



## รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ : การศึกษาการกระจายตัวของความเค้นและความเครียดในล้อ  
ยางตันโดยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

**Finite element stress-strain analysis of a solid tyre**

โดย : ผศ. ดร. อริสรา ชัยกิตติรัตน และคณะ  
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

## รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ : การศึกษาการกระจายตัวของความเค้นและความเครียดในล้อ  
ยางตันโดยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

**Finite element stress-strain analysis of a solid tyre**

คณะผู้วิจัย

1. ผศ. ดร. อริสรา ชัยกิตติรัตน์

2. นาย อุตติศ สุริภา

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

ระยะเวลาดำเนินการ: 6 เดือน (1 พฤศจิกายน 2547 – 30 เมษายน 2548)

งบประมาณจาก สกว.: 90,000 บาท

ชุดโครงการวิจัยขนาดเล็กเรื่องยางพารา(SPR)สนับสนุนโดยสำนักกองทุนสนับสนุนการวิจัย  
(ความเห็นในรายงานนี้เป็นของผู้วิจัย สกว.ไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป)

## Executive Summary

**ชื่อโครงการ :** การศึกษาการกระจายตัวของความเค้นและความเครียดในล้อยางตัน  
โดยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

**หัวหน้าโครงการ :** ผศ. ดร. อริสรา ชัยกิตติรัตน  
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

### **ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา**

ล้อยางตันจัดเป็นผลิตภัณฑ์เชิงวิศวกรรมที่ใช้ในอุตสาหกรรมมากเพราะว่าล้อยางตันสามารถรับน้ำหนักได้มากจึงใช้มากสำหรับรถพ่วงคลิฟท์ที่ใช้ในโรงงานอุตสาหกรรม ล้อยางตันมีส่วนประกอบจากยางธรรมชาติกว่า 80% โดยล้อยางจากยางธรรมชาติมีข้อดีที่ได้รับการพิสูจน์แล้วเช่น มีการต้านการวิ่งต่ำ (Low Rolling Resistance) และมีการอัตราการเกิดความร้อนสะสมต่ำ (Low Heat Generation) ประเทศไทยเป็นผู้ผลิตล้อยางตันมากเป็นอันดับหนึ่งในอาเซียน ทว่าปัจจุบันการแข่งขันในตลาดอุตสาหกรรมของล้อยางตันมีมากขึ้น โดยเฉพาะการแข่งขันกับประเทศจีนซึ่งมีค่าแรงต่ำกว่าเรามากจึงได้เปรียบในเรื่องการทำราคาสินค้าให้ต่ำกว่าแม้ว่าเราจะได้เปรียบในเรื่องต้นทุนของวัตถุดิบ

การพัฒนาคุณภาพของสินค้าและการสร้างเทคโนโลยีที่เป็นของตัวเอง จะทำให้ผลิตภัณฑ์มีจุดเด่นที่ชัดเจนและตอบสนองความต้องการของลูกค้าซึ่งมีแตกต่างกันได้อย่างตรงประเด็นและเป็นการเสริมสร้างศักยภาพการแข่งขัน(Competitiveness)ในตลาดโลก แต่ทว่าในประเทศไทยยังขาดองค์ความรู้ในการพัฒนาผลิตภัณฑ์อย่างมีทฤษฎีและแบบแผน การพัฒนาที่ผ่านมาจึงเป็นแบบลองผิดลองดีลองถูกและประยุกต์แบบ design จากต่างประเทศ โดยไม่รู้ว่สิ่งที่ได้ปรับเปลี่ยนนั้นจะทำให้คุณภาพของผลิตภัณฑ์เป็นอย่างไร ดีขึ้นหรือไม่ ดังนั้นการวิเคราะห์ทางกลของผลิตภัณฑ์อย่างมีทฤษฎีและแบบแผน ซึ่งจะเป็นพื้นฐานที่สำคัญที่สุดในการพัฒนาคุณภาพของสินค้าอย่างมีประสิทธิภาพและการสร้างเทคโนโลยีที่เป็นของตัวเองจึงเป็นสิ่งที่ต้องเร่งพัฒนาเป็นอย่างยิ่ง

ล้อยางตันส่วนมากจะประกอบไปด้วยยางชั้นนอก ยางชั้นกลางและยางชั้นใน ซึ่งยางเหล่านี้ทำจากยางธรรมชาติผสมกับยางสังเคราะห์โดยมีการเติมสารอื่นๆเช่น ระบบสารทำให้ยางคงรูป (Vulcanization system) ระบบสารป้องกันยางเสื่อม (Stabilizer system) ระบบสารตัวเติมเพิ่มความแข็งแรง (Filler system) นอกจากนี้แล้วในล้อยางตันยังมีแผ่นผ้าใบและเส้นลวดเหล็กเป็นส่วนประกอบเสริมเพื่อเพิ่มความแข็งแรงของล้อยางให้มากขึ้น

ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เป็นระเบียบวิธีคำนวณทางคอมพิวเตอร์ที่มีประสิทธิภาพและประหยัด จึงเป็นวิธีที่สามารถนำมาช่วยในการศึกษาถึงอิทธิพลของส่วนประกอบต่างๆในล้อยางตันได้และทำให้

สามารถเข้าใจพฤติกรรมเชิงกลของล้อยางได้ชัดเจนขึ้นและเป็นประโยชน์อย่างมากในการนำไปช่วยในการออกแบบล้อยางต้นให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น ทั้งนี้ในการสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ที่ให้ผลการวิเคราะห์ที่เชื่อถือได้นั้นจำเป็นจะต้องให้ความสำคัญในแต่ละขั้นตอนตั้งแต่การเลือกใช้แบบจำลองที่นำมาใช้อธิบายพฤติกรรมเชิงกลขององค์ประกอบในแต่ละชนิด การสร้างเมช การเลือกชนิดเอลิเมนต์ที่เหมาะสม และการกำหนดขอบเขตและภาระ ที่ถูกต้อง อีกทั้งควรมีการ Validation (การยืนยันผล) กับการทดลองในสภาวะรับภาระจริงด้วย

### วัตถุประสงค์

1. เพื่อทำการวิเคราะห์เชิงกลและศึกษาลักษณะการกระจายตัวของความเค้นและความเครียดในล้อยางต้น ภายใต้สภาวะที่รับภาระที่เกิดจากน้ำหนักบรรทุกทุกในแนวคิง โดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์
2. เพื่อศึกษาถึงอิทธิพลของส่วนประกอบต่างๆในล้อยางต้น ที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงลักษณะการกระจายตัวของความเค้นและความเครียดในล้อยางต้น
3. เป็นพื้นฐานในการสร้าง Methodology ของการวิเคราะห์และออกแบบเชิงกลสำหรับล้อยางต้นอย่างมีแบบแผนและมีประสิทธิภาพ

### วิธีการดำเนินการวิจัย

1. ศึกษาค้นคว้างานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
2. ศึกษาการสร้างแบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ ของล้อยางต้น โดยใช้โปรแกรม Abaqus
3. สร้างแบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ของล้อยางต้น
4. ทำการทดสอบวัสดุยางที่ใช้เป็นส่วนประกอบในล้อยางต้นทั้งหมด 3 ชนิด (Compound) ที่นำมาทำเป็นยางชั้นนอก ยางชั้นกลาง และยางชั้นใน
5. คำนวณหาการกระจายของความเค้น , ความเครียด และ การเปลี่ยนรูปของล้อยางต้นภายใต้สภาวะที่รับโหลดแบบสถิตย์ในแนวคิง
6. เปรียบเทียบการเปลี่ยนรูปที่ได้จากการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์กับผลที่ได้จากการวัดค่าระยะยุบตัวของล้อยางเนื่องจากการรับโหลดแบบสถิตย์ในแนวคิงของล้อยางต้น
7. วิเคราะห์ความสัมพันธ์ของการกระจายตัวของความเค้น, ความเครียดในล้อยางต้นและการเปลี่ยนรูปร่างของล้อยางต้นกับการเปลี่ยนแปลงส่วนประกอบต่างๆ เช่นการเพิ่มปริมาตรหรือลดปริมาตรของยางแต่ละชั้น
8. สรุปผลและเขียนรายงาน

## ผลลัพธ์

1. ได้แบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ของล้อยางตันภายใต้ภาระที่เกิดจากน้ำหนักบรรทุกทุกในแนวตั้ง
2. ทำให้ทราบลักษณะการกระจายตัวของความเค้นและความเครียดในล้อยางตันและสามารถทำนายลักษณะการเปลี่ยนรูป(Deformation) ภายใต้ภาระที่เกิดจากน้ำหนักบรรทุกทุกในแนวตั้ง
3. ทำให้ทราบถึงอิทธิพลของส่วนประกอบต่างๆในล้อยางตันที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงลักษณะการกระจายตัวของความเค้นและความเครียด เพื่อใช้เป็นแนวทางในการพัฒนาคุณภาพของผลิตภัณฑ์ล้อยางตัน

ระยะเวลาในการดำเนินงาน 1 พฤศจิกายน 2547 - 30 เมษายน 2547

งบประมาณ 90,000 บาท

## **Executive Summary**

**Project Title:** Finite element stress-strain analysis of a solid tyre

**Principle Researcher and Affiliation:**

Asst. Prof. Dr. Arisara Chaikittiratana  
Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering  
King Mongkut's Institute of Technology North Bangkok  
1518 Piboonsongkram Rd., Bangsue  
Bangkok 10800  
E-mail: [acn@kmitnb.ac.th](mailto:acn@kmitnb.ac.th)

**Background and rationale of project**

Solid tyres is one of the important engineering parts used widely in heavy industry. Forklift trucks used for handling heavy materials and goods often use solid tyres. These tyres have major advantages over the pneumatic tyres that they are puncture-proof, able to bear heavy loads and, most importantly, less maintenance cost.

Thailand is the biggest producer and exporter of solid tyres in ASEAN. Solid tyres produced in Thailand use natural rubber, which Thailand has a rich resource, as the major constituent material (mostly over 80%). Also, Natural rubber has advantages such as low rolling resistance and heat generation.

Due to the increasing competition in the world solid tyres market, improvements of the product to meet customers' demands are progressively important. However, at the present, Thailand is greatly deficient in the suitable knowledge and effective methodology for the product development. Up till now most Thai solid tyres producers opt to develop their products by trial and error or copying tyre designs from abroad without a slightest idea of what would be the consequence of the modifications they have made.

Solid tyre construction mostly consists of layers of the various rubber compounds of varying thickness to form a composite structure. Steel wires and canvas are also used as components in solid tyres. In order to improve the quality and performance of solid tyres to suit the customers' need, it is necessary to understand the influence of the tyre components on the mechanical behaviour such as stress and strain distribution. This can lead to the identification of locations at risk to damages and also results in a guidance for components and compound formulations optimisation.

Computational finite element analysis (FEA) is a cheap and powerful tool that presents an opportunity for a detailed study of the mechanical behaviour of a solid tyre under various loading conditions. New ideas in the tyre structure can be tested with computer models instead of having to construct real prototypes. However, to get results with good accuracy a model needs enough nodes, the use of right type of elements, nonlinear material model with rubber, the use of right boundary conditions, the knowledge of the material characteristics and parameters and the validation of the finite element analysis.

## **Objectives**

1. To analyse and study the stress and strain distribution in the solid tyre cross-section under the static loading condition imitating the vertical load bearing situation using finite element analysis.
2. To study and gaining understanding of the influence of rubber components constituted in the solid tyre on the stress and strain distribution behaviour.
3. To help forming a basis of effective methodology for analysis and design of solid tyres.

## **Methodology**

1. Literature survey of related published work.
2. Study of methods and steps used for constructing finite element models in ABAQUS finite element software package.
3. Construct the finite element model of the solid tyre under investigation using ABAQUS finite element software package.
4. Conduct tests for characterising mechanical behaviour of the all three rubber components constituted in the solid tyre
5. Analyse the stress and strain distribution and deformation behaviour using Finite element analysis
6. Validate the deformation due to a static loading of a solid tyre against the real experimental data.
7. Analyse and study the variation of Stress and strain distribution and solid tyre deformation due to changes in the rubber components such as volumes and moduli.
8. Conclude the study and write the study report.

## **Outputs**

1. An effective methodology for constructing reliable finite element models of composite solid tyres and analyses of results was accomplished.
2. An experimental set up for validating finite element results was devised.
3. The investigation of the influences of rubber components constituted in a solid tyre construction was carried out and thus better understanding of roles of the rubber components was attained.

**Project Duration** 1 November 2004 - 30 April 2005

**Budget:** 90,000 Baht

## **บทคัดย่อ**

งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อแสดงให้เห็นว่าแบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์สามารถนำมาใช้วิเคราะห์การกระจายตัวของ การเสียรูป ความเค้น ความเครียด และพลังงานความความเครียดจำเพาะ ภายในล้อยางตันที่มีองค์ประกอบอย่างมากว่าหนึ่งชนิด รวมทั้งสามารถนำมาศึกษาถึงอิทธิพลของส่วนประกอบต่างๆในล้อยางตันได้อีกด้วยซึ่งทำให้สามารถช่วยให้เข้าใจพฤติกรรมเชิงกลของล้อยางได้ชัดเจนขึ้นและเป็นประโยชน์อย่างมากในการนำไปช่วยในการออกแบบล้อยางตันให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น ทั้งนี้การจำลองสภาวะการรับภาระต่างๆของล้อยางตันด้วยเครื่องคอมพิวเตอร์ จะช่วยประหยัดเวลาและค่าใช้จ่ายอย่างมากเมื่อเทียบกับการที่จะต้องสร้างล้อยางตันจริงแล้วทำการทดสอบทุกครั้งเมื่อออกแบบใหม่ แต่ทั้งนี้ในการสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ที่ให้ผลการวิเคราะห์ที่เชื่อถือได้นั้นจำเป็นจะต้องให้ความสำคัญในแต่ละขั้นตอนตั้งแต่การเลือกใช้แบบจำลองที่นำมาใช้อธิบายพฤติกรรมเชิงกลขององค์ประกอบแต่ละชนิด การสร้างเมช การเลือกชนิดเอลิเมนต์ที่เหมาะสม และการกำหนดขอบเขตและภาระ ที่ถูกต้อง อีกทั้งควรมีการ Validation (การยืนยันผล) กับการทดลองในสภาวะรับภาระจริงด้วย

ในงานวิจัยนี้ได้สร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ที่จำลองพฤติกรรมเชิงกลภายใต้สภาวะที่รับโหลดแบบสถิตย์ของผลิตภัณฑ์ล้อยางตัน Model หนึ่งที่ผลิตขึ้นในประเทศไทย ล้อยางตันดังกล่าวประกอบไปด้วยองค์ประกอบ 3 ชนิด (ยางชั้นนอก, ยางชั้นกลาง และ ยางชั้นใน) และลวดเหล็ก ในการศึกษานี้ได้เลือกแบบจำลองไฮเปอร์อีลาสติกแบบโพลิโนเมียลอันดับสองเพื่อแทนพฤติกรรมของวัสดุยางทั้ง 3 ชนิด ส่วนลวดเหล็กได้จำลองให้เป็นวัสดุประเภทอีลาสติกและมีคุณสมบัติไอโซโทรปิก จากนั้นได้ทำการยืนยันผลการจำลองที่ได้จากแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์กับผลการทดสอบล้อยางตันจริง โดยค่าพารามิเตอร์ที่นำมาเปรียบเทียบคือค่าการยุบตัวในแนวที่ตั้งฉากกับแผ่นระนาบสัมผัสและค่าการเคลื่อนตัวด้านกว้างของล้อยางตันพบว่าค่าการเคลื่อนตัวที่ได้จากการจำลองและการทดสอบมีค่าใกล้เคียงกันโดยมีความคลาดเคลื่อนเล็กน้อย จึงกล่าวได้ว่าแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ที่สร้างขึ้นมีความถูกต้องและน่าเชื่อถือในระดับหนึ่ง ดังนั้นการกระจายตัวของความเค้น และความเครียดที่ได้จากการจำลองนั้นจึงน่าที่จะเชื่อถือได้

ในส่วนสุดท้ายของงานวิจัยได้ทำการศึกษาอิทธิพลของการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบยางในล้อยางตัน โดยทำการศึกษาดูการจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ถึงอิทธิพลของการเปลี่ยนแปลงปริมาตรของยางแต่ละชนิดที่ประกอบอยู่ในล้อยางตัน และ การเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติเชิงกลของยางแต่ละชนิดในล้อยางตันต่อการกระจายตัวและขนาดสูงสุดของพลังงานความเครียดจำเพาะซึ่งเป็นพารามิเตอร์ที่สามารถเชื่อมโยงไปสู่การบ่งบอกถึงความเสียหายในล้อยางตันเมื่อล้อยางตันรับภาระสถิตย์แบบกดอัด

**คำสำคัญ** ล้อยางตัน, ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์, การวิเคราะห์ความเค้นและความเครียด



## **Abstract**

This study aims to demonstrate that computational finite element analysis is a powerful tool that can be used to study the mechanical behaviour such as deformation, stress and strain distribution and strain energy density distribution in composite solid tyres. It also can be used to give the better understanding of the influence of the components constituted in the solid tyres on the tyre mechanical behaviour. This can lead to form guidance for better tyre design. More importantly, the computational modelling can save a lot of time and cost for testing new designs without having to construct real prototypes for every new designs. However, to get results with good accuracy a model needs enough nodes, the use of right type of elements, nonlinear material model with rubber, the use of right boundary conditions, the knowledge of the material characteristics and parameters and the validation of the finite element analysis.

In this study, a finite element model of a Thai made solid tyre was constructed to simulate the static compressive loading condition. The solid tyre being modeled constitutes of three types of rubber of components and steel wires. Rubber materials were represented using polynomial hyperelastic model. The predictions from the finite element simulation were validated against the real experimental data for the same static loading condition. The predictions of displacements in the direction perpendicular and parallel to the contact plane were in good agreement with the experimental data. Thus it can be said that the finite element model constructed can give trustworthy analysis. Investigation of the influence of various aspects of rubber components used in the tyre construction on the strain energy density distribution which can be linked to identification of damage risk areas was also carried out.

**Keywords** Solid tire, Finite element stress-strain analysis

## สารบัญ

	หน้า
1. บทนำ	1
2. กลศาสตร์ของวัสดุในล้อยางตัน	8
3. การทดสอบและวิเคราะห์คุณสมบัติทางกลของวัสดุยาง	13
4. การทดสอบการกดอัดล้อยางตัน	24
5. การสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อจำลองสภาวะรับแรงแบบสถิตย์ของล้อยางตัน	28
6. ผลการวิเคราะห์ความเค้นและความเครียดในล้อยางตันภายใต้สภาวะรับแรงแบบสถิตย์	39
7. อภิปราย สรุปผลและข้อเสนอแนะ	52
เอกสารอ้างอิง	55
ภาคผนวก ก ความหมายตัวย่อของเอลิเมนต์ชนิดต่างๆ	57
ภาคผนวก ข อินพุตไฟล์ของแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์	59
ภาคผนวก ค ตารางเปรียบเทียบวัตถุประสงค์ กิจกรรมที่ได้ดำเนินงานและผลที่ได้รับ	67
ภาคผนวก ง เอกสารสำหรับเผยแพร่	68

## สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า	
ภาพที่ 1-1	ผลของมูโนลินในการดึงแกนเดียว (Uniaxial Tension)	3
ภาพที่ 2-1	วงรอบฮิสเตอร์ซิส	12
ภาพที่ 3-1	ขั้นตอนทดสอบชนิดการดึงในแนวแกนเดียว	15
ภาพที่ 3-2	เครื่องทดสอบแรงดึงขณะทำการทดสอบ	15
ภาพที่ 3-3	ตัวอย่างความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นวิศวกรรมและความเครียดวิศวกรรมจากการทดสอบอย่างหนึ่งขึ้น	16
ภาพที่ 3-4	ผลการใช้วิธี Constant true young modulus with varying poisson's ratio ในการแทน Uniaxial Tensile data	16
ภาพที่ 3-5	ดูโรมิเตอร์ที่ใช้วัดค่าความแข็ง	19
ภาพที่ 3-6	ขั้นตอนทดสอบค่าความแข็งที่เป็นส่วนหนึ่งของล้อยางตัน	19
ภาพที่ 3-7	การเปรียบเทียบผลการจำลองที่รับโหลดแบบเท่ากันในสองแนวแกนของยาง โดยใช้ค่าสัมประสิทธิ์ที่ได้จากวิธีการทดสอบแบบดึง	21
ภาพที่ 3-8	การเปรียบเทียบผลการจำลองที่รับโหลดแบบเท่ากันในสองแนวแกนของยาง โดยใช้ค่าสัมประสิทธิ์ที่ได้จากวิธีการทดสอบความแข็ง	21
ภาพที่ 3-9	การเปรียบเทียบผลการจำลองแบบดึงในแนวแกนเดียวของยาง โดยใช้ค่าสัมประสิทธิ์ที่ได้จากวิธีการทดสอบความแข็ง	22
ภาพที่ 3-10	การเปรียบเทียบผลการจำลองแบบดึงแบบความกว้างคงที่ (planar test) ของยาง โดยใช้ค่าสัมประสิทธิ์ที่ได้จากวิธีการทดสอบความแข็ง	22
ภาพที่ 3-11	การเปรียบเทียบผลการจำลองแบบดึงเท่ากันในสองแนวแกนของยาง โดยใช้ค่าสัมประสิทธิ์ที่ได้จากวิธีการทดสอบความแข็ง	23
ภาพที่ 4-1	ล้อยางตันที่ทำการทดสอบ	24
ภาพที่ 4-2	ภาพจำลองเครื่องทดสอบการกดอัดล้อยางตัน	25
ภาพที่ 4-3	ตำแหน่งที่วัดค่าการเคลื่อนตัวของล้อยางตัน	26
ภาพที่ 4-4	ล้อยางตันในตำแหน่งที่สัมผัสกับแผ่นระนาบสัมผัส	26
ภาพที่ 5-1	ภาพแสดงครึ่งหนึ่งของหน้าตัดล้อยางตันที่แสดงองค์ประกอบภายในล้อยางตัน	28
ภาพที่ 5-2	แบบจำลองของล้อยางตันที่นำมาวิเคราะห์	29
ภาพที่ 5-3	เงื่อนไขขอบเขตของแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์	31
ภาพที่ 5-4	เงื่อนไขการสัมผัสและการบังคับ	32
ภาพที่ 5-5	โซลิดเอลิเมนต์ที่เหมาะสมกับปัญหาสามมิติ	33

## สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
ภาพที่ 5-6	ปัญหาการบิดตัวที่เกิดกับโซลิตเอลิเมนต์	34
ภาพที่ 5-7	หน้าตัดล้อย่างตันที่เมซด้วยเอลิเมนต์แบบสี่เหลี่ยมจำนวน 1,412 เอลิเมนต์	36
ภาพที่ 5-8	แผนผังขั้นตอนการสร้างอินพุตไฟล์ของแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์	36
ภาพที่ 5-9	ตัวอย่างการกระจายตัวของพลังงานความเครียดจำเพาะภายในล้อย่างตัน	38
ภาพที่ 6-1	การเปรียบเทียบค่าการเคลื่อนตัวที่ได้จากการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ กับการทดสอบการกดอัดจริง	40
ภาพที่ 6-2	การกระจายตัวของความเครียดหลักต่ำสุด และ ความเครียดหลักสูงสุด	41
ภาพที่ 6-3	การกระจายตัวของความเค้น Von Mises (MPa) ภายในล้อย่างตัน	41
ภาพที่ 6-4	การกระจายตัวของพลังงานความเครียดจำเพาะ ( $\text{MJ/m}^3$ ) ภายในล้อย่างตัน	42
ภาพที่ 6-5	การกระจายตัวของพลังงานความเครียดจำเพาะตามแนวกึ่งกลาง (เส้นสมมาตร) ของล้อย่างตันตันแบบ	43
ภาพที่ 6-6	การกระจายตัวของพลังงานความเครียดจำเพาะ( $\text{MJ/m}^3$ ) ในล้อย่างตันในล้อย่างตันในกรณีล้อย่างตันประกอบด้วย M059 เพียงอย่างเดียว	44
ภาพที่ 6-7	การกระจายตัวของพลังงานความเครียดจำเพาะ( $\text{MJ/m}^3$ ) ในล้อย่างตันในล้อย่างตันในกรณีล้อย่างตันประกอบด้วยยางชนิด C559B และ M059 เท่านั้น	45
ภาพที่ 6-8	การกระจายตัวของพลังงานความเครียดจำเพาะตามแนวกึ่งกลางของล้อย่างตันเปรียบเทียบกันระหว่าง ยางตันตันแบบ ยางตันในกรณี 6.2.1a และ ยางตันในกรณี 6.2.1b	46
ภาพที่ 6-9	การกระจายตัวของพลังงานความเครียดจำเพาะตามแนวกึ่งกลางของล้อย่างตัน ในกรณีที่เพิ่มค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นที่ละชนิดชนิด	48
ภาพที่ 6-10	การกระจายตัวของพลังงานความเครียดจำเพาะตามแนวกึ่งกลางของล้อย่างตัน ในกรณีที่ลดค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นเพียงหนึ่งชนิด	49

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
ตารางที่ 3-1	17
ตารางที่ 3-2	18
ตารางที่ 3-3	19
ตารางที่ 5-1	37
ตารางที่ 6-1	47
ตารางที่ 6-2	48
ตารางที่ 6-3	51

## 1. บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของโครงการ

ยางพาราเป็นพืชเศรษฐกิจหลักที่ทำรายได้เข้าประเทศปีละกว่าแสนล้านบาท แต่ในยามที่ราคายางตกต่ำก็จะมีผลกระทบต่อเศรษฐกิจและสังคมของชุมชนชาวสวนยางพารา ดังนั้นจึงต้องสร้างความเข้มแข็งให้แก่อุตสาหกรรมยางพาราในประเทศ เพื่อนำไปสู่การพัฒนาตลอดจนการสร้างนวัตกรรมที่เกี่ยวข้องกับอุตสาหกรรมยางพารา และทำให้ประเทศไทยเป็นศูนย์กลางของอุตสาหกรรมยางที่ส่งผลิตภัณฑ์ที่มียางพาราเป็นวัตถุดิบออกจำหน่ายไปทั่วโลกเช่น ล้อยาง เป็นต้น ทั้งนี้การออกแบบทางวิศวกรรมของผลิตภัณฑ์ยางเพื่อใช้ในงานเชิงวิศวกรรมที่มีประสิทธิภาพ จะจะเป็นสิ่งที่ยังขาดแคลนมากในประเทศไทย การออกแบบผลิตภัณฑ์ให้สอดคล้องกับ Specification การใช้งานของผู้ใช้ จำเป็นต้องอาศัยนักออกแบบที่มีความรู้ในคุณสมบัติเชิงกล (mechanical properties) ของ ส่วนประกอบยาง (Rubber compound) ภายใต้ภาระงานหลายรูปแบบ (various loading conditions) และวิธีที่จะนำคุณสมบัติเชิงกลเหล่านั้นมาประยุกต์ใช้ (implement) กับระเบียบวิธีวิเคราะห์เชิงกลที่เหมาะสม (suitable stress-strain analysis method)

ล้อยางต้นจัดเป็นผลิตภัณฑ์เชิงวิศวกรรมที่ใช้ในอุตสาหกรรมมากเพราะว่าล้อยางต้นสามารถรับน้ำหนักได้มากและไม่มีการรั่วเหมือนยางลมจึงใช้มากสำหรับรถโพลีคลิฟท์ที่ใช้ในโรงงานอุตสาหกรรม ล้อยางต้นมีส่วนประกอบจากยางธรรมชาติกว่า 80% โดยล้อยางจากยางธรรมชาติมีข้อดีที่ได้รับการพิสูจน์แล้ว เช่น มีการต้านการวิ่งต่ำ (Low Rolling Resistance) และมีการอัตราการเกิดความร้อนสะสมต่ำ (Low Heat Generation) ประเทศไทยเป็นผู้ผลิตล้อยางต้นมากเป็นอันดับหนึ่งในอาเซียน โดย 80% ของล้อยางต้นที่ผลิตได้ถูกส่งออกไปจำหน่ายยังต่างประเทศซึ่งมีราคาจำหน่ายต่อน้ำหนักมากกว่ายางพาราดิบหลายเท่าตัว จึงนับว่าเป็นการสร้างมูลค่าเพิ่มให้กับสินค้ายางพาราและนำเงินตราเข้าประเทศไทย ทว่าปัจจุบันการแข่งขันในตลาดอุตสาหกรรมของล้อยางต้นมีมากขึ้น โดยเฉพาะการแข่งขันกับประเทศจีนซึ่งมีค่าแรงต่ำกว่าเรามากจึงได้เปรียบในเรื่องการทำราคาสินค้าให้ต่ำกว่าแม้ว่าเราจะได้เปรียบในเรื่องต้นทุนของวัตถุดิบ

ทั้งนี้การพัฒนาคุณภาพของสินค้าและการสร้างเทคโนโลยีที่เป็นของตนเอง จะทำให้ผลิตภัณฑ์มีจุดเด่นที่ชัดเจนและตอบสนองความต้องการของลูกค้าซึ่งมีแตกต่างกันได้อย่างตรงประเด็นและเป็นการเสริมสร้างศักยภาพการแข่งขัน (Competitiveness) ในตลาดโลก แต่ทว่าในประเทศไทยยังขาดองค์ความรู้ในการพัฒนาผลิตภัณฑ์อย่างมีทฤษฎีและแบบแผน การพัฒนาที่ผ่านมาจึงเป็นแบบลองผิดลองถูกและประยุกต์แบบ design จากต่างประเทศ โดยไม่รู้ว่าสิ่งที่ได้ปรับเปลี่ยนนั้นจะทำให้คุณภาพของผลิตภัณฑ์เป็นอย่างไร ดีขึ้นหรือไม่ ดังนั้นการวิเคราะห์ทางกลของผลิตภัณฑ์อย่างมีทฤษฎีและแบบแผน ซึ่งจะเป็นพื้นฐานที่สำคัญที่สุดในนำมาซึ่งการพัฒนาคุณภาพของสินค้าอย่างมีประสิทธิภาพและการสร้างเทคโนโลยีที่เป็นของตนเองจึงเป็นสิ่งที่ต้องเร่งพัฒนาเป็นอย่างยิ่ง

ล้อยางต้นส่วนมากจะประกอบไปด้วยยางชั้นนอก ยางชั้นกลางและยางชั้นใน ซึ่งยางเหล่านี้ทำจากยางธรรมชาติผสมกับยางสังเคราะห์โดยมีการเติมสารอื่นๆเช่น ระบบสารทำให้ยางคงรูป (Vulcanization

system) ระบบสารป้องกันยางเสื่อม (Stabilizer system) ระบบสารตัวเติมเพิ่มความแข็งแรง (Filler system) นอกจากนี้แล้วในล้อยางตันยังมีแผ่นผ้าใบและเส้นลวดเหล็กเป็นส่วนประกอบเสริมเพื่อเพิ่มความแข็งแรงของล้อยางให้มากขึ้น

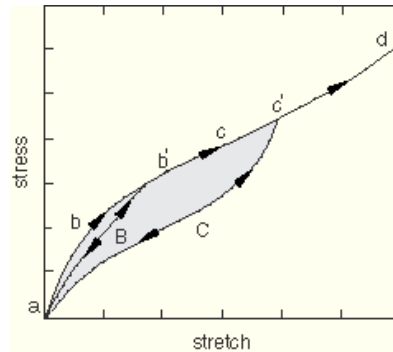
ในปัจจุบันอุตสาหกรรมการผลิตล้อยางตันในประเทศไทยยังไม่มีพื้นฐานของการออกแบบที่ดีและเหมาะสมกับสภาวะการใช้งานของผู้ใช้ การคาดคะเนพฤติกรรมของล้อยางตันขณะที่อยู่ภายใต้สภาวะที่รับโหลดเป็นสิ่งที่ไม่ง่ายเนื่องจากยางเป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติเชิงกลเป็นแบบไม่เชิงเส้น (Nonlinearity) อีกทั้งยังมีส่วนประกอบต่างๆที่มีคุณสมบัติเชิงกลต่างกันที่ใช้ในการผลิตยางตัน ดังนั้นเพื่อเป็นการพัฒนาล้อยางตันให้มีคุณภาพดียิ่งขึ้น จึงจำเป็นที่จะต้องเข้าใจถึงอิทธิพลขององค์ประกอบต่างๆที่อยู่ในล้อยางตัน ซึ่งมีผลต่อการกระจายตัวของความเค้นและความเครียดในล้อยางตัน และทำให้ทราบตำแหน่งที่จะเกิดความเสียหายในล้อยางตัน ซึ่งจะนำไปสู่การออกแบบรูปร่างทางเรขาคณิตขององค์ประกอบต่างๆในล้อยางตันและปรับปรุงคุณสมบัติเชิงกลของยาง เพื่อที่จะป้องกันไม่ให้เกิดความเสียหายขึ้นในล้อยางตัน

ในโครงการนี้ผู้วิจัยจะพิจารณาในกรณีที่ล้อยางตันอยู่ภายใต้สภาวะที่รับโหลดแบบสถิตย์ (Static Load) โดยงานวิจัยนี้เป็นการหาลักษณะการกระจายตัวของความเค้นและความเครียดที่เกิดขึ้นในล้อยางตันยางตันและการเสีรูปร่างของล้อยางตัน โดยจะศึกษาถึงอิทธิพลขององค์ประกอบต่างๆในล้อยางตันที่มีผลต่อการกระจายตัวของความเค้นและความเครียด เพื่อที่จะ นำไปออกแบบล้อยางตันให้มีคุณภาพ โดยงานวิจัยนี้จะทำการวิเคราะห์ปัญหาโดย ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Analysis , FEA) พร้อมทั้งเปรียบเทียบผลของการวิเคราะห์โดยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์กับการทดลองจริงโดยการวัดการเคลื่อนตัว (Displacement) ของล้อยางตัน สิ่งที่ได้จากการวิจัยนี้นอกจากจะทราบถึงอิทธิพลขององค์ประกอบต่างๆที่อยู่ในล้อยางตันซึ่งมีผลต่อการกระจายตัวของความเค้นและความเครียดแล้ว ยังจะได้แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของล้อยางตันเพื่อที่จะนำไปวิเคราะห์ปัญหาที่ซับซ้อนต่อไปเช่น ปัญหาที่ล้อยางตันรับโหลดแบบวงรอบ (Cycling Load)ซึ่งทำให้เกิดความร้อนขึ้นในเนื้อยาง ปัญหาของความเค้นที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ เป็นต้น

## **1.2 วัสดุยางในงานวิศวกรรม (Rubber in Engineering)**

ยางธรรมชาติถูกนำมาใช้ในงานวิศวกรรมมาแล้วไม่น้อยกว่า 150 ปี เนื่องจากยางธรรมชาติสามารถให้สมบัติบางประการที่ดีกว่ายางสังเคราะห์ [1] ได้แก่ ความแข็งแรงของยาง การเหนียวติดระหว่างการประกอบชิ้นส่วนต่างๆขณะทำการประกอบ ความทนต่อการฉีกขาด การระบายความร้อน แต่ยางธรรมชาติที่นำมาใช้ต้องผสมสารเพิ่มความแข็งแรงและผ่านกระบวนการวัลคาไนเซชัน (Vulcanization) เพื่อให้ยางคงรูปร่าง สารตัวเติมที่ใช้ผสมในยางธรรมชาติเพื่อเสริมแรง (Reinforcement) เช่น เพิ่มแรงดึง เพิ่มความทนต่อการสึก แบ่งออกเป็นสามกลุ่ม [1] คือ กลุ่มของผงคาร์บอนดำ กลุ่มของสารที่ไม่ใช่ผงคาร์บอนดำและกลุ่มของสารตัวเติมกลุ่มอื่นๆ ยางผสมคาร์บอนดำได้ถูกนำมาผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆมากมายโดยเฉพาะอย่างยิ่งยานพาหนะ อุปกรณ์รองรับเพื่อลดการสั่นสะเทือน เนื่องจากยางมีสมบัติความยืดหยุ่นสูง โดยพฤติกรรมเชิงกลของยางจะเป็นแบบยืดหยุ่นไม่เชิงเส้นและพบว่า เมื่อนำยางขึ้นทดสอบไปทดสอบโดยการดึงอย่างง่าย

แล้วปล่อยกลับสู่ตำแหน่งเดิมและดึงซ้ำครั้งต่อมาปรากฏว่า โหลดที่ใช้ดึงซ้ำครั้งต่อมามีค่าน้อยกว่าโหลดที่ใช้ดึงครั้งแรก (Stress Softening) ปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นเรียกว่า ผลของมุลลิน (Mullin Effect) ซึ่งทำให้ยางอ่อนลง ดังแสดงในภาพที่ 1-1 นอกจากนี้ยังพบว่าเมื่อยางรับโหลดแบบวงรอบจะมีการผลิตความร้อนขึ้นในเนื้อยาง (Heat Generate) อันเนื่องมาจากความเค้นและความเครียดที่เกิดขึ้นในเนื้อยาง



ภาพที่ 1-1 ผลของมุลลินในการดึงแกนเดียว (Uniaxial Tension)

### 1.3 ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method ,FEM)

ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เป็นระเบียบวิธีเชิงตัวเลข (Numerical Method) อีกวิธีหนึ่ง ซึ่งใช้หาผลเฉลยโดยประมาณ (Approximate Solution) ของปัญหาทางด้านวิศวกรรมศาสตร์และวิทยาศาสตร์ โดยปัญหาเหล่านี้อาจอธิบายอยู่ในรูปแบบของสมการเชิงอนุพันธ์ (Differential Equation) หรืออยู่ในรูปแบบของสมการอินทิกรัล (Integral Equation) เป็นต้น ซึ่งผลเฉลย แม่นตรง (Exact Solution) ของปัญหาเหล่านี้หาได้ยากหรืออาจหาไม่ได้เลย หลักการของระเบียบวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ในขั้นต้น เริ่มจากการแบ่งรูปร่างของปัญหาออกเป็นพื้นที่หลายๆพื้นที่หรือเป็นปริมาตรหลายๆปริมาตรอย่างต่อเนื่อง ซึ่งจะเรียกว่าเอลิเมนต์ ผลเฉลยที่ได้รับ จะเป็นผลเฉลยที่จุดต่อ (Node) ของแต่ละเอลิเมนต์ โดยผลเฉลยของแต่ละเอลิเมนต์ต้องสอดคล้องกับสมการเชิงอนุพันธ์และเงื่อนไขขอบเขตที่กำหนดมาให้ ซึ่งก็หมายความว่า หลักการของระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จะเริ่มต้นจากการพิจารณาเอลิเมนต์ทีละเอลิเมนต์และทำการสร้างสมการสำหรับเอลิเมนต์แต่ละเอลิเมนต์ โดยสมการที่สร้างขึ้นมาต้องสอดคล้องกับสมการเชิงอนุพันธ์ที่อธิบายปัญหาเหล่านั้น จากนั้นนำสมการของแต่ละเอลิเมนต์มาประกอบรวมกัน ก่อให้เกิดระบบสมการรวม ซึ่งในความหมายทางกายภาพก็คล้ายกับการนำทุกเอลิเมนต์มาประกอบรวมกันก่อให้เกิดเป็นรูปร่างของปัญหาที่จะทำการวิเคราะห์ โดยสมการไฟไนต์เอลิเมนต์ที่สร้างขึ้นมาจะเป็นระบบสมการพีชคณิต จากนั้นทำการกำหนดเงื่อนไขขอบเขตลงไปในระบบสมการรวม แล้วจึงทำการแก้ระบบสมการดังกล่าว ก่อให้เกิดผลเฉลยโดยประมาณที่ต้องการ ที่ตำแหน่งต่างๆของปัญหานั้นๆ ผลเฉลยที่ได้จากระเบียบวิธีนี้จะถูกต้องมากขึ้นเพียงใดจะขึ้นอยู่กับสามประการหลัก [2][3] ประการแรก การกำหนดรูปร่างของเอลิเมนต์ให้ใกล้เคียงกับลักษณะรูปร่างจริงของชิ้นงานได้มากขึ้นเพียงใด ประการที่สอง การประมาณพฤติกรรมของเอลิเมนต์ได้ถูกต้องตามสภาพที่แท้จริงหรือไม่ และประการที่สามคือ ความละเอียดในการคำนวณตัวเลขที่มีค่าน้อยๆของเครื่องคอมพิวเตอร์



#### **1.4 หลักการออกแบบล้อยางตัน (Concept Design of Solid Tyre)**

ในการออกแบบล้อยางจะเน้นในเรื่องของความปลอดภัยและความทนทานของล้อยางเนื่องจากล้อยางเป็นผลิตภัณฑ์ที่เกี่ยวข้องกับชีวิตและทรัพย์สินของมนุษย์ หน้าที่สำคัญของล้อยางโดยทั่วไปจะประกอบด้วย [1]

1. สามารถรับน้ำหนักได้
2. รับแรงกระแทกได้และมีความยืดหยุ่น
3. รับแรงขับเคลื่อนและแรงเบรกได้
4. รองรับแรงเหวี่ยงจากการเลี้ยวหักมุมได้
5. รักษาขนาดไว้ได้
6. ทนต่อการสึกหรอ
7. มีความต้านทานการหมุนของล้อต่ำ
8. มีเสียงและการสั่นสะเทือนน้อย
9. มีความทนทานตามระยะเวลาที่คาดการณ์
10. สนองตอบการหมุนของพวงมาลัย

ดังนั้นในการออกแบบล้อยางสิ่งที่จะต้องคำนึงถึง คือ

1. สมบัติทางกลของล้อยาง อันได้แก่ การรับน้ำหนัก การหักเหี้ยว การหยุดนิ่งและเกาะถนน การต้านทานการหมุนของล้อซึ่งจะช่วยประหยัดน้ำมัน
2. ความทนทานต่อการใช้งาน อันได้แก่ การสึกหรอของดอกยาง การทนทานต่อการล้าตัวของโครงยาง การสะสมความร้อนขณะขับเคลื่อน ความทนทานของส่วนดอกยางและแก้มยางต่อการฉีกขาด การร่อนหลุด และการถูกของมีคมตัด

ดังนั้นข้อพิจารณาในการออกแบบล้อยางเพื่อให้ได้คุณสมบัติดังที่กล่าวมาจะประกอบด้วย 2 องค์ประกอบ กล่าวคือ การพิจารณาลักษณะรูปร่าง (Geometry) ของล้อยาง และการพิจารณาคุณสมบัติเชิงกลของยางที่เป็นองค์ประกอบในล้อยางตัน

#### **1.5 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง**

Zheng และคณะ [4] ได้ศึกษาถึงการกระจายตัวของความเค้น ความเครียดและอุณหภูมิของล้อยางตันในสถานะคงตัว (Steady State) โดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ซึ่งล้อยางตันที่นำมาวิเคราะห์มีหน้าตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าอย่างง่าย และล้อยางตันเป็นผลิตภัณฑ์ที่ทำมาจากโพลียูรีเทน (PUE) โดยกำหนดให้โพลียูรีเทนมีคุณสมบัติเชิงกลเป็นไปตามแบบจำลองวัสดุของมูนีรีฟลิน (Mooney Rivlin) โดยการวิเคราะห์ปัญหาในส่วนของความเค้นและความเครียดนั้นจะพิจารณาเป็นปัญหาสามมิติ ในส่วนของอุณหภูมิจะพิจารณาเป็นปัญหาสองมิติ ซึ่งกำหนดให้ความร้อนที่เกิดขึ้นในเนื้อยางเป็นฟังก์ชันของความเร็ว ความเค้น และความเครียด ผลจากการวิเคราะห์พบว่า ในส่วนของคุณสมบัติเชิงกลนั้น

ปรากฏว่าความเค้นสูงสุดที่เกิดขึ้นในล้อยางต้นมีค่าน้อยกว่าความเค้นวิกฤตของโพลียูรีเทนและขึ้นอยู่กับความหนาในแนวรัศมีของล้อ และขนาดของโหลดที่กระทำกับล้อยางต้น ในส่วนของอุณหภูมิปรากฏว่าอุณหภูมิที่กระจายในล้อยางต้นนั้นจะขึ้นอยู่กับความเร็วและความหนาในแนวรัศมีของล้อยางต้น

Yu Libiao และคณะ [5] ได้ศึกษาปัญหาของการสัมผัสกันระหว่างล้อยางต้นกับพื้นถนนโดยจะพิจารณาในสภาวะที่รับโหลดแบบสถิตย์และโหลดแบบวงรอบด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ซึ่งมีพารามิเตอร์ที่น่าสนใจคือ ความเค้นตึงจากกับผิวสัมผัส (Contact Pressure) ความเค้นวอนมิส (Von-Mise-Stress) ความเค้นเฉือนที่ผิวสัมผัส (Shear Stress) ในการศึกษาครั้งนี้จะทำการเปรียบเทียบค่าความเค้นบริเวณที่สัมผัสกับพื้น ระหว่างล้อยางต้นที่ใช้ โพลียูรีเทนเป็นวัสดุกับล้อยางต้นที่ใช้ยางเป็นวัสดุ โดยกำหนดให้โพลียูรีเทนและยางมีคุณสมบัติเชิงกลเป็นไปตามแบบจำลองวัสดุของมุนนี่รีฟลิน และพิจารณาปัญหาเป็นแบบสามมิติ ในการพิจารณาปัญหาเกี่ยวกับการสัมผัสจะใช้วิธี Lagrangian Multiplier และ Symmetric Penalty Function ผลจากการวิเคราะห์ปรากฏว่า ความเค้นต่างๆที่เกิดขึ้นในบริเวณผิวสัมผัสของล้อยางต้นที่ทำจากยางจะมีค่าน้อยกว่าความเค้นที่เกิดขึ้นกับล้อยางต้นที่ทำจากโพลียูรีเทนทั้งในสภาวะที่รับโหลดแบบสถิตย์และโหลดแบบวงรอบ เพราะว่าพื้นที่ผิวสัมผัสของล้อที่ทำจากยาง มีค่ามากกว่าพื้นที่ผิวสัมผัสของล้อยางต้นที่ทำจากโพลียูรีเทน (ยางมีการเสียรูป(Deformation) มากกว่าโพลียูรีเทน)

ในงานวิจัยของ Harwood [6] เป็นการหาลักษณะการกระจายตัวของความเค้น ความเครียด และความร้อนที่เกิดขึ้นในล้อยางต้น โดยในส่วนของหาค่าความเค้นและความเครียดจะพิจารณาให้ล้อยางอยู่ในสภาวะที่รับโหลดแบบสถิตย์ โดยตั้งสมมุติฐานว่ายางเป็นวัสดุประเภท ไฮเปอร์อีลาสติก (Hyperelastic) และใช้แบบจำลองวัสดุเป็นแบบจำลองพหุนามอันดับที่ 2 ในการหาข้อมูลการทดสอบวัสดุ จะใช้วิธีการอัตราส่วนปัวซองผันแปร (Varying Poisson's Ratio Method) [7] เพื่อหาข้อมูลของการทดสอบแบบดึงในแนวแกนเดียว และการทดสอบแบบดึงเท่ากันในสองแนวแกน (Equibiaxial Test) และ การทดสอบดึงแบบความกว้างคงที่ (Shear Test) การวิจัยนี้จะสนใจล้อยางต้นแบบ Air Boss และล้อยางมีส่วนประกอบเพียงชนิดเดียวคือ ยาง ผลการวิเคราะห์ปรากฏว่า ค่าของการเคลื่อนตัวที่ได้จากการวิเคราะห์โดยวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์มีความสอดคล้องกับผลของการเคลื่อนตัวที่ทดสอบได้จริง มีผลทำให้สามารถหาระบายตัวของความเค้นและความเครียดได้

จากงานวิจัยที่น่าเสนอมาข้างต้นพบว่าเป็นการหาการกระจายตัวของความเค้นและความเครียดของล้อยางต้นที่ทำจากวัสดุเพียงชนิดเดียว โดยไม่คำนึงถึงอิทธิพลของส่วนประกอบต่างๆที่อยู่ภายในล้อยางต้นเลย

## 1.6 วัตถุประสงค์

1. เพื่อทำการวิเคราะห์เชิงกลและศึกษาลักษณะการกระจายตัวของความเค้นและความเครียดในล้อยางต้น ภายใต้สภาวะที่รับภาระแบบกดที่เกิดจากน้ำหนักบรรทุก โดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

2. เพื่อศึกษาถึงอิทธิพลของส่วนประกอบต่างๆ ในล้อยางตัน ที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงลักษณะการกระจายตัวของความเค้นและความเครียดในล้อยางตัน
3. เพื่อเป็นพื้นฐานในการสร้าง Methodology ของการวิเคราะห์และออกแบบเชิงกลสำหรับล้อยางตันอย่างมีแบบแผน

### 1.7 สมมติฐานการวิจัย

1. พิจารณาให้ยางที่นำมาวิเคราะห์เป็นวัสดุที่เป็นเนื้อเดียวกัน (Homogeneous)
2. พิจารณาให้ยางที่นำมาวิเคราะห์เป็นวัสดุประเภทไฮเปอร์อีลาสติก มีคุณสมบัติไอโซโทรปิก (Isotropic) และเป็นวัสดุที่อัดตัวไม่ได้ (Incompressible Material)
3. ไม่คำนึงถึงอุณหภูมิที่เกิดขึ้นในล้อยางตัน
4. ไม่พิจารณาผลของมุลลิน (Mullin's effect) ของยางมาพิจารณา
5. พิจารณาให้องค์ประกอบต่างๆ ในล้อยางตันยึดติดกันโดยสนิทตลอดเวลา

### 1.8 ขอบเขตของการทำวิจัย

1. ศึกษาถึงลักษณะการกระจายตัวของความเค้นและความเครียดในล้อยางตัน ภายใต้สภาวะที่รับโหลดแบบสถิตย์ โดยพิจารณาโหลดที่เกิดจากน้ำหนักบรรทุก โดยการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (FEA)
2. ศึกษาถึงอิทธิพลขององค์ประกอบต่างๆ ในล้อยางตัน ซึ่งมีผลต่อการกระจายตัวของความเค้นและความเครียด โดยพิจารณาในปริมาตรและคุณสมบัติเชิงกล (Mechanical Properties) ขององค์ประกอบเหล่านั้น
3. นำผลของการเคลื่อนตัว (Displacement) ซึ่งเกิดขึ้นในล้อยางตันที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์มาเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการวัดค่าการเคลื่อนตัวของล้อยางตันจริงๆ
4. ในงานวิจัยนี้จะไม่คำนึงถึงอิทธิพลของดอกยางและความเสียดทานและสูตรทางเคมีขององค์ประกอบยาง

### 1.9 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้วิธีการสร้างแบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ของล้อยางตันภายใต้สภาวะที่รับโหลดแบบสถิตย์
2. ทำให้ทราบถึงลักษณะการกระจายตัวของความเค้นและความเครียดในล้อยางตัน ภายใต้สภาวะที่รับโหลดแบบสถิตย์
3. ทำให้ทราบถึงอิทธิพลขององค์ประกอบต่างๆ ในล้อยางตันที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงลักษณะการกระจายตัวของความเค้นและความเครียด เพื่อใช้เป็นแนวทางในการพัฒนาคุณภาพของผลิตภัณฑ์ล้อยางตัน

4. ทำให้สามารถทำนายลักษณะการเสียรูปที่เกิดขึ้นในล้อยางตันภายใต้สภาวะที่รับโหลดแบบสถิตย์

### 1.10 วิธีการดำเนินการวิจัย

9. ศึกษาค้นคว้าเพื่อทำความเข้าใจขั้นพื้นฐานเกี่ยวกับพฤติกรรมและคุณสมบัติจำเพาะของยางและส่วนประกอบอื่นๆในล้อยางตัน รวมทั้งความสัมพันธ์ของความเค้นและความเครียด สมการพื้นฐานต่างๆและสมการควบคุม(Governing Equation)
10. ศึกษาการสร้างแบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ ของล้อยางตัน โดยใช้โปรแกรม Abaqus
11. สร้างแบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ของล้อยางตัน
12. ทำการทดสอบวัสดุยางที่ใช้เป็นส่วนประกอบในล้อยางตันทั้งหมด 3 ชนิด (Compound) ที่นำมาทำเป็นยางชั้นนอก ยางชั้นกลาง และยางชั้นใน โดยใช้การทดสอบแบบดึงยึดด้วยเครื่องทดสอบที่ภาควิศวกรรมเครื่องกล สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ เพื่อนำไปหาค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองไฮเปอร์อีลาสติก
13. คำนวณหาการกระจายของความเค้น , ความเครียด และ การเปลี่ยนรูปของล้อยางตันภายใต้สภาวะที่รับโหลดแบบสถิตย์ในแนวตั้ง
14. เปรียบเทียบผลของการเปลี่ยนรูปที่ได้จากการวิเคราะห์โดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์กับผลที่ได้จากการวัดค่าระยะการยุบตัวของล้อเนื่องจากการรับโหลดแบบสถิตย์ในแนวตั้งของล้อยางตันที่ผลิตแล้วจริงหนึ่ง แบบซึ่งเป็นแบบล้อยางตันสำหรับรถ Forklift มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของล้อ 52.4 cm ใช้รับน้ำหนักต่อล้อได้สูงสุด 14.5 kN ทั้งนี้ขนาดของล้อยางตันจะขึ้นอยู่กับภาระน้ำหนักต่อล้อสูงสุด (Load Capacity) โดยการทดสอบวัดค่าจริงจะไปทำที่บริษัทผู้ผลิตยางตัน บริษัทหนึ่งในประเทศไทย ซึ่งมีเครื่องทดสอบการรับน้ำหนักของล้อยางโดยใช้ระบบไฮดรอลิก การวัดระยะยุบตัวและการเปลี่ยนรูปทรงของล้อยางตันที่ตำแหน่งต่างๆจะทำโดยการใช้ Dial Gauge โดยจะต้องมีสร้างอุปกรณ์ที่จับยึดและที่วาง Dial Gauge ที่เหมาะสม  
 ทั้งนี้แบบล้อยางตันสำหรับรถ Forklift ที่ใช้ในการศึกษานี้เป็นแบบที่ใช้ค่อนข้างแพร่หลายและล้อยางตันชนิดอื่นก็จะมีส่วนประกอบพื้นฐานใกล้เคียงกับล้อยางตันที่ใช้ศึกษานี้ อีกทั้งการใช้ Methodology ในการวิเคราะห์ความเค้นความเครียดโดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ข้างต้นจะสามารถประยุกต์ใช้ได้กับการวิเคราะห์ล้อยางตันได้ทุกแบบ
15. วิเคราะห์ความสัมพันธ์ของการกระจายตัวของความเค้น, ความเครียดในล้อยางตันและการเปลี่ยนรูปร่างของล้อยางตันกับการเปลี่ยนแปลงส่วนประกอบต่างๆ เช่นการเพิ่มปริมาตรหรือลดปริมาตรของยางแต่ละชั้น
16. สรุปผล

## 2. กลศาสตร์ของวัสดุในลักษณะ

การวิเคราะห์ปัญหาต่างๆทางวิศวกรรมเช่น ปัญหาทางด้านกลศาสตร์ของแข็ง ปัญหาทางด้านการไหล หรือปัญหาในศาสตร์อื่นๆ ผลลัพธ์ที่เกิดขึ้นจากการวิเคราะห์ปัญหาเหล่านี้ขึ้นอยู่กับปัจจัยหรือองค์ประกอบใหญ่ๆ 3 องค์ประกอบ กล่าวคือ ระบบสมการเชิงอนุพันธ์ย่อย(Partial Differential Equation) ที่อธิบายความเป็นจริงของปัญหา เงื่อนไขขอบเขต (Boundary Conditions) สำหรับปัญหาที่ทำกรวิเคราะห์ และลักษณะรูปร่างของปัญหานั้น [8] สำหรับจุดมุ่งหมายของงานวิจัยนี้คือการศึกษาลักษณะการกระจายตัวของความเค้นและความเครียดที่เกิดขึ้นภายในวัสดุของตัวอย่าง ดังนั้นต้องทำความเข้าใจสมการควบคุมพื้นฐาน (Governing Equations) ที่อธิบายการเคลื่อนที่ของก้อนวัตถุ [9] กล่าวคือ

1. สถานะของความเค้น ที่ตำแหน่งใดๆในก้อนวัตถุ เพราะต้องนำมาพิจารณาความเสียหายที่จะเกิดขึ้นกับก้อนวัตถุนั้น

2. ระบบสมการเชิงอนุพันธ์ที่อธิบายความเป็นจริงของปัญหาที่วิเคราะห์ โดยงานวิจัยนี้จะเป็นการวิเคราะห์ปัญหาทางสถิตยศาสตร์ ดังนั้นระบบสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยที่ใช้อธิบายความเป็นจริงของปัญหานี้คือ ระบบสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยที่อธิบายความสมดุลของแรงใน

3. ทิศทางซึ่งจำเป็นต้องถูกต้องอยู่เสมอไม่ว่าจะเป็นที่ตำแหน่งใดๆในปัญหานั้น [8]

4. จลนพลศาสตร์ของวัตถุเป็นการศึกษาการเคลื่อนที่และการเสียรูปของวัตถุโดยไม่คำนึงถึงแรงที่กระทำกับวัตถุ ทำให้ได้สมการที่อธิบายความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดกับการเคลื่อนตัวของวัตถุ

5. สมการความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของวัสดุ ในงานวิจัยนี้ตัวอย่างนี้มีวัสดุเป็นองค์ประกอบ 2 ชนิดคือ วัสดุยางและลวดเหล็ก โดยความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของวัสดุยางเป็นแบบไฮเปอร์อีลาสติก ในขณะที่ลวดเหล็กมีความสัมพันธ์เป็นแบบเชิงเส้น

### 2.1 คุณสมบัติไฮเปอร์อีลาสติกของวัสดุยาง

โดยทั่วไปวัสดุยางที่นำมาใช้ในงานเชิงวิศวกรรมเช่นยางรถยนต์จะมีพฤติกรรมยืดหยุ่นแบบไม่เชิงเส้น ซึ่งส่วนมากแล้วพฤติกรรมดังกล่าวมักจะถูกนำเสนอในรูปแบบของฟังก์ชันพลังงานความเครียด (Strain energy function) จากการศึกษาพฤติกรรมของวัสดุประเภทยางส่วนมากแล้วจะสมมติให้วัสดุเป็นแบบไอโซโทรปิก (Isotropic Material) และวัสดุเป็นแบบอัดตัวไม่ได้ (Incompressible Material)

ตามข้อสมมุติดังกล่าวจะสามารถเขียนเทนเซอร์ของความเค้นหลักคือ  $\sigma_i$  (Cauchy Principle Stress Tensor) ในเทอมของฟังก์ชันพลังงานความเครียดต่อหน่วยปริมาตรซึ่งเป็นฟังก์ชันกับอัตราการยืดหลัก  $\lambda_i$  (Principal Extension Ratio) ได้ดังนี้ [9]

$$\sigma_i = \lambda_i \frac{\partial W}{\partial \lambda_i} + p, \quad i = 1 \dots 3 \quad (1)$$

$p$  เป็นค่าความดันไฮโดรสแตติก (Hydrostatic Pressure) ซึ่งหาค่าได้จากเงื่อนไขค่าขอบเขต (Boundary Condition) ถ้าเขียนสมการพลังงานความเครียดอยู่ในรูปของ Strain invariant  $W = W(I_1, I_2, I_3)$  โดยจากการสมมุติฐานวัสดุแบบอัดตัวไม่ได้  $I_3 = \lambda_1 \lambda_2 \lambda_3 = 1$  จะสามารถเขียนแทนเซอร์ความเค้นได้ดังนี้

$$\sigma_i = \lambda_i \left[ \frac{\partial W}{\partial I_1} \frac{\partial I_1}{\partial \lambda_i} + \frac{\partial W}{\partial I_2} \frac{\partial I_2}{\partial \lambda_i} \right] + p, \quad i=1 \dots 3 \quad (2)$$

โดยความเค้นวิศวกรรม (Engineering Stress) สามารถเขียนได้ดังนี้

$$f_i = \frac{1}{\lambda_i} \sigma_i \quad i=1 \dots 3 \quad (3)$$

โดยที่  $I_1 = \lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2 \quad (4)$

$$I_2 = \lambda_1^2 \lambda_2^2 + \lambda_2^2 \lambda_3^2 + \lambda_3^2 \lambda_1^2 \quad (5)$$

$$I_3 = \lambda_1^2 \lambda_2^2 \lambda_3^2 \quad (6)$$

สมการพลังงานความเครียด  $W$  สามารถแบ่งออกได้สองกลุ่มคือแบบจำลองที่แทนพฤติกรรมกลศาสตร์ (Phenomenological Model) เป็นแบบจำลองที่พัฒนามาจากความสัมพันธ์ของความเค้นกับการเปลี่ยนรูปโดยไม่สนใจพฤติกรรมโครงสร้าง และแบบจำลองแทนกายภาพ (Physical based Model) เป็นการพัฒนาจากกลไกโครงสร้างจุลภาค แบบจำลองที่แทนพฤติกรรมกายภาพ (Physical based Model) เช่น [10] แบบจำลองนีโอฮุกเกียน (Neo-Hookean Model)

$$W = C_{10}(\lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2 - 3) \quad (7)$$

แบบจำลองของอรรูดาบอยซ์ (Arruda-Boyce Model)

$$W = \mu \sum_{i=1}^5 \frac{C_i}{\lambda_m^{2i-2}} (I_1^i - 3^i) \quad (8)$$

เมื่อ  $C_1 = \frac{1}{2}$   $C_2 = \frac{1}{20}$   $C_3 = \frac{11}{1050}$   $C_4 = \frac{19}{7050}$   $C_5 = \frac{519}{673750}$

เมื่อ  $\mu$  คือ Initial Shear Modulus,  $\lambda_m$  คือ Locking stretch

แบบจำลองของวานเดอร์วาลส์ (Van der Waals Model)

$$W = \mu \left\{ -(\lambda_m^2 - 3) [\ln(1 - \eta) \eta] - \frac{2}{3} a \left( \frac{\tilde{I} - 3}{2} \right)^{\frac{3}{2}} \right\} \quad (9)$$

$$\tilde{I} = (1 - \beta) I_1 + \beta I_2 \quad \eta = \sqrt{\frac{\tilde{I} - 3}{\lambda_m^2 - 3}}$$

เมื่อ  $\mu$  คือ Initial Shear Modulus,  $\lambda_m$  คือ Locking stretch,  $a$  คือ Global interaction parameter

แบบจำลองที่แทนพฤติกรรมการสังเกต (Phenomenological Based Model) เช่น

แบบจำลองพหุนาม (Polynomial Model )

$$W = \sum_{i+j=1}^n C_{ij} (I_1 - 3)^i (I_2 - 3)^j \quad (10)$$

แบบจำลองของมูลนีรีฟลิน (Mooney-Rivlin Model)

$$W = C_{10} (I_1 - 3) + C_{01} (I_2 - 3) \quad (11)$$

แบบจำลองของโยห์ (Yeoh Model)

$$W = C_{10} (I_1 - 3) + C_{20} (I_1 - 3)^2 + C_{30} (I_1 - 3)^3 \quad (12)$$

แบบจำลองของอ็อกเดน (Ogden Model)

$$W = \sum_{i=1}^n \frac{2\mu_i}{\alpha_i^2} (\lambda_1^{\alpha_i} + \lambda_2^{\alpha_i} + \lambda_3^{\alpha_i} - 3) \quad (13)$$

เมื่อ  $\mu_i$  และ  $\alpha_i$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์ของวัสดุ (Materials parameters)

ทั้งนี้ค่าพลังงานความเครียด (Strain energy) ยังสามารถเป็นตัวบ่งชี้ถึงความเป็นไปได้ที่จะเกิดความเสียหายขึ้นในวัสดุยาง ถ้าจุดใดมีค่าพลังงานความเครียดมากแสดงว่าจุดนั้นมีความเค้นและความเครียดสูงซึ่งมีโอกาสที่จะเกิดความเสียหายได้ง่าย

## 2.2 คุณสมบัติของลวดเหล็ก

ในงานวิจัยนี้ได้จำลองลวดเหล็กให้เป็นวัสดุที่มีพฤติกรรมเชิงกลเป็นแบบยืดหยุ่นเชิงเส้น (Linear elasticity) และมีคุณสมบัติไอโซโทรปิก ดังนั้นความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดจะเขียนได้เป็น [11]

$$\sigma_{ij} = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \left[ \nu \delta_{ij} \varepsilon_{kk} + (1-2\nu) \varepsilon_{ij} \right] \quad (14)$$

เมื่อ

$E$  คือค่าโมดูลัสความยืดหยุ่น (Modulus of Elasticity)

$\nu$  คืออัตราส่วนปัวซอง (Poisson's Ratio)

$\delta_{ij}$  คือ Kronecker Delta

## 2.3 ความเค้นวอนมิส (Von Mises Stress)

ความเค้นวอนมิส (Von Mises Stress) นั้นสัมพันธ์กับพลังงานการเสียรูปร่าง (Distortion Energy Theory) [12] ที่เกี่ยวข้องกับพลังงานที่ใช้ในการเสียรูปร่าง (Change in Shape) และไม่คำนึงถึงการเปลี่ยนแปลงปริมาตร (Change in Volume)

ค่าความเค้นวอนมิสสำหรับความเค้นใน 3 มิติ หาได้ตามสมการที่ (15)

$$\sigma_v = \sqrt{[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_1)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]}/2 \quad (15)$$

เมื่อ

$\sigma_v$  คือความเค้นวอนมิตที่จุด ๆ หนึ่ง

$\sigma_1$  คือความเค้นหลักในแกนหลักที่ 1 ที่จุด ๆ หนึ่ง

$\sigma_2$  คือความเค้นหลักในแกนหลักที่ 2 ที่จุด ๆ หนึ่ง

$\sigma_3$  ความเค้นหลักในแกนหลักที่ 3 ที่จุด ๆ หนึ่ง

ทฤษฎีพลังงานเสียรูปสูงสุดมีแนวคิดที่ว่า การเสียหายของวัสดุที่จุด ๆ หนึ่งจะสัมพันธ์โดยตรงกับพลังงานความเครียดเสียรูป (Distortion Strain Energy) ต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรของวัสดุ ณ จุดนั้น ๆ [16] ซึ่งวัสดุยางโดยมากจะถือว่าเป็นวัสดุที่อัดตัวไม่ได้ (ไม่มีการเปลี่ยนแปลงปริมาตร มีแต่การเปลี่ยนแปลงรูปร่าง) ดังนั้นในการวิเคราะห์ความเค้นในล้อยางตัน ค่าความเค้นวอนมิตที่จุด ๆ หนึ่งจึงสามารถบ่งชี้ถึงพลังงานความเครียดเสียรูปว่าง ต่อหน่วยปริมาตรของวัสดุ ณ จุดนั้น ๆ

### 2.3 การเกิดความร้อนในวัสดุยาง (Heat Generation)

ปัญหาสำคัญที่พบในล้อยางตันคือ การเกิดความร้อนขึ้นภายในล้อยางตันขณะใช้งาน ส่งผลให้ความร้อนสะสมภายในล้อยางตันและเป็นสาเหตุที่ทำให้ล้อยางตันระเบิด ความร้อนที่เกิดขึ้นภายในวัสดุยาง เกิดจากการสูญเสียพลังงานภายในเนื้อวัสดุยางในระหว่างการเสียรูปเนื่องมาจากสมบัติความเป็นวิสโคอีลาสติก (Viscoelastic) ของวัสดุยาง การสูญเสียพลังงานสามารถคำนวณได้ในสภาวะที่วัสดุยางเกิดการเสียรูปภายใต้โหลดที่กระทำแบบวงรอบ (Cycling mode) จากภาพที่ 2-1 เส้นโค้ง EFGHA คือช่วงที่ความเครียดเพิ่มขึ้น พื้นที่ใต้เส้นโค้ง EFGHA กับแกน X คือพลังงานที่ให้กับวัสดุยาง (Input Energy) และเส้นโค้ง ABCDE คือช่วงที่ความเครียดลดลง พื้นที่ใต้เส้นโค้ง ABCDE กับแกน X คือพลังงานที่ย้อนกลับ (Energy Return) เนื่องจากสมบัติความเป็นวิสโคอีลาสติกทำให้พลังงานที่ย้อนกลับมีค่าไม่เท่ากับพลังงานที่ให้กับวัสดุยาง โดยพลังงานที่สูญเสียไปจะเปลี่ยนรูปเป็นความร้อน โดยปริมาณของพลังงานที่สูญเสียคือ พื้นที่ระหว่างเส้นโค้ง EFGHA กับเส้นโค้ง ABCDE ซึ่งจะเรียกวงรอบนี้ว่า วงรอบฮิสเทอรีซิส (Hysteresis Loop) การสูญเสียพลังงานในหนึ่งวงรอบของวัสดุที่จุด ๆ หนึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (16) [13]

$$\text{Energy loss} = \pi \sigma_0 \varepsilon_0 \sin \delta \quad (16)$$

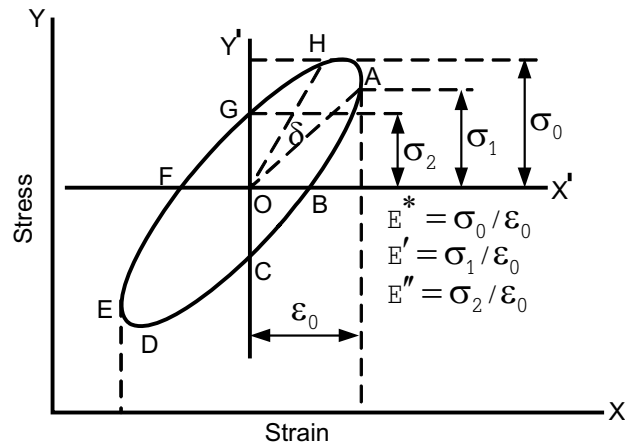
เมื่อ

$\sigma_0$  คือค่าความเค้นสูงสุดที่จุด ๆ หนึ่ง

$\varepsilon_0$  คือค่าความเครียดสูงสุดที่จุด ๆ หนึ่ง

$\delta$  คือมุมเฟสระหว่างความเค้นสูงสุดและความเครียดสูงสุด





ภาพที่ 2-1 วงรอบฮิสเทอรีซิส [13]

ในขณะที่ล้อยางต้นอยู่ภายใต้โหลดแบบวงรอบ (รถวิ่งอยู่) พบว่าขนาดของโหลดที่กระทำ (Amplitude) มีค่าคงที่ ดังนั้นการสูญเสียพลังงานในหนึ่งวงรอบของวัสดุยางที่จุดๆหนึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (17) [13]

$$\text{Energy loss} = \frac{\pi \sigma_0^2 \tan \delta}{E'} \quad (17)$$

เมื่อ

$\tan \delta$  คือค่าบ่งชี้การสูญเสียพลังงานภายในวัสดุยาง

$E'$  คือโมดูลัสสะสม (Storage Modulus) ของวัสดุยาง

จากสมการที่ (17) พบว่าการสูญเสียพลังงานจะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติทางพลศาสตร์ของวัสดุยาง (Dynamics Properties of Rubber) แต่ในขณะเดียวกันหากพิจารณาให้คุณสมบัติทางพลศาสตร์ของวัสดุยางคงที่ จะพบว่าการสูญเสียพลังงานจะขึ้นอยู่กับค่าความเค้นและค่าความเค้นสูงสุดที่เกิดขึ้น ณ จุดนั้นๆ ทั้งนี้ค่าความเค้นจะขึ้นอยู่กับค่าพลังงานความเครียด ดังนั้นการลดการสูญเสียพลังงานนอกจากจะพิจารณาคูณสมบัติทางพลศาสตร์ของวัสดุยางแล้วการลดค่าความเค้นและค่าพลังงานความเครียดก็เป็นอีกวิธีการหนึ่งในการลดการสูญเสียพลังงาน

### 3. การทดสอบและวิเคราะห์คุณสมบัติทางกลของวัสดุยาง

#### 3.1 วิธี Constant true Young's modulus with varying Poisson's ratio

โดยทั่วไปวัสดุยางที่นำมาใช้ในงานเชิงวิศวกรรมเช่นยางรถยนต์จะมีพฤติกรรมยืดหยุ่นแบบไม่เชิงเส้น ซึ่งส่วนมากแล้วพฤติกรรมดังกล่าวมักจะถูกนำเสนอในรูปแบบของฟังก์ชันพลังงานความเครียด (Strain energy function) ในซอฟต์แวร์ Finite element analysis เช่น ABAQUS มี Strain energy function อยู่ด้วยกันหลายแบบให้เลือกเช่น Neo Hookean, Ogden, Mooney-Rivlin, Arruda Boyce และ Van der Waal โดย ABAQUS สามารถที่จะกำหนดค่าคงที่ที่อยู่ใน Strain energy function ได้จากข้อมูลการทดสอบที่ป้อนลงไป โดยทั่วไปแล้วข้อมูลทดสอบที่สามารถหาได้สะดวกที่สุดคือ Uniaxial Tensile Test Data (การดึงในแนวแกนเดียว) แต่ทั้งนี้การป้อนข้อมูลทดสอบจาก Uniaxial Tensile Test Data อย่างเดียวเพื่อหาค่าคงที่ที่อยู่ใน Strain energy function นั้นไม่สามารถที่จะแน่ใจได้ว่า ค่าคงที่เหล่านั้นจะเพียงพอสำหรับการอธิบายพฤติกรรมการเปลี่ยนรูปในหลายแกนของวัสดุยางได้ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการทดสอบวัสดุแบบอื่นๆ เช่น Pure Shear (planar) หรือ Biaxial tests ด้วย แต่ทว่าการทดสอบดังกล่าวจะต้องมีการใช้อุปกรณ์เสริมเพิ่มเติมและมีความยุ่งยากในการทำการทดลอง ดังนั้นจึงมีวิธีที่เรียกว่า “ Constant true young modulus with varying poisson's ratio” ซึ่งถูกคิดค้นโดย Turner และ Brennen [7] โดยวิธีนี้จะสามารถสร้างข้อมูลการทดสอบ Pure Shear และ Equibiaxial tensile Data ได้จาก Uniaxial Tensile test data ซึ่งวิธีดังกล่าวมีรายละเอียดพอสังเขปดังนี้

ในความเป็นจริงในการดึงแกนเดียวความสัมพันธ์ระหว่าง True stress และ Engineering Stress ความเป็นเชิงเส้นจนถึง Engineering Strain ประมาณ 100% ซึ่งใน Range นี้ความสัมพันธ์ของ True stress ( $\sigma_i$ ) และ Engineering Strain ( $\varepsilon_i$ ) สามารถแสดงได้ดังนี้

$$\varepsilon_1 = \lambda_1 - 1 = \frac{1}{E}((\sigma_1 - \sigma_3) - \nu(\sigma_2 - \sigma_3)) \quad (18)$$

$$\varepsilon_2 = \lambda_2 - 1 = \frac{1}{E}((\sigma_2 - \sigma_3) - \nu(\sigma_1 - \sigma_3)) \quad (19)$$

$$\varepsilon_3 = \lambda_3 - 1 = \frac{1}{E}(-\nu((\sigma_1 - \sigma_3) + (\sigma_2 - \sigma_3))) \quad (20)$$

โดย  $\lambda_i$  คือ Extension Ratio (Stretch) และ  $\sigma_i = t_i \lambda_i$  ;  $t_i$  คือ Engineering Stress

ในวิธีนี้สมมติให้ยางเป็น Incompressible Material ในความสัมพันธ์ข้างต้น Hydrostatic pressure จะไม่มีผลกระทบกับการเสียรูปไม่ว่าค่า Poisson's Ratio  $\nu$  จะมีค่าเท่าใด สมการข้างต้นสามารถจัดรูปใหม่ได้เป็น

$$\sigma_1 = \frac{E(\lambda_1 - 1 + \nu(\lambda_2 - 1))}{(1 - \nu^2) + \sigma_3} \quad (21)$$

$$\sigma_2 = \frac{E(\lambda_2 - 1 + \nu(\lambda_1 - 1))}{(1 - \nu^2) + \sigma_3} \quad (22)$$

$$\nu = \frac{(\lambda_1 \lambda_2 - 1)}{(\lambda_1 \lambda_2 (\lambda_1 + \lambda_2 - 1) - 1)} \quad (23)$$

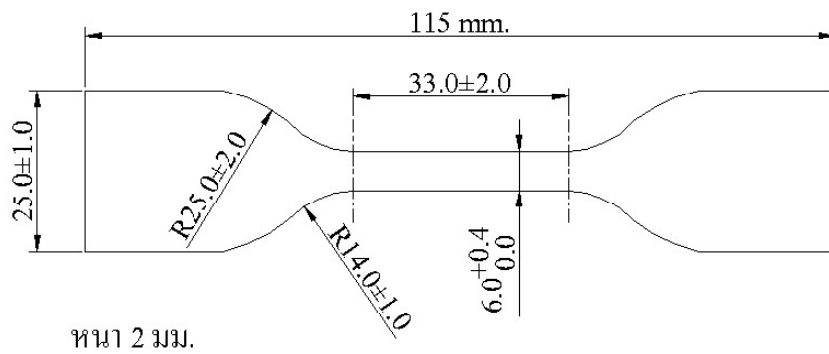
สำหรับการทำ Uniaxial tension ( $\lambda_2 = \lambda_3$ ) Pure shear ( $\lambda_2 = 1$ ) และ Equibiaxial tensile Test ( $\lambda_2 = \lambda_3$ ) นั้น  $\sigma_3 = 0$  โดยค่า  $E$  เป็นค่า True stress Young's modulus สามารถหาได้โดยใช้ระเบียบวิธีการถดถอยกำลังสองน้อยที่สุด (Linear Regression) จาก Graph ของ

$\sigma_1$  vs.  $\frac{(\lambda_1 - 1 + \nu(\lambda_2 - 1))}{(1 - \nu^2)}$  ที่ได้จากการทดลอง Uniaxial Tensile Test.

ในการหาค่าสัมประสิทธิ์ของแบบจำลองฟังก์ชันพลังงานความเครียดเพื่อเลือกใช้แบบจำลองที่สามารถจำลองพฤติกรรมของยางได้สอดคล้องกับพฤติกรรมจริงของยางนั้นต้องใช้ข้อมูลการทดสอบวัสดุสามลักษณะ คือ การทดสอบวัสดุแบบการดึงในแนวแกนเดียว การทดสอบแบบการดึงเท่ากันในสองแนวแกนและการทดสอบแบบการดึงแบบความกว้างคงที่ แต่เนื่องจากการยึดตัวของล้อยางต้นยางต้นที่นำมาวิเคราะห์ในงานวิจัยมีการยึดตัวน้อย ( $\lambda \leq 1.8$ ) ดังนั้นจึงสามารถประยุกต์วิธีการอัตราส่วนปัวซอง ของ Turner และ Brennan เพื่อทำนายข้อมูลของการทดสอบยางทั้งสามลักษณะ จากวิธีการอัตราส่วนปัวซองจะพบว่าพารามิเตอร์ที่ต้องหาจากการทดสอบยางคือค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของยาง ( $E$ ) ซึ่งหาได้โดยการทดสอบยางแบบ การดึงในแนวแกนเดียว นอกจากนี้ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของยาง ( $E$ ) ก็สามารถหาได้โดยการทดสอบค่าความแข็ง (Hardness Test) ของยาง

### 3.2 การทดสอบยางแบบการดึงในแนวแกนเดียว

สำหรับการศึกษานี้ในการทำการทดสอบ Uniaxial Tensile Test ได้ ในงานวิจัยนี้ได้ทำการทดสอบดึงยางเติมผงคาร์บอนดำ 3 ชนิด ที่ใช้รหัสว่า M049 , M059 และ C559B ซึ่งเป็นองค์ประกอบในล้อยางต้น โดยเป็น ยางชั้นกลาง ยางชั้นใน และ ยางชั้นนอก ตามลำดับ โดยนำยางทั้ง 3 ชนิดมาผ่านกระบวนการวัลคาไนเซชันที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียสในแม่พิมพ์เพื่อเตรียมชิ้นทดสอบชนิดการดึงในแนวแกนเดียวตามมาตรฐาน ASTM D 412-92 ดังแสดงในภาพที่ 3-1 การทดสอบได้ทำภายในห้องควบคุมอุณหภูมิให้คงที่ 25 องศาเซลเซียส อัตราเร็วในการดึง 200 มม.ต่อนาที โดยทำการทดสอบด้วยเครื่องทดสอบแรงดึงยี่ห้อ Instron Series IX Automated Material Testing System 6.05 และ VDO Extensometer ที่ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล สจพ. ดังแสดงในภาพที่ 3-2 และการทดสอบดึงยางแต่ละชนิดจะใช้ยางชิ้นทดสอบชนิดละ 5 ชิ้นทดสอบ ตัวอย่างผลการทดสอบได้แสดงไว้ในภาพที่ 3-3

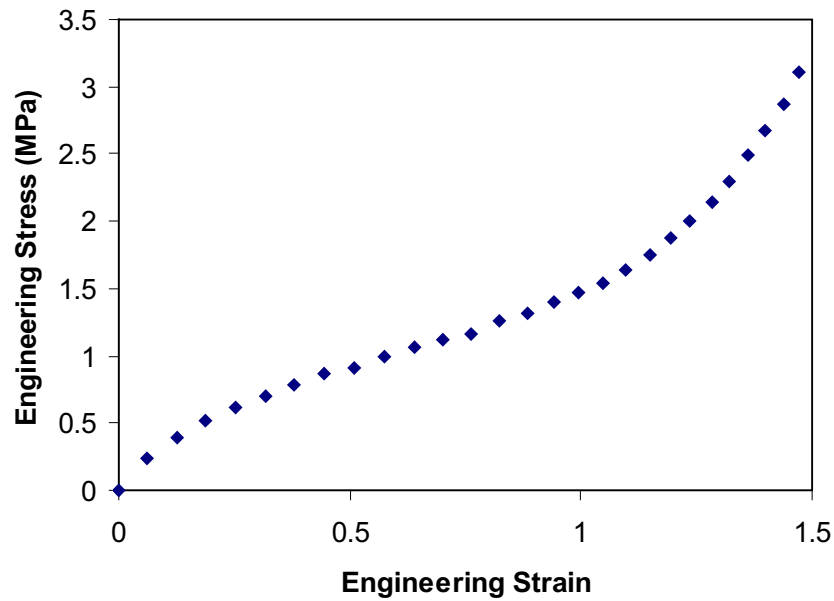


หนา 2 มม.

ภาพที่ 3-1 ชั้นทดสอบชนิดการดึงในแนวแกนเดียว

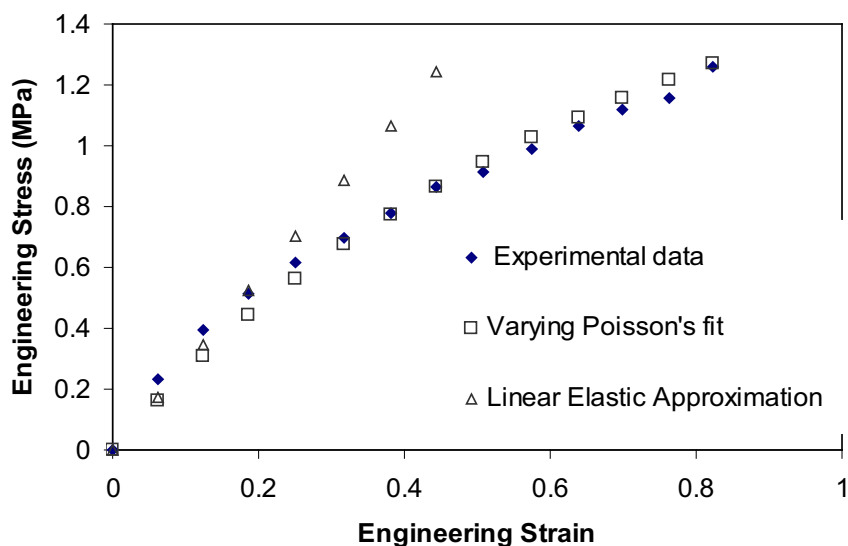


ภาพที่ 3-2 เครื่องทดสอบแรงดึงขณะทำการทดสอบ



ภาพที่ 3-3 ตัวอย่างความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นวิศวกรรมและความเครียดวิศวกรรมจากการทดสอบยางหนึ่งชิ้น

จากนั้นได้นำผลทดสอบข้างต้นมาวิเคราะห์โดยใช้วิธี “Constant true young modulus with varying poisson’s ratio” [9] โดยทั่วไปแล้ว Strain ที่เกิดขึ้นในล้อยางจะไม่เกิน 80 % จึงประยุกต์ใช้วิธีข้างต้นจนถึง Engineering strain ประมาณ 0.8 ซึ่งได้แสดงผลของการ Fit Experimental data โดยใช้วิธี “Constant true young modulus with varying poisson’s ratio” เพื่อให้ได้ค่าโมดูลัสยืดหยุ่น  $E$  ไว้ในภาพที่ 3-4



ภาพที่ 3-4 ผลการใช้วิธี Constant true young modulus with varying poisson’s ratio ในการแทน Uniaxial Tensile data

ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของยางเติมผงคาร์บอนดำแต่ละชนิด สามารถหาได้โดยใช้ข้อมูลที่ได้จากการทดสอบแบบดึงในแนวแกนเดียวและพิจารณาในช่วงที่  $\lambda \leq 1.8$  ค่าโดยค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นที่ได้เป็นค่าเฉลี่ยที่ได้จากการดึงยางขึ้นทดสอบทั้งหมด 5 ชิ้นทดสอบ และได้แสดงไว้ในตารางที่ 3-1

ตารางที่ 3-1 โมดูลัสความยืดหยุ่นของยางที่ได้จากการทดสอบแบบดึงในแนวแกนเดียว

ชนิดของยาง	ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่น (MPa)*
M049	A
M059	B
C559B	C

\*หมายเหตุ ค่าที่แท้จริงของค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นที่ได้ทางผู้อนุเคราะห์ Compound ยางทั้งสามชนิดที่นำมาทดสอบ ขอสงวนไว้ไม่ให้เปิดเผย โดยค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของยางทั้งสามชนิดอยู่ระหว่าง 3.0-10.5 MPa โดย ค่า  $C > B > A$

เนื่องจากในงานวิจัยนี้ได้วิเคราะห์ล้อยางต้นที่รับโหลดแบบสถิตย์และการทดสอบวัดค่าการเคลื่อนตัวของล้อยางต้นก็เป็นล้อยางต้นที่ยังไม่นำไปใช้งาน (รายละเอียดดูในหัวข้อที่ 4) ดังนั้นผลของมุลลิน (Mullin's Effect) ในล้อยางต้นที่ทำการทดสอบจึงยังไม่ถูกกำจัดออกไป ฉะนั้นการคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์ของแบบจำลองฟังก์ชันพลังงานความเครียดจึงพิจารณาจากข้อมูลการทดสอบที่ได้จากการทดสอบดึงยางครั้งที่ 1 จึงจะสอดคล้องกับพฤติกรรมจริงๆของล้อยางต้นที่ทำการทดสอบ แต่หากทำการวิเคราะห์ล้อยางต้นในขณะที่รับโหลดแบบวงรอบต้องคำนึงถึงผลของมุลลินด้วย

### 3.3 การทดสอบยางโดยวิธีการวัดค่าความแข็ง

การหาค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของยางเติมผงคาร์บอนดำนอกจากจะหาด้วยวิธีการทดสอบแบบดึงในแนวแกนเดียว โดยนำสารประกอบยางแต่ละชนิดที่เป็นองค์ประกอบในล้อยางต้นไปผ่านกระบวนการวัลคาไนเซชัน (การอบคงตัว) ในแม่พิมพ์เพื่อเตรียมขึ้นทดสอบชนิดการดึงในแนวแกนเดียว (ขึ้นทดสอบรูปดัมเบลล์) แล้วนำไปดึงทดสอบดังได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อที่ 3.2 แต่พฤติกรรมเชิงกลขององค์ประกอบยางแต่ละชนิดที่ได้จากการทดสอบแบบดึงในแนวแกนเดียวกับพฤติกรรมเชิงกลของยางแต่ละชนิดซึ่งประกอบกันเป็นล้อยางต้นที่นำไปผ่านกระบวนการอบคงตัวในแม่พิมพ์เพื่อผลิออกมาเป็นล้อยางต้นย่อมมีความแตกต่างกันอันเนื่องมาจากปัจจัยของ อุณหภูมิในการอบคงตัว เวลาที่ใช้ในการอบ ลักษณะรูปร่างของชิ้นงาน และกระบวนการถ่ายเทความร้อนของแม่พิมพ์ ถึงแม้ว่าสารประกอบยางจะมีส่วนผสมทางเคมีเหมือนกันก็ตาม ดังนั้นจึงควรต้องหาโมดูลัสความยืดหยุ่นของยางแต่ละชนิดที่เป็นองค์ประกอบอยู่ในล้อยางต้นหลังจาก

ที่ล้อยางต้นได้ผ่านกระบวนการอบคงตัวมาแล้ว เพื่อให้ได้ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของยางที่แท้จริงและนำไปใช้ในการวิเคราะห์ปัญหาต่อไป แต่เนื่องจากรูปร่างของล้อยางต้นที่จะนำมาทดสอบหาค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นไม่เอื้อแก่การนำไปทดสอบแบบการดึงในแนวแกนเดียว เพราะฉะนั้นจึงต้องใช้การทดสอบยางด้วยวิธีการวัดค่าความแข็งโดยค่าความแข็งที่วัดได้มีความสัมพันธ์กับโมดูลัสความยืดหยุ่น [13]

การทดสอบค่าความแข็งของยางจะใช้วิธีการทดสอบความแข็งของชอร์ (Shore Hardness Test) โดยสเกลการวัดความแข็งแบบชอร์ได้แบ่งออกเป็น 2 ชนิดคือ ค่าความแข็งแบบชอร์ เอ (Shore A) ซึ่งใช้วัดความแข็งของยางอ่อนและค่าความแข็งแบบชอร์ ดี (Shore D) ใช้วัดความแข็งของยางแข็ง การวัดความแข็งแบบชอร์จะนิยมใช้กันมากในอุตสาหกรรมยาง โดยมีอุปกรณ์ที่ใช้วัดค่าความแข็งแบบชอร์คือ ดูโรมิเตอร์ (Durometer) ดังแสดงในภาพที่ 3-5 ค่าความแข็งแบบชอร์สามารถนำไปประมาณค่าความแข็งที่วัดตามมาตรฐาน IRHD (International Rubber Hardness Degrees) [13]

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการทดสอบความแข็งของยางโดยเริ่มจากการเตรียมชิ้นทดสอบ ด้วยการนำล้อยางต้นที่ผ่านกระบวนการอบคงตัวแล้วไปตัดให้ได้ชิ้นทดสอบที่มีหน้าตัดเป็นหน้าตัดของล้อยางต้น มีความหนา 10 มม. ดังแสดงในภาพที่ 3-6 จากนั้นใช้ดูโรมิเตอร์วัดความแข็งของชิ้นทดสอบ โดยให้ตำแหน่งของการวัดกระจายไปทั่วทั้งหน้าตัดยาง ทำการบันทึกค่าความแข็งในแต่ละตำแหน่งและบริเวณของยางแต่ละชนิด โดยค่าความแข็งที่วัดได้เป็นค่าความแข็งแบบชอร์ เอ หาค่าความแข็งเฉลี่ยของยางแต่ละชนิด จากนั้นนำค่าความแข็งเฉลี่ยของยางแต่ละชนิดไปแปลงเป็นค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นด้วยวิธีการประมาณภายในช่วง (Interpolation) โดยใช้ข้อมูลความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งกับค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นที่แสดงอยู่ในตารางที่ 3-2 และค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของยางแต่ละชนิดที่ได้จากการวิธีการวัดความแข็งแสดงได้ดังตารางที่ 3-3

ตารางที่ 3-2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งแบบชอร์ เอ กับค่าโมดูลัสความยืดหยุ่น [13]

ค่าความแข็ง (Shore A)	ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่น (MPa)
10	0.4
20	0.7
30	1.2
40	1.7
50	2.5
60	3.8
70	6
80	10
90	23

ตารางที่ 3-3 ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของยางที่ได้จากวิธีการวัดความแข็งแบบชอร์

ชนิดของยาง	ค่าความแข็งเฉลี่ย (Shore A)**	ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่น (MPa)**
M049	D	A'
M059	E	B'
C559B	F	C'

**หมายเหตุ\*\*** ค่าที่แท้จริงของค่าความแข็งเฉลี่ย (Shore A)\*\*และค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นที่ได้จากการเทียบตาราง ทางบริษัทผู้อนุเคราะห์ Compound ยางทั้ง 3 ชนิด ขอสงวนไว้ไม่ให้เปิดเผย โดยค่าค่าความแข็งเฉลี่ย ยางทั้งสามชนิดอยู่ระหว่าง 50-80 และ โมดูลัสความยืดหยุ่นของยางทั้งสามชนิดอยู่ระหว่าง 3.0-10.0 MPa โดย  $C' > B' > A'$

ทั้งนี้พบว่าค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นที่ได้จากการวัดค่าความแข็งมีค่าน้อยกว่าค่าที่ได้จากการวัดโดยการดึงยึดแกนเดียวเล็กน้อย

ในทำนองเดียวกันกับการทดสอบแบบดึงแกนเดียว เมื่อทราบค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของยางแล้ว จะทำให้สามารถทำนายข้อมูลการทดสอบวัสดุทั้งสามลักษณะ (Uniaxial, Equibiaxial, Planar test) ได้ ด้วยวิธีการของอัตราส่วนปัวซอง ดังที่ได้กล่าวไว้ข้างต้น



ภาพที่ 3-5 ดูโรมิเตอร์ที่ใช้วัดค่าความแข็ง



ภาพที่ 3-6 ชิ้นทดสอบค่าความแข็งที่เป็นส่วนหนึ่งของล้อยางตัน

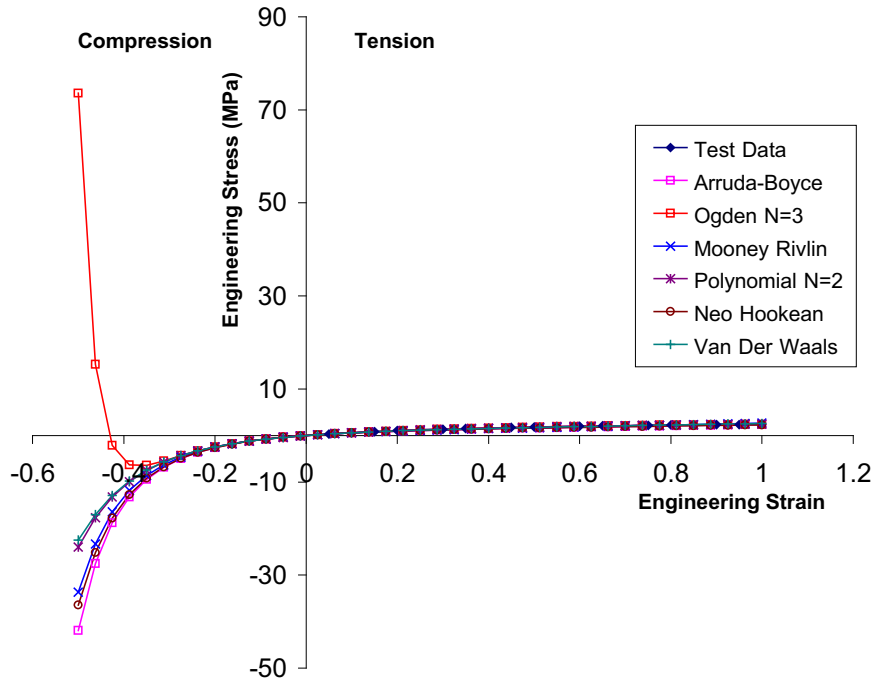


### 3.4 การหาค่าสัมประสิทธิ์ของแบบจำลองฟังก์ชันพลังงานความเครียด

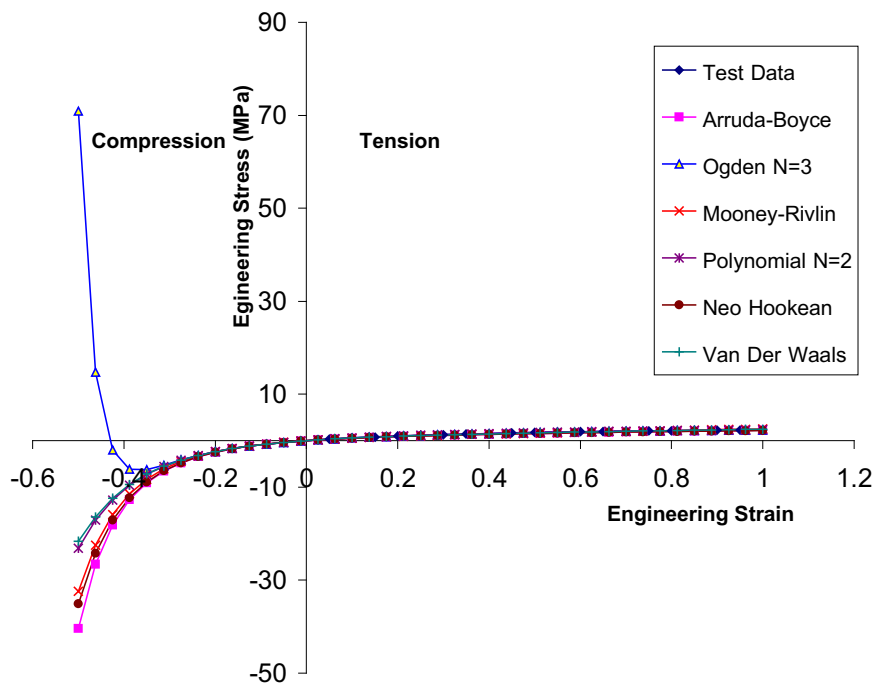
การหาค่าสัมประสิทธิ์ของแบบจำลองฟังก์ชันพลังงานความเครียดสามารถทำได้โดยใช้โปรแกรม ไฟไนต์เอลิเมนต์อะบาคัส (ABAQUS) [2] ด้วยการเอาข้อมูลการทดสอบทั้งสามลักษณะ(Uniaxial, Equibiaxial และ Planar Test) ที่ได้จากวิธี "Constant true young modulus with varying poisson's ratio" แปลงข้อมูลจากการทดสอบแบบดิ่งในแนวแกนเดียวและการทดสอบความแข็งของยางป้อนให้กับโปรแกรม โดยข้อมูลการทดสอบที่ป้อนให้กับโปรแกรมคือค่าความเค้นวิศวกรรม-ความเครียดวิศวกรรมของการทดสอบลักษณะต่างๆ

ในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้แบบจำลองที่ได้จากการสังเกตได้แก่ แบบจำลองมุนีรีฟลิน แบบจำลองพหุนาม อันดับที่ 2 แบบจำลองฮ็อกเคน อันดับที่ 3 และแบบจำลองกายภาพได้แก่แบบจำลองนีโอฮุกเกียน แบบจำลองออร์ตาบอยซ์ แบบจำลองวานเดอวาล์ ซึ่งเป็นที่ยอมรับกันอย่างกว้างขวาง มาหาค่าสัมประสิทธิ์ของแต่ละแบบจำลอง โดยใช้ข้อมูลการทดสอบที่ทำได้แล้วในหัวข้อที่ผ่านมา

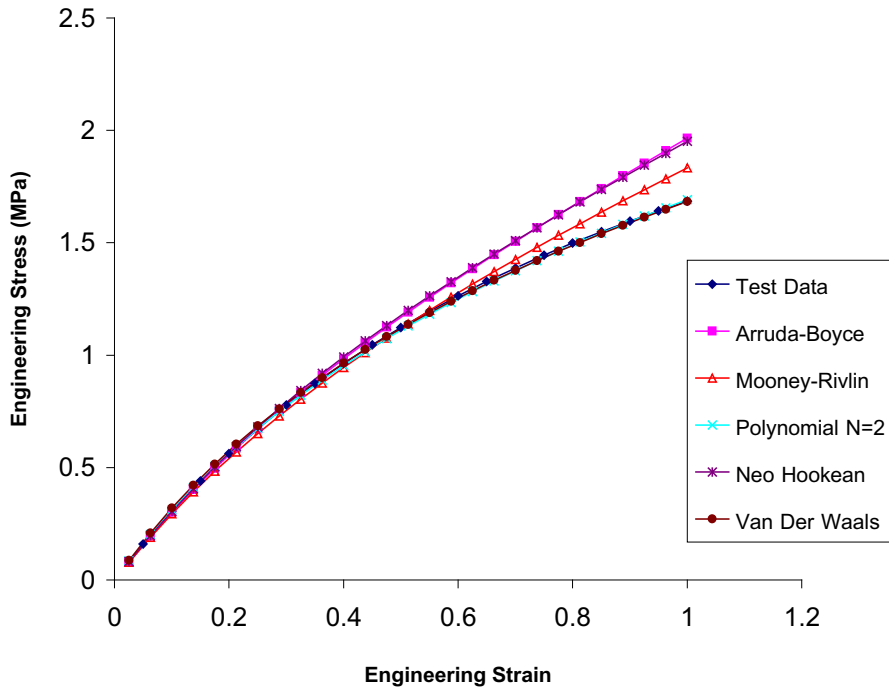
ค่าสัมประสิทธิ์ของแบบจำลองที่ได้จะนำไปทำนายพฤติกรรมเชิงกลของยาง ในการรับโหลดทั้งสามลักษณะโดยการใช้โปรแกรม อะบาคัส แต่ก่อนที่จะเลือกแบบจำลองไปใช้ ต้องทดสอบเสถียรภาพของแต่ละแบบจำลองก่อน โดยนำค่าสัมประสิทธิ์ของแบบจำลองไปทำนายความสัมพันธ์ของความเค้นวิศวกรรมกับความเครียดวิศวกรรมในขณะรับโหลดแบบอัด เมื่อพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์ของแบบจำลองที่ได้จากข้อมูลการทดสอบความแข็งของยางชนิดที่อ่อนที่สุดใน 3 ชนิดที่ใช้ พบว่า แบบจำลองฮ็อกเคน มีพฤติกรรมไม่เสถียร นั่นคือ พฤติกรรมที่ทำนายได้ไม่สอดคล้องกับพฤติกรรมจริง โดยในสภาวะที่รับโหลดแบบเท่ากันในสองแนวแกน ค่าความเค้นมีค่าเป็นบวกขณะที่ค่าความเครียดมีค่าเป็นลบ (การอัด) ดังแสดงในภาพที่ 3-7 และภาพที่ 3-8 ส่วนแบบจำลองที่เหลือให้แนวโน้มพฤติกรรมเชิงกลดูเป็นจริง ดังนั้นจึงเหลือแบบจำลองที่จะพิจารณา 5 แบบจำลองคือ แบบจำลองมุนีรีฟลิน แบบจำลองพหุนาม อันดับที่ 2 แบบจำลองนีโอฮุกเกียน แบบจำลองออร์ตาบอยซ์ แบบจำลองวานเดอวาล์ และพบว่าเมื่อนำค่าสัมประสิทธิ์ของแบบจำลองทั้งห้าไปทำนายพฤติกรรมเชิงกลของการทดสอบแบบดิ่งในแนวแกนเดียวและการทดสอบแบบดิ่งแบบความกว้างคงที่(planar test) ปรากฏว่า แบบจำลองทั้งห้าได้ทำนายพฤติกรรมเชิงกลได้ใกล้เคียงกับพฤติกรรมเชิงกลที่ได้จากการทดสอบ ดังแสดงในภาพที่ 3-9 และภาพที่ 3-10 ตามลำดับ แต่เมื่อนำไปทำนายพฤติกรรมเชิงกลของการทดสอบแบบดิ่งเท่ากันในสองแนวแกน ปรากฏว่าแบบจำลองพหุนาม อันดับที่ 2 ทำนายพฤติกรรมเชิงกลของยางได้ใกล้เคียงกับพฤติกรรมเชิงกลที่ได้จากการทดสอบมากที่สุด ดังแสดงในภาพที่ 3-11 ในกรณีของยางอีกสองชนิดที่เหลือ ก็เป็นไปในทำนองเดียวกันทั้งข้อมูลที่ได้มาจากการดิ่งและข้อมูลที่ได้จากการทดสอบความแข็ง ดังนั้นจึงสรุปได้ว่า ในงานวิจัยนี้เลือกใช้แบบจำลองพหุนาม อันดับที่ 2 เป็นแบบจำลองฟังก์ชันพลังงานความเครียดของยางเติมผงคาร์บอนดำ



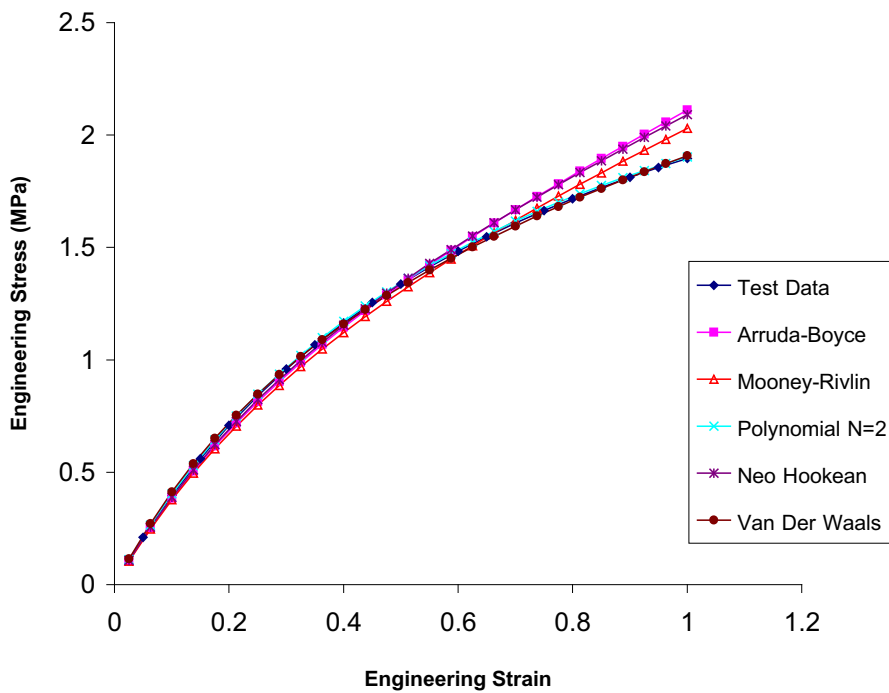
ภาพที่ 3-7 การเปรียบเทียบผลการจำลองที่รับโหลดแบบเท่ากันในสองแนวแกน  
ของยาง โดยใช้ค่าสัมประสิทธิ์ที่ได้จากวิธีการทดสอบแบบดึง



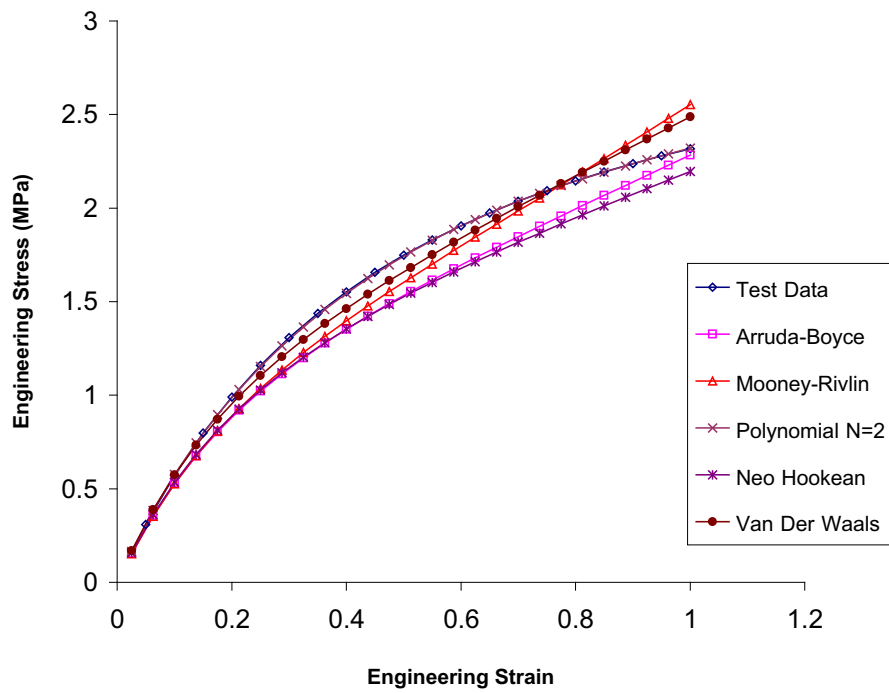
ภาพที่ 3-8 การเปรียบเทียบผลการจำลองที่รับโหลดแบบเท่ากันในสองแนวแกน  
ของยาง โดยใช้ค่าสัมประสิทธิ์ที่ได้จากวิธีการทดสอบความแข็ง



ภาพที่ 3-9 การเปรียบเทียบผลการจำลองแบบดิ่งในแนวแกนเดียวของยาง โดยใช้ค่าสัมประสิทธิ์ที่ได้จากวิธีการทดสอบความแข็ง



ภาพที่ 3-10 การเปรียบเทียบผลการจำลองแบบดิ่งแบบความกว้างคงที่ (planar test) ของยาง โดยใช้ค่าสัมประสิทธิ์ที่ได้จากวิธีการทดสอบความแข็ง



ภาพที่ 3-11 การเปรียบเทียบผลการจำลองแบบดิ่งเท่ากันในสองแนวแกนของยาง โดยใช้ค่าสัมประสิทธิ์ที่ได้จากวิธีการทดสอบความแข็ง

#### **4. การทดสอบการกดอัดล้อยางตัน**

ในบทนี้จึงจะกล่าวถึงการทดสอบการกดอัดล้อยางตันซึ่งรวมถึงอุปกรณ์และขั้นตอนการทดสอบ โดยวัตถุประสงค์ของการทดสอบการกดอัดล้อยางตันนี้เพื่อนำผลการทดสอบไปเปรียบเทียบและเป็นการยืนยันความถูกต้องของแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ซึ่งจำลองการรับโหลดของล้อยางตัน ซึ่งจะกล่าวต่อไปในหัวข้อที่ 5

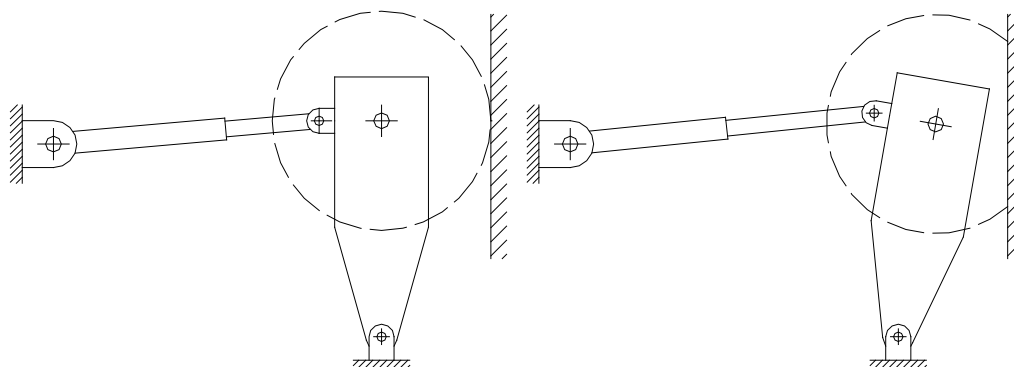
##### **4.1 ล้อยางตันที่ทดสอบและอุปกรณ์ที่ใช้ทดสอบการกดอัดล้อยางตัน**

ล้อยางตันที่นำมาทดสอบเป็นผลิตภัณฑ์ล้อยางตัน Model หนึ่งที่ผลิตโดยบริษัทแห่งหนึ่งในประเทศไทย ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกวัดได้ (หลังจากอบคงรูปแล้ว) 518 มม. ความกว้างหน้ายาง 143.8 มม. ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน (กระทะล้อ) 218 มม. ดังแสดงในภาพที่ 4-1 โดยล้อยางตันที่นำมาทดสอบเป็นล้อยางตันที่ผ่านกระบวนการวัลคาไนเซชัน มาก่อนหน้าการทดสอบ 1 วัน จะพบว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและความกว้างหน้ายางของล้อยางตันมีขนาดลดลงจากแบบที่กำหนด อาจจะเป็นสาเหตุมาจากกระบวนการวัลคาไนเซชัน



**ภาพที่ 4-1** ล้อยางตันที่ทำการทดสอบ

เครื่องทดสอบการกดอัดล้อยางตันที่ใช้เป็นเครื่องทดสอบของบริษัทที่ผลิตล้อยางตันนี้ โดยหลักการทำงานของเครื่องทดสอบสามารถอธิบายได้ดังภาพที่ 4-2 จากภาพที่ 4-2 (ซ้าย) การกดอัดล้อยางตันทำได้โดยให้โหลดกระทำกับก้านไฮดรอลิกส์(แรงดันจากน้ำมันไฮดรอลิกส์)ซึ่งต่ออยู่กับกรอบหมุน (Rotation Frame) ทำให้ก้านไฮดรอลิกส์เคลื่อนที่ส่งผลให้กรอบหมุนเคลื่อนที่และเนื่องจากล้อยางตันติดตั้งอยู่กับกรอบหมุน ดังนั้นล้อยางตันจึงเคลื่อนที่จนไปสัมผัสกับแผ่นระนาบที่ไม่มีการเคลื่อนตัว เมื่อให้โหลดกระทำเพิ่มขึ้นจะทำให้ล้อยางตันถูกกดอัดจากแผ่นระนาบที่อยู่หนึ่งส่งผลให้ล้อยางตันมีการเคลื่อนตัวและเสียรูป ดังแสดงในภาพที่ 4-2 (ขวา)



ภาพที่ 4-2 ภาพจำลองเครื่องทดสอบการกอดัดล้อยางต้น

พารามิเตอร์ที่สามารถวัดได้จากการทดสอบคือค่าการเคลื่อนตัวของล้อยางต้นและโหลดที่เครื่องทดสอบใช้กอดัดล้อยางต้น โดยเครื่องมือที่ใช้วัดการเคลื่อนตัวคือ นาฬิกาวัด (Dial Gauge)

#### 4.2 ขั้นตอนการติดตั้งและทดสอบการกอดัดล้อยางต้น

4.2.1 นำล้อยางต้นทดสอบมาประกอบเข้ากับเครื่องทดสอบการกอดัด

4.2.2 นำนาฬิกาวัดมาติดตั้งโดยให้ฐานขาตั้งของนาฬิกาวัดติดอยู่กับล้อยางต้นบริเวณกระทะล้อ (ฐานขาตั้งเป็นแม่เหล็ก) แต่เนื่องจากบริเวณติดตั้งฐานขาตั้งมีจำกัดดังนั้นในการทดสอบกอดัดล้อยางต้นจึงแยกการวัดค่าการเคลื่อนตัวออกเป็นสองครั้ง คือ วัดค่าการเคลื่อนตัวที่มากที่สุดของล้อยางต้นในแนวที่ตั้งฉากกับแผ่นระนาบสัมผัสและค่าการเคลื่อนตัวด้านกว้างของล้อยางต้นดังแสดงในภาพที่ 4-3 ซึ่งแสดงบริเวณที่ต้องการวัดค่าการเคลื่อนตัว

4.2.3 ปรับตำแหน่งของนาฬิกาวัดเพื่อวัดค่าการเคลื่อนตัวที่สูงสุดในแนวที่ตั้งฉากกับแผ่นระนาบสัมผัส โดยปรับให้แนวก้านวัดของนาฬิกาวัดตั้งฉากกับแผ่นระนาบสัมผัส ดังภาพที่ 4-4

4.2.4 ให้โหลดกอดัดล้อยางต้นและทำการวัดค่าการเคลื่อนตัวที่โหลดกระทำเป็น 25% , 50% , 75% และ 100% ของโหลดทดสอบ ทำการบันทึกค่าโหลดที่กระทำกับค่าการเคลื่อนตัวในแต่ละสภาวะ โดยล้อยางต้นที่ทำการทดสอบจะทดสอบด้วยโหลดทดสอบ 13,950 นิวตัน

4.2.5 หลังจากกอดัดล้อยางต้นจนถึงค่าโหลดทดสอบ และบันทึกค่าการเคลื่อนตัวและโหลดที่กระทำเสร็จ นำโหลดที่กระทำกับล้อยางต้นออก

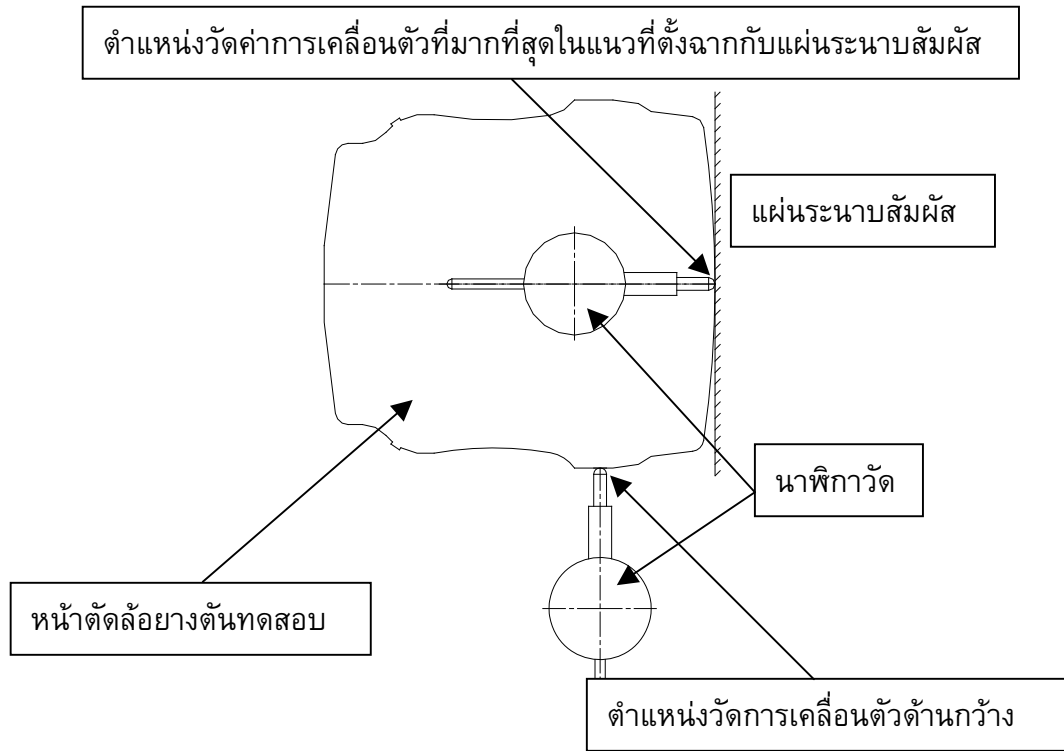
4.2.6 เคลื่อนล้อยางต้นทดสอบให้สัมผัสกับแผ่นระนาบสัมผัส ดังภาพที่ 4-4

4.2.7 ปรับตำแหน่งของนาฬิกาวัดเพื่อวัดค่าการเคลื่อนตัวด้านกว้างของล้อยางต้น โดยให้ก้านวัดของนาฬิกาวัดอยู่ในแนวตั้งฉากกับผิวของล้อยางต้นบริเวณที่ต้องการวัดค่าการเคลื่อนตัว

4.2.8 ทำซ้ำข้อที่ 4.2.5 และ ข้อที่ 4.2.6

4.2.9 เปลี่ยนตำแหน่งการทดสอบล้อยางต้นและทำการทดสอบซ้ำตามข้อที่ 4.2.2 ถึง 4.2.9

4.2.10 สิ้นสุดการทดสอบ



ภาพที่ 4-3 ตำแหน่งที่วัดค่าการเคลื่อนตัวของล้อยางต้น



ภาพที่ 4-4 ล้อยางต้นในตำแหน่งที่สัมผัสกับแผ่นระนาบสัมผัส

#### 4.3 ข้อผิดพลาดจากการทดสอบการกดอัดล้อย่างตัน

ข้อผิดพลาดที่เกิดขึ้นสรุปได้ดังนี้

4.3.1 ข้อผิดพลาดของการวัดค่าการเคลื่อนตัวจากนาฬิกาวัด อันเนื่องจากแนวแกนวัดของนาฬิกาวัดต้องตั้งฉากกับแผ่นระนาบสัมผัสในกรณีของการวัดค่าการเคลื่อนตัวที่มากที่สุดของล้อย่างตัน และในกรณีของการวัดการเคลื่อนตัวด้านกว้างของล้อย่างตัน ก่อนการกดอัดแนวแกนวัดจะต้องตั้งฉากกับผิวของล้อย่างตัน และเมื่อล้อย่างตันมีการเคลื่อนตัวและเสียรูปทำให้ผิวของล้อย่างตันไม่ตั้งฉากกับแกนวัด

4.3.2 ข้อผิดพลาดจากการวัดโหลดที่กระทำกับล้อย่างตัน โดยโหลดที่แท้จริงที่กระทำกับล้อย่างตันคือแรงปฏิกิริยาที่แผ่นระนาบสัมผัสกระทำกับล้อย่างตัน ซึ่งพบว่ามีความไม่เท่ากันกับค่าที่อ่านได้จากเครื่องทดสอบการกดอัด เนื่องจากค่าที่อ่านได้จากเครื่องเป็นโหลดที่กระทำกับก้านไฮโดรลิคส์ซึ่งควบคุมการเคลื่อนที่ของกรอบหมุน หรือจะกล่าวได้ว่าค่าที่อ่านได้เป็นแรงที่ป้อนเข้าระบบ (Input Force) แต่โหลดที่แท้จริงซึ่งกระทำกับล้อย่างตันจะมีค่าไม่เท่ากันกับแรงป้อนเข้าระบบเนื่องจากอิทธิพลของแรงเสียดทานที่ข้อต่อกรอกหมุนต่างๆในระบบ แรงเสียดทานระหว่างผิวแผ่นระนาบสัมผัสกับล้อย่างตันทดสอบ มุมเอียงของกระบอกสูบ ขนาดของล้อย่างตันทดสอบ ระยะห่างจากจุดหมุนของกรอบหมุนไปยังจุดศูนย์กลางของแกนกระทะล้อซึ่งติดตั้งอยู่ในกรอบหมุน มุมระหว่างเส้นตรงที่ลากจากจุดหมุนของกรอบหมุนไปยังจุดต่อของกรอบหมุนกับก้านไฮโดรลิคส์กับเส้นตรงที่ลากจากจุดหมุนของกรอบหมุนไปยังจุดหมุนของแกนที่ใช้สวมกระทะล้อ

4.3.3 การควบคุมเครื่องทดสอบการกดอัดให้ล้อย่างสัมผัสกับแผ่นระนาบสัมผัสพอดีในขั้นตอนที่ 4.2.3 และ 4.2.7 หากขั้นตอนนี้มีการผิดพลาดเช่นล้อย่างถูกกดอัดไปแล้วก็จะทำให้ค่าแรงและการเคลื่อนตัวที่อ่านได้ไม่เป็นค่าตามจริง

4.3.4 ขณะที่ทำการอ่านค่าการเคลื่อนตัวของล้อย่างตัน ค่าที่อ่านได้มีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลาที่วัด อันเนื่องจากคุณสมบัติการคืบตัวของวัสดุยาง (Creep)

4.3.5 ความเที่ยงตรงและแม่นยำของเครื่องมือวัดและผู้ใช้