใน

ดังนั้นจึงมีแนวคิดที่จะสร้างนวัตกรรมเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการขับขี่ให้กับทหารและประชาชนที่อยู่อาศัยในพื้นที่เสี่ยงภัยภายในประเทศไทย และอาจเป็นแนวทางส่งเสริมและแก้ปัญหาให้กับภาคอุตสาหกรรม ส่งเสริมภาคอุตสาหกรรมให้สามารถผลิตและจำหน่ายในเชิงพาณิชย์ ซึ่งนับเป็นอีกหนึ่งผลิตภัณฑ์เทคโนโลยีที่เป็นของคนไทย การออกแบบการพัฒนาและการสร้างล้อรถยนต์นิรภัยที่เหมาะสมตามหลักวิศวกรรมสำหรับรถยนต์นั่งส่วนบุคคลจึงเป็นงานวิจัยที่จะเข้ามาช่วยแก้ปัญหาดังกล่าวขนาดของกระทะล้อและขนาดยางมีลักษณะเฉพาะของตนเอง ดังนั้นล้อรันแพลทของรถยนต์นั่งส่วนบุคคลนี้จึงแตกต่างจากล้อรันแพลทของรถยนต์นั่งส่วนบุคคลชั้นนำทั่วไป ไม่สามารถนำมาใช้ร่วมกันได้และอีกหนึ่งความสำคัญคือรถยนต์นั่งส่วนบุคคลจะต้องไม่เป็นที่ผิด้สังเกตภายนอกต้องคงไว้ซึ่งลักษณะของรถกระบะที่มีใช้อยู่ทั่วไป (ประชาชนทางภาคใต้นิยมใช้รถบรรทุก Toyota Vigo) เมื่อใช้ในการสำรวจ ติดตามหรือลาดตระเวน จะไม่เป็นเป้าหมายในการถูกโจมตีหรือเมื่อถูกโจมตีเข้าที่ยาง ล้อรันแพลทจะช่วยให้สามารถขับขี่ต่อไปได้อีก 50 กิโลเมตร ด้วยความเร็วไม่เกิน 50 กิโลเมตรต่อชั่วโมง โดยไม่สูญเสียการควบคุมและยังช่วยให้สามารถซ่อมแซม หรือเปลี่ยนยางได้เมื่ออยู่ในสถานที่ที่สะดวกและปลอดภัย จึงเป็นอีกหนึ่งความสำคัญในการป้องกันการสูญเสียกำลังทหารและรถยนต์นั่งส่วนบุคคลให้มีความปลอดภัยอีกทั้งไม่จำเป็นต้องมียางอะไหล่ทำให้น้ำหนักรถลดลง รูปที่ 1.3 เป็นล้อรันแพลทโลหะของกรมการขนส่งทหารบก กองทัพบก (ทบ.) ร่วมกับภาคเอกชนที่ใช้สำหรับรถยนต์นั่งส่วนบุคคล (Toyota Vigo) ซึ่งมีน้ำหนักมากและไม่สามารถประกอบเข้ากับกระทะล้อได้อย่างแนบสนิท



รูปที่ 1.3 ล้อรันแพลทโลหะแบบเดิมสวมเข้ากับกระทะล้อ [3]



รูปที่ 1.4 ล้อรีนแฟลทสำหรับยานเกราะทางทหาร [4]



รูปที่ 1.5 ล้อรีนแฟลทสำหรับรถยนต์นั่งส่วนบุคคล [5]

รูปที่ 1.3-1.4 เป็นตัวอย่าง ล้อรีนแฟลทที่ใช้ในทางการทหารด้วยวัสดุพิเศษที่ต้านทานต่อการสึกหรอ น้ำหนักเบา ลักษณะการออกแบบคือล้อรีนแฟลทต้องสามารถเข้าได้กับลักษณะของกระทะล้อ มีความสะดวกในการประกอบเข้าไปซึ่งต้องใส่หลังจากการประกอบยางเข้าไปกับกระทะล้อแล้ว การประกอบต้องแนบสนิทและแน่น ไม่หลวมคลอน ล้อรีนแฟลทที่ออกแบบอาจต้องมีสองชั้นหรือสามชั้น ประกอบเข้าด้วยกันเป็นวงล้อรีนแฟลทหนึ่งวง อุปกรณ์การจับยึดและล้อคล้อรีนแฟลททุกชิ้นเข้าด้วยกันต้องแข็งแรงต้านทานแรงกระแทกจากน้ำหนักตัวรถที่วิ่งด้วยความเร็วต่างๆ ขึ้นอยู่กับการออกแบบล้อรีนแฟลทนั้นๆ หากวงล้อรีนแฟลทเกิดความเสียหายในขณะขับขี่รถยนต์ เช่น ชุดอุปกรณ์ การล้อคขาดหรือคลายตัว ส่งผลให้วงล้อรีนแฟลทแยกจากกัน

ดังนั้นล้อรีนแฟลทสำหรับรถยนต์นั่งส่วนบุคคลของกรมการขนส่งทหารบก กองทัพบก (ทบ.) ร่วมกับภาคเอกชน ดังรูปที่ 1.3 สามารถได้รับการพัฒนาและออกแบบใหม่เพื่อให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุด ปลอดภัย ไม่หลวมคลอน ไม่กินเนื้อยางด้านใน ไม่เสียรูปเมื่อได้รับแรงกระแทก สามารถถอด



ประกอบได้ง่ายและมีความเหมาะสมกับการใช้งานให้มีลักษณะดังตัวอย่างรูปที่ 1.4-1.5 การออกแบบและการวิเคราะห์ต้องพิจารณาตัวแปรหลายตัว เช่น 1) ความกว้างที่เหมาะสมของล้อรันแพลททั้งในส่วนที่ติดกับกระทะล้อและส่วนที่จะต้องสัมผัสกับผิวยางด้านในเมื่อยางแบน 2) รัศมีภายในและภายนอก ซึ่งรัศมีภายในเป็นค่าที่ขึ้นอยู่กับขนาดกระทะล้อและรัศมีภายนอกจะเป็นตัวแปรที่กำหนดค่าความสูงของล้อรันแพลท 3) การออกแบบรูปทรงเพื่อป้องกันล้อรันแพลทกินผิวยางภายในและรูปทรงของวงล้อรันแพลทในส่วนที่ต้องสัมผัสกับกระทะล้อ ซึ่งกระทะล้อไม่เรียบมีพื้นที่ที่เอียงยากต่อการจับยึด 4) การออกแบบชุดอุปกรณ์การล้อคให้สามารถรัดล้อรันแพลทเข้ากับกระทะล้อได้อย่างแน่นหนาด้วยน้ำหนักรถยนต์โดยรวม 1,800 กิโลกรัม 5) วัสดุที่ใช้ในการสร้างล้อรันแพลท 6) ความดันลมยาง เป็นต้น

งานวิจัยนี้จึงได้แนวความคิดที่จะสร้างนวัตกรรมรูปแบบล้อรันแพลทสำหรับรถยนต์นั่งส่วนบุคคล เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพสิ่งอุปกรณ์ทางทหารให้กับประเทศไทย ส่งเสริมและแก้ปัญหาให้กับภาคอุตสาหกรรม ส่งเสริมภาคอุตสาหกรรมให้สามารถผลิตและจำหน่ายในเชิงพาณิชย์ นับเป็นอีกหนึ่งผลิตภัณฑ์เทคโนโลยีที่เป็นของคนไทย

## 1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

- 1.2.1 เพื่อออกแบบล้อรันแพลทที่สร้างด้วยอลูมิเนียมสำหรับรถยนต์นั่งส่วนบุคคล
- 1.2.2 เพื่อวิเคราะห์ความเค้น ความเครียด และการเสียรูปของล้อรันแพลทและชิ้นส่วนประกอบต่างๆ

## 1.3 ขอบเขตของโครงการ

- 1.3.1 ใช้ล้ออลูมิเนียมอัลลอยด์ ขนาดขอบกระทะ 17 นิ้ว สำหรับรถยนต์นั่งส่วนบุคคล
- 1.3.2 กำหนดน้ำหนักของรถยนต์ไม่เกิน 1,800 กิโลกรัม โดยการวิเคราะห์ตั้งอยู่บนสมมุติฐานการกระจายน้ำหนักของรถยนต์เท่ากันทุกล้อ
- 1.3.3 ออกแบบและวิเคราะห์ความแข็งแรงของล้อรันแพลทด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์เท่านั้น เช่น SolidWorks และ SolidWorks Simulation
- 1.3.4 ใช้รูปแบบการ Pre-processing และ Solve-processing ของงานวิจัยที่ผ่านมาเป็นรูปแบบในการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ในครั้งนี้
- 1.3.5 สร้างโมเดลล้อรันแพลทด้วยวัสดุ 2 ชนิด และนำมาเปรียบเทียบความสามารถในการใช้งาน ได้แก่ Steel และ Aluminum Alloy

## 1.4 ประโยชน์ที่ได้รับ

- 1.4.1 ได้รูปแบบโมเดลของล้อรันแพลทที่เหมาะสมกับรถยนต์นั่งส่วนบุคคล

- 1.4.2 ได้โมเดลต้นแบบในการนำไปสู่การผลิตจริงและทดสอบใช้งานกับรถยนต์ที่แท้จริงต่อไป
- 1.4.3 ได้รูปแบบและกระบวนการจำลองด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อใช้ในการพัฒนาอีอาร์นแพลตฟอร์มรูปแบบและวัสดุอื่นๆ ต่อไป
- 1.4.4 สร้างและสนับสนุนนักวิจัยรุ่นใหม่ให้มีความเชี่ยวชาญให้กับประเทศไทย และมีการถ่ายทอดองค์ความรู้จากนักวิจัยรุ่นเก่าสู่รุ่นใหม่และสู่ภาคอุตสาหกรรม
- 1.4.5 ได้ผลงานตีพิมพ์ระดับชาติหรือนานาชาติหรือมีผลงานสำหรับการสัมมนาทางวิชาการ

## 1.5 สถานที่ทำการทดลอง/เก็บข้อมูล

- 1.5.1 สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร  
1381 ถนนประชาราษฎร์ 1 แขวงวงศ์สว่าง เขตบางซื่อ กรุงเทพฯ 10800  
โทรศัพท์/โทรสาร: 0 2836 3000 ต่อ 4138
- 1.5.2 สถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร  
399 ถนนสามเสน แขวงวชิระพยาบาล เขตดุสิต กรุงเทพฯ 10300  
โทรศัพท์/โทรสาร: 0 2665 3777 ต่อ 6099
- 1.5.3 สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน  
744 ถ.สุรนารายณ์ อ.เมือง จ.นครราชสีมา 30000  
โทรศัพท์ 0 4423 3000 โทรสาร: 0 4423 3052

## บทที่ 2

### ทฤษฎีและการทบทวนวรรณกรรม

#### 2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

##### 2.1.1 ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ [6]-[8]

ทฤษฎีวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method : FEM) ในหัวข้อ 2.1 นี้อ้างอิงเนื้อหาทั้งหมดจากตำรา “วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เบื้องต้น เรียบเรียงโดย รศ.ดร.ธงชัย พองสมุทร คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่” ที่เรียบเรียงไว้ดังต่อไปนี้ว่าเป็นวิธีทางตัวเลขเพื่อช่วยในการวิเคราะห์ปัญหาทางวิศวกรรมไม่ว่าจะเป็นการวิเคราะห์ทางโครงสร้าง (Structural) หรืออื่นๆ โดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์นั้นจะสามารถประมาณค่าผลเฉลยโดยการแก้สมการเชิงพีชคณิตแทนการแก้สมการเชิงอนุพันธ์โดยในการแก้ปัญหาดังกล่าว โครงสร้างหรือชิ้นงานจะถูกแบ่งออกเป็นชิ้นส่วนเล็กๆ (Element) ในจำนวนที่จำกัด (Finite) และผลเฉลยที่ได้จะเป็นคำตอบที่จุดต่อระหว่างเอลิเมนต์ (โหนด : Node) โดยที่แต่ละเอลิเมนต์จะมีผลเฉลยที่สามารถหาได้ง่ายและเมื่อนำมารวมกันจะสามารถหาค่าผลเฉลยของทั้งโครงสร้างได้โดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์นั้นจะสามารถให้ผลเฉลยของค่าการเสียรูป และแรงที่กระทำ ณ จุดหรือโหนดๆ และค่าความเค้นและความเครียดที่แต่ละเอลิเมนต์ได้ความเครียดกับการเสียรูป และความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดเป็นสิ่งจำเป็นในการวิเคราะห์ทางไฟไนต์เอลิเมนต์ ตัวอย่างปัญหาใน 1 มิติ ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการเสียรูปกับความเครียดดังนี้

$$\varepsilon_x = \frac{du}{dx} \quad (2.1)$$

ซึ่งเป็นสมการสำหรับปัญหาที่มีการเสียรูปน้อย (Small Displacement) และความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดจะมีค่าเท่ากับ

$$\sigma_x = E\varepsilon_x \quad (2.2)$$

โดยที่  $\sigma_x$  คือค่าความเค้นในแนวแกน x และ E คือ ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของวัสดุ

$$[D] = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} 1-\nu & \nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ & 1-\nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ & & 1-\nu & 0 & 0 & 0 \\ & & & \frac{1-2\nu}{2} & 0 & 0 \\ & & & & \frac{1-2\nu}{2} & 0 \\ & & & & & \frac{1-2\nu}{2} \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

เมื่อ  $[D]$  คือ เมทริกซ์คุณสมบัติของวัสดุ

การหาสทิงเฟนสเมทริกซ์สำหรับเอลิเมนต์แบบสปริงเมื่อสปริงที่มีค่านิจของสปริง (Stiffness) เท่ากับ  $k$  รับแรงดึงเท่ากับ  $F$  สามารถเขียนความสัมพันธ์ระหว่างแรงที่กระทำต่อชิ้นงานกับระยะสปริงยืดตัวได้ตามสมการที่ (2.4)

$$F=kx \quad (2.4)$$

เมื่อนำเอาหลักการของสปริงตามสมการที่ (2.4) มาประยุกต์ใช้กับหลักการไฟไนต์เอลิเมนต์จะสามารถเขียนสมการที่ (2.5) ใหม่ในลักษณะของเมทริกซ์ได้เป็น

$$f'=k'd' \quad (2.5)$$

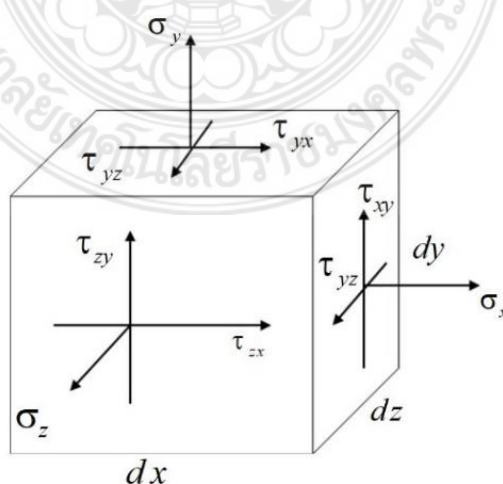
โดยที่  $f'$  คือ เมทริกซ์ของแรงที่กระทำกับสปริง

$k'$  คือ สทิงเฟนสเมทริกซ์ของสปริง

$d'$  คือ เมทริกซ์ของระยะยืด/หดตัวของสปริง

ในการวิเคราะห์เอลิเมนต์ในระบบ 3 มิติ นั้น เอลิเมนต์ประเภทนี้จะให้คำตอบมากกว่า เอลิเมนต์แบบ 2 มิติ หรือแบบแกนสมมาตร เอลิเมนต์แบบทรงสี่หน้า (Tetrahedron) เป็นเอลิเมนต์เบื้องต้นสำหรับ 3 มิติ ในส่วนนี้จะยกตัวอย่างจากหนังสือไฟไนต์เอลิเมนต์เบื้องต้น ผู้แต่ง รศ.ดร.ธงชัย พองสมุทร หน้า 175-180

ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดใน 3 มิติ ตามรูปที่ 2.1 คือลักษณะของความเค้นที่เกิดขึ้นในเอลิเมนต์แบบ 3 มิติ และเมื่อพิจารณาตามหลักการสมดุล (Equilibrium) จะได้ว่า



รูปที่ 2.1 ลักษณะความเค้นใน 3 มิติ [6]-[8]

$$\tau_{xy} = \tau_{yx}, \tau_{yz} = \tau_{zy}, \tau_{zx} = \tau_{xz} \quad (2.6)$$

ดังนั้นจะมีความเค้นเฉือนแค่ 3 ตัวเท่ากันที่ต้องพิจารณารวมกับความเค้นตั้งฉากจะได้เป็น

$$\{\sigma\} = \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{xy} \\ \tau_{yz} \\ \tau_{zx} \end{Bmatrix} \quad (2.7)$$

และความเค้นที่เกิดขึ้นในเอลิเมนต์จะมีดังนี้

$$\{\varepsilon\} = \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ \gamma_{xy} \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{zx} \end{Bmatrix} \quad (2.8)$$

โดยที่  $\varepsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x}, \varepsilon_y = \frac{\partial v}{\partial y}, \varepsilon_z = \frac{\partial w}{\partial z}$

$$\gamma_{xy} = \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} = \gamma_{yx}, \quad \gamma_{yz} = \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} = \gamma_{zy}, \quad \gamma_{zx} = \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} = \gamma_{xz}$$

(2.9)

และความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดเท่ากับ

$$\{\sigma\} = [D]\{\varepsilon\} \quad (2.10)$$

โดยที่

$$[D] = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} 1-\nu & \nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ & 1-\nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ & & 1-\nu & 0 & 0 & 0 \\ & & & \frac{1-2\nu}{2} & 0 & 0 \\ & & & & \frac{1-2\nu}{2} & 0 \\ & & & & & \frac{1-2\nu}{2} \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

การหาสทริกซ์เมทริกซ์สำหรับเอลิเมนต์แบบทรงสี่หน้า

ขั้นตอนที่ 1 เลือกประเภทของเอลิเมนต์

พิจารณาเอลิเมนต์ 3 มิติ แบบสี่หน้า (Tetrahedron) ดังรูปที่ 2.2 โดยที่ 1 เอลิเมนต์ประกอบด้วย 4 โหนด แต่ละโหนดมีระดับความเสรี (Degree of Freedom) เท่ากับ 3 และเมทริกซ์สำหรับการเสียรูปเท่ากับ

$$d = \begin{Bmatrix} u_1 \\ v_1 \\ w_1 \\ \vdots \\ u_4 \\ v_4 \\ w_4 \end{Bmatrix} \quad (2.12)$$



รูปที่ 2.2 เอลิเมนต์รูปทรงสี่หน้า [6]-[8]

ขั้นตอนที่ 2 เลือกฟังก์ชันของการเสียรูป

กำหนดให้การเสียรูปทั้งหมดยังอยู่ในช่วงของการยืดหยุ่นเชิงเส้น (Linear Elastic) อยู่ดังนั้นจะสามารถเขียนฟังก์ชันของการเสียรูป ( $u$ ,  $v$  และ  $w$ ) ในแต่ละแนวได้ดังนี้

$$\begin{aligned}
u(x,y,z) &= a_1 + a_2x + a_3y + a_4z \\
v(x,y,z) &= a_5 + a_6x + a_7y + a_8z \\
w(x,y,z) &= a_9 + a_{10}x + a_{11}y + a_{12}z
\end{aligned} \tag{2.13}$$

จากนั้นกำหนดให้  $\psi'$  เป็นฟังก์ชันของการเสียรูปของ  $u, v$  และ  $w$  โดยที่ในการวิเคราะห์นั้น สามารถทำได้เหมือนกันกับกรณีของเอลิเมนต์สามเหลี่ยม จะได้ว่า

$$u(x, y, z) = \frac{1}{6v} \left\{ (\alpha_1 + \beta_1x + \gamma_1y + \delta_1z)u_1 + (\alpha_2 + \beta_2x + \gamma_2y + \delta_2z)u_2 + (\alpha_3 + \beta_3x + \gamma_3y + \delta_3z)u_3 + (\alpha_4 + \beta_4x + \gamma_4y + \delta_4z)u_4 \right\} \tag{2.14}$$

โดยที่

$$6v = \begin{vmatrix} 1 & x_1 & y_1 & z_1 \\ 1 & x_2 & y_2 & z_2 \\ 1 & x_3 & y_3 & z_3 \\ 1 & x_4 & y_4 & z_4 \end{vmatrix} \tag{2.15}$$

$$\alpha_1 = \begin{vmatrix} x_2 & y_2 & z_2 \\ x_3 & y_3 & z_3 \\ x_4 & y_4 & z_4 \end{vmatrix} \quad \beta_1 = \begin{vmatrix} 1 & y_2 & z_2 \\ 1 & y_3 & z_3 \\ 1 & y_4 & z_4 \end{vmatrix} \quad \gamma_1 = \begin{vmatrix} 1 & x_2 & z_2 \\ 1 & x_3 & z_3 \\ 1 & x_4 & z_4 \end{vmatrix} \quad \delta_1 = \begin{vmatrix} 1 & x_2 & y_2 \\ 1 & x_3 & y_3 \\ 1 & x_4 & y_4 \end{vmatrix} \tag{2.16}$$

และ

$$\alpha_2 = - \begin{vmatrix} x_1 & y_1 & z_1 \\ x_3 & y_3 & z_3 \\ x_4 & y_4 & z_4 \end{vmatrix} \quad \beta_2 = \begin{vmatrix} 1 & y_1 & z_1 \\ 1 & y_3 & z_3 \\ 1 & y_4 & z_4 \end{vmatrix} \quad \gamma_2 = - \begin{vmatrix} 1 & x_1 & z_1 \\ 1 & x_3 & z_3 \\ 1 & x_4 & z_4 \end{vmatrix} \quad \delta_2 = \begin{vmatrix} 1 & x_1 & y_1 \\ 1 & x_3 & y_3 \\ 1 & x_4 & y_4 \end{vmatrix} \tag{2.17}$$

และ

$$\alpha_3 = \begin{vmatrix} x_1 & y_1 & z_1 \\ x_2 & y_2 & z_2 \\ x_4 & y_4 & z_4 \end{vmatrix} \quad \beta_3 = - \begin{vmatrix} 1 & y_1 & z_1 \\ 1 & y_2 & z_2 \\ 1 & y_4 & z_4 \end{vmatrix} \quad \gamma_3 = \begin{vmatrix} 1 & x_1 & z_1 \\ 1 & x_2 & z_2 \\ 1 & x_4 & z_4 \end{vmatrix} \quad \delta_3 = - \begin{vmatrix} 1 & x_1 & y_1 \\ 1 & x_2 & y_2 \\ 1 & x_4 & y_4 \end{vmatrix} \tag{2.18}$$

และ

$$\alpha_4 = - \begin{vmatrix} x_1 & y_1 & z_1 \\ x_2 & y_2 & z_2 \\ x_3 & y_3 & z_3 \end{vmatrix} \quad \beta_4 = \begin{vmatrix} 1 & y_1 & z_1 \\ 1 & y_2 & z_2 \\ 1 & y_3 & z_3 \end{vmatrix} \quad \gamma_4 = \begin{vmatrix} 1 & x_1 & z_1 \\ 1 & x_2 & z_2 \\ 1 & x_3 & z_3 \end{vmatrix} \quad \delta_4 = - \begin{vmatrix} 1 & x_1 & y_1 \\ 1 & x_2 & y_2 \\ 1 & x_3 & y_3 \end{vmatrix} \tag{2.19}$$

สามารถที่จะเขียนรูปของเมทริกซ์สำหรับฟังก์ชันการเสียรูปเท่ากับ

$$\begin{Bmatrix} u \\ v \\ w \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} N_1 & 0 & 0 & N_2 & 0 & 0 & N_3 & 0 & 0 & N_4 & 0 & 0 \\ 0 & N_1 & 0 & 0 & N_2 & 0 & 0 & N_3 & 0 & 0 & N_4 & 0 \\ 0 & 0 & N_1 & 0 & 0 & N_2 & 0 & 0 & N_3 & 0 & 0 & N_4 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_1 \\ v_1 \\ w_1 \\ u_2 \\ v_2 \\ w_2 \\ u_3 \\ v_3 \\ w_3 \\ u_4 \\ v_4 \\ w_4 \end{Bmatrix} \quad (2.20)$$

โดยที่

$$\begin{aligned} N_1 &= \frac{(\alpha_1 + \beta_1 x + \gamma_1 y + \delta_1 z)}{6V} & N_2 &= \frac{(\alpha_2 + \beta_2 x + \gamma_2 y + \delta_2 z)}{6V} \\ N_3 &= \frac{(\alpha_3 + \beta_3 x + \gamma_3 y + \delta_3 z)}{6V} & N_4 &= \frac{(\alpha_4 + \beta_4 x + \gamma_4 y + \delta_4 z)}{6V} \end{aligned} \quad (2.21)$$

ขั้นตอนที่ 3 ระบุความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดกับการเสียรูป และความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดกับการเสียรูปได้ว่า

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ \gamma_{xy} \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{zx} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \frac{\partial u}{\partial x} \\ \frac{\partial v}{\partial y} \\ \frac{\partial w}{\partial z} \\ \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \\ \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \\ \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \end{Bmatrix} \quad (2.22)$$

หรือ

$$\{\varepsilon\} = [B]\{d\} \quad (2.23)$$

โดยที่



$$[B] = [B_1 \quad B_2 \quad B_3 \quad B_4] \quad (2.24)$$

และ

$$B_1 = \begin{bmatrix} N_{1,x} & 0 & 0 \\ 0 & N_{1,y} & 0 \\ 0 & 0 & N_{1,z} \\ N_{1,y} & N_{1,x} & 0 \\ 0 & N_{1,z} & N_{1,y} \\ N_{1,z} & 0 & N_{1,x} \end{bmatrix} = \frac{1}{6V} \begin{bmatrix} \beta_1 & 0 & 0 \\ 0 & \gamma_1 & 0 \\ 0 & 0 & \delta_1 \\ \gamma_1 & \beta_1 & 0 \\ 0 & \delta_1 & \gamma_1 \\ \delta_1 & 0 & \beta_1 \end{bmatrix} \quad (2.25)$$

และสำหรับความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด

$$\{\sigma\} = [D]\{\epsilon\} \quad (2.26)$$

และ

$$\{\sigma\} = [D][B]\{d\} \quad (2.27)$$

ขั้นตอนที่ 4 หาสมการสทริกซ์และสมการสทิพเนส  
เมื่อพิจารณาในรูปของสมการ  $F = Kd$  จะได้ว่า

$$[K] = \iiint_V [B]^T [D][B] dV \quad (2.28)$$

ในกรณีที่เป็นเอลิเมนต์แบบทรงสี่หน้า (Tetrahedron) จะมีค่าคงที่ ดังนี้

$$[K] = V [B]^T [D][B] \quad (2.29)$$

ผลจากน้ำหนัก (Body Force)

$$\{f_b\} = \iiint_V [N]^T \{X\} dV \quad (2.30)$$

โดยที่

$$\{\mathbf{X}\} = \begin{Bmatrix} \mathbf{X}_b \\ \mathbf{Y}_b \\ \mathbf{Z}_b \end{Bmatrix} \quad (2.31)$$

ผลจากแรงที่ผิว (Surface Force)

จาก

$$\{f_s\} = \iint_s [N]^T \{T\} dS \quad (2.32)$$

โดยที่

$$\{T\} = \begin{Bmatrix} p_x \\ p_y \\ p_z \end{Bmatrix} \quad (2.33)$$

## 2.2 ทฤษฎีเกี่ยวกับยางรถยนต์และล้อรถสำหรับล้อรถยนต์ที่นั่งส่วนบุคคล

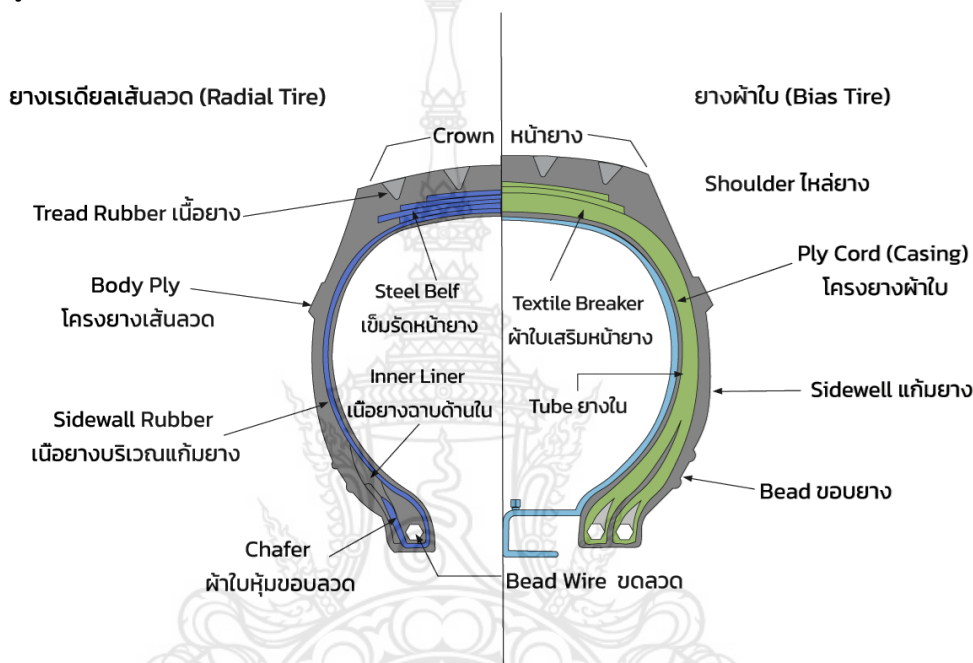
ยางรถยนต์เป็นส่วนประกอบรถยนต์รูปวงแหวนที่หุ้มขอบล้อ เพื่อปกป้องและช่วยให้สมรรถนะของรถยนต์ดีขึ้น เช่น ยางสำหรับรถยนต์และจักรยาน ให้การยึดเกาะระหว่างรถยนต์กับถนนในขณะที่ให้เบาะที่ยืดหยุ่นซึ่งดูดซับแรงกระแทก [9]

วัสดุของยางลมที่ทันสมัย ได้แก่ ยางสังเคราะห์ ยางธรรมชาติ ผ้าและลวด พร้อมด้วยคาร์บอนแบล็คและสารประกอบทางเคมีอื่นๆ ประกอบด้วยดอกยางและลำตัว ดอกยางให้การยึดเกาะในขณะที่ตัวรถยนต์รองรับปริมาณอากาศอัด ก่อนการพัฒนา ยางรุ่นแรกเป็นเพียงแถบโลหะที่สวมรอบล้อไม่เพื่อป้องกันการสึกหรอ ยางในสมัยก่อนเป็นแบบแข็ง (ไม่ใช่แบบลม) ในปัจจุบัน ยางส่วนใหญ่เป็นโครงสร้างแบบเติมลมได้ ยางลมใช้กับยานพาหนะหลายประเภทรวมทั้งรถยนต์ จักรยาน รถจักรยานยนต์ รถโดยสาร รถบรรทุก เครื่องมือหนัก และเครื่องบิน ยางล้อโลหะยังคงใช้กับหัวรถจักรและรางรถไฟ และยางตัน (หรือโพลีเมอร์อื่น ๆ) ยังคงใช้ในการใช้งานที่ไม่ใช่ยานยนต์ เช่น ล้อเลื่อน เกวียน เครื่องตัดหญ้า เป็นต้น [10]-[12]

ส่วนประกอบของยางประกอบด้วยหลายส่วน เช่น ดอกยาง ขอบยาง แก้มยาง ไหล่ยาง และชั้นยาง มีรายละเอียดดังนี้

1. ดอกยางเป็นส่วนหนึ่งของยางที่สัมผัสกับพื้นผิวถนน ส่วนที่สัมผัสกับถนนในช่วงเวลาที่กำหนด คือ ส่วนติดต่อดอกยางเป็นยางหนาหรือยางสารประกอบคอมโพสิตที่คิดค้นขึ้นเพื่อให้มีการยึดเกาะในระดับที่เหมาะสมโดยไม่สึกเร็วเกินไป ลวดลายดอกยางมีลักษณะเฉพาะด้วยรูปทรงเรขาคณิต

ของร่องดอกยาง ร่องจะวิ่งเป็นเส้นรอบวงและเพื่อให้หน้าไหลออกเป็นส่วนของารออกแบบดอกยางที่สัมผัสกับพื้นผิวถนนช่องว่าง คือ ช่องว่างระหว่างร่องที่ช่วยให้ระบายน้ำออกได้ รูปแบบดอกยางมีขนาดดอกยางที่ไม่สมมาตร (หรือไม่สม่ำเสมอ) ตามเส้นรอบวงเพื่อลดระดับเสียงที่ความถี่ต่างๆ ซึ่งปกติจะตั้งฉากกับร่องยางซึ่งช่วยให้น้ำจากร่องยางไหลออกไปด้านข้าง ดอกยางมักได้รับการออกแบบมาให้ยางมีสมรรถนะสูง มีอัตราส่วนช่องว่างขนาดเล็กเพื่อให้ยางสัมผัสกับพื้นถนนมากขึ้น เพื่อการยึดเกาะที่สูงขึ้นแต่อาจผสมด้วยยางที่นิ่มกว่าซึ่งให้การยึดเกาะที่ดีกว่าแต่สึกหรอเร็ว



รูปที่ 2.3 ส่วนประกอบของยาง [13]

2. หน้ายาง (Tread) เป็นส่วนที่อยู่นอกสุดของยางและเป็นส่วนที่สัมผัสผิวถนนทำหน้าที่ป้องกันของมีคมที่จะทำอันตรายต่อโครงยาง ที่หน้ายางก็ประกอบไปด้วยดอกยางและร่องยางเพื่อทำหน้าที่ในการยึดเกาะถนนมีแรงกฤษฎะเวลาวิ่ง เบรกหยุดได้มั่นใจ เป็นต้น ซึ่งในปัจจุบันนี้ดอกยางมีหลายชนิดซึ่งแต่ละชนิดก็จะให้ประสิทธิภาพที่แตกต่างกันออกไป ดังนั้นควรเลือกชนิดของดอกยางให้เหมาะสมกับสภาพการใช้งาน

3. แก้มยาง (Sidewall) เป็นส่วนนอกสุดของยางที่ไม่ได้สัมผัสพื้นถนนที่รถวิ่งอยู่ทำหน้าที่ป้องกันอันตรายที่มีต่อโครงยางและเป็นยางส่วนที่ยืดหยุ่น (Flexible) มากที่สุดของยาง การสึกหรอของแก้มยางไม่เท่ากันจนถึงขั้นผ้า แก้มยาง คือ ส่วนหนึ่งของยางที่เชื่อมระหว่างดอกยางกับขอบยาง แก้มยางส่วนใหญ่เป็นยางแต่เสริมด้วยผ้าหรือสายเหล็กที่ให้ความต้านทานแรงดึงและความยืดหยุ่น แก้มยางบรรจุแรงดันอากาศ และส่งแรงบิดที่ใช้โดยเพลาคับไปยังดอกยางเพื่อสร้างการยึดเกาะแต่รองรับน้ำหนักของรถเพียงเล็กน้อยดังที่เห็นได้ชัดเจนจากการยุบตัวของยางเมื่อเจาะทะลุแก้มยางขึ้นรูปด้วยกรรมวิธีเฉพาะของผู้ผลิตแต่ละราย

4. ไหล่ยาง (Shoulder) ประกอบด้วยเนื้อยางที่หนา หน้าที่ของเนื้อยาง คือ ป้องกันอันตรายที่จะมีต่อโครงยาง ปกติไหล่ยางจะถูกออกแบบเป็นร่องให้เหมาะสมเพื่อช่วยระบายความร้อนภายในยางออกมาได้ง่าย

5. โครงยาง (Carcass) เป็นส่วนประกอบหลักของยางซึ่งมีบทบาทสำคัญที่จะรักษาความดันลมภายในยางเพื่อให้ยางสามารถรับน้ำหนักบรรทุกได้รวมทั้งต้องทนทานต่อแรงกระแทก หรือสั่นสะเทือนจากถนนที่มีต่อยางได้ดี

6. ผ้าใบเสริมหน้ายาง หรือเข็มขัดรัดหน้ายาง (Breaker or Belt) เป็นชั้นที่อยู่ระหว่างหน้ายาง (Tread) กับโครงยาง (Carcass) ในกรณีของยางธรรมดา (Bias Tire) เราเรียกว่า “ผ้าใบเสริมโยหน้ายาง (Breaker)” และในกรณีของยางเรเดียล (Radial Tire) จะเรียกว่า “เข็มขัดรัดหน้ายาง (Belt)” ซึ่งทำหน้าที่ให้หน้ายางมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น รับแรงกระแทกได้ดีและป้องกันไม่ให้โครงยางชำรุดเสียหาย หมายเหตุ มียางธรรมดา (Bias) บางรุ่นที่สภาพการใช้งานไม่รุนแรง อาจจะทำโดยไม่มีชั้นของผ้าใบเสริมหน้ายาง (Breaker) ก็ได้

7. ขอบยาง (Bead) ประกอบด้วยกลุ่มของเส้นลวดเหล็กกล้า (High Carbon Steel) ที่ช่วยยึดส่วนปลายทั้ง 2 ข้างของโครงยางไว้ เพื่อให้บริเวณขอบยาง (Bead) มีความแข็งแรงสามารถยึดแน่นสนิทกับกระทะล้อได้ดี เมื่อนำไปใช้งานสำหรับยางรถยนต์ที่ไม่ใช้ยางใน (Tubeless Tire) ขอบยางเป็นส่วนที่สำคัญที่จะต้องทำหน้าที่ป้องกันไม่ให้ลมยางรั่วซึมออกมา ยางรถยนต์ซึ่งด้านหนึ่งประกอบด้วยขดลวด (Bead wire) ขอบยางเป็นส่วนที่สำคัญที่จะต้องทำหน้าที่ป้องกันไม่ให้ลมยางรั่วซึมออกมา

ยางรันแฟลท (Run Flat Tires, RFT) คือ ยางรถยนต์ที่จะทำให้รถยนต์สามารถเคลื่อนที่ต่อไปได้ แม้ว่ายางรถจะแบนด้วยการถูกเจาะหรือไม่มีลมยางด้วยเหตุผลต่างๆ ยางรันแฟลทได้ถูกนำเสนอขึ้นในช่วงกลางทศวรรษ 1980 หลังจากนั้นก็จะได้รับความนิยมมากขึ้นและผู้ผลิตรถยนต์ในบางยี่ห้อก็ได้กำหนดมาตรฐานสำหรับรถยนต์ใหม่ เช่น ยางรันแฟลทของ Bridgestone ถึงแม้จะไม่มีลมยางก็จะสามารถวิ่งได้เป็นระยะทางถึง 80 กิโลเมตร ด้วยความเร็วไม่เกิน 80 กิโลเมตรต่อชั่วโมง [14]

โดยส่วนใหญ่ยาง Run Flat สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ประเภทหลักๆ คือ

1) แบบ Self-supporting Tire ดังรูปที่ 2.4 ก) และ 2.5 ข) เป็นเทคโนโลยีรันแฟลทที่ใช้กันมากที่สุดในรถยนต์นั่งส่วนบุคคลในปัจจุบันคือมีแก้มยางที่รองรับตัวเอง แก้มยางเสริมความแข็งแรงเพื่อรองรับรถเมื่อแรงดันอากาศต่ำหรือแม้กระทั่งเมื่อยางสูญเสียแรงดันลมยางทั้งหมด ประโยชน์หลักของยางแบบนี้ คือ จะพยุงตัวเองช่วยให้สามารถขับต่อไปบนพื้นราบได้ถึง 50 ไมล์ หลังจากที่อากาศหมด โดยไม่จำเป็นต้องลงจากรถท่ามกลางอากาศหนาว ฝนตก หรือขึ้นทางหลวง หรือบนถนนในย่านที่คับแคบของเมือง ผู้ขับจะต้องลดความเร็วลงเหลือประมาณ 50 ไมล์ต่อชั่วโมง เพื่อให้ได้ช่วงระยะขับต่อสูงสุด เสถียรภาพที่ดีขึ้นหลังจากเกิดการระเบิด เนื่องจากยางนี้สามารถรองรับรถได้หลายไมล์โดยไม่มีอากาศ การบังคับเลี้ยวและการควบคุมรถจะยังคงใกล้เคียงปกติ พื้นที่เก็บสัมภาระมากขึ้น

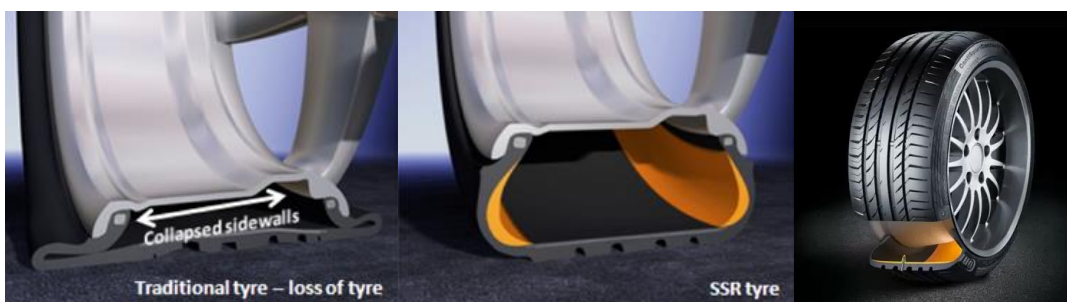
หมายถึงยางอะไหล่ส่วนใหญ่จะอยู่ที่พื้นที่ห้องเก็บสัมภาระ ผู้ผลิตรถยนต์สามารถใช้พื้นที่ดังกล่าวเพื่อเพิ่มพื้นที่จัดเก็บในรถให้สูงสุดได้โดยไม่ต้องใช้พื้นที่ว่าง [15], [16]

2) Auxiliary-supported Run Flat Tires หรือ Support Ring System ดังรูปที่ 2.4 ข) เป็นระบบเสริมที่รองรับจะรวมล้อและยางที่มีเอกลักษณ์เฉพาะสำหรับการใช้งานในรถยนต์ อุปกรณ์ดั้งเดิมในระบบเหล่านี้เมื่อยางแบนเมื่อใดหน้ายางจะมาสัมผัสอยู่บนวงแหวนล้อรันแฟลทที่ติดอยู่กับกระทะล้อ ข้อดีของระบบประเภทนี้คือล้อรันแฟลทแยกออกจากยางโดยตรงเป็นชิ้นส่วนคนละชิ้นซึ่งโดยทั่วไปแล้วจะไม่สึกหรอและไม่จำเป็นต้องเปลี่ยนล้อรันแฟลทและลดราคาของรันแฟลทลง (ซึ่งเมื่อเสื่อมสภาพเป็นระยะและต้องเปลี่ยน) โดยมากจะถูกนำไปใช้กับรถยนต์ขนาดใหญ่ เช่น รถเกราะล้อยางหรือยานพาหนะที่ใช้ในชายแดน เป็นต้น [17]

3) Self-sealing Run Flat Tires ดังรูปที่ 2.4 ค) คือยางนิรภัยที่ผลิตโดยอาศัยเทคนิคการเคลือบผิวใต้ดอกยางด้วยวัสดุ “Sealant” หรือใช้ Polymer ที่สามารถซ่อมแซมรอยรั่วด้วยตัวเอง ยางแบบซีลตัวเองไม่ใช่ยางรันแฟลทในแง่ที่สามารถทำงานได้โดยไม่ต้องใช้ลมแต่มีชั้นเคลือบหลุมร่องฟันภายในยางที่สามารถรักษาแรงดันอากาศในกรณีที่เกิดการเจาะ หากตะปูเจาะที่ยางแล้วถอดออก น้ำยาซีลจะเติมรอยรั่วให้เต็มตราบดีที่อยู่ใกล้ศูนย์กลางของดอกยางและต้องมีขนาดไม่เกิน 5 มิลลิเมตร ข้อได้เปรียบที่ใหญ่ที่สุดของยางแบบชนิดตัวเอง คือ คล้ายกับยางทั่วไปสามารถผสมและจับคู่กับยางมาตรฐานได้ และอายุการใช้งานของดอกยางก็เท่ากัน ข้อเสียคือค่าใช้จ่ายที่สูงขึ้น (ประมาณระดับพรีเมียมเท่ากับยางรันแฟลท) และความพร้อมในการใช้งานที่จำกัดยางประเภทนี้ไม่ใช่ยางมาตรฐานสำหรับรถใหม่แต่มีจำหน่ายเป็นยางทดแทน Continental และ Pirelli เป็นผู้ผลิตยางรถยนต์สองรายที่ผลิตยางแบบซีลตัวเอง [18]



รูปที่ 2.4 ล้อยางรันแฟลท ก) Self-supporting Tire และ ข) Supporting Ring System [16]



รูปที่ 2.5 ล้อยาง ก) ล้อยางธรรมดา ข) ล้อยางรันแฟลทแบบ Self-supporting Tire [17] และ ค) Self Seal Leakage Tire [18]

### 2.3 การทบทวนวรรณกรรม

ยางมีบทบาทสำคัญในความสะดวกสบาย การบังคับควบคุมและความปลอดภัยของรถยนต์ ในช่วงอายุการใช้งานที่ต้องเผชิญกับสภาพถนน และสภาพแวดล้อมที่แตกต่างกันมากมาย โดยทั่วไป มีองค์ประกอบ 3 ลักษณะของยางที่กำหนดความสามารถในการรับน้ำหนักของยางและรักษาหน้าสัมผัสไว้ได้แก่

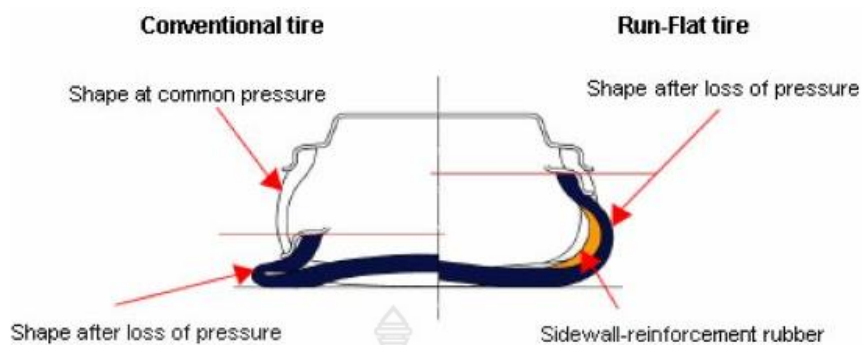
1. ขนาดของช่องลมระหว่างยางกับขอบล้อ
2. ความแข็งแรงที่ได้จากโครงสร้างยาง
3. ปริมาณแรงดันอากาศในยาง

ยางที่แบนส่วนใหญ่เป็นผลมาจากการรั่วซึม โดยไม่มีใครสังเกตและปล่อยให้แรงดันอากาศของยางลดลงและมี 3 เทคโนโลยีที่ใช้เพื่อช่วยรักษาความคล่องตัวของยานพาหนะเมื่อยางถูกเจาะ ได้แก่

1. ยางแบบ Self-sealing
2. ยางเสริมระบบรองรับ
3. ยางแบบ Self-supporting (เรียกว่า Run Flat Tyres)

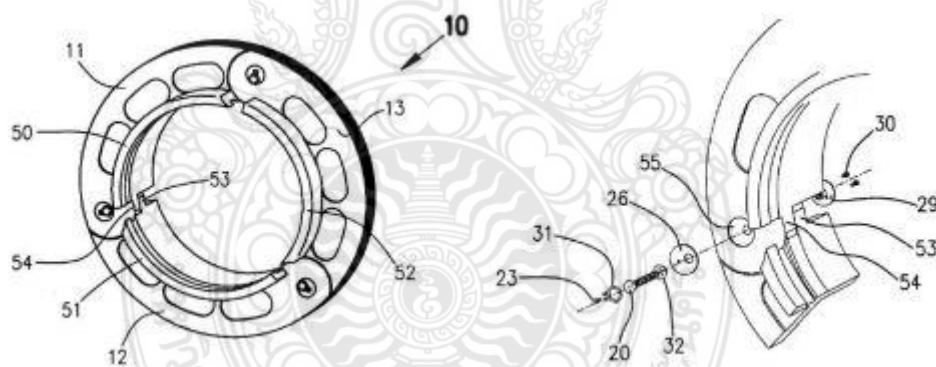
ยางแบบ Self-sealing ได้รับการออกแบบมาเพื่อแก้ไขรอยรั่วบริเวณหน้ายางส่วนใหญ่อย่างถาวรและทันที ในยางเสริมระบบรองรับนั้นดอกยางของยางแบนจะวางอยู่บนวงแหวนรองที่ติดอยู่กับล้อเมื่อยางสูญเสียแรงดันและยางรันแฟลทมีโครงสร้างภายในที่แข็งแรงขึ้น ยางประเภทนี้ใช้ระหว่างการทดลองในโครงการนี้ยางรันแฟลทสามารถบรรทุกน้ำหนักของรถยนต์ได้ชั่วคราว แม้ว่ายางจะสูญเสียแรงดันลมทั้งหมดไปแล้วก็ตาม เพื่อให้มีความสามารถในการ "Self-supporting" มียางแทรกติดอยู่ที่ด้านข้างหรือระหว่างชั้นของยาง โดยทนความร้อนที่ผิวด้านข้างเพื่อช่วยป้องกันยางส่วนที่เสริมขาดหากสูญเสียแรงดันอากาศ (รูปที่ 2.6) นอกจากนี้ยังมีเม็ดยางแบบพิเศษที่ช่วยให้ยางยึดขอบล้อได้อย่างมั่นคงแม้ในกรณีที่สูญเสียอากาศ ในทางปฏิบัติยางรันแฟลทสามารถทำงานได้ 80 กิโลเมตรต่อชั่วโมง เป็นเวลา 80 กิโลเมตร ในกรณีที่สูญเสียอากาศ [19]



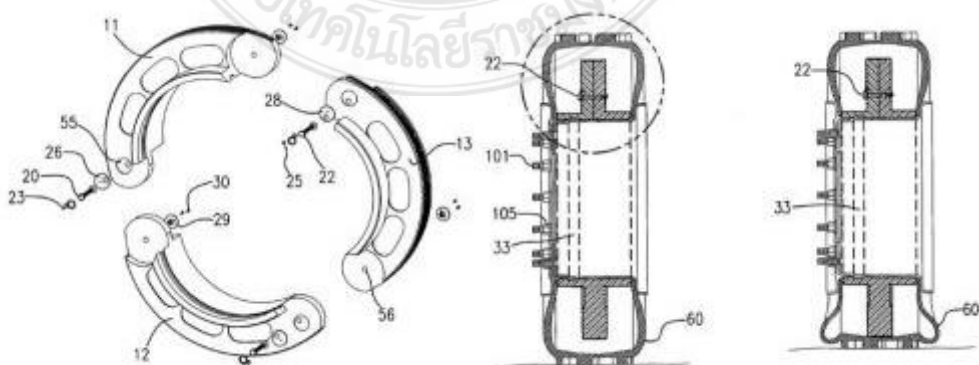


รูปที่ 2.6 ลักษณะรูปร่างหลังจากสูญเสียแรงดันอากาศแบบธรรมดาและแบบยางรันแฟลท [19]

Khaled K. อธิบายล้อรันแฟลทส่วนมากที่ประกอบกันสองชิ้นส่วนมักจะมีปัญหาเรื่องการประกบเข้ากันของล้อรันแฟลททั้งสองชิ้น เนื่องจากในความเป็นจริงชิ้นงานครึ่งวงกลมสองชิ้นที่มีจุดจับยึดนั้นไม่สามารถทำให้รันแฟลทประกบกับล้อกระทะได้อย่างแนบสนิท โดยที่นี้จึงสร้างล้อรันแฟลทแบบ 3 ชิ้น ขึ้นมาดังภาพโดยวัสดุที่ทำล้อรันแฟลทเป็นเหล็กและออกแบบจุดจับยึดแบบพิเศษ เพื่อป้องกันการคลายตัวของสลักเกลียวที่ล้อรันแฟลทเมื่อถูกแรงกด ซึ่งส่วนประกอบของจุดจับยึด ดังรูปที่ 2.7-2.8 [20]



รูปที่ 2.7 Run Flat Tire System and Device [20]

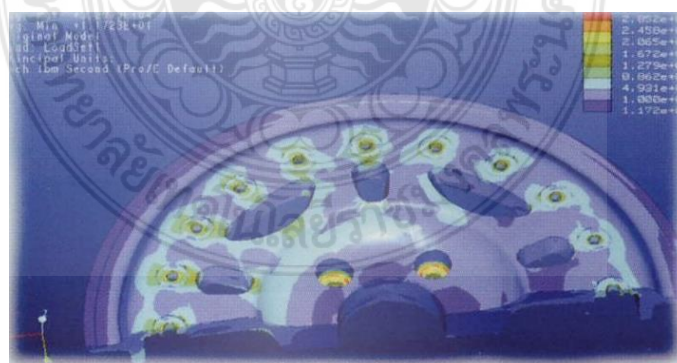


รูปที่ 2.8 ภาพการประกอบชิ้นส่วนล้อรันแฟลท [20]

ที่ผ่านมาได้มีการนำเสนอรถหุ้มเกราะที่ได้รับการออกแบบมา (รูปที่ 2.9) เพื่อปกป้องผู้โดยสารในสภาพแวดล้อมที่เป็นอันตรายแม้แต่การป้องกันที่ดีที่สุดก็อาจไร้ประโยชน์หากรถไม่สามารถเคลื่อนที่ได้ ด้วยเหตุผลนี้ผู้ผลิตรถยนต์รายใหญ่ทั้งหมด จึงหันไปหา Hutchinson เพื่อจัดหาโซลูชันการเคลื่อนย้ายที่จะช่วยให้รักษาความคล่องแคล่วและถูกใช้งานได้อย่าง ล้อรันแฟลทถูกผลิตขึ้นโดยใช้อุปกรณ์และเครื่อง CNC ที่ทันสมัย จากนั้นจึงได้รับการประเมินและทดสอบอย่างเข้มงวดโดยฝ่ายควบคุมคุณภาพโดยใช้อุปกรณ์วัดพิคัดที่ควบคุมโดย Sophisticated Coordinate Measurement รับรองความถูกต้องของชิ้นส่วนก่อนการผลิต การออกแบบใหม่แต่ละรายการจะผ่านการทดสอบโครงสร้างในห้องปฏิบัติการทดสอบ ซึ่งรับรองว่าล้อนั้นเป็นไปตามข้อกำหนดการทดสอบของลูกค้าทั้งหมด มาตรฐานการออกแบบ SAE DOT และ Hutchinson วิศวกรของฮัทชินสันได้พัฒนาการออกแบบล้อแบบใหม่ que แสดงถึงความก้าวหน้าทางเทคโนโลยีขั้นสูงสุด ดังรูปที่ 2.10 ในการจัดหาโซลูชัน การเคลื่อนย้ายให้แก่องค์กร หน่วยงานของรัฐ การขนส่งเงินสด และการใช้งานพลเรือนอื่นๆ ที่หลากหลาย ซึ่งรับประกันความปลอดภัยของผู้โดยสารเป็นอันดับแรก [21]



รูปที่ 2.9 Off Road CRF [21]

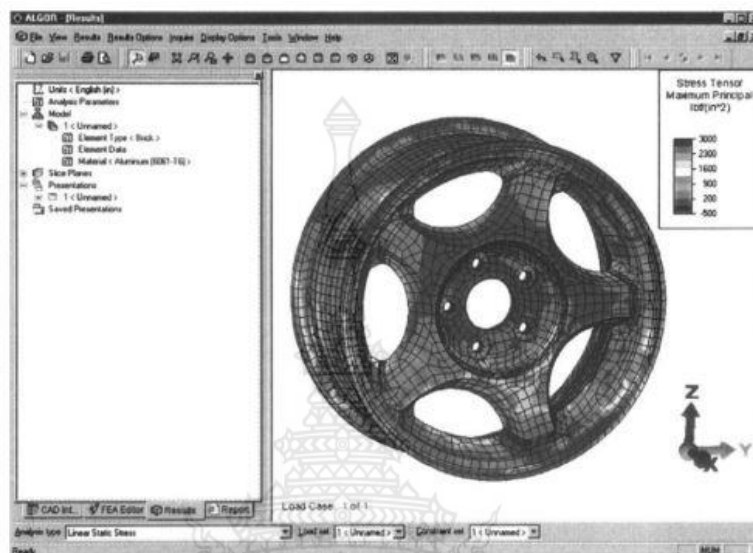


รูปที่ 2.10 ผลการวิเคราะห์ด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ [21]

John Stearns ได้สร้างโมเดลล้ออลูมิเนียมให้กับ Goodyear และถ่ายโอนโมเดลเข้าสู่โปรแกรม ALGOR ด้วยเทคโนโลยี InCAD Algor ผ่านไฟล์ IGES เลือกชนิดเอลิเมนต์เป็น Tetrahedral



จำนวน 35,000 เอลิเมนต์ น้ำหนักของรถกระทำลงบนยางสองวงเท่ากับ 1,000 ปอนด์ ซึ่งเป็นภาระสูงสุด น้ำหนักนี้ถูกนำไปใช้เป็นการคำนวณโหลดลงบนส่วนด้านล่างของล้อที่มีการกระจายแรงในรูปแบบพาราโบลา รูปที่ 2.11 แสดงผลจากการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ [22]



รูปที่ 2.11 การวิเคราะห์ความแข็งแรงของกระทะล้อรถยนต์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยใช้โปรแกรม ALGOR [22]



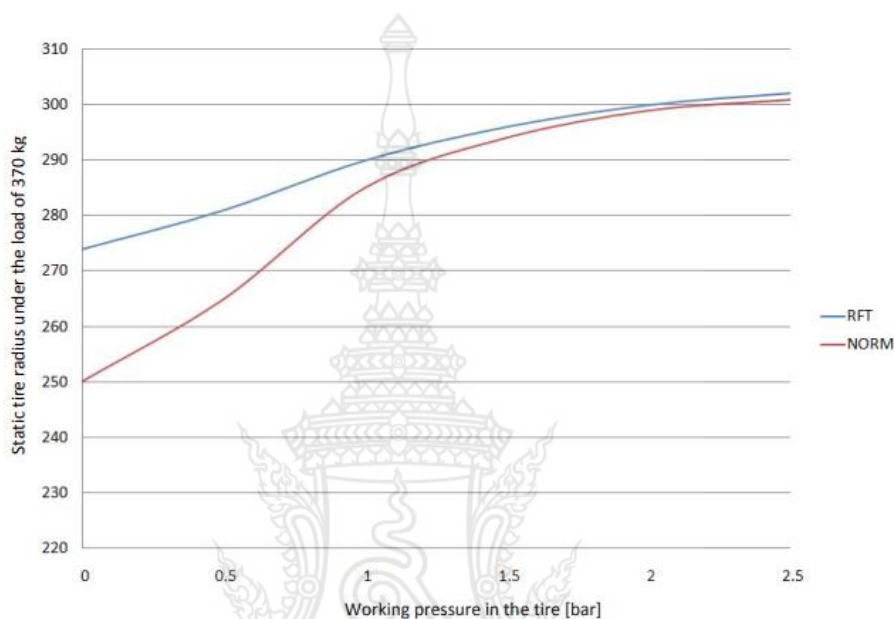
รูปที่ 2.12 มุมมองการโค้งงอผนังด้านข้างสำหรับยางรันแฟลทและยางซีเรียล 205/55R16 Bridgestone ยางด้านซ้ายมีแรงดันเล็กน้อย ยางตรงกลางเป็นยางรันแฟลทแบบลดแรงดันและยางด้านขวาเป็นยางอนุกรมแบบลดแรงดัน [22]

ระบบรันแฟลทปัจจุบันนี้มีหลายระบบที่ช่วยให้รถสามารถขับได้หลังจากยางเสียหายส่งผลให้แรงดันลมยางลดลง สิ่งที่ได้รับนิยามมากที่สุด (รูปที่ 2.12-2.14) [22] ได้แก่

1. สำหรับความเสียหายเล็กน้อยมีความเป็นไปได้ในการแก้ไขแรงดันลมยางโดยใช้ระบบสุบลมที่ล้อกลาง โขลุ่ยชนิดดังกล่าวใช้ในยานพาหนะทางทหารและออฟโรด

2. ยางรันแฟลทมีโครงสร้างรับน้ำหนักที่เสริมความแข็งแรงทำให้สามารถขับต่อไปได้แม้ว่าจะสูญเสียแรงดัน อย่างไรก็ตามมีความเป็นไปได้ที่จะขับต่อไปเป็นระยะทางหลายสิบกิโลเมตรตามข้อกำหนดของผู้ผลิตส่วนใหญ่

3. ระบบของแผ่นรองและส่วนเสริมเพิ่มเติมที่ผลิตในกรณีส่วนใหญ่จากวัสดุที่เป็นยางแข็ง ซึ่งมีไว้สำหรับการถ่ายน้ำหนักโดยล้อที่กำหนดแม้ว่าจะไม่มีแรงกดในยาง



รูปที่ 2.13 ข้อมูลจำเพาะของรัศมีสถิตของยาง 205/55 R16 พร้อมระบบรันแฟลทและยางซีเรียล (NORM) ขึ้นอยู่กับแรงดันใช้งาน [22]



รูปที่ 2.14 มุมมองของ KTO Rosomak สำหรับ 0 บาร์ พร้อมระบบรันแฟลท [22]

การประยุกต์ใช้งานรันแฟลทกับงานความมั่นคงของประเทศ มีวิธีแก้ปัญหาตามมาตรฐานสำหรับยานพาหนะทางทหาร ซึ่งช่วยให้ทหารและกำลังพลออกจากเขตอันตรายได้อย่างปลอดภัย แม้ล้อได้รับความเสียหายเพียงไม่กี่ล้อหรือในกรณีที่เกิดความเสียหายเล็กน้อย สามารถขับไปได้หลายสิบกิโลเมตร

กิโลเมตร อย่างไรก็ตามผู้ผลิตยางล้อได้พัฒนาและปรับใช้ระบบที่เป็นนวัตกรรมใหม่ๆ มากขึ้น ดังตัวอย่าง Tweel Solutions โดย Michelin (รูปที่ 2.15) ระบบดังกล่าวไม่ใช่แรงดันลมยางแต่อย่างใด ผลที่ได้ คือ ความเป็นไปได้ของการทำलयางในสภาพการต่อสู้อัจฉริยะลดลงอย่างมาก ในเวลาเดียวกันตามข้อมูลที่ได้รับจากผู้ผลิตความแข็งแรงในแนวตั้งเนื่องจากน้ำหนักยานพาหนะกดลงไปที่ยางจะถูกพิจารณาเป็นสำคัญ ต้องมีความสะดวกสบายในการขับขี่ที่เพียงพอและสภาวะการควบคุมพวงมาลัยของรถต้องดีด้วย [22]



รูปที่ 2.15 ยานพาหนะด้วยระบบ Tweel โดย Michelin [22]

วิธีแก้ปัญหาที่คล้ายกันนี้ได้รับการพัฒนาในประเทศสวีเดน โดย H. E. Hansson (รูปที่ 2.16) ปัจจุบันนี้เน้นเฉพาะรถยนต์นั่งเท่านั้น การวิจัยเกี่ยวกับล้อคอมโพสิตดังกล่าวได้ดำเนินการในประเทศสวีเดนและในประเทศโปแลนด์ตั้งแต่ปี พ.ศ.2532 มีการสร้างต้นแบบต่อเนื่องของล้อประเภทนี้ขึ้น และสามารถคาดหวังได้ว่าโซลูชันดังกล่าวจะถูกนำมาใช้เพื่อการใช้งานจำนวนมากในอนาคต [22]



รูปที่ 2.16 ล้อคอมโพสิตที่พัฒนาขึ้นในสวีเดน [22]

ระบบอื่นๆ ที่นำมาใช้โดยเฉพาะในกีฬายานยนต์ คือ ระบบที่เรียกว่า “มูส” เป็นวัสดุพิเศษที่เติมลงไปในพื้นที่ด้านในของยางเมื่อตรวจพบการสูญเสียแรงดัน (รูปที่ 2.17) ช่วยให้สามารถขับเคลื่อนต่อไปได้แม้ในความเร็วสูงและการรับน้ำหนักในขณะที่เคลื่อนที่ จัดทำโดย Michelin (BIB Mousse



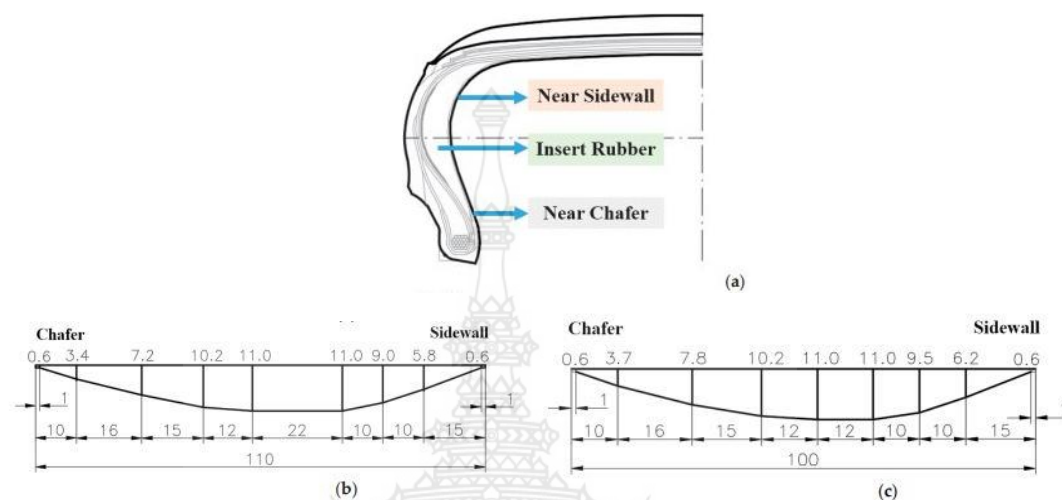
System) ความแข็งแรงของเม็ดยางแทรกแบบตายตัวด้วยระบบมูส ถูกดัดแปลงเพื่อให้ได้รับแรงดัน 0.9 บาร์ สำหรับรถจักรยานยนต์สปอร์ตแบบครอส [22]



รูปที่ 2.17 ภายในระบบ BIB Mousse สำหรับยางรถจักรยานยนต์ [22]

ยางที่ไม่มีลมอาจมีผลกระทบต่อความปลอดภัยอย่างร้ายแรงต่อทั้งผู้โดยสารในรถยนต์และผู้ใช้ถนนรายอื่นๆ ตามสถิติแล้วประมาณ 70 เปอร์เซ็นต์ ของอุบัติเหตุจากรอบทางหลวงเกิดจากลมยางและอัตราการเสียชีวิตของการขับขึ้นยางแบนนั้นใกล้เคียง 100 เปอร์เซ็นต์ ที่ความเร็วมากกว่า 160 กิโลเมตรต่อชั่วโมง ยางจะระเบิดทำให้สูญเสียแรงดันลมยางในทันที ส่งผลให้แก้มยางยุบและส่วนที่รองรับต่อมาจุดศูนย์ถ่วงของรถยนต์เปลี่ยนไปอย่างกะทันหันและรถยนต์เสียการควบคุม การออกแบบยางรันแฟลทได้ผ่านการออกแบบซ้ำๆ หลายครั้งตั้งแต่ไครสเลอร์และ US Royal นำเสนอแนวคิดของยางรันแฟลทในปี 1958 ยางรันแฟลทหลายประเภทได้รับการพัฒนาโดยผู้ผลิตยางในโลก ตั้งแต่มีการแนะนำแนวคิด ยางรันแฟลททั่วไปใช้โครงสร้างรองรับแก้มยางที่ออกแบบมาเป็นพิเศษ ซึ่งสามารถรองรับน้ำหนักของรถยนต์ได้แม้ในกรณีที่สูญเสียแรงดันลมยาง รันแฟลทสามารถวิ่งที่แรงดันภายในเป็นศูนย์ ระยะทางสูงสุด 80 กิโลเมตร ที่ความเร็ว 80 กิโลเมตรต่อชั่วโมง รันแฟลทประเภทที่มียางเสริมความแข็งแรงที่แก้มยางทำให้มีประสิทธิภาพการขับที่เปลี่ยนไป เช่น ความสบายในการขับขึ้น เพราะจะส่งผลต่อความกระด้างในการขับขึ้นและความต้านทานการหมุนลดลงกว่ายางลมแบบธรรมดา อย่างไรก็ตามเมื่อคำนึงถึงความปลอดภัย ตลาดจะค่อยๆ ยอมรับข้อดีของยางรันแฟลท ในปี 2544 ปีเอ็มดับเบิลยู ซีรีส์ 7 รุ่นที่ 4 ออกสู่ตลาดและเป็นรุ่นแรกของรถยนต์ที่ผลิตจำนวนมากที่ติดตั้งยางรันแฟลท ซึ่งแสดงว่ายางรันแฟลทเข้าสู่ตลาดอย่างเป็นทางการแล้วเมื่อเทียบกับโครงสร้างยางแบบดั้งเดิม ยางเสริมเพิ่มเติมและการเสริมความแข็งแรงของยางรันแฟลทจะเปลี่ยนสถานะความเค้นของแก้มยาง ในระหว่างกระบวนการวิ่งอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ มีความพยายามหลายครั้งที่จะตรวจสอบและเพิ่มประสิทธิภาพคุณสมบัติของแก้มยางเสริมความแข็งแรงด้วยตัวเอง โดยพิจารณาจากโครงสร้างของยางและยางเสริม ซึ่งรวมถึงรูปร่าง ความหนา สารประกอบและคุณสมบัติการสร้างความร้อนจากการงอของยางเสริม คุณสมบัติของยางเสริมคือต้องการความแข็งแรงที่สูงขึ้นสำหรับการรองรับโครงสร้าง ซึ่งแตกต่างจากแก้มยางทั่วไป แต่ยังคงต้องมีความต้านทานการดัดงอในระดับที่สูงขึ้นด้วย อย่างไรก็ตาม

คุณสมบัติทั้งสองนี้มักจะขัดแย้งกันและต้องมีความสมดุลอย่างรอบคอบเพื่อให้ได้คุณสมบัติที่เหมาะสมที่สุด [23] มีโมเดลสองมิติ (2 มิติ) ที่ใช้ในการจำลองนี้คือ รุ่น 245/45R18 96W และการออกแบบโครงสร้างของเม็ดยางเสริม (รูปที่ 2.18)



รูปที่ 2.18 การออกแบบโครงสร้างของยางเม็ดเสริม (หน่วย: มิลลิเมตร)

(a) รุ่นยางรันแฟลท (b) B-1 และ (c) B-2 [23]

รูปที่ 2.18 แสดงโครงสร้างยางเสริม 2 แบบ ซึ่งกำหนดเป็น B-1 และ B-2 ประเภทแลตเตอร์ B-1 มีช่วงการเปลี่ยนผ่านความหนามาก ในขณะที่ B-2 เป็นรูปพระจันทร์ครึ่งเสี้ยวที่มีช่วงการเปลี่ยนผ่านความหนาเล็กน้อย เมื่อเปรียบเทียบกับ B-1 แล้ว ความยาวรวมของยาง B-2 จะเล็กกว่า 10 มิลลิเมตร ความหนา 11 มิลลิเมตร ความหนาที่ปลายทั้งสองข้างก็ใหญ่กว่าซึ่งทำให้แข็งขึ้น และความเครียดกระจุกตัวภายใต้แรงดัดงอ เพื่อให้การวิจัยในบทความนี้ดีขึ้นจึงได้ออกแบบสูตรทดลองสี่กลุ่มโดยมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญในด้านการให้ความร้อนและความแข็ง ซึ่งใช้สำหรับการวิเคราะห์แบบจำลองและการผลิตยางด้วยการผสมผสานโครงสร้างของยางเม็ดเสริมทั้งสองแบบในรูปที่ 2.18 และแบบจำลองที่แสดงไว้ในตารางที่ 2.1 [23]

ตารางที่ 2.1 โครงร่างแบบจำลองการจำลอง [23]

List	Compound	Structure
Model-1	A-1	B-2
Model-2	A-2	B-2
Model-3	A-3	B-2
Model-4	A-4	B-2
Model-5	A-1	B-1
Model-6	A-2	B-1

(The compounds of A-1/A-2/A-3/A-4 will presented later on).

ตามรายงานของ Smithers FNF ของยางรันแฟลท 225/45 R17 HP ความแข็งของยางรองของยางรันแฟลทที่ผลิตโดยบริษัทยางที่มีชื่อเสียงระดับโลก โดยทั่วไปจะอยู่ระหว่าง 71–78 และวัสดุยางในสูตรส่วนใหญ่เป็น Cis-polybutadiene (BR) กับยางธรรมชาติ (NR) เช่น ยางรองรับของ Bridgestone คือ NR/BR = 30/70 ส่วนใหญ่คำนึงถึงความยืดหยุ่นสูงของ BR ในขณะเดียวกัน บริษัทอื่นๆ ก็เลือกยางธรรมชาติเป็นวัตถุดิบหลักที่มี Cis-polybutadiene เช่น ยางเม็ดเสริมของมิชลินที่ใช้ NR/BR = 70/30 โดยพิจารณาจากคุณสมบัติทางกายภาพและทางกลที่สูงของยางธรรมชาติเป็นหลัก ดังนั้นจากโครงสร้างแข็งที่แตกต่างกันสองแบบ เราจึงออกแบบยางเม็ดเสริมที่มีความแข็งต่างกันสี่กลุ่มสำหรับการผสม การไล่ระดับความแข็งคือ 78/75/72/68 โดยเลือก NR/BR = 70/30 สำหรับ A-2 และ NR/BR = 30/70 ถูกเลือกสำหรับสามกลุ่มที่เหลือ จากประสบการณ์การพัฒนาครั้งก่อนความแข็งต่ำเกินไปของยางเม็ดไม่เอื้อต่อความทนทานของยางภายใต้ความกดอากาศเป็นศูนย์ ดังนั้นในการทดลองนี้ A-3 และ A-4 จึงเป็นชุดค่าผสมใหม่ที่ออกแบบและพัฒนา ซึ่งจะนำมาเปรียบเทียบกับกรอกแบบก่อนหน้าภายใต้โครงสร้างของ B-1 และศึกษาเฉพาะระบบ A-1 และ A-2 ที่มีความแข็งสูงกว่า ในขณะที่การออกแบบยางดิบนั้น เพื่อศึกษาความสมดุลระหว่างการเลือกยางดิบกับการออกแบบความแข็งองค์ประกอบอื่นๆ ของการออกแบบโครงสร้าง แบบจำลองยางได้แสดงไว้ในตารางที่ 2.2 [23]

ตารางที่ 2.2 องค์ประกอบการออกแบบโครงสร้างอื่นๆ ของยางที่สอดคล้องกับการวิเคราะห์เชิงโครงสร้าง [23]

Structural Features		Model					
Structural Designing Features		1	2	3	4	5	6
<b>Insert Rubber</b>	compounds	A-1	A-2	A-3	A-4	A-1	A-2
<b>Belt</b>	materials	2 + 2*0.30HT-60EPD					
	Angle	29°					
<b>Carcass</b>	materials	1300D/2-110EPD					
	Carcass turn-up	low					
<b>Apex</b>	Shore A	79					
	height/mm	40					
<b>Bead</b>	materials	Φ1.295					
	arrange	4-5-6-5-4(φ466.8)					
<b>Charfer</b>	hardness	73					

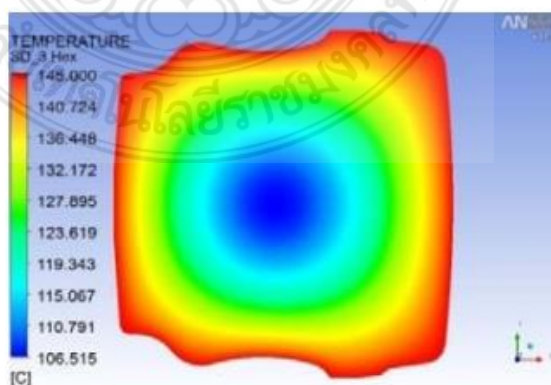
Note: EPD, Ends per DM.

การศึกษาแสดงให้เห็นว่ายางมีบทบาทสำคัญในการกำหนดความเสถียรและความปลอดภัยโดยรวมของรถยนต์ อย่างไรก็ตามยางรถยนต์กำลังเผชิญกับสถานะที่เป็นอันตราย เช่น อุณหภูมิที่สูงเกินไป การสัมผัสกับองค์ประกอบและการโจมตีจากเศษวัสดุบางอย่างที่อาจเจาะยางได้ ซึ่งอยู่บนท้องถนน (Dongpin, 2012) ยางรันแฟลทได้รับการปรับปรุงมาตรฐาน โดยการเพิ่มโครงสร้างผนังด้านข้างแบบพิเศษที่ช่วยให้ยางสามารถทำงานได้ มีความสามารถในการวิ่งบนพื้นเรียบบนล้อรันแฟลท ซึ่งโดยทั่วไปแล้วจะไม่สึกหรอหรือไม่จำเป็นต้องเปลี่ยน นอกจากนี้ยังช่วยลดความการ

สีทหรของยงดว้ย (Jogdarnd, et al, 2012) รันแพลทสร้งขึ้นมโดยเฉพะเพือให้ตรงตมเกณฑ์ในการรับภระที่เป็นแรงกดและข้อกำหนดระยะทงของการใช้งน [24]

ซึ่งควมคล่องตัวของยงแบนเป็นสิ่งส่ค้ญ นอกจกนี้คอมโพสิตรันแพลทยังใช้กับยงนพหนะดุกฉิน รลบรรทก รลขนส่ง และยงนพหนะเฝ้าระวัง และในการใช้งนที่คล่ยกันซึ่งจ้เป็นต้องม้การเคลือ่นไหวอย่งต่อนือง ติดตั้งงยโดยใช้สลักเกลียวเพียงสองตัวและสมารถขับได้อย่งนือย 30 กิโลเมตร ที่ 30 กิโลเมตรต่อช่วโมง โดยที่ยงทั้งสี่เส้นมีลักษณะแบน อุปกรณ์นี้ถูกเสียบเข้าไปในยงแบนไม่มียงนใน ซึ่งจะติดตั้งไว้รอล้อจึงกลยเป็นการประกอบของส่วนประกอบเสริมที่ออกแบมมเพื่อทงนร่วมกันเพื่อให้ม้ควมคล่องตัวสูงสุด ล้อสองประภเป็นที่น่าสนใจส่ห้การใช้งนในการประกอบนี้ไม่ว่จะเป็นสลักเกลียว 2 ชั้น หรือรูปแบบแหวนลือก 3 ชั้น ซึ่งใช้แหวนลือกและวงแหวนด้นข้งเพือยึดขึ้นส่วนทั้งหมตข้ดว้ยกัน อย่งไรก็ตามการออกแบบรันแพลทต้องอนุญาตให้ใส่ยงใหม่ได้ [24]

วิเคราะห์กระบวนการอบคงรูปของล้อย่างตันด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ที่สร้งจากการนำยง 3 ชนิด มารียงซ้อนกันโดยวิเคราะห์การกระจายตัวของอุณหภูมิและการคงรูปในแม่พิมพ์ และหล้งออกจกแม่พิมพ์ตั้งรูปที่ 2.19 จกผลกรททดลองพบว่าการกระจายตัวของอัตรการอบคงรูปในแม่พิมพ์ภายใน 3 ชั่วโมง นั้น บริเวณยงชั้นกลางจะคงรูปนือยที่สุดโดยมีระดับเพียงแค 1-2 เปอร์เซนต์ หล้งจกนั้นนำล้อยงออกจกแม่พิมพ์เพือปลอยให้เย็นตัวลงเป็นเวลา 3 ชั่วโมง จะมีระดับการคงรูปของยงที่ 6-8 เปอร์เซนต์ ค่ดงกล่าวจึงม้ควมคลาดเคลือ่นเกิดขึ้น อย่งไรก็ตามควมแมนย่ของการจ้ลองนั้นจะเพิ่มประสิทธิภขึ้นได้นั้นถ้ามีค่คุณสมบัติของวัสดุ รยละเอียด และส่วนประกอบของหน้ายงที่ใกล้เคียงกับควมเป็นจริงมากที่สุด ซึ่งในการผลิตล้อย่างตันจริงจะพบปัญหาเรืองของการที่ยงไม่สูกที่บริเวณกึ่งกลางหน้าตัดยงจะม้ควมสอดคล้อกับการทนายด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ อย่งไรก็ตามการมีระยะเวลาการอบและปลอยให้ยงเย็นตัวลงในเวลาที่เหมาะสมก็ จะทำให้ผลิตภณ์ที่มีประสิทธิภมากขึ้น [25]



รูปที่ 2.19 การกระจายตัวของอุณหภูมิภายในยงเมื่อทำการอบเป็นเวลา 3 ชั่วโมงที่ได้จกโปรแกรม Ansys Polyflow [25]



การสร้างยางรันแพลทโดยขึ้นรูปอย่างให้เป็นโฟมยาง เติมสารฟู (Blowing agent) และเพิ่มความแข็งแรงด้วยการเติมสารตัวเติมเคลย์หรือแคลเซียมคาร์บอเนต รูปที่ 2.20 นำขึ้นรันแพลทมาติดตั้งเข้ากับล้อกระทะโดยศึกษาการจับยึดสองรูปแบบได้แก่ 1) กาว 2) สกรู จับยึดผลการทดสอบออกมาว่า กาวไม่สามารถจะยึดขึ้นงานได้ สกรูเป็นตัวจับยึดสามารถวิ่งได้โดยไม่มีล้อยางลม 23 กิโลเมตร และเมื่อสวมล้อยางลมทำให้วิ่งได้เป็นระยะทาง 230 กิโลเมตร หลังจากนั้นนำล้อยางไปทดสอบตามมาตรฐาน มอก.367-2529 ทั้ง 2 กรณี ได้แก่ การทดสอบแบบมีลมที่ความเร็ว 60 80 และ 100 กิโลเมตรต่อชั่วโมง และแบบไม่มีลมทดสอบที่ความเร็ว 40 60 และ 80 กิโลเมตรต่อชั่วโมง จากผลการทดสอบพบว่าล้อยางเกิดการสั่นเมื่อวิ่งขับเคลื่อนที่มีความเร็วสูง อันเนื่องมาจากอุปกรณ์เสริมล้อยางนั้นมีน้ำหนักมากและมีช่องว่างระหว่างอุปกรณ์เสริมกับตัวกระทะล้อยางจึงทำให้เกิดการไม่สมดุลของล้อยาง จากการวิจัยนี้จะเป็นแนวทางในการศึกษาพัฒนาต่อไป [26]



รูปที่ 2.20 ผลจากการขึ้นรูป a) ขึ้นงานหลังจากการอัด b) ภาพตัดขวางของขึ้นงาน [26]

การออกแบบและพัฒนาสร้างกลไกให้ยางวิ่งได้หลังจากที่ยางถูกเจาะ เพื่อให้คนขับมีเวลาเพียงพอที่จะไปโรงปฏิบัติงานในบริเวณใกล้เคียง วัตถุประสงค์ คือ การสร้างกลไกในการวิ่งยางแบนเพื่อหลีกเลี่ยงไม่ให้ยางเสียรูปถาวรเมื่อเจาะทะลุ นอกจากนั้นเมื่อยางแบนความเค้นของระบบกันสะเทือนจะเพิ่มขึ้นตามสภาพถนน ขอบเขตของโครงการ คือ การสร้างกลไกในการวิ่งยางแบนโดยการสร้างวงแหวนรองรับภายในยางเพื่อรองรับยานพาหนะหลังจากที่ยางวิ่งเรียบและยังสามารถติดตั้งได้กับยางและขนาดล้อยางทุกประเภทโดยเริ่มต้นคำนวณขนาดของยางแข็ง (กว้างและยาว) สูตรในการคำนวณ คือ  $2\pi r$  ขนาดของขอบล้อคือ 12 นิ้ว (คูณ 25.4 เพื่อแปลงเป็น มิลลิเมตร) เท่ากับ 957.55 มิลลิเมตร ความกว้างของยางแข็งเลือกเป็น 65 มิลลิเมตร ดังนั้นความยาวสุดท้ายคือ 65 มิลลิเมตร x 957.55 มิลลิเมตร สำหรับชั้นแรก สำหรับชั้นที่สองวัดความหนาของยางแข็งและคำนวณเพื่อความปลอดภัยจำเป็นต้องเพิ่มความยาวยางอีก 50 มิลลิเมตร จากนั้นติดยางแข็งที่ขอบด้วยกาว Dunlop ใช้เลื่อยตัดผิวขอบให้หยาบ ใช้แปรงทากาว Dunlop กับพื้นผิวขอบล้อและพื้นผิวยางแข็ง หลังจาก 5 นาที ติด



ยางแข็งกับขอบ ตัดยางแข็งพิเศษเพื่อให้ปลายเรียบ หลังจากติดยางแข็งแล้วให้ใช้พินล๊อคปลายยางที่จุดสิ้นสุดของยาง เราใช้สลักเจาะเพื่อให้แน่ใจว่าจุดสิ้นสุดสามารถต่อเข้าด้วยกันได้ หลังจากเจาะหมดแล้วให้ใช้ค้อนเคาะหมุด เพื่อให้แน่ใจว่าได้ติดตั้งหมุดไว้อย่างสมบูรณ์ ขั้นต่อไปคือการติดตั้งยางเข้ากับยางใน ขั้นแรกคำนวณขนาดยางโดยใช้สูตรเดียวกับด้านบนกับขนาด จากนั้นทากาว Dunlop ที่ยางในและพื้นผิวยางแข็ง หลังจากผ่านไป 5 นาที ให้ติดยางเข้ากับยางด้านใน ใช้หมุดล๊อคปลายยาง (เหมือนข้างบน) หลังจากเสร็จสิ้นขั้นตอนข้างต้นให้เริ่มติดตั้งยางเข้ากับขอบล้อโดยใช้เครื่อง เมื่อการติดตั้งเสร็จสิ้นให้ทำการทรงตัวที่ยางเพื่อลดการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นในยาง ในตอนท้ายของโครงการจำเป็นต้องมีการทดสอบอย่างง่ายเพื่อให้ได้ผลลัพธ์ ผลการทดสอบจะรวมความเร็วสูงสุดของยางแบนว่ายางแบนจะสามารถใช้งานได้นานเท่าใด [27]



รูปที่ 2.21 ล้อยางลมที่สวมล้อรันแฟลทสำหรับการทดสอบ [27]

ตารางที่ 2.3 ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพระหว่าง Normal Tyre และ Flat Tyre [28]

	Normal Tyre	Flat Tyre
Velocity (m/s <sup>2</sup> )	$V=50\text{km/h}$ $=50\text{km/h} \times (1000\text{m}/1\text{km}) \times (1\text{h}/3600\text{s})$ $=13.89/35\text{s}$ $=0.3969\text{m/s}^2$	$V=50\text{km/h}$ $=50\text{km/h} \times (1000\text{m}/1\text{km}) \times (1\text{h}/3600\text{s})$ $=13.89/40\text{s}$ $=0.3473\text{m/s}^2$
Force (N)	$F=m \times a$ $=670\text{kg} \times 0.3969\text{m/s}^2$ $=265.92\text{N}$ $=265.92/4$ $=66.48\text{ N}$	$F=m \times a$ $=678\text{kg} \times 0.3473$ $=235.4\text{N}$ $=235.47\text{N}/4$ $=58.87\text{ N}$
Torque (N.m)	$T= rF$ $= (0.24\text{m})(66.48\text{N})$ $=15.96\text{N.m}$	$T= rF$ $= (0.20\text{m})(58.87\text{N})$ $=11.77\text{N.m}$
Horse Power	$\text{HP}=(T \times \text{RPM})/7120.89$ $=(15.96)(2000)/7120.89$ $=4.48\text{HP}$	$\text{HP}= T \times \text{RPM}/ 7120.89$ $=(11.77)(2000)/ 7120.89$ $=3.31\text{HP}$
Power weight ratio	Power to weight ratio = 4.48HP/670kg =0.006687	Power to weight ratio =3.31HP/678kg =0.004882

ผลการวิจัยพบว่าการออกแบบยางปกติมีคุณสมบัติที่ดีกว่าการออกแบบยางแบนจำนวนอัตราส่วนกำลังต่อน้ำหนักที่สูงกว่าสำหรับค่าแรงม้าที่กำหนด ยิ่งรถยนต์มีน้ำหนักน้อยก็ยิ่งใช้กำลังมากขึ้นและดีขึ้นเท่านั้น รถยนต์ที่มีน้ำหนักน้อยกว่าจะมีแรงเฉื่อยน้อยกว่า เร่งได้ง่ายกว่า และเปลี่ยนทิศทางได้ ในอีกด้านหนึ่งก็มีแรงฉุดน้อยกว่า เนื่องจากการฉุดขึ้นอยู่กับแรงเสียดทานซึ่งขึ้นอยู่กับน้ำหนัก นอกจากนี้การใช้ยางชนิดนี้ดูเหมือนจะส่งผลเสียต่อการเคลื่อนที่แบบไดนามิกระหว่างถนนและตัวถังรถ นอกจากนี้ผลลัพธ์ที่ได้ยังแสดงให้เห็นความจำเป็นในการวิจัยเพิ่มเติมในเรื่องนี้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในการกระจายแรงกดสัมผัสระหว่างยางและพื้นผิวถนน ได้ผลดังตารางที่ 2.3 และรูป Flat Tyre ดังรูปที่ 2.21 [27]

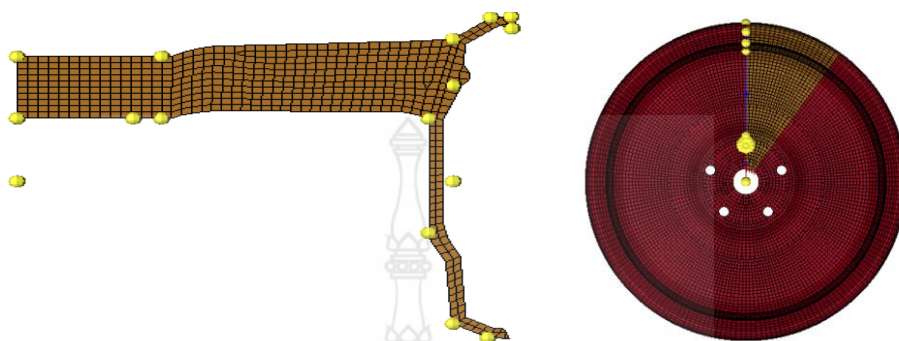
การออกแบบล้ออลูมิเนียมอัลลอยด์สำหรับใช้ในรถยนต์ ซึ่งช่วยเพิ่มประสิทธิภาพมวลของล้อ การวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์แสดงให้เห็นว่ามวลที่ปรับให้เหมาะสมของขอบล้อสามารถลดลงเหลือประมาณ 50 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเทียบกับล้ออัลลอยด์แบบจานแข็งแบบ Aluminum ที่มีอยู่ การวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ แสดงให้เห็นว่าความเค้นที่เกิดขึ้นในส่วนประกอบที่ปรับให้เหมาะสมนั้น ต่ำกว่าความเค้นครากที่แท้จริงของโลหะผสม Aluminum การประมาณอายุความล้าโดยการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ ภายใต้อาณาเขตความล้าในแนวรัศมี ดำเนินการเพื่อวิเคราะห์การกระจายความเค้นและส่งผลให้มีการกระจายจุดในล้ออัลลอยด์ เส้นโค้ง S-N ของส่วนประกอบแสดงให้เห็นว่าขีดจำกัดความทนทานอยู่ที่ 90 MPa ซึ่งต่ำกว่าความเค้นครากของวัสดุและปลอดภัยสำหรับการใช้งาน การวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ระบุว่าแม้หลังจากรอบความล้าที่ 1,020 ความเสียหายบนล้อพบเพียง 0.2 เปอร์เซ็นต์ วัสดุสำหรับกระทะล้อใช้ Al-Si (BS: LM25 alloy) โลหะผสมส่วนใหญ่ประกอบด้วย 6.5-7.0.0 เปอร์เซ็นต์ Si, 0.3-0.4 เปอร์เซ็นต์ Mg และส่วนที่เหลือเป็นอลูมิเนียม คุณสมบัติของโลหะผสมที่ใช้อยู่ในสภาวะการอบชุบด้วยความร้อน (T6) คุณสมบัติของโลหะผสม แสดงไว้ในตารางที่ 2.4 [28]

ตารางที่ 2.4 Material Properties of LM25 Aluminum Alloy in T6 Condition [28]

material properties	Magnitude with units
Tensile Stress	230 MPa
Endurance Limit	56 MPa
Modulus of Elasticity	71 (GPa)
Shear Strength	120 MPa
Tensile Yield Stress	185 MPa
Compressive Yield Stress	185 MPa
Elongation (%)	4
Density	2.685 g/cm <sup>3</sup> at 20°C

โมเดล FE ถูกเตรียมไว้สำหรับ 36 องศา ของเส้นรอบวง (Symmetry) เนื่องจากส่วนที่เหลือจะสมมาตรรอบแกนได้อย่างแม่นยำ การปรับเปลี่ยนที่จำเป็นสามารถทำได้ในส่วนเดียวกัน เอลิเมนต์เป็นชนิด Hexahedral and pentagonal ถูกนำมาใช้สำหรับการสร้างแบบจำลอง และการวิเคราะห์

แบบไฟไนต์เอลิเมนต์ดำเนินการโดยใช้ Hypermesh ขนาดองค์ประกอบ 5 มิลลิเมตร ใช้สำหรับเชื่อมกับองค์ประกอบ 100,118 และ 100,200 โหนด รูปที่ 2.22 แสดงองค์ประกอบ 2D และ 3D ของขบล้อและส่วนตัดขวางของ Sourav Das [28]



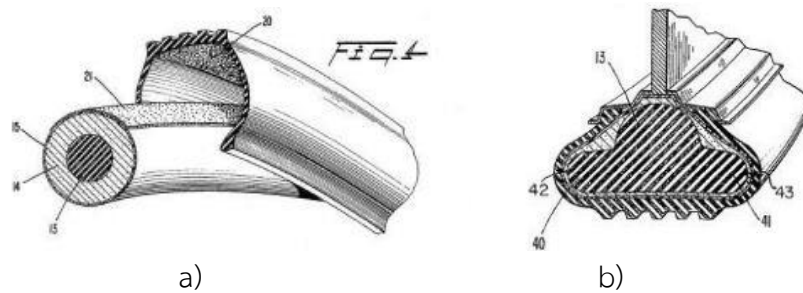
รูปที่ 2.22 ภาพ 2 มิติ และ 3 มิติ ของขบล้อและส่วนตัดขวางของ Sourav Das [28]

P. Baranowski and J. Malachowski [31] ทำการทดสอบรถที่ใช้ในทางทหาร ซึ่งศึกษาเกี่ยวกับผลกระทบช่วงล่างรถที่เกิดขึ้นเมื่อถูกระเบิด ใช้คอมพิวเตอร์ช่วยออกแบบในการวิเคราะห์ความเสียหายที่เกิดขึ้นโดยทำการจำลองทั้งหมด 3 รูปแบบ ได้แก่ 1) แบบล้อยางลมปกติ (Without Modification) 2) แบบล้อยางลมเสริมล้อรันแฟลท (Run-flat Modification) 3) ล้อยาง แบบรังผึ้ง (Honeycomb Modification) ผลทดสอบความแข็งแรง ดังตารางที่ 2.5 ค่าความแข็งแรงจากการทดลองจะเห็นว่าล้อยางแบบรังผึ้งสามารถป้องกันได้ดีที่สุดเมื่อล้อถูกระเบิด

ตารางที่ 2.5 ตารางเปรียบเทียบกรณีจำลองทั้ง 3 กรณี (ค่าสูงสุด) [31]

Quantity maximum value	Case 1 (no modification)	Case 2 (runflat insert)	Case 3 (composite structure)			
HMH stress [MPa]	Rim	731.00	Rim	652.00	Rim	419.00
	Spring fixing	408.00	Spring fixing	392.00	Spring fixing	294.00
	Hub	378.00	Hub	461.00	Hub	255.00
Plastic strain [-]	Rim	0.30	Rim	0.23	Rim	0.17
	Spring fixing	0.21	Spring fixing	0.16	Spring fixing	0.07
	Hub	0.14	Hub	0.11	Hub	0.04
Internal energy [kJ]	52.00	47.00	32.50			
Axial-end deflection [mm]	11.0	3.50	0.80			

Thomas G. Campagnac และคณะ [32] ศึกษารถยนต์ที่ไม่มียางในเมื่อเกิดเหตุยางรั่วหรือถูกเจาะ อาจทำให้รถยนต์สามารถเกิดอุบัติเหตุได้ ผู้ประดิษฐ์จึงได้คิดอุปกรณ์สำหรับเสริมความแข็งแรงเมื่อยางลมรั่วออกโดยแทรกวัสดุโฟมที่มีลักษณะเป็นเส้นดังรูปที่ 2.23 a) เข้าไปในล้อยางลมที่ไม่มียางใน ซึ่งคุณสมบัติของโฟม คือ สามารถยืดได้ ทำให้ล้อยางภายนอกไม่สามารถบีบอัดหรือบดล้อ และทำให้ล้อขับเคลื่อนได้และยังสามารถลดความเสียหายของแก้มล้อได้อีกด้วยแสดงดังรูปที่ 2.23 b)



รูปที่ 2.23 โครงสร้างภายใน a) ตัวอย่างเสริมเส้นโคม และ b) ลักษณะตัวอย่างลม [32]



## บทที่ 3

### การดำเนินงานวิจัย

ในบทนี้จะกล่าวถึงกระบวนการดำเนินงานวิจัยที่ประกอบไปด้วยวิธีการดำเนินงานวิจัย กระบวนการออกแบบลวดรีเลย์ที่เหมาะสมสำหรับรถยนต์นั่งส่วนบุคคลที่ต้องใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เข้ามาช่วยในการออกแบบและวิเคราะห์รูปร่างของลวดรีเลย์ รวมถึงการวิเคราะห์จุดจับยึดลวดรีเลย์ การวิเคราะห์ความเค้น ความเครียดและการเสียรูป โดยมีรายละเอียดในแต่ละส่วนดังนี้

#### 3.1 ระเบียบวิธีวิจัย

##### 3.1.1 กระบวนการดำเนินงานวิจัย

3.1.1.1 ศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องของกับลวดรีเลย์ประกอบด้วยการออกแบบลวดรีเลย์ และการวิเคราะห์ความแข็งแรงด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ข้อจำกัดด้านเทคนิค วัสดุ เป็นต้น และการสืบค้นข้อมูลในวารสารวิชาการต่างๆ

3.1.1.2 ออกแบบชุดดุมลวดและอุปกรณ์จับยึดสำหรับกระบวนการทดสอบการใช้งานจริงสำหรับลวดรีเลย์แบบเดิม โดยใช้เครื่องทดสอบการห้ำมลวดและเครื่องเก็บข้อมูล Data Logger

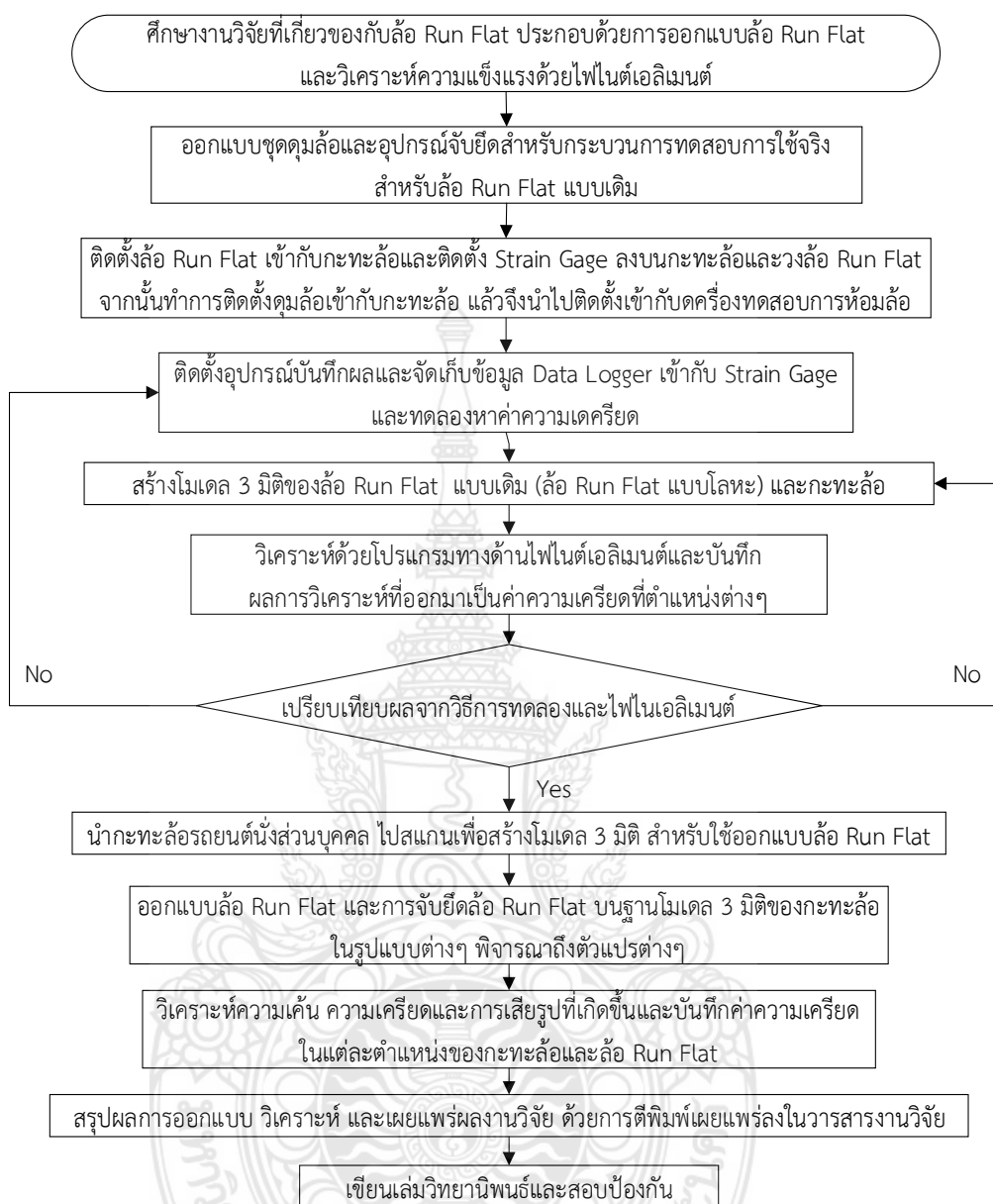
3.1.1.3 ติดตั้งลวดรีเลย์เข้ากับกระทะลวดและติดตั้ง Strain Gage ลงบนกระทะลวดและวงลวดรีเลย์ จากนั้นทำการติดตั้งชุดดุมลวดเข้ากับกระทะลวด แล้วจึงนำไปติดตั้งเข้ากับเครื่องทดสอบการห้ำมลวด

3.1.1.4 ติดตั้งอุปกรณ์บันทึกผลและจัดเก็บข้อมูล Data Logger เข้ากับ Strain Gage เพิ่มแรงกดเข้าไปที่วงลวดรีเลย์ อ่านค่าความเครียดและเก็บข้อมูล

3.1.1.5 สร้างโมเดล 3 มิติของลวดรีเลย์แบบเดิม (ลวดรีเลย์โลหะ) และกระทะลวด โดยใช้ขนาดจริงที่วัดได้จากกระทะลวดและลวดรีเลย์โลหะทั้งหมด

3.1.1.6 วิเคราะห์ด้วยโปรแกรมทางด้านไฟไนต์เอลิเมนต์และบันทึกผลการวิเคราะห์ที่ออกมาเป็นค่าความเครียดที่ตำแหน่งต่างๆ โดยต้องเป็นตำแหน่งที่ตรงกันกับค่าความเครียดที่ได้เก็บบันทึกไว้ในการทดลองและทิศทางของค่าความเครียดทั้งสองวิธีต้องเป็นค่าความเครียดที่เกิดขึ้นในทิศทางเดียวกัน ซึ่งสามารถปรับทิศทางได้ในโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์

3.1.1.7 เปรียบเทียบค่าความเครียดจากผลการทดลองและผลที่วิเคราะห์ด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ หากผลลัพธ์ทั้งสองวิธีให้ค่าที่สอดคล้องกัน จึงจะสามารถสรุปได้ว่าโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ที่เลือกใช้มีความสามารถในการแก้ไขโจทย์ปัญหานี้ได้และใช้กระบวนการ Pre-processing นี้เป็นรูปแบบในการออกแบบและวิเคราะห์ลวดรีเลย์แบบใหม่ต่อไป



รูปที่ 3.1 ขั้นตอนกระบวนการศึกษาวิจัย

3.1.1.1 นำกระทะล้อรถยนต์นั่งส่วนบุคคลไปสแกนเพื่อสร้างโมเดล 3 มิติ สำหรับใช้ออกแบบล้อรันแฟลท เพื่อให้ได้ล้อรันแฟลทที่สามารถประกอบเข้ากับกระทะล้อได้อย่างแนบสนิท จากนั้นทำการแก้ไขพื้นผิวโมเดล 3 มิติ ที่สแกนมาให้ถูกต้องและสามารถนำไปวิเคราะห์ต่อได้

3.1.1.2 ออกแบบล้อรันแฟลทและการจับยึดล้อรันแฟลทบนฐานโมเดล 3 มิติ ของกระทะล้อในรูปแบบต่างๆ พิจารณาถึงตัวแปรต่างๆ ที่อธิบายไว้ในกรอบการวิจัยดังรูปที่ 3.2

3.1.1.3 วิเคราะห์ความเค้น ความเคียดและการเสียรูปที่เกิดขึ้น และบันทึกค่าความเคียดในแต่ละตำแหน่งของกระทะล้อและล้อรันแฟลทรวมทั้งส่วนประกอบชิ้นส่วนต่างๆ ด้วย



3.1.1.4 สรุปผลการออกแบบวิเคราะห์และเผยแพร่ผลงานวิจัย ด้วยการตีพิมพ์เผยแพร่ลงในวารสารงานวิจัย

3.1.1.5 เขียนเล่มวิทยานิพนธ์และสอบป้องกัน

### 3.1.2 เครื่องมือและอุปกรณ์การวิจัย

3.1.2.1 เครื่องถอดยาง Hofmann Monty 32 และเครื่องถ่วงล้อ Hofmann Geodyna

3.1.2.2 เครื่องอัดอากาศ

3.1.2.3 Data Logger เพื่อใช้ในการทดสอบและวัดค่าความเครียดที่กระทะล้อ

3.1.2.4 โปรแกรมช่วยในการออกแบบและวิเคราะห์ทางด้านไฟไนต์เอลิเมนต์ (SolidWorks และ SolidWorks Simulation)

3.1.2.5 เครื่องคอมพิวเตอร์ที่มีหน่วยประมวลผลจำนวนมากและรวดเร็ว

3.1.2.6 Stain Gage แบบ Uniaxial ชนิด KFG-5-120-C1-11L3M2R พร้อมกาวติด Stain Gage

3.1.2.7 เครื่องทดสอบสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของล้อยางรถยนต์

3.1.2.8 เครื่องสแกนเลเซอร์ FARO Measurement FARO P06-05

### 3.1.3 กรอบการวิจัย



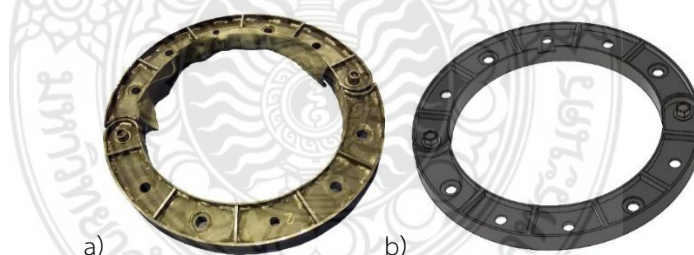
รูปที่ 3.2 กรอบการวิจัย (Conceptual Framework)

สำหรับกรอบการวิจัย (Conceptual Framework) เป็นการวางแผนความคิดของกระบวนการทำวิจัยที่ต้องกล่าวถึงตัวแปรต้นและตัวแปรตามต่างๆ จะต้องมีความสัมพันธ์กันและกันซึ่งจะต้อง

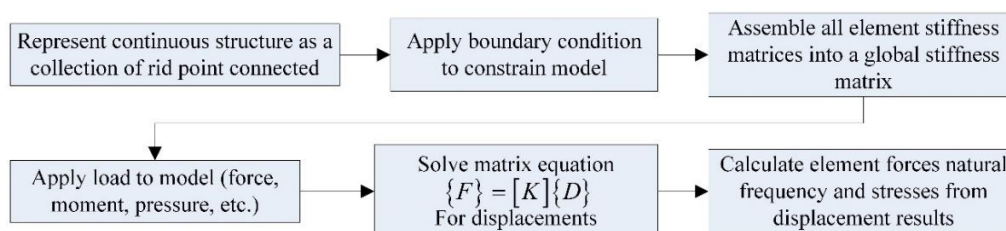
สอดคล้องกับระเบียบวิธีวิจัยบนพื้นฐานของทฤษฎีต่างๆ ซึ่งมีแนวคิดดังรูปที่ 3.2 การออกแบบและวิเคราะห์ความแข็งแรงของล้อรันแพลทและชุดอุปกรณ์การลื้อด้วย SolidWorks และ SolidWorks Simulation เพื่อเป็นข้อมูลสำคัญในการออกแบบ มีตัวแปรในการออกแบบประกอบด้วย 1) ความกว้างที่เหมาะสมของล้อรันแพลท 2) รัศมีภายในและภายนอก 3) วัสดุที่ใช้ในการสร้างล้อรันแพลทและชุดอุปกรณ์การลื้อ 4) น้ำหนักรถยนต์นั่งส่วนบุคคล 2,080 กิโลกรัม 5) ขนาดล้ออัลลอย 7.5Jx17 นิ้ว 6) ยางรถยนต์ 265/65 R17 7) ความดันลมยาง 8) วงล้อรันแพลทหนึ่งชุดอาจแบ่งออกเป็นสองหรือสามชิ้น มีกรอบการวิจัยดังรูปที่ 3.2

### 3.2 การวิเคราะห์ความเค้นและความเครียดของล้อรันแพลทด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

เริ่มจากการสร้างโมเดล 3 มิติ ของล้อรันแพลทแบบเดิม (ล้อรันแพลทโลหะ ดังรูปที่ 3.3) และกระทะล้อขนาด 17 นิ้ว โดยใช้ขนาดจริงที่วัดได้จากล้อรันแพลทโลหะ และสร้างโมเดลกระทะล้อขนาด 17 นิ้ว ด้วยกระบวนการวิศวกรรมย้อนรอย ที่จะได้ Surface Modeling จากนั้นนำไปสร้างพื้นผิวใหม่ และเปลี่ยนให้เป็น Solid Modeling ทำการประกอบโมเดลล้อรันแพลทและกระทะล้อเข้าด้วยกันและสร้างโมเดลทางไฟไนต์เอลิเมนต์ ซึ่งมีกระบวนการแสดงดังรูปที่ 3.4 กำหนดค่าและเงื่อนไขต่างๆ ในกระบวนการ Pre-processing จากนั้นวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมทางด้านไฟไนต์เอลิเมนต์และบันทึกผลการวิเคราะห์ที่ออกมาเป็นค่าความเครียดที่ตำแหน่งต่างๆ โดยต้องเป็นตำแหน่งที่ตรงกันกับค่าความเครียดที่ได้เก็บบันทึกไว้ในการทดลอง และทิศทางของค่าความเครียดทั้งสองวิธีต้องเป็นค่าความเครียดที่เกิดขึ้นในทิศทางเดียวกัน ซึ่งสามารถปรับทิศทางได้ในโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์



รูปที่ 3.3 ล้อรันแพลทโลหะแบบเดิมของรถบรรทุกขนาดเล็ก 4 ล้อ a) ล้อรันแพลทที่ใช้งาน และ b) โมเดลล้อรันแพลท



รูปที่ 3.4 กระบวนการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ [6], [14]



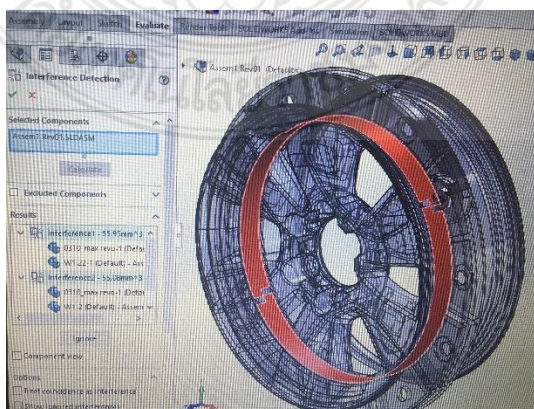


รูปที่ 3.5 โมเดล 3 มิติ ของล้อรีนแพลทและกระทะล้อของรถยนต์นั่งส่วนบุคคล



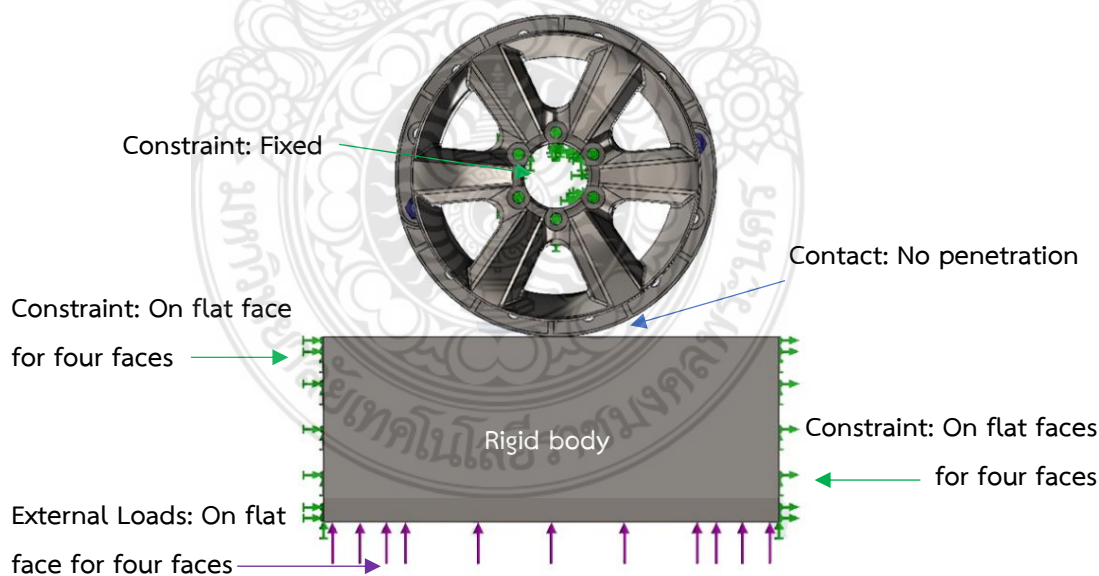
รูปที่ 3.6 การประกอบล้อรีนแพลทเข้ากับกระทะล้อ

จากรูปที่ 3.5 เป็นโมเดล 3 มิติ ของล้อรีนแพลทและกระทะล้อสำหรับใช้วิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ และนำมาประกอบเข้าด้วยกันดังรูปที่ 3.6 ทั้งนี้จะต้องทำการตรวจสอบการเกยกันของแต่ละชิ้นส่วนที่นำมาประกอบเข้าด้วยกัน โดยใช้คำสั่ง Interference Detection ดังรูปที่ 3.7 หากพบการเกยกันจะต้องทำการแก้ไขโมเดล



รูปที่ 3.7 ตัวอย่างการเกยกันของชิ้นงานระหว่างกระทะล้อและล้อรีนแพลท

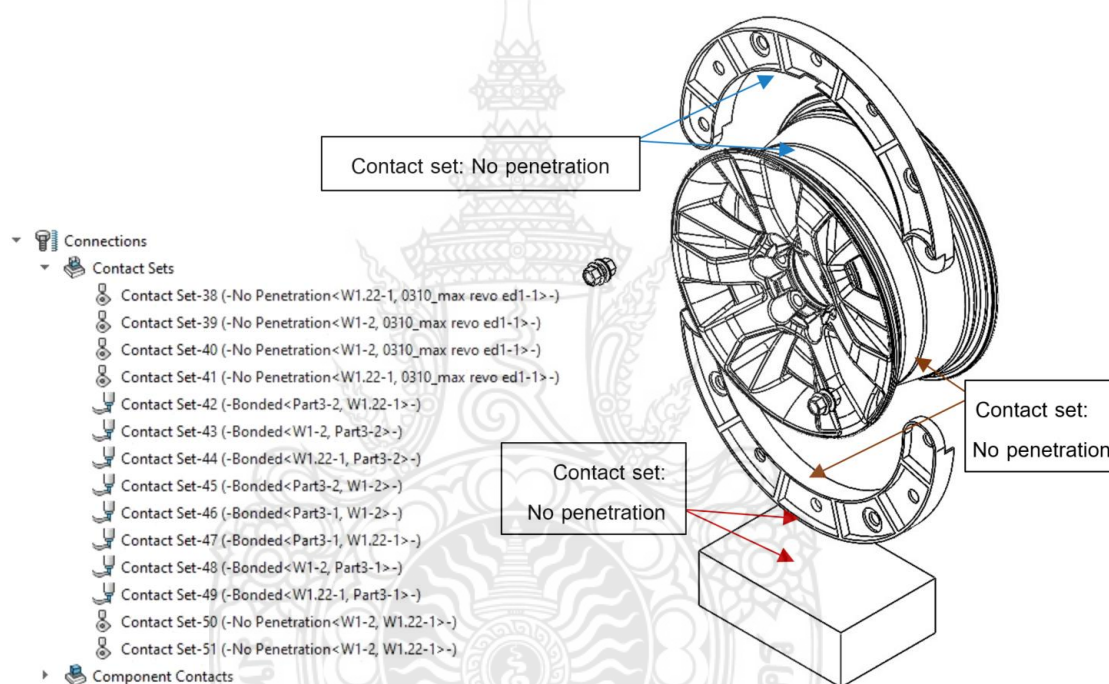
สำหรับกระบวนการ Pre-processing เป็นการเตรียมการโมเดล 3 มิติ ที่ออกแบบและสร้างขึ้นด้วยโปรแกรม SolidWorks กำหนดสมบัติของวัสดุ ดังตารางที่ 3.1 วัสดุ Aluminum Alloy ใช้กำหนดให้กับล้อแม็กอัลลอย [29] สำหรับ AISI 1020 ใช้กำหนดให้กับล้อเหล็กกันเพลทซึ่งเป็นล้อรันเพลทเดิม และ Aluminum Alloy ใช้สำหรับล้อรันเพลทแบบใหม่ การประกอบชิ้นส่วนต่างๆ เข้าด้วยกันจะเกิดหน้าสัมผัสระหว่างชิ้นส่วนต่างๆ ดังนั้นการกำหนดจะเป็นแบบ No Penetration และแบบ Bonded สำหรับการจับยึด (Fixtures) ให้กำหนดที่หน้าแปลนของล้อแม็กและบนพื้นผิวของรูโบลท์ทั้ง 6 รู ส่วนล้อรันเพลทจะกดเข้ากับถนน ซึ่งในที่นี้ออกแบบเป็นฐานก้อนสี่เหลี่ยมกดเข้าไปยังล้อรันเพลท แรงที่ใช้ในการกดอัดเพื่อนำค่าความเครียดไปเปรียบเทียบกับค่าการทดลองมีค่าเท่ากับ 4,905 และ 7,848 นิวตัน ซึ่งเปรียบเสมือนมวลของตัวรถที่กดลงไปเท่ากับ 800 กิโลกรัม x 9.81 เมตรต่อวินาทีกำลังสอง เท่ากับ 7848 นิวตัน แบบ Static Analysis ไปที่ล้อรันเพลทโดยมุมกดที่เริ่มต้นการกดให้ เป็น 0, 30, 45 และ 60 องศา ค่าแรงนี้ใช้สำหรับกรณีการวิเคราะห์เพื่อนำค่าความเครียดที่วิเคราะห์ให้ได้ไปเปรียบเทียบกับค่าความเครียดจากการทดลองเท่านั้น เพื่อยืนยันผลความถูกต้องและพิสูจน์ขีดความสามารถในการวิเคราะห์ของโปรแกรม SolidWorks Simulation สำหรับก้อนสี่เหลี่ยมที่เป็นฐานกดเข้ากับล้อรันเพลทจะต้องทำการกำหนดเงื่อนไขการจับยึดด้วย เพื่อให้ฐานก้อนสี่เหลี่ยมเกิดการเคลื่อนที่ขึ้นในแนวตั้งเท่านั้น โดยพื้นผิวรอบด้านทั้ง 4 ด้านจะได้รับการกำหนดแบบ On Flat Faces ให้สามารถเคลื่อนที่ได้เฉพาะในแนวตั้ง ดังรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 โมเดลไฟไนต์เอลิเมนต์

กำหนดชนิดของเอลิเมนต์เป็นแบบ 10 Nodes Tetrahedral แบ่งเอลิเมนต์โดยกำหนด Mesh Parameters เป็นแบบ Curvature-based Mesh ซึ่งจะได้ Maximum Element Size ควบคุมขนาด

เอลิเมนต์ที่ล้อรันแพลทและฐานก้อนสี่เหลี่ยมด้วยขนาด 6-30 มิลลิเมตร และได้จำนวนเอลิเมนต์มากกว่า 200,000 เอลิเมนต์ ตามลำดับ สำหรับกระบวนการ Solve Processing นั้นได้ใช้รูปแบบสมการการคำนวณของโปรแกรมแบบ Direct Sparse Solver กระบวนการ Post-processing คือการนำเสนอผลการวิเคราะห์ที่ประกอบด้วย 2 ส่วน คือ ค่าความเครียด ซึ่งจะต้องปรับค่าความเครียดที่แสดงออกมาให้มีทิศทางที่ถูกต้องสอดคล้องกับทิศทางที่ติดตั้ง Strain Gage ลงไป และความแข็งแรงของล้อรันแพลทที่สามารถต้านทานแรงอัดกำลังสูงได้โดยไม่เกิดความเสียหาย โดยอธิบายด้วยค่าความเค้นสูงสุดและการเสียรูปที่อยู่ในช่วงยืดหยุ่นเชิงเส้น ใช้ความเค้นที่ได้มาจากสมการพลังงานการเสียรูปสูงสุด (Maximum Distortion Energy) ในรูปของ Von Mises และการเสียรูปของล้อรันแพลท

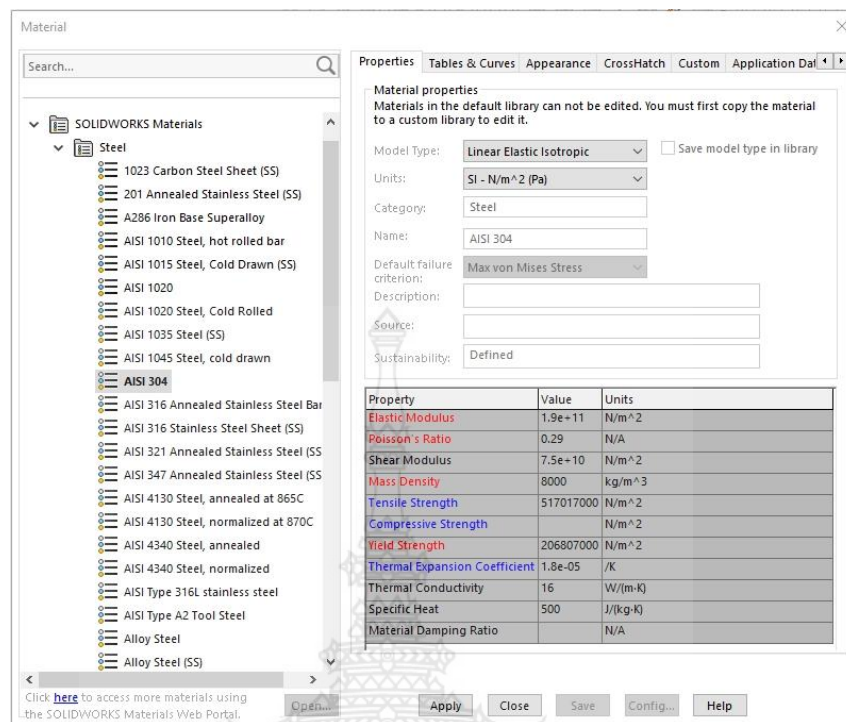


รูปที่ 3.9 การกำหนดหน้าสัมผัส (Contact) ระหว่างพื้นผิวของชิ้นส่วนต่างๆ

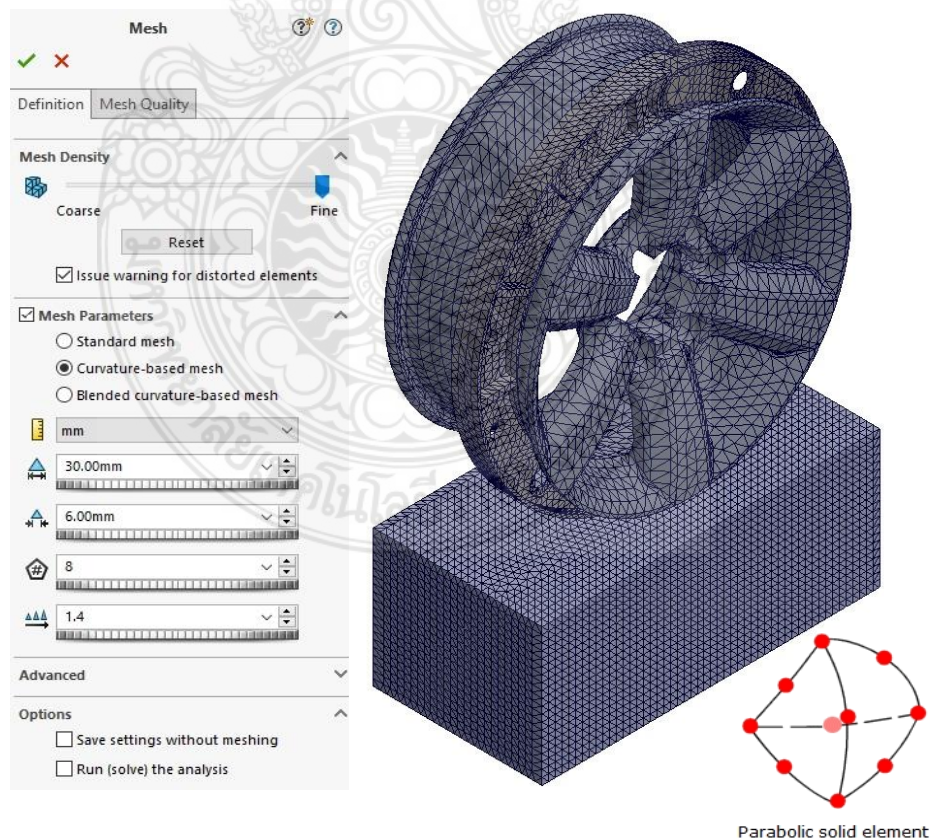
ตารางที่ 3.1 สมบัติของวัสดุสำหรับการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

Properties	Aluminum alloy	Aluminum 6063 T6	AISI 1020
	for wheel pan	for run flat	
Elastic Modulus, MPa	69x10 <sup>3</sup>	69x10 <sup>3</sup>	200x10 <sup>3</sup>
Poisson's Ratio	0.303	0.33	0.29
Shear Modulus, GPa	26	25.8	77
Mass Density, kg/m <sup>3</sup>	2,700	2,700	7,900
Tensile Strength, MPa	310	240	420
Yield Strength, MPa	275	215	351





รูปที่ 3.10 ตัวอย่างการกำหนดชนิดวัสดุ SUS304



รูปที่ 3.11 เอลิเมนต์และการกำหนดค่าเพื่อแบ่งเอลิเมนต์

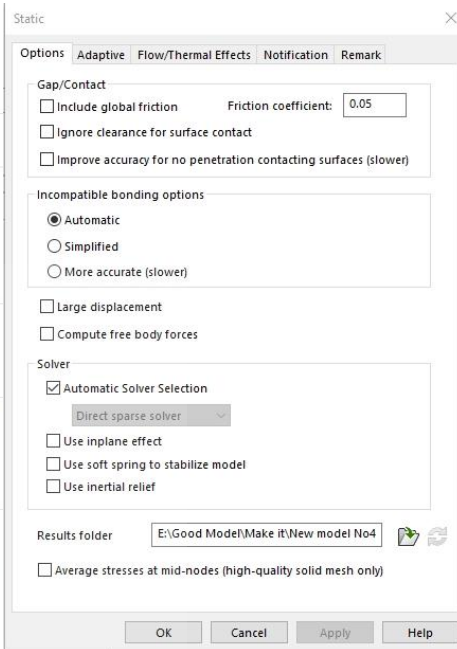
### Analysis Solvers

In finite element analysis, a problem is represented by a set of algebraic equations that must be solved simultaneously. There are two classes of solution methods: direct and iterative.

Direct methods solve the equations using exact numerical techniques. Iterative methods solve the equations using approximate techniques where in each iteration, a solution is assumed and the associated errors are evaluated. The iterations continue until the errors become acceptable.

The software offers the following choices:

<b>Automatic</b>	The software selects the solver based on the study type, analysis options, contact conditions, etc. Some options and conditions apply only to either Direct Sparse or FFEPlus.
<b>Direct Sparse</b>	Select the Direct Sparse: <ul style="list-style-type: none"> <li>• when you have enough RAM and multiple CPUs on your machine.</li> <li>• when solving models with No Penetration contact.</li> <li>• when solving models of parts with widely different material properties.</li> </ul> <p>For every 200,000 dof, you need 1GB of RAM for linear static analysis. The Direct Sparse solver requires 10 times more RAM than the FFEPlus solver.</p>
<b>FFEPlus (iterative)</b>	The FFEPlus solver uses advanced matrix reordering techniques that makes it more efficient for large problems. In general, FFEPlus is faster in solving large problems and it becomes more efficient as the problem gets larger. <p>For every 2, 000,000 dof, you need 1GB of RAM.</p>
<b>Large Problem Direct Sparse</b>	By leveraging enhanced memory-allocation algorithms, the Large Problem Direct Sparse solver can handle simulation problems that exceed the physical memory of your computer. <p>If you initially select the Direct Sparse solver and due to limited memory resources it has reached an out-of-core solution, a warning message alerts you to switch to the Large Problem Direct Sparse.</p>
<b>Intel Direct Sparse</b>	The Intel Direct Sparse solver is available for static, thermal, frequency, linear dynamic, and nonlinear studies. <p>By leveraging enhanced memory-allocation algorithms and multi-core processing capability, the Intel Direct Sparse solver improves solution speeds for simulation problems that are solved in-core.</p> <p>The Direct Sparse and Intel Direct Sparse solvers are more efficient at taking advantage of multiple cores.</p>



รูปที่ 3.12 การค่าตัวเลือกการวิเคราะห์เป็นแบบ Direct Sparse Solver

(a)

(b)

(c)

รูปที่ 3.13 การแสดงผลลัพธ์ (a) หน้าต่างการตั้งค่าความเครียดในทิศทางต่างๆ (b) การใช้ Probe ในการแสดงผลค่าความเครียดที่ตำแหน่งต่างๆ และ (c) คำจำกัดความของ Stress Components

จากรูปที่ 3.9 ต้องทำการกำหนดคู่สัมผัสระหว่างชิ้นส่วนต่างๆ ประกอบด้วยการกำหนดค่า No Penetration ให้กับพื้นผิวหน้าสัมผัสระหว่าง 1) โครงเหล็กไร้สนิมทั้ง 3 ชั้น กับวงล้อรันแพลททั้ง 3 ชั้น 2) พื้นผิววงล้อรันแพลทกับกระทะล้อ 3) พื้นผิวสัมผัสระหว่างล้อรันแพลทกับชิ้นส่วนแข็งเกร็ง (ตัวแทนถนน) โดยการกำหนดเหล่านี้จะอยู่บนสมมติฐานที่ไม่มีค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน การกำหนดค่าวัสดุให้กำหนดวัสดุสำหรับโครงเหล็กไร้สนิมเป็น SUS304 ที่มีสมบัติดังรูปที่ 3.10 และวงล้อรันแพลทเป็น Aluminum Alloy ซึ่งวัสดุทั้ง 2 ชนิด อยู่บนสมมติฐานการวิเคราะห์ที่อยู่ในช่วงยืดหยุ่นเชิงเส้น เป็นวัสดุที่มีสมบัติเหมือนกันในทุกทิศทาง (Isotropic Materials) และมีเนื้อเดียวกัน (Homogeneous) รูปที่ 3.11 เป็นการกำหนดชนิดของเอลิเมนต์เป็น Parabolic Solid Element หรือ Ten Odes Tetrahedral ด้วยพารามิเตอร์แบบ Curvature-based Mesh ที่มีขนาดเอลิเมนต์ใหญ่สุด 30 มิลลิเมตร และเอลิเมนต์ที่มีขนาดเล็กสุดประมาณ 6 มิลลิเมตร ได้จำนวน เอลิเมนต์ที่ 218,122 เอลิเมนต์ จำนวน 363,382 โหนด ตัวเครื่องมือสำหรับการวิเคราะห์ คือ Direct Spare Solver ดังรูปที่ 3.12 สำหรับการแสดงผลการวิเคราะห์จะเป็นการแสดงค่าความเครียดเพื่อใช้เปรียบเทียบกับค่าการทดลองด้วยค่าความเครียดในทิศทางต่างๆ ดังนั้นจะต้องกำหนดทิศทางแกนหรือการหมุนของชุดล้อให้ถูกต้อง เพื่อให้ค่าที่ได้สามารถนำไปเปรียบเทียบกันได้จริงและค่าความเค้นหรือความเครียดแต่ละทิศทางมีคำอธิบายดังรูปที่ 3.13 สำหรับการวิเคราะห์ความเค้นที่เกิดขึ้นจะเป็นการแสดงผลด้วยค่าความเค้น Von Mises

การแสดงผลประกอบด้วยความเค้น Von Mises ดังสมการที่ (3.1) และความเครียดแสดงดังสมการที่ (3.2)

$$Von\ Mises = \left\{ \frac{1}{2} \left[ (\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_x - \sigma_z)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 \right] + 3(\tau_{xy}^2 + \tau_{xz}^2 + \tau_{yz}^2) \right\}^{(1/2)} \quad (3.1)$$

$$Equivalent\ strain, \ ESTRN = 2 \left[ (\varepsilon_1 + \varepsilon_2) / 3 \right]^{(1/2)} \quad (3.2)$$

โดยที่

$$\varepsilon_1 = \frac{1}{2} \left[ (\varepsilon_x - \varepsilon^*)^2 + (\varepsilon_y - \varepsilon^*)^2 + (\varepsilon_z - \varepsilon^*)^2 \right] \quad (3.3)$$

$$\varepsilon_2 = \left[ (\gamma_{xy})^2 + (\gamma_{xz})^2 + (\gamma_{yz})^2 \right] / 4 \quad (3.4)$$

$$\varepsilon^* = \left[ \varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z \right] / 3 \quad (3.5)$$

โดยที่  $\varepsilon_x = X\ Normal\ strain$

$\varepsilon_y = Y\ Normal\ strain$

$\varepsilon_z = Z\ Normal\ strain$



$\gamma_{xy}$  = Shear strain in Y direction on YZ plane

$\gamma_{xz}$  = Shear strain in Z direction on YZ plane

$\gamma_{yz}$  = Shear strain in Z direction on XZ plane

การเปรียบเทียบผลลัพธ์ของค่าความเครียดที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์และการทดลองจะเป็นการพิสูจน์ขีดความสามารถในการแก้ไขโจทย์ปัญหาของงานวิจัยนี้ได้ หากผลลัพธ์ทั้งสองวิธีให้ค่าที่สอดคล้องกัน จึงจะสามารถสรุปได้ว่าโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ที่เลือกใช้มีขีดความสามารถในการแก้ไขโจทย์ปัญหานี้และจะใช้กระบวนการ Pre-processing นี้เป็นรูปแบบในการออกแบบและวิเคราะห์ล้อรถแบบใหม่ที่สร้างด้วยอลูมิเนียมซึ่งมีน้ำหนักเบากว่าเดิม

### 3.3 การหาค่าความเครียดของล้อรถด้วยการทดลอง

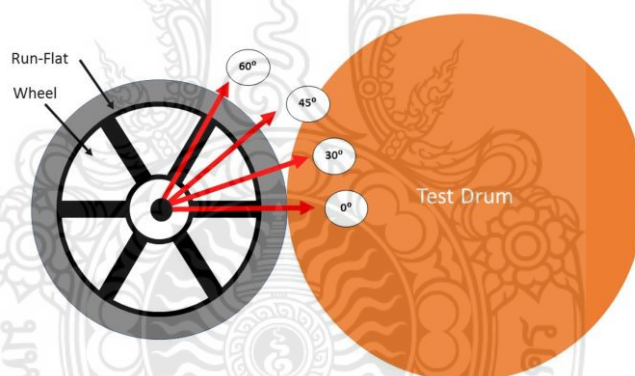
การดำเนินงานวิจัยประกอบด้วยสองวิธี คือ การทดลองและการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยใช้โปรแกรม SolidWorks Simulation มีรายละเอียดดังนี้

วิธีการทดลอง เตรียมชิ้นส่วนและเครื่องมือในการทดสอบ ติดตั้งล้อรถเข้ากับกระทะล้อ และติดตั้ง Strain Gage ลงบนกระทะล้อและวงล้อรถ ออกแบบและสร้างชุดดุมล้อ และอุปกรณ์จับยึดล้อรถแบบเดิมสำหรับทดสอบการกดล้อรถ จากนั้นทำการติดตั้งชุดดุมล้อเข้ากับกระทะล้อ แล้วจึงนำไปติดตั้งเข้ากับเครื่องทดสอบสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานยางล้อ เชื่อมต่อสายสัญญาณจาก Strain Gage เข้ากับอุปกรณ์จัดเก็บข้อมูล Data Logger ทำการควบคุมอุณหภูมิห้องทดสอบให้อยู่ที่ 25 องศาเซลเซียส เพิ่มแรงกดเข้าไปที่ดุมกระทะล้อเพื่อให้วงล้อรถเข้าไปกดทับกับวงล้อ (Drum) ของเครื่องทดสอบการห้ำหั่นล้อ อ่านค่าความเครียดและเก็บข้อมูลในทุกๆ ตำแหน่ง (ดังรูปที่ 3.14) และทำการทดลองซ้ำเพื่อหาค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน



รูปที่ 3.14 ตำแหน่งติดตั้ง Strain Gage ลงบนกระทะล้อและล้อรถ

นำล้อรันแพลทโลหะประกอบเข้ากับล้ออัลลอย (กระทะล้อ) ของรถยนต์นั่งส่วนบุคคลที่มีขนาด 17 นิ้ว โดยที่ไม่ต้องใส่ยางรถยนต์ จากรูปที่ 3.14 เป็นการกำหนดตำแหน่งด้วยพิกัดฉาก  $x, y, z$  และกำหนดตำแหน่งติดตั้ง Strain Gage ลงไปที่กระทะล้อและล้อรันแพลท เพื่อใช้เป็นจุดอ้างอิงสำหรับการเปรียบเทียบค่าความเครียดที่เกิดขึ้นจากการทดลองกับวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ทำการติดตั้งสเตรนเกจเข้ากับชุดล้อทั้งหมด 12 จุดตามรูปที่ 3.14 จากนั้นติดตั้งสายสัญญาณ Strain Gage เข้ากับเครื่อง Data Logger และนำเข้าเครื่องทดสอบการห้ามล้อ ดังรูปที่ 3.15 ใช้แรงกดไฮดรอลิกขับเคลื่อนชุดล้อเข้าไปดันเข้ากับชุดดรัม (Test Drum) ของเครื่องทดสอบการห้ามล้อ เปรียบเสมือนเป็นการจำลองการทดสอบบนถนนจริง โดยมุมกดที่เริ่มต้นการกดให้เป็น 0, 30, 45 และ 60 องศา ค่าความเครียดจากสเตรนเกจจะไปแสดงที่ Data Logger โดยมีหน่วยเป็นไมโครเมตรต่อเมตร นำผลที่ได้จาก Data Logger มาบันทึกเป็นค่าความเค้นความเครียด จากรูปที่ 3.14 พบว่าด้วยกระทะล้อจะมี 6 ก้าน บนกระทะล้อตำแหน่งที่ 1, 2, 3, 4, 5 และ 6 นั้น กับตำแหน่งหมายเลขที่ 7, 8, 9, 10, 11, และ 12 นั้น อาจจะไม่สามารถแสดงผลของค่าความเครียดที่เกิดขึ้นให้เป็นไปตามแกนต่างๆ เพื่อการอ่านค่า เนื่องด้วยใช้ระบบพิกัดฉาก ดังนั้นในแต่ละตำแหน่งจะมีการหมุนชุดวงล้อให้ตำแหน่งการอ่านค่า Strain Gage นั้นตรงกันกับทิศทางของแกนระบบพิกัดฉาก



รูปที่ 3.15 โครงสร้างระบบทดสอบหาค่าความเครียดด้วยเครื่องทดสอบการห้ามล้อ

### 3.4 การออกแบบล้อรันแพลทสำหรับรถยนต์นั่งส่วนบุคคล

การออกแบบล้อรันแพลทจะใช้กระบวนการวิศวกรรมย้อนรอยหรือวิศวกรรมย้อนกลับ เพื่อสร้างโมเดล 3 มิติ ของกระทะล้อ เพื่อนำไปใช้ในการสร้างวงล้อรันแพลทต่อไป โดยเมื่อทำสำเร็จแล้ว วิศวกรรมย้อนกลับจะให้สำเนาเสมือนของพิมพ์เขียวที่นำไปใช้กับการออกแบบต้นฉบับนั่นคือ ล้อรันแพลทจะสามารถสวมเข้ากับกระทะล้อได้อย่างสนิท วิศวกรรมย้อนรอยอาจเป็นวิธีที่แม่นยำที่สุดในการสร้างการออกแบบใหม่สำหรับสินค้าที่เลิกผลิตไปเมื่อหลายสิบปีก่อน ในกรณีที่พิมพ์เขียวดั้งเดิมสูญหายหรือถูกทำลายไปนาน วิศวกรรมย้อนรอยอาจเป็นวิธีเดียวที่จะทำให้ผลิตภัณฑ์ดังกล่าวกลับมามีชีวิตอีกครั้ง โดยสามารถรับรูปแบบการทำงานของผลิตภัณฑ์เก่าได้ โดยทั่วไปแล้วสามารถติดตาม



ขั้นตอนของการออกแบบและใช้ข้อมูลเชิงลึกเหล่านั้นเพื่อสร้างแบบจำลองใหม่ ซ่อมแซมชิ้นส่วนหรือปรับปรุงผลิตภัณฑ์ในอนาคต บางครั้งบริษัทต่างๆ ใช้วิศวกรรมย้อนรอยเพื่อรับข้อมูลการออกแบบของผลิตภัณฑ์ที่เลิกผลิตไปนานแล้ว ตัวอย่างเช่น บริษัทขนาดเล็กที่อยู่ในธุรกิจมานานกว่า 40 ปี อาจผลิตผลิตภัณฑ์จำนวนมากก่อนการออกแบบโดยใช้คอมพิวเตอร์ช่วยและการจัดเก็บไฟล์ดิจิทัล

การทำวิศวกรรมย้อนรอยเริ่มจากการนำล้ออัลลอยไปติดตั้งลงบนแท่นจับชิ้นงานและสร้างโมเดลกระทะล้อด้วยเครื่องสแกนเลเซอร์ FARO P06-05 3 มิติ ดังรูปที่ 3.16 ซึ่งจะทำให้ได้พิกัดต่างๆ บนผิวกระทะล้อ จากนั้นทำการสร้างพื้นผิวด้วยชุดคำสั่ง Surface โดยใช้โปรแกรม SolidWorks และเปลี่ยน Surface Modeling เป็น Solid Modeling ภายหลังจากการได้ Solid Modeling จะต้องทำการตรวจสอบพื้นผิวอีกครั้งจากนั้นทำการผ่าครึ่งกระทะล้อ เพื่อให้ได้หน้าตัดดังรูปที่ 3.17 เพื่อใช้เส้นของนอกเป็นแนวอ้างอิงสำหรับการสร้างล้อรันแพลทต่อไป



รูปที่ 3.16 เครื่องสแกนเลเซอร์ FARO Measurement FARO P06-05 3 มิติ



รูปที่ 3.17 หน้าตัดของล้ออัลลอยเป็นตัวกำหนดในการออกแบบ

จากรูปที่ 3.17 ซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะของกระทะล้อสำหรับรถยนต์นั่งส่วนบุคคล จากลักษณะดังกล่าวทำให้สามารถออกแบบเป็นวงล้อรันแพลทที่จะเข้าไปประกบได้และสามารถล๊อคให้แน่นได้

โดยที่ตำแหน่งหมายเลข 1 และหมายเลข 2 จะเป็นตำแหน่งล้อยึดไม่ให้วงล้อรันแพลทที่ออกแบบมาเคลื่อนที่ แนวความชันหมายเลข 3 เป็นความชันที่จะช่วยป้องกันไม่ให้วงล้อรันแพลทที่เข้ามาสวมเคลื่อนที่ออกจากตำแหน่งที่ประกอบเข้าไป ทั้งนี้วงล้อรันแพลทจะกว้างมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับรูปร่างของแนวขอบกระทะล้อและน้ำหนักของรถยนต์ที่ตกลงมา หากน้ำหนักมากจะส่งผลให้แรงกดมีค่ามาก ดังนั้นจะต้องออกแบบให้วงล้อมีความกว้างเพิ่มขึ้นด้วย สำหรับความสูงของวงล้อรันแพลทจะมากหรือน้อยย่อมมีความจำเป็น เนื่องด้วยหากวงล้อรันแพลทมีความสูงมากเท่าใดนั้น คือ ระยะระหว่างวงล้อรันแพลทกับพื้นผิวทางด้านในน้อยลง ซึ่งอาจเกิดการกระแทกได้หากล้อยางรถยนต์ไม่แบนและรถยนต์วิ่งด้วยความเร็วปกติทั่วไป ล้อรันแพลทถูกออกแบบมาเพื่อให้รถยนต์สามารถวิ่งได้ภายใต้เงื่อนไขที่ยางรถยนต์ไม่มีลมยาง ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่าง เช่น ประเภทของล้อรันแพลท น้ำหนักรถยนต์ เป็นต้น



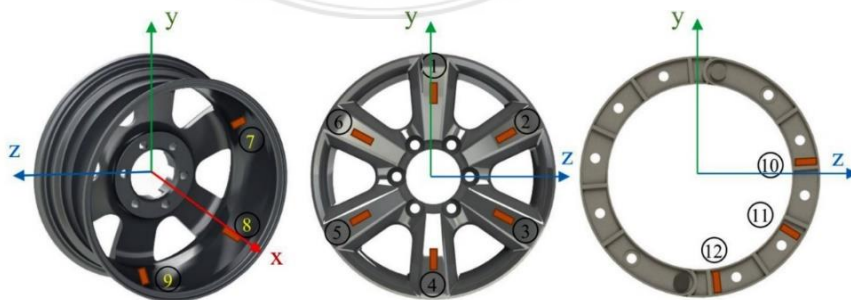
## บทที่ 4

### ผลการดำเนินงาน

จากการดำเนินงานในบทที่ 3 จึงได้ผลการดำเนินงานต่างๆ ประกอบด้วยผลการทดลองเพื่อหาค่าความเครียดที่เกิดขึ้นกับล้อรถแพลทโลหะและกระทะล้อ ผลการวิเคราะห์ความเครียดของล้อรถแพลทแบบเดิม (ล้อโลหะ) ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ จากนั้นจึงได้ทำการเปรียบเทียบค่าความเครียดทั้งสองวิธีเพื่อตรวจสอบขีดความสามารถของโปรแกรมที่ใช้วิเคราะห์และเป็นวิธีการนำไปสู่การออกแบบล้อรถแพลทแบบใหม่สำหรับรถยนต์นั่งส่วนบุคคลที่วิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยใช้วัสดุที่เป็น Aluminum 6063 T6 ที่มีน้ำหนักเบากว่า อันแสดงให้เห็นถึงการกระจายความเค้นที่เกิดขึ้นในล้อรถแพลทและกระทะล้อ มีรายละเอียดดังหัวข้อต่างๆ ต่อไปนี้

#### 4.1 ผลการดำเนินงานการทดสอบความเครียดของล้อรถแพลทแบบเดิม

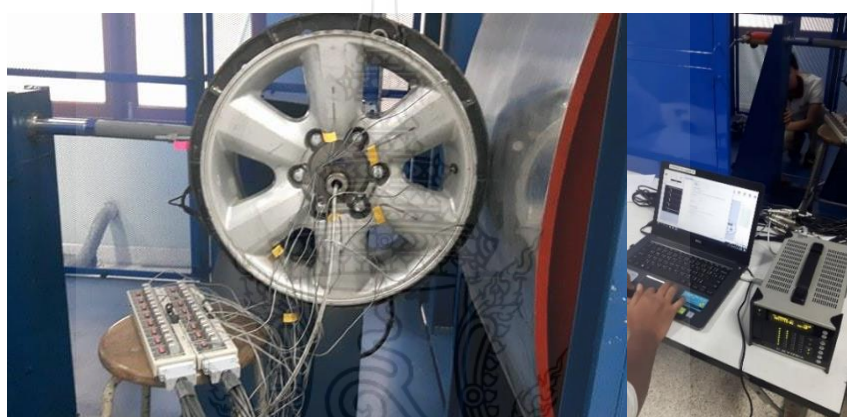
จากการเตรียมชิ้นส่วนและเครื่องมือในการทดสอบดังบทที่ 3 ได้ออกแบบและสร้างชุดดุมล้อและอุปกรณ์จับยึดล้อรถแพลทแบบเดิมสำหรับทดสอบการกดล้อรถแพลท จากนั้นทำการติดตั้งชุดดุมล้อเข้ากับกระทะล้อจึงได้ติดตั้งล้อรถแพลทเข้ากับกระทะล้อขนาด 17 นิ้ว ล้อคิให้แน่นด้วยสลักเกลียวและติดตั้ง Strain Gage ลงบนกระทะล้อและวงล้อรถแพลท ดังรูปที่ 4.1 และรูปที่ 4.2 แล้วจึงนำไปติดตั้งเข้ากับเครื่องทดสอบสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานยางล้อ เชื่อมต่อสายสัญญาณจาก Strain Gage เข้ากับอุปกรณ์จัดเก็บข้อมูล Data Logger ทำการควบคุมอุณหภูมิห้องทดสอบให้อยู่ที่ 25 องศาเซลเซียส และความชื้น 50% RH เพิ่มแรงกดเข้าไปที่ดุมของกระทะล้อเพื่อให้วงล้อรถแพลทเข้าไปกดทับกับวงล้อ (Drum) ของเครื่องทดสอบสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานยางล้อ ดังรูปที่ 4.3 อ่านค่าความเครียดและเก็บข้อมูลในทุกๆ ตำแหน่ง และทำการทดลองซ้ำเพื่อหาค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานในการทดลองอาจจำเป็นต้องทำการทดสอบจำนวนหลายครั้งและปรับตั้งให้อุปกรณ์ ชิ้นส่วนต่างๆ สามารถทำงานได้อย่างถูกต้อง เนื่องด้วยในการติดตั้งชิ้นส่วนต่างๆ จะเกิดช่องว่างมีระยะคลอนส่งผลให้การอ่านค่าความเครียดไม่คงที่เปลี่ยนแปลงตลอดเวลา ดังนั้นจะต้องปรับตั้งและทดลองจนกว่าค่าความเครียดที่อ่านได้นั้นคงที่



รูปที่ 4.1 ตำแหน่งติดตั้ง Strain Gage ลงบนกระทะล้อและล้อรถแพลท



รูปที่ 4.2 การติดตั้ง Strain Gage เข้ากับกระทะล้อและล้อรันแพลท



รูปที่ 4.3 การติดตั้งกระทะล้อและล้อรันแพลทเข้ากับอุปกรณ์การทดสอบ

ผลจากการสร้างโมเดล 3 มิติ ของล้อรันแพลทแบบเดิม คือ ล้อรันแพลทโลหะ แสดงดังรูปที่ 4.4 b) และกระทะล้อขนาด 17 นิ้ว โดยใช้ขนาดจริงที่วัดได้จากล้อรันแพลทโลหะและสร้างโมเดลกระทะล้อขนาด 17 นิ้ว ด้วยกระบวนการวิศวกรรมย้อนรอยที่จะได้ Surface Modeling จากนั้นนำไปสร้างพื้นผิวใหม่และเปลี่ยนให้เป็น Solid Modeling ทำการประกอบโมเดลล้อรันแพลทและกระทะล้อเข้าด้วยกันและสร้างโมเดลทางไฟไนต์เอลิเมนต์ กำหนดค่าและเงื่อนไขต่างๆ ในกระบวนการ Pre-processing จากนั้นวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมทางด้านไฟไนต์เอลิเมนต์และบันทึกผลการวิเคราะห์ที่ออกมาเป็นค่าความเครียดที่ตำแหน่งต่างๆ โดยต้องเป็นตำแหน่งที่ตรงกันกับค่าความเครียดที่ได้เก็บบันทึกไว้ในการทดลองและทิศทางของค่าความเครียดทั้งสองวิธีต้องเป็นค่าความเครียดที่เกิดขึ้นในทิศทางเดียวกัน ซึ่งสามารถปรับทิศทางได้ในโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์

#### 4.2 ผลการวิเคราะห์ความเครียดของล้อรันแพลทแบบเดิมด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

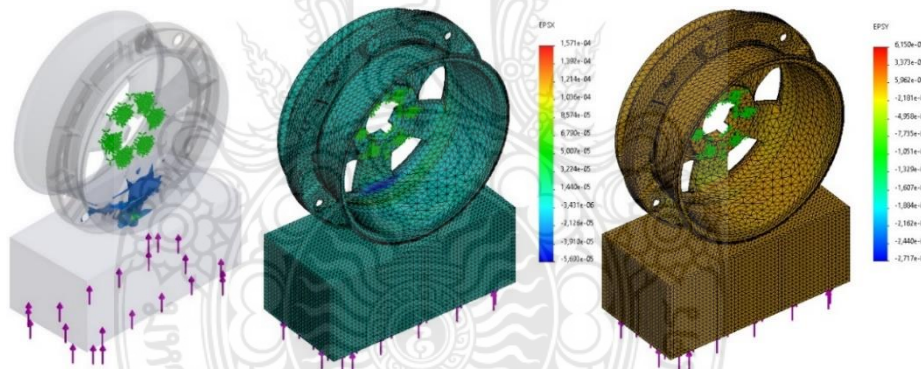
จากการนำโมเดลล้อรันแพลทที่ประกอบเข้ากับล้ออัลลอย (กระทะล้อ) เข้าสู่โปรแกรม SolidWorks Simulation เลือกประเภทการวิเคราะห์แบบสถิตยศาสตร์ (Static Analysis) โดย



กำหนดวัสดุของชิ้นงานสำหรับล้อรถเป็นโลหะ AISI 1020 และกำหนดล้ออัลลอยเป็น Alloy Steel (SS) ได้รูปการประกอบขึ้นส่วนดังรูปที่ 4.4 ผลจากการวิเคราะห์ความเครียดด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แสดงดังรูปที่ 4.5 ประกอบด้วยความเครียดตามแนวแกน x และความเครียดตามแนวแกน y และค่าความเครียดในแต่ละตำแหน่งที่วัดได้แสดงดังตารางที่ 4.1 และเปรียบเทียบค่าความเครียดระหว่างการทดลองและวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ในภาพรวมจะอยู่ระหว่างร้อยละ 10-16 นั้นแสดงให้เห็นว่าความเครียดที่ได้จากทั้งสองวิธีมีความสอดคล้องกันและวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ด้วยการใช้งานโปรแกรม SolidWorks Simulation มีขีดความสามารถในการแก้ไขโจทย์ปัญหาของงานวิจัยนี้ได้



รูปที่ 4.4 โมเดล 3 มิติ จากกระบวนการวิศวกรรมย้อนรอย a) กระโหลกและล้อรถแบบเดิม และ b) กระโหลกและล้อรถแบบใหม่

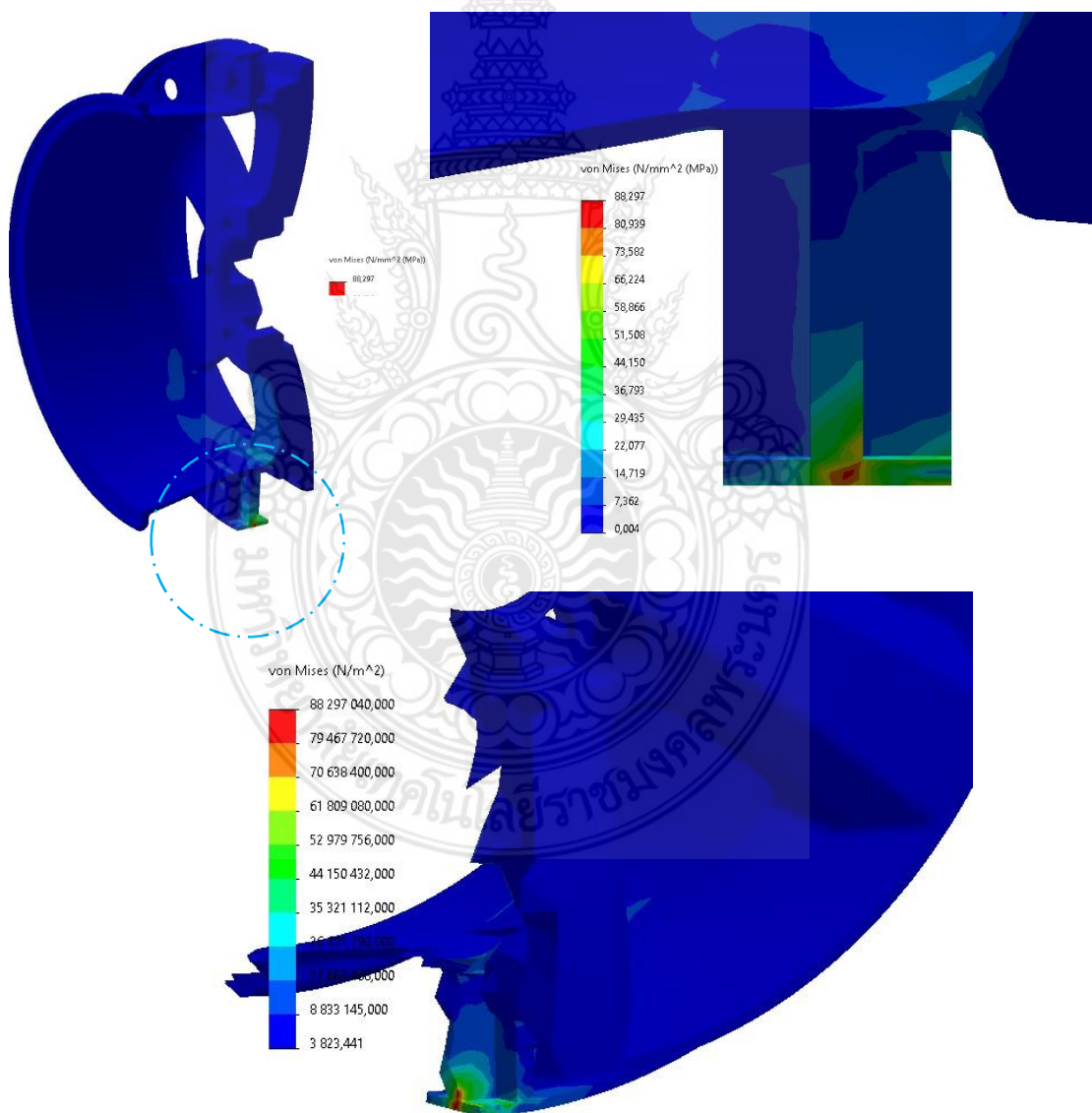


รูปที่ 4.5 ตัวอย่างค่าความเครียดจากวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลอง

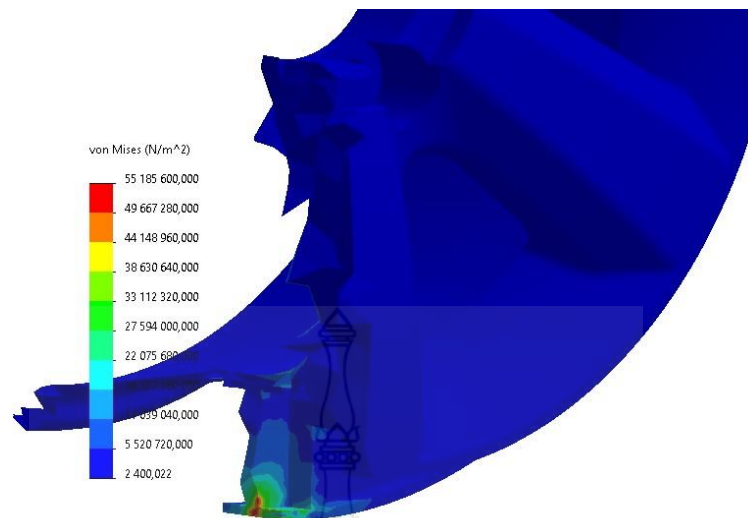
ตารางที่ 4.1 เปรียบเทียบค่าความเครียดในแนวแกนระหว่าง Exp. กับ FEA

Point No.	Strain		% Diff.	Remark
	Exp. result	FEA result		
1	0.00000057	0.00000050	11.88	y direction
4	0.00002200	0.00001883	14.41	y direction
7	0.00000038	0.00000032	15.69	x direction
8	-0.00000198	-0.00000166	16.31	x direction
9	-0.00000180	-0.00000151	16.39	x direction
10	0.00000030	0.00000027	11.37	z direction
12	-0.00000499	-0.00000444	11.03	y direction

จากการวิเคราะห์ค่าความเครียดและพบว่ามีความสอดคล้องกันทั้งสองวิธีที่กล่าวมา และนำไปสู่การออกแบบรับแพลตฟอร์มใหม่ โดยอาจพิจารณาการออกแบบได้ในรูปแบบของการเปลี่ยนชนิดของวัสดุจาก AISI1020 เป็นวัสดุชนิดอื่นที่มีน้ำหนักเบากว่าหรือรูปแบบการเปลี่ยนหน้าตัดล้อรับแพลตฟอร์มใหม่ ทั้งนี้ก่อนการพิจารณาการเปลี่ยนแปลงรูปแบบใดรูปแบบหนึ่ง จำเป็นต้องวิเคราะห์การกระจายของความเค้น Von Mises เพื่อเป็นแนวทางในการออกแบบและวิเคราะห์ที่ให้ล้อรับแพลตฟอร์มมีค่าความเค้นที่เหมาะสม และได้วัสดุหรือรูปแบบหน้าตัดที่ดี ผลการวิเคราะห์แสดงดังรูปที่ 4.6 และ 4.7 ด้วยมวลที่ใช้ในการกดเท่ากับ 800 และ 500 kg ผลที่ได้แสดงให้เห็นค่าความเค้น Von Mises สูงสุด เท่ากับ 82.3 และ 55.2 MPa ตามลำดับ จึงเป็นแนวทางในการเปลี่ยนวัสดุจาก AISI1020 เป็น อลูมิเนียม 6063 T6 ที่มีค่าความเค้นที่จุดครากมากกว่าค่าความเค้นที่วิเคราะห์ได้



รูปที่ 4.6 การกระจายความเค้นที่เกิดขึ้นที่กระทะล้อและล้อรับแพลตฟอร์มแบบเดิมภายใต้มวล 800 kg



รูปที่ 4.7 การกระจายความเค้นที่เกิดขึ้นที่กระทะล้อและล้อรันแพลทแบบเดิมภายใต้มวล 500 kg

### 4.3 ผลการออกแบบล้อรันแพลทแบบใหม่สำหรับรถยนต์นั่งส่วนบุคคล

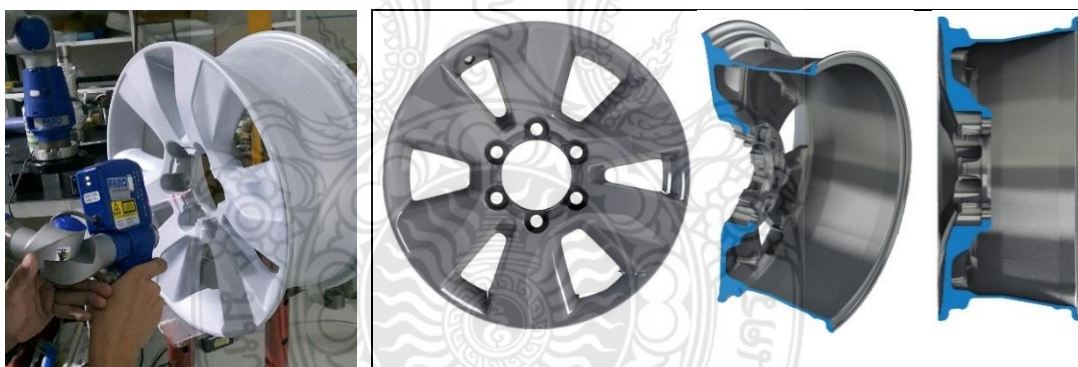
จากการวิเคราะห์โดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์และการทดลองได้ผลการเปรียบเทียบค่าความเครียดในแนวแกน x และแกน y แสดงดังตารางที่ 4.1 ซึ่งพบว่ามีค่าความแตกต่างของทั้งสองวิธีอยู่ในช่วงร้อยละ 10-16 ทิศทางของผลลัพธ์จากทั้งสองวิธีมีความสอดคล้องกัน และผลการวิเคราะห์ในรูปแบบที่ 4.10-4.11 แสดงให้เห็นว่าสามารถพิจารณาเปลี่ยนวัสดุได้ โดยในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้วัสดุ Aluminum 6063 T6 ซึ่งมีความต้านทานทางแรงดึงและความเค้นที่จุดครากที่เหมาะสมเมื่อเปรียบเทียบกับน้ำหนักที่ลดลงอย่างมาก สำหรับรถยนต์นั่งส่วนบุคคลที่เป็นรถซึ่งมีน้ำหนักไม่เกิน 2,080 kg เป็นการนับรวมรถกระบะสี่ล้อหรือที่เรียกกันในเรื่องว่ารถปิคอัพด้วย จากรูปที่ 4.12 เป็นการทำให้วิศวกรรมย่อยของกระทะล้อขนาด 17 นิ้ว ที่ใช้กับรถบรรทุกหรือรถปิคอัพ และได้โมเดลดังรูปที่ 4.13 และประกอบเข้ากับล้อรันแพลท ภายใต้กระบวนการ Pre-processing ต้องกำหนดวัสดุสำหรับล้อรันแพลทเป็น Aluminum 6063 T6 ดังตารางที่ 3.1 ภาระที่กระทำหรือกดเข้าไปยังล้อรันแพลทคือ 3,000 3,500 4,000 5,000 6,000 7,000 และ 8,000 N ซึ่งแรงทั้งหมดเป็นแรงที่กระทำต่อหนึ่งล้อ ภายใต้สมมติฐานหรือเงื่อนไขคือ น้ำหนักรถยนต์กระจายเท่ากันทั้งสี่ล้อ ตารางที่ 4.1 แสดงขนาดของแรงเนื่องจากน้ำหนักรถยนต์นั่งส่วนบุคคลและเป็นแรงที่ใช้กำหนดลงในโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์

ตารางที่ 4.2 ขนาดแรงเนื่องจากน้ำหนักรถยนต์นั่งส่วนบุคคล

รายการ	กรณีที่ 1	กรณีที่ 2	กรณีที่ 3	กรณีที่ 4	กรณีที่ 5	กรณีที่ 6	กรณีที่ 7
แรงต่อหนึ่งล้อ (N)	3,000	3,500	4,000	5,000	6,000	7,000	8,000
คิดเป็นมวลที่กดลงต่อหนึ่งล้อ (kg)	305.8	356.8	407.7	509.7	611.6	713.5	815.5
คิดเป็นมวลของรถยนต์หนึ่งคัน (kg)	1,223	1,427	1,631	2,038	2,446	2,854	3,262



พบว่าในขอบเขตของงานวิจัยนี้กำหนดขนาดมวลของรถยนต์นั่งไม่เกิน 2,080 kg ดังนั้นจึงให้ความสำคัญหลักไปที่กรณีศึกษา 1-4 ซึ่งแต่ละกรณีมีน้ำหนักรถยนต์ดังตารางที่ 4.2 ทั้งนี้ในความเป็นจริงเมื่อเกิดการใช้งานรันแฟลทและรถยนต์เคลื่อนที่แล้ว น้ำหนักรถยนต์ที่ตกลงไปที่แต่ละล้อจะมีค่ามากกว่าน้ำหนักรถยนต์จริงอันเกิดจากการขับเคลื่อนด้วยต้นกำลังเครื่องยนต์ การเคลื่อนที่ของรถยนต์บนถนน ซึ่งสภาพถนนในความจริงนั้นไม่ราบเรียบ ดังนั้นจึงมีการกำหนดกรณีที่ 5-7 ที่มีมวลของรถยนต์ 2446-3262 kg ซึ่งเป็นมวลของรถยนต์ที่มากกว่าขอบเขตของงานวิจัยนี้ได้ถูกนำมาเป็นส่วนหนึ่งของการวิเคราะห์เพื่อพิจารณาขีดความสามารถของวงล้อรันแฟลทว่าสามารถรับน้ำหนักรถยนต์ที่มากกว่า 2,080 kg ได้หรือไม่ จากรูปที่ 4.14 ถึง 4.17 เป็นผลการวิเคราะห์การกระจายความเค้นที่เกิดขึ้นสำหรับล้อรันแฟลทแบบใหม่ที่สร้างขึ้นด้วย Aluminum 6063 T6 ภายใต้แรงกด 3,000 3,500 4,000 และ 5,000 นิวตัน และจากตารางที่ 4.3 เป็นผลลัพธ์จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์ เอลิเมนต์สำหรับล้อรันแฟลทแบบใหม่ ประกอบด้วยค่าความเค้น Von Mises ค่าความเครียดและค่าความปลอดภัยภายใต้แรงกระทำระหว่าง 3,000-8,000 นิวตัน การพิจารณาจะให้ความสำคัญไปที่ล้อรันแฟลทเป็นหลัก เนื่องด้วยกระทะล้อได้ถูกออกแบบและสร้างมาให้สามารถรองรับน้ำหนักรถยนต์ได้เรียบร้อยแล้ว



a)

b)

รูปที่ 4.8 การสแกนด้วยเครื่องสแกนเลเซอร์ FARO P06-05 a) เครื่องสแกน b) โมเดลล้อ 17 นิ้ว  
ภายหลังกระบวนการวิศวกรรมย้อนรอย

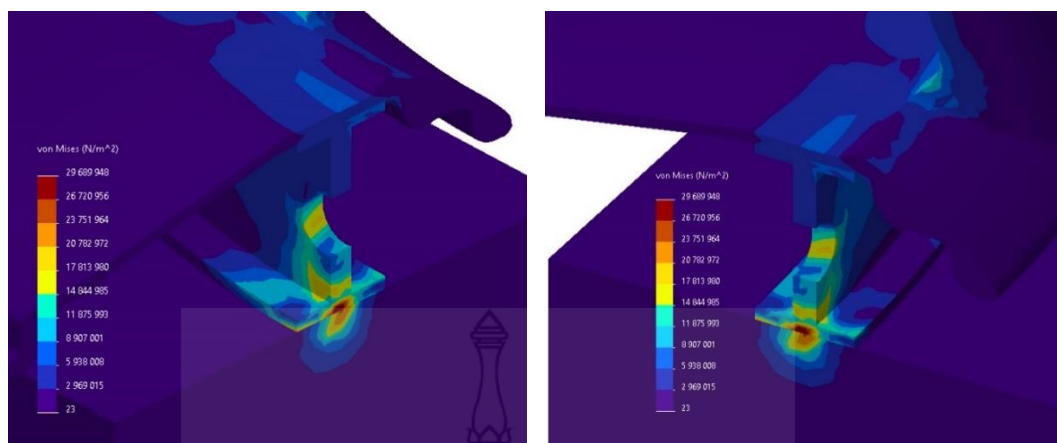


a)

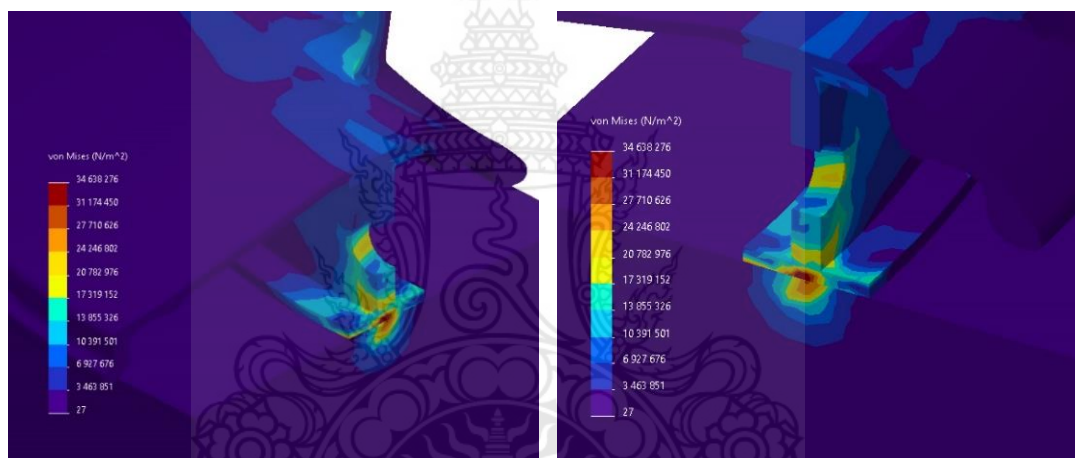


b)

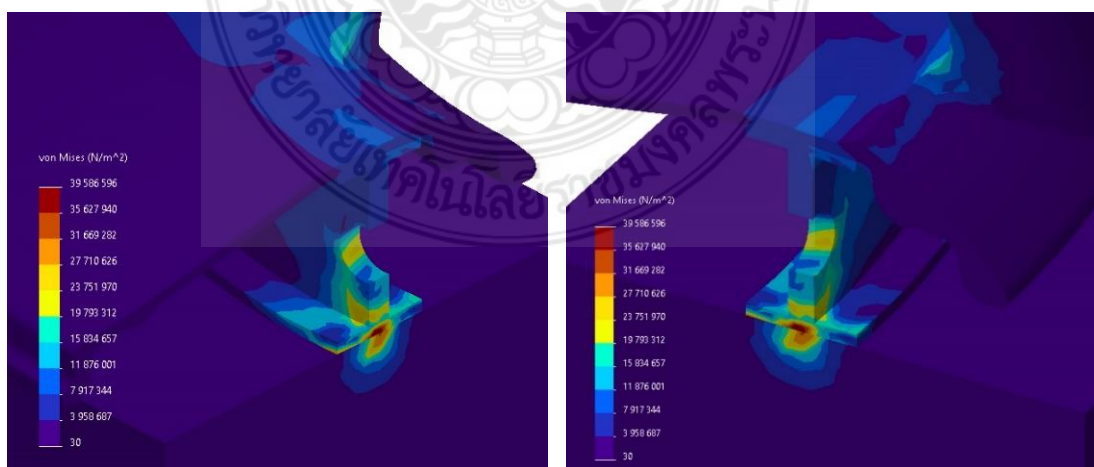
รูปที่ 4.9 โมเดล 3 มิติ จากกระบวนการวิศวกรรมย้อนรอย a) กระทะล้อและล้อรันแฟลทแบบเดิม  
และ b) กระทะล้อและล้อรันแฟลทแบบใหม่



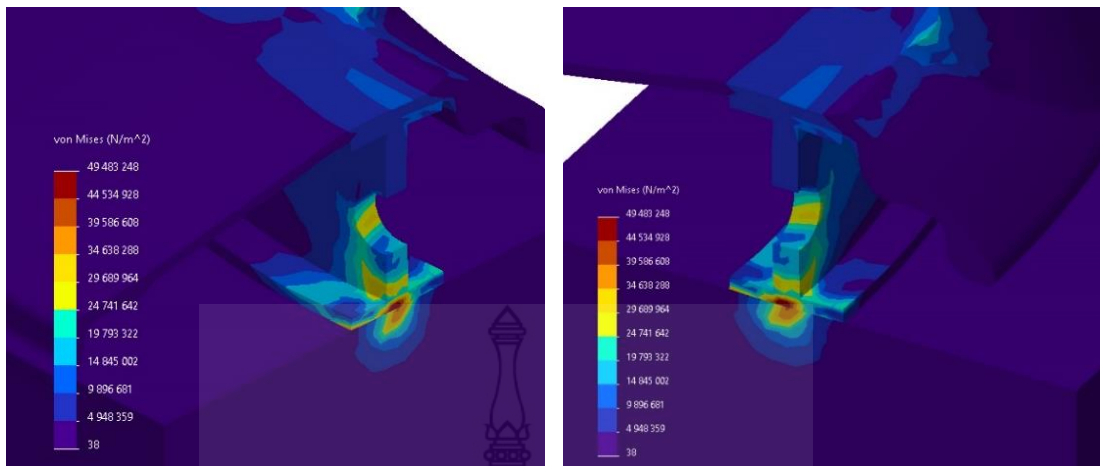
รูปที่ 4.10 กรณีที่ 1 การกระจายความเค้น Von Mises สำหรับล้อยันเพลทแบบใหม่  
ภายใต้แรงกด 3,000 นิวตัน



รูปที่ 4.11 กรณีที่ 2 การกระจายความเค้น Von Mises สำหรับล้อยันเพลทแบบใหม่  
ภายใต้แรงกด 3,500 นิวตัน



รูปที่ 4.12 กรณีที่ 3 การกระจายความเค้น Von Mises สำหรับล้อยันเพลทแบบใหม่  
ภายใต้แรงกด 4,000 นิวตัน



รูปที่ 4.13 กรณีที่ 4 การกระจายความเค้น Von Mises สำหรับล้อรันแพลทแบบใหม่ ภายใต้แรงกด 5,000 นิวตัน

ตารางที่ 4.3 ผลการวิเคราะห์สำหรับล้อรันแพลทใหม่ด้วยวัสดุ Aluminum 6063 T6

รายการผลลัพธ์	แรงกด, N (kg)						
	3,000 (305.8)	3,500 (356.8)	4,000 (407.7)	5,000 (509.7)	6,000 (611.6)	7,000 (713.5)	8,000 (815.5)
Max. Von Mises stress (MPa)	29.6	34.6	39.6	49.5	59.4	69.3	79.2
Equivalent Strain, (ESTRN)	0.0003672	0.000428	0.000489	0.000612	0.000734	0.000856	0.000979
Safety factor (for run flat)	7.2	6.2	5.4	4.3	3.6	3.1	2.7

การวิเคราะห์ด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ด้วยการวิเคราะห์แบบสถิตยศาสตร์ได้รับการยืนยันผลการวิเคราะห์ด้วยการทดลองมีความแตกต่างของค่าความเครียดร้อยละ 10-16 กระบวนการวิศวกรรมย้อนรอยเข้ามามีส่วนในการสร้างกระทะล้อที่มีมิติที่ถูกต้องและส่งผลให้สามารถสร้างแบบจำลองล้อรันแพลทที่เหมาะสม และมีขนาดที่ถูกต้องสามารถเข้าได้กับกระทะล้อ ล้อรันแพลทแบบใหม่ที่กำหนดด้วยวัสดุ Aluminum 6063 T6 ได้ถูกนำมาใช้ในการสร้างล้อรันแพลทแบบใหม่ ส่งผลให้น้ำหนักวงล้อรันแพลทหนึ่งชุดจากน้ำหนัก 11.36 กิโลกรัม ลดลงเหลือ 3.88 กิโลกรัม (ลดลง 2.92 เท่า) ในขณะที่ค่าความเค้นที่จุดครากไม่เกินขีดจำกัดยืดหยุ่นและมีค่าความปลอดภัยมากพอที่จะสามารถรับน้ำหนักได้สูงระหว่าง 2.7-7.2 เท่า (ภาระกดระหว่าง 3,000-8,000 นิวตัน) แต่หากพิจารณาภาระที่กระทำต่อหนึ่งล้อด้วยภาระที่ต้องรับน้ำหนักบรรทุกที่ 7,000-8,000 นิวตัน พบว่ามีค่าความปลอดภัยอยู่ระหว่าง 2-3 เท่า ซึ่งค่าความปลอดภัยยังเพียงพอต่อการใช้งาน

## บทที่ 5

### สรุปผลและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผล

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบล้อรถแฟลทที่สร้างด้วยอลูมิเนียมสำหรับรถยนต์นั่งส่วนบุคคลและวิเคราะห์ความเค้น ความเครียด และการเสียรูปของล้อรถแฟลทและชิ้นส่วนประกอบต่างๆ ล้อรถแฟลทรูปแบบเดิมที่มีขนาด 17 นิ้ว ถูกสร้างด้วย AISI 1020 ซึ่งมีน้ำหนัก 11.36 กิโลกรัมต่อวงล้อ ปัญหาสำคัญคือน้ำหนักและการประกอบเข้ากับกระทะล้อไม่แนบสนิทและมีช่องว่าง งานวิจัยนี้จึงต้องเปลี่ยนวัสดุจาก AISI 1020 เป็น Aluminum 6063 T6 การทดลองและการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลขโดยการใช้โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ถูกนำมาใช้ในงานวิจัยด้วยการเปรียบเทียบค่าความเครียดตามตำแหน่งต่างๆ ของล้อรถแฟลทและกระทะล้อ ผลลัพธ์จากทั้งสองวิธีการแสดงให้เห็นถึงขีดความสามารถของโปรแกรม SolidWorks Simulation

จากการวิเคราะห์โดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์และการทดลองได้ผลการเปรียบเทียบค่าความเครียดในแนวแกน x และแกน y ซึ่งพบว่ามีค่าความแตกต่างของทั้งสองวิธีอยู่ในช่วงร้อยละ 10-16 ทิศทางของผลลัพธ์จากทั้งสองวิธีมีความสอดคล้องกัน ผลลัพธ์จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับล้อรถแฟลทแบบใหม่ประกอบด้วย ค่าความเค้น Von Mises ค่าความเครียด และค่าความปลอดภัย ภายใต้แรงกระทำระหว่าง 3,000-8,000 นิวตัน กระบวนการวิศวกรรมย้อนรอยเข้ามามีส่วนในการสร้างกระทะล้อที่มีมิติที่ถูกต้องและส่งผลให้สามารถสร้างแบบจำลองล้อรถแฟลทที่เหมาะสมและมีขนาดที่ถูกต้องสามารถเข้าได้กับกระทะล้อ ล้อรถแฟลทแบบใหม่ที่กำหนดด้วยวัสดุ Aluminum 6063 T6 ได้ถูกนำมาใช้ในการสร้างล้อรถแฟลทแบบใหม่ ส่งผลให้น้ำหนักวงล้อรถแฟลทหนึ่งชุดจากน้ำหนัก 11.36 กิโลกรัม ลดลงเหลือ 3.88 กิโลกรัม (ลดลง 2.92 เท่า) ในขณะที่ค่าความเค้นที่จุดครากไม่เกินขีดจำกัดยืดหยุ่นและมีค่าความปลอดภัยมากพอที่จะสามารถรับน้ำหนักได้สูงระหว่าง 2.7-7.2 เท่า (ภาระกระทำระหว่าง 3,000-8,000 นิวตัน) แต่หากพิจารณาภาระที่กระทำต่อหนึ่งล้อด้วยภาระที่ต้องรับน้ำหนักบรรทุกที่ 7,000-8,000 นิวตัน พบว่ามีค่าความปลอดภัยอยู่ระหว่าง 2-3 เท่า ซึ่งค่าความปลอดภัยยังเพียงพอต่อการใช้งาน ดังนั้นจากผลการวิจัยที่กล่าวมาจึงสามารถสรุปผลงานวิจัยต่อวัตถุประสงค์ได้ดังต่อไปนี้

- ได้ดำเนินการออกแบบล้อรถแฟลทที่สร้างด้วยอลูมิเนียมสำหรับรถยนต์นั่งส่วนบุคคลที่สามารถรองรับน้ำหนักรถยนต์นั่งส่วนบุคคล รวมทั้งรถบรรทุกปิคอัพด้วย ทั้งนี้ในการผลิตล้อรถแฟลทอลูมิเนียมขึ้นมาจริง ควรเป็นการหล่อขึ้นรูปและนำมาปรับผิวเพื่อให้เข้าได้กับพื้นผิวของกระทะล้อ

- ได้ดำเนินการวิเคราะห์ความเค้น ความเครียด และการเสียรูปของล้อรถแฟลท และชิ้นส่วนประกอบต่างๆ ส่งผลให้ทราบค่าความปลอดภัยในการใช้งาน

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

แนวทางการออกแบบและวิเคราะห์ลัทธิฐานแพลทสำหรับรถยนต์นั่งส่วนบุคคลนี้สามารถเป็นแนวทางการต่อยอดเพื่อออกแบบ และวิเคราะห์ลัทธิฐานแพลทสำหรับรถยนต์นั่งส่วนบุคคลขนาดเล็กได้ เพียงแต่รูปแบบหน้าตัดของลัทธิฐานแพลทจะต้องได้รับการพิจารณาใหม่ และยังคงต้องใช้กระบวนการวิศวกรรมย้อนรอยเช่นเดิม โครงสร้างเหล็กซึ่งอยู่ภายในลัทธิฐานแพลทอาจได้รับการพิจารณาออกแบบใหม่ให้มีเพียง 1 เส้น และออกแบบให้หน้าตัดของลัทธิฐานแพลทไม่สูงมากนัก นั่นคือรัศมีของวงลัทธิฐานแพลทด้านนอกสุดจะต้องมากกว่ารัศมีของขอบกระทะล้อในระยะที่ไม่ส่งผลให้ขอบกระทะล้อบดยางได้เมื่อไม่มีลมยาง นอกเหนือจากวัสดุ Aluminum Alloy แล้ว ยังสามารถใช้เป็นวัสดุทดแทนได้ และสามารถต่อยอดจากงานวิจัยนี้ไปสู่การออกแบบหน้าตัดรถแพลทใหม่ด้วยวัสดุอื่นๆ ที่จะทำให้อัตนทุนลดลงและมีกระบวนการผลิตที่ไม่ซับซ้อนกว่านี้





## เอกสารอ้างอิง

- [1] Avtotachki. Alexander Falchenko. (19 Jan 2021). REIFENPANNEN FAHREN, DIE PANNENSICHER SIND. [Online]. Available <https://avtotachki.com/de/shiny-run-flat-kotorye-ne-boyatsya-prokola/>
- [2] Grzegorz Motrycz, Karolina J. Helnarska and Piotr Stryjek, “Continuing a vehicle fitted with run flat tyres,” Scientific Journal of Silesian University of Technology. Series Transport, vol. 112, pp. 157-169, 2021.
- [3] กรมการขนส่งทางบกกองทัพบก และ บริษัท เจ เอส แอนด์ มิวเสส จำกัด, การวิจัยและพัฒนา ร่มรถยนต์บรรทุกทุกประเภทขนาดเล็กติดเกาะ รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์, 2558.
- [4] RunFlat International limited. (2021). Static RunFlat System. [Online]. Available from: <https://runflatinternational.com/products/static-runflat-system/>
- [5] RAVON AUTO. Hutchinson Runflat. [Online]. Available from: <https://www.ravonauto.com/product/hutchinson-runflat/>
- [6] ธงชัย พงษ์สมุทร, วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เบื้องต้น, ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่: ห้างหุ้นส่วนจำกัด ดารารวรรณการพิมพ์ เชียงใหม่. 2549.
- [7] ชัยวัฒน์ ไชยมหาพฤกษ์, “แผ่นเกาะเซรามิกส์กันกระสุนด้วยวัสดุเชิงประกอบ,” วิทยานิพนธ์ วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิศวกรรมเครื่องกล, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร, 2561.
- [8] นวพล กลางทัพ, “การวิเคราะห์พารามิเตอร์ที่มีผลกระทบต่อความสามารถในการต้านทานการเจาะทะลุของกระสุนบนโลหะด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์,” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิศวกรรมเครื่องกล, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร, 2562.
- [9] Sukholthaman, P. and Shirahada, K. (2014) Eco-value co-creation towards a sustainable tire scrap recovery network: Case of Bridgestone Thailand.
- [10] Erdogan, G., Alexander, L. and Rajamani, R.(2011) Estimation of Tire-Road Friction Coefficient Using a Novel Wireless Piezoelectric Tire Sensor
- [11] Tesheng, Hsiao, Jing-Yuan, Lan and Hanping, Yang. (2014) Integrated estimation of vehicle states, tire forces, and tire-road friction coefficient
- [12] Qi, Xiao-jie and Wang, Qiang. (2011) Study on the prediction technology of the retreaded tire residual life.



- [13] บริษัท บริดจสโตนเชลส์ (ประเทศไทย) จำกัด, โครงสร้างพื้นฐานของยางรถยนต์ (Basic Structure), (3 Nov. 2021). [ออนไลน์], Available: <https://bridgestonetruckcenter.com/blog/post/detail/51>
- [14] ประกอบ ชาติภักดิ์, พลรัชต์ บุญมี, ธีระวัฒน์ แม้นดั่ง และราม ชาติภักดิ์, “ล้อ Run-flat สำหรับรถยนต์บรรทุกทุกประเภทขนาดเล็กติดเกาะ,” รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์ สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ พ.ศ.2561.
- [15] Ronald Montoya. (Feb, 2022). “What Are Run-Flat Tires?,” [Online], Available: <https://www.edmunds.com/driving-tips/run-flat-tires-a-primer.html>
- [16] Blackcircles. co. th. “ระบบยาง รั้น แพลต มีกี่แบบ?,” [Online], Available: <https://www.blackcircles.co.th/th/faq-run-flat-tyre>
- [17] Bestdrivestellenbosch.co.za (Sep 17, 2021). “SSR-Self Supporting Runflat Tyres,” [Online], Available: <https://bestdrivestellenbosch.co.za/ssr-self-supporting-runflat-tyres/>
- [18] In 2 tires. (23 Nov. 2021). Neumatics run flat vs autosellantes. [Online], Available: <https://www.in2tires.com/BLOG/neumaticos-run-flat-vs-autosellantes>
- [19] Veld, op het, I. B. A. (2006). Run flat tires versus conventional tires: an experimental comparison. (DCT rapporten; Vol. 2006.042). Technische Universiteit Eindhoven. [Online], Available: <https://research.tue.nl/en/publications/run-flat-tires-versus-conventional-tires-an-experimental-comparis>
- [20] Nazmi Ali, C. H. Seng, M. S. Mohammad, A. I. Din and A. Hakim (January 2016). Design And Development Of The Mechanism For Run Flat Tyre Part 1’ for group member 1. Universiti Malaysia Pahang.
- [21] TYRON Flat Tyre Protection. (Aug 2012.). [Online], Available: [https://www.tyron-japan.jp/images/pdf\\_files/EnglishRunflat-Friction-Shield-information-sheet.pdf](https://www.tyron-japan.jp/images/pdf_files/EnglishRunflat-Friction-Shield-information-sheet.pdf)
- [22] Piotr Stryjek, Tomasz Nikisz and Krzysztof Omyliński. INNOVATIVE RUN FLAT SYSTEMS. Journal of KONES Powertrain and Transport, Vol. 22, No. 1 (November 2015)
- [23] Liu, H.; Pan, Y.; Bian, H.; Wang, C. (20 January 2021) Optimize Design of Run-Flat Tires by Simulation and Experimental Research. [Online], Available from: <https://www.mdpi.com/1996-1944/14/3/474>

- [24] Amosun, S.T., Adebisin, A.A., “Performance Evaluation of A Run-Flat Tyre.” Yaba College of Technology, Yaba and The Federal Polytechnic, Ilaro. Materials 2021, 14, 474.
- [25] สิทธิชัย ลิ้มรุ่งเรืองรัตน์ และอริสรา ชัยกิตติรัตน์, “การทำนายระดับการคงรูปของล้อยางตันด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์,” ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลและการบิน-อวกาศ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, 2554.
- [26] เจริญยุทธ เดชวายุกุล และคณะ, (2555). “พัฒนาล้อยางลมเสริมชั้นโฟมยาง” หาดใหญ่: คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- [27] H. S. Cheah, M. S. Mohammad, N. Ali, A. I. Din, A. Hakim, “Design and Development of The Mechanism for Run Flat Tyre, Part3,” in Proceeding of 2nd Integrated Design Project Conference (IDPC), Jan. 2016.
- [28] Sourav Das, “ Design and Weight Optimization of Aluminium Alloy Wheel,” International Journal of Scientific and Research Publications, vol.4, no.6, Jun. 2014.
- [29] Igbudu, Samuel and Fadare, David, “ Comparison of Loading Functions in the Modelling of Automobile Aluminium Alloy Wheel under Static Radial Load,” Open Journal of Applied Sciences. Vol. 5, pp. 403-413, 2015.
- [30] John Stearns, “ Reinventing the tire,” International News / Materials and Design, vol. 22, pp. 591–593, 2001.

ไม่มีเนื้อหาจากต้นฉบับ



## ประวัติการศึกษาและการทำงาน



ชื่อ นามสกุล	นายอลงกต ทะจาร์	
วัน เดือน ปีเกิด	25 มีนาคม 2532	
ภูมิลำเนา	103 หมู่ที่ 5 ตำบลห้วยม้า อำเภอเมืองแพร่ จังหวัดแพร่	
ประวัติการศึกษา		
วุฒิการศึกษา	ชื่อสถาบัน	ปีที่สำเร็จ
การศึกษา		
ประกาศนียบัตรวิชาชีพ	วิทยาลัยเทคนิคแพร่	2551
ประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูง	วิทยาลัยเทคนิคแพร่	2553
ปริญญาตรี	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร	2558
ตำแหน่งและสถานที่ทำงานปัจจุบัน		
หัวหน้าวิศวกรขาย บริษัท โทมิตะ เอเชีย จำกัด		