



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการการพัฒนาวิศวกรรมการออกแบบผลิตภัณฑ์และกระบวนการ
ผลิตยางตีนตะขา

โดย ผศ.ดร. ชนะ รักษ์ศิริ และคณะ

กุมภาพันธ์ 2562

สารบัญ

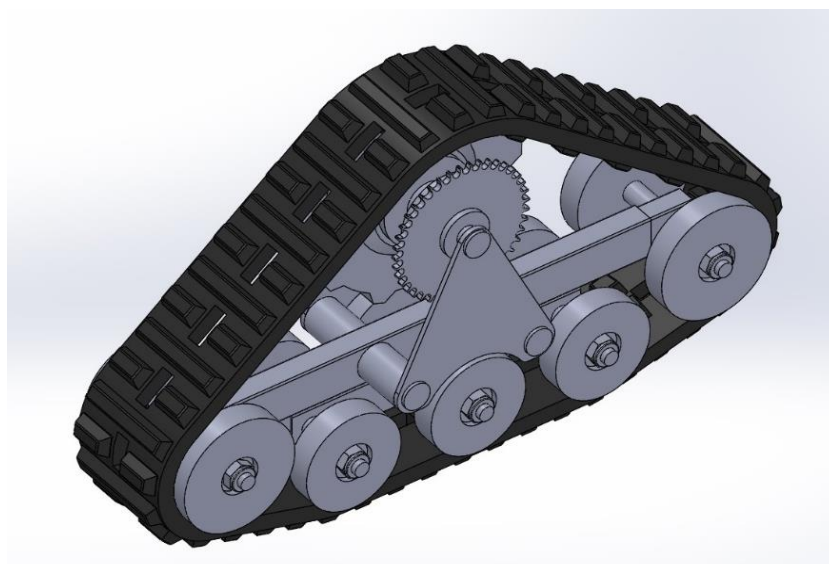
หน้า

Executive Summary	1
บทคัดย่อ	6
คำนำ	7
วัตถุประสงค์	8
ขอบเขตของงานวิจัย	8
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	9
การตรวจเอกสาร	10
อุปกรณ์และวิธีการ	22
ผลการดำเนินงาน	35
สรุปและข้อเสนอแนะ	50
เอกสารอ้างอิง	51
ภาคผนวก	
บทความสำหรับเผยแพร่	54
กิจกรรมที่เกี่ยวข้องกับการนำผลจากโครงการไปใช้ประโยชน์	60
ตารางเปรียบเทียบวัตถุประสงค์	61
ผลการทดสอบสมบัติเชิงกล และวิธีการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ในยางตีนตะขาบ	62
แบบสองมิติชิ้นส่วนทางกลของล้อและเครื่องทดสอบยางตีนตะขาบ	75
ข้อมูลจากเครื่องทดสอบยางตีนตะขาบ	87

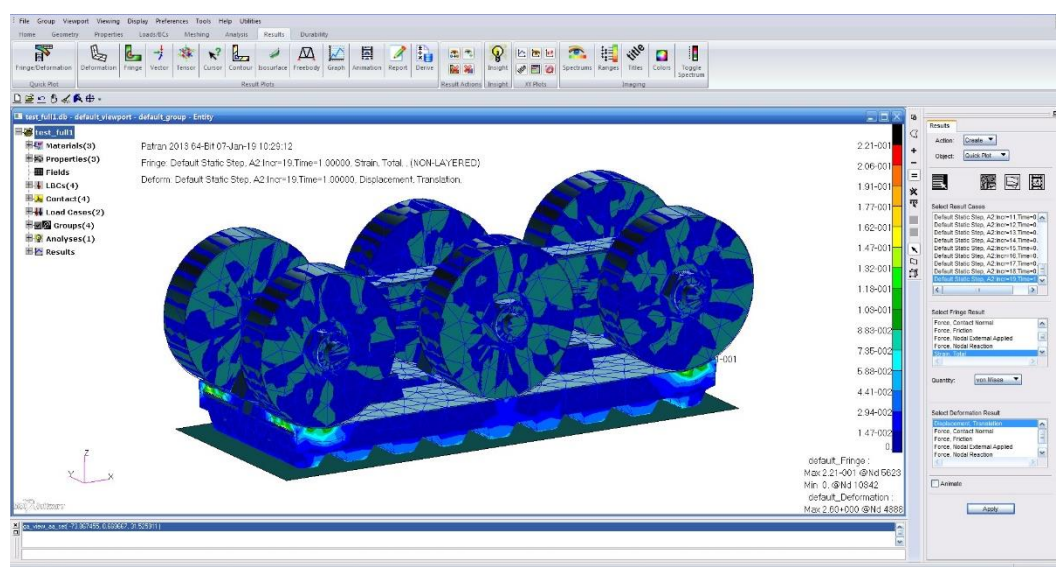
Executive Summary

ชื่อโครงการวิจัย	:	การพัฒนาวิศวกรรมการออกแบบผลิตภัณฑ์และกระบวนการผลิตยาง ตีนตะขา (A Development of Engineering Product Design and Manufacturing Process Design for Rubber Track)
หัวหน้าโครงการ	:	ผศ.ดร. ชนะ รักษศิริ
หน่วยงานต้นสังกัด	:	ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
หน่วยงานร่วมโครงการ	:	บริษัท อุตสาหกรรมผลิตยางไทยสิน จำกัด
ระยะเวลาดำเนินการ	:	12 เดือน
มูลค่างบประมาณรวมทั้งหมด	:	2,336,350 บาท

ยางตีนตะขาเป็นอุปกรณ์สำคัญสำหรับเครื่องจักรกลที่ใช้งานในด้านการเกษตรกรรม งานก่อสร้าง และงานเหมือง อันได้แก่ รถเก็บเกี่ยว รถตัดแต่ง รถตัด รถมอเตอร์ เนื่องจากยางตีนตะขาสามารถเคลื่อนที่เข้าไปในพื้นที่ทำงานในสภาพพื้นที่ต่างๆ ได้อย่างคล่องตัวกว่าล้อประเภทอื่นๆ โดยในประเทศไทยมีการใช้กันอยู่ 2 ชนิด ได้แก่ ล้อเหล็กตีนตะขาและล้อยางตีนตะขา ยางตีนตะขาจะสามารถแบ่งใช้กับขนาดของรถแทรกเตอร์ ดังแสดงในรูปที่ 2 โดยรถแทรกเตอร์มี 3 ประเภท ได้แก่ รถแทรกเตอร์ขนาดเล็ก (20-35 แรงม้า) ตีนตะขาสำหรับรถแทรกเตอร์ขนาดกลาง (36-60 แรงม้า) และตีนตะขาสำหรับรถแทรกเตอร์ขนาดใหญ่ (190-200 แรงม้า) นอกจากนี้ยังมีการใช้งานในรถพิเศษ คือ รถเอนกประสงค์ ATV ดังแสดงในรูปที่ 3 และรถเข็นผู้ป่วย ดังแสดงในรูปที่ 4 โดยยางตีนตะขาที่ใช้กับรถแทรกเตอร์นั้นได้มีบริษัทที่สามารถทำการผลิตและจำหน่ายภายในประเทศแล้ว แต่ยางตีนตะขาที่ใช้กับรถเอนกประสงค์ ATV และรถเข็นผู้ป่วยนั้นยังไม่มีผลิตและจำหน่าย อันเนื่องมาจากมีข้อจำกัดทั้งในด้านเทคโนโลยีการออกแบบผลิตภัณฑ์ การออกแบบกระบวนการผลิตและการออกแบบเครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบสมรรถนะการทำงานของยางตีนตะขาภายในประเทศ ทำให้ต้องมีการนำเข้ายางตีนตะขาจากต่างประเทศสำหรับใช้กับรถเอนกประสงค์ ATV และรถเข็นผู้ป่วยเป็นจำนวนมาก จากเหตุผลข้างต้นคณะวิจัยฯ จึงประยุกต์ใช้ เทคโนโลยีคอมพิวเตอร์ช่วยในการออกแบบ (Computer Aided Design, CAD) คอมพิวเตอร์ช่วยในการผลิต (Computer Aided Manufacturing, CAM) และคอมพิวเตอร์ช่วยในงานวิศวกรรม (Computer Aided Engineering, CAE) มาใช้ในการสร้างองค์ความรู้ในการ การออกแบบรายละเอียดของผลิตภัณฑ์ตามหน้าที่การใช้งานที่หลากหลาย รวมถึงการออกแบบแม่พิมพ์ในการขึ้นรูปปลายของยางตีนตะขาเพื่อใช้ในการผลิต รวมไปถึงการออกแบบอุปกรณ์ทดสอบผลิตภัณฑ์ยางตีนตะขา โดยในงานวิจัยนี้มีขอบเขตในการวิจัยสำหรับยางตีนตะขาสำหรับใช้กับรถเอนกประสงค์ ATV และรถเข็นผู้ป่วย เพื่อนำไปใช้เป็นองค์ความรู้พื้นฐานในการพัฒนาผลิตภัณฑ์ยางตีนตะขา ให้แก่เอกชนที่ต้องการสร้างผลิตภัณฑ์ยางตีนตะขาต่อไป



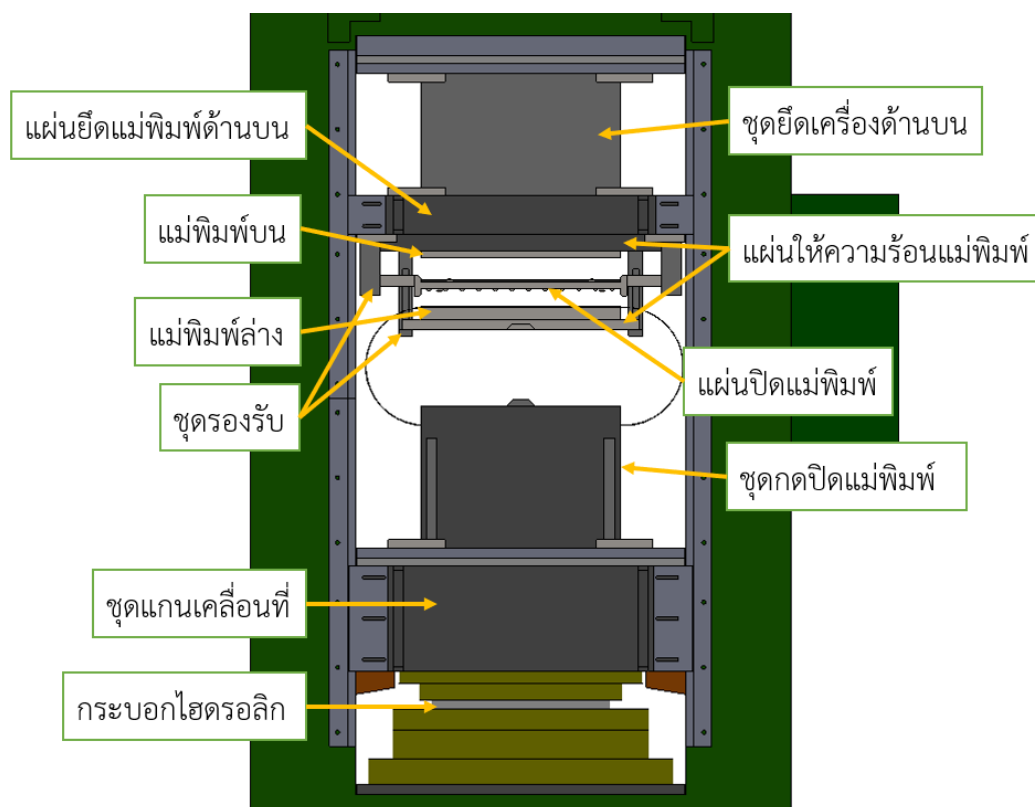
ภาพที่ 1 รูปแบบชุดล้ออย่างดินตะขาบที่ใช้ในงานวิจัย



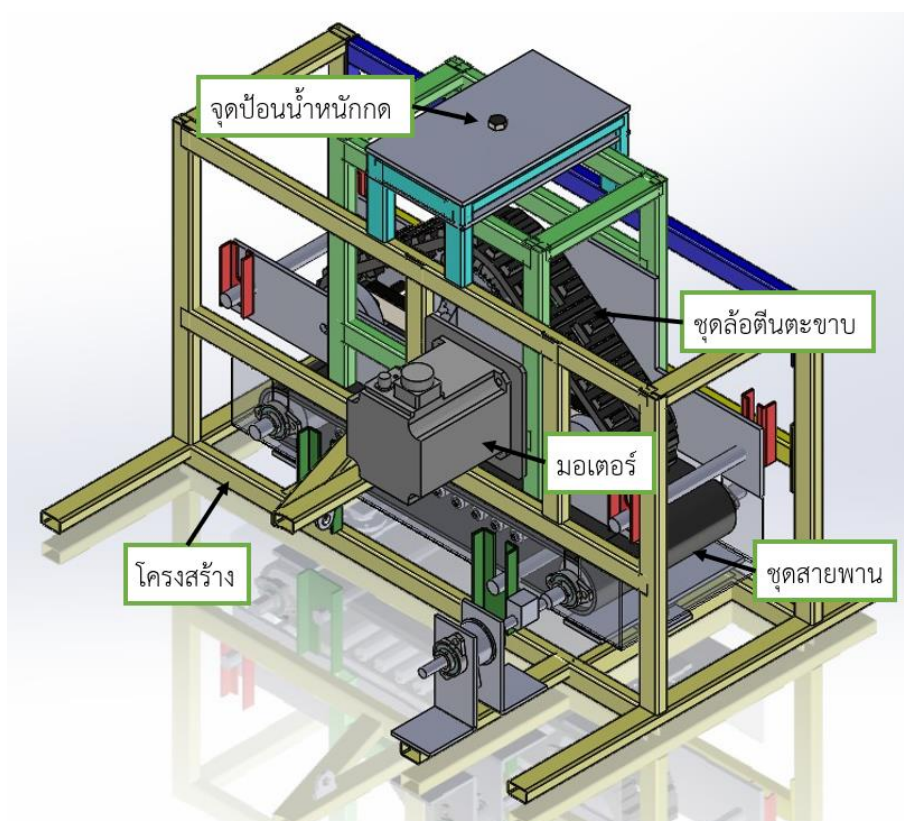
ภาพที่ 2 การวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ในยางดินตะขาบ



ภาพที่ 3 แม่พิมพ์ขึ้นรูปยางดินตะขาบ



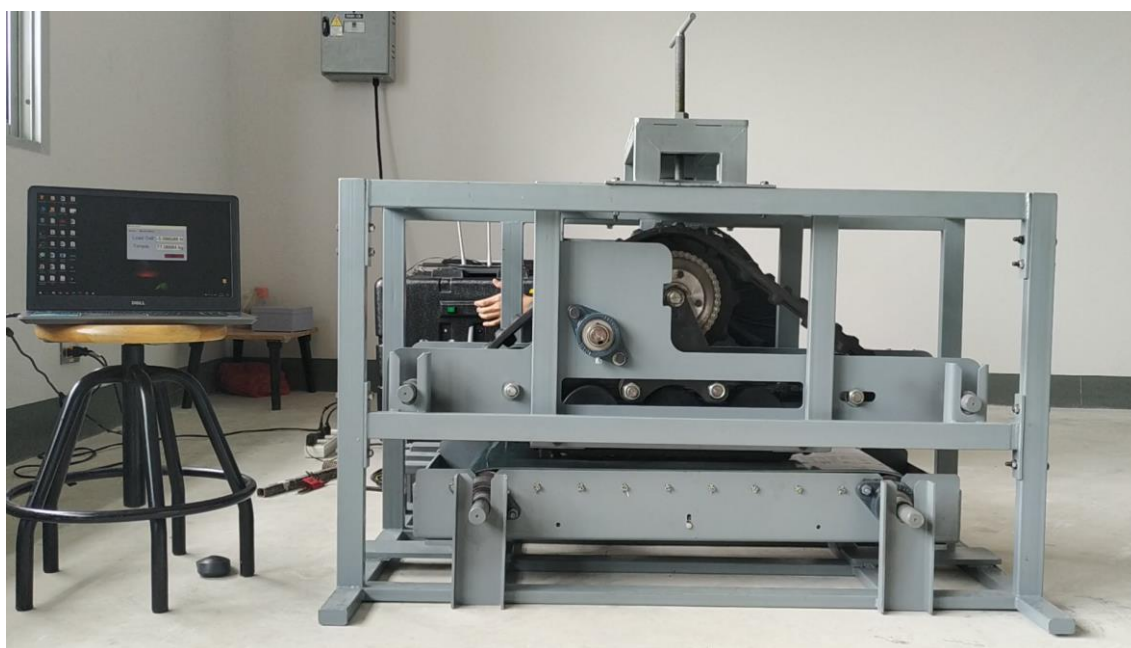
ภาพที่ 4 เครื่องอัดยางสำหรับขึ้นรูปยางตีนตะขา



ภาพที่ 5 ชุดทดสอบยางตีนตะขา



ภาพที่ 6 การอัดขึ้นรูปยางตีนตะขาบ



ภาพที่ 7 การทดสอบการทำงานของยางตีนตะขาบ

ผลที่ได้รับ

ผลสำเร็จ

ผลผลิตที่ได้ คือ การออกแบบผลิตภัณฑ์ กระบวนการผลิตและการทดสอบ ยางตีนตะขาบ

ความคุ้มค่าของการวิจัย

การสร้างมูลค่าเพิ่มให้แก่ยางธรรมชาติที่มากขึ้นจากการเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตยางตีนตะขาบ

ระดับความสำเร็จของงาน

การออกแบบผลิตภัณฑ์และกระบวนการผลิตยางตีนตะขาบ ความสำเร็จของงานวิจัยระยะนี้เป็น ระบุ G หมายถึง ความสำเร็จตามเป้าประสงค์ (Goal results)

แนวทางการนำไปใช้ประโยชน์

ผลงานวิจัยนี้จะเป็นประโยชน์ต่อภาคอุตสาหกรรมยางพาราแบบไม่จำเพาะเจาะจงผู้รับผลประโยชน์

บทคัดย่อ

ล้อยางตีนตะขากเป็นอุปกรณ์ที่เริ่มมีการใช้งานอย่างแพร่หลายมากขึ้น ไม่ว่าจะเป็นด้านเกษตรกรรม งานก่อสร้างและงานเหมือง รวมไปถึงรถ ATV และรถเข็นผู้ป่วย โดยยางตีนตะขาที่ใช้งานมีอยู่ 2 ชนิดได้แก่ ยางตีนตะขาเสริมเหล็กและยางตีนตะขาเสริมผ้าใบ ซึ่งยางตีนตะขาเสริมผ้าใบมักใช้กับรถเล็กอย่างรถ ATV และรถเข็นผู้ป่วย แต่ยางตีนตะขาที่ใช้กับรถเอนกประสงค์ ATV และรถเข็นผู้ป่วยนั้นยังไม่มีการผลิตและจำหน่ายในประเทศไทย อันเนื่องมาจากมีข้อจำกัดทั้งในด้านเทคโนโลยีการออกแบบผลิตภัณฑ์ การออกแบบกระบวนการผลิตและการออกแบบเครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบสมรรถนะการทำงานของยางตีนตะขาภายในประเทศ ทำให้ต้องมีการนำเข้ายางตีนตะขาจากต่างประเทศสำหรับใช้กับรถเอนกประสงค์ ATV และรถเข็นผู้ป่วยเป็นจำนวนมาก จากเหตุผลข้างต้น งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์ในการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีคอมพิวเตอร์ช่วยในการออกแบบ (Computer Aided Design, CAD) คอมพิวเตอร์ช่วยในการผลิต (Computer Aided Manufacturing, CAM) และคอมพิวเตอร์ช่วยในงานวิศวกรรม (Computer Aided Engineering, CAE) มาใช้ในการสร้างองค์ความรู้ในการ ออกแบบรายละเอียดของผลิตภัณฑ์ ออกแบบแม่พิมพ์ในการขึ้นรูปปลายของยางตีนตะขาเพื่อใช้ในการผลิต รวมไปถึงการออกแบบอุปกรณ์ทดสอบผลิตภัณฑ์ยางตีนตะขา เพื่อให้เกิดองค์ความรู้ในการพัฒนาผลิตภัณฑ์ยางตีนตะขา ให้แก่เอกชนไทยที่มีความต้องการสร้างผลิตภัณฑ์ยางตีนตะขาต่อไป

Abstract

Rubber track wheels were used more widely such as in agriculture, construction, mining, ATV and off-road wheelchair. There are two type of rubber track include rubber track with iron core and rubber track with ply. Which rubber track with ply was used in small track wheel as ATV and off-road wheelchair. But they are not product in Thailand because limitation of product design, technology, machine and testing device that causing to import from foreign countries. From above reasons this research aim to apply knowledge of Computer Aided Design (CAD), Computer Aided Manufacturing (CAM) and Computer Aided Engineering (CAE) to develop product design in rubber track for ATV and off-road wheelchair. Including designing rubber track mold, developing machining for rubber track forming and developing testing device. In order to create knowledge and develop rubber track products to Thai entrepreneur who interested in rubber track products.

การพัฒนาวิศวกรรมการออกแบบผลิตภัณฑ์และกระบวนการผลิตยางตีนตะขาบ

A Development of Engineering Product Design and Manufacturing Process Design for Rubber Track

คำนำ

ยางตีนตะขาบเป็นอุปกรณ์สำคัญสำหรับเครื่องจักรกลที่ใช้งานในด้านการเกษตรกรรม งานก่อสร้าง และงานเหมือง อันได้แก่ รถเก็บเกี่ยว รถตัดแต่ง รถตัด รถแทรกเตอร์ เนื่องจากยางตีนตะขาบสามารถเคลื่อนที่เข้าไปในพื้นที่ทำงานในสภาพพื้นที่ต่างๆ ได้อย่างคล่องตัวกว่าล้อประเภทอื่นๆ โดยในประเทศไทยมีการใช้กันอยู่ 2 ชนิด ได้แก่ ล้อเหล็กตีนตะขาบและล้อยางตีนตะขาบ ยางตีนตะขาบจะสามารถแบ่งใช้กับขนาดของรถแทรกเตอร์ ดังแสดงในรูปที่ 2 โดยรถแทรกเตอร์มี 3 ประเภท ได้แก่ รถแทรกเตอร์ขนาดเล็ก (20-35 แรงม้า) ตีนตะขาบสำหรับรถแทรกเตอร์ขนาดกลาง (36-60 แรงม้า) และตีนตะขาบสำหรับรถแทรกเตอร์ขนาดใหญ่ (190-200 แรงม้า) นอกจากนี้ยังมีการใช้งานในรถพิเศษ คือ รถเอนกประสงค์ ATV ดังแสดงในรูปที่ 3 และรถเข็นผู้ป่วย ดังแสดงในรูปที่ 4 โดยยางตีนตะขาบที่ใช้กับรถแทรกเตอร์นั้นได้มีบริษัทที่สามารถทำการผลิตและจำหน่ายภายในประเทศแล้ว แต่ยางตีนตะขาบที่ใช้กับรถเอนกประสงค์ ATV และรถเข็นผู้ป่วยนั้นยังไม่มีผลิตและจำหน่าย อันเนื่องมาจากมีข้อจำกัดทั้งในด้านเทคโนโลยีการออกแบบผลิตภัณฑ์ การออกแบบกระบวนการผลิตและการออกแบบเครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบสมรรถนะการทำงานของยางตีนตะขาบภายในประเทศ ทำให้ต้องมีการนำเข้ายางตีนตะขาบจากต่างประเทศสำหรับใช้กับรถเอนกประสงค์ ATV และรถเข็นผู้ป่วยเป็นจำนวนมาก จากเหตุผลข้างต้นคณะวิจัยฯ จึงประยุกต์ใช้ เทคโนโลยีคอมพิวเตอร์ช่วยในการออกแบบ (Computer Aided Design, CAD) คอมพิวเตอร์ช่วยในการผลิต (Computer Aided Manufacturing, CAM) และคอมพิวเตอร์ช่วยในงานวิศวกรรม (Computer Aided Engineering, CAE) มาใช้ในการสร้างองค์ความรู้ในการ การออกแบบรายละเอียดของผลิตภัณฑ์ตามหน้าที่การใช้งานที่หลากหลาย รวมถึงการออกแบบแม่พิมพ์ในการขึ้นรูปปลายของยางตีนตะขาบเพื่อใช้ในการผลิต รวมไปถึงการออกแบบอุปกรณ์ทดสอบผลิตภัณฑ์ยางตีนตะขาบ โดยในงานวิจัยนี้มีขอบเขตในการวิจัยสำหรับยางตีนตะขาบสำหรับใช้กับรถเอนกประสงค์ ATV และรถเข็นผู้ป่วย เพื่อนำไปใช้เป็นองค์ความรู้พื้นฐานในการพัฒนาผลิตภัณฑ์ยางตีนตะขาบ ให้แก่เอกชนที่ต้องการสร้างผลิตภัณฑ์ยางตีนตะขาบต่อไป

วัตถุประสงค์

1. เพื่อนำหลักการทางวิศวกรรมออกแบบรายละเอียดของผลิตภัณฑ์ยางตีนตะขาบตามภาระหน้าที่การใช้งาน
2. เพื่อนำหลักการทางวิศวกรรมการออกแบบและผลิตแม่พิมพ์ในการขึ้นรูปลายของยางตีนตะขาบเพื่อใช้ในการผลิตยางตีนตะขาบ
3. เพื่อออกแบบและผลิตอุปกรณ์ในการทดสอบการทำงานของยางตีนตะขาบ

ขอบเขตของงานวิจัย

1. ขอบเขตของงานวิจัยจะศึกษาสำหรับ ยางตีนตะขาบที่ใช้สำหรับรถเอนกประสงค์ ATV และรถเข็นผู้ป่วย
2. ยางธรรมชาติ (NR) ที่ใช้เป็นสูตรตั้งต้นในการวิจัย คือ ยางธรรมชาติที่มีความแข็ง 70 Shore A

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

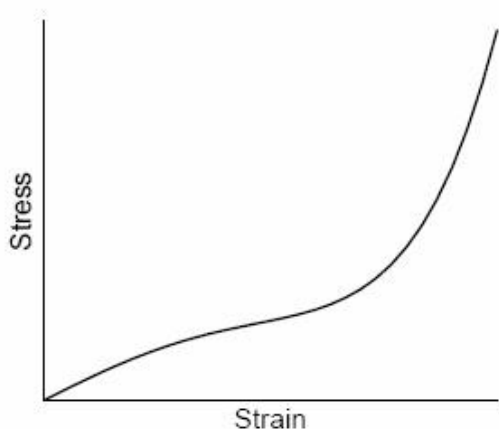
1. องค์ความรู้ในการการออกแบบรายละเอียดของผลิตภัณฑ์ตามหน้าที่การใช้งานต่างๆ
2. องค์ความรู้ในการการออกแบบและผลิตแม่พิมพ์ในการขึ้นรูปลายของยางดินตะขาบ
3. องค์ความรู้การออกแบบอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบการทำงานของยางดินตะขาบ
4. มีการยื่นจดทรัพย์สินทางปัญญา (สิทธิบัตร หรือ อนุสิทธิบัตร)

การตรวจเอกสาร

1. ลักษณะทั่วไปของยาง

1.1 คุณสมบัติเชิงกลของวัสดุประเภทยาง (Mechanical Properties of Rubber)

คุณสมบัติเด่นหลักๆ ของยางในงานวิศวกรรม คือ มีความยืดหยุ่นที่ค่าความเครียดสูง คุณสมบัติการหน่วงทางพลศาสตร์ ความต้านทานการสึกหรอ และมีค่าพลังงานการแตกหักสัมพัทธ์สูง โดยปกติยางเป็นวัสดุไฮเปอร์อีลาสติก (Hyperelastic Material) ซึ่งมีพฤติกรรมความสัมพันธ์ของความเค้นกับความเครียด ดังแสดงในภาพที่ 1 โดยรูปแบบความเสียหายที่แตกต่างกันจะทำให้พฤติกรรมของความเค้นและความเครียดแตกต่างกัน โดยรูปแบบความเสียหายการเฉือนอย่างง่าย (Simple Shear) จะมีพฤติกรรมของความเครียดเป็นเชิงเส้นมากกว่ารูปแบบความเสียหายแบบกดอัด (Compression) และแบบแรงดึง (Tensile) นอกจากนี้ยางยังมีพฤติกรรมที่ไม่สามารถอัดตัวได้ (Incompressible) หมายถึงไม่สามารถเปลี่ยนแปลงปริมาตรได้เมื่อมีแรงกระทำ ยางจะมีค่าโมดูลัสเฉือน (Shear Modulus) ต่ำกว่าค่าโมดูลัสเชิงปริมาตร (Bulk Modulus) อยู่มากโดยค่าโมดูลัสเชิงปริมาตรจะมีค่าประมาณ 1000-2000 MPa แต่ค่าโมดูลัสเฉือนจะมีค่าประมาณ 1 MPa ความสามารถในการอัดตัวของวัสดุ สามารถอธิบายผ่านค่าอัตราส่วนปัวซอง (Poisson's Ratio) หมายถึง ค่าอัตราส่วนระหว่างความเครียดที่มีทิศทางตั้งฉากกับทิศทางขนานกับแรงที่กระทำบนวัสดุสำหรับยางจะมีค่าอัตราส่วนปัวซองอยู่ที่ประมาณ 0.5



ภาพที่ 1 พฤติกรรมแบบไม่เป็นเชิงเส้นของยาง [1]

1.2 ลักษณะการทดสอบวัสดุประเภทไฮเปอร์อีลาสติก

การทดสอบวัสดุประเภทไฮเปอร์อีลาสติกสามารถแบ่งออกได้เป็น การทดสอบหนึ่งแนวแกน (Uniaxial Test) การทดสอบสองแนวแกน (Biaxial Test) การทดสอบแบบความกว้างคงที่ (Planar Test) และการทดสอบแบบปริมาตร (Volumetric Test) ดังภาพที่ 2 การใช้ข้อมูลการทดสอบวัสดุหลายๆ ลักษณะเพื่อมาวิเคราะห์หาค่าสัมประสิทธิ์ ทำให้เลือกแบบจำลองที่ถูกต้องและสามารถจำลองพฤติกรรมของวัสดุในขณะที่ได้รับภาระแบบซับซ้อนได้อย่างแม่นยำจากวิธีการทดสอบวัสดุประเภทไฮเปอร์อีลาสติกทั้งหมด แต่วิธี การทดสอบแบบปริมาตรเป็นการทดสอบเพื่อหาการอัดตัวได้ (Compressibility) ของวัสดุ แต่เนื่องจากในงานวิจัย

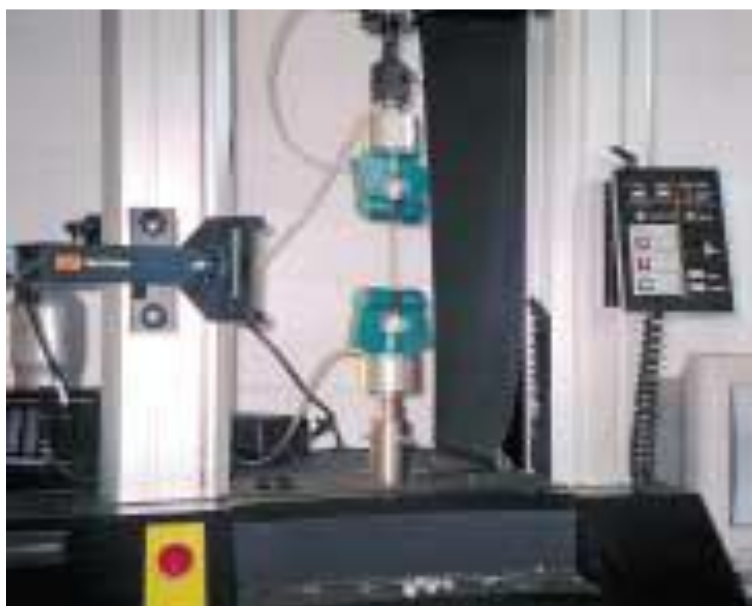
ได้ตั้งสมมุติฐานให้ยางเป็นวัสดุที่อัดตัวไม่ได้ ดังนั้นการทดสอบแบบปริมาตรจึงไม่ถูกนำมาพิจารณา ดังนั้นจากคุณสมบัตินี้ทำให้วิธีการทดสอบวัสดุลดลงเหลือเพียง 3 วิธีดังนี้

1) การทดสอบแบบการดึงในแนวแกนเดียว (Uniaxial Tensile Test) ซึ่งสมมูล (Equivalent) กับการทดสอบแบบการกดในแนวแกนเดียว (Uniaxial Compression Test)

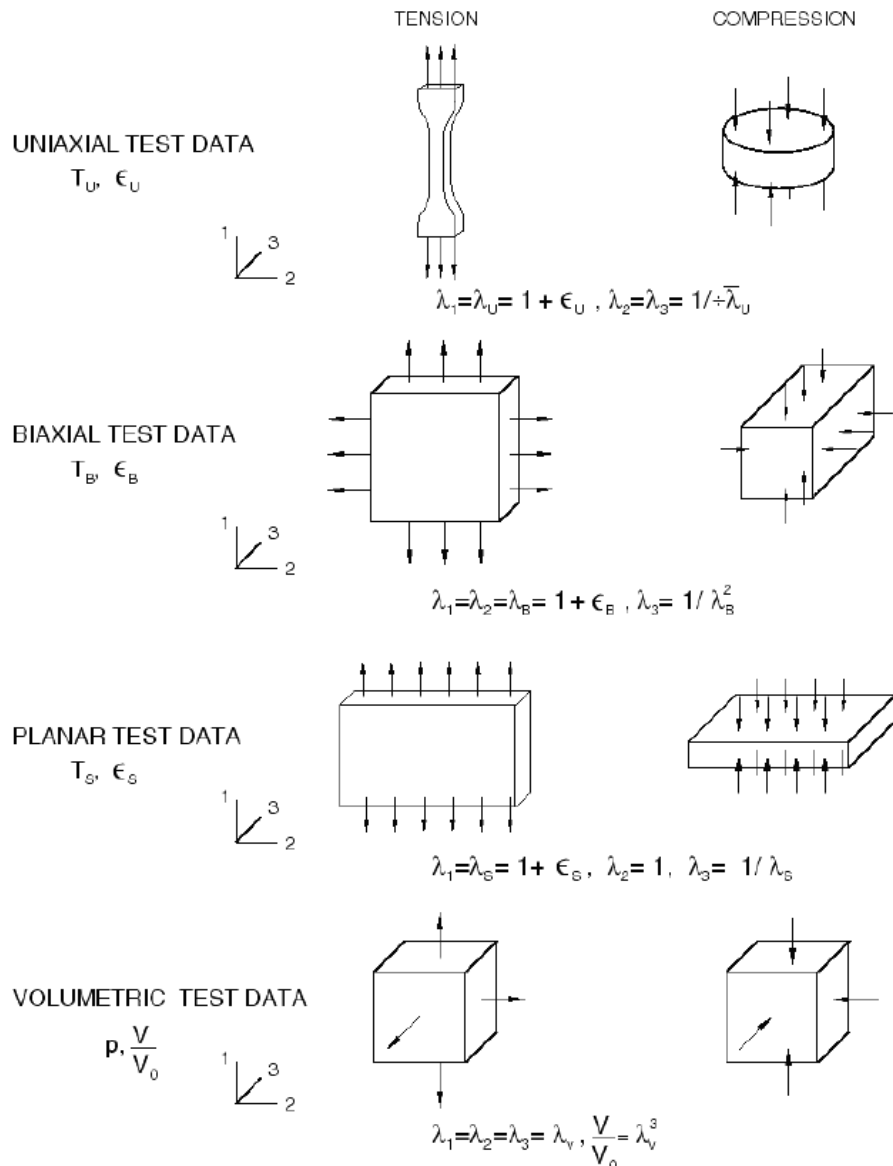
2) การทดสอบแบบการดึงเท่ากันในสองแนวแกน (Equibiaxial Tensile Test) ซึ่งสมมูลกับการทดสอบแบบการกดเท่ากันในสองแนวแกน (Equibiaxial Compression Test)

3) การทดสอบแบบการดึงแบบความกว้างคงที่ (Planar Tensile Test) ซึ่งสมมูลกับการทดสอบแบบการกดแบบความกว้างคงที่ (Planar Compression Test)

ดังนั้นข้อมูลการทดสอบวัสดุทั้ง 3 แบบ ได้แก่ แบบการดึงในแนวแกนเดียว การทดสอบแบบการดึงเท่ากันในสองแนวแกน การทดสอบแบบการดึงแบบความกว้างคงที่ ซึ่งจะครอบคลุมพฤติกรรมของวัสดุอย่างต่อเนื่องการนำไปหาค่าสัมประสิทธิ์ของแบบจำลองฟังก์ชันพลังงานความเครียดซึ่งเป็นสมบัติเฉพาะของวัสดุแต่ละชนิด สามารถทำได้โดยนำชิ้นยางทดสอบมาทดสอบด้วยเครื่องทดสอบหาความ สัมพันธ์ระหว่างความเค้น (Stress) และอัตราการยืดตัว (Stretch Ratio) ของยาง



ภาพที่ 2 การทดสอบคุณสมบัติของยาง



ภาพที่ 3 ลักษณะการทดสอบวัสดุประเภทไฮเปอร์อีลาสติก [2]

1.3 พฤติกรรมยืดหยุ่นหลายแนวแกนของยาง

ในการศึกษาพฤติกรรมยืดหยุ่นหลายแนวแกนของยางเป็นผลงานวิจัยของ Turner and Brennan (1990) ซึ่งสามารถนำมาใช้กับวัสดุที่มีการยืดน้อยๆ เพราะที่การยืดตัวน้อยๆ พฤติกรรมยืดหยุ่นแนวแกนเดียวของยางเป็นแบบเชิงเส้น ดังนั้นจึงสามารถหาค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของยางได้จากข้อมูลความสัมพันธ์ของความเค้นจริงกับอัตราส่วนการยืด โดยใช้วิธีการอัตราส่วนปัวซอง ซึ่งจะพิจารณาให้อัตราส่วนปัวซองเป็นค่าที่มีการผันแปร (Variable Value) ความสัมพันธ์ของความเค้น โมดูลัสความยืดหยุ่น อัตราส่วนการยืดและอัตราส่วนปัวซอง โดยนำข้อมูลการทดสอบยางแบบการดึงในแนวแกนเดียว และสามารถนำค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นไปทำนายพฤติกรรมเชิงกลของยางใน การดึงแบบเท่ากันในสองแนวแกน และการดึงแบบความกว้างคงที่ แต่มีเงื่อนไขว่าจะประยุกต์วิธีการอัตราส่วนปัวซอง เพื่อทำนายข้อมูลของการทดสอบยางทั้งสามลักษณะได้ต้องมีการยืดตัวน้อยๆ ($\lambda \leq 1.8$) ถ้าเป็นการยืดตัวมากๆ ก็สามารถใช้ได้แต่ไม่สามารถรับรองผลได้ว่ามีความแม่นยำมากนักเพียงไร

เริ่มต้นจากสมการพื้นฐานทางวิศวกรรมอธิบายความเครียดในเทอมของโมดูลัสยืดหยุ่น (Young's Modulus) ความเค้น (Stress) และอัตราส่วนปัวซอง (Poisson's Ratio)

$$\sigma_1 = E[\lambda_1 - 1 + \nu(\lambda_2 - 1)] / (1 - \nu^2) + \sigma_3 \quad (1)$$

$$\sigma_2 = E[\lambda_2 - 1 + \nu(\lambda_1 - 1)] / (1 - \nu^2) + \sigma_3 \quad (2)$$

$$\nu = (\lambda_1 \lambda_2 - 1) / (\lambda_1 \lambda_2 (\lambda_1 + \lambda_2 - 1) - 1) \quad (3)$$

เมื่อ $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ คือ ค่าความเค้นจริงในแนวแกนที่ 1, 2 และ 3

λ_1 คือ อัตราส่วนการยืดในแนวแกนที่ 1, 2

ν คือ อัตราส่วนปัวซอง

E คือ โมดูลัสความยืดหยุ่น

พิจารณาในกรณีของการดึงในแนวแกนเดียว การดึงในสองแนวแกนและการดึงแบบความกว้างคงที่ จึงส่งผลให้ $\sigma_3 = 0$ เพราะเราไม่คำนึงถึงแรงที่เกิดขึ้นในแนวดังกล่าว ทำให้สมการที่ (1) และ (2) สามารถเขียนเป็น

$$\sigma_1 = E[\lambda_1 - 1 + \nu(\lambda_2 - 1)] / (1 - \nu^2) \quad (4)$$

$$\sigma_2 = E[\lambda_2 - 1 + \nu(\lambda_1 - 1)] / (1 - \nu^2) \quad (5)$$

พิจารณาในกรณีที่เป็นการดึงในแนวแกนเดียวดังแสดงในภาพที่ 10 จะได้ว่า $\lambda_1 = \lambda_u$ และ $\lambda_2 = 1/\lambda_u$ แทนค่าลงในสมการที่ (3) (4) และ (5) จะได้ว่า

$$\nu = 1 / (\lambda_u + \sqrt{\lambda_u}) \quad (6)$$

$$\sigma_U = \sigma_1 = E \left[\lambda_u - 1 + \nu \left(\frac{1 - \sqrt{\lambda_u}}{\sqrt{\lambda_u}} \right) \right] / (1 - \nu^2) \quad (7)$$

เมื่อ λ_u คือ อัตราส่วนการยืดในแนวการดึง

σ_U คือ ความเค้นจริงในแนวการดึงของการดึงในแนวแกนเดียว

พิจารณาในกรณีที่เป็นการดึงเท่ากันในสองแนวแกนดังแสดงในภาพที่ 3 จะได้ว่า $\lambda_1 = \lambda_2 = \lambda_B$ แทนค่าลงในสมการที่ (6) และ (7) จะได้ว่า

$$\nu = (\lambda_B + 1) / (2\lambda_B^2 + \lambda_B + 1) \quad (8)$$

$$\sigma_B = \sigma_1 = \sigma_2 = E[\lambda_B - 1 + \nu(\lambda_B - 1)] / (1 - \nu^2) \quad (9)$$

เมื่อ λ_B คือ อัตราส่วนการยืดในแนวการดึง

σ_B คือ ความเค้นจริงในแนวการดึงของการดึงเท่ากันทั้งสองแนวแกน

พิจารณาในกรณีที่เป็นการดึงแบบความกว้างคงที่ดังแสดงในภาพที่ 3 จะได้ว่า $\lambda_1 = \lambda_s$ และ $\lambda_2 = 1$ แทนค่าลงในสมการที่ (6) และ (7) จะได้ว่า

$$\nu = 1/(\lambda_s + 1) \quad (10)$$

$$\sigma_s = E(\lambda_s - 1)/(1 - \nu^2) \quad (11)$$

เมื่อ λ_s คือ อัตราส่วนการยืดในแนวการดึง

σ_s คือ ความเค้นจริงในแนวการดึงของการดึงแบบความกว้างคงที่

จากสมการที่กล่าวมานี้สังเกตเห็นว่าความเค้นในกรณีที่รับภาระลักษณะต่างๆ จะเป็นฟังก์ชันของ โมดูลัสความยืดหยุ่น อัตราส่วนปัวซองและอัตราส่วนการยืดตัวในแนวการดึงของแต่ละกรณี ดังนั้นสามารถหาความเค้นได้ หากกำหนดค่าอัตราส่วนการยืดในแนวการดึง โดยใช้สมการที่ (6), (7) ซึ่งจะขึ้นอยู่กับลักษณะของภาระที่กระทำส่วนโมดูลัสความยืดหยุ่นหาได้จากข้อมูลการทดสอบการดึงวัสดุในแนว แกนเดียวโดยมีรายละเอียดดังนี้พิจารณาการดึงในแนวแกนเดียว จากสมการที่ (7)

$$\sigma_U = \sigma_1 = E \left[\lambda_U - 1 + \nu \frac{(1 - \sqrt{\lambda_U})}{\sqrt{\lambda_U}} \right] / (1 - \nu^2)$$

สามารถเขียนในรูปแบบใหม่ได้เป็น

$$\sigma_U = EP(\lambda_U, \nu) \quad (12)$$

$$\text{เมื่อ } P = \left[\lambda_U - 1 + \nu \frac{(1 - \sqrt{\lambda_U})}{\sqrt{\lambda_U}} \right] / (1 - \nu^2)$$

$$\nu = 1/(\lambda_U + \sqrt{\lambda_U})$$

ข้อมูลที่ได้จากการทดสอบและนำไปใช้คือค่าความเค้นวิศวกรรม (Engineering Stress) และค่าความเครียดวิศวกรรม (Engineering Strain) สามารถนำไปใช้แปลงเป็นค่าความเค้นจริงและอัตราส่วนการยืดตามลำดับได้

$$\sigma_U = \sigma_{Eng} (\varepsilon_{Eng} + 1) \quad (13)$$

$$\lambda_U = \varepsilon_{Eng} + 1 \quad (14)$$

เมื่อ σ_{Eng} คือ ความเค้นวิศวกรรมในแนวการดึง

ε_{Eng} คือ ความเครียดวิศวกรรมในแนวการดึง

ดังนั้นค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของยางในสมการที่ (7) สามารถหาได้โดยใช้ระเบียบวิธีการถดถอยกำลังสองน้อยที่สุด ดังแสดงในสมการที่ (15)

$$E = \frac{\sum_{i=1}^N \sigma_{U_i} P(\lambda_{U_i}, \nu_i)}{\sum_{i=1}^N P^2(\lambda_{U_i}, \nu_i)} \quad (15)$$

เมื่อ N คือ จำนวนจุดข้อมูลที่ได้จากการทดสอบวัสดุ

σ_{U_i} คือ ความเค้นจริงที่ได้จากการทดสอบการดึงในแนวแกนเดียวค่าที่ i

λ_{U_i} คือ อัตราส่วนการยืดที่ได้จากการทดสอบการดึงในแนวแกนเดียวค่าที่ i

ν_i คือ อัตราส่วนปัวซองค่าที่ i

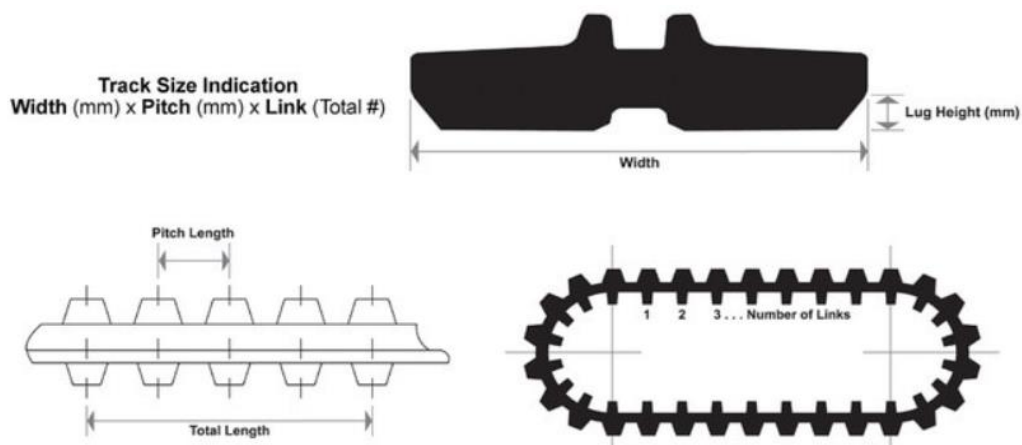
2. คุณสมบัติวิสโคอีลาสติก (Viscoelasticity)

คุณสมบัติเป็นวิสโคอีลาสติกที่มีองค์ประกอบสำคัญอยู่ 2 ส่วน คือส่วนที่ไหลได้คล้ายของเหลวหนืด (Viscous Liquid) และส่วนที่เป็นของแข็งยืดหยุ่น (Elastic Solid) ยางได้รับการคงรูปแล้ว การเกิดเป็นโครงสร้างตาข่าย 3 มิติ ของโมเลกุลยาง จะทำให้ยางมีความยืดหยุ่นสูงขึ้นและทำให้ยางไม่สามารถไหลได้ ดังนั้นยางที่คงรูปแล้ว จะมีองค์ประกอบส่วนที่เป็นของแข็งยืดหยุ่นสูง แม้ว่าการคงรูปจะทำให้องค์ประกอบส่วนที่เป็นของเหลวหนืดมีสัดส่วนลดลง แต่การคงรูปก็ไม่สามารถทำให้องค์ประกอบส่วนที่เป็นของเหลวหนืดนี้หายไปจากเนื้อยางได้หมด ดังนั้น ยางจึงไม่ใช่วัสดุที่มีความยืดหยุ่นอย่างสมบูรณ์ ซึ่งพฤติกรรมวิสโคอีลาสติกเมื่อมีแรงกระทำต่อโซ่โมเลกุลของยาง การตอบสนองต่อแรงของโซ่โมเลกุลจะมีลักษณะต่างจากวัสดุที่มีคุณสมบัติแบบอีลาสติก ซึ่งค่าความเครียดจะแปรผันตรงกับค่าความเค้นโดยที่ไม่มีตัวแปรของเวลาเข้ามาเกี่ยวข้อง แต่กรณีของวัสดุแบบวิสโคอีลาสติก โซ่โมเลกุลจะยืดตัวอย่างช้า ๆ จนถึงสภาวะที่โซ่โมเลกุลทุกโซ่ตอบสนองต่อแรงกระทำอย่างสมบูรณ์ และเมื่อกำจัดแรงกระทำออก โซ่โมเลกุลจะค่อย ๆ เรียงตัวสู่ช่องว่างและความเครียดจะลดลงสู่สภาวะใกล้เคียงเดิมเท่านั้น แต่จะไม่สามารถกลับคืนอย่างสมบูรณ์เหมือนก่อนที่โครงสร้างจะมีแรงมากระทำ คุณสมบัติลักษณะนี้เรียกว่า คุณสมบัติวิสโคอีลาสติก (Viscoelasticity)

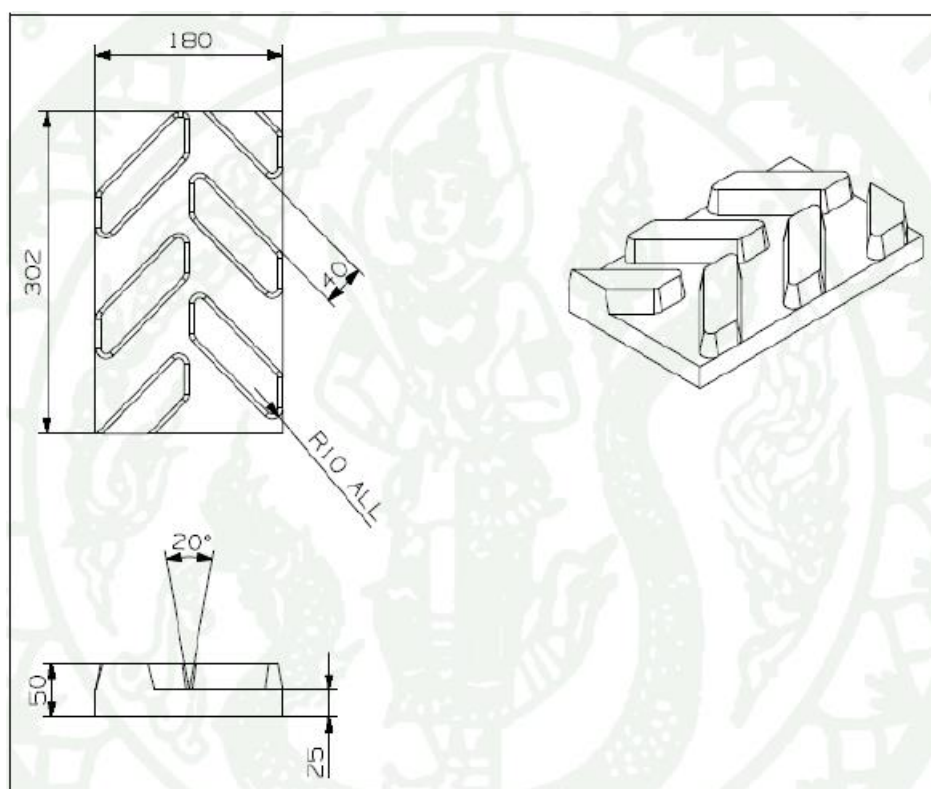
ทฤษฎีและการทดลองคุณสมบัติวิสโคอีลาสติก ศึกษาโดยนักฟิสิกส์หลายคนรวมถึงแมกซ์เวลล์ (Maxwell) โบลท์แมน (Boltzman) และเคลวิน (Kelvin) สนใจในคุณสมบัติการคืบ (Creep) และการคืนตัว (Recovery) ของวัสดุ ซึ่งคุณสมบัติวิสโคอีลาสติกกลายเป็นหัวข้อสำคัญทางวิศวกรรมเพราะการเพิ่มขึ้นของการใช้งานพอลิเมอร์สังเคราะห์ในทางวิศวกรรม

3. ลักษณะโดยทั่วไปของยางตีนตะขา

ลักษณะทั่วไปของยางตีนตะขาจะประกอบไปด้วย ความกว้างของหน้ายางตามขนาดของรถที่ใช้ ความสูงของดอกยาง ระยะพิทช์และจำนวนลิงค์ ดังแสดงในภาพที่ 4 นอกจากนี้ในส่วนของดอกยางยังประกอบด้วย ความกว้างของดอกยาง ความลึกของร่องยาง มุมเอียงของร่องยาง ดังแสดงในภาพที่ 5 เป็นต้น



ภาพที่ 4 ลักษณะโดยทั่วไปของยางตีนตะขา [3]



ภาพที่ 5 ลักษณะของร่องและมุมของดอกยางตีนตะขา [1]

ในส่วนรูปแบบของดอกยางตีนตะขานั้นสามารถมีได้มากมายหลากหลายรูปแบบ ขึ้นอยู่กับลักษณะการใช้งาน การออกแบบเฉพาะของผู้ผลิต โดยรูปแบบของยางตีนตะขาหลักๆที่มีการผลิตออกมาจำหน่ายสู่ท้องตลาดได้แก่

1) Staggered Block Tread

เป็นรูปแบบมาตรฐานที่ได้รับความนิยมจากผู้ผลิตรายใหญ่ต่างๆ การออกแบบเน้นความทนทานต่อการฉีกขาดและการขั้บที่นุ่มนวล โดยการใช้งานเหมาะกับสภาพพื้นผิวแข็ง ถนนลาดยาง ถนนคอนกรีตต่างๆ หรือพื้นที่ที่มี หิน กรวด เป็นต้น สามารถถนอมพื้นผิวได้ดีเช่นการขั้บบนพื้นดินหรือผิวที่ปูด้วยหญ้า เป็นต้น ในขณะเดียวกันการใช้งานในสภาพพื้นเปียกหรือเป็นโคลนจะไม่เหมาะกับดอกยางประเภทนี้



ภาพที่ 6 ดอกยางตีนตะขาแบบ Staggered Block [4]

ดอกยางแบบ C-Lug จะคล้ายคลึงกับแบบ Staggered Block เพียงแค่มีการตัดเว้าให้เกิดเป็นรูปตัวซี เพื่อเพิ่มแรงในการฉุดลากให้ได้มากกว่าเดิม ทำให้สามารถทำงานกับพื้นที่ได้หลากหลายกว่า แต่ยังคงรักษาความนุ่มนวลในการขั้บอยู่บ้าง



ภาพที่ 7 ดอกยางตีนตะขาแบบ C-Lug [4]

3) Straight Bar Tread

รูปแบบดอกยางแบบแถบตรงถูกออกแบบมาเพื่อเพิ่มแรงฉุดลากสูงสุด เหมาะสำหรับพื้นผิวเปียกหรือพื้นดินโคลน แต่ในการขั้บบนผิวเรียบแข็งจะไม่ราบรื่นเท่าที่ควรอีกทั้งยังมีโอกาสทำลายพื้นผิวได้ในกรณีที่วิ่งบนพื้นผิวนุ่มหรือพื้นสนามหญ้า เป็นต้น



ภาพที่ 8 ดอกยางตีนตะขาแบบ Straight Bar [4]

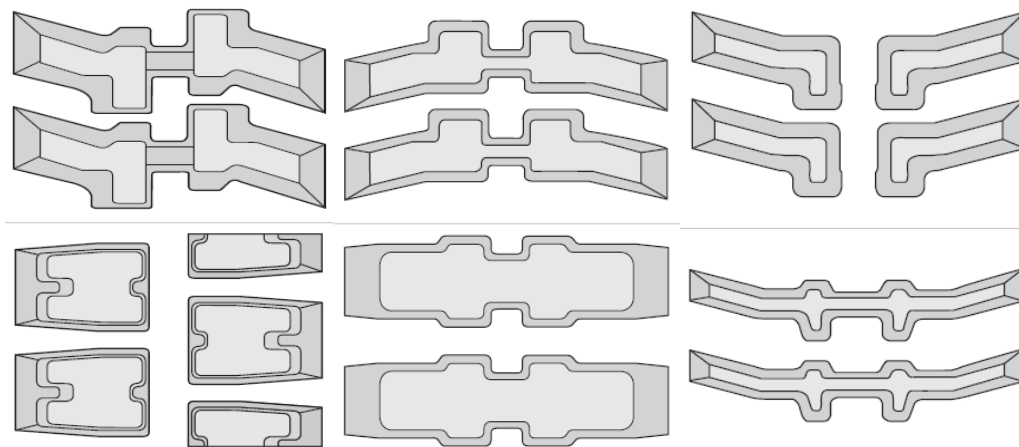
4) Multi Bar Tread

การใช้งานดอกยางแบบ Multi Bar ช่วยในเรื่องการขับเคลื่อนที่ดียิ่งขึ้นเมื่อเทียบกับดอกยางแบบ Straight Bar และยังคงให้แรงฉุดลากที่ดีอยู่ เหมาะกับการใช้งานเมื่อจำเป็นต้องเคลื่อนที่เปลี่ยนไปมาระหว่างสองพื้นผิว



ภาพที่ 9 ดอกยางตีนตะขาแบบ Multi Bar Tread [4]

นอกจากรูปแบบหลักๆข้างต้นที่กล่าวมา ยังมีรูปแบบอื่นๆที่ได้มีการพัฒนาขึ้น เช่นจากรูปแบบ C-lug อาจมีการพัฒนารูปร่างเป็นตัว H หรือแบบ Straight Bar อาจมีการพัฒนาเป็นรูปแบบ Zigzag เป็นต้น ซึ่งรูปแบบของดอกยางในปัจจุบันจะมีความหลากหลายมากขึ้นตามการใช้งานต่างๆ



ภาพที่ 10 ตัวอย่างรูปแบบต่างๆของยางตีนตะขา [5]

4. งานวิจัยที่เกี่ยวกับยางตีนตะขาที่เกี่ยวข้อง

Entrekin (1999) การวิเคราะห์ด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ถูกวิเคราะห์โครงสร้างที่มีความซับซ้อนและประกอบด้วยเงื่อนไขที่มีความซับซ้อน เอลิเมนต์แบบทรงสี่หน้าแบบ 4 จุดต่อ เป็นลักษณะเอลิเมนต์ที่ซับซ้อนน้อยที่สุด และมักถูกใช้ในการวิเคราะห์ อันเนื่องมาจากว่าเอลิเมนต์รูปทรงดังกล่าวนี้สามารถถูกใช้สร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ทุกรูปทรง อย่างไรก็ตามเอลิเมนต์ชนิดนี้มักต้องใช้จำนวนค่อนข้างมากจึงจะให้ผลเฉลยที่ถูกต้อง ดังนั้นการวิเคราะห์จึงต้องใช้ทรัพยากรค่อนข้างมากแต่ในทางกลับกันการใช้เอลิเมนต์ทรงสี่หน้าแบบ 10 จุดต่อ จึงถูกนำมาใช้แทน ข้อดีของเอลิเมนต์ประเภทนี้ คือ การที่เส้นต่อเป็นรูปทรงสี่หน้านั้นสามารถ

บดงอได้ จึงสามารถใช้จำนวนเอลิเมนต์น้อยกว่าในการสร้างแบบวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ จากรูปทรงสามมิติเดียวกัน นอกจากนี้ เอลิเมนต์ทรงสี่หน้าแบบ 10 จุดต่อ จึงให้ผลเฉลยการวิเคราะห์ที่ใกล้เคียงกับความเป็นจริงอย่างมาก

Cheng and Chen (2003) ในงานวิจัยนี้การทดสอบการดึงยาง EPDM เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นและความเครียดจะถูกทดสอบด้วยอัตราการดึงที่ต่างๆ กัน เริ่มตั้งแต่การทดสอบที่มีการดึงเสมือนอยู่ในสภาพสถิตที่อัตราความเครียดน้อยกว่า 0.4 1/s และการดึงเสมือนอยู่ในสภาพพลวัตที่อัตราความเครียดในช่วง 2800-3200 1/s จากการทดสอบพบว่าความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นและความเครียดจะขึ้นกับปัจจัยของอัตราความเครียดที่ใช้ในการดึง

นัย (2544) ได้กล่าวถึงดอกยางที่เป็นส่วนนอกสุดของยางอยู่เหนือโครงยางที่สัมผัสกับพื้นผิวดอกยางทำหน้าที่ยึดเกาะพื้นผิวและป้องกันโครงผ้าใบสึก เป็นส่วนที่เกิดการเสียดสีอยู่ตลอด ถ้ารถฟาร์มแทรกเตอร์ทำงานบนถนนแห้งและเรียบแล้วดอกยางก็ไม่มี ความจำเป็น แต่เนื่องจากรถฟาร์มแทรกเตอร์ต้องทำงานในไร่นาบนสภาพพื้นดินต่างๆ กัน แสดงดังภาพที่ 11 ดอกยางจึงมีความจำเป็นอย่างมาก ยางของยวดยานทุกประเภทจะต้องมีดอกยาง ยกเว้นยางของรถบดถนนและยางของรถแข่งที่ใช้ความเร็วสูงบนถนนเรียบแห้ง การเลือกใช้ดอกยางที่เหมาะสมกับสภาพพื้นที่มีความสำคัญที่จะทำให้ผู้ใช้ได้รับประโยชน์จากการใช้งานอย่างเต็มที่ และจะช่วยประหยัดค่าใช้จ่าย



ภาพที่ 11 รถฟาร์มแทรกเตอร์ที่ใช้ล้อตีนตะขาบในปัจจุบัน [8]

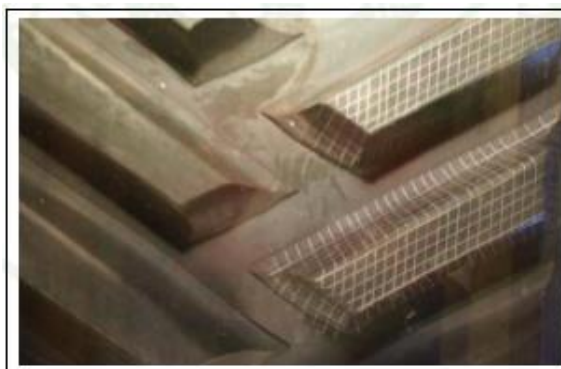
Rahman et al. (2005) งานวิจัยนี้จะเน้นเกี่ยวกับการออกแบบยางล้อของพาหนะแบบพิเศษสำหรับใช้งานบนทางขรุขระบนผิวดินเลน โดยการศึกษาของงานวิจัยนี้เริ่มจากการศึกษาคุณสมบัติของดินเลนโดยใช้เครื่องมือวัดทางวิศวกรรมหลายตัวเข้าร่วมกัน การทดสอบแรงเฉือนโดยตรงถูกทดสอบโดยใช้เครื่อง Wtkeham Farrance 25402 เพื่อที่จะใช้ในการวัดค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานการยึดเกาะระหว่างอนุภาคและค่าโมดูลัสแรงเฉือนของดินเลน สำหรับการทดสอบแรงกดตัวจะถูกทดสอบโดยใช้เครื่องมือใช้กำลังแรงที่ถูกสร้างขึ้นเป็นพิเศษเพื่อที่จะทราบถึงค่าความแข็งตึงของตำแหน่งพื้นผิว และชั้นในของดินเลน จากนั้นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ประกอบไปด้วยยางล้อที่ออกแบบมาพิเศษและดินเลนที่มีคุณสมบัติที่วัดได้ข้างต้นได้ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อที่จะใช้ในกระบวนการปรับแบบของล้อยางให้มีความเหมาะสมที่สุด

Grisso et al. (2006) ได้ทำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่สามารถอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างอุปกรณ์การลากและดิน ในการทำนายประสิทธิภาพการทำงานของยานพาหนะออฟโรด ตัวอย่าง เช่น ผลการดำเนินงานของยางที่ใช้ในพื้นที่การเกษตรได้รับการพัฒนาเป็นครั้งแรกโดย Brixius ซึ่งการทำนายประสิทธิภาพการฉุดลากและความต้านทานการเคลื่อนไหวย ต่อมา Al-Hamad และคณะ ได้ทำการปรับปรุงสมการ Brixius

Wei (2011) ทำการทดสอบหาค่าอัตราส่วนของแรงหารด้วยความกว้างของชิ้นงานทดสอบและการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ของชิ้นยางตีนตะขาบ จากการทดสอบการขัดถูนั้นพบว่าความเครียดตึงสูงสุดและความเครียดเฉือนสูงสุดเกิดที่ตำแหน่งบริเวณขอบชิ้นยางตีนตะขาบทั้งในการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์และการทดสอบ ซึ่งจากการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์สามารถใช้ในการยืนยันการวิเคราะห์โมเดลของโครงยางที่ซับซ้อน

Liu et al. (2012) แหวนยางกันซึมถูกวิเคราะห์พฤติกรรมการทำงานโดยใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบไม่เป็นเชิงเส้น โดยคุณสมบัติของยางจะได้จากการทดสอบการดึงแล้วนำมาหาค่าสัมประสิทธิ์ของแบบจำลองมุนนีเรพลีน จากการวิเคราะห์พบว่าค่าความเค้นวอนมิสสูงสุดจะพบบริเวณที่แหวนยางกันซึมนั้นสัมผัสกับแกนลูกสูบ โดยค่าความเค้นวอนมิสจะเพิ่มขึ้นเมื่อค่าของแรงดันน้ำมันภายในกระบอกสูบนั้นสูงขึ้น อย่างไรก็ตามค่าความเค้นวอนมิสสูงสุดนั้นยังมีค่าน้อยกว่าค่าของแรงดันน้ำมันภายในกระบอกสูบในสถานะที่ใช้งานตามปกติซึ่งเป็นผลให้สามารถป้องกันการรั่วไหลของน้ำมันออกด้านนอกกระบอกได้

Sergio et al. (2012) โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับการพัฒนาผลิตภัณฑ์ของบริษัท Camoplast Solideal ถูกนำมาใช้ในการศึกษาพฤติกรรมของยางตีนตะขาบ โดยการศึกษาด้วยวิธีเชิงตัวเลขต่างๆ ที่ผ่านมานั้นทำให้ทราบถึงลักษณะกลศาสตร์และข้อจำกัดเชิงกล อย่างไรก็ตามสิ่งที่สำคัญในการศึกษายางตีนตะขาบในปัจจุบันนั้น คือ การพัฒนาเครื่องมือการวิเคราะห์เพื่อให้สามารถศึกษาลักษณะการสึกของยางตีนตะขาบ ยางตีนตะขาบมักใช้ในงานเกษตรกรรมและการทำนายนการสีกและอายุการใช้งานนั้นค่อนข้างยาก ซึ่งการได้มาซึ่งข้อมูลสำหรับเพื่อใช้ทำนายการสึกนั้นก็ค่อนข้างยากเช่นกัน เนื่องจากการนำเสนอข้อมูลการสัมผัสระหว่างผิวยางกับพื้นดินในการปฏิบัติการนั้นค่อนข้างจะจำลองค่อนข้างยาก ดังนั้น งานวิจัยนี้จะเป็นการอธิบายถึงกระบวนการจำลองการสึกของล้อยางตีนตะขาบที่เกิดขึ้นเมื่อมีการหมุนของล้อ โดยจุดมุ่งหมายหลักจะเป็นการพัฒนาแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ โดยนำผลของการจำลองในคอมพิวเตอร์มาเทียบกับผลที่ได้จากการทดสอบจริง ซึ่งผลที่ได้จะช่วยให้สามารถทราบถึงเงื่อนไขทางกลศาสตร์ที่ส่งผลต่อการกร่อนของยางล้อตีนตะขาบ เพื่อช่วยในการออกแบบต่อไปได้ แสดงดังภาพที่ 13



ภาพที่ 13 ผลิตภัณฑ์ยางตีนตะขาบสำหรับการทดสอบ [16]

จากการทบทวนบทความและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่า ได้มีการศึกษาศึกษา ทดสอบและวิจัยเกี่ยวกับยางตีนตะขาบเป็นจำนวนมาก มีการใช้โมเดลทางคณิตศาสตร์มาอธิบายความสัมพันธ์ มีการออกแบบระบบและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบการทำงานของยางตีนตะขาบ นอกจากนี้ยังได้มีการนำวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์มาช่วยในการวิเคราะห์เพื่อดูพฤติกรรมต่างๆที่เกิดขึ้นของยาง

อุปกรณ์และวิธีการ

วัสดุและอุปกรณ์

1. โปรแกรมช่วยในการออกแบบ Solidworks
2. โปรแกรมช่วยในการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ MSC Patran และ MSC Marc
3. ชุดล้อตีนตะขาบ
4. ชุด Servo Motor
5. ยางคอมปาวด์
6. เครื่องอัดยาง

วิธีการ

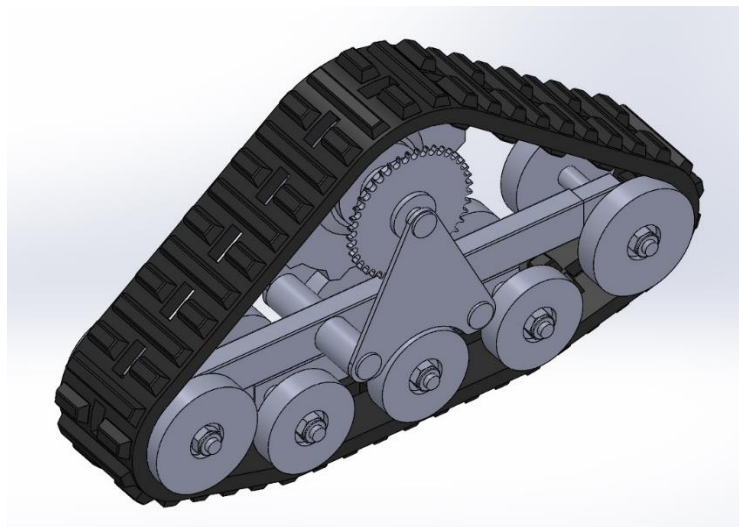
การดำเนินงานของโครงการแบ่งเป็นสามส่วน ในส่วนแรกเป็นการดำเนินงานในส่วนของการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ในยางตีนตะขาบ โดยใช้ค่าสัมประสิทธิ์จากความสัมพันธ์ในสมบัติเชิงกลของยาง กับการใช้คอมพิวเตอร์ช่วยในการวิเคราะห์ (CAE) ซึ่งได้แก่การจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ในโปรแกรม ส่วนที่สองเป็นการออกแบบวิธีการขึ้นรูปยางตีนตะขาบ โดยการดัดแปลงเครื่องอัดยางที่ทางบริษัทมีอยู่เดิมให้สามารถขึ้นรูปยางตีนตะขาบได้ และส่วนที่สามเป็นการออกแบบเครื่องทดสอบการทำงานของยางตีนตะขาบ เพื่อใช้ทดสอบยางตีนตะขาบที่ได้ทำการผลิตขึ้นมาและเป็นการเปรียบเทียบผลที่ได้จากแบบจำลองกับการทดสอบจริง

1. สร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ในยางตีนตะขาบ

การสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์นั้นจำเป็นต้องมีส่วนประกอบ 3 อย่างคือ รูปทรงผลิตภัณฑ์ (Geometry) คุณสมบัติของวัสดุ (Material) และเงื่อนไขในการจำลอง (Boundary Condition) จึงจะสามารถทำการประมวลผลและแสดงผลลัพธ์ของการคำนวณได้

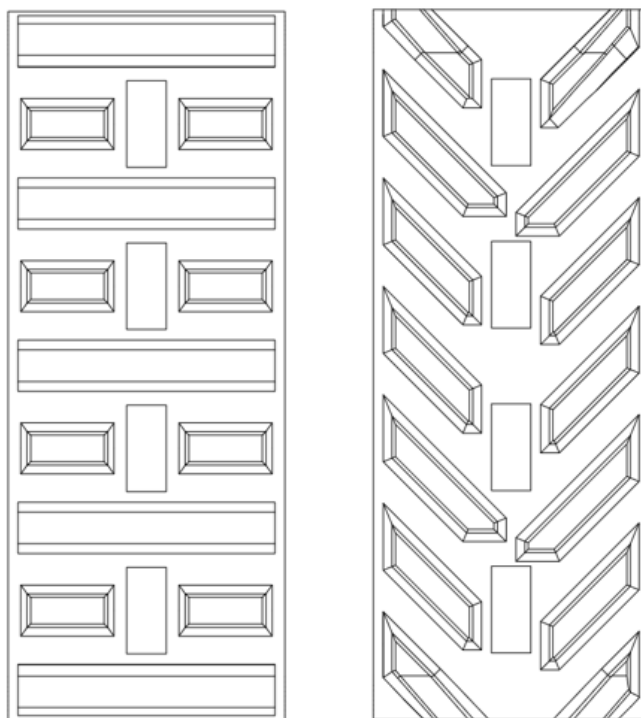
1.1 เตรียมแบบรูปทรงยางตีนตะขาบ

ในการสร้างแบบ 3 มิติของยางตีนตะขาบได้ใช้โปรแกรมช่วยในการออกแบบ Solidwork ในการสร้างแบบจำลอง 3 มิติ (CAD) ของยางตีนตะขาบขึ้น เพื่อใช้เป็นไฟล์ตั้งต้นในการนำเข้าสู่กระบวนการขึ้นต้น (Pre Processing) ในโปรแกรม MSC Patran โดยแบบ 3 มิติที่ใช้ในการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ประกอบด้วย ยางตีนตะขาบและชุดล้อยางตีนตะขาบ ดังแสดงในภาพที่ 14



ภาพที่ 14 แบบ 3 มิติของยางตีนตะขาบและชุดล้อตีนตะขาบ

ในส่วนองแบบยางตีนตะขาบ ทางผู้วิจัยได้ทำการออกแบบยางตีนตะขาบสำหรับศึกษาเป็นรูปแบบ Straight Bar ซึ่งสามารถวิ่งได้ในทุกพื้นผิวถนน โดยเฉพาะถนนออฟโรด โดยการวางแนว bar ของยางนั้นได้ออกแบบไว้ 2 รูปแบบนั้นคือ วางเป็นแนวขวางกับเส้นยางและวางทำมุม 45 องศากับแนวเส้นยางดังแสดงในภาพที่ 15

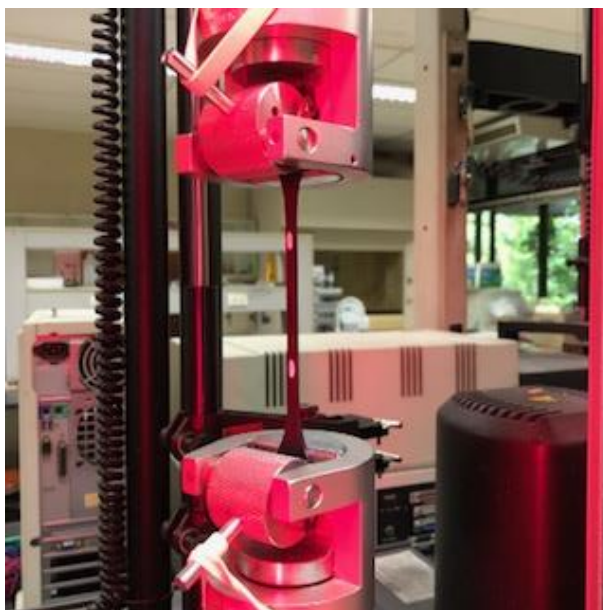


ภาพที่ 15 แบบลายยางตีนตะขาบแบบตรงแนวขวาง (ซ้าย) และแบบทำมุม 45 องศา (ขวา)

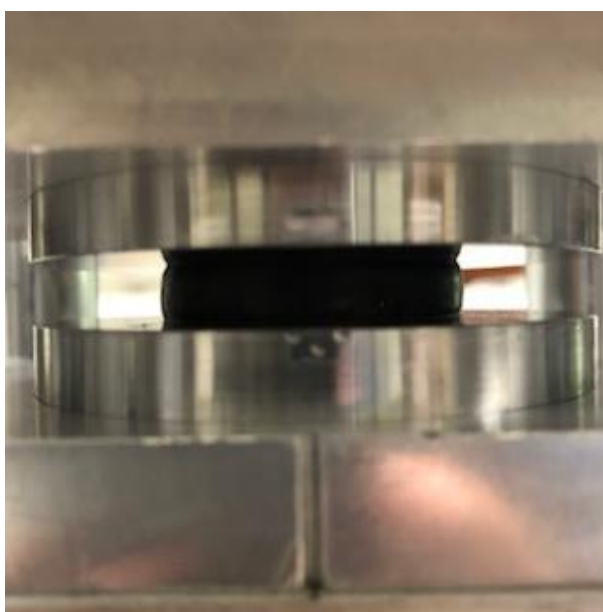
1.2 ทดสอบสมบัติของสูตรยางต้นแบบที่นำมาศึกษา

ในการหาค่าสัมประสิทธิ์ของแบบจำลองวัสดุไฮเปอร์อีลาสติกของยางที่จะใช้ขึ้นรูปยางตีนตะขาบนั้น จะต้องมีการทดสอบสมบัติเชิงกลของยางเพื่อนำค่าที่ได้จากการทดสอบไปหาค่าสัมประสิทธิ์ และนำผลลัพธ์ที่ได้ไปใช้ในแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยการทดสอบสมบัติเชิงกลของยางจะประกอบไปด้วย การทดสอบ

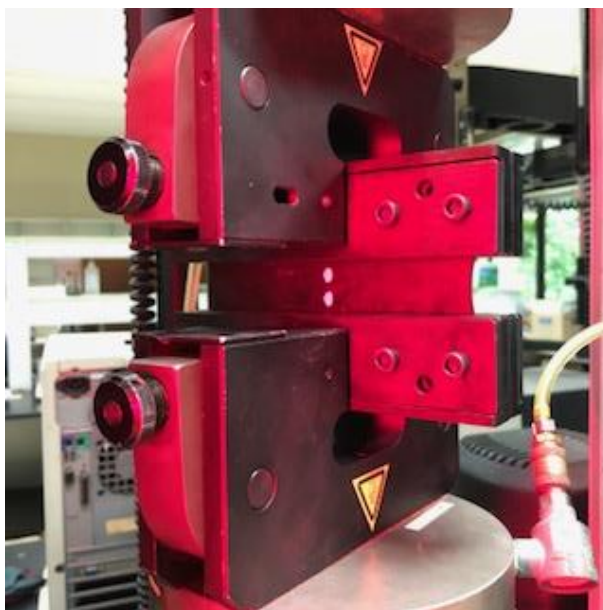
การรับแรงดึง (Uniaxial Tension Test) การทดสอบการรับแรงกดอัด (Compression Test) และการทดสอบการรับแรงเฉือน (Planar Tension Test)



ภาพที่ 16 แสดงการทดสอบการรับแรงดึง

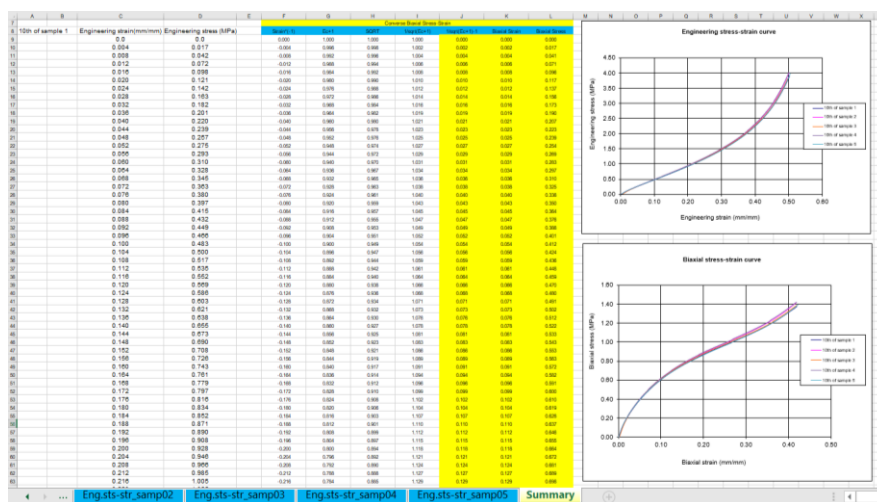


ภาพที่ 17 การทดสอบการรับแรงกดอัด



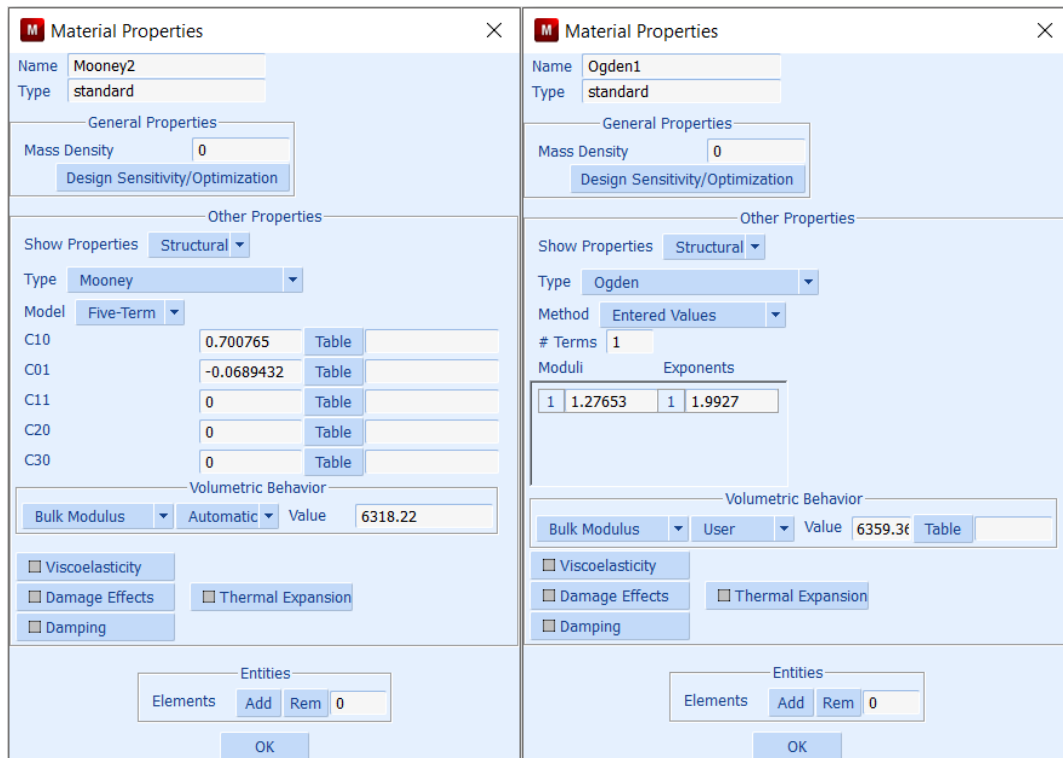
ภาพที่ 18 การทดสอบการรับแรงเค้น

สูตรยางที่นำไปทดสอบสมบัติของวัสดุ เป็นสูตรยางที่ทางบริษัท อุตสาหกรรมผลิตยางไทยสินมียู่เดิม โดยในการเลือกสูตรยางนั้น ทางผู้วิจัยได้ประชุมร่วมกับทางบริษัทในการเลือกสูตรยางที่สอดคล้องกับการขึ้นรูปยางตีนตะขาบ โดยอ้างอิงคุณสมบัติของมาตรฐานอุตสาหกรรมของยางรถยนต์เชิงพาณิชย์ (มอก. 2478-2552) มาใช้เป็นเกณฑ์ประกอบการตัดสินใจ ซึ่งสูตรยางที่เลือกนำมาทดสอบประกอบด้วย ยางสูตร 05HS สูตร 06 และสูตร 210 และใช้บริการทดสอบคุณสมบัติของยางจากศูนย์วิจัยเทคโนโลยียาง คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล ตัวอย่างผลการทดสอบดังแสดงในภาพที่ 19 (ผลการทดสอบทั้งหมดจัดแสดงในภาคผนวก)



ภาพที่ 19 ผลการทดสอบสมบัติของยางต้นแบบ

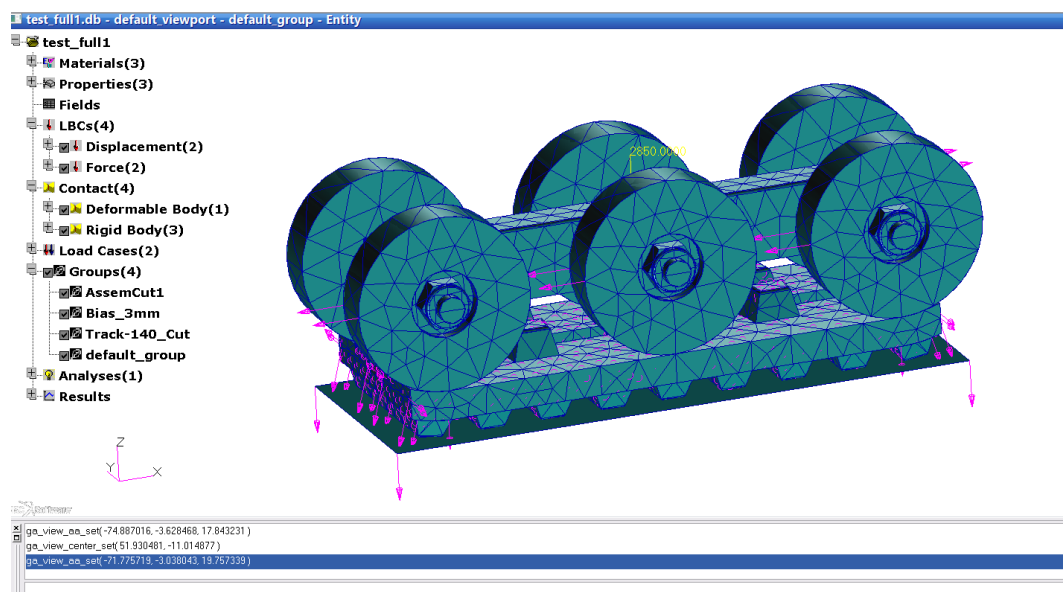
จากผลการทดสอบสมบัติของยาง ผลลัพธ์ที่ได้จะเป็นค่าความเค้นและความเครียดที่เกิดขึ้นระหว่างการทดสอบ โดยค่าที่ได้สามารถนำไปสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด (Engineering Stress-Strain Curve) และสามารถหาค่าสัมประสิทธิ์ของแบบจำลองวัสดุไฮเปอร์อีลาสติก เพื่อนำไปใช้ในแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ ผ่านโปรแกรม Marc Mentat ดังแสดงในภาพที่ 20 (Material Properties ของยางที่ทำการทดสอบจัดแสดงในภาคผนวก)



ภาพที่ 20 ค่าสัมประสิทธิ์วัสดุไฮเปอร์อีลาสติกของยางต้นแบบ

1.3 สร้างเงื่อนไขในแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์

จากการเตรียมแบบ 3 มิติและคุณสมบัติข้างต้น สามารถนำแบบ 3 มิติมาสร้างเงื่อนไขในแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยใช้โปรแกรม MSC Patran ในการกำหนดขนาดของเอลิเมนต์ กำหนดคุณสมบัติของวัสดุ และการกำหนดเงื่อนไขขอบเขตของแรงที่มากระทำ ได้แก่ น้ำหนัก (Load) ที่ยางตีนตะขากได้รับ แรงดึงในตัวอย่างที่เกิดขึ้นจากการขับเคลื่อนของล้อ ดังแสดงในภาพที่ 21 จากนั้นประมวลผลโดยใช้ MSC Marc เพื่อดูพฤติกรรมการรับแรงของวัสดุต่อไป

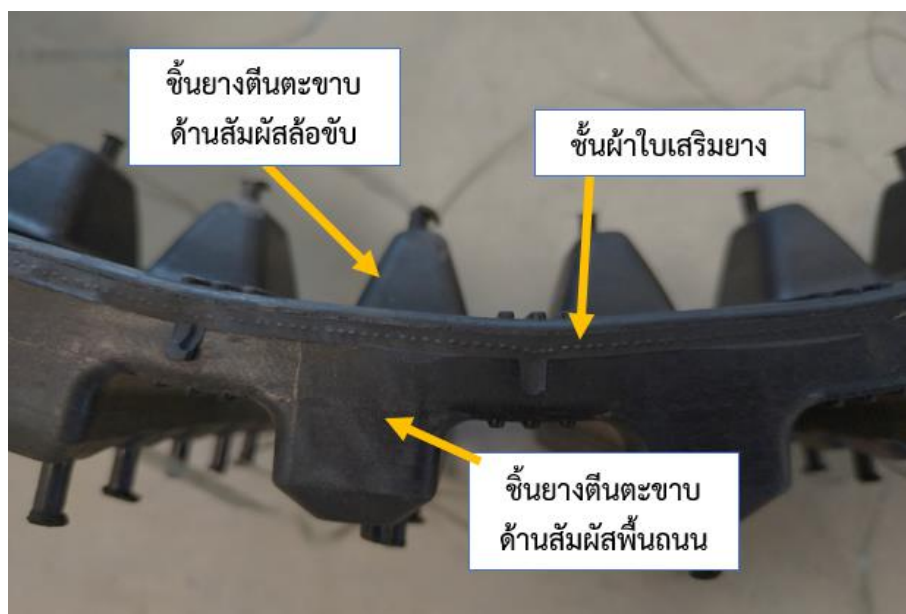


ภาพที่ 21 การกำหนดเงื่อนไขในแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์

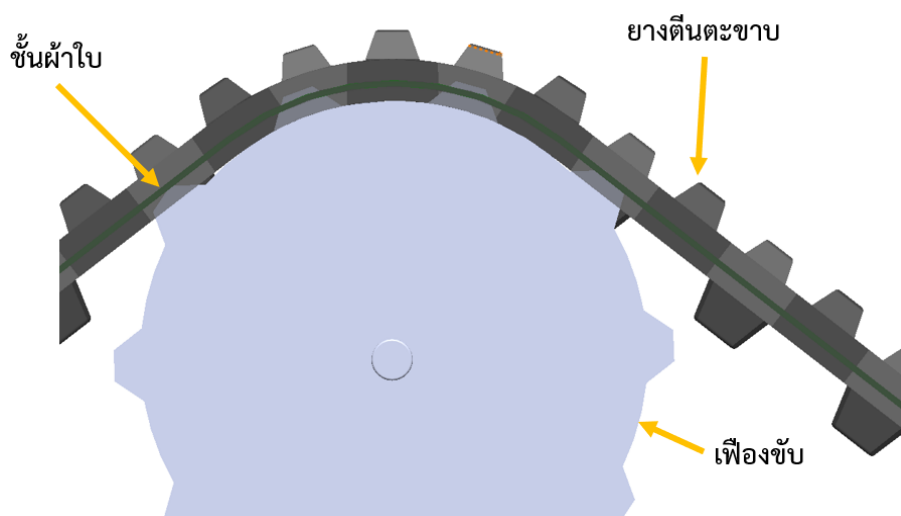
2. ออกแบบการขึ้นรูปยางดินตะขาบต้นแบบ

2.1 ออกแบบส่วนประกอบต่างๆ ที่ใช้ในการขึ้นรูปยางดินตะขาบให้เข้ากับเครื่องอัดยางที่มีอยู่เดิม

การขึ้นรูปยางดินตะขาบในงานวิจัยนี้จะเป็นการขึ้นรูปยางดินตะขาบสำหรับรถ ATV และรถเข็นผู้ป่วย โดยจากการศึกษายางดินตะขาบของรถขนาดเล็กที่มีการผลิตและใช้งานในต่างประเทศนั้น ตัวยางดินตะขาบจะมีการเสริมชั้นผ้าใบในตัวยางเพื่อช่วยในการรับแรงดึงที่เกิดจากการฉุดลากระหว่างการขับเคลื่อนดังแสดงในภาพที่ 22 ดังนั้นยางดินตะขาบที่ทางผู้วิจัยจะทำการทดสอบขึ้นรูปและนำมาใส่กับชุดล้อดินตะขาบที่มีอยู่จึงเป็นแบบใช้ผ้าใบเสริมในยางดังแสดงในภาพที่ 23



ภาพที่ 22 ยางดินตะขาบแบบเสริมผ้าใบ



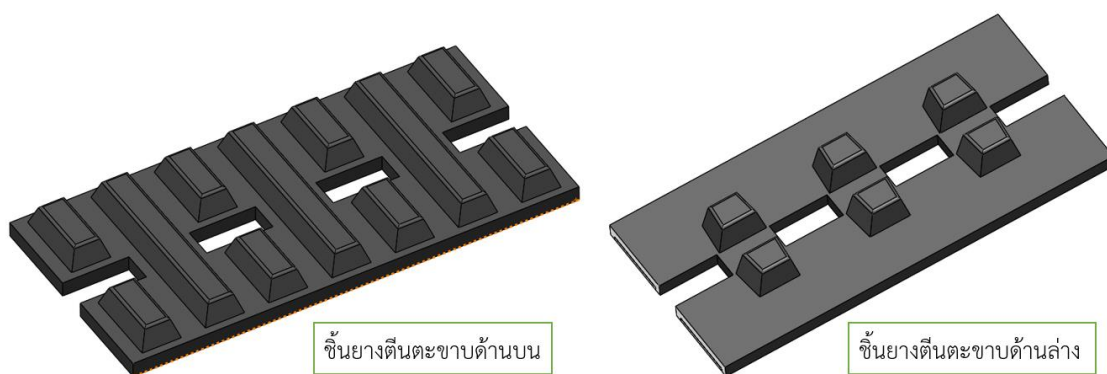
ภาพที่ 23 ยางดินตะขาบแบบเสริมผ้าใบ

จากแบบโมเดลของยางตีนตะขาแบบ ขั้นตอนที่ต่อไปเป็นการสำรวจเครื่องจักรที่ใช้ในการขึ้นรูปยางตีนตะขา คือเครื่องอัดยาง โดยในงานวิจัยได้ใช้เครื่องอัดยางที่ทางบริษัทอุตสาหกรรมยางไทยสินมียูเดม ดังแสดงในภาพที่ 24 ซึ่งเป็นเครื่องอัดยางในรถบรรทุก จึงต้องมีการออกแบบชิ้นส่วนและการจับยึดแม่พิมพ์เพิ่มเติมเพื่อให้สามารถอัดขึ้นรูปยางตีนตะขาได้

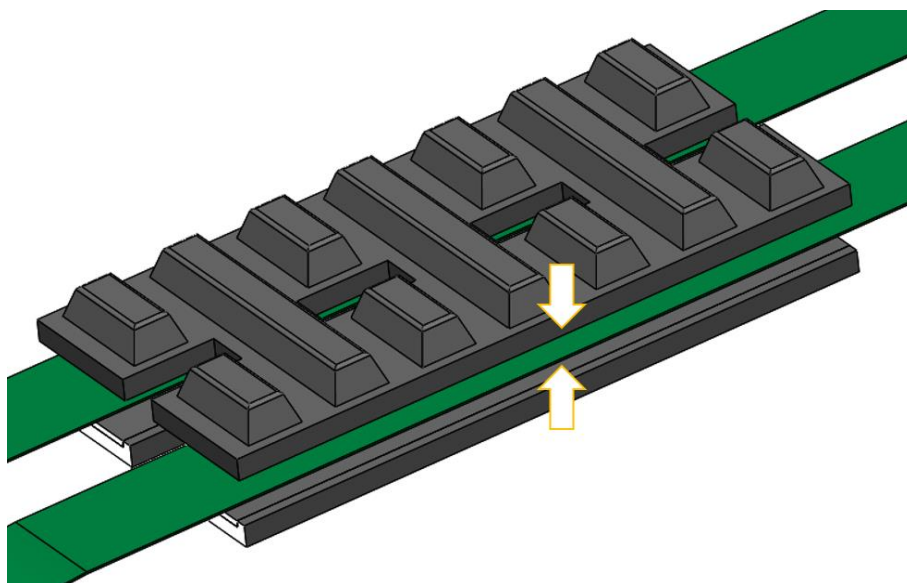


ภาพที่ 24 เครื่องอัดยางในรถบรรทุกของบริษัทฯ

กระบวนการขึ้นรูปยางตีนตะขาแบบเสริมผ้าใบประกอบด้วยสองขั้นตอนคือ ขั้นตอนแรกเป็นการขึ้นรูปยางตีนตะขาขึ้นมาเป็นชิ้นประกอบด้วยชิ้นด้านบนและชิ้นด้านล่าง ดังแสดงในภาพที่ 25 (ด้านบนคือลายดอกยาง ด้านล่างคือส่วนประกบกับเฟืองล้อขับ) ส่วนขั้นตอนที่สองเป็นการประกบยางตีนตะขาทั้งสองด้านเข้ากับผ้าใบจนครบวงล้อดังแสดงในภาพที่ 26



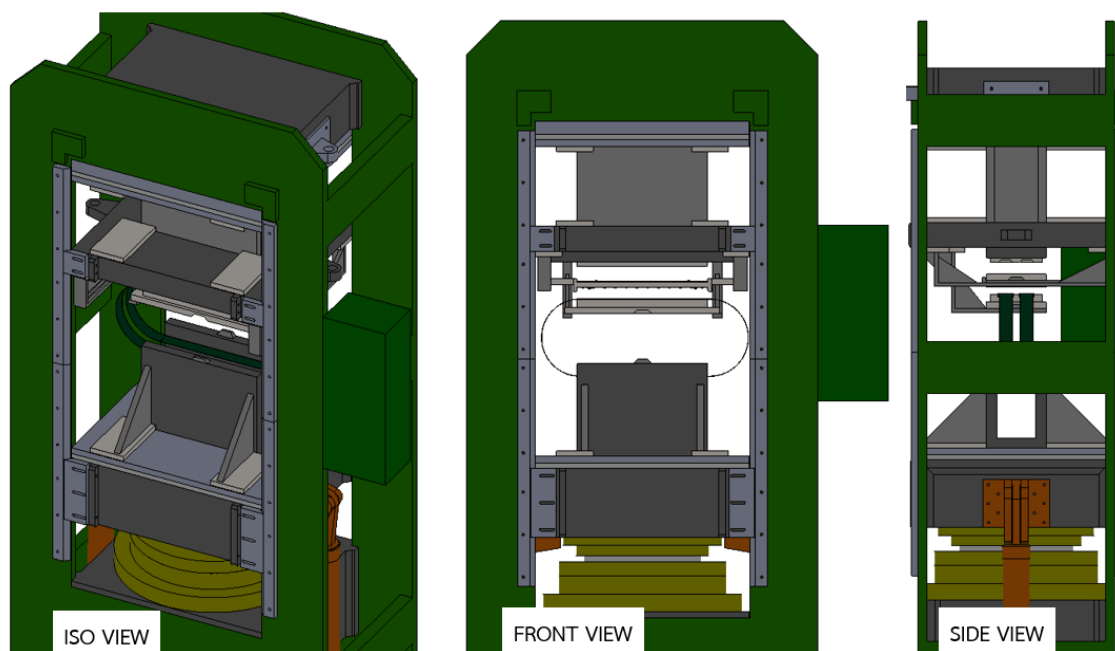
ภาพที่ 25 ชิ้นยางตีนตะขาด้านบนและล่าง



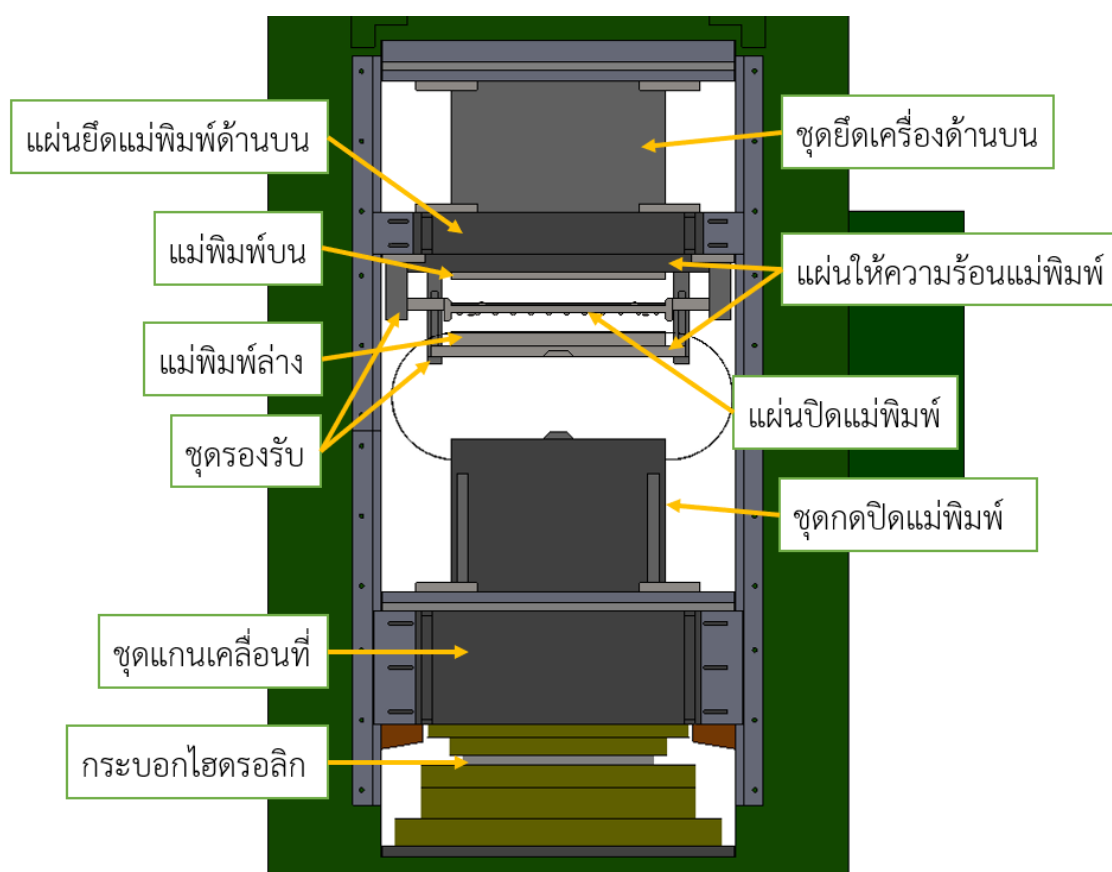
ภาพที่ 26 การประกบชิ้นยางตีนตะขากับผ้าใบ

จากเครื่องอัดยางเดิมของทางบริษัทฯ และกระบวนการขึ้นรูปยางตีนตะขาบที่ได้กล่าวมาข้างต้น สามารถออกแบบชิ้นส่วนต่างๆ ที่ใช้ประกอบการขึ้นรูปยางตีนตะขาบเข้ากับเครื่องอัดยาง ดังแสดงในภาพที่ 27 และ 28 โดยมีส่วนประกอบหลักๆ ดังนี้

- 1) ชุดยึดเครื่องด้านบน ทำหน้าที่ยึดและตั้งตำแหน่งแม่พิมพ์ด้านบนให้อยู่ในพื้นที่ที่สามารถทำงานได้สะดวก
- 2) แผ่นให้ความร้อนแม่พิมพ์ ซึ่งมีฮีตเตอร์ไฟฟ้าฝังอยู่ ทำหน้าที่ให้ความร้อนกับแม่พิมพ์ยาง
- 3) แผ่นปิดแม่พิมพ์ ทำหน้าที่กีดแม่พิมพ์ทั้งด้านบนและด้านล่าง ในระหว่างการอัดขึ้นรูปยาง
- 4) ชุดกดปิดแม่พิมพ์ ทำหน้าที่ดันและกดแม่พิมพ์ให้ติดกันระหว่างการขึ้นรูปยาง และการประกบติดกับผ้าใบ
- 5) ชุดรองรับ ทำหน้าที่เป็นตัวพักชิ้นส่วนที่มีการเคลื่อนที่ขึ้นลง ได้แก่ แผ่นปิดแม่พิมพ์ และแม่พิมพ์ด้านล่าง กรณีเครื่องเคลื่อนที่ลงเพื่อคลายแม่พิมพ์ออกจากกัน
- 6) แม่พิมพ์ยางตีนตะขาบ ประกอบด้วยด้านบนและด้านล่าง มีความยาวเท่ากับหนึ่งในสี่ของความยาวเส้นรอบวงของยาง (ต้องทำการอัดขึ้นรูป 4 ครั้งจึงจะได้ยางมาติดกับผ้าใบจนครบวง)



ภาพที่ 27 เครื่องอัดยางสำหรับยางดินตะขบ



ภาพที่ 28 ส่วนประกอบต่างๆ ของเครื่องอัดยางดินตะขบ

2.2 ออกแบบระบบควบคุมความร้อนให้กับแม่พิมพ์ยาง

การให้ความร้อนในการขึ้นรูปยางของทางบริษัทฯ ได้ใช้ระบบไอน้ำในการให้ความร้อน ซึ่งในกระบวนการอัดขึ้นรูปยางดินตะขานั้นได้เปลี่ยนมาใช้ระบบฮีตเตอร์ไฟฟ้าแทนระบบเดิมซึ่งเป็นการใช้ไอน้ำเนื่องจากความสะดวกในเรื่องการออกแบบชิ้นส่วนอุปกรณ์และการติดตั้งบนเครื่องอัดยาง โดยอุปกรณ์ที่ใช้ในการให้ความร้อนและควบคุมอุณหภูมิประกอบด้วย

- 1) ฮีตเตอร์ไฟฟ้าแบบแท่ง (Cartridge Heater)
- 2) อุปกรณ์วัดอุณหภูมิแบบ Thermocouple
- 3) อุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิ (Temperature Controller) แบบ PID Control
- 4) อุปกรณ์ตัดต่อวงจรแบบ Solid State Relay

การหาขนาดของฮีตเตอร์สำหรับให้ความร้อนกับแม่พิมพ์ยางดินตะขาน สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$Q = mc\Delta T$$

โดยที่ Q คือ พลังงานความร้อน (Joule)
 m คือ มวลของแม่พิมพ์ (kg)
 c คือ ค่าความจุความร้อนเฉพาะ (เหล็ก = 0.444 kJ/kg-K)
 ΔT คือ อุณหภูมิที่ต้องการ (อุณหภูมิปลาย-อุณหภูมิตั้งต้น)

จากสมการข้างต้นสามารถคำนวณค่าพลังงานความร้อนได้ดังนี้

$$Q = 105.596 \times 0.444 \times (433.15 - 310.15) \\ = 5766.81 \text{ kJ}$$

จากค่าพลังงานความร้อน นำมาหาค่ากำลังไฟฟ้าของฮีตเตอร์โดยใช้สูตร

$$P = \frac{E}{t}$$

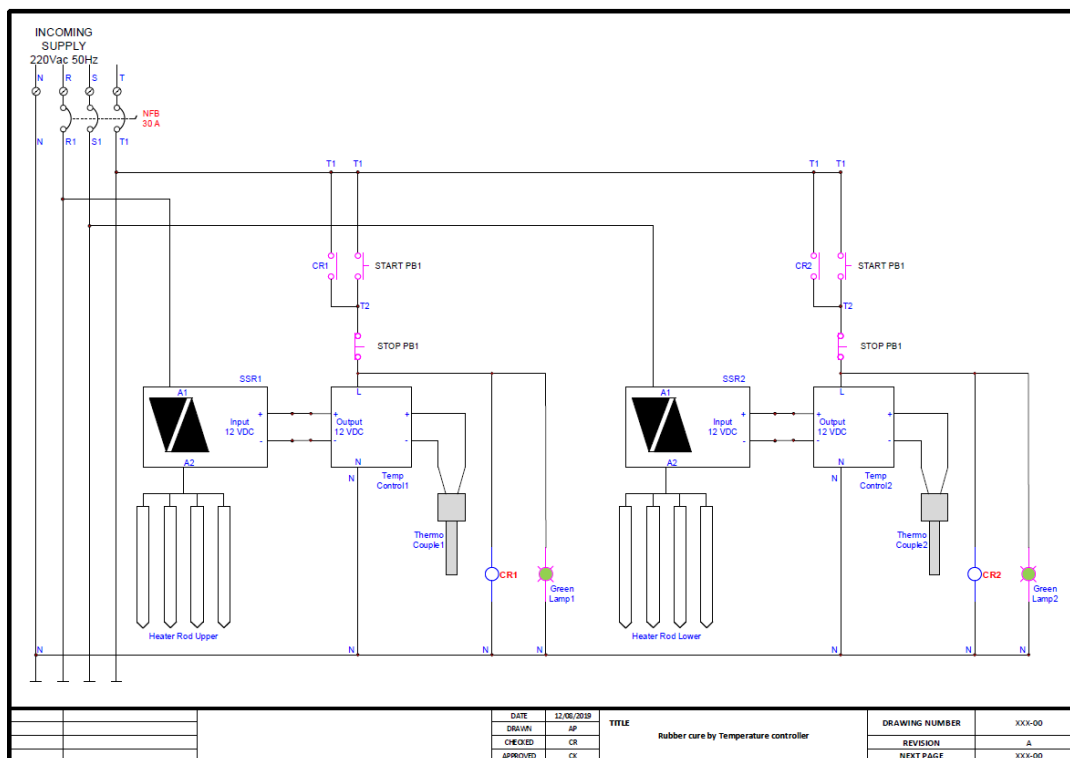
โดยที่ P คือ กำลังไฟฟ้า (Watts)
 E คือ พลังงาน (Joule)
 t คือ เวลาที่ใช้ (s)

จากสมการข้างต้นสามารถคำนวณหาลำกำลังไฟฟ้าของฮีตเตอร์ได้ดังนี้

$$P = \frac{5,766.81}{1,200} \\ = 4.8 \text{ kW}$$

จากกำลังไฟฟ้าข้างต้นจึงได้เลือกใช้ฮีตเตอร์ขนาด 600 Watts จำนวน 8 แท่ง โดยแบ่งการติดตั้งออกเป็นสองแถว คือติดตั้งกับแผ่นให้ความร้อนที่แม่พิมพ์ตัวบน 4 แท่ง และติดตั้งกับแผ่นให้ความร้อนที่แม่พิมพ์ตัวล่าง 4 แท่ง

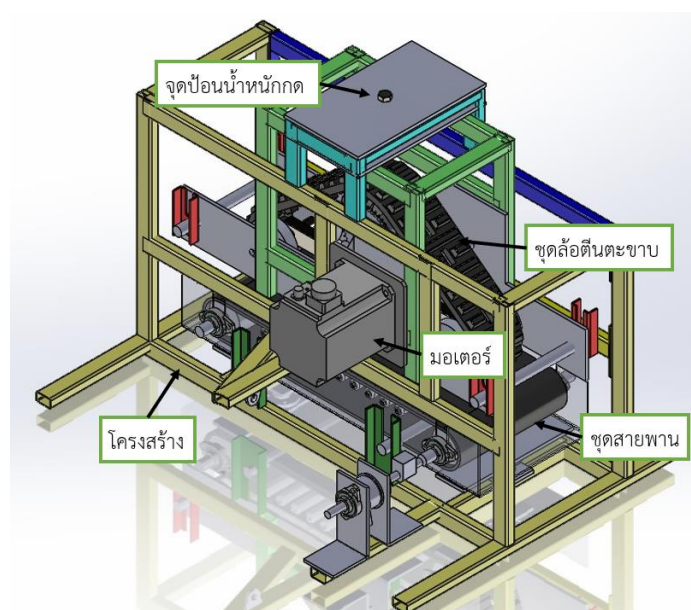
ในการออกแบบทางไฟฟ้าของระบบควบคุมอุณหภูมิโดยใช้อุปกรณ์ที่กล่าวมาข้างต้น ได้ทำการเขียนแบบไฟฟ้า Single line Diagram แสดงการทำงานของระบบควบคุมอุณหภูมิในการให้ความร้อนของแม่พิมพ์ ดังแสดงในภาพที่ 29



ภาพที่ 29 Single line Diagram ของระบบควบคุมอุณหภูมิ

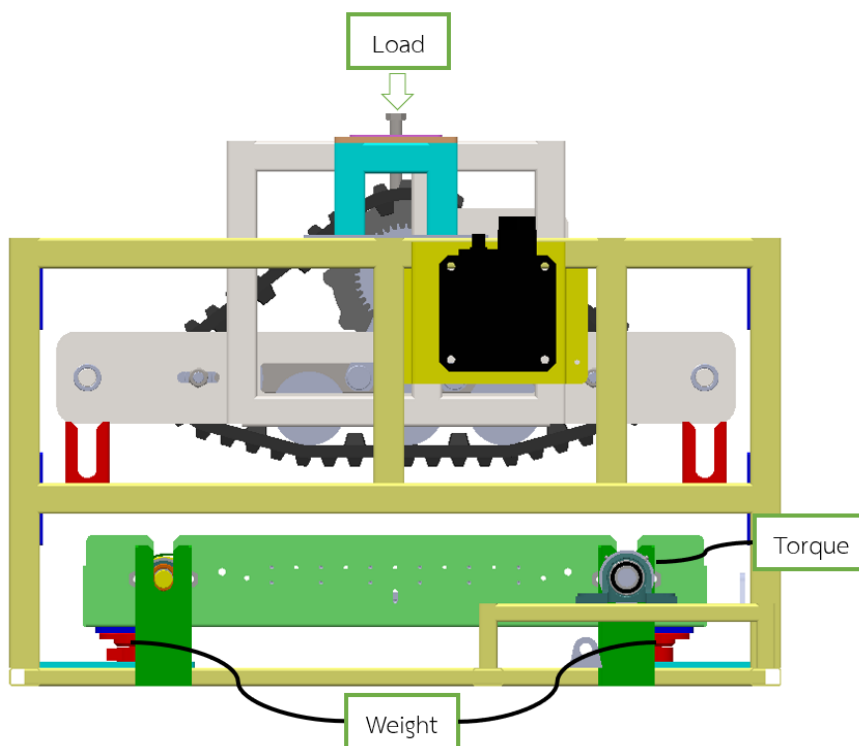
3. ออกแบบชุดทดสอบการทำงานของยางตีนตะขา

เมื่อผลิตยางตีนตะขาเป็นที่เรียบร้อยแล้ว จำเป็นต้องมีการทดสอบการใช้งานเพื่อยืนยันว่าชิ้นงานที่ผลิตขึ้นสามารถใช้งานได้จริง ในงานวิจัยจึงมีการออกแบบชุดทดสอบการทำงานของยางตีนตะขา โดยการใช้มอเตอร์ไฟฟ้าต่อเข้ากับชุดล้อยางตีนตะขาเพื่อขับเคลื่อนระบบ มีชุดสายพานรองรับล้อยางตีนตะขาเคลื่อนที่บนสายพาน โดยแบบ 3 มิติของชุดทดสอบยางตีนตะขาบดังแสดงในภาพที่ 30



ภาพที่ 30 ภาพรวมของชุดทดสอบยางตีนตะขาบ

การทดสอบการทำงานของล้อตีนตะขาสามารถทำได้โดยการป้อนน้ำหนักที่กระทำกับล้อตีนตะขา ผ่านการขึ้นสกรูที่จุดป้อนน้ำหนักด้านบนเครื่องทดสอบ จากนั้นปรับตั้งแรงเสียดทานของสายพานโดยการขึ้นสกรูด้านผ้าเบรกเพื่อเพิ่มแรงฝืดของเพลาลูกกลิ้งของสายพาน แล้วจึงสั่งให้มอเตอร์ทำงานขับเคลื่อนล้อตีนตะขา ระหว่างทดสอบจะมีการวัดค่าที่ได้จากการทดสอบ ได้แก่ น้ำหนักที่กระทำกับสายพาน (Weight) แรงบิดของเพลที่เกิดขึ้นจากการตั้งแรงฝืดบนเพลสายพาน (Torque) ดังแสดงในภาพที่ 31



ภาพที่ 31 การวัดค่าที่ได้จากการทดสอบ

นอกจากค่าที่วัดได้จากเซนเซอร์ดังกล่าวแล้ว ยังมีตัวแปรอื่นที่เกิดขึ้นจากการทดสอบเช่น Torque ของมอเตอร์ ความเร็วของยางตีนตะขาและความเร็วของสายพาน โดยการทดสอบหามูลล้อตีนตะขาสามารถนำค่าตัวแปรที่ได้มาคำนวณหาประสิทธิภาพการฉุดลากหรือการดึง (Tractive Efficiency, TE) [10][17] ของล้อยางตีนตะขาได้จากสมการ

$$TE = \left(\frac{NTR}{GTR} \right) (1 - s) \quad (1)$$

เมื่อ TE คือ Tractive Efficiency

NTR คือ Net Traction Ratio

GTR คือ Gross Traction Ratio

s คือ wheel slip

โดยที่ $NTR = GTR - MRR \quad (2)$

เมื่อ MRR คือ Motion Resistance Ratio

โดยที่ $GTR = \frac{T}{r \times w} \quad (3)$

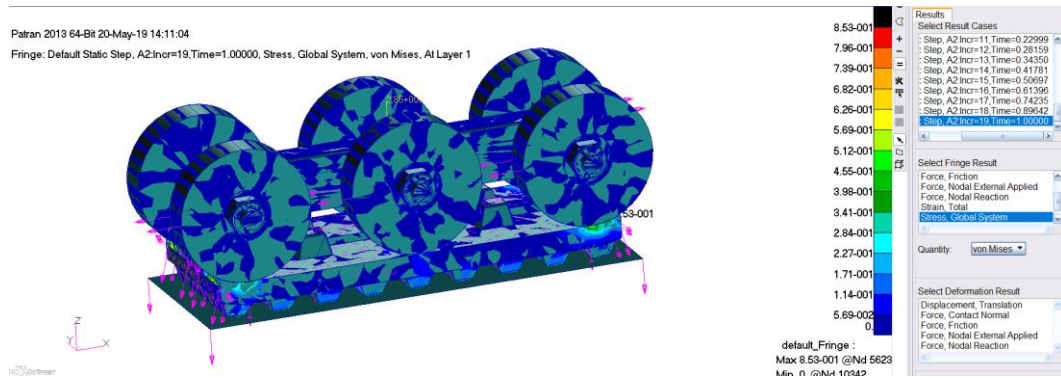
$$MRR = \frac{M}{w} \quad (4)$$

เมื่อ T คือ input torque (N.m)
 M คือ motion resistance (N)
 r คือ rolling radius
 w คือ dynamic load (N)

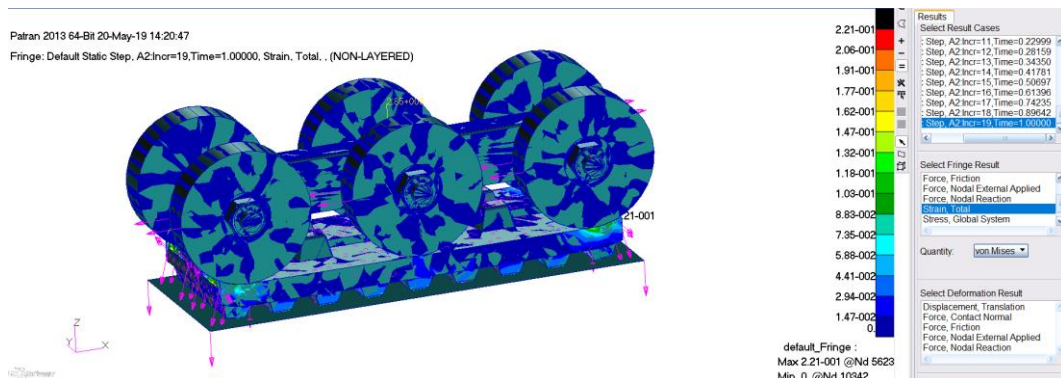
ผลการดำเนินงาน

1. ผลการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์

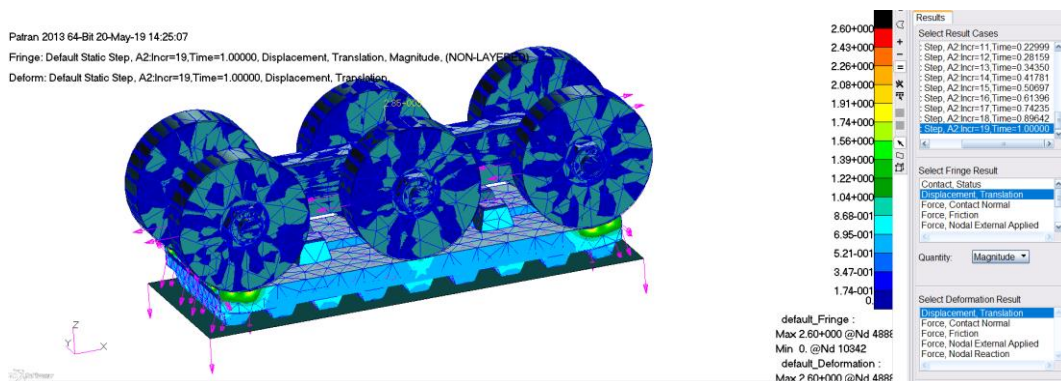
ผลลัพธ์ที่ได้จากการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ในยางตีนตะขาบ ประกอบไปด้วย ค่าความเค้น ความเครียดในตัวอย่าง ค่าการยืดหรือยุบตัวของยางตีนตะขาบ และแรงบริเวณหน้าผิวสัมผัสระหว่างยางตีนตะขาบกับพื้นผิว ดังแสดงในภาพที่ 32 33 34 และ 35 ตามลำดับ



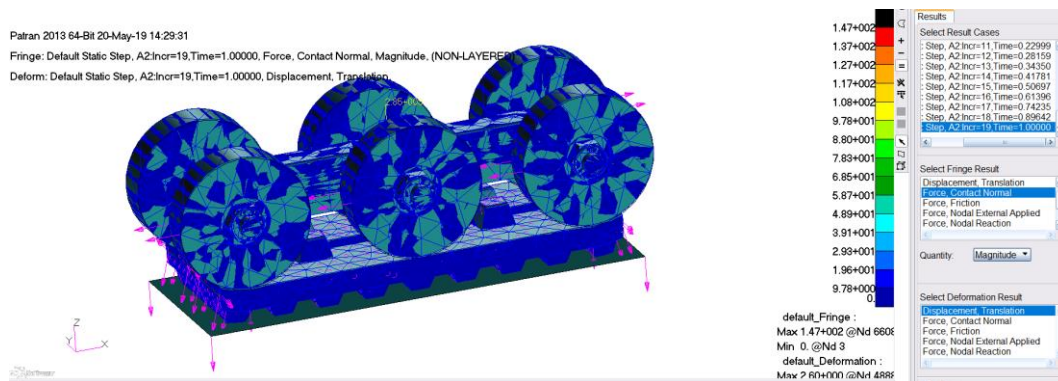
ภาพที่ 32 ผลลัพธ์ค่าความเค้นของยางในโปรแกรม



ภาพที่ 33 ผลลัพธ์ค่าความเครียดของยางในโปรแกรม



ภาพที่ 34 ผลลัพธ์การยืดหรือยุบตัวของยางตีนตะขาบในโปรแกรม



ภาพที่ 35 ผลลัพธ์ของแรงหน้าผิวสัมผัสระหว่างยางกับพื้นผิว

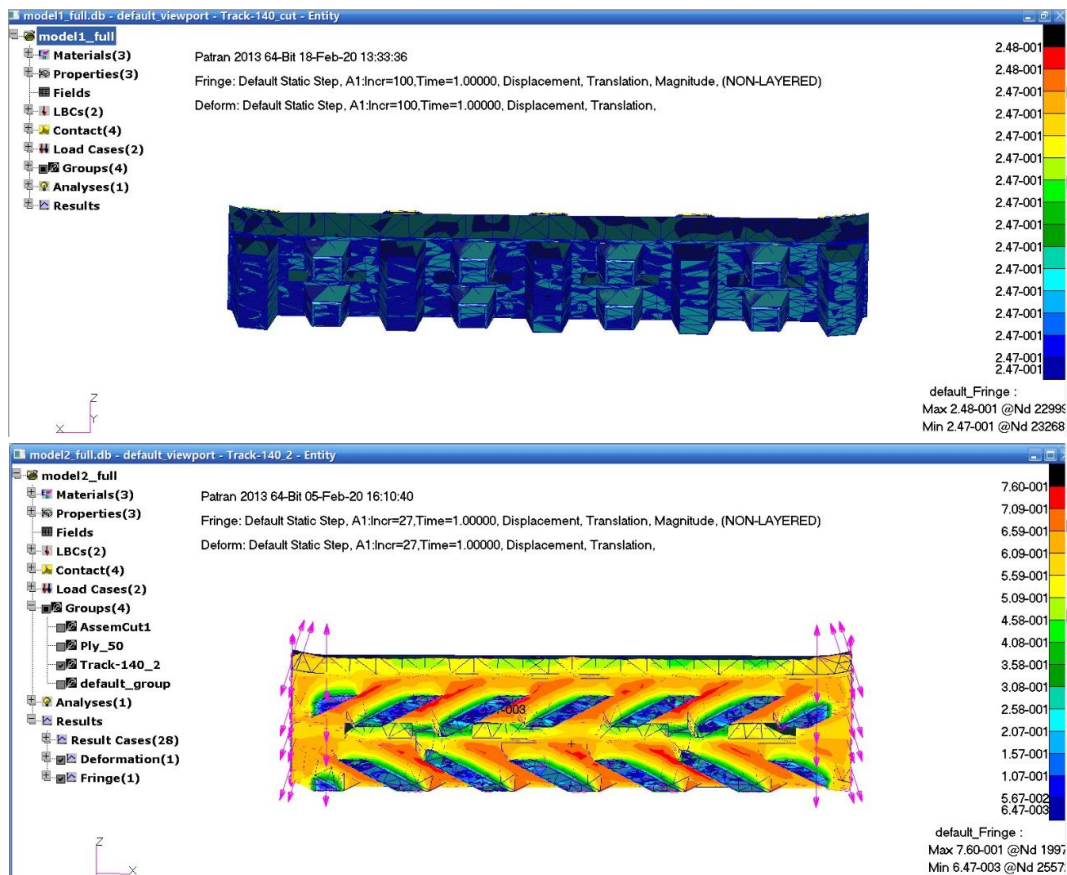
โดยผลลัพธ์ที่ได้สามารถนำมาเปรียบเทียบระหว่างสูตรยางแต่ละสูตร เพื่อเลือกสูตรยางที่เหมาะสมในการใช้ขึ้นรูปยางดินตะขาบ ดังแสดงในตารางที่ 1 โดยสูตรยางที่นำมาใช้ในการขึ้นรูปยางดินตะขาบคือยางสูตร 05HS ซึ่งเป็นสูตรที่มีความแข็งแรงเหมาะสมกับยางที่ใช้กับถนนแบบออฟโรดโดยมีคุณสมบัติของยางคอมปาวด์ดังนี้

ค่า	300% Modulus	= 17.98 MPa
	Tensile Strength	= 24.21 MPa
	Tear Strength	= 92.53 MPa
	%Elongation at break	= 423.3
	Hardness	= 71
	สัดส่วนของยางธรรมชาติ	= 51%

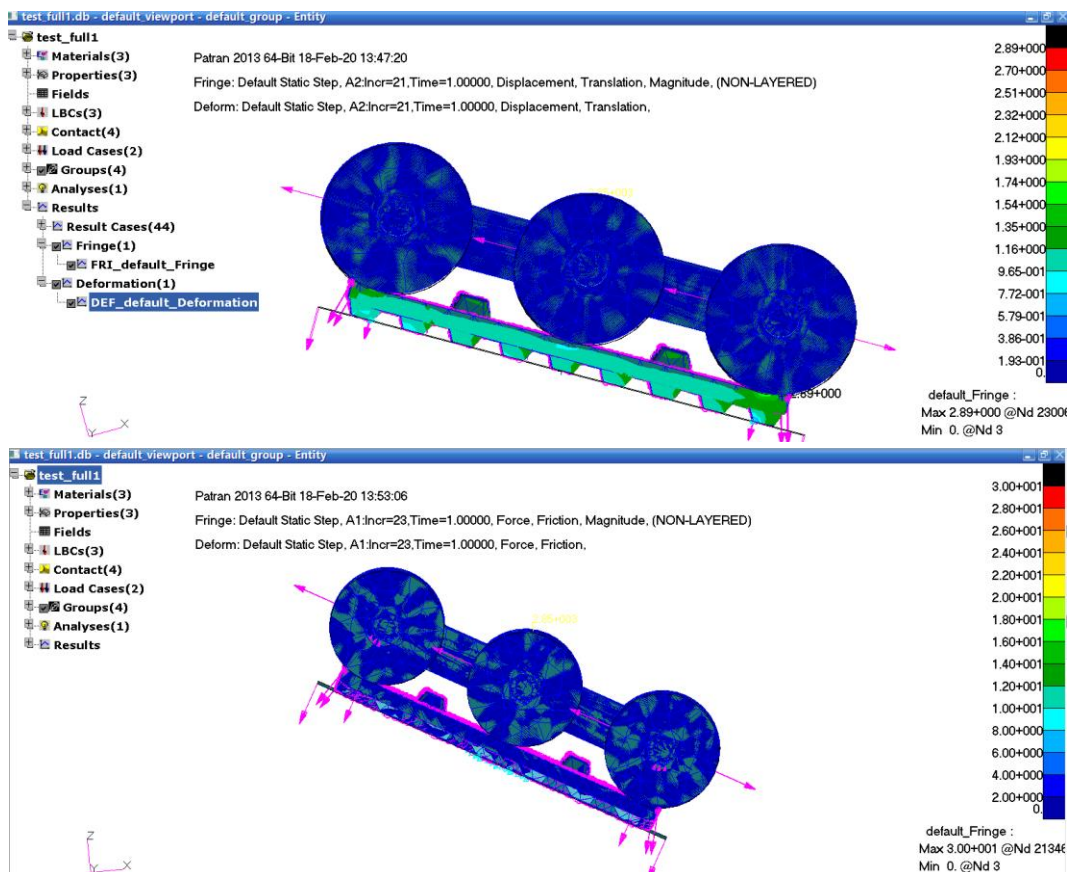
ตารางที่ 1 ค่าผลลัพธ์จากการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของยางแต่ละสูตร

สูตรยาง	ค่าความเค้นสูงสุด	ค่าความเครียดสูงสุด	ค่าการยุบตัวสูงสุด	แรงหน้าผิวสัมผัส
05HS	8.53×10^{-1}	2.21×10^{-1}	2.60	1.47×10^2
06	8.16×10^{-1}	2.81×10^{-1}	3.48	1.44×10^2
210	8.03×10^{-1}	3.58×10^{-1}	4.49	1.41×10^2

จากสูตรยางข้างต้น นำมาใช้ในการแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์กับยางดินตะขาบทั้งสองรูปแบบเพื่อเปรียบเทียบพฤติกรรมของการรับภาระแรงที่กระทำกับยางดินตะขาบทั้ง 2 แบบที่ได้ออกแบบขึ้นข้างต้น โดยใช้การจำลองการรับแรงที่กระทำของยางดินตะขาบบนพื้นราบและการจำลองการป็นขึ้นพื้นเอียง 30 องศา ผลการจำลองของยางดินตะขาบในกรณีรับแรงในแนวราบดังแสดงในภาพที่ 36 และการจำลองยางดินตะขากับพื้นเอียง 30 องศาได้ผลลัพธ์ดังแสดงในภาพที่ 37



ภาพที่ 36 ผลการจำลองทางดินตะขาบในกรณีรับแรงในแนวราบ



ภาพที่ 37 ผลการจำลองทางดินตะขาบในกรณีรับแรงในแนวเอียงทำมุม 30 องศา

จากภาพที่ 36 และ 37 ผลจากการจำลองพบว่าการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง (Deformation) ของยางในการรับแรงที่มากระทำกับยางตีนตะขาของลายดอกยางแบบตรง (ภาพย่อด้านบน) จะเกิดขึ้นน้อยกว่าลายดอกยางแบบเอียงทำมุม 45 องศา (ภาพย่อด้านล่าง) โดยเฉพาะในแนวราบนั้น ดอกยางแบบทำมุม 45 องศา มีการเปลี่ยนรูปร่างของยางเยอะกว่าลายยางแบบตรงอย่างเห็นได้ชัด (แบบตรงมีค่า 0.28 และแบบเอียงมีค่า 0.76 มิลลิเมตร) แต่ก็ยังมีค่าอยู่ในช่วงไม่เกิน 1 มิลลิเมตร ลายของยางจึงไม่ได้ส่งผลต่อโครงสร้างของยางมากนัก ด้วยเนื่องจากทั้งรถ ATV และรถเข็นผู้ป่วยเป็นรถขนาดเล็ก ดังนั้นในการเลือกโมเดลยางที่นำมาผลิตเป็นยางต้นแบบ ทางผู้วิจัยได้มองถึงปัจจัยในการผลิตนั้นคือเครื่องอัดยางที่มีอยู่ โดยทางเครื่องอัดยางเดิมที่ทางบริษัทมีอยู่เดิมเป็นเครื่องที่ใช้ในงานยางในรถบรรทุก ในการสร้างแม่พิมพ์สำหรับอัดขึ้นรูปยางตีนตะขาจึงต้องคำนึงถึงขนาดของตัวเครื่อง ทำให้ทางผู้วิจัยได้เลือกรูปแบบยางแนวขวางมาเป็นแบบยางตั้งต้น เนื่องจากเหตุผลทางด้านความยาวในการขึ้นรูปที่จำกัดและการต่อลายดอกยางทำได้ง่ายและสะดวกกว่าแนวมุมเอียง

2. การผลิตและติดตั้งชิ้นส่วนทางกลบนเครื่องอัดยาง

การผลิตชิ้นส่วนทางกลสำหรับติดตั้งบนเครื่องอัดยางดังแสดงในภาพที่ 38 การประกอบชิ้นส่วนทางกลเข้ากับเครื่องอัดยาง การทดสอบการเคลื่อนที่ขึ้น-ลงของเครื่องและรับแรงอัด ดังแสดงในภาพที่ 39 และ 40 ตามลำดับ



ภาพที่ 38 การผลิตชิ้นส่วนทางกลตามแบบ 3 มิติที่ได้จัดทำขึ้น



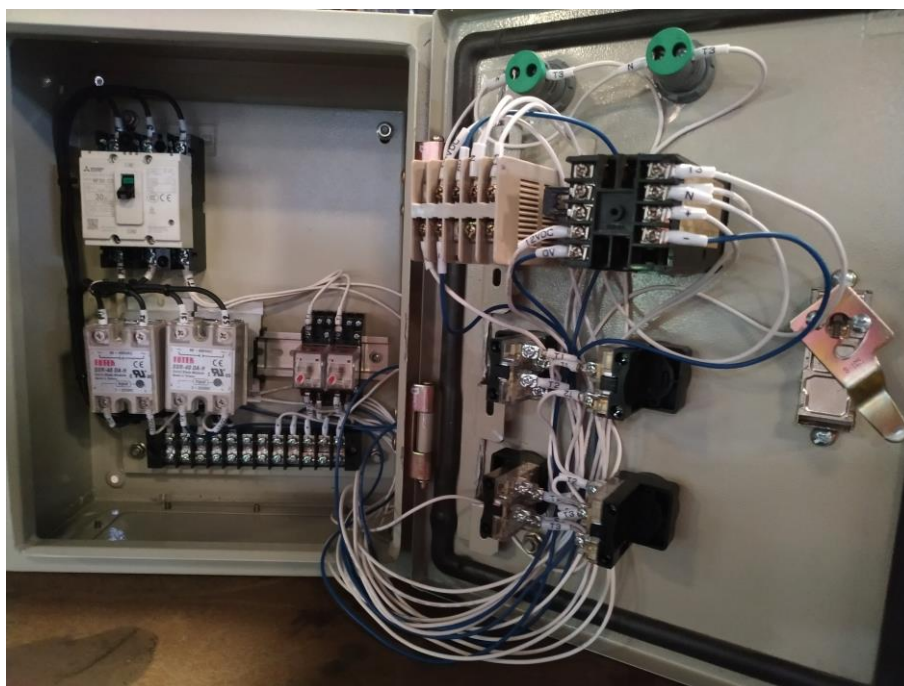
ภาพที่ 39 การประกอบชิ้นส่วนทางกลเข้ากับเครื่องอัดยาง



ภาพที่ 40 การทดสอบการทำงานหลังการประกอบ

3. ผลการติดตั้งระบบไฟฟ้าในการให้ความร้อนกับแม่พิมพ์

การติดตั้งระบบไฟฟ้าประกอบด้วยการทำตู้ควบคุมและการเดินสายไฟภายในตู้ดังแสดงในภาพที่ 41 การติดตั้งฮีตเตอร์และการเดินสายไฟนอกตู้ควบคุมดังแสดงในภาพที่ 42 และการทดสอบการทำงานของฮีตเตอร์ดังแสดงในภาพที่ 43



ภาพที่ 41 การเดินสายไฟเข้าสู่ตู้ควบคุมอุณหภูมิ



ภาพที่ 42 การติดตั้งฮีตเตอร์และต่อไฟเข้ากับระบบ



ภาพที่ 43 การทดสอบให้ความร้อนกับแม่พิมพ์

4. การทดสอบขึ้นรูปยางดินตะขาบ

ทดสอบขึ้นรูปยางดินตะขาบโดยเตรียมยางคอมปาวด์ให้พอดีกับแม่พิมพ์โดยการรีดยางคอมปาวด์เป็นแผ่นแล้วตัดให้ได้ขนาดพอดีกับการวางบนพิมพ์ (วางให้เข้าร่องพิมพ์) ดังแสดงในรูปที่ 44 และ 45 โดยมีการชั่งน้ำหนักของยางให้พอดีกับการขึ้นรูปโดยเผื่อน้ำหนักให้เยาะกว่าประมาณ 10% เช่น แผ่นยางด้านบนในส่วนที่เป็นลายดอกยางมีน้ำหนักหลังจากการอัดขึ้นรูปอยู่ที่ 0.5 กิโลกรัม จะต้องตัดเตรียมยางคอมปาวด์ให้น้ำหนักประมาณ 0.55 กิโลกรัม ส่วนแผ่นยางด้านล่างในส่วนที่สัมผัสชุดขั้วจะมีน้ำหนักหลังจากการอัดขึ้นรูป 0.8 กิโลกรัม จะต้องตัดเตรียมยางคอมปาวด์ให้น้ำหนักประมาณ 0.88 กิโลกรัม



ภาพที่ 44 ยางคอมปาวด์สำหรับแม่พิมพ์บนและล่าง



ภาพที่ 45 ยางคอมปาวด์เมื่อนำมาวางเข้ากับแม่พิมพ์

เมื่อได้ยางคอมปาวด์ตามขนาดที่ต้องการแล้วจึงนำคอมปาวด์เข้าแม่พิมพ์แล้วทำการอัดขึ้นรูปดังแสดงในภาพที่ 46 จนได้ชิ้นงานยางตีนตะขาบขึ้นมา 2 ชิ้น นั่นคือชิ้นด้านบนและด้านล่างดังแสดงในภาพที่ 47 จากนั้นนำชิ้นยางตีนตะขาบที่ได้มาทากาวซีเมนต์ในด้านที่จะทำการประกบติดกันเพื่อให้ตัวกาวซีเมนต์เป็นตัวประสาน ดังแสดงในภาพที่ 48 และทำการตัดผ้าใบให้ได้ความกว้าง 50 มิลลิเมตร และความยาวตามเส้นรวบวงของยางนั้นคือ 1,828 มิลลิเมตร ดังแสดงในภาพที่ 49 เพื่อนำมาอัดประกบติดกับผ้าใบดังแสดงในภาพที่ 50 โดยยางตีนตะขาบเมื่อทำการอัดประกบกันจนครบวงแล้วดังแสดงในรูปที่ 51 โดยมีแบบ 2 มิติแสดงรายละเอียดและภาพตัดขวางของยางตีนตะขาบที่ทางผู้วิจัยได้ทำการขึ้นรูปขึ้นดังแสดงในรูปที่ 52



ภาพที่ 46 อัดขึ้นรูปชิ้นยางตีนตะขาบ



ภาพที่ 47 ชิ้นงานยางดินตะขาบจากการอัดขึ้นรูป



ภาพที่ 48 การทากาวซีเมนต์บนยางในด้านที่ต้องการประกบติดกัน



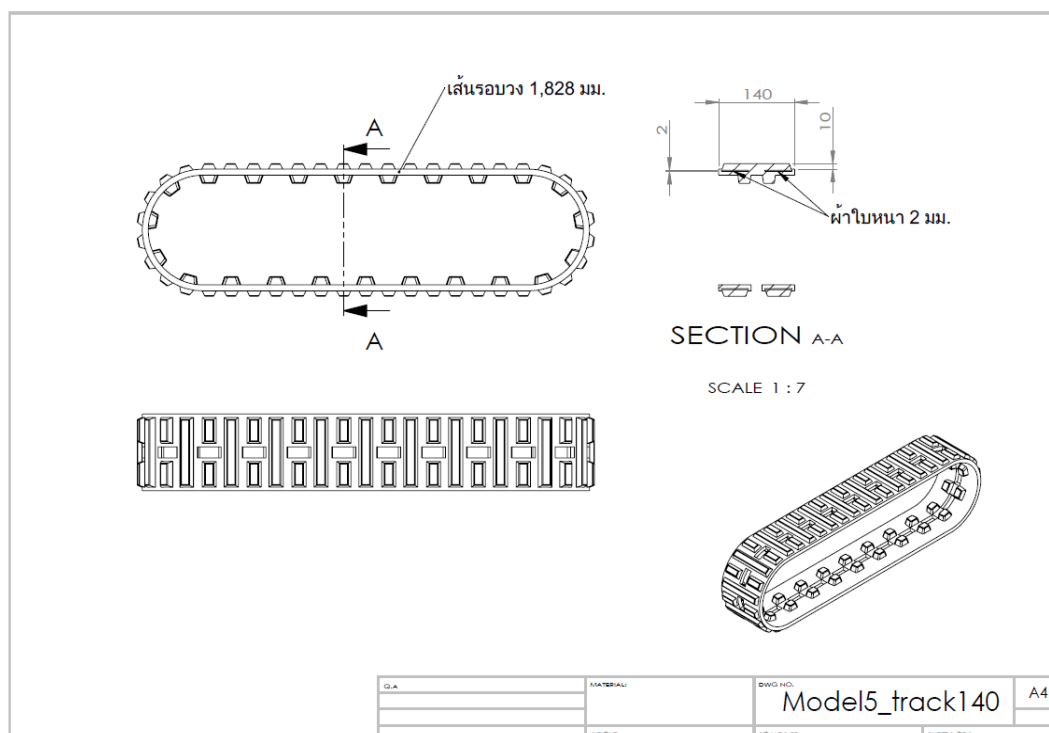
ภาพที่ 49 ชิ้นผ้าใบที่ตัดตามขนาด



ภาพที่ 50 การอัดประกบติดผ้าใบเข้ากับยางตีนตะขาบ



ภาพที่ 51 ยางตีนตะขาบเมื่อทำการประกบกั้นจนครบวง



ภาพที่ 52 แบบ 2 มิติของยางตีนตะขาต้นแบบที่ทำการทดสอบขึ้นรูป

จากการทดสอบขึ้นรูปยางตีนตะขาพบว่า ในการอัดขึ้นรูปยางตีนตะขาขึ้นบนและชั้นล่างหนึ่งครั้ง ใช้เวลาในการให้ความร้อนประมาณ 17 นาที และการอัดประกบขึ้นยางตีนตะขาเข้ากับผ้าใบหนึ่งครั้งใช้เวลาประมาณ 1 ชั่วโมง โดยยางตีนตะขาต้นแบบ 1 เส้นจะต้องทำการอัดขึ้นรูป 4 ครั้งและทำการอัดประกบยางอีก 4 ครั้ง รวมกับเวลาในการนำยางเข้า-ออกแม่พิมพ์ จะได้เวลาในการผลิตยาง 1 เส้น ประมาณ 5 ชั่วโมง 20 นาที (ไม่รวมเวลาในการจัดเตรียมชิ้นงานหรือวัตถุดิบ)

จากเวลาในการผลิตนำมาวิเคราะห์ต้นทุนเบื้องต้นในส่วนกระบวนการผลิตยางตีนตะขาต้นแบบ โดยมีต้นทุนการผลิตตามรายการดังนี้

- ยางธรรมชาติ (ยางตีนตะขา 1 เส้นใช้ยางธรรมชาติประมาณ 2.65 กิโลกรัม) 112.285 บาท (ราคาน้ำยางเฉลี่ยปี 2562 42.37 บาท/กก.)
- ค่าสารเคมี ส่วนผสม 77.52 บาท (ราคาโดยประมาณ และรวม Operating cost ในส่วนของกระบวนการผสมจนได้คอมพาวด์)
- ผ้าใบเสริมยาง (ยางตีนตะขา 1 เส้นใช้ผ้าใบคิดเป็นน้ำหนัก 0.35 กิโลกรัม ราคา 39.01 บาท/กก.) 13.65 บาท
- ค่าไฟจากการให้ความร้อนด้วยฮีตเตอร์ไฟฟ้า 107.04 บาท (ไฟฟ้าที่ใช้ในช่วงอัดขึ้นรูปยางประมาณ 25.58 หน่วย ค่าไฟช่วง On Peak หน่วยละ 4.1839)
- ค่าไฟจากการใช้งานเครื่องอัดยาง 9.36 บาท (ไฟฟ้าที่ใช้ในช่วงอัดขึ้นรูปยางประมาณ 2.236 หน่วย)
- ค่าแรงคนงานในการทำงานตลอดกระบวนการ 325 บาท (คิดเป็นการทำงานเต็ม 1 วัน ค่าแรงขั้นต่ำ จ.นครปฐม ปี2562)

- ค่าจ้างผลิต ติดตั้ง แม่พิมพ์และชิ้นส่วนต่างๆเข้ากับเครื่องอัดยางเดิม และต้นทุนการทำเครื่องทดสอบ ประมาณ 300,000 บาท

จากต้นทุนการผลิตข้างต้นเมื่อรวมต้นทุนต่อการผลิตยาง 1 เส้นจะได้ประมาณ 644.85 บาท ทั้งนี้ถ้าจะมีต้นทุนในส่วนอื่นที่ยังไม่ได้นำมารวมเช่น ต้นทุนทางด้าน engineering cost ค่าขนส่ง ค่าบรรจุภัณฑ์ ทางผู้วิจัยจึงได้เพิ่มจากต้นทุนขึ้นอีก 20% จะได้ 773.83 บาท และเมื่อเปรียบเทียบกับยางตีนตะขาบในประเภทเดียวกันที่มีการจำหน่ายในต่างประเทศ จะมีราคาอยู่ที่ประมาณ 80 USD หรือเทียบเป็นเงินไทยประมาณ 2,494.68 บาท หากทางผู้ผลิตจำหน่ายในราคาโรงงานอยู่ที่ 1,500 บาท จะสามารถคืนทุนได้ในเวลา 1 ปี 4 เดือน

5. การผลิตชิ้นส่วนและประกอบเครื่องทดสอบยางตีนตะขาบ

การสร้างเครื่องทดสอบยางตีนตะขาบประกอบด้วยการเชื่อมประกอบโครงสร้าง การผลิตชิ้นส่วนและประกอบสายพานตามแบบสั่งผลิตดังแสดงในภาพที่ 53 และ 54 (แบบประกอบ แบบสั่งผลิต และแบบภาพตัดขวางของยางตีนตะขาบจัดแสดงในภาคผนวก) และการติดตั้งเซนเซอร์และระบบไฟฟ้าดังแสดงในภาพที่ 55 จนได้เครื่องทดสอบยางตีนตะขาบที่พร้อมใช้งานดังแสดงในภาพที่ 56



ภาพที่ 53 การเชื่อมประกอบโครงเครื่อง



ภาพที่ 54 การผลิตชิ้นส่วนและประกอบชุดสายพาน



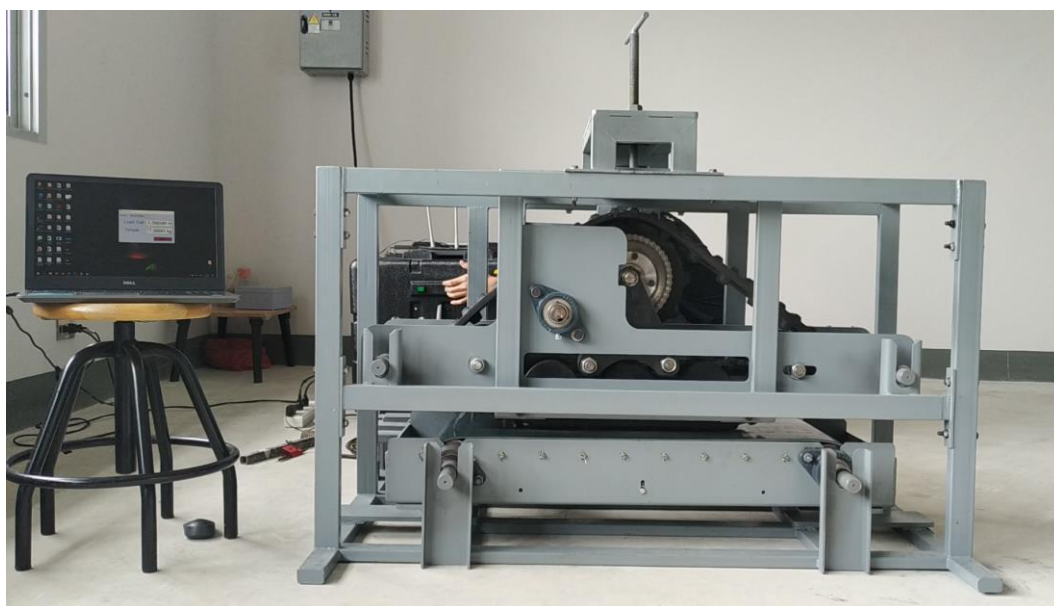
ภาพที่ 55 การติดตั้งเซนเซอร์และระบบไฟฟ้าของเครื่องทดสอบ



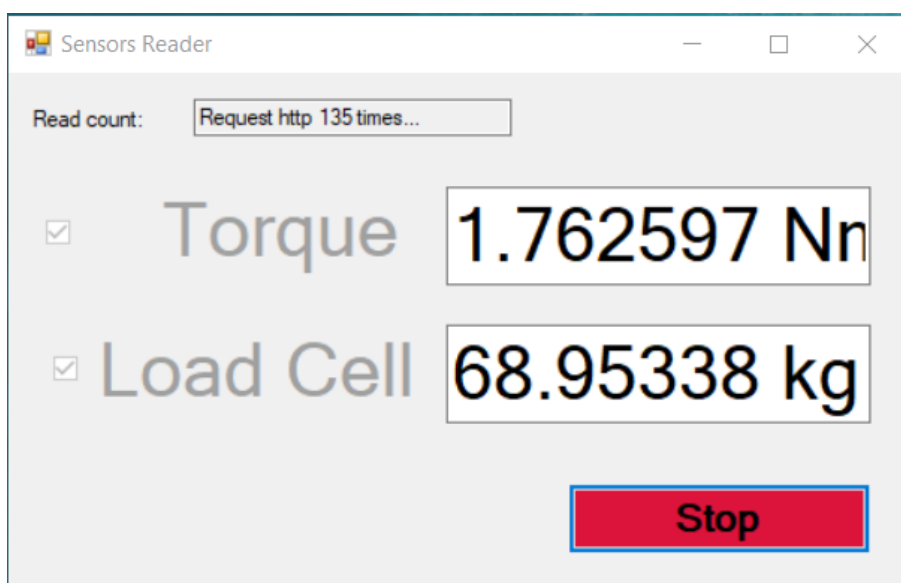
ภาพที่ 56 เครื่องทดสอบยางดินตะขาบ

6. การทดสอบและคำนวณ Tractive Efficiency ของยางตีนตะขาทันแบบ

ตัวเครื่องทดสอบยางตีนตะขาได้ถูกออกแบบให้สามารถเชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์ได้แบบไร้สายผ่านระบบ Wireless ดังแสดงในภาพที่ 57 โดยจะมีโปรแกรมสำหรับอ่านค่าจากเซนเซอร์ดังแสดงในภาพที่ 58 นอกจากนี้ยังมีตัวแปรอื่นๆที่จำเป็นในการคำนวณได้แก่ ความเร็วของยางตีนตะขา ความของสายพาน และ Torque ของมอเตอร์ (ข้อมูลของค่าตัวแปรต่างๆ จัดแสดงในภาคผนวก) ซึ่งเมื่อได้ทำการทดสอบการทำงานของยางตีนตะขาและทำการเก็บข้อมูลแล้ว สามารถนำมาคำนวณหา Tractive Efficiency ของยางตีนตะขาได้ตามตารางที่ 2



ภาพที่ 57 การทดสอบการทำงานของล้อตีนตะขา



ภาพที่ 58 หน้าต่างโปรแกรมรับค่าจากเซนเซอร์

ตารางที่ 2 การคำนวณ Tractive Efficiency ของยางตีนตะขาตามการป้อนความเร็วที่แตกต่างกัน

Motor Speed (RPM)	T (N.m)	w (N)	M (N)	s	GTR	MRR	NTR	TE
500	212.20	960.26	212.10	0.027	0.678	0.221	0.466	0.660
800	205.92	839.74	161.24	0.034	0.766	0.192	0.574	0.724
1,000	202.40	657.36	133.79	0.029	0.962	0.204	0.759	0.765

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

จากการทดลองขึ้นรูปยางดินตะขบต้นแบบจากการออกแบบชิ้นส่วนสำหรับเครื่องอัดยางเดิมของทางบริษัทฯ พบว่า สามารถขึ้นรูปขึ้นงานยางดินตะขบขึ้นมาได้ และจากการทดสอบการทำงานของยางดินตะขบด้วยเครื่องทดสอบที่ทางผู้วิจัยพัฒนาขึ้น สามารถนำค่าตัวแปรที่ได้จากการทดสอบ อาทิเช่น น้ำหนักที่กระทำกับชุดล้อดินตะขบระหว่างการขับเคลื่อน แรงดึงที่ยางดินตะขบกระทำกับสายพาน แรงบิดของมอเตอร์ไฟฟ้าที่ส่งผ่านเกียร์ทด ความเร็วของล้อยางและความเร็วของสายพาน นำมาคำนวณหาค่าประสิทธิภาพการฉุดลากหรือการดึงของยางดินตะขบ (Tractive Efficiency, TE) พบว่าที่ความเร็วรอบมอเตอร์ 500 รอบ/นาที มีค่า TE อยู่ที่ 0.660 ที่ความเร็ว 800 รอบ/นาที มีค่า TE อยู่ที่ 0.724 และที่ความเร็ว 1000 รอบ/นาที มีค่า TE อยู่ที่ 0.765 ซึ่งค่า TE ที่มีค่าเข้าใกล้ 1.0 จะหมายถึงประสิทธิภาพการฉุดลากที่ดียิ่งกว่า

จากเป้าหมายของผลผลิตและตัวชี้วัดคือ การผลิตยางดินตะขบสำหรับรถ ATV และรถเข็นผู้ป่วย ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ใหม่ในประเทศไทย ผลจากงานวิจัยทำให้เกิดองค์ความรู้ในการใช้คอมพิวเตอร์ช่วยในการวิเคราะห์ (CAE) มาใช้ในการวิเคราะห์พฤติกรรมการรับภาระของยางดินตะขบก่อนทำการผลิต การปรับปรุงเครื่องจักรที่มีอยู่เดิมให้สามารถขึ้นรูปยางดินตะขบได้ส่งผลให้ผู้ประกอบการมีทางเลือกในการผลิตมากขึ้น สามารถที่จะสร้างต้นแบบเพื่อพัฒนาผลิตภัณฑ์ใหม่ให้กับบริษัท นอกจากนี้การมีชุดทดสอบการทำงานของยางดินตะขบประกอบกับการใช้โปรแกรมช่วยในการวิเคราะห์จะช่วยเพิ่มมูลค่าและความน่าเชื่อถือในตัวผลิตภัณฑ์

ข้อเสนอแนะ

ในงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาเพื่อให้เกิดองค์ความรู้และแนวทางในการต่อยอดผลิตภัณฑ์ใหม่ในประเทศ ซึ่งได้แก่ยางดินตะขบสำหรับรถ ATV และ รถเข็นผู้ป่วย เป็นทางเลือกสำหรับผู้ประกอบการในการแปรรูปยางพาราให้มีมูลค่าเพิ่มขึ้น โดยในกระบวนการผลิตยางดินตะขบในงานวิจัยได้ใช้เครื่องอัดยางเดิมของโรงงาน โดยการผลิตชิ้นส่วนเข้ามาติดตั้งให้สามารถขึ้นรูปยางดินตะขบได้ ซึ่งอาจจะทำให้กระบวนการขึ้นรูปนั้นมีขั้นตอนที่เพิ่มมากขึ้นและใช้เวลานานกว่าเครื่องอัดสำหรับยางดินตะขบโดยเฉพาะ โดยหากต้องการต่อยอดไปยังการผลิตจริง อาจจำเป็นต้องมีเครื่องจักรในลักษณะเดียวกันกับที่มีอยู่เพิ่มขึ้นเพื่อลดเวลาในการผลิตหรือใช้เครื่องจักรสำหรับยางดินตะขบโดยเฉพาะ ทั้งนี้ทางผู้วิจัยได้จัดทำข้อมูลและถ่ายทอดองค์ความรู้ที่ได้จากงานวิจัยไปยังบริษัทฯ เพื่อเป็นข้อมูลและเป็นแนวทางในการต่อยอดผลิตภัณฑ์ต่อไป

เอกสารอ้างอิง

- [1] ชุติมา ศักดิ์ชินบุตร. 2556. การศึกษาค่าความแข็งตึงของผลิตภัณฑ์ยางตีนตะขาบ. บัณฑิตวิทยาลัย. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. กรุงเทพฯ
- [2] Gent, A. N. 2001. Engineering with Rubber. Oxford University Press, New York, NY.
- [3] <https://bobcatzone.com/rubber-tracks/>
- [4] <https://www.track-mart.com/blogs/news/differences-in-tread-patterns>
- [5] <http://www.drworld.com> (Rubber Track & Undercarriage System)
- [6] Entekin, A.1999. Accuracy of MSC/NASTRAN First- and Second-Order Tetrahedral Elements in Solid Modeling for Stress Analysis.
- [7] Cheng, M. and W. Chen. 2003. Experimental Investigation of the Stress-Stretch Behavior of EPDM Rubbers with Loading Rate Effects. International Journal of Solids and Structures. 40:4749-4768
- [8] นัย บำรุงเวช. 2544. รถฟาร์มแทรคเตอร์ล้อและยาง. สำนักพิมพ์ ส.ส.ท., กรุงเทพฯ.
- [9] Rahman A., A. Yahaya, M. Zohadie, D. Ahmad and W. Ishak. 2005. Designing Framework of a Segmented Rubber Tracked Vehicle for Sepang Peat Terrain in Malaysia. IIUM Engineering Journal 6 (2005).
- [10] Robert Grisso, John Perumpral, Frank Zoz. 2006. An Empirical Model for Tractive Performance of Rubber-Track in Agricultural Soils. Journal of Terramechanics. 43:225-236.
- [11] Michelle S. Hoo Fatt and X. Ouyang. 2007. Integral-Based Constitutive Equation for Rubber at High Strain Rates. International Journal of Solids and Structures. 44:6491-6506.

- [12] Heinrich, G. and M. Kluppel. 2008. Rubber Friction, Tread Deformation and Tire Traction. *Wear*. 265:1052-22060.
- [13] Mohsenimanesh, A., S.M. Ward and M.D. Gilchrist. 2009. Stress Analysis of a Multi-Laminated Tractor Tyre using Non-Linear 3D Finite Element Analysis. *Materials and Design*. 30:1124-1132.
- [14] Wei, Li. 2011. Experimental Test and Slide Analysis of Rubber Track. Yantai University.
- [15] Sang, J.B., L.F. Sun., S.F. Xing and D.L. Zhang. 2012. Computational Analysis of Stress Field and Contract Pressure for Rubber Seal Based on Non-Linear Finite Element. *Applied Mechanics and Material*. 268-270: 1080-1083.
- [16] Sergio G. Arias, Ph.D. 2012. Finite Element Analysis of Rubber Treads on Tracks to Simulate Wear Development. Advanced Technology Group, Camoplast Solideal Inc.
- [17] S. Rasool and H. Raheman. 2016. Suitability of rubber track as traction device for power tillers. *Journal of Terramechanics*. 66:41-47.

ภาคผนวก

การพัฒนาวิศวกรรมการออกแบบผลิตภัณฑ์และกระบวนการผลิตยางตีนตะขาบ
(A Development of Engineering Product Design and Manufacturing Process
Design for Rubber Track)

ผศ. ดร. ชนะ รักษ์ศิริ

ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

หน่วยงานที่ร่วมโครงการ บริษัท อุตสาหกรรมผลิตยางไทยสิน จำกัด

บทคัดย่อ

ล้อยางตีนตะขาบเป็นอุปกรณ์ที่เริ่มมีการใช้งานอย่างแพร่หลายมากขึ้น ไม่ว่าจะเป็นด้านเกษตรกรรม งานก่อสร้างและงานเหมือง รวมไปถึงรถ ATV และรถเข็นผู้ป่วย โดยยางตีนตะขาบที่ใช้งานมีอยู่ 2 ชนิดได้แก่ ยางตีนตะขาบเสริมเหล็กและยางตีนตะขาบเสริมผ้าใบ ซึ่งยางตีนตะขาบเสริมผ้าใบมักใช้กับรถเล็กอย่างรถ ATV และรถเข็นผู้ป่วย แต่ยางตีนตะขาบที่ใช้กับรถเอนกประสงค์ ATV และรถเข็นผู้ป่วยนั้นยังไม่มีการผลิตและจำหน่ายในประเทศไทย อันเนื่องมาจากมีข้อจำกัดทั้งในด้านเทคโนโลยีการออกแบบผลิตภัณฑ์ การออกแบบกระบวนการผลิตและการออกแบบเครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบสมรรถนะการทำงานของยางตีนตะขาบภายในประเทศ ทำให้ต้องมีการนำเข้ายางตีนตะขาบจากต่างประเทศสำหรับใช้กับรถเอนกประสงค์ ATV และรถเข็นผู้ป่วยเป็นจำนวนมาก จากเหตุผลข้างต้นงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์ในการประยุกต์ใช้ เทคโนโลยีคอมพิวเตอร์ช่วยในการออกแบบ (Computer Aided Design, CAD) คอมพิวเตอร์ช่วยในการผลิต (Computer Aided Manufacturing, CAM) และคอมพิวเตอร์ช่วยในงานวิศวกรรม (Computer Aided Engineering, CAE) มาใช้ในการสร้างองค์ความรู้ในการ ออกแบบรายละเอียดของผลิตภัณฑ์ ออกแบบแม่พิมพ์ในการขึ้นรูปปลายของยางตีนตะขาบเพื่อใช้ในการผลิต รวมไปถึงการออกแบบอุปกรณ์ทดสอบผลิตภัณฑ์ยางตีนตะขาบ เพื่อให้เกิดองค์ความรู้ในการพัฒนาผลิตภัณฑ์ยางตีนตะขาบ ให้แก่เอกชนไทยที่มีความต้องการสร้างผลิตภัณฑ์ยางตีนตะขาบต่อไป

Abstract

Rubber track wheels were used more widely such as in agriculture, construction, mining, ATV and off-road wheelchair. There are two type of rubber track include rubber track with iron core and rubber track with ply. Which rubber track with ply was used in small track wheel as ATV and off-road wheelchair. But they are not product in Thailand because limitation of product design, technology, machine and testing device that causing to import from foreign countries. From above reasons this research aim to apply knowledge of Computer Aided Design (CAD), Computer Aided Manufacturing (CAM) and Computer Aided Engineering (CAE) to develop product design in rubber track for ATV and off-road wheelchair. Including designing rubber track mold, developing machining for rubber track forming and developing testing device. In order to create knowledge and develop rubber track products to Thai entrepreneur who interested in rubber track products.

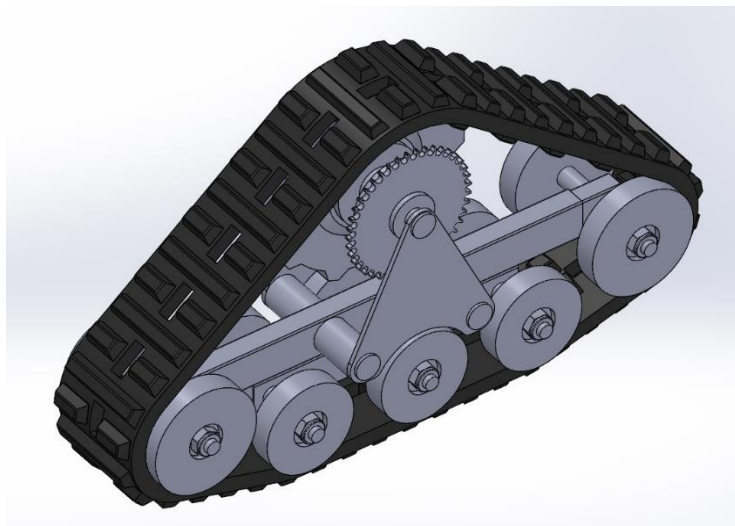
บทนำ

ยางตีนตะขากเป็นอุปกรณ์สำคัญสำหรับเครื่องจักรกลที่ใช้ในงานด้านการเกษตรกรรม งานก่อสร้างและงานเหมือง อันได้แก่ รถเก็บเกี่ยว รถตัดแต่ง รถตัด รถแทรกเตอร์ เนื่องจากยางตีนตะขากสามารถเคลื่อนที่เข้าไปในพื้นที่ทำงานในสภาพพื้นที่ต่างๆ ได้อย่างคล่องตัวกว่าล้อประเภทอื่นๆ โดยในประเทศไทยมีการใช้กันอยู่ 2 ชนิด ได้แก่ ล้อเหล็กตีนตะขากและล้อยางตีนตะขาก ยางตีนตะขากจะสามารถแบ่งใช้กับขนาดของรถแทรกเตอร์ ดังแสดงในรูปที่ 2 โดยรถแทรกเตอร์มี 3 ประเภท ได้แก่ รถแทรกเตอร์ขนาดเล็ก (20–35 แรงม้า) ตีนตะขากสำหรับรถแทรกเตอร์ขนาดกลาง (36–60 แรงม้า) และตีนตะขากสำหรับรถแทรกเตอร์ขนาดใหญ่ (190–200 แรงม้า) นอกจากนี้ยังมีการใช้งานในรถพิเศษ คือ รถเอนกประสงค์ ATV ดังแสดงในรูปที่ 3 และรถเข็นผู้ป่วย ดังแสดงในรูปที่ 4 โดยยางตีนตะขากที่ใช้กับรถแทรกเตอร์นั้นได้มีบริษัทที่สามารถทำการผลิตและจำหน่ายภายในประเทศแล้ว แต่ยางตีนตะขากที่ใช้กับรถเอนกประสงค์ ATV และรถเข็นผู้ป่วยนั้นยังไม่มีการผลิตและจำหน่าย อันเนื่องมาจากมีข้อจำกัดทั้งในด้านเทคโนโลยีการออกแบบผลิตภัณฑ์ การออกแบบกระบวนการผลิตและการออกแบบเครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบสมรรถนะการทำงานของยางตีนตะขากภายในประเทศ ทำให้ต้องมีการนำเข้ายางตีนตะขากจากต่างประเทศสำหรับใช้กับรถเอนกประสงค์ ATV และรถเข็นผู้ป่วยเป็นจำนวนมาก จากเหตุผลข้างต้นคณะวิจัยฯ จึงประยุกต์ใช้ เทคโนโลยีคอมพิวเตอร์ช่วยในการออกแบบ (Computer Aided Design, CAD) คอมพิวเตอร์ช่วยในการผลิต (Computer Aided Manufacturing, CAM) และคอมพิวเตอร์ช่วยในงานวิศวกรรม (Computer Aided Engineering, CAE) มาใช้ในการสร้างองค์ความรู้ในการ การออกแบบรายละเอียดของผลิตภัณฑ์ตามหน้าที่การใช้งานที่หลากหลาย รวมถึงการออกแบบแม่พิมพ์ในการขึ้นรูปลายของยางตีนตะขากเพื่อใช้ในการผลิต รวมไปถึงการออกแบบอุปกรณ์ทดสอบผลิตภัณฑ์ยางตีนตะขาก โดยในงานวิจัยนี้มีขอบเขตในการวิจัยสำหรับยางตีนตะขากสำหรับใช้กับรถเอนกประสงค์ ATV และรถเข็นผู้ป่วย เพื่อนำไปใช้เป็นองค์ความรู้พื้นฐานในการพัฒนาผลิตภัณฑ์ยางตีนตะขาก ให้แก่เอกชนที่ต้องการสร้างผลิตภัณฑ์ยางตีนตะขากต่อไป

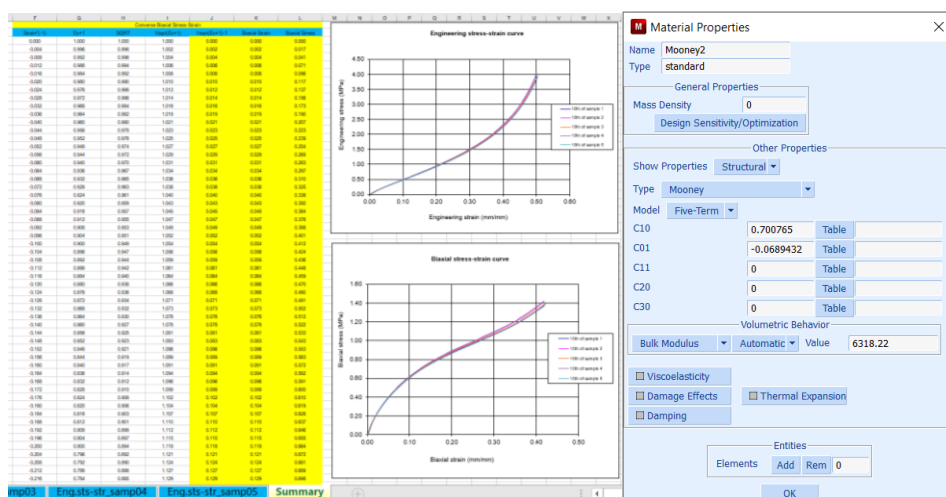
การดำเนินงาน

การดำเนินงานของโครงการแบ่งเป็นสามส่วน ในส่วนแรกเป็นการดำเนินงานในส่วนของการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ในยางตีนตะขาก โดยใช้ความสัมพันธ์ของสมบัติเชิงกลของยาง กับการใช้คอมพิวเตอร์ช่วยในการวิเคราะห์ (CAE) ซึ่งได้แก่การจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ในโปรแกรม ส่วนที่สองเป็นการออกแบบวิธีการขึ้นรูปยางตีนตะขาก โดยการดัดแปลงเครื่องอัดยางที่ทางบริษัทฯ มีอยู่เดิมให้สามารถขึ้นรูปยางตีนตะขากได้ และส่วนที่สามเป็นการออกแบบเครื่องทดสอบการทำงานของยางตีนตะขาก เพื่อใช้ทดสอบยางตีนตะขากที่ได้ทำการผลิตขึ้นมาพร้อมกับเก็บข้อมูลมาวิเคราะห์และคำนวณประสิทธิภาพของยางตีนตะขาก (Tractive Efficiency)

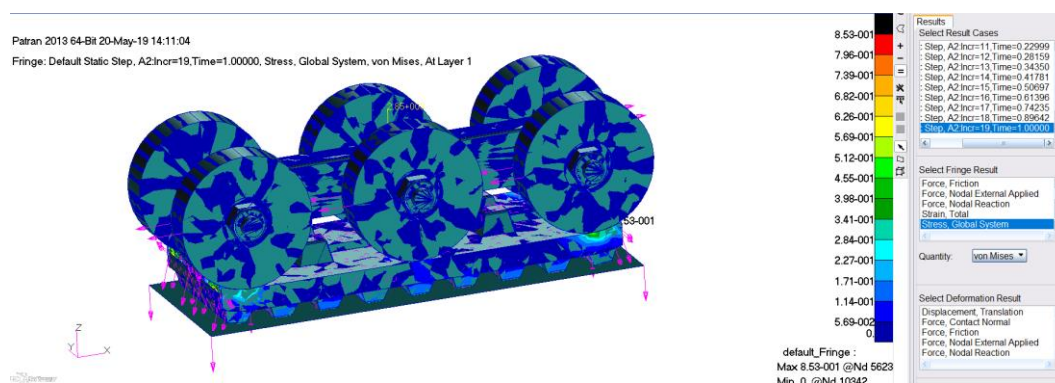
ในส่วนการทำแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ในงานวิจัยประกอบด้วย แบบ 3 มิติของชุดล้อยางตีนตะขาก คุณสมบัติของยางตีนตะขากที่ต้องการขึ้นรูป และโปรแกรมจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์



ภาพที่ 1 แบบ 3 มิติของยางตีนตะขาและชุดล้อตีนตะขา

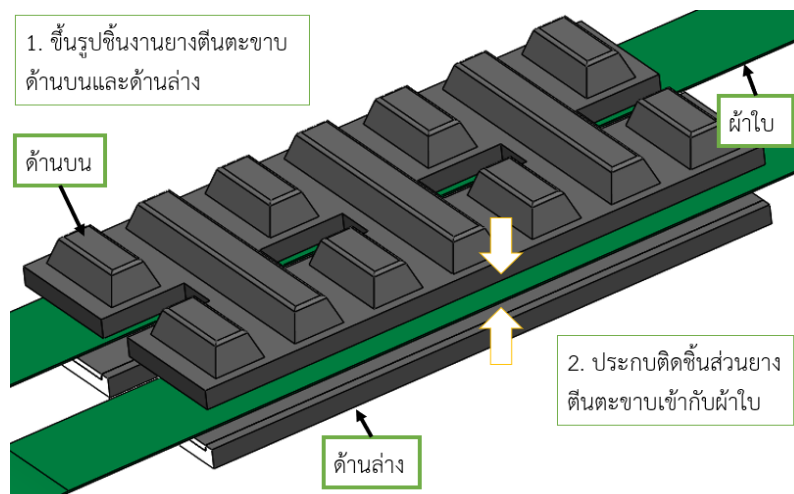


ภาพที่ 2 ผลการทดสอบสมบัติและค่าสัมประสิทธิ์ของยางต้นแบบ

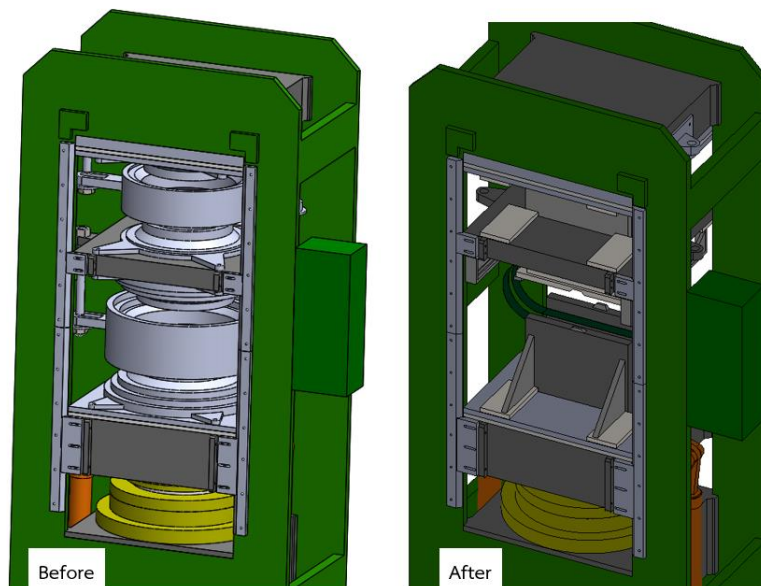


ภาพที่ 3 โปรแกรมจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์

จากการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์นำไปสู่การเลือกใช้สูตรยางสำหรับขึ้นรูปยางตีนตะขา โดยในการขึ้นรูปยางตีนตะขาได้ใช้เครื่องอัดยางที่ทางบริษัทมีอยู่เดิม จึงต้องมีการออกแบบชิ้นส่วนสำหรับแม่พิมพ์และเครื่องจักร รวมถึงวิธีการขึ้นรูปให้เหมาะสมกับเครื่องจักรที่มีอยู่



ภาพที่ 4 วิธีการขึ้นรูปยางตีนตะขา

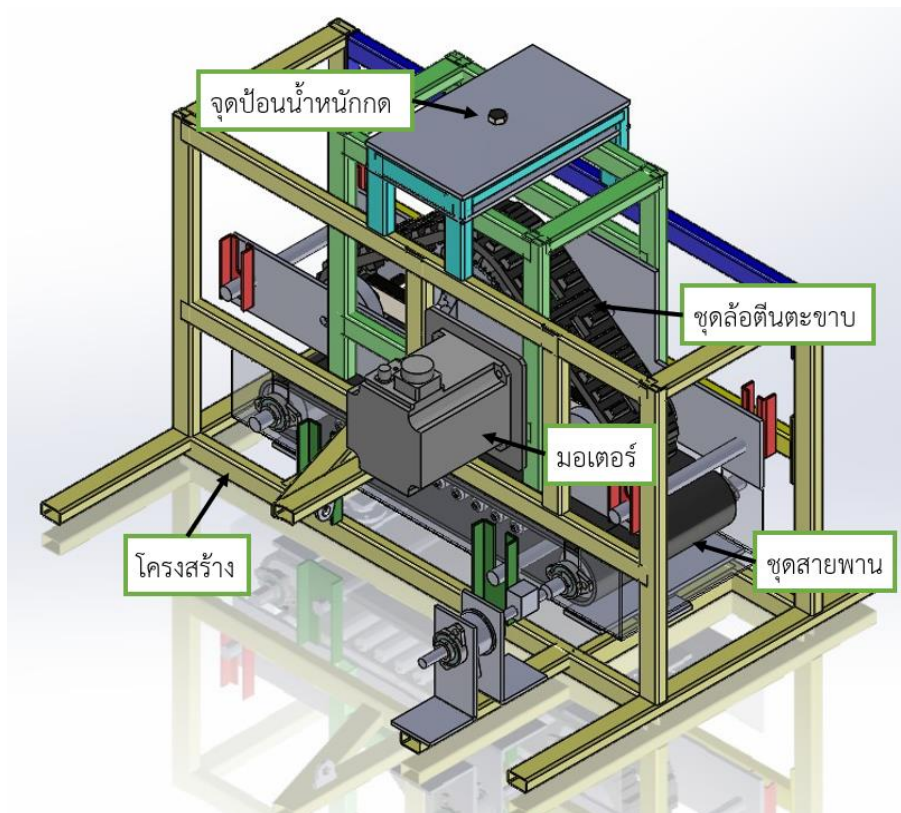


ภาพที่ 5 เครื่องอัดยางก่อนและหลังการพัฒนา

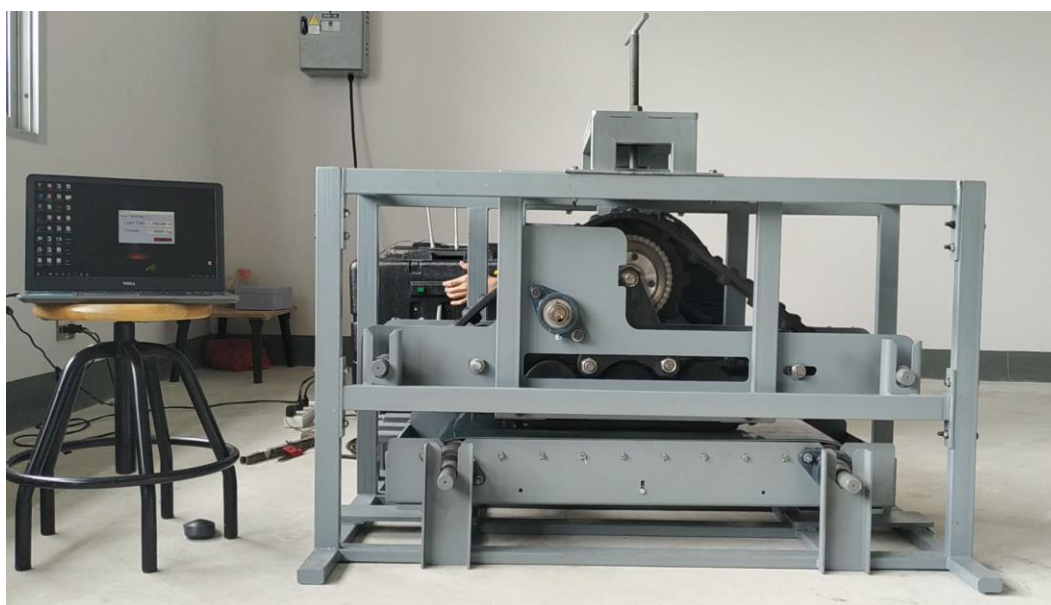


ภาพที่ 6 ยางตีนตะขาต้นแบบ

ส่วนที่สามของงานวิจัยเป็นการทดสอบการใช้งานยางตีนตะขาบที่ทำการผลิตขึ้น โดยการออกแบบชุดทดสอบยางตีนตะขาบ โดยเป็นลักษณะของการใช้มอเตอร์ไฟฟ้าต่อเข้ากับชุดล้อตีนตะขาบ และให้ล้อยางตีนตะขาบวิ่งอยู่บนสายพาน พร้อมกับการวัดค่าของน้ำหนักที่กระทำกับสายพานระหว่างการวิ่งทดสอบและแรงดึงที่ยางตีนตะขาบกระทำกับสายพาน นอกจากนี้ยังใช้แรงขับของมอเตอร์ที่ส่งกำลังไปยังล้อตีนตะขาบ ความเร็วของยางตีนตะขาบและความเร็วของสายพาน มาคำนวณหาค่าประสิทธิภาพ (Tractive Efficiency) ของยางตีนตะขาบ



ภาพที่ 7 ชุดทดสอบยางตีนตะขาบ



ภาพที่ 8 การทดสอบยางตีนตะขาบ

ผลการดำเนินการที่ได้รับ

ผลผลิตที่ได้ คือ การออกแบบผลิตภัณฑ์ กระบวนการผลิตและการทดสอบ ยางตีนตะขาบ
ความคุ้มค่าของการวิจัย เป็นการสร้างมูลค่าเพิ่มให้แก่ยางธรรมชาติที่มากขึ้นจากการเพิ่ม
ประสิทธิภาพในการผลิตยางตีนตะขาบ
ระดับความสำเร็จของงาน การออกแบบผลิตภัณฑ์และกระบวนการผลิตยางตีนตะขาบ ความสำเร็จ
ของงานวิจัยระยะนี้เป็น ระบุ G หมายถึง ความสำเร็จตามเป้าประสงค์ (Goal results)

กิจกรรมที่เกี่ยวข้องกับการนำผลจากโครงการไปใช้ประโยชน์

1. การใช้ประโยชน์ด้านนโยบาย

การนำผลงานวิจัยไปใช้ประโยชน์

☒ ด้านนโยบาย • ด้านสาธารณะ • ด้านชุมชนและพื้นที่ • ด้านพาณิชย์ • ด้านวิชาการ

โดยใคร (กรุณาให้ข้อมูลเจาะจง)

• หน่วยงาน ☒ สถาบันศึกษา ☒ ผู้ประกอบการ • เกษตรกร • อื่นๆ

- มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

- กลุ่มอุตสาหกรรมผู้ผลิตยางรถ

มีการนำไปใช้ประโยชน์อย่างไร

ใช้ในการสร้างมูลค่าเพิ่มแก่ยางพารา และเพิ่มประสิทธิภาพของการผลิตยางตีนตะขาบ

2. การใช้ประโยชน์ด้านพาณิชย์

การนำผลงานวิจัยไปใช้ประโยชน์

• ด้านนโยบาย • ด้านสาธารณะ • ด้านชุมชนและพื้นที่ ☒ ด้านพาณิชย์ • ด้านวิชาการ

โดยใคร (กรุณาให้ข้อมูลเจาะจง)

• หน่วยงาน • สถาบันศึกษา ☒ ผู้ประกอบการ • เกษตรกร • อื่นๆ

- กลุ่มอุตสาหกรรมผู้ผลิตยางรถ

มีการนำไปใช้ประโยชน์อย่างไร

ใช้ในการสร้างมูลค่าเพิ่มแก่ยางพารา เพิ่มและเพิ่มประสิทธิภาพของการผลิตยางตีนตะขาบ

3. การใช้ประโยชน์ด้านวิชาการ

การนำผลงานวิจัยไปใช้ประโยชน์

• ด้านนโยบาย • ด้านสาธารณะ • ด้านชุมชนและพื้นที่ • ด้านพาณิชย์ ☒ ด้านวิชาการ

โดยใคร (กรุณาให้ข้อมูลเจาะจง)

• หน่วยงาน ☒ สถาบันศึกษา • ผู้ประกอบการ • เกษตรกร • อื่นๆ

- ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

- ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า เครื่องกล การผลิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

มีการนำไปใช้ประโยชน์อย่างไร

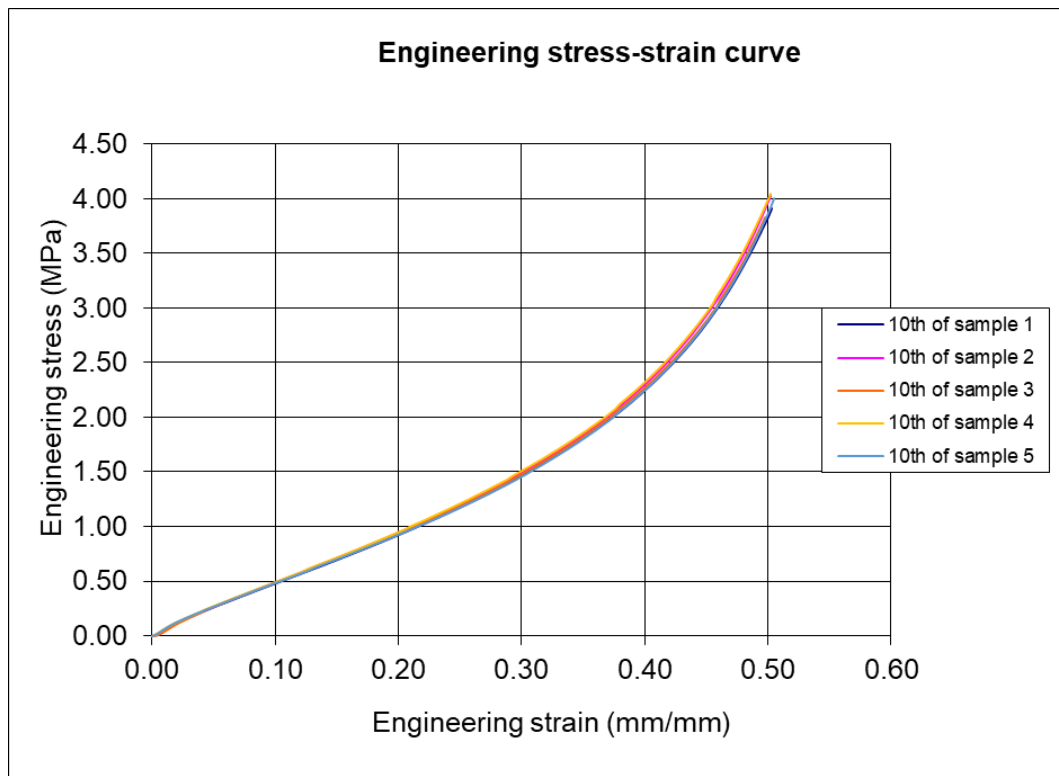
การเรียน การสอน และงานวิจัย ในรายวิชา กระบวนการผลิต

ตารางเปรียบเทียบกิจกรรมที่วางแผนและกิจกรรมที่ดำเนินการและผลที่ได้รับ

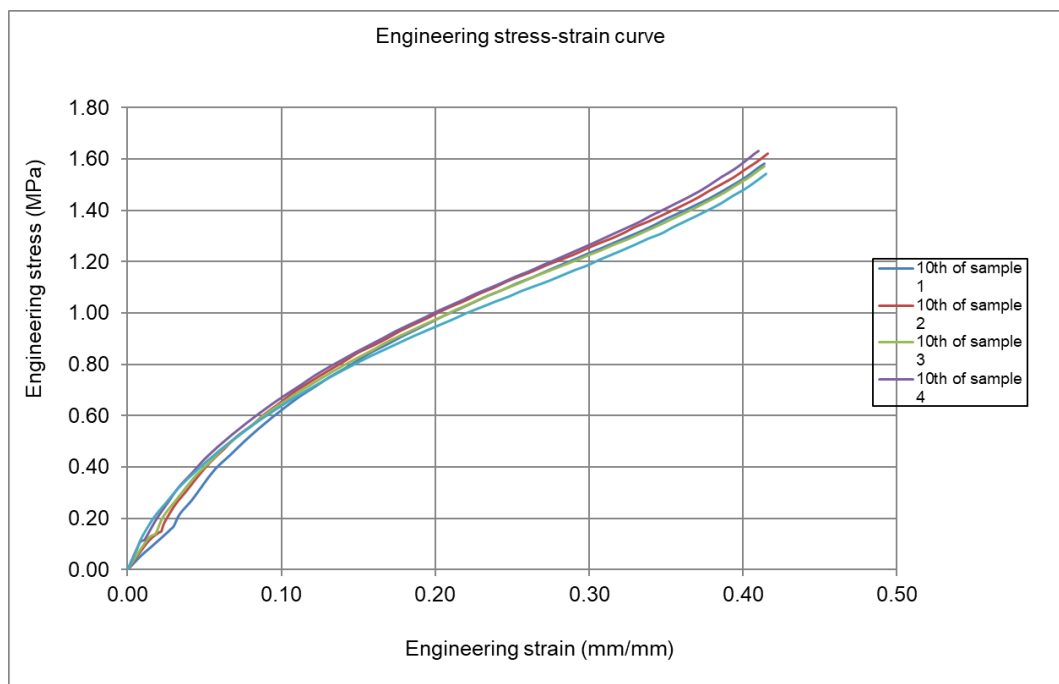
กิจกรรมที่วางแผน	กิจกรรมที่ดำเนินการ	ผลที่ได้รับ
1. ศึกษาค่าตัวแปรด้านรูปร่างในมิติต่างๆของยาง ดินตะขาบที่มีผลต่อการใช้งาน	กิจกรรมเป็นไปตามแผน	ข้อมูลเกี่ยวกับยางดินตะขาบ
2. สร้างแบบจำลอง 3 มิติ เพื่อใช้ในการคอมพิวเตอร์ ช่วยในงานวิศวกรรม จำลองการทำงานของยาง ดินตะขาบ	กิจกรรมซ้ำกว่าที่วางแผนไว้	แบบ 3 มิติของยางและล้อดินตะขาบ และผลการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ในยาง ดินตะขาบ
3. สร้างต้นแบบของยางดินตะขาบด้วยการพัฒนา เครื่องอัดยางที่มีอยู่เดิมของทางบริษัทฯ	กิจกรรมซ้ำกว่าที่วางแผนไว้	เครื่องอัดยางที่สามารถขึ้นรูปยางดินตะขาบได้
4. ทำการออกแบบและผลิตชุดทดสอบการทำงานของ ยางดินตะขาบที่ผลิตขึ้น	กิจกรรมซ้ำกว่าที่วางแผนไว้	ชุดเครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบยางดินตะขาบ
5. ทดสอบการใช้งานของยางดินตะขาบต้นแบบและ คำนวณหาประสิทธิภาพของยาง ภายหลังจากทดสอบ	กิจกรรมซ้ำกว่าที่วางแผนไว้	ผลการทดสอบและผลการคำนวณประสิทธิภาพ

ผลการทดสอบสมบัติเชิงกล และวิธีการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ในยางดินตะขาบ

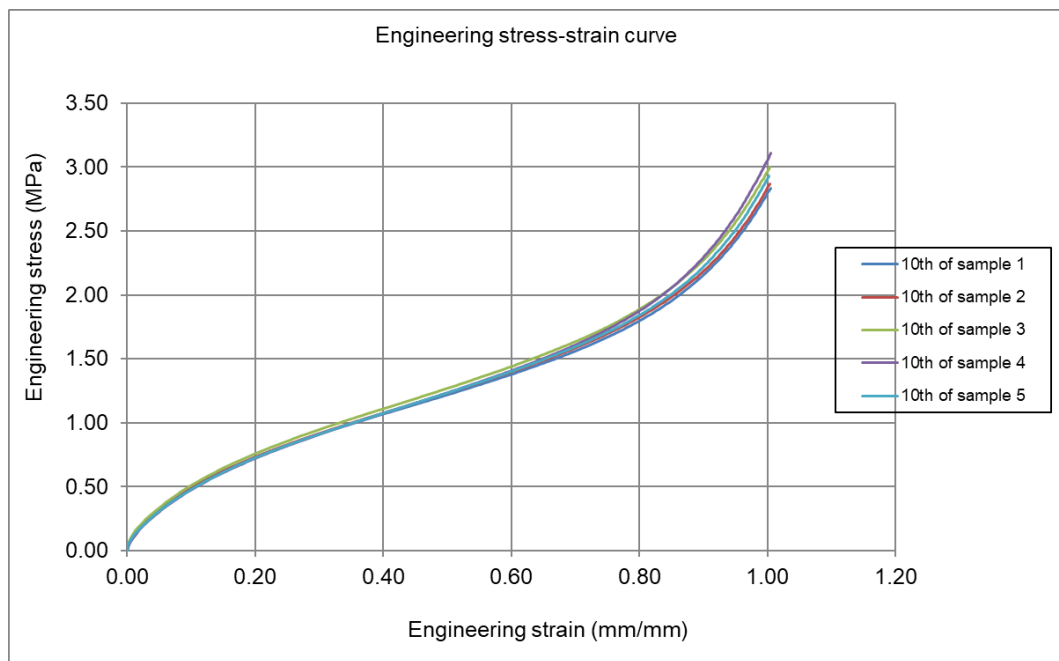
รายงานผลการทดสอบ



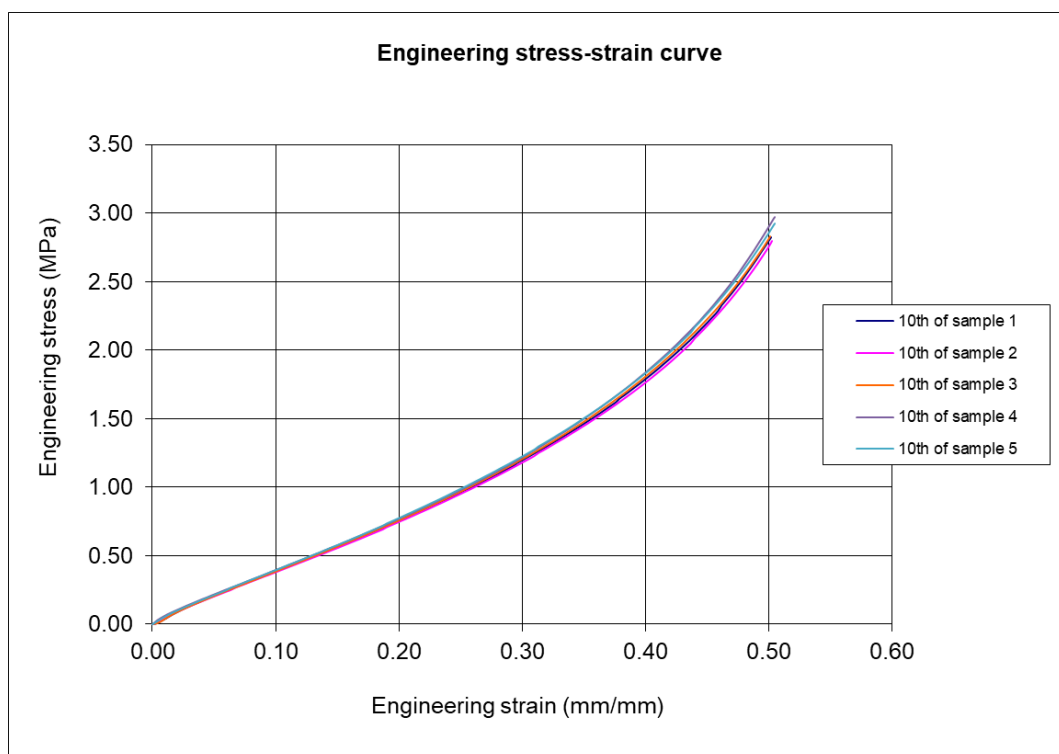
กราฟ Stress-Strain curve การทดสอบ Biaxial ของยาง 05HS



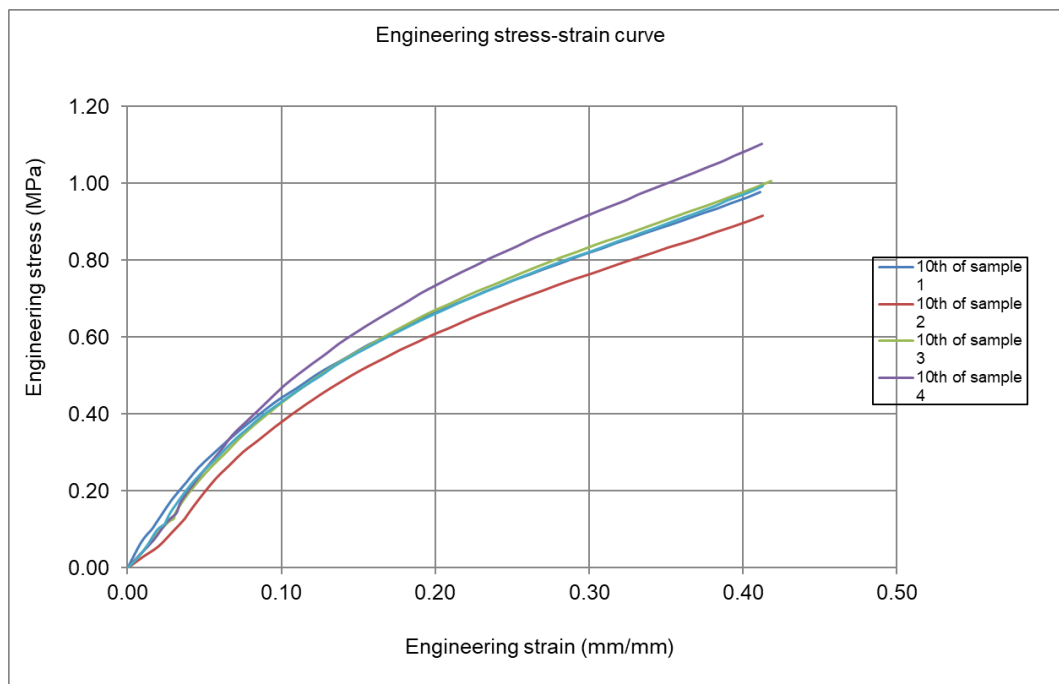
กราฟ Stress-Strain curve การทดสอบ Planar shear ของยาง 05HS



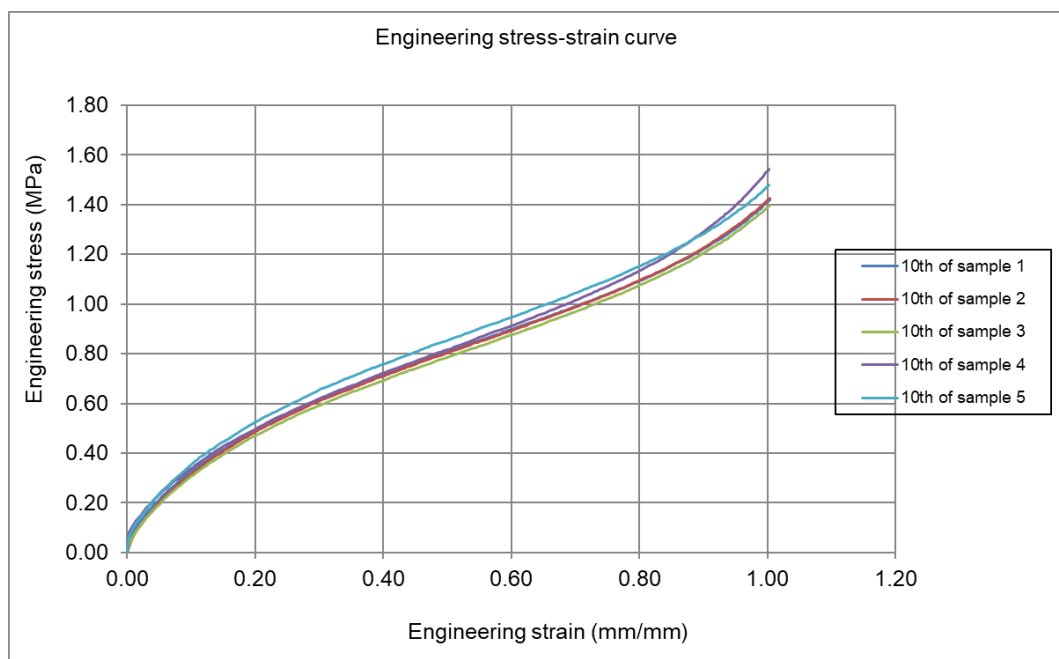
กราฟ Stress-Strain curve การทดสอบ Uniaxial ของยาง 05HS



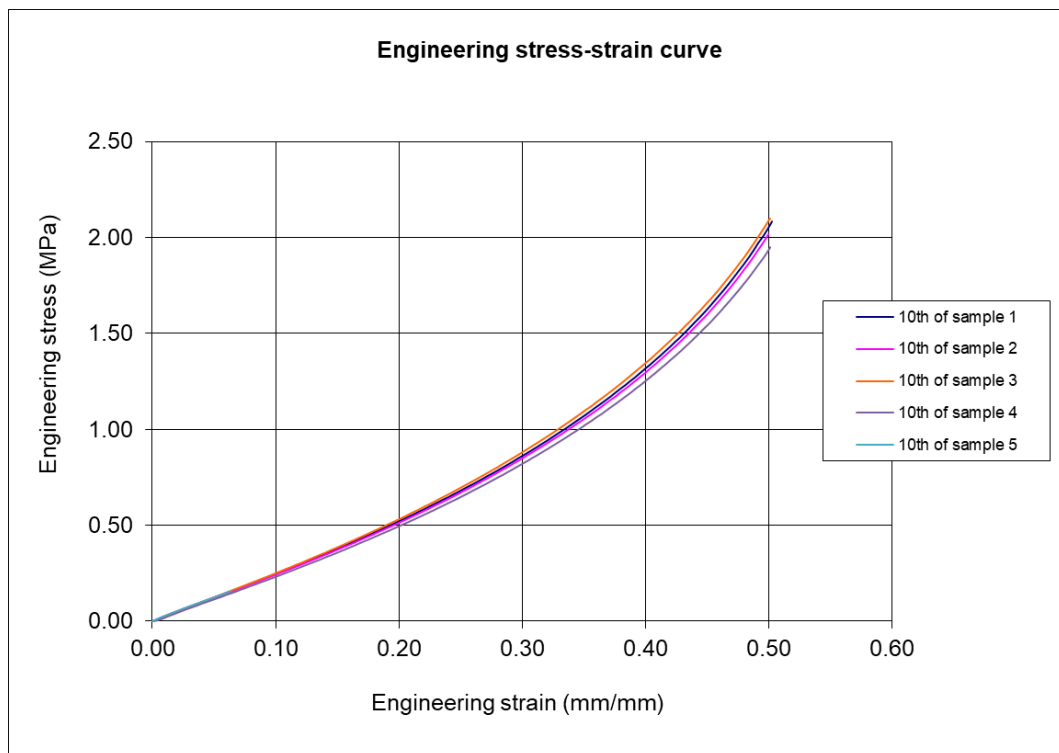
กราฟ Stress-Strain curve การทดสอบ Biaxial ของยาง 06



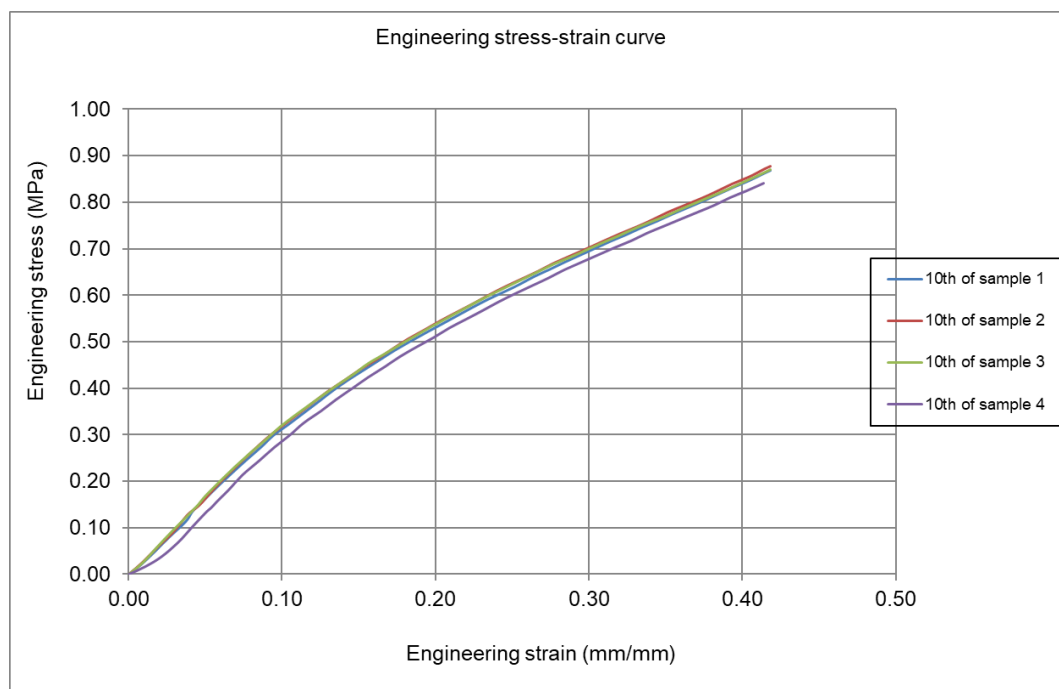
กราฟ Stress-Strain curve การทดสอบ Planar shear ของยาง 06



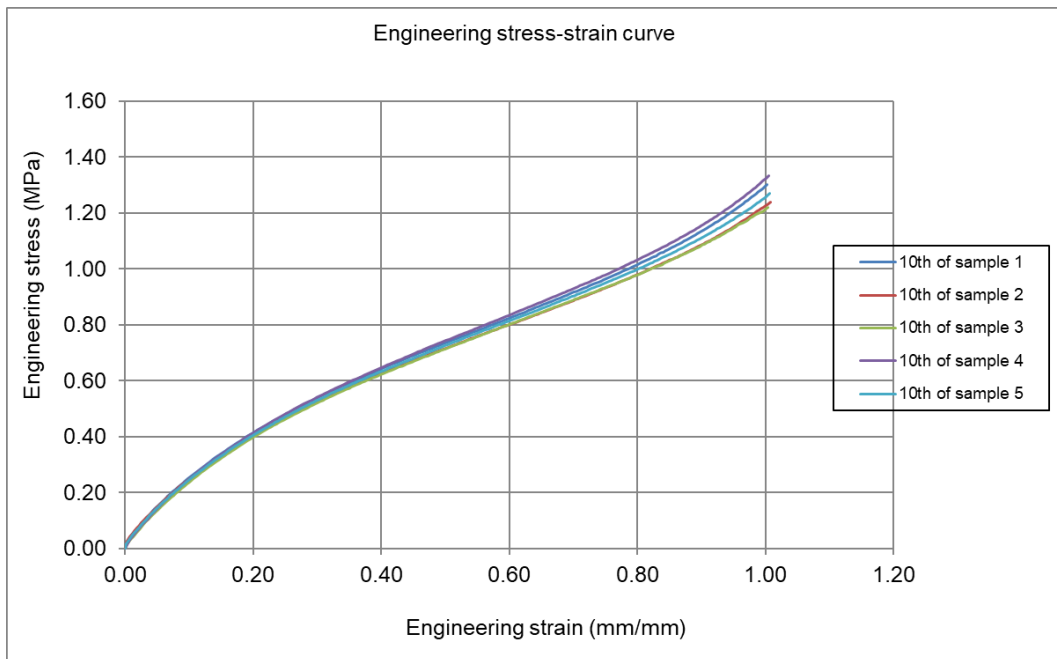
กราฟ Stress-Strain curve การทดสอบ Uniaxial ของยาง 06



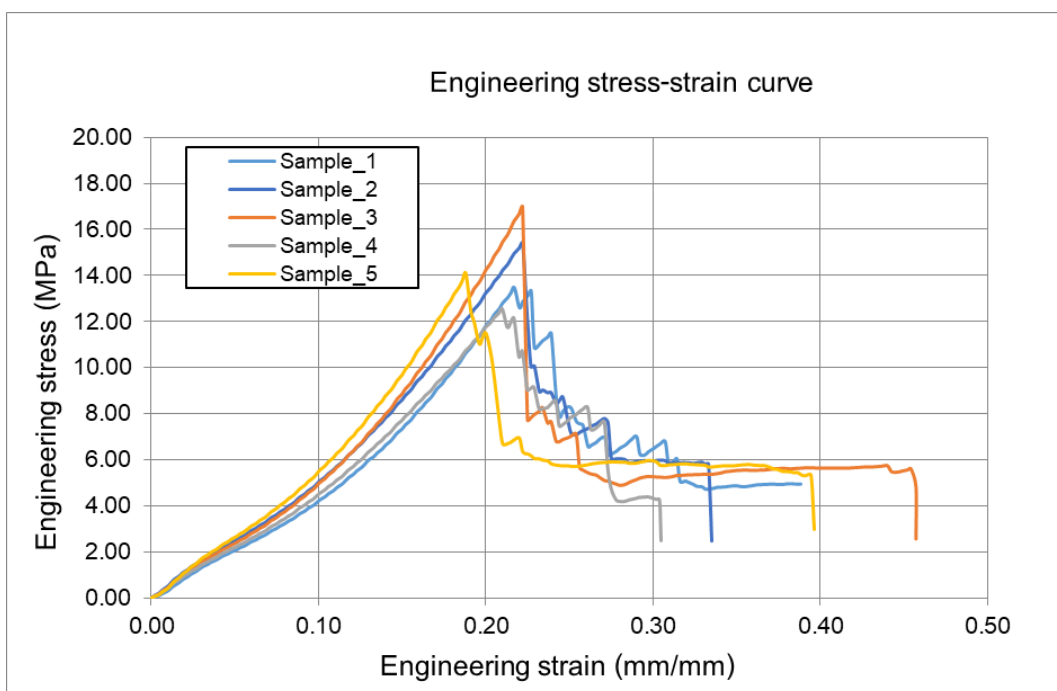
กราฟ Stress-Strain curve การทดสอบ Biaxial ของยาง 210



กราฟ Stress-Strain curve การทดสอบ Planar shear ของยาง 210



กราฟ Stress-Strain curve การทดสอบ Uniaxial ของยาง 210



กราฟ Stress-Strain curve การทดสอบแรงดึงของผ้าใบเสริมยาง

ค่าสัมประสิทธิ์แบบจำลองไฮเปอร์อีลาสติก

The image shows two side-by-side screenshots of the 'Material Properties' dialog box for Mooney materials. Both windows have 'Name' as 'Mooney2' and 'Mooney3' respectively, and 'Type' as 'standard'. The 'General Properties' section shows 'Mass Density' as 0 and a 'Design Sensitivity/Optimization' button. The 'Other Properties' section has 'Show Properties' set to 'Structural', 'Type' as 'Mooney', and 'Model' as 'Five-Term'. Below this is a table of coefficients:

Material	C10	C01	C11	C20	C30
Mooney2	0.700765	-0.0689432	0	0	0
Mooney3	0.725542	-0.0319851	-0.0522548	0	0

The 'Volumetric Behavior' section shows 'Bulk Modulus' set to 'Automatic' with a 'Value' of 6318.22 for Mooney2 and 6935.57 for Mooney3. There are checkboxes for 'Viscoelasticity', 'Damage Effects', and 'Thermal Expansion', all of which are unchecked. At the bottom, the 'Entities' section shows 'Elements' with 'Add' and 'Rem' buttons, and a 'Rem' value of 0. An 'OK' button is at the bottom right of each window.

ค่าสัมประสิทธิ์จากแบบจำลองมูนี-รีฟลิน 2 และ 3 เทอมของยาง 05HS

The image shows two side-by-side screenshots of the 'Material Properties' dialog box for Ogden materials. Both windows have 'Name' as 'Ogden1' and 'Ogden2' respectively, and 'Type' as 'standard'. The 'General Properties' section shows 'Mass Density' as 0 and a 'Design Sensitivity/Optimization' button. The 'Other Properties' section has 'Show Properties' set to 'Structural', 'Type' as 'Ogden', and 'Method' as 'Entered Values'. Below this is a table of coefficients:

Material	Moduli	Exponents
Ogden1	1	1.27653
Ogden2	1	10.6397
Ogden2	2	2.66618

The 'Volumetric Behavior' section shows 'Bulk Modulus' set to 'User' with a 'Value' of 6359.36 for Ogden1 and 22192 for Ogden2. There are checkboxes for 'Viscoelasticity', 'Damage Effects', and 'Thermal Expansion', all of which are unchecked. At the bottom, the 'Entities' section shows 'Elements' with 'Add' and 'Rem' buttons, and a 'Rem' value of 0. An 'OK' button is at the bottom right of each window.

ค่าสัมประสิทธิ์จากแบบจำลองออกเดนอันดับ 1 และ 2 ของยาง 05HS

Material Properties - Mooney2

Name: Mooney2
Type: standard

General Properties
Mass Density: 0
Design Sensitivity/Optimization

Other Properties
Show Properties: Structural
Type: Mooney
Model: Five-Term

Parameter	Value	Table
C10	0.373936	Table
C01	0.0639917	Table
C11	0	Table
C20	0	Table
C30	0	Table

Volumetric Behavior
Bulk Modulus: Automatic Value: 4379.27

Viscoelasticity, Damage Effects, Thermal Expansion, Damping

Entities
Elements: Add Rem 0

OK

Material Properties - Mooney3

Name: Mooney3
Type: standard

General Properties
Mass Density: 0
Design Sensitivity/Optimization

Other Properties
Show Properties: Structural
Type: Mooney
Model: Five-Term

Parameter	Value	Table
C10	0.418954	Table
C01	0.097694	Table
C11	-0.0638487	Table
C20	0	Table
C30	0	Table

Volumetric Behavior
Bulk Modulus: Automatic Value: 5166.48

Viscoelasticity, Damage Effects, Thermal Expansion, Damping

Entities
Elements: Add Rem 0

OK

ค่าสัมประสิทธิ์จากแบบจำลองมูนี-รีฟลิน 2 และ 3 เทอมของยาง 06

Material Properties - Ogden1

Name: Ogden1
Type: standard

General Properties
Mass Density: 0
Design Sensitivity/Optimization

Other Properties
Show Properties: Structural
Type: Ogden
Method: Entered Values
Terms: 1

Moduli	Exponents
1 1.66349	1 1.13555

Volumetric Behavior
Bulk Modulus: User Value: 4722.43 Table

Viscoelasticity, Damage Effects, Thermal Expansion, Damping

Entities
Elements: Add Rem 0

OK

Material Properties - Ogden2

Name: Ogden2
Type: standard

General Properties
Mass Density: 0
Design Sensitivity/Optimization

Other Properties
Show Properties: Structural
Type: Ogden
Method: Entered Values
Terms: 2

Moduli	Exponents
1 26.3865	1 0.106595
2 0.25831	2 -2.82721

Volumetric Behavior
Bulk Modulus: User Value: 8857.43 Table

Viscoelasticity, Damage Effects, Thermal Expansion, Damping

Entities
Elements: Add Rem 0

OK

ค่าสัมประสิทธิ์จากแบบจำลองออกเดนอันดับ 1 และ 2 ของยาง 06

The image shows two side-by-side screenshots of the 'Material Properties' dialog box for Mooney materials. Both have 'Name' as 'Mooney2' and 'Mooney3' respectively, and 'Type' as 'standard'. The 'General Properties' section shows 'Mass Density' as 0 and a 'Design Sensitivity/Optimization' button. The 'Other Properties' section has 'Show Properties' set to 'Structural', 'Type' as 'Mooney', and 'Model' as 'Five-Term'. Below this is a table of coefficients:

Material	C10	C01	C11	C20	C30
Mooney2	0.394935	-0.0379243	0	0	0
Mooney3	0.407298	-0.0163365	-0.0295162	0	0

The 'Volumetric Behavior' section shows 'Bulk Modulus' set to 'Automatic' with a 'Value' of 3570.11 for Mooney2 and 3909.61 for Mooney3. There are checkboxes for 'Viscoelasticity', 'Damage Effects', 'Thermal Expansion', and 'Damping'. The 'Entities' section at the bottom shows 'Elements' with 'Add' and 'Rem' buttons, and a 'Rem' value of 0. An 'OK' button is at the bottom right.

ค่าสัมประสิทธิ์จากแบบจำลองมูนี-รีฟลิน 2 และ 3 เทอมของยาง 210

The image shows two side-by-side screenshots of the 'Material Properties' dialog box for Ogden materials. Both have 'Name' as 'Ogden1' and 'Ogden2' respectively, and 'Type' as 'standard'. The 'General Properties' section shows 'Mass Density' as 0 and a 'Design Sensitivity/Optimization' button. The 'Other Properties' section has 'Show Properties' set to 'Structural', 'Type' as 'Ogden', and 'Method' as 'Entered Values'. Below this is a table of coefficients:

Material	Moduli	Exponents
Ogden1	1 0.738866	1 1.95076
Ogden2	1 9.59469 2 3.17906	1 0.429014 2 -0.797648

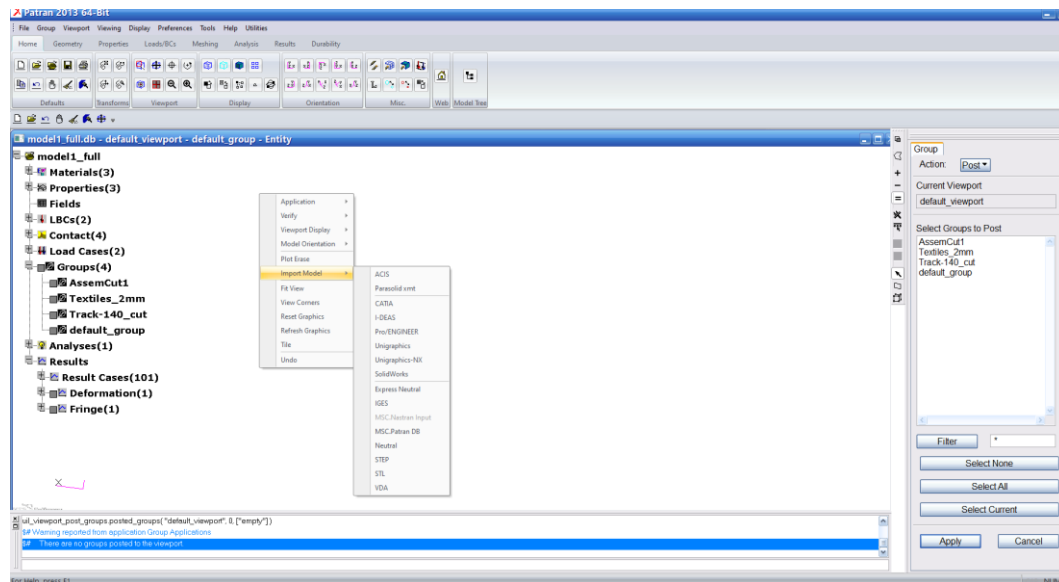
The 'Volumetric Behavior' section shows 'Bulk Modulus' set to 'User' with a 'Value' of 3603.38 for Ogden1 and 16630.1 for Ogden2. There are checkboxes for 'Viscoelasticity', 'Damage Effects', 'Thermal Expansion', and 'Damping'. The 'Entities' section at the bottom shows 'Elements' with 'Add' and 'Rem' buttons, and a 'Rem' value of 0. An 'OK' button is at the bottom right.

ค่าสัมประสิทธิ์จากแบบจำลองออกเดนอันดับ 1 และ 2 ของยาง 06

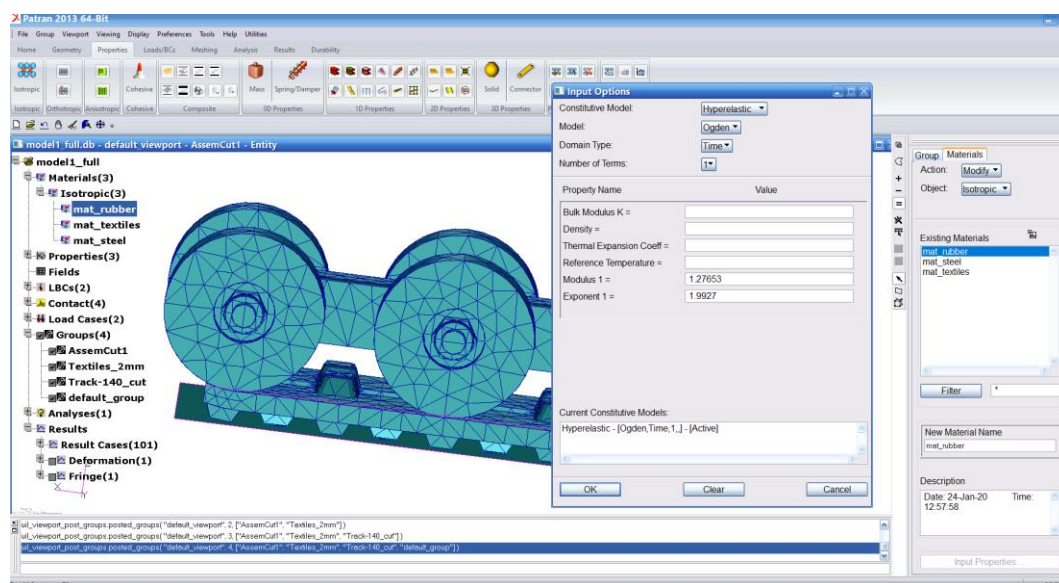
ในการเลือกนำใช้ค่าสัมประสิทธิ์ไปใช้งานในไฟไนต์เอลิเมนต์อาศัยการเปรียบเทียบค่า Value โดยค่า Value ที่น้อยกว่าจะให้ผลการคำนวณที่ดีกว่า

ขั้นตอนการทำไฟไนต์เอลิเมนต์ในยางตีนตะขา

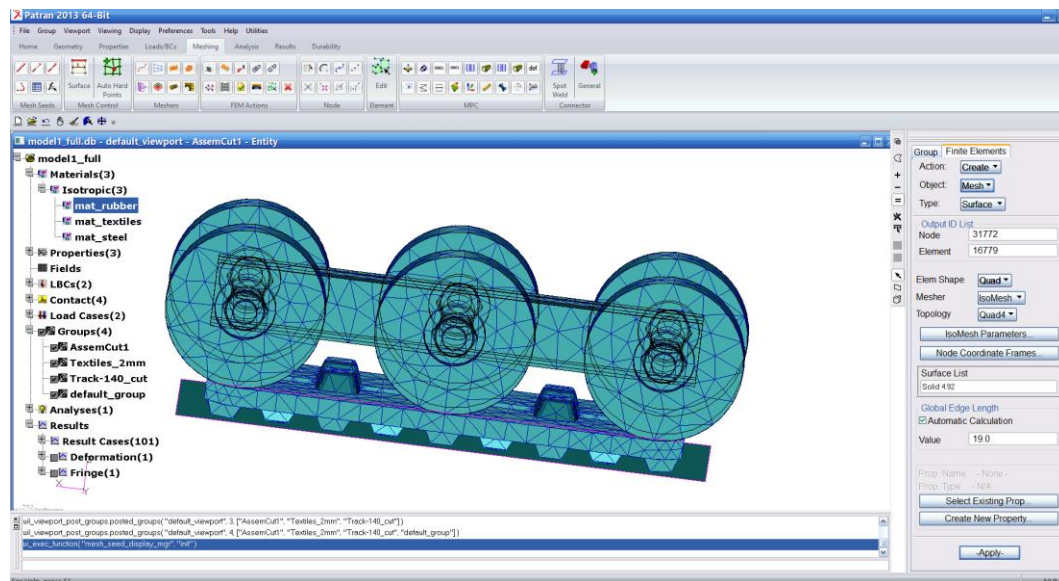
1. นำไฟล์ CAD ที่จัดเตรียมไว้ไว้ในโปรแกรมจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ (MSC Patran)



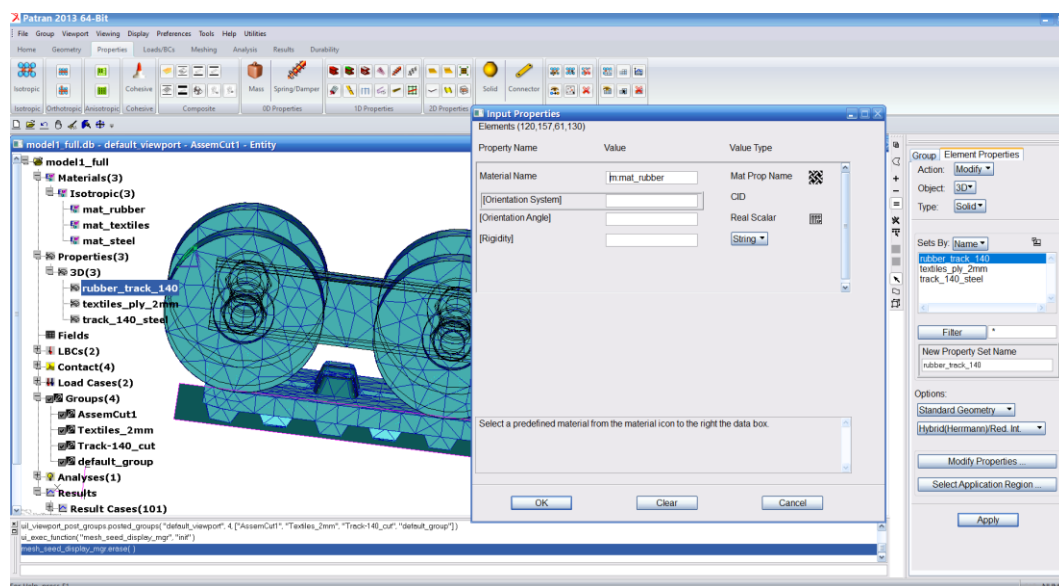
2. สร้าง Material โดยใช้ค่าสัมประสิทธิ์ที่ได้จากการทดสอบสมบัติเชิงกลข้างต้น



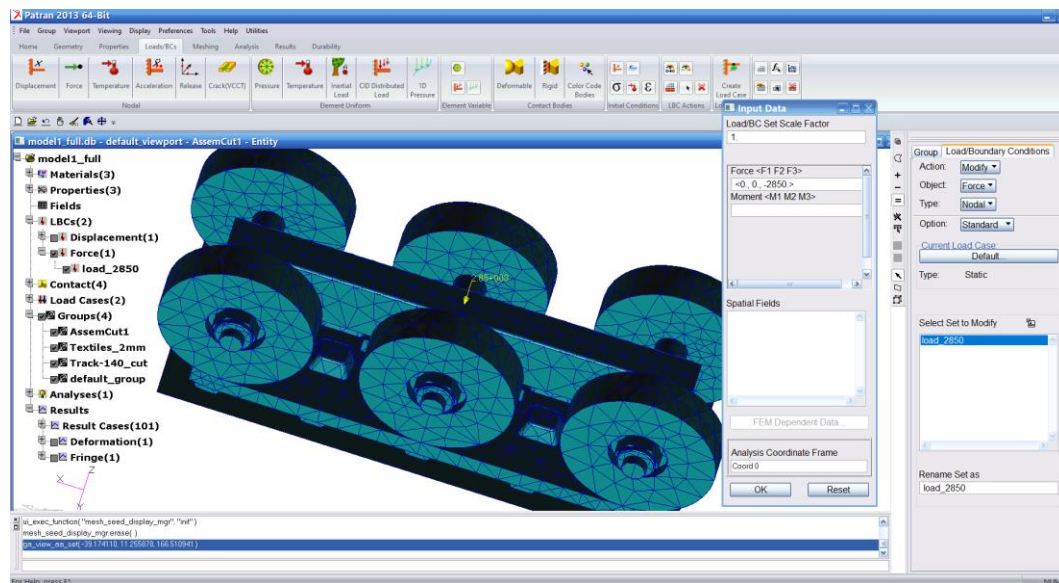
3. สร้าง Mesh ให้กับแต่ละชิ้นส่วนที่นำเข้ามาในโปรแกรมจะเกิดเป็น Element ขึ้นมาในชิ้นส่วน



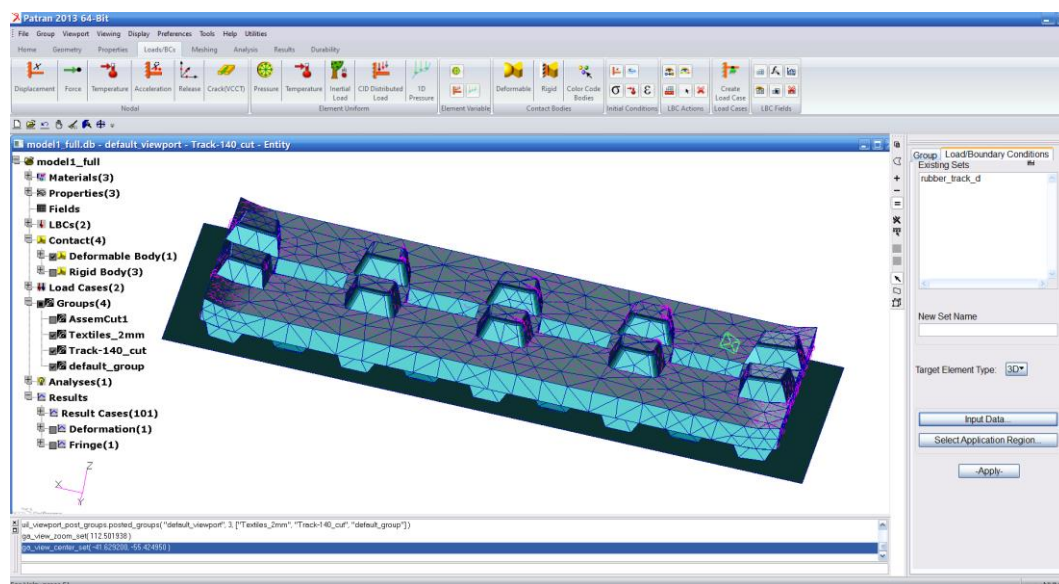
4. กำหนด Material Properties ให้กับชิ้นส่วนต่างๆที่นำเข้ามาในโปรแกรมโดยการกำหนดเข้าไปที่ Element ของชิ้นส่วนที่ได้สร้างขึ้น



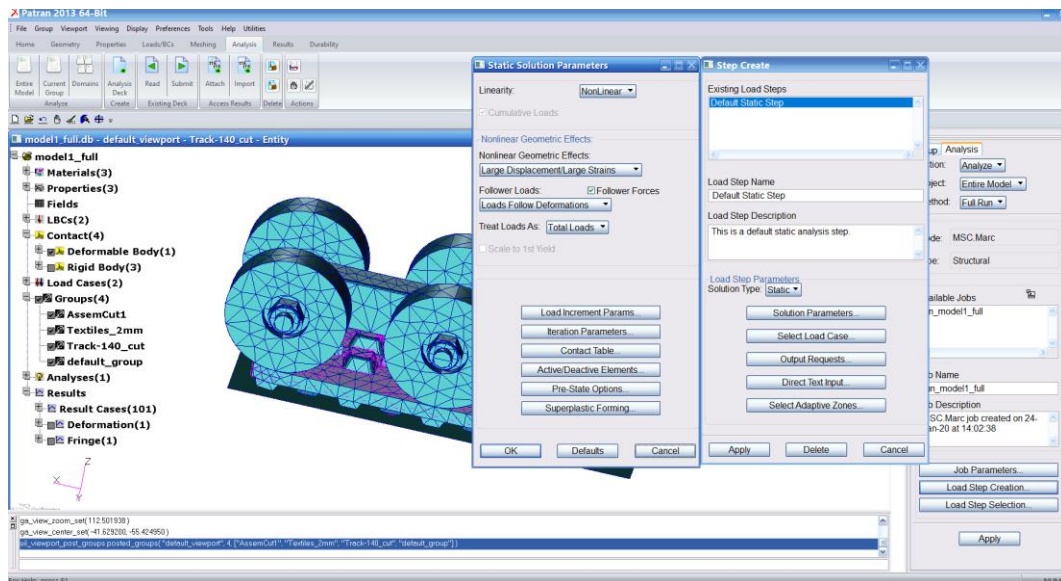
5. กำหนดแรงที่กระทำกับชิ้นส่วนเช่น แรงกดที่เกิดจากน้ำหนักของรถและล้อดันตะขาบ แรงดึงที่เกิดจากการขับเคลื่อนของล้อดันตะขาบ จุดที่มีการเคลื่อนที่และจุดที่ไม่มีการเคลื่อนที่ เป็นต้น



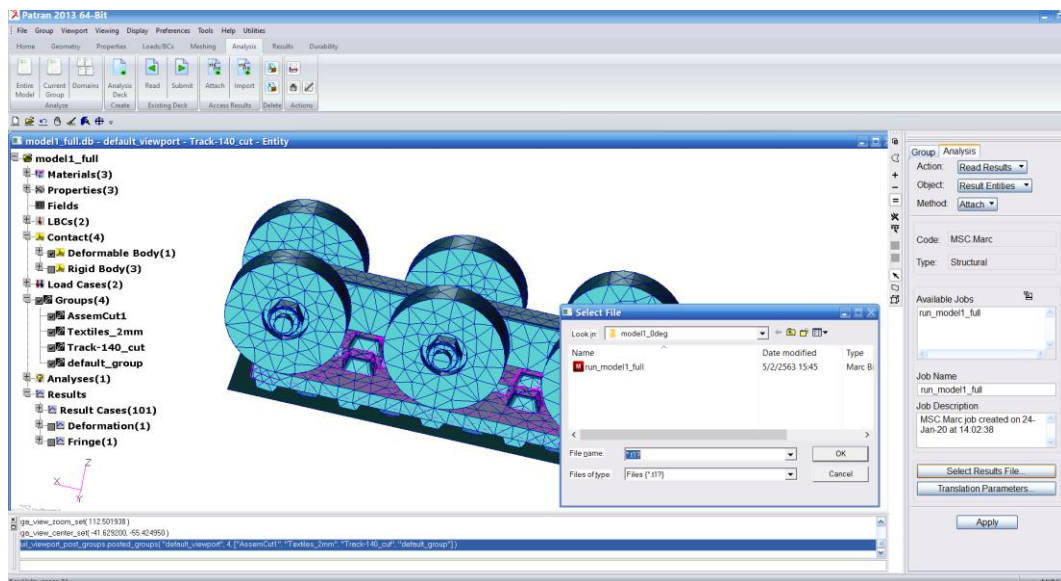
6. กำหนดพื้นผิวสัมผัสของแต่ละชิ้นส่วน ความแข็งเกร็ง (Rigid body) และการเปลี่ยนรูปร่างของวัตถุ (Deformable body) ลงไปยังชิ้นส่วนต่างๆที่ต้องการศึกษา



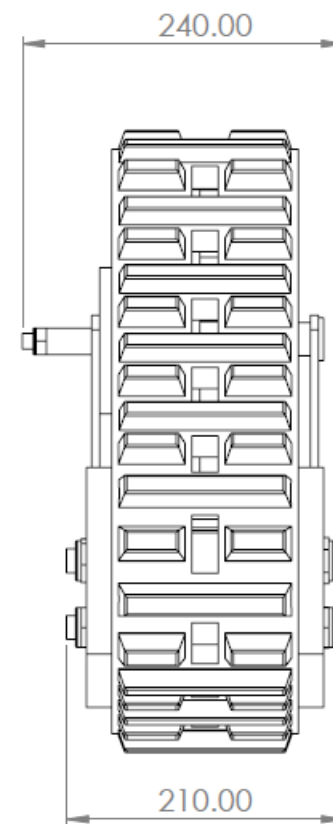
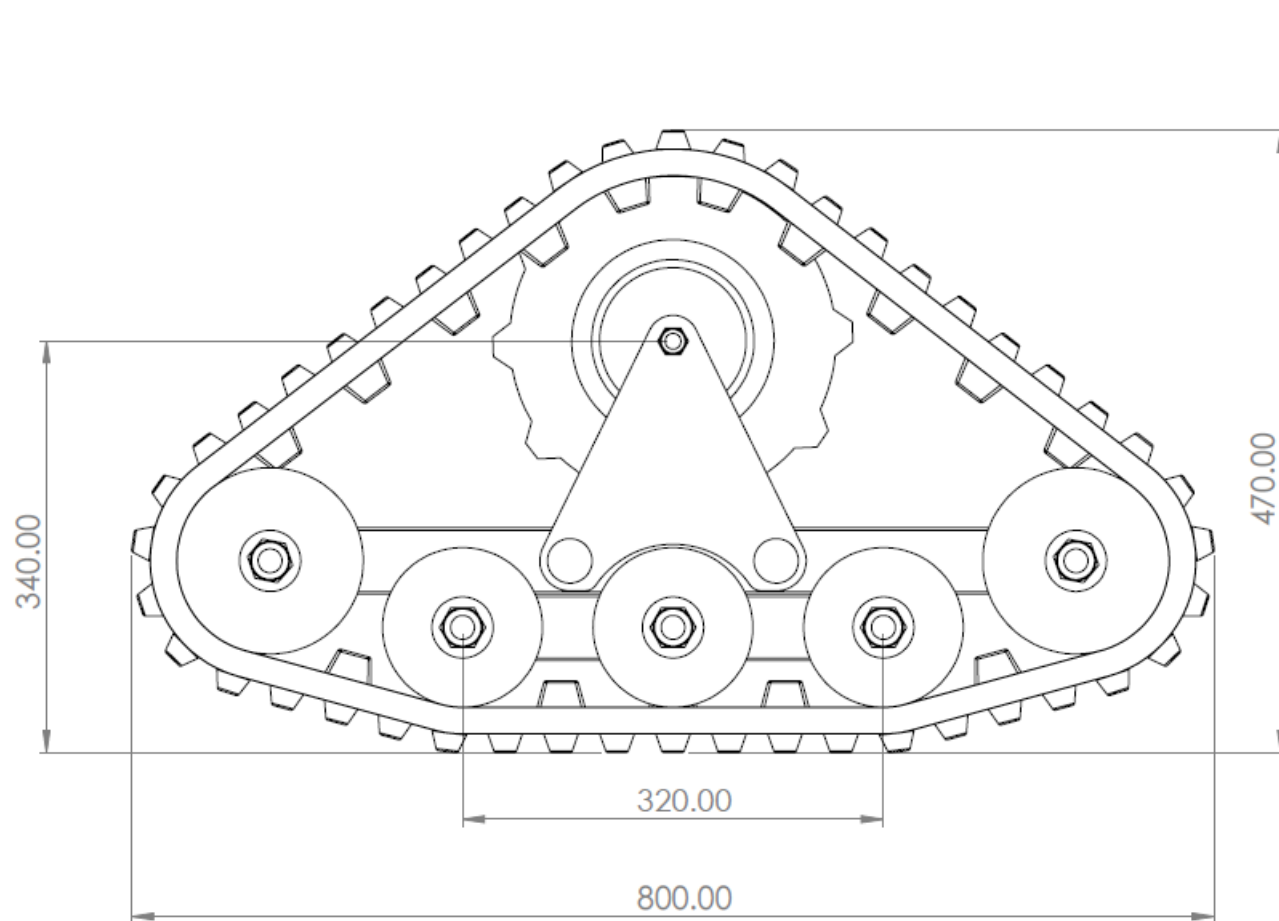
7. ทำการตั้งค่าพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์ จากนั้นจึงให้โปรแกรมทำการคำนวณ



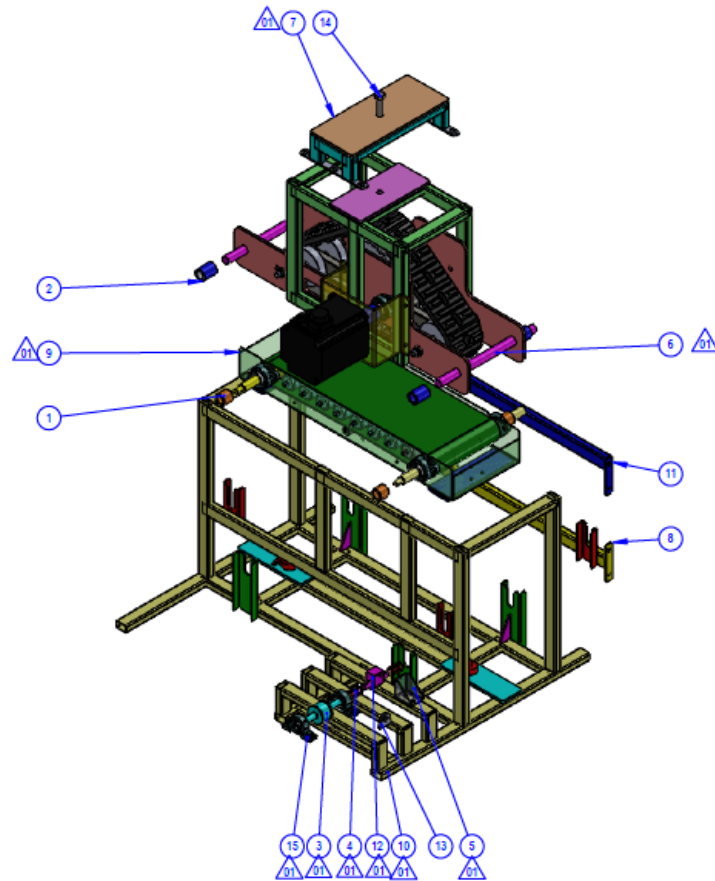
8. นำเข้าผลของการคำนวณเพื่อดูผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณ



แบบสองมิติชิ้นส่วนทางกลของชุดล้อและเครื่องทดสอบยางตีนตะขาบ



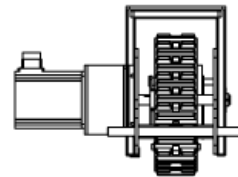
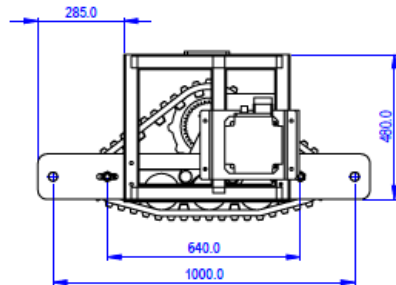
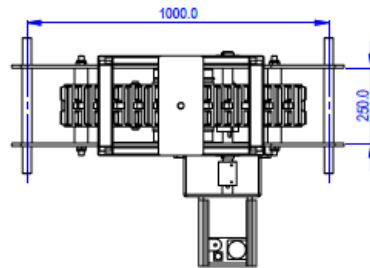
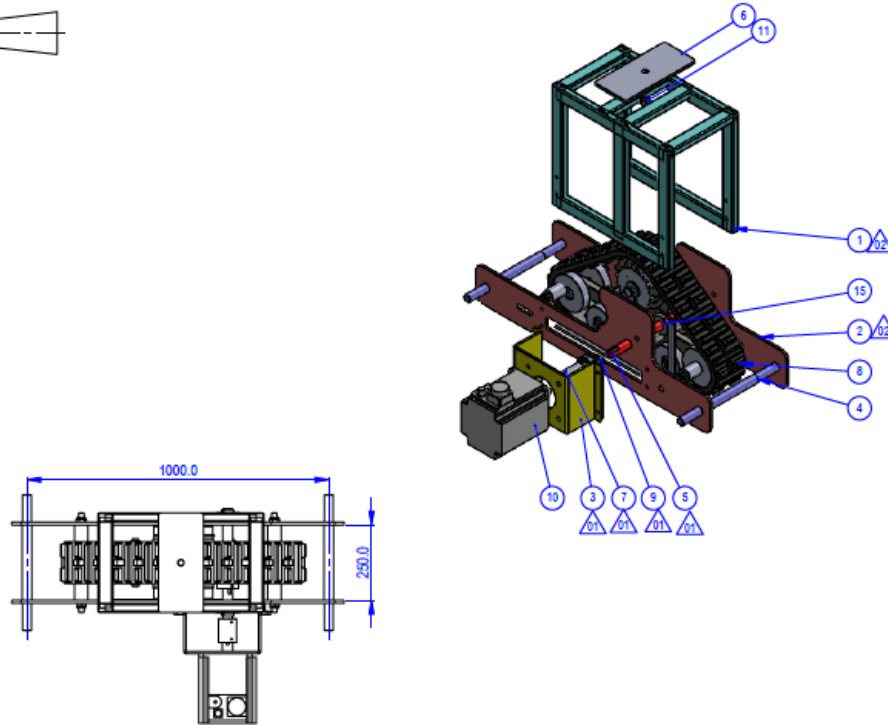
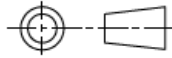
	DWG NO. Assem1	A4
WEIGHT:	SCALE 1:5	SHEET 1 OF 1



REVISIONS					
REV.	SO. NO	DESCRIPTION	DATE	NAME	CHECKER
00		PRELIMINARY RELEASED			
01			6/7/2019		

17	DIN 913 - M4 x 8-N							1
16	DIN 6912 - M4 x 16 — 12.5N							1
15	CPDR20		CPDR - Pillow Blocks (Economy) -Cast Housing Pillow-					2
14	DIN EN 24018 - M20 x 150-WN							1
13	PLATE WING_A	-	-	-	-	---	-	2
12	FSH01988	-	-	-	-	---	-	1
11	SKY20190008-0006	00	-	-	-	---	-	1
10	SKY20190008-0005	-	-	-	-	---	-	1
9	SKY20190008-0004	-	-	-	-	---	-	1
8	SKY20190008-0003	00	-	-	-	---	-	1
7	SKY20190008-0002	-	-	-	-	---	-	1
6	SKY20190008-0001	01	-	-	-	---	-	1
5	SKY20190008-0124	00	-	SS400	-	---	-	1
4	SKY20190008-0123	00	-	SS400	-	---	-	2
3	SKY20190008-0120	00	-	SS400	-	---	-	1
2	SKY20190008-0113	00	-	SS400	-	---	-	4
1	SKY20190008-0114	00	-	SS400	-	---	-	4
ITEM NO.	PART NUMBER	REV.	DESCRIPTION	MATERIAL / VENDOR	HARDNESS	FINISHED SIZE	SPA RE QTY.	00/QTY
FINISHED SIZE: ---		MATERIAL/VENDOR: -		HARDNESS: -		QTY: -		
STANDARD ITEM NO: -				FINISHED WEIGHT: -		SPARE QTY: -		
						 Kasturba University		
						PROJECT/TWO/DWGNO		
PROPRIETARY AND CONFIDENTIAL FOR INFORMATION GOVERNORS & VICE CHANCELLORS IS THE SOLE PROPERTY OF KASTURBA UNIVERSITY. REPRODUCTION IN PART OR AS A WHOLE WITHOUT THE WRITTEN PERMISSION OF KASTURBA UNIVERSITY IS PROHIBITED.		X 40:2 JUL 40:2 XXX 25:803 ANGLES: 40°/30° INSIDE RADIUS: 0.2 Max. CHAMFERS: 0.2 x 45° DRILLED & TAPPED HOLES ±0.10 FINISH 0.4 MICROMETERS		DESIGNER: - DRAFTSMAN: - CHECKER: - DESIGNED BY: - PROJECT NO: -		DATE: - DATE: 20/05/2019 DATE: 20/05/2019 DATE: 20/05/2019		DESCRIPTION: ---
						DWG SIZE: SCALE: DRAWING NO: SKY20190008-0000		REVISION: 01
						A3 1:15 THIRD ANGLE		Page 1 Of 2

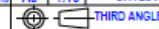
THIRD ANGLE PROJECTION



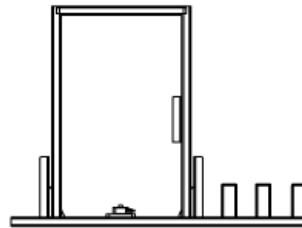
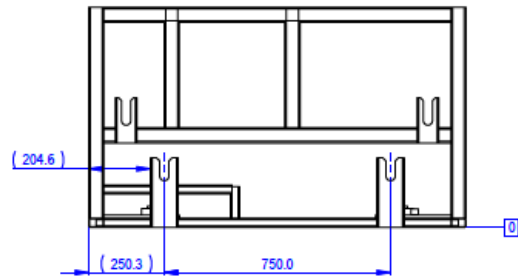
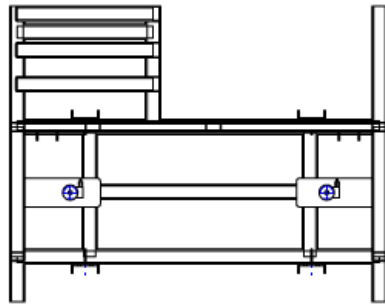
REVISIONS					
REV.	SO. NO	DESCRIPTION	DATE	NAME	CHECKER
00		PRELIMINARY RELEASED			
01			6/7/2019		
02			6/18/2019		

17	SKY20190008-0128	-	-	-	-	---	-	2
16	SKY20190008-0127	-	-	-	-	---	-	1
15	SP40B21_N_32		SP40B, BSP40B, SSP40B - Sprockets - 40B Series - Mounting Hole Type					1
14	SPACER	-	-	-	-	---	-	4
13	DIN EN ISO 10511 - M20 - N							4
12	SKY20190008-0125	00	-	SS400	-	---	-	2
11	Hexagon Nut ISO 8674 - M20 x 1.5 - W - N							1
10	17SSJT-M220B							1
9	HDH30		HDH - Ball Bearing Units - Cylindrical Hole, Casting Type - Rhomb Flanged Type					2
8	Assem1							1
7	SKY20190008-0125	00	-	SS400	-	---	-	1
6	SKY20190008-0107	00	-	SS400	-	---	-	1
5	SKY20190008-0106	01	-	SS400	-	---	-	1
4	SKY20190008-0105	00	-	SS400	-	---	-	2
3	SKY20190008-0104	01	-	SS400	-	---	-	1
2	SKY20190008-0103	02	-	SS400	-	---	-	2
1	SKY20190008-0101	01	-	SS400	-	---	-	1

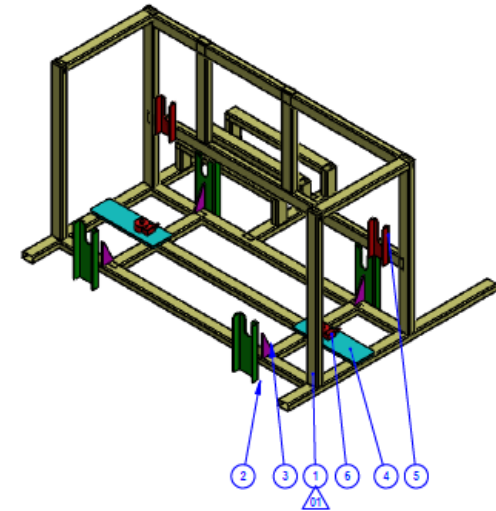
ITEM NO.	PART NUMBER	REV.	DESCRIPTION	MATERIAL / VENDOR	HARDNESS	FINISHED SIZE	SPA RE QTY.	00/QTY
FINISHED SIZE		MATERIAL/ENDOR		HARDNESS		QTY		
STANDARD ITEM NO.		UNLESS OTHERWISE SPECIFIED, DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS		FINISHED SIZE		FINISHED QTY		
UNLESS OTHERWISE SPECIFIED, DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS		UNLESS OTHERWISE SPECIFIED, DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS		FINISHED SIZE		FINISHED QTY		
UNLESS OTHERWISE SPECIFIED, DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS		UNLESS OTHERWISE SPECIFIED, DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS		FINISHED SIZE		FINISHED QTY		
UNLESS OTHERWISE SPECIFIED, DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS		UNLESS OTHERWISE SPECIFIED, DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS		FINISHED SIZE		FINISHED QTY		
UNLESS OTHERWISE SPECIFIED, DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS		UNLESS OTHERWISE SPECIFIED, DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS		FINISHED SIZE		FINISHED QTY		
UNLESS OTHERWISE SPECIFIED, DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS		UNLESS OTHERWISE SPECIFIED, DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS		FINISHED SIZE		FINISHED QTY		
UNLESS OTHERWISE SPECIFIED, DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS		UNLESS OTHERWISE SPECIFIED, DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS		FINISHED SIZE		FINISHED QTY		
UNLESS OTHERWISE SPECIFIED, DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS		UNLESS OTHERWISE SPECIFIED, DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS		FINISHED SIZE		FINISHED QTY		
UNLESS OTHERWISE SPECIFIED, DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS		UNLESS OTHERWISE SPECIFIED, DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS		FINISHED SIZE		FINISHED QTY		
UNLESS OTHERWISE SPECIFIED, DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS		UNLESS OTHERWISE SPECIFIED, DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS		FINISHED SIZE		FINISHED QTY		
UNLESS OTHERWISE SPECIFIED, DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS		UNLESS OTHERWISE SPECIFIED, DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS		FINISHED SIZE		FINISHED QTY		
UNLESS OTHERWISE SPECIFIED, DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS		UNLESS OTHERWISE SPECIFIED, DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS		FINISHED SIZE		FINISHED QTY		
UNLESS OTHERWISE SPECIFIED, DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS		UNLESS OTHERWISE SPECIFIED, DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS		FINISHED SIZE		FINISHED QTY		
UNLESS OTHERWISE SPECIFIED, DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS		UNLESS OTHERWISE SPECIFIED, DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS		FINISHED SIZE		FINISHED QTY		
UNLESS OTHERWISE SPECIFIED, DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS		UNLESS OTHERWISE SPECIFIED, DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS		FINISHED SIZE		FINISHED QTY		
UNLESS OTHERWISE SPECIFIED, DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS		UNLESS OTHERWISE SPECIFIED, DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS		FINISHED SIZE		FINISHED QTY		
UNLESS OTHERWISE SPECIFIED, DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS		UNLESS OTHERWISE SPECIFIED, DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS		FINISHED SIZE		FINISHED QTY		
UNLESS OTHERWISE SPECIFIED, DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS		UNLESS OTHERWISE SPECIFIED, DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS		FINISHED SIZE		FINISHED QTY		
UNLESS OTHERWISE SPECIFIED, DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS		UNLESS OTHERWISE SPECIFIED, DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS		FINISHED SIZE		FINISHED QTY		
UNLESS OTHERWISE SPECIFIED, DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS		UNLESS OTHERWISE SPECIFIED, DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS		FINISHED SIZE		FINISHED QTY		
UNLESS OTHERWISE SPECIFIED, DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS		UNLESS OTHERWISE SPECIFIED, DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS		FINISHED SIZE		FINISHED QTY		
UNLESS OTHERWISE SPECIFIED, DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS		UNLESS OTHERWISE SPECIFIED, DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS		FINISHED SIZE		FINISHED QTY		
UNLESS OTHERWISE SPECIFIED, DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS		UNLESS OTHERWISE SPECIFIED, DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS		FINISHED SIZE		FINISHED QTY		
UNLESS OTHERWISE SPECIFIED, DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS		UNLESS OTHERWISE SPECIFIED, DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS		FINISHED SIZE		FINISHED QTY		
UNLESS OTHERWISE SPECIFIED, DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS		UNLESS OTHERWISE SPECIFIED, DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS		FINISHED SIZE		FINISHED QTY		
UNLESS OTHERWISE SPECIFIED, DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS		UNLESS OTHERWISE SPECIFIED, DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS		FINISHED SIZE		FINISHED QTY		
UNLESS OTHERWISE SPECIFIED, DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS		UNLESS OTHERWISE SPECIFIED, DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS		FINISHED SIZE		FINISHED QTY		
UNLESS OTHERWISE SPECIFIED, DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS		UNLESS OTHERWISE SPECIFIED, DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS		FINISHED SIZE		FINISHED QTY		
UNLESS OTHERWISE SPECIFIED, DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS		UNLESS OTHERWISE SPECIFIED, DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS		FINISHED SIZE		FINISHED QTY		
UNLESS OTHERWISE SPECIFIED, DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS		UNLESS OTHERWISE SPECIFIED, DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS		FINISHED SIZE		FINISHED QTY		
UNLESS OTHERWISE SPECIFIED, DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS		UNLESS OTHERWISE SPECIFIED, DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS		FINISHED SIZE		FINISHED QTY		
UNLESS OTHERWISE SPECIFIED, DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS		UNLESS OTHERWISE SPECIFIED, DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS		FINISHED SIZE		FINISHED QTY		
UNLESS OTHERWISE SPECIFIED, DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS		UNLESS OTHERWISE SPECIFIED, DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS		FINISHED SIZE		FINISHED QTY		
UNLESS OTHERWISE SPECIFIED, DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS		UNLESS OTHERWISE SPECIFIED, DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS		FINISHED SIZE		FINISHED QTY		
UNLESS OTHERWISE SPECIFIED, DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS		UNLESS OTHERWISE SPECIFIED, DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS		FINISHED SIZE		FINISHED QTY		
UNLESS OTHERWISE SPECIFIED, DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS		UNLESS OTHERWISE SPECIFIED, DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS		FINISHED SIZE		FINISHED QTY		
UNLESS OTHERWISE SPECIFIED, DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS		UNLESS OTHERWISE SPECIFIED, DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS		FINISHED SIZE		FINISHED QTY		
UNLESS OTHERWISE SPECIFIED, DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS		UNLESS OTHERWISE SPECIFIED, DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS		FINISHED SIZE		FINISHED QTY		
UNLESS OTHERWISE SPECIFIED, DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS		UNLESS OTHERWISE SPECIFIED, DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS		FINISHED SIZE		FINISHED QTY		
UNLESS OTHERWISE SPECIFIED, DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS		UNLESS OTHERWISE SPECIFIED, DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS		FINISHED SIZE		FINISHED QTY		
UNLESS OTHERWISE SPECIFIED, DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS		UNLESS OTHERWISE SPECIFIED, DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS		FINISHED SIZE		FINISHED QTY		
UNLESS OTHERWISE SPECIFIED, DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS		UNLESS OTHERWISE SPECIFIED, DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS		FINISHED SIZE		FINISHED QTY		
UNLESS OTHERWISE SPECIFIED, DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS		UNLESS OTHERWISE SPECIFIED, DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS		FINISHED SIZE		FINISHED QTY		
UNLESS OTHERWISE SPECIFIED, DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS		UNLESS OTHERWISE SPECIFIED, DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS		FINISHED SIZE		FINISHED QTY		
UNLESS OTHERWISE SPECIFIED, DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS		UNLESS OTHERWISE SPECIFIED, DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS		FINISHED SIZE		FINISHED QTY		
UNLESS OTHERWISE SPECIFIED, DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS		UNLESS OTHERWISE SPECIFIED, DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS		FINISHED SIZE		FINISHED QTY		
UNLESS OTHERWISE SPECIFIED, DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS		UNLESS OTHERWISE SPECIFIED, DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS		FINISHED SIZE		FINISHED QTY		
UNLESS OTHERWISE SPECIFIED, DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS		UNLESS OTHERWISE SPECIFIED, DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS		FINISHED SIZE		FINISHED QTY		
UNLESS OTHERWISE SPECIFIED, DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS		UNLESS OTHERWISE SPECIFIED, DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS		FINISHED SIZE		FINISHED QTY		
UNLESS OTHERWISE SPECIFIED, DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS		UNLESS OTHERWISE SPECIFIED, DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS		FINISHED SIZE		FINISHED QTY		
UNLESS OTHERWISE SPECIFIED, DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS		UNLESS OTHERWISE SPECIFIED, DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS		FINISHED SIZE		FINISHED QTY		
UNLESS OTHERWISE SPECIFIED, DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS		UNLESS OTHERWISE SPECIFIED, DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS		FINISHED SIZE		FINISHED QTY		
UNLESS OTHERWISE SPECIFIED, DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS		UNLESS OTHERWISE SPECIFIED, DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS		FINISHED SIZE		FINISHED QTY		
UNLESS OTHERWISE SPECIFIED, DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS		UNLESS OTHERWISE SPECIFIED, DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS		FINISHED SIZE		FINISHED QTY		
UNLESS OTHERWISE SPECIFIED, DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS		UNLESS OTHERWISE SPECIFIED, DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS		FINISHED SIZE		FINISHED QTY		
UNLESS OTHERWISE SPECIFIED, DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS		UNLESS OTHERWISE SPECIFIED, DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS		FINISHED SIZE		FINISHED QTY		
UNLESS OTHERWISE SPECIFIED, DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS		UNLESS OTHERWISE SPECIFIED, DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS		FINISHED SIZE		FINISHED QTY		
UNLESS OTHERWISE SPECIFIED, DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS		UNLESS OTHERWISE SPECIFIED, DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS		FINISHED SIZE		FINISHED QTY		
UNLESS OTHERWISE SPECIFIED, DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS		UNLESS OTHERWISE SPECIFIED, DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS		FINISHED SIZE		FINISHED QTY		
UNLESS OTHERWISE SPECIFIED, DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS		UNLESS OTHERWISE SPECIFIED, DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS		FINISHED SIZE		FINISHED QTY		
UNLESS OTHERWISE SPECIFIED, DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS		UNLESS OTHERWISE SPECIFIED, DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS		FINISHED SIZE		FINISHED QTY		
UNLESS OTHERWISE SPECIFIED, DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS		UNLESS OTHERWISE SPECIFIED, DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS		FINISHED SIZE		FINISHED QTY		
UNLESS OTHERWISE SPECIFIED, DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS		UNLESS OTHERWISE SPECIFIED, DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS		FINISHED SIZE		FINISHED QTY		
UNLESS OTHERWISE SPECIFIED, DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS		UNLESS OTHERWISE SPECIFIED, DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS		FINISHED SIZE		FINISHED QTY		
UNLESS OTHERWISE SPECIFIED, DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS		UNLESS OTHERWISE SPECIFIED, DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS		FINISHED SIZE		FINISHED QTY		
UNLESS OTHERWISE SPECIFIED, DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS		UNLESS OTHERWISE SPECIFIED, DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS		FINISHED SIZE		FINISHED QTY		
UNLESS OTHERWISE SPECIFIED, DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS		UNLESS OTHERWISE SPECIFIED, DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS		FINISHED SIZE		FINISHED QTY		
UNLESS OTHERWISE SPECIFIED, DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS		UNLESS OTHERWISE SPECIFIED, DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS		FINISHED SIZE		FINISHED QTY		
UNLESS OTHERWISE SPECIFIED, DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS		UNLESS OTHERWISE SPECIFIED, DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS						



1 OF 1

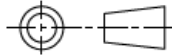


REVISIONS					
REV.	SO. NO	DESCRIPTION	DATE	NAME	CHECKER
00		PRELIMINARY RELEASED			
01			6/7/2019		

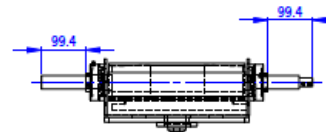
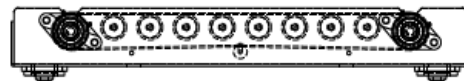
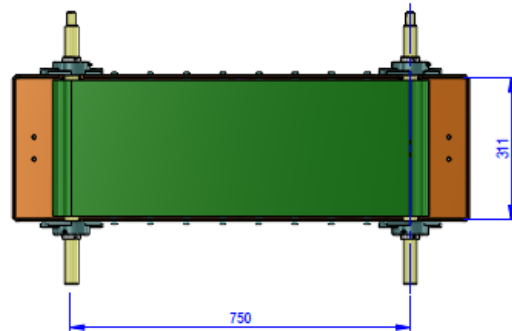
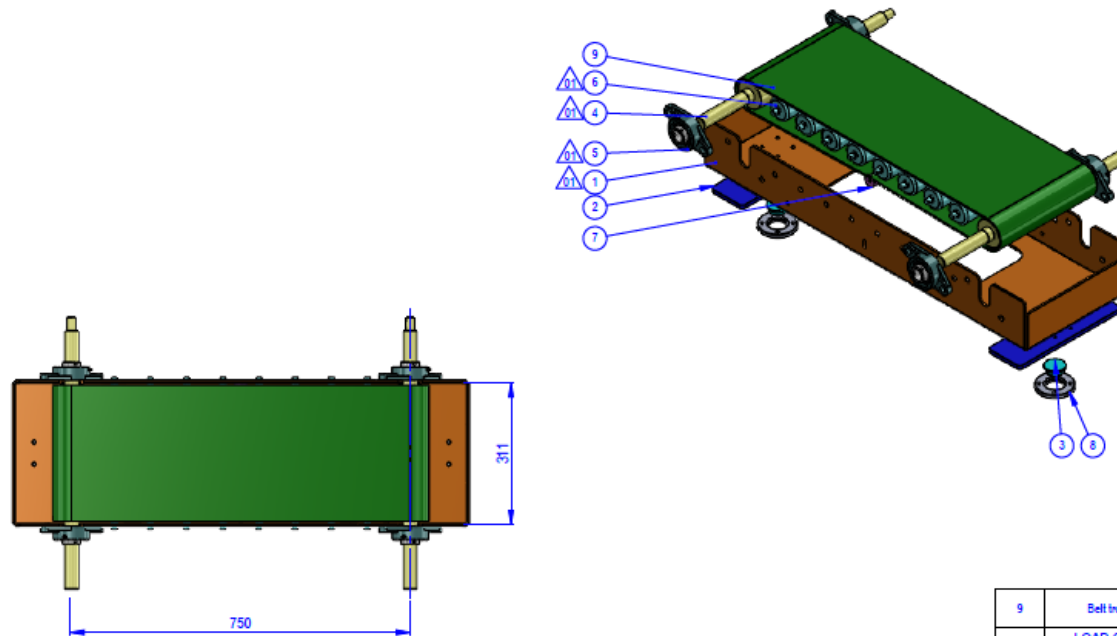


6	LOAD CELL 200KG							2
5	SKY20190008-0112	00	-	SS400	-	---	-	2
4	SKY20190008-0111	00	-	SS400	-	---	-	2
3	SKY20190008-0110	00	-	SS400	-	---	-	4
2	SKY20190008-0109	00	-	SS400	-	---	-	4
1	SKY20190008-0100	01	-	SS400	-	---	-	1
ITEM NO.	PART NUMBER	REV.	DESCRIPTION	MATERIAL / VENDOR	HARDNESS	FINISHED SIZE	SPA RE QTY.	00/QTY
FRESH SIZE		MATERIAL/ENDOR		HARDNESS	QTY	 Kasturba Medical University		
STANDARD ITEM NO		UNLESS OTHERWISE SPECIFIED, DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS		FINISH/TOLERANCE	SPARE QTY	PROJECT / PROCESS		
PROPRIETARY AND CONFIDENTIAL INFORMATION CONTAINED HEREIN IS THE PROPERTY OF KASTURBA MEDICAL UNIVERSITY AND IS TO BE USED ONLY FOR THE PURPOSES SPECIFIED HEREIN. ANY REPRODUCTION OR TRANSMISSION OF THIS INFORMATION WITHOUT THE WRITTEN PERMISSION OF KASTURBA MEDICAL UNIVERSITY IS PROHIBITED.		X ± 0.2		DESIGNER	DATE	DESCRIPTION		
		XX ± 0.05		DRAWN				
		XXX ± 0.03		CHECKER		DRUGS SKY20190008-0005 01		
		ANGLES: 0.1°-30°		DESIGN APPR				
		INSIDE RADIUS: 0.2 Min.		PROJECT NO		 THIRD ANGLE		
DRILLED & TAPPED HOLES ± 0.10 FINISH 0.4 MICROMETERS				1 OF 1				

THIRD ANGLE PROJECTION

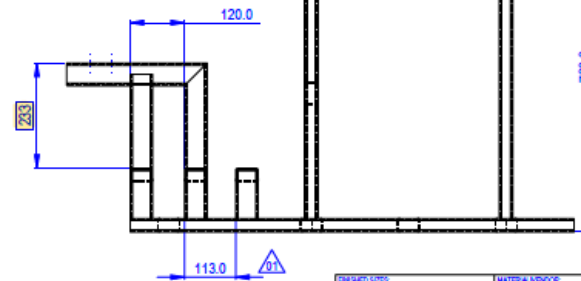
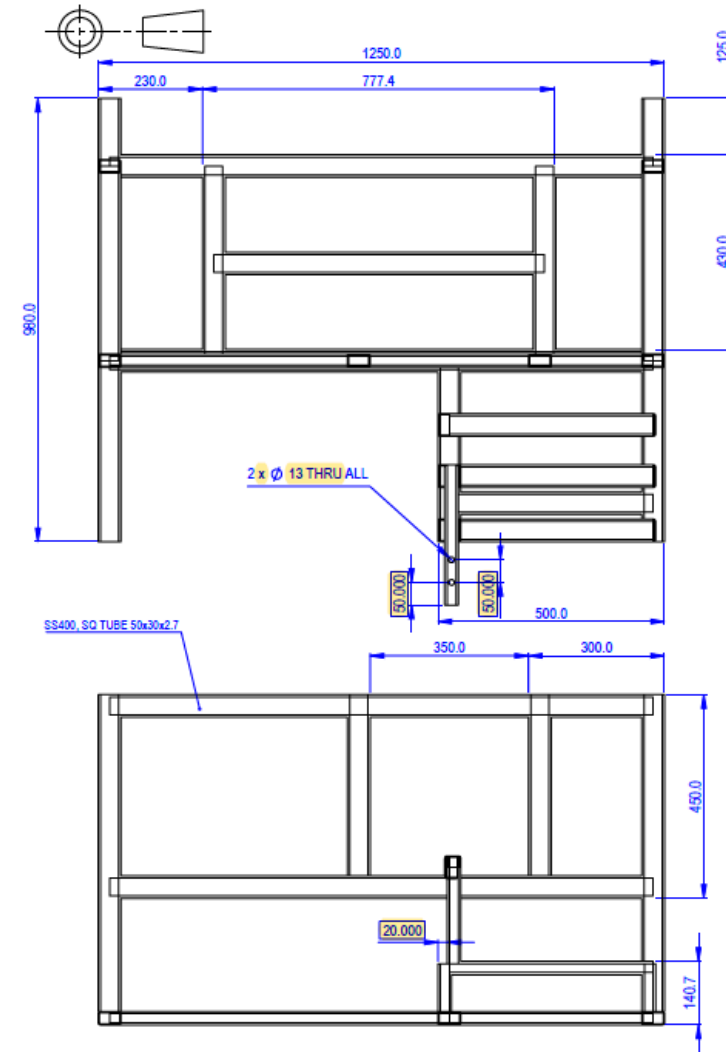


REVISIONS					
REV.	SO. NO	DESCRIPTION	DATE	NAME	CHECKER
00		PRELIMINARY RELEASED			
01			6/7/2019		



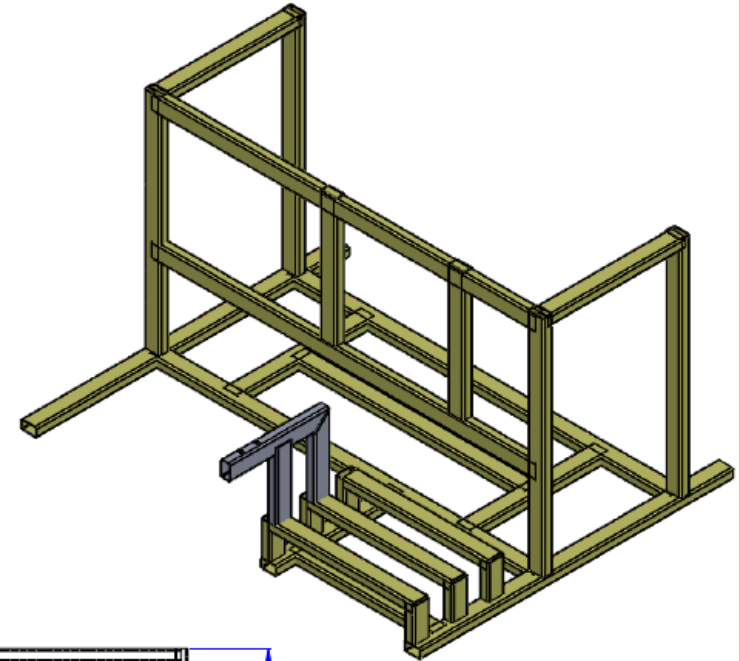
9	Belt truck						1	
8	LOAD CELL FLANGE_A	-	-	-	-	---	2	
7	SHAFT_C	-	-	-	-	---	1	
6	ROLLER_360	-	-	-	-	---	8	
5	HDH30		HDH - Ball Bearing Units - Cylindrical Hole, Casting Type- Rhomb Flanged Type				4	
4	SKY20190008-0121	01	-	-	-	---	2	
3	LOAD CELL FLANGE_B	-	-	-	-	---	2	
2	SKY20190008-0119	01	-	SS400	-	---	2	
1	SKY20190008-0116	01	-	SS400	-	---	1	
ITEM NO.	PART NUMBER	REV.	DESCRIPTION	MATERIAL / VENDOR	HARDNESS	FINISHED SIZE	SPA RE QTY.	00/QTY
DESIGNED BY: ---		MATERIAL/VENDOR: ---		HARDNESS: ---		QTY: ---		
STANDARD ITEM NO: ---		UNLESS OTHERWISE SPECIFIED, DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS		FINISHED TOLERANCE: ---		SPARE OFF: ---		
PROPRIETARY AND CONFIDENTIAL THE INFORMATION CONTAINED HEREIN IS THE SOLE PROPERTY OF KASICER UNIVERSITY. REPRODUCTION IN PART OR AS A WHOLE WITHOUT THE WRITTEN PERMISSION OF KASICER UNIVERSITY IS PROHIBITED.		X ±0.2 XX ±0.10 XXX ±0.05 ANGLES ±0.30° INSIDE RADIUS: 0.2 Max. CHAMFERS: 0.3 x 45° DRILLED & TAPPED HOLES ±0.10 FINISH 0.4 MICROMETERS		DESIGNER: ---		PROJECT PROCESS: ---		
				NAME: ---		DATE: ---		
				DRAFTSMAN: ---		DESCRIPTION: ---		
				CHECKED: ---		DATE: ---		
				DESIGN APPR: ---		PROJECT NO: ---		
						DRAWING NO: SKY20190008-0004		
						SCALE: 1:10		
						REVISION: 01		
						THIRD ANGLE		
						1 OF 1		

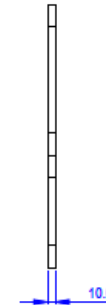
THIRD ANGLE PROJECTION

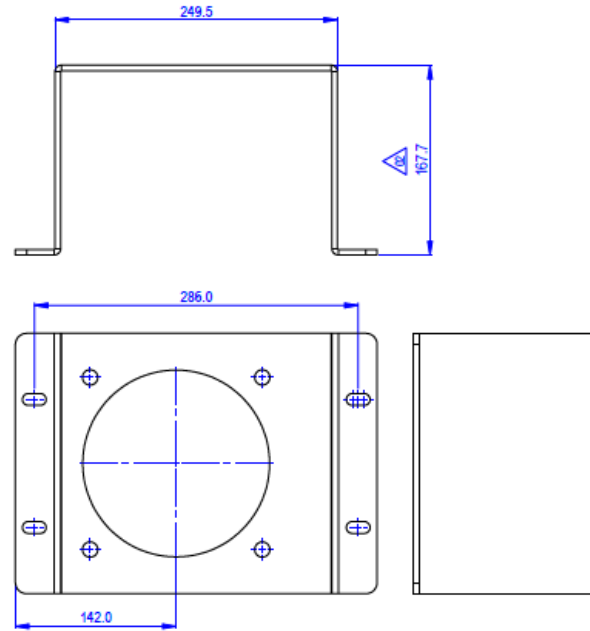


REVISIONS					
REV.	SO. NO	DESCRIPTION	DATE	NAME	CHECKER
00		PRELIMINARY RELEASED			
01			6/7/2019		

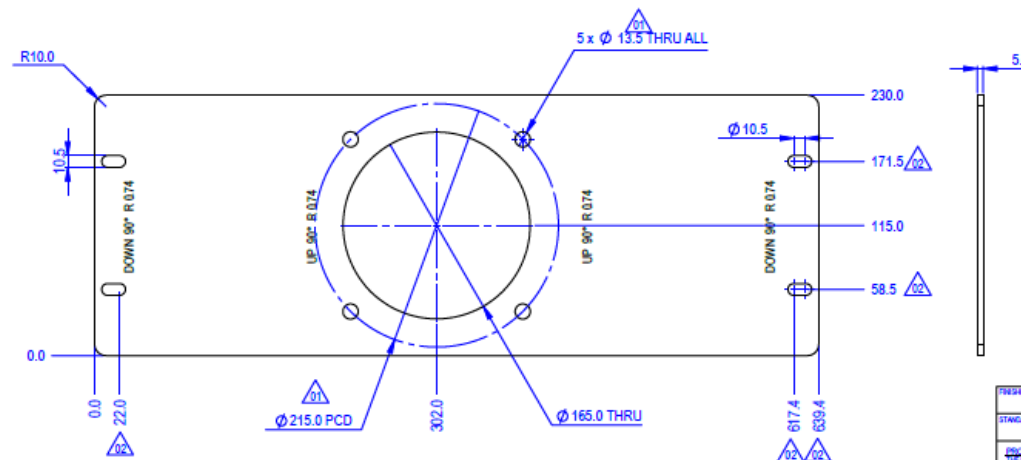
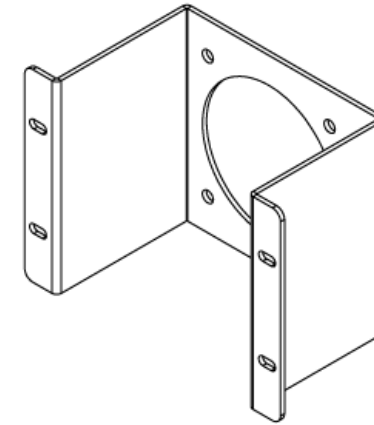
FINISHED SIZE	MATERIAL/NOTE	WALDRESS	QTY	 Kascisan University	
STANDARD ITEM NO.	SS400	FINISHED/NOT	1		
PROPRIETARY AND CONFIDENTIAL THE INFORMATION CONTAINED IN THIS DRAWING IS THE SOLE PROPERTY OF KALAMART UNIVERSITY REPRODUCTION IN PART OR AS A WHOLE WITHOUT THE WRITTEN PERMISSION OF KALAMART UNIVERSITY IS PROHIBITED.		UNLESS OTHERWISE SPECIFIED, DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS		PROJECT/PROCESS	
		X ±0.2		DESIGNER	
		XXX ±0.003		DATE	
		ANGLE ±0.30°		DRAFTER	
		INSIDE RADIUS 0.2 Min.		CHECKER	
		CHAMFERS 0.3 x 45°		DATE	
		DRILLED & TAPPED HOLES ±0.10		SCALE	
		FINISH 0.4 MICROMETERS		THIRD ANGLE	



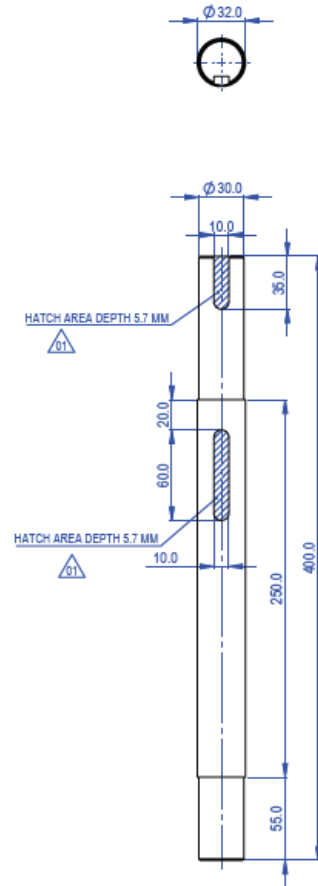
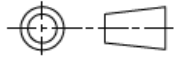
[illegible] Kasetsart University



REVISIONS					
REV.	SO. NO	DESCRIPTION	DATE	NAME	CHECKER
00		PRELIMINARY RELEASED			
01			6/6/2019		
02			7/4/2019		

[illegible]

THIRD ANGLE PROJECTION

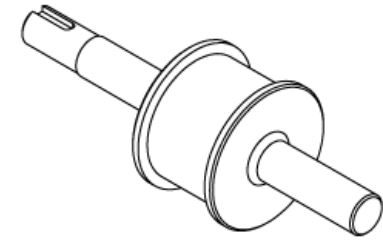
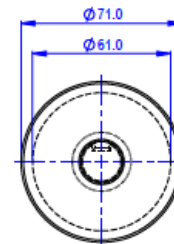
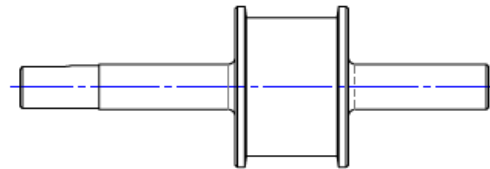
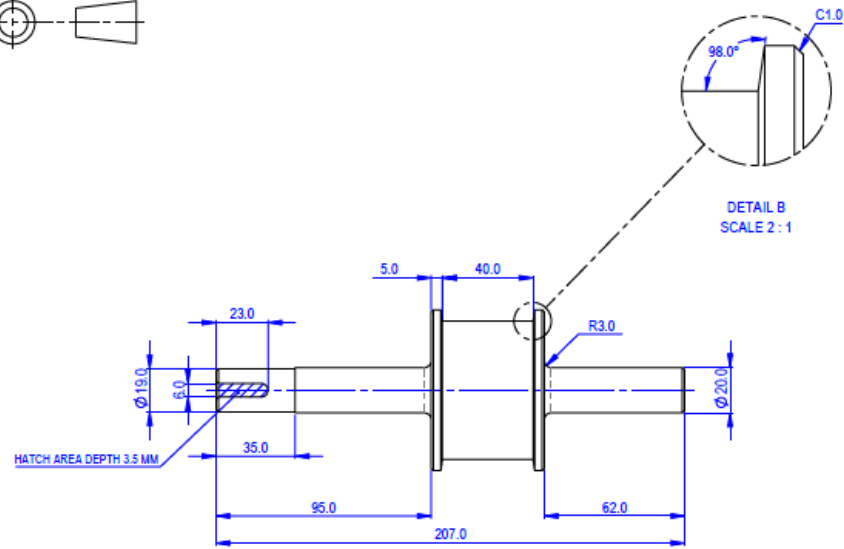
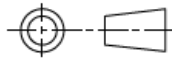


REVISIONS					
REV.	SO. NO	DESCRIPTION	DATE	NAME	CHECKER
00		PRELIMINARY RELEASED			
01			6/6/2019		



FINISHED SIZE: ---	MATERIAL SPEC: SS400	TOLERANCE: -	QTY: 1	 Kasturba University	
STANDARD ITEM NO: -	UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS	FINISH/TREATMENT: -	SPARE QTY: -		
PROPRIETARY AND CONFIDENTIAL THIS DRAWING IS THE PROPERTY OF KASTURBA UNIVERSITY REPRODUCTION IN WHOLE OR AS A WHOLE WITHOUT THE WRITTEN PERMISSION OF KASTURBA UNIVERSITY IS PROHIBITED.	X ±0.2 XX ±0.05 XXX ±0.03 ANGLES ±0.30° INSIDE RADIUS: 0.5 Min. CHAMFERS: 0.3 x 45° DRILLED & TAPPED HOLES ±0.10 FINISH 0.4 MICROMETERS	DESIGNER: - DRAFTER: - CHECKER: - DESIGN APPR: - PROJECT NO: -	DATE: 26/02/2019 DATE: 26/02/2019 DATE: 26/02/2019	PROJECT PROPOSED: ---	
				DESCRIPTION: -	
				DRAWING NO: SKY20190008-0106	
				REVISION: 01	
				 THIRD ANGLE 1 OF 1	

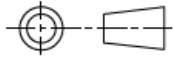
THIRD ANGLE PROJECTION



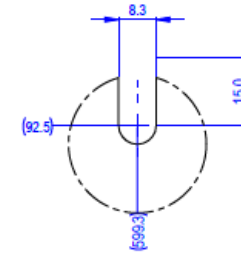
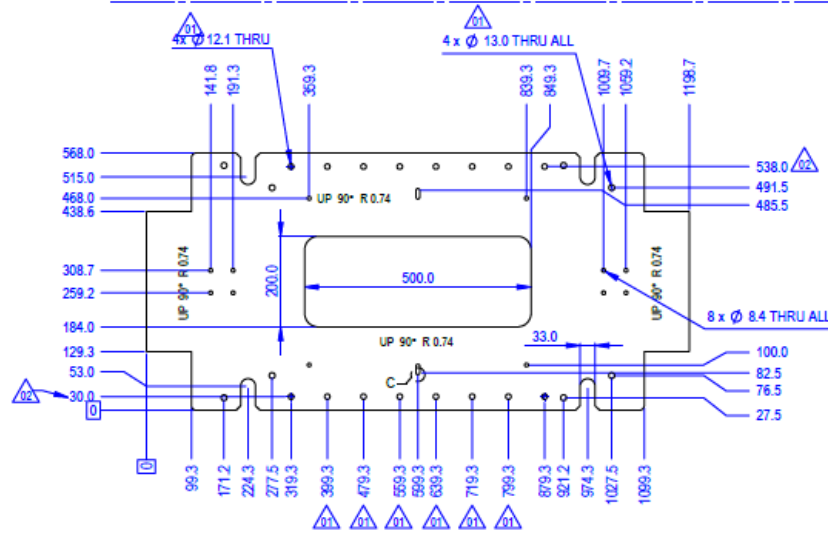
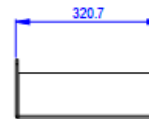
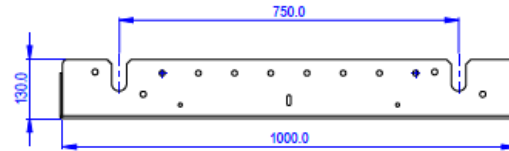
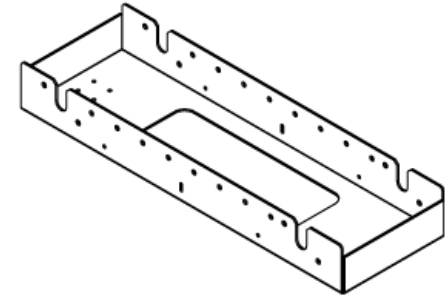
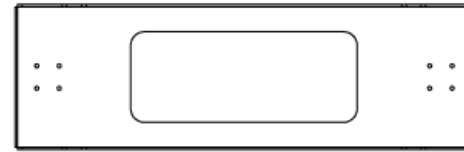
REVISIONS					
REV.	SO. NO	DESCRIPTION	DATE	NAME	CHECKER
00		PRELIMINARY RELEASED			

FINISHED SIZE	MATERIAL/VENDOR	HARDNESS	QTY	 Kasar University	
---	SS400	-	1		
STANDARD ITEM NO	UNLESS OTHERWISE SPECIFIED, DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS	FINISHED SIZE	SPARE QTY	PROJECT / PROCESS	
-				---	
PROPRIETARY AND CONFIDENTIAL THIS DRAWING IS THE PROPERTY OF KASAR UNIVERSITY. REPRODUCTION IN WHOLE OR IN PART WITHOUT THE WRITTEN PERMISSION OF KASAR UNIVERSITY IS PROHIBITED.	X 40.2 XXX 40.2 XXX 40.2 ANGLE: 40.2° INSIDE RADIUS: 0.2 Max. CHAMFERS: 0.3 x 45° DRILLED & TAPPED HOLES: ± 0.10 FINISH: 0.4 MICROMETERS	DESIGNER	NAME	DATE	DESCRIPTION
				20/02/2019	
		DRAWN BY		20/02/2019	
		CHECKED		20/02/2019	
		DESIGN APPR		20/02/2019	
		PROJECT NO		20/02/2019	
				A3	1:2
		 THIRD ANGLE		PAGE 1 OF 1	

THIRD ANGLE PROJECTION



REVISIONS					
REV.	SO. NO	DESCRIPTION	DATE	NAME	CHECKER
00		PRELIMINARY RELEASED			
01			6/6/2019		
02			6/7/2019		



DETAIL C
SCALE 1 : 1

FINISH CODE: ---		MATERIAL/MOD: SS400		WORKSHEET: -		CITY: 1		 Kasetsart University	
STANDARD ITEM NO: -		UNLESS OTHERWISE SPECIFIED, DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS		PROJECT/CLIENT: -		DATE: 20/02/2019		PROJECT / PROCESS: ---	
PROPRIETARY AND CONFIDENTIAL X 45° R0.4 R0.3 R0.2 R0.1 R0.05 INSIDE RADIUS: 0.2 Max. CHAMFERS: 0.3 x 45° DRILLED & TAPPED HOLES AS IS FINISH 0.4 MICROMETERS				DESIGNER: -		NAME: -		DESCRIPTION: -	
				DRAWN: -		NAME: -		DATE: 20/02/2019	
				CHECKER: -		NAME: -		DATE: 20/02/2019	
				DESIGN APPR: -		NAME: -		DATE: 20/02/2019	
				PROJECT NO: -		NAME: -		DATE: 20/02/2019	
						THIRD ANGLE		1 OF 1	

หมายเหตุ : แบบ 2 มิติที่แสดงเป็นเพียงบางส่วน โดยทางผู้วิจัยได้จัดทำแบบ 2 มิติของทุกชิ้นส่วนเป็นไฟล์ PDF แนบไปใน CD ของงานวิจัย

ข้อมูลจากการทดสอบยางดินตะขบด้วยเครื่องทดสอบ

ผลการวัดค่าน้ำหนักและ Torque ที่เกิดขึ้นจากสายพาน

ค่าที่ได้จากเซนเซอร์เมื่อเข้าโปรแกรมอ่านค่าจะสามารถอ่านค่าที่เปลี่ยนแปลงได้ทุกๆ 1 วินาที โดยค่าที่นำไปใช้ในการคำนวณทั้งน้ำหนักและ torque จะเป็นค่าเฉลี่ยดังแสดงในตารางที่ 1

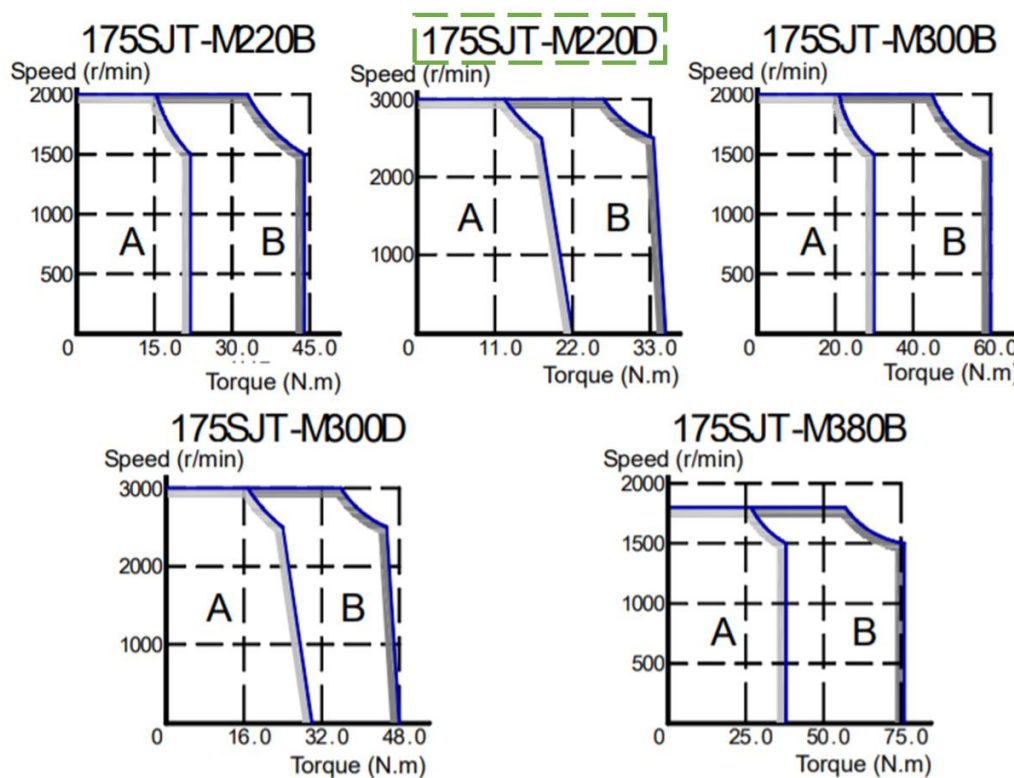
ตารางที่ 1 ผลการเก็บค่าจากเซนเซอร์ในการทดสอบยางตีนตะขา

Time (sec)	500rpm		800rpm		1000rpm	
	T (Nm)	W (Kg)	T (Nm)	W (Kg)	T (Nm)	W (Kg)
1	8.255	109.696	5.969	76.644	4.989	58.144
2	8.185	80.448	6.154	108.126	4.645	86.345
3	7.568	92.664	6.154	108.126	5.536	75.897
4	8.001	85.54	5.422	92.141	5.377	76.481
5	7.727	91.719	6.333	100.76	4.804	56.09
6	7.752	110.483	6.268	79.318	5.9	79.903
7	7.707	111.508	7.383	108.852	4.989	46.424
8	7.707	109.69	6.333	84.573	4.67	63.777
9	7.727	80.408	5.969	98.544	5.182	92.484
10	8.255	109.69	5.606	118.372	5.332	61.824
11	8.708	115.276	5.969	79.503	4.695	76.642
12	9.574	90.712	5.447	70.18	4.645	70.562
13	8.364	93.372	6.039	67.361	5.855	76.561
14	7.822	100.255	5.949	81.253	4.74	60.457
15	7.931	84.894	7.065	63.254	4.919	81.253
16	7.822	116.71	6.403	92.242	5.72	50.413
17	8.115	86.706	6.064	64.041	5.72	50.413
18	7.568	89.001	5.307	78.073	4.804	72.695
19	7.772	103.337	6.472	79.177	4.371	65.791
20	8.638	95.606	6.238	61.521	4.784	38.029
Average	8.06	97.89	6.127	85.60	5.083	67.01

ค่าน้ำหนักที่ได้จาก loadcell สามารถนำไปคำนวณเป็นค่า dynamic load ซึ่งใช้ในการคำนวณ ส่วนค่า torque จากการตั้งความฝืดของสายพานสามารถคำนวณเป็นแรงเสียดทานในการเคลื่อนที่ (motion resistance) ได้

Input Torque ของมอเตอร์

มอเตอร์ไฟฟ้าที่ใช้ในเครื่องทดสอบยางดินตะขापเป็น AC Servo Motor GSK รุ่น 175SJT-M220D มี torque สูงสุดอยู่ที่ 22 Nm ส่งกำลังผ่านเกียร์ทดที่ 1:10 โดย Torque ของมอเตอร์จะแปรผันตามความเร็วรอบดังแสดงในภาพที่ 1 โดยค่า torque ของมอเตอร์ที่เกิดขึ้นจากการป้อนค่าความเร็วในการทดลองดังแสดงในตารางที่ 2



ภาพที่ 1 ความสัมพันธ์ของความเร็วรอบกับ torque มอเตอร์

ตารางที่ 2 ค่า torque ที่ความเร็วต่างๆ ที่ได้จากกราฟความสัมพันธ์

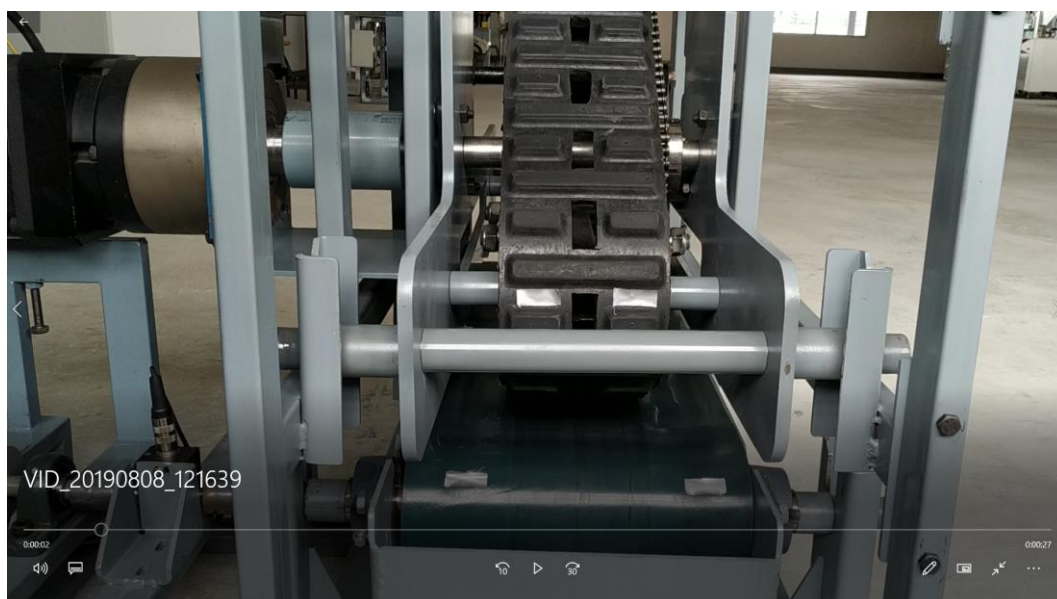
ความเร็วรอบมอเตอร์ (RPM)	torque มอเตอร์ (N.m)	torque ผ่านเกียร์ทด (mm/s)
500	21.120	211.20
800	20.592	205.92
1000	20.240	202.40

ความเร็วของยางตีนตะขาและสายพาน

ความเร็วของยางตีนตะขาและความเร็วของสายพานสามารถใช้การนับรอบของการเคลื่อนที่เทียบกับเวลาจากการบันทึกวีดิโอขณะเครื่องทำงานเพื่อหาความเร็วดังแสดงในภาพที่ 2 ผลจากการวัดความเร็วของยางตีนตะขาและสายพานดังแสดงในตารางที่ 3 โดยค่าความเร็วที่ได้สามารถนำไปหาค่า wheel slip ระหว่างยางกับสายพานได้

ตารางที่ 3 ความเร็วยางตีนตะขาและความเร็วสายพานที่แต่ละความเร็วรอบมอเตอร์

ความเร็วรอบมอเตอร์ (RPM)	ความเร็วยางตีนตะขา (mm/s)	ความเร็วสายพาน (mm/s)
500	350.88	341.50
800	561.31	542.98
1000	698.52	678.72



ภาพที่ 2 การบันทึกวีดิโอเพื่อหาความเร็วยางตีนตะขาและสายพาน