



การลดการต้านทานการหมุนกลิ้งของล้อยางตันด้วยการปรับ
สัดส่วนหน้าตัดยางชั้นนอกและชั้นใน
**Decreasing Rolling Resistance of Solid Tire by Variation of
Inner and Outer Sections**

เพทาย รัตนดิลก ณ ภูเก็ต
Petai Rattanadilok Na Phuket

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of
Master of Engineering in Mechanical Engineering
Prince of Songkla University**

2554

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

ชื่อวิทยานิพนธ์ การลดการต้านทานการหมักกลิ้งของส้อย่างต้นด้วยการปรับ
สัดส่วนหน้าตัดยางชั้นนอกและชั้นใน
ผู้เขียน นายแพทย์ รัตนดิถก ณ ฎเกื้อต
สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

คณะกรรมการสอบ

.....
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เจริญยุทธ เดชวายุกุล)

.....ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.พทุทธิกร สมิตไมตรี)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

.....กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เจริญยุทธ เดชวายุกุล)

.....
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิริยะ ทองเรือง)

.....กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิริยะ ทองเรือง)

.....กรรมการ
(ดร.ฐานันดรศักดิ์ เทพญา)

.....กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ทศนพ กำเนิดทอง)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง
ของการศึกษา ตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

.....
(ศาสตราจารย์ ดร.อมรรัตน์ พงศ์คารา)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

ชื่อวิทยานิพนธ์	การลดการต้านทานการหมักกลิ้งของล้อยางต้นด้วยการปรับ สัดส่วนหน้าตัดยางชั้นนอกและชั้นใน
ผู้เขียน	นายเพทาย รัตนดิถก ณ ฎุเกีต
สาขาวิชา	วิศวกรรมเครื่องกล
ปีการศึกษา	2554

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการลดความต้านทานการหมักกลิ้งของล้อยางต้นที่มีผลต่อการประหยัดพลังงานในการใช้งานในรถโฟล์คคลิฟท์ โดยตัวแปรที่ทำการศึกษาคือ ดอกยาง แก้มยาง รูปร่างหน้าตัดและสัดส่วนของยางต้นชั้นใน สำหรับวิธีการศึกษาที่นำมาใช้ในการศึกษา คือ การใช้แบบจำลองด้วยวิธีไฟไนต์อิลิเมนต์ ทำนายผลของการปรับเปลี่ยนตัวแปรต่างๆเพื่อหารูปแบบล้อยางที่ลดค่าความต้านทานการหมักกลิ้ง โดยมีการยืนยันผลค่าการต้านทานการหมักกลิ้งกับการทดสอบล้อยางต้นจริงในห้องทดลองจำนวน 3 ยี่ห้อ ในขั้นตอนเบื้องต้นของการจำลองเพื่อหารูปแบบการจำลองที่เหมาะสม จากนั้นจึงทำการพัฒนาปรับเปลี่ยนโมเดลดอกยาง แก้มยาง รูปร่างหน้าตัดและสัดส่วนของยางต้นชั้นใน ไปตามลำดับชั้น โดยเริ่มทำการพัฒนาจากโมเดลของล้อยางต้นในห้องทดลองที่มีผลค่าการต้านทานการหมักกลิ้งต่ำสุด และไม่มีการเปลี่ยนค่าสมบัติทางกลของล้อยางทั้งสองชั้นในแบบจำลองจากการศึกษาพบว่าเมื่อล้อยางต้นมีความแข็งเพิ่มขึ้นจากการปรับเปลี่ยนโมเดล ส่งผลให้ค่าการต้านทานการหมักกลิ้งลดลง เนื่องจากกระชวยและพลังงานความเครียดลดลง ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่า การลดค่าการต้านทานการหมักกลิ้งของล้อยางต้นสามารถทำได้โดยเพิ่มปริมาณยางในและลดปริมาณยางนอก ซึ่งยางในมีความแข็งมากกว่าจึงส่งผลให้ความแข็งโดยรวมของล้อยางต้นเพิ่มขึ้น

Thesis Title Decreasing Rolling Resistance of Solid Tire by Variation of
Inner and Outer Sections

Author Mr.Petai Rattanadilok Na Phuket

Major Program Mechanical Engineering

Academic Year 2011

ABSTRACT

The objective of this study is to decrease the rolling resistance of integral solid tire by slightly changing the inner and outer shape sections. The rolling resistance is considered as important roles on reducing energy for using in forklift truck. Not only the formulation of rubber material can reduce rolling resistance but also, from the point of view of mechanics, the rolling resistance may reduce by geometry of cross section. In this work, there are four tasks are performed. First, the 3 brand of existing commercial solid tires in Thailand is investigated for cross sections and tested for rolling resistance. Second, the finite element method is used to simulate rolling resistance in order to develop simulation models. Third, the finite element results are validated with experiment results. Fourth, the finite element method is used to study the effect of inner section and outer section such as size of side wall and tread on rolling resistance. It is found that the increasing of inner section and decreasing of side wall slightly affect on stiffness of solid tire significantly. The stiffness of solid tire is higher due to those variations, and also decrease rolling resistance apparently.

กิตติกรรมประกาศ

ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ทั้งสองท่านคือ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เจริญยุทธ เดชวาญกุล และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วิริยะ ทองเรือง ที่กรุณาให้คำปรึกษา คำแนะนำ ข้อเสนอแนะที่มีประโยชน์ในการทำวิจัยรวมถึงการเขียนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. พงุทธิกร สมิตไมตรี ดร. ฐานันดรศักดิ์ เทพญา และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ทศนพ กำเนิดทอง คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาให้คำแนะนำและตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์ให้ถูกต้องและสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ที่ให้เงินทุนอุดหนุนการวิจัย

ขอขอบคุณ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตหาดใหญ่ ที่ให้ความอนุเคราะห์สำหรับสถานที่และเครื่องมือในการทำวิจัย ศูนย์กสิกรรมมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการประมวลผลแบบจำลองไฟในต้อเลนเมนต์ ศูนย์วิศวกรรมพลังงาน มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการให้คำแนะนำและวิธีการใช้เครื่องมือ

บุคลากรภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลทุกท่านที่ให้ความอนุเคราะห์ช่วยเหลือในการประสานงานและแนะนำวิธีการใช้เครื่องมือ

ขอบคุณ เพื่อนๆ พี่ๆ และน้องๆ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล ตลอดจนทุกท่านที่มีได้กล่าวมาไว้ ณ ที่นี้ที่มีส่วนช่วยในการทำวิจัยและให้คำแนะนำ วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงสำเร็จสมบูรณ์ด้วยดี

เพทาย รัตนดิลก ณ ภูเก็ต

สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	(6)
รายการตาราง	(8)
รายการภาพประกอบ	(9)
สัญลักษณ์คำย่อและตัวย่อ	(13)
1 บทนำ	
1.1 บทนำต้นเรื่อง	1
1.2 การตรวจเอกสาร	2
1.3 วัตถุประสงค์	9
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	9
1.5 ขอบเขตการวิจัย	9
2 ทฤษฎี	
2.1 พลังงานสูญเสียบ	10
2.2 ความต้านทานการหมุนกลิ้งของล้อยางตัน	12
2.3 ผลกระทบจากการพัฒนาเพื่อลดค่าความต้านทานการหมุนกลิ้ง	15
2.4 สมบัติทางกลของวัสดุ	16
2.5 แบบจำลองฟังก์ชันพลังงานความเครียด	18
2.6 การทดสอบสมบัติทางกลของวัสดุ	23
3 วิธีการวิจัย	
3.1 วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย	25
3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์	25
3.3 ขั้นตอนและวิธีวิจัย	35
4 ผลการทดลอง	
4.1 สมบัติทางกลของยาง	43
4.2 ค่าสัมประสิทธิ์พลังงานความเครียด	45
	(6)

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.3 ผลการทดสอบค่าความต้านทานการหมุนกลิ้ง	50
5 ผลการศึกษาค่าความต้านทานการหมุนกลิ้งจากแบบจำลอง	
5.1 ผลการศึกษาค่าความต้านทานการหมุนกลิ้งของล้อยางตัน	62
5.2 การพัฒนารูปแบบเพื่อลดค่าความต้านทานการหมุนกลิ้ง	72
6 บทสรุปและวิจารณ์ผล	
6.1 ค่าความต้านทานการหมุนกลิ้งของล้อยางตันในห้องตลาด	93
6.2 สมบัติทางกลของยาง	94
6.3 การวิเคราะห์ยืนยันความถูกต้องของแบบจำลองไฟไนต์อีเลเมนต์	94
6.4 การศึกษาและพัฒนาตัวแปรต่างๆที่ส่งผลต่อค่าความต้านทานการหมุนกลิ้ง	95
เอกสารอ้างอิง	96
ภาคผนวก	
ก ขั้นตอนการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์อีเลเมนต์	100
ข แบบโมเดลล้อยาง	105
ประวัติผู้เขียน	114

รายการตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 สัมประสิทธิ์ค่าความต้านทานการหมุนกลิ้งระหว่างล้อและพื้นผิวต่างๆ	11
3.1 ลักษณะจำเพาะของล้อยางตันที่ใช้ในการวิจัย	25
3.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันและภาระน้ำหนัก	30
3.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบและความเร็วทดสอบเชิงเส้น	34
4.1 ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าความเค้นของล้อยางตัน	44
4.2 ค่าสัมประสิทธิ์พลังงานความเครียดของยางชนิดต่างๆ	46
4.3 การวิเคราะห์ ANOVA แบบ 2 ปัจจัย	56
4.4 ผลค่าความต้านทานการหมุนกลิ้งของแต่ละยี่ห้อ	57
4.5 ผลการยุบตัวล้อยางของแต่ละยี่ห้อ	58
5.1 จำนวนอิลิเมนต์ของล้อยางแต่ละโมเดล	62
5.2 รายละเอียดข้อมูลที่โน้ดต่างๆ	64
5.3 ผลความแตกต่างของค่าความต้านทานการหมุนกลิ้งจากการจำลอง เปรียบเทียบกับ ผลการทดสอบ	70
5.4 ค่าภาระน้ำหนักจากการจำลองเปรียบเทียบกับทดสอบ	70
5.5 ผลการตรวจสอบอิลิเมนต์ล้อยาง A	73
5.6 ข้อมูลจำเพาะและค่าความต้านทานการหมุนกลิ้งของล้อยาง	76
5.7 ค่าความเค้นและความเครียดหน้าตัดยาง A-A เมื่อยางรับภาระน้ำหนัก	78
5.8 ค่าความเครียดเฉือนภายในหน้าตัด B-B และ C-C เมื่อยางได้รับภาระน้ำหนัก และเกิดการหมุนกลิ้ง	83
5.9 แรงดันสัมผัส เมื่อยางได้รับภาระน้ำหนักและเกิดการหมุนกลิ้ง	88
5.10 พลังงานความเครียดของล้อยางตัน	91

รายการภาพประกอบ

รูปที่	หน้า
1.1 โครงสร้างหน้าตัดของล้อยางตันสองชั้น	1
1.2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วกับค่าความต้านทานการหมุนกลิ้ง	2
1.3 (ก) ลักษณะสัดส่วนล้อยาง (ข) ผลของลักษณะสัดส่วนล้อยางต่อ RR	3
1.4 การเปลี่ยนแปลงของค่ามุมสัมผัสสูญเสียต่ออุณหภูมิของวัสดุต่างกัน	3
1.5 ค่าความต้านทานการหมุนกลิ้งของยาง ไบแอสและยางเรเดียลที่ขนาดใกล้เคียงกัน	4
1.6 แรงและระยะต่างๆบนชุดทดสอบ	5
1.7 การวัดค่าความต้านทานการหมุนกลิ้งบนถนนจำลองแบบพื้นผิวเรียบ	6
1.8 ระบบทดสอบค่าความต้านทานการหมุนกลิ้งของล้อยาง	6
1.9 ระบบทดสอบค่าความต้านทานการหมุนกลิ้งของล้อยางโดยหลักเพนดูลัม	7
1.10 ระบบทดสอบค่าความต้านทานการหมุนกลิ้งของล้อยาง	7
2.1 สัดส่วนการสูญเสียพลังงานของรถยนต์นั่งส่วนบุคคลในขณะเคลื่อนที่	10
2.2 แสดงแรงต่างๆที่กระทำต่อล้อยางตัน	12
2.3 แสดงรัศมีภายนอกและภายในของล้อยางตัน	14
2.4 ความสัมพันธ์ของปัจจัยต่างๆ ต่อค่าความต้านทานการหมุนกลิ้ง	14
2.5 ผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกายภาพต่างๆ ของล้อยาง	15
2.6 การเปลี่ยนรูปของยางภายใต้แรงกด	16
2.7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกดและความเครียดกด	17
2.8 แสดงการทดสอบยางในลักษณะต่างๆ	23
2.9 การเทียบการทดสอบแรงกดในแนวแรงเมื่อวัสดุมีสมบัติอัดตัวไม่ได้	24
3.1 ลักษณะจำเพาะของล้อยางตันที่ใช้ในงานวิจัย	25
3.2 ประแจปอนด์	26
3.3 กระทะล้อแบบ 2 ซีก	26
3.4 เครื่องทดสอบสมบัติวัสดุเอนกประสงค์	26
3.5 การติดตั้ง Displacement Transducer	27
3.6 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันไฟฟ้ากับระยะยืดหดของ Displacement Transducer	27
3.7 Pressure Sensor	28
3.8 ตรวจสอบแรงที่เกิดขึ้นด้วยโพลดเซลล์	28

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.9 ความสัมพันธ์ระหว่างการคำนวณแรงจากความดันของ Pressure Sensor กับแรงที่เกิดขึ้น	29
3.10 แท่นอัดไฮดรอลิก	30
3.11 หัวเจาะ	30
3.12 หินเจียร	30
3.13 เครื่องทดสอบล้อยางคัน	31
3.14 ส่วนติดตั้งล้อทดสอบ	32
3.15 การประกอบล้อยางเข้ากับกระทะล้อ	32
3.16 การติดตั้งล้อยางเข้ากับเครื่องทดสอบ	33
3.17 ผู้ควบคุมความเร็วของเครื่องทดสอบ	34
3.18 แผนภูมิแสดงขั้นตอนหลักในการวิจัย	35
3.19 แรงและระยะต่างๆบนชุดทดสอบ	36
3.20 แสดงตำแหน่งติดตั้งอุปกรณ์ตรวจรู้แรงบิด	37
3.21 ตัวอย่างตารางบันทึกผลการทดลองและขั้นตอนที่ทำการบันทึกค่า	39
3.22 แสดงบริเวณส่วนของล้อยางสำหรับตัดแบ่งเพื่อทำชิ้นงานทดสอบ	40
3.23 การเจาะยางให้ได้ทรงกระบอก	41
3.24 ชิ้นงานภายหลังการเจาะ	41
3.25 การเจียรปรับแต่งความสูง (ก) เจียรด้วยหินเจียรแทน (ข) ชิ้นงานภายหลังการเจียร	41
3.26 ทดสอบการกดด้วยเครื่องทดสอบสมบัติวัสดุเอนกประสงค์	42
4.1 ผลการทดสอบทางกลของยางในและยางนอกของแต่ละยี่ห้อ	43
4.2 แผนภูมิขั้นตอนการยืนยันความถูกต้องสัมประสิทธิ์พลังงานความเครียด	45
4.3 แบบจำลองชิ้นงานทดสอบแรงกด	45
4.4 เปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ค่าความเค้นและความเครียดจากค่าสัมประสิทธิ์ โดยการจำลองกับผลการทดสอบชิ้นงานทดสอบของล้อยางคันชั้นใน ยี่ห้อ A	47
4.5 เปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ค่าความเค้นและความเครียดจากค่าสัมประสิทธิ์ โดยการจำลองกับผลการทดสอบชิ้นงานทดสอบของล้อยางคันชั้นนอก ยี่ห้อ A	47
4.6 เปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ค่าความเค้นและความเครียดจากค่าสัมประสิทธิ์ โดยการจำลองกับผลการทดสอบชิ้นงานทดสอบของล้อยางคันชั้นใน ยี่ห้อ B	48

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.7 เปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ค่าความเค้นและความเครียดจากค่าสัมประสิทธิ์ โดยการจำลองกับผลการทดสอบชิ้นงานทดสอบของล้อยางตันชั้นนอก ยี่ห้อ B	48
4.8 เปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ค่าความเค้นและความเครียดจากค่าสัมประสิทธิ์ โดยการจำลองกับผลการทดสอบชิ้นงานทดสอบของล้อยางตันชั้นใน ยี่ห้อ C	49
4.9 เปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ค่าความเค้นและความเครียดจากค่าสัมประสิทธิ์ โดยการจำลองกับผลการทดสอบชิ้นงานทดสอบของล้อยางตันชั้นนอก ยี่ห้อ C	49
4.10 ภาพตัวอย่างขณะทดสอบ	50
4.11 ผลการทดสอบล้อยางตัน A ล้อที่ 1	51
4.12 ผลการทดสอบล้อยางตัน A ล้อที่ 2	51
4.13 ผลการทดสอบล้อยางตัน B ล้อที่ 1	52
4.14 ผลการทดสอบล้อยางตัน B ล้อที่ 2	52
4.15 ผลการทดสอบล้อยางตัน C ล้อที่ 1	53
4.16 ผลการทดสอบล้อยางตัน C ล้อที่ 2	53
4.17 เปรียบเทียบผลทดสอบระหว่างล้อทดสอบ 1 และ 2 ของล้อยาง A	54
4.18 เปรียบเทียบผลทดสอบระหว่างล้อทดสอบ 1 และ 2 ของล้อยาง B	54
4.19 เปรียบเทียบผลทดสอบระหว่างล้อทดสอบ 1 และ 2 ของล้อยาง C	55
4.20 ผลค่าความต้านทานการหมุนกลิ้งเทียบกับภาระน้ำหนักของล้อยางตันแต่ละยี่ห้อ	57
4.21 ผลการยุบตัวล้อยางเทียบกับภาระน้ำหนักของล้อยางตันแต่ละยี่ห้อ	58
5.1 โมเดลล้อยางตัน A เทียบกับภาพถ่ายจริง	59
5.2 โมเดลล้อยางตัน B เทียบกับภาพถ่ายจริง	60
5.3 โมเดลล้อยางตัน C เทียบกับภาพถ่ายจริง	61
5.4 ผลการกระจายภาระน้ำหนักในขณะรับภาระน้ำหนัก	63
5.5 ผลการกระจายภาระน้ำหนักในขณะรับภาระน้ำหนักและกำลังหมุนทวนเข็มนาฬิกา	63
5.6 ค่าความต้านทานการหมุนกลิ้งและภาระน้ำหนักที่เกิดขึ้นจากการจำลองที่ระยะยุบ เดียวกับการทดสอบของล้อยาง A	66
5.7 ค่าความต้านทานการหมุนกลิ้งและภาระน้ำหนักที่เกิดขึ้นจากการจำลองที่ระยะยุบ เดียวกับการทดสอบของล้อยาง B	67

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.8 ค่าความต้านทานการหมุนกลิ้งและภาระน้ำหนักที่เกิดขึ้นจากการจำลองที่ระยะยุบ เกี่ยวกับการทดสอบของตัวอย่าง C	68
5.9 ภาระน้ำหนักเทียบกับระยะยุบจากการทดสอบที่ยังไม่ทราบค่าภาระน้ำหนักที่แน่ชัด และการจำลองแต่ละตัวอย่าง	69
5.10 ขั้นตอนการตรวจสอบจำนวนอิเลเมนต์	72
5.11 รายละเอียดการปรับเปลี่ยนทิศทางของแผนภูมิ	74
5.12 ขั้นตอนการพัฒนารูปแบบตัวอย่างต้น	75
5.13 บริเวณหน้าตัดตัวอย่างเพื่อแสดงค่าความเค้นและความเครียด	77
5.14 บริเวณหน้าตัดตัวอย่างเพื่อแสดงค่าความเครียดในขณะรับภาระน้ำหนัก และเกิดการหมุนกลิ้ง	77

สัญลักษณ์คำย่อและตัวย่อ

A	พื้นที่หน้าตัดของยางเมื่อมีแรงกระทำ
A_0	พื้นที่หน้าตัดของยางเมื่อไม่มีแรงกระทำ
C_{ijk}	สัมประสิทธิ์พลังงานความเครียด
D	เส้นผ่านศูนย์กลางหรือความกว้าง ขาวของชิ้นงาน
E	ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของยางที่ความเครียดใดๆ
F	แรงที่กระทำต่อชิ้นงาน
F_R	ค่าความต้านทานการหมุนกลิ้ง
FEM	Finite Element Method
G	ค่าโมดูลัสเฉือน
I_1, I_2, I_3	Three Invariants of the Green Deformation Tensor
L	ความหนาของยางเมื่อมีแรงกระทำ
L_0	ความหนาของยางเมื่อไม่มีแรงกระทำ
ΔL	คือความยาวที่เปลี่ยนไปเมื่อชิ้นงานถูกแรงกระทำ
M	มวล
N	จำนวนข้อมูลทั้งหมด
P	กำลังไฟฟ้า
$P(x)$	ฟังก์ชันความดันสัมผัส
R	รัศมี
RR	ความต้านทานการหมุนกลิ้ง
RRC	สัมประสิทธิ์ค่าความต้านทานการหมุนกลิ้ง
T	แรงบิด
$TAN\delta$	มุมสัมผัสสูญเสีย
W	พลังงานความเครียด
e	ระยะจุดหมุนกับแรงปฏิกิริยาภาชนะนำหนักในแนวแกน x
f_i	แรงในแนวแกนใดๆ
r	รัศมี
r^2	ค่าสหสัมพันธ์
$v_{rev.shaft}$	ความเร็วรอบเพลาคู่มือทดสอบ

สัญลักษณ์คำย่อและตัวย่อ (ต่อ)

v_{road}	ความเร็วทดสอบเชิงเส้นพัวถนนจำลอง
γ	ความเครียดเฉือน
ε	ความเครียด
$\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$	อัตราการจัดตัวในทิศทาง 1,2,3 ตามลำดับ
λ_m	การลื้อคตัวของระยะยึด
σ	ความเค้น
τ	ความเค้นเฉือน
σ_{EXP}	ค่าความเค้นที่วิเคราะห์จากการทดลองที่ความเครียดใดๆ
σ_{FEA}	ค่าความเค้นที่วิเคราะห์จากวิธีไฟไนต์อิลเมนต์ที่ความเครียดใดๆ
σ_n	ความเค้นในแนวตั้งฉาก

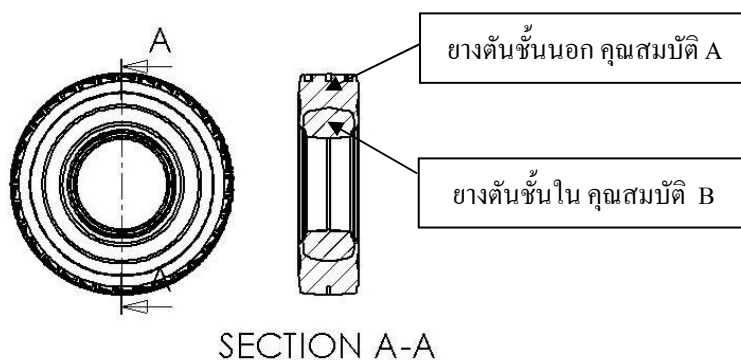
บทที่ 1

บทนำ

1.1 บทนำต้นเรื่อง

ล้อยางตัน (Solid Tire) เป็นผลิตภัณฑ์หนึ่งที่ใช้กับรถโฟล์คคลิฟท์ ล้อยางตันที่ใช้ทั่วไปมีหลายแบบ แบบสองชั้นเป็นแบบหนึ่งที่ใช้อยู่ ไม่จำเป็นต้องใช้ลม ยางชั้นในมีการเสริมผ้าใบจึงแข็งแรงกว่ายางชั้นนอก จึงมีน้ำหนักมากกว่ายางลมปกติ ในการใช้งานต้องใช้พลังงานมากในการเร่งออกตัว เนื่องจากล้อยางรับน้ำหนักบรรทุกมาก เนื้อยางมีพลังงานความเครียดสูงก่อนออกตัว และขณะหมุนกลิ้ง ซึ่งพลังงานความเครียดในเนื้อยางมีปัจจัยจากความต้านทานของเนื้อวัสดุยาง และรูปทรงของยาง ผลจากพลังงานความเครียดมีผลให้ล้อยางต้านทานการหมุนต่างกัน และมีผลต่อการใช้พลังงานจากต้นกำลังเพื่อขับเคลื่อนให้เคลื่อนไปในขณะรับภาระบรรทุก ผู้วิจัยมีแนวคิดที่จะลดความต้านทานการหมุนกลิ้ง (Rolling Resistance, RR) ของล้อยางตัน ซึ่ง RR ลดลงส่งผลให้อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานของรถโฟล์คคลิฟท์ลดลงด้วย แต่การลด RR ของล้อได้นั้น ต้องเข้าใจแนวทางในการปรับเปลี่ยนสูตรยาง และการเปลี่ยนแปลงลักษณะทางกายภาพ

จากปัญหาดังกล่าว ผู้วิจัยจึงมีแนวคิดศึกษาทำนาย RR ของล้อยางตันจากแบบจำลองและวิเคราะห์ปัญหาด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์อิเลเมนต์ (Finite Element Method, FEM) พร้อมทั้งเปรียบเทียบ RR ของล้อยางตันที่ได้จากการวัดชิ้นงานจริงกับผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณทางวิธี FEM สิ่งที่จะได้จากการวิจัยนี้ คือ แบบจำลองของล้อยางตันที่มี RR ลดลงโดยตัวแปรที่ศึกษา คือ โครงสร้างหน้าตัดและสัดส่วนยางของล้อยางสองชั้น ดังแสดงใน รูปที่ 1.1 ซึ่งส่งผลต่อ RR แบบจำลอง FEM ที่มี RR ลดลง สามารถนำไปเป็นแนวทางปรับปรุงการผลิตล้อยางตันในประเทศไทยต่อไป



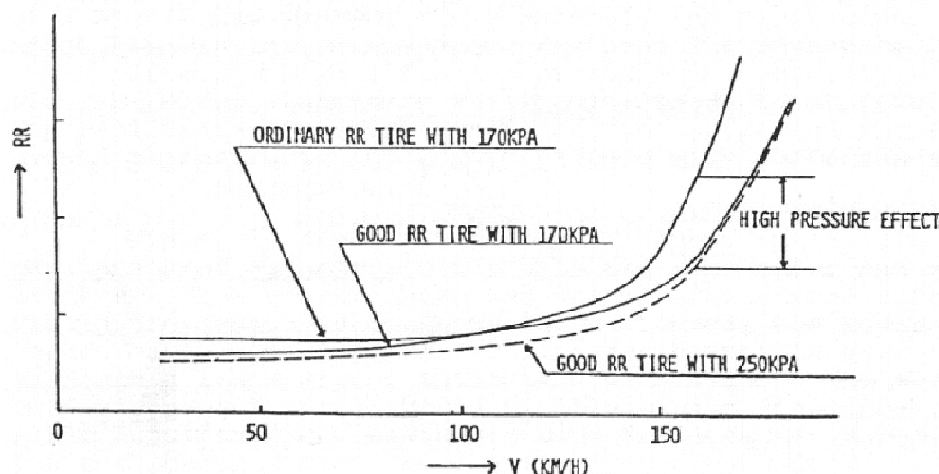
รูปที่ 1.1 โครงสร้างหน้าตัดยางของล้อยางตันสองชั้น

1.2 การตรวจเอกสาร

จากการสืบค้นเอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวกับค่าความต้านทานการหมุนกลิ้งของล้อยาง สามารถแบ่งออกเป็นกลุ่มของการศึกษาได้ดังนี้

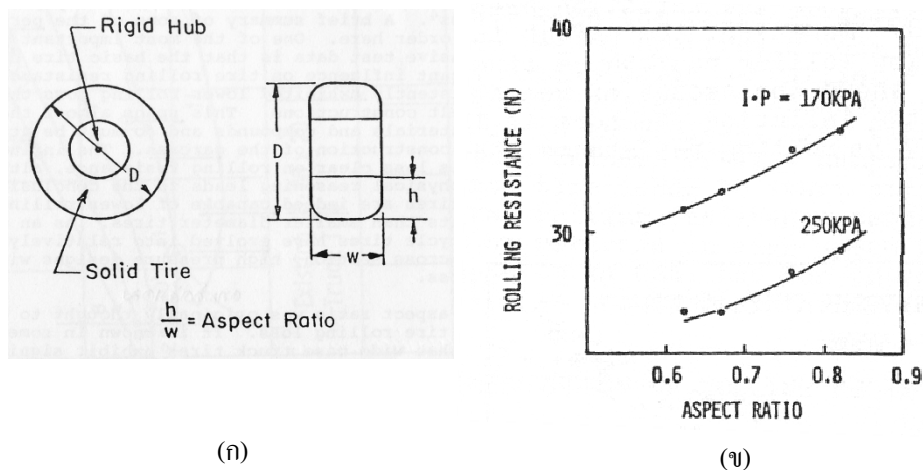
1.2.1 การศึกษาตัวแปรที่มีผลต่อค่าความต้านทานการหมุนกลิ้งของล้อยางลม

Yoshimura, N. *et al*, 1982 ได้นำเสนอการวิจัยเกี่ยวกับ RR ของล้อยางลมในประเทศญี่ปุ่น พบว่าบริเวณของล้อยางที่เกิดฮีทเทอริซิสมากที่สุด คือ บริเวณดอกยาง โดยเกิดมากถึง 49 % (จากการวิเคราะห์ด้วย FEM) ค่าความดันลมยางสูงส่งผลให้ RR ต่ำ และได้แสดงให้เห็นว่าเมื่อความเร็วของรถเพิ่มขึ้นถึง 100 กิโลเมตรต่อชั่วโมง RR จะเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด ดังแสดงในรูปที่ 1.2 และการเปลี่ยนความดันลมยางจาก 170 kPa เป็น 250 kPa ส่งผลให้ RR ลดลงถึง 17% แต่การเปลี่ยนความดันลมยางจาก 250 kPa เป็น 330 kPa ส่งผลให้ RR ลดลงเพียง 9% และพบว่าลักษณะสัดส่วนของล้อยาง (Aspect Ratio) ส่งผลต่อ RR โดย RR เพิ่มขึ้นเมื่อลักษณะสัดส่วนของล้อเพิ่ม ซึ่งลักษณะสัดส่วนล้อยางได้แสดงดังใน รูปที่ 1.3 และในขณะที่ใช้งานอุณหภูมิของล้อยางเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่ามุมสัมผัสนูนเสียด (Loss Tangent, $TAN\delta$) ของวัสดุแต่ละชนิดลดลง ดังแสดงใน รูปที่ 1.4 โดยค่ามุมสัมผัสนูนเสียดแปรผันโดยตรงกับ RR



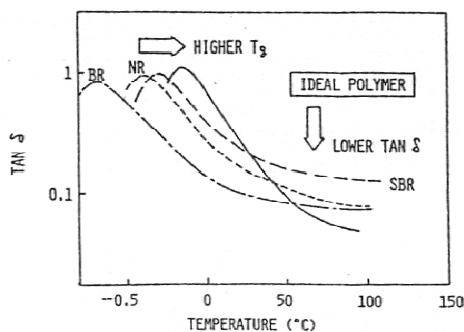
รูปที่ 1.2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วกับค่าความต้านทานการหมุนกลิ้ง

ที่มา : Yoshimura, N. *et al*, 1982



รูปที่ 1.3 (ก) ลักษณะสัดส่วนล้อยาง (ข) ผลของลักษณะสัดส่วนล้อยางต่อ RR

ที่มา : Yoshimura, N. *et al*, 1982



รูปที่ 1.4 การเปลี่ยนแปลงของค่ามอดูลัสสัมผัสสูญเสียต่ออุณหภูมิของวัสดุต่างกัน

ที่มา : Yoshimura, N. *et al*, 1982

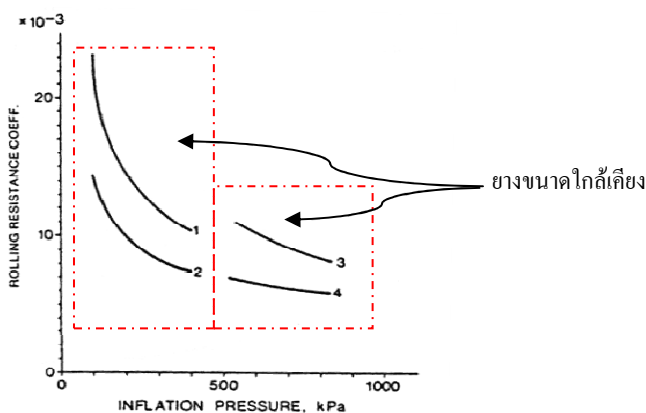
S.K. Clark, 1982 ศึกษาการเปลี่ยนรูปเนื่องจากการหมุนกลิ้งภายใต้ภาระน้ำหนัก การเปลี่ยนรูปนี้ส่งผลให้เกิดการสูญเสียพลังงานในรูปแบบฮีทเทอริซิส ซึ่งเป็นปรากฏการณ์ที่ซับซ้อนกว่าหลักการพื้นฐานเดิมของ Coulomb ผู้ซึ่งอธิบายปรากฏการณ์ RR โดยการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างล้อแข็งเกร็งกับพื้นผิวที่มีอุปสรรค และได้แสดง RR เมื่อเทียบกับเวลา พบว่าสถานะเริ่มต้นที่อุณหภูมิยางเท่ากับอุณหภูมิห้อง RR จะมีค่ามาก และค่อยๆลดลงจนเข้าสู่สภาวะคงตัวหลังจากเวลาที่ 20 เป็นต้นไป เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิล้อยาง

L.Y.Chang and J.S.Shackleton, 1982 ศึกษาความสัมพันธ์พื้นฐานต่างๆที่ส่งผลต่อ RR ให้ลดลง และเป็นที่ยอมรับ คือ ความดันลมยางเพิ่ม ภาระน้ำหนักลดและความเร็วต่ำ โครงสร้างและชนิดของผ้าใบ ดอกยาง แก้มยาง ความหนาของโครง ความกว้าง ล้วนมีผลต่อ RR ซึ่งสามารถควบคุม RR ให้มากหรือน้อยได้โดยการออกแบบแบบลักษณะทางกายภาพนี้ การพัฒนาหลักๆ เพื่อที่จะแข่งขันกันลด RR คือ การเพิ่มโครงสร้างแบบยางเรเดียล การลดปริมาณของวัสดุ

(มากถึง40%) และการผลิตยางให้สามารถรับความดันลมยางที่สูง และการพัฒนาในปัจจุบันได้นำ การวิเคราะห์ด้วย FEM มาเพื่อออกแบบพัฒนาลักษณะ โครงและดอกของล้อยางลม เพื่อลด RR

W.W.Klingbeil. *et al* , 1982 ทำการศึกษาพบว่า 5% ที่ลดลงของค่ามุมสัมผัส สูญเสีย ทำให้ RR ลดลง 2% การเพิ่มขึ้นของมอดูลัส ทำให้ RR ลดลงในส่วนจากการกด แต่เพิ่มขึ้น จากการบิดและความเค้นเฉือนของดอกยาง โดยการเพิ่มขึ้นของมอดูลัส 50% ทำให้ RR ลดลงเพียง 3% แต่ในทางกลับกันการลดลงของมอดูลัส 50% ทำให้ RR เพิ่มขึ้นถึง 20% การสูญเสียพลังงาน จากการหมุนกลิ้งในรูปของการกดเป็นส่วนกลับของพลังงานสูญเสียบนมอดูลัสสะสมกับวัฏจักร ของภาระภายใต้ความเค้นคงที่ ส่วนการสูญเสียในรูปของการดัด (Bending) จากวัฏจักรภายใต้ ความเครียดคงที่ มาจากการเปลี่ยนรูปความโค้งเส้นรอบวงของดอกยาง การเพิ่มขึ้นของการสูญเสีย เนื่องจากการดัด กับมอดูลัสของดอกยาง เป็นผลจากการเพิ่มขึ้นของค่าความแข็งการดัด (Flexural Rigidity) ส่วนระบบกลไกของ ความเค้นเฉือน ไม่สามารถอธิบายภายใต้ความเค้นหรือความเครียด คงที่ แต่แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มขึ้นของแรงเฉือนและขนาดของการเปลี่ยนแปลงรูปร่างส่งผลให้ RR เพิ่มขึ้น แรงเฉือนที่ผิวของดอกยางก็เช่นเดียวกัน ที่ไม่สามารถอธิบายภายใต้ความเค้นหรือ ความเครียดคงที่ แต่แสดงให้เห็นว่าความเครียดจะเพิ่มขึ้นและระยะลดลงเมื่อมอดูลัสเพิ่มขึ้น

D.J.Schuring , 1982 ทำการศึกษาพบว่า ที่ขนาดล้อยาง ความดันลมยางและภาระ น้ำหนักเท่ากัน ยางไบแอสจะมี RR มากกว่ายางเรเดียล โดยที่ยางไบแอส คือ ยางที่มีโครงสร้าง ผ้าใบ (PLY) หลายๆชั้นซึ่งจะถูกวางจิงทับซ้อนกันในแนวทแยงมุมและยางเรเดียล คือ ยางที่มีเส้น ลวดที่เรียงตัววางทำมุม 90 องศา กับเส้นรอบวงยางจากขอบลวดด้านหนึ่งสู่อีกด้านหนึ่ง เนื่องจาก ความแตกต่างทางโครงสร้างภายในที่ส่งผลต่อการเปลี่ยนรูปร่างบริเวณดอกยาง ดังแสดงใน รูปที่ 1.5 โดย (1) ยางไบแอส G78-15 ภาระน้ำหนัก 5 kN (2) ยางเรเดียล P205/75R15 ภาระน้ำหนัก 5 kN (3) ยางไบแอส 10.00-20 ภาระน้ำหนัก 20 kN (4) ยางเรเดียล 11R22.5 ภาระน้ำหนัก 20 kN



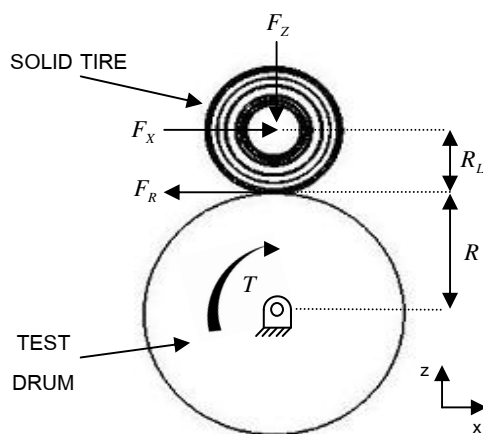
รูปที่ 1.5 ค่าความต้านทานการหมุนกลิ้งของยางไบแอสและยางเรเดียลที่ขนาดใกล้เคียงกัน

ที่มา : D.J.Schuring , 1982

1.2.2 การศึกษาวิธีการวัดค่าความต้านทานการหมุนกลิ้งและพฤติกรรมของล้อยาง

SAE J1269 และ SAE J1270 แสดงวิธีการและขั้นตอนสำหรับมาตรฐานการวัด RR ของล้อยางลม รถยนต์นั่ง รถบรรทุกทุกล้อ รถบัสและรถบรรทุกสี่ล้อ โดยสรุปได้ดังนี้

การทดสอบ เพื่อใช้เปรียบเทียบค่าความต้านทานการหมุนกลิ้งล้อยางลมของแต่ละบริษัทผู้ผลิตมีการวัดตามขั้นตอน SAE J1269 เป็นมาตรฐาน โดยมี 3 วิธีในการวัด ได้แก่ วิธีวัดแรง (Force Method) วิธีวัดแรงบิด (Torque Method) และวิธีวัดกำลังไฟฟ้า (Power Method) เป็นการวัดค่าที่สถานะคงตัว ความเร็วคงที่ มีการปรับค่าเข้าสู่อุณหภูมิอ้างอิงภายหลังจากการวัดเพื่อให้เป็นมาตรฐาน สำหรับล้อยางตัน ปัจจุบันไม่มีมาตรฐานใดมากำหนดขั้นตอนและวิธีการ ในงานวิจัยนี้ใช้ขั้นตอนและวิธีการวัดค่าความต้านทานการหมุนกลิ้งของล้อยาง ตามมาตรฐาน SAE J1269 แต่มีการปรับเปลี่ยนรายละเอียดต่างๆของขั้นตอนการวัด และกำหนดเงื่อนไขขอบเขตหรือปัจจัยต่างๆ ที่สถานะเดียวกัน ทำให้สามารถนำค่าความต้านทานการหมุนกลิ้งที่ได้จากล้อยางตันของแต่ละบริษัทผู้ผลิตมาเปรียบเทียบกันได้ สามารถวัดได้ 3 วิธี คือ วิธีวัดแรง วิธีวัดแรงบิด และวิธีวัดกำลังไฟฟ้า โดยทั้ง 3 วิธีให้ผลที่สอดคล้องกัน โดยรูปแบบแรงที่ใช้ลักษณะการจำลองและระยะต่างๆบนชุดทดสอบได้แสดงดังใน รูปที่ 1.6 ซึ่งรายละเอียดของขั้นตอนและวิธีการจะนำเสนอใน บทที่ 3 ต่อไป

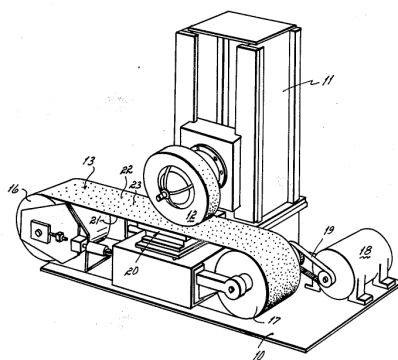


รูปที่ 1.6 แรงและระยะต่างๆบนชุดทดสอบ

เจริญยุทธ และคณะ, 2009 ทำการศึกษาพบว่าเมื่อล้อยางรับแรงอัดต่อเนื่องไปนานๆ สมบัติยืดหยุ่นของยางจะเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ และเมื่อปล่อยให้อุณหภูมิกลับมาเท่าอุณหภูมิห้องความแข็งตึงไม่เท่าเดิม และจากการทดสอบยางภายใต้ภาระน้ำหนัก 1.2, 1.6 และ 2.0 ตัน ที่ความเร็ว 10, 15 และ 20 กิโลเมตรต่อชั่วโมง พบว่า ยางแต่ละยี่ห้อส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิแก้มยาง เมื่อเทียบกับเวลาแตกต่างกัน และอุณหภูมิภายในสูงกว่าอุณหภูมิแก้มยาง

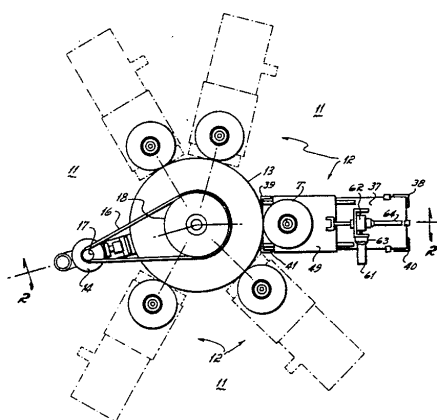
1.2.3 สิทธิบัตรที่เกี่ยวข้องกับค่าความต้านทานการหมุนกลิ้ง

สิทธิบัตรลำดับที่ US4,458,527 แสดงกลไกการวัด RR บนถนนจำลองแบบพื้นผิวเรียบ ซึ่งการทดสอบบนถนนจำลองบนพื้นผิวเรียบให้ลักษณะการยุบตัวของแก้มยางใกล้เคียงความจริงมากกว่าพื้นผิวทดสอบแบบทรงกระบอก (ดรัม) แต่ข้อเสีย คือ ระบบมีราคาแพง โดย หมายเลข 20 คือ ไฮโดรสแตติกแบร์ริง ซึ่งจะลดน้ำความดันสูงแปรผันตามภาระน้ำหนักที่ล้อยกกดลงบนสายพานออกจากหัวฉีดเพื่อรักษาระดับของสายพาน (หมายเลข 13) ให้เสมือนวิ่งบนถนนจริง ดังแสดงใน รูปที่ 1.7



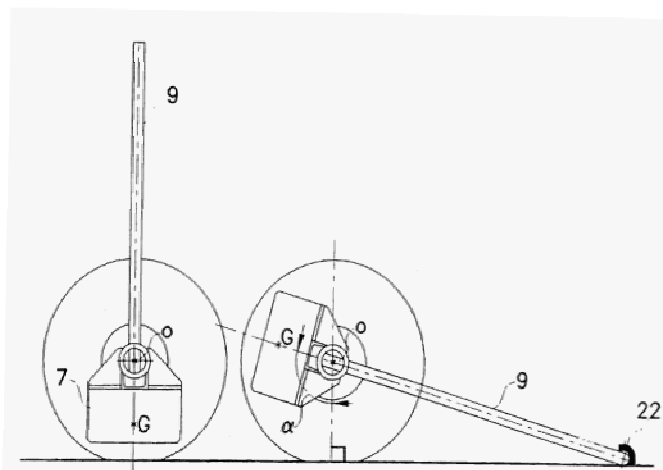
รูปที่ 1.7 การวัดค่าความต้านทานการหมุนกลิ้งบนถนนจำลองแบบพื้นผิวเรียบ
ที่มา : US4,458,527

สิทธิบัตรลำดับที่ US4,489,598 เป็นการวัด RR บนชุดทดสอบแบบหมุนในแนวนอน ดังแสดงใน รูปที่ 1.8 ซึ่งไม่มีผลของแรงโน้มถ่วงต่อ RR เพราะในกรณีวัดแรง เมื่อเกิดการเปลี่ยนรูปร่างใต้ภาระน้ำหนัก ส่งผลให้จุดศูนย์กลางมวลเปลี่ยนตำแหน่ง ซึ่งการทดสอบแบบหมุนในแนวนอน ส่งผลให้ RR มีความแม่นยำมากขึ้น



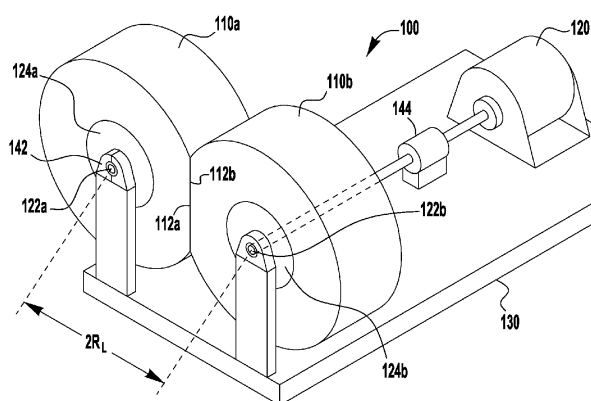
รูปที่ 1.8 ระบบทดสอบค่าความต้านทานการหมุนกลิ้งของล้อยาง
ที่มา : US4,489,598

สิทธิบัตรลำดับที่ US5,635,623 เป็นใช้หลักการเพนคูล์ม โดยติดตั้งล้อข้างจำนวน 2 ล้อ มี น้ำหนักถ่วง (G) ดังแสดงใน รูปที่ 1.9 โดยรูปทางด้านขวาถือสถานะเริ่มต้น และทำการปล่อยตะขอ (หมายเลข 22) แล้วจับเวลาจนระบบเป็นไปดังรูปด้านซ้าย การเคลื่อนไหวยจะเป็นลักษณะมีตัวหน่วง (Damp) และค่าที่ได้จะรวมถึงโมเมนต์ความเฉื่อยของล้อข้างด้วย



รูปที่ 1.9 ระบบทดสอบค่าความต้านทานการหมุนกลิ้งของล้อข้างโดยหลักเพนคูล์ม
ที่มา : US5,635,623

สิทธิบัตรลำดับที่ US7,591,167 หา RR โดยการนำล้อข้าง 2 ล้อ (หมายเลข 110a,110b) มาติดตั้ง ดังในแสดงใน รูปที่ 1.10 หมายเลข 120 คือ ต้นกำลัง หมายเลข 144 คือ อุปกรณ์ตรวจรู้แรงบิด โดยลักษณะของระบบ ต้องการแก้ปัญหาการเปลี่ยนรูปของยางบนผิวโค้งซึ่งยังไม่เหมือนความเป็นจริง โดยแรงบิดที่ได้จากการวัดจะเป็น RR ของล้อ 2 ล้อ



รูปที่ 1.10 ระบบทดสอบค่าความต้านทานการหมุนกลิ้งของล้อข้าง
ที่มา : US7,591,167

จากการทบทวนเอกสารในหัวข้อ 1.2 พบว่า

1. เอกสารในกลุ่มการศึกษา ตัวแปรที่มีผลต่อความต้านทานการหมุนกึ่งของล้อยางลมของ Yoshimura, N. *et al* ได้ให้ข้อมูลที่สนับสนุนว่าการเพิ่มความดันของล้อยางรวมถึงการลดสัดส่วน Aspect Ratio ของล้อยางลม ส่งผลให้ค่า RR ลดต่ำลง ซึ่งสามารถนำไปเทียบกับล้อยางตันในแง่ความแข็ง (Stiffness) ของล้อยางซึ่งเกิดจากปัจจัยของเนื้อยางและรูปทรงของล้อยางตันได้ สำหรับงานของ L.Y.Chang and J.S.Shackleton นั้นก็ปรากฏหลักฐานที่ชัดเจนในกรณีล้อยางลมว่าการปรับลดความดันลมรวมถึงลักษณะโครงสร้างแก้มยาง ดอกยาง มีผลต่อ RR และได้ให้แนวทางการใช้ FEM พัฒนาลักษณะโครงสร้างสร้างของล้อยางเพื่อลด RR สำหรับงานของ W.W.Klingbeil. *et al* นั้น ได้ให้แนวทางในเรื่องสมบัติโมดูลัสยางมีผลต่อการเพิ่มลด RR โดยตรง ซึ่ง เอกสารกลุ่มนี้มีส่วนสนับสนุนตัวแปรที่น่าสนใจ เช่น สมบัติยาง ความแข็งยาง รูปร่างทางกายภาพ ดอกยาง ในกรณีของล้อยางตันได้

2. เอกสารในกลุ่มการศึกษา วิธีการวัดค่าความต้านทานการหมุนกึ่งและพฤติกรรมของล้อยาง ได้ให้แนวคิดในการวัดค่า RR โดยนำมามาตรฐานวิธีการวัด SAE J1269 และ SAE 1270 ของล้อยางลม มาปรับเปลี่ยนรายละเอียดต่างๆของขั้นตอนการวัดให้เหมาะสมกับล้อยางตันได้ การทดสอบล้อยางบนพื้นผิวจำลองแบบพื้นผิวเรียบและบนพื้นผิวจำลองแบบทรงกระบอกให้ลักษณะการยุบตัวแตกต่างกัน ดังนั้นในการจำลอง FEM จะต้องให้พื้นผิวจำลองมีลักษณะเช่นเดียวกันกับการทดสอบ

1.3 วัตถุประสงค์

เพื่อศึกษาการปรับโครงสร้างหน้าตัดของล้อยางตัน ให้มีความต้านทานการหมุนกลิ้งต่ำโดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์อีเลเมนต์

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ทำให้ทราบถึงผลของโครงสร้างหน้าตัดล้อยางตัน ต่อการลดลงของความต้านทานการหมุนกลิ้ง

1.4.2 มีความสามารถในการพัฒนาผลิตภัณฑ์ด้วยหลักการทางวิศวกรรม

1.5 ขอบเขตของการวิจัย

1.5.1 ในงานวิจัยจะศึกษาล้อยางตันชนิดสองชั้นขนาด 6.00-9 ที่ขายในท้องตลาดประเทศไทยเป็นหลัก

1.5.2 จำนวนชิ้นทดสอบที่นำมาเปรียบเทียบระหว่างการทดลองกับแบบจำลองไฟไนต์อีเลเมนต์กำหนดไว้เพียง 3 ยี่ห้อ ยี่ห้อละ 2 ชิ้นทดสอบ

1.5.3 ตัวแปรที่ศึกษาในแบบจำลองไฟไนต์อีเลเมนต์ คือ

- การปรับเปลี่ยนหน้าตัดยางนอกบริเวณแก้มยางหรือส่วนเกี่ยวข้อ 3 รูปแบบ
- ในแต่ละรูปแบบของหน้าตัดยางนอกจะเปลี่ยนรูปแบบยางใน 3 รูปแบบ
- ศึกษารูปแบบดอกยาง 2 ลักษณะ คือ S, H Profile

1.5.4 ไม่คำนึงการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของยางชั้นใน ในกระบวนการผลิตสำหรับขั้นตอนการปรับรูปแบบยางตันชั้นใน

1.5.5 ไม่คำนึงการเปลี่ยนแปลงสมบัติยางตามอุณหภูมิ ไม่พิจารณาความร้อนก่อตัวในเนื้อยางและไม่มีการเปลี่ยนสมบัติทางกลของยางชั้นนอกและชั้นใน ในแบบจำลองไฟไนต์อีเลเมนต์

1.5.6 ทำการพัฒนาในแบบจำลองเท่านั้น ไม่สร้างชิ้นงานจริง

บทที่ 2

ทฤษฎี

2.1 พลังงานสูญเสีย

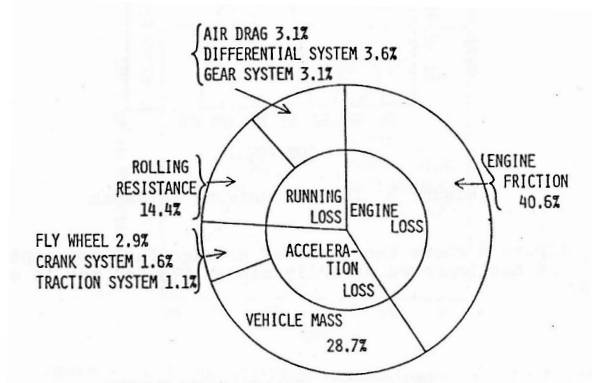
ในการเคลื่อนที่ของรถมีการสูญเสียพลังงาน 3 ทาง ทางแรก การสูญเสียขณะวิ่ง (Running loss) เนื่องจากแรงต้านอากาศและความต้านทานการหมุนกลิ้งของล้อยาง (RR) ทางที่สอง การสูญเสียจากการเร่ง (Acceleration Loss) ของชิ้นส่วนเครื่องยนต์ เช่น ความเร่งเชิงมุมของเพลลา และล้อช่วยแรง ทางที่สามการสูญเสียในส่วนของเครื่องยนต์ (Engine Friction Loss) จากแรงเสียดทานในตัวเครื่องยนต์ ดังแสดงใน รูปที่ 2.1 พบว่าการสูญเสียพลังงานจากการวิ่งเกิดจากผลของ RR 14.4% ของการสูญเสียพลังงานทั้งหมด มีการศึกษาพบว่า การลดลงของ RR ของล้อยางลม 10 % ส่งผลให้ประหยัดเชื้อเพลิงได้ถึง 1-2 % (Yoshimura, N. *et al*, 1982) สำหรับการใช้งานระยะยาวจะ ช่วยประหยัดพลังงานโดยรวมได้ สำหรับล้อยางตันยังไม่มีการศึกษามากนัก อย่างไรก็ตามในการใช้งานล้อยางตันในรถโฟล์คคลิฟท์ย่อมมีการสูญเสียพลังงานคล้ายคลึงกับการใช้รถอื่น ๆ เนื่องจากมี ภาระน้ำหนักบรรทุกมาก RR แปรผันโดยตรงกับน้ำหนัก และขึ้นอยู่กับสัมประสิทธิ์ค่าความต้านทานการหมุนกลิ้ง (Rolling Resistance Coefficient, RRC) ดังสมการ 2.1 (รูปที่ 2.2 ประกอบ สมการ)

$$F_x = RRC \cdot F_z \quad (2.1)$$

โดยที่ F_x คือ ค่าความต้านทานการหมุนกลิ้ง (N)

RRC คือ สัมประสิทธิ์ค่าความต้านทานการหมุนกลิ้ง (Dimensionless)

F_z คือ ภาระน้ำหนัก (N)



รูปที่ 2.1 สัดส่วนของการสูญเสียพลังงานของรถยนต์นั่งส่วนบุคคลในขณะเคลื่อนที่

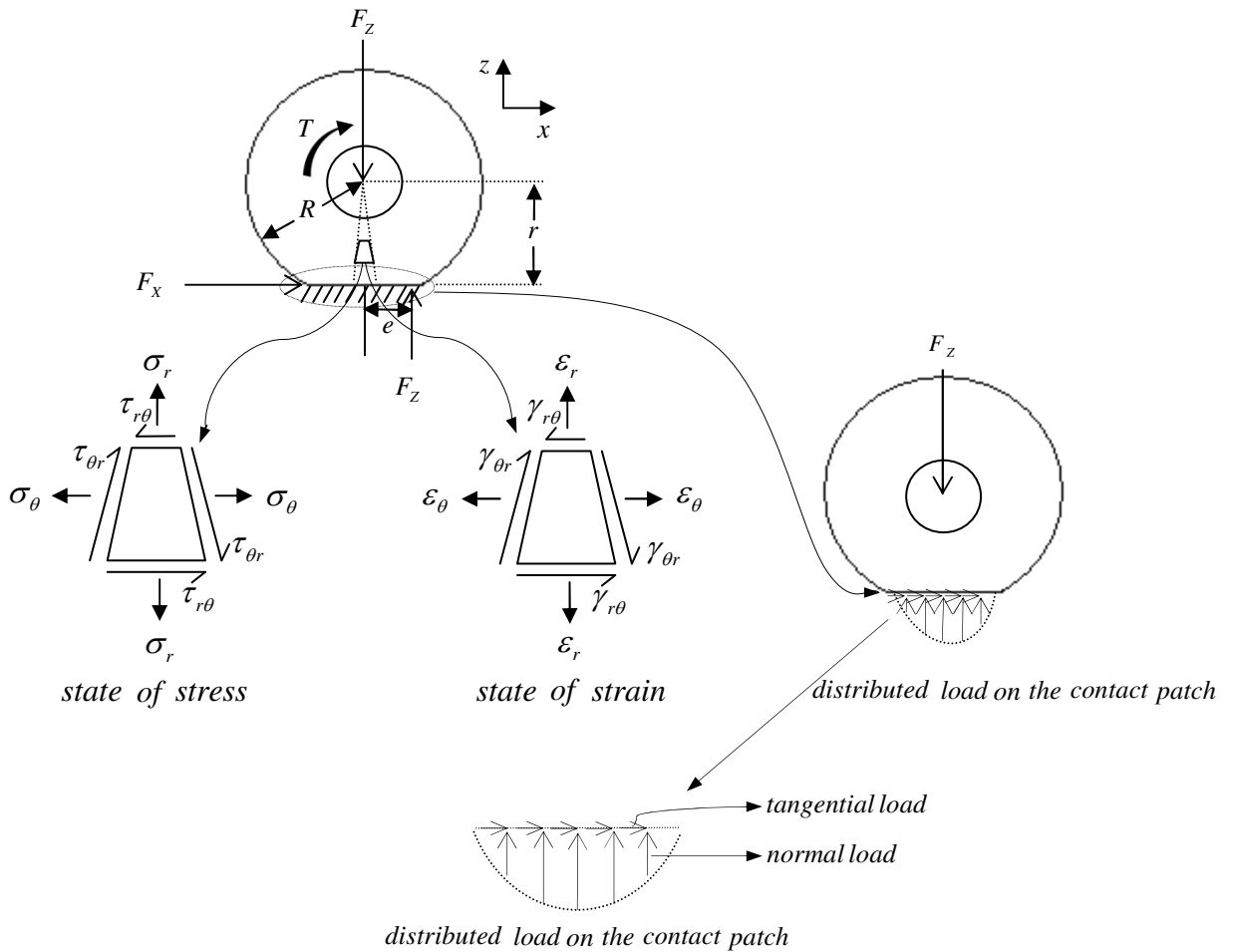
ที่มา : Yoshimura, N. *et al*, 1982

เมื่อพิจารณาให้ค่าการสูญเสียในส่วนอื่นๆ เท่ากันกับกรณีรถยนต์นั่งส่วนบุคคล สัดส่วนของ RR และ การสูญเสียจากการเร่งต่อการสูญเสียทั้งหมดจะเพิ่มขึ้นเพราะรถไฟฟ้าจะมีน้ำหนักบรรทุกมากกว่ารถยนต์นั่งส่วนบุคคล ดังนั้นการลดลงของ RR ล้อย่างต้น 10 % จะส่งผลให้ประหยัดเชื้อเพลิงได้มากกว่า 1-2 % และตัวอย่างค่า RRC ระหว่างล้อกับพื้นผิวต่างๆ ได้แสดงดังใน ตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 สัมประสิทธิ์ค่าความต้านทานการหมุนกลิ้งระหว่างล้อและพื้นผิวต่างๆ

ล้อและพื้นผิวต่างๆ	RRC (Dimensionless)
ล้อกับรางรถไฟ	0.0002 - 0.0010
ล้อรถจักรยานกับพื้นผิวลูกรกทดสอบ	0.0022 - 0.005
ล้อรถประหยัดพลังงาน (Econo Car) ของมิชลินกับพื้นถนน	0.0025
ล้อกับรางรถราง	0.005
ล้อรถประหยัดพลังงานทั่วไปกับพื้นถนน	0.0055
ล้อรถยนต์กับพื้นผิวลูกรกทดสอบ	0.0062 - 0.015
ล้อรถยนต์กับพื้นคอนกรีต	0.010 - 0.015
ล้อรถยนต์กับพื้นหญ้า	0.055 - 0.065
ล้อรถยนต์กับพื้นทราย	0.3

2.2 ความต้านทานการหมุนกลิ้งของล้อยางตัน



รูปที่ 2.2 แสดงแรงต่างๆที่กระทำต่อล้อยางตัน

จาก รูปที่ 2.2 พิจารณาล้อยางตันบนพื้นถนนแบบสองมิติสมมุติไม่สนใจการเกิดสภาวะความเครียดในแนว y ทั้งนี้เพื่ออธิบายแนวทางการสัมพันธ์ระหว่าง RR กับพลังงานความเครียดในเนื้อหาในสถานะที่มีการลื่นไถล ภายใต้ภาระน้ำหนัก (F_z) แรงต้านทานการหมุนกลิ้ง (F_x) เกิดจากการกระจายของ F_z บนพื้นที่สัมผัสระหว่างยางกับถนน (Contact Patch) ไปบนพื้นที่สัมผัส โดยเกิดการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งของแรงปฏิกิริยา F_z เป็นระยะ e ดังนั้น F_x จึงมีค่าดังสมการที่ 2.2 และ 2.3

$$F_x = \frac{T}{r} + (F_z \cdot \mu) = \frac{(F_z \cdot e)}{r} + (F_z \cdot \mu) \quad (2.2)$$

$$F_x = \frac{1}{r} \int_{-x}^x x \cdot P(x) dx + \mu \int_{-x}^x P(x) dx \quad (2.3)$$

โดยที่	F_x	คือ แรงต้านทานการหมุนกลิ้งในสภาวะมีการลื่นไถล
	T	คือ แรงบิดจากเพลลาที่ใช้ในการขับล้อให้เริ่มเคลื่อนที่ (Starting Torque)
	r	คือ ระยะจุดหมุนกับพื้นถนนในแนวแกน y หรือ คือ R (รัศมีล้อ) - δ (ระยะยุบตาม load F_z)
	F_z	คือ แรงปฏิกิริยาภาระน้ำหนัก
	e	คือ ระยะจุดหมุนกับแรงปฏิกิริยาภาระน้ำหนักในแนวแกน x
	$P(x)$	คือ ฟังก์ชันความดันสัมผัสหรือแรงปฏิกิริยาภาระน้ำหนักตำแหน่ง x ใดๆ
	μ	คือ สัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน

และเมื่อพิจารณาในสภาวะที่ไม่มีมีการลื่นไถล โดยจุดเปลี่ยนของสภาวะทั้งสอง คือ แรงบิด โดยที่หาก $\frac{T}{r} < F_z \cdot \mu$ ล้อจะไม่มีมีการลื่นไถล จากสมการที่ 2.2 และ 2.3 จึงลดรูปเป็น

$$F_x = \frac{T}{r} = \frac{(F_z \cdot e)}{r} \quad (2.4)$$

$$F_x = \frac{1}{r} \int_{-x}^x x \cdot P(x) dx \quad (2.5)$$

เมื่อพิจารณาในรูปแบบพลังงานความเครียด (W) หรือพลังงานที่ถูกกักเก็บไว้ในเนื้อวัสดุเมื่อวัสดุถูกกระทำทำให้เปลี่ยนรูป ภายใต้การกระทำของแรงภายนอก ดังสมการที่ 2.6 แรงต้านทานการหมุนกลิ้ง (F_x) แปรผันโดยตรงกับ ความเค้นเฉือน ($\tau_{r\theta}$) คือ เมื่อ F_x มากส่งผลให้ W มาก

$$W = \sum \int_0^{\varepsilon} \sigma_i d\varepsilon_i = \int_0^{\varepsilon} \sigma_r d\varepsilon_r + \int_0^{\varepsilon} \sigma_{\theta} d\varepsilon_{\theta} + \int_0^{\gamma} \tau_{r\theta} d\gamma_{r\theta} \quad (2.6)$$

โดยที่	W	คือ พลังงานความเครียด
	σ	คือ ความเค้น
	ε	คือ ความเครียด
	$\tau_{r\theta}$	คือ ความเค้นเฉือน
	$\gamma_{r\theta}$	คือ ความเครียดเฉือน

โมเมนต์ความเฉื่อยมีผลต่อการเพิ่มขึ้นของ RR ของล้อ โดยมีผลในขณะที่ยังคงมี การเปลี่ยนแปลงความเร่งเชิงมุม โมเมนต์ความเฉื่อยของล้อทางด้านหมุนตามลักษณะการใช้งาน คือ หมุนรอบแกน y รัศมีภายนอก (R_{out}) รัศมีภายใน (R_{in}) และมวล (M) ดังแสดงใน รูปที่ 2.3 มี ค่าโดยประมาณดังแสดงใน สมการที่ 2.7

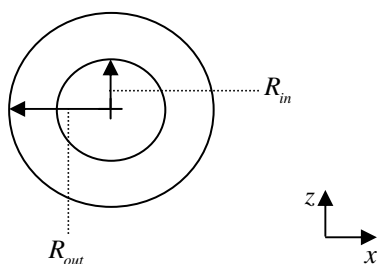
$$I = \frac{1}{2} M (R_{out}^2 + R_{in}^2) \quad (2.7)$$

โดยที่ I คือ โมเมนต์ความเฉื่อยของล้อทางด้าน ($\text{kg}\cdot\text{m}^2$)

M คือ มวลของล้อทางด้าน (kg)

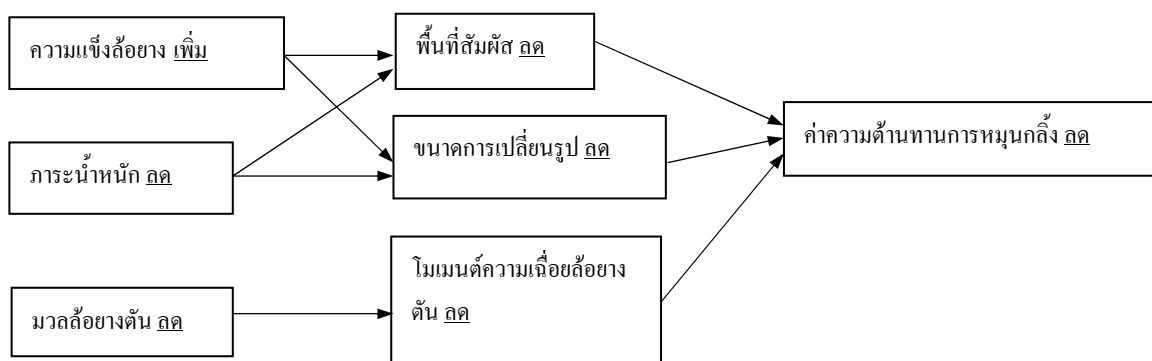
R_{out} คือ รัศมีภายนอกของล้อทางด้าน (m)

R_{in} คือ รัศมีภายในของล้อทางด้าน (m)



รูปที่ 2.3 แสดงรัศมีภายนอกและภายในของล้อทางด้าน

ดังนั้นการลด โมเมนต์ความเฉื่อยของล้อสามารถทำได้โดยลด มวล รัศมี ภายนอกและรัศมีภายใน แต่ในงานวิจัยซึ่งยึดขนาดล้อทางด้าน 6.00-9 เป็นหลัก จึงไม่สามารถ เปลี่ยนแปลงรัศมีภายนอกและภายในได้ แต่อาจเปลี่ยนแปลงลักษณะรูปร่างของแก้มยาง และ สัดส่วนของยางด้านชั้นในต่อยางด้านชั้นนอก และได้สรุปความสัมพันธ์ของปัจจัยต่างๆต่อ RR ดัง แสดงใน รูปที่ 2.4



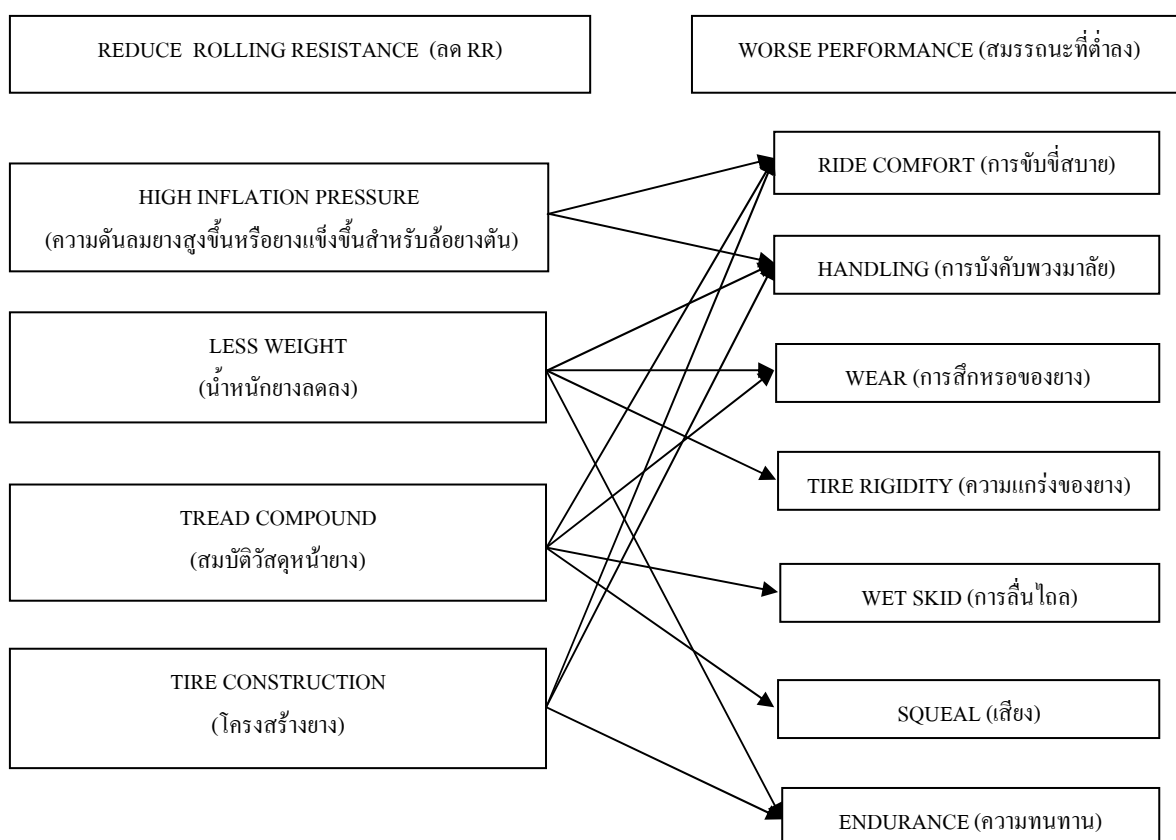
รูปที่ 2.4 ความสัมพันธ์ของปัจจัยต่างๆ ต่อค่าความต้านทานการหมุนกลิ้ง

เนื่องจากข้อจำกัดเรื่องขนาดมาตรฐานทางมิติของล้อยางต้นที่ใช้งานในอุตสาหกรรม ได้แก่ รัศมีภายในและภายนอก จึงไม่ได้มีการศึกษาผลของโมเมนต์ความเฉื่อยต่อ RR ของล้อยางในงานวิจัยนี้ ตัวแปรที่สนใจในการศึกษา คือ ตัวแปรสัดส่วนรูปทรงยางในยางนอกที่มีผลต่อ RR ศึกษาเมื่อใช้งานที่ภาวะสมดุลสถิต

ดังนั้นสิ่งที่สามารถเปลี่ยนแปลงได้ในงานวิจัย คือ เปลี่ยนแปลงสัดส่วนและรูปทรงของยางต้นชั้นในต่อยางต้นชั้นนอก ซึ่งมีผลต่อค่าความแข็งของล้อยางต้น

2.3 ผลกระทบจากการพัฒนาเพื่อลดค่าความต้านทานการหมุนกลิ้ง

ในการพัฒนาเพื่อลด RR ของล้อยางต้นนั้น ต้องคำนึงถึงผลกระทบที่ตามมาด้วย ซึ่งผลกระทบนี้เกิดจากการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกายภาพต่างๆ ของล้อยาง ดังแสดงใน รูปที่ 2.5

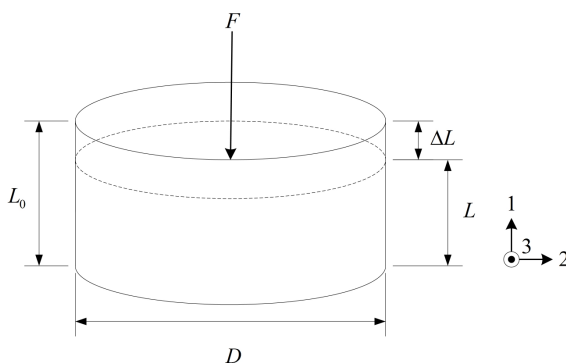


รูปที่ 2.5 ผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกายภาพต่างๆ ของล้อยาง

2.4 สมบัติทางกลของวัสดุ

สมบัติการรับแรงกดเป็นสมบัติเชิงกลของวัสดุที่มีความสำคัญต่อการกำหนดมาตรฐานและคุณภาพของผลิตภัณฑ์ สำหรับผลิตภัณฑ์ส่วนใหญ่ นำไปใช้งานกับการรับแรงกดมาก โดยเฉพาะผลิตภัณฑ์ที่ใช้งานจริงในเชิงวิศวกรรม เช่น ยางรองคอสะพาน ยางรองฐานตึก ยางลดการสั่นสะเทือน ล้อยางตัน เป็นต้น ด้วยเหตุนี้สมบัติการรับแรงกดจึงเป็นสมบัติที่มีความสำคัญต่อการออกแบบหรือการใช้งานของผลิตภัณฑ์ดังกล่าว

การทดสอบหาสมบัติการรับแรงกดของยางมาจากความเค้น (Stress, σ) และค่าความเครียด (Strain, ε) ได้จากสมการ 2.8 และ 2.9 ตามลำดับ โดยการนำชิ้นยางทดสอบมารับแรงกด เนื่องจากในระหว่างการทดสอบพื้นที่หน้าตัดของยางจะมีค่าไม่คงที่ กล่าวคือพื้นที่หน้าตัดของยางจะเพิ่มขึ้นในแนวข้างตามระยะที่ยางยืด การทดสอบส่วนใหญ่ใช้พื้นที่หน้าตัดของยางมีค่าเท่ากับพื้นที่หน้าตัดตั้งแต่ต้น



รูปที่ 2.6 การเปลี่ยนรูปของยางภายใต้แรงกด

ที่มา : เบนจพร,2551

การหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้น ความเครียด และอัตราการยืดตัว (Stretch Ratio) ภายใต้แรงกดในแกนเดียวดัง รูปที่ 2.6 หาได้ดังสมการต่อไปนี้

$$\text{ความเค้น (Stress)} \quad \sigma = \frac{F}{A}, A_0 = \pi \frac{D^2}{4} \quad (2.8)$$

$$\text{ความเครียด (Strain)} \quad \varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} = \frac{L - L_0}{L_0} \quad (2.9)$$

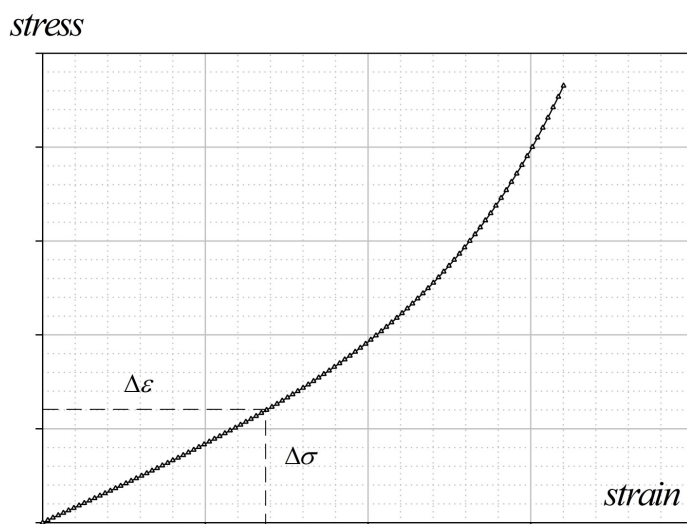
$$L = L_0(1 + \varepsilon) \quad (2.10)$$

$$\text{อัตราการยืดและหดตัว (Stretch Ratio)} \quad \lambda_1 = \frac{L}{L_0} = (1 + \varepsilon) \quad (2.11)$$

$$\lambda_2 = \lambda_3 = \sqrt{A / A_0} \quad (2.12)$$

โดยที่ F	คือ แรงกดซึ่งมีค่าเป็นลบ
A_0	คือ พื้นที่หน้าตัดของชิ้นงานทดสอบก่อนการทดสอบ
ΔL	คือ ระยะกดตามแนวแรง
L	คือ ความสูงของชิ้นงานขณะรับแรงกด
L_0	คือ ความสูงเดิมของชิ้นงานทดสอบก่อนการทดสอบ
$\lambda_{1,2,3}$	คือ อัตราการยืดและหดตัวในแนวแกนใดๆ

ค่า Young's modulus (Compressive Young's modulus, E) เป็นค่าที่ได้จากความชันในช่วงเริ่มต้นของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกดและความเครียดกด ตามกฎของฮุก (Hook's law) ดังแสดงใน รูปที่ 2.7 โดยปกติใช้ค่าความเครียดในช่วง 20% หรือ 50% สามารถหาค่ามอดูลัสยืดหยุ่น (Modulus of Elasticity) หรือมอดูลัสของยัง (Young's modulus, E) ได้ ดังสมการ 2.13 ค่า Young's modulus ใช้แสดงความสามารถในการต้านทานต่อการเปลี่ยนรูปของยางได้เฉพาะในช่วงความเครียดต่ำๆ เท่านั้น (เฉพาะในช่วงที่ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นแรงกดและความเครียดแรงกดยังเป็นเส้นตรง) เนื่องจากค่ามอดูลัสแสดงให้เห็นถึงความสามารถในการต้านทานต่อการเปลี่ยนรูปของยาง ดังนั้นนิยมใช้ค่ามอดูลัสของยางในการระบุสมบัติความแข็งแรงและระดับของการเชื่อมโยงของยาง โดยทั่วไป ค่า 100% มอดูลัสของยางอยู่ในช่วง 1 MPa ถึง 13 MPa ขึ้นอยู่กับสูตรการผสมสารเคมี (คัดแปลงจาก เบญจพร,2551)



รูปที่ 2.7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกดและความเครียดกด

$$E = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} \quad (2.13)$$

สมบัติการรับแรงกดเป็นสมบัติเชิงกลของวัสดุที่ใช้ในการทดสอบสำหรับเปรียบเทียบความแข็งตึงการกด (Compressive Stiffness) ของยางสูตรต่างๆ นักเทคโนโลยียางนิยมใช้ทดสอบในการพัฒนาสูตรเคมียางสำหรับการผลิต ผลิตภัณฑ์ยางที่ต้องรับแรงกดในระหว่างการใช้งาน วิธีการวัดความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดเมื่อภายใต้การกดแบบสถิต (Static Compression) ได้ระบุไว้ในมาตรฐาน ASTM 575 เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบ คือ เครื่องทดสอบสมบัติวัสดุเอนกประสงค์ (Universal Testing Machine) ซึ่งมาตรฐาน ASTM ได้แบ่งการทดสอบออกเป็น 2 แบบ คือ

- 1) แบบ A : การทดสอบที่กำหนดขนาดของการเปลี่ยนรูป (Compression test of specified deflection) ในกรณีนี้ ผู้ทดสอบจะทำการวัดแรงที่ใช้ในการกดเพื่อทำให้ชิ้นทดสอบเกิดการเปลี่ยนรูป (ยุบตัว) ตามระยะที่กำหนด
- 2) แบบ B : การทดสอบที่กำหนดแรงกด (Compression test of specified force) ในกรณีนี้ ผู้ทดสอบจะทำการวัดขนาดของการเปลี่ยนรูป (วัดระยะยุบตัว) เมื่อชิ้นทดสอบได้รับแรงกดตามค่าที่กำหนด (พจนานุกรม, 2550)

2.5 แบบจำลองฟังก์ชันพลังงานความเครียด (Strain Energy Function)

ในการวิเคราะห์วัสดุประเภทยางแบบจำลองของวัสดุจะแตกต่างจากฟังก์ชันพลังงานความเครียดทั่วไปเพราะยางสามารถคงความยืดหยุ่นไว้ได้แม้จะได้รับความเครียดที่สูงมาก ซึ่งเรียกพฤติกรรมของวัสดุประเภทนี้ว่า ไฮเปอร์อีลาสติก ผลิตภัณฑ์ที่ทำจากวัสดุที่มีพฤติกรรมลักษณะนี้จำเป็นต้องหาสมการแสดงความสัมพันธ์ของความเค้นและความเครียด เพื่อใช้อธิบายพฤติกรรมการยืดหยุ่นแบบไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear Elastic Deformation) ซึ่งนักวิจัยหลายท่านได้เขียนอยู่ในรูปฟังก์ชันพลังงานความเครียด (Strain Energy Function, W)

$$W = W(U) \quad (2.14)$$

เมื่อ U คือ ค่าเทนเซอร์ระยะการยืด (Stretch Tensor) เป็นเมตริกซ์แนวทแยงประกอบด้วยค่า $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ เป็นอัตราส่วนการยืดในแนวแกนหลัก x, y, z สำหรับวัสดุไอโซโทรปิก (Isotropic Material) โดย

$$\text{Extension Ratio } (\lambda) = \frac{\text{Final Length}}{\text{Original Length}} = 1 + \text{Strain } (\varepsilon) \quad (2.15)$$

สำหรับกรณีที่เป็นการกด อัตราการหดตัว $= 1 - Strain(\varepsilon)$ โดยที่

$$Strain(\varepsilon) = \frac{Current\ Length - Original\ Length}{Original\ Length} \quad (2.16)$$

ซึ่งค่าของพลังงานความเครียดสามารถเขียนให้อยู่ในรูปฟังก์ชันสมมาตร (Symmetric Function) ของ $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ ได้ดังนี้

$$W = W(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3) \quad (2.17)$$

พลังงานความเครียด W เป็นฟังก์ชันของสเตรนอินวาเรียนท์ (Strain Invariants)

$$W = W(I_1, I_2, I_3) \quad (2.18)$$

$$\begin{aligned} I_1 &= \lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2 \\ I_2 &= \lambda_1^2 \lambda_2^2 + \lambda_2^2 \lambda_3^2 + \lambda_3^2 \lambda_1^2 \\ I_3 &= \lambda_1^2 \lambda_2^2 \lambda_3^2 \end{aligned} \quad (2.19)$$

สมมุติฐานที่ว่าวัสดุจะเป็นวัสดุที่อัดตัวไม่ได้ ทำให้ $I_3 = 1$

$$W = W(I_1, I_2) \quad (2.20)$$

ค่าความเค้นหลักเคาซี (Cauchy Principle Stress) เป็นค่าแรงต่อพื้นที่ที่เปลี่ยนแปลง (Strain Area) สามารถอธิบายได้ ดังนี้

$$\sigma_i = \frac{\lambda_i}{\lambda_1 \lambda_2 \lambda_3} f_i = \lambda_i \frac{\partial W}{\partial \lambda_i} + \sigma \quad (2.21)$$

แบบจำลองฟังก์ชันพลังงานความเครียดที่ใช้อธิบายพฤติกรรมเชิงกลของวัสดุประเภทยาง แบ่งออกเป็นสองกลุ่มใหญ่ๆ กลุ่มแรกเป็นแบบจำลองที่แทนพฤติกรรมจากการสังเกต (Phenomenological Model) พัฒนามาจากความสัมพันธ์ของความเค้นกับการเปลี่ยนรูปเมื่อไม่พิจารณาถึงโครงสร้างภายในโมเลกุล โดยค่าสัมประสิทธิ์ของแบบจำลองนี้ ไม่มีความหมายทางกายภาพ แต่เป็นค่าสัมประสิทธิ์ที่ได้จากการปรับแบบจำลองให้ใกล้เคียงกับข้อมูลที่ได้จากการทดลองมากที่สุดหรือการทำนายพฤติกรรมโดยใช้สมการทางคณิตศาสตร์ การจำลองพฤติกรรมเชิงกลของวัสดุในลักษณะนี้มีข้อดี คือ จะทำนายได้แม่นยำในช่วงที่มีข้อมูลทดลอง ดังนั้นจึงจำเป็นที่จะต้องมีการทดสอบวัสดุในหลายๆลักษณะเพื่อใช้การวิเคราะห์พฤติกรรมให้มีความถูกต้องมากที่สุด กลุ่มที่สองเป็นแบบจำลองที่แทนพฤติกรรมทางกายภาพ (Physical Based Model) เป็น

แบบจำลองที่ไม่จำเป็นต้องมีข้อมูลการทดลองมากก็สามารถทำนายพฤติกรรมได้ การพัฒนามาจากโครงสร้างจุลภาคโดยใช้ทฤษฎีจลศาสตร์ (Kinetic Theory) หรือทฤษฎีกลศาสตร์สถิติ (Statistical Mechanics Theory) สมมติฐานจากการเคลื่อนที่ระดับโซโมเลกุลในแต่ละอิลิเมนต์ ซึ่งการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของวัสดุโพลิเมอร์ประเภทยางถูกนำมาเชื่อมโยงกับการเปลี่ยนแปลงทางเอนโทรปี (Entropy) แบบจำลองจากการสังเกตไม่สามารถทำนายพฤติกรรมที่ไม่ได้มีผลการทดลองได้ เนื่องจากแบบจำลองที่แทนพฤติกรรมจากการสังเกตจะอ้างอิงข้อมูลจากการทดลองมาทำนายพฤติกรรม จากปัญหาดังกล่าวจึงมีการพัฒนาแบบจำลองที่นำความรู้ด้านกลไกการเสีรูปและการวิเคราะห์โครงสร้างโมเลกุล ดังนั้นแม้ว่าข้อมูลจากการทดลองมีไม่เพียงพอ แต่แบบจำลองที่แทนพฤติกรรมกายภาพสามารถทำนายพฤติกรรมช่วงที่ไม่มีข้อมูลได้ (จารุวรรณ, 2550)

2.5.1 แบบจำลองที่แทนพฤติกรรมจากการสังเกต (Phenomenological Model)

2.5.1.1 แบบจำลองพหุนาม (Polynomial Model)

ฟังก์ชันพลังงานความเครียด (Strain Energy Function) สำหรับวัสดุไอโซโทรปิกและอัดตัวไม่ได้ ซึ่งสามารถเขียนให้อยู่ในรูปอนุกรมของค่าที่ไม่ผันแปรของเทนเซอร์การเสีรูปได้ดังนี้

$$W = \sum_{i+j+k=1}^N C_{ijk} (I_1 - 3)^i (I_2 - 3)^j (I_3 - 3)^k \quad (2.22)$$

โดยที่ C_{ijk} เป็นค่าสัมประสิทธิ์ของแบบจำลอง

จากสมมติฐานกำหนดให้วัสดุยางเป็นวัสดุอัดตัวไม่ได้ ดังนั้น $I_3 = 1$ จากสมการข้างต้น แบบจำลองพหุนามจึงลดรูปเป็น

$$W = \sum_{i+j=1}^N C_{ijk} (I_1 - 3)^i (I_2 - 3)^j \quad (2.23)$$

เมื่อ $N = 2$

$$W = C_{10}(I_1 - 3) + C_{01}(I_2 - 3) + C_{11}(I_1 - 3)(I_2 - 3) + C_{20}(I_1 - 3)^2 + C_{02}(I_2 - 3)^2 \quad (2.24)$$

2.5.1.2 แบบจำลองมูนีรีฟลิน (Mooney-Rivlin Model)

แบบจำลองนี้มีรูปแบบเดียวกันกับแบบจำลองพหุนาม โดยกำหนดให้มีค่าอันดับที่ 1 ($N = 1$) แบบจำลองมูนีรีฟลินเป็นแบบจำลองที่ทำนายพฤติกรรมของยางได้ไม่ถูกต้องมากนัก เนื่องจากจำนวนเทอมของแบบจำลองมีน้อยเกินไป อย่างไรก็ตามแบบจำลองนี้สามารถนำไป

อธิบายความสัมพันธ์ของความเค้นและความเครียดได้ในช่วงที่การยืดตัวไม่สูงมาก และมีรูปแบบอื่นๆ ของพลังงานความเครียด ดังนี้

Mooney's original notation :

$$W = C_1(I_1 - 3) + C_2(I_2 - 3) \quad (2.25)$$

Mooney Rivlin notation :

$$W = C_{10}(I_1 - 3) + C_{01}(I_2 - 3) \quad (2.26)$$

The Signiorini form :

$$W = C_{10}(I_1 - 3) + C_{01}(I_2 - 3) + C_{20}(I_1 - 3)^2 \quad (2.27)$$

The Yeoh form:

$$W = C_{10}(I_1 - 3) + C_{20}(I_1 - 3)^2 + C_{30}(I_1 - 3)^3 \quad (2.28)$$

Third order Deformation Form(James, Green, and Simpson):

$$W = C_{10}(I_1 - 3) + C_{01}(I_2 - 3) + C_{11}(I_1 - 3)(I_2 - 3) + C_{20}(I_1 - 3)^2 + C_{30}(I_1 - 3)^3 \quad (2.29)$$

2.5.1.3 แบบจำลองอ็อกเดน (Ogden Model)

เป็นแบบจำลองที่นิยมใช้อีกแบบจำลองหนึ่ง ซึ่งเขียนอยู่ในรูปแบบผลรวมของอัตราส่วนการยืดตัวและสามารถทำนายพฤติกรรมของวัสดุได้ดี แต่จะมีความคลาดเคลื่อนมากเมื่อมีอันดับสูงขึ้น ($N \geq 3$) เนื่องจากเลขยกกำลังเป็นเลขจำนวนจริงใดๆ ซึ่งมีรูปแบบดังนี้

$$W = \sum_{i=1}^n \frac{2\mu_i}{\alpha_i^2} (\lambda_1^{\alpha_i} + \lambda_2^{\alpha_i} + \lambda_3^{\alpha_i} - 3) \quad (2.30)$$

มีค่ามอดูลัสของการเฉือนคือ

$$\mu_0 = \sum_{i=1}^n \mu_i \quad (2.31)$$

แบบจำลองอ็อกเดนที่นิยมใช้คือแบบจำลองอ็อกเดนอันดับที่ 3 ($N = 3$)

2.5.2 แบบจำลองที่แทนพฤติกรรมกายภาพ (Physical Based Model)

2.5.2.1 แบบจำลองนีโอฮุกเกียน (Neo-Hookean Model)

เป็นแบบจำลองที่สามารถทำนายพฤติกรรมได้ดีมีรูปแบบดังนี้

$$W = \frac{1}{2}G(I_1 - 3) \quad (2.32)$$

โดย G คือ มอดูลัสการเฉือน (Shear Modulus)

2.5.2.2 แบบจำลองอรรูดาบอยซ์ (Arruda-Boyce Model)

แบบจำลองอรรูดาบอยซ์เป็นแบบจำลองที่มีพื้นฐานมาจากทฤษฎีทางฟิสิกส์ โดยการพิสูจน์มาจากทฤษฎี Non-Gaussian Network ที่กำหนดให้มีสปริง 8 อันเชื่อมต่อกันที่จุดศูนย์กลางของอิเลเมนต์รูปทรงลูกบาศก์ (Cubic Element) ค่าคงที่ได้มาจากการขยายอนุกรมของ Inverse Langevin Function จากรูปแบบสมการในทฤษฎีข้างต้นสามารถนำเอาค่าคงที่มาใช้ได้มากกว่า 5 เทอมที่กล่าวมา แต่เนื่องจากนักวิจัยหลายคนพบว่าเทอมที่เหลือส่งผลต่อพฤติกรรมของวัสดุน้อยมากจึงพิจารณาตัดออกได้มีรูปแบบดังนี้

$$W = \mu \sum_{i=1}^5 \frac{C_i}{\lambda_m^{2i-2}} (I_1 - 3)^i \quad (2.33)$$

$$\text{โดยที่ } C_1 = \frac{1}{2}, C_2 = \frac{1}{20}, C_3 = \frac{11}{1050}, C_4 = \frac{19}{7000}, C_5 = \frac{519}{673750}$$

μ เป็นมอดูลัสการเฉือนที่ความเครียดต่ำ, λ_m เป็นการล็อกตัวของระยะยึด

2.5.2.3 แบบจำลองวานเดอวาลส์ (Van Der Waals Model)

แบบจำลองวานเดอวาลส์ หรือจะเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า แบบจำลองคิลเลียน (Kilian Model) แบบจำลองนี้จะมีค่า Locking Stretch (λ_m) เป็นค่าที่ใช้บ่งบอกถึงขีดจำกัดในการยืดตัวของโครงข่ายต่อโยงแบบ Non-Gaussian จากโครงสร้างสมการจะเห็นว่าพลังงานความเครียดของวานเดอวาลส์จะมีแนวโน้มเข้าใกล้ค่าไม่จำกัด (Infinity) ดังนั้นแบบจำลองชนิดนี้จึงไม่สามารถอธิบายการดึงที่มีระยะยืดสูงกว่า (λ_m) ได้ ซึ่งถือเป็นข้อจำกัดในการใช้งาน (จารุธรรม, 2550)

$$W = \mu \left\{ -(\lambda_m^2 - 3) [\ln(1 - \eta)\eta] - \frac{2}{3} a \left(\frac{\tilde{I} - 3}{2} \right)^{\frac{3}{2}} \right\} \quad (2.34)$$

โดยที่

$$\tilde{I} = (1 - \beta)I_1 + \beta I_2$$

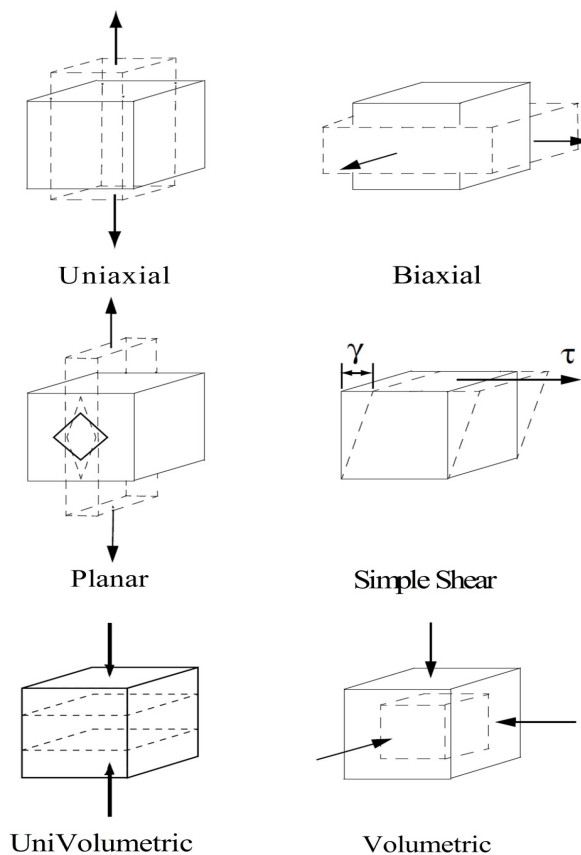
$$\eta = \sqrt{\frac{\tilde{I} - 3}{\lambda_m^2 - 3}}$$

$$a = \frac{1}{\lambda_m - \frac{1}{\lambda_m^2} + \frac{2c_{01}}{3\mu}}$$

β = Invariant Mixture Parameter

2.6 การทดสอบสมบัติทางกลของวัสดุ

การทดสอบสมบัติทางกลของวัสดุยืดหยุ่นเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์พลังงานความเครียด ($C_{10}, C_{01}, C_{11}, C_{20}, C_{30}$) ซึ่งเป็นสมบัติเฉพาะของวัสดุแต่ละชนิด สามารถทำได้โดยนำชิ้นยางทดสอบมาทดสอบด้วยเครื่องทดสอบหาความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น และอัตราการยืดตัวของยางตามลักษณะการทดสอบแบบต่างๆ ดังแสดงใน รูปที่ 2.8

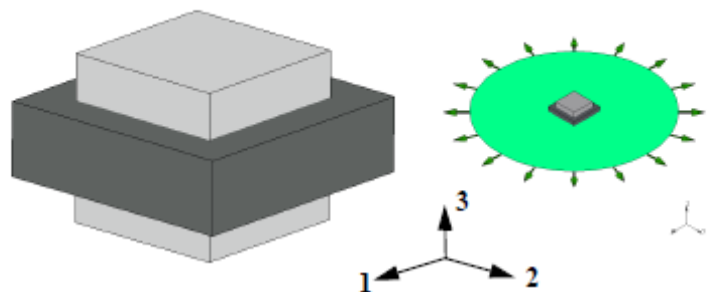


รูปที่ 2.8 แสดงการทดสอบยางในลักษณะต่างๆ

ที่มา : คู่มือ Experimental Elastomer Analysis, 2005

เนื่องจากวัสดุยืดหยุ่นส่วนใหญ่มีสมบัติการอัดตัวไม่ได้สูง (Fully Incompressible Material) จึงไม่ต้องทดสอบการอัดตัว (Volumetric Testing) และเมื่อชิ้นงานได้รับแรงในลักษณะแรงดันหรือความดัน (Hydrostatic Load) พบว่าไม่เกิดการเปลี่ยนรูป เมื่อแรงหรือความเค้นเปลี่ยนไปทำให้สามารถเทียบเท่าพฤติกรรมจากการทดสอบลักษณะต่างๆ ดังรูปที่ 2.9 ดังนั้นการทดสอบแรงกดในแนวแรง (Uniaxial Compression Test) จึงเทียบเท่าลักษณะการเปลี่ยนรูปเดียวกันกับแบบการทดสอบแรงดึงในแนวระนาบ (Planar Test) ซึ่งจะนำไปใช้กำหนดรูปแบบการเปลี่ยนรูปของยางในโปรแกรมไฟไนต์อีเลเมนต์ต่อไป

$$\lambda_1 = \lambda_2 = \lambda \quad \lambda_3 = 1/\lambda^2$$



รูปที่ 2.9 การเทียบการทดสอบแรงกดในแนวแรงเมื่อวัสดุมีสมบัติอัดตัวไม่ได้
ที่มา : คู่มือ Experimental Elastomer Analysis, 2005

บทที่ 3

วิธีการวิจัย

บทนี้จะกล่าวถึง วัสดุ อุปกรณ์และขั้นตอนในการทำวิจัย ซึ่งประกอบด้วย การทดสอบและการจำลองวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์อิลิเมนต์หาค่าความต้านทานการหมุนกลิ้ง ขณะรับภาระน้ำหนักและกลิ้งที่ความเร็วเชิงเส้นต่างๆ เพื่อเปรียบเทียบผลจากตัวอย่างต้นของแต่ละ ยี่ห้อ จากวิธีการทดสอบและวิธีการจำลอง

3.1 วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย

วัสดุที่ใช้ในงานวิจัยนี้ได้แก่ ตัวอย่างต้นสองชั้นขนาด 6.00-9 rim 4 จำนวน 3 ยี่ห้อ โดยตัวอย่างมีลักษณะจำเพาะดังแสดงใน ตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ลักษณะจำเพาะของตัวอย่างต้นที่ใช้ในการวิจัย

Tire size	6.00-9 rim 4
Outside Diameter (mm)	520
Maximum Width (mm)	159
Weight (kg)	≈27

3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์

3.2.1 เครื่องมือวัดกำลังไฟฟ้า ยี่ห้อ CHAUVIN ARNOUX รุ่น C.A 8210 ใช้วัดค่า กำลังไฟฟ้าของเครื่องทดสอบ เพื่อนำไปคำนวณหาค่าความต้านทานการหมุนกลิ้งของตัวอย่างต้น



รูปที่ 3.1 เครื่องมือวัดกำลังไฟฟ้า

3.2.2 ประแจปอนด์ ใช้เพื่อขันประกบกะทะล้อเข้ากับล้อยาง และการขันน็อตยึดล้อกับหน้าแปลนคุมล้อ ตามค่าแรงบิดของแต่ละกรณี



รูปที่ 3.2 ประแจปอนด์

3.2.3 กะทะล้อแบบสองซีก (Split wheel) ทำจากเหล็กแผ่นขึ้นรูป มีขายตามท้องตลาด ซึ่งใช้ได้สำหรับล้อยางแบบบรรจุลมและล้อยางแบบยางตัน



รูปที่ 3.3 กะทะล้อแบบ 2 ซีก

3.2.4 เครื่องทดสอบสมบัติวัสดุเอนกประสงค์ (Universal testing machine) ผลิตโดย Instron รุ่น 8878 Load cell 25 kN โดยใช้ทดสอบหาค่าความสัมพันธ์ของชิ้นยางทดสอบ เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด และนำข้อมูลไปหาค่าคุณสมบัติของวัสดุ



รูปที่ 3.4 เครื่องทดสอบสมบัติวัสดุเอนกประสงค์

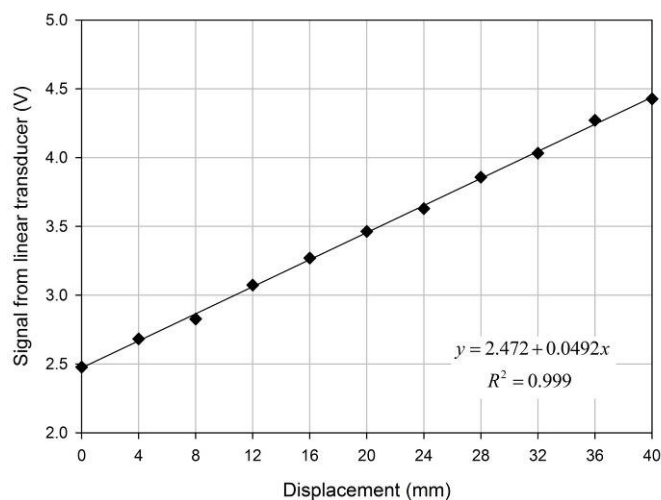
3.2.5 Rectilinear Displacement Transducer รุ่น LT-M-0100-S ยี่ห้อ GEFRAN อุปกรณ์นี้ติดตั้งเพื่อตรวจสอบระยะยวบตัวของล้อยางขณะทดสอบระยะยวบของล้อยางสามารถวัดจากการยืดออกของกระบอกไฮดรอลิกขณะทำการกดล้อยาง ดังรูปที่ 3.5 Displacement Transducer ที่ใช้ในงานวิจัยเป็นแบบก้านยึดหด มีช่วงในการวัดระยะ 0-100 มิลลิเมตร ภายในประกอบด้วยค่าความต้านทานซึ่งแปรเปลี่ยนตามระยะทาง สามารถเก็บข้อมูลเป็นค่าสัญญาณต่างศักย์ไฟฟ้าผ่านอุปกรณ์รวบรวมข้อมูล (Data Acquisition) และแสดงผลทางคอมพิวเตอร์ โดยต่อเข้ากับแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง 5 โวลต์



รูปที่ 3.5 การติดตั้ง Displacement Transducer

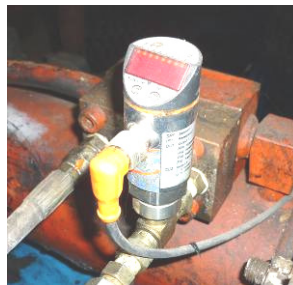
อุปกรณ์นี้ก่อนใช้งานได้ทำการสอบเทียบค่าสัญญาณไฟฟ้าที่ได้กับระยะการยืดของก้านวัด โดยการวัดค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าเทียบกับการวัดระยะยืดด้วยเวอร์เนียคาลิเปอร์ ความละเอียด 0.05 มิลลิเมตร ได้ความสัมพันธ์ดังรูปที่ 3.6 นำความสัมพันธ์ที่ได้ไปใช้ในโปรแกรมเก็บข้อมูลและแสดงผล

Displacement Transducer Calibration Curve

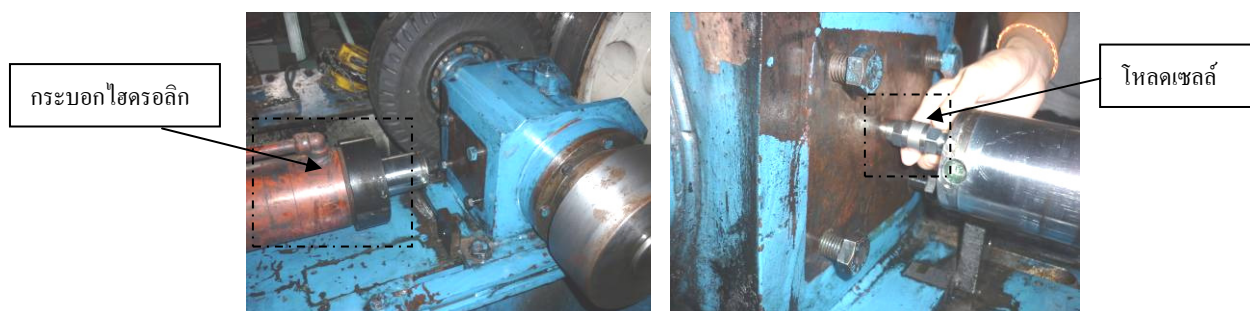


รูปที่ 3.6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความดันไฟฟ้ากับระยะยืดหดของ Displacement Transducer

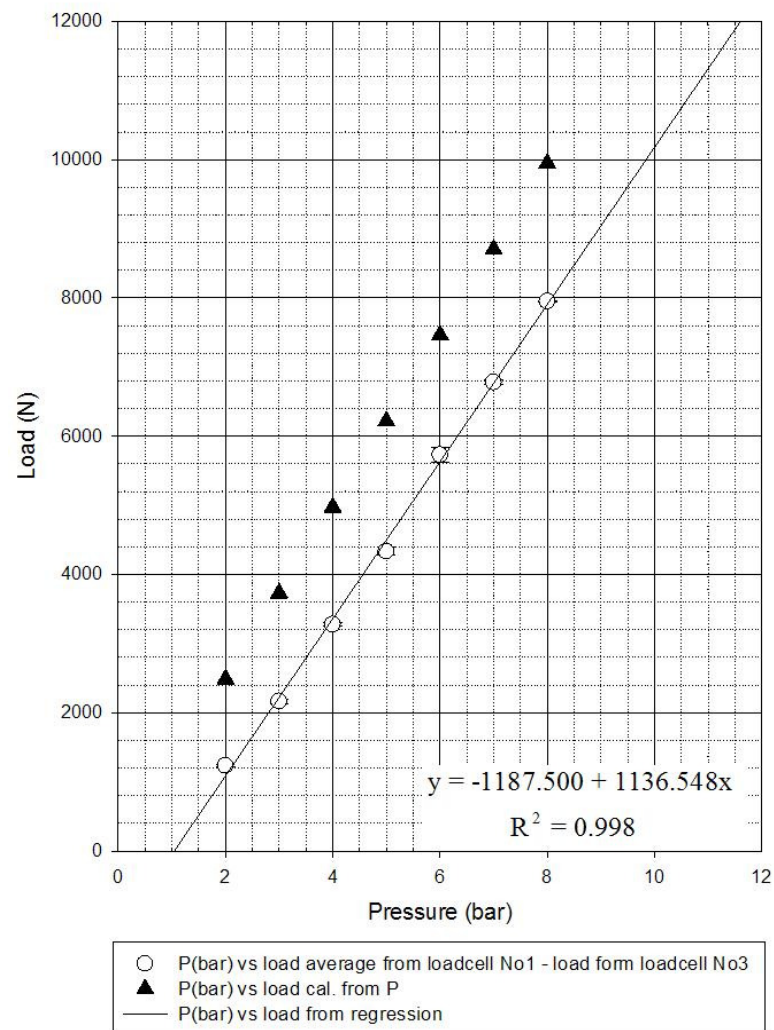
3.2.6 Pressure Sensor ดังรูปที่ 3.7 อุปกรณ์นี้ติดตั้งเพื่อวัดค่าความดันในกระบอกไฮดรอลิก มีหน้าจอบอกค่าความดันและสามารถเก็บค่าสัญญาณเป็นความต่างศักย์ไฟฟ้าทำงานได้โดยต่อเข้ากับแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง 24 โวลต์ สัญญาณที่ได้จะแปรตามความดันของน้ำมันไฮดรอลิกที่เกิดขึ้น สำหรับค่าความดันของน้ำมันที่วัดได้สามารถนำไปคำนวณหาแรงกิริยาที่กระบอกกระทำต่อล้อยางได้ เมื่อรู้ค่าของพื้นที่หน้าตัดกระบอกไฮดรอลิก อุปกรณ์นี้ก่อนใช้งานได้ทำการสอบเทียบค่าที่วัดได้กับ Pressure Gauge มาตรฐานก่อนนำไปใช้งาน แต่เมื่อทำการตรวจสอบอีกขั้นหนึ่งเทียบกับ โหลดเซลล์ดังแสดงใน รูปที่ 3.8 ปรากฏว่าค่าแรงที่คำนวณได้จากการทราบความดันบนพื้นที่หน้าตัดยังไม่ถูกต้อง โดยค่าที่คำนวณได้มากกว่าค่าแรงในความเป็นจริงเนื่องจากความดันที่กระทำบนพื้นที่หน้าตัดเกิดการสูญเสียแรงไปกับแรงเสียดทานระหว่างซีลกับผนังกระบอกไฮดรอลิก ดังนั้นในการวิจัยครั้งนี้ จึงยึดค่าแรงที่วัดได้จากโหลดเซลล์ที่ความดันต่างๆ เป็นหลัก แต่ข้อจำกัดของโหลดเซลล์ที่ใช้ในการตรวจสอบ คือ สามารถรับแรงได้เพียง 10,000 นิวตัน หรือทำการวัดได้มากที่สุดที่ความดันไม่เกิน 8 บาร์ จึงนำค่าลำดับในช่วงที่โหลดเซลล์สามารถเก็บค่าได้ มาสร้างสมการถดถอยมีค่าสหสัมพันธ์ เพื่อใช้ทำนายแรงที่จะเกิดขึ้นในกรณีที่มีความดันน้ำมันไฮดรอลิกมีค่า 12 บาร์ โดยค่าและสมการความสัมพันธ์ระหว่างความดันในกระบอกและแรงที่เกิดขึ้นแสดงดังใน รูปที่ 3.9



รูปที่ 3.7 Pressure Sensor



รูปที่ 3.8 ตรวจสอบแรงที่เกิดขึ้นด้วยโหลดเซลล์



รูปที่ 3.9 ความสัมพันธ์ระหว่างการคำนวณแรงจากความดันของ Pressure Sensor กับแรงที่เกิดขึ้น

สิ่งที่สามารถตรวจจับได้ในขณะทดสอบเพื่อไปสู่ค่าภาระน้ำหนัก มีเพียงค่าความดันที่อ่านได้จาก Pressure Sensor และยึดค่าที่ได้จากการตรวจสอบด้วยโหลดเซลล์ ซึ่งยังเป็นค่าที่ยังไม่ถูกต้องเนื่องจากยังคงมีพื้นที่ที่เกิดการสูญเสียแรงเนื่องจากแรงเสียดทานบริเวณพื้นผิวระหว่างฐานของสปริงเคลือบกับเครื่องทดสอบบริเวณที่รองรับสปริงเคลือบ แต่ค่าที่ได้ก็เข้าใกล้ค่าภาระน้ำหนักที่เกิดขึ้นจริงมากขึ้น และค่าภาระน้ำหนักที่เกิดขึ้นจริงระหว่างพื้นผิวโค้งของด้อยางและครีมนั้นด้วยอุปกรณ์ที่มีอยู่ไม่สามารถตรวจสอบได้ ดังนั้นจึงยึดค่าภาระน้ำหนักตามที่ปรากฏบนโหลดเซลล์ที่แต่ละความดันน้ำมันไฮดรอลิกจากกราฟข้างต้นเป็นหลัก

ในการทดสอบจะทดสอบที่ 3 ภาระน้ำหนักโดยมีความสัมพันธ์ระหว่างความดันเกจน้ำมันไฮดรอลิกที่ควบคุมและภาระน้ำหนักทดสอบดัง ตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันและภาระน้ำหนัก

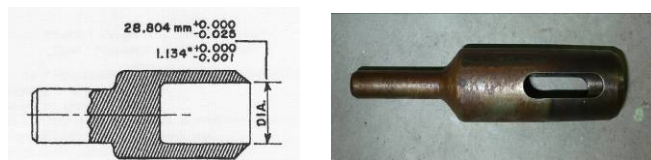
ความดัน (bar)	ภาระน้ำหนัก (N)
4	3,358
8	7,904
12	12,451

3.2.7 แท่นอัดไฮดรอลิก ใช้เพื่อตัดแบ่งตัวอย่าง



รูปที่ 3.10 แท่นอัดไฮดรอลิก

3.2.8 หัวเจาะ ใช้เจาะชิ้นยางของตัวอย่างสำหรับเตรียมชิ้นงานทดสอบมีเส้นผ่านศูนย์กลางตรงกับมาตรฐานการทดสอบ เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด



รูปที่ 3.11 หัวเจาะ

3.2.9 หินเจียร ใช้เจียรเพื่อปรับความสูงและความเรียบได้ฉากของชิ้นยางทดสอบ



รูปที่ 3.12 หินเจียร

3.2.10 เครื่องทดสอบความต้านทานการหมุนกลิ้ง

ความต้านทานการหมุนกลิ้งของล้อยางทดสอบโดยใช้เครื่องทดสอบล้อยางด้วยถนนจำลองแบบลูกกลิ้ง (Test Drum) โดยมีแรงอัดกระทำต่อล้อยางและหมุนไปตามความเร็วที่ต้องการทดสอบ ซึ่งเหมือนการทดสอบการใช้งานล้อยางขณะรับภาระจริง

ฐานของเครื่องทดสอบมีลักษณะเป็นกล่องขนาด กว้าง×ยาว×สูง เท่ากับ 1250 × 2500 × 690 มิลลิเมตร ทำจากเหล็กแผ่นหนา 19 มิลลิเมตร บนฐานติดตั้งประกอบด้วยส่วนที่สำคัญสองส่วนได้แก่ ส่วนลูกกลิ้งและส่วนติดตั้งล้อทดสอบ

ส่วนลูกกลิ้งประกอบด้วย ลูกกลิ้งโลหะ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 89 เซนติเมตร โดยลูกกลิ้งติดกับเพลาลูกขนาด 4 นิ้ว ด้วยลิ้มและยึดด้วยสเปนเซอร์ทั้งสองด้าน เพื่อป้องกันการลื่นตัวในแนวแกนเพลาลูกของลูกกลิ้ง เพลาลูกทั้งสองด้านติดตั้งบน โรลเลอร์แบร์ริงและยึดติดกับฐาน เพลาลูกข้างหนึ่งต่อกับเกียร์ทดเพื่อหมุนลูกกลิ้งดังแสดงใน รูปที่ 3.13 ใช้มอเตอร์แบบ AC Motor Gear ขนาด 10 แรงม้า ความเร็วรอบสูงสุด 1450 รอบต่อนาที ขับผ่านเกียร์ทดอัตรา 1:10 ผ่านชุดพูลี่สายพานไปยังล้อขับ สามารถปรับความเร็วรอบการหมุนของครีมนได้



รูปที่ 3.13 เครื่องทดสอบล้อยางต้น

ส่วนติดตั้งล้อทดสอบประกอบด้วย สปินเดิล (Spindle) เฟรมควบคุมการกดอัดล้อยางโดยไฮดรอลิก (Hydraulics) ดังแสดงใน รูปที่ 3.14 ชุดสปินเดิลทำหน้าที่สำหรับติดตั้งล้อทดสอบให้หมุนตามลูกกลิ้ง ชุดสปินเดิลจะเคลื่อนที่ตามแนวร่องที่เจาะไว้บนฐานเครื่องโดยร่องที่เจาะต้องยาวพอเหมาะเพื่อให้ชุดสปินเดิลสามารถเคลื่อนที่เข้าออกได้ตามรัศมีของล้อยางที่แตกต่างกัน การเคลื่อนที่ของชุดสปินเดิลจะควบคุมโดยเฟรมควบคุมการกดอัดล้อยางซึ่งเป็นตัวส่งผ่านแรงจากกระบอกลไฮดรอลิกไปยังล้อยางทดสอบ (วีระชัย,2552)



รูปที่ 3.14 ส่วนติดตั้งล้อทดสอบ

ชุดไฮดรอลิกทำหน้าที่ควบคุมการเคลื่อนที่เข้าออกของชุดสปริงเคิล โดยกระบอกไฮดรอลิกวางอยู่ตรงกลางของเฟรมและส่งแรงในแนวอนผ่านเฟรมไปกระทำต่อฐานของชุดสปริงเคิล แรงนี้ส่งผ่านมายังล้ออย่างทำให้ล้อยกคบบนลูกกลิ้ง

ในการประกอบกะทะล้อเข้ากับล้ออย่างต้นทำโดยนำกะทะล้อแต่ละซีกใส่จากแต่ละด้านของล้ออย่างต้นและทำการอัดกะทะล้อให้เข้าไปในเส้นรอบวงด้านในของล้ออย่างด้วยแม่แรงไฮดรอลิก โดยอัดข้างใดข้างหนึ่งให้เข้าไปก่อนจนแน่น ดังแสดงใน รูปที่ 3.15 จากนั้นอัดกะทะล้อซีกที่เหลือเข้าไปในวงล้อด้านใน โดยต้องให้รูที่ไว้สำหรับใส่สลักเกลียวให้ตรงกัน และทำการขันบีบให้กะทะล้อทั้งสองซีกบีบประกบกันสนิท ซึ่งใช้แรงบิดในการขันบีบ สำหรับล้ออย่างต้นขนาด 6.00-9 ที่ช่วง 60-90 ปอนด์-ฟุต (TMC Corporation,2000) โดยทำการขันบีบที่ 70 ปอนด์-ฟุต



รูปที่ 3.15 การประกอบล้ออย่างเข้ากับกะทะล้อ

การติดตั้งล้อยางต้นบนเครื่องทดสอบ จะติดตั้งตรงตำแหน่งดัง รูปที่ 3.16 โดยใช้ทอร์กในการขันน็อตยึดล้อกับหน้าแปลนล้อด้วยแรง 80 ปอนด์-ฟุต ทำการอัดล้ออย่างให้ชนกับล้อขับโดยใช้แรงอัดจากกระบอกไฮดรอลิก แรงอัดล้อจะใช้แรงอัดที่มีขนาดเท่ากับน้ำหนักของรถฟอร์คลิฟท์ทั่วไป ซึ่งน้ำหนักของตัวรถขณะไม่บรรทุกสิ่งของจะมีน้ำหนัก 3,800 กิโลกรัม สามารถรับน้ำหนักบรรทุกได้สูงสุด 2,500 กิโลกรัม ดังนั้นล้อยางต้นแต่ละล้อจะรับน้ำหนักขณะไม่บรรทุกสิ่งของ เท่ากับ 950 กิโลกรัม และจะรับน้ำหนัก 1,575 กิโลกรัม เมื่อบรรทุกสิ่งของสูงสุด



รูปที่ 3.16 การติดตั้งล้อยางบนเครื่องทดสอบ

แรงอัดที่ใช้กดอัดล้ออ่านจากเกจวัดความดันที่ติดตั้งบนลิ้นควบคุมทิศทางซึ่งเป็นความดันกระบอกไฮดรอลิก ซึ่งแรงดันที่อ่านได้จากเกจวัดความดันและสามารถเทียบเป็นน้ำหนักกดล้อได้

ความเร็วที่ใช้ในการทดสอบจะควบคุมความเร็วรอบของเพลาก่อนผ่านเกียร์ทดอัตราทด 1:10 ซึ่ง โดยควบคุมที่ผู้ควบคุมดังแสดงใน รูปที่ 3.17 ซึ่งทำให้ดรัมมีความเร็วรอบเปลี่ยนและเสมือนเกิดความเร็วเชิงเส้นของล้อยางต้น ในขณะที่เคลื่อนที่สัมผัสกับดรัมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.89 เมตร มีค่า ดังสมการ

$$v_{road} = \frac{v_{rev.shaft}}{10} \times \frac{60}{1000} \times \pi(0.89) \quad (3.1)$$

โดยที่ v_{road} คือ ความเร็วทดสอบเชิงเส้น (km/hr)

$v_{rev.shaft}$ คือ ความเร็วรอบ (rpm)

ในการทดสอบจะทดสอบที่ 3 ความเร็วโดยมีความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบที่ควบคุมและความเร็วทดสอบดังตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบของเพลาก่อนผ่านเกียร์ทดและความเร็วทดสอบเชิงเส้น

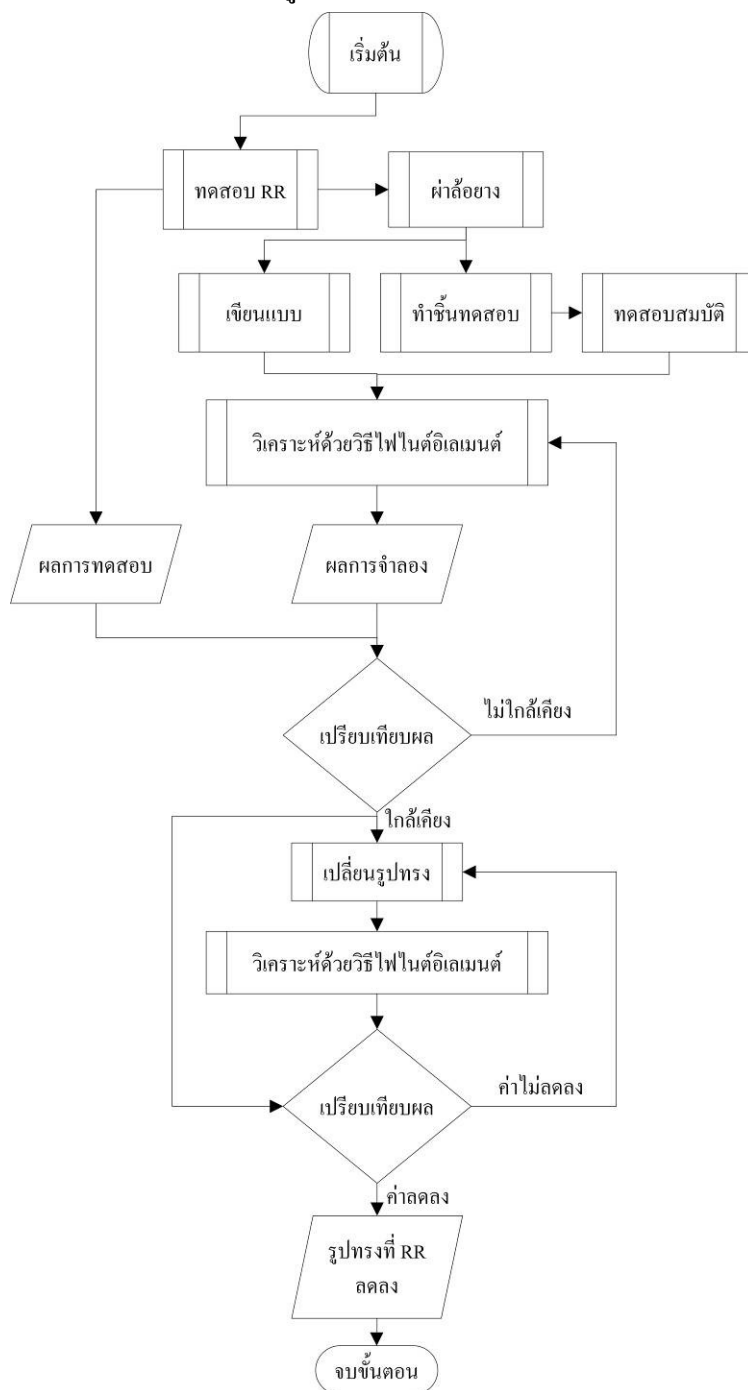
ความเร็วรอบ (<i>rpm</i>)	ความเร็วทดสอบเชิงเส้น (<i>km/hr</i>)
300	5.03
600	10.06
900	15.09



รูปที่ 3.17 ตู้ควบคุมความเร็วของเครื่องทดสอบ

3.3 ขั้นตอนและวิธีวิจัย

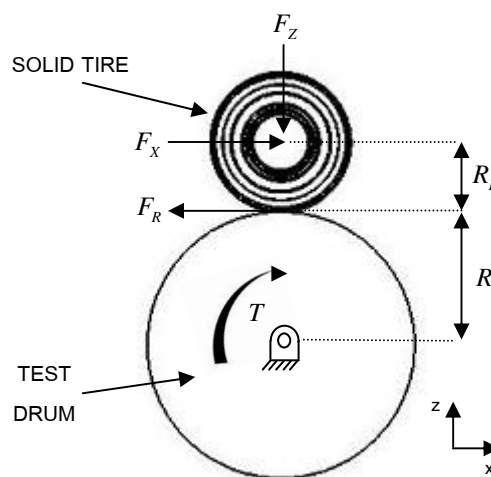
การวิจัยเรื่องการลดความต้านทานการหมุนกลิ้งของล้อยางตันด้วยการปรับสัดส่วนหน้าตัดยางชั้นนอกและชั้นใน ประกอบด้วย 4 กิจกรรมหลัก ซึ่งแสดงแผนภูมิความสัมพันธ์ของกิจกรรมหลักในการวิจัยดังแสดงใน รูปที่ 3.18



รูปที่ 3.18 แผนภูมิแสดงขั้นตอนหลักในการวิจัย

รายละเอียดสำหรับกิจกรรมหลักแต่ละกิจกรรม คือ

3.3.1 กิจกรรมที่ 1 : การทดสอบหาค่าความต้านทานการหมุนกลิ้งของล้อยางตัน โดยทดสอบล้อจำนวน 3 ยี่ห้อ ยี่ห้อละ 2 ล้อทดสอบ ตัวแปรที่ศึกษา คือ 3 ภาระน้ำหนัก ได้แก่ 3,358 7,904 และ 12,451 นิวตัน และ 3 ความเร็ว ได้แก่ 5.03 10.06 และ 15.09 กิโลเมตรต่อชั่วโมง สำหรับรายละเอียดวิธีการวัดตามมาตรฐาน SAE J1269 นั้นสามารถวัดได้ 3 วิธี คือ วิธีวัดแรง วิธีวัดแรงบิด และวิธีวัดกำลังไฟฟ้า โดยทั้ง 3 วิธีให้ผลที่สอดคล้องกัน โดยรูปแบบแรงที่ใช้ลักษณะการจำลองและระยะต่างๆบนชุดทดสอบ แสดงดัง รูปที่ 3.19



รูปที่ 3.19 แรงและระยะต่างๆบนชุดทดสอบ

วิธีวัดแรง

วิธีนี้จะทำการวัดแรงที่แกนเพลลาของล้อ (F_x) โดยติดตั้งโหลดเซลล์ในแนวแกน x และทำการวัดรัศมีภาระน้ำหนัก (R_L) แล้วนำไปคำนวณหาค่าความต้านทานการหมุนกลิ้ง ดังสมการที่ 3.2

$$F_R = F_x (1 + R_L / R) \quad (3.2)$$

โดยที่	F_R	คือ ค่าความต้านทานการหมุนกลิ้ง (N, lbf)
	F_x	คือ ขนาดของแรงสุทธิที่แกนเพลลาของล้อ (N, lbf)
	R_L	คือ รัศมีภาระน้ำหนัก (m, in)
	R	คือ รัศมีลูกกลิ้งพื้นทดสอบ (Test Drum) (m, in)

ถ้าวัดด้วยวิธีนี้ แรงเสียดทานจากจารบีภายในลูกปืนล้อและแรงต้านอากาศมีผลต่อค่าแรงที่แกนเพลลาของล้อ ผลการทดลองอาจเกิดจากการผิดพลาดของการที่ชุดทดสอบไม่ได้

แนวแกน คือ แกนเพลาล้อทดสอบและแกนเพลารับน้ำหนักไม่ขนานในแนวแกน และไม่อยู่ในระนาบเดียวกัน และการวัดรัศมีภาระน้ำหนักที่คลาดเคลื่อนจะส่งผลให้เกิดการผิดพลาดในการคำนวณค่าความต้านทานการหมุนกลิ้งมากขึ้น

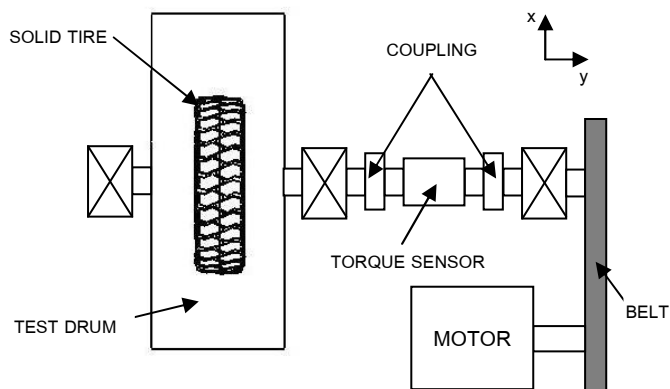
วิธีวัดแรงบิด

วิธีนี้จะทำการวัดแรงบิดโดยการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจรู้แรงบิด (Torque Sensor) ของเพลาดำแหน่งก่อนส่งกำลังให้กับลูกกลิ้งพื้นทดสอบ ดังแสดงในรูปที่ 3.20 แล้วนำไปคำนวณค่าความต้านทานการหมุนกลิ้ง ดัง สมการที่ 3.3

$$F_R = T / R \quad (3.3)$$

โดยที่ F_R คือ ค่าความต้านทานการหมุนกลิ้ง (N,lbf)
 T คือ แรงบิดสุทธิ (N·m,lbf·in)
 R คือ รัศมีลูกกลิ้งพื้นทดสอบ (m,in)

วิธีนี้ตัวแปรที่วัดมีจำนวนไม่มากและสมการที่ใช้ไม่ซับซ้อน แต่มีการสูญเสียของพลังงานส่วนเกินที่วัดได้มากกว่าวิธีวัดแรง คือ โมเมนต์ความเฉื่อยของลูกกลิ้งพื้นทดสอบ



รูปที่ 3.20 แสดงตำแหน่งติดตั้งอุปกรณ์ตรวจรู้แรงบิด

วิธีวัดกำลังไฟฟ้า

วิธีนี้อาศัยการวัดกำลังไฟฟ้าที่มอเตอร์หรือต้นกำลัง โดยทำการวัดความต่างศักย์ไฟฟ้า ค่ากระแสไฟฟ้า และค่าพาวเวอร์แฟกเตอร์ เพื่อคำนวณกำลังไฟฟ้าที่ใช้ในระบบ ดัง สมการที่ 3.4

$$F_R = c \cdot P / v \quad (3.4)$$

โดยที่	F_R	คือ ค่าความต้านทานการหมุนกลิ้ง (N, lbf)
	c	คือ ค่าคงที่ มีค่า 3.60 สำหรับในกรณีความเร็วเป็นกิโลเมตรต่อชั่วโมง และมีค่า 0.503 ในกรณีความเร็วเป็นไมล์ต่อชั่วโมง
	P	คือ กำลังไฟฟ้าสุทธิของมอเตอร์ (W)
	v	คือ ความเร็วในการทดสอบ (km/h, mph)

สำหรับวิธีนี้ไม่จำเป็นต้องติดตั้งอุปกรณ์ตรวจรู้เพื่อวัดแรงหรือแรงบิดซึ่งมีราคาแพง ใช้เพียงแค่ พาวเวอร์มิเตอร์เพื่อวัดกำลังไฟฟ้า แต่มีข้อเสีย คือ ค่าที่วัดได้ครอบคลุมถึงแรงที่สูญเสียในระบบทั้งระบบ

เนื่องจากวิธีวัดแรงและวิธีวัดแรงบิดนั้น จำเป็นต้องใช้งบประมาณสูงในการสั่งซื้ออุปกรณ์มาติดตั้งเพิ่ม ในงานวิจัยจึงเลือกใช้วิธีวัดกำลังไฟฟ้าซึ่งเหมาะสมกับสภาพการณ์มากที่สุด

การหาค่าข้อมูลสุทธิ

ในการทดลองนั้นจำเป็นต้องมีการหักค่าความต้านทานอื่นๆ (Parasitic Loss) เช่น แรงเสียดทานจากจารบีภายในลูกปืน แรงต้านอากาศ โมเมนต์ความเฉื่อยของระบบ ที่ไม่ใช่แรงต้านทานการหมุนกลิ้งที่เกิดจากล้อยาง ซึ่งหาได้จากการใส่ภาระน้ำหนักเพียงเล็กน้อย เพื่อให้ล้อยางต้นหมุนสัมผัสกับพื้นผิวสัมผัส โดยปราศจากการลื่นไถล จากนั้นวัดกำลังไฟฟ้าที่ได้ นำไปหักออกจากค่าที่ได้จากการทดสอบจริง เพื่อให้เป็นค่าของข้อมูลที่เป็นผลสุทธิจากความต้านทานการหมุนกลิ้งที่เกิดจากล้อยางเพียงอย่างเดียว

การทดสอบ

สำหรับล้อยางต้นใหม่ที่ไม่ว่านการใช้งาน จำเป็นต้องมีการปรับสภาพโครงสร้างภายในอย่างถาวร โดยการหมุนด้วยความเร็วเชิงเส้น 10 กิโลเมตรต่อชั่วโมงภายใต้ภาระน้ำหนักจากความดัน 8 บาร์เป็นเวลา 30 นาที จากนั้นจึงปล่อยยางทิ้งไว้และเย็นตัวเข้าสู่อุณหภูมิห้อง จึงเริ่มทำการทดสอบ

สำหรับรายละเอียดขั้นตอนการทดสอบมีดังนี้

1. ประกอบกะทะล้อเข้ากับล้อยางต้น และติดตั้งล้อยางต้นบนเครื่องทดสอบ โดยวิธีการประกอบได้แสดงรายละเอียดไว้ใน หัวข้อ 3.2.10
2. ตรวจสอบระยะยุบล้อยางเพื่อเซตศูนย์ ระยะยุบ

3. เปิดเครื่องเพื่ออุ่นยาง โดยหมุนที่ความเร็ว 10 กิโลเมตรต่อชั่วโมง ภายใต้ภาระน้ำหนักจากความดัน 8 บาร์ เป็นเวลา 10 นาที จากนั้นปั๊มถอยยางออก
4. ทดสอบให้ครีมหุ่นด้วยความเร็วเชิงเส้น 5 กิโลเมตรต่อชั่วโมง
5. เพิ่มความดันน้ำมัน ไฮดรอลิกเพื่อให้ล้อยาง สัมผัสและหมุนตามไปกับครี โดยให้ยางหมุนตามโดยไม่เกิดการสลลิป (สังเกตจากเสียงบดล้อยาง) เพื่อบันทึกค่า กำลังไฟฟ้าเนื่องจาก Parasitic Loss ครั้งที่ 1 และได้แสดงตัวอย่างการบันทึกค่าดัง รูปที่ 3.21
6. เพิ่มความดันไฮดรอลิกเป็น 4 บาร์ แล้วบันทึกค่ากำลังไฟฟ้า และระยะยุบ (ควรใช้เวลาให้น้อยที่สุดในขั้นตอนนี้ เพราะในขั้นตอนนี้อ้อยางมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้น หากใช้เวลามากจะทำให้ข้อมูลเกิดความผิดพลาดมากขึ้น)
7. ปรับคอนโทรลวาล์ว เพื่อเปลี่ยนทิศทางการไหล จากนั้นปั๊มถอยล้อยางห่างจากครี แล้วทำซ้ำในขั้นตอนที่ 5 เพื่อบันทึกค่ากำลังไฟฟ้า Parasitic Loss ครั้งที่ 2 และสามารถนำค่านี้ไปเป็นค่ากำลังไฟฟ้าของ Parasitic Loss ครั้งที่ 1 ในกรณีความดันถัดไป
8. ทำซ้ำในขั้นตอนที่ 6 แต่เปลี่ยนความดัน เป็น 8 และ 12 บาร์ ตามลำดับ
9. ทำซ้ำในขั้นตอนที่ 4 แต่เปลี่ยนความเร็วเป็น 10 และ 15 กิโลเมตรต่อชั่วโมงตามลำดับ
10. ปิดเครื่อง สิ้นสุดการทดสอบ

ตารางบันทึกผลการทดลอง

วันที่ ๑๑ มิถุนายน ๒๕๖๔ ยางยี่ห้อ: [] 1 ครั้ง 1 T Ambient: 30.2 T Tire: 34.6

โหลด	ความเร็ว	P.Parasitic loss(kw)	P(kw)	ระยะยุบ(mm)	Pnet(kw)
4bar	300 rpm.	1.39 ; 1.41	1.78	4.64	
8bar	5 km/hr	1.41 ; 1.40	2.58	9.79	
12bar		1.40 ; 1.40	3.48	14.01	
4bar	๕๐๐ rpm.	1.69 ; 1.67	1.97	4.59	
8bar	๑๐ km/hr	1.67 ; 1.67	2.85	9.74	
12bar		1.67 ; 1.64	3.88	14.17	
4bar	๑๐๐ rpm.	1.93 ; 1.85	2.21	4.53	
8bar	15 km/hr	1.85 ; 1.80	3.07	9.84	
12bar		1.๘๐ ; 1.๗๗	3.98	13.96	

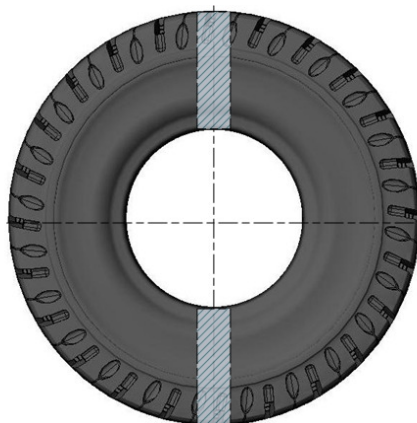
รูปที่ 3.21 ตัวอย่างตารางบันทึกผลการทดลองและขั้นตอนที่ทำการบันทึกค่า

และทำการทดลองซ้ำ ล้อทดสอบเดิม 2 ครั้ง แต่ต้องให้อุณหภูมิล้อยางเข้าสู่ อุณหภูมิสิ่งแวดล้อมก่อนการทดสอบ เพื่อลดความผิดพลาดของผลการทดสอบ จากนั้นจึงเปลี่ยน ล้อทดสอบ จนครบ ทั้ง 3 ยี่ห้อ จำนวนทั้งหมด 6 ล้อ สำหรับการวิเคราะห์ผลการทดสอบจะนำเสนอ ต่อไปในบทที่ 4

3.3.2 กิจกรรมที่ 2 : การทดสอบสมบัติทางกลของยาง (Mechanical Properties of Rubber) เป็นการนำตัวอย่างชิ้นยางจากล้อยางแต่ละยี่ห้อมาทดสอบสมบัติทางกลด้วยเครื่องทดสอบ ความแข็งแรงของวัสดุ โดยหาความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดหรือความเค้นกับ อัตราการยืดตัว ของยางโดยการทดสอบการกดในแนวแกน และนำความสัมพันธ์มากำหนด พฤติกรรมของยางในแบบจำลองไฟไนต์อิเลเมนต์ต่อไป

โดยมีรายละเอียดของขั้นตอนดังนี้

1. นำล้อยางภายหลังการทดสอบตัดด้วยแท่นอัดไฮดรอลิกปลายตัดใบมีด จำนวน 2 ชิ้น ดังแสดงในรูปที่ รูปที่ 3.22



รูปที่ 3.22 แสดงบริเวณส่วนของล้อยางสำหรับตัดแบ่งเพื่อทำชิ้นงานทดสอบ

2. จากนั้นนำยางที่ได้ เจาะด้วยสว่านแท่นดอกยึดด้วยหัวเจาะ ดังแสดงใน รูปที่ 3.23 โดยเจาะบริเวณยางนอกและยางในอย่างละ 1 ชิ้น และทำซ้ำกับยางชิ้นที่เหลือเช่นเดียวกัน ได้ ชิ้นงานทดสอบ ของยางแต่ละยี่ห้อ จำนวน 4 ชิ้น (ชิ้นใน 2 ชิ้นนอก 2) ต่อเส้น โดยมีเส้นผ่าน ศูนย์กลางตามมาตรฐานการทดสอบ ดังแสดงในรูปที่ 3.24



รูปที่ 3.23 การเจาะยางให้ได้ทรงกระบอก



รูปที่ 3.24 ชิ้นงานภายหลังการเจาะ

3. นำชิ้นยางที่ได้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางตามมาตรฐาน มาปรับแต่งความสูงให้ได้ขนาด 12.5 มิลลิเมตรด้วยหินเจียรแทน ได้ชิ้นงานลักษณะพร้อมทดสอบการกดดังแสดงใน รูปที่ 3.25



(ก) เจียรด้วยหินเจียรแทน



(ข) ชิ้นงานภายหลังการเจียรปรับแต่งความสูง

รูปที่ 3.25 การเจียรปรับแต่งความสูง

4. หลังจากได้ชิ้นงานพร้อมทดสอบการกด จากนั้นทดสอบการกดด้วยเครื่องทดสอบสมบัติวัสดุเอนกประสงค์ ดังแสดงใน รูปที่ 3.26 โดยใช้มาตรฐาน ASTM D575-91 กดด้วยอัตราความเร็ว 12 มิลลิเมตรต่อนาที



รูปที่ 3.26 ทดสอบการกดด้วยเครื่องทดสอบสมบัติวัสดุเอนกประสงค์

5. บันทึกค่าความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดจากการทดสอบยางทั้งหมด 12 ชิ้น (ทดสอบชิ้นละ 2 ครั้ง) พร้อมตรวจสอบความถูกต้องข้อมูลคุณสมบัติทางกลของแต่ละชิ้นหือจากค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของชุดข้อมูล จากนั้นเฉลี่ยข้อมูลเหลือข้อมูลเพียง 6 ชุด

6. หาค่าคุณสมบัติของวัสดุ ทั้ง 6 ชุด โดยใช้โปรแกรม MSC.MARC จากนั้นตรวจสอบโดยการจำลองวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์อิลิเมนต์โดยมีเงื่อนไขขอบเขตและขนาดรูปทรงเหมือนการทดสอบการกด ที่ได้กระทำในขั้นตอนที่ 4

7. สิ้นสุดการทดสอบ ได้ค่าคุณสมบัติวัสดุ

3.3.3 กิจกรรมที่ 3 : การวิเคราะห์และยืนยันความถูกต้องของแบบจำลองไฟไนต์อิลิเมนต์ ในกิจกรรมนี้ประกอบด้วย การเขียนแบบล้อย่าง จากนั้นวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์อิลิเมนต์ โดยใช้ค่าคุณสมบัติวัสดุจากที่ได้ในกิจกรรมที่ 2 โดยรายละเอียดของกิจกรรมประกอบไปด้วย

- เขียนแบบ โมเดลล้อย่าง 3 ยี่หื้อ
- การจำลองหาค่าความต้านทานการหมุนกลิ้งล้อย่าง 3 ยี่หื้อ พร้อมเปรียบเทียบกับผลการทดลอง
- การตรวจสอบจำนวนอิลิเมนต์

3.3.4 กิจกรรมที่ 4 : การศึกษาตัวแปรต่างๆคือสัดส่วนล้อย่างต้นชั้นในต่อล้อย่างต้นชั้นนอก ที่ส่งผลต่อค่าความต้านทานการหมุนกลิ้ง โดยตัวแปรที่ศึกษาในแบบจำลองไฟไนต์อิลิเมนต์ คือ

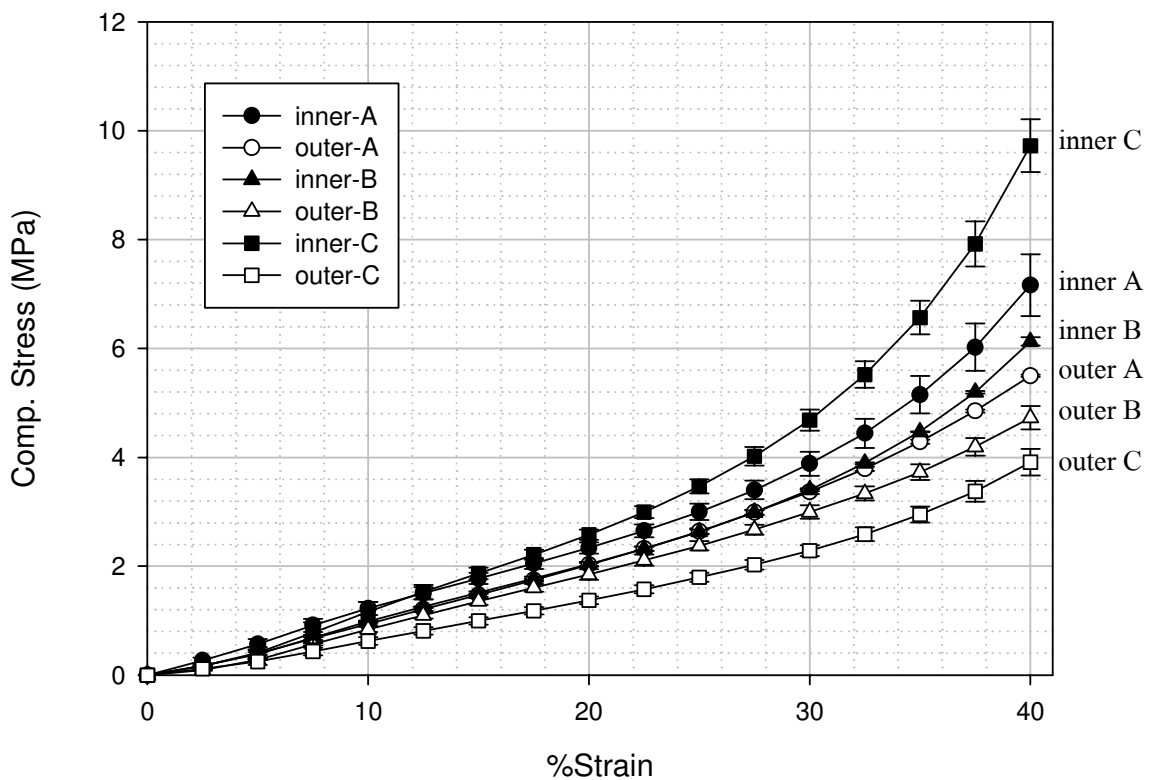
- การปรับเปลี่ยนหน้าตัดยางนอกบริเวณแก้มยางหรือส่วนเกี่ยวข้อ 3 รูปแบบ
- ในแต่ละรูปแบบของหน้าตัดยางนอกจะเปลี่ยนรูปแบบยางใน 3 รูปแบบ
- ศึกษารูปแบบดอกยาง 2 ลักษณะ คือ S, H Profile

บทที่ 4

ผลการทดลอง

4.1 สมบัติทางกลของยาง

การทดสอบสมบัติทางกลของยางมีวัตถุประสงค์หลัก เพื่อวิเคราะห์หาค่าสัมประสิทธิ์ของสมการพลังงานความเครียด ซึ่งจะนำไปใช้กำหนดพฤติกรรมทางกลของยางในต้นแบบไฟไนต์อิลิเมนต์ โดยการทดสอบสมบัติทางกล คือ การทดสอบการกดในแนวแกนเดียว (Uniaxial Compression Test) ซึ่งจะทำการทดสอบทางกลของยางชั้นในและยางชั้นนอกของแต่ละยี่ห้อ โดยจะทดสอบชิ้นงานแต่ละส่วน(ยางชั้นนอกและยางชั้นใน) ส่วนละ 2 ชิ้น ทำการทดสอบชิ้นละ 2 ครั้ง โดยใช้เครื่องทดสอบสมบัติวัสดุ จากนั้นนำผลการทดสอบมาหาค่าเฉลี่ย โดยมีผลการทดสอบแสดงดังใน รูปที่ 4.1 โดย inner คือ ชิ้นงานทดสอบจากยางชั้นใน และ outer คือ ชิ้นงานทดสอบจากยางชั้นนอก ของยาง 3 ยี่ห้อ คือ A B C และได้แสดงรายละเอียดของค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานดัง ตารางที่ 4.1



รูปที่ 4.1 ผลการทดสอบทางกลของยางในและยางนอกของแต่ละยี่ห้อ

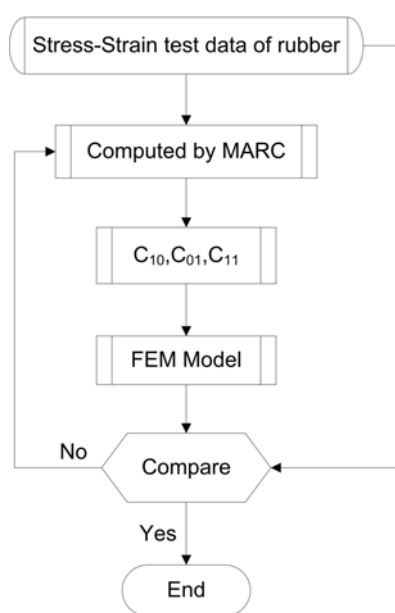
ตารางที่ 4.1 ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าความเค้นของล้อยางตัน

%Strain	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน ($M \square a$)					
	Inner-A	Outer-A	Inner-B	Outer-B	Inner-C	Outer-C
2.5	0.05	0.01	0.02	0.01	0.00	0.03
5	0.10	0.03	0.06	0.00	0.10	0.06
7.5	0.12	0.03	0.05	0.02	0.19	0.07
10	0.12	0.02	0.02	0.05	0.18	0.07
12.5	0.11	0.03	0.00	0.06	0.13	0.07
15	0.10	0.03	0.02	0.06	0.11	0.07
17.5	0.10	0.03	0.03	0.07	0.09	0.07
20	0.11	0.04	0.04	0.10	0.09	0.07
22.5	0.12	0.04	0.04	0.10	0.11	0.07
25	0.15	0.05	0.04	0.08	0.13	0.08
27.5	0.17	0.05	0.04	0.09	0.17	0.09
30	0.22	0.04	0.03	0.13	0.20	0.10
32.5	0.27	0.04	0.02	0.13	0.24	0.12
35	0.35	0.04	0.00	0.14	0.31	0.15
37.5	0.43	0.03	0.02	0.16	0.41	0.19
40	0.57	0.02	0.08	0.21	0.48	0.24

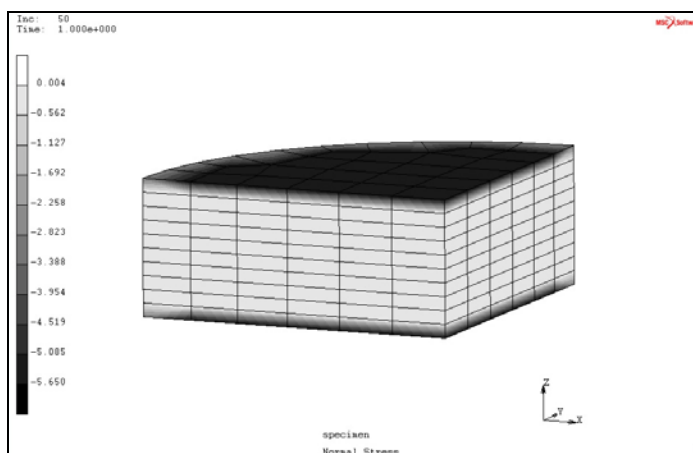
จากผลการทดสอบพบว่า ยางชั้นในของล้อยางตัน 2 ยี่ห้อ (A และ C) มีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานสูง โดยสูงถึง $0.5 M \square a$ เนื่องจากยางชั้นในของล้อยางตัน 2 ยี่ห้อนี้ ภายใต้อายุการใช้งานที่ผ่านไปด้วยผ้าใบจำนวนมาก และการเรียงตัวของผ้าใบในเนื้อวัสดุไม่เป็นระเบียบ ส่งผลให้วัสดุไม่เป็นวัสดุไอโซโทรปิก เป็นผลทำให้ค่าการวัดความสัมพัทธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของชิ้นงานทดสอบที่สุ่มตัดมาเกิดความแตกต่างอย่างเห็นได้ชัด และเป็นไปได้ยากหากต้องการความถูกต้องในจุดนี้เนื่องจากการเรียงตัวอย่างไม่เป็นระเบียบของผ้าใบ ในการทดสอบ จึงไม่พิจารณาในจุดนี้ และเลือกใช้ค่าเฉลี่ยจากการทดสอบ เพื่อหาค่าคุณสมบัติวัสดุเช่นเดียวกันกับวัสดุยางทั่วไป

4.2 ค่าสัมประสิทธิ์พลังงานความเครียด

การหาค่าสัมประสิทธิ์ของสมการพลังงานความเครียดเพื่อกำหนดพฤติกรรมของยางในต้นแบบไฟไนต์อีเลเมนต์ ทำได้โดยนำค่าลำดับความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดที่ได้จากการทดสอบการกด มาประมวลผลด้วย โปรแกรม MSC.MENTAT จากนั้นสร้างแบบจำลองขนาดชิ้นงานทดสอบ แล้ววิเคราะห์ผลด้วยวิธีไฟไนต์อีเลเมนต์ เพื่อยืนยันความถูกต้องของค่าสัมประสิทธิ์พลังงานความเครียด โดยมีแผนภูมิขั้นตอนการยืนยัน ดังแสดงใน รูปที่ 4.2 และแบบจำลองชิ้นงานทดสอบแรงกด ดังแสดงใน รูปที่ 4.3



รูปที่ 4.2 แผนภูมิขั้นตอนการยืนยันความถูกต้องสัมประสิทธิ์พลังงานความเครียด



รูปที่ 4.3 แบบจำลองชิ้นงานทดสอบแรงกด

จากแผนภูมิใน รูปที่ 4.2 สามารถอธิบายรายละเอียดของแต่ละขั้นตอนได้ดังนี้

1. หาค่า C_{10}, C_{01}, C_{11} จากข้อมูลการทดสอบความเค้นความเครียด โดยใช้โปรแกรม MSC.MENTAT
2. สร้างแบบจำลองชิ้นงานที่มีลักษณะและขนาดเหมือนชิ้นงานทดสอบ ด้วยโปรแกรมทางไฟไนต์อิลเมนต์ กำหนดให้ยังมีค่าสัมประสิทธิ์พลังงานความเครียด C_{10}, C_{01}, C_{11} ตามที่ประมวลผลได้ในตอนต้น ใช้อิลเมนต์แบบสามมิติรูปสี่เหลี่ยม 9 โหนด (Type 84, Three-dimensional Arbitrarily Distorted Brick, Herrmann Formulation) จำนวน 1200 อิลเมนต์
3. หาค่าความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดจากแบบจำลองข้างต้น จากนั้นเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดที่ได้จากผลการทดสอบ
4. คำนวณหาร้อยละของความแตกต่างเฉลี่ยตลอดช่วงความเครียดที่พิจารณาตามสมการที่ 4.1 เพื่อแสดงการเปรียบเทียบ

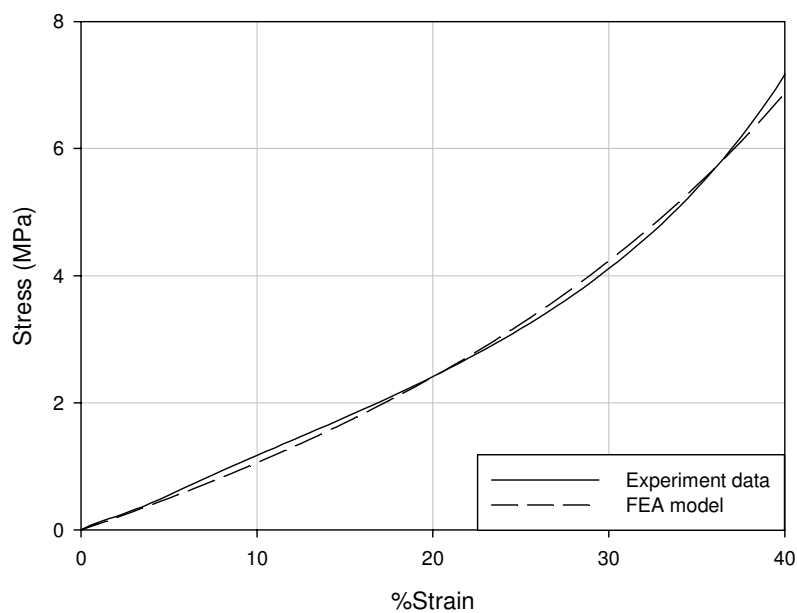
$$\text{ร้อยละความแตกต่างเฉลี่ย (\%)} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{|\sigma_{FEA} - \sigma_{exp}|}{\sigma_{exp}} \times 100 \quad (4.1)$$

- โดยที่ σ_{FEA} คือ ค่าความเค้นที่ได้จากแบบจำลองไฟไนต์อิลเมนต์
 σ_{exp} คือ ค่าความเค้นที่ได้จากการทดลองที่ความเครียดใดๆ
 N คือ จำนวนคู่ลำดับความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด

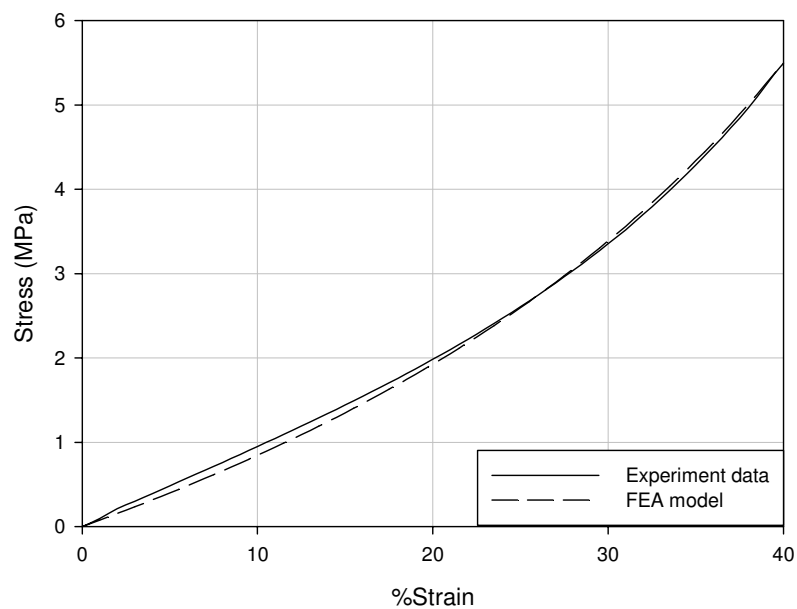
สรุปผลการยืนยันความถูกต้องของค่าสัมประสิทธิ์พลังงานความเครียดในลักษณะต่างๆ สามารถสรุปผลได้ดังตารางที่ 4.2 ดังนี้

ตารางที่ 4.2 ค่าสัมประสิทธิ์พลังงานความเครียดของยางชนิดต่างๆ

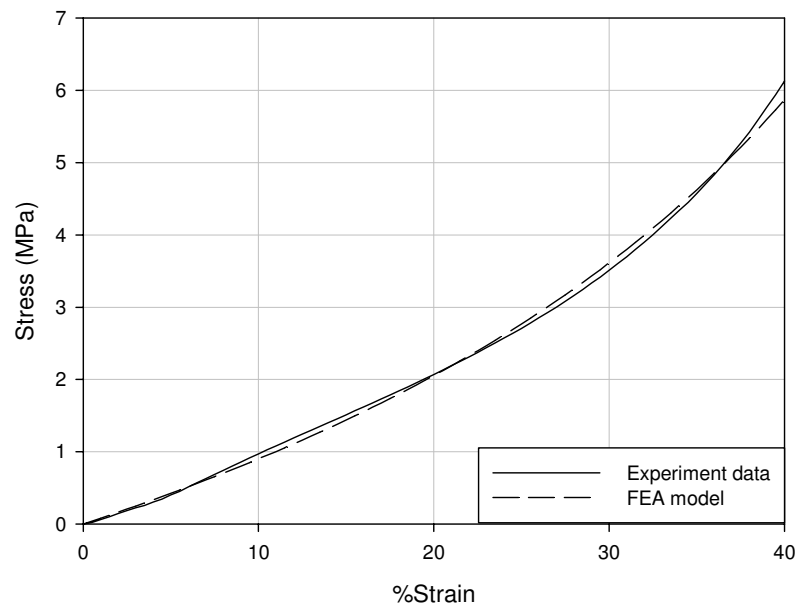
ยี่ห้อ	C_{10}	C_{01}	C_{11}	ความแตกต่างเปรียบเทียบกับผลทดสอบ (%)
Inner-A	1.63161	0	0	0.38
Outer-A	1.27867	0	0	0.92
Inner-B	1.36711	0	0	0.33
Outer-B	1.12807	0	0	0.98
Inner-C	1.28906	0.222908	0.23481	1.16
Outer-C	0.58979	0.185628	0	0.45



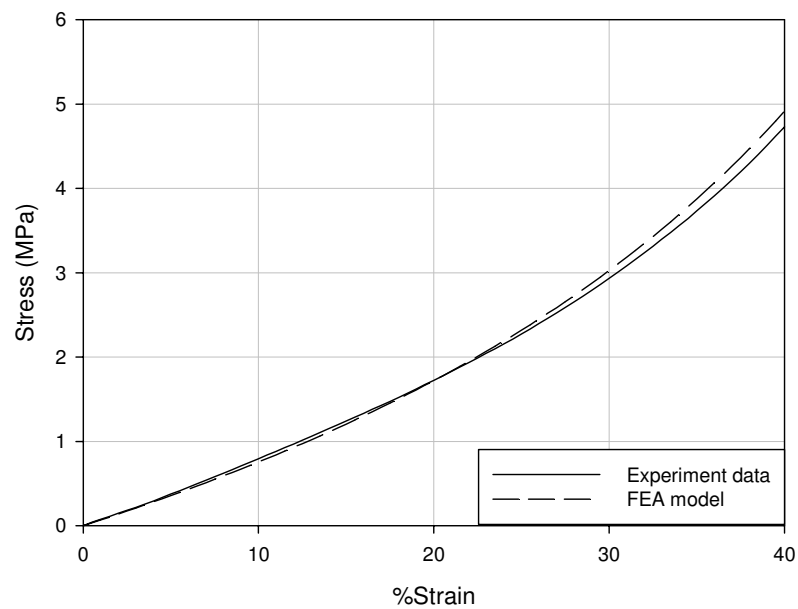
รูปที่ 4.4 เปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ค่าความเค้นและความเครียดจากค่าสัมประสิทธิ์โดยการจำลองกับผลการทดสอบชิ้นงานทดสอบของล้อยางต้นชั้นใน ยี่ห้อ A



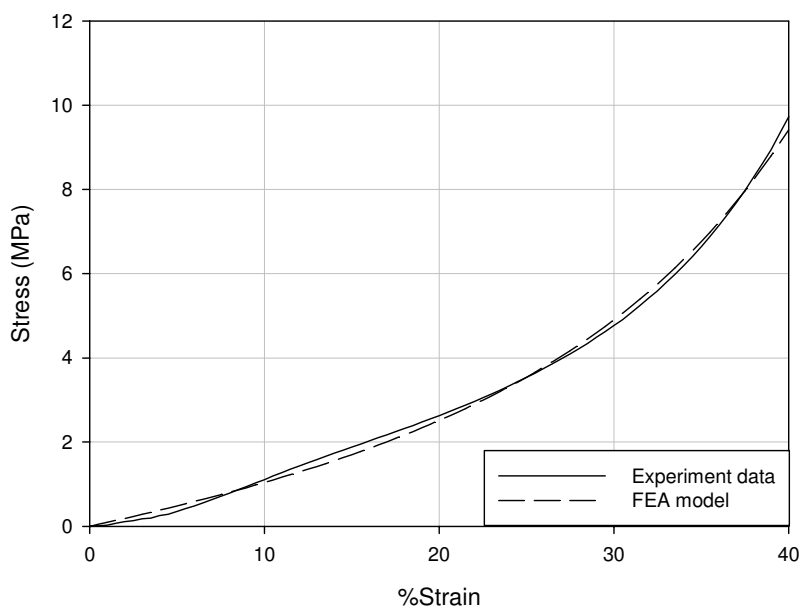
รูปที่ 4.5 เปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ค่าความเค้นและความเครียดจากค่าสัมประสิทธิ์โดยการจำลองกับผลการทดสอบชิ้นงานทดสอบของล้อยางต้นชั้นนอก ยี่ห้อ A



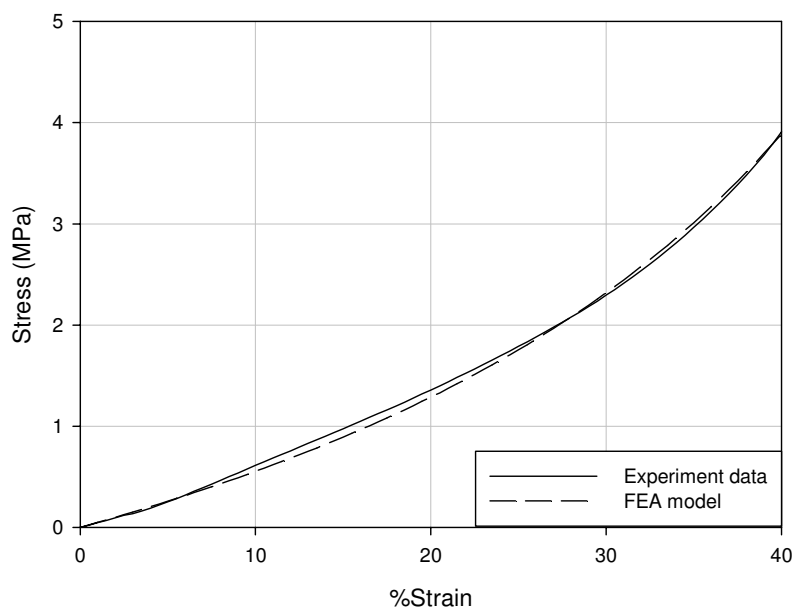
รูปที่ 4.6 เปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ค่าความเค้นและความเครียดจากค่าสัมประสิทธิ์โดยการจำลองกับผลการทดสอบชิ้นงานทดสอบของตัวอย่างต้นชั้นใน ยี่ห้อ B



รูปที่ 4.7 เปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ค่าความเค้นและความเครียดจากค่าสัมประสิทธิ์โดยการจำลองกับผลการทดสอบชิ้นงานทดสอบของตัวอย่างต้นชั้นนอก ยี่ห้อ B



รูปที่ 4.8 เปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ค่าความเค้นและความเครียดจากค่าสัมประสิทธิ์โดยการจำลองกับผลการทดสอบชิ้นงานทดสอบของล้อยางต้นชั้นใน ยี่ห้อ C



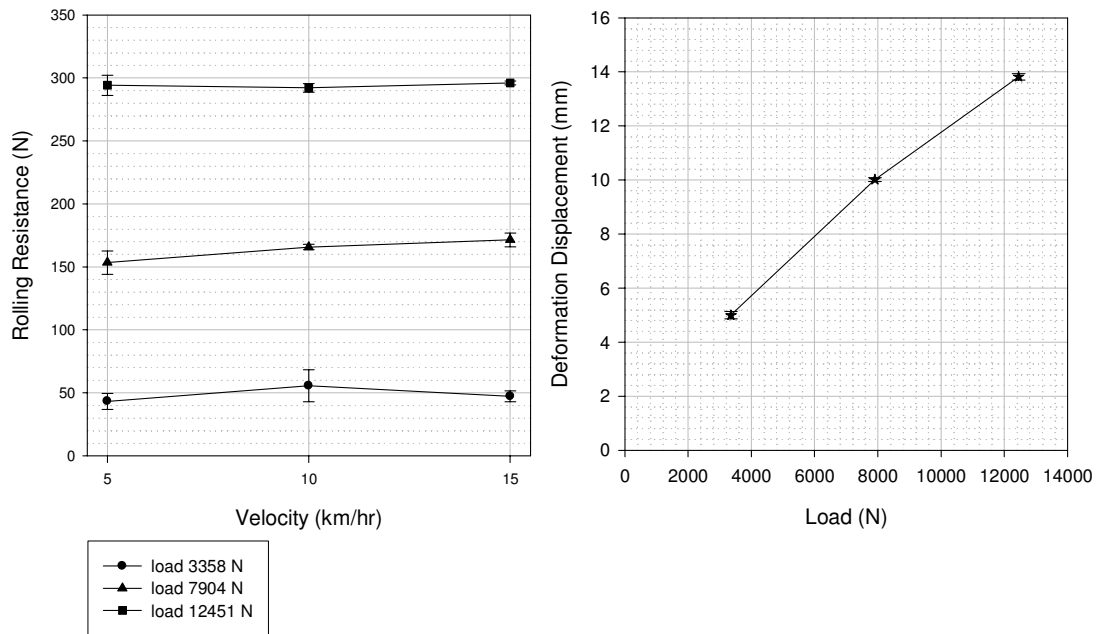
รูปที่ 4.9 เปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ค่าความเค้นและความเครียดจากค่าสัมประสิทธิ์โดยการจำลองกับผลการทดสอบชิ้นงานทดสอบของล้อยางต้นชั้นนอก ยี่ห้อ C

4.3 ผลการทดสอบหาค่าความต้านทานการหมุนกลิ้ง

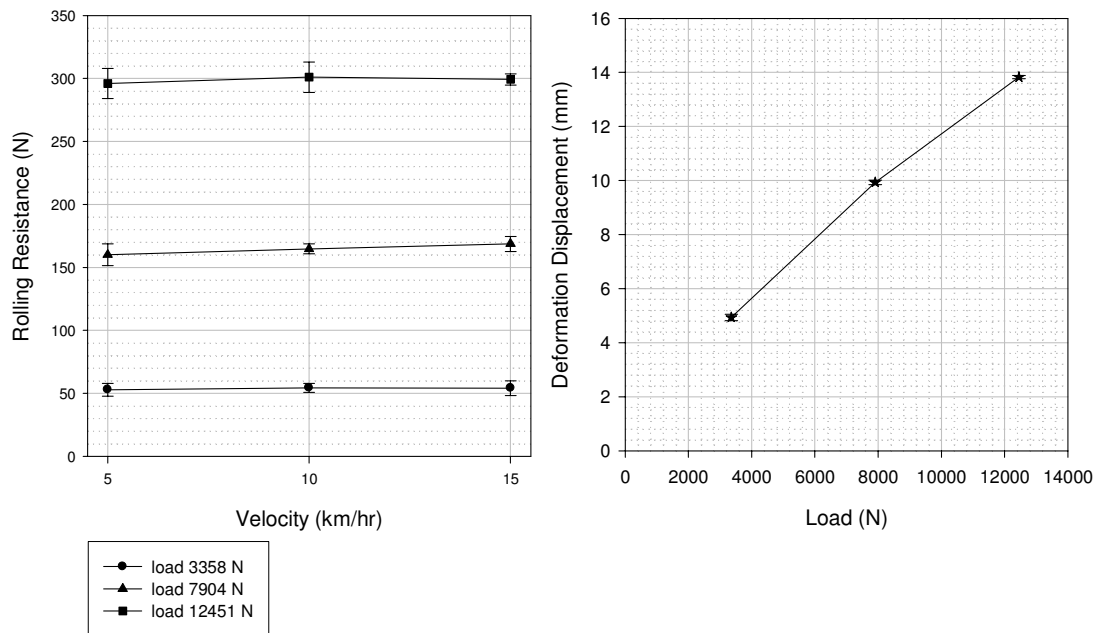
การทดสอบหาค่าความต้านทานการหมุนกลิ้งของล้อยางตันแต่ละยี่ห้อ มีวัตถุประสงค์เพื่อนำผลที่ได้จากการทดสอบเป็นตัวตั้งในการเปรียบเทียบผลจากการจำลองเพื่อยืนยันความถูกต้องของแบบจำลอง โดยตรวจสอบได้จากค่าความต้านทานการหมุนกลิ้งและค่าขุดตัวของล้อยางตันในแต่ละกรณีความเร็วและภาระน้ำหนักทดสอบ ทำการทดสอบล้อยางตันจาก 3 ยี่ห้อ ยี่ห้อละ 2 ล้อทดสอบ และทำการทดสอบล้อละ 3 ครั้ง โดยมีผลการทดสอบ ของล้อยางตันแต่ละล้อและแต่ละยี่ห้อ ดังแสดงใน รูปที่ 4.11 - รูปที่ 4.16 และแสดงค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานและค่าเฉลี่ยจากการทดสอบ จำนวน 3 ครั้ง



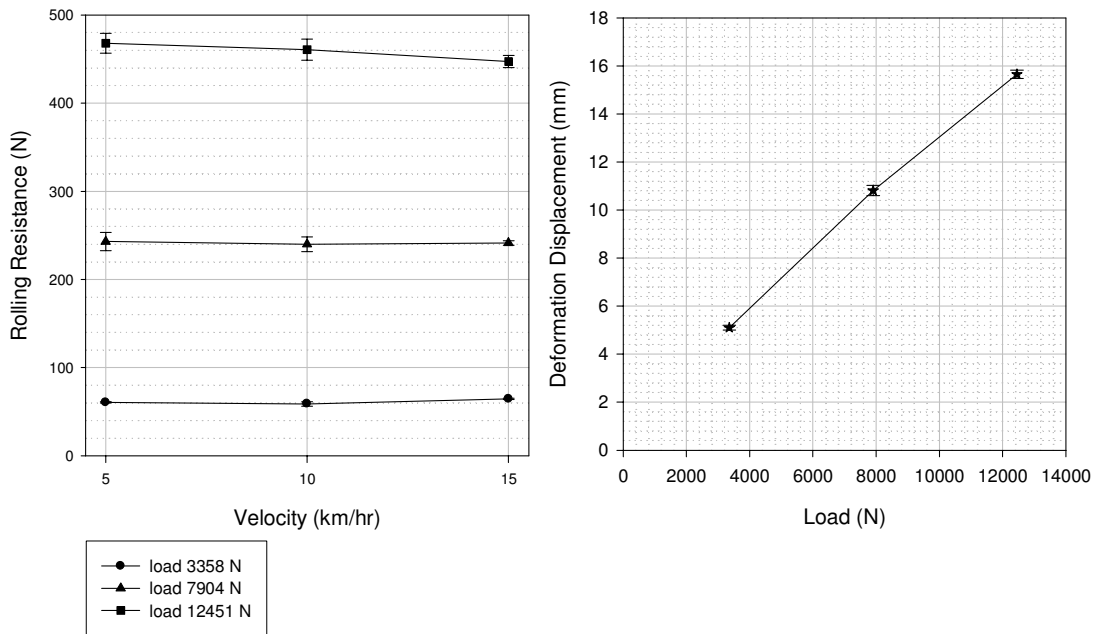
รูปที่ 4.10 ภาพตัวอย่างขณะทดสอบ



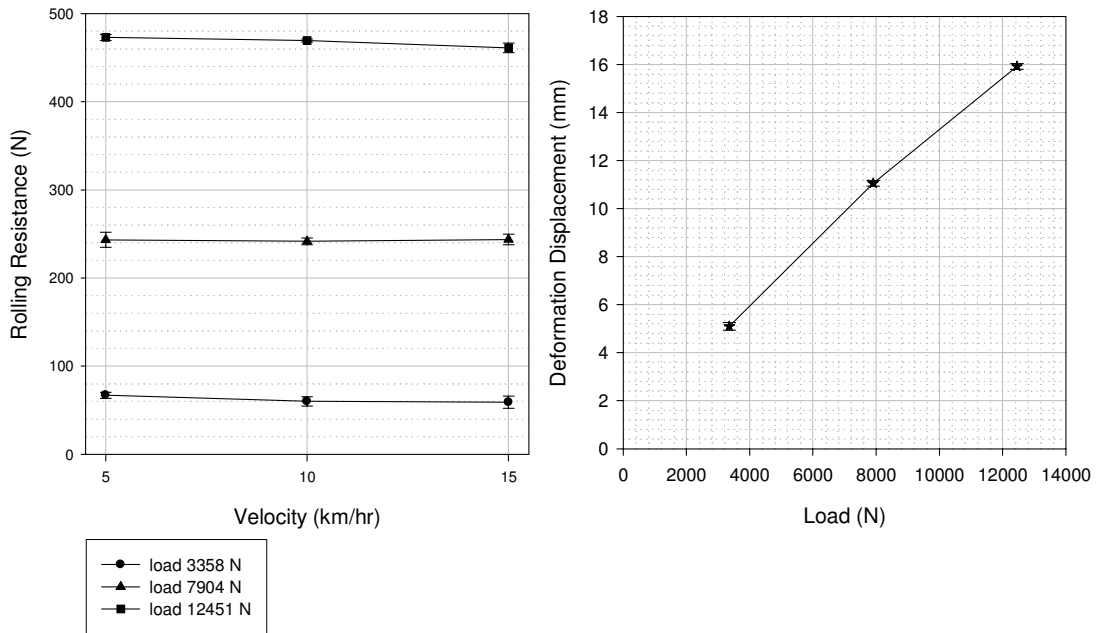
รูปที่ 4.11 ผลการทดสอบล้อยางตัน A ล้อที่ 1



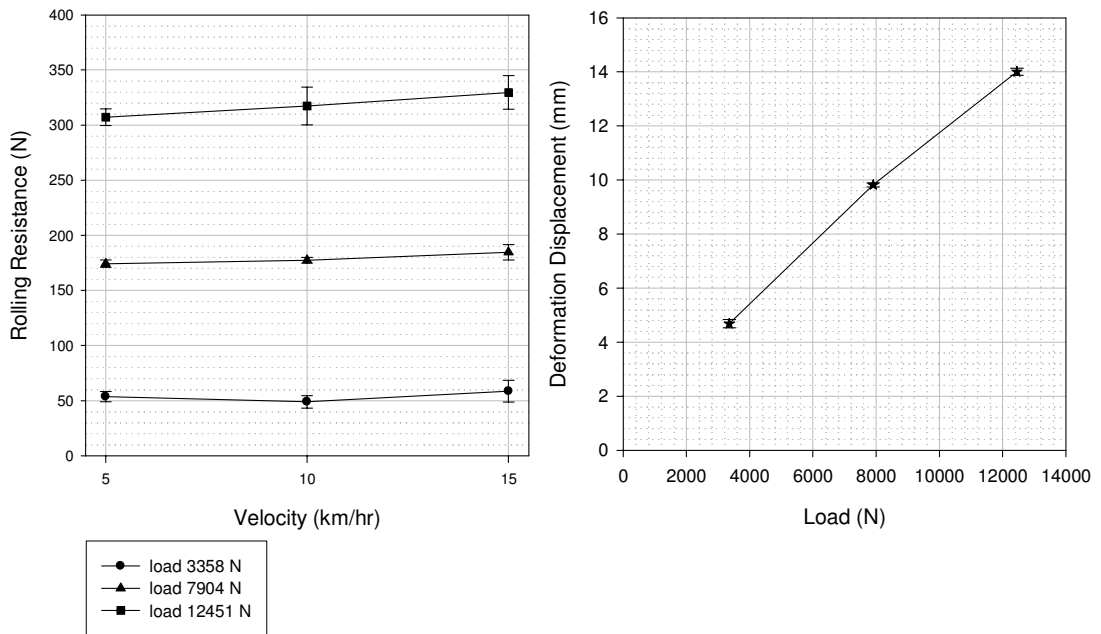
รูปที่ 4.12 ผลการทดสอบล้อยางตัน A ล้อที่ 2



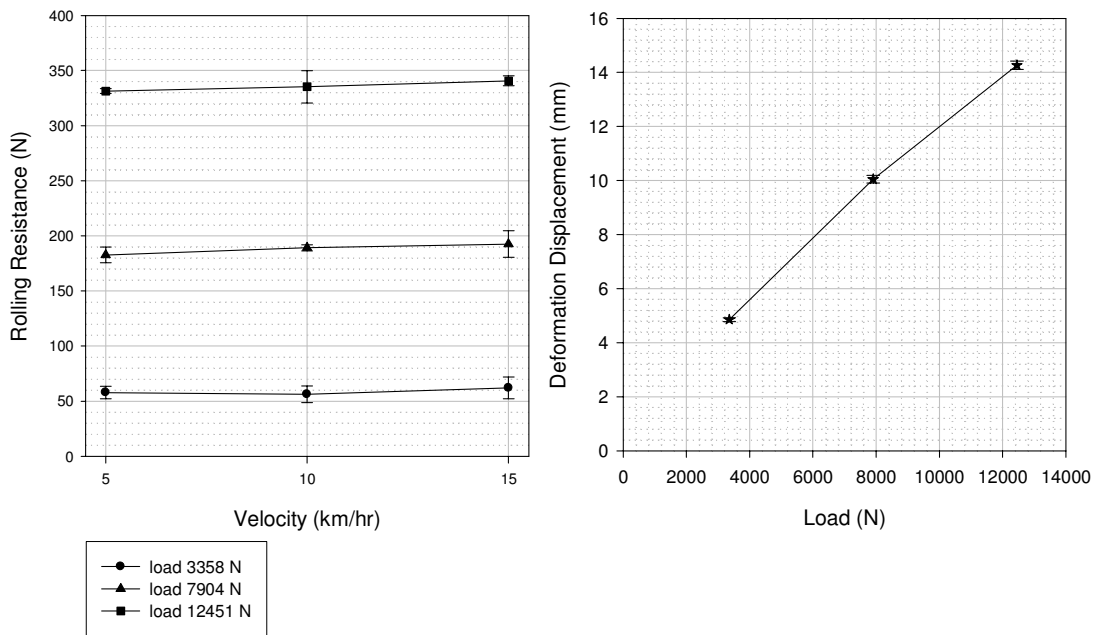
รูปที่ 4.13 ผลการทดสอบล้อยางตัน B ล้อที่ 1



รูปที่ 4.14 ผลการทดสอบล้อยางตัน B ล้อที่ 2

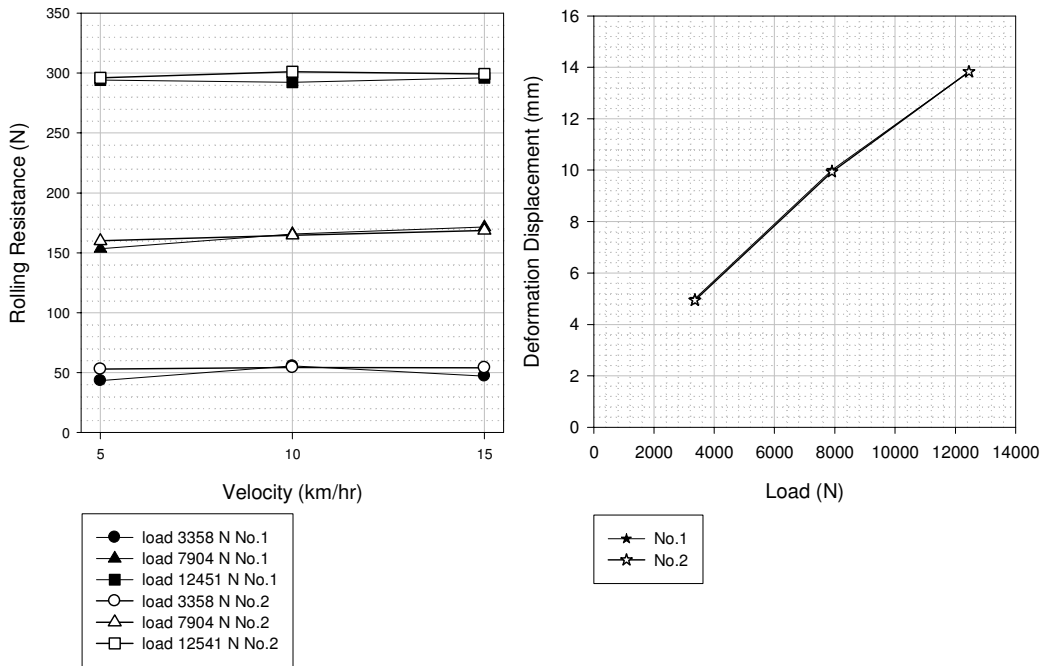


รูปที่ 4.15 ผลการทดสอบล้อยางตัน C ล้อที่ 1

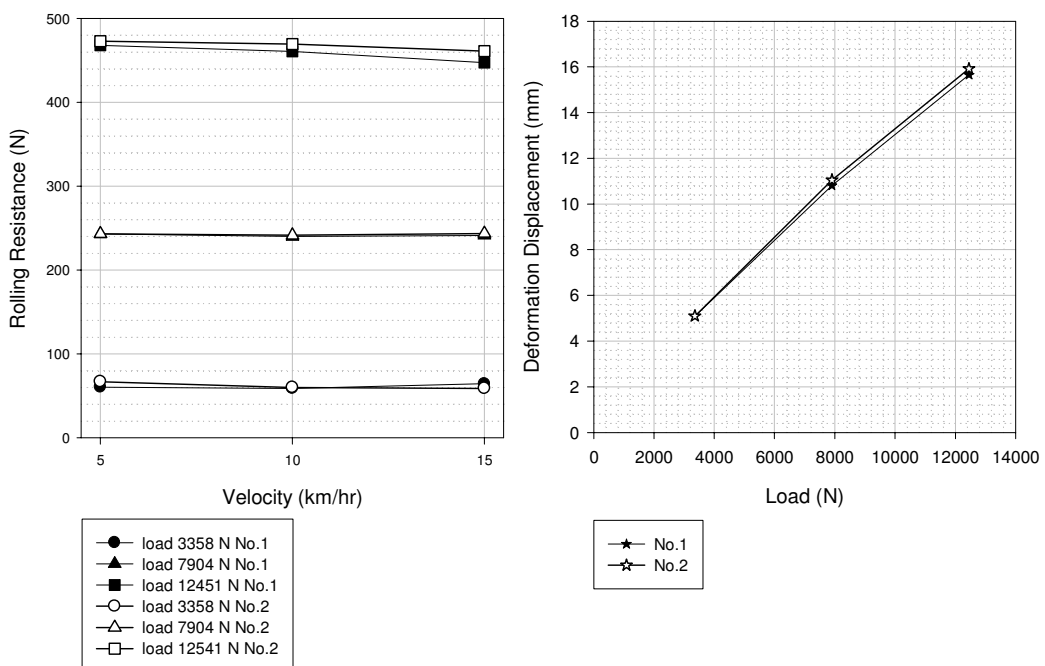


รูปที่ 4.16 ผลการทดสอบล้อยางตัน C ล้อที่ 2

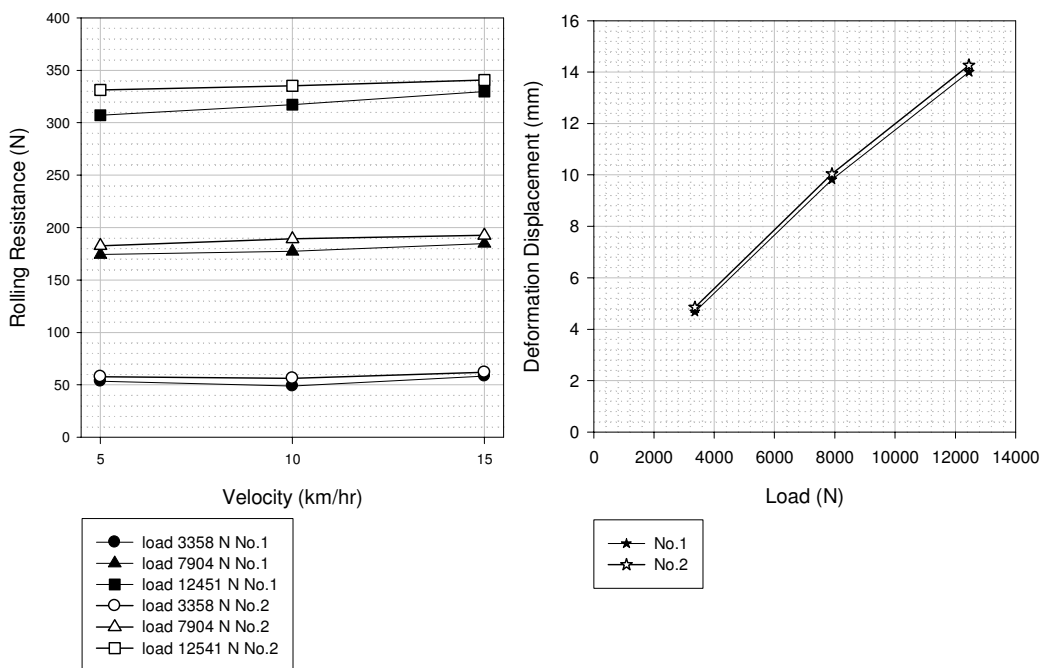
และได้เปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างล้อที่ 1 และ ล้อที่ 2 ของแต่ละซี่ล้อดัง
แสดงใน รูปที่ 4.17 - รูปที่ 4.19



รูปที่ 4.17 เปรียบเทียบผลทดสอบระหว่างล้อทดสอบ 1 และ 2 ของล้อยี่ห้อ A



รูปที่ 4.18 เปรียบเทียบผลทดสอบระหว่างล้อทดสอบ 1 และ 2 ของล้อยี่ห้อ B



รูปที่ 4.19 เปรียบเทียบผลทดสอบระหว่างล้อทดสอบ 1 และ 2 ของล้อยาง C

เมื่อพิจารณาจากกราฟผลการทดสอบ พบว่า การเปลี่ยนแปลงความเร็วในการทดสอบมีแนวโน้มไม่ส่งผลต่อค่าความต้านทานการหมุนกลิ้ง ซึ่งจากงานวิจัยอื่นๆ (Yoshimura, N. et al, 1982) ที่ได้ทำการศึกษาในเรื่องนี้พบว่า ค่าความเร็วที่เปลี่ยนไปจะมีผลต่อค่าความต้านทานการหมุนกลิ้งอย่างเห็นได้ชัดเมื่อความเร็วเพิ่มขึ้นถึง 100 กิโลเมตรต่อชั่วโมง เพราะล้อยางต้นทดสอบที่ความเร็วรอบต่ำ การเพิ่มความเร็วที่การทดสอบรอบต่ำๆอาจไม่เห็นผลชัดเท่ากับการทดสอบขางลมที่รอบสูง เนื่องจาก Heat Buildup ส่งผลต่อ RR ที่รอบสูง จึงได้ทำการวิเคราะห์ข้อมูลเชิงสถิติโดยใช้ Analysis of Variance (ANOVA) เพื่อตรวจสอบว่าการเปลี่ยนแปลงความเร็วในการทดสอบ มีผลต่อค่าการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานการหมุนกลิ้งหรือไม่ จากการวิเคราะห์ข้อมูลด้วยโปรแกรม Sigmaplot 11.0 ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซนต์ สามารถสรุปเป็นตาราง ดังแสดงใน ตารางที่ 4.3

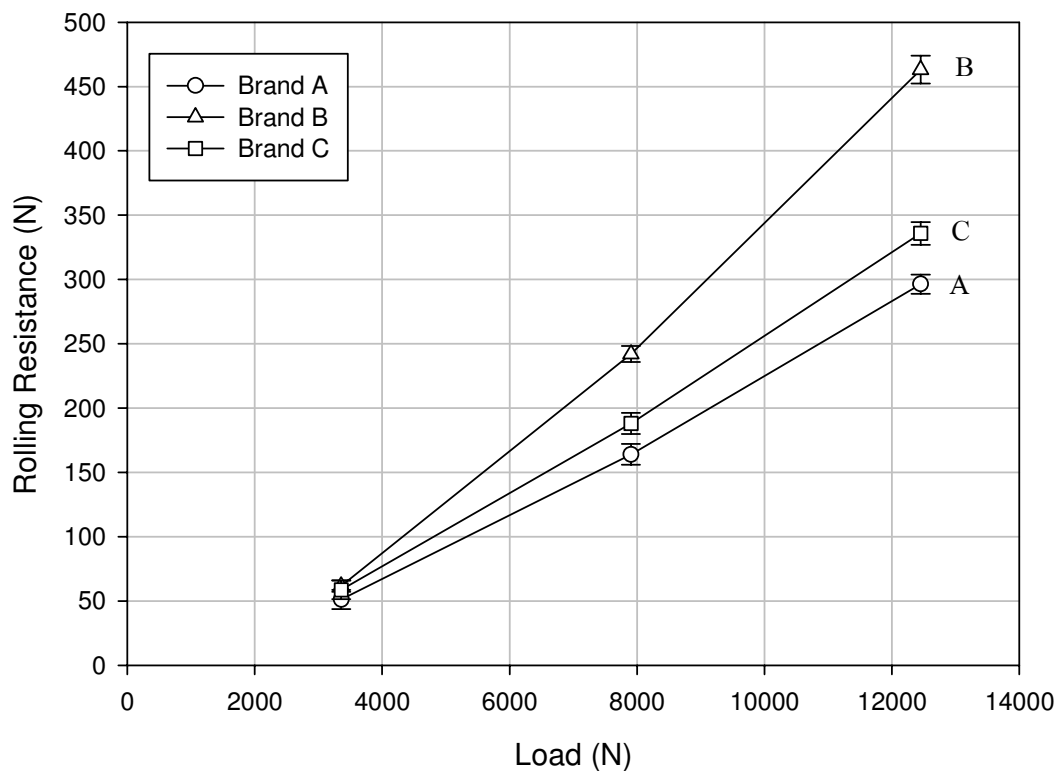
ตารางที่ 4.3 การวิเคราะห์ ANOVA แบบ 2 ปัจจัย

Source of Variation	DF	SS	MS	F	F Crit
Brand	4	62261.720	15565.430		
Load	2	757050.702	378525.351	82.764	3.63
load x brand	8	36588.276	4573.535		
velocity	2	20.151	10.076	0.229	3.63
velocity x brand	8	352.109	44.014		
load x velocity	4	145.132	36.283	2.195	3.01
Residual	16	264.439	16.527		
Total	44	856682.530	19470.058		

จากตารางที่ 4.3 สามารถวิเคราะห์และสรุปได้ดังนี้

- ปัจจัย Load มีผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของค่าความต้านทานการหมุนกลิ้ง เพราะค่า F ที่คำนวณได้มากกว่าค่า F-Critical แต่ปัจจัย velocity ไม่มีผลต่อค่าความต้านทานการหมุนกลิ้ง เพราะค่า F ที่คำนวณได้น้อยกว่าค่า F-Critical

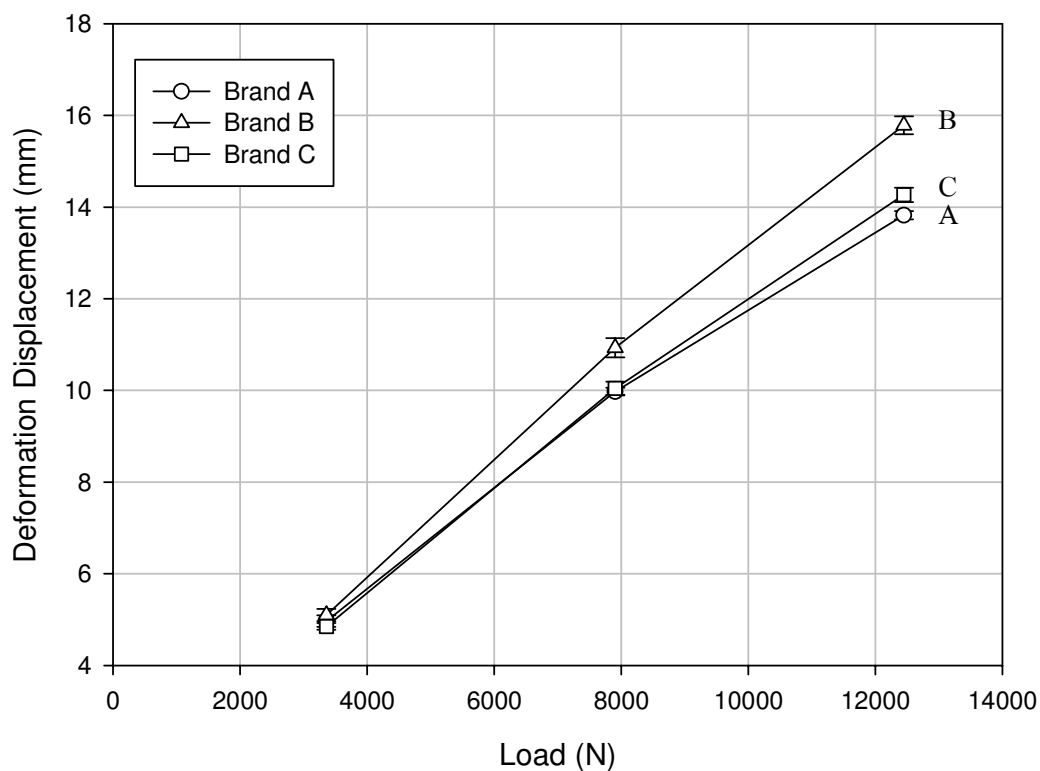
เมื่อปัจจัยความเร็วไม่มีผลในการทดสอบ ดังนั้นจึงหาค่าเฉลี่ยของ ค่าความต้านทานการหมุนกลิ้งที่ขึ้นกับปัจจัยภาระน้ำหนักเพียงอย่างเดียว โดยได้ผลของค่าความต้านทานการหมุนกลิ้งของแต่ละยี่ห้อ ดังแสดงใน ตารางที่ 4.4 และ รูปที่ 4.20



รูปที่ 4.20 ผลค่าความต้านทานการหมุนกลิ้งเทียบกับภาระน้ำหนักของล้อยางตันแต่ละยี่ห้อ

ตารางที่ 4.4 ผลค่าความต้านทานการหมุนกลิ้งของแต่ละยี่ห้อ

Load (N)	Rolling Resistance (N)		
	A	B	C
3358	51.2 ± 7.5	61.6 ± 4.5	58.7 ± 7.3
7904	163.9 ± 8.1	242.0 ± 6.1	188.2 ± 8.3
12451	296.4 ± 7.4	463.1 ± 10.8	335.8 ± 8.7



รูปที่ 4.21 ผลการยุบตัวของตัวอย่างเทียบกับภาระน้ำหนักของตัวอย่างต้นแต่ละยี่ห้อ

ตารางที่ 4.5 ผลการยุบตัวของตัวอย่างของแต่ละยี่ห้อ

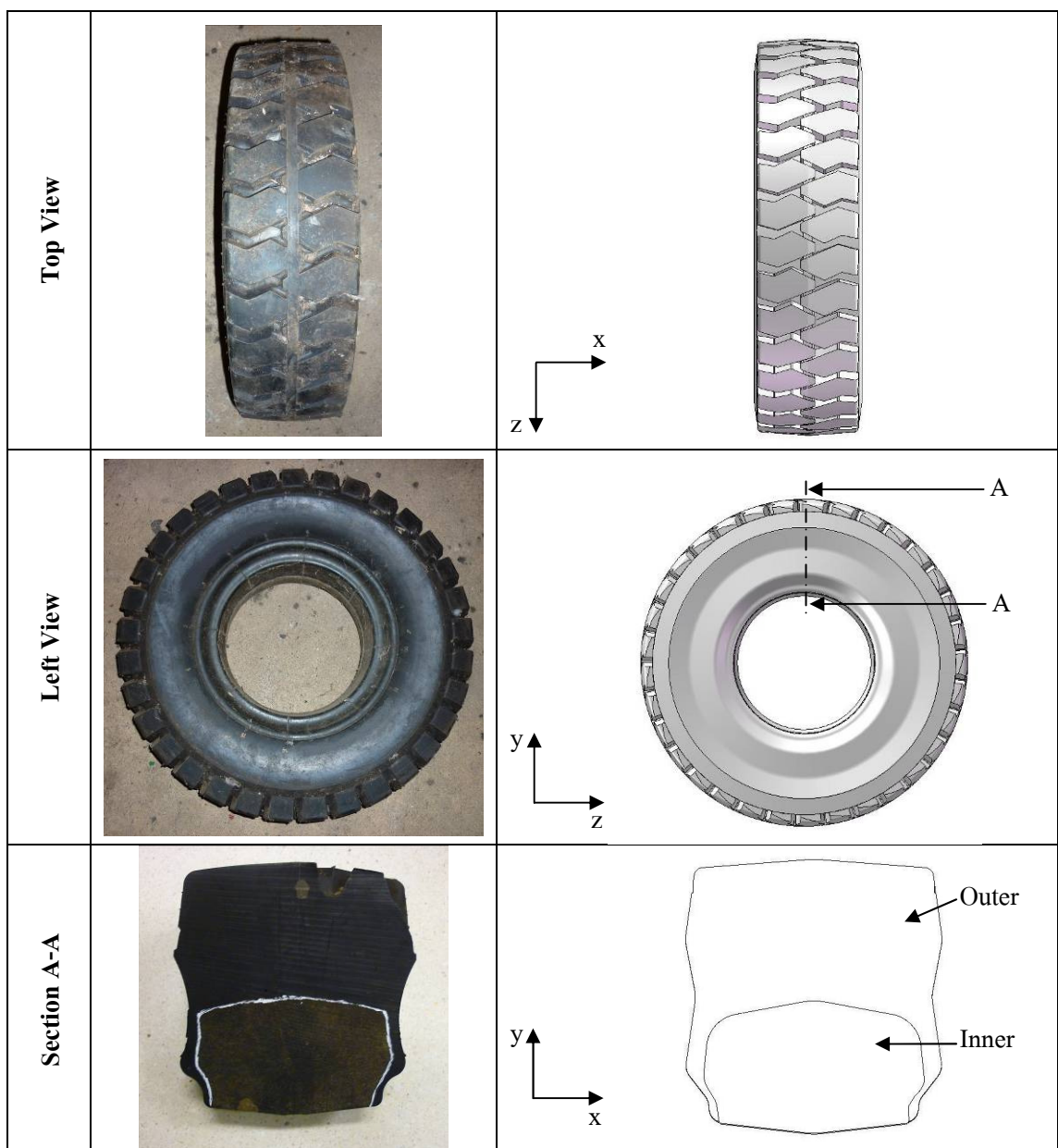
Load (N)	Deformation Displacement (mm)		
	A	B	C
3358	4.97 ± 0.13	5.10 ± 0.13	4.85 ± 0.07
7904	9.97 ± 0.08	10.9 ± 0.21	10.05 ± 0.14
12451	13.8 ± 0.09	15.79 ± 0.20	14.27 ± 0.16

จากตารางที่ 4.4 และ 4.5 พบว่าผลการทดสอบค่าความต้านทานการหมุนกึ่งของตัวอย่างต้น แต่ละตัวอย่างเรียงจากน้อยไปมากดังนี้ คือ $A < C < B$ และค่าการยุบตัวของตัวอย่างก็เป็นไปในทิศทางเดียวกัน คือ $A < C < B$ ดังนั้น แสดงให้เห็นว่าการลดค่าความต้านทานการหมุนกึ่งสามารถลดได้โดยทำให้ยางมีความแข็งโดยรวมเพิ่มขึ้น เพื่อลดค่าการยุบตัวของตัวอย่างต้น

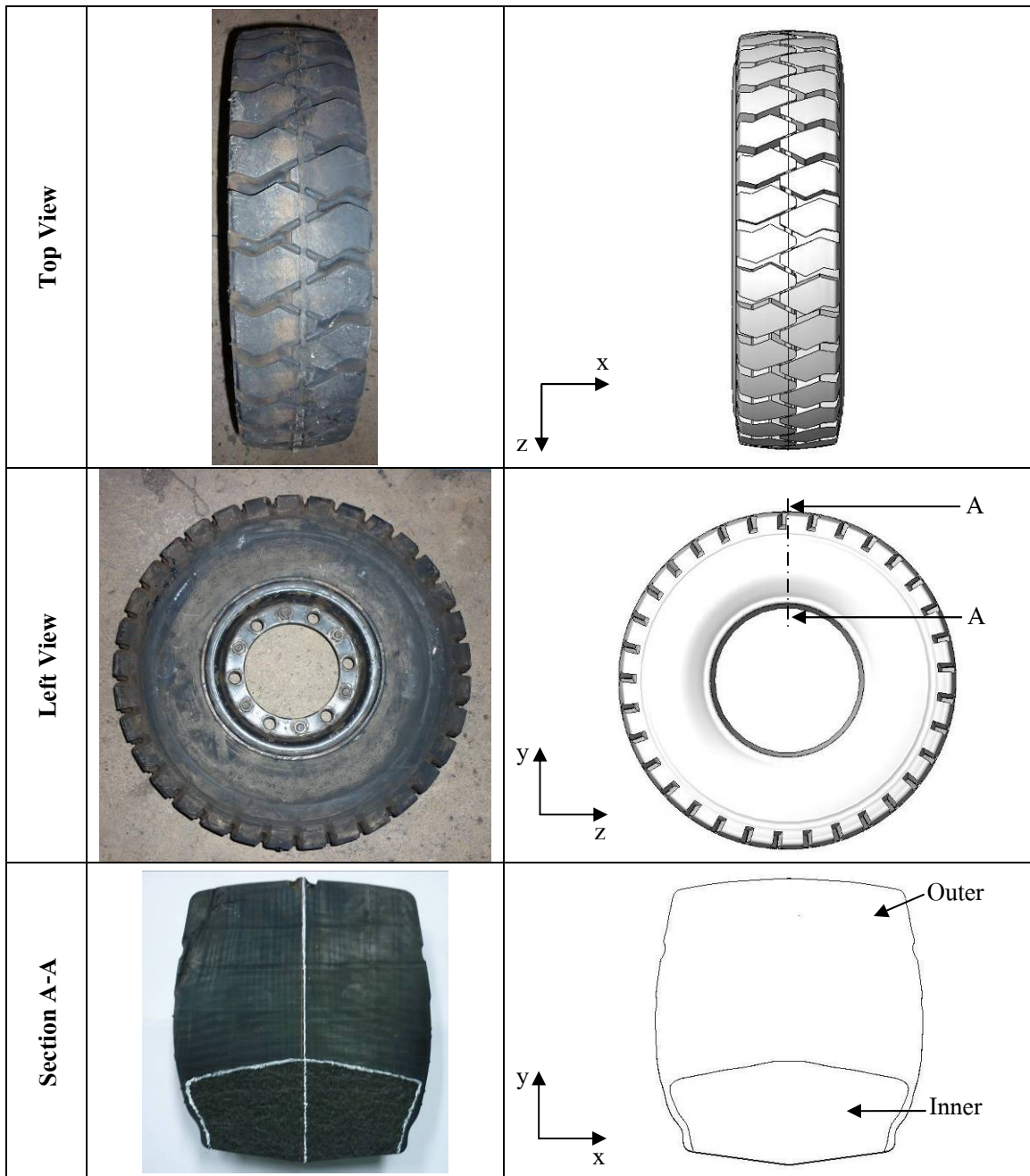
บทที่ 5

ผลการศึกษาค่าความต้านทานการหมุนกลิ้งจากแบบจำลอง

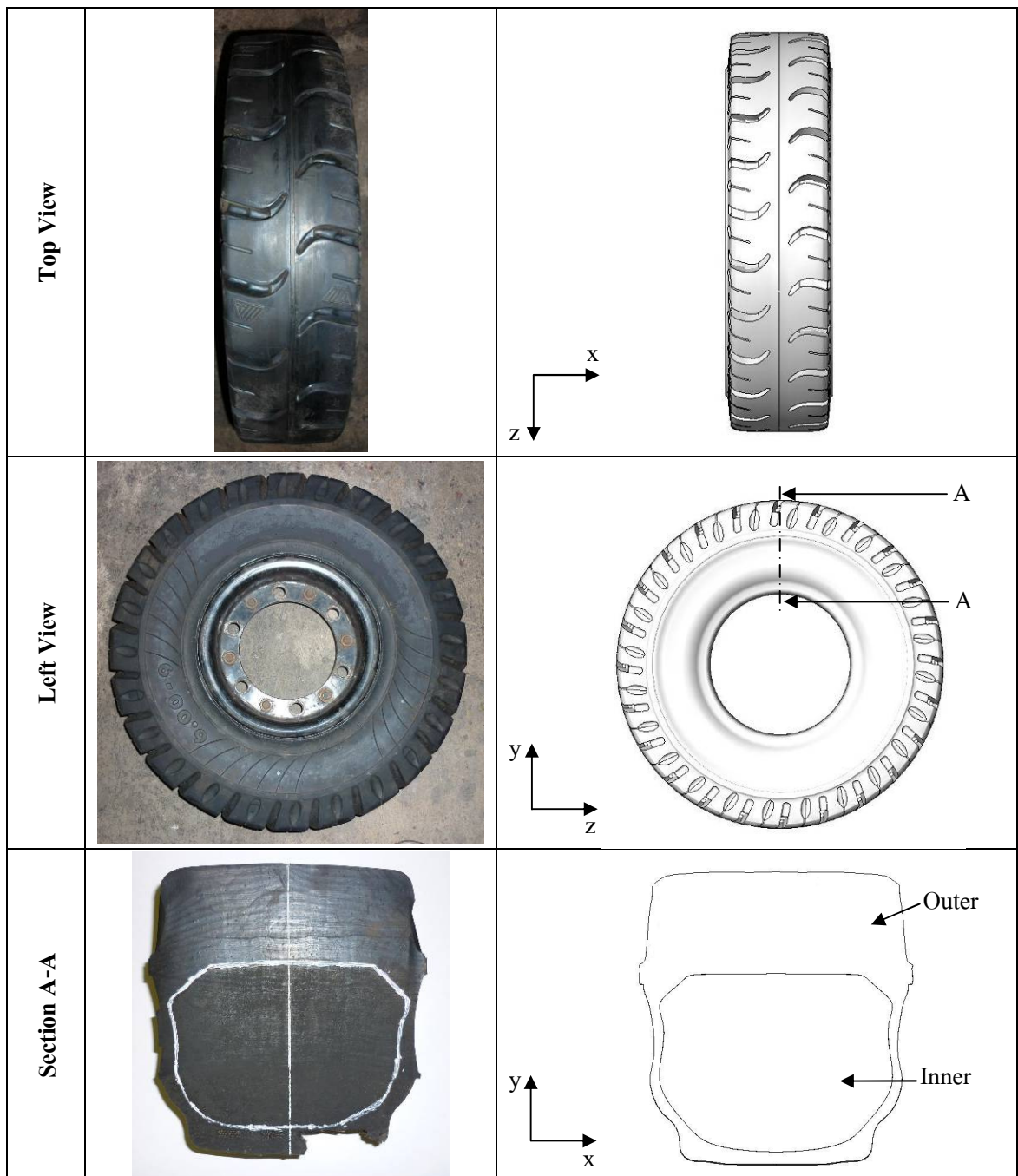
ในขั้นแรกของการจำลองวิเคราะห์หาค่าความต้านทานการหมุนกลิ้งของล้อยางตัน ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์อีเลเมนต์ จำเป็นต้องทราบรูปพรรณสัณฐาน (geometry) ของล้อยางตัน ซึ่งทำการเขียนโมเดลของล้อยางตัน โดยใช้โปรแกรม SolidWorks 2007 ได้โมเดลของล้อยางตันแต่ละซี่ห้อยเทียบกับภาพถ่ายล้อยางจริงในมุมมองต่างๆแสดงใน รูปที่ 5.1 - รูปที่ 5.3



รูปที่ 5.1 โมเดลล้อยางตัน A เทียบกับภาพถ่ายจริง



รูปที่ 5.2 โมเดลตัวอย่างต้น B เทียบกับภาพถ่ายจริง



รูปที่ 5.3 โมเดลตัวอย่างต้น C เทียบกับภาพถ่ายจริง

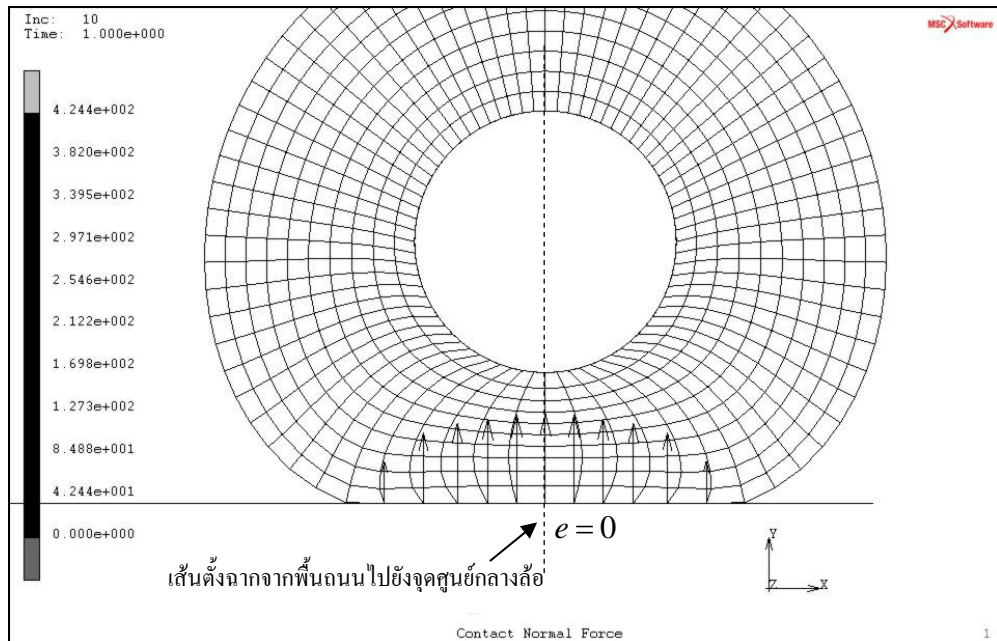
จากนั้นทำการสร้างอิเลเมนต์ (create mesh) โดยใช้โปรแกรม MSC.Patran 2006 โดยกำหนดให้แบ่งอิเลเมนต์เป็นชั้น (Class) Tet4 โดยขนาดของอิเลเมนต์ถูกตั้งค่าให้เป็นแบบอัตโนมัติ และกำหนดให้ใช้โน้ตร่วมกันบริเวณรอยต่อระหว่างยางชั้นนอกและยางชั้นใน ซึ่งหลังจากการสร้างอิเลเมนต์ ได้จำนวนอิเลเมนต์ในแต่ละโมเดลดัง ตารางที่ 5.1 โดยโมเดลล้อยางที่มีส่วนโค้งรัศมีแคบในโมเดลจำนวนมากจะได้จำนวนอิเลเมนต์สูง

ตารางที่ 5.1 จำนวนอิเลเมนต์ของล้อยางแต่ละโมเดล

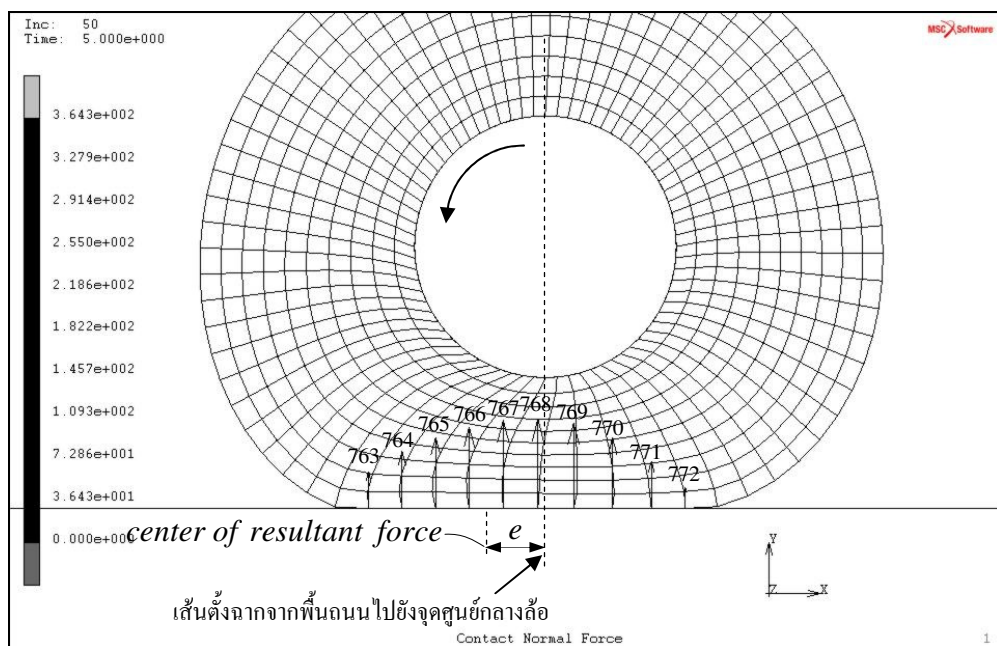
ล้อยาง	จำนวนอิเลเมนต์
A	51,780
B	33,616
C	109,994

5.1 ผลการศึกษาค่าความต้านทานการหมุนกลิ้งของล้อยางต้น

ในหัวข้อนี้ได้ศึกษาความต้านทานการหมุนกลิ้งภายในล้อยาง และผลของค่าความต้านทานการหมุนกลิ้งของล้อยางต้นยี่ห้อต่างๆ โดยสาเหตุของความต้านทานการหมุนกลิ้ง คือ เมื่อล้อยางได้รับภาระน้ำหนัก แรงที่กระทำถูกกระจายไปทั่วบริเวณที่ล้อยางสัมผัสกับพื้นถนนจำลอง โดยแรงปฏิกิริยามีค่ามากที่สุดที่ตำแหน่งกึ่งกลางล้อและลดลงเมื่อระยะห่างจากจุดศูนย์กลาง กล่าวคือไม่มีโมเมนต์รอบแกนหมุนของล้อ ดังแสดงใน รูปที่ 5.4 และเมื่อล้อยางเริ่มหมุน ตำแหน่งการกระจายของแรงปฏิกิริยาจะเปลี่ยนแปลง โดยค่าเฉลี่ยของแรงปฏิกิริยาจะเริ่มเอียงจากจุดศูนย์กลางล้อ ทำให้เกิดโมเมนต์รอบแกนหมุนของล้อยาง ดังแสดงใน รูปที่ 5.5 ซึ่งค่าโมเมนต์ที่เกิดขึ้น คือ ค่าความต้านทานการหมุนกลิ้งในรูปแบบโมเมนต์



รูปที่ 5.4 ผลการกระจายภาระน้ำหนักในขณะรับภาระน้ำหนัก



รูปที่ 5.5 ผลการกระจายภาระน้ำหนักในขณะรับภาระน้ำหนักและกำลังหมุนทวนเข็มนาฬิกา

จาก รูปที่ 5.5 ล้อยางสมมุติ เกิดแรงต้านทานการหมุนกลิ้ง (F_x) เท่ากับ 224.2 นิวตัน ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการ 2.4 คือ

$$F_x = \frac{T}{r} = \frac{(F_z \cdot e)}{r}$$

โดยดูผลค่าแรงบิด (T) และระยะจุดหมุนกับพื้นถนน (r) จากโปรแกรมไฟไนต์อิเลเมนต์ (r มีค่า 50 มิลลิเมตร) และได้แสดงรายละเอียดการกระจายของภาระน้ำหนักที่โนดต่างๆ (ประกอบรูปที่ 5.5) ดังตารางที่ 5.2 โดยจุดศูนย์กลางล้อตำแหน่ง x มีค่าเท่ากับ 0

ตารางที่ 5.2 รายละเอียดข้อมูลที่โนดต่างๆ

Node	Coordinate x (mm)	Contact Normal Force y (N)	Moment (N.mm)
763	-27.05665953	149.3245	-4040.222156
764	-21.90934346	233.7657	-5121.653009
765	-16.77655321	290.1451	-4867.634708
766	-11.64340905	331.2915	-3857.362449
767	-6.444921409	359.1433	-2314.650343
768	-1.149031564	364.3083	-418.6017357
769	4.30775	346.6176	1493.141966
770	10.25993722	287.891	2953.743586
771	16.21118254	192.9638	3128.171385
772	21.3849877	85.81918	1835.242109
ผลรวม		2641.26998	-11209.82536

*หมายเหตุ ไม่มีการปรับจำนวนตำแหน่งทศนิยมเพื่อให้เห็นความสอดคล้องของข้อมูล

จากตารางที่ 5.2 ได้แสดงรายละเอียดผลของโมเมนต์รอบแกน z ของกระทะล้อจากการกระทำของการกระจายภาระน้ำหนักที่โนดต่างๆ ซึ่งสามารถดูข้อมูลตำแหน่งปัจจุบันของโนด (Coordinate) ได้จากการ นำค่าตำแหน่งเริ่มต้นของโนด รวมกับค่าการกระจัด (Displacement) จากโปรแกรมไฟไนต์อิเลเมนต์ และผลรวมโมเมนต์ จากการคำนวณการกระจายภาระน้ำหนักที่แต่ละโนด มีค่า -11209.82536 นิวตันมิลลิเมตร ซึ่งมีค่าเท่ากับค่าที่สามารถดูผลได้โดยตรงคือ โมเมนต์รอบแกน z ที่เกิดบนกระทะล้อซึ่งสมมุติให้เป็นวัตถุแข็งเกร็ง (Rigid body) โดยโมเมนต์มีค่า

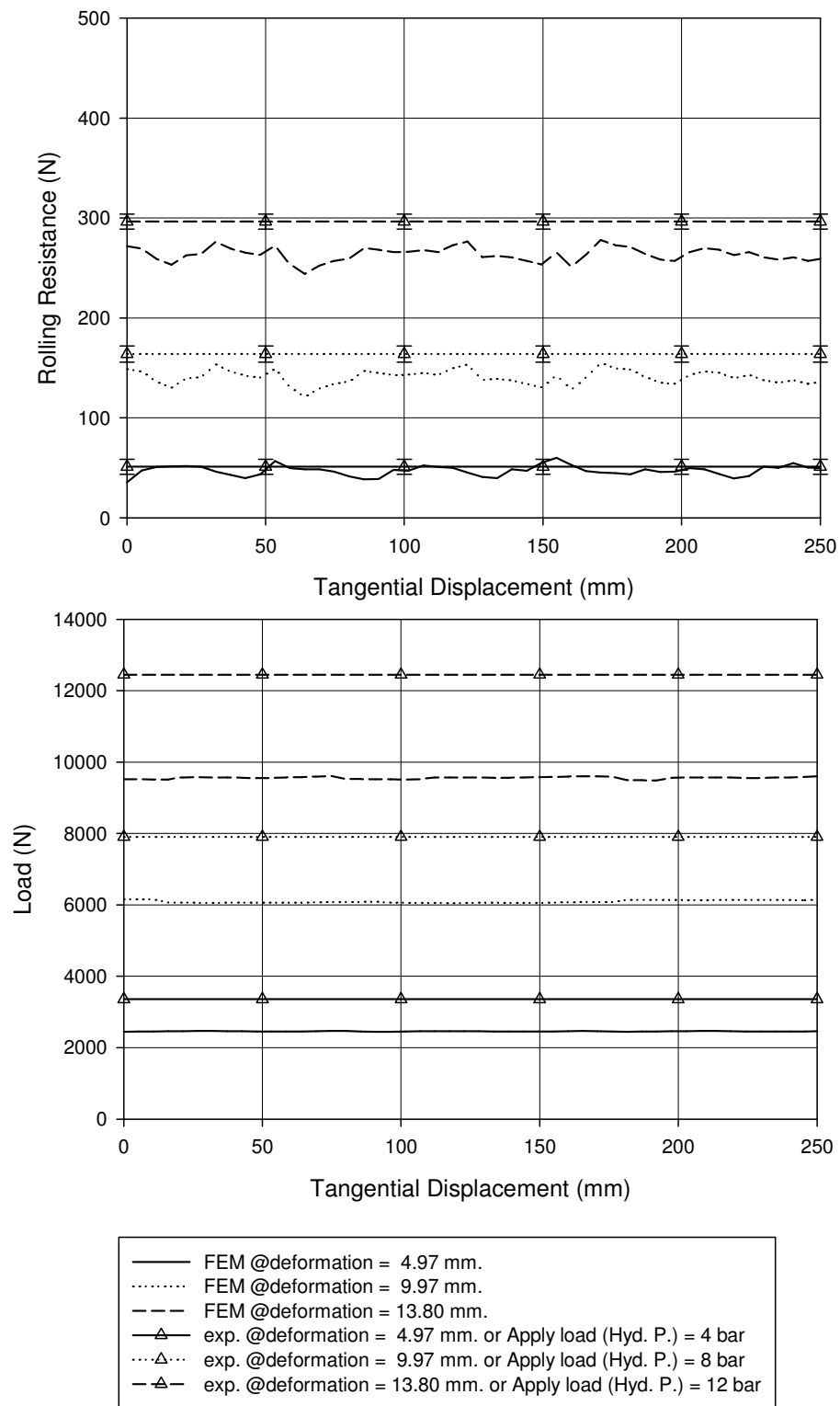
-11209.8 นิวตันมิลลิเมตร จะเห็นได้ว่าค่าโมเมนต์จากการดูค่าโดยตรง และจากการคำนวณตามลักษณะสมการ 2.5 คือ

$$F_x = \frac{1}{r} \int_{-x}^x x \cdot P(x) dx$$

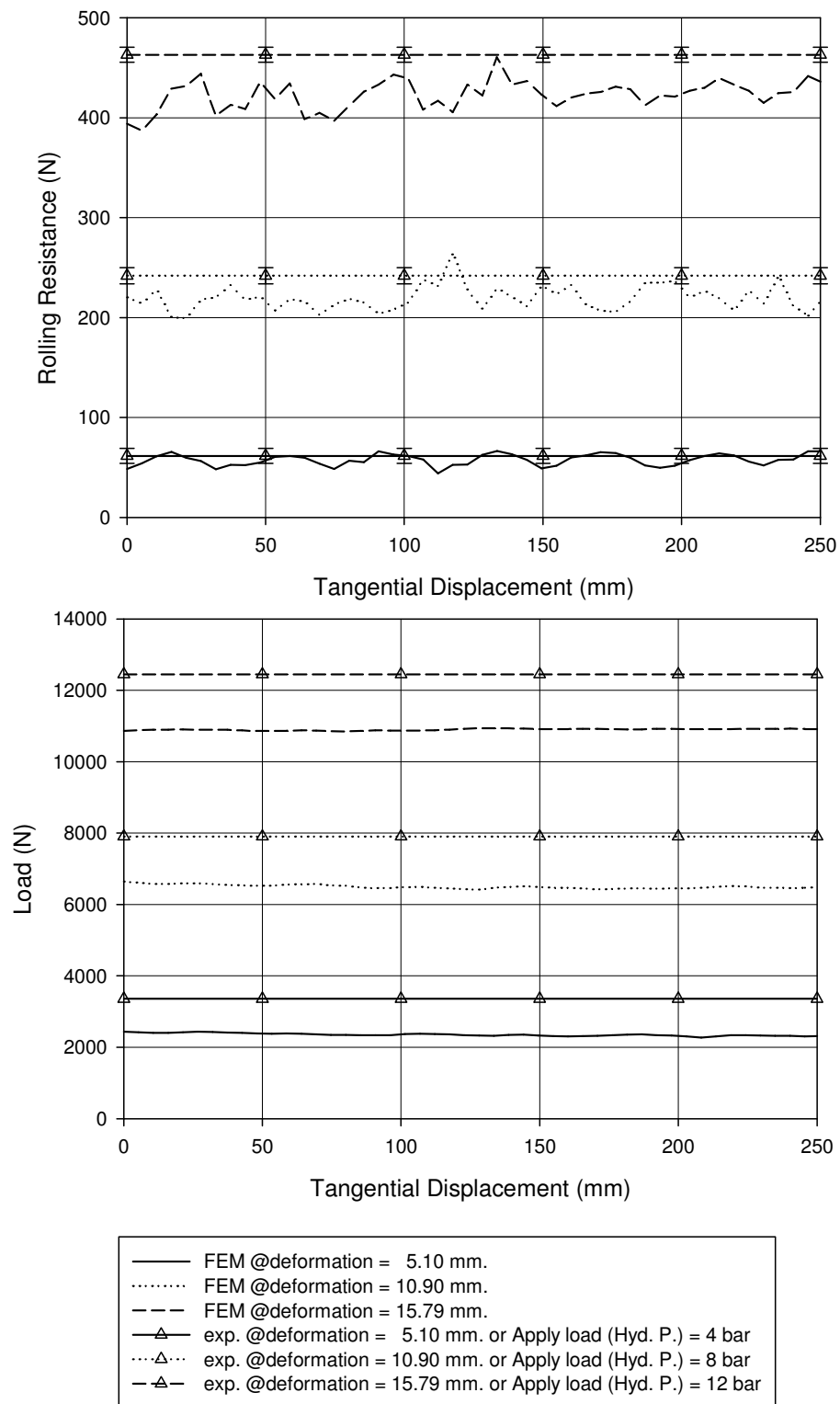
โดยใช้ข้อมูลจาก ตารางที่ 5.2 ได้ผลสอดคล้องกัน และสามารถคำนวณกลับเพื่อหาค่า e โดยที่ F_z คือ ผลรวมของแรง Contact Normal Force มีค่า 2641.26998 นิวตัน ดังนั้นค่า e จากการคำนวณกลับจึงมีค่า -4.24 มิลลิเมตร ซึ่งเป็นค่าที่มีความสมเหตุสมผล เพราะตำแหน่ง e (Center of Resultant Force) อยู่ระหว่างโนดที่ 767 และ 768 ดังนั้นสำหรับล้อยางยี่ห้อต่างๆจึงยึดแนวทางนี้ในการจำลอง โดยดูค่าโมเมนต์ที่เกิดขึ้นเพียงอย่างเดียว ไม่แสดงรายละเอียดค่าในแต่ละโนดลักษณะนี้ เพราะในการจำลองล้อยางแต่ละยี่ห้อ จะมีโนดที่อยู่ในสถานะกำลังสัมผัสกับพื้นถนนจำลองเป็นจำนวนมาก (ประมาณ 90 โหนด) และสำหรับพื้นถนนจำลองแบบทรงกระบอก โมเมนต์ที่เกิดขึ้นจะมีผลจากแรง 2 ทิศทาง ไม่เหมือนกับล้อยางสมมุติใน รูปที่ 5.5 ซึ่งเป็นพื้นถนนแบบเรียบที่ทำให้มีแรงเพียงทิศทางเดียว แต่สามารถใช้หลักการเดียวกันได้

สำหรับผลการจำลองด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์ของล้อยางต้น ที่กรณีภาชนะน้ำหนักต่างๆในการทดสอบ ซึ่งในการทดสอบนั้นยังไม่ทราบค่าของภาชนะน้ำหนัที่เกิดขึ้นอย่างแน่ชัด และไม่สามารถตรวจสอบแบบแม่นยำจากอุปกรณ์ที่มีอยู่ได้ ดังนั้น ในการจำลองจึงใช้ค่าการยุบตัวของล้อยางซึ่งเป็นค่าที่เชื่อถือได้ในการทดสอบเป็นตัวกำหนด แล้วจึงสังเกตค่าภาชนะน้ำหนักที่เกิดขึ้นในกรณีการยุบตัวที่ระยะต่างๆ ของแต่ละล้อยาง จากการจำลองจึงทำให้ทราบภาชนะน้ำหนักที่เกิดขึ้นในการทดสอบชัดเจนขึ้น และจะนำค่าภาชนะน้ำหนักนี้ไปกำหนดเป็นตัวแปรในส่วนขั้นตอนการพัฒนา โดยค่าภาชนะน้ำหนักที่ได้มีค่าน้อยกว่าค่าจากการตรวจสอบด้วยโพลดเซลล์ ซึ่งสอดคล้องกับสมมุติฐานที่ตั้งไว้ ในบทที่ 3

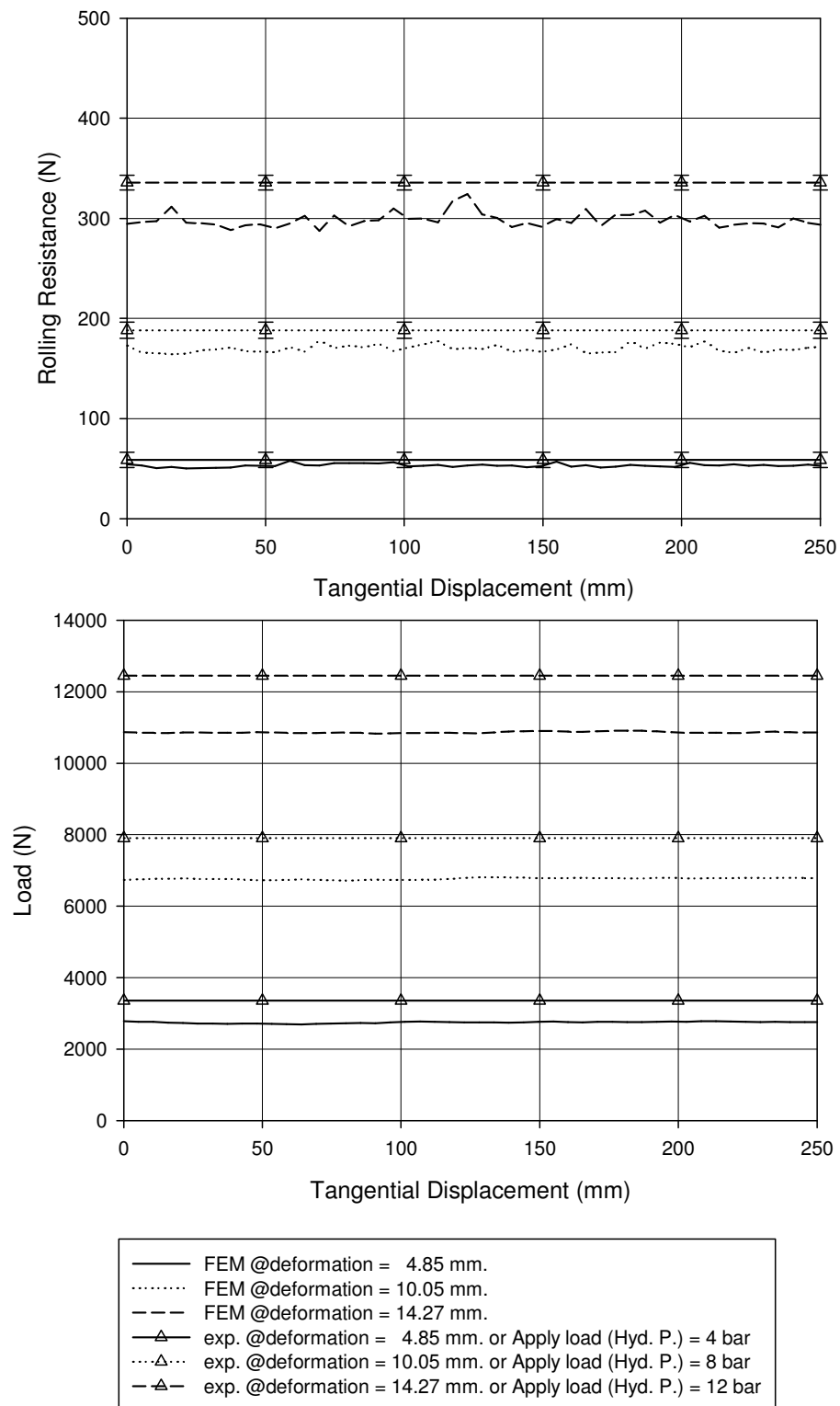
โดยผลจำลองค่าความต้านทานการหมุนกลิ้งและภาชนะน้ำหนักที่เกิดขึ้นที่กรณีระยะยุบต่างๆเช่นเดียวกันกับการทดสอบได้แสดงดัง รูปที่ 5.6 - รูปที่ 5.9



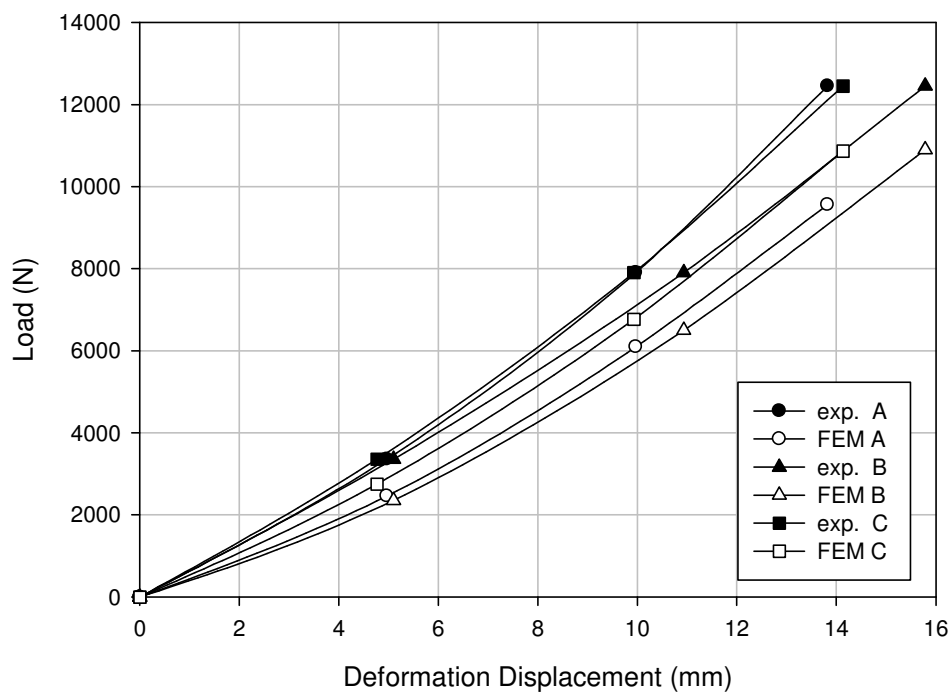
รูปที่ 5.6 ค่าความต้านทานการหมุนกลิ้งและภาระน้ำหนักที่เกิดขึ้นจากการจำลอง
ที่ระยะขยับเดียวกับการทดสอบของตัวอย่าง A



รูปที่ 5.7 ค่าความต้านทานการหมุนกลิ้งและภาระน้ำหนักที่เกิดขึ้นจากการจำลองที่ระยะขยับเดียวกับการทดสอบของตัวอย่าง B



รูปที่ 5.8 ค่าความต้านทานการหมุนกลิ้งและภาระน้ำหนักที่เกิดขึ้นจากการจำลองที่ระยะขยับเดียวกับการทดสอบของตัวอย่าง C



รูปที่ 5.9 ภาระน้ำหนักเทียบกับระยะยุบจากการทดสอบที่ยังไม่ทราบค่าภาระน้ำหนักที่แน่นชัดและการจำลอง แต่ละตัวอย่าง

จากการจำลองด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์อิลเมนต์ และนำค่าความต้านทานการหมุน มาหาค่าเฉลี่ยตลอดช่วงการเคลื่อนที่บนระยะทางประมาณ 250 มิลลิเมตร (ล้อยหมุนประมาณ 1 ใน 6 รอบ หรือ 60 องศา) ซึ่งสาเหตุของการเคลื่อนที่ได้ระยะทางเพียงเท่านั้น เนื่องจาก ระยะทางในการจำลองมีผลต่อขนาดของข้อมูลในระบบ โดยเมื่อระยะทางในการจำลองเพิ่มขึ้นขนาดของข้อมูลจะเพิ่มขึ้น เพราะจำนวนช่วงเวลาพิจารณา (Increment) จะต้องมากขึ้น และจากการที่ล้อยหมุนไปประมาณ 1 ใน 6 รอบ ทำให้ครอบคลุมต่อการเคลื่อนที่ผ่านดอกยางที่มี จำนวน 33 ดอกใน 1 ล้อ หรือประมาณ ดอกละ 10.9 องศา สำหรับตัวอย่าง A และ B จำนวน 24 ดอกใน 1 ล้อ หรือประมาณ ดอกละ 15 องศาสำหรับตัวอย่าง C ระยะทางเท่านั้นจึงเพียงพอต่อการจำลอง และจากการจำลอง พบว่า ผลค่าความต้านทานการหมุนกลับมีความคลาดเคลื่อน โดยมีค่าน้อยกว่าค่าจากการทดสอบ ประมาณ 10 เปอร์เซ็นต์ โดยแสดงรายละเอียดใน ตารางที่ 5.2 ซึ่งอาจเกิดจากการ โมเดลตัวอย่างต้นไม่ละเอียดพอ และการทดสอบค่าคุณสมบัติที่ยังคงมีความคลาดเคลื่อน จำนวนอิลเมนต์ในการจำลองที่ยังไม่ทำให้คำตอบเข้าสู่คำตอบจริง และปัจจัยภายนอกอื่นๆ เช่น อุณหภูมิที่มีอิทธิพลต่อค่าคุณสมบัติทางกลของยาง ซึ่งภายในบริบทไม่สามารถควบคุมได้ แต่ทำให้ทราบแนวทางการจำลอง และมี

ความเพียงพอ ที่จะสามารถนำแนวทางการจำลองนี้ไปพัฒนาเพื่อหาสัดส่วนยางชั้นนอกชั้นในและรูปแบบแก้มยางคอกยาง ที่ทำให้ค่าความต้านทานการหมุนกลิ้งลดลง

ตารางที่ 5.3 ผลความแตกต่างของค่าความต้านทานการหมุนกลิ้งจากการจำลอง
เปรียบเทียบกับผลการทดสอบ

ล้อยาง	ระยะยวบ (mm)	ผลค่าความต้านทานการหมุนกลิ้ง	ผลค่าความต้านทานการหมุนกลิ้ง	ความแตกต่างเปรียบเทียบ
		จากการทดสอบ (N)	จากการจำลอง (N)	กับผลทดสอบ (%)
A	4.97	51.2	46.93	8.34
	9.97	163.9	141.03	13.95
	13.80	296.4	264.03	10.92
B	5.10	61.6	57.60	6.50
	10.90	242.0	220.33	8.96
	15.79	463.1	423.09	8.64
C	4.85	58.7	53.29	9.21
	10.05	188.2	169.85	9.75
	14.27	335.8	297.95	11.27

ตารางที่ 5.4 ค่าภาระน้ำหนักจากการจำลองเปรียบเทียบกับผลการทดสอบ

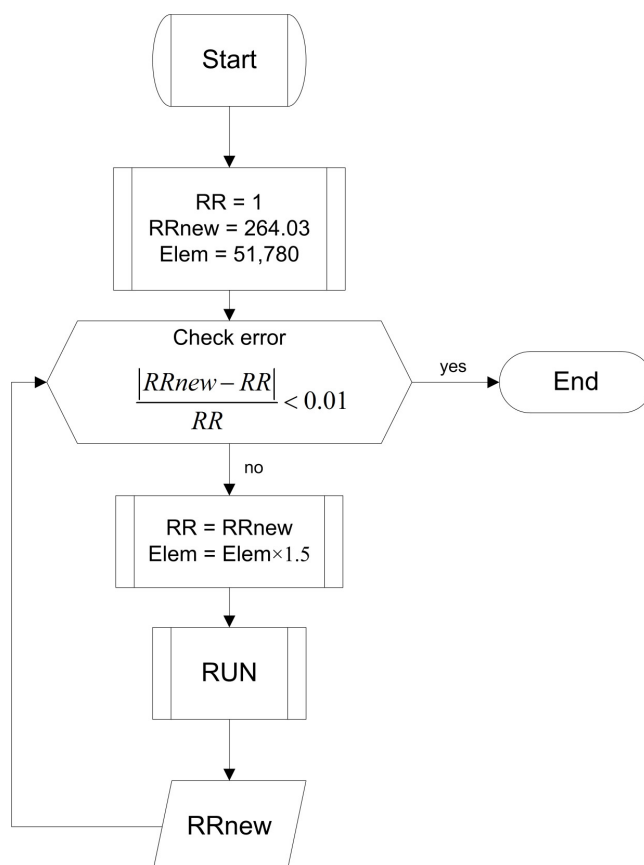
ล้อยาง	ภาระน้ำหนักต่างๆที่เกิดขึ้นจากการจำลองที่ระยะยวบต่างๆเช่นเดียวกับการทดสอบ (N)			
	จากการคำนวณความดัน	4,974 (4bar)	9,947 (8bar)	14,922 (12bar)
	จากการตรวจสอบด้วยโพลดเซลล์	3,358	7,904	12,451
A		2,459	6,094	9,556
B		2,353	6,497	10,899
C		2,750	6,767	10,863
ค่าเฉลี่ยจากการจำลอง		2,520	6,453	10,439

จากตารางที่ 5.4 ทำให้ทราบภาวะน้ำหนักที่เกิดขึ้นจริงโดยคำตอบมีความใกล้เคียงความจริงมากกว่าการตรวจสอบด้วยโพลดเซลล์ โดยที่ความดันน้ำมันไฮดรอลิก 4 บาร์ คือ เสมือนมีภาวะน้ำหนักกดด้อยเพียง 2,520 นิวตัน จากเดิมที่เข้าใจในขั้นแรกจากการคำนวณความดันบนพื้นที่หน้าตัดของกระบอกสูบภายในกระบอกไฮดรอลิก คือ 4,974 นิวตัน และลดลงเหลือ 3,358 นิวตัน จากการตรวจสอบด้วยโพลดเซลล์ และให้ข้อมูลทำงานองเดียวกันกับที่กรณีความดัน 8 และ 12 บาร์ เช่นกัน

5.2 การพัฒนารูปแบบเพื่อลดค่าความต้านทานการหมุนกลิ้ง

ในหัวนี้จะนำเสนอขั้นตอนการพัฒนารูปแบบล้อขางเพื่อลดค่าความต้านทานการหมุนกลิ้ง โดยทำการพัฒนาทีละขั้นตอน มีล้อขาง A ที่มีค่าความต้านทานการหมุนกลิ้งต่ำสุดเป็นต้นแบบการพัฒนา ไม่มีการปรับเปลี่ยนค่าคุณสมบัติวัสดุ แต่จะทำการพัฒนารูปแบบ ได้แก่ การพัฒนา ดอกขาง แก้มขาง รูปแบบขางชั้นในและลัดส่วนขางชั้นใน ไปทีละขั้นตอนตามลำดับ

โดยก่อนที่จะทำการพัฒนา จำเป็นจะต้องทำการตรวจสอบจำนวนอิลิเมนต์ของล้อขาง A เพื่อให้คำตอบเข้าสู่คำตอบจริง โดยทำการเพิ่มจำนวนอิลิเมนต์ ครั้งละประมาณ 50 เปอร์เซนต์ แล้วสังเกตการณ์เปลี่ยนแปลงของผลค่าความต้านทานการหมุนกลิ้ง โดยจะยอมรับจำนวนอิลิเมนต์ที่ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของค่าความต้านทานการหมุนกลิ้ง เมื่อเทียบกับคำตอบในขั้นตอนก่อนหน้า ไม่เกิน 1 เปอร์เซนต์ และได้แสดงรายละเอียดขั้นตอนการตรวจสอบดังรูปที่ 5.10 และได้แสดงผลของการตรวจสอบจำนวนอิลิเมนต์ของล้อขาง A ดังตารางที่ 5.5



รูปที่ 5.10 ขั้นตอนการตรวจสอบจำนวนอิลิเมนต์

ตารางที่ 5.5 ผลการตรวจสอบอิลเมนต์ตัวอย่าง A

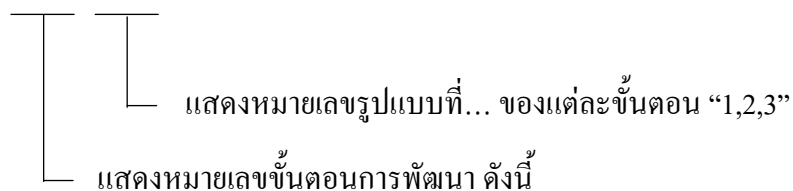
จำนวนอิลเมนต์	RR (N)	ความแตกต่าง(%)
51,780	264.03	N/A
75,433	267.88	1.458
115,978	270.14	0.844

จากนั้นจึงใช้จำนวนอิลเมนต์ที่ทำให้ค่าตอบคู่เข้า เป็นจำนวนอิลเมนต์ในขั้นตอนพัฒนา ซึ่งในความเป็นจริงจำนวนอิลเมนต์ที่เหมาะสมนั้นจะขึ้นอยู่กับรูปแบบโมเดล เงื่อนไขขอบเขตในการจำลอง และชนิดคำตอบที่ต้องการ แต่ในขั้นตอนพัฒนา มีการเปลี่ยนรูปแบบโมเดลตลอด จึงต้องตรวจสอบทุกครั้ง แต่เนื่องจากหากตรวจสอบทุกขั้นตอนของการเปลี่ยนโมเดล จำเป็นต้องมีพื้นที่สำหรับเก็บข้อมูลจำนวนมาก แต่จากการตรวจสอบจำนวนอิลเมนต์ในโมเดลตั้งต้น ก็สามารถลดความผิดพลาดในกรณีนี้ได้ในระดับหนึ่ง ในงานวิจัยจึงไม่ทำการตรวจสอบในขั้นตอนการพัฒนา เพราะจำนวนอิลเมนต์ในแต่ละโมเดลมีจำนวนใกล้เคียงกัน จึงสามารถนำข้อมูลของแต่ละโมเดลเปรียบเทียบกันได้

ในการจำลองทำที่ภาระน้ำหนัก 9,553 นิวตัน ซึ่งเป็นภาระน้ำหนักที่ทำให้เกิดความต้านทานการหมุนกลิ้ง 270.14 นิวตัน สำหรับตัวอย่างต้น A และทำการปรับเปลี่ยนพัฒนารูปแบบทีละขั้น โดยเลือกรูปแบบที่ส่งผลให้ค่าการต้านการหมุนกลิ้งมีค่าต่ำสุดเป็นตัวตั้งสำหรับการพัฒนาในขั้นตอนต่อไป โดยมีขั้นตอนและจำนวนรูปแบบในการพัฒนาดังนี้

1. ดอกยาง 2 รูปแบบ
2. แก้มยาง 3 รูปแบบ
3. รูปร่างยางต้นชั้นใน โดยมีพื้นที่หน้าตัดใกล้เคียงกัน 3 รูปแบบ
4. สัปดาห์ของยางต้นชั้นในต่อยางต้นชั้นนอก 3 รูปแบบ

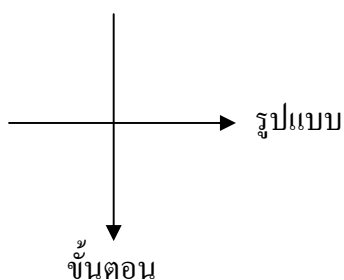
ได้มีการตั้งชื่อสัญลักษณ์ของแต่ละโมเดลโดยมีรายละเอียด ดังนี้



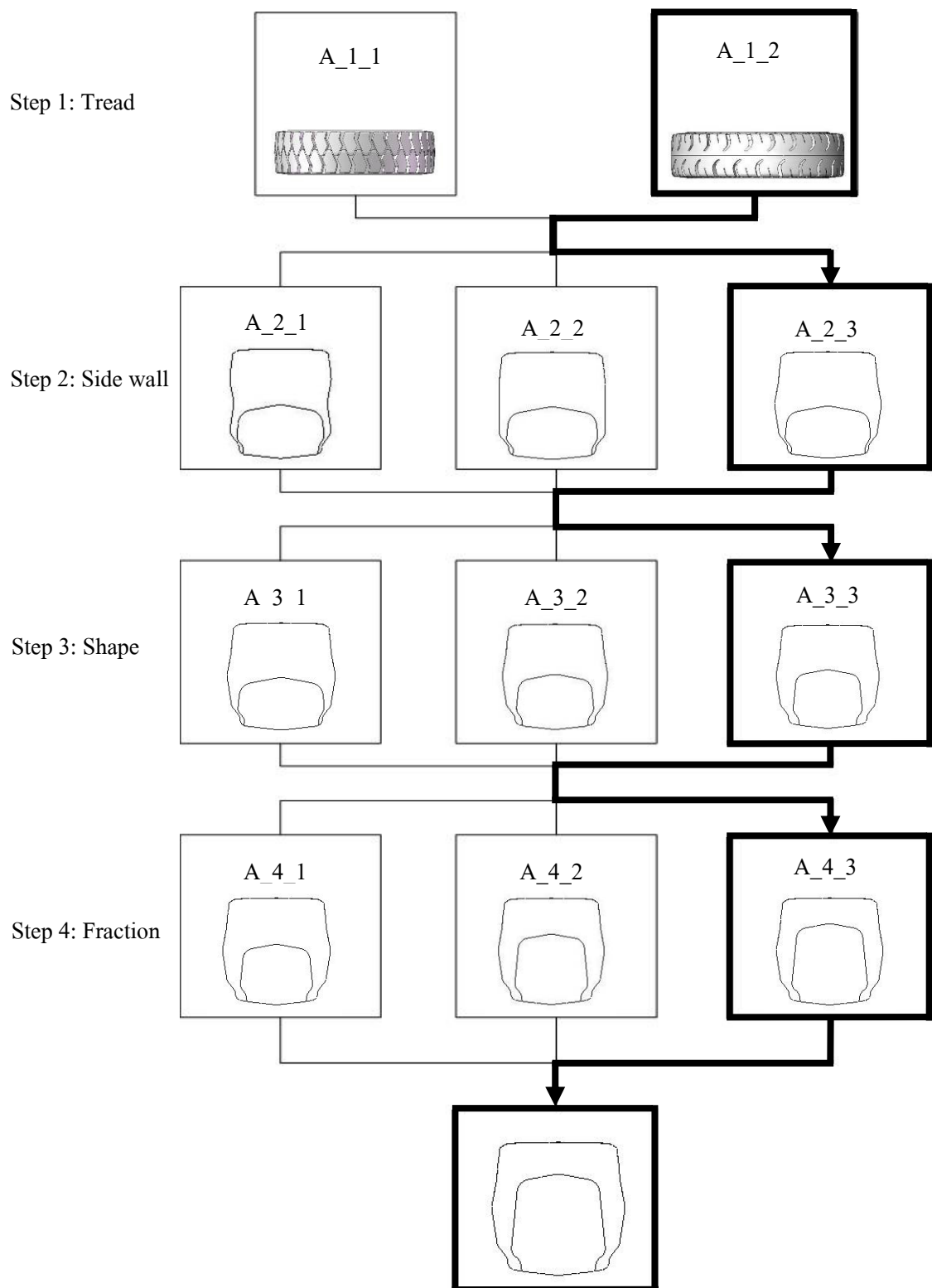
- “1” แสดงขั้นตอนการพัฒนาโดยการเปลี่ยนดอกยาง
- “2” แสดงขั้นตอนการพัฒนาโดยการเปลี่ยนแก้มยาง
- “3” แสดงขั้นตอนการพัฒนาโดยการเปลี่ยนรูปร่างหน้าตัดยางในขนาดใกล้เคียง
- “4” แสดงขั้นตอนการพัฒนาโดยการเปลี่ยนขนาดหน้าตัดยางใน

จากการจำลองในขั้นตอนการพัฒนาโมเดลได้ผลเส้นทางการจำลองรายละเอียดดังแสดงใน รูปที่ 5.12 ผลค่าความต้านทานการหมุนกลิ้งในตารางที่ 5.5 และได้แสดงรายละเอียดขนาดหน้าตัดโมเดลแต่ละรูปแบบในภาคผนวก

ในการแสดงผลขั้นตอนการพัฒนาใน รูปที่ 5.12 มีรายละเอียดทิศทางของแผนภูมิดัง รูปที่ 5.11



รูปที่ 5.11 รายละเอียดการปรับเปลี่ยนทิศทางของแผนภูมิ



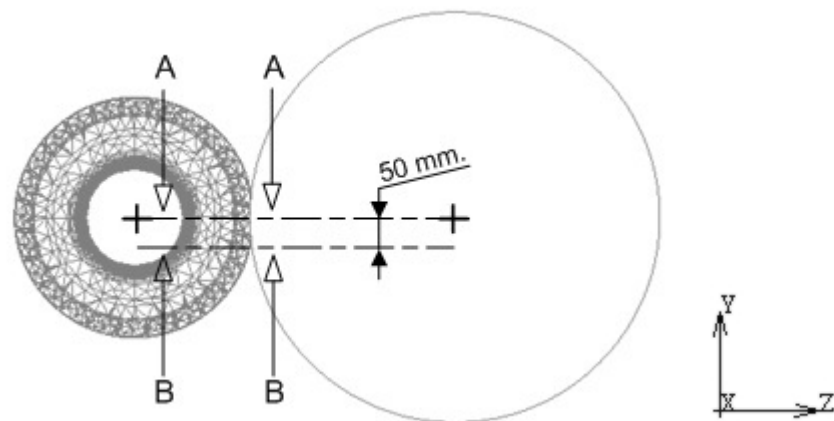
รูปที่ 5.12 ขั้นตอนการพัฒนาแบบล้อยางต้น

ตารางที่ 5.6 ข้อมูลจำเพาะและค่าความต้านทานการหมุนกลิ้งของล้อยาง

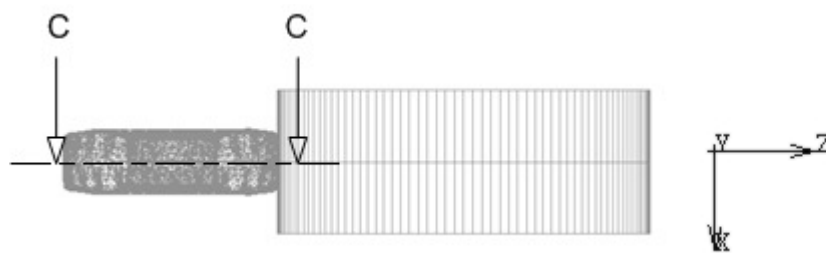
โมเดล	ปริมาตรยาง ใน(cm ³)	ปริมาตรยาง นอก(cm ³)	น้ำหนัก (kg)	ระยะยุบ (mm)	RR (N)	RR ลดลง (%)
A_1_1	7052.3	15896.3	26.81	13.84	270.1	N/A
A_1_2&A_2_1	7052.3	16113.4	27.06	11.95	221.0	18.17
A_2_2	7052.3	16566.6	27.59	11.93	217.8	19.36
A_2_3&A_3_1	7052.3	17080.3	28.18	11.92	215.6	20.19
A_3_2	7122.6	17010.0	28.18	11.79	208.9	22.65
A_3_3&A_4_1	7285.4	16847.2	28.19	11.64	201.1	25.54
A_4_2	9205.1	14927.5	28.26	11.37	185.5	31.32
A_4_3	11313.0	12819.7	28.35	11.14	171.7	36.45
A_4_3 (ไม่มีดอก)	11313.0	13314.0	28.92	10.54	153.6	43.13

*หมายเหตุ ค่าความหนาแน่น ยางใน = 1.1951 (g/cm³), ยางนอก = 1.1565 (g/cm³)

ในขั้นตอนการพัฒนาได้ทำการสังเกตพฤติกรรมภายในล้อยางที่เกิดขึ้นในแต่ละโมเดล โดยพิจารณาที่สองสถานะ คือ เมื่อยางได้รับการสูบน้ำหนักและเมื่อยางได้รับการสูบน้ำหนักและเกิดการหมุนกลิ้งควบคู่กันไป และได้แสดงผลในรูปแบบแถบความชัน (Contour bands) ดังตารางที่ 5.6 – 5.8 โดยในสถานะแรก คือ เมื่อยางได้รับการสูบน้ำหนักเพียงอย่างเดียว ได้แสดง ค่าของความเค้นและความเครียดภายในหน้าตัดล้อยาง A-A (ตารางที่ 5.7) รายละเอียดบริเวณดังแสดงใน รูปที่ 5.13 และสถานะที่สอง คือ เมื่อยางได้รับการสูบน้ำหนักและเกิดการหมุนกลิ้งควบคู่กันไป ได้แสดงค่าความเครียดภายในหน้าตัดล้อยาง B-B (ตารางที่ 5.8) รายละเอียดบริเวณดังแสดงใน รูปที่ 5.13 เช่นกัน แสดงความเครียดภายในหน้าตัดล้อยาง C-C (ตารางที่ 5.8) รายละเอียดบริเวณดังแสดงใน รูปที่ 5.14 และแสดงค่าความดันสัมผัส (ตารางที่ 5.9) บริเวณพื้นที่สัมผัสระหว่างล้อยางกับพื้นผิวจำลอง

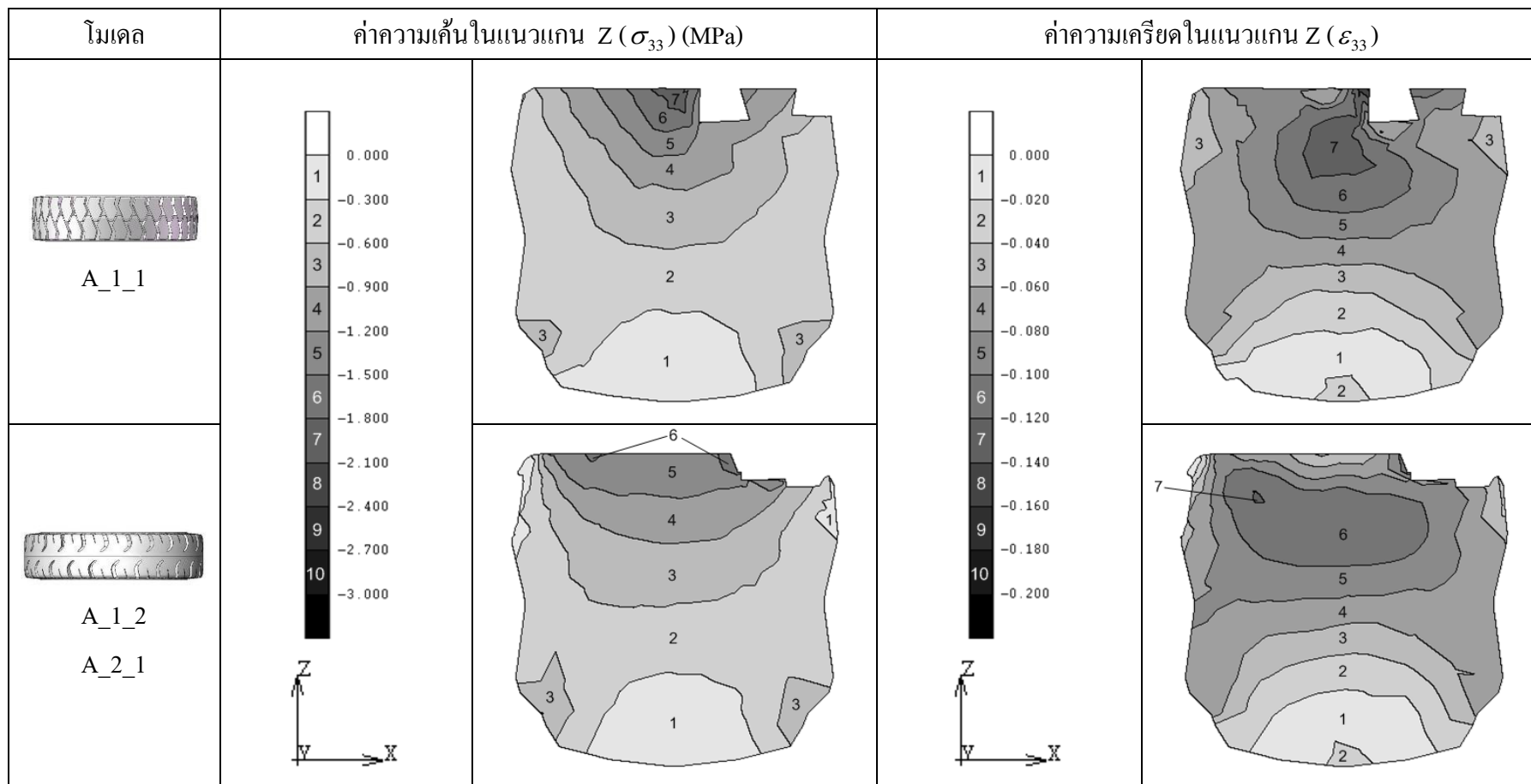


รูปที่ 5.13 บริเวณหน้าตัดตัวอย่างเพื่อแสดงค่าความเค้นและความเครียด

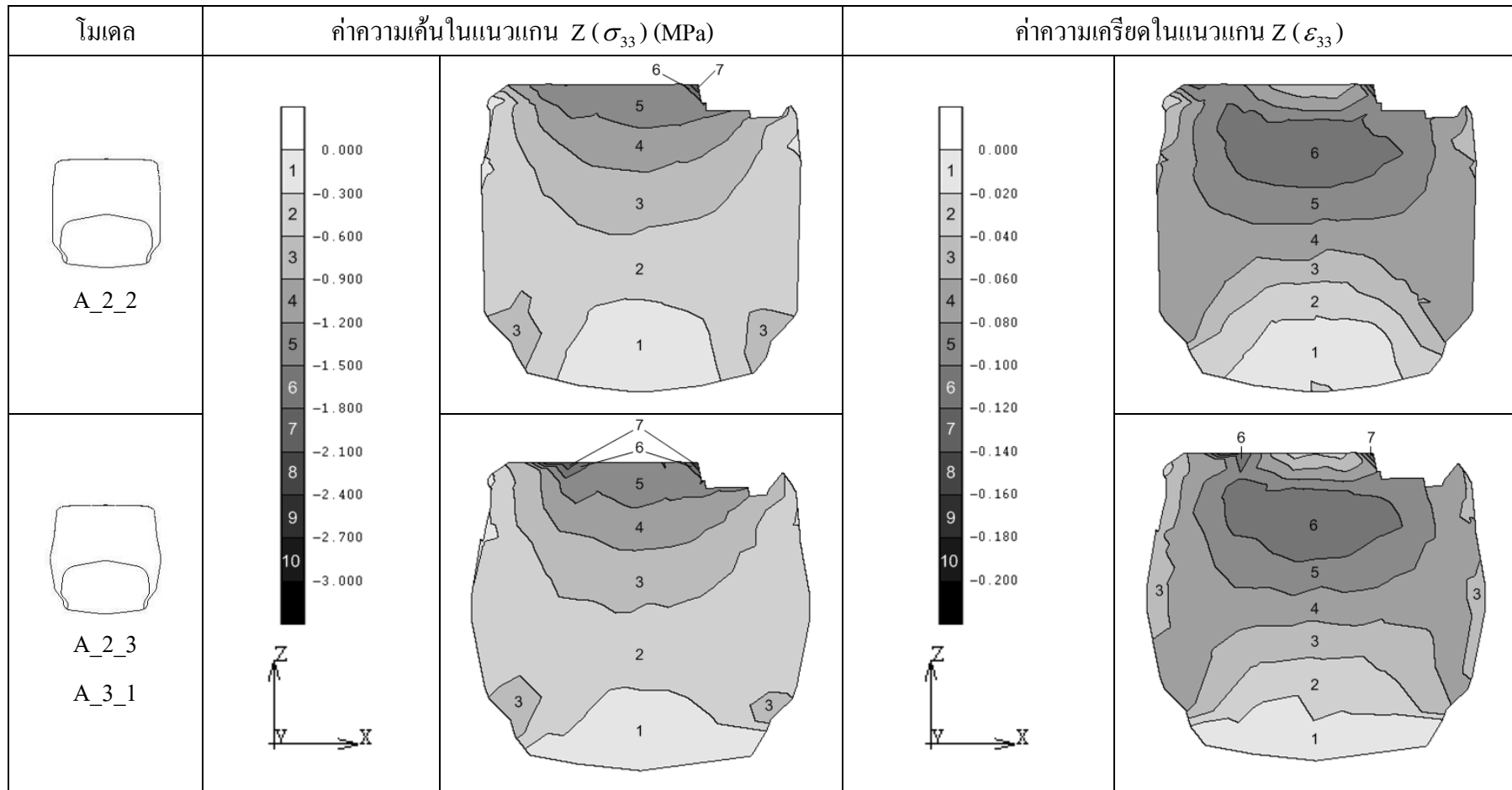


รูปที่ 5.14 บริเวณหน้าตัดตัวอย่างเพื่อแสดงค่าความเครียด
ในขณะที่รับภาระน้ำหนักและเกิดการหมุนกลิ้ง

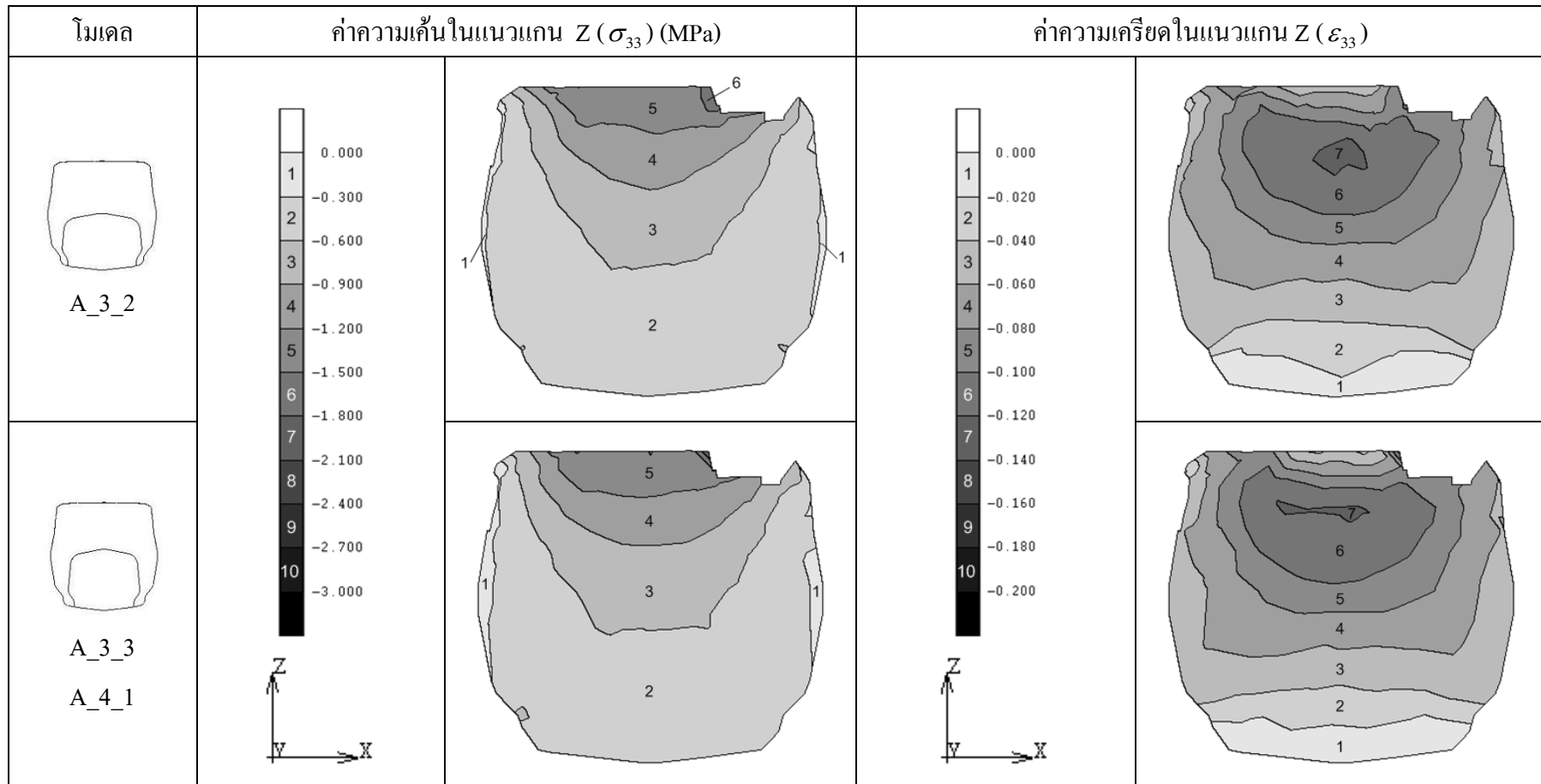
ตารางที่ 5.7 ค่าความเค้นและความเครียดหน้าตัดยง A-A เมื่อยางรับภาระน้ำหนัก



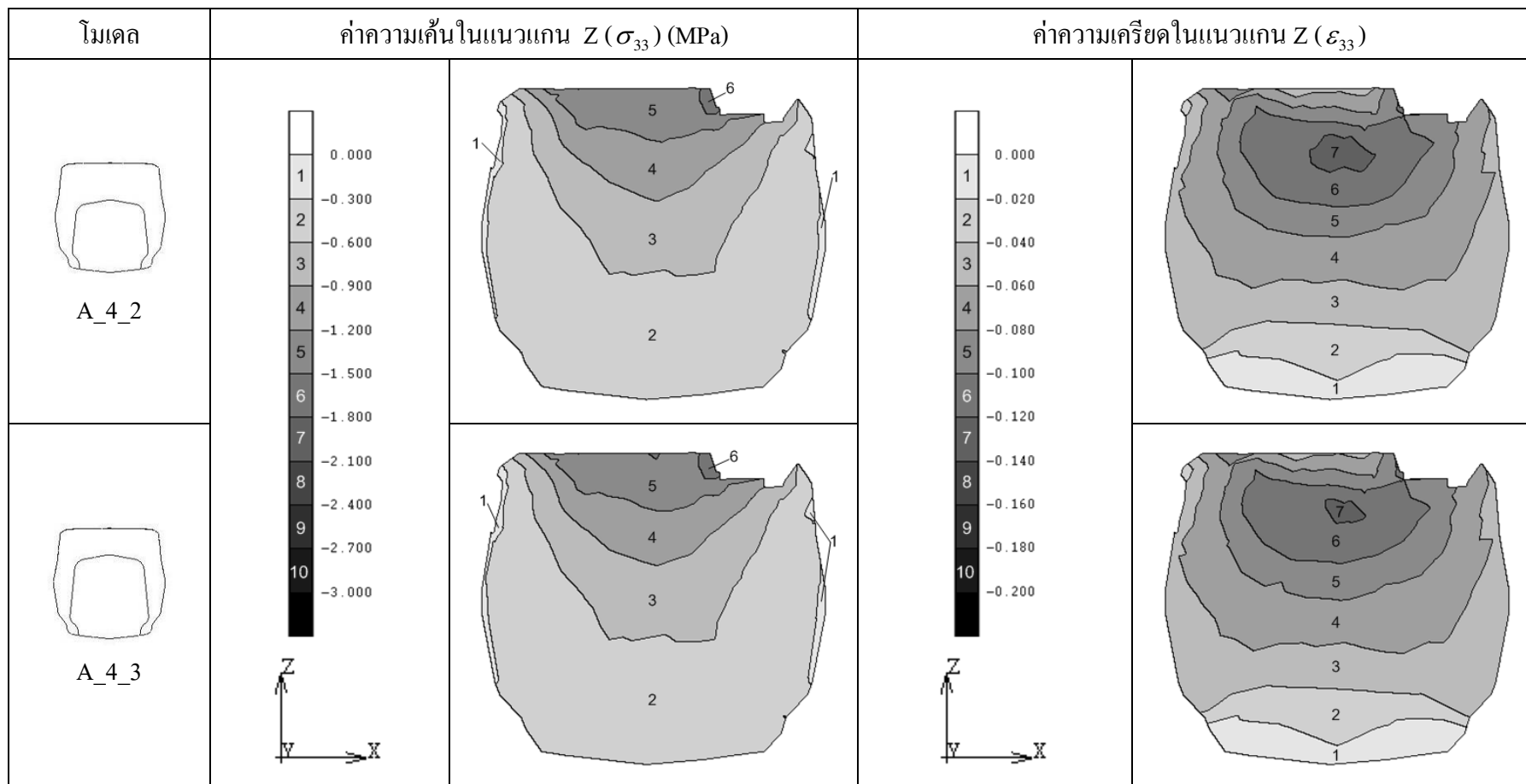
ตารางที่ 5.7 (ต่อ) ค่าความเค้นและความเครียดหน้าตัดยวง A-A เมื่อยางรับภาระน้ำหนัก




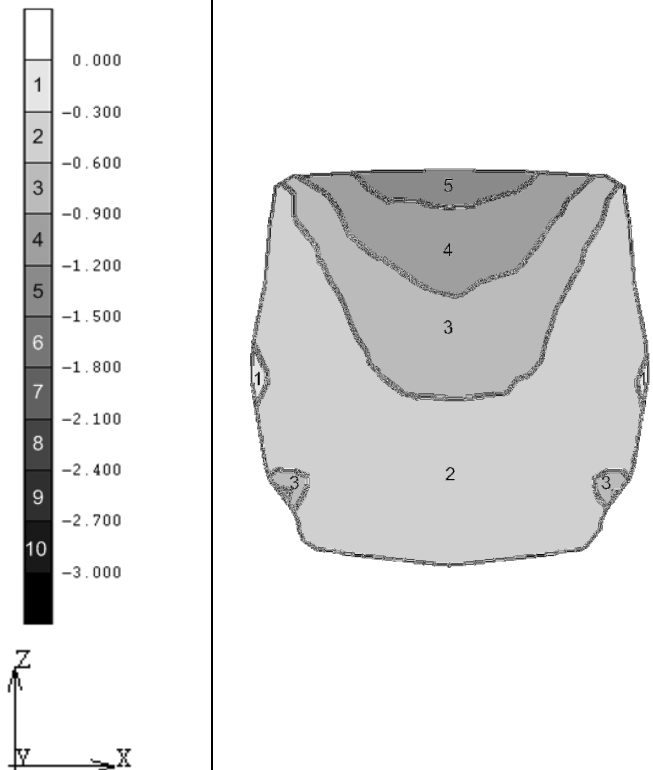
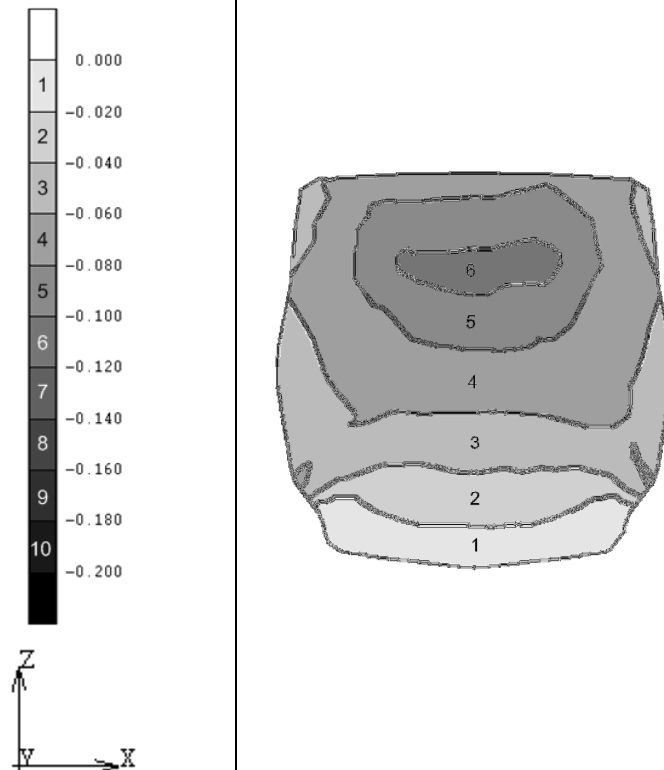
ตารางที่ 5.7 (ต่อ) ค่าความเค้นและความเครียดหน้าตัดยวง A-A เมื่อยังรับภาระน้ำหนัก



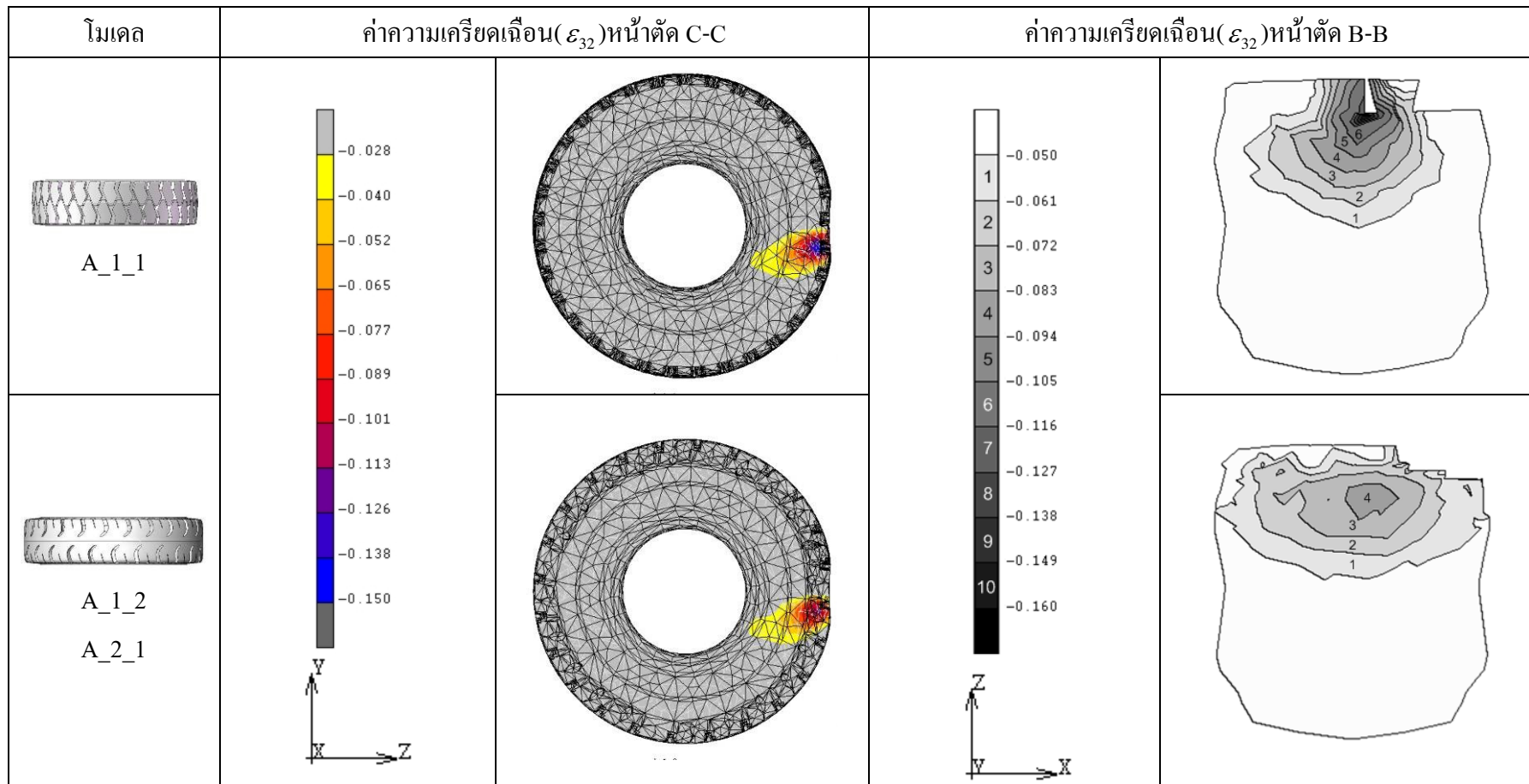
ตารางที่ 5.7 (ต่อ) ค่าความเค้นและความเครียดหน้าตัดยวง A-A เมื่อยางรับภาระน้ำหนัก



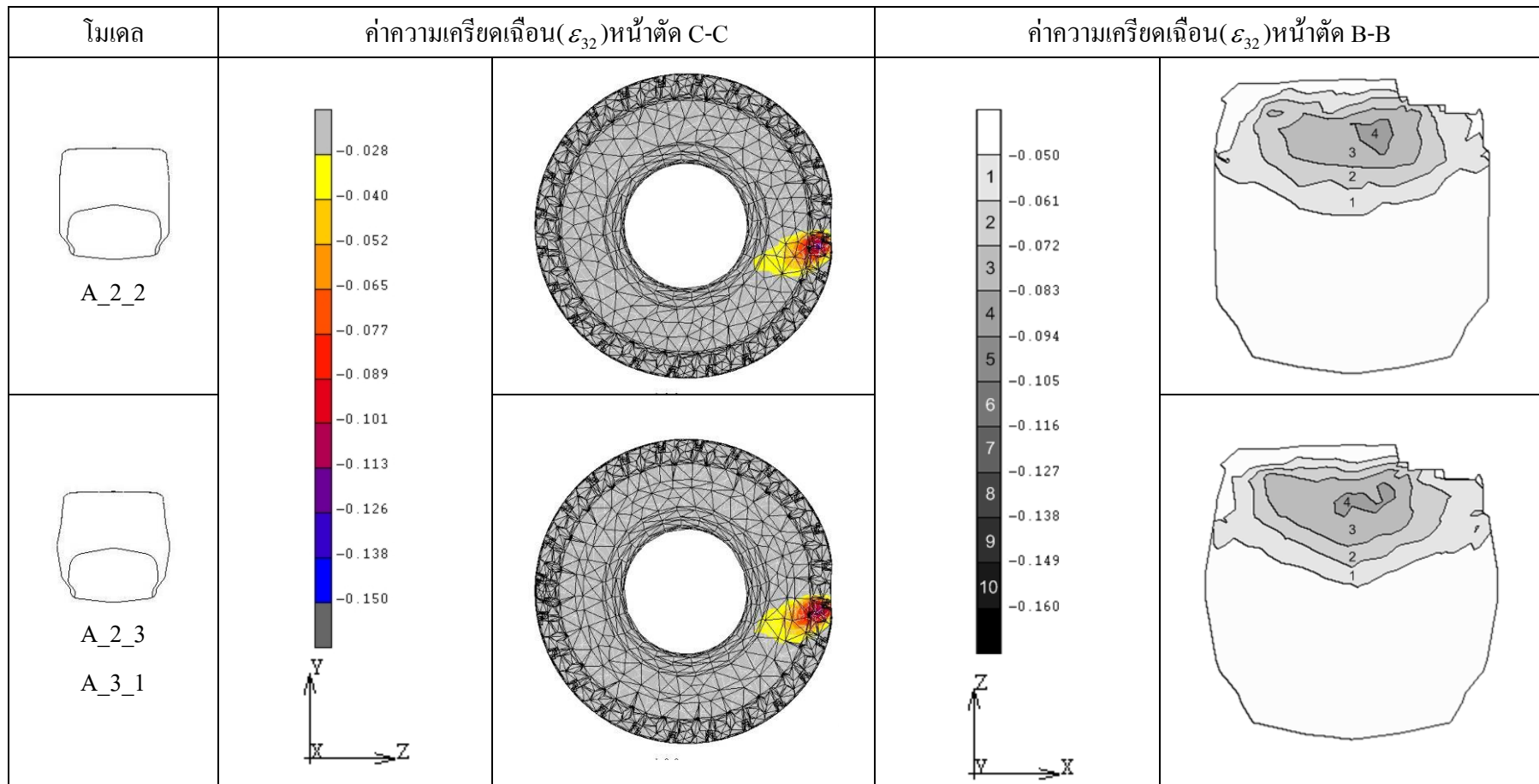
ตารางที่ 5.7 (ต่อ) ค่าความเค้นและความเครียดหน้าตัดยวง A-A เมื่อยังรับภาระน้ำหนัก

โมเดล	ค่าความเค้นในแนวแกน Z (σ_{33}) (MPa)	ค่าความเครียดในแนวแกน Z (ϵ_{33})
 <p data-bbox="224 949 369 1037">A_4_3 (ไม่มีดอก)</p>		

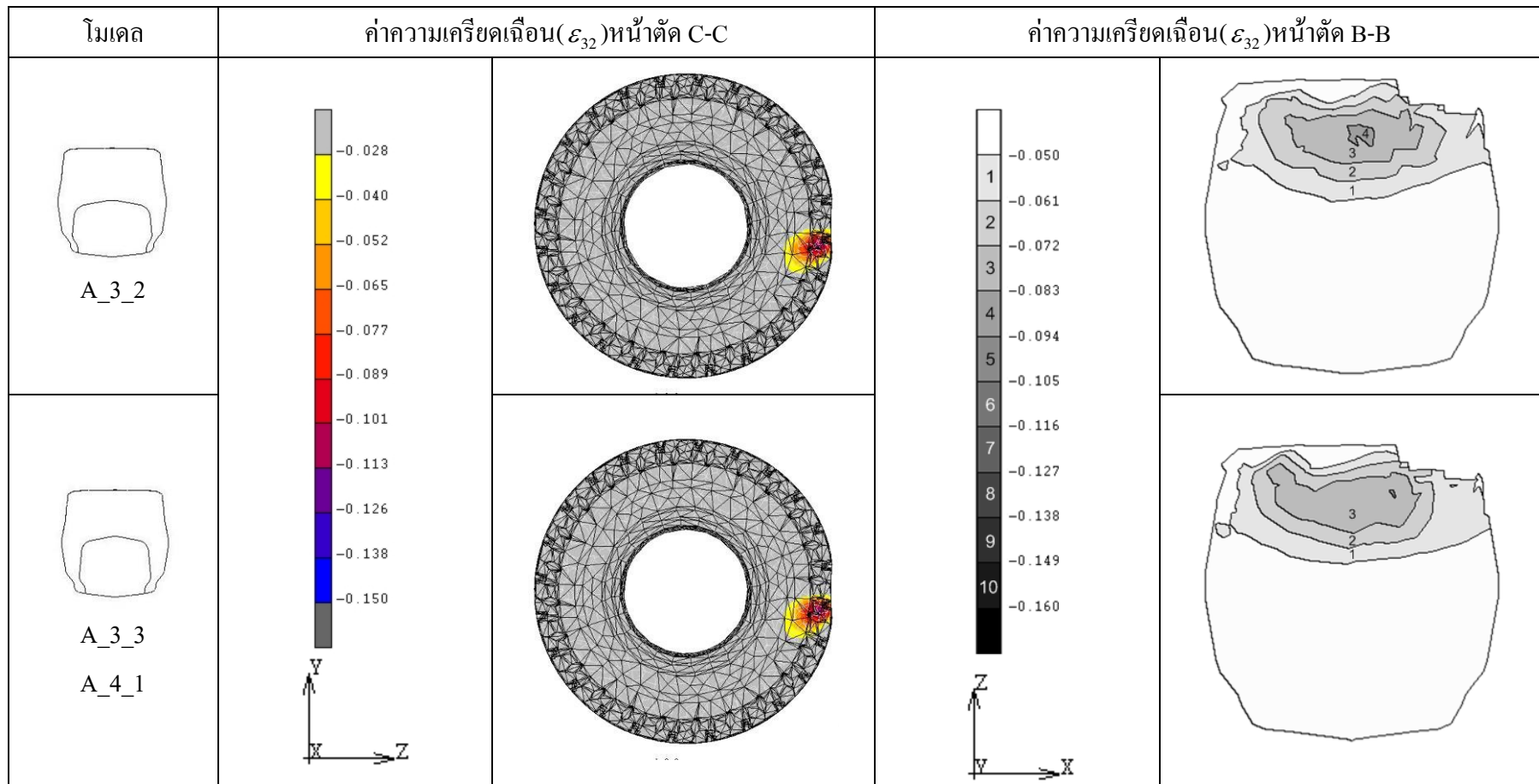
ตารางที่ 5.8 ค่าความเครียดเฉือนภายในในหน้าตัด B-B และ C-C เมื่อยางได้รับภาระน้ำหนักและเกิดการหมุนกลิ้ง



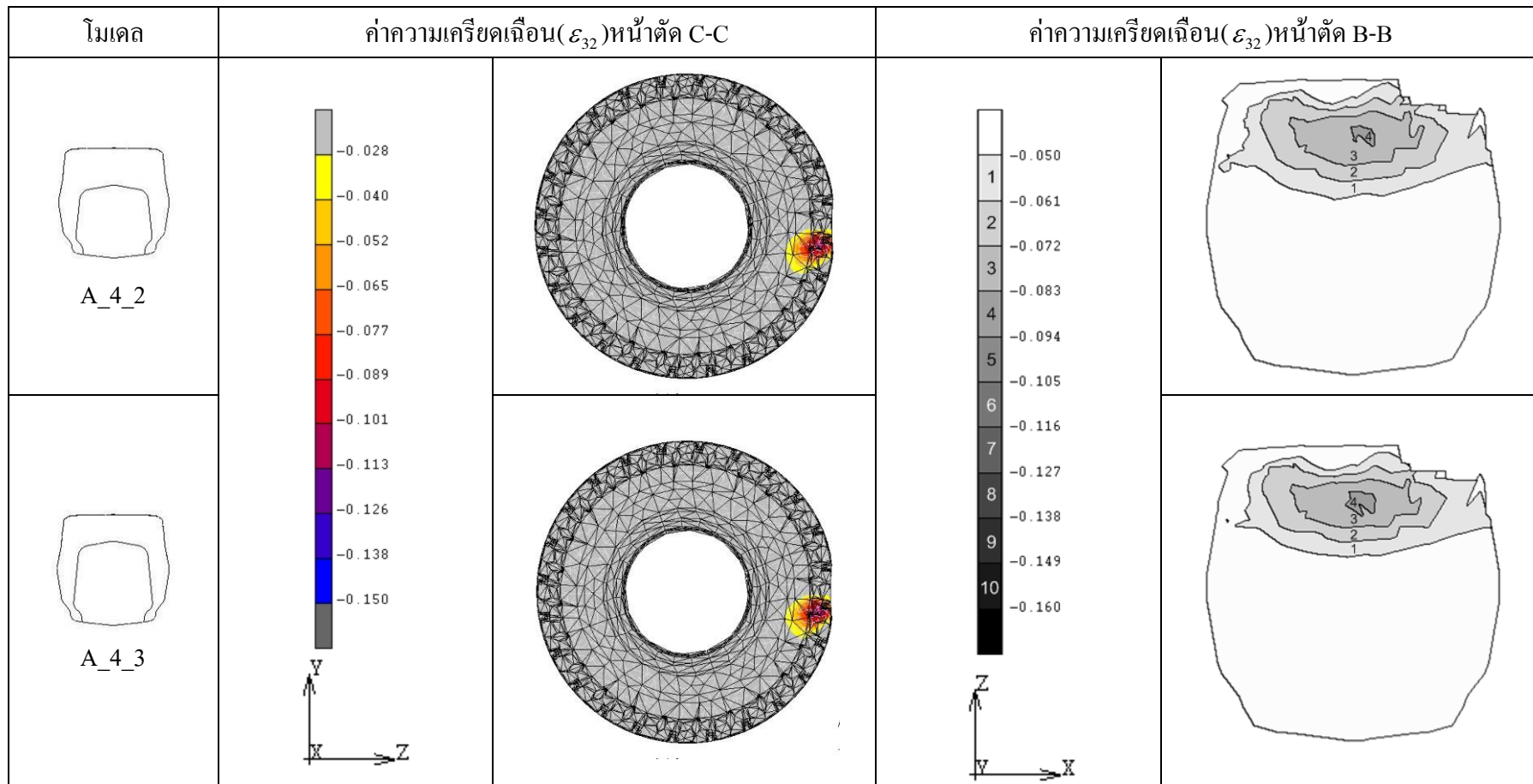
ตารางที่ 5.8 (ต่อ) ค่าความเครียดเฉือนภายในหน้าตัด B-B และ C-C เมื่อขังน้ำหนักและเกิดการหมุนกลิ้ง



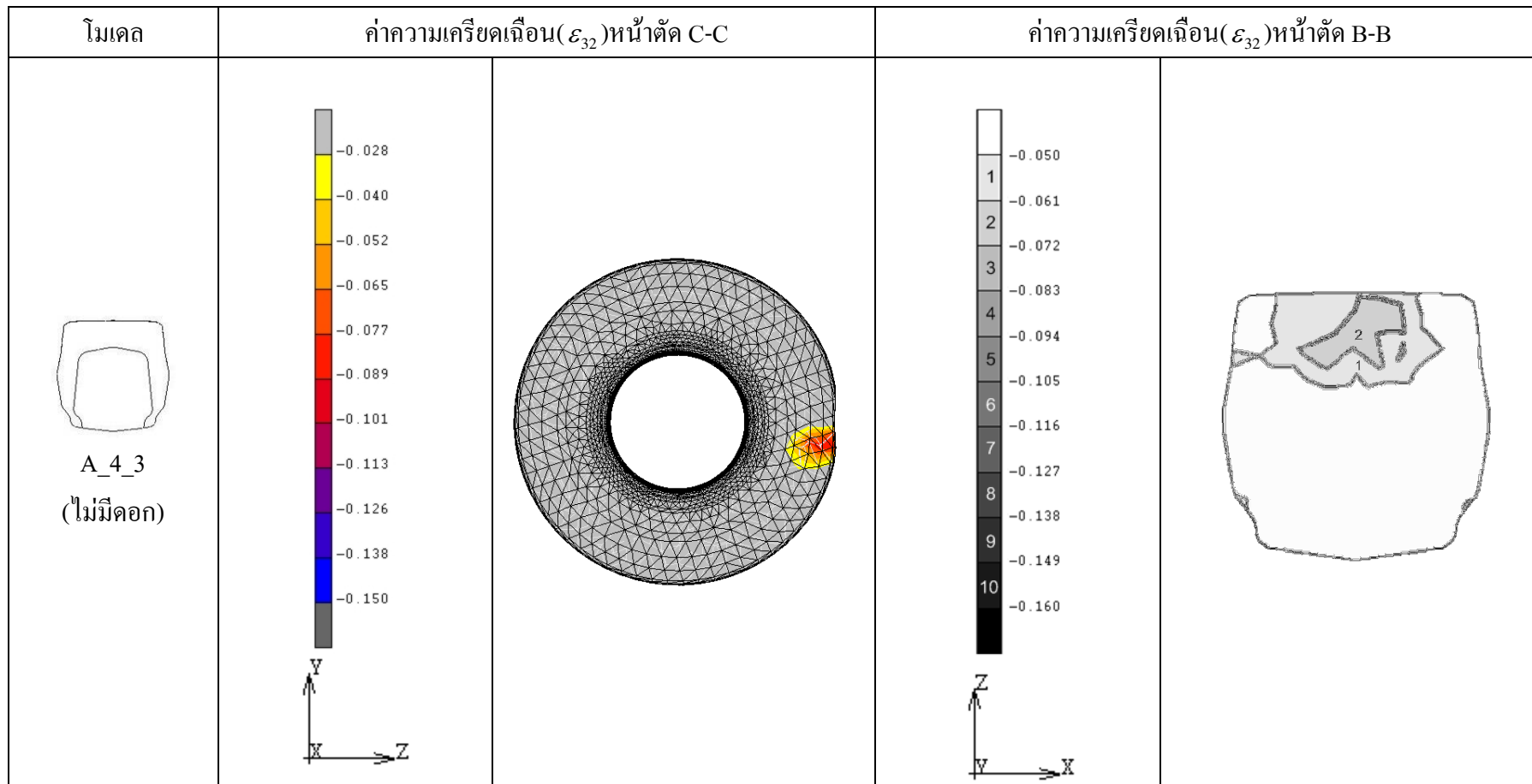
ตารางที่ 5.8 (ต่อ) ค่าความเครียดเฉือนภายในหน้าตัด B-B และ C-C เมื่อขังน้ำหนักและเกิดการหมุนกลิ้ง



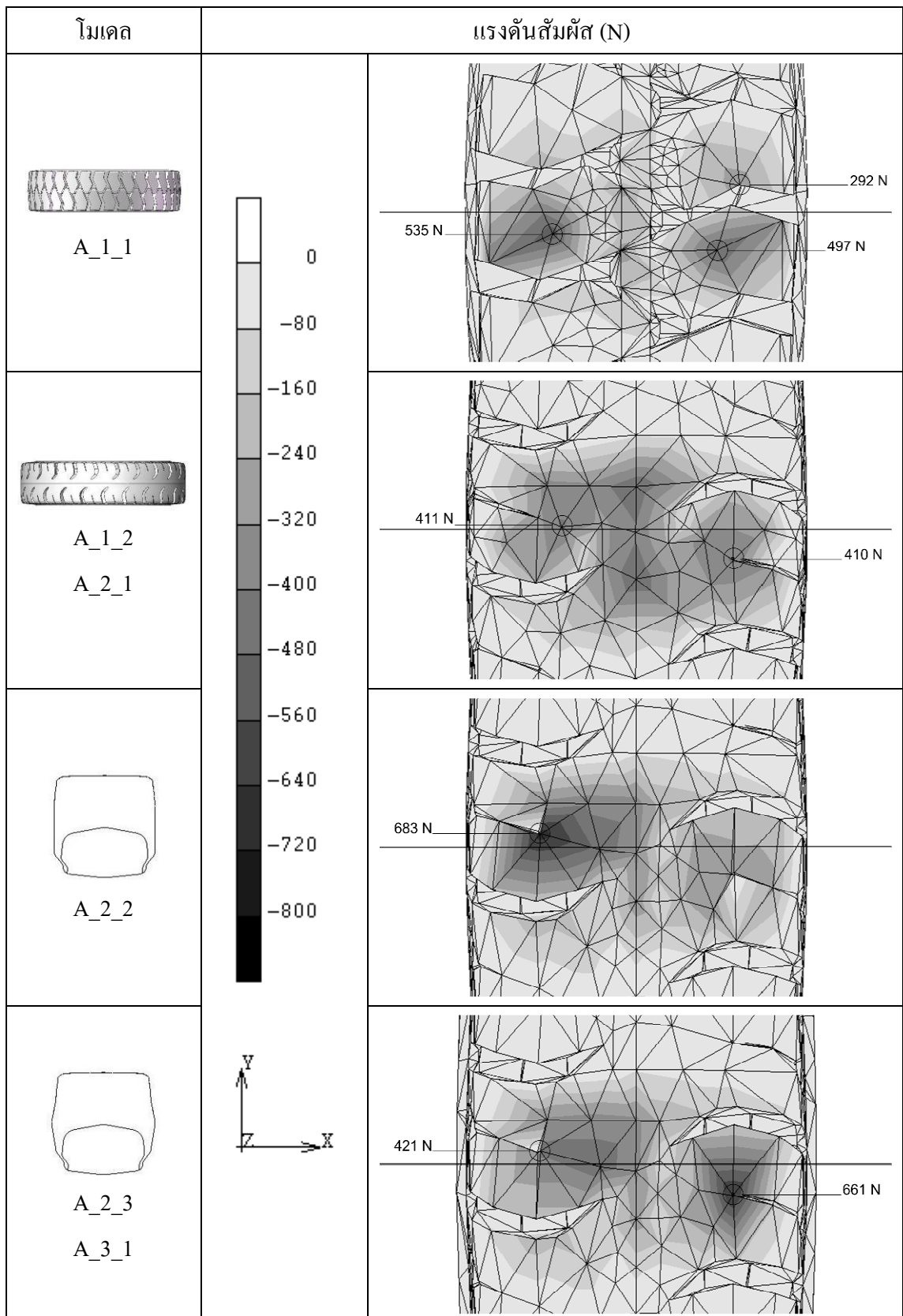
ตารางที่ 5.8 (ต่อ) ค่าความเครียดเฉือนภายในหน้าตัด B-B และ C-C เมื่อขยับน้ำหนักและเกิดการหมุนกลิ้ง



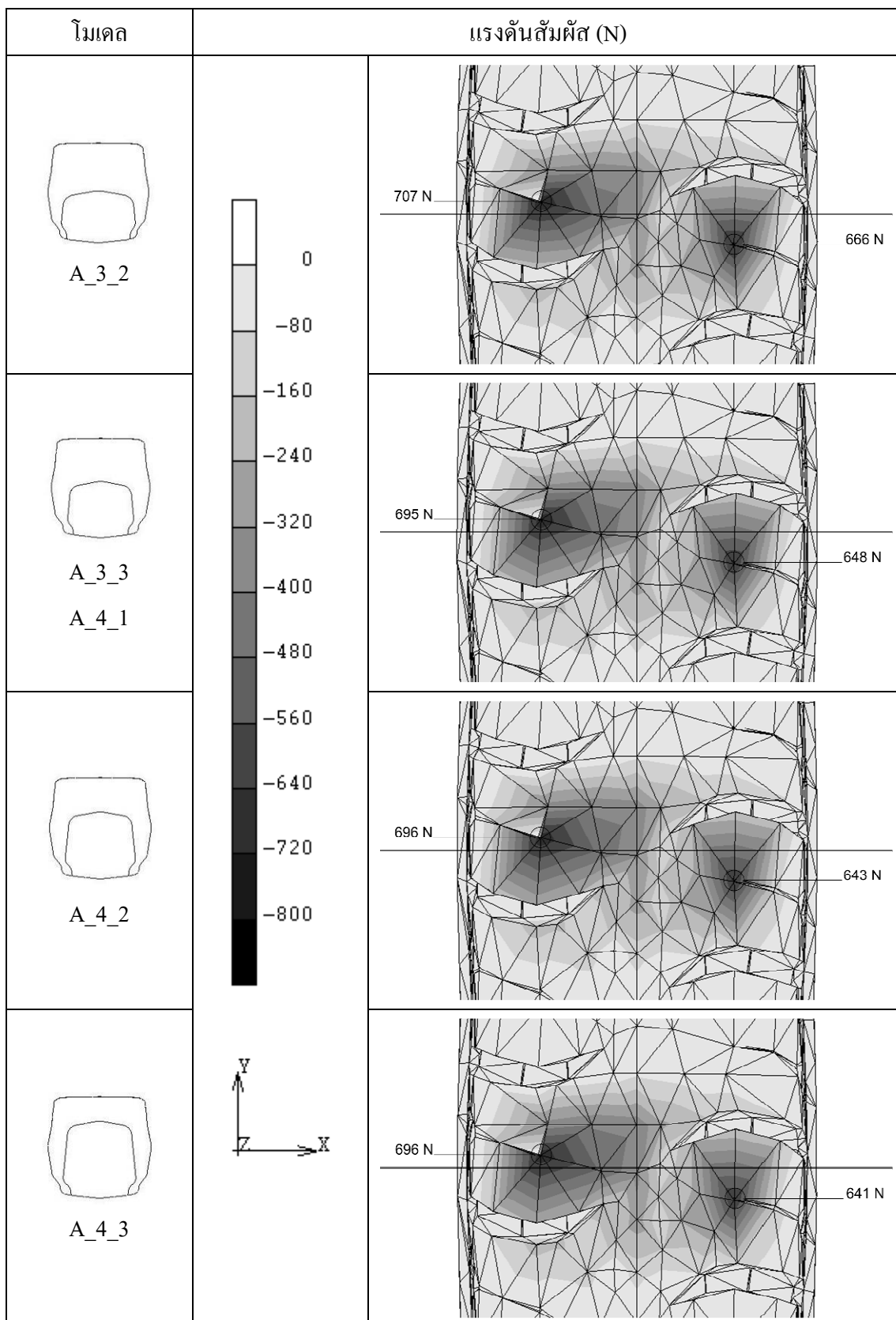
ตารางที่ 5.8 (ต่อ) ค่าความเครียดเฉือนภายในหน้าตัด B-B และ C-C เมื่อยางได้รับภาระน้ำหนักและเกิดการหมุนกลิ้ง



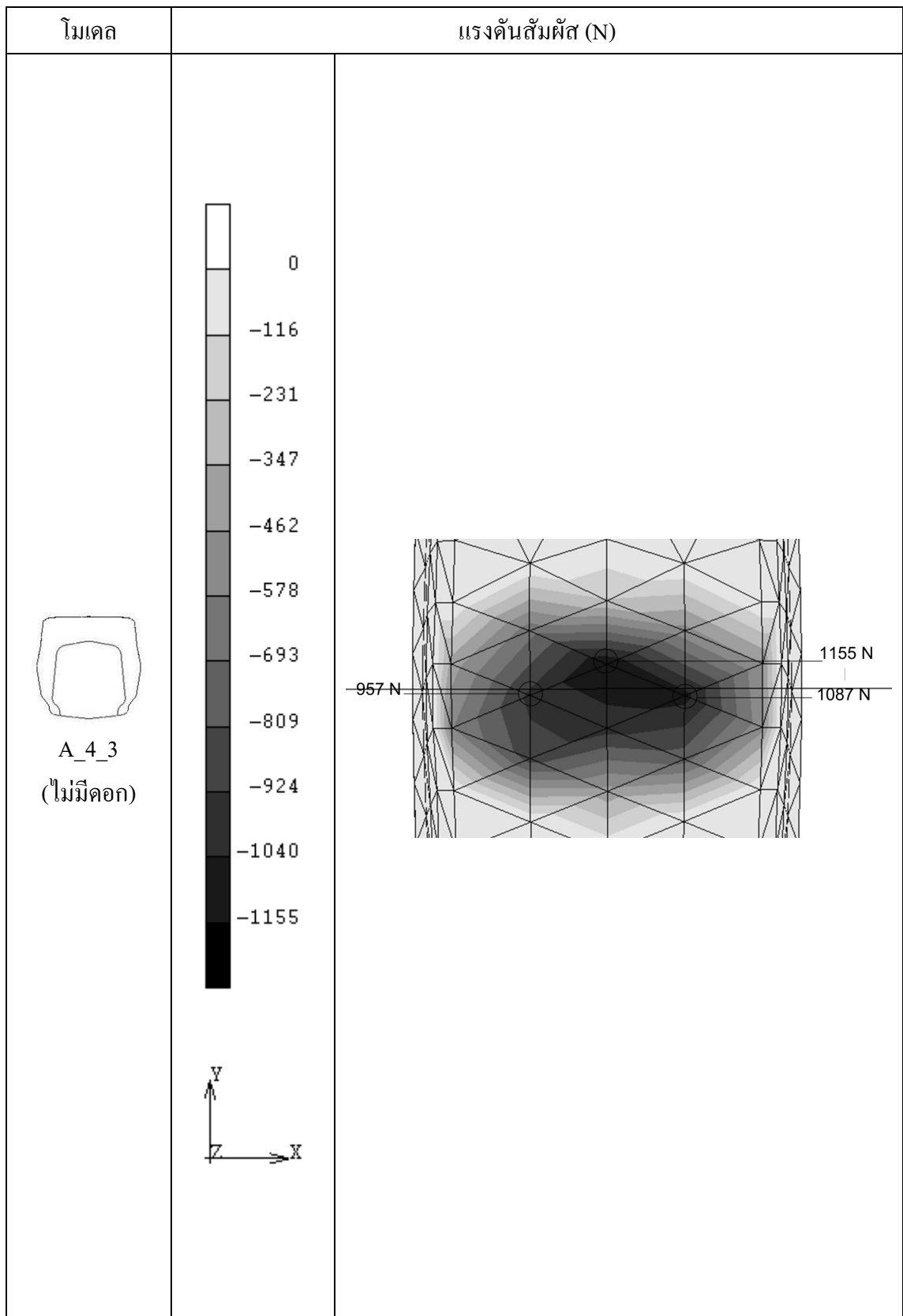
ตารางที่ 5.9 แรงดันสัมผัส เมื่อยางได้รับภาระน้ำหนักและเกิดการหมุนกลิ้ง



ตารางที่ 5.9 (ต่อ) แรงดันสัมผัส เมื่อยางได้รับการนํ้าหนักและเกิดการหมุนกลิ้ง



ตารางที่ 5.9 (ต่อ) แรงดันสัมผัส เมื่อยางได้รับการนำหนักและเกิดการหมุนกลิ้ง



ตารางที่ 5.10 พลังงานความเครียดของล้อยางตัน

โมเดล	พลังงานความเครียด (J)
A_1_1	71.544
A_1_2&A_2_1	57.343
A_2_2	60.593
A_2_3&A_3_1	60.239
A_3_2	55.088
A_3_3&A_4_1	54.041
A_4_2	49.438
A_4_3	44.686
A_4_3 (ไม่มีดอก)	40.679

จากตารางที่ 5.6 จะเห็นได้ว่าเมื่อเพิ่มความแข็ง (Stiffness) ของล้อยาง จากการเปลี่ยนดอกยางในโมเดล A_1_2 จากการเพิ่มปริมาณแก้มยางในโมเดล A_2_2 และ A_2_3 จากการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง ในโมเดล A_3_2 และ A_2_3 และจากการเพิ่มปริมาณล้อยางชั้นในในโมเดล A_4_2 และ A_4_3 การเพิ่มความแข็งส่งผลให้ล้อยางเกิดการยุบตัวลดลงในขณะรับภาระน้ำหนัก โดยระยะยุบลดลงมากสุดในขั้นตอนพัฒนาดอกยาง คือ ลดลงได้ถึง 1.89 มิลลิเมตร และความต้านทานการหมุนกลิ้งลดลงมากสุดในขั้นตอนนี้เช่นกัน โดยลดลง 18.17 เปอร์เซ็นต์ สำหรับผลของขั้นตอนพัฒนาต่อมา ส่งผลให้ค่าความต้านทานการหมุนกลิ้งลดลงเป็นลำดับ แต่ไม่เด่นชัด โดยในขั้นตอนสุดท้ายมีค่าความต้านทานการหมุนกลิ้งลดลง 36.45 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเทียบกับ โมเดลแรก และลดลง 43.13 เปอร์เซ็นต์ เมื่อไม่มีดอกยาง

จากตารางที่ 5.7 เมื่อเพิ่มขนาดความสูงของล้อยางตันชั้นในทั้งจากการเพิ่มความสูงโดยตรงและจากการปรับเปลี่ยนรูปร่าง ส่งผลให้พื้นที่หน้าตัดล้อยางที่เป็นล้อยางตันชั้นนอกเกิดความเครียดในแนวแกน z มากขึ้น โดยสำหรับปัญหาการวิเคราะห์เพื่อศึกษาค่าความต้านทานการหมุนกลิ้ง การเพิ่มค่าความแข็งจะทำให้ค่าความต้านทานการหมุนกลิ้งลดลง แต่การเปลี่ยนจุดบริเวณการเกิดความเครียดลักษณะนี้ จะมีผลต่อจุดเกิดความร้อนในเนื้อยาง โดยบริเวณที่เกิดความเครียดมากจะเกิดความร้อนก่อตัวมาก ซึ่งสามารถใช้วิธีไฟในต้ออิลเมนต์ชั้นสูงทำนายพฤติกรรมนี้ได้เช่นกัน และเมื่อเริ่มเปลี่ยนรูปร่างหน้าตัดยางชั้นใน ในโมเดล A_3_2 ส่งผลให้ค่า

ความเค้นในแนวแกน z บริเวณที่ล้อย่างสัมผัสกับขอบกะทะลดลง ซึ่งจุดนี้อาจเป็นปัญหาสำหรับการใช้งานในเชิงอุตสาหกรรม เพราะอาจเกิดการลื่นไถลระหว่างผิวสัมผัสได้

จากตารางที่ 5.8 แสดงให้เห็นการลดลงของความเครียดเนื่องที่เกิดขึ้นภายในหน้าตัดล้อย่าง ความเครียดเนื่องลดลงตามลำดับขั้นการพัฒนาโดยลดลงบริเวณที่ถูกแทนที่ด้วยล้อย่างตันชั้นใน และบริเวณความเครียดเนื่องที่ลดลงที่มีผลต่อการลดลงของค่าความต้านทานการหมุนกลิ้งที่สุด คือ บริเวณที่ใกล้กับดอกยาง

จากตารางที่ 5.9 แสดงให้เห็นความดันสัมผัสของแต่ละโมเดล โดยโมเดลที่มีการกระจายตัวของน้ำหนักที่ในคบริเวณพื้นที่ด้านล่างในรูป ได้เส้นบอกแนวจุดหมุนสูงกว่าด้านบน ส่งผลให้เกิดโมเมนต์ด้านรอบแกนหมุนสูง ทำให้ค่าความต้านทานการหมุนสูง

และสามารถดูผลของพลังงานความเครียดในเนื้อเยื่อแต่ละโมเดลใน ตารางที่ 5.10 ซึ่งค่าพลังงานความเครียดสอดคล้องไปในทิศทางเดียวกันกับค่าความต้านทานการหมุน โดยพลังงานความเครียดมากเมื่อเกิดความต้านทานการหมุนมาก แต่การปรับเปลี่ยนโครงสร้างในขั้นตอนการพัฒนามีผลทำให้น้ำหนักโดยรวมล้อย่างเปลี่ยน ซึ่งจะมีผลต่อแรงด้านการเคลื่อนที่ในลักษณะการหมุนหรือ โมเมนต์ความเฉื่อย โดยโมเมนต์ความเฉื่อยเพิ่มขึ้นเมื่อน้ำหนักเพิ่มขึ้น ซึ่งเหตุนี้จะทำให้สิ้นเปลืองพลังงานสำหรับการใช้งานในเชิงอุตสาหกรรมมากขึ้น จะต้องทำการวิเคราะห์เชิงพลวัตและหาค่าสภาวะที่ดีที่สุดต่อไป (ในงานวิจัยศึกษาเพียงในลักษณะสถิตยศาสตร์)

บทที่ 6

บทสรุปและวิจารณ์ผล

สำหรับงานวิจัยการลดความต้านทานการหมุนกลิ้งของล้อยางตันด้วยการปรับสัดส่วนหน้าตัดยางชั้นนอกและชั้นในได้แบ่งการวิจัยเป็น 4 กิจกรรมหลัก ได้แก่ การทดสอบหาค่าความต้านทานการหมุนกลิ้งของล้อยางตันที่มีขายอยู่ในท้องตลาดโดยเลือกมา 3 ยี่ห้อ การทดสอบหาสมบัติทางกลของยาง การวิเคราะห์และยืนยันความถูกต้องของแบบจำลองไฟไนต์อีเลเมนต์ การศึกษาตัวแปรต่างๆของล้อยางตันและพัฒนาเพื่อลดค่าความต้านทานการหมุนกลิ้ง สามารถวิจารณ์และสรุปได้เป็นข้อๆดังนี้

6.1 ค่าความต้านทานการหมุนกลิ้งของล้อยางตันในท้องตลาด

การทดสอบหาค่าความต้านทานการหมุนกลิ้งของล้อยางตันสามารถนำมามาตรฐานการวัดค่าความต้านทานการหมุนกลิ้งของล้อยางลม SAE J1269 มาปรับใช้ได้ ซึ่งมี 3 วิธี คือ วิธีวัดแรง วิธีวัดแรงบิด และวิธีวัดกำลังไฟฟ้า โดยในงานวิจัยได้เลือกใช้วิธีวัดกำลังไฟฟ้า และให้ผลออกมาที่น่าเชื่อถือพอสมควร คือ ค่าความต้านทานการหมุนที่วัดมีค่าประมาณ 2 ถึง 4 เปอร์เซ็นต์ของภาระน้ำหนัก โดยล้อยางตันที่มีค่าความต้านทานการหมุนจากน้อยไปมาก คือ $A < C < B$ ตามลำดับ สำหรับปัจจัยภายนอกที่ต้องระมัดระวังในการทดสอบ คือ อุณหภูมิในขณะที่ทดสอบ และอุณหภูมิที่เกิดขึ้นภายในล้อยางหลังจากการทดสอบ เพราะในการทดสอบอุณหภูมิของล้อยางจะเพิ่มขึ้น ดังนั้นในการทดสอบซ้ำจึงต้องรอเพื่อให้อุณหภูมิล้อยางเข้าสู่สภาวะปกติหรืออุณหภูมิห้องเสียก่อน และในขณะที่ทำการวัดพฤติกรรมของเครื่องทดสอบจะเปลี่ยนแปลงเช่นกัน คือ กำลังไฟฟ้าที่เครื่องทดสอบต้องการในการขับเคลื่อนจะลดลงเนื่องจากความหนืดในระบบลดลง เช่น จารบีและน้ำมันหล่อลื่น ในการทดสอบจึงควรกระทำให้รวดเร็วเพื่อลดความผิดพลาดจากส่วนนี้ สำหรับภาระน้ำหนักในการกำหนดให้เป็นตัวแปรขาเข้าโดยดูค่าจากเกจความดันน้ำมันที่กระทำกับพื้นที่หน้าตัดของลูกสูบภายในกระบอกไฮดรอลิกยังไม่มีค่าน่าเชื่อถือ เนื่องจากหลังจากได้ทำการตรวจสอบโดยโพลด์เซลล์ที่ผ่านการสอบเทียบแล้ว พบว่ามีความผิดพลาดถึง 48 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งน้ำหนักที่เกิดขึ้นจริงที่ผิวสัมผัสระหว่างล้อยางกับพื้นผิวจำลองจะมีค่าน้อยกว่า ค่าที่ได้จากการตรวจสอบด้วยโพลด์เซลล์ และผิดพลาดถึง 97 เปอร์เซ็นต์เมื่อเทียบกับคำตอบจากการวิเคราะห์ด้วยไฟไนต์อีเลเมนต์ และความละเอียดของเกจมีน้อยเกินไป คือ เกจวัดความดันสามารถวัดการเปลี่ยนแปลงได้ทุกๆความดัน 1 บาร์ ค่าสัญญาณความดันไฟฟ้าที่ออกมาจากเซนเซอร์เป็นแบบขั้นบันไดไม่ได้มีความชันขึ้นเรื่อยๆเมื่อเพิ่มความดันจาก 2 บาร์ (2 บาร์คือค่าความดันแรกที่

เซนเซอร์วัดได้) ไป 3 บาร์ และจากขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของลูกสูบภายในกระบอกไฮดรอลิกเท่ากับ 12.5 เซนติเมตร ซึ่งก็คือ ค่าความดันจะเปลี่ยนแปลงทุกๆ 1,243 นิวตัน ซึ่งเป็นค่าที่หยาบเกินไป ในงานวิจัยจึงใช้ระยะยวบซึ่งเป็นค่าที่เชื่อถือได้มากกว่าเป็นตัวแปรขาเข้าในแบบจำลองไฟไนต์อิเลเมนต์

6.2 สมบัติทางกลของยาง

การทดสอบทางกลของยาง ในกิจกรรมนี้จะต้องทำการทดสอบหาค่าความต้านทานการหมุนกลิ้งในกิจกรรมที่ 1 ให้สำเร็จก่อน เนื่องจากล้อยางจะเกิดการเสียหาย จากการถูกตัดด้วยแท่นอัดไฮดรอลิกติดปลายติดใบมีด จากนั้นนำหน้าตัดล้อยางมาเจาะด้วยหัวเจาะได้ซึ่งงานทดสอบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางตามมาตรฐาน และปรับความสูงของชิ้นงานด้วยหินเจียรแท่น จากนั้นทำการทดสอบหาค่าความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดโดยใช้มาตรฐานการทดสอบการกด ASTM D575-91 ทดสอบที่ 40% Strain เนื่องจากลักษณะการเปลี่ยนรูปของล้อยางต้นในงานวิจัยเป็นการเปลี่ยนรูปในลักษณะการกด ผลการทดสอบมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานมากสำหรับล้อยางต้นชิ้นนี้เนื่องจากมีผ้าใบเป็นส่วนประกอบ และสำหรับปัญหาและอุปสรรคในการทดสอบการกด คือ ระยะเวลาที่เครื่องทดสอบการกดแสดงผลจะไม่ตรงกับระยะเวลาที่เห็นได้ด้วยตา โดยเหตุการณ์นี้จะเกิดขึ้นเมื่อ ระยะเวลาของเครื่องทดสอบอยู่ใกล้ส่วนปลายของอุปกรณ์ตรวจระยะภายในเครื่องทดสอบ ในการใช้เครื่องทดสอบจึงควรหลีกเลี่ยงระยะนี้ ภายหลังการทดสอบจึงนำค่าความสัมพันธ์มาประมวลผลด้วยโปรแกรม MSC.MENTAT ได้ค่าสัมประสิทธิ์พลังงานความเครียด มีความผิดพลาดประมาณ 1 เปอร์เซ็นต์ และเมื่อทดลองจำลองเพื่อยืนยันความถูกต้องของค่าสัมประสิทธิ์ ได้ผลความเค้นและความเครียดในรูปแบบเดียวกันกับกราฟที่แสดงใน โปรแกรมขั้นตอนการหาค่าสัมประสิทธิ์เช่นเดียวกัน

6.3 การวิเคราะห์ยืนยันความถูกต้องของแบบจำลองไฟไนต์อิเลเมนต์

การวิเคราะห์ยืนยันความถูกต้องของผลค่าความต้านทานการหมุนกลิ้งจากแบบจำลองเทียบกับผลการทดสอบในกิจกรรมที่ 1 มีค่าความผิดพลาด โดยค่าที่ได้จากการจำลองน้อยกว่าค่าที่ได้จากการทดสอบโดยเฉลี่ยประมาณ 10 เปอร์เซ็นต์ โดยเหตุการณ์ในการจำลอง คือ กดล้อยางต้นเข้าหาลูกกลิ้งพื้นทดสอบ โดยขนาดของลูกกลิ้งพื้นทดสอบจะต้องเหมือนกันกับลูกกลิ้งพื้นทดสอบในขั้นตอนการทดสอบเพราะจะส่งผลต่อการเปลี่ยนรูปของล้อยางบริเวณคอกยางใกล้เคียงกันเพราะบริเวณคอกยางเป็นพื้นที่ที่ส่งผลต่อค่าความต้านทานการหมุนกลิ้งมากที่สุด จากนั้นเริ่มหมุนลูกกลิ้งพื้นทดสอบจนได้ระยะทางการเคลื่อนที่ประมาณ 250 มิลลิเมตร และจำนวน

อิเลเมนต์ของล้อยางตัน ที่ทำให้ค่าตอบลู่เข้าสู่ค่าตอบจริงโดยเกิดการเปลี่ยนแปลงของค่าความต้านทานการหมุนกลิ้งไม่เกิน 1 % เมื่อทำการเพิ่มจำนวนอิเลเมนต์ประมาณ 0.5 เท่า คือ จำนวนประมาณ 120,000 อิเลเมนต์

6.4 การศึกษาและพัฒนาตัวแปรต่างที่ส่งผลต่อค่าความต้านทานการหมุนกลิ้ง

ในกิจกรรมนี้ได้ทำการศึกษาค่าความต้านทานการหมุนกลิ้งเทียบกับทฤษฎีในบทที่ 2 ซึ่งได้แสดงให้เห็นว่าทฤษฎีกับผลการจำลองจากวิธีไฟไนต์อิเลเมนต์ให้ผลที่สอดคล้องกัน และพัฒนาโดยเริ่มพัฒนาจากล้อยางตันที่มีค่าความต้านทานการหมุนกลิ้งต่ำที่สุด คือ ล้อยาง A จากนั้นทำการปรับเปลี่ยน ดอกยาง (เป็นแบบเดียวกับล้อยาง C) แก้มยาง รูปร่างหน้าตัดยางชั้นใน และขนาดหน้าตัดยางชั้นใน ตามลำดับ โดยสามารถลดค่าความต้านทานการหมุนกลิ้ง ได้เป็นจำนวนมากตั้งแต่ขั้นตอนแรก สามารถลดได้ถึง 18.17 เปอร์เซ็นต์ ลดได้เป็น 20.19 เปอร์เซ็นต์หลังจากเพิ่มขนาดแก้มยาง ลดได้เป็น 25.54 เปอร์เซ็นต์ หลังจากเปลี่ยนรูปร่างหน้าตัด โดยพื้นที่หน้าตัดใกล้เคียงกับขนาดเดิม และลดได้เป็น 36.45 เปอร์เซ็นต์หลังจากเพิ่มขนาดหน้าตัดยางชั้นใน จึงสามารถสรุปได้เป็นที่แน่ชัดว่า การเพิ่มความแข็งให้ล้อยางส่งผลต่อการกระจายภาระน้ำหนักทำให้สามารถลดค่าความต้านทานการหมุนกลิ้งได้ โดยดอกยางเป็นส่วนที่มีอิทธิพลต่อค่าความต้านทานการหมุนกลิ้งมากที่สุด แต่การปรับสัดส่วนเพื่อให้ยางแข็งขึ้นในลักษณะนี้จะส่งผลเสียต่อความนุ่มนวลในการขับขี่ในการใช้งานจริงเช่นกัน

เอกสารอ้างอิง

Analysis of variance (Online). Available:

<http://www.statistics.ob.tc/anova> (6 July 2554)

D.J. Schuring, "Rolling Resistance loss of Pneumatic Tires", *Rubber Chem. Technol.* 153,(3) 600 (August 1980)

Ergin Tönük, Y. Samim Ünlüsoy, "Prediction of automobile tire cornering force characteristics by finite element modeling and analysis", Department of Mechanical Engineering, Middle East Technical University, 06531 Ankara, Turkey, 2001:1219-1232

George Komandi, "An evaluation of the concept of rolling resistance", *Godollo University of Agricultural Sciences, Hungary*, 1999:159-166

J.F. Archard "Elastic deformation and the laws of friction", *Proceeding of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical*, Vol.243, No. 1233, 1957:190-205.

J.R. Cho, K.W. Kim, H.S. Jeong, "Numerical investigation of tire standing wave using 3-D patterned tire model", *School of Mechanical Engineering, Pusan National University, Kwangju, Korea*, 2007:795-807

L.Y. Chang and J.S. Shackleton "An Overview of Rolling Resistance", *Tire Rolling Resistance at the 122nd Meeting of the Rubber Division*, 1982: 24-50.

MSC Software Corporation, 2005. *คู่มือ Experimental Elastomer Analysis*

N. Yoshimura, M. Okuyama, and K. Yamagishi, "The Present Status of Research on Rolling Resistance in Japan", *Tire Rolling Resistance at the 122nd Meeting of the Rubber Division*, 1982: 51-68.

Rolling Resistance (Online). Available:

http://en.wikipedia.org/wiki/Rolling_resistance (21 February 2010)

SAE J1269. Rolling resistance Measurement Procedure for Passenger Car, Light Truck, and Highway Truck and Bus Tires. Society of Automotive Engineer, Inc. 400 Commonwealth Drive, Warrendale, PA 15096-0001

- SAE J1270.Measurement of Passenger Car, Light Truck, and Highway Truck and Bus Tires.Society of Automotive Engineer, Inc.400 Commonwealth Drive, Warrendale, PA 15096-0001
- S.K. Clark “Brief History of Tire Rolling Resistance ”,Tire Rolling Resistance at the 122nd Meeting of the Rubber Division, 1982: 1-23.
- TMC Corporation. 2000. Operation & Maintenance Manual Forklift Truck. Tokyo: Nishishimbashi, Minato-ku.
- W.W.Klingbeil,S.W.Hong,R.N.Kienle,and H.W.H.Witt “Theoretical and Experimental Analysis of Dual-Compound Tread Designs for Reduced Rolling Resistance”,Tire Rolling Resistance at the 122nd Meeting of the Rubber Division, 1982: 299-362.
- ศูนย์สารสนเทศการเกษตร,“ข้อมูลพื้นฐานเศรษฐกิจการเกษตร”, ISBN 978-974-403-523-3, สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร ถนนพหลโยธิน แขวงลาดยาว เขตจตุจักร กรุงเทพฯ, 33-34.
- เบญจพร,2551.วัสดุผสมสามองค์ประกอบทำจากยางธรรมชาติและตัวเติมนาโนเป็นตัวตรวจรู้ทางอิเล็กทรอนิกส์.วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ พงษ์ธร แซ่อูย,“สารเคมียาง”,ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ,2548
- เจริญยุทธ และคณะ, สัญญาเลขที่ RDG 4750037, รายงานฉบับสมบูรณ์ โครงการ “ผลของความสัมพันธ์ของรูปทรงต่อการสั่นสะเทือนของล้อรถแบบยางตัน”, สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย ฝ่ายอุตสาหกรรม, พฤษภาคม 2550
- เจริญยุทธ และคณะ, สัญญาเลขที่ RDG 5050026, รายงานฉบับสมบูรณ์ โครงการ “พัฒนามาตรฐานการทดสอบและข้อกำหนดความทนทานของล้อยางตัน”, สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย ฝ่ายอุตสาหกรรม, เมษายน 2552
- จารุธรรม,2550.การวิเคราะห์สมบัติวิสโคไฮเปอร์อีลาสติกของยางคงรูปที่อุณหภูมิแตกต่างกัน, วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
- วิภู,2549.การใช้วิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ศึกษาผลกระทบของชั้นกาวบางต่อการกระจายความเค้นในเนื้อยางของชิ้นงานแบบต่อชน.วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
- วิภู พิวัฒน์ เจริญยุทธ เดชวายุกุล วิริยะ ทองเรือง และชลดา เลวิส., “การทดสอบสมบัติของวัสดุไฮเปอร์อีลาสติกเพื่อใช้ในต้นแบบไฟไนต์เอลิเมนต์”,การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 18, 18-20 ตุลาคม 2547 จังหวัดขอนแก่น

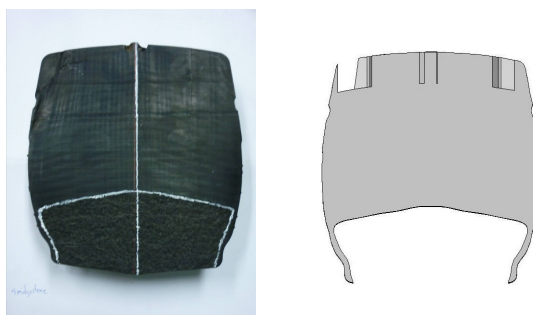
วีระชัย,2552.การสิ้นสະเทือนของล้อย่างตันสองชั้น.วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

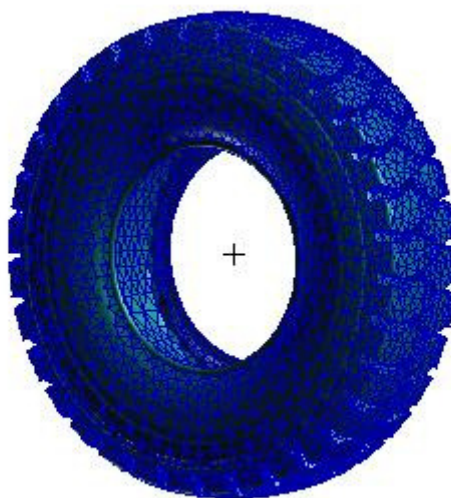
ขั้นตอนการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

1. เขียนแบบล้อยางชั้นในและชั้นนอกโดยใช้โปรแกรม Solid Work บันทึกไฟล์แบบ Parasolid (*.x_t) และเขียนกะทะล้อ บันทึกไฟล์แบบ IGES (*.igs)



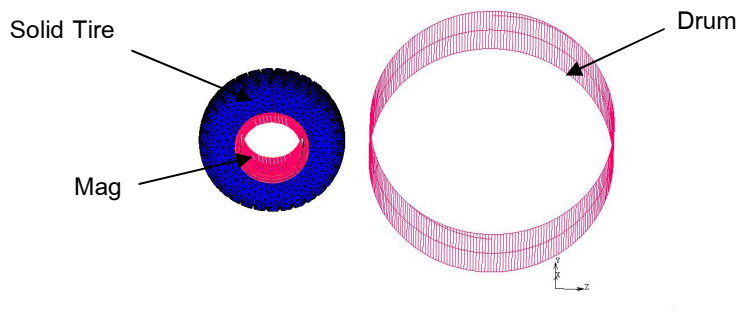
รูปที่ 1 ตัวอย่างแบบล้อยางต้นชั้นนอก

2. นำเข้าไฟล์ในขั้นตอนที่ 1 ในโปรแกรม MSC.Patran (ข้อควรระวัง: ต้องกำหนดหน่วยให้เป็นขนาดเดียวกันกับไฟล์จาก Solid work) จากนั้นสร้าง mesh แบบ Tetra4 ของยางชั้นในและยางชั้นนอกโดยให้พื้นผิวที่สัมผัสกันของทั้งสอง มี node ร่วมกันโดยใช้คำสั่ง Assembly parameters และบันทึกไฟล์ แบบ Neutral (*.out)



รูปที่ 2 ผลการสร้าง mesh โดยโปรแกรม MSC.Patran

3. เปิดโปรแกรม Marc mentat เขียนครัมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.89 เมตร นำเข้ากะทะล้อที่ได้ ในขั้นตอนที่ 1 และนำเข้าไฟล์ mesh ของล้อยางที่ได้ในขั้นตอนที่ 2 พร้อมกำหนดคุณสมบัติวัสดุ ยางชั้นในและยางชั้นนอก และกำหนดชนิดของอิเลเมนต์เป็นแบบสามมิติ รูปปิรามิด 4 โนด (Type 157, Three-dimensional, Low-order, Tetrahedron, Herrmann Formulations)

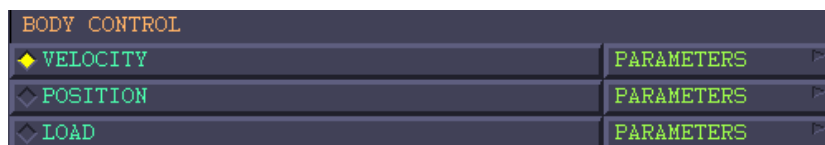


รูปที่ 3 ตัวอย่างของผลการนำเข้าไฟล์โมเดลต่างๆเพื่อวิเคราะห์

4. กำหนดค่าคุณสมบัติวัสดุ

5. กำหนดข้อมูลในส่วนเมนู Contact โดยให้ตัวอย่างเป็นวัสดุยูปตัวได้ ส่วนครัมและกะทะล้อเป็นวัสดุแข็งเกร็ง ทำการควบคุมความเร็วรอบของครัม (เปรียบเสมือนครัมหมุนในการทดสอบ) และระบุจุดศูนย์กลางการหมุน ควบคุมโหนดของกะทะล้อ (เปรียบเสมือนใส่ภาชนะน้ำหนักในการทดสอบ) กำหนดให้ตัวอย่างมีการสัมผัสกับครัม สัมผัสกับตัวเองแบบ touching และสัมผัสกับกะทะล้อแบบ glue

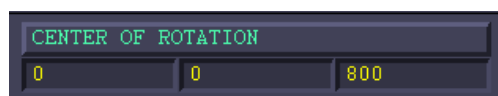
สำหรับรายละเอียดสำหรับกำหนดการควบคุมครัมแสดงดัง รูปที่ 4 - รูปที่ 6 โดยกำหนดให้ครัมหมุนรอบจุดศูนย์กลางที่กำหนดรอบแกน x ด้วยความเร็วที่ต้องการ เสมือนครัมกำลังหมุนในขณะทดสอบ



รูปที่ 4 ควบคุมความเร็วรอบครัม

VELOCITY (CENTER OF ROTATION)		
X	0	TABLE
Y	0	TABLE
Z	0	TABLE
ROTATIONAL (RAD/TIME)	3.14159	TABLE table1

รูปที่ 5 ครัมหมุนครั้งรอบต่อวินาที หรือ 5 กิโลเมตรต่อชั่วโมง

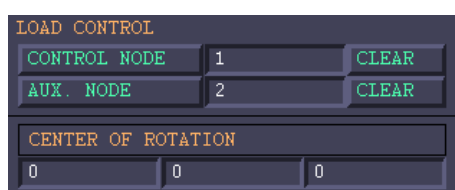


รูปที่ 6 กำหนดจุดศูนย์กลางการหมุนของครัม

สำหรับรายละเอียดสำหรับกำหนดการควบคุมกะทะล้อแสดงดัง รูปที่ 7 - รูปที่ 8 โดยควบคุมโหลดที่กระทำเสมือนภาระน้ำหนักที่กระทำกับล้ออย่างตัน สำหรับการควบคุมวิธีนี้ จำเป็นจะต้องสร้าง node เพื่อมาควบคุมวัตถุแข็งเกร็งอีกชั้นหนึ่ง โดยแสดง node ที่ควบคุมกะทะล้อ ใน รูปที่ 10 แล้วจึงค่อยกำหนดเงื่อนไขขอบเขตที่ node



รูปที่ 7 ควบคุมโหลดที่กระทำกับกะทะล้อ



รูปที่ 8 กำหนด node สำหรับควบคุมกะทะล้อ

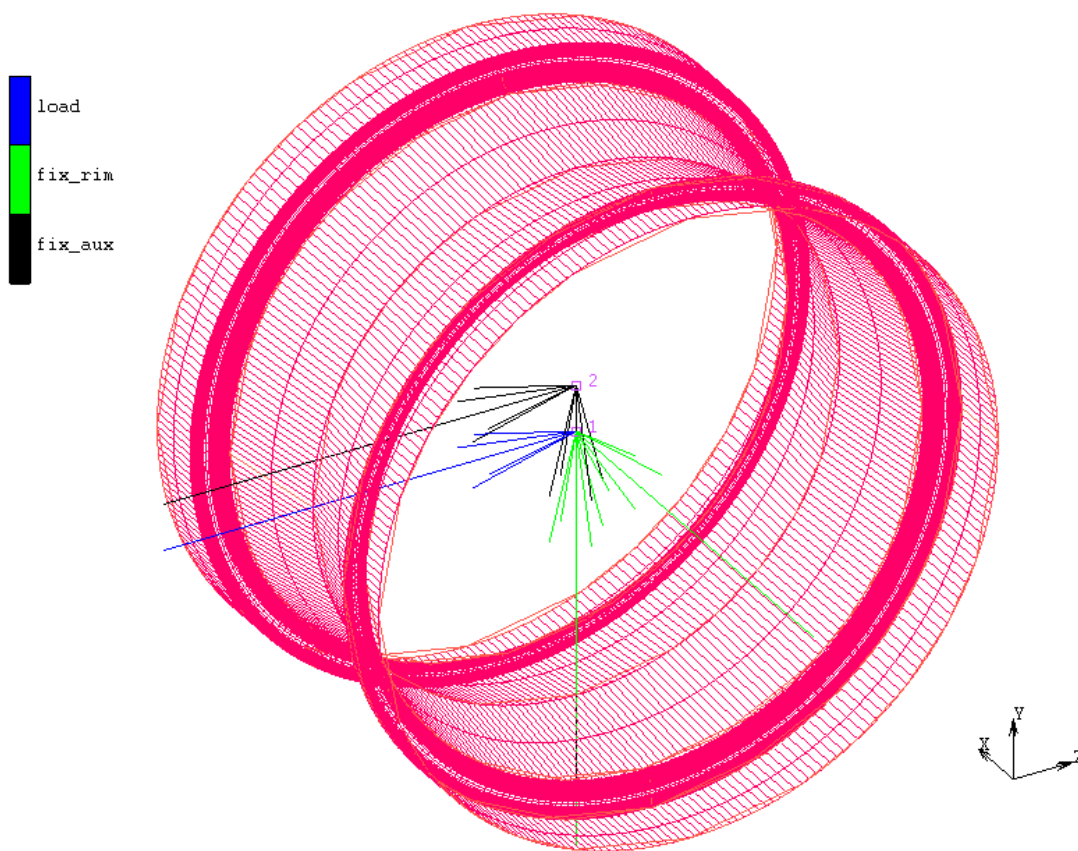
ในการจำลองจะเกิดการสัมผัสเพียง 3 บริเวณ คือ บริเวณที่สัมผัสกับกะทะล้อ บริเวณที่สัมผัสกับตัวเอง (คอกยาง) และบริเวณที่สัมผัสกับครัม ดังแสดงใน รูปที่ 9

CONTACT TABLE PROPERTIES				SECOND		
		BODY NAME	BODY TYPE	1	2	3
FIRST	1	rubber	deformable	T	T	G
	2	drum	rigid			
	3	rim	rigid			

รูปที่ 9 เงื่อนไขการสัมผัส

6. กำหนดเงื่อนไขขอบเขต ซึ่งมี 3 เงื่อนไข ดังแสดงใน รูปที่ 10 โดยแต่ละเงื่อนไข ขอบเขตมีรายละเอียดดังนี้

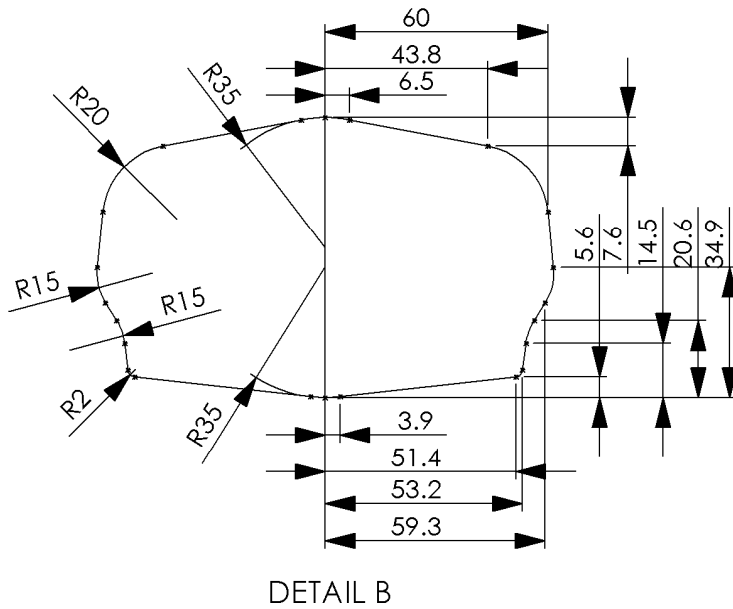
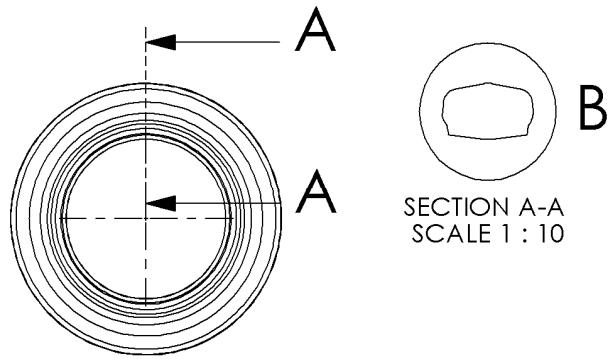
- load คือ การกำหนดภาระน้ำหนักที่กดล้อยาง (แรงในแนวแกน z) เข้าหาครัม
- fix_rim คือ การบังคับไม่ให้กะทะล้อเคลื่อนที่ในแนวแกน x และ y
- fix_aux คือ การบังคับไม่ให้กะทะล้อหมุนรอบแกน y และ z



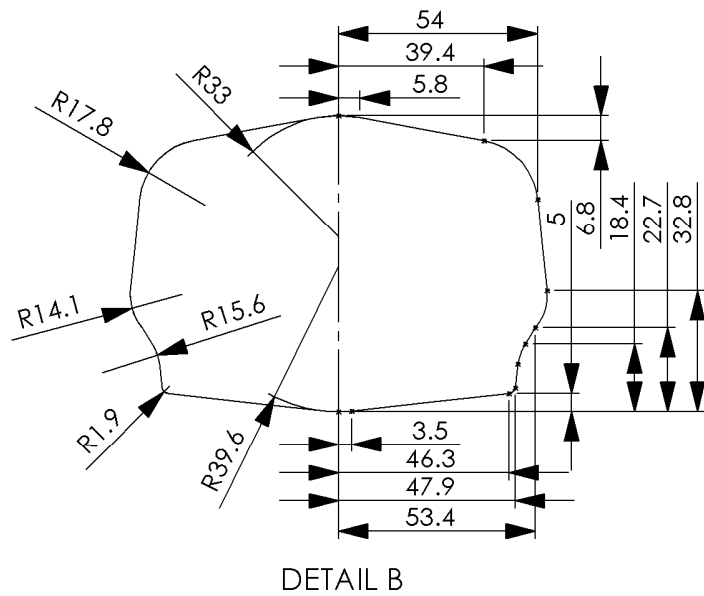
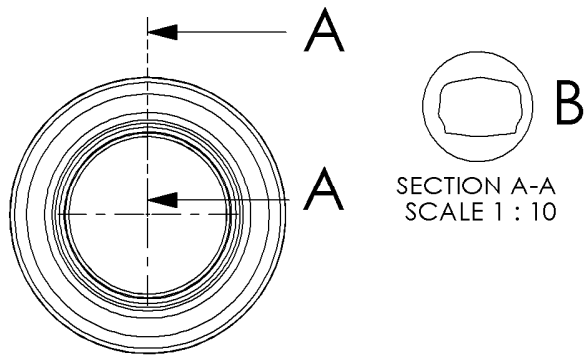
รูปที่ 10 แสดงเงื่อนไขขอบเขตบริเวณกะทะลื้อ


7. วิเคราะห์ผล โดยค่าความต้านทานการหมุนกลิ้งสามารถคำนวณได้โดยด้วยสมการ 3.3 จากการดูค่าโมเมนต์รอบแกน x ของดรัม

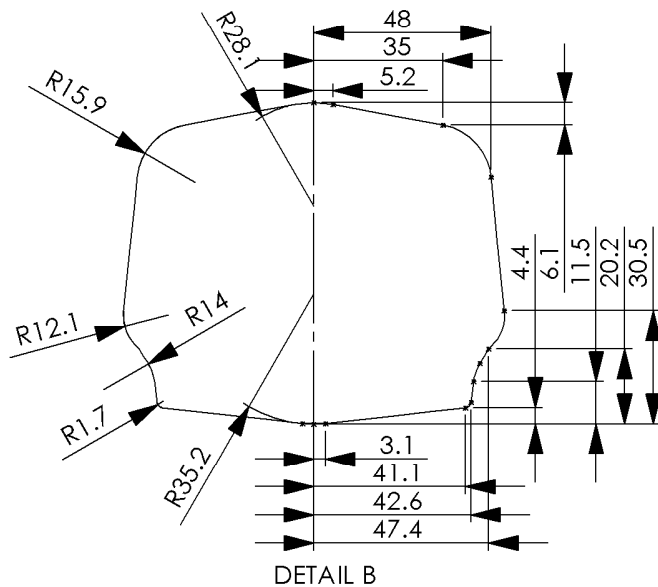
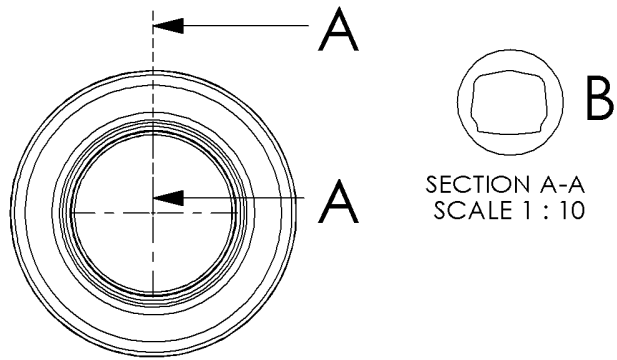
ภาคผนวก ข
แบบโมเดลตัวอย่าง




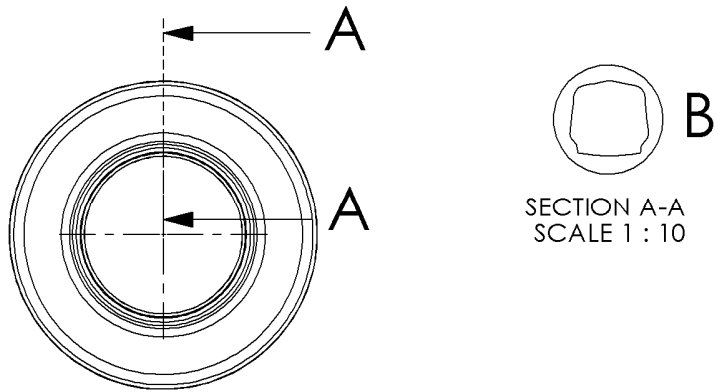
	NAME	 มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล
DRAWN	Mr.petai R.	
CHECKED	Mr.petai R.	TITLE:
ENG APPR.	Mr.petai R.	ยางใน
APPROVED		A_1_1,A_1_2,A_2_1,A_2_2,A_2_3,A_3_1
COMMENTS:		SIZE
		A4
		SCALE 1:2
		WEIGHT :



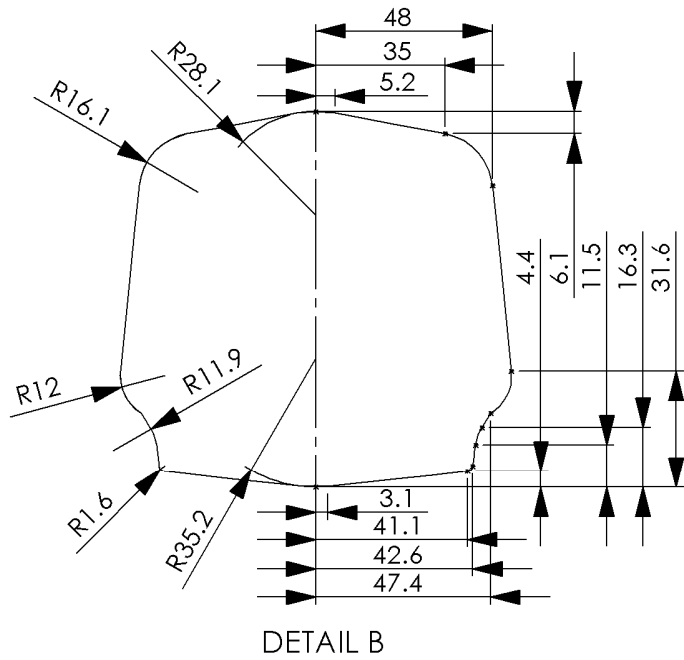
	NAME	 มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล	
DRAWN	Mr.petai R.		
CHECKED	Mr.petai R.		
ENG APPR.	Mr.petai R.	TITLE:	
APPROVED		ยางใน A_3_2	
COMMENTS:		SIZE	
		A4	
		SCALE 1:2	WEIGHT :



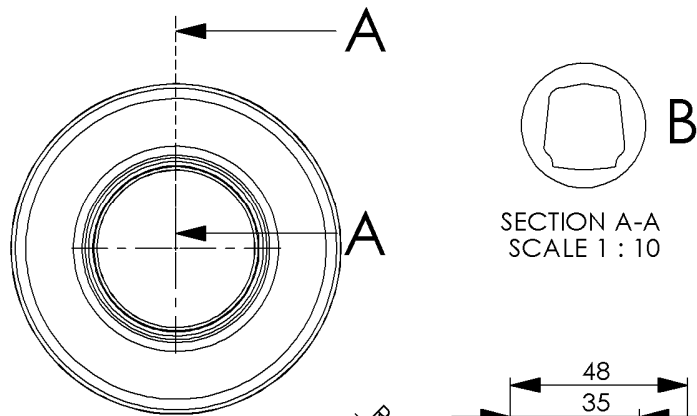
	NAME	 มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล	
DRAWN	Mr.petai R.		
CHECKED	Mr.petai R.	TITLE: ยางใน A_3_3,A_4_1	
ENG APPR.	Mr.petai R.		
APPROVED			
COMMENTS:		SIZE	
		A4	
		SCALE 1:2	WEIGHT :



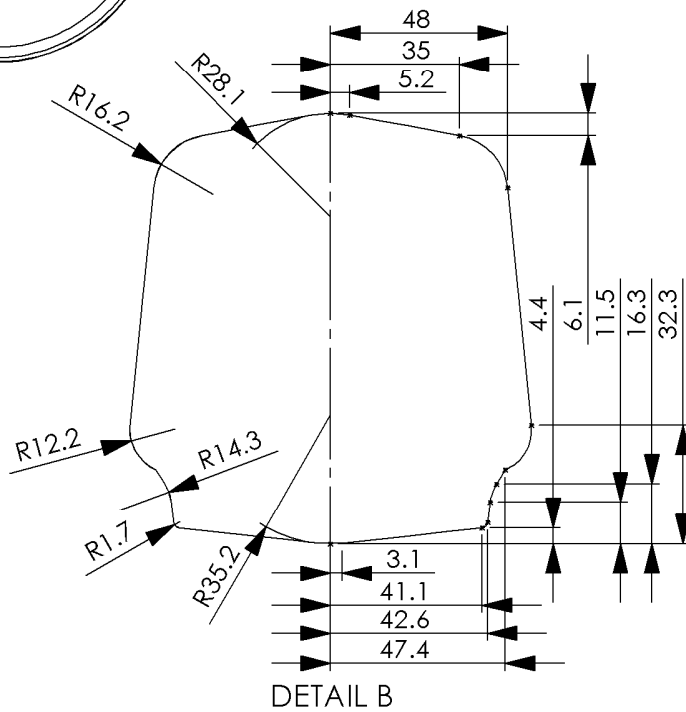
SECTION A-A
SCALE 1 : 10




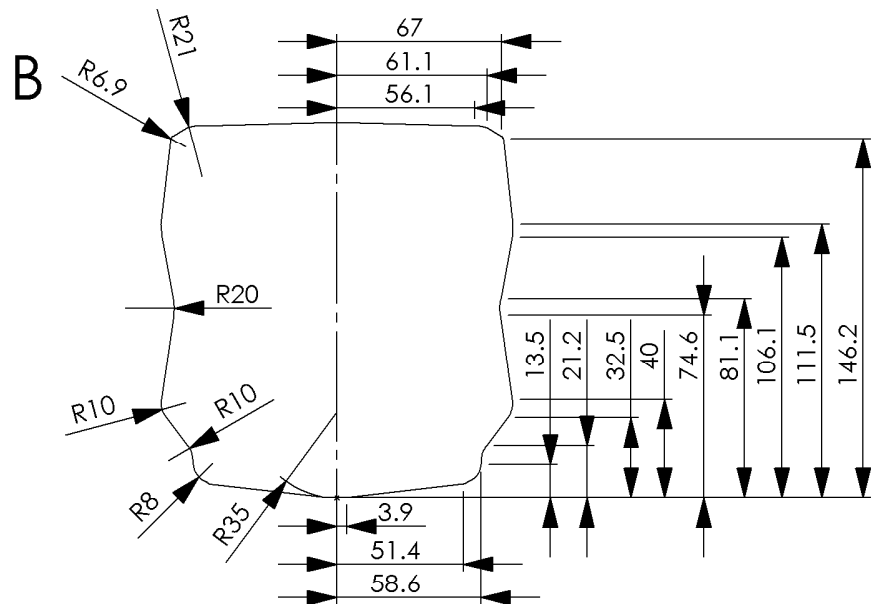
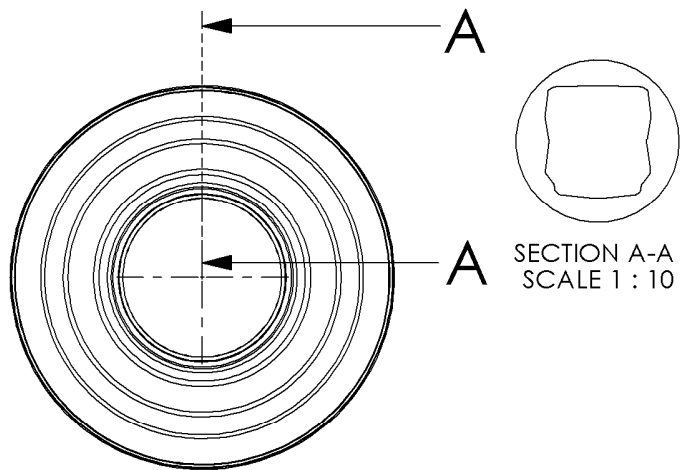
	NAME	 มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล	
DRAWN	Mr.petai R.		
CHECKED	Mr.petai R.		
ENG APPR.	Mr.petai R.	TITLE:	
APPROVED		ยางไน A_4_2	
COMMENTS:		SIZE	
		A4	
		SCALE 1:2	WEIGHT :



SECTION A-A
SCALE 1 : 10

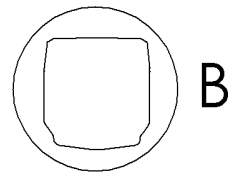
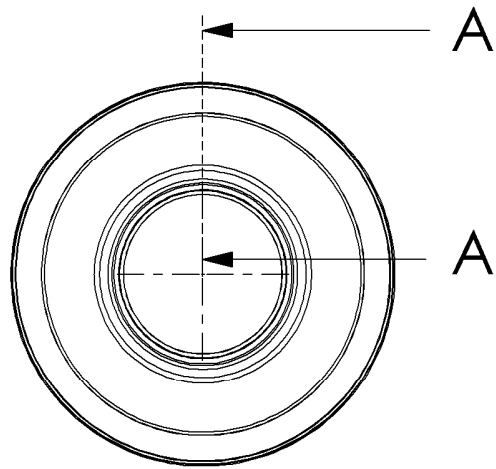


	NAME	 มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล	
DRAWN	Mr.petai R.		
CHECKED	Mr.petai R.		
ENG APPR.	Mr.petai R.	TITLE:	
APPROVED		ยางใน A_4_3	
COMMENTS:		SIZE	
		A4	
		SCALE 1:2	WEIGHT :

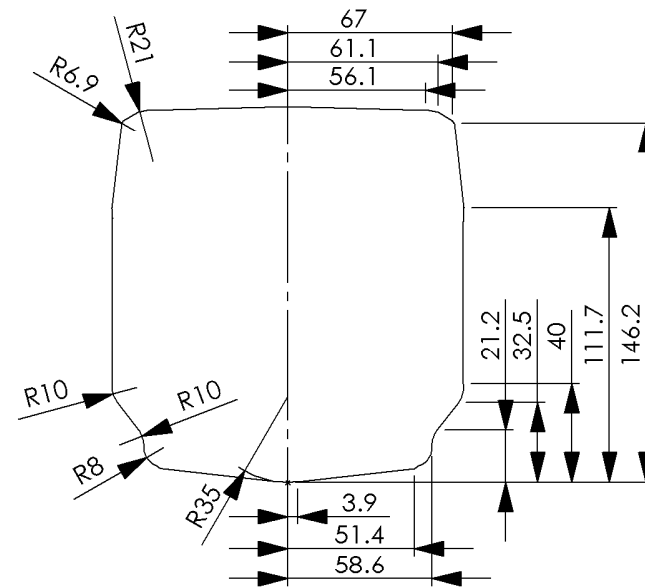


DETAIL B
SCALE 1 : 3

	NAME	 มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล
DRAWN	Mr.petai R.	
CHECKED	Mr.petai R.	TITLE: ยางนอก(รวมไน) A_1_1,A_1_2,A_2_1
ENG APPR.	Mr.petai R.	
APPROVED		
COMMENTS:		
	SIZE	
	A4	
	SCALE 1:2	WEIGHT :

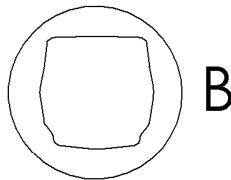
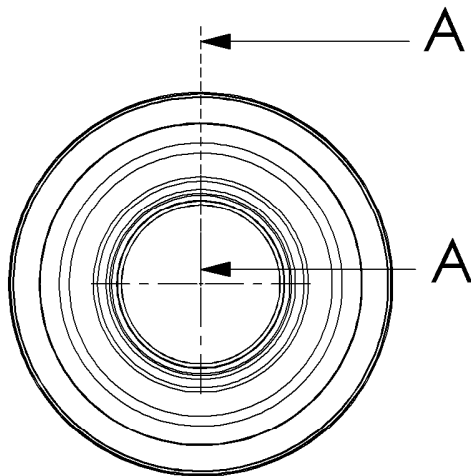


SECTION A-A
SCALE 1 : 10

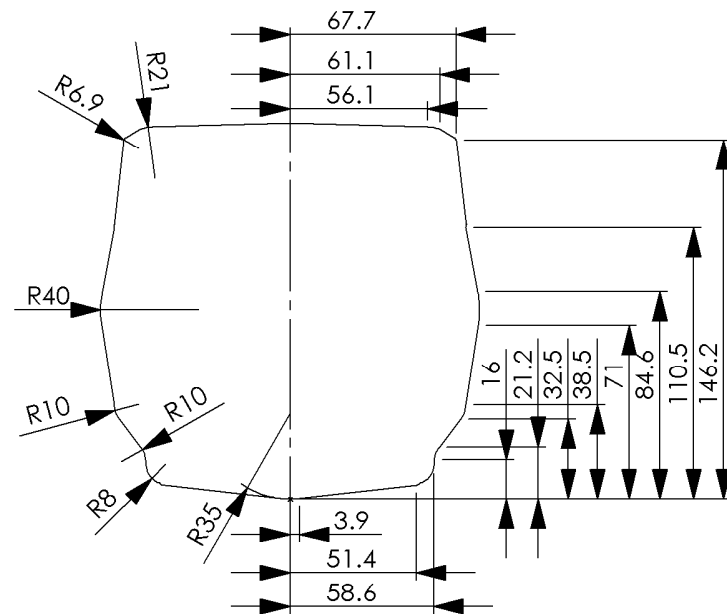


DETAIL B
SCALE 1 : 3

	NAME	 มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล
DRAWN	Mr.petai R.	
CHECKED	Mr.petai R.	TITLE: ยางนอก(รวมใน) A_2_2
ENG APPR.	Mr.petai R.	
APPROVED		
COMMENTS:		SIZE A4
		SCALE 1:2 WEIGHT :



SECTION A-A
SCALE 1 : 10



DETAIL B
SCALE 1 : 3

	NAME	 มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล
DRAWN	Mr.petal R.	
CHECKED	Mr.petal R.	TITLE: ยางนอก(รวมไน) A_2_3,A_3_1,A_3_2,A_3_3,A_4_1,A_4_2,A_4_3
ENG APPR.	Mr.petal R.	
APPROVED		
COMMENTS:	SIZE	
	A4	
	SCALE 1:2	WEIGHT :

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ สกุล นายแพทย์ รัตนดิลก ณ ภูเก็ต
รหัสประจำตัวนักศึกษา 5210120028
วุฒิการศึกษา
วุฒิ ชื่อสถาบัน ปีที่สำเร็จการศึกษา
วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต มหาวิทยาลัยมหิดล 2551
(วิศวกรรมเครื่องกล)

ทุนการศึกษา (ที่ได้รับระหว่างการศึกษา)

ทุนอุดหนุนการวิจัย บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ปีงบประมาณ 2553

การตีพิมพ์เผยแพร่ผลงาน

แพทย์ รัตนดิลก ณ ภูเก็ต, เจริญยุทธ เดชวายุกุล, วิริยะ ทองเรือง, 2553. “วิธีการวัดค่าต้านทานการหมุนสำหรับล้อยางตัน”. การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ครั้งที่ 8, หน้า 761-764, สงขลา , ประเทศไทย, 22-23 เมษายน 2553