



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ : การศึกษาสมบัติเชิงกลที่อุณหภูมิต่ำของยางคงรูปเพื่อพัฒนาผลิตภัณฑ์
ล้อยางตัน

**Study of Low Temperature Mechanical Properties of Rubber
for Solid Tire Product Development**

โดย : ผศ. ดร. อริสรา ชัยกิตติรัตน และคณะ
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลและการบิน-อวกาศ
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

เสร็จโครงการเมื่อ ธันวาคม 2553

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ : การศึกษาสมบัติเชิงกลที่อุณหภูมิต่ำของยางคงรูปเพื่อพัฒนาผลิตภัณฑ์
ล้อยางตัน

**Study of Low Temperature Mechanical Properties of Rubber
for Solid Tire Product Development**

คณะผู้วิจัย

1. ผศ. ดร. อริสรา ชัยกิตติรัตน
2. ผศ.ดร. ธีราวุธ พงศ์ประยูร

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

ชุดโครงการวิจัยขนาดกลางเรื่องยางพารา(MPR)สนับสนุนโดยสำนักกองทุนสนับสนุนการวิจัย
(ความเห็นในรายงานนี้เป็นของผู้วิจัย สกว.ไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป)

Executive Summary

ชื่อโครงการ : การศึกษาสมบัติเชิงกลที่อุณหภูมิต่ำของยางคงรูปเพื่อพัฒนาผลิตภัณฑ์ล้อยางตัน

หัวหน้าโครงการ : ผศ. ดร. อริสรา ชัยกิตติรัตน

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลและการบิน-อวกาศ คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

อุตสาหกรรมห้องเย็นซึ่งมีอุณหภูมิต่ำกว่าศูนย์องศาเซลเซียสเช่นในโรงงานอุตสาหกรรมอาหารแช่แข็งซึ่งเป็นอุตสาหกรรมที่มีความสำคัญของประเทศ โรงงานเหล่านี้มีความจำเป็นที่จะต้องใช้รถโฟล์คลิฟท์ในการขนส่งสินค้า รถโฟล์คลิฟท์เหล่านี้ส่วนมากใช้ล้อยางตัน ดังนั้นล้อยางตันจำเป็นจะต้องมีคุณสมบัติที่ทนทานต่อความเย็นและมีสมบัติเชิงกลที่ดีในอุณหภูมิต่ำ ล้อยางตันที่ใช้ในอุตสาหกรรมห้องเย็นในประเทศไทยส่วนมากจะนำเข้ามาจากต่างประเทศซึ่งจะมีราคาค่อนข้างสูง ทั้งนี้เพราะล้อยางตันที่ผลิตได้ในประเทศไทยยังไม่สามารถใช้งานได้ดีที่อุณหภูมิต่ำและเกิดปัญหาของการเสีรูปร่าง, การยึดกับกระทะล้อ และการยึดเกาะกับพื้นทีลื่นเป็นต้น ดังนั้นการพัฒนาล้อยางตันที่ผลิตในประเทศไทยเพื่อใช้ในสภาวะที่มีอุณหภูมิต่ำจึงเป็นสิ่งที่จำเป็นต่ออุตสาหกรรมในประเทศและเพื่อการส่งออกไปใช้ในประเทศที่มีอากาศหนาวจัดเช่นรัสเซียและแคนาดาต่อไป

ในการพัฒนาผลิตภัณฑ์ล้อยางตันจำเป็นจะต้องมีการพัฒนาคอมปาว์นซ์ของยางคงรูปที่เหมาะสมและในการทดสอบสมบัติเชิงกลของทั่วไปของคอมปาว์นซ์เหล่านี้เช่น Tensile test หรือ tearing test จะทำการทดสอบที่อุณหภูมิห้อง ซึ่งจะไม่สามารถบ่งบอกถึงสมบัติที่อุณหภูมิที่แท้จริงที่ต่ำกว่าศูนย์องศาเซลเซียส เนื่องจากคุณสมบัติเชิงกลของยางจะขึ้นอยู่กัอุณหภูมิด้วย ดังนั้นจำเป็นที่จะต้องมีการทำการทดสอบที่อุณหภูมิต่ำเพื่อให้สามารถนำคุณสมบัติเชิงกลต่างๆไปหาปรับปรุงสูตรยางและออกแบบเชิงวิศวกรรมให้ได้ล้อยางที่มีคุณสมบัติดีต่อการนำไปใช้งานที่อุณหภูมิต่ำ

วัตถุประสงค์

เพื่อศึกษาสมบัติเชิงกลที่อุณหภูมิต่ำของยางคงรูปเพื่อนำมาพัฒนาผลิตภัณฑ์ล้อยางตันให้สามารถใช้งานได้มีประสิทธิภาพดีขึ้นที่อุณหภูมิต่ำ

วิธีการดำเนินการวิจัย

1. ทำการศึกษาทฤษฎี,มาตรฐาน และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องเกี่ยวกับการทดสอบและคุณสมบัติเชิงกลของยางที่อุณหภูมิต่ำ
2. จัดทำอุปกรณ์ที่เหมาะสมเพื่อที่จะใช้ในการทำสร้างสภาวะที่อุณหภูมิต่ำและขึ้นทดสอบสำหรับการทดสอบสมบัติเชิงกลที่อุณหภูมิต่างๆ คือ ตั้งแต่ -50°C จนถึงอุณหภูมิห้อง
3. ทำการทดสอบคุณสมบัติของยางคงรูปที่ใช้ในการผลิตล้อยางตัน โดยทำการทดสอบ Tensile และ Compression Test , Short term Compression relaxation test และ Tearing Test รวมถึงการทำการทดสอบแบบพลวัต Dynamic Test โดยใช้เครื่อง DMA และ ศึกษาการขยายตัว/หดตัวเนื่องจากความร้อน โดยใช้เครื่อง TMA
4. นำผลการทดลองที่ได้มาทำการวิเคราะห์และศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิโดยใช้ทฤษฎีของวิสโคอิลาสติคซี้ตีและหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมเพื่อใช้ในการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์
5. ทำการทดลองปรับปรุงสูตรยางคอมปาวด์ ให้ใช้งานได้ดีขึ้นที่อุณหภูมิต่ำและทำการทดสอบเปรียบเทียบกับยางคอมปาวด์ที่ใช้อยู่เดิม
6. วิเคราะห์และสรุปผลการวิจัย

ผลลัพธ์

ได้ผลการศึกษาคุณสมบัติเชิงกลที่อุณหภูมิ(ที่อุณหภูมิต่ำ)ของยางคงรูปเพื่อนำมาพัฒนาผลิตภัณฑ์ล้อยางตันให้สามารถใช้งานได้ดีที่อุณหภูมิต่ำและสามารถเพิ่มมูลค่าผลิตภัณฑ์อีกทั้งผลการศึกษาดังกล่าวจะเป็นแนวทางที่จะนำมาใช้ปรับปรุงสูตรยางคอมปาวด์และผลิตภัณฑ์ล้อยางตันต่อไป

ระยะเวลาในการดำเนินงาน กันยายน 51 - ธันวาคม 53

Executive Summary

Project Title: Study of Low Temperature Mechanical Properties of Rubber Vulcanisates for Solid Tire

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

Background and rationale of project

Frozen food industry is one of the Thai main exporters whose exported goods' value exceeds several billion bahts each year. Many frozen food factories have their own cold storage rooms which working temperature is below the freezing point. These cold storage rooms employ forklifts equipped with solid tyre for their products handling operations. These solid tyres are required to perform well under extremely freezing cold condition. Most of the solid tyres for cold storage rooms are imported from abroad and often very expensive as solid tyres made in Thailand are not capable of working properly under a such harsh condition. There were reported problems of detachment of solid tyres from the metal rims, flat spots and bad handling on the slippery surface. Thus, to develop solid tyres that are free from the mentioned problem will be very fruitful to the frozen food industry and could become an export product to other extremely cold climate countries such as Canada and Russia.

In the process of developing low temperature solid tyres, the properties such as tensile behavior and tear strength at room temperature are not adequate. Instead, these properties should be obtained at the actual working low temperature since rubber used in solid tyres has mechanical properties that are temperature dependence. Therefore, it is very essential to study mechanical properties of rubber at low temperatures below the freezing point and thus the tested data can be used for the future development of the rubber compound and mechanical design to achieve solid tyres that can perform well in very low temperature conditions.

Objectives

To study mechanical properties of rubber vulcanisates at low temperature for the development of solid tyres that can perform effectively at low temperature conditions

Methodology

1. Literature survey of related published work.
2. Set up an appropriate apparatus and test methods for the study of mechanical properties of rubber at low temperatures from -50 °C to room temperature.
3. Conduct tests for mechanical and physical properties such as tensile test, short term relaxation , dynamic test, thermal expansion and differential scanning calorimetry.
4. Investigate the effect of temperature on the test results and model the mechanical behavior using the viscoelasticity theory and apply to the finite element analysis
5. Improve the existing rubber compound for better mechanical property at low temperatures
6. Discuss, conclude the study and write a report

Outputs

The study of mechanical property of rubber at low temperatures that can be used for the development of rubber compound and solid tyre suitable for low temperature applications

Project Duration September 2008 - December 2010

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาสมบัติเชิงกลที่อุณหภูมิต่ำของยางกรู๊ปเพื่อนำมาพัฒนาผลิตภัณฑ์ล้อยางตันให้สามารถใช้งานได้มีประสิทธิภาพดีขึ้นที่อุณหภูมิต่ำ เพื่อใช้กับรถโฟล์คลิฟท์ในอุตสาหกรรมห้องเย็นแช่แข็ง โดยในงานวิจัยนี้ได้จัดทำอุปกรณ์ที่เพื่อที่จะใช้ในการทำสร้างสภาวะที่อุณหภูมิต่ำจนถึง $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ เพื่อใช้ร่วมกับเครื่องทดสอบเนกประสงค์ (Universal testing machine) และได้ทำการศึกษาพฤติกรรมรับแรงดึงและการผ่อนคลายความเค้นของวัสดุยางที่ใช้ทำยางตัน ที่อุณหภูมิ $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ ถึง $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ พบว่ายางจะมีพฤติกรรมที่ต้านแรงดึงมากขึ้น และมีการคลายความเค้นที่ช้าลงเมื่ออุณหภูมิต่ำลง โดยเมื่ออุณหภูมิต่ำลงกว่าอุณหภูมิกลาสทรานซิชัน ยางจะมีพฤติกรรมเชิงกลที่แตกต่างจากที่อุณหภูมิอื่นอย่างชัดเจน เมื่อนำล้อยางตันที่ทำจากยางที่ใช้สูตรที่มีอยู่เดิมนำมาทดสอบที่อุณหภูมิ $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ ซึ่งเป็นอุณหภูมิทั่วไปของห้องเย็นแช่แข็ง พบว่าล้อยางจะมีความแข็งแรงมากกว่าที่การทดสอบที่อุณหภูมิห้อง และมีการคืนตัวช้ามากหลังจากเอาระลอก ในงานวิจัยนี้ได้ทำการจัดหาสูตรยางขึ้นใหม่ซึ่งใช้ BR และ naphthenic oil เป็น plasticizer ทำให้ยางมีอุณหภูมิกลาสทรานซิชันต่ำกว่าสูตรยางเดิมประมาณ 8 องศาเซลเซียส และมีช่วงกลาสทรานซิชันที่แคบลง จึงทำให้ยางมีพฤติกรรมที่อ่อนตัวดีที่อุณหภูมิต่ำและการคลายความเค้นที่เร็วขึ้น จากนั้นได้ทำการจำลองพฤติกรรมการคลายความเค้นของยางทั้งสองสูตรด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์และคำนวณเวลาจากทฤษฎีวิโคอิลาสติกซิตีโดยทำการหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมซึ่งทำให้การจำลองดังกล่าวสามารถแสดงพฤติกรรมการคลายตัวของยางทั้งสองสูตรที่อุณหภูมิต่างๆ ได้ใกล้เคียงผลทดสอบ และได้ทำการจำลองพฤติกรรมการรับภาระกดคงที่และการคืนตัวเมื่อนำภาระออกของล้อยางตันแบบ press-on ที่อุณหภูมิห้องเปรียบเทียบกับที่ $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ พบว่าแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์สามารถจำลองพฤติกรรมการคืบ (creep) โดยเมื่อยางรับภาระคงที่ค่าความเครียดและระยะการยุบตัวของหน้ายางจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ เมื่อเวลาผ่านไป และเมื่อเอาระลอกค่าความเครียดและระยะยุบตัวจะค่อยๆ คืนตัวกลับสู่สภาวะเดิม (recovery) จากผลการจำลองที่อุณหภูมิ $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ พบว่าล้อยางที่ใช้สูตรยางที่ใหม่ที่ได้นำเสนอจะมีพฤติกรรมการคืบที่น้อยกว่าและอ่อนตัวกว่ายางสูตรเดิมและสามารถคืนตัวกลับได้เร็วกว่า ซึ่งคุณสมบัติเหล่านี้เป็นสมบัติที่พึงประสงค์สำหรับการใช้งานที่อุณหภูมิต่ำ

คำสำคัญ คุณสมบัติที่อุณหภูมิต่ำ, ล้อยางตัน , วิโคอิลาสติกซิตี

Abstract

This work aims to study physical and mechanical behavior of rubber used in solid tires at low ambient temperature below the freezing point such that the results from the study can be used for development of solid tires used in frozen food cold storage rooms. In this work an appropriate apparatus was set up and used together with an universal testing machine for the study of mechanical properties of rubber at low temperatures from -50 °C to room temperature . The tests performed were including tensile and stress relaxation tests. It was found that at lower temperature rubber became stiffer and slower to relieve stress. The stiffening and slow stress relaxing were especially apparent as temperature went below the glass transition temperature of the rubber compound studied. When a small solid tire with the existing rubber compound was compressed inside the chamber with the ambient temperature of -25 °C, it was found that the tire is apparently stiffer and when load was removed the recovery of the original shape was very slow compared to the test at room temperature. In this work, a new rubber compound was presented as an example compound that has BR and naphthnic oil in its composition. This compound has glass transition temperature lower than the existing compound's by approximately 8 °C and has narrower glass transition range. This new compound was found to be softer and faster to relieve stress at temperature below 0 °C.

The viscoelastic behavior of the two compounds at different temperatures was captured using prony series and shift-time-temperature equivalent factors and later used in the subsequent finite element analysis of a press-on solid tire. The finite element model was constructed and then used to simulate the static load compression and recovery behavior of a press-on tire at room temperature and at -25°C. It was found that the creep and recovery behaviour of the press-on solid tire can be modeled adequately with the developed finite element model. It also predicted that at -25°C the solid tire with the new compound will have less creep deformation and will have faster recovery after load removal. This is the desirable performance for the usage of solid tires at low temperature.

Keywords Low temperature properties, Solid tire, Viscoelasticity

สารบัญ

	หน้า
1. บทนำ	1
2. การทดสอบและวิเคราะห์คุณสมบัติทางกลของวัสดุยางที่อุณหภูมิต่ำ	6
3. ตัวอย่างสูตรยางใหม่สำหรับการใช้งานที่อุณหภูมิต่ำ	19
4. การจำลองพฤติกรรมการคลายความเค้นของวัสดุยางที่อุณหภูมิต่างๆ	31
ด้วยแบบจำลองวัสดุ Linear Viscoelastic	
5. การวิเคราะห์การใช้งานล้อยางตันเบื่องตันด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์	37
6. อภิปราย สรุปผลและข้อเสนอแนะ	50
เอกสารอ้างอิง	52
ภาคผนวก ก ตารางเปรียบเทียบวัสดุประสงค์ กิจกรรมที่ได้ดำเนินงานและผลที่ได้รับ	54
ภาคผนวก ข เอกสารสำหรับเผยแพร่	56

1 บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของโครงการ

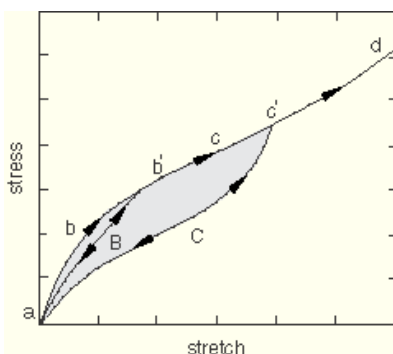
อุตสาหกรรมห้องเย็นซึ่งมีอุณหภูมิต่ำกว่าศูนย์องศาเซลเซียสเช่นในโรงงานอุตสาหกรรมอาหารแช่แข็งซึ่งเป็นอุตสาหกรรมที่มีความสำคัญของประเทศ โรงงานเหล่านี้มีความจำเป็นที่จะต้องใช้รถโฟล์คลิฟท์ในการขนส่งสินค้า รถโฟล์คลิฟท์เหล่านี้ส่วนมากใช้ล้อยางตัน ดังนั้นล้อยางตันจำเป็นจะต้องมีคุณสมบัติที่ทนทานต่อความเย็นและมีสมบัติเชิงกลที่ดีในอุณหภูมิต่ำ ล้อยางตันที่ใช้ในอุตสาหกรรมห้องเย็นในประเทศไทยส่วนมากจะนำเข้ามาจากต่างประเทศซึ่งจะมีราคาค่อนข้างสูง ทั้งนี้เพราะล้อยางตันที่ผลิตได้ในประเทศยังไม่สามารถใช้งานได้ดีที่อุณหภูมิต่ำและเกิดปัญหาของการยึดเกาะและการยึดกับกระเบื้องล้อเป็นต้น ดังนั้นการพัฒนาล้อยางตันที่ผลิตในประเทศไทยเพื่อใช้ในสภาวะที่มีอุณหภูมิต่ำจึงเป็นสิ่งที่จำเป็นต่ออุตสาหกรรมในประเทศและเพื่อการส่งออกไปใช้ในประเทศที่มีอากาศหนาวจัดเช่น รัสเซียและแคนาดาต่อไป

ในการพัฒนาผลิตภัณฑ์ล้อยางตันจำเป็นจะต้องมีการพัฒนาคุณสมบัติของยางคงรูปที่เหมาะสมและในการทดสอบสมบัติเชิงกลของทั่วไปของคอมปาว์เหล่านี้เช่น Tensile test หรือ tearing test จะทำการทดสอบที่อุณหภูมิห้อง ซึ่งจะไม่สามารถบ่งบอกถึงสมบัติที่อุณหภูมิที่ใช้จริงที่ต่ำว่า ศูนย์องศาเซลเซียส เนื่องจากคุณสมบัติเชิงกลของยางจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิด้วย ดังนั้นจำเป็นที่จะต้องมีการทำการทดสอบที่อุณหภูมิต่ำเพื่อให้สามารถนำคุณสมบัติเชิงกลต่างๆไปหาปรับปรุงสูตรยางและออกแบบเชิงวิศวกรรมให้ได้ล้อยางที่มีคุณสมบัติดีต่อการนำไปใช้งานที่อุณหภูมิต่ำ

1.2 วัสดุยางในงานวิศวกรรม (Rubber in Engineering)

ยางธรรมชาติถูกนำมาใช้ในงานวิศวกรรมมาแล้วไม่น้อยกว่า 150 ปี เนื่องจากยางธรรมชาติสามารถให้สมบัติบางประการที่ดีกว่ายางสังเคราะห์ [1] ได้แก่ ความแข็งแรงของยาง การเหนียวติดระหว่างการประกอบชิ้นส่วนต่างๆขณะทำการประกอบ ความทนต่อการฉีกขาด การระบายความร้อน แต่ยางธรรมชาติที่นำมาใช้ต้องผสมสารเพิ่มความแข็งแรงและผ่านกระบวนการวัลคาไนเซชัน (Vulcanization) เพื่อให้ยางคงรูป สารตัวเติมที่ใช้ผสมในยางธรรมชาติเพื่อเสริมแรง (Reinforcement) เช่นเพิ่มแรงดึง เพิ่มความทนต่อการสึก แบ่งออกเป็นสามกลุ่ม [1] คือ กลุ่มของผงคาร์บอนดำ กลุ่มของสารที่ไม่ใช่ผงคาร์บอนดำและกลุ่มของสารตัวเติมกลุ่มอื่นๆ ยางผสมคาร์บอนดำได้ถูกนำมาผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆมากมายโดยเฉพาะยางสำหรับยานพาหนะ อุปกรณ์รองรับเพื่อลดการสั่นสะเทือน เนื่องจากยางมีสมบัติความยืดหยุ่นสูง โดยพฤติกรรมเชิงกลของยางจะเป็นแบบยืดหยุ่นไม่เชิงเส้นและพบว่า เมื่อนำยางขึ้นทดสอบไปทดสอบโดยการดึงอย่างง่ายแล้วปล่อยกลับสู่ตำแหน่งเดิมและดึงซ้ำครั้งต่อมาปรากฏว่าโหลดที่ใช้ดึงซ้ำครั้งต่อมามีค่าน้อยกว่าโหลดที่ใช้

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



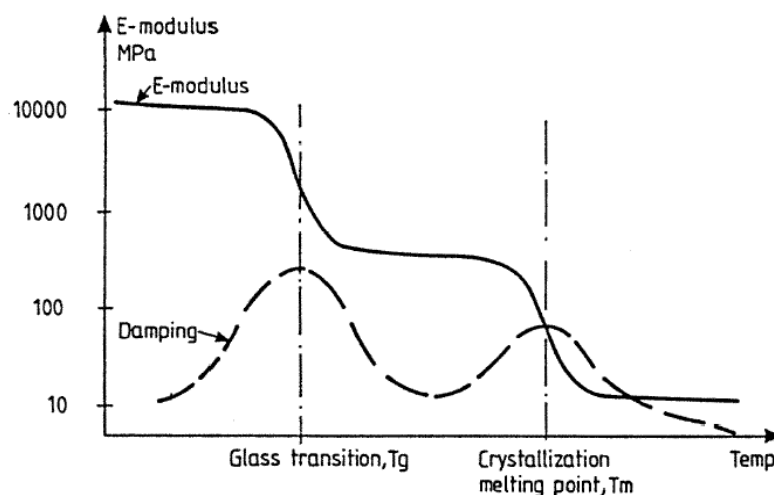
ภาพที่ 1-1 ผลของมุลลินในการดึงแกนเดียว (Uniaxial Tension)

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) ของปัญหาเหล่านี้หาได้ยากหรืออาจจะหาไม่ได้เลย หลักการของระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ในขั้นต้น เริ่มจากการแบ่งรูปร่างของปัญหาออกเป็นพื้นที่หลายๆพื้นที่หรือเป็นปริมาตรหลายๆปริมาตรอย่างต่อเนื่อง ซึ่งจะเรียกว่าเอลิเมนต์ ผลเฉลยที่ได้รับ จะเป็นผลเฉลยที่จุดต่อ (Node) ของแต่ละเอลิเมนต์ โดยผลเฉลยของแต่ละเอลิเมนต์ต้องสอดคล้องกับสมการเชิงอนุพันธ์และเงื่อนไขขอบเขตที่กำหนดมาให้ ซึ่งก็หมายความว่า หลักการของระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จะเริ่มต้นจากการพิจารณาเอลิเมนต์ทีละเอลิเมนต์และทำการสร้างสมการสำหรับเอลิเมนต์แต่ละเอลิเมนต์ โดยสมการที่สร้างขึ้นจะต้องสอดคล้องกับสมการเชิงอนุพันธ์ที่ อธิบายปัญหาเหล่านั้น จากนั้นนำสมการของแต่ละเอลิเมนต์มาประกอบรวมกัน ก่อให้เกิดระบบสมการรวม ซึ่งในความหมายทางกายภาพก็คล้ายกับการนำทุกเอลิเมนต์มาประกอบรวมกันก่อให้เกิดเป็นรูปร่างของปัญหาที่จะทำการวิเคราะห์ โดยสมการไฟไนต์เอลิเมนต์ที่สร้างขึ้นมาจะเป็นระบบสมการ พีชคณิต จากนั้นทำการกำหนดเงื่อนไขขอบเขตลงไปในระบบสมการรวม แล้วจึงทำการแก้ระบบสมการดังกล่าว ก่อให้เกิดผลเฉลยโดยประมาณที่ต้องการ ที่ตำแหน่งต่างๆของปัญหานั้นๆ ผลเฉลยที่ได้จากระเบียบวิธีนี้จะถูกต้องมากน้อยเพียงใดจะขึ้นอยู่กับสามประการหลัก [2][3] ประการแรก การกำหนดรูปร่างของเอลิเมนต์ให้ใกล้เคียงกับลักษณะรูปร่างจริงของชิ้นงานได้มากน้อยเพียงใด ประการที่สอง การประมาณพฤติกรรมของเอลิเมนต์ได้ถูกต้องตามสภาพที่แท้จริงหรือไม่ และประการที่สามคือ ความละเอียดในการคำนวณตัวเลขที่มีค่าน้อยๆของเครื่องคอมพิวเตอร์

1.4 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ยางคงรูปเป็นวัสดุวิโคอีลาสติกซึ่งมีคุณสมบัติเชิงกลที่ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและเวลา พฤติกรรมวิโคอีลาสติกที่พบทั่วไปของยางเช่น การผ่อนคลายความเค้น (stress relaxation) และการคืบตัว (Creep) รวมถึง ฮิสเตอร์รีซิส (Hysteresis) คุณสมบัติวิโคอีลาสติกนี้ขึ้นอยู่กับความสามารถที่จะหมุนตัวไปมาได้ของ โมเลกุล (Molecular Rotation) คุณสมบัติวิโคอีลาสติกนี้สามารถนำไปสัมพันธ์กับคุณสมบัติต่างๆของยางที่ใช้ทำล้อยางเช่น การเกิดความร้อนสะสม (Heat build up), การต้านทานการกลิ้ง (Rolling Resistance), การฉีกขาดเนื่องจากการ ล้าตัว (Fatigue Crack), ความเสียดทาน (Friction) และการการสึก (wear) เมื่ออุณหภูมิของยางคงรูปลดลง ยางจะมีความแข็งเพิ่มขึ้นและมีค่าโมดูลัสเพิ่มขึ้น เนื่องจากการขยับตัวของโมเลกุลทำได้ยากขึ้น เมื่ออุณหภูมิลดลงจนต่ำกว่าอุณหภูมิกลาสทรานซิชัน (glass transition temperature, T_g) Molecular rotation จะไม่สามารถเกิดขึ้นได้ทำให้ยางมีคุณสมบัติแข็งเปราะเหมือนแก้ว ค่า T_g จะมีค่าต่างกันออกไปขึ้นอยู่กับชนิดของคอมปาวด์ ในยางบางชนิดเช่น ยางธรรมชาติ (NR) และ โพลีโคลโรพรีน (CR) เมื่ออุณหภูมิลดลงจนถึงอุณหภูมิตกผลึก (melting crystallization temperature, T_m) จะมีการตกผลึกซึ่งจะทำให้การขยับตัวได้ของโมเลกุลทำได้ยากขึ้นเช่นกัน โดยค่าอุณหภูมิ T_m จะมีค่าสูงกว่า T_g โดยการตกผลึกจะค่อยๆเกิดขึ้นและจะใช้เวลานานกว่าจะถึงสภาวะสมดุล [4] การเปลี่ยนแปลงของคุณสมบัติเชิงกลของยางคงรูปทั่วไปเนื่องจากอุณหภูมิเช่น โมดูลัสและความหน่วง (Damping) สามารถแสดงได้ดังภาพที่ 1-2 [5]



ภาพที่ 1-2 การเปลี่ยนแปลงของคุณสมบัติเชิงกลของยางคงรูปทั่วไปเนื่องจากอุณหภูมิ [5]

จากภาพที่ 1-2 จะเห็นว่าที่อุณหภูมิในช่วงของ T_g และ T_m จะมีการเปลี่ยนแปลงของโมดูลัสอย่างรวดเร็ว และความหน่วงซึ่งก็คือค่า Loss Tangent จะมีค่าสูง (Peak) สำหรับยางธรรมชาติจะมี T_g อยู่ที่ประมาณ -72°C และ T_m อยู่ที่ -25°C โดยทั่วไปแล้วค่า T_g จะเป็นตัวกำหนดอุณหภูมิต่ำสุดที่ยางจะสามารถใช้งานได้

พลาสติกไซเซอร, การวัลเคโนเซชันและการเปลี่ยนชนิดของยางคอมปาวด์จะมีผลต่อค่าของ T_g และ ช่วงของ T_g (T_g region) โดย การเพิ่มปริมาณพลาสติกไซเซอร จะทำให้ T_g ต่ำลงและช่วงอุณหภูมิกลาสทราน

ซึ่งจะกว้างขึ้น ส่วนการเปลี่ยนชนิดของยางจะมีผลทำให้ T_g เปลี่ยน แต่ไม่กระทบกับความกว้างของช่วงกลาสทรานซิชัน [6]

Lion A. [7] ได้ศึกษาคุณสมบัติเชิงกลของยางคงรูปชนิดที่ใช้ทำดอกยาง (Tread Compound) ที่อุณหภูมิ -20°C ถึง 100°C โดยการทดสอบดึงถึงค่าความเครียดสูง (Large deformation) ถึง 100 % ที่อัตราเร็วการดึงต่างๆกันและการทดสอบดึงเป็นวงรอบ (Cyclic strain controlled) ซึ่งพบว่าที่อุณหภูมิต่ำ ยางจะแสดงถึงความเป็นขึ้นอยู่กัเวลา (Rate dependent) อย่างชัดเจน กว่าที่อุณหภูมิสูง และได้นำเสนอแบบจำลองคณิตศาสตร์แบบ non-linear thermomechanical ที่สามารถอธิบายพฤติกรรมเชิงกลที่ค่าความเครียดสูงที่อุณหภูมิต่างๆได้ดี

ในหลายๆงานวิจัยได้ใช้การทดสอบคุณสมบัติพลวัตโดยใช้เครื่องทดสอบ DMA (Dynamic Mechanical Analyser) ในการศึกษาคุณสมบัติเชิงกลของยางคงรูปที่อุณหภูมิต่างๆรวมถึงอุณหภูมิต่ำกว่าศูนย์องศา เช่นในงานของ Gauthier และ คณะ [8] ที่ศึกษาคุณสมบัติวิสโคอีลาสติกแบบไม่เชิงเส้นของยาง SBR ผสมซิลิกาที่อัตราส่วนผสมต่างกัน และมีการเตรียมผิวที่ใช้ Silane ต่างชนิดกัน ที่อุณหภูมิต่างๆ โดยได้ผลว่าอัตราส่วนของซิลิกาและการเตรียมผิวที่ใช้ Silane ต่างชนิดกัน จะไม่กระทบต่อค่า T_g มากนัก แต่จะมีผลต่อขนาดของ Payne Effect, ขนาดของ Storage modulus และค่าสูงสุดของ Loss tangent ที่อุณหภูมิต่างๆอย่างชัดเจน โดยเมื่ออัตราส่วนของ Filler มากขึ้นจะทำให้ขนาดของสมบัติข้างต้นสูงขึ้น และการเตรียมผิวด้วย Silane จะทำให้ Payne Effect ลดลงกว่าการที่ไม่ได้เตรียมผิว

Genic-Markovic และ คณะ [9] ได้ใช้เครื่อง DMA ในการศึกษาคุณสมบัติวิสโคอีลาสติกของยางวัลเคนซ์ EPDM แบบไม่มีสารตัวเติมและมีสารตัวเติมเขม่าดำที่ 158 phr ที่อุณหภูมิตั้งแต่ -80°C ถึง 100°C โดยได้ทำการทดสอบในโหมดดึงของการคลายความเค้น และการคืนกลับตัว ที่ค่าความเครียดต่างๆ จนถึง 2% ทั้งนี้การใช้เครื่อง DMA มีข้อจำกัดในเรื่องของค่าความเครียดที่สามารถใช้ได้ซึ่งเป็นค่าความเครียดที่ต่ำจากการศึกษาพบว่า ยางที่มีสารตัวเติมจะมีพฤติกรรมแบบ non-linear viscoelastic ชัดเจน นั่นคือ ค่าโมดูลัสการคลายความเค้นจะขึ้นอยู่กับขนาดของความเครียดด้วย แต่อย่างไรก็ดีการทำ Temperature-Time superposition ยังสามารถใช้ได้ที่เวลาสั้นๆ (ในสเกลของ 10^3 sec) อีกทั้งได้ทำการทดสอบแบบพลวัต ที่ความถี่ 1 Hz ที่อุณหภูมิต่างๆ ของยางแบบที่ยังไม่วัลเคนซ์ พบว่ายางที่มีสารตัวเติมที่มีการใส่น้ำมันจะมีค่า T_g ต่ำกว่ายางที่ไม่มีสารตัวเติมเล็กน้อย เนื่องจากน้ำมันจะเข้าไปเพิ่ม Free Volume ของเนื้อยางทำให้โมเลกุลขยับตัวได้ง่ายขึ้น

สำหรับคุณสมบัติการขยายตัวความร้อน (Thermal Expansion) ของยางคงรูปที่อุณหภูมิต่ำได้มีการศึกษาโดยใช้เครื่อง TMA/DTMA (Thermomechanical analyzer) เช่นในงานของ Brazier และคณะ [10] ที่ศึกษาสมบัติการขยายตัวความร้อน (Thermal Expansion) เพื่อหา T_g ของ Elastomer ชนิดต่างๆ เช่น NBR, Neoprene, polyarylate, SBR และ BR/SBR/NR blend รวมทั้งผลกระทบของการใส่ Plasticizers เช่น DOP, DBP, naphthenic oil, ใน SBR ซึ่งได้ผลว่า Plasticizers ชนิด DBP ในปริมาณที่มากพอจะสามารถทำ

ให้ T_g ลดลงได้อย่างชัดเจน แต่ การใส่ plasticizers ชนิดอื่น ไม่สามารถเห็นการลดลงของ T_g อย่างเด่นชัด เมื่อวัดด้วย วิธี TMA

นอกจากนี้ยังมีการทดสอบมาตรฐานต่างๆเช่น Gehman Test (ISO 1432), Brittle Point (ISO 812), Temperature Retraction Test (ISO 2921) และ Compression Set ที่อุณหภูมิต่ำ (ISO 815) ซึ่งมาตรฐานการทดสอบดังกล่าวได้ถูกรวบรวมและสำรวจโดย Spetz [5]

ในการออกแบบผลิตภัณฑ์ยางรวมถึงผลิตภัณฑ์ยางในปัจจุบัน ได้มีการใช้ไฟไนต์เอลิเมนต์มากขึ้น เนื่องจากยางเป็นวัสดุไฮเปอร์อีลาสติกและวิสโคอีลาสติก เราจึงต้องมีการนำผลการทดลองที่ได้มาหาค่าพารามิเตอร์และแบบจำลองที่เหมาะสมดังที่ได้เช่นแสดงในงานวิจัยของหนึ่งในคณะผู้วิจัยที่ได้แสดงถึงการใช้ไฟไนต์เอลิเมนต์ในการวิเคราะห์ความเค้น-ความเครียดในล้อยางตัน [11] และ ทำนายการเกิดความร้อนสะสมเนื่องจากการรับภาระแบบเป็นวงรอบ ของชิ้นส่วนวัสดุยาง [12] รวมถึงการศึกษาและจำลองสมบัติที่ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ (มากกว่าอุณหภูมิห้อง) และเวลาของวัสดุยาง[13] นอกจากนี้ยังมีผลงานวิจัยอื่นที่ได้แสดงถึงขั้นตอนการใช้ไฟไนต์เอลิเมนต์ในการวิเคราะห์ล้อยางได้มีการสำรวจในเอกสารอ้างอิง[14] แต่ทั้งนี้เท่าที่สำรวจเอกสารมา ยังไม่มีงานวิจัยใดกล่าวถึงการใช้ไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อการออกแบบผลิตภัณฑ์ล้อยางตันที่อุณหภูมิต่ำ

เพื่อเป็นแนวทางการแก้ปัญหาข้างต้นเราจำเป็นต้องศึกษาคุณสมบัติเชิงกลนั้นคือคุณสมบัติไฮเปอร์อีลาสติกและ Viscoelastic ที่อุณหภูมิต่ำเพื่อนำไปปรับปรุงสูตรยางและนำไปใช้ในการออกแบบล้อยางตันที่เหมาะสมต่อไปซึ่งการปรับปรุงสูตรยางเพื่อให้เหมาะกับการใช้งานที่อุณหภูมิต่ำนั้นได้มีการรวบรวมในเอกสารอ้างอิง[15]

1.5 วัตถุประสงค์

เพื่อศึกษาคุณสมบัติเชิงกลที่อุณหภูมิ(ที่อุณหภูมิต่ำ)ของยางคงรูปเพื่อนำมาพัฒนาผลิตภัณฑ์ล้อยางตันให้สามารถใช้งานได้ดีที่อุณหภูมิต่ำและสามารถเพิ่มมูลค่าผลิตภัณฑ์

1.6 สมมุติฐานการวิจัย

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

1.7 ขอบเขตของการทำวิจัย

1. ศึกษาสมบัติเชิงกลที่อุณหภูมิ(ที่อุณหภูมิค่า)ของยางคงรูปเพื่อนำมาพัฒนาผลิตภัณฑ์ล้อยางต้น
2. ในงานวิจัยนี้จะไม่คำนึงถึงอิทธิพลของดอกยางและความเสียดทาน

1.8 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ได้ผลการศึกษาคุณสมบัติเชิงกลที่อุณหภูมิ(ที่อุณหภูมิค่า)ของยางคงรูปเพื่อนำมาพัฒนาผลิตภัณฑ์ล้อยางต้นให้สามารถใช้งานได้ดีที่อุณหภูมิค่าและสามารถเพิ่มมูลค่าผลิตภัณฑ์อีกทั้งผลการศึกษาดังกล่าวจะเป็นแนวทางที่จะนำมาใช้ปรับปรุงสูตรยางคอมปาวด์ต่อไป

1.9 วิธีการดำเนินการวิจัย

1. ทำการศึกษาทฤษฎี,มาตรฐาน และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องเกี่ยวกับการทดสอบและคุณสมบัติเชิงกลของยางที่อุณหภูมิค่า
2. จัดทำอุปกรณ์ที่เหมาะสมเพื่อที่จะใช้ในการทำสร้างสภาวะที่อุณหภูมิค่า
3. ทำการจัดทำอุปกรณ์และชิ้นทดสอบที่เหมาะสมสำหรับการทดสอบที่อุณหภูมิต่างๆ คือ ตั้งแต่ -50 °C จนถึงอุณหภูมิห้อง
4. ทำการทดสอบสมบัติของยางคงรูปที่ใช้ในการผลิตล้อยางต้น ด้วยการทดสอบแรงดึง การพ่นคลายความเค้น รวมถึงการทำการทดสอบแบบพลวัต Dynamic Test โดยใช้เครื่อง DMA และศึกษาการขยายตัว/หดตัวเนื่องจากความร้อน โดยใช้เครื่อง TMA
5. นำผลการทดลองที่ได้มาทำการวิเคราะห์และศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิโดยใช้ทฤษฎีของวิสโคอิลาสติคซิติและไฟไนต์อีเลเมนต์
6. จัดหาสูตรยางคอมปาวด์ ให้ใช้งานได้ดีขึ้นที่อุณหภูมิค่าและทำการทดสอบ เปรียบเทียบกับยางคอมปาวด์ที่ใช้อยู่เดิม
7. วิเคราะห์และสรุปผลการวิจัย

2 การทดสอบและวิเคราะห์สมบัติทางกลของวัสดุยางที่อุณหภูมิค่า

2.1 อุปกรณ์

การทดสอบด้วยเครื่องทดสอบแรงดึง Instron Universal Testing Machine Model 5567 ซึ่งมีข้อมูลจำเพาะดังแสดงในตารางที่ 2-1

ตารางที่ 2-1 ข้อมูลจำเพาะเครื่องทดสอบ Instron Universal Testing Machine Model 5567

Specification	
Load cell	30 KN
Crosshead speed range	0.005 mm/min - 500 mm/min
Return speed	600 mm/min
Total vertical test space	1192 mm
Space between columns	420 mm
Testing type	Tensile ,Compression
Drive unit	Lead screws
Acceleration time (From 0 to top speed)	150 ms

เครื่องทดสอบดังกล่าวได้ติดตั้งเข้ากับห้องควบคุมอุณหภูมิ เพื่อที่จะใช้ในการ สร้างสภาวะอุณหภูมิต่ำจนถึง $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ โดยใช้ไอของก๊าซไนโตรเจน ซึ่งในโครงการนี้ได้มีการจัดทำอุปกรณ์ ซึ่งประกอบด้วยชุดควบคุมการไหลของก๊าซไนโตรเจน ชุดถ่ายเทก๊าซไนโตรเจน และถังใส่ก๊าซไนโตรเจนเหลว และได้ทำการติดตั้งที่เหมาะสม ภาพที่ 2-1 แสดงเครื่องทดสอบและห้องควบคุมอุณหภูมิ ภาพที่ 2-2 แสดงชุดอุปกรณ์ใช้ในการสร้างสภาวะอุณหภูมิต่ำโดยใช้ไอของก๊าซไนโตรเจน



ภาพที่ 2-1 แสดงเครื่องทดสอบและห้องควบคุมอุณหภูมิ



ภาพที่ 2-2 แสดงชุดอุปกรณ์ใช้ในการสร้างสถานะอุณหภูมิต่ำโดยใช้ไอของก๊าซไนโตรเจน

2.2 วัสดุยางทดสอบ

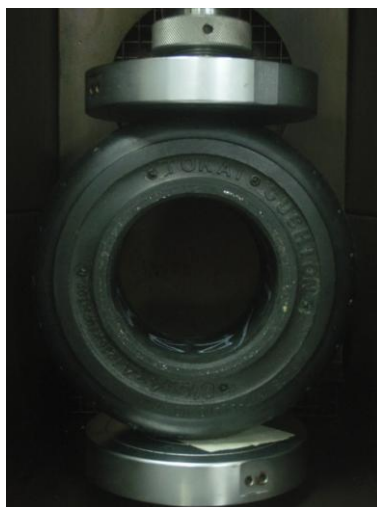
วัสดุยางที่ใช้เป็นวัสดุยางผสมเขม่าดำที่ใช้ผลิตล้อยางต้นแบบ press on ซึ่งสูตรยางได้รับการอนุเคราะห์จาก บริษัทเอกชนบริษัทหนึ่ง โดยมีส่วนผสมดังตารางที่ 2-2

ตารางที่ 2-2 แสดงส่วนผสมในสูตรยาง

ส่วนผสม	PHR
Nature Rubber	60.000
SBR1500	40.000
Struktol A60	1.000
Zinc Oxide	3.000
Stearic acid	2.000
Carbon black N220	64.000
Antioxidant	0.500
WAX	4.000
Tackifying resins	6.000
Struktol 40 MS	2.000
Aromatic oil	10.000
Sulphur	1.500
MBTS	1.000
DPG	0.500
TMTD	0.200

2.3 การทดสอบการกดล้อยางตันที่อุณหภูมิต่ำ

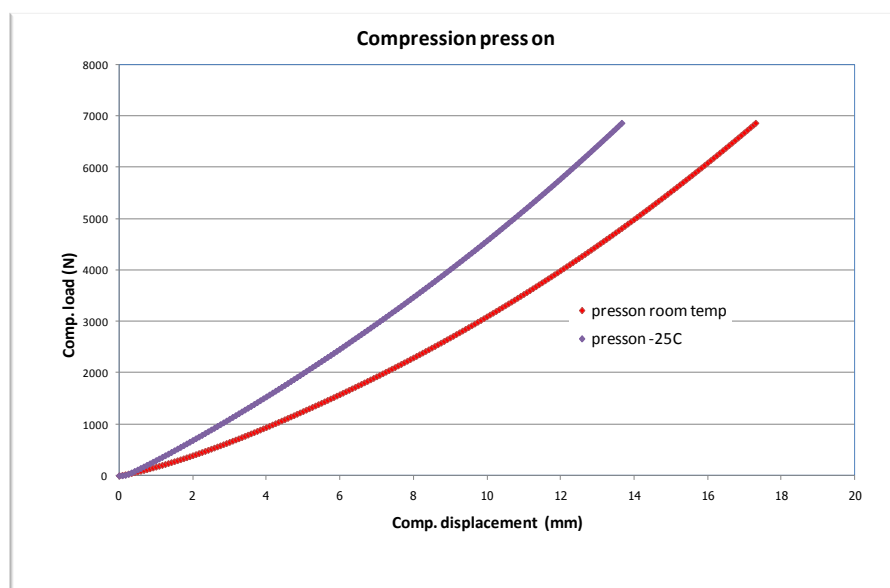
ในการทดสอบการกดล้อยางตันที่อุณหภูมิต่ำมีวัตถุประสงค์เพื่อดูลักษณะการยุบตัว-คืนตัว และความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดกับระยะยุบตัวที่เกิดขึ้นกับล้อยางแบบ Press on ที่ใช้สูตรยางผสมเขม่าดำ ขนาด 8.5 "x 4" x4 "ที่อุณหภูมิติดลบ 25 องศาเซลเซียส และเปรียบเทียบกับที่ผลทดสอบที่อุณหภูมิปกติ โดยภาพที่ 2-3 และภาพที่ 2-4 แสดงถึงลักษณะการติดตั้งการทดสอบการกดล้อยางตันด้วยเครื่องทดสอบ Universal Testing Machine ในห้องควบคุมอุณหภูมิ โดยแรงกดสูงสุดที่ใช้คือ 6,864.076 N (700 kg) ก่อนเริ่มให้แรงกด แป้นกดจะสัมผัสกับยางทั้งด้านบนพอดิ



ภาพที่ 2-3 แสดงถึง ลักษณะการติดตั้งก่อนทดสอบ



ภาพที่ 2-4 แสดงการทดสอบที่อุณหภูมิติดลบ 25 องศาเซลเซียส



ภาพที่ 2-5 กราฟของระยะยุบตัวเทียบกับแรงกดของตัวอย่างต้น Press on ที่อุณหภูมิห้องและที่อุณหภูมิ -25°C



ภาพที่ 2-6 แสดงภาพหลังเสร็จสิ้นการทดสอบ ปรากฏว่าตัวอย่างไม่สามารถคืนรูปกลับได้ดังเดิม

จากภาพที่ 2-5 กราฟระหว่างระยะยุบตัวกับแรงกดที่จากการทดสอบการกดตัวอย่าง Press on ที่อุณหภูมิห้องและอุณหภูมิตดลบ 25 องศาเซลเซียส จะสามารถเห็นได้ชัดว่าความชันของกราฟการยุบตัวของตัวอย่าง Press on ที่อุณหภูมิตดลบ 25 องศาเซลเซียส จะมากกว่าความชันของกราฟที่อุณหภูมิห้องอยู่ประมาณ 23.53% ซึ่งหมายความว่าที่อุณหภูมิต่ำตัวอย่างจะแข็งขึ้น ซึ่งจะส่งผลให้ Contact Area ของหน้ายาง ลดลง และอาจส่งผลให้เกิดการ Slip ได้ง่ายกว่าที่อุณหภูมิห้อง

จากภาพที่ 2-6 แสดงภาพตัวอย่างที่อุณหภูมิตดลบ 25 องศาเซลเซียสหลังจากการทดสอบการยุบตัวแล้วเคลื่อนเป็นกดให้มาอยู่ที่ตำแหน่งตอนเริ่มทดสอบ พบว่าตัวอย่างจะไม่สามารถคืนรูปกลับไปที่เดิมได้ โดยเร็วเหมือนกับการทดสอบที่อุณหภูมิห้องซึ่งตัวอย่างจะสามารถคืนตัวกลับได้เกือบทันที สาเหตุที่เป็นเช่นนี้เพราะวัสดุยางที่ใช้มีคุณสมบัติที่ยังไม่เหมาะสมกับสภาพอากาศที่มีอุณหภูมิต่ำมากๆ ได้ เมื่อไปใช้งาน

จริงในขณะที่รถรับภาระและจอดอยู่นิ่ง ล้อยางจะเกิดการเสีรูปร่างไป และเมื่อรถเริ่มเคลื่อนที่ ล้อยางจะคืนสภาพให้เป็นทรงกลมเหมือนเดิมได้ซ้ำและเกิด Flat spot ซึ่งจะมีผลเสียทำให้ล้อยางเสียความสมดุลและอาจทำให้ล้อยางเกิดความเสียหายได้ จึงจำเป็นต้องปรับสูตรยางใหม่ ที่ทำให้ล้อยาง มีความยืดหยุ่นและสามารถคืนตัวได้ดีขึ้นที่อุณหภูมิต่ำ หรือมีสมบัติที่ใกล้เคียงกับการใช้งานที่อุณหภูมิห้องมากขึ้น

2.4 การทดสอบ Tensile test

2.4.1 ขั้นตอนทดสอบ

ในการทดลองนี้จะทำการทดสอบวัสดุยางที่นำมาทำเป็นล้อยางต้นแบบ press on ที่ใช้กับรถโฟล์กคลิฟท์ ที่มีส่วนผสมดังตารางที่ 2-2 การเตรียมขั้นตอนทดสอบการทำที่สถาบันวิจัยยาง โดยมีขั้นตอนดังนี้คือ

- การบดผสมยาง

หลังจากการเตรียมสารก่อนบดผสมเมื่อตรวจสอบสารครบแล้วจึงเริ่มขั้นตอนบดผสมยาง โดยกำหนดให้อุณหภูมิระหว่างการบดผสมอยู่ระหว่าง 100 -120 องศาเซลเซียส เพื่อป้องกันไม่ให้อย่างสุกเร็วเกินไป โดยสามารถตรวจสอบได้จากมาตรวัดอุณหภูมิจากหน้าจอแสดงผลโดยภายในเครื่องบดผสมยาง (Internal mixer) ซึ่งมีขั้นตอนดังนี้

1. เตรียมยางธรรมชาติมาบดผสมในเครื่องบดผสมยางให้นิ่มก่อนแล้วเติมยาง SBR ลงไปบดผสมต่อโดยใช้เวลาทั้งหมดประมาณ 5 นาที
2. ผสมผงคาร์บอนดำลงไปเครื่องบดผสมยาง แต่เติมแค่ครึ่งเดียวก่อนแล้วจึงบดผสมต่ออีก 1 นาที จึงเติมที่เหลือโดยใช้เวลาทั้งหมดประมาณ 3 นาที
3. เติม Struktol 40 MS, Aromatic oil, Tackifying resins resin และ WAX ลงบดผสม พร้อมกับ ผงคาร์บอน
4. เติมสาร antioxidant ลงไปบดผสมใช้เวลาประมาณ 6 นาที
5. เติมตัวกระตุ้น ZnO, Struktol A60 และ Stearic Acid ลงบดผสมโดยใช้เวลาทั้งหมดประมาณ 2 นาที
6. เติมตัวเร่งปฏิกิริยา MBTS, DPG, และ TMTD ลงบดผสมโดยใช้เวลาทั้งหมดประมาณ 2 นาทีแล้วจึงนำไปบดต่อที่เครื่องบดผสมยางแบบ 2 ลูกกลิ้ง

-บดผสมยางให้เป็นแผ่น

ขั้นตอนนี้เป็นขั้นตอนหลังจากที่บดผสมและเติมสารเสริมแรงมาแล้ว จึงนำมามบดผสมต่อในเครื่องบดผสมยางแบบ 2 ลูกกลิ้ง (Two Roll Mill) เพื่อเติมสารสุดท้าย

1. นำยางที่บดผสมแล้วมาบดต่อที่เครื่องบด 2 ลูกกลิ้งซึ่งเราจะบดผสมจากเดิมที่เป็นก้อนให้เป็นแผ่นและลดขนาดในการบดให้เป็นแผ่นที่บางลงไปเรื่อยๆ โดยใช้เวลาทั้งหมดประมาณ 3 นาที

2. เติมหำมะถันและใช้คัตเตอร์กัดเนื้อเยื่อที่บิดไปด้วยเพื่อให้กำมะถันแทรกตัวทั่วถึงกัน โดยใช้เวลาทั้งหมดประมาณ 3 นาที

3. เมื่อยางกับกำมะถันเข้ากันเป็นเนื้อเดียวกันและได้ความหนาที่ต้องการแล้วก็เตรียมทำชิ้นขึ้นขั้นตอนต่อไป

-อบคงรูปยาง

การอบยางคงรูปในเข้าพิมพ์เป็นกระบวนการที่ทำให้ได้รูปแบบตามผลิตภัณฑ์และทำให้ยางคงรูปโดยอาศัยความร้อนและแรงอัดเป็นขั้นตอนหลังจากการตัดยางเพื่อให้เซตตัวและเลือกนำไปอบว่าจะต้องการรูปแบบใด

1. นำแผ่นยางที่ได้จากการใช้เครื่องบดผสมยาง 2 ลูกกลิ้งแล้วตัดเป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัสตามแผ่นอลูมิเนียมต้นแบบเพื่อนำไปอบคงรูป

2. แบ่งยางบางส่วนนำไปหาค่ารีโอโลยี (Rheology) เพื่อหาเวลาที่ต้องใช้ในการอบคงรูปหรือเรียกว่าเวลาการสุก สำหรับยางรองแท่นเครื่องได้ค่ารีโอโลยีที่เวลาในการอบคงรูป ซึ่งสูตรยางชนิดนี้ใช้เวลาในการอบคงรูป 3 นาที โดยใช้อุณหภูมิที่ 150 องศาเซลเซียส

3. ก่อนที่นำเข้าเครื่องอบคงรูปยางต้องปล่อยยางทิ้งไว้อย่างน้อย 6 ชั่วโมงเพื่อให้ยางเซตตัวและคลายความร้อนที่สะสมไว้ตั้งแต่การบดผสมยาง

ชิ้นทดสอบเป็นรูปดัมเบลล์ (Dumbbell) ชนิดการดึงในแนวแกนเดียวตามมาตรฐาน ASTM D 412-92 ดังแสดงในภาพที่ 2-7



ภาพที่ 2-7 ชิ้นทดสอบการดึงในแนวแกนเดียว

2.4.2 ขั้นตอนการทดสอบ

การทดสอบทำโดยเครื่องทดสอบแรงดึงยี่ห้อ Instron model 5567 ดังแสดงในภาพที่ 2-1 ทดลองภายในห้องควบคุมอุณหภูมิให้คงที่ ในช่วงอุณหภูมิ (-50) ถึง 25 องศาเซลเซียส โดยใช้ระบบสร้างสภาวะที่อุณหภูมิต่ำ ดังแสดงในรูปที่ 2-2 ด้วยอัตราความเร็วในการดึง 200 มิลลิเมตรต่อนาที

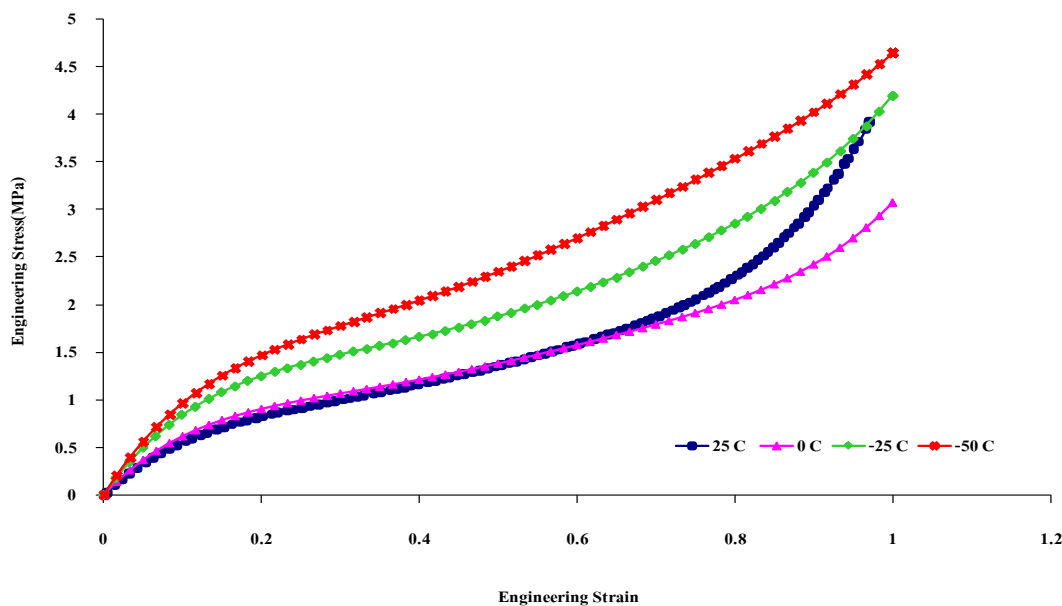
การทดสอบยางโดยวิธีการดึงในแนวแกนเดียวมีขั้นตอนดังนี้

1. เตรียมเครื่องทดสอบพร้อมทั้งติดตั้งห้องควบคุมอุณหภูมิ

2. นำชิ้นทดสอบไปจับยึดกับหัวจับการดึง
3. ปิดห้องควบคุมอุณหภูมิและเปิดสวิทช์ตั้งค่าอุณหภูมิที่ต้องการพร้อมเปิดพัดลมเพื่อให้อากาศถ่ายเทได้ทั่วถึงและรองนกว่าอุณหภูมิจะถึงค่าที่ต้องการ
4. ตั้งค่าที่จะทำการทดสอบวัสดุของเครื่องทดสอบแรงดึงคือ โหมดการดึง การเก็บบันทึกข้อมูลที่ได้ อัตราเร็วในการดึง วิธีการตั้งค่าการทดสอบดูได้จากคู่มือการใช้เครื่องทดสอบ
5. บันทึกข้อมูลที่ได้จากการทดสอบวัสดุ ซึ่งข้อมูลที่ได้จากการทดสอบคือ ค่าความเค้นวิศวกรรม และค่าความเครียดวิศวกรรม
6. ดึงยางขึ้นทดสอบซ้ำประมาณ 7 ครั้งต่อ 1 ชิ้นเพื่อกำจัดผลของมุลลิน ใช้ชิ้นทดสอบจำนวน 3 ชิ้นต่อ 1 อุณหภูมิ

2.4.3 ผลการทดสอบการดึงแกนเดียว

ผลการทดสอบการดึงแกนเดียวของวัสดุยางในหัวข้อ 2.2 หลังนำผลกระทบของมุลลิน(Mullin's effect) ออกแล้ว สามารถนำมาพลอต กราฟระหว่าง Engineering Stress และ Engineering Strain ที่อุณหภูมิต่างๆระหว่าง -50C ถึง 25 องศาเซลเซียส ได้ดังแสดงไว้ในภาพที่ 2-8 จะเห็นได้ว่าสำหรับวัสดุยางที่ใช้ในการผลิตล้อแบบ Press-on ที่อุณหภูมิ 0 และ 25 องศาเซลเซียส เมื่อกำจัดผลของมุลลินออกแล้ว เส้นกราฟระหว่าง Engineering Stress และ Engineering Strain ที่ทั้ง 2 อุณหภูมิมีค่าใกล้เคียงกันมาก แต่เมื่ออุณหภูมิยังต่ำลงความแตกต่างระหว่างเส้นกราฟความสัมพันธ์ของค่าความเค้นวิศวกรรมและค่าความเครียดวิศวกรรมเมื่อเทียบกับที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียสจะยิ่งมีมากขึ้น ที่อุณหภูมิ - 50 องศาเซลเซียสเส้นกราฟมีค่าความชันมากที่สุด จึงสามารถกล่าวได้ว่ายิ่งอุณหภูมิมิค่าต่ำลงวัสดุยางจะประพฤติตัวเหมือนวัสดุที่มีความแข็งหรือ stiffness มากขึ้น ส่งผลให้ความเค้นด้านแรงดึงมีค่าสูงขึ้น ที่ความเครียดเท่ากัน



ภาพที่ 2-8 แสดงผลเปรียบเทียบการดึงแกนเดียวของวัสดุที่ใช้ผลิตล้อยางต้นแบบ Press on ที่อุณหภูมิแตกต่างกัน

2.5 การทดสอบการคลายความเค้น (Short term tensile relaxation test)

การทดสอบการคลายความเค้นจะเป็นการศึกษาสมบัติวิโคอีลาสติกของวัสดุที่ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและเวลา ซึ่งผลการทดสอบดังกล่าวจะนำมาใช้ในการหาพารามิเตอร์สำหรับใช้กับแบบจำลองวัสดุแบบ viscoelastic เพื่อนำมาใช้ในการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ต่อไป

2.5.1 ขั้นตอนทดสอบ

เหมือนขั้นตอนสำหรับการทดสอบแรงดึงกับหัวข้อ 2.4.1

2.5.2 ขั้นตอนการทดสอบ

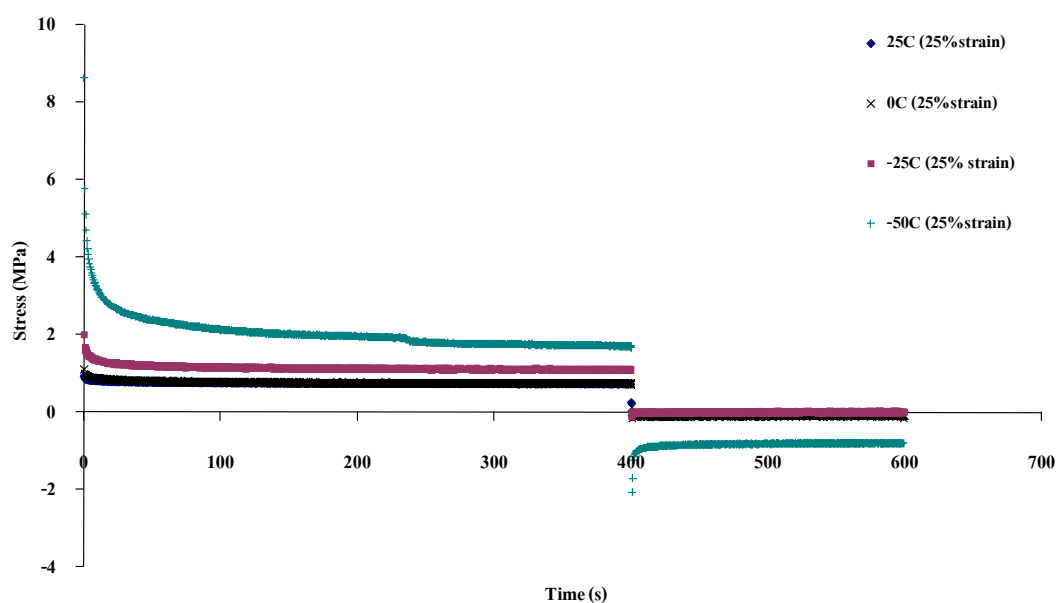
การทดสอบการคลายความเค้นที่ความเครียดเท่ากับ 25% และคงที่ความเครียดไว้เป็นเวลา 400 วินาที ทำการทดสอบภายในตู้ควบคุมอุณหภูมิคงที่ -50 ถึง 25 องศาเซลเซียส โดยขั้นตอนการทดสอบเป็นดังนี้

1. เตรียมเครื่องทดสอบพร้อมทั้งติดตั้งตู้ควบคุมอุณหภูมิ
2. ตั้งค่าโปรแกรมให้ดึงยางก่อนในลักษณะดึงกลับไปกลับมาจำนวน 4 รอบ เพื่อกำจัดผลของมุลิน โดยกำหนดอัตราความเร็วในการดึง 200 มม.ต่อนาที

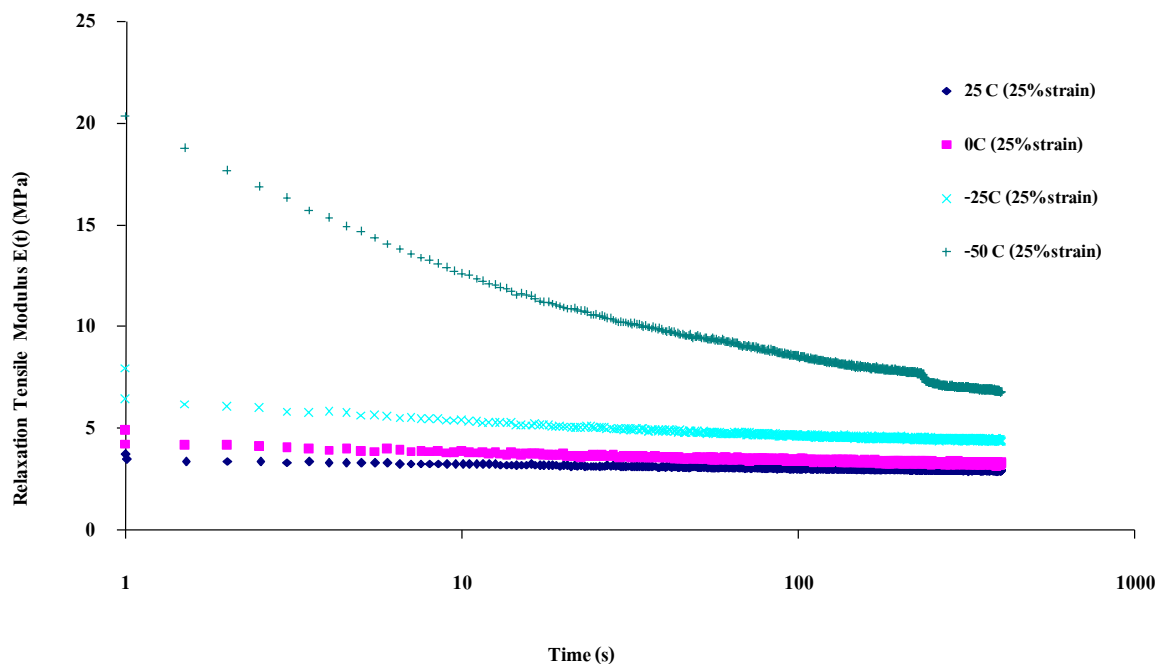
3. วัดค่าความยาวก่อนการดึงในครั้งที่ 5
4. ดึงวัสดุยางในแนวแกนหลังกำจัดผลของมูนลินและคงที่ความเครียดไว้ที่ 25% เป็นเวลา 400 วินาที หลังจากนั้นลดความเครียดลงเหลือ 0% เป็นเวลา 200 วินาที
5. บันทึกข้อมูลการทดลองและทดลองจำนวน 3 ซินต่อ 1 อุณหภูมิแล้วหาค่าเฉลี่ย

2.5.3 ผลการทดสอบการคลายความเค้น

จากการทดลองการคลายความเค้นที่กล่าวมาเราสามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับเวลาที่อุณหภูมิห้อง (25 °C) ดังได้แสดงดังภาพที่ 2-9 และค่าโมดูลัสกับเวลาดังแสดงดังภาพที่ 2-10 ซึ่งจะสังเกตได้ว่า ที่อุณหภูมิ ระหว่าง 25 °C ถึง -25 °C พฤติกรรมการผ่อนคลายความเค้นจะใกล้เคียงกันมาก แต่เมื่ออุณหภูมิลดต่ำลงมาถึง -50 °C พฤติกรรมการผ่อนคลายความเค้นจะแตกต่างจากที่อุณหภูมิอื่นๆ โดยจะมีการผ่อนคลายความเค้นได้ช้าลงและมีการกลับคืนตัวที่ช้ากว่าที่อุณหภูมิอื่นๆ อย่างชัดเจน ซึ่งจะสามารถวิเคราะห์ได้ว่าช่วงอุณหภูมิ -50 °C ถึง -25 °C อยู่ช่วงกลาสทรานซิชันของวัสดุยางนี้ ซึ่งจะทำให้มีการเปลี่ยนแปลงสมบัติเชิงกลอย่างมากและชัดเจน ทั้งนี้ อุณหภูมิ T_g ของวัสดุสามารถระบุได้โดยการทดสอบ DMA, DSC และ TMA ที่จะได้ทำต่อไป



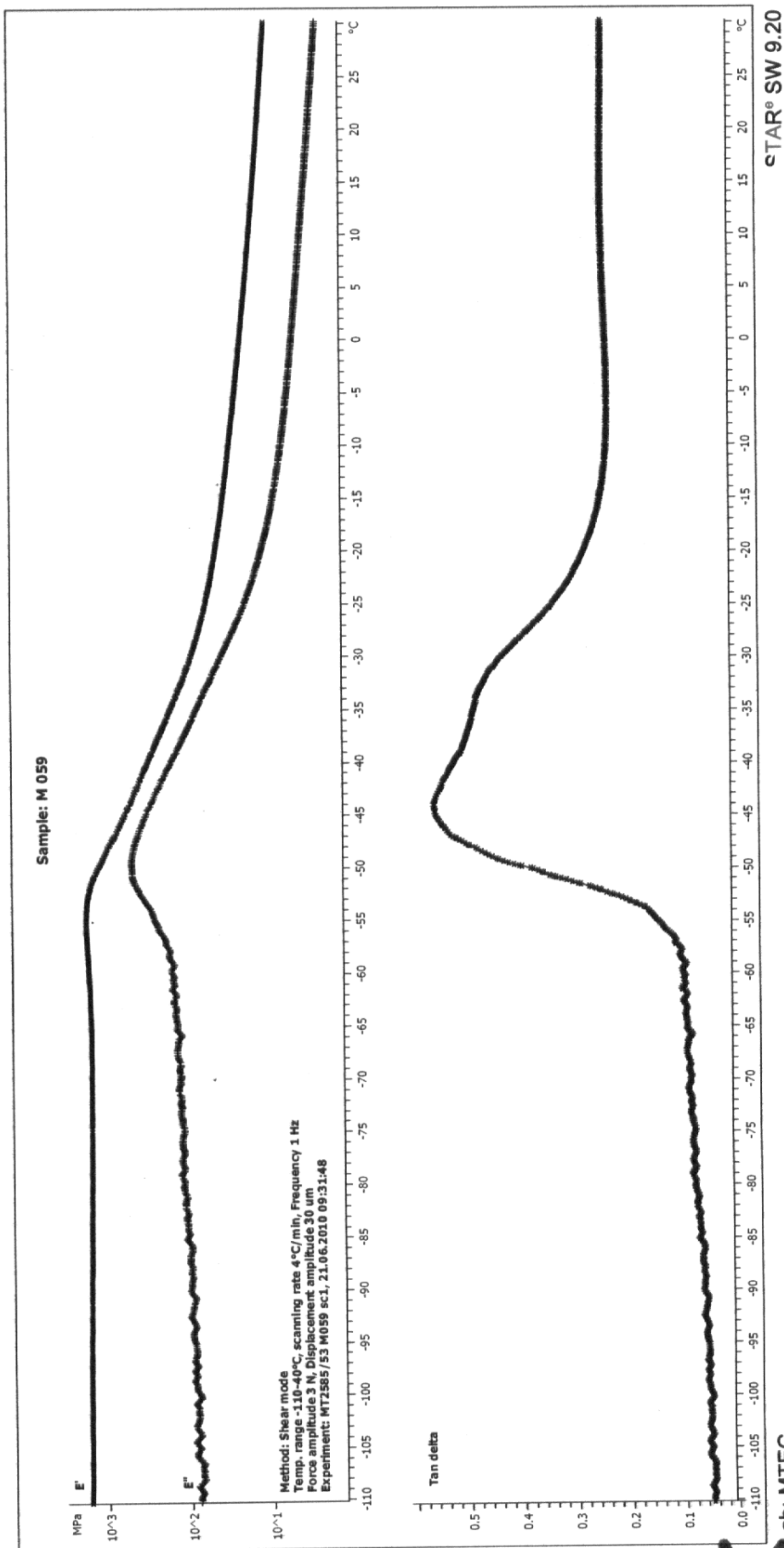
ภาพที่ 2-9 แสดงการเปรียบเทียบการทดสอบการคลายความเค้นที่อุณหภูมิแตกต่างกันที่ความเครียดเท่ากับ 25% และการคืนตัว ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส, 0 องศาเซลเซียส, -25 องศาเซลเซียส, -50 องศาเซลเซียส



ภาพที่ 2-10 กราฟระหว่างโมดูลัสการผ่อนคลายกับเวลาที่อุณหภูมิแตกต่างกันที่ความเครียดเท่ากับ 25% ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส, 0 องศาเซลเซียส, -25 องศาเซลเซียส, -50 องศาเซลเซียส

2.6 การทดสอบ DMA (Dynamic Mechanical Analysis)

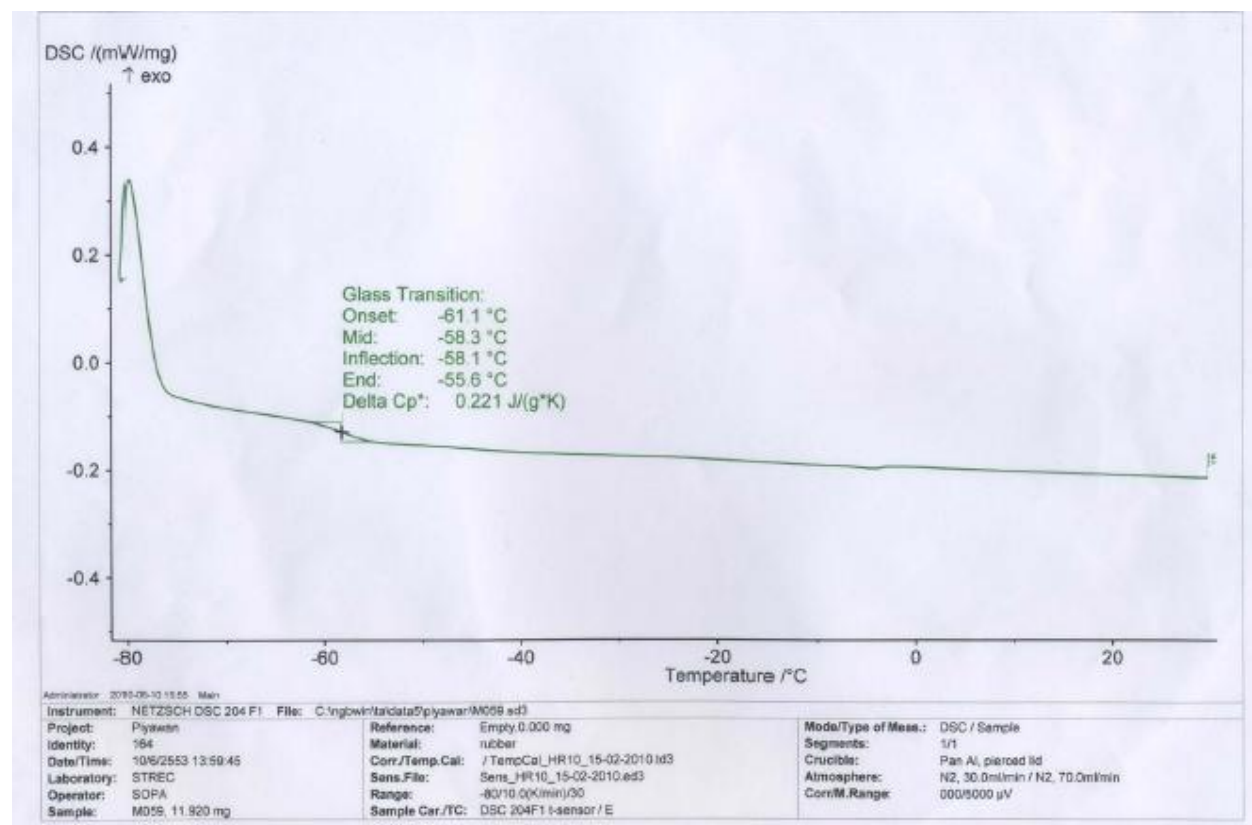
การทดสอบ DMA (Dynamic Mechanical Analysis) ใน Shear Mode ที่ Frequency 1Hz, Displacement amplitude = 30 μm , Force amplitude = 3N ที่อุณหภูมิ -110 $^{\circ}\text{C}$ ถึง 30 $^{\circ}\text{C}$, scan rate = 4C / min ทำโดยใช้เครื่อง Mettler Toledo DMA/SDTA 861 ที่ ศูนย์วิจัยโลหะและวัสดุแห่งชาติ (MTEC) ผลการทดสอบได้แสดงไว้ในภาพที่ 2-11 จากภาพแสดงให้เห็นว่ามีการเปลี่ยนแปลงของ Graph E' , E'' และ $\tan \delta$ เมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนไป โดย ช่วง Glass transition อยู่ระหว่าง -55 $^{\circ}\text{C}$ และ -17 $^{\circ}\text{C}$ โดยช่วงอุณหภูมิดังกล่าวจะมีการเปลี่ยนแปลงของ E' อย่างชัดเจน และเป็นช่วงของการเกิด peak ของ E'' และ $\tan \delta$ โดย จุดสูงสุดของค่า $\tan \delta$ อยู่ที่อุณหภูมิ -45 $^{\circ}\text{C}$ ซึ่งคืออุณหภูมิ T_g ของวัสดุ ซึ่งสอดคล้องกับผลทดสอบของการคลายความเค้น (Stress Relaxation) ข้างต้น ที่ที่อุณหภูมิ -50 $^{\circ}\text{C}$ จะมีลักษณะของการคลายความเค้นที่ช้าแตกต่างจากที่อุณหภูมิอื่นอย่างชัดเจนเพราะเป็นอุณหภูมิที่ต่ำกว่า T_g และยางกำลังจะเข้าสู่ช่วงสถานะกลาสซี (glassy state) ซึ่งการขยับตัวได้ของโมเลกุลจะเป็นไปได้ช้ามาก



รูปที่ 2-11 แสดงผลการทดสอบ DMA (Dynamic Mechanical Analysis) ใน Shear Mode ที่ Frequency 1Hz , Displacement amplitude = 30 µm, Force amplitude = 3N ที่อุณหภูมิ -80°C ถึง 30 °C , scan rate = 4C / min

2.7 การทดสอบ DSC(Differential Scanning Calorimeter)

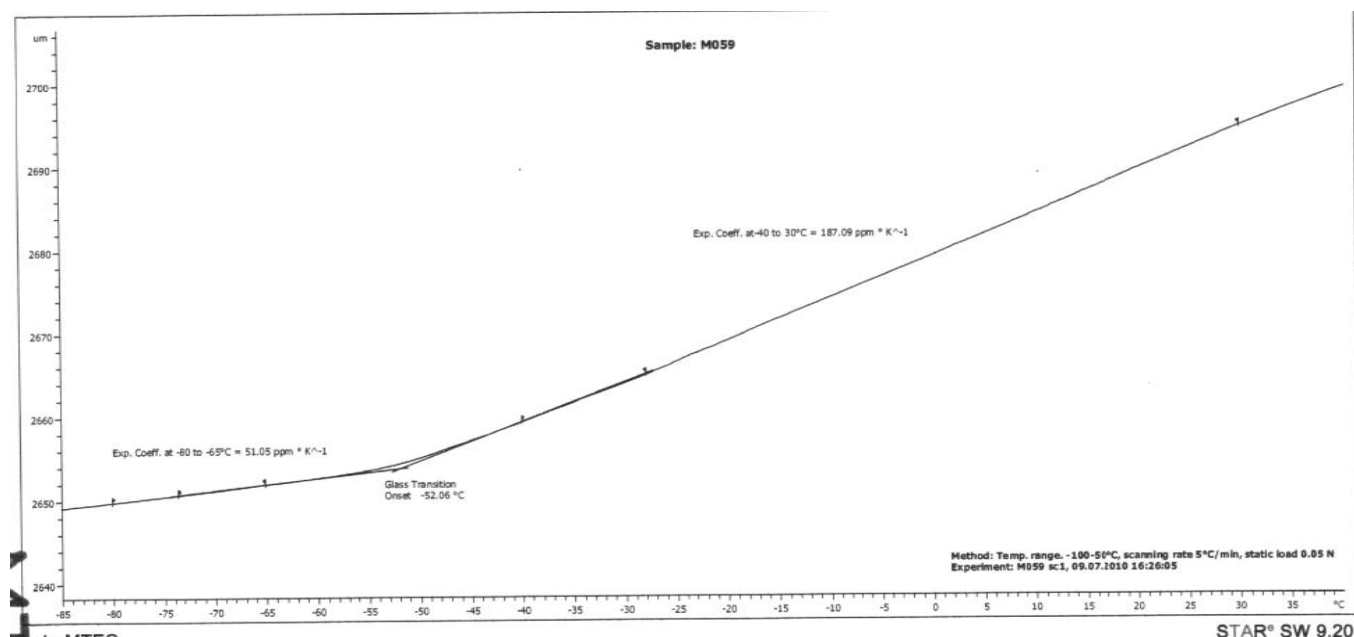
ผลการทดสอบ DSC ด้วยเครื่อง Netzsch DSC 204 ที่มหาวิทยาลัยมหิดล ได้ผลดังแสดงในภาพที่ 2-12 จากภาพจะเห็นได้ว่าช่วง Glass transition อยู่ระหว่าง -61°C และ -56°C และ T_g อยู่ที่ -58.1°C ซึ่งต่ำกว่าผลที่ได้จาก DMA ข้างต้น



ภาพที่ 2-12 แสดงผลการทดสอบ DSC

2.8 ผลการทดสอบ TMA(Thermal Mechanical Analysis)

การทดสอบ TMA (Thermal Mechanical Analysis) ทำโดยเครื่อง Mettler Teledo DMA/SDTA 861 ที่ ศูนย์วิจัยโลหะและวัสดุแห่งชาติ (MTEC) scanning rate = 5°C/min, Static load = 0.05 N ซึ่งเป็นการวัดการขยายตัวทางความร้อน ซึ่งผลการทดสอบแสดงไว้ในภาพที่ 2-13 และได้ค่าอุณหภูมิ Glass transition อยู่ที่ -52.06°C



ภาพที่ 2-13 แสดงผลการทดสอบ TMA

3 ตัวอย่างสูตรยางใหม่สำหรับการใช้งานที่อุณหภูมิต่ำ

3.1 วัสดุยางสูตรใหม่สำหรับการใช้งานที่อุณหภูมิต่ำ

ในงานวิจัยนี้ได้จัดทำตัวอย่างสูตรยางใหม่ที่ได้รับการอนุเคราะห์จากบริษัทเอกชนบริษัทหนึ่ง ที่ได้เปลี่ยนชนิดของยางจาก NR/SBR เป็น NR/BR โดย BR จะมี T_g ต่ำกว่า SBR และ NR และได้เปลี่ยน Plasticiser จาก Aromatic oil มาเป็น Naphthenic oil ซึ่งมี T_g และน้ำหนักโมเลกุลต่ำกว่า Aromatic oil ที่จะทำให้อย่างมีความยืดหยุ่นดีกว่าที่อุณหภูมิต่ำ [6] โดยในตารางที่ 3-1 ได้แสดงส่วนผสมของสูตรยางใหม่สำหรับการใช้งานที่อุณหภูมิต่ำ

ตารางที่ 3-1 แสดงส่วนผสมของตัวอย่างสูตรยางสำหรับการใช้งานที่อุณหภูมิต่ำ

ส่วนผสม	PHR
Natural rubber (NR)	50
butyl rubber	50
ZnO	5
Stearic	1
N-220	20
N-330	30
TMQ	1
Phenolic resin	5
naphthenic petroleum oil	5
parafin wax	1.5
Sulfur	1.50
Tetramethyl thiuram disulfide	0.2
2,2 benzothiazyl disulfide	1.5

การเตรียมชิ้นทดสอบยางทำที่สถาบันวิจัยยาง โดยมีขั้นตอนดังนี้คือ

- การบดผสมยาง

หลังจากการเตรียมสารก่อนบดผสมเมื่อตรวจสอบแล้วจึงเริ่มขั้นตอนบดผสมยาง โดยกำหนดให้อุณหภูมิระหว่างการบดผสมอยู่ระหว่าง 100 -120 องศาเซลเซียส เพื่อป้องกันไม่ให้ ยางสุกเร็วเกินไป โดยสามารถตรวจสอบได้จากมาตรวัดอุณหภูมิจากหน้าจอแสดงผลโดยภายในเครื่องบดผสมยาง (Internal mixer) ซึ่งมีขั้นตอนดังนี้

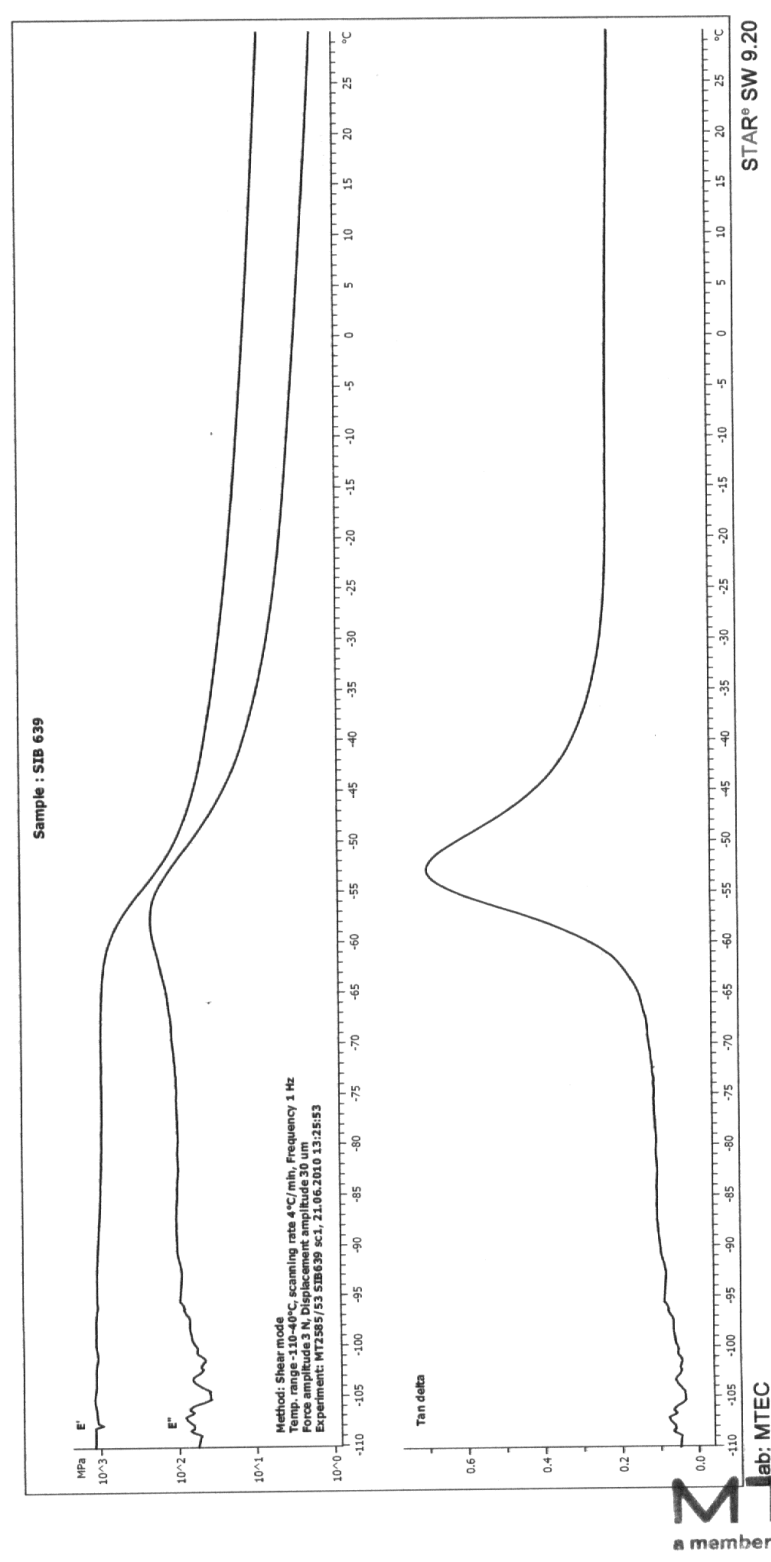
1. นำยางทั้งสองชนิดแยกไปบดด้วยเครื่องบดยางแบบสองลูกกลิ้ง แล้วนำไปวัดค่าความหนืดให้มีค่าใกล้เคียงกัน
2. เตรียมยางทั้งสองชนิดมาบดผสมในเครื่องบดผสมยางให้นิ่มก่อน โดยใช้เวลาทั้งหมดประมาณ 5 นาที
3. ผสมผงคาร์บอนดำลงไปเครื่องบดผสมยาง แต่เดิมแค่ครึ่งเดียวก่อนแล้วจึงบดผสมต่ออีก 1 นาที จึงเติมที่เหลือโดยใช้เวลาทั้งหมดประมาณ 3 นาที
4. เติม phenolic resin ,naphthenic petroleum oil,parafinลงบดผสม พร้อมกับ ผงคาร์บอน
5. เติมสาร anti oxidant TMQ ลงไปบดผสมใช้เวลาประมาณ 6 นาที
6. เติมตัวกระตุ้น ZnOและ Stearic Acid ลงบดผสมโดยใช้เวลาทั้งหมดประมาณ 2 นาที

7. เติมตัวเร่งปฏิกิริยาTMTD , MBTS ลงบดผสมโดยใช้เวลาทั้งหมดประมาณ 2 นาทีแล้วจึงนำไปบดต่อที่เครื่องบดผสมยางแบบ 2 ลูกกลิ้ง

ส่วนขั้นตอนอื่นๆในการเตรียมชิ้นทดสอบจะเหมือนกับที่ได้แจ้งไว้ในหัวข้อ 2.4.1

3.2 การทดสอบ DMA ของยางสูตรสำหรับการใช้งานที่อุณหภูมิต่ำ

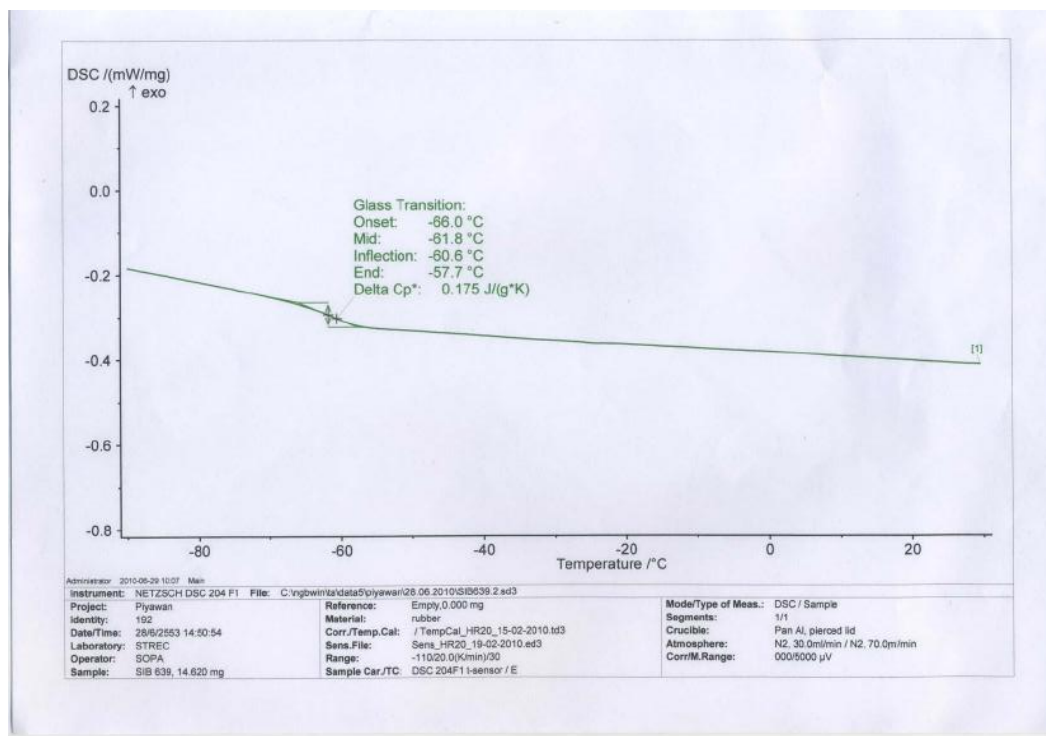
การทดสอบ DMA (Dynamic Mechanical Analysis) ใน Shear Mode ที่ Frequency 1Hz ,Displacement amplitude = 30 μ m, Force amplitude = 3N ที่อุณหภูมิ -110 $^{\circ}$ C ถึง 30 $^{\circ}$ C , scan rate = 4C / min ทำโดยใช้เครื่อง Mettelle Teledo DMA/SDTA 861 ที่ ศูนย์วิจัยโลหะและวัสดุแห่งชาติ (MTEC) ผลการทดสอบได้แสดงไว้ในภาพที่ 3-1 จากภาพ แสดงให้เห็นว่ามีการเปลี่ยนแปลงของ Graph E', E'' และ tan δ เมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนไป โดย ช่วง Glass transition อยู่ระหว่าง -65 $^{\circ}$ C และ -35 $^{\circ}$ C โดยช่วงอุณหภูมิดังกล่าวจะมีการเปลี่ยนแปลงของ E', E'' และ tan δ อย่างมากและชัดเจน และจุดสูงสุดของค่า tan δ อยู่ที่ -54 $^{\circ}$ C นั่นคือค่าของ Tg ซึ่งต่ำกว่า ยางสูตรเดิม อีกทั้งจะสังเกตได้ว่า ช่วง peak ของ tan δ ซึ่งอยู่ในช่วง ระหว่าง -65 $^{\circ}$ C และ -35 $^{\circ}$ C ยางสูตรใหม่จะแคบกว่าของยางสูตรเก่าที่อยู่ในช่วงระหว่าง -55 $^{\circ}$ C และ -17 $^{\circ}$ C ซึ่งอาจเป็นผลจากการที่ยางสูตรเก่าใช้plasticiser ที่เป็น aromatic oil และใช้ในสัดส่วนที่มากคือ 10 phr



ภาพที่ 3-1 แสดงผลการทดสอบ DMA (Dynamic Mechanical Analysis) ใน Shear Mode ที่ Frequency 1Hz ,Displacement amplitude = 30 µm, Force amplitude = 3N ที่อุณหภูมิ -80°C ถึง 30 °C , scan rate = 4C / min

3.3 การทดสอบ DSC ของยางสูตรสำหรับการใช้งานที่อุณหภูมิต่ำ

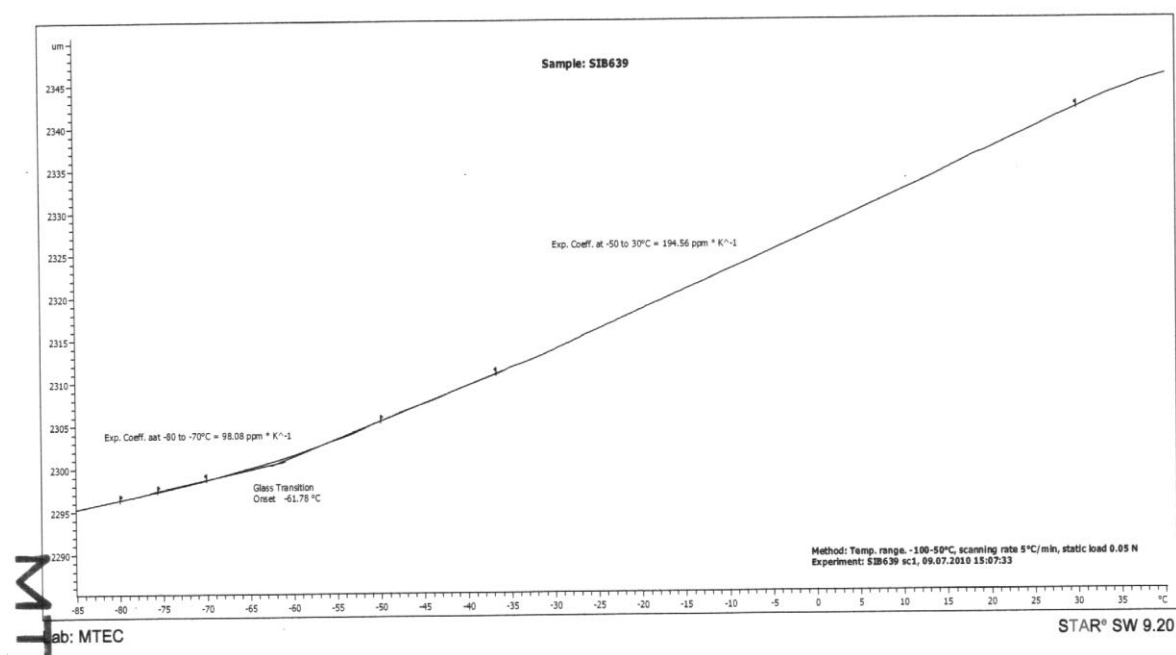
ผลการทดสอบ DSC (Differential Scanning Calorimeter) ด้วยเครื่อง Netzsch DSC 204 ที่มหาวิทยาลัยมหิดล ได้ผลดังแสดงในภาพที่ 3-2 ได้ช่วง Glass transition -66°C ถึง 57.7°C อยู่ที่ ค่า Glass transition temperature อยู่ที่ 60.6°C ซึ่งต่ำกว่าผลที่ได้จาก DMA ข้างต้น และต่ำกว่าผลที่วัดได้จากยางสูตรเดิม



ภาพที่ 3-2 แสดงผลการทดสอบ DSC

3.4 ผลการทดสอบ TMA ของยางสูตรสำหรับการใช้งานที่อุณหภูมิต่ำ

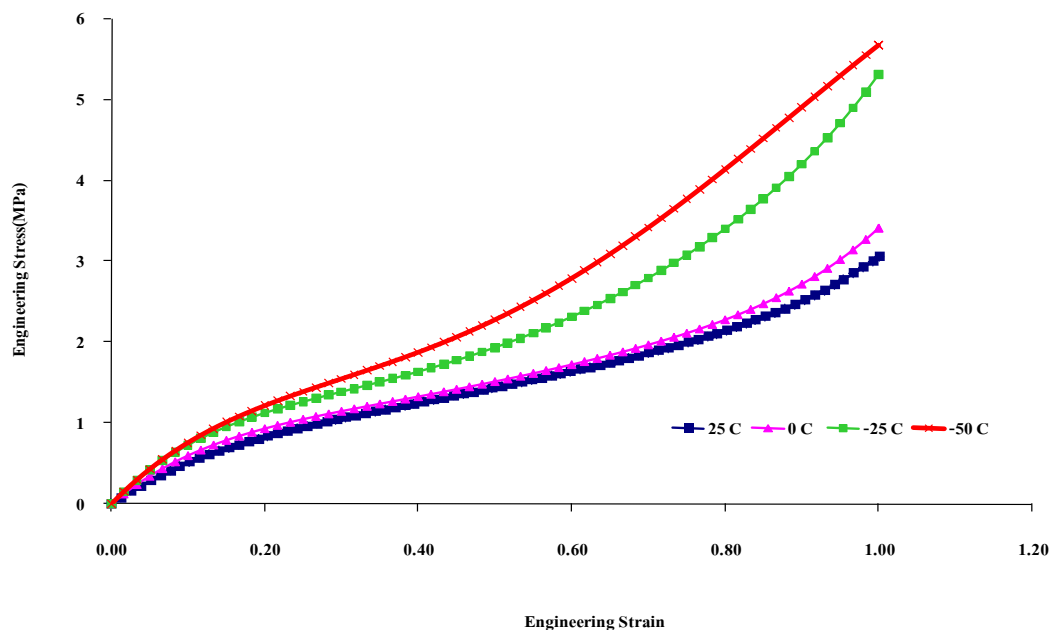
การทดสอบ TMA (Thermal Mechanical Analysis) ทำด้วยเครื่อง Mettler Toledo DMA/SDTA 861 ที่ ศูนย์วิจัยโลหะและวัสดุแห่งชาติ (MTEC) scanning rate = 5°C/min , Static load = 0.05 N ผลการทดสอบแสดงไว้ในภาพที่ 3-3 โดยค่า Glass transition temperature ที่วัดได้คือ -61.78°C ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ได้จาก DSC และต่ำกว่าค่าที่วัดได้จากยางสูตรเดิม



รูปที่ 3-3 แสดงผลการทดสอบ TMA

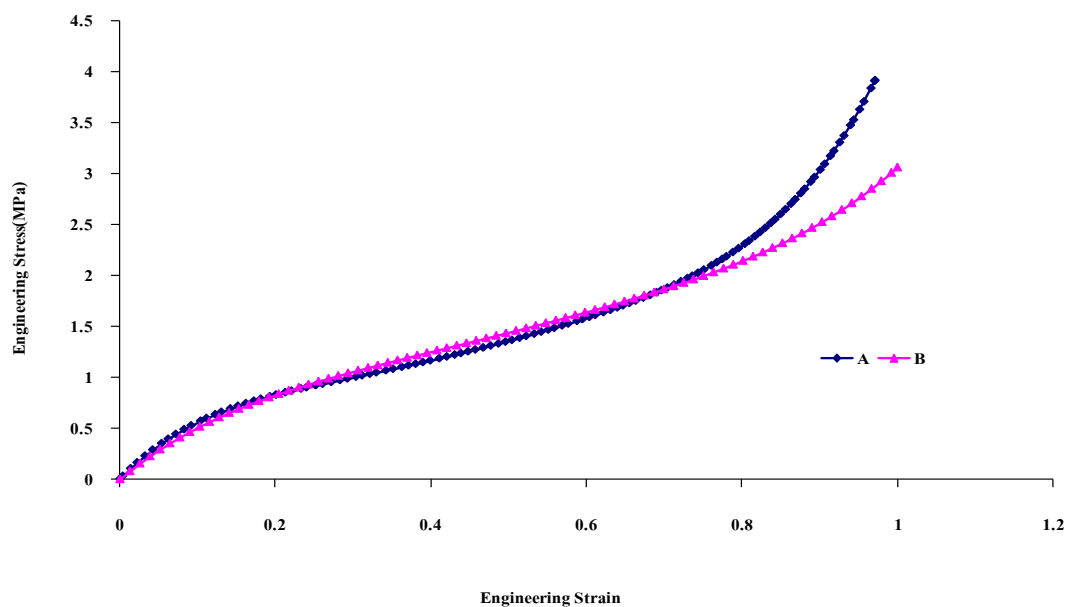
3.5 การเปรียบเทียบผลทดสอบ *Tensile test* ของยางสูตรสำหรับการใช้งานที่อุณหภูมิต่ำและสูตรเดิม

ผลการทดสอบการดึงแกนเดียวของวัสดุยางในหัวข้อ 3.1 ด้วยวิธีการและอุปกรณ์เช่นเดียวกับในหัวข้อ 2.4 หลังนำผลกระทบของมุลลิน(Mullin's effect) ออกแล้ว สามารถนำมาพลอตกราฟระหว่าง Engineering Stress และ Engineering Strain ที่อุณหภูมิต่างๆระหว่าง -50C ถึง 25 องศาเซลเซียส ได้ดังแสดงไว้ในภาพที่ 3-4 จะเห็นได้ว่าสำหรับวัสดุยางที่ได้ปรับปรุงใหม่ ที่อุณหภูมิ 0 และ 25 องศาเซลเซียส เมื่อกำจัดผลของมุลลินออกแล้ว เส้นกราฟระหว่าง Engineering Stress และ Engineering Strain ที่ทั้ง 2 อุณหภูมิมีค่าใกล้เคียงกันมาก แต่ เมื่ออุณหภูมียิ่งต่ำลงความแตกต่างระหว่างเส้นกราฟความสัมพันธ์ของค่าความเค้นวิศวกรรมและค่าความเครียดวิศวกรรมเมื่อเทียบกับที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียสจะยังมีมากขึ้น ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียสเส้นกราฟมีค่าความชันมากที่สุดคล้ายกับวัสดุยางสูตรเดิม

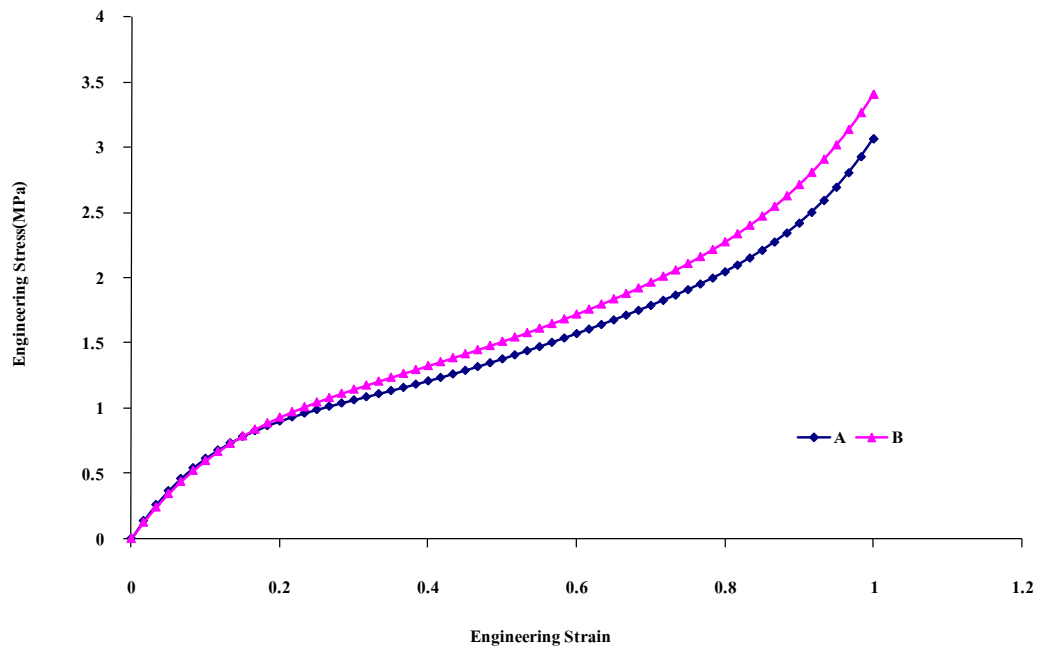


ภาพที่ 3-4 ผลเปรียบเทียบการดึงแกนเดียวของวัสดุยางสูตรใหม่ที่อุณหภูมิแตกต่างกัน

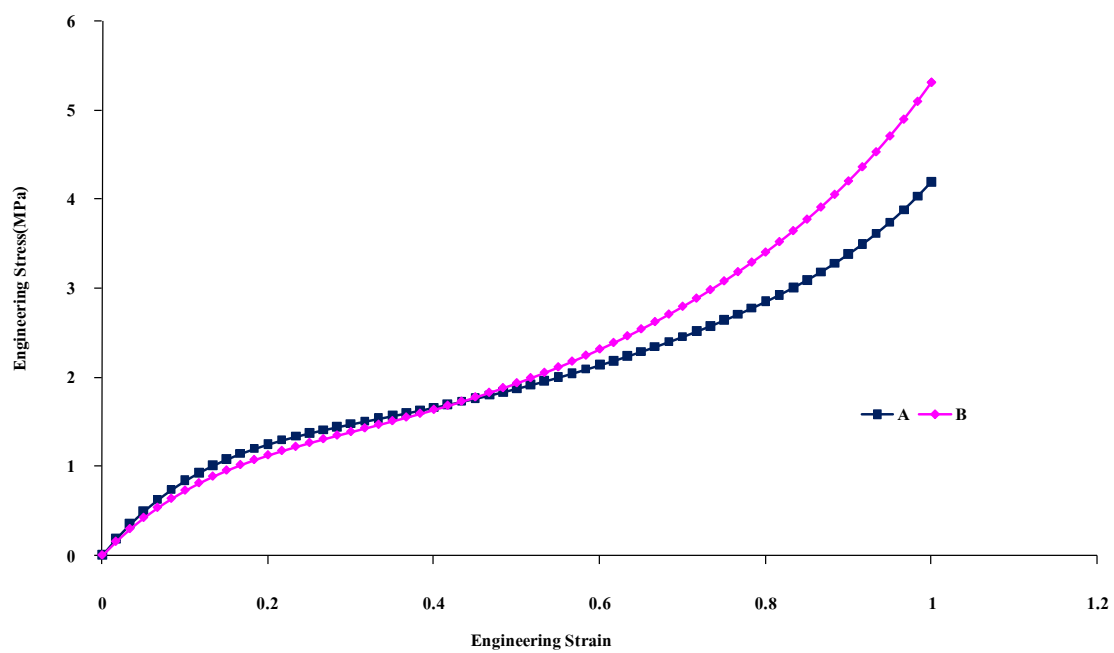
ผลของการทดสอบการดึงของวัสดุยางทั้งสองชนิดเปรียบเทียบกันที่อุณหภูมิต่างๆสามารถแสดงได้ดังภาพที่ 3-5 ถึงภาพที่ 3-8



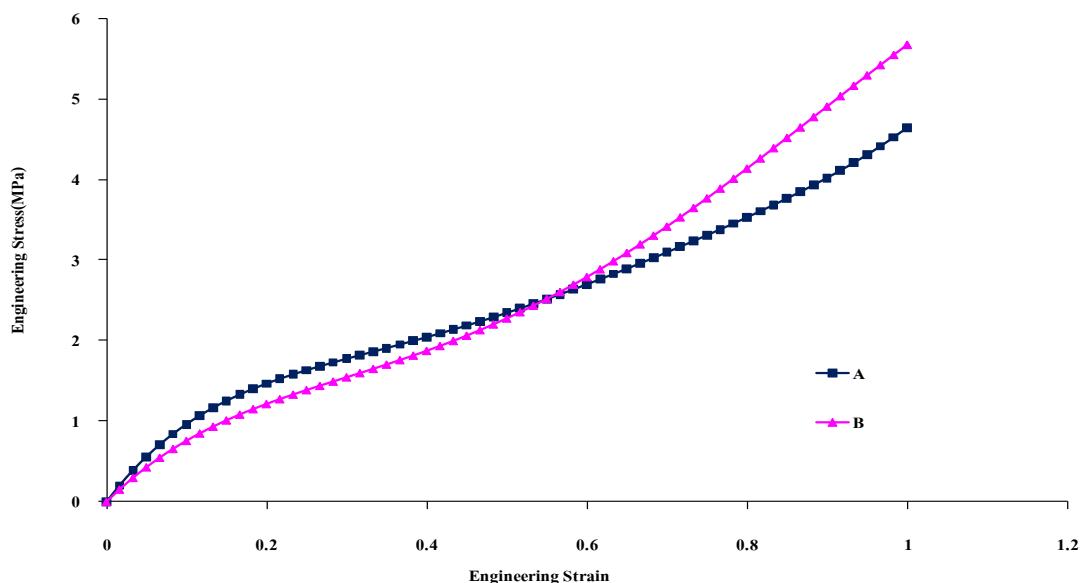
ภาพที่ 3-5 ผลของการทดสอบการดึงของวัสดุยางทั้งสองชนิด (A วัสดุยางสูตรเดิม, B วัสดุยางใหม่) เปรียบเทียบกันที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส (อุณหภูมิห้อง)



ภาพที่ 3-6 ผลของการทดสอบการดึงของวัสดุทั้งสองชนิด (A วัสดุยางสูตรเดิม, B วัสดุยางใหม่) เปรียบเทียบกันที่อุณหภูมิ 0 องศาเซลเซียส



ภาพที่ 3-7 ผลของการทดสอบการดึงของวัสดุทั้งสองชนิด (A วัสดุยางสูตรเดิม, B วัสดุใหม่) เปรียบเทียบกันที่อุณหภูมิ -25 องศาเซลเซียส



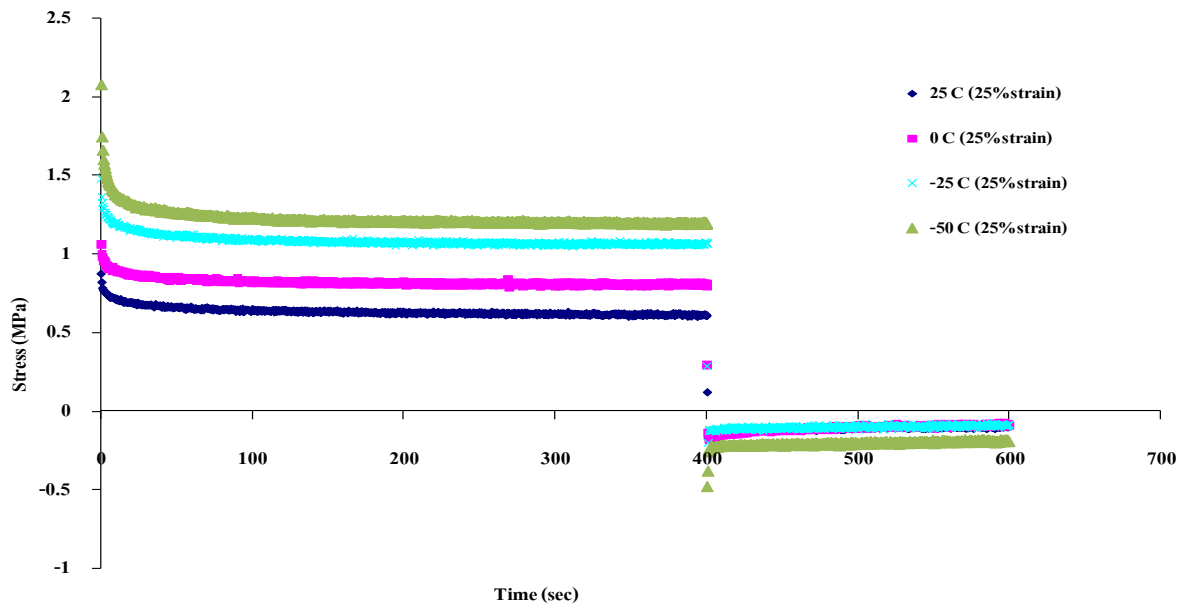
ภาพที่ 3-8 ผลของการทดสอบการดึงของวัสดุยางทั้งสองชนิด (A วัสดุยางสูตรเดิม, B วัสดุยางใหม่) เปรียบเทียบกันที่อุณหภูมิ -50 องศาเซลเซียส

จากภาพที่ 3-5 ถึงภาพที่ 3-8 จะเห็นได้ว่ากราฟการทดสอบแรงดึงของยางทั้งสองสูตรที่อุณหภูมิต่างๆ จะมีค่าใกล้เคียงกันมากที่ความเครียดต่ำกว่า 50% โดย ยางสูตรใหม่(B) มี stiffness น้อยกว่า ยางสูตรเดิม(A) เล็กน้อย

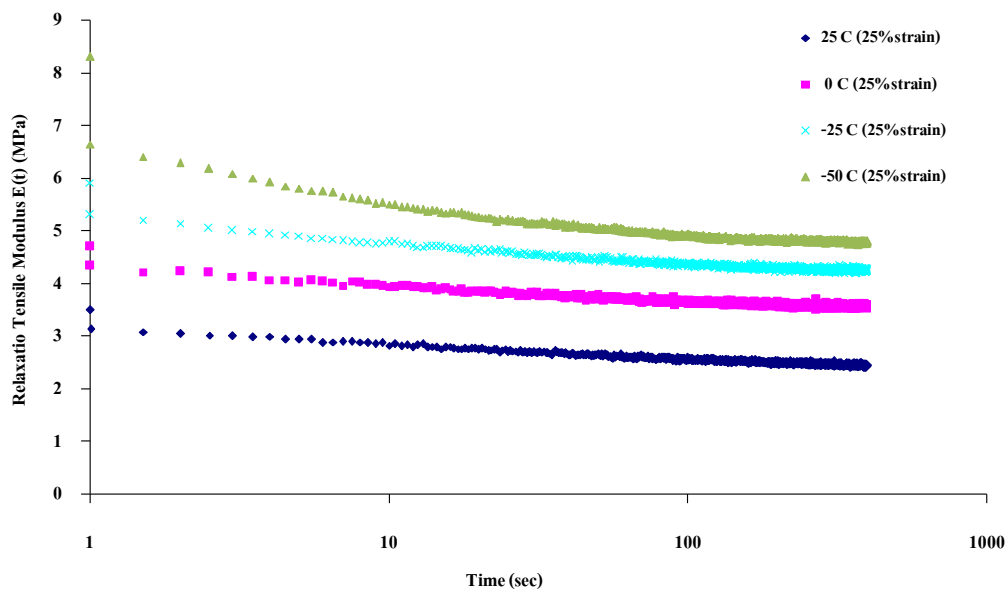
ที่อุณหภูมิห้อง ที่ความเครียดสูงกว่า 80% ยางสูตรเดิม(A) มีกราฟที่มีความชันมากกว่ายางสูตรใหม่ (B) แต่ ที่อุณหภูมิต่ำ (0 °C ถึง -50 °C) และที่ความเครียดสูงกว่า 50% ยางสูตรใหม่(B)มีกราฟที่มีความชันมากกว่า หรือมี stiffness มากกว่า

3.6 ผลเปรียบเทียบผลการทดสอบคลายความเค้น

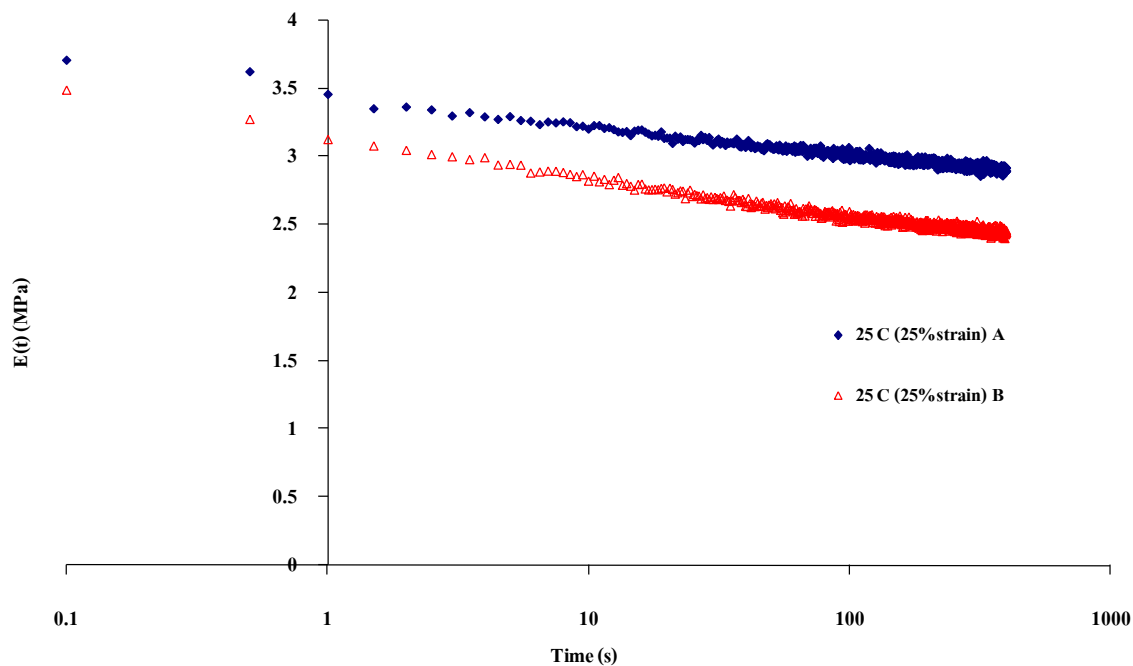
ผลการทดสอบการดึงแกนเดียวของวัสดุยางที่ปรับปรุงสูตรแล้วในหัวข้อ 3.1 ด้วยวิธีการและอุปกรณ์เช่นเดียวกับในหัวข้อ 2.5 ได้แสดงไว้ในภาพที่ 3-9 ถึง ภาพที่ 3-14



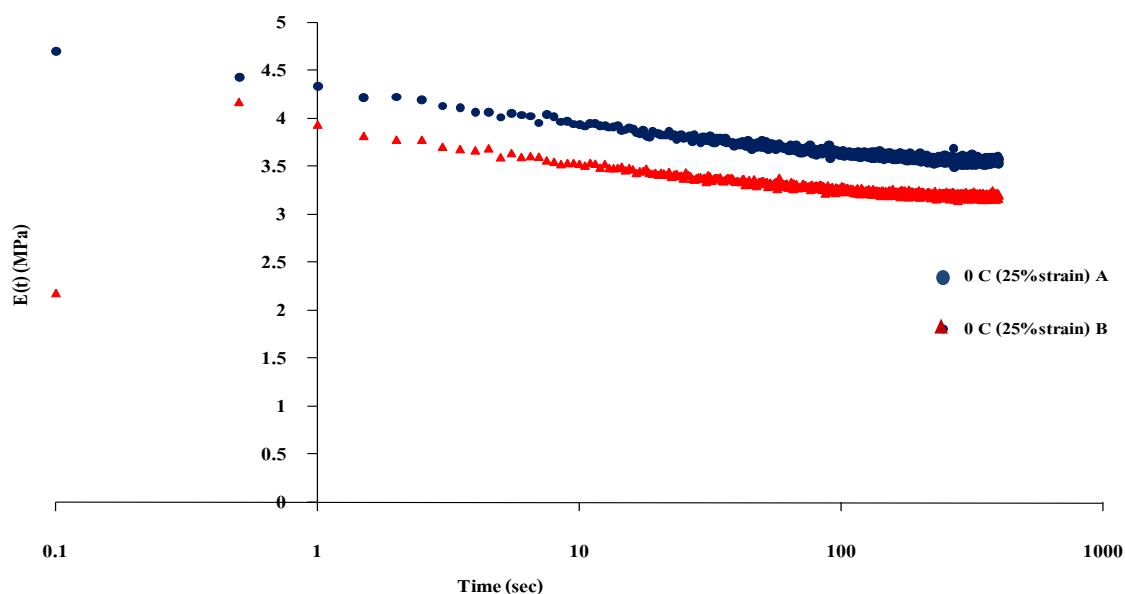
ภาพที่ 3-9 แสดงการเปรียบเทียบการทดสอบการคลายความเค้นของวัสดุยางสูตรใหม่ที่อุณหภูมิแตกต่างกันที่ความเครียดเท่ากับ 25% และการคืนตัว ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส, 0 องศาเซลเซียส, -25 องศาเซลเซียส, -50 องศาเซลเซียส



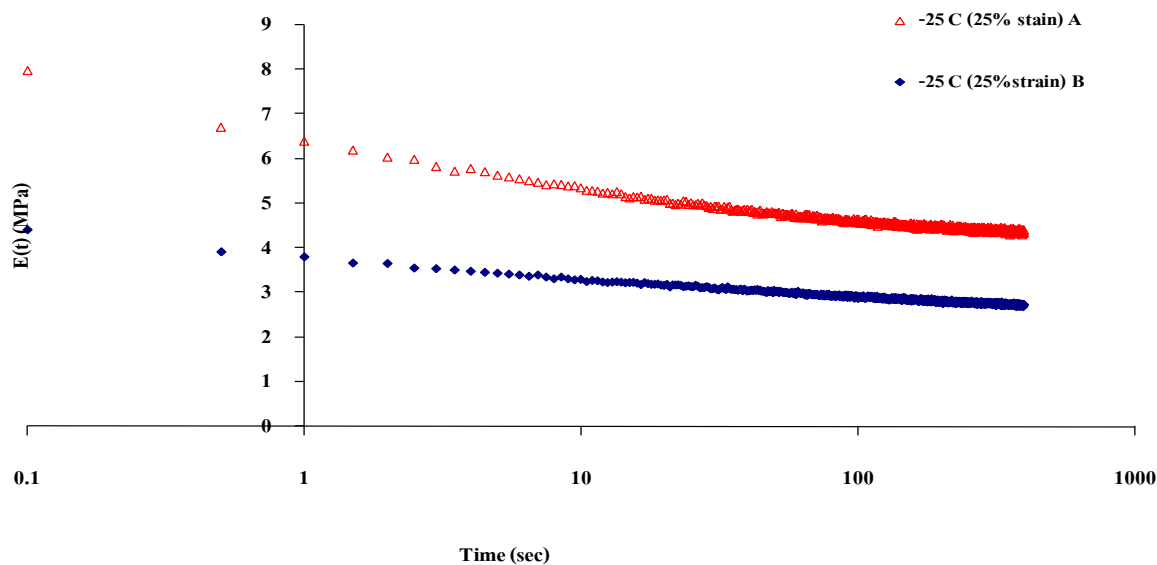
ภาพที่ 3-10 กราฟระหว่างโมดูลัสการผ่อนคลายกับเวลา ของวัสดุยางที่ได้รับการปรับรงแล้วที่อุณหภูมิแตกต่างกันที่ความเครียดเท่ากับ 25% ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส, 0 องศาเซลเซียส, -25 องศาเซลเซียส, -50 องศาเซลเซียส



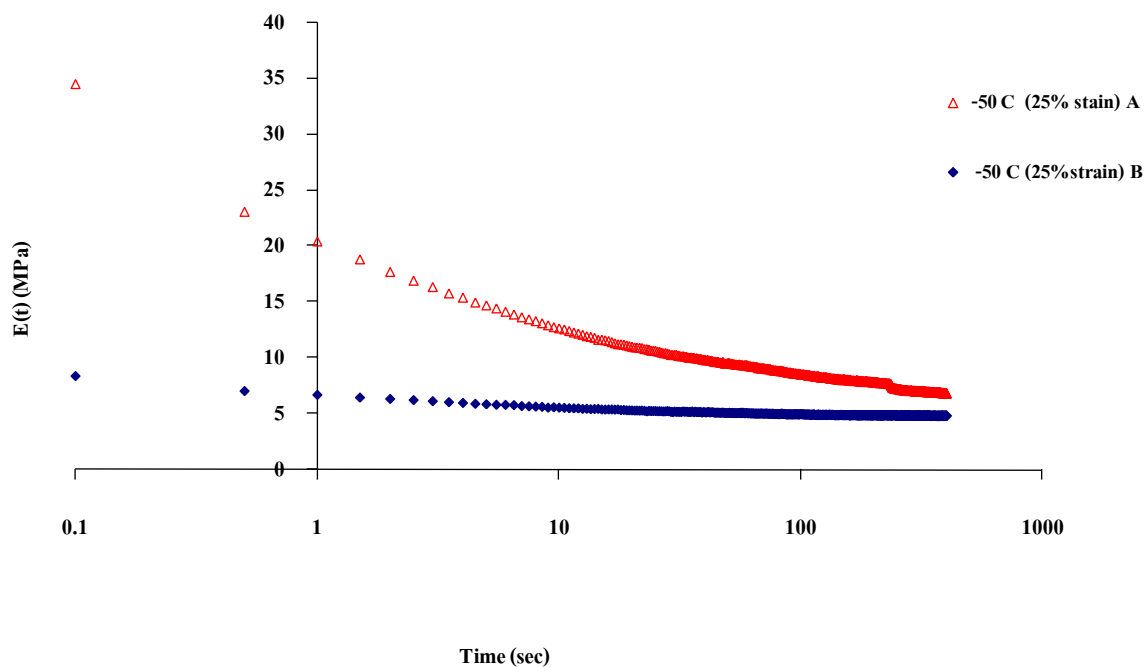
ภาพที่ 3-11 กราฟระหว่างโมดูลัสการผ่อนคลายกับเวลา ของวัสดุยางที่ได้รับการปรับปรุงแล้ว (B) เทียบกับสูตรยางเดิม (A) ที่อุณหภูมิแตกต่างกันที่ความเครียดเท่ากับ 25% ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส



ภาพที่ 3-12 กราฟระหว่างโมดูลัสการผ่อนคลายกับเวลา ของวัสดุยางที่ได้รับการปรับปรุง(B) แล้ว เทียบกับสูตรยางเดิม(A) ที่อุณหภูมิแตกต่างกันที่ความเครียดเท่ากับ 25% ที่อุณหภูมิ 0 องศาเซลเซียส



ภาพที่ 3-13 กราฟระหว่างโมดูลัสการผ่อนคลายกับเวลา ของวัสดุยางที่ได้รับการปรับปรุงแล้ว(B) เทียบกับสูตรยางเดิม (A) ที่อุณหภูมิแตกต่างกันที่ความเครียดเท่ากับ 25% ที่อุณหภูมิ -25 องศาเซลเซียส



ภาพที่ 3-14 กราฟระหว่างโมดูลัสการผ่อนคลายกับเวลา ของวัสดุยางที่ได้รับการปรับปรุงแล้ว (B) เทียบกับสูตรยางเดิม(A) ที่อุณหภูมิแตกต่างกันที่ความเครียดเท่ากับ 25% ที่อุณหภูมิ -50 องศาเซลเซียส

จากการเปรียบเทียบผลการทดสอบข้างต้นจะเห็นได้ว่าที่อุณหภูมิทดสอบทุกอุณหภูมิวัสดุยางใหม่จะมี Relaxation Modulus ต่ำกว่าวัสดุเดิม และความแตกต่างจะชัดเจนขึ้นเมื่ออุณหภูมิต่ำลง ทั้งนี้เป็นเพราะยางสูตรใหม่มี T_g ที่ต่ำลง และมีช่วงกลาสทรานซิชันที่แคบลงจากผลทดสอบ DMA โดยที่อุณหภูมิ $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ ยางสูตรใหม่จะอยู่ในสถานะ Rubbery ช่วงต้น แต่ยางสูตรเก่ายังอยู่ในช่วงปลาย Glass transition และที่อุณหภูมิ $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ ยางสูตรใหม่จะมีสถานะอยู่ในช่วง กลางๆของ Glass transition แต่ยางสูตรเก่ายังอยู่ในช่วงต้นของ Glass transition ซึ่งเข้าไปใกล้ glassy state แล้ว

4. การจำลองพฤติกรรมการคลายความเค้นของวัสดุ ยางที่อุณหภูมิต่างๆด้วย แบบจำลองวัสดุ Linear Viscoelastic

4.1 การหาค่าพารามิเตอร์ในอนุกรมพรีนีย์ (Prony Series)

สำหรับ แบบจำลองวัสดุ แบบ Linear Viscoelastic โมดูลัสการผ่อนคลายความเค้น (Stress Relaxation Modulus) ที่ขึ้นอยู่กับเวลาสามารถเขียนอยู่ในรูปของสมการอนุกรมพรีนีย์ (Prony's series) ได้ดังนี้

$$E(t) = E_0 + \sum_{i=1}^n E_i \exp\left(-\frac{t}{\tau_i}\right) \quad (1)$$

$$E(t) = \frac{\sigma(t)}{\varepsilon_0} \quad (2)$$

โดยที่ $\sigma(t)$ คือ ความเค้นที่เวลา t

ε_0 คือ ความเครียดที่คงไว้ให้คงที่

τ_i คือเวลาการคลายตัว (Relaxation Time)

ซึ่งความสัมพันธ์ข้างต้นสามารถเขียนอยู่ในรูปของอัตราส่วนโมดูลัสการผ่อนคลายความเค้นได้ดังนี้ [2]

$$g(t) = 1 - \sum_{i=1}^N g_i (1 - \exp(-\frac{t}{\tau_i})) \quad (3)$$

เมื่อ $g(t)$ คืออัตราส่วนโมดูลัสการผ่อนคลายความเค้นที่เวลา t

และ

$$g(t) = \frac{E(t)}{E_0} \quad (4)$$

โดยที่

$E(t)$, E_0 คือโมดูลัสผ่อนคลายความเค้นที่เวลา t , และโมดูลัสการผ่อนคลายความเค้นที่ $t = 0$

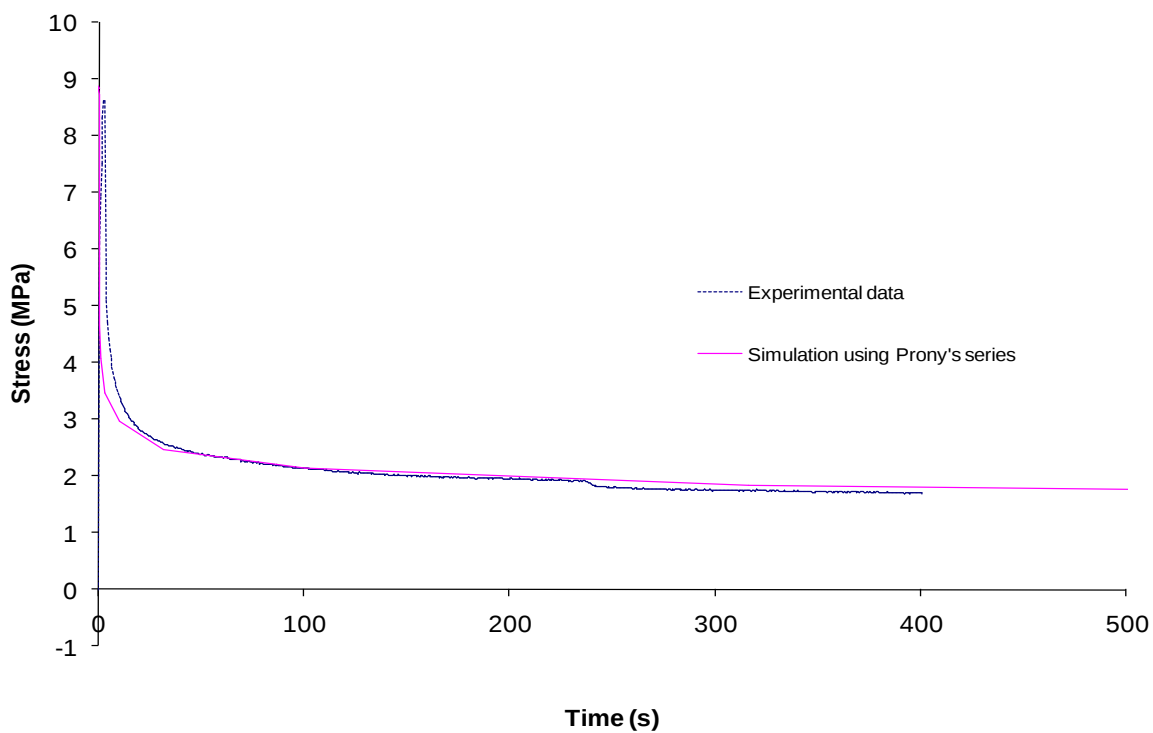
งานวิจัยนี้เราต้องการหาค่าการหาค่าพารามิเตอร์ในอนุกรมโพรนี้ นั่นคือ g_i และ τ_i หรือค่าสเปกตรัมของการผ่อนคลายความเค้น (Relaxation Spectrum) ภายในอนุกรมโพรนี้ ซึ่งเมื่อเราได้ค่าการทดลองการผ่อนคลายความเค้นที่อุณหภูมิ -50 องศาเซลเซียสเราจึงนำข้อมูลที่ได้เพื่อมาหาค่า g_i และ τ_i โดยใช้ข้อมูลจากการทดสอบการผ่อนคลายความเค้นแทนในสมการที่ 1 ถึง 4 โดยค่าของ τ_i จะถูกเลือกให้ครอบคลุมช่วงเวลาที่เกิดการคลายความเค้นให้มากที่สุดและแต่ละค่าของ τ_i ห่างกัน 10 เท่า (1 decade) ค่าสเปกตรัมของการผ่อนคลายความเค้นของยางทั้งสองชนิดได้แสดงไว้ในตารางที่ 4-1 และตารางที่ 4-2 และผลที่ได้จากการจำลองการคลายความเค้นด้วยค่าสเปกตรัมที่อุณหภูมิ -50 องศาเซลเซียส แสดงดังภาพที่ 4-1 และ ภาพที่ 4-2

ตารางที่ 4-1 ค่าค่าสเปกตรัมของการผ่อนคลายความเค้น (Relaxation Spectrum) ของยางคอมปาวด์สูตรเดิม ที่หาจากการทดสอบการผ่อนคลายความเค้นที่ -50 องศาเซลเซียส

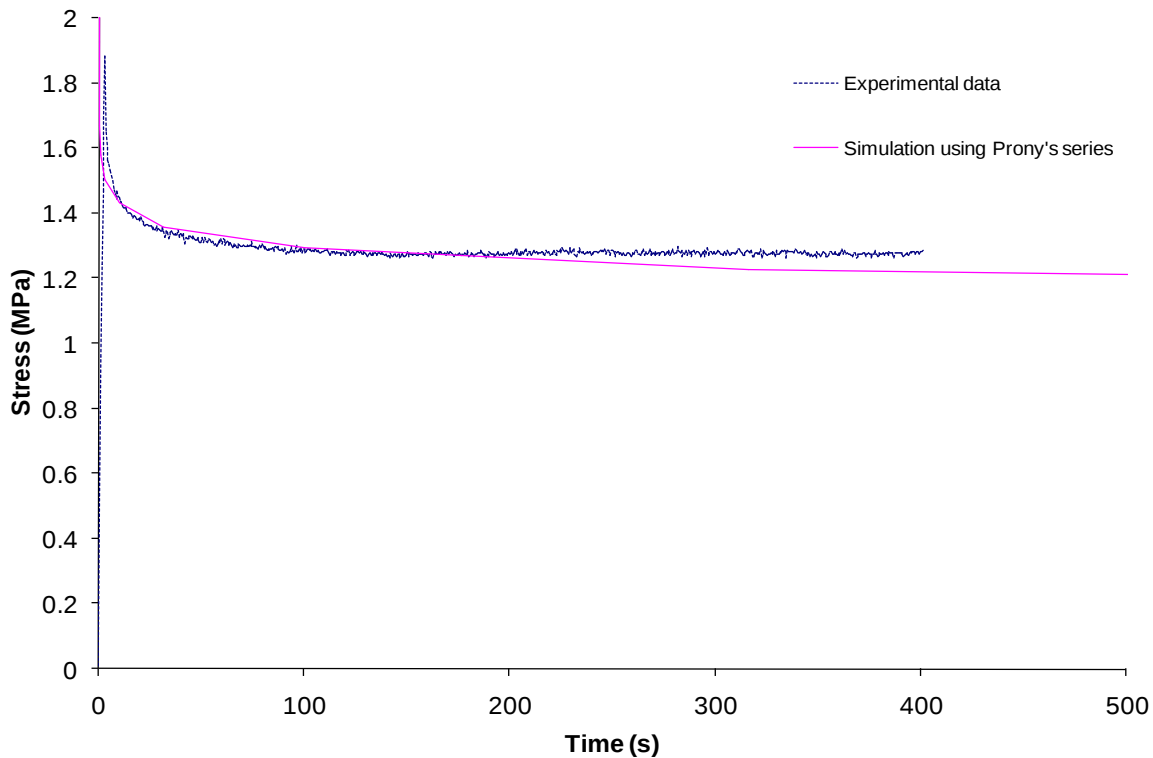
Relaxation Spectrum	
g_i	τ_i (sec)
0.193900488	0.001
0.057704349	0.01
0.187562551	0.1
0.132669904	1
0.125710656	10
0.073148006	100
0.060133491	1000
0.042732126	10000
0.037549233	100000

ตารางที่ 4-2 ค่าค่าสเป็คตรัมของการผ่อนคลายความเค้น (Relaxation Spectrum) ของยางคอมปาวด์สูตรสูตรใหม่ จากการทดสอบการผ่อนคลายความเค้นที่ -50 องศาเซลเซียส

Relaxation Spectrum	
g_i	τ_i (sec)
0.519656906	0.001
0.066666667	0.01
0.115896771	0.1
0.024225526	1
0.025236039	10
0.021463012	100
0.021099313	1000
0.017405608	10000
0.015850903	100000
0.01644253	1000000
0.006408555	10000000
0.032981503	100000000



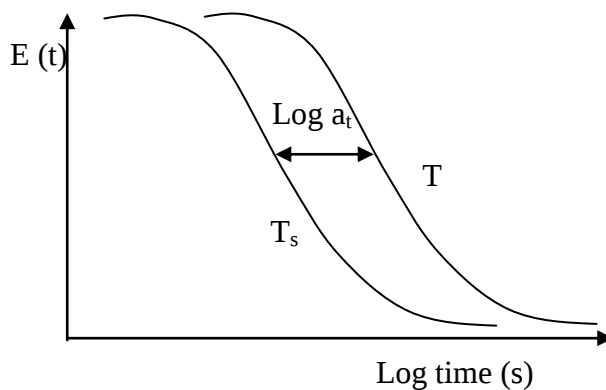
ภาพที่ 4-1 ผลการจำลองการผ่อนคลายความเค้นที่อุณหภูมิ -50 องศาเซลเซียส ของยางสูตรเดิม (A)



ภาพที่ 4-2 ผลการจำลองการผ่อนคลายความเค้นที่อุณหภูมิ -50 องศาเซลเซียส ของยางสูตรใหม่ (B)

4.2 การหาค่าเลื่อนเวลา (Shift Factor)

พฤติกรรมวิสโคอีลาสติกเช่นการผ่อนคลายความเค้นจะขึ้นอยู่กับเวลาและอุณหภูมิ โดยเมื่อพลอตกราฟการผ่อนคลายความเค้นบนสเกล Log time ที่อุณหภูมิต่างกัน กราฟจะสามารถวางทับซ้อนกันได้เมื่อเลื่อนกราฟจากอุณหภูมิอ้างอิง T_s ไปในแนวระนาบไปยังกราฟที่อุณหภูมิ T โดยระยะเลื่อนในแนวระนาบดังกล่าวคือค่า $\log a_t$ และ a_t เรียกว่า ค่าเลื่อนเวลา(Shift Factor) ดังแสดงในภาพที่ 4-3 โดยผลจากการทดสอบการคลายความเค้นที่อุณหภูมิ -50 องศาเซลเซียส ถึง อุณหภูมิห้อง สามารถนำมาคำนวณหาค่าเลื่อนเวลา (Shift Factor) ได้ดังแสดงในตารางที่ 4-3



ภาพที่ 4-3 พฤติกรรมวิสโคอีลาสติกเช่นการผ่อนคลายความเค้นที่ขึ้นอยู่กับเวลาและอุณหภูมิ

ในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้สมการวิลเลียม-แลนเดล-เฟอรี่ (Williams - Landel - Ferry Equation : WLF) เพื่อแสดงถึงการเปลี่ยนแปลงของ shift factor a_T ซึ่งขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ ดังแสดงในสมการที่ 5

$$\log a_T = \frac{C_1(T - T_s)}{C_2 + (T - T_s)} \quad (5)$$

โดย C_1, C_2 คือค่าคงที่

T คืออุณหภูมิที่สนใจ

T_s คืออุณหภูมิอ้างอิง

เพื่อใช้ในการ คำนวณ ค่า $\log a_T$ ที่วัดได้จากการทดสอบและให้อุณหภูมิอ้างอิงคืออุณหภูมิ -50 องศาเซลเซียส ซึ่งแสดงไว้ในตารางที่ 4-3 (ของขงสูตร A) และ ตารางที่ 4-5 (ของขงสูตร B) โดยได้ค่าคงที่ที่ใช้ในสมการ (5) ดังได้แสดงไว้ในตารางที่ 4-4 (ของขงสูตร A) และตารางที่ 4-6 (ของขงสูตร B)

ตารางที่ 4-3 ค่าเลื่อนเวลา (Shift Factor) ที่วัดได้ที่อุณหภูมิต่างๆ, อุณหภูมิอ้างอิง T_s คือ -50 องศาเซลเซียส ของขงสูตรเดิม(A)

$\log (a_T)$	อุณหภูมิ($^{\circ}C$)
-4.40	25
-3.34	0
-0.67	-25
0	-50

ตารางที่ 4-4 ค่าคงที่ของสมการ WLF ที่หาได้ โดย อุณหภูมิอ้างอิง T_s คือ -50 องศาเซลเซียส

C_1	C_2
14.40	170.27

ตารางที่ 4-5 ค่าเลื่อนเวลา (Shift Factor) ที่อุณหภูมิต่างๆ อุณหภูมิอ้างอิง T_s คือ -50 องศาเซลเซียส ของขงสูตรใหม่ (B)

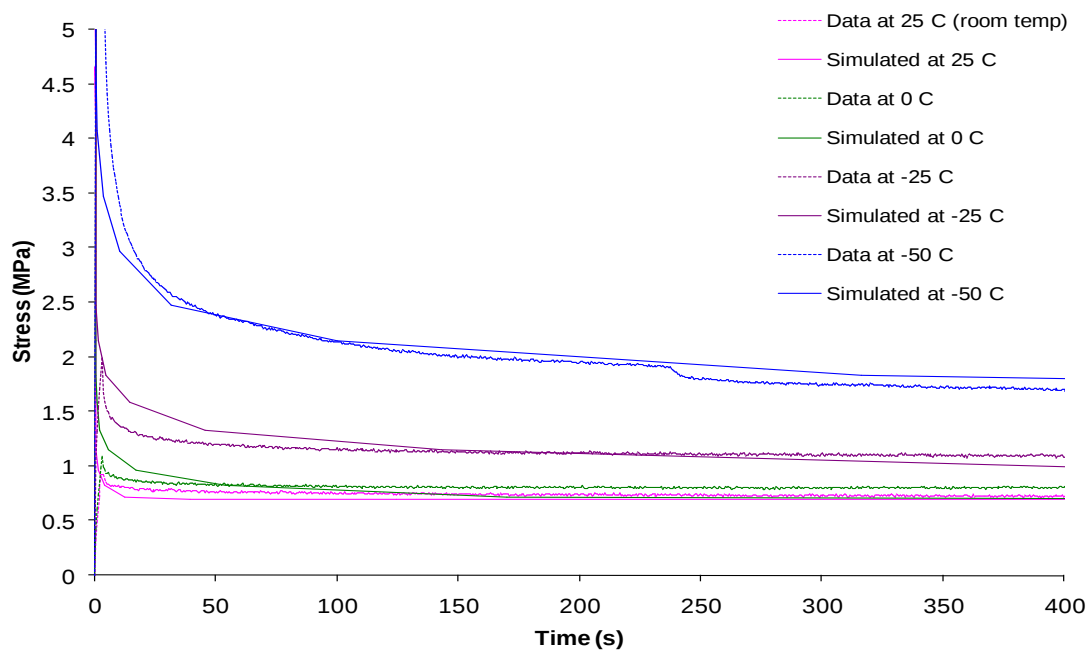
$\log (a_T)$	อุณหภูมิ($^{\circ}C$)
-6.41	25
-2.97	0
-2.46	-25
0	-50

ตารางที่ 4-6 ค่าคงที่ของสมการ WLF ที่หาได้ โดย อุณหภูมิอ้างอิง T_s คือ -50 องศาเซลเซียส ของยางสูตรใหม่ (B)

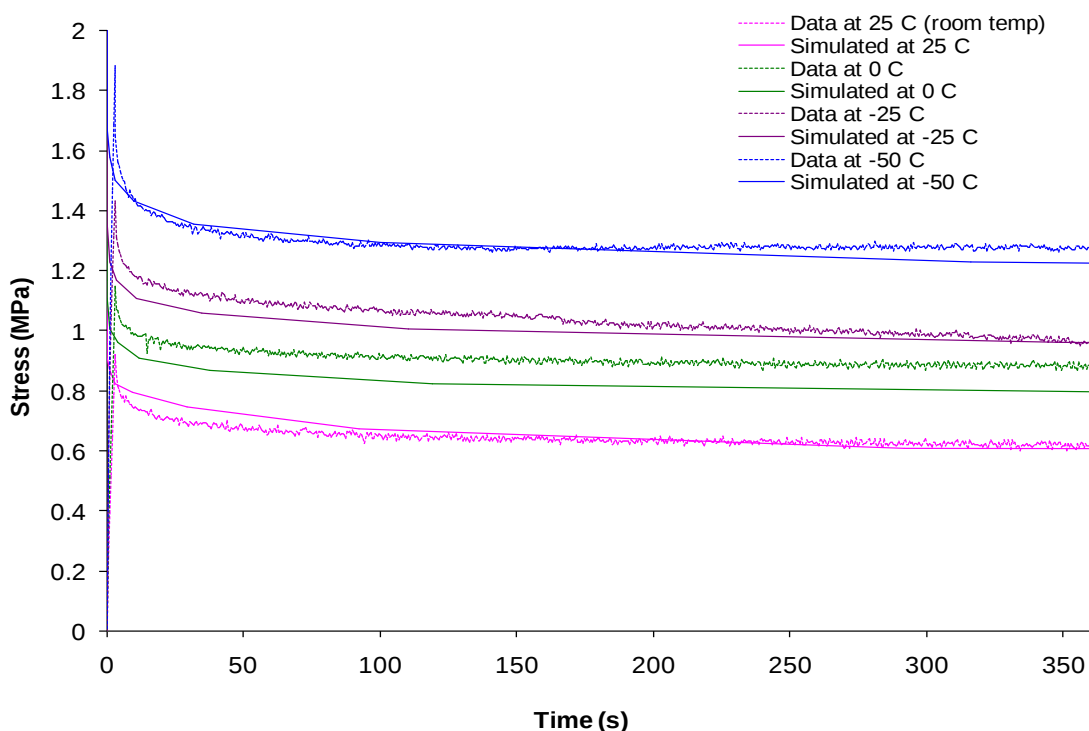
C_1	C_2
22.20	200.92

4.3 การจำลองการคลายผ่อนคลายความเค้นที่อุณหภูมิต่างๆโดยใช้ *Prony Series* และ สมการ *WLF*

เมื่อนำ Prony Series และ สมการ WLF ที่มีค่าพารามิเตอร์ที่หาได้จากการทดสอบ นั่นคือ g_i , τ_i และ C_1 , C_2 มาจำลองการผ่อนคลายความเค้นที่อุณหภูมิต่างๆ จะได้ผลการเปรียบเทียบระหว่างผลการจำลองกับการผลการทดสอบการคลายความเค้นที่ความเครียด 25 % ที่อุณหภูมิต่างๆของวัสดุยางทั้งสองชนิดดังสามารถแสดงไว้ในภาพที่ 4-4 และภาพที่ 4-5 โดย ค่า g_i , τ_i และ C_1 , C_2 และให้อุณหภูมิอ้างอิงคือ -50 องศาเซลเซียส เป็นค่าที่โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ต้องการ เพื่อใช้จำลองพฤติกรรมวิสโคอีลาสติกของวัสดุยาง



ภาพที่ 4-4 ผลการเปรียบเทียบระหว่างผลการจำลองกับการผลการทดสอบการคลาย ความเค้นที่ความเครียด 25 % ที่อุณหภูมิต่างๆของวัสดุยางเดิม (A)



ภาพที่ 4-5 ผลการเปรียบเทียบระหว่างผลการจำลองกับการผลการทดสอบการคลาย ความเค้นที่ ความเครียด 25 % ที่อุณหภูมิต่างๆของวัสดุยางใหม่ (B)

จากภาพที่ 4-4 ถึง 4-5 จะเห็นได้ว่า การใช้แบบจำลองแบบวัสดุ linear viscoelastic ที่ใช้ Prony Series และ shift factor ตามสมการ WLF ด้วยชุดพารามิเตอร์ที่หามาได้ จะสามารถจำลองพฤติกรรมของการคลายความเค้นของวัสดุยางทั้งสองที่ อุณหภูมิ ตั้งแต่ -50°C ถึง 25°C ได้ดีใกล้เคียงผลทดสอบ ซึ่งเราจะนำไปใช้ในการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ต่อไป

5 การวิเคราะห์การใช้งานล้อยางตันเบื้องต้นด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

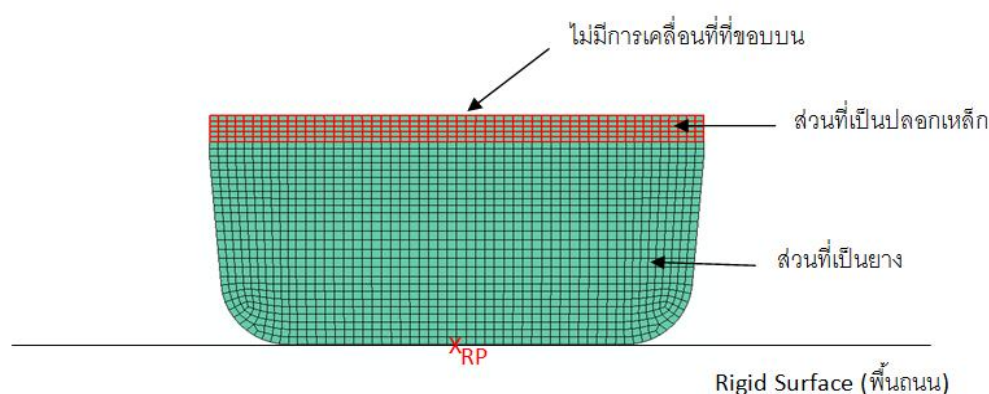
ในการพัฒนาผลิตภัณฑ์ล้อยางตัน เราสามารถใช้การวิเคราะห์ ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อจำลองการใช้งานของล้อยางเพื่อดูแนวโน้มประสิทธิภาพของผลิตภัณฑ์ ก่อนจะ สร้างผลิตภัณฑ์ต้นแบบจริง อีกทั้ง จะเป็นการประหยัดวัสดุและเวลาในการลองผิดลองถูกในการทำผลิตภัณฑ์ต้นแบบและทดสอบ

5.1 การวิเคราะห์การรับแรงและการคืนตัวของล้อยางตันที่อุณหภูมิต่างๆ

ในโครงการนี้ได้ทำการจำลองการรับภาระของล้อยางตันโดยการรับภาระกดด้วยแรงคงที่ ขนาด 1,000 Kg เป็นเวลา 60 วินาที และปล่อยให้ล้อยางคืนตัวหลังจากภาระออก และเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ของล้อยางที่ทำจากยางสูตรเดิม(A)และยางสูตรใหม่(B)ที่อุณหภูมิห้อง 25°C และที่อุณหภูมิ -25°C ซึ่งเป็นอุณหภูมิทั่วไปในห้องเย็นที่ใช้ในอุตสาหกรรมแช่แข็ง

5.1.1 การสร้างแบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์

ในการวิเคราะห์ได้สร้างแบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อจำลองการรับภาระแรงกดที่อุณหภูมิต่างๆของล้อยางดันแบบ Press-on หน้าตัดดังภาพที่ 5-1 ได้ใช้แบบจำลองแบบ 2 มิติ และทำการจำลองโดยใช้โปรแกรมABAQUS 6.8 โดยใช้เงื่อนไขขอบเขตดังแสดงไว้ในภาพที่ 5-1 การให้ภาระในการจำลองทำการให้ภาระที่จุดอ้างอิง (Reference Point, RP) ที่พื้นถนนด้วยแรงกดที่ ขนาด 1000 Kg ในการจำลองได้ทำการสร้าง Mesh ดังแสดงไว้ในภาพที่ 5-1 ได้เลือก เอลิเมนต์ที่ใช้คือ CP4R (Plane Strain Linear Element with Reduced integration) ในแบบจำลองมีวัสดุสองประเภทคือเหล็ก(บล็อกเหล็ก)และวัสดุยาง เลือกให้วัสดุเหล็กเป็นวัสดุแบบ Isotropic Linear Elastic โดยมีค่า Young's Modulus คือ 200 GPa และ Poisson's Ratio คือ 0.3 และยางเป็นวัสดุแบบ Visco-Hyperelastic แบบอัดตัวไม่ได้ โดยค่า พารามิเตอร์ในส่วนที่เป็น Viscoelastic ของยางทั้งสองชนิดได้แสดงไว้ในหัวข้อที่ 4.1 ส่วนที่เป็น Hyperelastic ได้เลือกแบบจำลองแบบ Neo-Hookean โดยค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองดังกล่าวสามารถได้จากข้อมูลที่ได้จากการทดสอบดึงแกนเดียว (uniaxial tensile test) ค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลอง Neo-Hookean ซึ่งก็คือค่า C_{10} ของวัสดุยางทั้งสองได้แสดงไว้ในตารางที่ 5-1



ภาพที่ 5-1 แสดงแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์และเงื่อนไขขอบเขตในการจำลอง

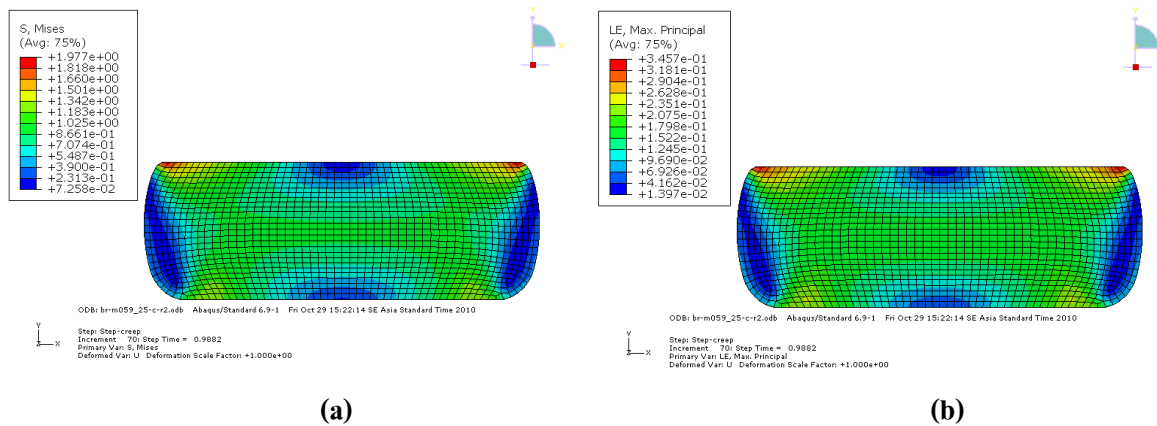
ตารางที่ 5-1 ค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลอง Neo-Hookean

วัสดุ	ค่า C_{10}
เดิม	6.0
สูตรใหม่	4.0

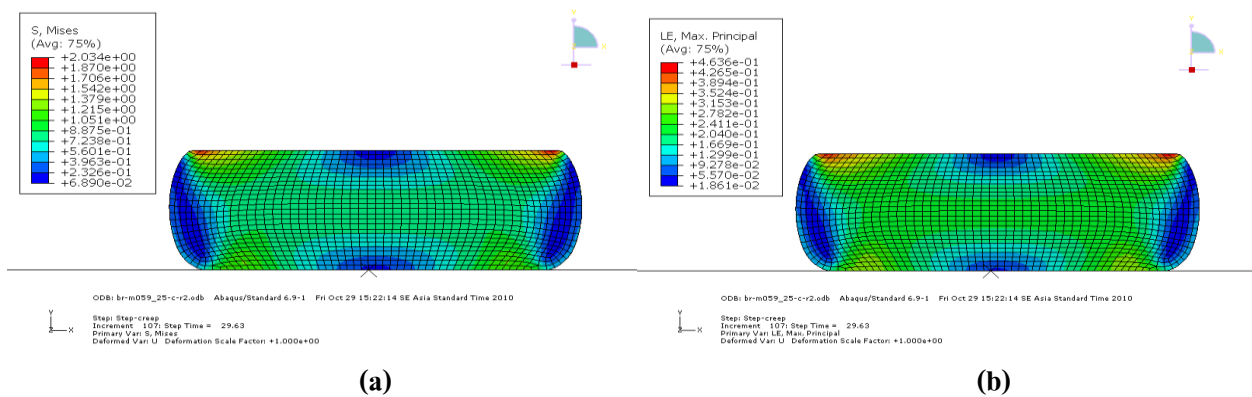
5.1.2 ผลการวิเคราะห์ทางไฟไนต์เอลิเมนต์

จากผลการจำลองการกดด้วยแรงกดที่ ขนาด 1,000 Kg เป็นเวลา 60 วินาที และปล่อยให้ล้อยางคืนตัวหลังจากภาระออก สามารถแสดงตัวอย่างการกระจายตัวของความเค้นของล้อยางที่ทำจากยางสูตรเดิม

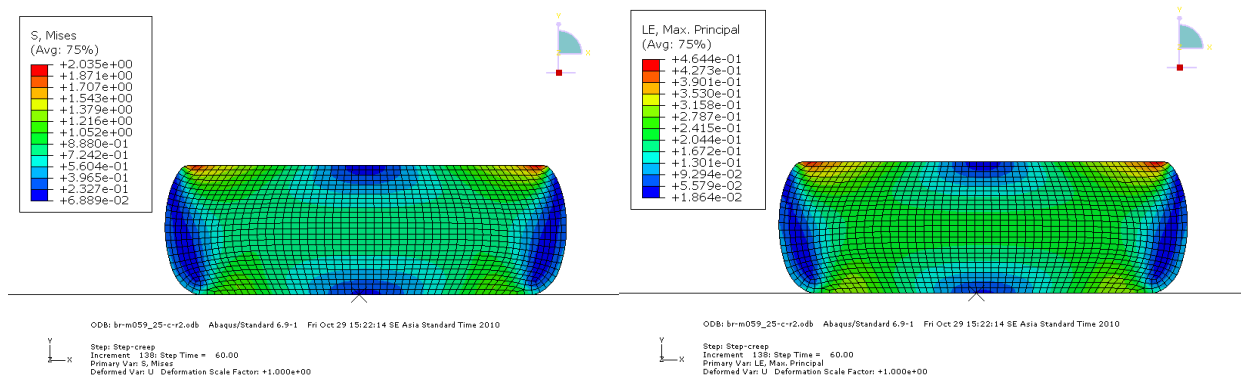
(A) ที่อุณหภูมิห้อง 25°C และที่อุณหภูมิ -25°C ซึ่งเป็นอุณหภูมิทั่วไปในห้องเย็นที่ใช้ในอุตสาหกรรมแช่แข็ง ที่เวลาต่างๆ ดังได้แสดงไว้ในภาพที่ 5-2 ถึงภาพที่ 5-13 และตัวอย่างการกระจายตัวของความเค้นของล้อยางที่ทำจากยางสูตรใหม่(B) ที่อุณหภูมิห้อง 25°C และที่อุณหภูมิ -25°C ที่เวลาต่างๆ ดังได้แสดงไว้ในภาพที่ 5-14 ถึงภาพที่ 5-23



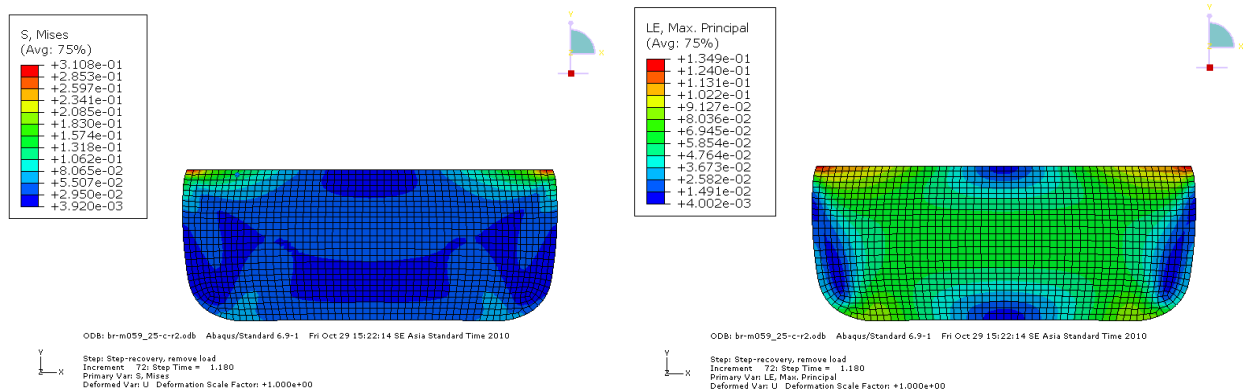
ภาพที่ 5-2 แสดงผลการกระจายตัวของ (a) ความเค้น Von Mises (b) ความเครียดหลักสูงสุดในส่วนยางของ ล้อยางตัน(สูตรเดิม A) ที่อุณหภูมิ 25°C ที่เวลา 1 วินาทีหลังจากรับภาระ 1,000 Kg



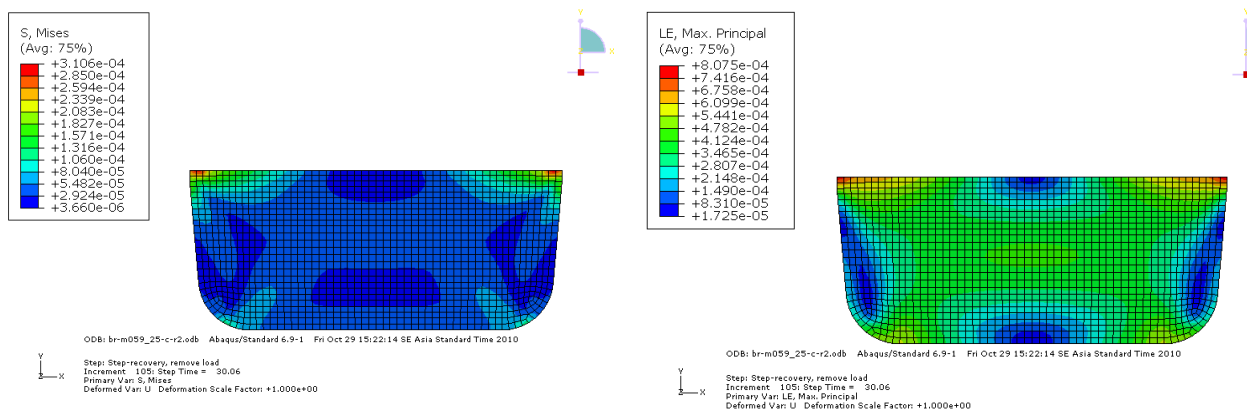
ภาพที่ 5-3 แสดงผลการกระจายตัวของ (a) ความเค้น Von Mises (b) ความเครียดหลักสูงสุดในส่วนยางของ ล้อยางตัน(สูตรเดิม A) ที่อุณหภูมิ 25°C ที่เวลา 30 วินาทีหลังจากรับภาระ 1,000 Kg



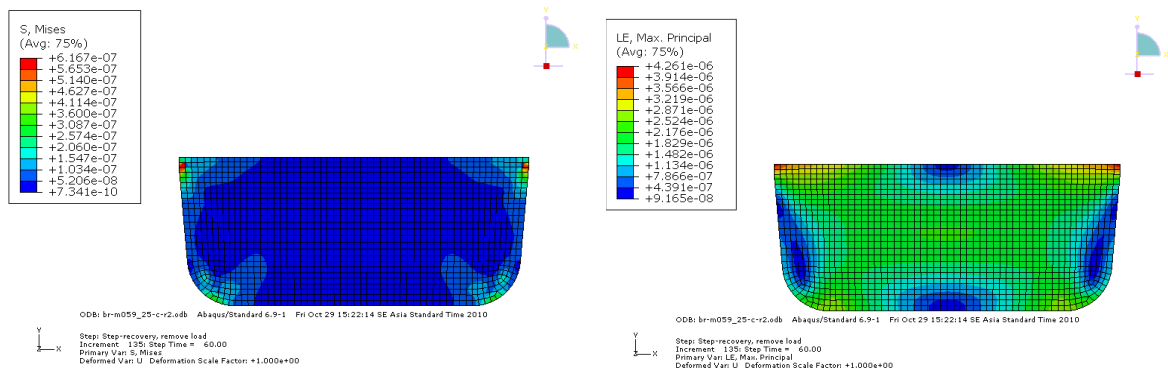
ภาพที่ 5-4 แสดงผลการกระจายตัวของ (a) ความเค้น Von Mises (b) ความเค้นหลักสูงสุดในส่วนยางของ ล้อยางตัน(สูตรเดิม A) ที่อุณหภูมิ 25 °C ที่เวลา 60 วินาทีหลังจากรับภาระ 1,000 Kg



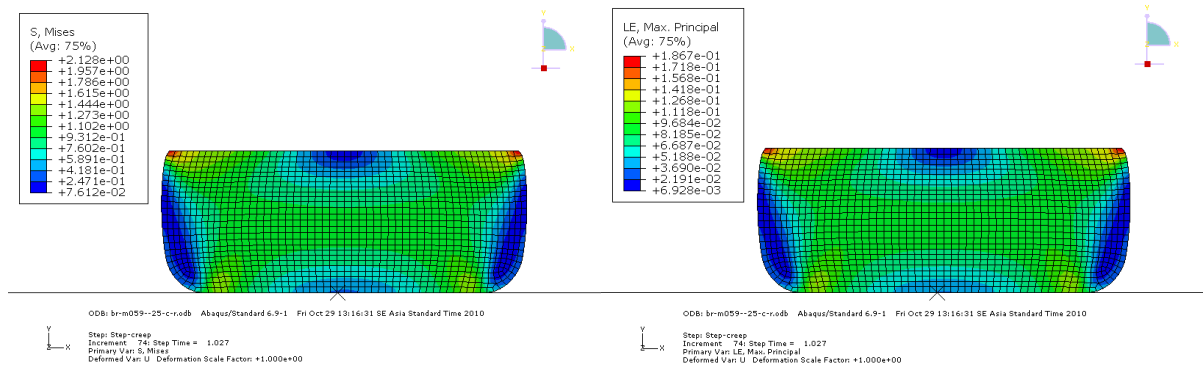
ภาพที่ 5-5 แสดงผลการกระจายตัวของ (a) ความเค้น Von Mises (b) ความเค้นหลักสูงสุดในส่วนยางของ ล้อยางตัน(สูตรเดิม A) ที่อุณหภูมิ 25 °C ที่เวลา 1 วินาทีหลังจากเอาภาระ 1,000 Kg ออก



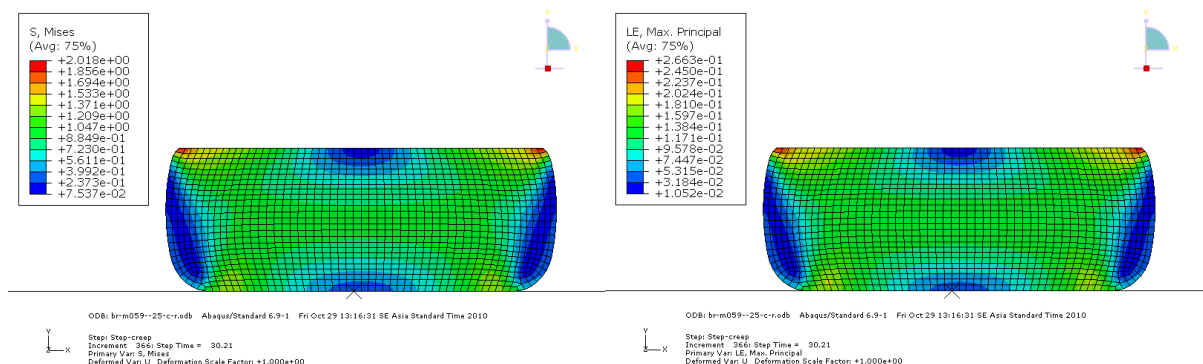
ภาพที่ 5-6 แสดงผลการกระจายตัวของ (a) ความเค้น Von Mises (b) ความเค้นหลักสูงสุดในส่วนยางของ ล้อยางตัน(สูตรเดิม A) ที่อุณหภูมิ 25 °C ที่เวลา 30 วินาทีหลังจากเอาภาระ 1,000 Kg ออก



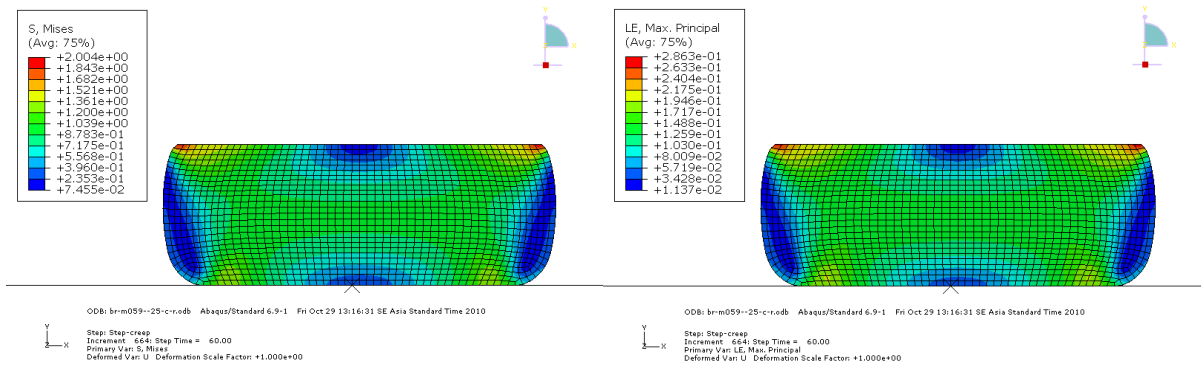
ภาพที่ 5-7 แสดงผลการกระจายตัวของ (a) ความเค้น Von Mises (b) ความเค้นหลักสูงสุดในส่วนยางของ ล้อยางตัน(สูตรเดิม A) ที่อุณหภูมิ 25 °C ที่เวลา 60 วินาทีหลังจากเอภาระ 1,000 Kg ออก



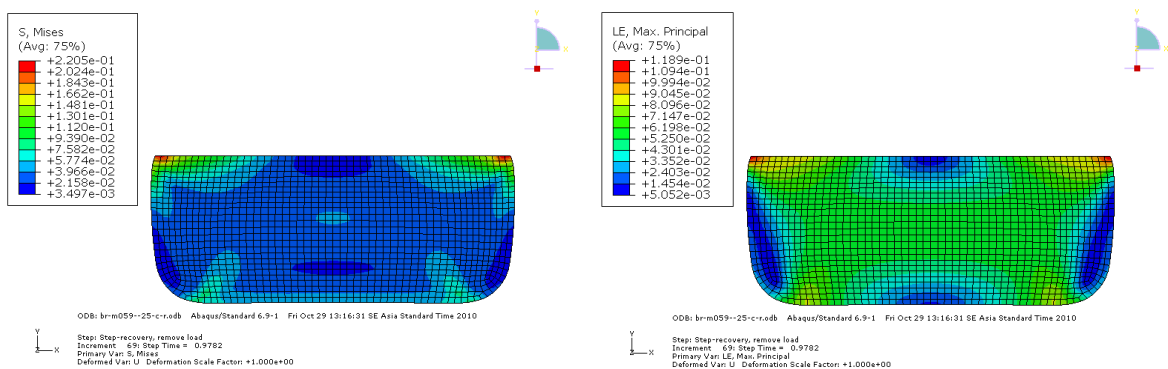
ภาพที่ 5-8 แสดงผลการกระจายตัวของ (a) ความเค้น Von Mises (b) ความเค้นหลักสูงสุดในส่วนยาง (สูตรเดิม A) ที่อุณหภูมิ -25 °C ที่เวลา 1 วินาทีหลังจากรับภาระ 1,000 Kg



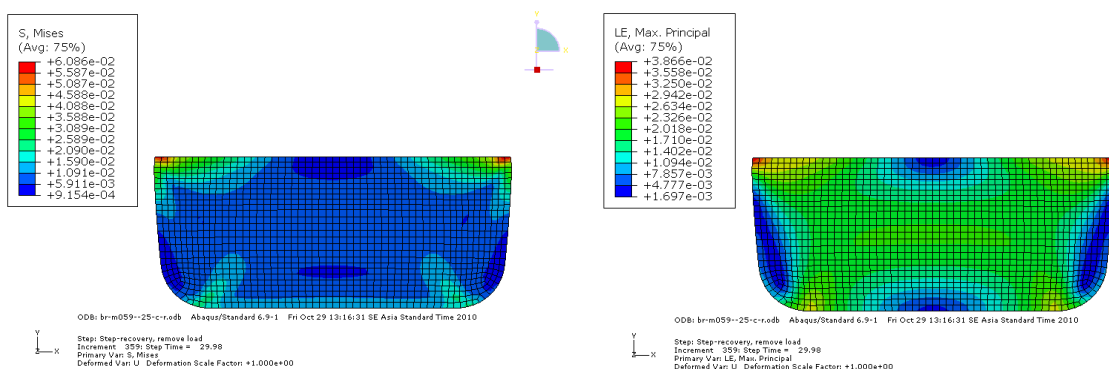
ภาพที่ 5-9 แสดงผลการกระจายตัวของ (a) ความเค้น Von Mises (b) ความเค้นหลักสูงสุดในส่วนยาง (สูตรเดิม A) ที่อุณหภูมิ -25 °C ที่เวลา 30 วินาทีหลังจากรับภาระ 1,000 Kg



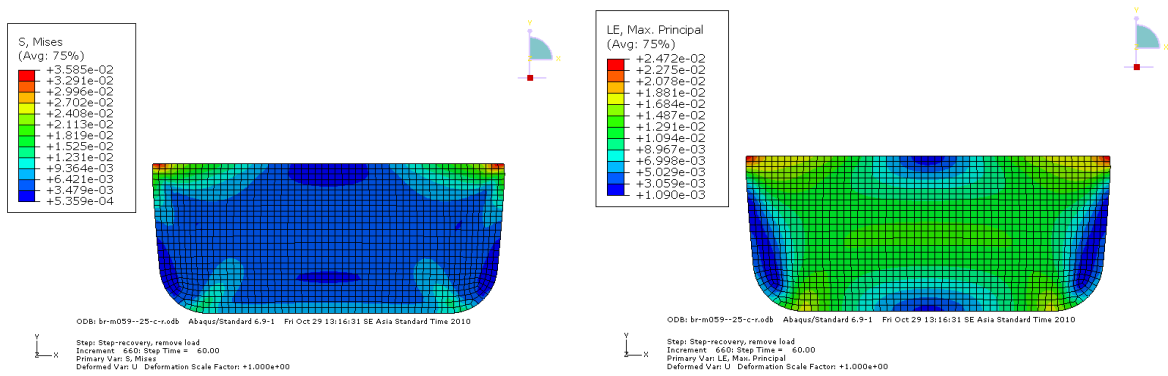
ภาพที่ 5-10 แสดงผลการกระจายตัวของ (a) ความเค้น Von Mises (b) ความเครียดหลักสูงสุดในส่วนยาง (สูตรเดิม A) ที่อุณหภูมิ -25°C ที่เวลา 60 วินาทีหลังจากรับภาระ 1,000 Kg



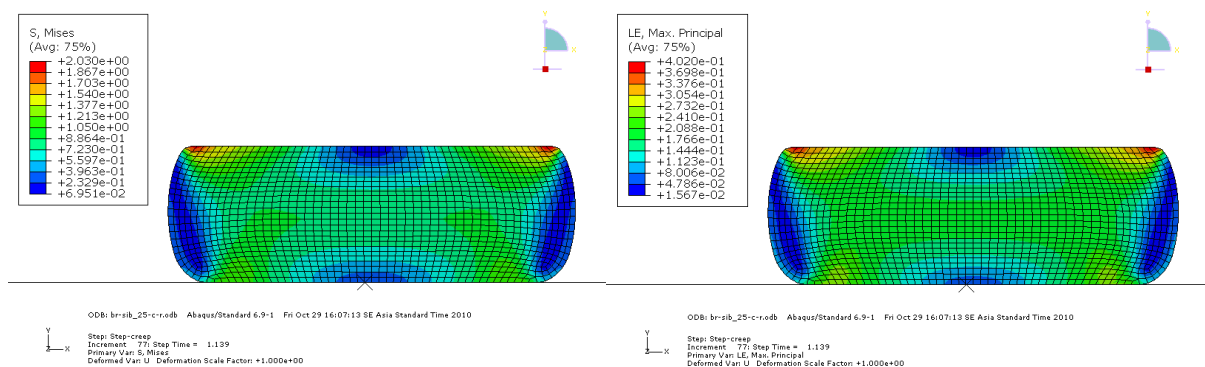
ภาพที่ 5-11 แสดงผลการกระจายตัวของ (a) ความเค้น Von Mises (b) ความเครียดหลักสูงสุดในส่วนยาง (สูตรเดิม A) ที่อุณหภูมิ -25°C ที่เวลา 1 วินาทีหลังจากเอาภาระ 1,000 Kg ออก



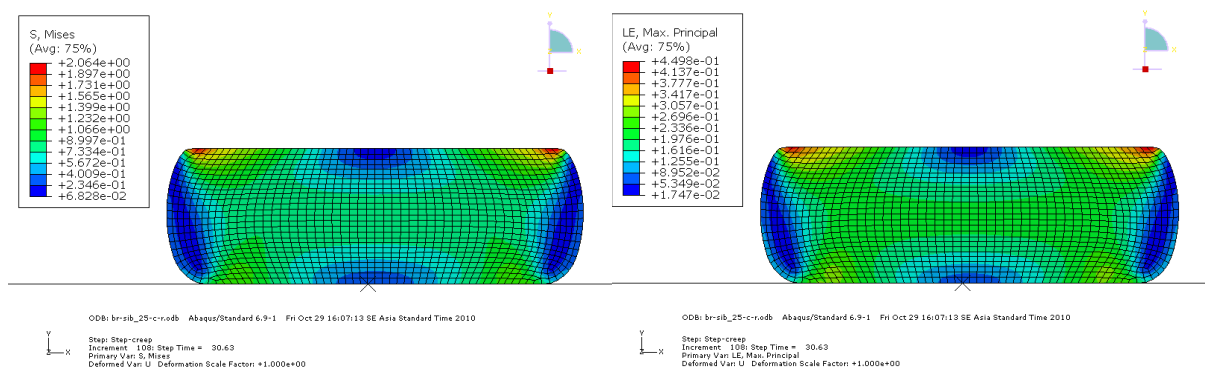
ภาพที่ 5-12 แสดงผลการกระจายตัวของ (a) ความเค้น Von Mises (b) ความเครียดหลักสูงสุดในส่วนยางของ ล้อยางคัน (สูตรเดิม A) ที่อุณหภูมิ -25°C ที่เวลา 30 วินาทีหลังจากเอาภาระ 1,000 Kg ออก



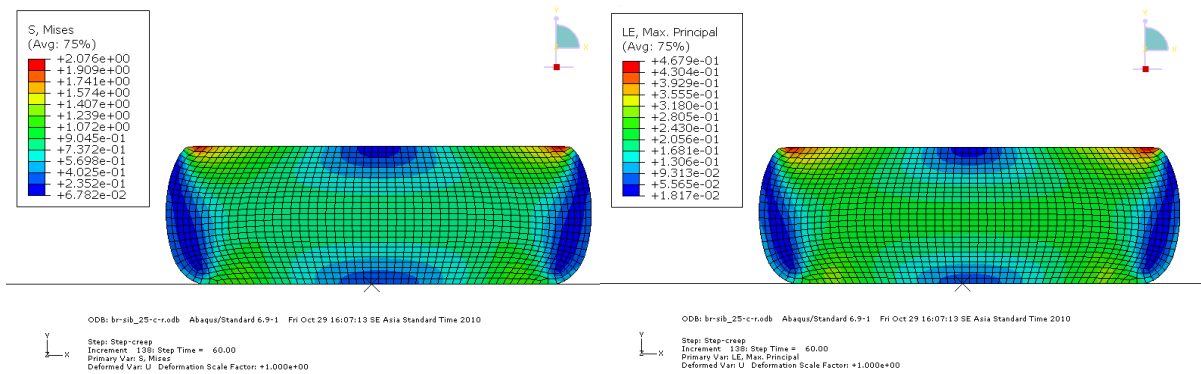
ภาพที่ 5-13 แสดงผลการกระจายตัวของ (a) ความเค้น Von Mises (b) ความเครียดหลักสูงสุดในส่วนยาง (สูตรเดิม A) ที่อุณหภูมิ -25°C ที่เวลา 60 วินาทีหลังจากเอภาระ 1,000 Kg ออก



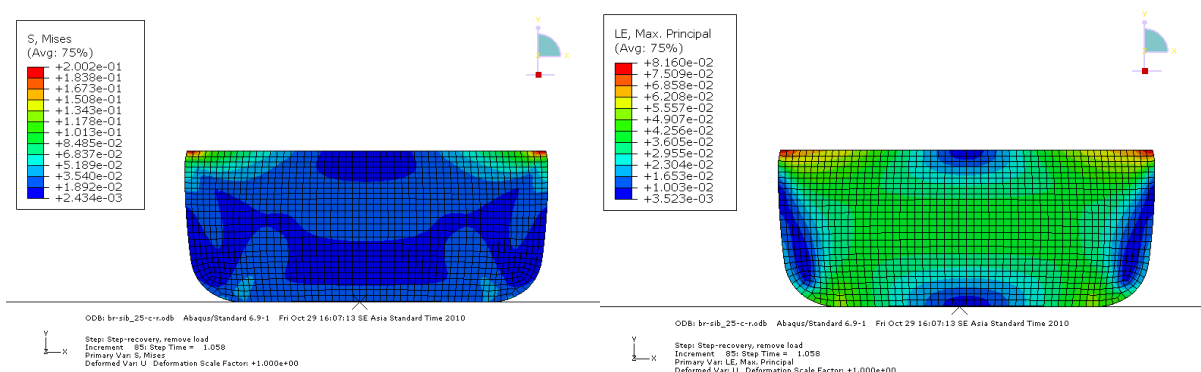
ภาพที่ 5-14 แสดงผลการกระจายตัวของ (a) ความเค้น Von Mises (b) ความเครียดหลักสูงสุดในส่วนยางของ ล้อยางตัน(สูตรใหม่ B) ที่อุณหภูมิ 25°C ที่เวลา 1 วินาทีหลังจากรับภาระ 1,000 Kg



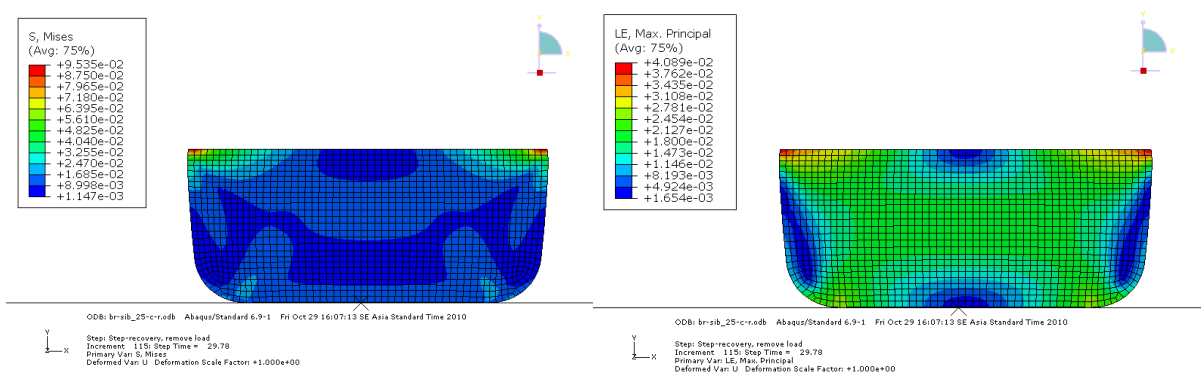
ภาพที่ 5-15 แสดงผลการกระจายตัวของ (a) ความเค้น Von Mises (b) ความเครียดหลักสูงสุดในส่วนยางของ ล้อยางตัน(สูตรใหม่ B) ที่อุณหภูมิ 25°C ที่เวลา 30 วินาทีหลังจากรับภาระ 1,000 Kg



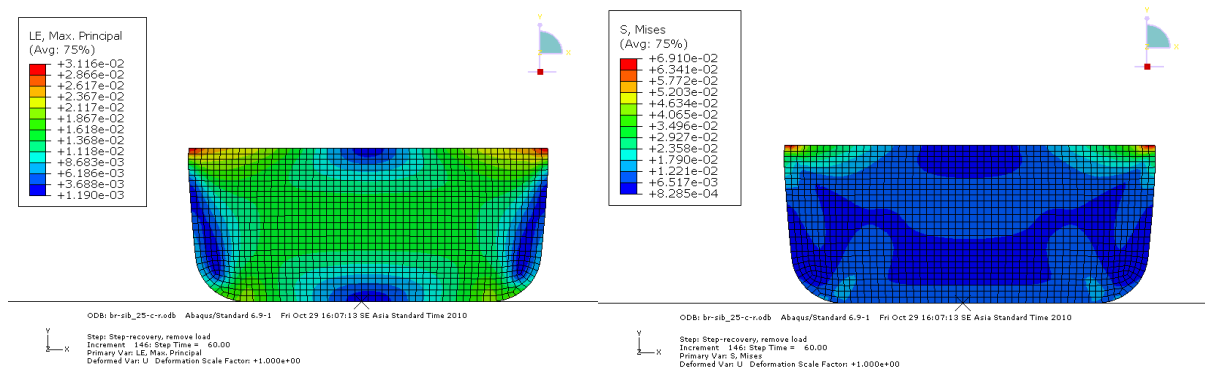
ภาพที่ 5-16 แสดงผลการกระจายตัวของ (a) ความเค้น Von Mises (b) ความเครียดหลักสูงสุดในส่วนยางของ ล้อยางตัน(สูตรใหม่ B) ที่อุณหภูมิ 25 °C ที่เวลา 60 วินาทีหลังจากรับภาระ 1,000 Kg



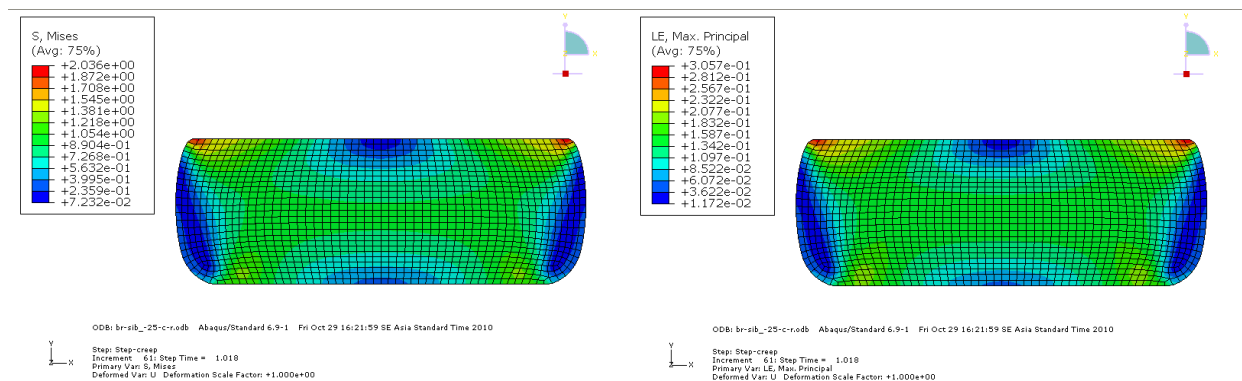
ภาพที่ 5-17 แสดงผลการกระจายตัวของ (a) ความเค้น Von Mises (b) ความเครียดหลักสูงสุดในส่วนยาง (สูตรใหม่ B) ที่อุณหภูมิ 25 °C ที่เวลา 1 วินาทีหลังจากเอาภาระ 1,000 Kg ออก



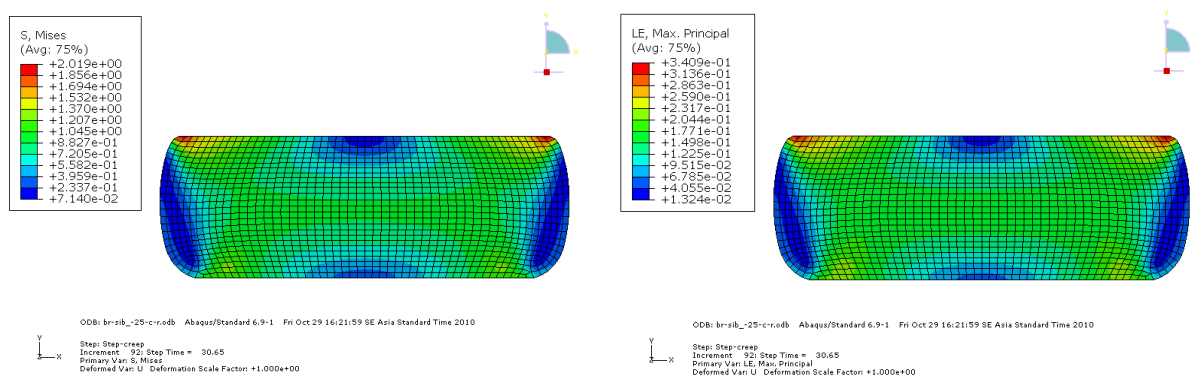
ภาพที่ 5-18 แสดงผลการกระจายตัวของ (a) ความเค้น Von Mises (b) ความเครียดหลักสูงสุดในส่วนยาง (สูตรใหม่ B) ที่อุณหภูมิ 25 °C ที่เวลา 30 วินาทีหลังจากเอาภาระ 1,000 Kg ออก



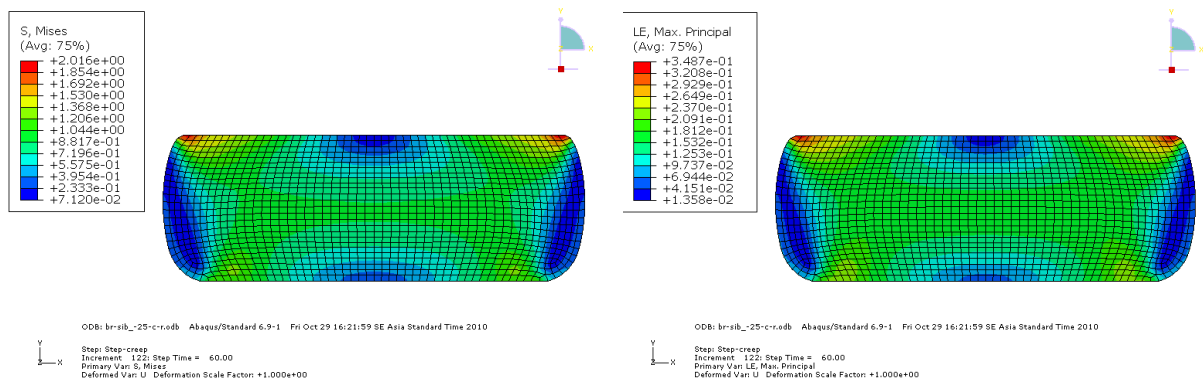
ภาพที่ 5-19 แสดงผลการกระจายตัวของ (a) ความเค้น Von Mises (b) ความเครียดหลักสูงสุดในส่วนยาง (สูตรใหม่ B) ที่อุณหภูมิ 25 °C ที่เวลา 60 วินาทีหลังจากเอภาระ 1,000 Kg ออก



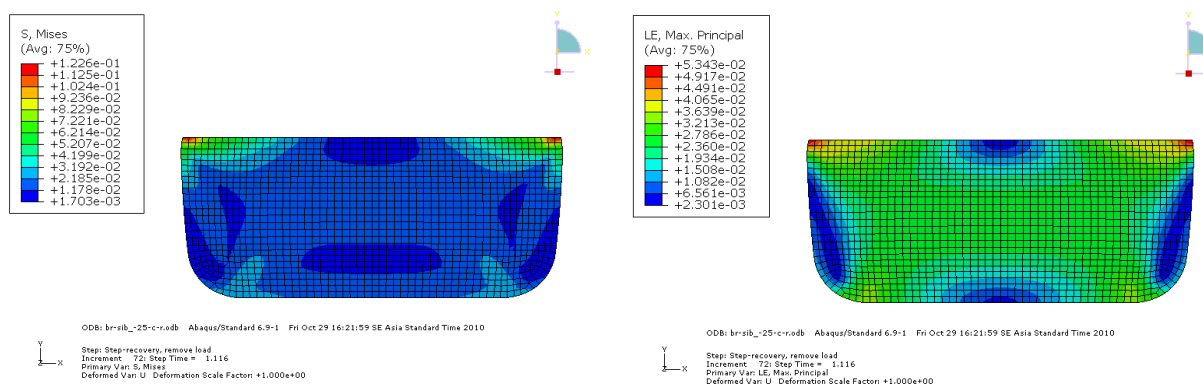
ภาพที่ 5-20 แสดงผลการกระจายตัวของ (a) ความเค้น Von Mises (b) ความเครียดหลักสูงสุดในส่วนยาง (สูตรใหม่ B) ที่อุณหภูมิ -25 °C ที่เวลา 1 วินาทีหลังจากรับภาระ 1,000 Kg



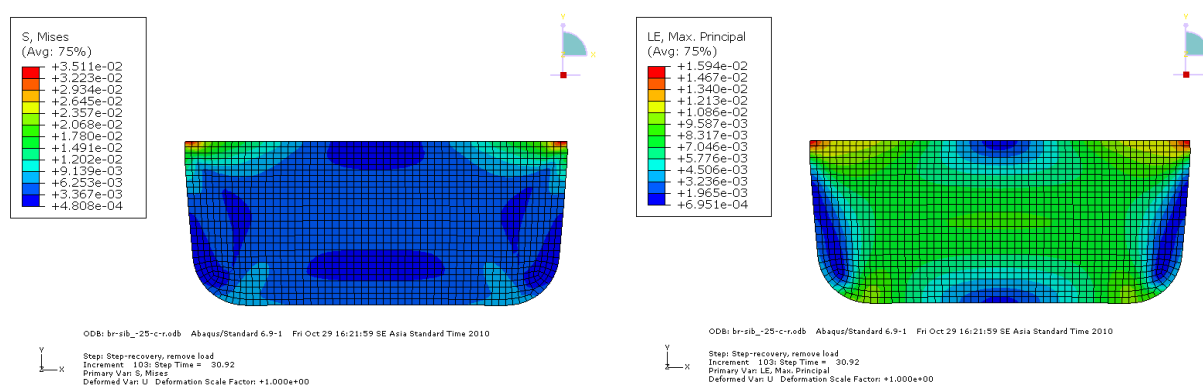
ภาพที่ 5-21 แสดงผลการกระจายตัวของ (a) ความเค้น Von Mises (b) ความเครียดหลักสูงสุดในส่วนยาง (สูตรใหม่ B) ที่อุณหภูมิ -25 °C ที่เวลา 30 วินาทีหลังจากรับภาระ 1,000 Kg



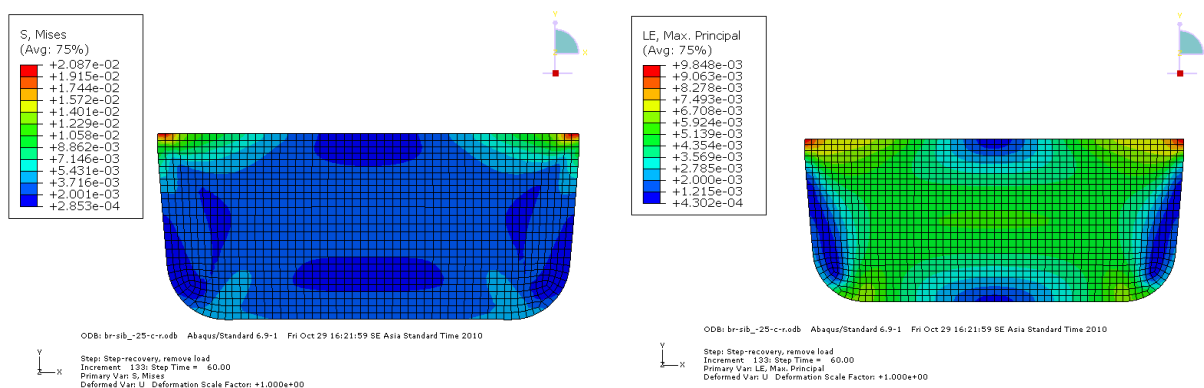
ภาพที่ 5-22 แสดงผลการกระจายตัวของ (a) ความเค้น Von Mises (b) ความเครียดหลักสูงสุดในส่วนยาง (สูตรใหม่ B) ที่อุณหภูมิ -25°C ที่เวลา 60 วินาทีหลังจากรับภาระ 1,000 Kg



ภาพที่ 5-23 แสดงผลการกระจายตัวของ (a) ความเค้น Von Mises (b) ความเครียดหลักสูงสุดในส่วนยาง (สูตรใหม่ B) ที่อุณหภูมิ -25°C ที่เวลา 1 วินาทีหลังจากเอาภาระ 1,000 Kg ออก

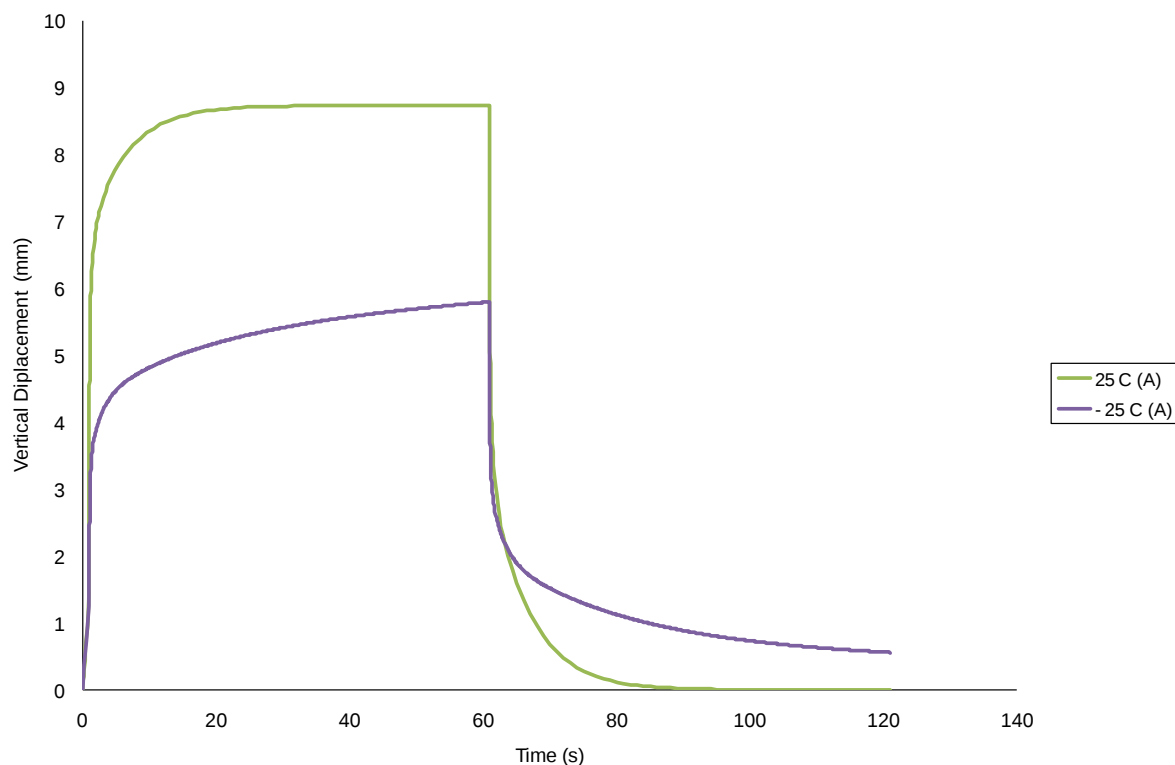


ภาพที่ 5-24 แสดงผลการกระจายตัวของ (a) ความเค้น Von Mises (b) ความเครียดหลักสูงสุดในส่วนยาง (สูตรใหม่ B) ที่อุณหภูมิ -25°C ที่เวลา 30 วินาทีหลังจากเอาภาระ 1,000 Kg ออก

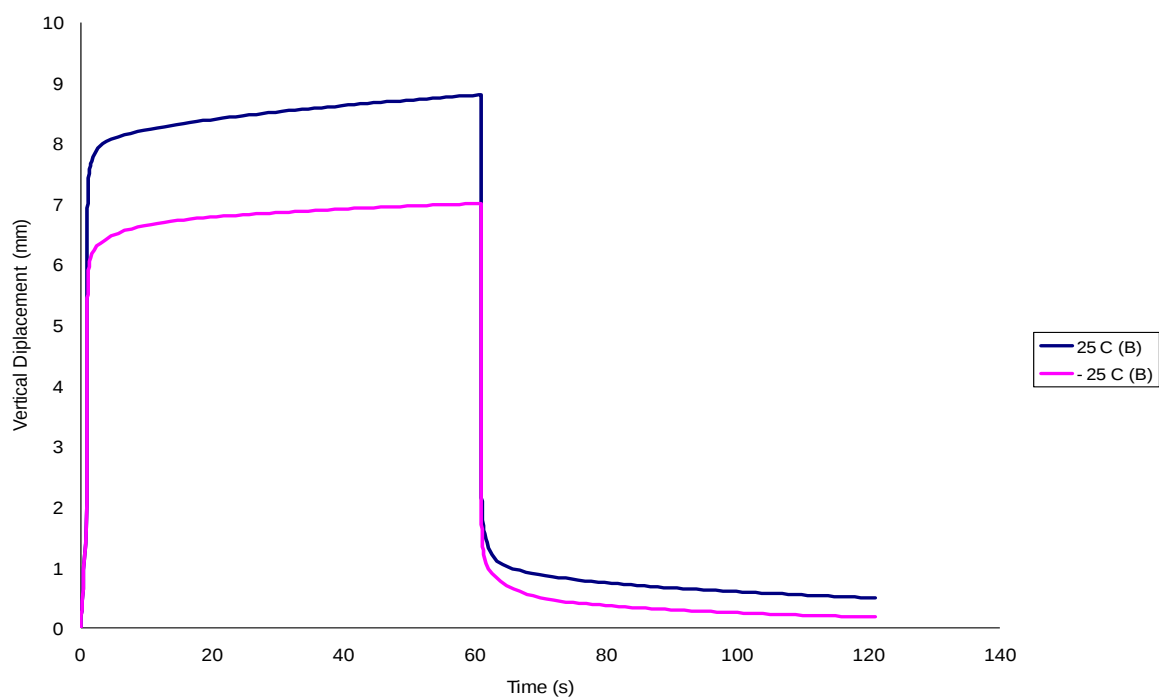


ภาพที่ 5-25 แสดงผลการกระจายตัวของ (a) ความเค้น Von Mises (b) ความเครียดหลักสูงสุดในส่วนยาง (สูตรใหม่ B) ที่อุณหภูมิ -25°C ที่เวลา 60 วินาทีหลังจากเอภาระ 1,000 Kg ออก

การก๊อปปี้ตัวของระยะการจัดของหน้ายางตามแนวตั้งขณะรับภาระและการคืนตัวหลังเอภาระออกของล้อยางที่มาจากยางสูตรเดิม (A) และสูตรใหม่ (B) ที่ได้จากการจำลองด้วยแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ข้างต้น ที่อุณหภูมิ 25°C และ -25°C ได้แสดงไว้ในภาพที่ 5-26 และภาพที่ 5-27

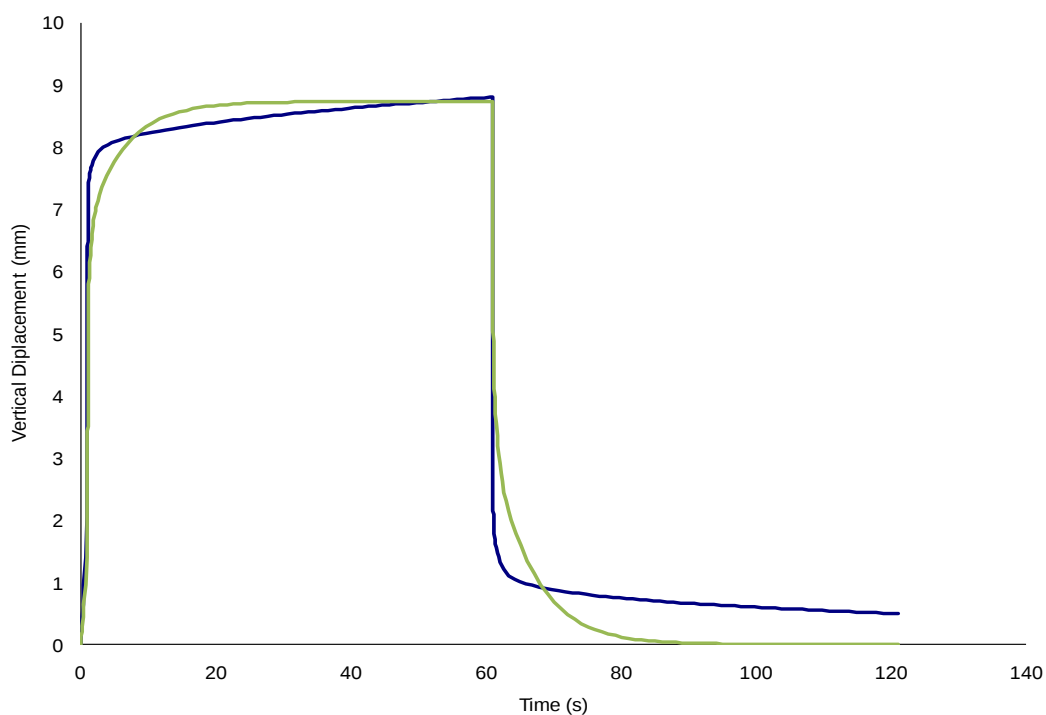


ภาพที่ 5-26 แสดงการก๊อปปี้ตัวของระยะการจัดของหน้ายางตามแนวตั้งและการคืนตัวของล้อยางเทียบกับเวลาที่อุณหภูมิ 25°C และ -25°C ของล้อยางสูตรเดิม (A) ที่ได้จากการจำลองด้วยแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์

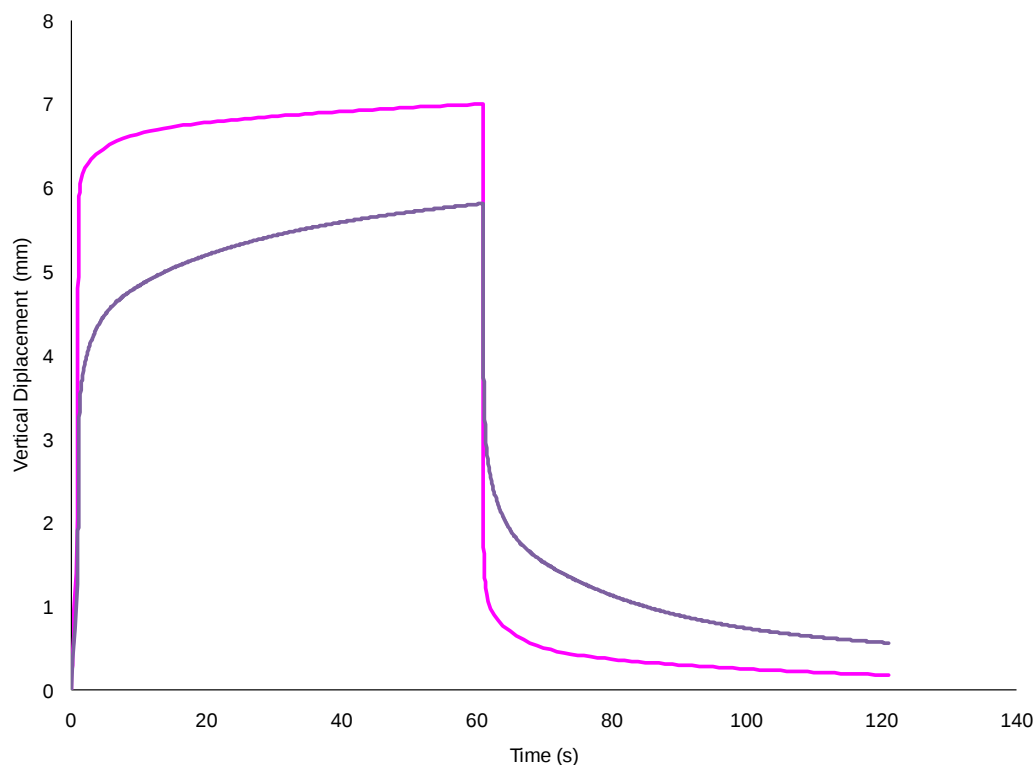


ภาพที่ 5-27 แสดงการคืบตัวของระยะกระจัดของหน้ายางตามแนวตั้งของยางเทียบกับเวลาที่อุณหภูมิ 25°C และ -25°C ของล้อยางสูตรปรับปรุง (B) ที่จากการจำลอง

ภาพที่ 5-28 ถึง 5-29 แสดงการเปรียบเทียบระยะการคืบตัวของหน้ายางระหว่างล้อยางต้นที่ทำจากยางสูตรเดิม (A) กับยางสูตรใหม่ (B) ที่อุณหภูมิ 25°C และ -25°C



ภาพที่ 5-28 แสดงการเปรียบเทียบระยะการคืบตัวของหน้ายางระหว่างล้อยางต้นที่ทำจากยางสูตรเดิม (A) กับล้อยางต้นที่ทำจากยางคอมปาว์ใหม่ (B) ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส



ภาพที่ 5-29 แสดงการเปรียบเทียบระยะการคืบตัวของหน้ายางระหว่างล้อยางตันที่ทำจากยางสูตรเดิม (A) กับล้อยางตันที่ทำจากยางคอมปาว์ใหม่ (B) ที่อุณหภูมิ -25 องศาเซลเซียส

จากผลการจำลองด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์โดยใช้แบบจำลองวัสดุยางเป็นแบบ visco-hyperelastic สามารถแสดงให้เห็นได้ว่าขณะที่ล้อยางรับภาระคงที่ ความเค้นจะไม่เปลี่ยนแปลง แต่ความเครียดและระยะกระจัดตามแนวตั้งของหน้ายางจะค่อยๆ เพิ่มขึ้นเมื่อเวลาผ่านไป นั่นคือเราสามารถจำลองปรากฏการณ์ของการคืบ (creep) ได้ และเมื่อนำภาระที่กระทำออก ความเค้นจะหายไปเกือบจะทันที แต่ยังคงมีความเครียดตกค้าง (Residual strain) ซึ่งค่อยๆ ลดลงเมื่อเวลาผ่านไป ซึ่งคือปรากฏการณ์ การคืนตัวกลับ (Recovery) ของล้อยางตัน

สำหรับล้อยางที่ทำจากยางสูตรเดียวกัน เมื่อเปรียบเทียบผลการจำลองที่อุณหภูมิ 25 °C และ -25 °C จะเห็นได้ว่า ที่อุณหภูมิ -25 °C ความเครียดและระยะกระจัดที่เกิดขึ้นจะมีค่าน้อยกว่า และการคืนตัวของความเครียดและระยะกระจัดหลังนำภาระออกจะช้ากว่าที่อุณหภูมิ 25 °C

เมื่อเปรียบเทียบผลการจำลองของล้อยางที่ทำจากยางสูตรเดิม (A) และสูตรใหม่ (B) พบว่า ที่อุณหภูมิ 25 °C ความเครียดและระยะกระจัดจะมีค่าใกล้เคียงกันขณะรับภาระคงที่

ที่อุณหภูมิ -25 °C ความเครียดและระยะกระจัดของล้อยางสูตรเดิม (A) จะมีค่าสูงกว่าล้อยางสูตร (B) ขณะรับภาระคงที่ที่เวลาใดๆ และจะสามารถคืนตัวกลับได้ช้ากว่าล้อยางสูตรใหม่ (B) เมื่อนำภาระออก ซึ่งแสดงว่าถ้าหน้ายางสูตร (A) ไปรับภาระแบบเป็นวงรอบจะเกิดการสะสมของความเครียดมากกว่าและมี

แนวโน้มนำจะเกิดความเสียหายเช่นการเกิด flat spot ที่ยางซึ่งจะทำให้ประสิทธิภาพการใช้งานของล้อยางตันลดต่ำลง ได้มากกว่าล้อยางสูตรใหม่(B)

ทั้งนี้ผลการวิเคราะห์ไฟฟ้าในตั้เซลล์ให้ผลการทำนายพฤติกรรมของการรับภาระของผลิตภัณฑ์ล้อยางตัน ทำให้คาดได้ว่ายางสูตรใหม่ (B) เมื่อนำมาผลิตเป็นล้อยางตันจะมีประสิทธิภาพที่อุณหภูมิต่ำ (-25°C) ดีกว่าสูตรยางเดิม(A) เนื่องจากมีความยืดหยุ่นและความสามารถในการคืนกลับตัวที่ดีกว่าที่อุณหภูมิต่ำ ทั้งนี้ค่าที่ได้จากการจำลองเป็นการทำนายจึงยังต้องการการวัดจากการทดสอบจริงเพื่อพิสูจน์ความแม่นยำของผลจำลอง

6 อภิปราย, สรุปผล และข้อเสนอแนะ

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาสมบัติเชิงกลที่อุณหภูมิต่ำของยางคอมปาว์นผสมเขม่าดำที่ใช้ทำล้อยางตัน เพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาผลิตภัณฑ์ล้อยางตันให้ใช้งานได้ดีที่อุณหภูมิต่ำ โดยได้จัดสร้าง อุปกรณ์ที่เหมาะสมเพื่อที่จะใช้ในการทำสร้างสภาวะที่อุณหภูมิต่ำ และใช้ได้ร่วมกับเครื่องทดสอบ Universal Testing Machine ที่ภาควิชาฯ

เพื่อเป็นการแสดงถึงปัญหาการใช้งานที่อุณหภูมิต่ำของล้อยางตันจึงได้ทำการทดสอบกดล้อยางตันขนาดเล็กซึ่งเป็นสูตรสำหรับการใช้งานที่อุณหภูมิทั่วไปที่ได้รับการอนุเคราะห์จากเอกชนแห่งหนึ่ง พบว่าเมื่อกดล้อยางตันที่สภาวะอุณหภูมิ -25°C (ซึ่งเป็นอุณหภูมิของห้องเย็นในอุตสาหกรรมแช่แข็ง) ล้อยางแข็งขึ้นและจะสูญเสียความสามารถในการคืนตัวและเกิดการตกค้างของความเครียด (residual strain) อย่างชัดเจนซึ่งจะเป็นสาเหตุทำให้ล้อยางเสียความสมดุลเมื่อนำมาวิ่งใช้งานและเกิดความเสียหายได้

จากนั้นได้ทำการศึกษาสมบัติเชิงกลและสมบัติทางกายภาพของยางคอมปาว์นที่นำมาผลิตล้อยางตันข้างต้นที่อุณหภูมิต่างๆเพื่อนำมาวิเคราะห์ถึงสาเหตุของปัญหาการข้างต้น พบว่าเมื่อทำการทดสอบ แรงดึงที่อุณหภูมิ 25°C , 0°C , -25°C และ -50°C วัสดุยางคอมปาว์นนี้จะต้านแรงดึงมากขึ้น (stiffness มากขึ้น)เมื่ออุณหภูมิต่ำลง โดยที่อุณหภูมิ -25°C และ -50°C วัสดุจะมี stiffness มากกว่าที่อุณหภูมิห้องอย่างเด่นชัด สำหรับการคลายความเค้นในโหมดดึง ที่ความเครียด 25% วัสดุยางคอมปาว์นสูตรนี้จะแสดงพฤติกรรมที่ขึ้นอยู่กัเวลา(viscoelastic)มากขึ้นเมื่ออุณหภูมิต่ำลงโดยจะเริ่มเห็นได้ชัดขึ้นที่อุณหภูมิ -25°C และ -50°C จะมีการคลายความเค้นที่ช้าและการคืนตัวที่ช้ากว่าที่อุณหภูมิห้อง โดยเฉพาะที่อุณหภูมิ -50°C ความแตกต่างนี้จะเห็นได้อย่างเด่นชัดมาก ทำให้คาดได้ว่า ที่อุณหภูมิ -25°C และ -50°C วัสดุจะมีสถานะอยู่ในช่วงของกลาสทรานซิชัน ซึ่งโมเลกุลเริ่มขยับตัวเพื่อผ่อนคลายความเค้นได้ยาก เพื่อเป็นการหาช่วงและอุณหภูมิกลาสทรานซิชันจึงได้ทำการทดสอบวัสดุด้วยการทดสอบด้วยเครื่อง DMA, DSC และ TMA ได้ผลดังสามารถแสดงสรุปไว้ในตารางที่ 6.1 โดยจากผลจาก DMA จะสอดคล้องกับผลการทดสอบพฤติกรรมการคลายความเค้นข้างต้น ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าสาเหตุของการสูญเสียความยืดหยุ่นของล้อยางตันที่อุณหภูมิ -25°C นั้นเป็นเพราะที่อุณหภูมิดังกล่าวยางมีสถานะอยู่ในช่วงกลาสทรานซิชัน

จากนั้นได้ทำการจัดหาสูตรยางคอมปาว์ใหม่ที่ได้รับการอนุเคราะห์สูตรจากบริษัทเอกชนแห่งหนึ่ง เพื่อเป็นตัวอย่าง ของการปรับปรุงสูตรยางคอมปาว์ที่จะสามารถใช้งานได้ดีที่อุณหภูมิต่ำ โดยในสูตรยางนี้ได้ทำการเปลี่ยนการใช้ยางจาก NR/SBR เป็น NR/BR โดย BR มี T_g ที่ต่ำกว่า NR และ SBR อีกทั้งได้ทำการเปลี่ยน Plasticiser จาก Aromatic oil เป็น Naphthenic oil ซึ่งมี T_g ต่ำกว่า และน้ำหนักโมเลกุลต่ำกว่า อีกทั้งได้ใช้ในสัดส่วนที่น้อยลง และได้ทำการทดสอบหาช่วงอุณหภูมิกลาสทรานซิชันและอุณหภูมิกลาสทรานซิชัน ด้วยเครื่อง DMA, DSC และ TMA ได้แสดงสรุปผลไว้ในตารางที่ 6.1

ตาราง 6.1 ผลการทดสอบยางคอมปาว์สูตรเดิม(A) และยางคอมปาว์สูตรใหม่(B) ด้วยเครื่อง DMA, DSC และ TMA

การทดสอบ	ช่วงอุณหภูมิกลาสทรานซิชัน		อุณหภูมิกลาสทรานซิชัน (T_g)	
	ยางสูตรเดิม(A)	ยางสูตรใหม่(B)	ยางสูตรเดิม(A)	ยางสูตรใหม่(B)
DMA	-55 °C ถึง -17 °C	-65 °C ถึง -35 °C	-45 °C	-54 °C
DSC	-61 °C ถึง -56 °C	-66 °C ถึง 57.7 °C	-58.1 °C	-60.6 °C
TMA	NA	NA	-52.1 °C	-61.78 °C

จากตารางที่ 6.1 จะเห็นได้ว่ายางคอมปาว์สูตรใหม่มีช่วงอุณหภูมิกลาสทรานซิชันที่แคบกว่าสูตรเดิมและอุณหภูมิกลาสทรานซิชัน (T_g) ที่ต่ำกว่าสูตรเดิม และเมื่อนำยางคอมปาว์ใหม่มาทดสอบแรงดึงที่อุณหภูมิ 25 °C, 0 °C, -25 °C และ -50 °C พบว่ายางสูตรใหม่ (B) มี stiffness น้อยกว่า ยางสูตรเก่า (A) เล็กน้อย และเมื่อนำมาทดสอบการคลายความเค้น พบว่าที่ -25 °C และ -50 °C มีการคลายความเค้นและการคืนตัวที่ช้าลงแต่ไม่ได้แตกต่างจากที่อุณหภูมิห้อง 25 °C มากนัก ไม่เหมือนยางคอมปาว์สูตรเดิม (A) ทั้งนี้เป็นเพราะยางสูตรใหม่มีช่วงกลาสทรานซิชันที่แคบกว่าเดิม โดยที่อุณหภูมิ -25 °C และ -50 °C วัสดุจะเข้าสู่ช่วงต้นของ Rubbery state แล้ว

จากงานวิจัยนี้แสดงให้เห็นว่าเราสามารถพิจารณาว่าวัสดุที่ใช้ทำล้อยางคันมีสมบัติที่เหมาะสม ที่อุณหภูมิต่ำหรือไม่ โดยดูจากช่วงอุณหภูมิของกลาสทรานซิชันของวัสดุยางที่วัดได้ จาก DMA และการทดสอบการคลายความเค้นที่อุณหภูมิต่ำ และวิธีหนึ่งที่ทำให้ล้อ ยางประสิทธิภาพที่ดีขึ้นที่อุณหภูมิต่ำคือ ปรับสูตรยางให้มีอุณหภูมิกลาสทรานซิชันต่ำลง และช่วงอุณหภูมิกลาสทรานซิชันแคบลง ซึ่งวัสดุยางจะแสดงพฤติกรรมที่ขึ้นอยู่กับเวลาน้อยลงและยังคงความ อ่อนตัว ที่อุณหภูมิต่ำเมื่อเทียบกับสูตรยางที่ยังไม่ได้ รับการปรับปรุง ทำให้มีการคืบที่น้อยกว่าและการสะสมของความเครียดที่น้อยกว่าทำให้มีล้อยางโอกาสเกิด ความเสียหายต่ำกว่า

เมื่อใช้แบบจำลองวัสดุแบบ linear viscoelastic ด้วยโพร์นีย์ซีร์ส และสมการ WLF ในการจำลอง พฤติกรรมของการคลายความเค้นที่อุณหภูมิต่างๆของยางทั้งสองสูตร พบว่าแบบจำลองดังกล่าวสามารถจำลอง

พฤติกรรมการคลายความเค้นที่ ค่าความเค้น 25% ที่ขึ้นอยู่กับเวลาและอุณหภูมิของยางทั้งสองสูตรได้ดีใกล้เคียงกับผลทดสอบ

สุดท้ายเพื่อนำผลการทดสอบมาพัฒนาผลิตภัณฑ์ล้อยางตันโดยยังไม่ต้องสร้างผลิตภัณฑ์ต้นแบบจากยางสูตรใหม่เพื่อนำมาทดสอบเปรียบเทียบกับล้อยางที่ทำจากสูตรเดิม เนื่องจากงบประมาณในโครงการมีจำกัด จึงได้ทำการจำลอง การรับภาระของล้อยางตันที่ทำจากยางสองสูตรนี้ที่อุณหภูมิห้องและที่ -25°C ด้วยวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยใช้แบบจำลองวัสดุแบบ Visco-Hyperelastic แบบอัดตัวไม่ได้ โดยค่าพารามิเตอร์ในส่วนที่เป็น Viscoelastic ของยางทั้งสองชนิดหาได้จากผลการทดสอบการผ่อนคลายความเค้นที่อุณหภูมิต่างๆ ส่วนที่เป็น Hyperelastic ใช้แบบจำลองแบบ Neo-Hookean จากผลการจำลองพฤติกรรม การคืบ (creep) และการคืนตัวกลับ หลังการนำภาระออก ของล้อยางตันแบบ press on ที่ทำจากสูตรยางเดิม และยางใหม่พบว่า ที่อุณหภูมิ -25°C ความเครียดและระยะกระจัดของล้อยางสูตรเดิม (A) จะมีค่าสูงกว่าล้อยางสูตร(B) ขณะรับภาระคงที่ที่เวลาใดๆ และจะสามารถคืนตัวกลับได้ช้ากว่าล้อยางสูตรใหม่ (B) เมื่อนำภาระออก ซึ่งแสดงว่าถ้า นำยางสูตร (A) ไปรับภาระแบบเป็นวงรอบจะเกิดการสะสมของความเครียดมากกว่าและมีแนวโน้มจะเกิดความเสียหายเช่นการเกิด flat spot ที่ยางซึ่งจะทำให้ประสิทธิภาพการใช้งานของล้อยางตันลดต่ำลง ได้มากกว่าล้อยางสูตรใหม่(B)

ทั้งนี้ผลการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ให้ผลการทำนายพฤติกรรมของการรับภาระของผลิตภัณฑ์ล้อยางตัน ทำให้คาดได้ว่ายางสูตรใหม่ (B) ที่ได้นำเสนอ เมื่อนำมาผลิตเป็นล้อยางตันจะมีประสิทธิภาพที่อุณหภูมิต่ำ (-25°C) ดีกว่าสูตรยางเดิม(A) เนื่องจากมีความยืดหยุ่นและความสามารถในการคืนกลับตัวที่ดีกว่าที่อุณหภูมิต่ำ ทั้งนี้ค่าที่ได้จากการจำลองเป็นการทำนายจึงยังต้องการการวัดจากการทดสอบจริงเพื่อพิสูจน์ความแม่นยำของผลจำลอง

แต่อย่างไรก็ดียังมีประสิทธิภาพอื่นเช่นคุณสมบัติการติดยึดด้วยกาวกับกระทะล้อ และการยึดเกาะระหว่างยางและพื้น ที่อุณหภูมิต่ำ ที่ยังต้องศึกษาเพิ่มเติมเพื่อนำมาพัฒนาเป็นผลิตภัณฑ์ล้อยางจริง

เอกสารอ้างอิง

- [1] วราภรณ์ ขจรไชยกุล ส่วนอุตสาหกรรมยาง, สถาบันวิจัยยาง. เทคโนโลยียาง. กรุงเทพมหานคร
- [2] ABAQUS Standard User's Manual Version 6.8, Dassault Systemes Simulia Corp., USA
- [3] เดช พุทธเจริญทอง. การวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์. กรุงเทพมหานคร : ศูนย์สื่อเสริมกรุงเทพ, 2541.
- [4] Dick, J. S., Ed., Rubber technology : compounding and testing for performance, Hanser Gardner, 2001. pp 54

- [5] Spetz, G., "Development in low temperature testing of Rubber materials", Elastocon AB, Technical report 01/4, April 2001.
- [6] Schaefer, R. J., "Dynamic properties of rubber", Rubber World, April 1995, pp. 22.
- [7] Lion, A., "On the large deformation behaviour of reinforced rubber at different temperatures", J. Mech. Phys. Solids, 45, (1997), pp. 1805.
- [8] Gauthier, C., et al, "Analysis of the non-linear viscoelastic behaviour of silica", Polymer, 45, (2004), pp. 2761.
- [9] Ginic-Markovic, M., "Viscoelastic behaviour of filled, and unfilled, EPDM elastomer", Thermochimica Acta, 357-358 (2000), pp. 211
- [10] Brazier, D. and Nickel, G. "Application of tma for rapid evaluation of low-temperature properties of elastomer vulcanizates", Rubber Chemistry and Technology, 52 (1979), pp. 735
- [11] อุทิศ สุริภา และ อริสรา ชัยกิตติรัตน์, การศึกษาการกระจายตัวของความเค้นและความเครียดในล้อยางตันโดยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์, การประชุมวิชาการ สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย ประจำปี 2549, วันที่ 24-26 สิงหาคม 2549, โรงแรมมิราเคิล แกรนด์
- [12] สถาพร วัณชัย, อริสรา ชัยกิตติรัตน์ และ ชาญยุทธ โกธิตะวงศ์, การศึกษาลักษณะการเกิดความร้อนในชิ้นส่วนวัสดุยางภายใต้การรับภาระแบบเป็นวงรอบ, การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 19, มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์, หาดใหญ่, ตุลาคม 2548
- [13] จารุธรณ์ สังข์ปาน และ อริสรา ชัยกิตติรัตน์, การวิเคราะห์สมบัติวิสโคไฮเปอร์อีลาสติคของยางคงรูปที่อุณหภูมิแตกต่างกัน, การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 21, โรงแรมเวลคัม จอมเทียนบีช, ชลบุรี, 17-19 ตุลาคม 2550.
- [14] Ghosh, P., et al., "Material property characterization for finite element analysis of tires", Rubber World, January 2006, pp. 22
- [15] Dick, J.S., Ed., How to improve rubber compounds, Hanser Gardner, 2004. pp 92-98

ภาคผนวก ก

ตารางเปรียบเทียบวัตถุประสงค์ กิจกรรมที่ได้ดำเนินงานและผลที่ได้รับ

ตารางเปรียบเทียบวัตถุประสงค์ กิจกรรมที่วางแผนไว้ และผลที่ได้รับ

โครงการ : การศึกษาสมบัติเชิงกลที่อุณหภูมิต่ำของยางคงรูปเพื่อพัฒนาผลิตภัณฑ์ล้อยางต้น

ชื่อสถาบันการศึกษา/วิจัย : มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

รายงานวันที่ : 20 ธันวาคม 2553

ผู้จัดทำ : ผศ. ดร. อริสรา ชัยกิตติรัตนนา

วัตถุประสงค์	กิจกรรมตามแผนงาน	กิจกรรมที่ได้ดำเนินการและผลที่ได้รับ
เพื่อศึกษาสมบัติเชิงกลที่อุณหภูมิต่ำของยางคงรูปเพื่อนำมาพัฒนาผลิตภัณฑ์ล้อยางต้นให้สามารถใช้งานได้มีประสิทธิภาพดีขึ้นที่อุณหภูมิต่ำ	- ศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง - จัดหาอุปกรณ์ที่เหมาะสมเพื่อที่จะใช้ในการทำสร้างสภาวะที่อุณหภูมิต่ำและขึ้นทดสอบที่เหมาะสมสำหรับการทดสอบสมบัติเชิงกลที่อุณหภูมิต่างๆ คือ ตั้งแต่ -50 °C จนถึงอุณหภูมิห้อง - ทำการทดสอบสมบัติของยางคงรูปที่ใช้ในการผลิตล้อยางต้นที่อุณหภูมิต่างๆ คือ ตั้งแต่ -50 °C จนถึงอุณหภูมิห้อง - นำผลการทดลองที่ได้มาทำการวิเคราะห์และศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิโดยใช้ทฤษฎีของวิสโค-อีลาสติกซิดีและไฟไนต์อีเลเมนต์ - ทำการปรับปรุงสูตรยางคอมปาวด์ให้ใช้งานได้ดีขึ้นที่อุณหภูมิต่ำและทำการทดสอบ เปรียบเทียบกับยางคอมปาวด์ที่ใช้อยู่เดิม - วิเคราะห์และสรุปผลการวิจัย	- Literature survey ของงานและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง - ได้อุปกรณ์ที่เหมาะสมเพื่อที่จะใช้ในการทำสร้างสภาวะที่อุณหภูมิต่ำและขึ้นทดสอบที่เหมาะสมสำหรับการทดสอบสมบัติเชิงกลที่อุณหภูมิต่ำ - ได้ทำการทดสอบและได้ข้อมูลการทดสอบพฤติกรรมเชิงกลของยางที่ใช้ในล้อยางต้นที่อุณหภูมิต่ำ - ได้แบบจำลองวิสโคอีลาสติกของวัสดุและค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองที่เหมาะสม - ได้แบบจำลองทางไฟไนต์อีเลเมนต์ของล้อยางต้นและผลวิเคราะห์การกระจายตัวของความเค้น ความเครียด และการเปลี่ยนรูปของล้อยางต้น ที่อุณหภูมิต่ำและผลกระทบของอุณหภูมิต่อการเสียรูปของล้อยาง - ได้ทำการจัดหาสูตรยางคอมปาวด์ที่ใช้งานได้ดีขึ้นที่อุณหภูมิต่ำและได้ผลการทดสอบเปรียบเทียบกับยางคอมปาวด์ที่ใช้อยู่เดิม ด้วยการทดสอบและการจำลองด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์อีเลเมนต์ และได้ผลการจำลองว่าล้อยางต้นที่ทำจากสูตรยางที่ได้รับการปรับปรุงจะสามารถทำงานได้ดีกว่าคอมปาวด์ยางสูตรเดิมที่อุณหภูมิต่ำ - วิเคราะห์และสรุปผลการวิจัย

ภาคผนวก ข
เอกสารสำหรับการเผยแพร่

การศึกษาสมบัติเชิงกลที่อุณหภูมิต่ำของยางคงรูปเพื่อพัฒนาผลิตภัณฑ์ล้อยางตัน

Study of Low Temperature Mechanical Properties of Rubber for Solid Tire Development

อริสรา ชัยกิตติรัตน

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลและการบิน-อวกาศ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

1518 ถนน พิบูลสงคราม เขต บางซื่อ กรุงเทพฯ 10800

โทรศัพท์/โทรสาร 02 9132500 ต่อ 8308 / 02 5869541 E-mail acn@kmutnb.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาสมบัติเชิงกลที่อุณหภูมิต่ำของยางคงรูปสำหรับนำมาพัฒนาผลิตภัณฑ์ล้อยางตันให้สามารถใช้งานได้มีประสิทธิภาพดีขึ้นที่อุณหภูมิต่ำเพื่อใช้กับรถโฟล์คลิฟท์ในอุตสาหกรรมห้องเย็นแช่แข็ง โดยได้จัดหาอุปกรณ์ที่จะใช้สร้างสภาวะที่อุณหภูมิต่ำ สำหรับศึกษาพฤติกรรมเชิงกลที่อุณหภูมิต่ำ ของวัสดุยางที่ใช้ทำยางตัน ได้แก่ การรับแรงดึงและการคลายความเค้น จากนั้นได้ทำการจำลองพฤติกรรมการคลายความเค้นของวัสดุยางนี้ด้วยแบบจำลองวัสดุแบบ Linear Viscoelastic โดยใช้ โพรนี้ซีรีส์และค่าเลื่อนเวลาจากสมการ WLF โดยทำการหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสม ซึ่งพบว่าแบบจำลองดังกล่าวสามารถอธิบายพฤติกรรมวัสดุได้ใกล้เคียงผลทดสอบจริงที่อุณหภูมิต่างๆที่ใช้ทดสอบ และได้ทำการจำลองพฤติกรรมการรับภาระกดคงที่และการคืนตัวเมื่อนำภาระออกของล้อยางตันแบบ press-on ที่อุณหภูมิต่ำเปรียบเทียบกับที่ -25°C ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ พบว่าแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ดังกล่าวสามารถจำลองพฤติกรรมการคืบและการคืนตัว (Creep and Recovery) ของล้อยางตันที่อุณหภูมิต่ำได้ และ ที่อุณหภูมิต่ำ -25°C ล้อยางจะคืนตัวกลับสู่สภาพเดิมหลังจากเอาภาระออกได้ช้ากว่าที่อุณหภูมิต่ำอย่างชัดเจนสอดคล้องกับความเป็นจริง ซึ่งแบบจำลองดังกล่าวสามารถนำไปใช้ในการวิเคราะห์ปัญหาอื่นๆเช่น การกระจายตัวของพื้นผิวสัมผัส หรือการยึดติดกับกระทะล้อ ที่จะ เป็นประโยชน์ต่อการพัฒนาประสิทธิภาพที่พึงประสงค์ของล้อยางตันสำหรับการใช้งานที่อุณหภูมิต่ำต่อไป โดยจะสามารถลดการลองผิดลองถูกในการสร้างล้อยางตันแบบและทดสอบจริงซึ่งจะเป็นการประหยัดทั้งเวลาและค่าใช้จ่าย

Abstract

This work aims to study physical and mechanical behavior of rubber used in solid tires at low ambient temperature below the freezing point such that the results from the study can be used in development of solid tires used in frozen food cold storage rooms. In this work an appropriate apparatus was set up for the study of mechanical properties of rubber at low temperatures such as tensile behavior and stress relaxation. The viscoelastic behavior of the rubber compound at different temperatures was captured using linear viscoelastic material model and later used in the subsequent finite element analysis of a press-on solid tire. It was found that the creep and recovery behavior of the press-on solid tire can be modeled adequately with the developed finite element model. It also showed that at -25°C the solid tire will be recovered much slower after load removal than at room temperature, in consistent with the test result observed. This finite element model developed will be useful for further development of product to achieve the desirable performance at low temperatures.

คำสำคัญ : สมบัติที่อุณหภูมิต่ำ, ล้อยางตัน , วิสโคอีลาสติซิตี

Keywords : Low temperature properties, Solid tire, Viscoelasticity

1. บทนำ

เมื่ออุณหภูมิของยางคงรูปลดลง ยางจะมีความแข็งเพิ่มขึ้นและมีค่าโมดูลัสเพิ่มขึ้น เนื่องจากการขยับตัวของโมเลกุลทำได้ยากขึ้น เมื่ออุณหภูมิต่ำลงจนต่ำกว่าอุณหภูมิกลาสทรานซิชัน (glass transition temperature, T_g) Molecular rotation จะไม่สามารถเกิดขึ้นได้ทำให้ยางมีคุณสมบัติแข็งเปราะเหมือนแก้ว ค่า T_g จะมีค่าต่างกันออกไปขึ้นอยู่กับชนิดของคอมพาวด์ ในยางบางชนิดเช่น ยางธรรมชาติ (NR) เมื่ออุณหภูมิต่ำลงจนถึงอุณหภูมิตกผลึก (melting crystallization temperature, T_m) จะมีการตกผลึกซึ่งจะทำให้การขยับตัวของโมเลกุลทำได้ยากขึ้นเช่นกัน โดยค่าอุณหภูมิ T_m จะมีค่าสูงกว่า T_g โดยการตกผลึกจะค่อยๆเกิดขึ้นและจะใช้เวลานานกว่าจะถึงสภาวะสมดุล [1] การเปลี่ยนแปลงของคุณสมบัติเชิงกลของยางคงรูปทั่วไปเนื่องจากอุณหภูมิเช่น โมดูลัสและความหน่วง(Damping)[2] อุณหภูมิในช่วงของ T_g และ T_m จะมีการเปลี่ยนแปลงของโมดูลัสอย่างรวดเร็วและความหน่วงซึ่งคือค่า Loss Tangent จะมีค่าสูง (Peak) สำหรับยางธรรมชาติจะมี T_g อยู่ที่ประมาณ -72°C และ T_m อยู่ที่ -25°C โดยทั่วไปแล้วค่า T_g จะเป็นตัวกำหนดอุณหภูมิต่ำสุดที่ยางจะสามารถใช้งานได้ พลาสติกไอโซเมอร์ ,การวัลเคไนเซชันและอัตราส่วนการผสมกันของยางคอมพาวด์จะมีผลต่อค่าของ T_g และช่วงของ T_g (T_g region) [3]

ในหลายๆงานวิจัยได้ใช้การทดสอบคุณสมบัติพลวัตรโดยใช้เครื่องทดสอบ DMA (Dynamic Mechanical Analyser)และเครื่อง TMA (Thermomechanical analyzer)ในการศึกษาคุณสมบัติเชิงกลของยางคงรูปที่อุณหภูมิต่างๆรวมถึงอุณหภูมิต่ำกว่าศูนย์องศา [4-6]

ปัญหาที่พบเมื่อนำตัวอย่างยางที่ใช้ในอุณหภูมิลดลงไปใช้ในห้องเย็นที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า 0°C ซึ่งในบางที่มีอุณหภูมิต่ำถึง -25°C ก็คือปัญหาที่ตัวอย่างหลุด

ออกจากกระดือและปัญหา สูญเสียรูปร่างเดิมของยาง

ในการพัฒนาผลิตภัณฑ์ล้อยางต้น จำเป็นต้องมีการพัฒนาคอมพาว์ของยางคงรูปที่เหมาะสมและในการทดสอบสมบัติเชิงกลของทั่วไปของคอมพาว์เหล่านี้เช่น Tensile test หรือ Stress relaxation test จะทำการทดสอบที่อุณหภูมิห้อง ซึ่งจะไม่สามารถบ่งบอกถึงสมบัติที่อุณหภูมิที่ใช้จริงที่ต่ำกว่าศูนย์องศาเซลเซียสเนื่องจากคุณสมบัติเชิงกลของยางจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิด้วย ดังนั้นจำเป็นที่จะต้องมีการทำการทดสอบที่อุณหภูมิต่ำ เพื่อให้สามารถนำคุณสมบัติเชิงกลต่างๆไป ใช้ปรับปรุงสูตรยางและออกแบบเชิงวิศวกรรมให้ได้ตัวอย่างที่มีคุณสมบัติดีต่อการนำไปใช้งานที่อุณหภูมิต่ำ

2. วัตถุประสงค์

เพื่อศึกษาสมบัติเชิงกลที่อุณหภูมิต่ำของยางคงรูปเพื่อนำมาพัฒนาผลิตภัณฑ์ล้อยางต้นให้สามารถใช้งานได้มีประสิทธิภาพดีขึ้นที่อุณหภูมิต่ำ

3. วิธีการทดสอบ

3.1. อุปกรณ์

เครื่องทดสอบแรงดึง Instron Universal Testing Machine Model 5567 เครื่องทดสอบดังกล่าวได้ติดตั้งเข้ากับห้องควบคุมอุณหภูมิ เพื่อที่จะใช้ในการสร้างสภาวะอุณหภูมิต่ำจนถึง -50°C โดยใช้ไอของก๊าซไนโตรเจน ดังแสดงในภาพที่ 1

3.2. วัสดุ

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษา วัสดุยางผสมเมมาค่าที่ใช้ผลิตล้อยางต้นแบบ press on สำหรับใช้ที่อุณหภูมิทั่วไป ซึ่งได้รับการสนับสนุนจากบริษัทเอกชนแห่งหนึ่ง



ภาพที่ 1 เครื่องทดสอบแรงดึง Intron Universal Testing Machine และชุดอุปกรณ์ใช้ในการสร้างสภาวะอุณหภูมิต่ำโดยใช้ไอของก๊าซไนโตรเจน

3.3. วิธีการทดสอบ

3.3.1. การทดสอบการกดตัวอย่างคันที่อุณหภูมิต่ำ

ใช้ตัวอย่างแบบ Press on สูตรยางผสมเขม่าดำ ขนาด 8.5 "x 4" x 4 "ที่อุณหภูมิ ด้วยเครื่องทดสอบ Universal Testing Machine ในตู้ควบคุมอุณหภูมิ -25 °C ซึ่งเป็นอุณหภูมิทั่วไปของห้องเย็นที่ใช้แช่แข็งอาหาร ดังแสดงไว้ในภาพที่ 2 เปรียบเทียบกับอุณหภูมิปกติโดยแรงกดสูงสุดที่ใช้คือ 700 kg

3.3.2. Tensile test

ทดสอบ Tensile test ตามมาตรฐาน ASTM D412 ภายในห้องควบคุมอุณหภูมิให้คงที่ ในช่วงอุณหภูมิ (-50) ถึง 25 องศาเซลเซียส โดยใช้ระบบสร้างสภาวะที่อุณหภูมิต่ำ ด้วยอัตราการความเร็วในการดึง 200 มิลลิเมตรต่อวินาที

3.3.3. Short term tensile relaxation test

การจัดผลของมูลลินจากการทดลองด้วยเครื่องทดลองแรงดึงที่ความเครียดเท่ากับ 25% คงที่

ความเครียดไว้เป็น เวลา 400 วินาที ทดลองภายในตู้ควบคุมอุณหภูมิที่ -50,-25, 0 และ 25 องศาเซลเซียส



ภาพที่ 2 แสดงการทดสอบการกดตัวอย่างคันที่อุณหภูมิติดลบ 25 องศาเซลเซียส

3.3.4. Dynamic Mechanical Analysis (DMA)

การทดสอบ DMA (Dynamic Mechanical Analysis) ใน Shear Mode ที่ Frequency 1Hz ,Displacement amplitude = 30 μ m, Force amplitude = 3N ที่อุณหภูมิ -110°C ถึง 30 °C , scan rate = 4C / min ทำโดยใช้เครื่อง Mettler Teledon DMA/SDTA 861 ที่ ศูนย์วิจัยโลหะและวัสดุแห่งชาติ (MTEC)

3.3.5. Differential Scanning Calorimeter (DSC)

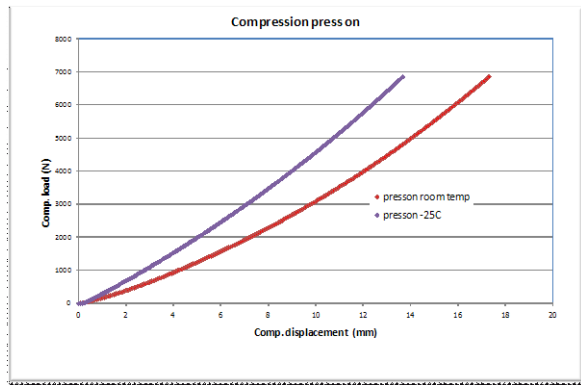
การทดสอบ DSC (Differential Scanning Calorimeter) ด้วยเครื่อง Netzsch DSC 204 ที่ มหาวิทยาลัยมหิดล

3.3.6. Thermal Mechanical Analysis (TMA)

การทดสอบ TMA (Thermal Mechanical Analysis) ทำด้วยเครื่อง Mettler Teledon DMA/SDTA 861 ที่ ศูนย์วิจัยโลหะและวัสดุแห่งชาติ (MTEC) scanning rate = 5C/min, Static load = 0.05 N

4. ผลการวิจัย

4.1. ผลการทดสอบการกดล้อยางดันที่อุณหภูมิต่ำ



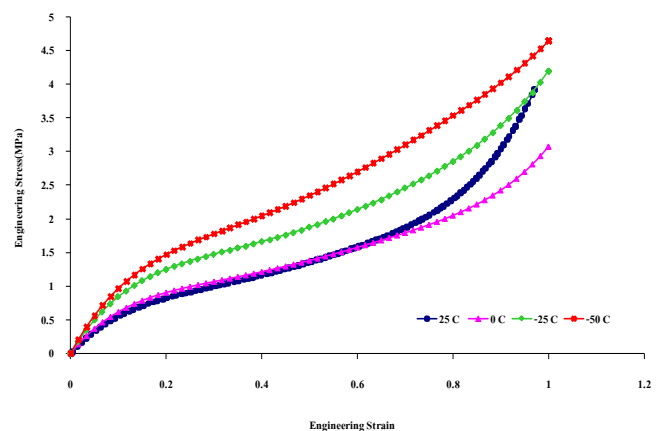
ภาพที่ 3 แสดง กราฟของระยะขยุตัวเทียบกับแรงกดของล้อยางดัน Press on ที่อุณหภูมิห้อง (สีแดง) และที่อุณหภูมิ -25°C (สีม่วง)

จากภาพที่ 3 กราฟระหว่างระยะขยุตัวกับแรงกดที่จากการทดสอบการกดล้อยาง Press on ที่อุณหภูมิห้องและอุณหภูมิตดลบ 25 องศาเซลเซียส จะสามารถเห็นได้ชัดว่าความชันของกราฟการขยุตัวของล้อยาง Press on ที่อุณหภูมิตดลบ 25 องศาเซลเซียส จะมากกว่าความชันของกราฟที่อุณหภูมิห้อง ซึ่งหมายความว่าที่อุณหภูมิต่ำล้อยางจะแข็งแรงขึ้น

อีกทั้ง หลังจากการทดสอบการขยุตัวแล้ว เคลื่อนเป็นกดให้มาอยู่ ที่ตำแหน่งตอนเริ่มทดสอบ พบว่าล้อยางจะไม่สามารถคืนรูปกลับมาที่เดิมได้ โดยเร็วเหมือนกับการทดสอบที่อุณหภูมิห้องซึ่งล้อยางจะสามารถคืนตัวกลับได้เกือบทันที สาเหตุที่เป็นเช่นนี้เพราะวัสดุยางที่ใช้มีคุณสมบัติที่ยังไม่เหมาะสมกับสภาพอากาศที่มีอุณหภูมิต่ำมากๆ ได้ เมื่อไปใช้งานจริงในขณะที่รถรับภาระและจอดอยู่นิ่ง ล้อยางจะเกิดการเสียรูปร่างไป และเมื่อรถเริ่มเคลื่อนที่ ล้อยางจะคืนสภาพให้เป็นทรงกลมเหมือนเดิมได้ช้าและเกิด Flat spot ซึ่งจะมีผลเสียทำให้ล้อยางเสียความสมดุล และอาจทำให้ล้อยางเกิดความเสียหายได้

4.2. การทดสอบการดึงแกนเดียว

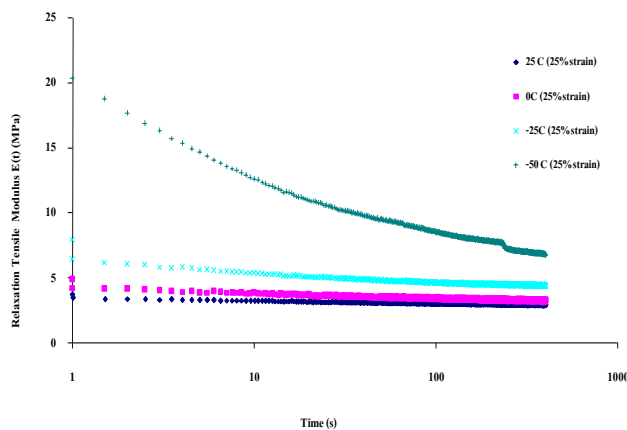
ผลการทดสอบการดึงแกนเดียวของวัสดุยาง หลังนำผลกระทบของมุลินออกแล้ว สามารถนำมาพลอต กราฟระหว่าง Engineering Stress และ Engineering Strain ที่อุณหภูมิต่างๆระหว่าง -50 ถึง 25 องศาเซลเซียส ได้ดังแสดงไว้ในภาพที่ 4 จะเห็นได้ว่า สำหรับวัสดุยางที่ใช้ในการผลิตล้อยางดันแบบ Press-on ที่อุณหภูมิ 0 และ 25 องศาเซลเซียส เมื่อกำจัดผลของมุลินออกแล้ว เส้นกราฟระหว่าง Engineering Stress และ Engineering Strain ที่ทั้ง 2 อุณหภูมิมีค่าใกล้เคียงกันมาก แต่ เมื่ออุณหภูมิต่ำลง ความแตกต่างระหว่างเส้นกราฟความสัมพันธ์ของความเค้นวิศวกรรมและค่าความเครียดวิศวกรรมเมื่อเทียบกับที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียสจะยิ่งมีมากขึ้น ที่อุณหภูมิ -50 องศาเซลเซียสเส้นกราฟมีค่าความชันมากที่สุด จึงสามารถกล่าวได้ว่ายิ่งอุณหภูมิต่ำลง วัสดุยางจะประพฤติตัวเหมือนวัสดุที่มีความแข็งหรือ stiffness มากขึ้น



ภาพที่ 4 ผลเปรียบเทียบการดึงแกนเดียวของวัสดุยางที่ใช้ผลิตล้อยางดันแบบ Press on ที่อุณหภูมิต่างกัน

4.3. ผลการทดสอบการคลายความเค้น

จากการทดลองการคลายความเค้น สามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง โมดูลัสกับเวลา ดังได้แสดงดังภาพที่ 5 จะสังเกตได้ว่า ที่อุณหภูมิ ระหว่าง -25°C ถึง 25°C พฤติกรรมการผ่อนคลายความเค้นจะใกล้เคียงกันมาก แต่เมื่ออุณหภูมิลดต่ำลงมาถึง -50°C พฤติกรรมการผ่อนคลายความเค้นจะแตกต่างจากที่อุณหภูมิอื่นๆ โดยจะมีการผ่อนคลายความเค้นได้ช้าลง และมีการกลับคืนตัวที่ช้ากว่าที่อุณหภูมิอื่นๆ



ภาพที่ 5 กราฟระหว่างโมดูลัสการผ่อนคลายกับเวลาที่อุณหภูมิแตกต่างกันที่ความเครียดเท่ากับ 25% ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส, 0 องศาเซลเซียส, -25 องศาเซลเซียส, -50 องศาเซลเซียส

ตารางที่ 1 แสดงผลการทดสอบอย่างคอมปาวน์ ด้วย การทดสอบ DMA, DSC และ TMA

การทดสอบ	ช่วงอุณหภูมิ กลาสทรานซิชัน	อุณหภูมิกลาสทรานซิชัน (T_g)
DMA	-55°C ถึง -17°C	-45°C
DSC	-61°C ถึง -56°C	-58.1°C
TMA	NA	-52.1°C

4.4. ผลการทดสอบ DMA, DSC และ TMA

การทดสอบ DMA, DSC และ TMA ทำเพื่อหาช่วงอุณหภูมิและค่าอุณหภูมิของกลาสทรานซิชันของวัสดุยางคอมปาวน์ที่ใช้ศึกษา ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 1

4.5. การจำลองพฤติกรรมของการคลายความเค้นของวัสดุ ยางที่อุณหภูมิต่างๆ ด้วยแบบจำลองวัสดุ Linear Viscoelastic

สำหรับ แบบจำลองวัสดุ Linear Viscoelastic โมดูลัสการผ่อนคลายความเค้นที่ขึ้นอยู่ กับเวลาสามารถเขียนอยู่ในรูปของสมการอนุกรมพอนี่ (Prony's series) ได้ดังนี้

$$E(t) = E_o + \sum_{i=1}^n E_i \exp\left(-\frac{t}{\tau_i}\right) \quad (1)$$

$$E(t) = \frac{\sigma(t)}{\varepsilon_0} \quad (2)$$

โดยที่ $\sigma(t)$ คือ ความเค้นที่เวลา t

ε_0 คือ ความเครียดที่คงไว้ให้คงที่

τ_i คือ เวลาการคลายตัว

ซึ่งสามารถเขียน อยู่ในรูปของอัตราส่วน โมดูลัสการผ่อนคลายความเค้นได้ดังนี้ [7]

$$g(t) = 1 - \sum_{i=1}^N g_i (1 - \exp(-\frac{t}{\tau_i})) \quad (3)$$

เมื่อ $g(t)$ คือ อัตราส่วนโมดูลัสการผ่อนคลายความเค้นที่เวลา t

$$g(t) = \frac{E(t)}{E_o} \quad (4)$$

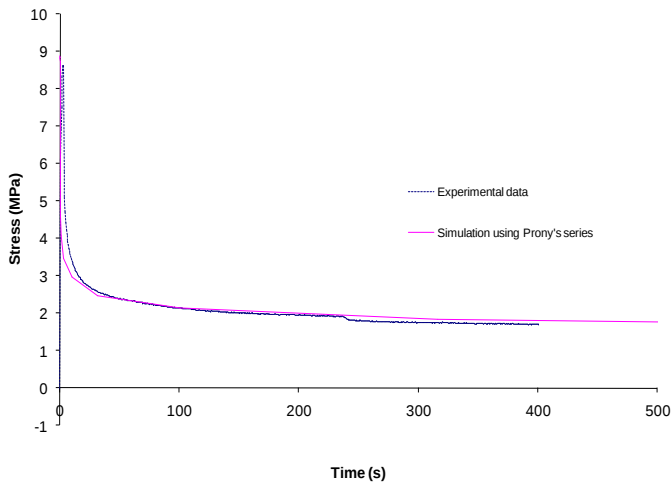
โดย $E(t)$ คือ โมดูลัสผ่อนคลายความเค้นที่เวลา t

E_o คือ โมดูลัสการผ่อนคลายความเค้นที่ $t = 0$

เมื่อเราได้ค่าการทดลองการผ่อนคลายความเค้นที่อุณหภูมิ -50 องศาเซลเซียสเรานำข้อมูลที่ได้เพื่อมาหาค่า g_i และ τ_i โดยใช้ข้อมูลจากการทดสอบการผ่อนคลายความเค้นแทนในสมการที่ 1 ถึง 4 โดยค่าของ τ_i จะถูกเลือกให้ครอบคลุมช่วงเวลาที่เกิดการ

คลายความเค้นให้มากที่สุดและแต่ละค่าของ τ_i ห่างกัน 10 เท่า (1 decade)

ค่าสเปกตรัมของการผ่อนคลาย ความเค้นของวัสดุยางคอมปาว์นที่ใช้ศึกษา แสดงไว้ในตารางที่ 2 และผลที่ได้จากการจำลองการคลายความเค้นด้วยค่าสเปกตรัมที่อุณหภูมิ -50°C แสดงดังภาพที่ 6



ภาพที่ 6 ผลการจำลองการผ่อนคลายความเค้นที่อุณหภูมิ -50°C ของวัสดุยางที่ใช้ศึกษา

ในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้สมการวิลเลียม-แลนเดล-เฟอร์รี (Williams - Landel - Ferry Equation : WLF) เพื่อแสดงถึงการเปลี่ยนแปลงของ shift factor a_T ซึ่งขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ ดังแสดงในสมการที่ 5

$$\log a_T = \frac{C_1(T - T_s)}{C_2 + (T - T_s)} \quad (5)$$

C_1, C_2 คือค่าคงที่, T คืออุณหภูมิที่สนใจ
 T_s คืออุณหภูมิอ้างอิง

ในที่นี้อุณหภูมิอ้างอิงคืออุณหภูมิ -50 องศาเซลเซียส โดยได้ค่าคงที่ที่ใช้ในสมการ (5) ดังได้แสดงไว้ในตารางที่ 3

ผลการเปรียบเทียบระหว่างผลการจำลอง ที่ใช้แบบจำลอง linear viscoelastic ข้างต้นกับการผลการทดสอบการคลายความเค้นที่ความเครียด 25 % ที่

อุณหภูมิต่างๆ ได้แสดงไว้ในภาพที่ 7 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าแบบจำลองวัสดุดังกล่าวสามารถอธิบายพฤติกรรมวัสดุที่ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและเวลาได้ใกล้เคียงผลทดสอบจริงที่อุณหภูมิต่างๆที่ใช้ทดสอบ

ตารางที่ 2 ค่าค่าสเปกตรัมของการผ่อนคลายความเค้นของวัสดุยาง ที่หาจากการทดสอบการผ่อนคลายความเค้นที่ -50°C

Relaxation Spectrum	
g_i	τ_i (sec)
0.193900488	0.001
0.057704349	0.01
0.187562551	0.1
0.132669904	1
0.125710656	10
0.073148006	100
0.060133491	1000
0.042732126	10000
0.037549233	100000

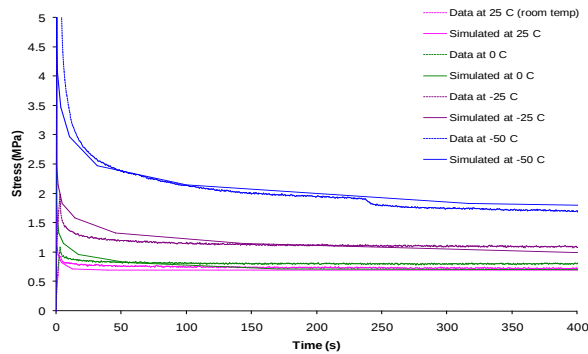
ตารางที่ 3 ค่าคงที่ของสมการ WLF ที่หาได้ โดยอุณหภูมิอ้างอิง T_s คือ -50 องศาเซลเซียส

ค่าคงที่ในสมการ WLF	
C_1	C_2
14.40	170.27

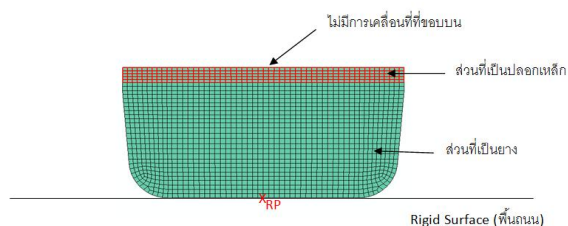
4.6. การวิเคราะห์การใช้งานล้อยางดันเบื่องดันด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

ในโครงการนี้ได้ทำการจำลองการรับภาระของล้อยางดันโดยการรับภาระกดด้วยแรงคงที่ ขนาด 1,000 Kg เป็นเวลา 60 วินาที และปล่อยให้ล้อยางคืนตัวหลังเอาภาระออก ที่อุณหภูมิห้อง 25°C และที่อุณหภูมิ -25°C ซึ่งเป็นอุณหภูมิทั่วไปในห้องเย็นที่ใช้

ในอุตสาหกรรมแช่แข็ง โดยได้สร้างแบบจำลองแสดงในภาพที่ 8 ด้วยโปรแกรม ABAQUS 6.8 ร่วมกับแบบจำลองวัสดุแบบ Visco-Hyperelastic โดยค่าพารามิเตอร์ในส่วนที่เป็น Viscoelastic ของยางทั้งสองชนิดได้แสดงไว้ในตารางที่ 2 และ 3 ส่วนที่เป็น Hyperelastic ได้เลือกแบบจำลองแบบ Neo-Hookean โดยค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองดังกล่าวสามารถได้จากข้อมูลที่ได้จากการทดสอบดึงแกนเดียว (uniaxial tensile test) ค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลอง Neo-Hookean ซึ่งคือค่า C_{10} ของวัสดุยางที่ใช้คือ 6.0

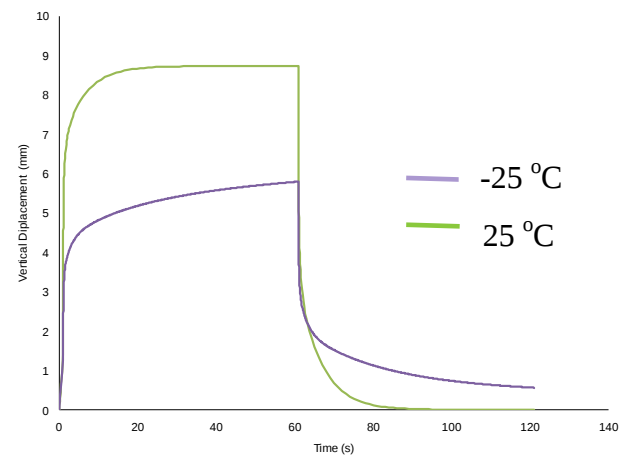


ภาพที่ 7 แสดง ผลการเปรียบเทียบระหว่างผลการจำลองกับการผลการทดสอบการคลายความเค้นที่ความเครียด 25 % ที่อุณหภูมิต่างๆของวัสดุยาง

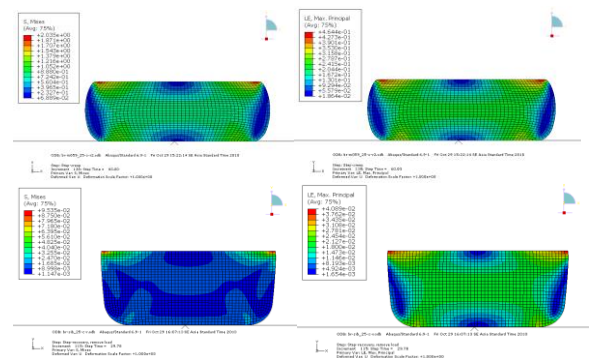


ภาพที่ 8 แสดงแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์และเงื่อนไขขอบเขตในการจำลอง

การกีดตัวของระยะกระจัดของหน้ายางตามแนวตั้งขณะรับภาระ และการคืนตัวหลังเอาภาระออกของล้อยางตันที่ได้จากการจำลองด้วย แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ข้างต้น ที่อุณหภูมิ 25 °C และ -25 °C ได้แสดงไว้ในภาพที่ 9



ภาพที่ 9 แสดงการกีดตัวของระยะกระจัดของหน้ายางตามแนวตั้งและการคืนตัวของ ล้อยางเทียบกับเวลาที่อุณหภูมิ 25 °C และ -25 °C ที่ได้จากการจำลองด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์



ภาพที่ 10 แสดงผลการกระจายตัวของ ความเค้น Von Mises และความเครียดหลักสูงสุดในส่วนยางของล้อยางตันที่อุณหภูมิ -25 °C ที่เวลา 60 วินาทีหลังจากรับภาระ 1,000 Kg (บน) และที่เวลา 30 วินาทีหลังจากเอาภาระ 1,000 Kg ออก (ล่าง)

จากภาพที่ 9 จะเห็นได้ว่าแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ ดังกล่าวสามารถจำลองพฤติกรรมการกีดและการคืนตัว (Creep and Recovery) ของล้อยางตันที่อุณหภูมิข้างต้นได้ และที่อุณหภูมิ -25 °C ล้อยางจะคืนตัวกลับสู่สภาพเดิมหลังเอาภาระออก ได้ช้ากว่าที่อุณหภูมิห้องอย่างชัดเจนสอดคล้องกับความเป็นจริง

อีกทั้งจากภาพที่ 10 แสดงถึงความสามารถของการจำลองด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ที่สามารถแสดงถึงการกระจายความเค้นและความเครียดขณะรับภาระและความเค้นและความเครียดตกค้างเมื่อนำภาระออก

5. อธิบาย,สรุปผลและข้อเสนอแนะ

จากผลการทดสอบในโครงการนี้ พบว่าเมื่อนำตัวอย่างต้นไปรับภาระกดที่สภาวะอุณหภูมิ -25°C (ซึ่งเป็นอุณหภูมิทั่วไปของห้องเย็นที่ใช้แช่แข็งอาหาร) ตัวอย่างแข็งขึ้นและจะสูญเสียความสามารถในการคืนตัว กลับสู่สภาพเดิมอย่างรวดเร็ว ทั้งนี้เป็นเพราะ ที่อุณหภูมิดังกล่าววัสดุยางที่ใช้ทำตัวอย่างต้นจะมีสถานะอยู่ในช่วงกลาสทรานซิชันที่วัดได้จาก DMA คือระหว่าง -55°C ถึง -17°C และเข้าสู่สถานะกลาสซึ่งโมเลกุลจะขยับตัวได้ยาก ซึ่งสอดคล้องกับผลจากการทำการทดสอบแรงดึงและการคลายความเค้นที่พบวัสดุยางจะต้านแรงดึงมากขึ้น และคลายความเค้นได้ช้าลงกว่าที่อุณหภูมิห้อง เมื่ออุณหภูมิลดต่ำลง จากนั้นได้ทำการจำลองพฤติกรรมการคลายความเค้นของวัสดุยางนี้ด้วยแบบจำลองวัสดุแบบ Linear Viscoelastic โดยใช้ โพรเน็ตซีรีส์และค่าเลื่อนเวลาจากสมการ WLF โดยทำการหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมซึ่งพบว่าแบบจำลองดังกล่าวสามารถอธิบายพฤติกรรมวัสดุได้ใกล้เคียงผลทดสอบจริงที่อุณหภูมิต่างๆที่ใช้ทดสอบ และได้ทำการจำลองพฤติกรรมการรับภาระกดคงที่และการคืนตัวเมื่อนำภาระออกของตัวอย่างต้นแบบ press-on ที่อุณหภูมิห้องเปรียบเทียบกับที่ -25°C ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ พบว่าแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ดังกล่าวสามารถจำลองพฤติกรรมการคืบและการคืนตัว (Creep and Recovery) ของตัวอย่างต้นที่อุณหภูมิข้างต้นได้ รวมถึงการกระจายตัวของความเค้นและความเครียดตกค้างได้ และที่อุณหภูมิ -25°C ตัวอย่างจะคืนตัวกลับสู่สภาพเดิมหลังจากภาระออกได้ช้ากว่าที่อุณหภูมิห้องอย่างชัด เจนสอดคล้องกับความเป็นจริง ซึ่ง

แบบจำลองดังกล่าวสามารถนำไปใช้ในการวิเคราะห์ปัญหาอื่นๆเช่น การกระจายตัวของพื้นผิวสัมผัส หรือการยึดติดกับกระทะลื้อ ที่จะเป็นประโยชน์ต่อการพัฒนาประสิทธิภาพที่พึงประสงค์ของตัวอย่างต้นสำหรับการใช้งานที่อุณหภูมิต่ำต่อไป โดยจะสามารถลดการลองผิดลองถูกในการสร้างตัวอย่างต้นแบบและทดสอบจริงซึ่งจะเป็นการประหยัดทั้งเวลาและค่าใช้จ่าย

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Dick, J. S., Ed., Rubber technology : compounding and testing for performance, Hanser Gardner, 2001.
- [2] Goran Spetz, Elastocon AB, Sweden, Technical report 01/4 April 2001, "Development in low temperature testing of Rubber materials", www.elastocon.se
- [3] Schaefer, R. J., "Dynamic Rubber Technology", Rubber World, April 1995, pp. 22.
- [4] Gauthier, C., et al, "Analysis of the non-linear viscoelastic behaviour of silica", Polymer, 45, (2004), pp. 2761
- [5] Ginic-Markovic, M., "Viscoelastic behaviour of filled, and unfilled, EPDM elastomer", Thermochimica Acta, 357-358 (2000), pp. 211
- [6] Brazier, D. and Nickel, G. "Application of tma for rapid evaluation of low-temperature properties of elastomer vulcanizates", 52 (1979), pp. 735
- [7] ABAQUS Standard User's Manual Version 6.8, Dassault Systemes Simulia Corp., USA

การชี้แจงข้อคิดเห็นและเสนอแนะจาก สกว.

<u>ข้อคิดเห็นจาก สกว.</u>	<u>คำชี้แจง</u>
1. การตอบข้อคิดเห็นจาก สกว MPR	
1.1 ส่วนใหญ่เป็นการเสนอข้อมูลดิบจากห้องปฏิบัติการ ไม่ค่อยให้ความรู้ว่ามีทฤษฎี คำนวณอย่างไร	ในรายงานมีทั้งการนำเสนอข้อมูลผลการทดสอบ และผลการวิเคราะห์ด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์โดยใช้แบบจำลองวัสดุแบบ Visco-hyperelastic ด้วย ทั้งนี้ได้นำเสนอวิธีการหาพารามิเตอร์ต่างๆจากการทดสอบ เพื่อนำมาใช้กับแบบจำลองวัสดุ และผลการวิเคราะห์ด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ที่แสดงให้เห็นความสามารถในการทำนายพฤติกรรมของวัสดุและผลิตภัณฑ์ล้อยางที่ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและเวลาด้วยแบบจำลองดังกล่าว ทางผู้วิจัยมั่นใจว่าจะ <u>เป็นประโยชน์แก่ผู้ที่มีความรู้ในสาขาของการไฟไนต์เอลิเมนต์ และการจำลองพฤติกรรมวัสดุด้วยวิธีเชิงตัวเลขในประเทศไทย</u> ที่จะสามารถนำไปวิเคราะห์และออกแบบผลิตภัณฑ์ยางล้อต่อไป โดยสามารถที่จะลดเวลาการลองผิดลองถูกและค่าวัสดุที่จะต้องมาทำต้นแบบผลิตภัณฑ์แล้วมาทำการทดสอบจริง
1.1.1 การพิมพ์รายงานควรมีการเคาะ 1 ครั้งระหว่างตัวพยางค์กับเครื่องหมายต่างๆ หรืออักษรภาษาอังกฤษ	1.1.1 ได้ทำการแก้ไขในรายงานฉบับสมบูรณ์ตามคำแนะนำ
1.1.2 หน้าที่ 3 ตามแกน x อุณหภูมิควรเพิ่มไม่ใช้ลด ในบรรทัดที่ 11	1.1.2 ได้ทำการแก้ไขในรายงานฉบับสมบูรณ์ตามคำแนะนำ
1.1.3 หน้าที่ 4 ประโยคไม่สมบูรณ์ในย่อหน้าแรก ความเป็น หายไป	1.1.3 ได้แก้ไขหน้าที่ 4 ย่อหน้าแรกเป็น "ยางจะแสดงพฤติกรรมเชิงกลที่ขึ้นอยู่กับเวลา(Rate dependent)อย่างชัดเจน"
1.1.4 ควรแก้ “สารเติมเต็ม” เป็น “สารตัวเติม” ตามที่ปกติใช้กันในวงการยาง	1.1.4 ได้ทำการแก้ไขในรายงานฉบับสมบูรณ์ตามคำแนะนำ

ข้อคิดเห็นจาก สกว.	คำชี้แจง
1.1.5 คำว่า “Solution” ที่นักวิจัยใช้คำว่า “ผลเฉลย” แก่เป็น “ผลลัพธ์” น่าจะเหมาะสมกว่า	1.1.5 คำว่า “ผลเฉลย” เหมาะสมกับ context ของระเบียบวิธีเชิงตัวเลขแล้ว
1.2 วัตถุประสงค์ต้องเป็นตามที่ระบุในสัญญา	วัตถุประสงค์ตามที่ระบุในสัญญาคือ "เพื่อศึกษาสมบัติเชิงกลของยางคงรูปเพื่อนำมาพัฒนาผลิตภัณฑ์ล้อยางคันให้สามารถใช้งานได้มีประสิทธิภาพได้ดีขึ้นที่อุณหภูมิต่ำ" ซึ่งโครงการนี้ ได้ทำตามวัตถุประสงค์ตามที่ระบุในสัญญาแล้ว
1.3 การวิจัยควรมีลำดับขั้นมากกว่านี้ นักวิจัยกล่าวกระโดดมาก มีสูตรในการปรับปรุงอยู่ 2 สูตรจากสูตรเดิมที่ใช้ยาง NBR และ SBR มาเป็น NR และ BR ส่วนสารเคมีก็เปลี่ยนอย่างไม่มีที่มาที่ไป ควรจะมีการสรุปว่าใช้ตัวแปรอะไรบ้าง ทำไมถึงเปลี่ยนมาเป็นสูตรที่ได้มาด้วย การเปลี่ยนน้ำมันค้อยรับได้ แต่สารตัวเร่ง CBS เดิมก็คืออยู่แล้วกับเขม่าดำ และเริ่มต้นทำไมเลือก NBR ทั้งๆ ที่ Tg สูงกว่า NR มากๆ คู่ยางที่เลือกครั้งแรก ก็ไม่น่าสนใจ และไม่เหมาะสมตั้งแต่แรก ทั้งที่ทราบว่าจะใช้ที่อุณหภูมิต่ำ สูตรยางคู่แรกที่เสนอมาจากการทดสอบ Tg ไม่น่าจะถึง -45 C เลย น่าจะสูงกว่านี้ ทั้งนี้ ควรมีคำอธิบายเพิ่มเติมเกี่ยวกับการปรับสูตรว่ามีการปรับสัดส่วนของ สารเคมี อะไร เพราะอะไร และการปรับเพียงครั้งเดียวก็ได้ข้อสรุปที่ดีเลยใช้หรือไม่ ซึ่งไม่น่าจะเป็นไปได้ อย่างไรก็ตาม ไม่แน่ใจว่าสูตรที่นำเสนอเป็นสูตรที่ใช้ทดลองจริงในงานวิจัยนี้ เพราะนักวิจัยไม่ได้ทำเอง ตัวอย่างน่าจะเตรียมมาจากบริษัทเกรงว่าบริษัทจะไม่เปิดเผยข้อมูลที่แท้จริง จะเห็นได้จากสูตรดั้งเดิมที่ใช้ เริ่มจากสูตร NBR เพราะเป็นยางทนน้ำมันไม่ใช่ยางทนความเย็น	เนื่องจากนักวิจัยไม่ได้เตรียมคอมปาว์นยางเอง สูตรยางสำหรับล้อยางคันดังกล่าวได้มาจากบริษัทเอกชน ซึ่งตอนแรกได้ข้อมูลสูตรคอมปาว์ดที่คลาดเคลื่อนกับคอมปาว์นที่ใช้ทดสอบจริง ทั้งนี้ได้ใส่สูตรคอมปาว์นที่แท้จริงในรายงานฉบับสมบูรณ์แล้ว แต่อย่างไรก็ดียางคอมปาว์นแรกที่ใช้ถึงแม้มี Tg ต่ำกว่า -25°C แต่ก็มี การคืนตัวที่ไม่ดีและมีการคลายความเค้นที่ช้ากว่าที่อุณหภูมิห้องมาก โดยในคอมปาว์นที่ได้รับการปรับปรุงจากคอมปาว์นแรกโดยมีการใส่ BR ซึ่งมีค่า Tg ที่ต่ำกว่า -90 oC และใส่นaphthenic petroleum oil ซึ่งเป็น Plasticizer ที่ทำให้ยางมีความยืดหยุ่นดีที่อุณหภูมิต่ำ จึงทำให้ยางที่ปรับปรุงขึ้นใหม่มีค่า Tg ที่ต่ำกว่า และความยืดหยุ่นและการคลายความเค้นที่เร็วกว่าของคอมปาว์นแรก ที่อุณหภูมิ -25°C ทั้งนี้ผู้วิจัยมีความคิดว่าสูตรคอมปาว์นยางไม่ได้เป็นองค์ความรู้สำคัญที่ได้จากงานวิจัยนี้ โดยในโครงการนี้แสดงให้เห็นว่าถึงแม้ยางคอมปาว์นจะมี Tg ที่ต่ำกว่าอุณหภูมิที่ใช้งานในห้องเย็น (-25 °C) แต่ไม่ได้หมายความว่ายางคอมปาว์นดังกล่าวจะใช้งานได้ดีที่ -25 °C เพราะ ความกว้างของช่วงอุณหภูมิกลาสทรานซิชันก็มีผลต่อสมบัติวัสดุ ซึ่งคอมปาว์นนี้นี้มีความกว้างของช่วงอุณหภูมิกลาสทรานซิชันอยู่ระหว่าง -55°C ถึง -17 °C และยังมีสมบัติอื่นๆ โดยเฉพาะสมบัติวิสโคอีลาสติก ที่จะส่งผลต่อการคลายความเค้น, การคืบ และการคืนกลับตัวได้ดี ของล้อยาง ที่ต้องศึกษาและคำนึงถึง เมื่อปรับสูตรยางคอมปาว์นให้มี Tg ต่ำลง ก็

	ยังคงต้องศึกษา สมบัติการคลายความเค้น, การคืบ และการคืนกลับตัว ว่าดีขึ้นที่อุณหภูมิที่ใช้งานหรือไม่ และในงานวิจัยนี้ก็ได้ขงคอมพิวเตอร์ใหม่ที่ได้รับการอนุเคราะห์จากบริษัทเอกชนที่ทำการเพิ่ม BR และ naphthenic petroleum oil ที่มีคุณสมบัติการใช้งานที่อุณหภูมิค่าที่พึงประสงค์ได้ ซึ่งการปรับปรุงคอมพิวเตอร์ดังกล่าวเป็นเพียงตัวอย่างแนวทางการปรับปรุงสูตรยางที่ได้ผล ซึ่งอาจจะมีวิธีอื่นที่ดีกว่านี้
1.4 ควรนำเสนอข้อมูลในรูปแบบที่สมบูรณ์ คือ สูตร เทคนิค และผลการใช้งานจริงสำหรับผลิตภัณฑ์ ล้อยางต้น เพื่อผู้ประกอบการจะสามารถนำผลงานไปใช้ในการทดลองผลิตจริงได้	ได้ใส่สูตรและเทคนิคการเตรียมขึ้นทดสอบที่สมบูรณ์ในรายงานฉบับสมบูรณ์แล้ว ทั้งนี้เงินงบประมาณที่ขอไปไม่เพียงพอต่อการผลิตผลิตภัณฑ์ล้อยางต้นที่ใช้สูตรยางที่ปรับปรุงใหม่เพื่อมาทดสอบใช้งานจริง โดยโครงการนี้ถึงแม้ยังไม่ได้ผลิตภัณฑ์ล้อยางต้นที่ใช้สูตรยางที่ปรับปรุงใหม่ขึ้นมาจริง แต่ได้ทำการจำลองการใช้งานของล้อยางต้นที่ใช้สูตรยางใหม่เปรียบเทียบกับล้อยางต้นที่ใช้สูตรยางเดิม โดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ร่วมกับแบบจำลองวัสดุแบบ visco-hyperelasticity ซึ่งได้พารามิเตอร์จากผลการทดสอบการคลายความเค้นที่อุณหภูมิต่างๆ ทำให้สามารถทำนายได้ว่าผลิตภัณฑ์จากยางสูตรใหม่นี้จะมีประสิทธิภาพที่ดีกว่าเดิม เนื่องจากการคืบ (creep) ของหน้ายางที่น้อยกว่าและสามารถคืนตัวกลับได้เร็วกว่าเมื่อนำภาระออก
1.5 ข้อมูลจากรายงาน ยังไม่สามารถบอกได้ว่าเตรียมยางอย่างไร เตรียมเอง หรือผู้ใช้ผลงานเตรียมให้เท่าที่รายงานมีผลเพียงเล็กน้อย ว่าทำการปรับสูตรแล้ว <u>Tg สูงขึ้นกว่าเดิม</u> ทำให้สรุปออกมาว่าน่าจะใช้ได้ แต่ไม่มีข้อมูลอื่นที่ใช้ในการยืนยันมากกว่านี้	ในโครงการนี้ผู้วิจัยไม่ได้เตรียมยางเอง โดยทั้งนี้ได้รับความอนุเคราะห์จากบริษัทยางล้อเอกชนบริษัทหนึ่งเป็นผู้เตรียมยางให้ทั้งหมด โดยเมื่อทำการปรับปรุงสูตรแล้ว ได้ <u>Tg ต่ำกว่าเดิม</u> (ไม่ใช่สูงขึ้นตามผู้ประเมินกล่าว) อีกทั้งความกว้างของช่วงอุณหภูมิกลาสทรานซิชันยังแคบลง โดยได้มีข้อมูลการทดสอบแรงดึงและการคลายความเค้นที่อุณหภูมิค่า และผลการวิเคราะห์การคืบ (creep) และการคืนตัวของหน้าล้อยางต้น โดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ เป็นข้อมูลเสริมเพิ่มเติมว่าสูตรยางที่ได้รับการปรับปรุงใหม่เมื่อนำมาผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ล้อยางต้นแล้วจะมี

	ประสิทธิภาพที่ดีขึ้นกว่าเดิม
1.6 นักวิจัยยังขาดการอธิบายผลการทดลอง มีแต่รูป เช่น ควรสรุปว่าจากกราฟหรือตาราง ผลที่ได้สื่อถึงอะไร ให้ความรู้อะไร หรือว่าเหตุผลที่เกิดการเปลี่ยนแปลงนั้น เกิดจากอะไร เป็นความรู้เชิงวิชาการด้วยว่า เกิดอะไรขึ้นถึงได้ผลเช่นนี้ ไม่ใช่บอกว่ามีความแตกต่างหรือเพิ่มขึ้นจากเดิม เช่นในหน้าที่ 13 ควรให้เหตุผลด้วยว่าที่อุณหภูมิต่ำ -50 C ถึงมีการผ่อนคลายความเค้น และการกลับตัวช้ากว่าอุณหภูมิอื่นๆ สรุปออกมาโดยไม่มีเหตุผลรองรับ ในรูปอื่นๆเช่นเดียวกัน (3.5-3.14) และจากความรู้ที่ได้จะนำไปแก้ไขกับงานของนักวิจัยอย่างไรต่อจากหน้าที่ 13	นักวิจัยได้กล่าวถึงการเปลี่ยนแปลงของสมบัติเชิงกลของยางที่เกิดขึ้นอย่างชัดเจนที่อุณหภูมิกลาสทรานซิชันแล้วในหัวข้องานวิจัยที่เกี่ยวข้องแล้วในหน้าที่ 3 และได้กล่าวอีกครั้งหนึ่งในหน้าที่ 14 ของร่างรายงานฯ ที่กล่าวถึงความสอดคล้องกันระหว่างผลการทดสอบ DMA และผลการทดสอบการผ่อนคลายความเค้นในช่วงอุณหภูมิกลาสทรานซิชัน ทั้งนี้ถ้าผู้อ่านมีพื้นฐานที่ดีเกี่ยวกับสมบัติของยางพอลิเมอร์น่าจะเข้าใจได้โดยไม่ต้องเกี่ยวกับผลการทดลองในหน้าที่ 13 แต่อย่างไรก็ดีผู้วิจัยได้ให้เหตุผลเพิ่มเติมสำหรับกลุ่มผู้อ่านที่อาจทำความเข้าใจได้ยากหรือมีพื้นฐานน้อยไว้ในรายงานฉบับสมบูรณ์แล้ว ผู้วิจัยได้ทำการทดลองดังเช่นในร่างรายงานหน้าที่ 13 มาทำการวิเคราะห์หาพารามิเตอร์ของแบบจำลองวิสโคอีลาสติกในหัวข้อที่ 4
1.7 ในการอ้างอิง นักวิจัยเขียนมาว่ามีการทำเรื่องเกี่ยวกับงานนี้ แต่ไม่บอกว่าทำอะไร แล้วพบอะไร ให้ความรู้อะไรบ้าง โดยไม่มีผลว่าเขาได้อะไร พบอะไร	ได้มีการเพิ่มเติมข้อมูลของผลงานวิจัยที่อ้างอิงในรายงานฉบับสมบูรณ์ในส่วนของผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องแล้ว
1.8 ภาพที่ 4-4 และ 4.5 คำอธิบายภาพเหมือนกันแต่กราฟต่างกัน?	ได้แก้ไขคำอธิบาย ภาพที่ 4-4 เป็น "ผลการเปรียบเทียบระหว่างผลการจำลองกับการผลการทดสอบการคลาย ความเค้นที่ความเครียด 25 % ที่อุณหภูมิต่างๆ ของสูตรยางเดิม A" และ ภาพที่ 4-5 เป็น "ผลการเปรียบเทียบระหว่างผลการจำลองกับการผลการทดสอบการคลาย ความเค้นที่ความเครียด 25 % ที่อุณหภูมิต่างๆ ของสูตรยางใหม่ B"
1.9 การอ้างอิงของ Dick ขอให้อ้างอิงหน้าด้วยเกี่ยวกับสูตรที่อ้างถึง	ในเอกสารอ้างอิง[15] ซึ่งเป็นงานของ Dick, J.S. ในหน้าที่ 92-98 เป็นคำแนะนำเกี่ยวกับการเลือกใช้วัสดุส่วนผสมต่างๆที่จะทำให้ยางคอมปาว์มีสมบัติที่ดีขึ้นที่อุณหภูมิต่ำ ทั้งนี้ได้ใส่เลขหน้าไว้ในเอกสารอ้างอิงเพิ่มเติมแล้ว
<u>ข้อคิดเห็นจาก สกว.</u>	<u>คำชี้แจง</u>
1.10 ภาพที่ 5-3 ถึง 5-18 ควร group ให้เหลือเป็น	ภาพที่ 5-3 ถึง 5-18 มีความแตกต่างกันคือ ค่า ของ Von Mises

สูตร A และมีเทียบกันที่อุณหภูมิ เวลา เดียวกัน หรืออะไรก็ตามที่สามารถเปรียบเทียบให้เห็นถึงความแตกต่างกันได้	Stress และ Maximum Principle Strain ที่เปลี่ยนไปที่เวลาและอุณหภูมิต่างกัน ระหว่างรับภาระ และระหว่าง เอาภาระออกแล้ว ที่ได้จากการจำลองด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์
1.11 ควรสรุปและอภิปรายผลการทดลอง ว่าประเด็นที่ได้เป็นอย่างไร ที่สรุปมาก่อนข้างน้อยเกินไป ควรสรุปให้เห็นเป็นรูปธรรมได้มากกว่านี้ ไม่ใช่ว่าขึ้นกับเวลา และอุณหภูมิ ซึ่งเป็นที่ประจักษ์ตามทฤษฎีอยู่แล้ว	ได้เพิ่มหาตรงส่วนสรุปและอภิปรายผลการทดลองในรายงานฉบับสมบูรณ์ตามคำแนะนำแล้ว
2. การตอบข้อสังเกต/ ข้อเสนอแนะ จาก สกว MPR 2.1 ข้อมูลที่มีอยู่ในวัตถุประสงค์ว่าจะศึกษาสมบัติเชิงกลของยางที่อุณหภูมิต่ำ นักวิจัยได้ทำการวัด และปรับสูตรมาหนึ่งสูตรจากสูตรเดิม วัดหาค่า Tg ว่าต่ำกว่าเดิมจาก -45 C เป็น -54 C แล้วสรุปว่าน่าจะใช้ได้เนื่องจากอุณหภูมิใช้งานอยู่ที่ -25 C สำหรับห้องเย็น ถ้าเป็นที่อุณหภูมินี้จริง สูตรเดิมน่าจะใช้ได้ ถ้าวัดถูกต้อง แต่จากสูตรยางเดิมที่ใช้ NBR ผสม SBR ค่า Tg ไม่น่าได้ถึง -45 C เพราะ Tg ของ NBR ต่ำเพียง -45 C อุณหภูมิการใช้งานในช่วง -40 C หรือสูงกว่าเป็น -20 C ฉะนั้น เวลาผสมกันก็ไม่ควรได้ -45 C ควรสูงกว่า	เนื่องจากนักวิจัยไม่ได้เตรียมคอมปาว์นตัวเอง สูตรยางสำหรับล้อยางต้นดังกล่าวได้มาจากบริษัทเอกชน ซึ่งตอนแรกได้ข้อมูลสูตรคอมปาว์ดที่คลาดเคลื่อนกับคอมปาว์นที่ใช้ทดสอบจริง ทั้งนี้ได้ใส่สูตรคอมปาว์นที่แท้จริงในรายงานฉบับสมบูรณ์แล้ว แต่อย่างไรก็ดียางคอมปาว์นแรกที่ใช้ถึงแม้มี Tg ต่ำกว่า -25°C แต่ก็มีสารก่อกวนตัวที่ไม่ดีและมีการคลายความเค้นที่ช้ากว่าที่อุณหภูมิห้องมาก โดยในคอมปาว์นที่ได้รับการปรับปรุงจากคอมปาว์นแรกโดยมีการใส่ BR ซึ่งมีค่า Tg ที่ต่ำกว่า -90 °C และใส่นaphthenic petroleum oil ซึ่งเป็น Plasticizer ที่ทำให้ยางมีความยืดหยุ่นดีที่อุณหภูมิต่ำ จึงทำให้ยางที่ปรับปรุงขึ้นใหม่มีค่า Tg ที่ต่ำกว่า และ ความยืดหยุ่นและการคลายความเค้นที่เร็วกว่ายางคอมปาว์นแรก ที่อุณหภูมิ -25°C ทั้งนี้ผู้วิจัยมีความคิดว่าสูตรคอมปาว์นยางไม่ได้เป็นองค์ความรู้สำคัญที่ได้จากงานวิจัยนี้ โดยในโครงการนี้แสดงให้เห็นว่าถึงแม้ยางคอมปาว์นจะมี Tg ที่ต่ำกว่าอุณหภูมิที่ใช้งานในห้องเย็น (-25 °C)แต่ไม่ได้หมายความว่ายางคอมปาว์นดังกล่าวจะใช้งานได้ดีที่-25 °C เพราะ ความกว้างของช่วงอุณหภูมิกลาสทรานซิชันก็มีผลต่อสมบัติวัสดุ ซึ่งคอมปาว์นนี้มีความกว้างของช่วงอุณหภูมิกลาสทรานซิชันอยู่ระหว่าง -55°C ถึง -17 °C และยังมีสมบัติ

	อื่นๆ โดยเฉพาะสมบัติวิสโคอิลาสติก ที่จะส่งผลต่อการคลายความเค้น, การคืบ และการคืนกลับตัวได้ดี ของล้อยาง ที่ต้องศึกษาและคำนึงถึง เมื่อปรับสูตรยางคอมปาวนัให้มี Tg ต่ำลง ก็ยังคงต้องศึกษา สมบัติการคลายความเค้น, การคืบ และการคืนกลับตัว ว่าดีขึ้นที่อุณหภูมิที่ใช้งานหรือไม่ และในงานวิจัยนี้ก็ได้ยางคอมปาวนัใหม่ที่ได้รับการอนุเคราะห์จากบริษัทเอกชนที่ทำการเพิ่ม BR และ naphthenic petroleum oil ที่มีคุณสมบัติการใช้งานที่อุณหภูมิต่ำที่พึงประสงค์ได้ ซึ่งการปรับปรุงคอมปาวนัดังกล่าวเป็นเพียงตัวอย่างแนวทางการปรับปรุงสูตรยางที่ได้ผล ซึ่งอาจจะมีวิธีอื่นที่ดีกว่านี้
2.2 นักวิจัยใช้เวลาเกินกำหนดมาก ควรมีคำชี้แจงและการขยายผลการวิจัยเป็นโครงการขนาดใหญ่ (LPR) นั้น ต้องมีความมั่นใจในส่วนร่วมสนับสนุนจากบริษัทฯ ตามสัดส่วน (In cash/ In Kind) ที่เหมาะสม เพราะว่าประโยชน์เป็นของบริษัทโดยตรง	งานวิจัยมีความล่าช้ามีส่วนหนึ่งมีสาเหตุมาจาก การได้ชุดอุปกรณ์สร้างสภาวะที่อุณหภูมิต่ำล่าช้าและต้องมีการส่งกลับไปต่างประเทศเพื่อไปปรับปรุงให้เข้ากับอุปกรณ์ Temperature Chamber ที่มีอยู่ที่ภาควิชาฯ อีกทั้งผู้วิจัยขาดนักศึกษาช่วยวิจัยที่สามารถช่วยทำงานได้ต่อเนื่อง งานวิจัยน่าจะเป็นประโยชน์ต่อบริษัทผลิตล้อยางต้นทั่วไป ด้วยเนื่องจากงานวิจัยนี้ได้นำเสนอ methodology ในการศึกษาสมบัติเชิงกลที่อุณหภูมิต่ำที่จำเป็นต่อการพัฒนาผลิตภัณฑ์ล้อยางต้น นอกจากนี้ยังเสนอตัวอย่างแนวทางการปรับปรุงสูตรยางที่ได้ผล อีกทั้งยังนำเสนอ methodology ในการวิเคราะห์การใช้งานของล้อยางต้นที่อุณหภูมิต่างๆ ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ร่วมกับแบบจำลองวัสดุแบบ visco-hyperelastic ซึ่งบริษัทอื่นจะนำไปเป็นแนวทางการพัฒนาล้อยางต้นได้เดี่ยวเช่นกัน