



การสั่นสะเทือนของล้อยางตันสองชั้น

Vibration of Integral Solid Tires

วีระชัย เก้าเอียน

Weerachai Kao-ien

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

2552

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

(1)

ชื่อวิทยานิพนธ์ การสิ้นสะท้อนของล้อย่างตันสองชั้น
ผู้เขียน นายวีระชัย เก้าเอียน
สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

คณะกรรมการสอบ

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

.....ประธานกรรมการ
(ดร.กิตตินันท์ มลิวรรณ)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

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

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

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

.....
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พฤทธิกร สมิตไมตรี)

.....กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พฤทธิกร สมิตไมตรี)

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

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง
ของการศึกษา ตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

.....
(รองศาสตราจารย์ ดร.เกริกชัย ทองหนู)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

ชื่อวิทยานิพนธ์	การสันสะเทือนของล้อยางคันสองชั้น
ผู้เขียน	นายวีระชัย เก้าเอียน
สาขาวิชา	วิศวกรรมเครื่องกล
ปีการศึกษา	2551

บทคัดย่อ

การใช้งานล้อยางคันสองชั้นสำหรับรถฟอร์คลิฟท์ยังมีปัญหาของการสันสะเทือนขณะใช้งาน สาเหตุอาจเกิดจากความไม่คงรูปของหน้าตัดของล้อยางรอบแกนหมุนซึ่งส่งผลต่อความแข็งแรงของล้อยางที่ไม่สม่ำเสมอรอบแกนหมุนเป็นปัจจัยทำให้เกิดการสันสะเทือน ซึ่งผู้ประกอบการและคณะวิจัยได้ร่วมคิดค้นกระบวนการผลิตล้อยางคันที่สามารถควบคุมความคงรูปของหน้าตัดล้อยางคันได้แก่การใช้เครื่องมือวงยางใหม่ให้พ้นยางแน่นขึ้น กระบวนการพรีฟอร์มยางชั้นใน และกระบวนการพรีเคียวยางชั้นใน โดยในงานวิจัยนี้ศึกษาการสันสะเทือนของล้อยางคันสองชั้นขณะถูกกดและกลิ้งบนเครื่องทดสอบล้อยางคันซึ่งเปรียบเสมือนการใช้งานขณะรับน้ำหนักบรรทุกทุกจริง โดยซึ่งจะศึกษาถึงพฤติกรรมและปัจจัยที่ทำให้เกิดการสันสะเทือนเมื่อปรับกระบวนการผลิต ได้แก่ การตรวจสอบความสม่ำเสมอของความแข็งแรงรอบแกนหมุน โดยให้ล้อยางรับแรงกดขณะอยู่หนึ่ง วัดสัญญาณการสันสะเทือนของล้อยางคันขณะรับน้ำหนักบรรทุกทุกและกลิ้งด้วยความเร็วต่าง ๆ ตรวจสอบความคงรูปของหน้าตัดของล้อยาง และความสม่ำเสมอของความหนาแน่นรอบแกนหมุนเพื่อเปรียบเทียบกับความแข็งแรงของล้อยางและพฤติกรรมการสันสะเทือนขณะใช้งานและยืนยันผลจากการปรับกระบวนการผลิต ทั้งนี้ได้นำล้อยางที่มีขายตามท้องตลาดยี่ห้ออื่น ๆ มาเปรียบเทียบกับด้วย จากผลการศึกษาพบว่า การปรับเปลี่ยนกระบวนการผลิตสามารถลดการสันสะเทือนขณะใช้งานเทียบกับกระบวนการผลิตแบบเก่า และดีเทียบเท่ากับและดีกว่าล้อยางมาตรฐานบางยี่ห้อ กระบวนการผลิตที่ดีที่สุดสำหรับการศึกษาในงานวิจัยนี้คือ กระบวนการผลิตโดยใช้เครื่องมือวงยางใหม่เพียงอย่างเดียวสามารถควบคุมความคงรูปของหน้าตัด เพิ่มความหนาแน่นให้แก่ล้อยางคันให้มีความสม่ำเสมอรอบแกนหมุนและเกิดการสันสะเทือนที่ต่ำอยู่ในเกณฑ์ที่ยังไม่เกิดความเสียหายมากเมื่อใช้งานที่ความเร็ว 16 กิโลเมตรต่อชั่วโมง

Thesis Title	Vibration of Integral Solid Tires
Author	Mr.Weerachai Kao-ien
Major Program	Mechanical Engineering
Academic Year	2008

ABSTRACT

Solid tire using with forklift truck has problems about the vibration during running. There are unbalances in solid tire due to the absence of the uniformity of cross section shape about rotating axis. The manufacturer has search for the manufacturing process that can control the uniformity of the shape of the solid tires that are using the new rubber sheet roller, process of perform and process of procure. In this research is to study the vibration behavior of the solid tires by rolling on the drum test machine with compression and vary the speed. The causes of the vibration response are inspected that are the stiffness balance, inner shape uniformity of cross section and the density balance about rotating axis of solid tires compared to other standard solid tires. It is found that the vibration response of the solid tires by the new processes become lower and better than some standard tires. Merely process of using the new rubber sheet roller is the best in this research because it can control the uniformity of the shape, increase the density and reduce the vibration response.

กิตติกรรมประกาศ

ข้าพเจ้าขอขอบคุณ ผศ.ดร.เจริญยุทธ เดชวายุกุล ผศ.ดร.วิริยะ ทองเรือง ผศ.ดร.พฤษกร สมิตไมตรี ซึ่งเป็นคณะกรรมการที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ได้ให้คำปรึกษาและกำลังใจในการทำวิทยานิพนธ์ด้วยดีตลอดมา ผศ.กณดิถ เจษฎ์พัฒนานนท์ซึ่งเป็นผู้ประคองผู้คิดค้นเครื่องมือวัดการสิ้นสะเก็อนโดยใช้หลักการขวางกั้นลำแสงและได้ให้คำแนะนำเกี่ยวกับการใช้งาน ขอขอบคุณ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์และบุคลากร ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลทุกท่านที่ให้ความอนุเคราะห์อนุญาตให้ใช้เครื่องมือและสถานที่ และได้ ให้ความไว้วางใจตลอดการทำวิจัยและวิทยานิพนธ์ ขอขอบคุณรุ่นน้องสโมสรนักศึกษาและรหัส 45 ถึง 51 และรุ่นน้องต่างคณะทุกท่านที่ได้ให้ความช่วยเหลือในด้านต่าง ๆ ด้วยความเต็มใจ

วิระชัย เก้าเอี้ยน

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	(3)
Abstract	(4)
กิตติกรรมประกาศ	(5)
สารบัญ	(6)
รายการตาราง	(9)
รายการภาพประกอบ	(10)
บทที่	
1. บทนำ	1
1.1 บทนำตั้งเรื่อง	1
1.2 การตรวจเอกสาร	6
1.3 วัตถุประสงค์	9
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	9
1.5 ขอบเขตของงานวิจัย	9
2. ทฤษฎี	10
2.1 การคำนวณหาค่าความแข็งดึงของล้อยางตัน	10
2.2 แนวคิดเกี่ยวกับการสันสะท้อนของล้อยางตัน	12
2.3 สัญญาณการสันสะท้อน	13
2.3.1 ความถี่	13
2.3.2 ขนาดของการสันสะท้อน	13
2.3.3 มุมเฟส	14
2.4 หน่วยวัดสัญญาณการสันสะท้อน	15
2.5 การวิเคราะห์แบบสเปกตรัม	16
2.6 การประเมินค่าความรุนแรงของการสันสะท้อนของสัญญาณแบบรวม	17
2.7 อุปกรณ์วัดการสันสะท้อน	19

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3. วิธีการวิจัย	21
3.1 วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย	21
3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์	22
3.3 เครื่องทดสอบการสันสะเทือนและการติดตั้งล้อย่างต้น	23
3.4 อุปกรณ์วัดการสันสะเทือนด้วยวิธีการวางกั้นลำแสง	28
3.5 การติดตั้งอุปกรณ์วัดการสันสะเทือนของล้อย่างต้น	30
3.6 ขั้นตอนและวิธีวิจัย	30
3.6.1 กิจกรรมที่ 1 การทดสอบหาค่าความแข็งตึงของล้อย่างต้น ขณะล้อยู่ไม่หมุน	30
3.6.2 กิจกรรมที่ 2 การทดสอบการสันสะเทือนของล้อย่างขณะถูกกดกลิ้ง	32
3.6.3 กิจกรรมที่ 3 การตรวจสอบการกระจายตัวของรูปทรงของยางชั้นใน	34
3.6.4 กิจกรรมที่ 4 การตรวจสอบความหนาแน่นเฉลี่ยรอบวงล้อ	36
4. ผลการทดลอง	37
4.1 ผลการทดสอบความแข็งตึงรอบแกนหมุนของล้อย่างต้น	37
4.1.1 ผลการทดสอบการยุบตัวของล้อย่างต้นที่สภาวะหยุดนิ่ง	37
4.1.2 ความสัมพันธ์ของค่าความแข็งตึงของล้อย่างต้น	43
4.2 ผลการทดสอบการสันสะเทือน	48
4.3 ผลการตรวจสอบการกระจายตัวของรูปทรงของยางชั้นใน	57
4.3.1 ความสมมาตรของรูปทรงของยางชั้นใน	57
4.3.2 การกระจายตัวของรูปทรงของยางชั้นในบริเวณรับแรงในแนวตั้งฉาก	59
4.4 ผลการตรวจสอบความหนาแน่นเฉลี่ยตลอดเส้นรอบวงของยางชั้นใน	61

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
5. สรุปผลการวิจัย	63
ข้อเสนอแนะ	64
บรรณานุกรม	65
ภาคผนวก	67

รายการตาราง

ตารางที่	หน้า
ตารางที่ 3.1 ลักษณะจำเพาะของตัวอย่างต้นที่ใช้ในการทดสอบ	21
ตารางที่ 3.2 การแบ่งกลุ่มตัวอย่างตามกระบวนการผลิต	22
ตารางที่ 3.3 แสดงค่าความสัมพันธ์ของความดันที่ใช้กับน้ำหนัก ที่ตัวอย่างได้รับขณะทำการกดอัด	27
ตารางที่ 3.4 ค่าความเร็วรอบของมอเตอร์ที่ใช้ในการทดสอบเทียบกับ ความเร็วเชิงเส้นขณะล้อยิ่ง	34
ตารางที่ 4.1 ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าระยะยวบของตัวอย่างต้นทดสอบ	42
ตารางที่ 4.2 แสดงความสัมพันธ์ของความเร็วรอบของมอเตอร์และความถี่ ของการสั่นสะเทือนของตัวอย่าง	54
ตารางที่ 4.3 ค่าสัญญาณการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นสูงสุดใช้ประเมินความรุนแรง ของการสั่นสะเทือน	55
ตารางที่ 4.4 ตัวอย่างตัวอย่างที่นำมาตรวจสอบการกระจายตัวของรูปทรงของ ยางชั้นใน	57

รายการภาพประกอบ

ภาพประกอบที่	หน้า
รูปที่ 1.1 ความไม่สม่ำเสมอของความแข็งดึงในล้อยาง	1
รูปที่ 1.2 ความไม่กลมของล้อ	2
รูปที่ 1.3 การเยื้องศูนย์ของกระทะล้อ	2
รูปที่ 1.4 กระบวนการผลิตล้อยางตัน	3
รูปที่ 1.5 ล้อยางตันที่เสร็จสมบูรณ์	4
รูปที่ 1.6 การพ่นขึ้นรูปล้อยางด้วยเครื่องช่วยม้วนล้อยาง	4
รูปที่ 1.7 การทำพรีฟอร์มยางชั้นใน	5
รูปที่ 1.8 เปรียบเทียบยางชั้นในที่ไม่ได้ทำการพรีฟอร์ม (ซ้าย) และยางชั้นในที่ทำพรีฟอร์ม (ขวา)	5
รูปที่ 1.9 รูปทรงของหน้าตัดล้อยาง	6
รูปที่ 2.1 แนวคิดการทดสอบการยุบตัวของล้อยางตัน	11
รูปที่ 2.2 ระบบสปริงและมวลของล้อยาง	12
รูปที่ 2.3 เครื่องจักรที่มีมุมเฟสที่ตำแหน่ง 1 และ 2 ต่างกัน 0 และ 180 องศา	15
รูปที่ 2.4 แสดงขนาดของสัญญาณการสั่นสะเทือนแบบต่าง ๆ	16
รูปที่ 2.5 การสั่นสะเทือนของเครื่องจักรบนโดเมนเวลาและโดเมนความถี่	17
รูปที่ 2.6 กราฟประเมินความรุนแรงของการสั่นสะเทือน (ระยะการเคลื่อนที่-ความเร็ว)	18
รูปที่ 2.7 หลักการของเครื่องวัดการสั่นสะเทือนด้วยวิธีการวางลำแสงเลเซอร์	20
รูปที่ 2.8 การตรวจวัดสัญญาณการสั่นสะเทือนด้วยวิธีการวางก้านลำแสง	20
รูปที่ 3.1 เครื่องทดสอบการสั่นสะเทือนของล้อยางตัน	23
รูปที่ 3.2 หน่วยติดตั้งล้อทดสอบ	24
รูปที่ 3.3 กระทะล้อแบบสองซีก	25
รูปที่ 3.4 การประกอบล้อยางเข้ากับกระทะล้อ	25
รูปที่ 3.5 การติดตั้งล้อยางบนเครื่องทดสอบ	26
รูปที่ 3.6 เปรียบเทียบแรงดันที่ใช้กดกับน้ำหนักที่กดอัดล้อ	26

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบที่	หน้า
รูปที่ 3.7 เปรียบเทียบความเร็วรอบของมอเตอร์และความเร็วเชิงเส้นของ ตัวอย่างขณะกลิ้ง	27
รูปที่ 3.8 อุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดการสั่นสะเทือนด้วยวิธีขวางกั้นลำแสง	28
รูปที่ 3.9 อุปกรณ์รับสัญญาณจากชุดอุปกรณ์ตรวจรับแสง	28
รูปที่ 3.10 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะบังแสงที่เพิ่มขึ้นกับค่าสัญญาณไฟฟ้าที่ได้ จากอุปกรณ์ตรวจรับแสง	29
รูปที่ 3.11 ตำแหน่งในการติดตั้งอุปกรณ์วัดการสั่นสะเทือนของเพลลา	30
รูปที่ 3.12 การติดตั้งเกจวัดระยะเพื่อวัดระยะยุบของสปริง	31
รูปที่ 3.13 การติดตั้งเกจวัดระยะเพื่อวัดระยะยุบของตัวอย่าง	31
รูปที่ 3.14 ตำแหน่งของน็อตยึดเฟรมควบคุมแรงอัดตัวอย่าง	33
รูปที่ 3.15 ตัวอย่างการบันทึกผลด้วยคอมพิวเตอร์	34
รูปที่ 3.16 แนวการตัดตัวอย่างเพื่อตรวจสอบการกระจายรูปทรงของยางชั้นใน	35
รูปที่ 3.17 การวัดระยะการกระจายตัวของยางชั้นในบนหน้าตัดตัวอย่าง	35
รูปที่ 4.1 แสดงระยะยุบตัวของตัวอย่างตัวอย่าง 1 ที่แรงกระทำต่าง ๆ	37
รูปที่ 4.2 แสดงระยะยุบตัวของตัวอย่างตัวอย่าง 5 ที่แรงกระทำต่าง ๆ	38
รูปที่ 4.3 แสดงระยะยุบตัวของตัวอย่างตัวอย่าง 8 ที่แรงกระทำต่าง ๆ	39
รูปที่ 4.4 แสดงระยะยุบตัวของตัวอย่างตัวอย่าง 9 ที่แรงกระทำต่าง ๆ	40
รูปที่ 4.5 แสดงระยะยุบตัวของตัวอย่างตัวอย่าง 23 ที่แรงกระทำต่าง ๆ	41
รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าระยะยุบของตัวอย่างเมื่อได้รับแรงกด	43
รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ของค่าความแข็งดิ่งรอบแกนหมุนของตัวอย่าง เมื่อได้รับแรงกระทำ 974 kg	43
รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ของค่าความแข็งดิ่งรอบแกนหมุนของตัวอย่าง เมื่อได้รับแรงกระทำ 1217.5 kg	44
รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ของค่าความแข็งดิ่งรอบแกนหมุนของตัวอย่าง เมื่อได้รับแรงกระทำ 1461.0 kg	44

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบที่	หน้า
รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ของค่าความแข็งตึงรอบแกนหมุนของล้ออย่างตัวอย่าง เมื่อได้รับแรงกระทำ 1704.5 kg	45
รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ของค่าความแข็งตึงรอบแกนหมุนของล้ออย่างตัวอย่าง เมื่อได้รับแรงกระทำ 1946.4 kg	45
รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ของค่าความแข็งตึงเฉลี่ยของล้ออย่างตัวอย่างที่แรงกระทำ ต่าง ๆ	46
รูปที่ 4.13 ค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานของความแข็งของล้อตามกลุ่มกระบวนการ ผลิต	46
รูปที่ 4.14 ค่าความแข็งตึงเฉลี่ยของล้อตามกลุ่มกระบวนการผลิตที่แรงกระทำต่าง ๆ	47
รูปที่ 4.15 ผลของการสั่นสะเทือนขณะกดคคกิ้งที่ความเร็วรอบมอเตอร์ 400 rpm	48
รูปที่ 4.16 ผลของการสั่นสะเทือนขณะกดคคกิ้งที่ความเร็วรอบมอเตอร์ 500 rpm	48
รูปที่ 4.17 ผลของการสั่นสะเทือนขณะกดคคกิ้งที่ความเร็วรอบมอเตอร์ 600 rpm	49
รูปที่ 4.18 ผลของการสั่นสะเทือนขณะกดคคกิ้งที่ความเร็วรอบมอเตอร์ 700 rpm	49
รูปที่ 4.19 ผลของการสั่นสะเทือนขณะกดคคกิ้งที่ความเร็วรอบมอเตอร์ 800 rpm	50
รูปที่ 4.20 ผลของการสั่นสะเทือนขณะกดคคกิ้งที่ความเร็วรอบมอเตอร์ 900 rpm	50
รูปที่ 4.21 ผลของการสั่นสะเทือนในแนวตั้งที่ความเร็วรอบมอเตอร์ 400 rpm	51
รูปที่ 4.22 ผลของการสั่นสะเทือนในแนวตั้งที่ความเร็วรอบมอเตอร์ 500 rpm	51
รูปที่ 4.23 ผลของการสั่นสะเทือนในแนวตั้งที่ความเร็วรอบมอเตอร์ 600 rpm	52
รูปที่ 4.24 ผลของการสั่นสะเทือนในแนวตั้งที่ความเร็วรอบมอเตอร์ 700 rpm	52
รูปที่ 4.25 ผลของการสั่นสะเทือนในแนวตั้งที่ความเร็วรอบมอเตอร์ 800 rpm	53
รูปที่ 4.26 ผลของการสั่นสะเทือนในแนวตั้งที่ความเร็วรอบมอเตอร์ 900 rpm	53
รูปที่ 4.27 ผลการสั่นสะเทือนขณะกดคคกิ้งของล้อตามกลุ่มต่าง ๆ ที่ความเร็วรอบมอเตอร์ 400 rpm	55
รูปที่ 4.28 ผลของการสั่นสะเทือนที่แกนเพลลาของล้อคันเทียบกับ Machinery Vibration Severity Chart ในหน่วยเมตริก	56
รูปที่ 4.29 ชั้นยางที่ผ่านการตัดเพื่อตรวจสอบความสมมาตรของหน้าตัด	57

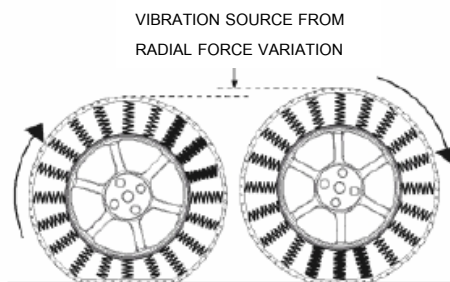
บทที่ 1

บทนำ

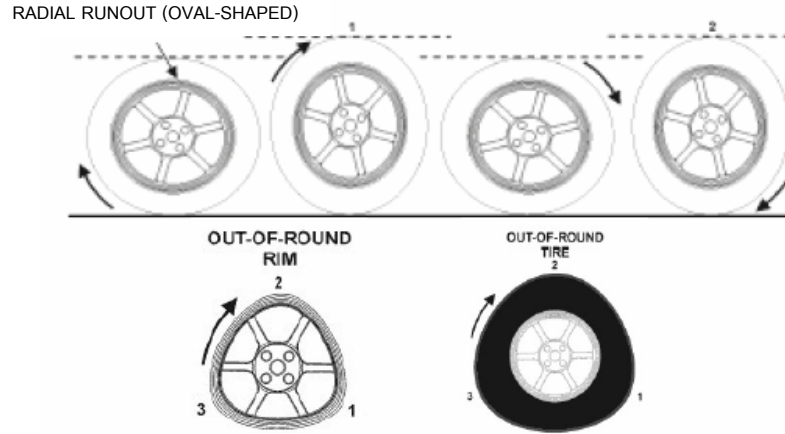
1.1 บทนำต้นเรื่อง

รถฟอร์คลิฟต์ (Forklift truck) หรือรถยก เป็นเครื่องจักรกลที่สำคัญอย่างหนึ่งในการเคลื่อนย้ายวัสดุเนื่องจากมีความคล่องตัวในการทำงานเป็นเครื่องมือที่ช่วยอำนวยความสะดวกต่อการขนถ่ายและการจัดวางสิ่งของต่าง ๆ ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของกระบวนการผลิต ในการขนถ่ายสิ่งของโดยรถฟอร์คลิฟต์สิ่งที่ควรระวังคือการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นขณะรถแล่นเพื่อไม่ให้สิ่งของตกลงเกิดความเสียหาย การสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นกับรถฟอร์คลิฟต์ขึ้นอยู่กับหลายปัจจัยเช่น การทำงานของเครื่องยนต์ ระบบรองรับการสั่นสะเทือน ความขรุขระของพื้นถนน และส่วนที่สำคัญที่สุดคือล้อซึ่งทำหน้าที่รับน้ำหนักบรรทุกทั้งหมดเป็นปัจจัยที่ก่อให้เกิดการสั่นสะเทือนและช่วยลดการสั่นสะเทือน ล้อที่ใช้สำหรับรถฟอร์คลิฟต์มีทั้งล้อแบบบรรจุลมและล้อแบบยางตัน

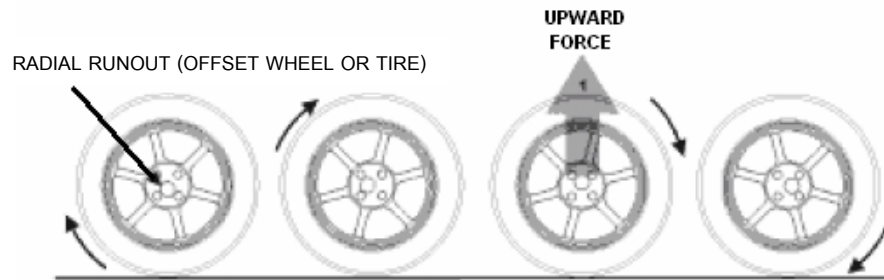
ล้อยางตันที่ใช้สำหรับรถฟอร์คลิฟต์เป็นแบบยางตันสองชั้น ประกอบด้วยยางชั้นนอกและยางชั้นใน ยางชั้นนอกมีสมบัติทนต่อการสึกกร่อนและเจาะทะลุ ส่วนยางชั้นในมีความแข็งกว่ายางชั้นนอกสำหรับรับแรงอัดจากน้ำหนักรถและน้ำหนักบรรทุก การใช้งานล้อยางตันยังมีปัญหาจากการกระดอนและการสั่นสะเทือนขณะวิ่งบนพื้นเรียบ เนื่องจากเกิดจากการเปลี่ยนแปลงแรงกระทำต่อล้อยางขณะกลิ้งซึ่งเป็นผลมาจากความไม่สม่ำเสมอของความแข็งตึง (Stiffness) ของยางรอบแกนหมุนดังรูปที่ 1.1 ที่เกิดจากความไม่สมดุลของล้อยาง ความไม่กลมหรือการเยื้องศูนย์กลางของกะทะล้อ ดังรูปที่ 1.2 และ 1.3 สาเหตุดังกล่าวอาจเกิดจากกระบวนการผลิตยางตันสองชั้นที่ใช้อยู่ในปัจจุบันไม่สามารถควบคุมรูปร่างของยางชั้นในให้มีการกระจายสม่ำเสมอรอบแกนหมุนของล้อยางได้ขณะทำการอบ ทำให้ล้อยางที่ผลิตได้มีการกระจายมวลไม่สม่ำเสมอ หน้าที่ดของล้อยางไม่คงที่อาจเกิดความไม่กลม และเกิดการแยกชั้นกันระหว่างยางชั้นนอกกับยางชั้นในขณะใช้งานส่งผลต่อคุณภาพของล้อยางตัน



รูปที่ 1.1 ความไม่สม่ำเสมอของความแข็งตึงในล้อยาง

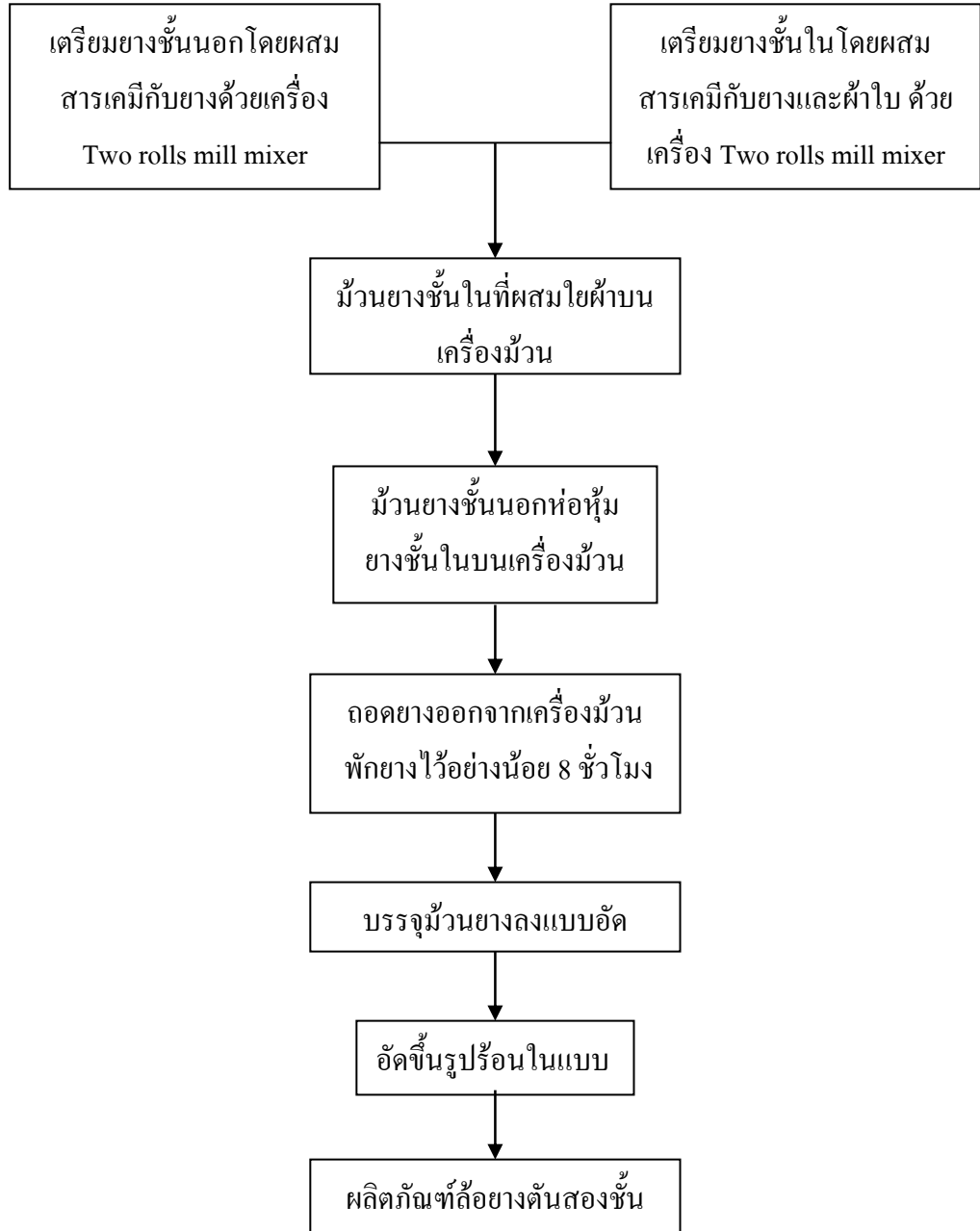


รูปที่ 1.2 ความไม่กลมของล้อ



รูปที่ 1.3 การเยื้องศูนย์กลางของกะทะล้อ

กระบวนการผลิตล้อยางต้นทำโดยนำยางแผ่นที่ผ่านกระบวนการปรับปรุงคุณสมบัติมา
ม้วนขึ้นรูปด้วยเครื่องมือม้วนยางและทำการอัดรีด ซึ่งมีการบวนการดังรูปที่ 1.4 จะได้ล้อยางต้นที่
เสร็จสมบูรณ์ดังรูปที่ 1.5



รูปที่ 1.4 กระบวนการผลิตล้อยางตัน



รูปที่ 1.5 ล้อยางตันที่เสร็จสมบูรณ์

การม้วนขึ้นรูปยางจะใช้เครื่องม้วนยางและคนในการดึงและประกองแผ่นยางให้แต่ละชั้นแนบชิดกัน ดังรูปที่ 1.6 ก) ซึ่งจะมีการคลาดเคลื่อนในการทำให้แผ่นยางอยู่ตรงตำแหน่งเดิม ส่งผลให้ยางที่ได้มีหน้าตัดไม่สม่ำเสมอและเกิดการแยกชั้นกัน จึงได้มีการปรับปรุงกระบวนการม้วนยางแบบใหม่โดยใช้มอเตอร์เป็นต้นกำลังในการดึงม้วนแผ่นยาง สามารถปฏิบัติงานโดยคนเพียงคนเดียวเพื่อประกองแผ่นยางให้เข้าไปในเครื่องม้วนและมีลูกกลิ้งกดให้ยางแต่ละชั้นแนบสนิทกันมากขึ้น ดังรูปที่ 1.6 ข)



ก)



ข)

รูปที่ 1.6 การพันขึ้นรูปล้อยางด้วยเครื่องช่วยม้วนล้อยาง

ก) การใช้แรงงานคนในการม้วนยางบนเครื่องม้วนยางแบบเก่า

ข) การใช้ลูกกลิ้งมาช่วยในการม้วนยางบนเครื่องม้วนยางแบบใหม่

โรงงานผลิตล้อยางตันและคณะวิจัยได้ร่วมคิดกระบวนการควบคุมล้อยางชั้นในให้สมมาตรและคงรูปมากขึ้นและศึกษาความสมดุลของล้อยางโดยวัดหรือตรวจสอบในรูปการสันสะท้อนขณะใช้งาน ซึ่งกระบวนการปรับความสม่ำเสมอของยางชั้นในที่น่ามาศึกษามีดังนี้

1.กระบวนการพรีฟอร์ม (Preform) ทำโดยนำยางชั้นในที่ผ่านกระบวนการม้วนขึ้นรูปแล้วไปทำการอัดขึ้นรูปโดยไม่ใช้ความร้อนในโมลก่อนดังรูปที่ 1.7 ก) และ ข) จากนั้นนำยางชั้นนอกมาพันทับและนำไปอบขึ้นรูปให้สุกพร้อมกัน



ก)



ข)

รูปที่ 1.7 การทำพรีฟอร์มยางชั้นใน

ก) การนำยางชั้นในใส่ในโมล

ข) การอัดยางชั้นในเพื่อเพิ่มความหนาแน่น

กระบวนการดังกล่าวทำให้ยางชั้นในที่ได้มีขนาดเล็กลงและความหนาแน่นมากขึ้นสังเกตจากความสูงลดลงแต่ยังคงเส้นผ่านศูนย์กลางเท่าเดิมดังรูปที่ 1.8 และเมื่อนำล้อยางต้นที่ผลิตได้เสร็จสมบูรณ์มาทำการผ่าดูหน้าตัดของยางจะพบว่ายางชั้นในมีความสมมาตรมากขึ้น ดังรูปที่ 1.9 ข)



รูปที่ 1.8 เปรียบเทียบยางชั้นในที่ไม่ได้ทำการพรีฟอร์ม (ซ่าย)

และยางชั้นในที่ทำกรพรีฟอร์ม (ขวา)



ก)



ข)

รูปที่ 1.9 รูปทรงของหน้าตัดล้อยาง

ก) ล้อยางก่อนปรับปรุงกระบวนการผลิต

ข) ล้อยางที่ทำการพรีฟอร์มยางชั้นใน

2.กระบวนการทำพรีเคียว (Precure)

คล้ายกับการทำพรีฟอร์มโดยนำม้วนยางชั้นในไปทำการอบร้อนใน โมลที่อุณหภูมิประมาณ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 20 นาที เสร็จแล้วนำไปพันกับยางชั้นนอกและนำไปอบขึ้นรูปให้สุกพร้อมกัน

ในงานวิจัยครั้งนี้จะทำการศึกษาความสมดุลความแข็งตึงรอบแกนหมุนขณะกดกลิ้งของล้อยางตันสองชั้นที่ผ่านกระบวนการปรับยางชั้นในให้คงรูปและสมมาตรมากขึ้น และทำการศึกษาการสันสะเทือนที่แกนเพลลาของล้อยางตันขณะล้อยางได้รับภาระบรรทุกทุกและกลิ้ง เพื่อนำข้อมูลที่ได้ไปใช้ในการปรับสมดุลและคุณภาพของล้อยางตันต่อไป

1.2 การตรวจเอกสาร

จากการสืบค้นเอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวกับการทดสอบการสันสะเทือน และการปรับปรุงคุณภาพของล้อยางตันที่ส่งผลต่อการสันสะเทือนสรุปได้ดังนี้

A. Kising และ H. Gohlich, 1989 ทำการทดสอบคุณสมบัติทางพลศาสตร์ของล้อยางขนาดใหญ่สำหรับรถแทรกเตอร์ในการเกษตรพบว่าค่าความแข็งตึงของล้อยางและค่าความหน่วงลดลงเมื่อความเร็วเพิ่มขึ้น และความไม่สม่ำเสมอของล้อยางได้แก่ความกลมที่ไม่สม่ำเสมอมีผลต่อการสันสะเทือนของล้อยางด้วย

Clijmans, L. *et al.*, 1996 ทำการศึกษากลกระทบบของความดันลมความแข็งตึงของล้อยางและมวลของยางว่ามีผลต่อความถี่ในการสันสะเทือนของรถตัดหญ้าขนาดใหญ่ที่ใช้ในการเกษตร อย่างไร

Taylor, R.K. *et al.* , 2000 ได้ศึกษาการใช้งานของล้อยางแบบบรรจุลมที่ใช้สำหรับเครื่องจักรกลทางการเกษตร โดยทำการทดสอบพฤติกรรมของล้อยางที่สภาวะรับแรงเมื่อล้อยางหมุนและไม่หมุนที่ความดันลมของยางต่าง ๆ กัน ทำการหาแรงที่กดและระยะยุบของล้อยางพบว่าความแข็งตึงของยางแตกต่างกันตามความดันลมในล้อยางและการหมุน

Jianmin, G. *et al.* , 2001 ศึกษาพฤติกรรมทางพลศาสตร์ของยางแบบใช้ความดันลมยางในการรับน้ำหนักบรรทุกได้ทำการทดสอบโดยให้แรงกดคงที่ ที่สภาวะความเร็วต่าง ๆ ตั้งแต่ 0 ถึง 10 กิโลเมตรต่อชั่วโมงและความดันของยางลมแตกต่างกันไป โดยการวัดค่าของความแข็งตึงและค่าความหน่วงของล้อยางพบว่าค่าต่าง ๆ จะเปลี่ยนไปเมื่อความดันลมและความเร็วที่ต่างกัน ซึ่งจะลดลงเมื่อความเร็วเพิ่มขึ้น

ชลดา และคณะ, 2547 ได้ทำการศึกษาการปรับปรุงความทนทานและการจับขึ้นที่สะดวกสบายของยางรถล้อตัน โดยปรับปรุงสูตรดอกยางให้มีสมบัติทนทานต่อการถดถอยของสมบัติเนื่องจากความร้อน มีความร้อนสะสมต่ำทนต่อการสึกหรอและฉีกขาดได้ดี ใช้ระบบการวัดคาบไซค์แบบเซมิอัติว ใช้และสารเคมีในปริมาณสูงกว่าปกติเล็กน้อยซึ่งจะทำให้ต้นทุนในการผลิตสูงขึ้นจึงลดต้นทุนโดยการใช้อยางรีเคลมเป็นส่วนผสม และได้เพิ่มขึ้นยางนึ่งเป็นยางชั้นกลางระหว่างดอกยางและยางชั้นในซึ่งส่งผลต่อการจับขึ้นที่นุ่มนวล

อุทิศ, 2548 ได้การศึกษาระยะการกระจายตัวของความเค้นและความเครียดในล้อยางตันภายใต้สภาวะที่รับโหลดแบบสถิตที่มีอิทธิพลมาจากลักษณะรูปร่างและคุณสมบัติเชิงกลของล้อยางตันด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ สามารถยืนยันความถูกต้องโดยเปรียบเทียบกับค่าการเคลื่อนตัวที่ได้กับผลการทดสอบการกดอัดล้อยางตันจริง โดยไม่นำผลของความเสียดทานและดอกยางมาพิจารณา จากการศึกษาล้อยางตันที่มีองค์ประกอบของยางแบบ 3 ชั้นพบว่าการกระจายตัวของพลังงานความเครียดจำเพาะมีค่าสูงในบริเวณใกล้กับแนวสมมาตรของหน้าตัดล้อยางตันที่องค์ประกอบของยางชั้นนอก ซึ่งสอดคล้องกับบริเวณที่เกิดความร้อนสูง กรณีที่เปลี่ยนแปลงความหนาขององค์ประกอบยางชั้นนอกและยางชั้นกลางจะส่งผลต่อการกระจายตัวของพลังงานความเครียดจำเพาะมากที่สุดเนื่องจากเป็นบริเวณที่ล้อยางเกิดการเสียรูปมาก และการที่จะลดพลังงานความเครียดจำเพาะในล้อยางตันทำได้โดยเพิ่มโมดูลัสความยืดหยุ่นที่องค์ประกอบยางชั้นนอกและยางชั้นกลางแต่ต้องคำนึงถึงค่า $\tan \delta$ ที่จะส่งผลต่อสมบัติทางพลศาสตร์ของล้อยางตันด้วย

เครื่องมือวัดค่าการสั่นสะเทือนด้วยวิธีขวางกันลำแสงซึ่งเป็นวิธีการวัดแบบไม่สัมผัสอีกวิธีหนึ่งที่สามารถนำมาใช้ในการตรวจวัดค่าการสั่นสะเทือน โดยมีความไวของเครื่องวัดเป็นเชิงเส้น [Chetpattananondh, K. *et al.*, 2005] ทำให้สามารถเปรียบเทียบได้ง่ายสามารถวัดค่าความ

สั่นสะเทือนของวัตถุที่มีผิวสกรปรกหรือวัตถุที่มีผิวโค้ง ได้อย่างถูกต้องและแม่นยำ ราคาถูกและติดตั้งได้ง่าย และได้มีการพัฒนาเครื่องมือวัดนี้มาใช้วัดการสั่นสะเทือนที่แกนเพลลาเพื่อตรวจสอบความสมดุลการหมุนของล้อยางตัน [Chetpattananondh, K. *et al.*, 2008] และผลการศึกษาความสมดุลรอบแกนหมุนของล้อยางตันสองชั้น [เสนห์, 2550] โดยเปรียบเทียบระหว่างกระบวนการผลิตล้อยางตันแบบเก่าและกระบวนการผลิตที่ใช้เครื่องช่วยม้วนล้อยางแบบใหม่ และเทียบกับล้อยางตันที่มีขายอยู่ตามท้องตลาด โดยทำการศึกษาถึงความกลมของล้อยางตันจากกระบวนการผลิตที่ต่างกัน และการขันบีบกะทะล้อด้วยแรงขนาดต่าง ๆ ที่ส่งผลต่อความสมดุลแรงเหวี่ยงในรูปของการสั่นสะเทือนขณะล้อยางหมุนที่ความเร็วเชิงเส้น 25 กิโลเมตรต่อชั่วโมงโดยที่ล้อยางไม่รับแรงกด ใช้การตรวจวัดการสั่นสะเทือนที่แกนเพลลาด้วยอุปกรณ์ตรวจวัดแบบไม่สัมผัส ด้วยวิธีการขวางกันลำแสง พบว่ากระบวนการผลิตล้อยางแบบใหม่ที่ควบคุมให้ยางชั้นในมีความสม่ำเสมอของมวลและรูปร่างหน้าตัดมากขึ้นส่งผลให้ความสมดุลรอบแกนหมุนของล้อยางตันดีขึ้น ในส่วนของการวิเคราะห์การสั่นสะเทือนและการประเมินความรุนแรงของการสั่นสะเทือนของระบบ มีเกณฑ์ที่ใช้ในการประเมินคือ Machinery Vibration Severity Chart [IRD Mechanalysis, Inc., 1993] จะทำให้ทราบสถานะการสั่นสะเทือนของระบบอยู่ในสถานะที่ส่งผลต่อความเสียหายกับชิ้นส่วนหรืออุปกรณ์ต่าง ๆ มากน้อยเพียงใด ได้นำมาใช้เป็นเกณฑ์ในการออกแบบ Air-conditioning Chiller เพื่อให้มีการสั่นสะเทือนที่ส่งผลต่อการสึกหรอของเบร็งที่ใช้กับ Air-conditioning Chiller ขนาด 1,250 ตันในช่วงที่ยอมรับได้ [Michael S. and Johnson Jr., P.E. 2000]

งานวิจัยที่ผ่านมาเป็นการทดสอบการสั่นสะเทือนของล้อยางลมที่ใช้กับรถยนต์และรถแทรกเตอร์สำหรับการเกษตร โดยจะศึกษาการเปลี่ยนแปลงความแข็งตึงของล้อ โดยการเปลี่ยนแปลงความดันลมยางและความเร็วใช้งานที่ส่งผลต่อการสั่นสะเทือน ส่วนในงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับล้อยางตันจะเป็นการศึกษาการกระจายตัวของความเค้นและความเครียดภายใต้สถานะที่รับโหลดแบบสถิตย์ การศึกษากระบวนการทางเคมีที่ทำให้ล้อยางมีความทนทานต่อการฉีกขาด ส่งผลต่อคุณสมบัติเชิงกลของล้อยางโดยตรง และสมดุลการหมุนที่ไม่สม่ำเสมอเนื่องจากความไม่กลมของล้อยาง ล้วนเป็นปัจจัยที่ส่งผลต่อการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นขณะล้อยางตันกลิ้งไปบนพื้นถนนและสามารถนำเครื่องมือวัดที่มีราคาถูกมีความแม่นยำสูงมาใช้ในการประเมินการสั่นสะเทือนของล้อยางตันขณะกลิ้งได้ ความสม่ำเสมอของการกระจายรูปทรงตามหน้าตัดของล้อยางตันสองชั้นที่มีความแข็งแรงไม่เท่ากันก็อาจเป็นสาเหตุหนึ่งที่ส่งผลต่อสมดุลการหมุนของล้อยาง

1.3 วัตถุประสงค์

เพื่อศึกษาพฤติกรรมการสั่นสะเทือนของล้อยางต้นสองชั้น ที่มีผลมาจากความไม่สมดุลของความแข็งดิ่งรอบแกนหมุนหลังผ่านกระบวนการปรับรูปทรงของยางชั้นในให้มีความคงรูปและสมมาตรมากขึ้น เปรียบเทียบกับล้อยางต้นที่มีขายตามท้องตลาด

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ทราบลักษณะพฤติกรรมของการสั่นสะเทือนของล้อยางต้น ที่มีผลเนื่องมาจากรูปทรงของยางต้นชั้นใน เพื่อนำข้อมูลไปใช้ปรับปรุงในกระบวนการผลิตล้อยางให้มีผลต่อการสั่นสะเทือนที่ลดลง

1.5 ขอบเขตของงานวิจัย

- 11.1 ทดสอบความสมดุลความแข็งดิ่งของล้อยางต้นและทำการวัดการสั่นสะเทือนที่แกนเพลลา
- 11.2 ล้อตัวอย่างที่ทดสอบได้แก่ ล้อยางต้นที่มีขายอยู่ตามท้องตลาดในประเทศ ล้อยางที่ผ่านกระบวนการผลิตแบบเก่า และล้อยางที่ผ่านกระบวนการผลิตที่สามารถควบคุมความสม่ำเสมอของยางชั้นในให้ดีขึ้น โดยเลือกใช้ล้อยางต้นขนาด 6:00-9 ในการทดสอบ
- 11.3 ในการศึกษาจะไม่ศึกษาผลกระทบของตัวแปรต่อไปนี้คือ อุณหภูมิ และ ความร้อนในเนื้อยาง อัตราการหน่วง (Damping Ratio) ในเนื้อยาง และผลของรูปร่างของดอกยาง

บทที่ 2

ทฤษฎี

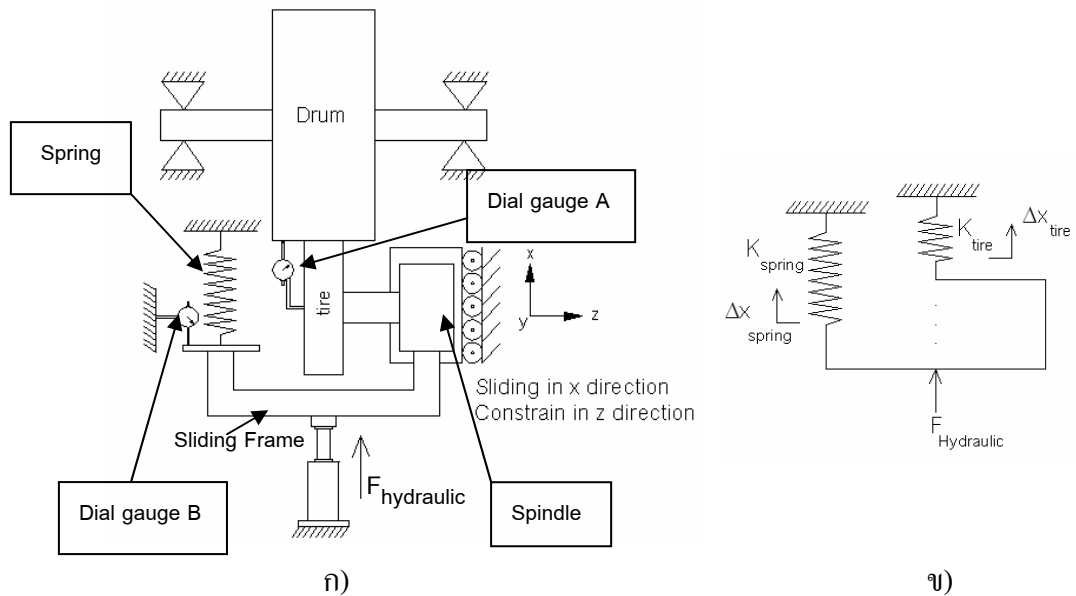
พฤติกรรมการสั่นสะเทือนของล้อยางต้นเกิดจากหลายสาเหตุเช่น การไม่สมดุลของการติดตั้งล้อยางต้น ความไม่เรียบของหน้าสัมผัสและการเสียดสีระหว่างล้อยางต้นกับพื้นถนน ความไม่สมดุลของเนื้อวัสดุ หรือการเสียรูปของล้อยางต้น สมบัติทางกายภาพของล้อยางต้น ได้แก่ สมบัติความเป็นสปริงของล้อยาง และสมบัติการต้านการสั่นสะเทือนคือมวลของล้อยาง หากสมบัติทางกายภาพนี้ไม่สมดุลตลอดเส้นรอบวงของล้อยางเป็นส่วนสำคัญที่ทำให้การสั่นสะเทือนเกิดขึ้น

2.1 การคำนวณหาค่าความแข็งตึงของล้อยางต้น

กระบวนการผลิตล้อยางต้นซึ่งไม่สามารถควบคุมความสมดุลของการกระจายตัวของมวลของยางชั้นใน ส่งผลให้ค่าความแข็งตึงตามแนวรัศมีของล้อยางไม่สมดุลตลอดเส้นรอบวงของล้อยาง เมื่อล้อยางต้นถูกใช้งานจะเกิดการกระดอนบนหน้าสัมผัสบนพื้นผิวถนน เนื่องจากล้อยางต้นขณะใช้งานเกิดการยุบตัวตามแนวรัศมีที่ต่างกันเมื่อล้อหมุนเปลี่ยนมุมไป ส่งผลต่อการสั่นสะเทือนขณะล้อยางกลิ้งบนพื้นถนน

แนวคิดในการตรวจสอบความแข็งตึงรอบแกนหมุนทำโดยการหาค่าระยะยุบของล้อยางเมื่อได้รับแรงกดที่เปลี่ยนไป ดังรูปที่ 2.1 ประกอบด้วย

1. ล้อขับ (Drum) สำหรับเป็นพื้นถนน
 2. เฟรมเลื่อนใช้สำหรับเลื่อนบังคับล้อยางต้นให้เข้าออกไปสัมผัสกับล้อขับ โดยรับแรงจากกระบอกลูกสูบไฮดรอลิก
 3. ชุดไฮดรอลิก ใช้สำหรับควบคุมแรงกดอัดล้อยางต้นให้ไปสัมผัสกับล้อขับโดยออกแรงผ่านเฟรมเลื่อน
 4. สปริง ใช้สำหรับถ่ายแรงจากกระบอกลูกสูบไฮดรอลิกไปยังล้อยางทดสอบขณะทำการกดอัดและช่วยคืนเฟรมกลับขณะปลดแรงออก
 5. เพลาหมุนล้อทดสอบ (Spindle) ใช้สำหรับหมุนล้อยางให้เปลี่ยนตำแหน่งตามจุดที่ได้แบ่งไว้
 6. ไคอัลเกจ A ใช้วัดระยะยุบตัวของล้อยาง
 7. ไคอัลเกจ B ใช้วัดระยะยุบตัวของสปริง
- สมมติให้ล้อขับ (Drum) เป็นพื้นที่ไม่มีการยุบตัวเมื่อรับแรงกด ระยะ โกงของเพลาที่ล้อขับ และระยะ โกงของเพลาที่ล้อยางทดสอบเมื่อเทียบกับการเลื่อนของเฟรมมีค่าน้อยมาก



รูปที่ 2.1 แนวคิดการทดสอบการยุบตัวของล้อยางตัน

- ก) ส่วนประกอบของเครื่องทดสอบโดยเครื่องทดสอบการหมุนของล้อยางบนถนนจำลอง (Drum Test) และการติดตั้งเกจวัดระยะ
- ข) Free body diagram แสดงการกดอัดล้อยาง

การคำนวณหาค่าแรงกดอัดที่ล้อได้จากการนำแรงต้านของสปริงซึ่งคำนวณจากการยุบตัวของสปริง ดังสมการที่ 2.1 นำมาหักลบกับแรงกดอัดจากกระบอกไฮดรอลิก จะได้แรงที่กดอัดล้อ ดังสมการที่ 2.3 และเมื่อทราบค่าระยะยุบของล้อยางขณะรับแรงกดอัดก็จะสามารถคำนวณหาค่าความแข็งตึง (Stiffness) ของล้อยางตันเมื่อได้รับแรงขนาดต่าง ๆ ได้ ตามความสัมพันธ์ดังสมการที่ 2.4

$$F_{spring} = K_{spring} \Delta X_{spring} \quad (2.1)$$

$$F_{hydraulic} = PA \quad (2.2)$$

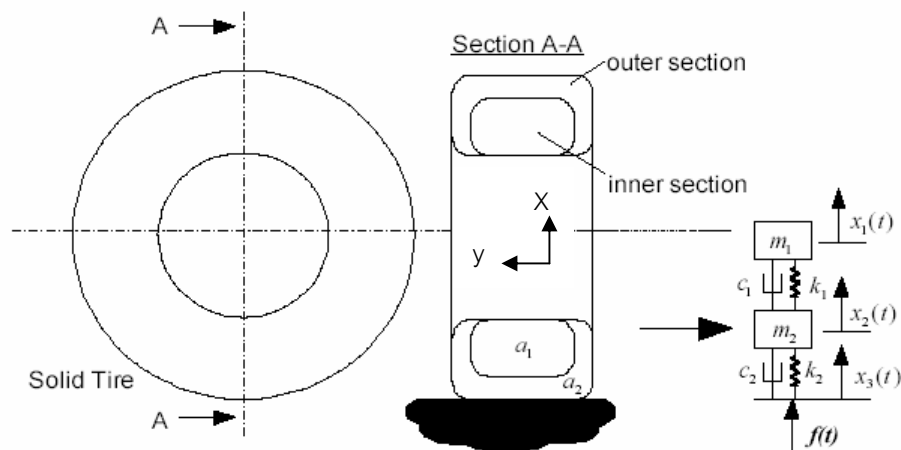
$$F_{tire} = F_{hydraulic} - F_{spring} \quad (2.3)$$

$$F_{tire} = K_{tire} \Delta X_{tire} \quad (2.4)$$

เมื่อ	F_{spring}	คือ แรงต้านการยุบตัวของสปริง
	K_{spring}	คือ ค่าความแข็งตึงของสปริง เท่ากับ 37,980 N/m
	ΔX_{spring}	คือ ระยะยุบของสปริงวัดโดยใช้ไดอัลเกจ A ดังรูปที่ 2.1 ก
	$F_{hydraulic}$	คือ แรงอัดจากกระบอกไฮดรอลิก
	P	คือ ความดันที่อ่านได้จากเกจวัดความดันที่กระบอกไฮดรอลิก
	A	คือ พื้นที่หน้าตัดของกระบอกไฮดรอลิก
	F_{tire}	คือ แรงที่กดอัดตัวอย่างทดสอบ

2.2 แนวคิดเกี่ยวกับการสั่นสะเทือนของล้อยางตัน

โครงสร้างภายในของล้อยางตันจะมีลักษณะดังรูปที่ 2.2 เมื่อมีแรงกระทำจากภายนอกกดไปที่ยางซึ่งก็คือแรงปฏิกิริยาที่พื้นกระทำต่อยาง $f(t)$ ในแนวสู่จุดศูนย์กลางล้อ การสั่นสะเทือนของล้อยางจะเป็นลักษณะของการสั่นสะเทือนแบบบังคับใน 2 ระดับขึ้นความถี่ (2 DOF Forced Vibration) เนื่องจากมีคุณสมบัติเป็นทั้งสปริงและตัวหน่วงการสั่นสะเทือน



รูปที่ 2.2 ระบบสปริงและมวลของล้อยาง

$f(t)$ คือ แรงที่พื้นกระทำต่อล้อในแนวสู่จุดศูนย์กลางล้อ a_1 และ a_2 พื้นที่หน้าตัดที่บ่งบอกรูปร่างโครงสร้างของยางชั้นในและชั้นนอกตามลำดับ m_1 และ k_1 คือมวลและความแข็งตึงของยางชั้นในซึ่งขึ้นกับ a_1 m_2 และ k_2 คือมวลและความแข็งตึงของยางชั้นนอกซึ่งขึ้นกับ a_2 พิจารณาการสั่นของระบบเป็นแบบ 1 มิติเขวนต่อกันแบบอนุกรมด้วยสปริงและตัวหน่วง ค่าสัมประสิทธิ์การหน่วง (Damping constant) c_1 ของยางชั้นใน ค่าสัมประสิทธิ์การหน่วง c_2 ของยางชั้นนอก

จะเห็นว่าการสั่นสะเทือนในล้อยางคันขึ้นอยู่กับตัวแปรหลายตัว ได้แก่ค่า m_1 , m_2 , k_1 และ k_2 เป็นกลุ่มตัวแปรที่ส่งผลต่อการเคลื่อนที่ดังกล่าว จะสังเกตเห็นว่าการสั่นสะเทือนจะซับซ้อนมากยิ่งขึ้นถ้า m_1 , m_2 , k_1 และ k_2 เปลี่ยนแปลงตามเวลาเนื่องจากจากความไม่คงรูปและไม่สม่ำเสมอรอบแนวแกนของพื้นที่หน้าตัด (a_1 และ a_2) ถ้าสามารถควบคุมให้ k_1 และ k_2 เปลี่ยนแปลงตามเวลาน้อยที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ โดยการควบคุมให้รูปทรง (a_1 และ a_2) ของยางชั้นในและชั้นนอกคงรูปและสมมาตรรอบแกนหมุนน่าจะเป็นการลดความซับซ้อนของการสั่นสะเทือนของล้อยางได้ระดับหนึ่ง ซึ่งจะต้องทำการทดสอบการสั่นสะเทือนของล้อยางเมื่อล้อทดสอบหมุนที่ความเร็วรอบเท่ากัน ดอกยางแบบเดียวกัน ค่าความยืดหยุ่นของยางในเดียวกัน ภาระแรงกริยาปฏิกริยาที่ล้อได้รับรวมถึงแรงเสียดทานสถิตเริ่มต้นเท่ากัน โดยจะทำการเปรียบเทียบพฤติกรรมการสั่นสะเทือนของล้อ เช่น ความถี่ (Frequency) และขนาดการเคลื่อนที่ (Amplitudes)

2.3 สัญญาณการสั่นสะเทือน

สัญญาณการสั่นสะเทือนที่วัดได้สามารถนำมาช่วยในการบ่งบอกถึงสภาพหรือข้อบกพร่องของระบบ โดยมีตัวแปรที่ใช้ในการวัดประกอบด้วย

2.3.1 ความถี่

หมายถึงความถี่ของการสั่นสะเทือน หากพิจารณาสัญญาณการสั่นสะเทือนบนโดเมนเวลาก็จะหมายถึง จำนวนรอบของการสั่นสะเทือนต่อหน่วยเวลา ซึ่งหน่วยที่นิยมใช้จะเป็น CPM (Cycle per Minute) ความถี่นี้จะเป็นปัจจัยที่มีความสำคัญมากตัวหนึ่งในการบ่งบอกถึงสภาพความเสียหายได้ถ้าหากนำตัวแปรนี้ไปใช้กับสัญญาณการสั่นสะเทือนบนโดเมนความถี่

2.3.2 ขนาดของการสั่นสะเทือน

เป็นตัวแปรที่สำคัญอีกตัวหนึ่งที่ใช้บ่งบอกสภาพของระบบ โดยทั่วไปแล้วขนาดของการสั่นสะเทือนหากมีขนาดใหญ่ย่อมหมายถึงระบบเริ่มมีปัญหา ขนาดของการสั่นสะเทือนมีอยู่หลายชนิด ซึ่งตัวหลักที่ใช้ได้แก่

1. การขจัดหรือระยะการเคลื่อนที่ (Displacement) คือระยะการเคลื่อนที่ของมวลจากจุดสมดุล ในกรณีที่วัดค่าจากค่าสูงสุดไปยังค่าต่ำสุด (Peak to Peak) จะเป็นค่าระยะทางทั้งหมดที่ตัวมวลเคลื่อนที่จากจุดสูงสุดไปจุดต่ำสุดในแต่ละวัฏจักร

2. ความเร็วของการสั่นสะเทือน (Velocity) คือความเร็วของการเคลื่อนที่ที่กลับไปกลับมาของมวล มวลจะมีความเร็วเป็นศูนย์เมื่อมวลเคลื่อนที่อยู่ที่จุดสูงสุดและต่ำสุด และจะมีความเร็วสูงสุดในขณะที่มวลเคลื่อนที่ผ่านจุดสมดุล

3. ความเร่ง (Acceleration) คือ อัตราการเปลี่ยนแปลงความเร็วของมวลในขณะที่เคลื่อนที่กลับไปกลับมาโดยจะมีค่าสูงสุดเมื่อมวลอยู่ตำแหน่งสูงสุดและต่ำสุดจากจุดสมดุล

การเลือกที่จะวัดสัญญาณการสั่นสะเทือนอยู่ในรูปของการจัด หรือความเร็ว หรือความเร่งนั้น ขึ้นอยู่กับลักษณะการทำงานและความถี่ของระบบที่จะทำการวัด โดยทั่วไปแล้ว หากขนาดของการสั่นสะเทือนที่วัดได้มีค่ามาก มักจะบ่งบอกถึงสภาพที่มีปัญหาของระบบ แต่สิ่งที่จะเป็นตัวกำหนดว่าจะเลือกวัดด้วยค่าอะไรก็คือ ความถี่ที่ใช้งานของระบบ

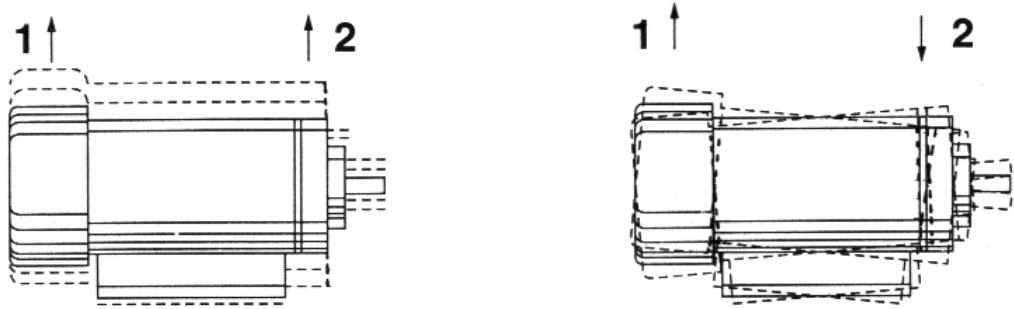
ในกรณีที่ระบบเคลื่อนที่ด้วยความถี่ต่ำ (ต่ำกว่า 600 CPM) มักนิยมทำการวัดการสั่นสะเทือนด้วยปริมาณของการจัดหรือระยะการเคลื่อนที่ เนื่องจากเป็นปริมาณที่บอกลักษณะของการสั่นสะเทือนที่มีความถี่ต่ำได้ดีที่สุด ขนาดของระยะการเคลื่อนที่ที่สูงมักจะบ่งบอกว่าความเสียหายที่อาจเกิดขึ้นนั้นจะมาจากความเค้น และไม่ใช่ว่าผลที่มาจากความล้า

สำหรับระบบที่เคลื่อนที่ด้วยความถี่ประมาณ 600 CPM ถึง 60,000 CPM มักนิยมทำการวัดการสั่นสะเทือนด้วยปริมาณของความเร็ว ในกรณีนี้หากปริมาณความเร็วที่วัดมีขนาดสูงมากก็จะเป็นการบ่งบอกว่าความเสียหายที่อาจเกิดขึ้นกับระบบนั้นจะเป็นความเสียหายที่เกิดจากความล้า

สำหรับความเร่งจะเป็นค่าที่สัมพันธ์โดยตรงกับแรง และแรงที่มีขนาดใหญ่ย่อมอาจเกิดขึ้นได้ที่มีความถี่สูงถึงแม้ขนาดของระยะการเคลื่อนที่และความเร็วจะมีค่าน้อย ในกรณีนี้ถ้าความเร่งที่วัดได้มีค่าสูงในขณะที่ความเร็วมีค่าน้อย ความเสียหายที่อาจเกิดขึ้นกับระบบนี้จะเกิดจากแรงที่ป้อนเข้ามาแทนที่จะเป็นผลจากความล้า

2.3.3 มุมเฟส

จะเป็นค่าแตกต่างของชิ้นส่วนที่มีการสั่นสะเทือนขึ้นหนึ่งเมื่อเทียบกับจุดอ้างอิงหรือชิ้นส่วนที่มีการสั่นสะเทือนอีกชิ้นหนึ่ง มุมเฟสจะใช้เป็นข้อมูลบอกลักษณะการเคลื่อนที่ของตำแหน่งต่าง ๆ บนเครื่องจักร ดังรูปที่ 2.3 แสดงถึงตัวอย่างการวัดมุมเฟสที่นำมาใช้กับการตรวจวัดการสั่นสะเทือนของเครื่องจักรเพื่อบอกลักษณะการเคลื่อนที่ของเครื่องจักร โดยรูปทางซ้ายแสดงให้เห็นว่ามุมเฟสระหว่างตำแหน่ง 1 และ 2 เท่ากัน คือมีค่ามุมเฟสต่างกันเท่ากับ 0 องศา เรียกว่าการเคลื่อนที่ในเฟสเดียวกัน (In-phase Motion) รูปทางขวามือแสดงถึงมุมเฟสระหว่างตำแหน่ง 1 และ 2 ต่างกัน 180 องศา เรียกว่าการเคลื่อนที่แบบ Out of Phase



รูปที่ 2.3 เครื่องจักรที่มีมุมเฟสที่ตำแหน่ง 1 และ 2 ต่างกัน 0 และ 180 องศา
[ก่อเกียรติ บุญชูกุลศล, 2540]

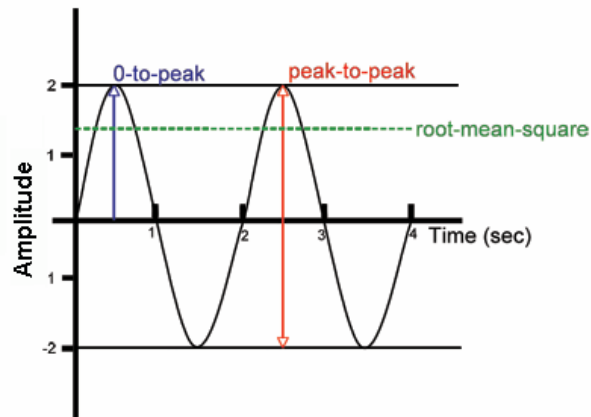
2.4 หน่วยวัดสัญญาณการสั่นสะเทือน

สัญญาณการสั่นสะเทือนในรูปของการจัด ความเร็ว หรือความเร่งนั้นอยู่ในรูปของคลื่นรูปไซน์ หรือรูปเป็นคาบซึ่งจะมีทั้งค่าบวกและค่าลบ และมีค่าเปลี่ยนแปลงตามเวลา การบอกขนาดของสัญญาณการสั่นสะเทือนในลักษณะการบอกขนาดโดยรวมที่นิยมใช้กันมีดังนี้

1. ระดับยอดสูงสุด (Peak Level) เป็นการบอกค่าระดับสูงสุดของสัญญาณที่เบี่ยงเบนไปจากระดับศูนย์ ค่านี้มักนิยมใช้วัดการสั่นสะเทือนที่เกิดจากการกระแทกช่วงเวลาสั้น ๆ
2. ระดับยอดสูงสุดถึงยอดสูงสุดอีกยอดหนึ่ง (Peak to Peak Level) คือ การบอกขนาดของสัญญาณที่วัดจากจุดสูงสุดทางบวกกับจุดต่ำสุดทางลบ
3. ค่าเฉลี่ย (Average Level) เป็นค่าเฉลี่ยของสัญญาณที่เกิดขึ้นในช่วงเวลาหนึ่ง ๆ ในกรณีทั่วไปที่สัญญาณการสั่นสะเทือนมีค่าเป็นทั้งบวกและลบเมื่อเทียบกับตำแหน่งสมดุลซึ่งจะทำให้ค่าเฉลี่ยเป็นศูนย์ ค่าเฉลี่ยในกรณีนี้จะคิดโดยทำการเปลี่ยนเครื่องหมายของขนาดสัญญาณที่ลบให้เป็นบวก (Rectified) แล้วจึงคิดค่าเฉลี่ยออกมา
4. ค่าอาร์เอ็มเอส (RMS, Root Mean Square) เป็นค่าที่ได้จากการนำสัญญาณที่วัดได้ในโดเมนเวลาที่เกิดขึ้นในช่วงหนึ่ง ๆ มายกกำลังสองแล้วทำการเฉลี่ยตลอดคาบและถอดรากที่สอง

$$X_{rms} = \sqrt{\frac{1}{t} \int_0^t X^2(t) dt} \quad (2.5)$$

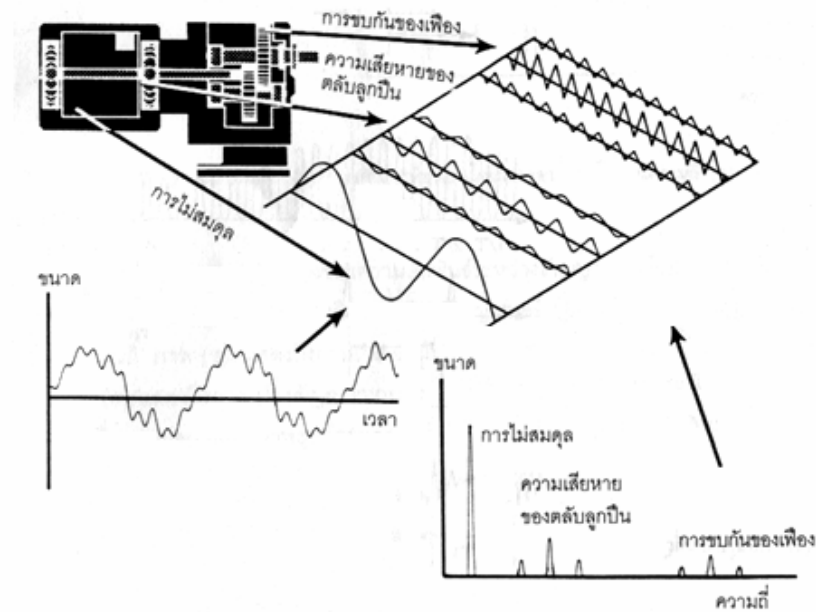
5. ค่าแฟกเตอร์เครสท์ (Crest Factor) เป็นค่าอัตราส่วนของ Peak Level กับ RMS Level ซึ่งค่าดังกล่าวจะให้ข้อมูลว่าลักษณะสัญญาณการสั่นสะเทือนที่วัดได้มีแนวโน้มเป็นการสั่นสะเทือนลักษณะแบบกระแทก (Impulse) หรือแบบสุ่ม (Random) ในกรณีที่ึ่เป็นลักษณะแบบกระแทก ค่าแฟกเตอร์เครสท์จะสูง ส่วนกรณีที่ึ่เป็นลักษณะสุ่ม ค่าแฟกเตอร์เครสท์จะต่ำ



รูปที่ 2.4 แสดงขนาดของสัญญาณการสั่นสะเทือนแบบต่าง ๆ

2.5 การวิเคราะห์แบบสเปกตรัม

สัญญาณการสั่นสะเทือนแบบฮาร์มอนิกซึ่งเป็นไปตามลักษณะของแรงที่มากระตุ้นแบบฮาร์มอนิก และเป็นสัญญาณที่ถูกแสดงอยู่บนโดเมนเวลา การวินิจฉัยสภาพหรือข้อบกพร่องของระบบจะได้จากการพิจารณาขนาดของการสั่นสะเทือนเพียงอย่างเดียว หากแรงที่มากระตุ้นไม่อยู่ในรูปของสัญญาณฮาร์มอนิกแต่เป็นสัญญาณที่มีลักษณะเป็นคาบแล้ว เพื่อให้ง่ายต่อการวิเคราะห์จึงจำเป็นต้องใช้วิธีการแปลงสัญญาณลักษณะเป็นคาบออกมาเป็นสัญญาณการสั่นสะเทือนที่ความถี่ต่าง ๆ กัน เป็นการวิเคราะห์สัญญาณการสั่นสะเทือนบนโดเมนความถี่ ซึ่งจะถูกแยกเป็นสัญญาณฮาร์มอนิกหลาย ๆ สัญญาณที่หลาย ๆ ความถี่รวมกัน โดยใช้การแปลงแบบฟูเรียร์ (Fourier Transform) ในปัจจุบันด้วยวิทยาการทางคอมพิวเตอร์ทำให้การแปลงสัญญาณลักษณะคาบมาเป็นสัญญาณบนแกนความถี่นั้นทำด้วยวิธีที่เรียกว่า ผลการแปลงฟูเรียร์แบบเร็ว (Fast Fourier Transform) ซึ่งการคำนวณจะง่ายและรวดเร็วยิ่งขึ้น

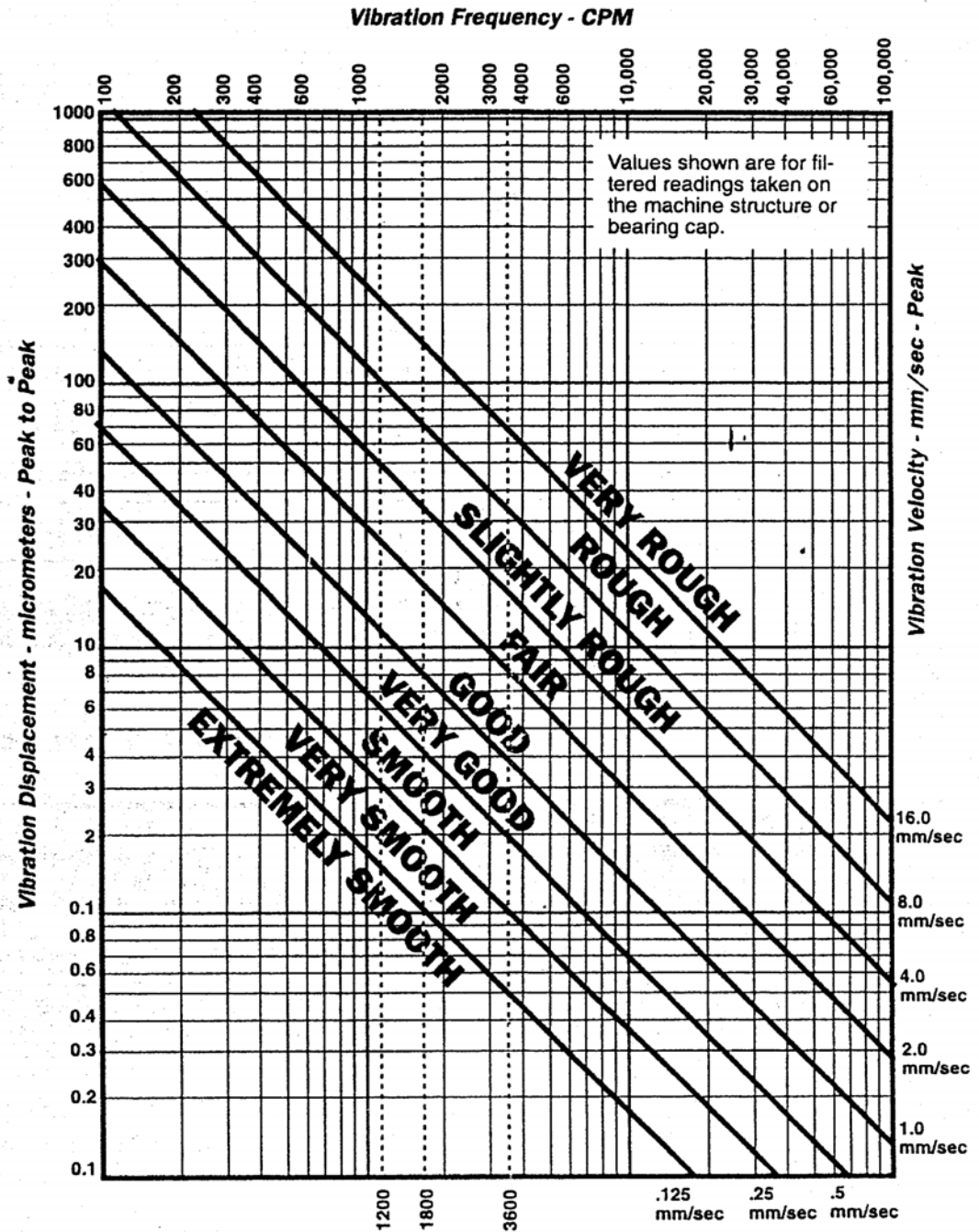


รูปที่ 2.5 การสั่นสะเทือนของเครื่องจักรบน โดเมนเวลาและโดเมนความถี่
[ก่อเกียรติ บุญชูกุล, 2540]

2.6 การประเมินค่าความรุนแรงของการสั่นสะเทือนของสัญญาณแบบรวม

การวิเคราะห์สัญญาณการสั่นสะเทือนแบบรวมสามารถทำได้โดยการเปรียบเทียบกับค่าอ้างอิง โดยใช้หลักการที่ว่า ขนาดของสัญญาณยิ่งมากระบบก็ยิ่งมีแนวโน้มว่าจะบกพร่องได้มาก เนื่องจากการวัดสัญญาณแบบรวมจะแสดงผลเป็นค่าเดียวซึ่งระบบอาจมีมวลต่าง ๆ กัน ทำงานที่ความเร็วต่าง ๆ กัน จึงต้องมีเกณฑ์หรือข้อกำหนดระดับการสั่นสะเทือนที่ถือว่ารุนแรง หรือยอมรับได้ดังกราฟในรูปที่ 2.6 ข้อมูลที่ดีที่สุดที่ใช้เป็นเกณฑ์กำหนดว่าระดับการสั่นสะเทือนโดยยอมรับได้ ระดับใดเริ่มยอมรับไม่ได้ ควรมาจากการเก็บข้อมูลสะสมของเครื่องจักรแต่ละตัวภายใต้การทำงานจริง เนื่องจากเครื่องจักรแต่ละเครื่องแม้จะมีลักษณะและเงื่อนไขการทำงานเหมือนกัน ผลิตมาจากโรงงานผู้ผลิตเดียวกัน แต่มักจะมีคุณลักษณะของการสั่นสะเทือนไม่เหมือนกัน ดังนั้นในการกำหนดระดับที่เป็นระดับเตือนหรือยอมรับไม่ได้จึงควรมีค่าต่างกัน

METRIC MACHINERY VIBRATION SEVERITY CHART



รูปที่ 2.6 กราฟประเมินความรุนแรงของการสั่นสะเทือน (ระยะการเคลื่อนที่-ความเร็ว)

[IRD Mechanalysis, Inc., 1993]

2.7 อุปกรณ์วัดการสั่นสะเทือน

อุปกรณ์ตรวจวัดการสั่นสะเทือน ทำหน้าที่เปลี่ยนแปลงการสั่นสะเทือนของวัตถุเป็นสัญญาณไฟฟ้า ซึ่งนำสัญญาณมาขยาย บันทึกลง แสดงผล และนำผลมาใช้วิเคราะห์ข้อมูลการสั่นสะเทือน อุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดการสั่นสะเทือนประกอบด้วย หัวทรานส์ดิวเซอร์ สายเคเบิลและเครื่องประมวลผล

2.7.1 หัวทรานส์ดิวเซอร์สำหรับวัดการสั่นสะเทือน

หัวทรานส์ดิวเซอร์เป็นอุปกรณ์หลักที่ทำหน้าที่แปลงสภาพการสั่นสะเทือนที่ต้องการเป็นสัญญาณทางไฟฟ้า ซึ่งแยกประเภทตามหลักการของการเกิดสัญญาณได้เป็น

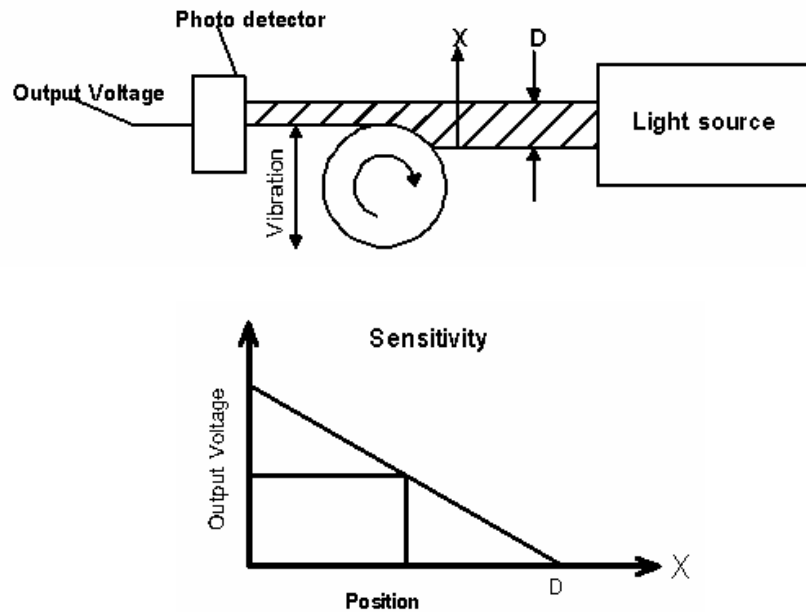
1. ทรานส์ดิวเซอร์สำหรับวัดระยะการเคลื่อนที่
2. ทรานส์ดิวเซอร์สำหรับวัดความเร็ว
3. ทรานส์ดิวเซอร์สำหรับวัดความเร่ง

หัวทรานส์ดิวเซอร์มีทั้งแบบที่ไม่ต้องมีการสัมผัสโดยตรงจะใช้หลักการเหนี่ยวนำกระแสไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก และแบบสัมผัสโดยตรงทำงานโดยอาศัยการเคลื่อนที่ของขดลวดซึ่งถูกรองรับด้วยสปริงและมีแม่เหล็กยึดติดกับตัวเรือน เมื่อมีการสั่นสะเทือน ขดลวดจะสั่นและเคลื่อนที่ตัดกับสนามแม่เหล็กทำให้เกิดค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าเป็นสัดส่วนกับการสั่นสะเทือน

ปัจจุบันหัวทรานส์ดิวเซอร์จะนิยมใช้หลักการพิโซอิเล็กทริก (Piezoelectric) ใช้วัสดุประเภทควอตซ์ และ เฟอร์โรอิเล็กทริกเซรามิกส์ (Ferroelectric Ceramics) ซึ่งจะเกิดประจุไฟฟ้าเมื่อได้รับแรงกดตามการสั่นสะเทือน

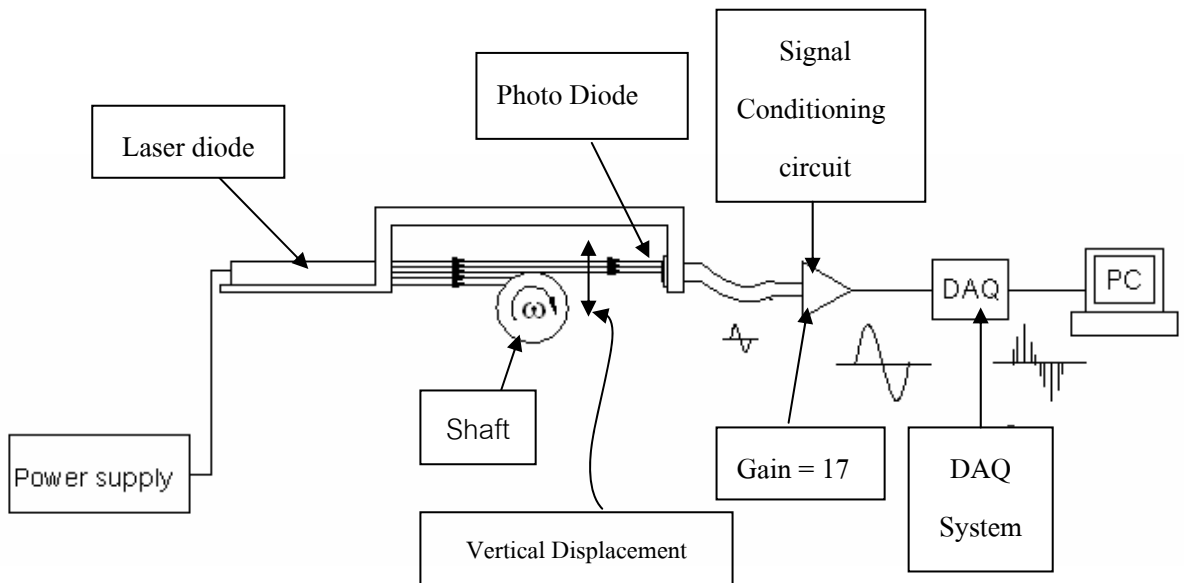
2.7.2 อุปกรณ์วัดสั่นสะเทือนด้วยวิธีการขวางกั้นลำแสง

อุปกรณ์การวัดการสั่นสะเทือนด้วยวิธีการขวางกั้นลำแสง [Chetpattananondh, K, 2005] เป็นการวัดการสั่นสะเทือนของระบบแบบไม่สัมผัสด้วยวิธีการขวางกั้นลำแสงดังรูปที่ 2.7 อาศัยหลักการที่ว่าเมื่อแสงถูกขวางกั้นโดยวัตถุ ความเข้มของแสงที่ไปตกกระทบยังอุปกรณ์ตรวจรับแสงจะเปลี่ยนแปลงไป ทำให้ค่าสัญญาณไฟฟ้าที่วัดได้จะเปลี่ยนแปลงตามไปด้วย ซึ่งสัญญาณไฟฟ้าที่ทำการวัดออกมาจะเป็นค่าของแรงดันไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลง สามารถประดิษฐ์นำมาใช้งานด้วยต้นทุนที่ต่ำใช้อุปกรณ์ที่หาซื้อได้ภายในประเทศ โดยมีอุปกรณ์หลักได้แก่ แหล่งกำเนิดลำแสงเป็นเลเซอร์ไดโอด (Laser Diode) อุปกรณ์ตรวจรับแสง (Photo detector) และ วงจรขยายสัญญาณ (Signal Conditioning circuit)



รูปที่ 2.7 หลักการของเครื่องวัดการสั่นสะเทือนด้วยวิธีการขวางลำแสงเลเซอร์

ดังนั้นเมื่อวัตถุสั่นสะเทือนไปขวางลำแสงที่ส่งผ่านไปยังอุปกรณ์ตรวจจับแสง ทำให้ความเข้มของแสงที่ตกกระทบเกิดการเปลี่ยนแปลงทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณไฟฟ้า ส่งผ่านไปยังอุปกรณ์ขยายสัญญาณ และอุปกรณ์แปลงสัญญาณไฟฟ้าที่เป็นแบบอนาล็อกให้เป็นสัญญาณดิจิทัลเพื่อเก็บข้อมูลและแสดงผลผ่านคอมพิวเตอร์ดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 การตรวจวัดสัญญาณการสั่นสะเทือนด้วยวิธีการขวางลำแสง [เสนห์, 2550]

บทที่ 3 วิธีการวิจัย

บทนี้จะกล่าวถึง วัสดุ อุปกรณ์และขั้นตอนในการทำวิจัย ซึ่งประกอบด้วย การทดสอบหาความแข็งแรง การทดสอบการสิ้นสละเทือนของล้อยางขณะรับภาระแรงกดและกลิ้งที่ความเร็วต่าง ๆ การตรวจสอบความสมมาตรของรูปทรงของยางชั้นในและความหนาแน่นของล้อยางเฉลี่ยตามแนวรัศมีที่มีผลต่อความสมดุลของล้อยางส่งผลต่อการสิ้นสละเทือน เปรียบเทียบล้อยางต้นที่ผลิตจากบริษัทอื่น ๆ และจากต่างประเทศ

3.1 วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย

วัสดุที่ใช้ในงานวิจัยนี้ได้แก่ล้อยางต้นสองชั้นขนาด 6.00-9 rim 4 มีลักษณะจำเพาะแสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ลักษณะจำเพาะของล้อยางต้นที่ใช้ในการทดสอบ

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

แบ่งเป็นกลุ่มตามยี่ห้อและกระบวนการผลิตได้ 9 กลุ่มได้แก่

กลุ่มที่ 1 กลุ่มเครื่องม้วนเก่า คือล้อยางต้นที่ผลิตโดยใช้เครื่องม้วนที่โรงงานใช้อยู่เดิมในการม้วนขึ้นรูปล้อยางก่อนกระบวนการอบ

กลุ่มที่ 2 กลุ่มเครื่องม้วนใหม่+พรีฟอร์ม คือล้อยางต้นที่ผลิตโดยใช้เครื่องม้วนที่คณะวิจัยและออกแบบมาใหม่ให้มีโครงสร้างที่แข็งแรง เพื่อปรับปรุงกระบวนการม้วนขึ้นรูปล้อยางร่วมกับกระบวนการพรีฟอร์มโดยทำการอัดเย็นก่อนการอบขึ้นรูปล้อ

กลุ่มที่ 3 กลุ่มเครื่องม้วนใหม่+พรีเคียว คือล้อยางต้นที่ผลิตโดยใช้เครื่องม้วนใหม่ร่วมกับกระบวนการพรีเคียว

กลุ่มที่ 4 กลุ่มเครื่องม้วนใหม่ คือล้อยางต้นที่ผลิตโดยใช้เครื่องม้วนแบบใหม่ม้วนขึ้นรูป

กลุ่มที่ 5 กลุ่มผลิตให้ไม่สมดุล คือล้อยางตันที่ตั้งใจผลิตให้ล้อยางเกิดความไม่สมดุลโดยการม้วนยางชั้นในซ้อนทับกันให้มีลักษณะเป็นเนินรอบแกนหมุนจากนั้นจึงพันทับด้วยยางชั้นนอกเพื่อใช้ในการเปรียบเทียบผลของล้อปกติและล้อผิดปกติจากความไม่สมดุลของเนื้อยาง

กลุ่มที่ 6-9 คือล้อยางตันที่มีขายอยู่ตามท้องตลาดเพื่อนำมาเปรียบเทียบกับล้อยางใน 5 กลุ่มแรก

ล้อยางตันที่ใช้ในการทดสอบสามารถแบ่งออกเป็นกลุ่ม ๆ ตามกระบวนการผลิตมีรายละเอียดดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 การแบ่งกลุ่มล้อยางตามกระบวนการผลิต

กลุ่ม	ยี่ห้อ	กระบวนการผลิต	หมายเลขล้อ	น้ำหนักเฉลี่ย (kg)
1	Pio-tyres	เครื่องม้วนเก่า	1,2,3	26.3
2	Pio-tyres	เครื่องม้วนใหม่+พรีฟอร์ม	4,11	26.6
3	Pio-tyres	เครื่องม้วนใหม่+พรีเคียว	5,10	26.5
4	Pio-tyres	เครื่องม้วนใหม่	7,9	26.6
5	Pio-tyres	ผลิตให้ไม่สมดุล	6,8	26.6
6	Bridgestone	ล้อมาตรฐาน	12,13,14	26.9
7	Bergougnan	ล้อมาตรฐาน	15,16,17	25.4
8	Tokai	ล้อมาตรฐาน	18,19,20	25.5
9	Komachi	ล้อมาตรฐาน	21,22,23	27.4

3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์

3.2.1 เครื่องทดสอบการสั่นสะเทือนของล้อยางตัน

3.2.2 กะทะล้อแบบสองซีก

3.2.3 อุปกรณ์ช่วยถอดประกอบกะทะล้อ

3.2.4 ไดอัลเกจ

3.2.5 เวอร์เนียคาลิปเปอร์

3.2.6 เครื่องมือวัดการสั่นสะเทือนแบบวิธีวางก้านลำแสง

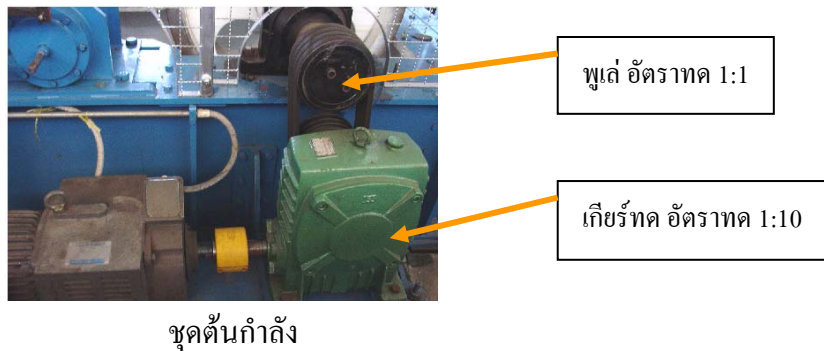
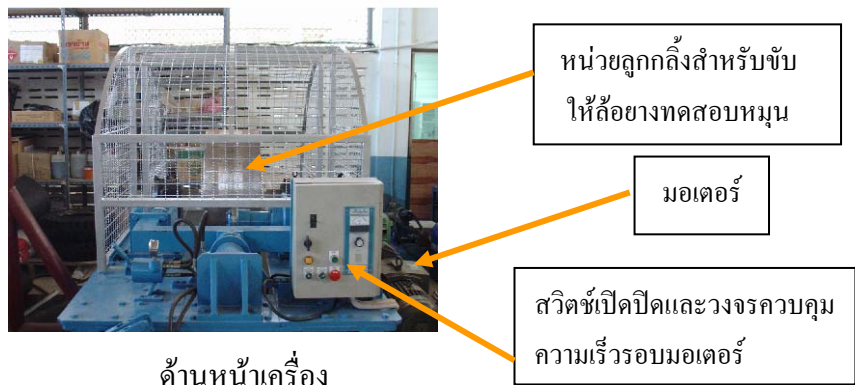
3.2.7 เครื่องชั่ง

3.3 เครื่องทดสอบการสั่นสะเทือนและการติดตั้งตัวอย่างต้น

การสั่นสะเทือนของตัวอย่างทดสอบโดยใช้เครื่องทดสอบตัวอย่างด้วยถนนจำลองโดยใช้ ลูกกลิ้ง (Drum Test) ออกแบบและสร้างขึ้นมาเฉพาะในงานวิจัยนี้ โดยมีแรงอัดกระทำต่อตัวอย่าง และหมุนไปตามความเร็วที่ต้องการทดสอบ ซึ่งเหมือนการทดสอบการใช้งานตัวอย่างขณะรับภาระจริง

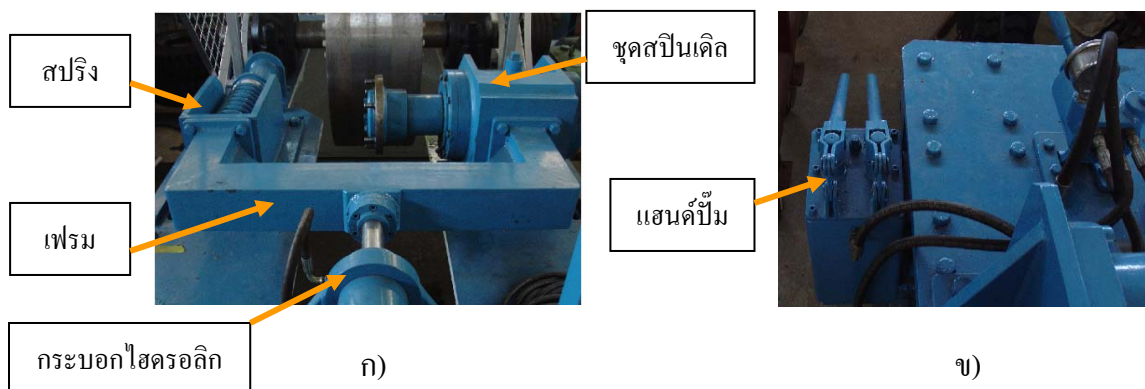
ฐานของเครื่องทดสอบการสั่นสะเทือนมีลักษณะเป็นกล่องขนาด กว้าง x ยาว x สูง เท่ากับ 1250 mm x 2500 mm x 690 mm ทำจากเหล็กแผ่นหนา 19 mm ออกแบบให้ถอดประกอบได้ บนฐานติดตั้งประกอบด้วยหน่วยที่สำคัญสองหน่วยได้แก่ หน่วยลูกกลิ้ง และหน่วยติดตั้งล้อทดสอบ

หน่วยลูกกลิ้งประกอบด้วยลูกกลิ้งโลหะขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 90 เซนติเมตร ลูกกลิ้งจะติดกับเพลาลูกขนาด 4 นิ้ว ด้วยลิ้มและยึดด้วยสเปนเซอร์ทั้งสองด้านเพื่อป้องกันการเลื่อนตัวในแนวแกนเพลาลูกกลิ้ง ปลายเพลาทิ้งสองด้านติดตั้งบนโรลเลอร์แบร์ริงและยึดติดกับฐาน ปลายเพลาช่างหนึ่งต่อกับเกียร์ทดเพื่อหมุนลูกกลิ้งดังรูปที่ 3.1 ใช้มอเตอร์แบบ AC Motor Gear ขนาด 10 แรงม้า ความเร็วรอบสูงสุด 1450 รอบต่อนาที ขับผ่านเกียร์ทดที่มีอัตราทด 1:10 ผ่านชุดพูลี่สายพานไปยังล้อขับ สามารถปรับความเร็วรอบของมอเตอร์ได้



รูปที่ 3.1 เครื่องทดสอบการสั่นสะเทือนของตัวอย่างต้น

หน่วยติดตั้งล้อทดสอบประกอบด้วย สปินเดิล (spindle) เฟรมควบคุมการกดอัดล้อยาง และชุดไฮดรอลิก (hydraulics) ดังรูปที่ 3.2 ชุดสปินเดิลทำหน้าที่สำหรับติดตั้งล้อทดสอบให้หมุนตามลูกกลิ้งประกอบด้วยเพลาล้อและตลับลูกปืนขนาด 100 mm รองรับเพลาล้อ โดยตลับลูกปืนด้านที่ติดกับล้อยางทดสอบจะใช้ตลับลูกปืนเม็ดโค้งสองแถว (spherical roller bearing) เพื่อรองรับการโก่งตัวของเพลาล้อ อีกด้านหนึ่งใช้ตลับลูกปืนเม็ดกลมร่องลึก (ball bearing) ชุดสปินเดิลจะเคลื่อนที่ตามแนวร่องที่เจาะไว้บนฐานเครื่อง โดยร่องที่เจาะจะต้องยาวพอเหมาะเพื่อให้ชุดสปินเดิลสามารถเคลื่อนที่เข้าออกได้ตามรัศมีของล้อยางที่ต่างกัน การเคลื่อนที่ของชุดสปินเดิลจะควบคุมโดยเฟรมควบคุมการกดอัดล้อยางซึ่งเป็นตัวส่งผ่านแรงจากกระบอกล้อไฮดรอลิกไปยังล้อยางทดสอบ บนเฟรมควบคุมการกดอัดด้านหนึ่งเป็นสปริงซึ่งมีค่าคงที่ของสปริงเท่ากับ 37,980 นิวตันต่อเมตร สปริงจะทำหน้าที่รักษาสมดุลของแรงขณะทำการกดอัดล้อยาง ช่วยในการลดการดัดบนเฟรมและการคำนวณแรงที่ล้อยางได้รับขณะถูกกดอัดอยู่ได้



รูปที่ 3.2 หน่วยติดตั้งล้อทดสอบ

ก) เฟรมเคลื่อนสำหรับกดอัดล้อยาง

ข) แอสต์ปั๊มและถังน้ำมันไฮดรอลิกสำหรับควบคุมแรงดันให้กับกระบอกล้อไฮดรอลิก

ชุดไฮดรอลิกทำหน้าที่ควบคุมการเคลื่อนที่เข้าออกของชุดสปินเดิลโดยกระบอกล้อไฮดรอลิกจะวางอยู่ตรงกลางของเฟรมและส่งแรงในแนวนอนผ่านเฟรมไปกระทำต่อฐานของชุดสปินเดิลและสปริง แรงนี้จะผ่านมายังล้อยางทำให้ล้อยางกดบนลูกกลิ้ง

การติดตั้งล้อบนเครื่องทดสอบจะใช้กระทะล้อสำหรับรถฟอร์คลิฟท์แบบ 2 ซีก (split wheel) ทำจากเหล็กแผ่นขึ้นรูป มีขายตามท้องตลาด ซึ่งใช้ได้สำหรับล้อแบบบรรจุลมและล้อแบบยางตัน ดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 กระทะล้อแบบสองซีก

ในการประกอบกระทะล้อเข้ากับล้อยางตันทำโดยนำกระทะล้อแต่ละซีกใส่จากแต่ละด้านของล้อยางตันและทำการอัดกระทะล้อให้เข้าไปในเส้นรอบวงด้านในของล้อยางด้วยแม่แรงไฮดรอลิก โดยอัดข้างใดข้างหนึ่งให้เข้าไปก่อนจนแน่น ดังรูปที่ 3.4 ก จากนั้นอัดกระทะล้อซีกที่เหลือเข้าไปในวงล้อด้านในโดยต้องให้รูที่ไว้สำหรับใส่สลักเกลียวให้ตรงกัน และทำการขันบีบให้กระทะล้อทั้งสองซีกบีบประกบกันสนิท ดังรูปที่ 3.4 ข ซึ่งใช้ทอร์คในการขันบีบ สำหรับล้อยางตันขนาด 6.00-9 ที่ช่วง 60 – 90 ปอนด์-ฟุต [TMC Corporation, 2000] โดยทำการขันบีบที่ 70 ปอนด์-ฟุต



ก)



ข)

รูปที่ 3.4 การประกอบล้อยางเข้ากับกระทะล้อ

ก) การอัดกระทะล้อเข้าไปยังวงในของล้อยาง

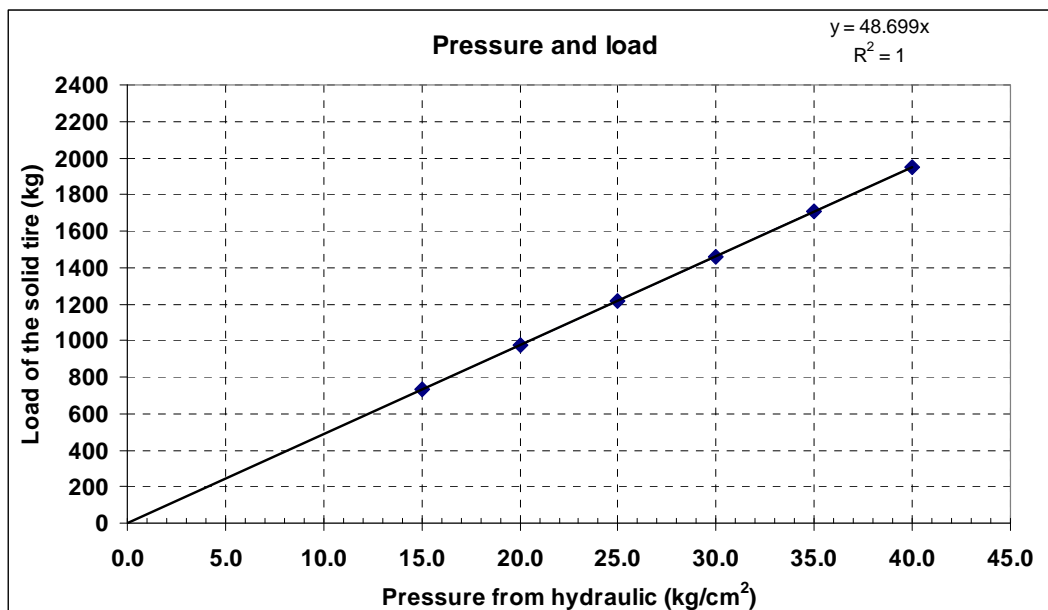
ข) การขันบีบกระทะล้อให้ประกบแน่น

การติดตั้งล้อยางตันบนเครื่องทดสอบการสิ้นเสเทือนจะติดตั้งตรงตำแหน่งดังรูปที่ 3.5 โดยใช้ทอร์คในการขันน็อตยึดล้อกับหน้าแปลนคูล้อ 80 ปอนด์-ฟุต ทำการอัดล้ออย่างให้ชนกับล้อจับ โดยใช้แรงอัดจากกระบอกไฮดรอลิก แรงอัดล้ออย่างจะใช้แรงอัดที่มีขนาดเท่ากับน้ำหนักของรถฟอร์คลิฟท์ทั่วไป ซึ่งน้ำหนักของตัวรถขณะไม่บรรทุกสิ่งของจะมีน้ำหนัก 3,800 กิโลกรัม สามารถรับน้ำหนักบรรทุกได้สูงสุด 2,500 กิโลกรัม ดังนั้นล้อยางตันแต่ละล้อจะรับน้ำหนักขณะไม่บรรทุกสิ่งของ เท่ากับ 950 กิโลกรัม และจะรับน้ำหนัก 1,575 กิโลกรัม เมื่อบรรทุกสิ่งของสูงสุด



รูปที่ 3.5 การติดตั้งล้อยางบนเครื่องทดสอบ

แรงอัดที่ใช้กดอัดล้ออย่างอ่านจากเกจวัดความดันที่ติดตั้งบนลิ้นควบคุมทิศทางซึ่งเป็นความดันของกระบอกไฮดรอลิก ซึ่งแรงดันที่อ่านได้จากเกจวัดความดันเทียบเป็นน้ำหนักกดล้อได้ดังรูปที่ 3.6 และแรงกดที่ใช้ในการทดสอบแสดงดังตารางที่ 3.3



รูปที่ 3.6 เปรียบเทียบแรงดันที่ใช้กดกับน้ำหนักที่กดอัดล้อ

ตารางที่ 3.3 แสดงค่าความสัมพันธ์ของความดันที่ใช้กับน้ำหนักที่ล้อยางได้รับขณะทำการกดอัด

$P_{\text{hydraulic}}$ (kg/cm ²)	Force _{tire} (kg)
15	734.4
20	974.0
25	1,217.5
30	1,461.0
35	1,704.5
40	1,946.4

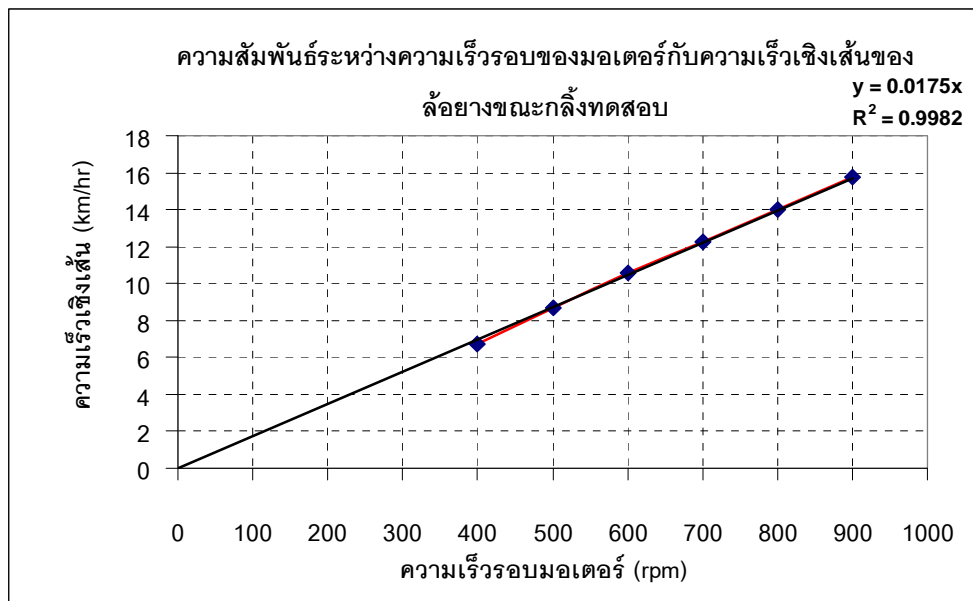
ความเร็วที่ใช้ในการทดสอบจะควบคุมโดยความเร็วรอบของมอเตอร์ผ่านเกียร์ทดอัตราทด 1:10 ใช้วงจรควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ปรับความเร็วรอบของมอเตอร์ให้ได้ตรงกับความเร็วเชิงเส้นที่ต้องการทดสอบคำนวณได้ตามสมการที่ 3.1 ซึ่งเป็นความเร็วที่ใช้งานของรถฟอร์คลิฟท์ตามความสัมพันธ์ดังรูปที่ 3.7

$$v = \left(\frac{2\pi n}{60} R\right) \quad (3.1)$$

v = ความเร็วเชิงเส้นของล้อยาง (กิโลเมตรต่อชั่วโมง)

n = ความเร็วรอบวัตต์ที่เพลาล้อ (รอบต่อนาที)

R = รัศมีของล้อยางตัน (เมตร)

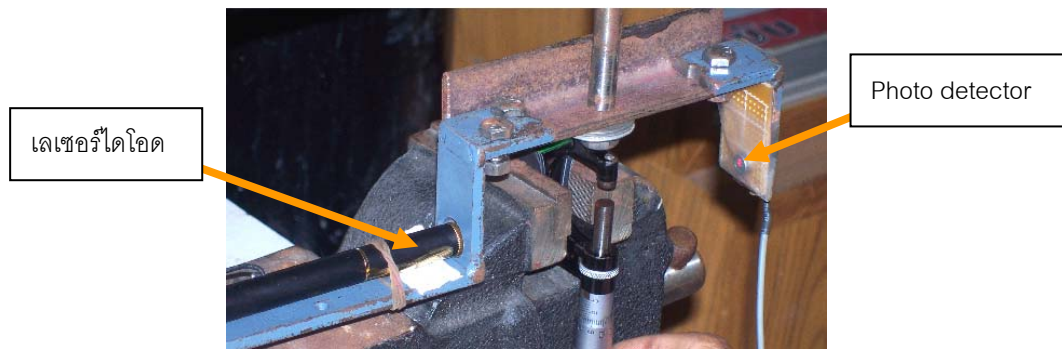


รูปที่ 3.7 เปรียบเทียบความเร็วรอบของมอเตอร์และความเร็วเชิงเส้นของล้อยางขณะกำลัง

3.4 อุปกรณ์วัดการสั่นสะเทือนด้วยวิธีการขวางกั้นลำแสง

อุปกรณ์ในการวัดการสั่นสะเทือนด้วยวิธีการขวางกั้นลำแสงมีส่วนประกอบดังต่อไปนี้

1. แหล่งกำเนิดแสงจะใช้เลเซอร์ไดโอด 1 มิลลิวัตต์ ที่มีความกว้างของลำแสง 3 มิลลิเมตร และมีค่าความยาวคลื่นของลำแสงเท่ากับ 670 นาโนเมตร ดังรูปที่ 3.8

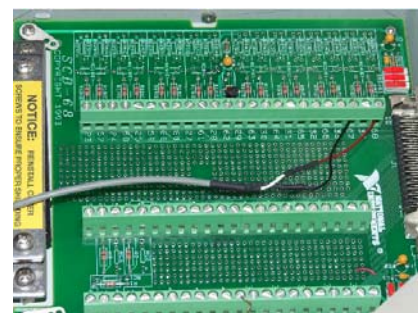


รูปที่ 3.8 อุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดการสั่นสะเทือนด้วยวิธีการขวางกั้นลำแสง

2. อุปกรณ์ตรวจจับแสง (Photo detector) ที่ใช้มีแถบความถี่ 100 kHz ดังรูปที่ 3.8
3. วงจรแปลงสัญญาณจากการสั่นสะเทือนเป็นสัญญาณไฟฟ้า (Signal Conditioning Circuit) ดังรูปที่ 3.9 ก มีอัตราขยายสัญญาณ 17 เท่าส่งสัญญาณผ่านระบบแปลงสัญญาณ Data Acquisition system (DAQ) ดังรูปที่ 3.9 ข ไปยังโปรแกรมคอมพิวเตอร์ประมวลผล และแสดงผลแอมพลิจูดของการสั่นสะเทือนให้อยู่ในรูปกราฟฟังก์ชันของเวลา และฟังก์ชันของความถี่ สามารถบันทึกค่าเป็นตัวเลขให้อยู่ในแฟ้มข้อมูลคอมพิวเตอร์



ก)



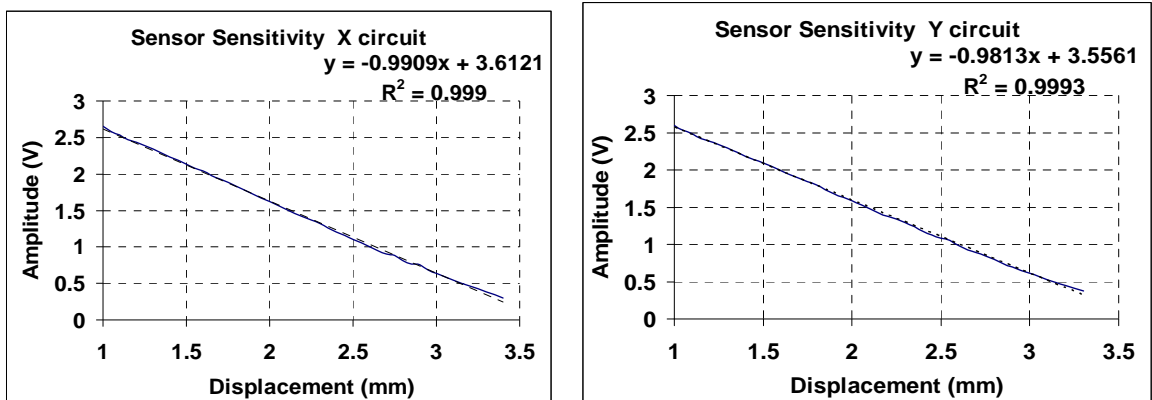
ข)

รูปที่ 3.9 อุปกรณ์รับสัญญาณจากชุดอุปกรณ์ตรวจจับแสง

- ก) อุปกรณ์แปลงสัญญาณการสั่นสะเทือนเป็นสัญญาณไฟฟ้า (Signal Conditioning Circuit)

- ข) อุปกรณ์รับสัญญาณไฟฟ้าเข้าสู่ระบบประมวลผล (DAQ System)

ในการเปรียบเทียบเครื่องมือวัดการสั่นสะเทือนด้วยวิธีวางกั้นลำแสงเพื่อตรวจสอบความเป็นเชิงเส้นของสัญญาณที่วัดออกมาได้นั้น ทำโดยใช้ไมโครมิเตอร์วัดระยะที่ลำแสงถูกขวาง โดยทำการปรับเลื่อนตำแหน่งของปลายไมโครมิเตอร์ให้เลื่อนขึ้นไปบังลำแสง ครั้งละ 0.1 มิลลิเมตร จะทำให้ความเข้มของแสงที่อุปกรณ์ตรวจรับแสง (photo detector) เปลี่ยนแปลง ทำการบันทึกค่าสัญญาณไฟฟ้าที่ได้เป็นโวลต์ปรับเลื่อนปลายไมโครมิเตอร์ขึ้นจนลำแสงถูกบังหมด นำข้อมูลที่ได้มาพล็อตกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะบังแสงที่เพิ่มขึ้น ได้รับความสัมพันธ์ดังรูปที่ 3.10



ก)

ข)

รูปที่ 3.10 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะบังแสงที่เพิ่มขึ้นกับค่าสัญญาณไฟฟ้าที่ได้จากอุปกรณ์ตรวจรับแสง [เสนห์, 2550]

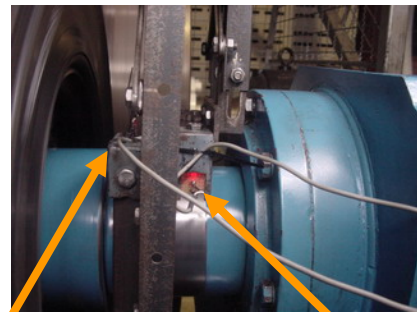
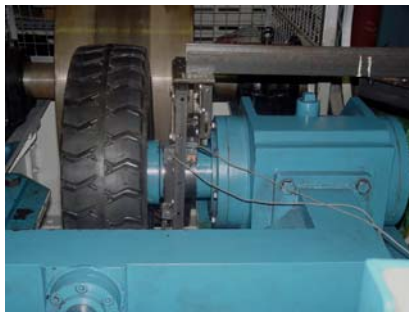
ก) วงจรวัดการสั่นสะเทือนตามแนวแกนนอน

ข) วงจรวัดการสั่นสะเทือนตามแนวแกนตั้ง

จากกราฟจะเห็นได้ว่า ความสัมพันธ์ที่ได้จะเป็นแบบเชิงเส้น ซึ่งเมื่อทำการกำหนดสมการเส้นแนวโน้มได้สมการเส้นตรงที่มีความชันเท่ากับ -0.99 ทั้งในวงจรที่ใช้วัดการสั่นสะเทือนในแนวนอนและวงจรวัดการสั่นสะเทือนแนวตั้ง แสดงว่าเมื่อระยะที่แสงถูกบังไป 1 มิลลิเมตร สัญญาณไฟฟ้ามีการเปลี่ยนแปลงลดลงไปเท่ากับ 1 โวลต์ และจะมีช่วงในการวัดสัญญาณอยู่ในช่วง 1 mm ตรงตำแหน่งกึ่งกลางของลำแสงที่ส่องผ่าน นั่นคือ ถ้าวัตถุมีการสั่นสะเทือนไม่เกิน 1 mm (ในช่วง ± 0.5 mm จากตำแหน่งกึ่งกลางของลำแสง) เครื่องมือวัดนี้สามารถตรวจวัดได้ [เสนห์, 2550]

3.5 การติดตั้งอุปกรณ์วัดการสั่นสะเทือนของล้อยางต้น

การใช้อุปกรณ์วัดการสั่นสะเทือนด้วยวิธีวางกั้นลำแสงจะให้ลำแสงของเลเซอร์ไดโอดส่องผ่านเพลลา ดังนั้นตำแหน่งในการติดตั้งอุปกรณ์วัดการสั่นสะเทือนจะติดตั้งที่เพลลา คือ และวัดการสั่นสะเทือนของเพลลาแบบ 2 แกนพร้อมกัน คือ 1) แกน x ขนานกับพื้นระดับซึ่งกำหนดให้เป็นแนวรับน้ำหนักบรรทุกของล้อยางและ 2) แกน y ตั้งฉากกับพื้นระดับ ดังรูปที่ 3.11 และเก็บค่าสัญญาณการสั่นสะเทือนด้วยคอมพิวเตอร์



Sensor in horizontal

Sensor in vertical

รูปที่ 3.11 ตำแหน่งในการติดตั้งอุปกรณ์วัดการสั่นสะเทือนของเพลลา

3.6 ขั้นตอนและวิธีวิจัย

การวิจัยเรื่องการสั่นสะเทือนของล้อยางต้นสองประกอบด้วย 4 กิจกรรมหลัก คือ

3.6.1 กิจกรรมที่ 1 การทดสอบหาค่าความแข็งตึงของล้อยางต้นขณะล้อไม่หมุน

วัตถุประสงค์

1. เพื่อหาแนวโน้มการกระจายของความแข็งตึงของล้อยางในแนวรัศมีที่มุมต่าง ๆ ตามแนวเส้นรอบวงของล้อยางต้นขณะล้อไม่หมุน โดยการกดอัดบนเครื่องทดสอบการสั่นสะเทือน
2. เพื่อเป็นข้อมูลในการประกอบการในการทำนายพฤติกรรมการสั่นสะเทือนของล้อยาง

ขั้นตอนการทดสอบหาค่าความแข็งดึงของล้อยางต้นขณะล้อไม่หมุน

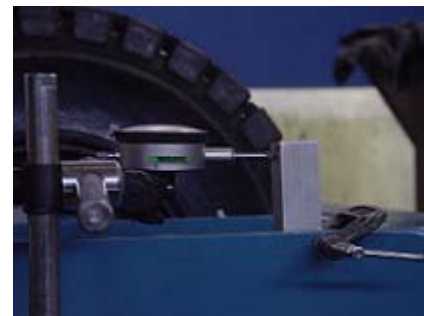
การหาค่าความแข็งดึงของล้อยางต้นขณะอยู่นิ่งที่มุมต่าง ๆ จากการกดอัดล้อยางทดสอบให้ไปสัมผัสกับล้อขับซึ่งมีวิธีการทดสอบดังนี้

1. แบ่งตำแหน่งล้อยางต้นทดสอบตามแนวเส้นรอบวงออกเป็น 16 ส่วนเท่า ๆ กัน (ลุ่มตำแหน่งเริ่มต้น) ซึ่งจะมีความยาวของช่วงที่ล้อยางสัมผัสกับล้อขับสูงสุด เท่ากับ 10.2 เซนติเมตรรับน้ำหนักกดอัดสูงสุดที่ 2,000 กิโลกรัม

2. ติดตั้งล้อยางทดสอบบนเครื่องทดสอบการสั่นสะเทือน

3. ทำการหมุนนวดล้อยางทดสอบ โดยการให้ล้อยางถูกกดคลึงบนล้อขับใช้แรงดันไม่มากในการกดอัดที่ 20 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ให้หมุนที่ความเร็วรอบ 300 รอบต่อนาที ทำการเดินเครื่องเป็นเวลา 20 นาทีแล้วปลดแรงออก เป็นการอุ่นให้ล้อยางปรับความแข็งเริ่มต้น

4. ติดตั้งไดอัลเกจ (Dial Gauge) เพื่อวัดระยะยุบของสปริงและระยะยุบของล้อยางตามตำแหน่งดังรูป 3.12 และรูปที่ 3.13



รูปที่ 3.12 การติดตั้งเกจวัดระยะเพื่อวัดระยะยุบของสปริง



รูปที่ 3.13 การติดตั้งเกจวัดระยะเพื่อวัดระยะยุบของล้อยาง

5. ทำการกดอัดตัวอย่างให้ตัวอย่างยุบตัว โดยทำการกดอัดด้วยแรงดันเริ่มต้น 15 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตรปรับค่าเริ่มต้นของเกจวัดระยะทั้งสองตัว บันทึกค่าระยะหดของสปริง และระยะยุบของตัวอย่าง โดยอ่านค่าจากไดอัลเกจ เปลี่ยนแปลงน้ำหนักที่ใช้ในการกดอัดตัวอย่างให้อยู่ระหว่าง 1,000 กิโลกรัม ถึง 2,000 กิโลกรัม โดยจะควบคุมที่ เกจวัดความดัน ของกระบอกไฮดรอลิก ใช้ความดันที่ 25 30 35 และ 40 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตรตามลำดับ ซึ่งตัวอย่างจะได้รับน้ำหนักกดที่ 974 1,217 1,461 1,704 และ 1,946 กิโลกรัมตามลำดับ ทำการกดอัดและบันทึกค่าระยะยุบจนครบทั้ง 16 ตำแหน่ง

6. ทดสอบตัวอย่างตัวอย่างละ 3 ครั้งและทดสอบตัวอย่างทั้งหมด โดยการทดสอบครั้งถัดไปจะทำการถอดกะทะลื้อออกจากตัวอย่างต้นและพักไว้อย่างน้อย 24 ชั่วโมงเพื่อให้คลายตัว แล้วนำผลการทดสอบมาหาค่าระยะยุบเฉลี่ยในแต่ละตำแหน่ง

7. นำค่าระยะยุบของยาง และ สปริงเนื่องจากกระบอกไฮดรอลิกกดอัดที่แต่ละตำแหน่ง มาคำนวณหาค่าแรงกดอัดที่ลื้อได้รับโดยคำนวณแรงที่สปริงด้านการกดอัดจากกระบอกไฮดรอลิกแล้วนำมาหักลบกับแรงที่กระบอกไฮดรอลิกกดอัด จะได้แรงที่กดอัดตัวอย่างนำค่าระยะยุบของลื้อและแรงที่กดอัดลื้อมาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะยุบของลื้อและแรงกดอัดที่ลื้อได้รับตามที่ได้อธิบายไปแล้วในหัวข้อที่ 2.1

3.6.2 กิจกรรมที่ 2 การทดสอบการสันสะท้อนของลื้อขณะถูกกดกลิ้ง

วัตถุประสงค์ของการทดสอบเพื่อนำข้อมูลไปวิเคราะห์ถึงสาเหตุของการสันสะท้อนที่มากขึ้นน้อยต่างกันเปรียบเทียบกับตัวอย่างตัวอย่างที่ต่างกัน และศึกษาความแตกต่างของพฤติกรรมการสันสะท้อนของลื้อยงต้นก่อนการปรับปรุงยางชั้นในให้มีสมำเสมอ โดยใช้เครื่องมือยางแบบเก่าแบบใหม่ และลื้อยงต้นหลังปรับปรุงชั้นในให้มีสมำเสมอด้วยกระบวนการพรีฟอร์มกับ พรีเคียว และลื้อยงต้นที่มีขายทั่วไปตามท้องตลาด

ทำการทดสอบลื้อตัวอย่างโดยการกดกลิ้งบนเครื่องทดสอบการสันสะท้อนแบบ Road Test ซึ่งลื้อยง 1 ลื้อจะรับน้ำหนัก 950 กิโลกรัมขณะไม่บรรทุกสิ่งของ และ 1,575 กิโลกรัมขณะบรรทุกสิ่งของสูงสุด โดยจะทำการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักที่ใช้ในการกดอัดลื้อยงให้อยู่ระหว่าง 1,000 กิโลกรัม ถึง 1,700 กิโลกรัม ควบคุมแรงกดที่เกจวัดความดันของกระบอกไฮดรอลิก ใช้ความดันที่ 20 25 30 และ 35 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ตามลำดับ และเปลี่ยนแปลงความเร็วรอบในการกลิ้งของลื้อยง โดยควบคุมจากความเร็วรอบของมอเตอร์ให้ลื้อยงทดสอบหมุนกลิ้งที่ความเร็วเชิงเส้นระหว่าง 5 – 16 กิโลเมตรต่อชั่วโมง ซึ่งเป็นความเร็วในช่วงที่ใช้งานของรถฟอร์คลิฟท์

ขั้นตอนการทดสอบการสั่นสะเทือนของล้อยางตัน

1. ติดตั้งล้อยางตันเข้ากับเครื่องทดสอบการสั่นสะเทือน
2. ติดตั้งอุปกรณ์วัดการสั่นสะเทือน ต่อวงจรแปลงสัญญาณ และเลเซอร์ไดโอดเข้ากับแหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้า
3. ทำการหมุนนวดล้อยางทดสอบ โดยการให้ล้อยางถูกกดกลิ้งบนล้อยับ ใช้แรงดันในการกดอัด 20 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ควบคุมความเร็วรอบของล้อยับให้หมุนที่ความเร็วรอบ 300 รอบต่อนาที ทำการเดินเครื่องเป็นเวลา 20 นาที แล้วปลดแรงออก
4. เปลี่ยนชุดเฟรมควบคุมแรงอัดล้อยางโดยใช้แรงอัดจากกระบอกไฮดรอลิกกดอัดล้อยางทดสอบให้แนบกับล้อยับ จะเปลี่ยนแปลงความดันที่ใช้ในการทดสอบ 20 25 30 และ 35 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ตามลำดับ
5. ขั้นตอนดังรูปที่ 3.14 ยึดฐานทั้งด้านของสปริงและล้อยางเพื่อให้เฟรมอยู่กับที่



น็อตยึดเฟรมด้านสปริง



น็อตยึดเฟรมด้านล้อยางทดสอบ

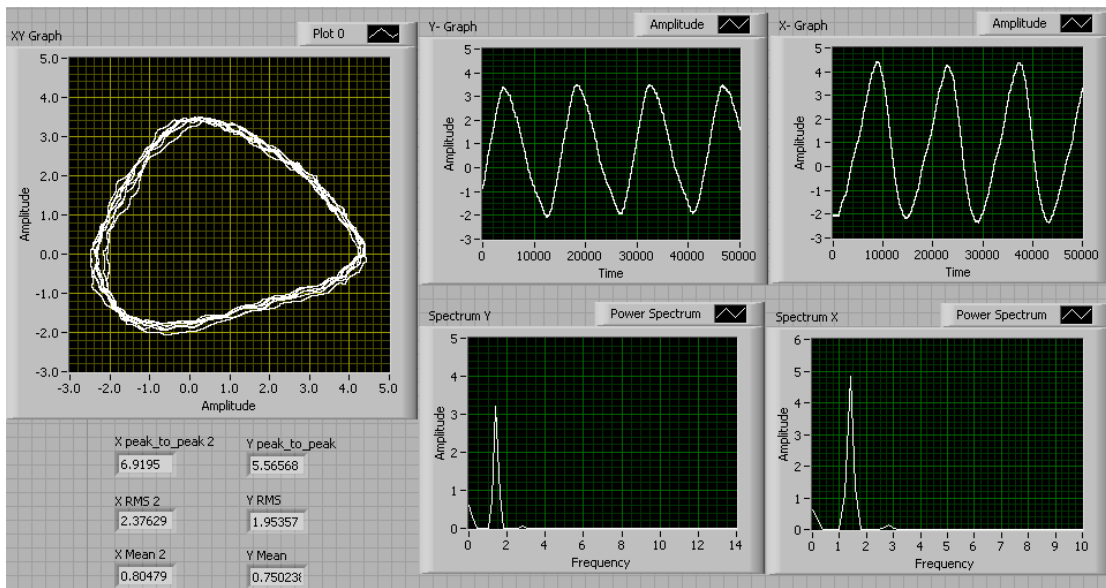
รูปที่ 3.14 ตำแหน่งของน็อตยึดเฟรมควบคุมแรงอัดล้อยาง

7. ทำการปรับเลื่อนชุดหัววัดการสั่นสะเทือนให้เพลาล้อบังลำแสงของเลเซอร์ไดโอดครึ่งหนึ่งของลำแสงที่ส่องเต็มโดยอ่านค่าจากโวลท์มิเตอร์
8. สตาร์ทมอเตอร์และค่อย ๆ ปรับความเร็วรอบของมอเตอร์จนกระทั่งถึงความเร็วใช้งาน ระหว่าง 5 – 16 กิโลเมตรต่อชั่วโมง ดังตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.4 ค่าความเร็วรอบของมอเตอร์ที่ใช้ในการทดสอบเทียบกับความเร็วเชิงเส้นขณะล้อยิ่ง

ความเร็วรอบมอเตอร์ rpm	ความเร็วเชิงเส้นของล้อขณะล้อยิ่ง km/hr
400	6.69
500	8.67
600	10.57
700	12.22
800	14.02
900	15.76

9. บันทึกข้อมูลโดยใช้ผ่านคอมพิวเตอร์ ดังตัวอย่างในรูปที่ 3.15

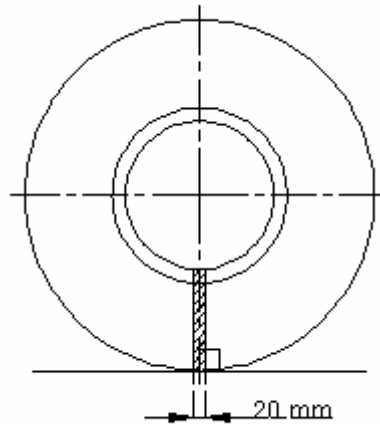


รูปที่ 3.15 ตัวอย่างการบันทึกผลด้วยคอมพิวเตอร์

3.6.3 กิจกรรมที่ 3 การตรวจสอบการกระจายตัวของรูปทรงของยางชั้นใน

วัตถุประสงค์เพื่อตรวจสอบความสม่ำเสมอของการกระจายรูปทรงของยางชั้นในของล้ออย่างตัวอย่างซึ่งส่งผลต่อค่าความแข็งดิ่งรอบแกนหมุนและการสั่นสะเทือน

นำล้อยางต้นที่ผ่านการทดสอบในกิจกรรมที่ 1 และ 2 แล้ว โดยเลือกล้อที่ดีที่สุดของแต่ละกลุ่มกระบวนการผลิต ซึ่งล้อที่ดีหมายถึงล้อที่มีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของระยะยวบที่น้อยและผลการสั่นสะเทือนต่ำนำมาตัดตามแนวรัศมีให้มีความหนาประมาณ 2 เซนติเมตร ดังรูปที่ 3.16



รูปที่ 3.16 แนวการตัดตัวอย่างเพื่อตรวจสอบการกระจายรูปทรงของยางชั้นใน

ขั้นตอนการตรวจวัดความสมมาตรของหน้าตัดยางชั้นใน

1. นำหน้าตัดของล้อทดสอบมาขีดเส้นแบ่งเป็น 2 ส่วน และใช้เครื่องกลมแบ่งมุมละ 10 องศาขีดเส้นตามแนวรัศมีที่ได้แบ่งไว้และกำหนดให้มุมที่อยู่ด้านขวามือเป็นมุมค่าบวก (10 องศา ถึง 80 องศา) ด้านซ้ายมือเป็นมุมค่าลบดังรูปที่ 3.17 ก

2. ใช้เวอร์เนียวัดระยะจากจุดศูนย์กลางอ้างอิงถึงขอบยางชั้นใน ตามตำแหน่งต่าง ๆ ดังรูปที่ 3.17 ข และบันทึกค่าระยะที่ได้



ก



ข

รูปที่ 3.17 การวัดระยะการกระจายตัวของยางชั้นในบนหน้าตัดตัวอย่าง

3. หาผลต่างของระยะที่ตำแหน่งมุมตรงข้าม เช่น ตำแหน่งมุม +10 กับ -10 และ +20 กับ -20 จนครบทั้งหน้าตัดแล้วหาค่าเฉลี่ยของผลต่างในหน้าตัดนั้น ๆ

4. นำผลต่างเฉลี่ยที่ได้ในในแต่ละหน้าตัดมาหาค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน จะได้ค่าเฉลี่ยหนึ่งค่า ต่อหนึ่งล้อ

5. นำค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานที่ได้ มาแสดงด้วยกราฟ

3.6.4 กิจกรรมที่ 4 การตรวจสอบความหนาแน่นเฉลี่ยรอบวงล้อ

วัตถุประสงค์เพื่อศึกษาถึงความสัมพันธ์ระหว่างการกระจายตัวของรูปทรงของยางชั้นในกับความหนาแน่นตลอดเส้นรอบวงของล้อยาง ที่ส่งผลต่อการสิ้นสະเทือน

นำชิ้นยางที่ตัดไว้ในกิจกรรมที่ 3 มาหาความหนาแน่นของชิ้นยางด้วยวิธีการแทนที่น้ำ หาค่าเฉลี่ยของความหนาแน่นและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของล้อตัวอย่างแล้วนำมาเปรียบเทียบกันระหว่างกระบวนการผลิตและความสัมพันธ์กับการกระจายรูปทรงของยางชั้นในและการสิ้นสະเทือน

บทที่ 4

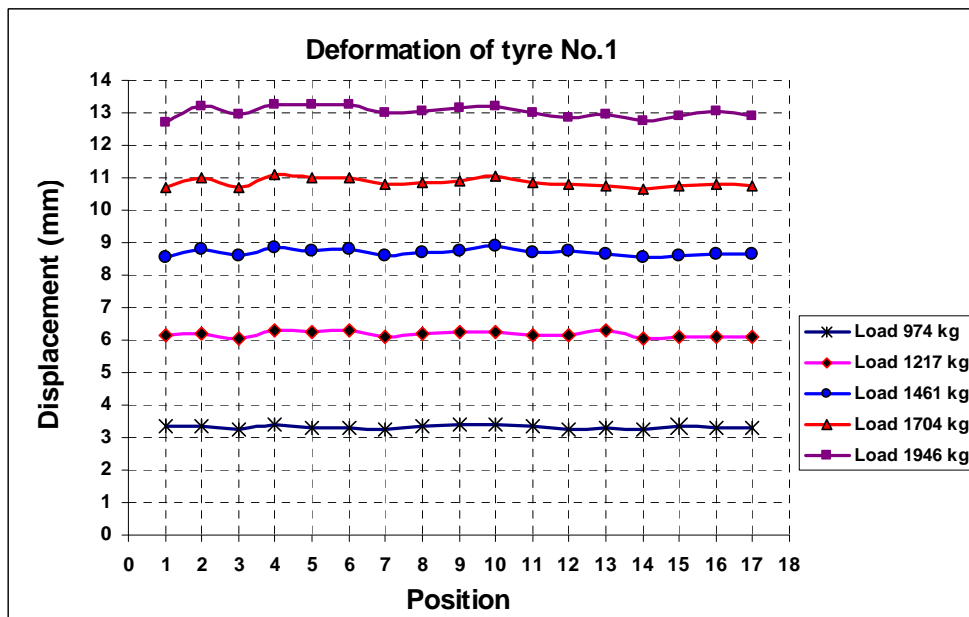
ผลการทดลอง

ผลการทดสอบความแข็งแรงดึงรอบแกนหมุนของล้อยางตัน โดยการวัดระยะยุบเมื่อล้อยางได้รับแรงกดขนาดต่าง ๆ และผลการทดสอบการสันสะท้อนของล้อยางโดยการวัดการสันสะท้อนของแกนเพลาคด้วยวิธีการวางกั้นลำแสงมีดังนี้

4.1 ผลการทดสอบความแข็งแรงดึงรอบแกนหมุนของล้อยางตัน

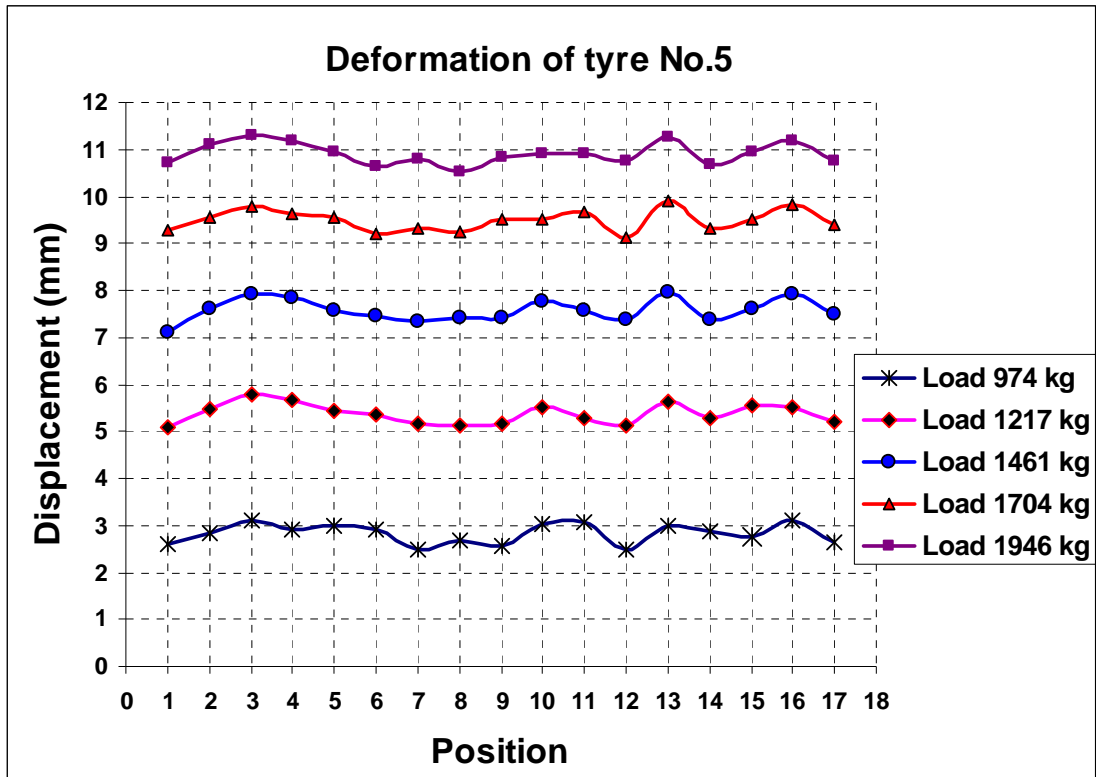
4.1.1 ผลการทดสอบการยุบตัวของล้อยางตันที่สถานะสถิตย์หยุดนิ่ง

จากการทดสอบล้อยางตันตัวอย่างจำนวน 23 ล้อ ได้ความสัมพันธ์ระหว่างระยะยุบของล้อยางเมื่อใช้แรงกดอัดค่าต่าง ๆ กับตำแหน่งของล้อยางรอบแกนหมุนดังรูปที่ 4.1-4.5 (รายละเอียดของล้ออื่น ๆ อยู่ในภาคผนวก)



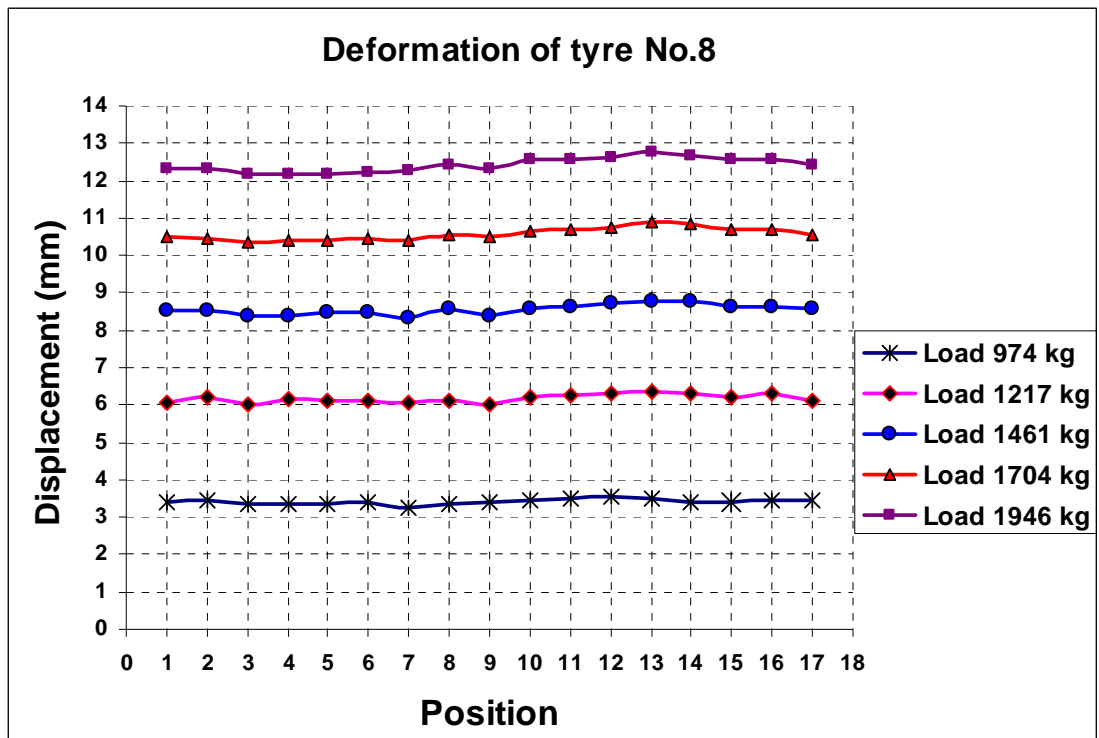
Load (kg)	974	1,217	1,461	1,704	1,946
SD	0.05	0.08	0.10	0.13	0.16
Max	3.393	6.318	8.910	11.106	13.267
Min	3.240	6.054	8.535	10.648	12.703
Max-Min	0.153	0.264	0.375	0.458	0.564
mean	3.319	6.174	8.703	10.850	13.023

รูปที่ 4.1 แสดงระยะยุบตัวของล้อยางตัวอย่าง 1 ที่แรงกระทำต่าง ๆ



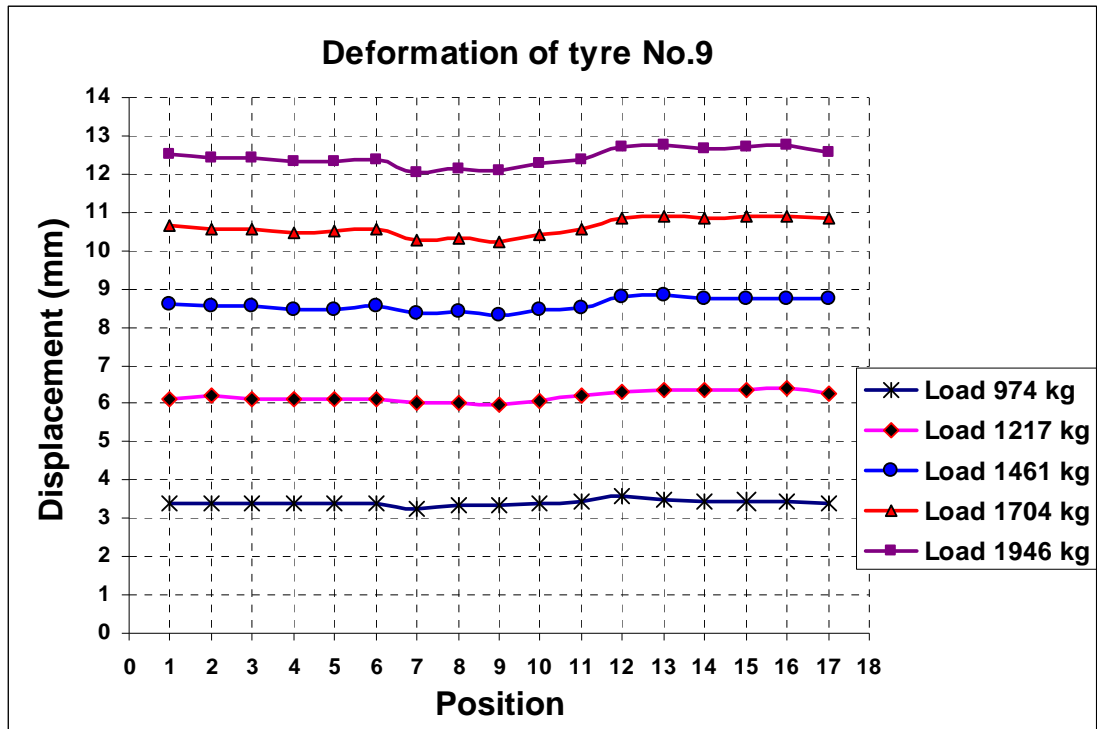
Load (kg)	974	1,217	1,461	1,704	1,946
SD	0.21	0.21	0.23	0.22	0.22
Max (mm)	3.117	5.769	7.949	9.894	11.303
Min (mm)	2.473	5.097	7.125	9.133	10.543
Max-Min (mm)	0.644	0.672	0.824	0.761	0.760
Mean (mm)	2.826	5.375	7.578	9.492	10.917

รูปที่ 4.2 แสดงระยะยุบตัวของล้อยางตัวอย่าง 5 ที่แรงกระทำต่าง ๆ



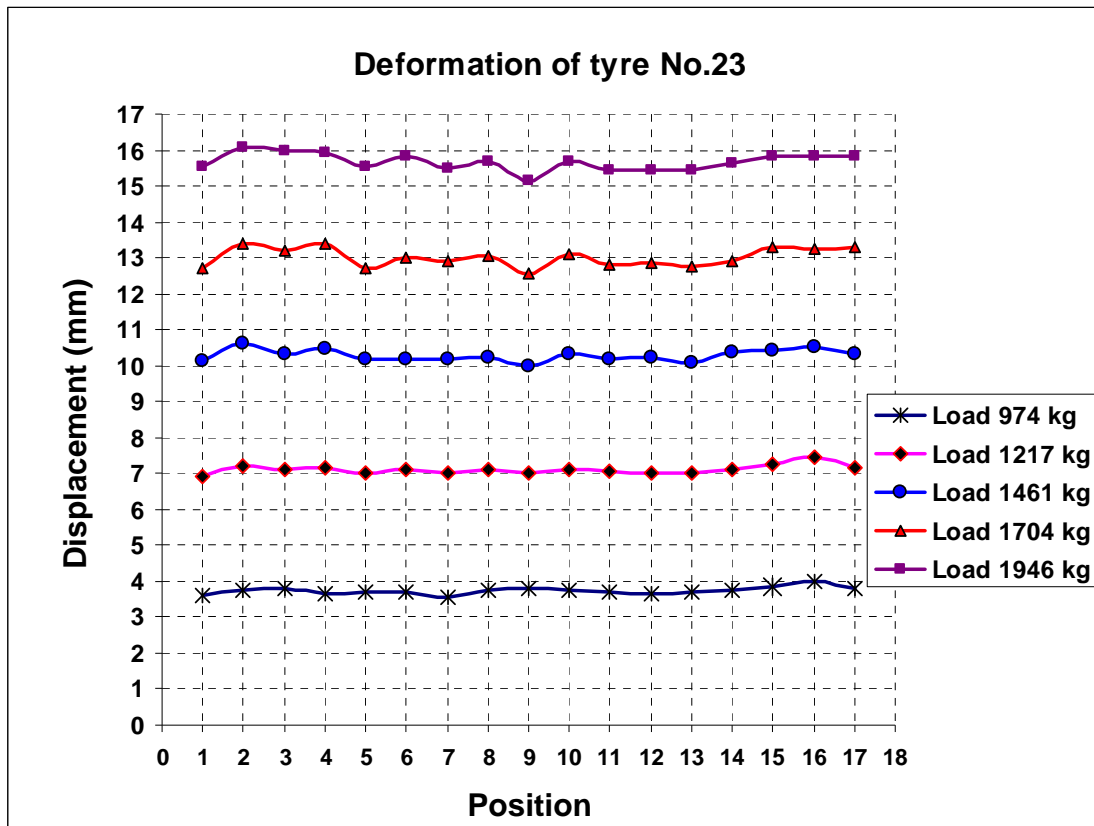
Load (kg)	974	1,217	1,461	1,704	1,946
SD	0.06	0.10	0.13	0.16	0.18
Max (mm)	3.541	6.368	8.788	10.871	12.769
Min (mm)	3.272	6.024	8.308	10.343	12.189
Max-Min (mm)	0.269	0.344	0.479	0.528	0.580
Mean (mm)	3.415	6.177	8.548	10.574	12.427

รูปที่ 4.3 แสดงระยะยุบตัวของล้อยางตัวอย่าง 8 ที่แรงกระทำต่าง ๆ



Load (kg)	974	1,217	1,461	1,704	1,946
SD	0.06	0.13	0.16	0.22	0.22
Max (mm)	3.564	6.420	8.859	10.910	12.757
Min (mm)	3.270	5.980	8.314	10.240	12.044
Max-Min (mm)	0.294	0.440	0.546	0.669	0.712
Mean (mm)	3.415	6.190	8.581	10.605	12.434

รูปที่ 4.4 แสดงระยะขยุบตัวของล้อยางตัวอย่าง 9 ที่แรงกระทำต่าง ๆ



Load (kg)	974	1,217	1,461	1,704	1,946
SD	0.10	0.12	0.16	0.25	0.24
Max (mm)	3.972	7.468	10.617	13.412	16.084
Min (mm)	3.538	6.910	9.963	12.588	15.153
Max-Min (mm)	0.435	0.558	0.654	0.824	0.931
Mean (mm)	3.732	7.110	10.281	13.017	15.670

รูปที่ 4.5 แสดงระยะยุบตัวของล้อยางตัวอย่าง 23 ที่แรงกระทำต่าง ๆ

ค่าระยะยุบของสปริง (ΔX_{spring}) จะมีค่าไม่เท่ากับค่าระยะยุบของล้อยางที่สัมผัสกับล้อขับ (ΔX_{tire}) ซึ่งวัดโดยใช้ไดอัลเกจ B ดังรูปที่ 2.1 ก โดยค่าระยะยุบของสปริงจะมีค่ามากกว่าค่าระยะยุบของล้อยางทดสอบ เนื่องจากเนื้อยางของล้อยางต้นมีความแข็งมากกว่าสปริง จึงเกิดการยุบตัวได้น้อยกว่า ซึ่งแรงที่กระทำต่อล้อยางจะถูกถ่ายไปยังเพลาล้อส่วนหนึ่ง ค่าความแข็งตั้งที่ได้จากแรงกระทำต่อล้อยางจึงอาจจะเป็นค่าความแข็งตั้งรวมของล้อยางและเพลาล้อ

ตารางที่ 4.1 ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าระยะยุบของล้อยางตันทดสอบ

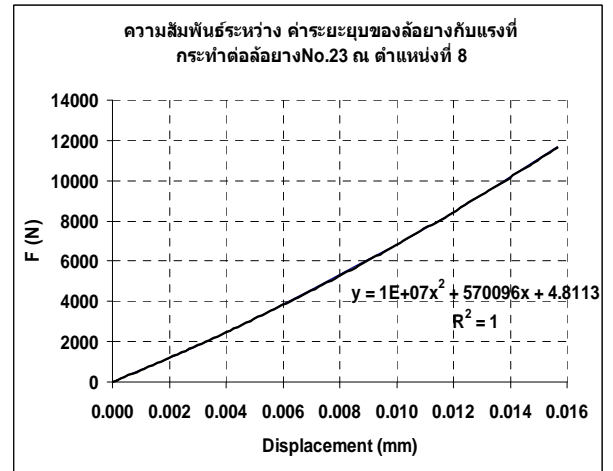
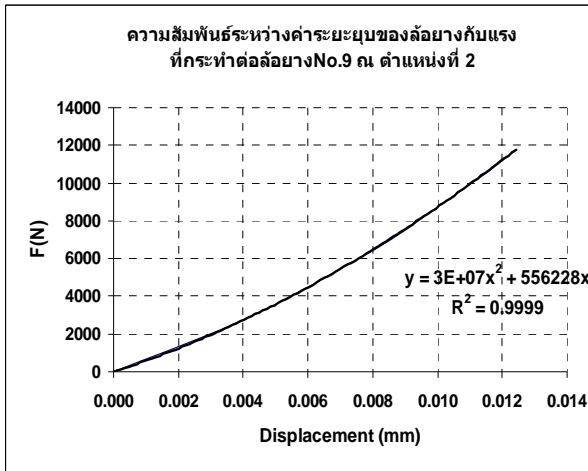
Tyre NO.	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน				
	Load 974 kg	Load 1217 kg	Load 1461 kg	Load 1,704 kg	Load 1,946 kg
1	0.05	0.08	0.10	0.13	0.16
2	0.06	0.09	0.12	0.14	0.13
3	0.05	0.05	0.08	0.11	0.12
4	0.06	0.16	0.25	0.30	0.28
5	0.21	0.21	0.23	0.22	0.22
6	0.18	0.20	0.20	0.28	0.39
7	0.21	0.27	0.29	0.31	0.35
8	0.06	0.10	0.13	0.16	0.18
9	0.06	0.13	0.16	0.22	0.22
10	0.15	0.28	0.36	0.43	0.46
11	0.05	0.15	0.18	0.21	0.23
12	0.04	0.09	0.10	0.16	0.12
13	0.09	0.09	0.12	0.13	0.14
14	0.10	0.18	0.22	0.23	0.26
15	0.06	0.11	0.10	0.08	0.14
16	0.05	0.05	0.07	0.11	0.13
17	0.08	0.08	0.12	0.16	0.19
18	0.10	0.13	0.16	0.16	0.17
19	0.07	0.08	0.07	0.08	0.13
20	0.05	0.13	0.22	0.17	0.17
21	0.09	0.11	0.12	0.14	0.13
22	0.11	0.11	0.12	0.10	0.14
23	0.10	0.12	0.16	0.25	0.24

จากตารางที่ 4.1 จะพบว่าล้อยางตัวอย่างจะมีความไม่สม่ำเสมอของระยะยุบตลอดเส้นรอบวงล้อและเมื่อล้อยางได้รับแรงกดมากขึ้นความไม่สม่ำเสมอของค่าระยะยุบจะเปลี่ยนแปลง ล้อยางที่มีความสม่ำเสมอของการยุบตัวได้แก่ ล้อยางตัวอย่างที่ 2, 3, 13, 15, 16, 19, 21 และ 22

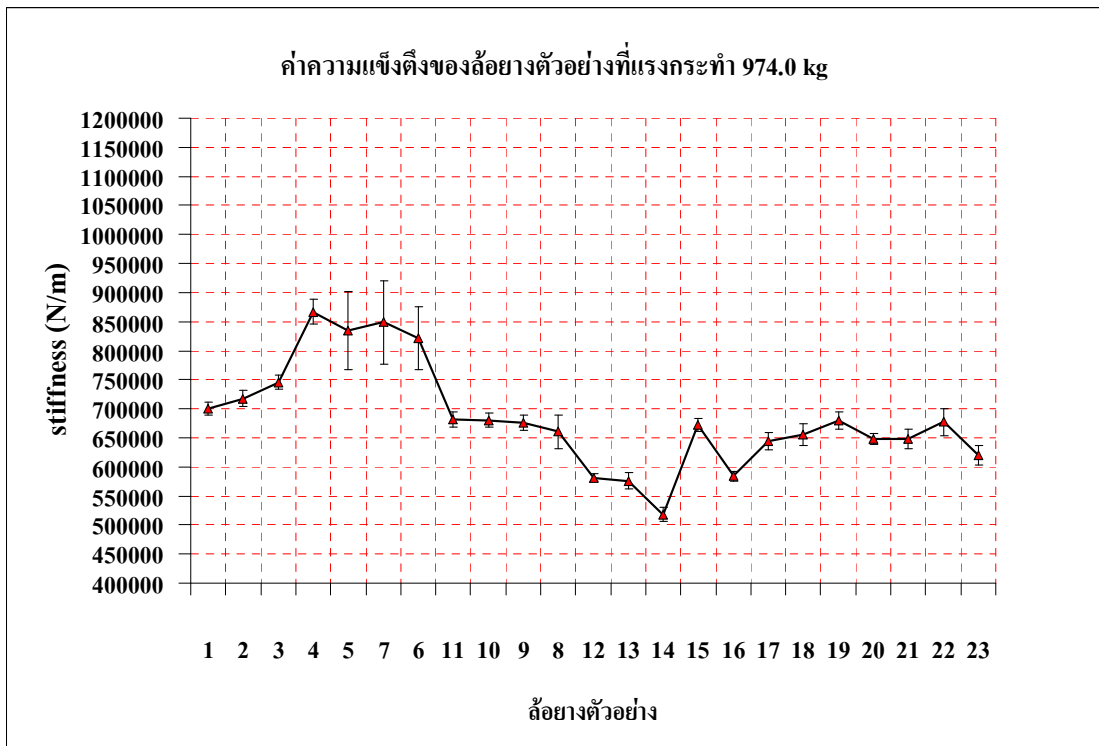
4.1.2 ความสัมพันธ์ของค่าความแข็งตึงของล้อยางตัน

ค่าความแข็งตึงของล้อยางตันทดสอบได้จากการคำนวณตามสมการที่ 2.4 ซึ่งจะได้ความสัมพันธ์ของค่าความแข็งตึงไม่เป็นเชิงเส้นในแต่ละจุดรอบวงล้อดังผลทดสอบดังรูปที่ 4.6 และไม่เท่ากันตลอดเส้นรอบวงของล้อตามความสัมพันธ์ของระยะยวบของล้อยางเมื่อได้รับแรงกด ดังนั้นค่าความแข็งตึงที่คำนวณได้จึงเป็นค่าความแข็งตึงเมื่อล้อยางได้รับแรงกดขณะนั้น ดังรูปที่ 4.7

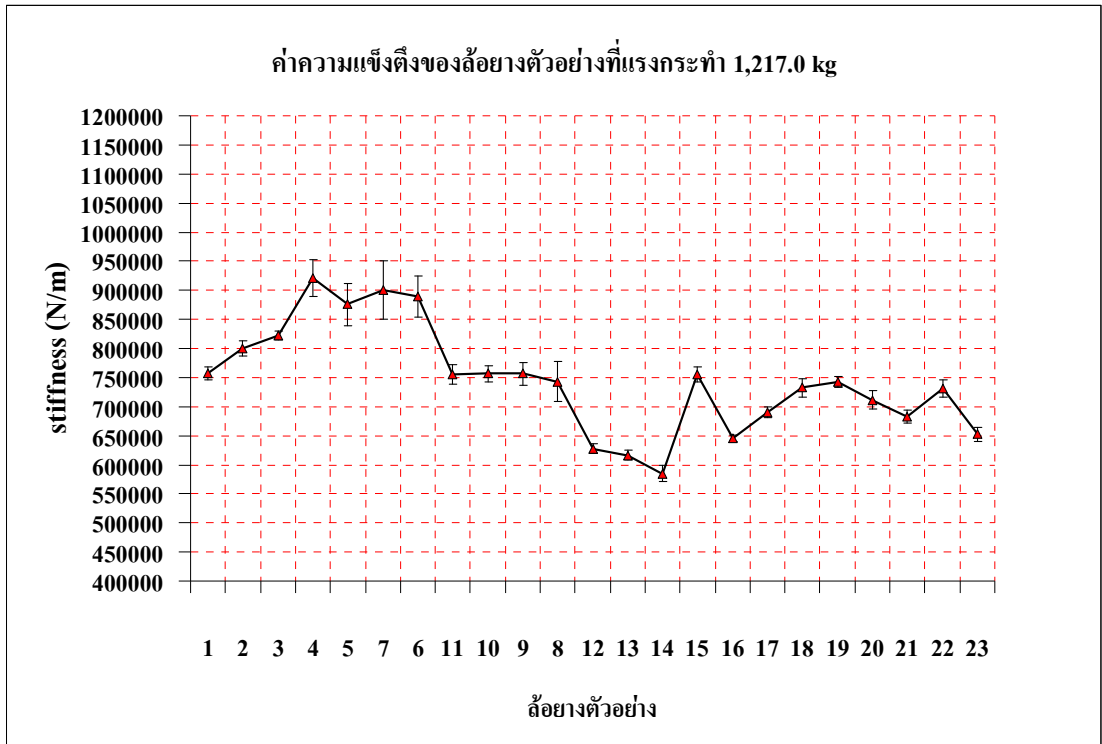
-4.11



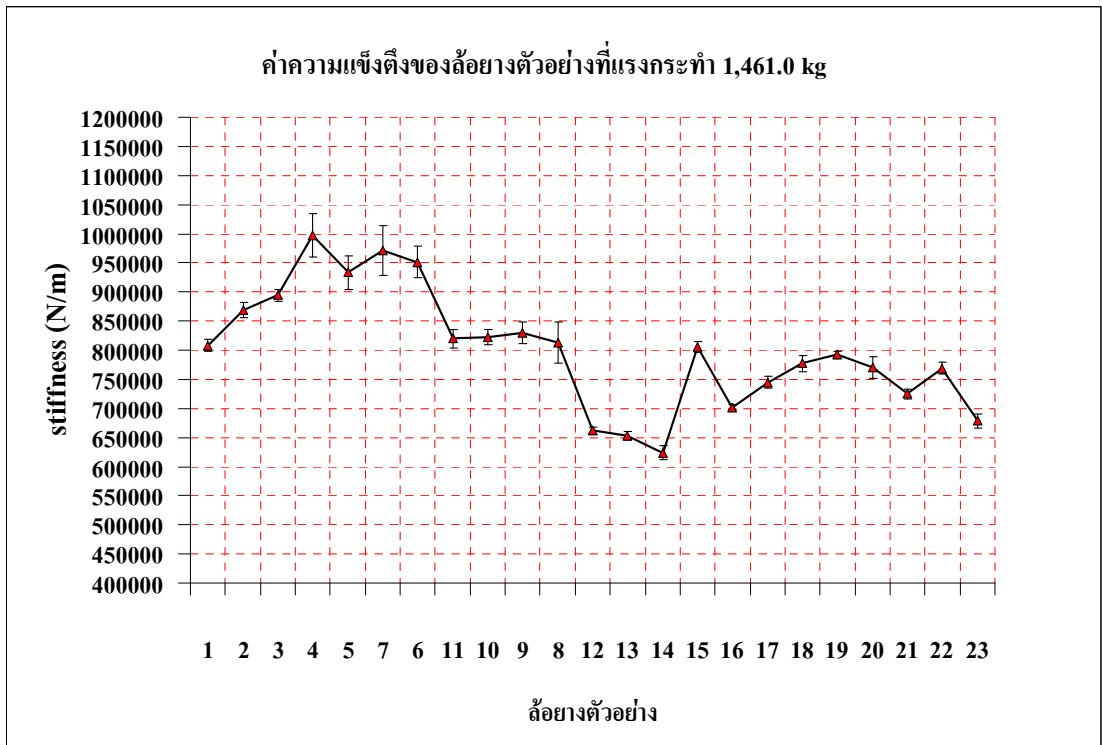
รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าระยะยวบของล้อยางเมื่อได้รับแรงกด



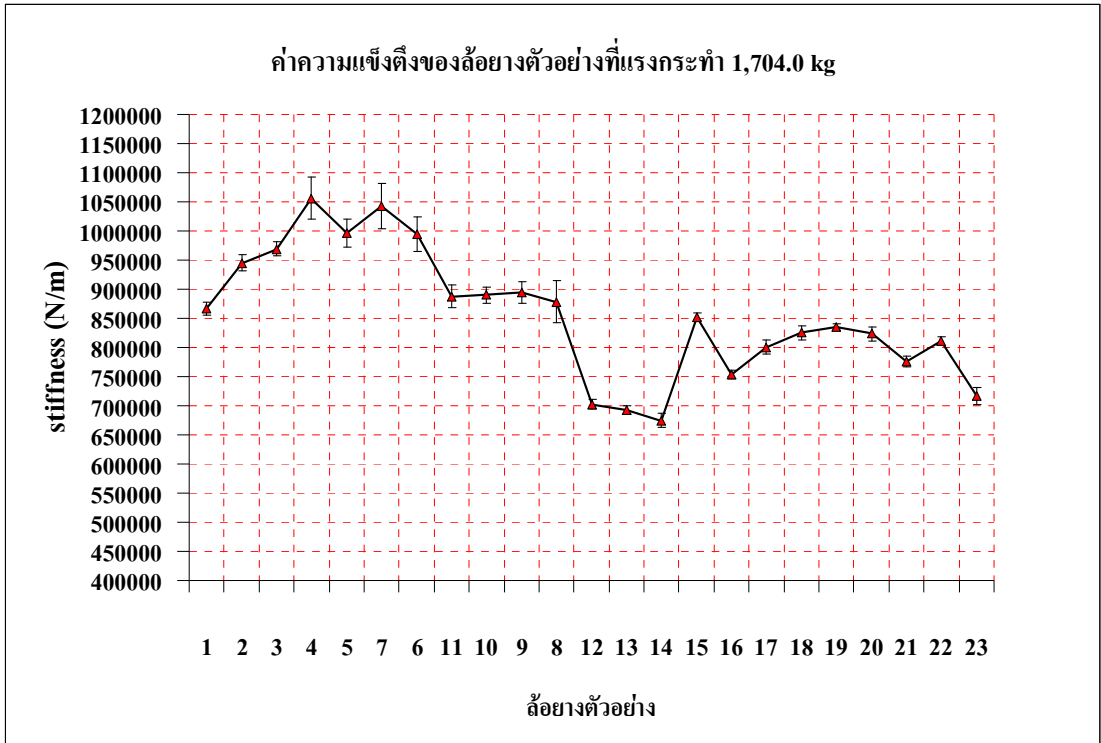
รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ของค่าความแข็งตึงรอบแกนหมุนของล้อยางตัวอย่างเมื่อได้รับแรงกระทำ 974 kg



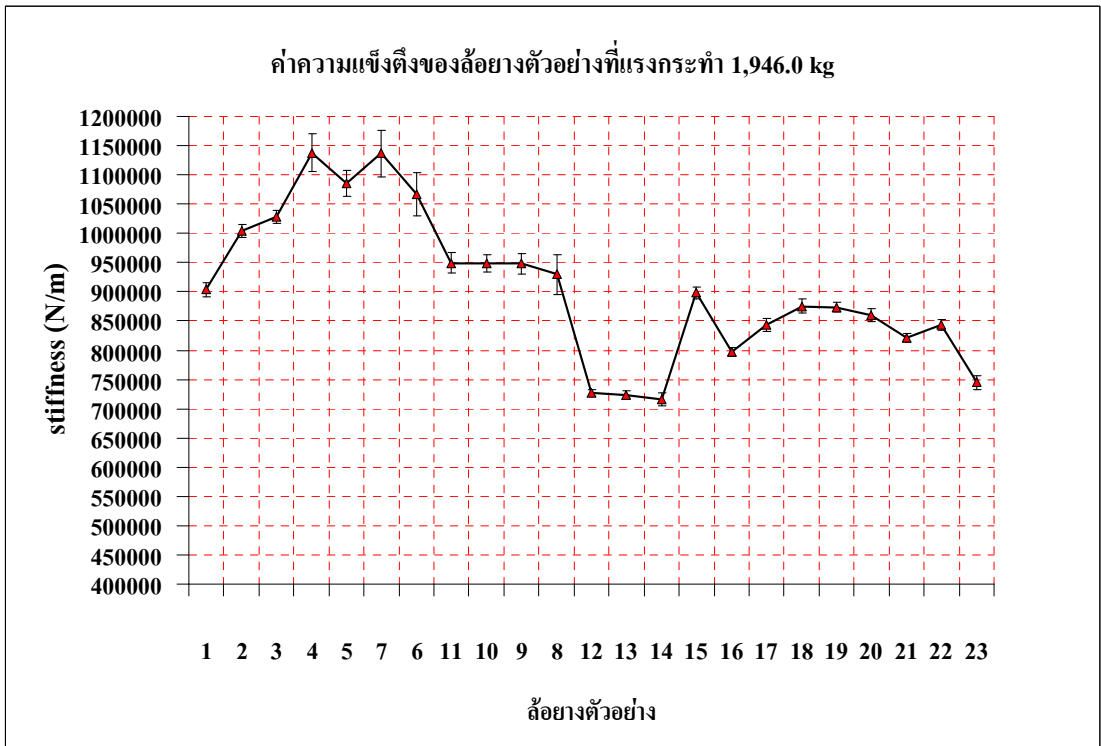
รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ของค่าความแข็งตึงรอบแกนหมุนของล้อยางตัวอย่างเมื่อได้รับแรงกระทำ 1217.5 kg



รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ของค่าความแข็งตึงรอบแกนหมุนของล้อยางตัวอย่างเมื่อได้รับแรงกระทำ 1461.0 kg

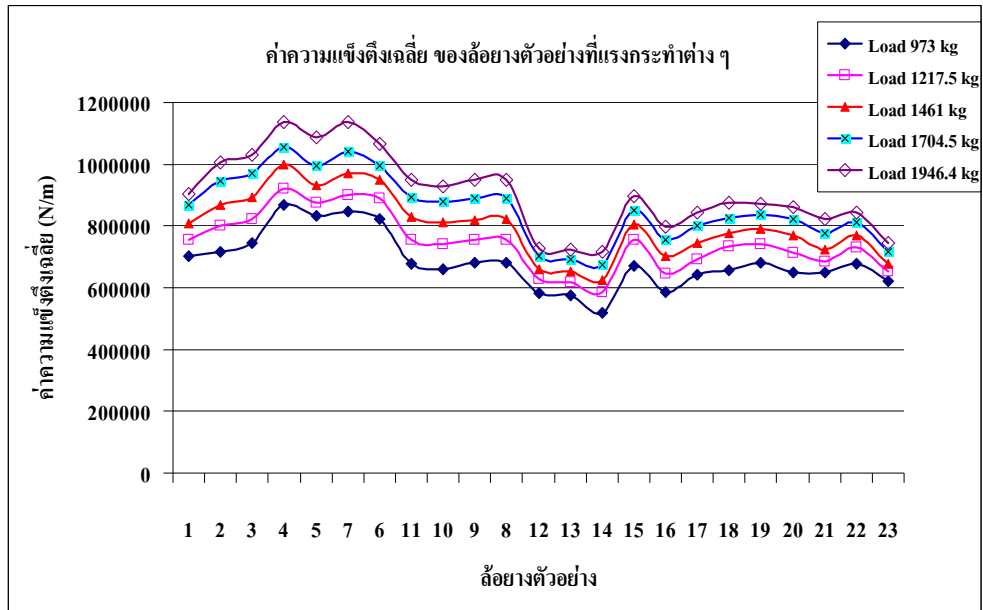


รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ของค่าความแข็งตึงรอบแกนหมุนของล้อยางตัวอย่างเมื่อได้รับแรงกระทำ 1,704.5 kg



รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ของค่าความแข็งตึงรอบแกนหมุนของล้อยางตัวอย่างเมื่อได้รับแรงกระทำ 1,946.4 kg

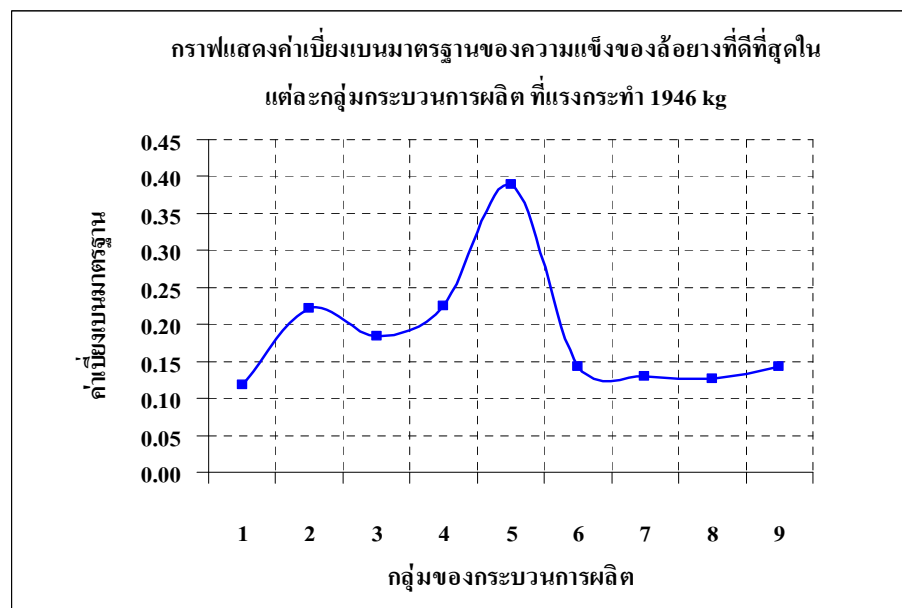
ผลของค่าความแข็งดึงเฉลี่ยตลอดเส้นรอบวงของล้อยางที่แรงกระทำต่าง ๆ ดังรูปที่ 4.12



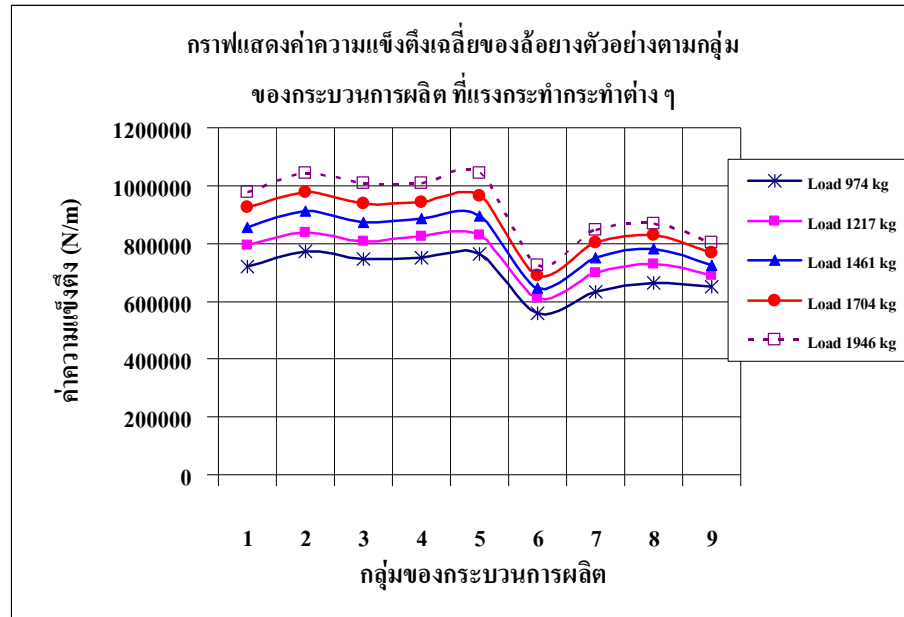
รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ของค่าความแข็งดึงเฉลี่ยของล้อยางตัวอย่างที่แรงกระทำต่าง ๆ

จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่าความแข็งดึงพบว่า ล้อยางต้นตัวอย่างที่ 12 13 และ 14 ซึ่งเป็นล้อจากผู้ผลิตชิ้นนี้จะมีค่าความแข็งดึงต่ำกว่าล้อยางตัวอย่างอื่น ซึ่งความแข็งของล้อยางจะขึ้นกับส่วนประกอบทางเคมีของเนื้อยางและวัสดุที่นำมาใช้ผลิตเป็นยางชั้นใน

เปรียบเทียบค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของการยุบตัวและค่าเฉลี่ยของค่าความแข็งดึงของล้อยางต้นตัวอย่างตามกลุ่มกระบวนการผลิตจากตารางที่ 3.2 ดังรูปที่ 4.13 และ 4.14



รูปที่ 4.13 ค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานของความแข็งของล้อยางตามกลุ่มกระบวนการผลิต



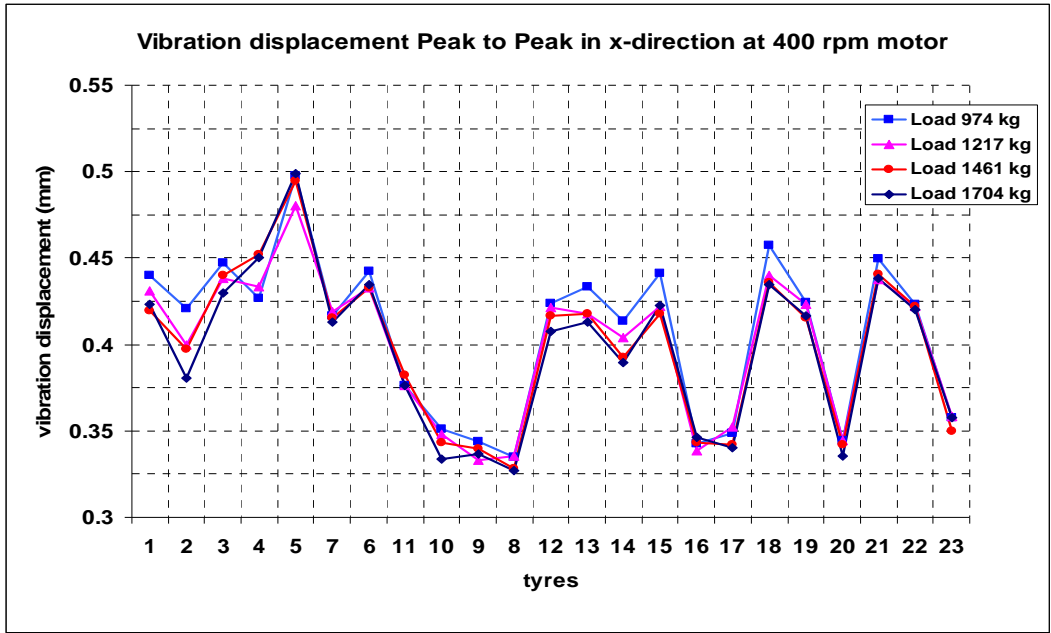
รูปที่ 4.14 ค่าความแข็งดึงเฉลี่ยของล้อยางตามกลุ่มกระบวนการผลิตที่แรงกระทำต่าง ๆ

ค่าความแข็งดึงของล้อยางต้นหาได้จากการคำนวณจากการยุบตัวของล้อยางเมื่อควบคุมแรงกดอัดให้คงที่พบว่าระยะยุบของล้อยางไม่คงที่รอบแกนหมุน เมื่อเพิ่มแรงกระทำล้อยางจะทำให้ระยะยุบมีแนวโน้มที่จะเบี่ยงเบนสูงขึ้นและมีบางล้อยางที่ความไม่สม่ำเสมอของการยุบตัววงที่การศึกษาการเบี่ยงเบนของระยะยุบรอบแกนหมุนดังรูปที่ 4.13 พบว่าล้อยางในกลุ่มกระบวนการผลิตที่ 5 ซึ่งเป็นล้อยางที่ตั้งใจผลิตให้ไม่สมดุลมีความแตกต่างของการยุบตัวของล้อยางรอบแกนหมุนสูงสุด และพบว่าในกระบวนการผลิตที่ 1 โดยใช้เครื่องมือวงยางตัวเก่ามีความสม่ำเสมอของระยะยุบของล้อยางใกล้เคียงกับกลุ่มกระบวนการผลิตที่ 6 7 8 และ 9 ซึ่งเป็นกลุ่มของล้อยางมาตรฐาน ส่วนกระบวนการผลิตแบบฟรีฟอร์ม ฟรีเคียว และ เครื่องม้วนยางตัวใหม่นั้นยังคงมีค่าการยุบตัวที่ค่อนข้างสูงกว่ากลุ่มล้อยางมาตรฐานที่มีขายตามท้องตลาด ซึ่งอาจเกิดจากความแตกต่างกันของสูตรยาง การผสมที่ยังไม่เข้ากันระหว่างเนื้อยางและสารเคมีในกระบวนการบดยาง การควบคุมกระบวนการคงรูปของยางขณะอบและการควบคุมอุณหภูมิให้มีการกระจายเท่ากัน

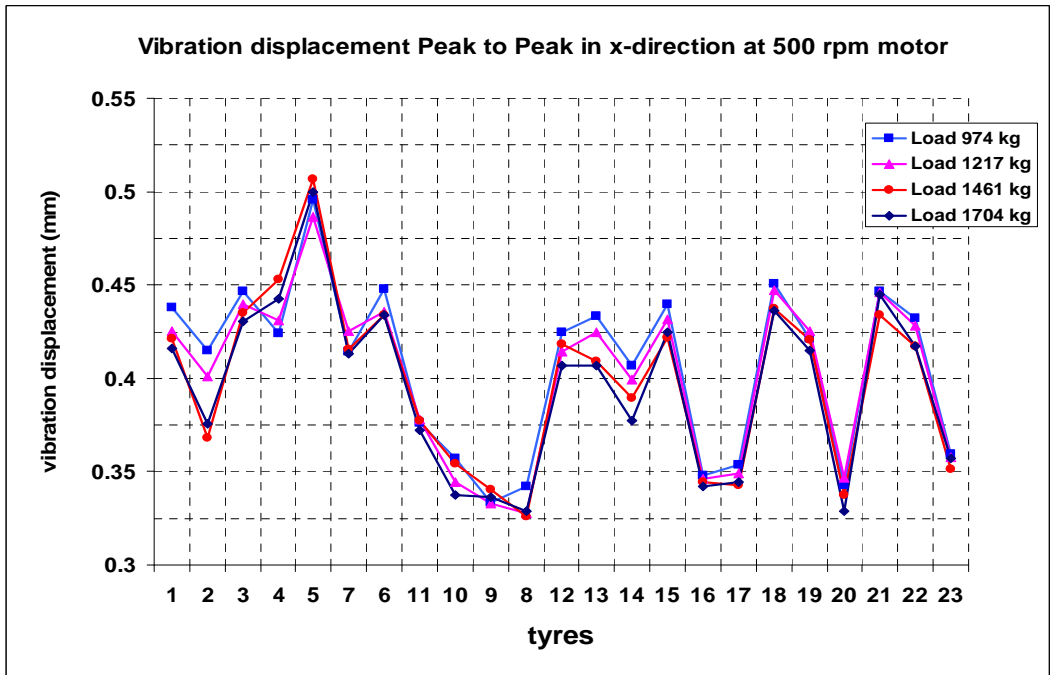
4.2 ผลการทดสอบการสั่นสะเทือน

สัญญาณการสั่นสะเทือน

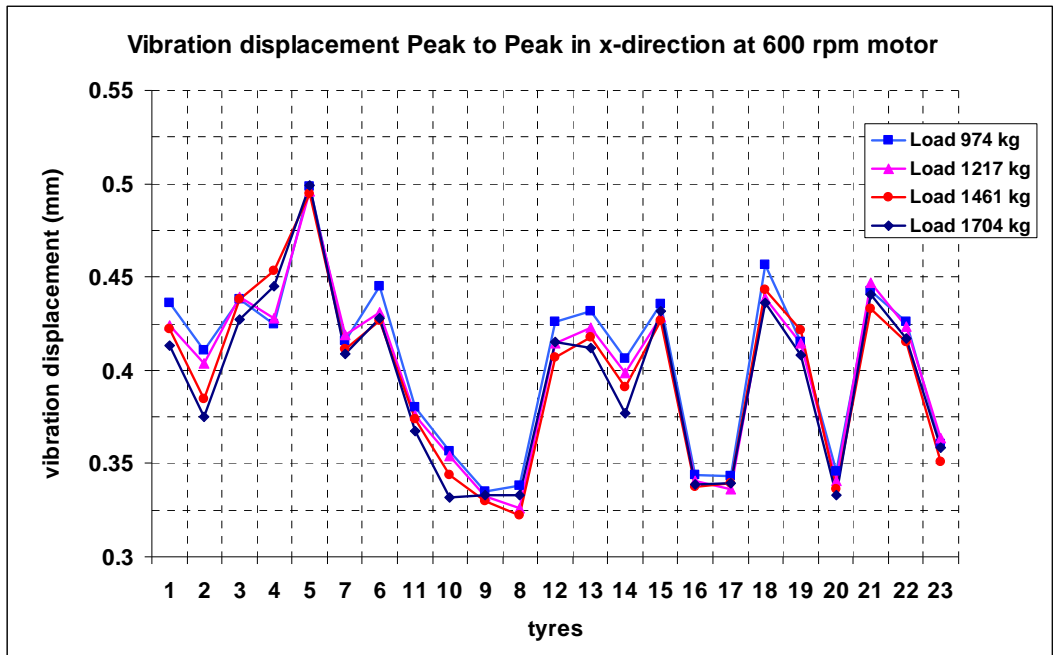
นำค่าสัญญาณการสั่นสะเทือนในแนวนอนกับพื้นแบบ peak to peak ของตัวอย่างตัวอย่างที่ได้รับแรงกระทำต่าง ๆ มาเปรียบเทียบกับรูปที่ 4.15 -4.20



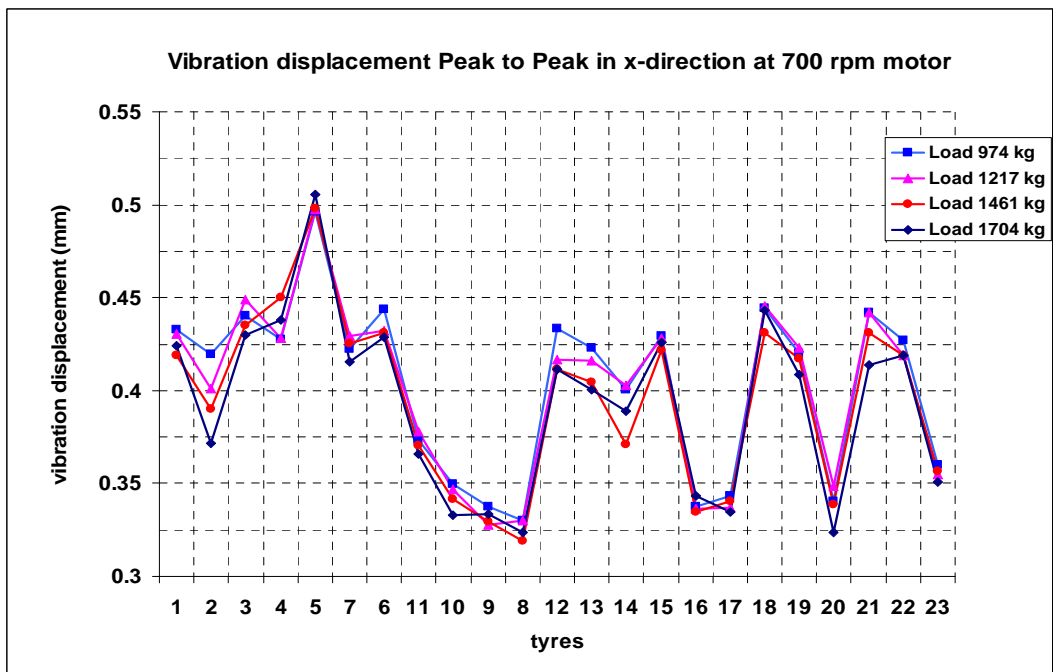
รูปที่ 4.15 ผลของการสั่นสะเทือนขณะกดกลิ้งที่ความเร็วรอบมอเตอร์ 400 รอบต่อนาที



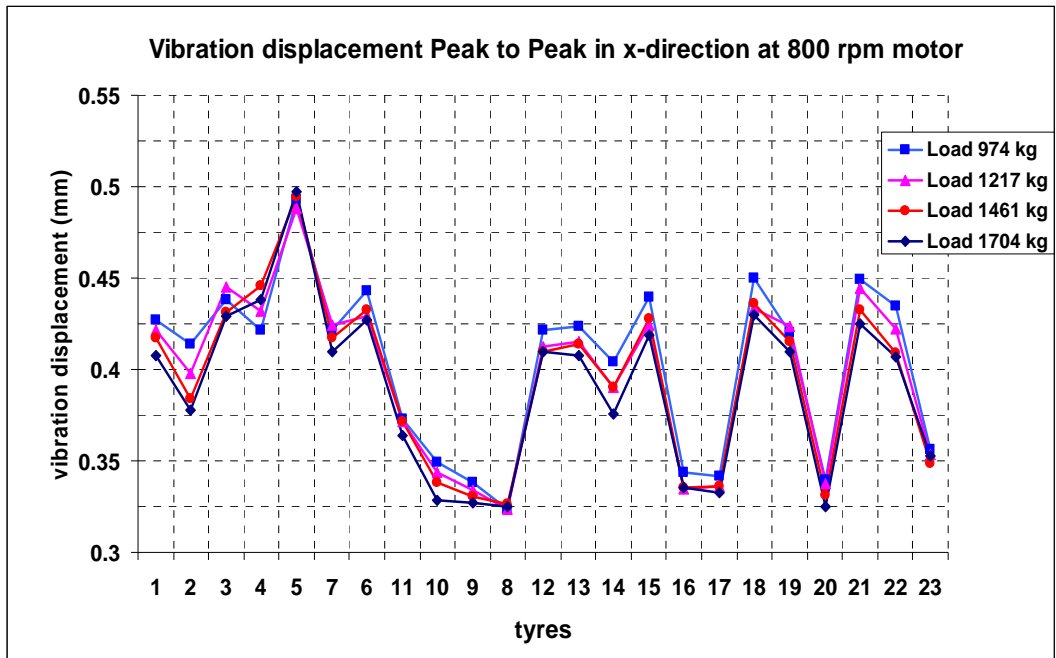
รูปที่ 4.16 ผลของการสั่นสะเทือนขณะกดกลิ้งที่ความเร็วรอบมอเตอร์ 500 รอบต่อนาที



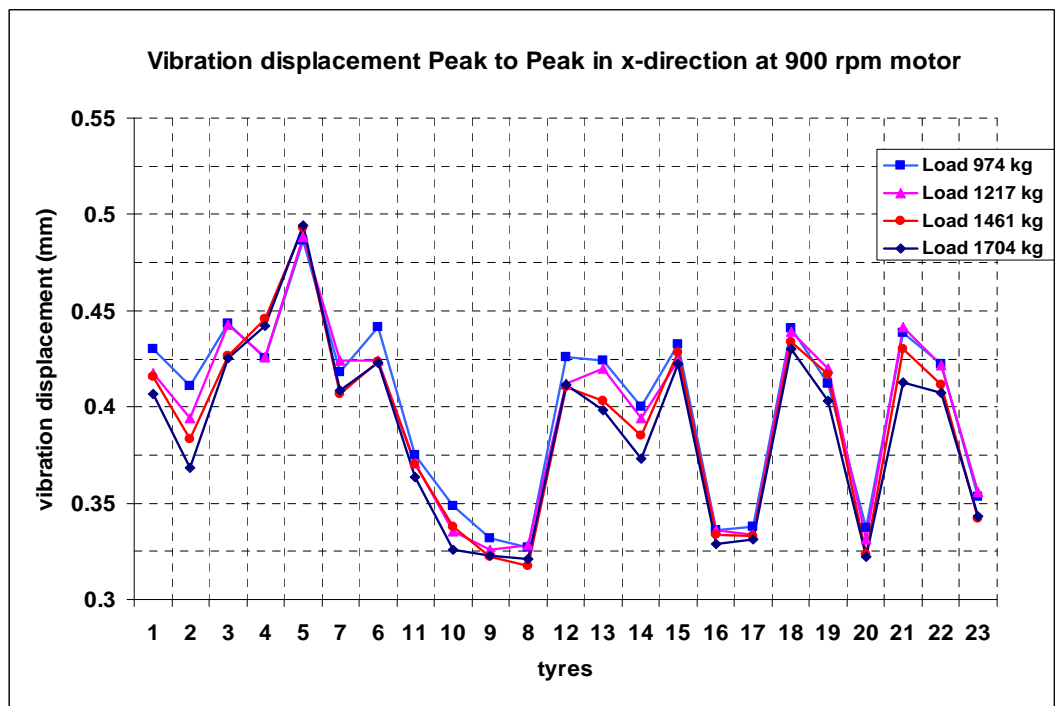
รูปที่ 4.17 ผลของการสั่นสะเทือนขณะกดคลิ้งที่ความเร็วรอบมอเตอร์ 600 รอบต่อนาที



รูปที่ 4.18 ผลของการสั่นสะเทือนขณะกดคลิ้งที่ความเร็วรอบมอเตอร์ 700 รอบต่อนาที

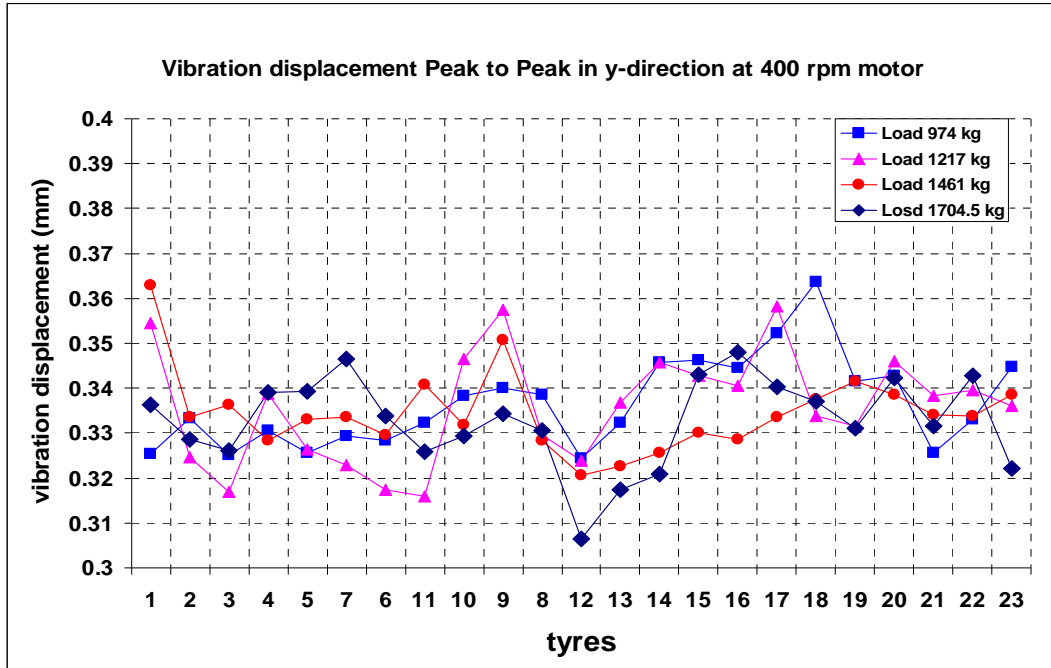


รูปที่ 4.19 ผลของการสั่นสะเทือนขณะกคกถึงที่ความเร็วรอบมอเตอร์ 800 รอบต่อนาที

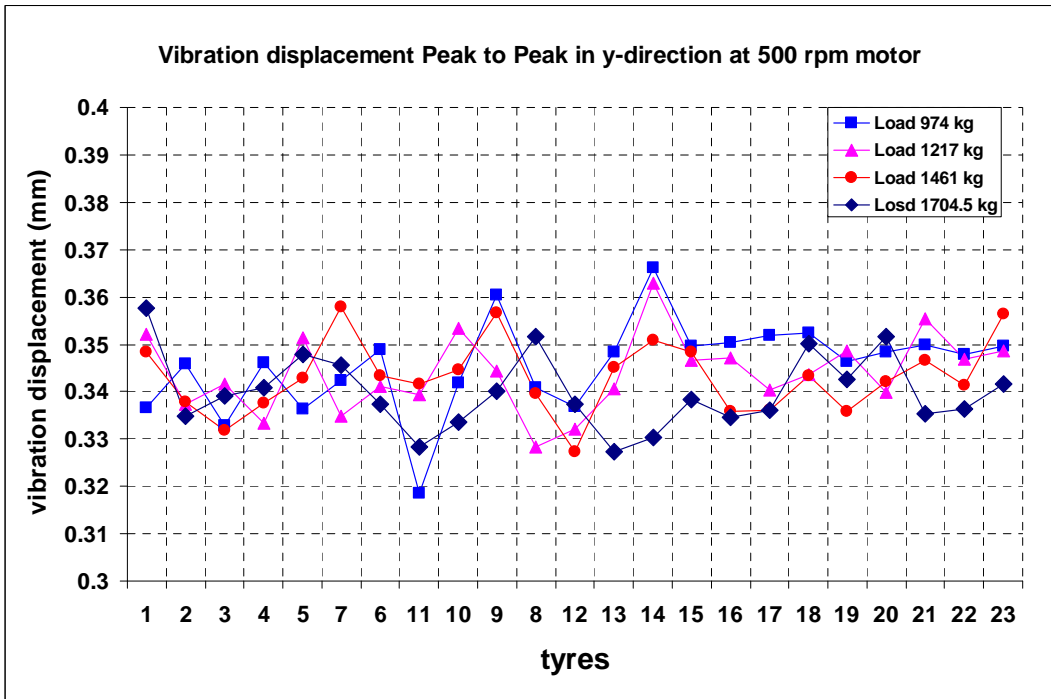


รูปที่ 4.20 ผลของการสั่นสะเทือนขณะกคกถึงที่ความเร็วรอบมอเตอร์ 900 รอบต่อนาที

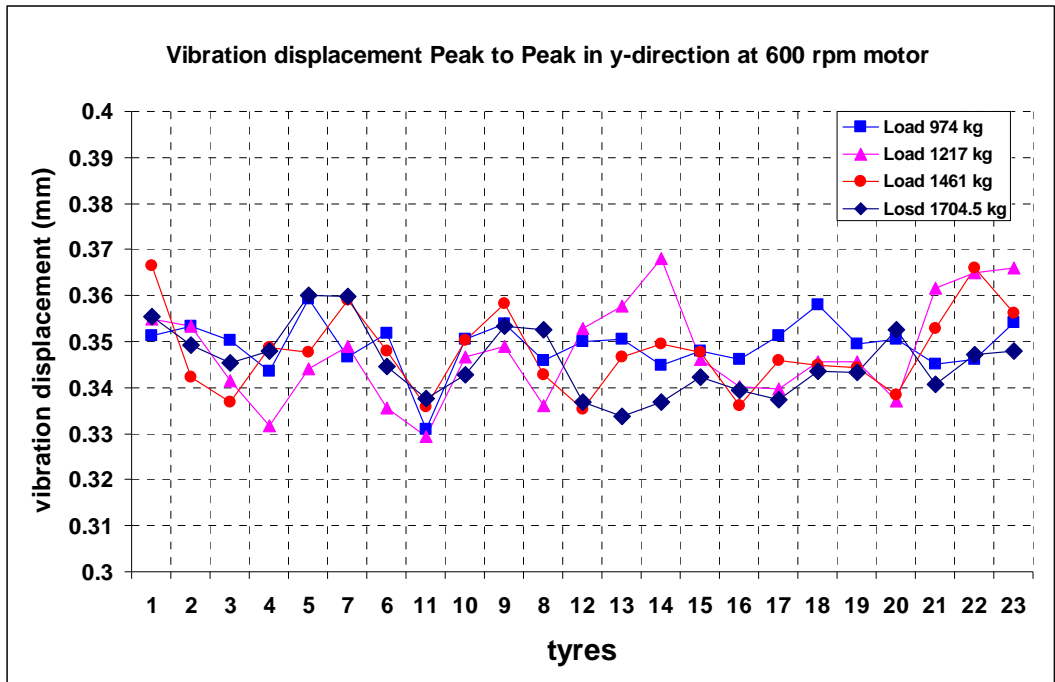
ในส่วนผลของสัญญาณการสั่นสะเทือนในแนวดิ่งซึ่งไม่ได้รับแรงกระทำจากภายนอกจึงมีค่าใกล้เคียงกันดังรูปที่ 4.21-4.26



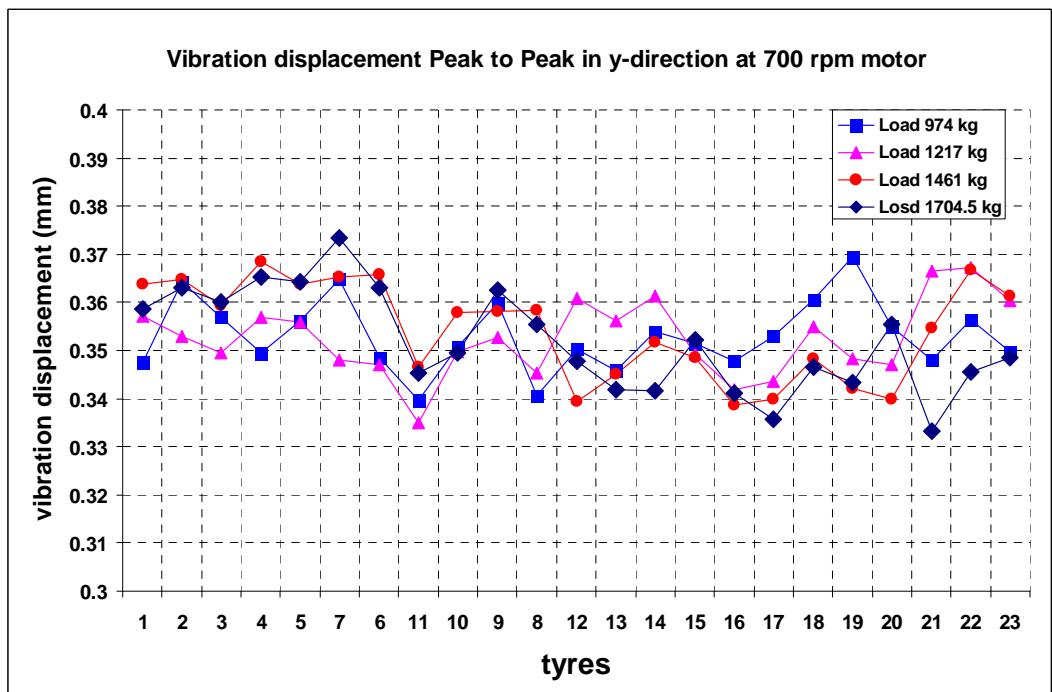
รูปที่ 4.21 ผลของการสั่นสะเทือนในแนวดิ่งที่ความเร็วรอบมอเตอร์ 400 รอบต่อนาที



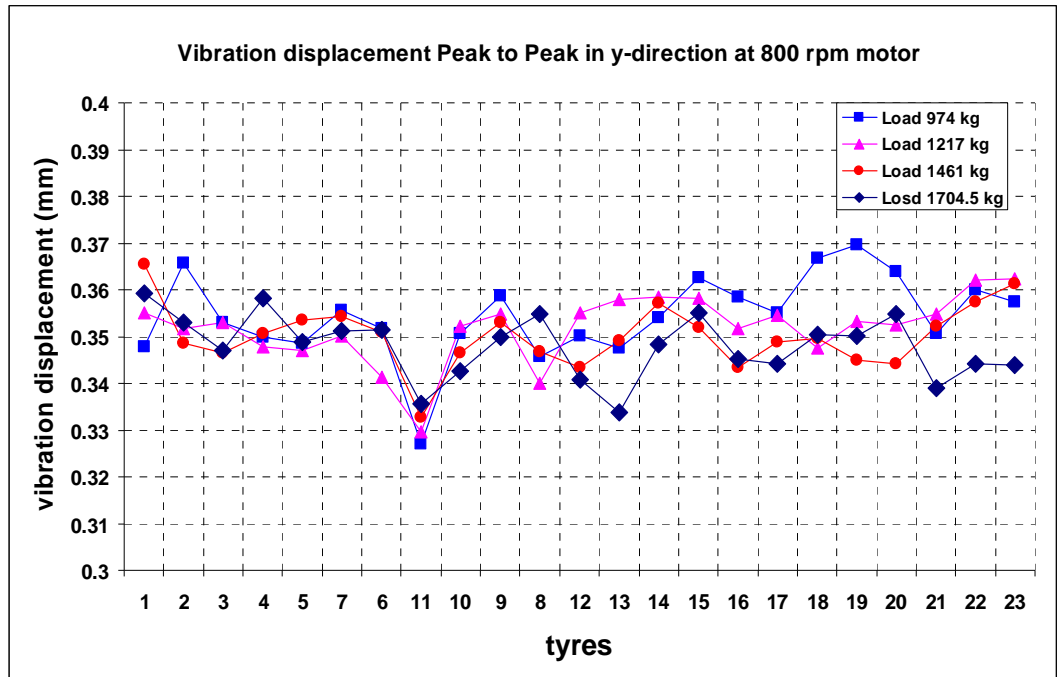
รูปที่ 4.22 ผลของการสั่นสะเทือนในแนวดิ่งที่ความเร็วรอบมอเตอร์ 500 รอบต่อนาที



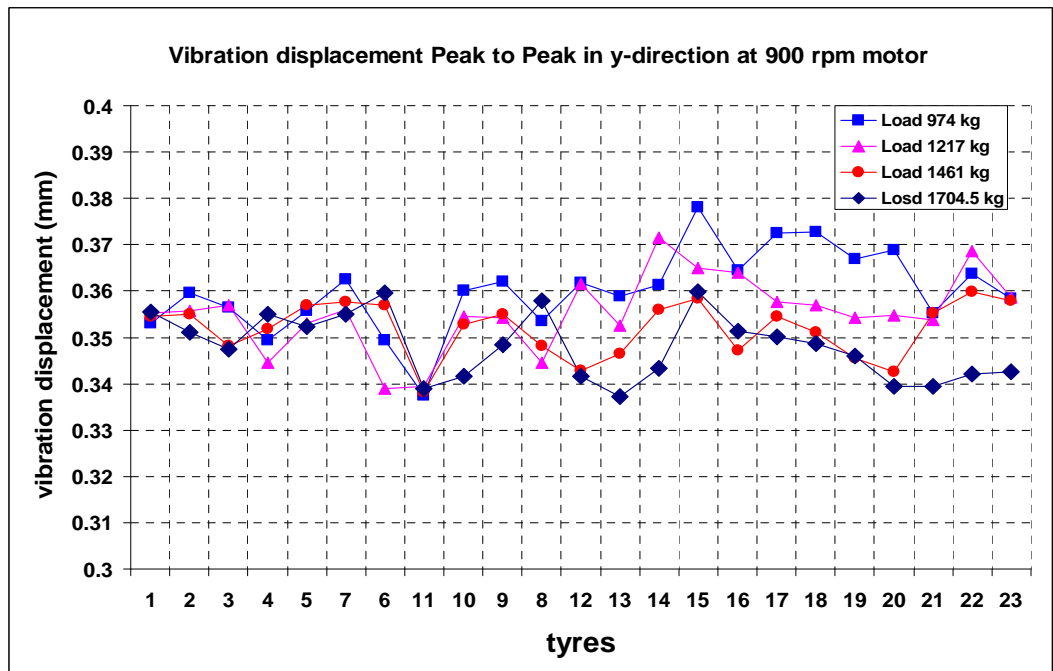
รูปที่ 4.23 ผลของการสั่นสะเทือนในแนวตั้งที่ความเร็วรอบมอเตอร์ 600 รอบต่อนาที



รูปที่ 4.24 ผลของการสั่นสะเทือนในแนวตั้งที่ความเร็วรอบมอเตอร์ 700 รอบต่อนาที



รูปที่ 4.25 ผลของการสั่นสะเทือนในแนวตั้งที่ความเร็วรอบมอเตอร์ 800 รอบต่อนาที



รูปที่ 4.26 ผลของการสั่นสะเทือนในแนวตั้งที่ความเร็วรอบมอเตอร์ 900 รอบต่อนาที

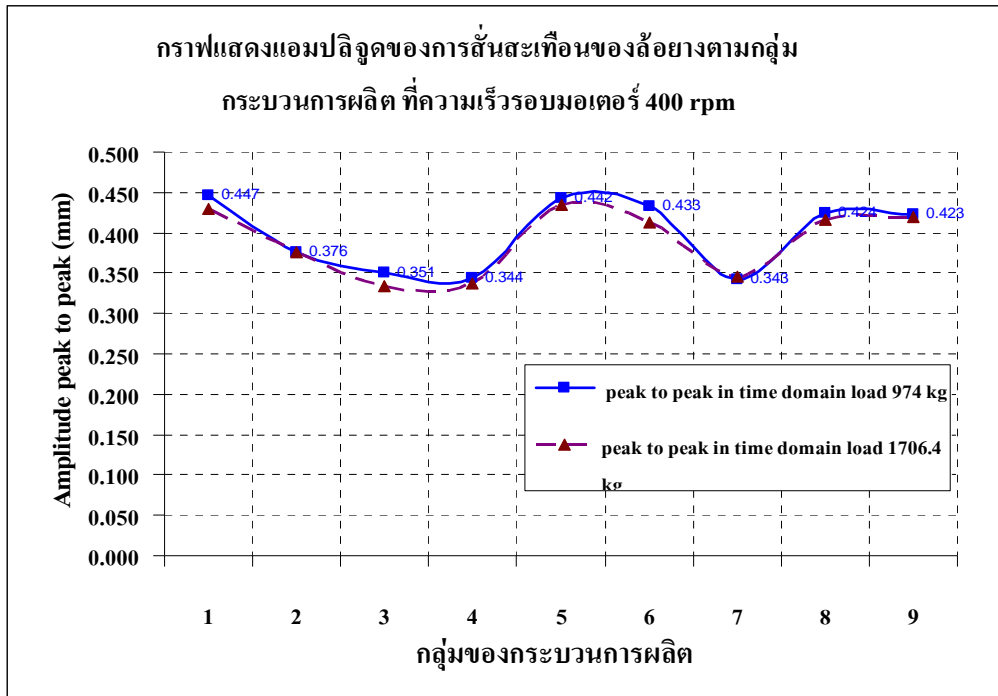
ความถี่ของการสั่นสะเทือนของตัวอย่างตันที่เกิดขึ้นที่ความเร็วรอบต่าง ๆ ได้จากการแยกสัญญาณการสั่นสะเทือนบนโดเมนความถี่ แสดงดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 แสดงความสัมพันธ์ของความเร็วรอบของมอเตอร์และความถี่ของการสั่นสะเทือนของตัวอย่าง

ความเร็วรอบมอเตอร์ (rpm)	ความถี่ของการสั่นสะเทือน ที่แกนเพลาล้อ (Hz)	ความถี่ของการสั่นสะเทือนที่ แกนเพลาล้อ (CPM=Hz × 60)
400	1.2	72
500	1.4	84
600	1.8	108
700	2	120
800	2.4	144
900	2.6	156

สัญญาณการสั่นสะเทือนของตัวอย่างตันแต่ละล้อย่อมมีค่าใกล้เคียงกันเมื่อเพิ่มแรงกดและความเร็วในการหมุน สัญญาณการสั่นสะเทือนระหว่างล้อในแนวขนานกับพื้นระดับซึ่งเป็นแนวที่ได้รับแรงกดจะมีความแตกต่างกันอย่างชัดเจน ส่วนค่าสัญญาณการสั่นสะเทือนระหว่างล้อในแนวคิงไม่แตกต่างกันมากซึ่งการสั่นสะเทือนอาจเป็นผลมาจากแรงโน้มถ่วง แรงเสียดทานและแรงหนีศูนย์กลางขณะหมุนของตัวอย่างตัน เมื่อเพิ่มความเร็วในการหมุนตัวอย่างทดสอบที่ได้รับแรงกระทำที่ต่ำจะเกิดแอมพลิจูดของการสั่นสะเทือนที่สูงกว่า อาจเนื่องมาจากการที่ตัวอย่างทดสอบถูกกดด้วยน้ำหนักที่สูงระยะขยุบของตัวอย่างเกิดการเปลี่ยนแปลงที่น้อยลง

นำค่าสัญญาณการสั่นสะเทือนแบบ peak to peak ของกลุ่มตัวอย่างตัวอย่างที่เกิดขึ้นที่ความเร็วรอบของมอเตอร์ 400 rpm ซึ่งเป็นความเร็วรอบที่เกิดแอมพลิจูดของการสั่นสะเทือนสูงสุด และพบว่าเมื่อตัวอย่างตันได้รับแรงกดที่สูงขึ้นแอมพลิจูดของการสั่นสะเทือนกลับลดลงแสดงดังรูปที่ 4.27

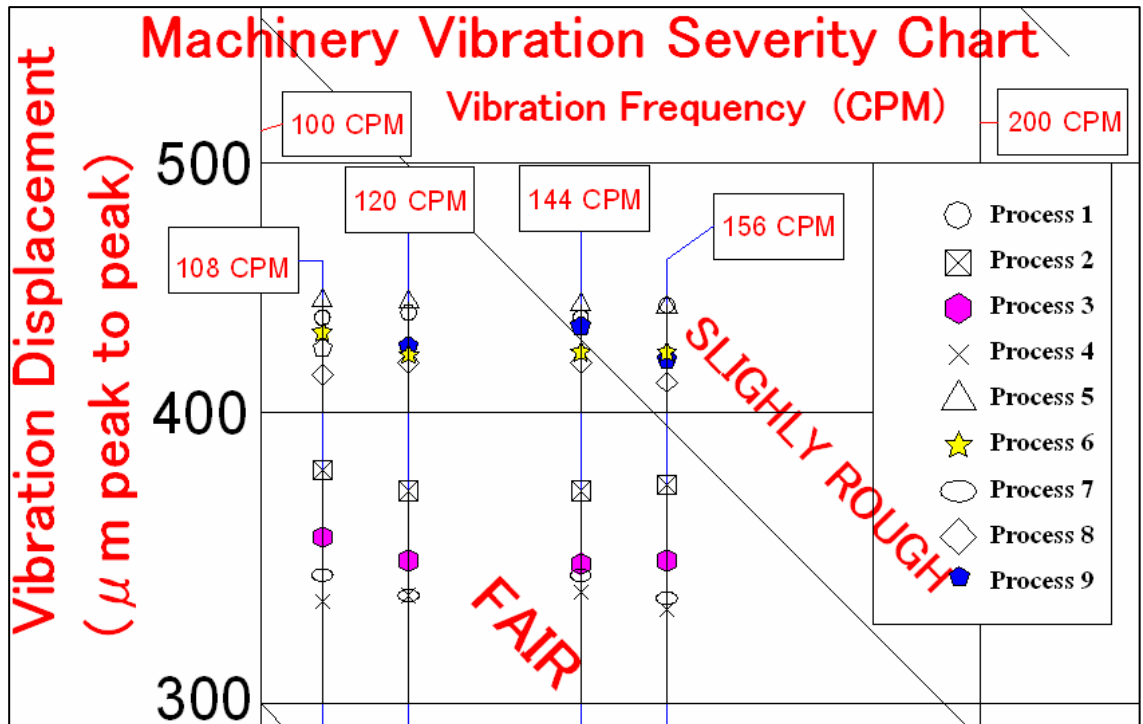


รูปที่ 4.27 ผลการสั่นสะเทือนของตัวอย่างตามกลุ่มต่าง ๆ ที่ความเร็วรอบมอเตอร์ 400 rpm

ค่าสัญญาณการสั่นสะเทือนที่มีค่าสูงแต่ความถี่ในการสั่นสะเทือนต่ำอาจยังไม่ส่งผลกระทบต่อความเสียหายของระบบ ดังนั้นควรนำมาเทียบกับเกณฑ์ประเมินความรุนแรง Machinery Vibration Severity Chart ซึ่งผลของค่าสัญญาณการสั่นสะเทือนและความถี่ที่นำมาใช้ประเมินความรุนแรงของการสั่นสะเทือน แสดงดังตารางที่ 4.3 ที่น้ำหนักกด 974 กิโลกรัม และแสดงผลการประเมินความรุนแรงของการสั่นสะเทือนของตัวอย่างต้นดังรูปที่ 4.28

ตารางที่ 4.3 ค่าสัญญาณการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นสูงสุดใช้ประเมินความรุนแรงของการสั่นสะเทือน

Process	Amplitude peak to peak (mm) แรงกระทำต่อตัวอย่าง 974 kg					
	Freq.72CPM	Freq.84CPM	Freq.108CPM	Freq.120CPM	Freq.144CPM	Freq.156CPM
1	0.447	0.447	0.438	0.440	0.438	0.443
2	0.376	0.376	0.380	0.373	0.373	0.375
3	0.351	0.357	0.357	0.349	0.348	0.349
4	0.344	0.333	0.335	0.337	0.338	0.332
5	0.442	0.448	0.445	0.444	0.443	0.442
6	0.433	0.433	0.432	0.423	0.424	0.424
7	0.343	0.348	0.344	0.337	0.344	0.336
8	0.424	0.421	0.415	0.420	0.420	0.412
9	0.423	0.432	0.426	0.427	0.435	0.422



รูปที่ 4.28 ผลของการสั่นสะเทือนที่แกนเพลลาของล้ออย่างต้นเทียบกับ Machinery Vibration Severity Chart ในหน่วยเมตริก

จากการศึกษาการสั่นสะเทือนของล้ออย่างขณะรับแรงกดและกลิ้งโดยวัดสัญญาณการเคลื่อนตัวของเพลาล้อแบบ peak to peak พบว่าเมื่อล้ออย่างได้รับแรงกดที่น้อยจะมีการสั่นสะเทือนที่สูงและมีแนวโน้มลดลงเมื่อแรงกดเพิ่มขึ้น ที่แรงกดเดียวกันการกลิ้งที่ความเร็วต่ำจะมีการสั่นสะเทือนที่สูงและมีแนวโน้มที่ลดลงเมื่อเพิ่มความเร็วในการหมุน

การเปลี่ยนแปลงกระบวนการผลิตล้ออย่างต้นสามารถช่วยลดการสั่นสะเทือนขณะใช้งานได้ดังผลในรูปที่ 4.27 และ ค่าในตารางที่ 4.3 จะเห็นว่าแอมพลิจูดของการสั่นสะเทือนลดลงและใกล้เคียงกับล้ออย่างมาตรฐานเมื่อเปลี่ยนกระบวนการผลิตมาใช้เครื่องมือใหม่และปรับฟอร์ม เครื่องมือใหม่และปรับเฟือง และเครื่องมือใหม่ เมื่อใช้งานที่ความเร็วสูงขึ้นแนวโน้มของความรุนแรงเนื่องจากการสั่นสะเทือนก็ยังอยู่ในแนวโน้มที่ต่ำกว่ากลุ่มล้ออย่างที่ผลิตด้วยเครื่องมือเก่าและล้ออย่างมาตรฐานบางยี่ห้อ จะเห็นได้ชัดเจนเมื่อนำมาพิจารณาในเกณฑ์ประเมินความรุนแรงของการสั่นสะเทือนซึ่งสรุปได้ว่ากระบวนการผลิตที่ 4 ซึ่งปรับเปลี่ยนมาใช้เครื่องมือแบบใหม่เพียงอย่างเดียวก็สามารถลดการสั่นสะเทือนขณะใช้งานล้ออย่างต้นได้และดีกว่ากระบวนการอื่น ๆ

4.3 ผลการตรวจสอบการกระจายตัวของรูปทรงของยางชั้นใน

4.3.1 ความสมมาตรของรูปทรงของยางชั้นใน

การตรวจสอบความสมมาตรของรูปทรงของยางชั้นในทำโดยการวัดการระยาะการกระจายตัวของยางชั้นในบริเวณหน้าตัดล้อยางซึ่งได้จากการตัดผ่าล้อยางตัวอย่างเป็นชั้นดังรูปที่ 4.29 โดยเลือกล้อยางตัวอย่างที่มีความแข็งสม่ำเสมอที่สุดในแต่ละกลุ่มกระบวนการผลิตดังตารางที่ 4.4 เนื่องจากเกิดปัญหาในการตัดล้อยาง ดังนั้นล้อยางในกลุ่มกระบวนการผลิตที่ 7 และ 9 จึงไม่ได้นำมาพิจารณาซึ่งเป็นล้อยางที่มีส่วนประกอบของลวดเหล็ก

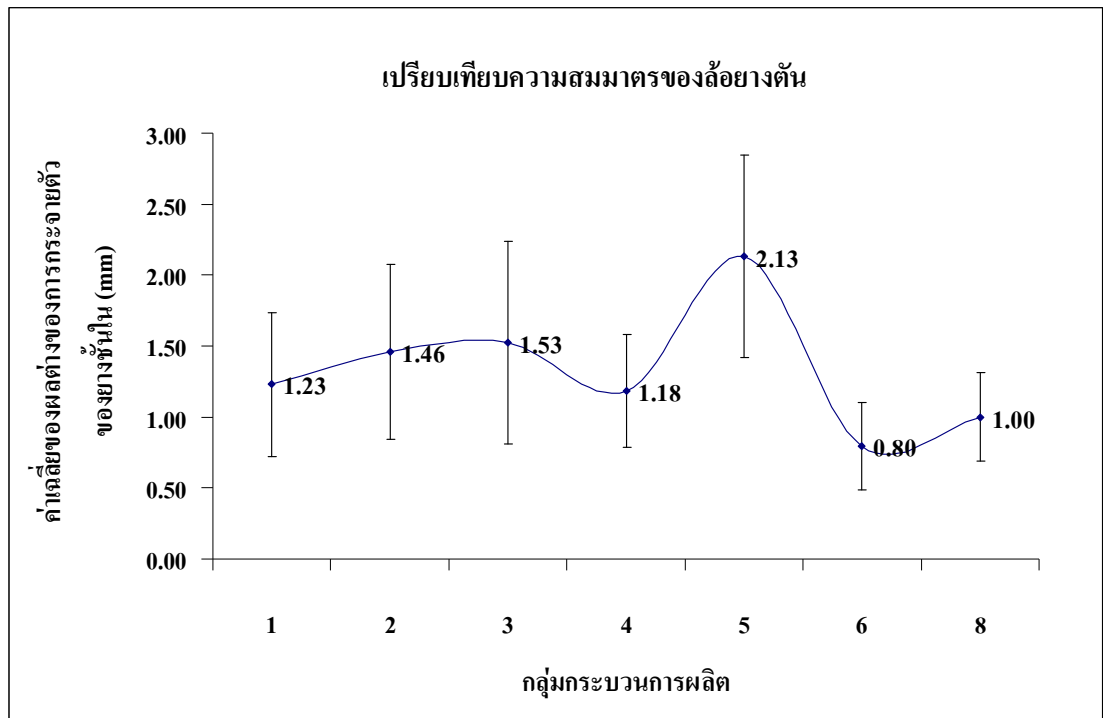


รูปที่ 4.29 ชั้นยางที่ผ่านการตัดเพื่อตรวจสอบความสมมาตรของหน้าตัด

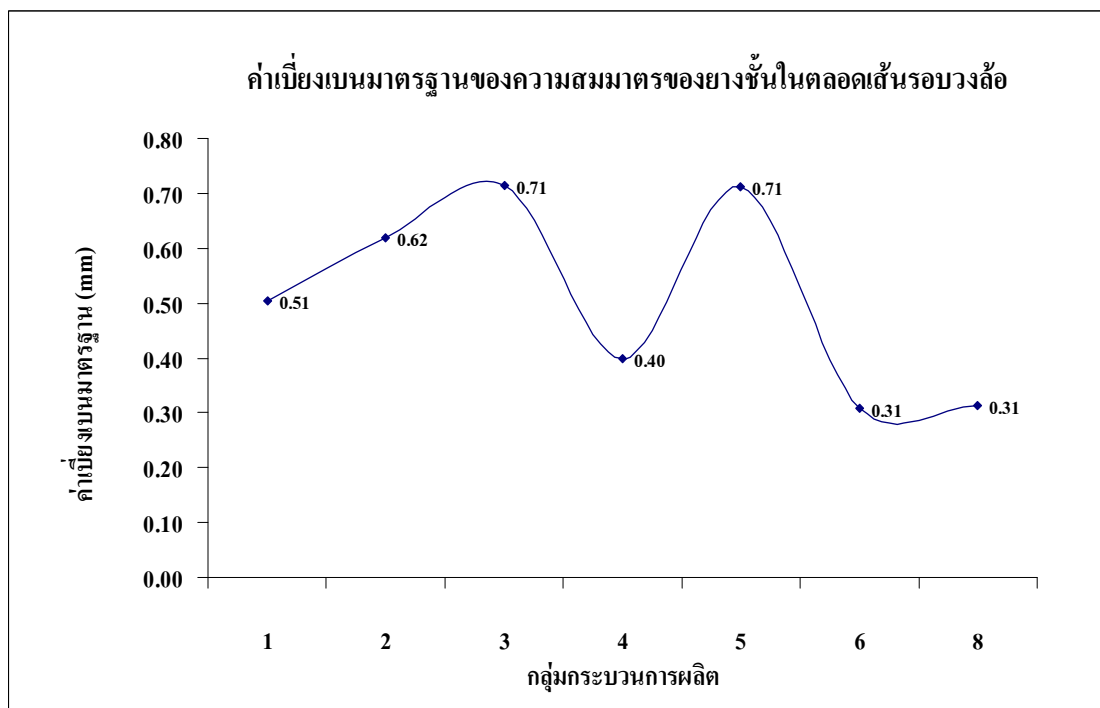
ตารางที่ 4.4 ล้อยางตัวอย่างที่นำมาตรวจสอบการกระจายตัวของรูปทรงของยางชั้นใน

กลุ่มกระบวนการผลิต	ล้อยางตัวอย่าง
1 เครื่องม้วนเก่า	3
2 เครื่องม้วนใหม่+preform	4,11
3 เครื่องม้วนใหม่+preure	5,10
4 เครื่องม้วนใหม่	9
5 ผลิตให้ไม่สมดุล	6,8
6 ล้อมมาตรฐาน	14
8 ล้อมมาตรฐาน	18

ผลการตรวจสอบความสมมาตรของหน้าตัดล้อยางแสดงดังรูป 4.30 และ 4.31



รูปที่ 4.30 ความสมมาตรของยางชั้นในของล้อย่างตันตามกลุ่มกระบวนการผลิต

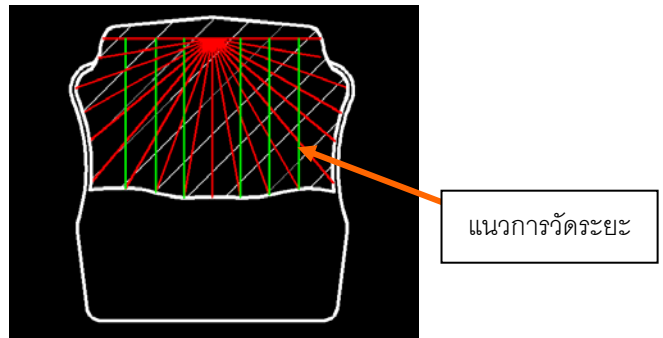


รูปที่ 4.31 ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของความสมมาตรของยางชั้นในตลอดเส้นรอบวงล้อตามกลุ่มกระบวนการผลิต

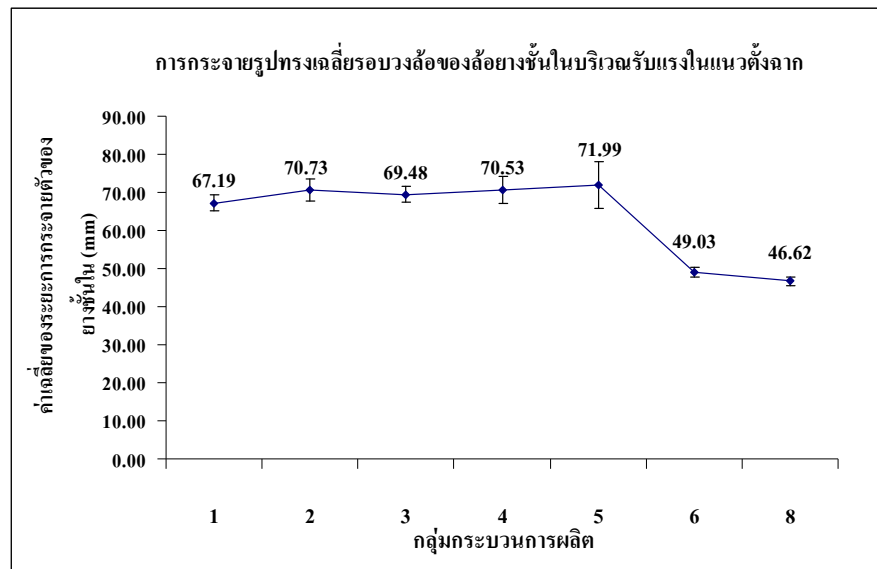
จากการศึกษาความสมมาตรของการกระจายรูปทรงของยางชั้นใน โดยการตัดผ่าล้อย่างเพื่อ
 ดูการกระจายรูปทรงตามหน้าตัดของล้อ จากรูปที่ 4.30 และ 4.31 พบว่ากระบวนการผลิตด้วยเครื่อง
 มีวนยางตัวใหม่สามารถทำให้ยางชั้นในมีความสมมาตรมากขึ้นเมื่อเทียบกับการผลิตด้วยเครื่องมีวน
 ยางเก่า แต่ยังคงมีความเบี่ยงเบนสูงกว่ากลุ่มของล้อมาตรฐาน

4.3.2 การกระจายตัวของรูปทรงของยางชั้นในบริเวณรับแรงในแนวตั้งฉาก

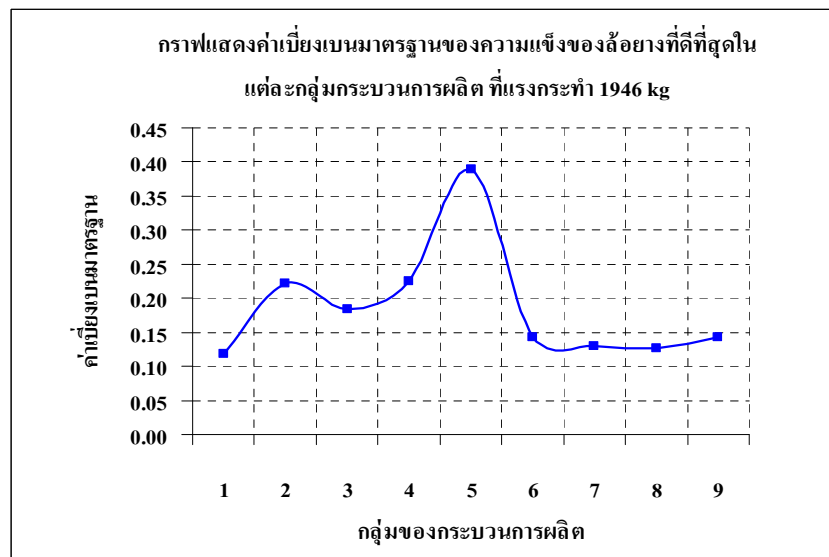
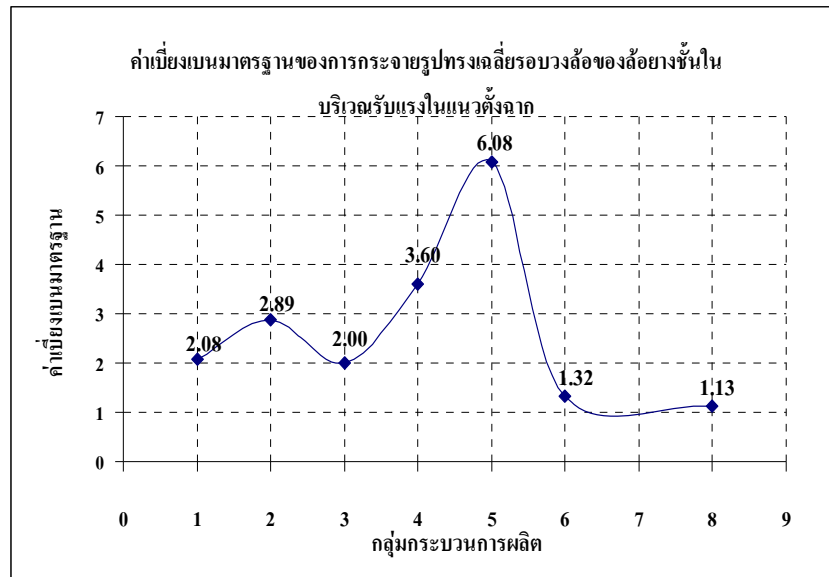
การวัดกระจายรูปทรงเฉลี่ยของยางชั้นในรอบวงล้อในบริเวณรับแรงใน
 แนวตั้งฉากเพื่อต้องการทราบการกระจายรูปทรงของยางชั้นในที่มีผลต่อการยุบตัวของล้อขณะ
 รับแรง ได้จากการวัดระยะการกระจายรูปทรงของยางชั้นในที่มุมบวก 40 องศา ถึง มุมลบ 40 องศา
 ในแนวตั้งฉากดังรูปที่ 4.32 และผลการกระจายรูปทรงของยางชั้นในแสดงดังรูปที่ 4.33 และ
 ผลเปรียบเทียบค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของระยะการกระจายรูปทรงของยางชั้นในและระยะยุบเมื่อล้อ
 ยางได้รับแรงกดขณะหยุดนิ่งดังรูปที่ 4.34



รูปที่ 4.32 แสดงการวัดการกระจายรูปทรงของยางชั้นในในแนวตั้งฉาก



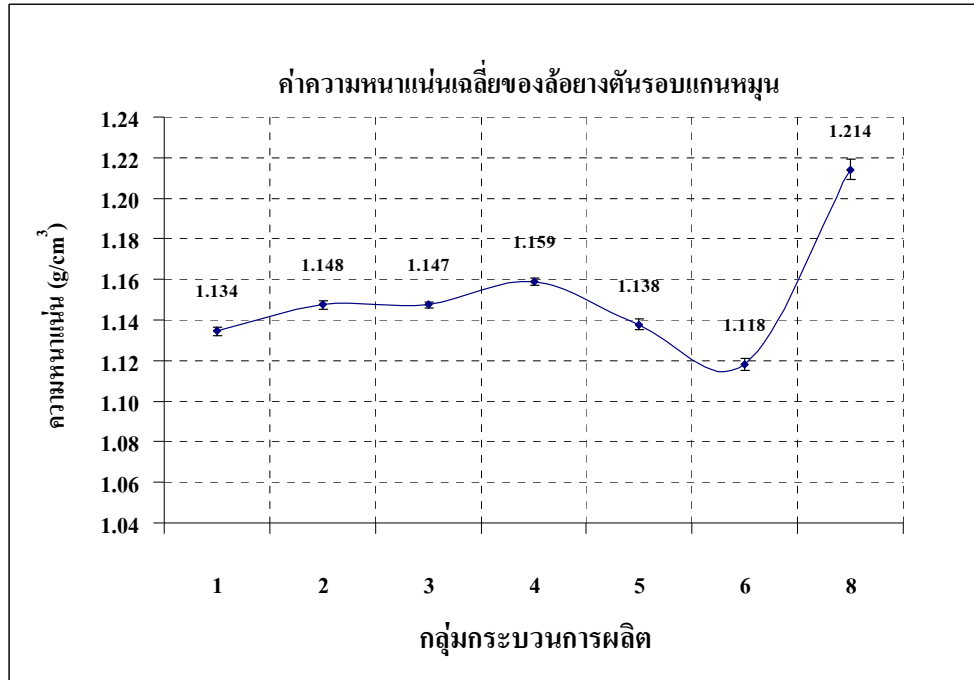
รูปที่ 4.33 การกระจายรูปทรงเฉลี่ยของยางชั้นในรอบวงล้อในบริเวณรับแรงในแนวตั้งฉาก
 ตามกลุ่มกระบวนการผลิต



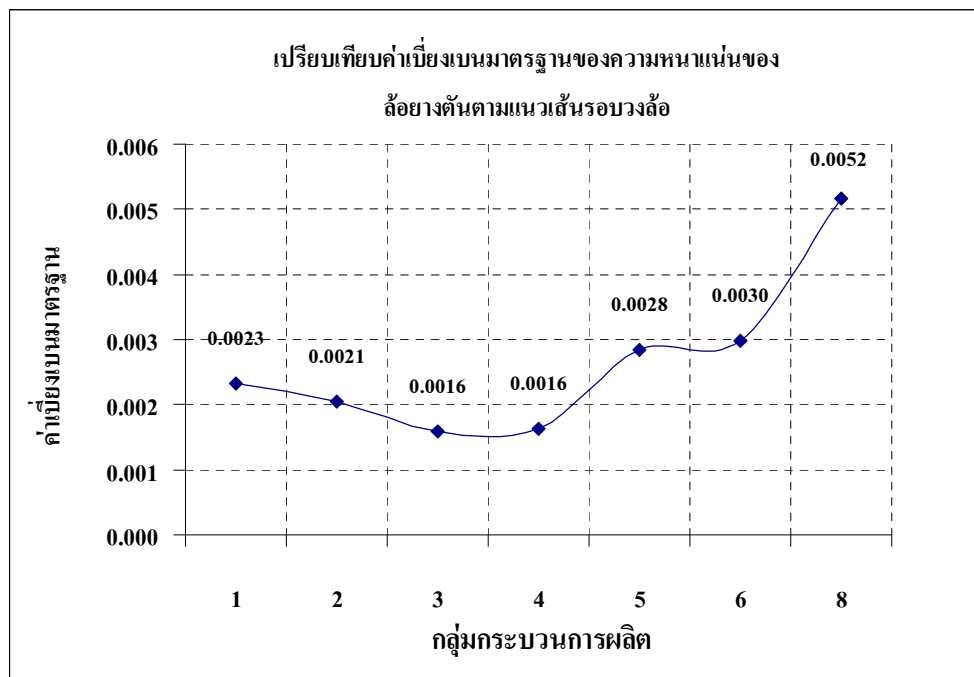
รูปที่ 4.34 เปรียบเทียบค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของการกระจายรูปทรงเฉลี่ยของยางชั้นในบริเวณรับแรงในแนวตั้งฉากและความแข็งรอบวงล้อตามกลุ่มกระบวนการผลิต

จากการวัดระยะการกระจายตัวของรูปทรงของยางชั้นในบริเวณรับแรงในแนวตั้งฉากซึ่งส่งผลต่อการรับภาระของล้อยางโดยตรง พบว่าแต่ละล้อตัวอย่างมีปริมาณของยางชั้นในที่แตกต่างกันเนื่องจากเหตุผลของการลดต้นทุนและการเสริมความแข็งแรงให้กับล้อยาง เมื่อตรวจสอบความสม่ำเสมอของการกระจายรูปทรงของล้อยางชั้นในบริเวณรับแรงในแนวตั้งฉากพบว่ามีความสอดคล้องกับการเบี่ยงเบนของระยะขุมรอบแกนหมุนดังรูปที่ 4.34 ดังนั้นการกระจายรูปทรงของยางชั้นในส่งผลต่อความแข็งของล้อยางโดยตรง

4.4 ผลการตรวจสอบความหนาแน่นเฉลี่ยตลอดเส้นรอบวงของยางชั้นใน



รูปที่ 4.35 ความหนาแน่นเฉลี่ยรอบแกนหมุนของล้อยางตามกลุ่มกระบวนการผลิต



รูปที่ 4.36 ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของความหนาแน่นรอบแกนหมุนของล้อยางตันตามกลุ่มกระบวนการผลิต

จากการตรวจสอบความหนาแน่นเฉลี่ยของล้อยางรอบแกนหมุนตามกลุ่มกระบวนการผลิต ดังรูปที่ 4.35 เมื่อเทียบกับผลของการสันสะเทือนขณะกดกลิ้งดังรูปที่ 4.28 ในกลุ่มกระบวนการผลิต ที่ 1 – 5 ซึ่งเป็นล้อยางต้นจากแหล่งผลิตเดียวกัน พบว่ากระบวนการผลิตที่ 4 คือการใช้เครื่องมือ วนยางตัวใหม่เพียงอย่างเดียวสามารถทำให้ความหนาแน่นของล้อยางโดยรวมเพิ่มขึ้นและมีความ สม่ำเสมอมากขึ้นซึ่งส่งผลต่อการสันสะเทือนที่ลดลง

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาพฤติกรรมการสั้นสะเทือนของล้อยางต้นสองชั้นขณะใช้งาน โดยทำการทดสอบและศึกษาถึงองค์ประกอบที่ส่งผลต่อการสั้นสะเทือน ได้แก่ค่าความแข็งดึงของล้อยางรอบแกนหมุนโดยการกดอัดล้อยางขณะล้อยางไม่หมุน และการกระจายตัวของรูปทรงของยางชั้นในที่ส่งผลต่อความแข็งของล้อยางที่ไม่สม่ำเสมอโดยการตัดผาล้อยางเพื่อตรวจสอบการกระจายรูปทรงของยางชั้นในตามหน้าตัดล้อยาง ในส่วนของการทดสอบการสั้นสะเทือนทำโดยให้ล้อยางรับภาระบรรทุกและกลิ้งบนลูกกลิ้งซึ่งเปรียบเสมือนถนนจำลองและทำการวัดการสั้นสะเทือนของเพลาล้อด้วยอุปกรณ์วัดการสั้นสะเทือนด้วยวิธีขวางกันลำแสงซึ่งเป็นกระบวนการวัดแบบไม่สัมผัส โดยทำการทดสอบและเปรียบเทียบระหว่างล้อยางต้นที่ได้จากกระบวนการผลิตแบบต่าง ๆ ได้แก่ล้อยางต้นที่ใช้กระบวนการผลิตแบบเก่า กระบวนการผลิตโดยใช้การม้วนขึ้นรูปยางด้วยเครื่องม้วนยางที่ออกแบบใหม่ กระบวนการผลิตโดยใช้การม้วนขึ้นรูปยางด้วยเครื่องม้วนยางใหม่ประกอบกับการอัดขึ้นเส้นก่อนอบขึ้นรูปเรียกว่ากระบวนการพรีฟอร์ม และกระบวนการผลิตโดยใช้การม้วนขึ้นรูปยางด้วยเครื่องม้วนยางใหม่ประกอบกับการอัดร้อนก่อนอบขึ้นรูปเรียกว่ากระบวนการพรีเคียว เปรียบเทียบกับล้อยางต้นที่มีขายอยู่ตามท้องตลาด

การศึกษาความแข็งดึงของล้อยางต้นรอบแกนหมุน โดยศึกษาระยะยุบที่เกิดขึ้นเมื่อควบคุมแรงกดให้คงที่ จากการศึกษาของแต่ละล้อยางทั้งที่ปรับและไม่ปรับกระบวนการผลิตและจากล้อยางยี่ห้อมาตรฐานอื่น ๆ พบว่าความแข็งของล้อยางต้นไม่คงที่รอบแกนหมุนหากยิ่งเพิ่มแรงมากขึ้นเท่าไรระยะยุบก็มีแนวโน้มจะเบี่ยงเบนที่สูงขึ้น ค่าความแข็งของล้อยางต้นมีผลมาจากการกระจายรูปทรงของยางชั้นใน ดังนั้น การปรับเปลี่ยนกระบวนการผลิตส่งผลต่อความแข็งดึงของล้อยางต้นโดยตรง ในกลุ่มของล้อยางต้นที่ได้ทำการปรับกระบวนการผลิต กระบวนการผลิตโดยใช้เครื่องม้วนใหม่จะทำให้ยางชั้นในมีความสม่ำเสมอของความสมมาตรที่สุดใกล้เคียงกับล้อยางที่นำมาใช้เป็นมาตรฐานและช่วยทำให้ความหนาแน่นเฉลี่ยของล้อยางต้นเพิ่มขึ้น

พฤติกรรมการสั้นสะเทือนของล้อยางต้นขณะถูกกดและกลิ้งจะมีแอมพลิจูดของการสั้นสะเทือนที่ลดลงเมื่อได้รับแรงกดและความเร็วในการหมุนเพิ่มขึ้น ล้อยางที่ผลิตด้วยเครื่องม้วนใหม่มีแอมพลิจูดของการสั้นสะเทือนเพลาน้อยกว่ากระบวนการอื่นและการเคลื่อนตัวดังกล่าวนี้เกี่ยวข้องเท่ากับล้อยางต้นมาตรฐานยี่ห้ออื่น ๆ แอมพลิจูดของการสั้นสะเทือนของล้อยางต้นที่ได้จากการผลิตด้วยเครื่องม้วนเก่าจะมีแอมพลิจูดของการสั้นสะเทือนมากที่สุดและน้อยลงเมื่อเปลี่ยนกระบวนการ ซึ่งกระบวนการผลิตที่สามารถลดการสั้นสะเทือนได้ดีคือกระบวนการผลิตโดยใช้เครื่อง

ม้วนใหม่เพียงอย่างเดียวซึ่งเป็นกระบวนการผลิตที่ดีที่สุดสำหรับการศึกษาในงานวิจัยนี้ แต่การประเมินความรุนแรงของการสั้นสะเทือนนั้นจะต้องพิจารณาทั้งแอมพลิจูดและความถี่ของการสั้นสะเทือนซึ่งถ้าแอมพลิจูดในการสั้นสะเทือนต่ำแต่เกิดที่ความถี่สูงก็จะมีแนวโน้มของการสั้นรุนแรงกว่าได้

ข้อเสนอแนะ

1. ความแข็งดิ่งที่เปลี่ยนไปหลังจากล้อยางถูกใช้งานควรมีการตรวจสอบซ้ำที่อุณหภูมิห้องเพื่อเปรียบเทียบกับความแข็งดิ่งก่อนใช้งาน เพราะเมื่อล้อยางได้รับแรงอัดต่อเนื่องไปช่วงหนึ่งสมบัติยืดหยุ่นของยางจะเปลี่ยนไปตามอุณหภูมิเมื่อปล่อยให้อุณหภูมิล้อยางกลับมายังอุณหภูมิห้องความแข็งดิ่งของล้อยางอาจจะไม่เท่าเดิม

2. ควรทำการศึกษาถึงค่าความหน่วงของเนื้อยางเพื่อเป็นคุณสมบัติในการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของล้อยางต้นสองชั้น

3. ลูกกลิ้งที่ทำหน้าที่เปรียบเสมือนพื้นถนนควรจะทำให้มีเส้นผ่านศูนย์กลางโตกว่าเดิมเพื่อให้มีพื้นที่สัมผัสของหน้ายางมากขึ้นส่งผลต่อการกระจายแรงของล้อยาง ดังนั้นเครื่องทดสอบที่ใช้ในงานวิจัยนี้ยังไม่สามารถทำการทดสอบล้อยางต้นที่มีขนาดใหญ่กว่า ขนาด 6.00-9 rim 4 ได้

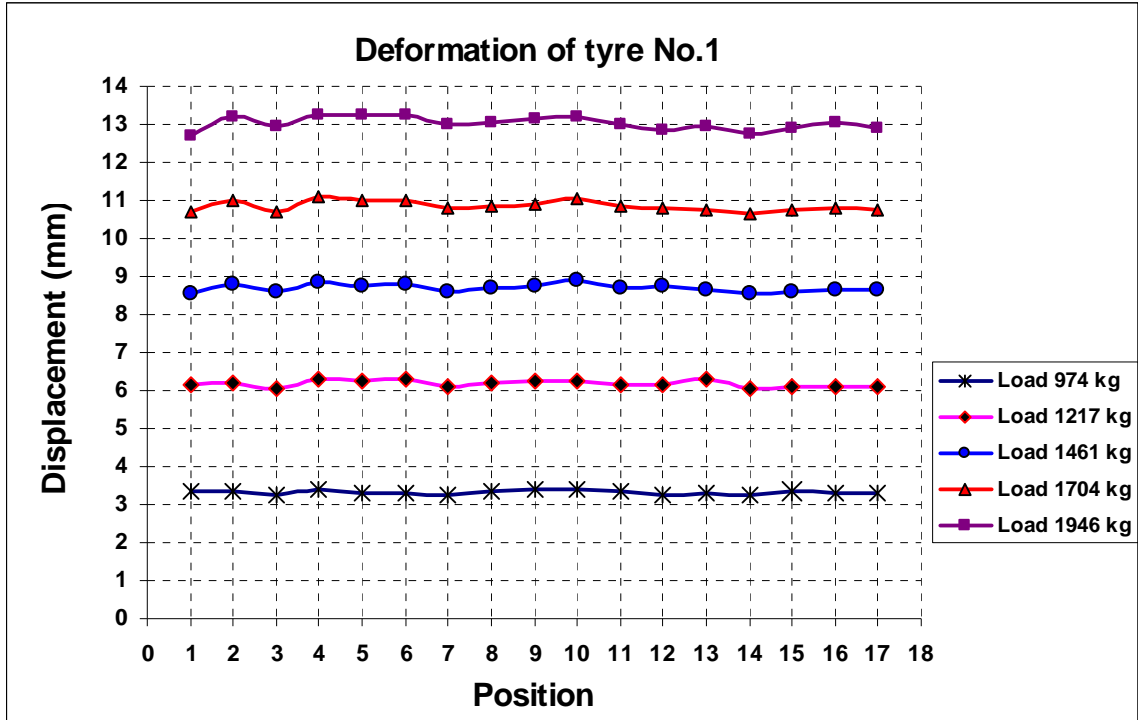
บรรณานุกรม

1. ก่อเกียรติ บุญชูกุศล, สมศักดิ์ ไชยะภินันท์ และ ชัยโรจน์ คุณพนิชกิจ. 2540. การวิเคราะห์การสั่นสะเทือน :การเฝ้าตรวจและการจัดการการบำรุงรักษา. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ. สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น).
2. เจริญ เพชรมณี . 2547. เรียนลัด LabVIEW™ Software for Measurement and Automation. กรุงเทพฯ. ซีเอ็ดดูเคชั่น.
3. ชลดา เลวิส และคณะ. 2547. การปรับปรุงความทนทานและการขบปีที่สะกดสบายของยางรถล้อตัน. รายงานวิจัย. กรุงเทพฯ. สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย.
4. ประดิษฐ์ หมู่เมืองสอง และ สุขฐาน หรรษสุข. 2550. การวิเคราะห์การสั่นสะเทือน.กรุงเทพฯ. ซีเอ็ดดูเคชั่น.
5. ศูนย์ที่ปรึกษาด้าน โลจิสติกส์และการจัดเก็บยกย้ายสินค้าและวัสดุ บริษัทเจนบรเรจิด จำกัด. 2547. รถยกอุตสาหกรรม. กรุงเทพฯ. ศูนย์ฯ.
6. มนตรี พิรุณเกษตร. 2548. การสั่นสะเทือนทางกล. กรุงเทพฯ. ท้อป.
7. เสน่ห์ รักเกื้อ. 2550. ความสมดุลการหมุนของล้อยางตันสองชั้นหลังการปรับยางชั้นในให้สม่ำเสมอ. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
8. อุทิศ สุริภา. 2548. การกระจายตัวของความเค้นและความเครียดในล้อยางตันภายใต้สภาวะที่รับโหลดแบบสถิต. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.
9. Singiresu S. Rao.2545. การสั่นทางกล Mechanical vibrations. แปลโดย กนต์ธร ชำนิประศาสน์. กรุงเทพฯ: เพียร์สัน เอ็ดดูเคชั่น อินโดไชน่า.
10. Chetpattananondh, K. and Jindapetch, N. 2005. A New Technique of Vibration Measurement for Cylinder. PSU-UNS International Conference on Engineering and Environment - ICEE-2005. Novi Sad. May 19-20.

11. Chetpattananondh, K., Dechwayukul, C. and Thongruang, W. 2008. An applied laser shade vibration measurement technique for rotating imbalance for quality testing of solid tires. *Measurement* 41: 922–933.
12. Clijmans, L., Ramon, H., Langenakens, DeBaerdemaeker J. 1996. Influence of tyres on the dynamic behavior of a lawn mower. *Journal of Terramechanics* 33 (4):195-208
13. Daniel J. Inman. 1996. *Engineering vibration*. Upper Saddle River, N.J. Prentice-Hall International.
14. IRD Mechanalysis, Inc. 1993. *IRD Mechanalysis IQ 2000 Application Guide*. Columbus.
15. Jianmin, G., Gall, R. and Zuomin, W. 2001. Dynamic damping and Stiffness Characteristics of The Rolling Tire. *Tire Science and Technology* 29 (4): 258-268.
16. Kising, A. and Gohlich, H. 1989. Dynamic Characteristics of Large Tyres. *The British Society for Research in Agricultural Engineering* 43: 11-21.
17. Michael, S. and Johnson Jr., P.E. 2000. Vibration Tests For Bearing Wear. *ASHRAE Journal* 2000 : 52-56.
18. Taylor, R.K., Bashford, L.L. and Schrock, M.D. 2000. Methods for Measuring Vertical Tire Stiffness. *Transaction of the American Society of Agricultural Engineer* 43 (6) :1415-1419.
19. Thomson, W. and Dillon, D.M. 1993. *Theory of Vibration with Application*. Columbus. Prentice Hall.
20. TMC Corporation. 2000. *Operation & Maintenance Manual Forklift Truck*. Tokyo: Nishi-shimbashi, Minato-ku.

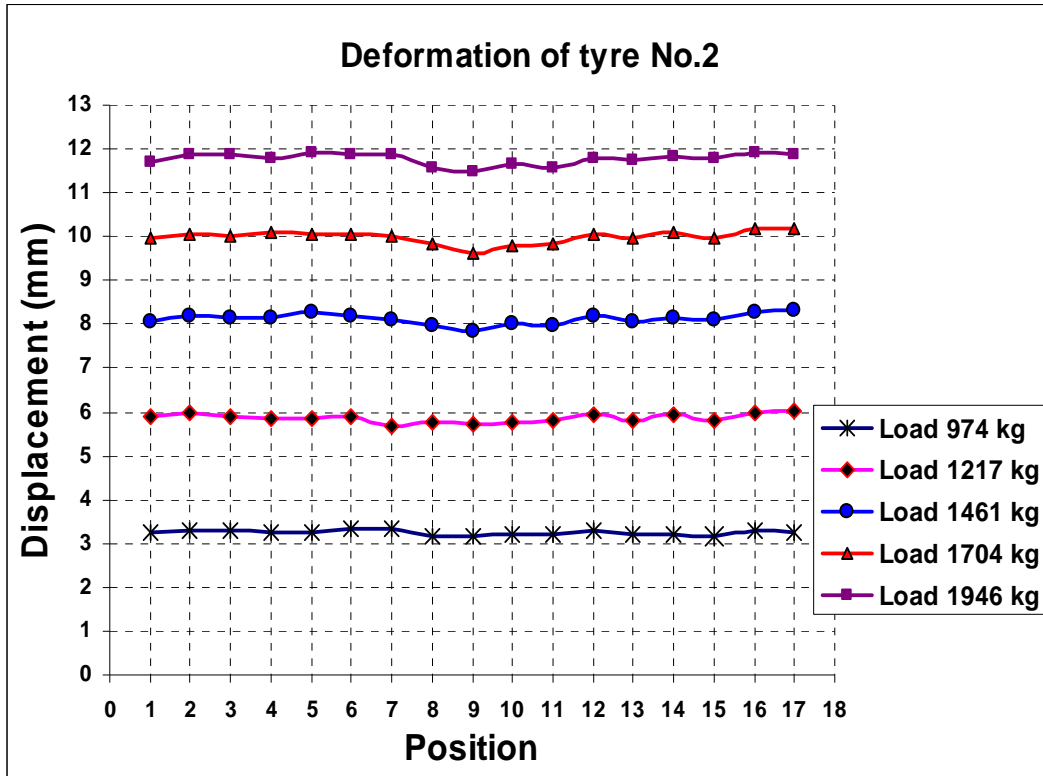
ภาคผนวก

ผลการทดสอบการกดอัดล้อยางต้นในสภาวะสถิตย์ของล้อยางต้นตัวอย่างจำนวน 23 ล้อ



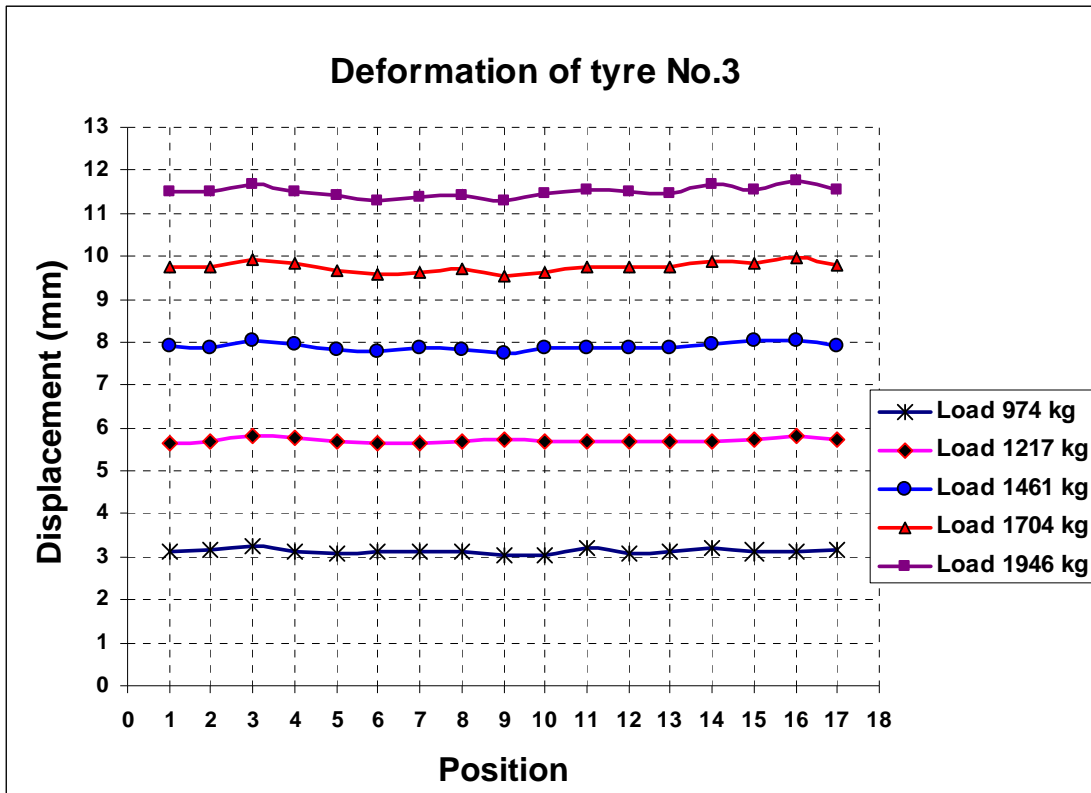
Load (kg)	974	1,217	1,461	1,704	1,946
SD	0.05	0.08	0.10	0.13	0.16
Max	3.393	6.318	8.910	11.106	13.267
Min	3.240	6.054	8.535	10.648	12.703
Max-Min	0.153	0.264	0.375	0.458	0.564
mean	3.319	6.174	8.703	10.850	13.023

รูปที่ a1 แสดงระยะยุบตัวของล้อยางตัวอย่าง 1 ที่แรงกระทำต่าง ๆ



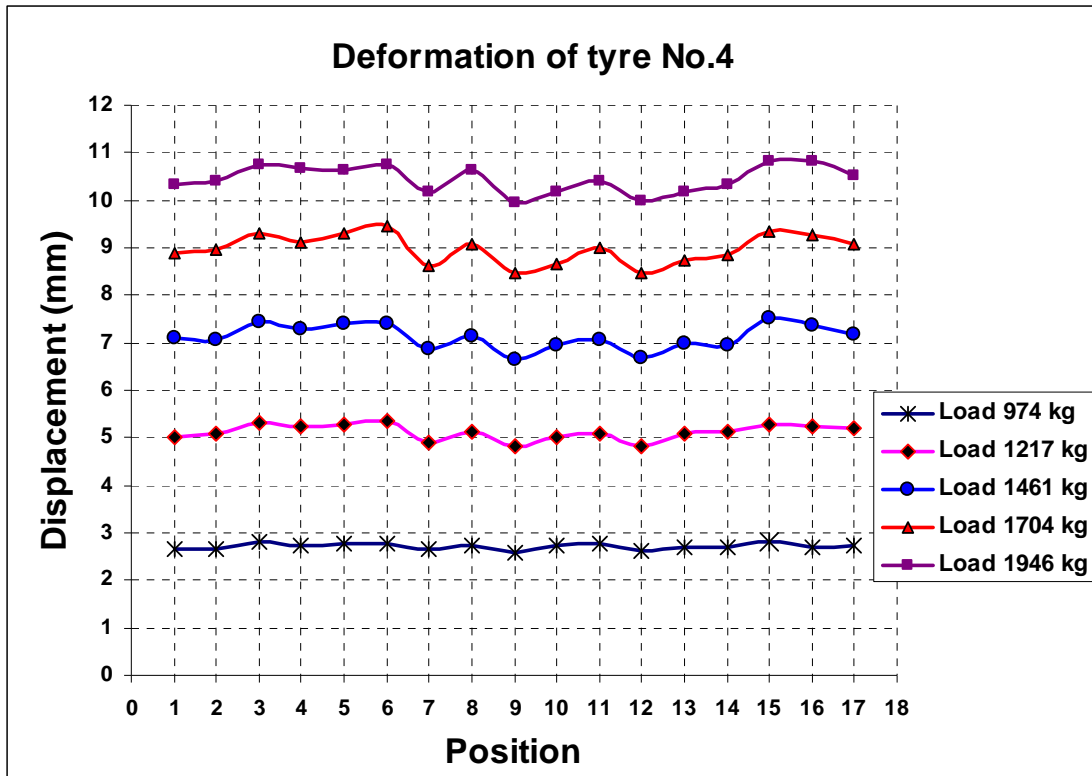
Load (kg)	974	1,217	1,461	1,704	1,946
SD	0.06	0.09	0.12	0.14	0.13
Max (mm)	3.349	6.016	8.311	10.176	11.924
Min (mm)	3.151	5.668	7.844	9.617	11.502
Max-Min (mm)	0.198	0.348	0.467	0.558	0.422
Mean (mm)	3.249	5.857	8.122	9.983	11.772

รูปที่ a2 แสดงระยะยุบตัวของล้อยางตัวอย่าง 2 ที่แรงกระทำต่าง ๆ



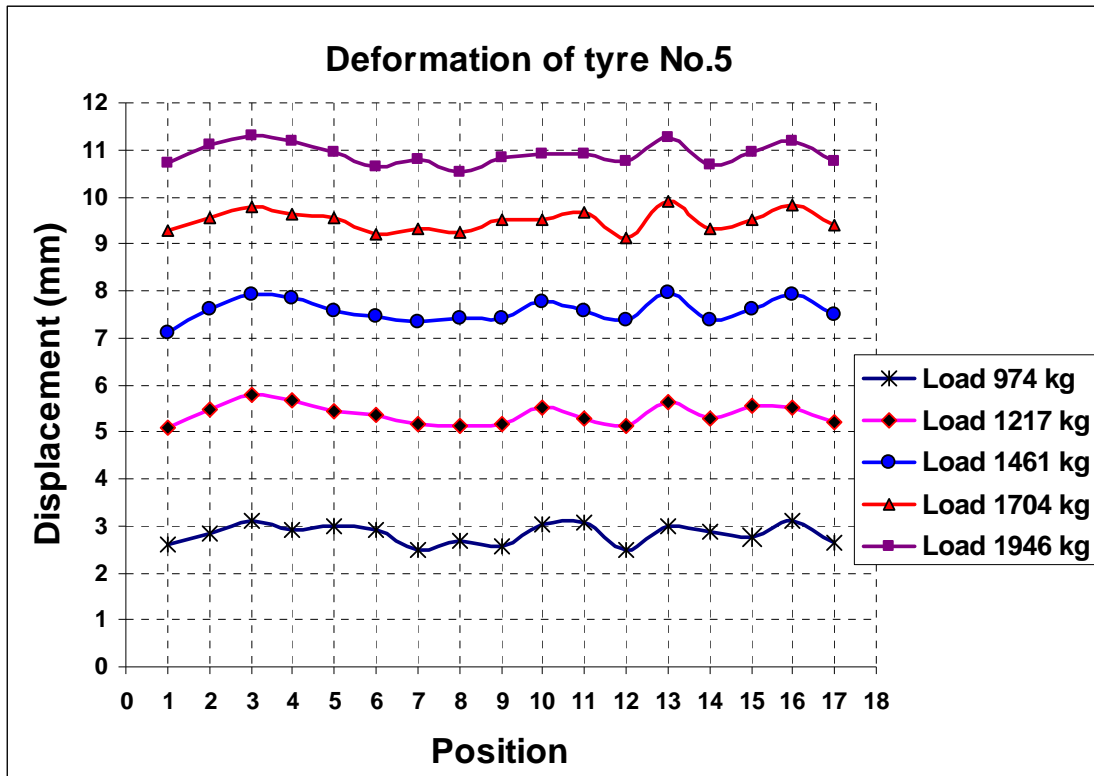
Load (kg)	974	1,217	1,461	1,704	1,946
SD	0.05	0.05	0.08	0.11	0.12
Max (mm)	3.243	5.804	8.055	9.982	11.744
Min (mm)	3.051	5.652	7.758	9.555	11.284
Max-Min (mm)	0.191	0.152	0.296	0.427	0.461
Mean (mm)	3.132	5.705	7.893	9.748	11.500

รูปที่ a3 แสดงระยะยุบตัวของล้ออย่างตัวอย่าง 3 ที่แรงกระทำต่าง ๆ



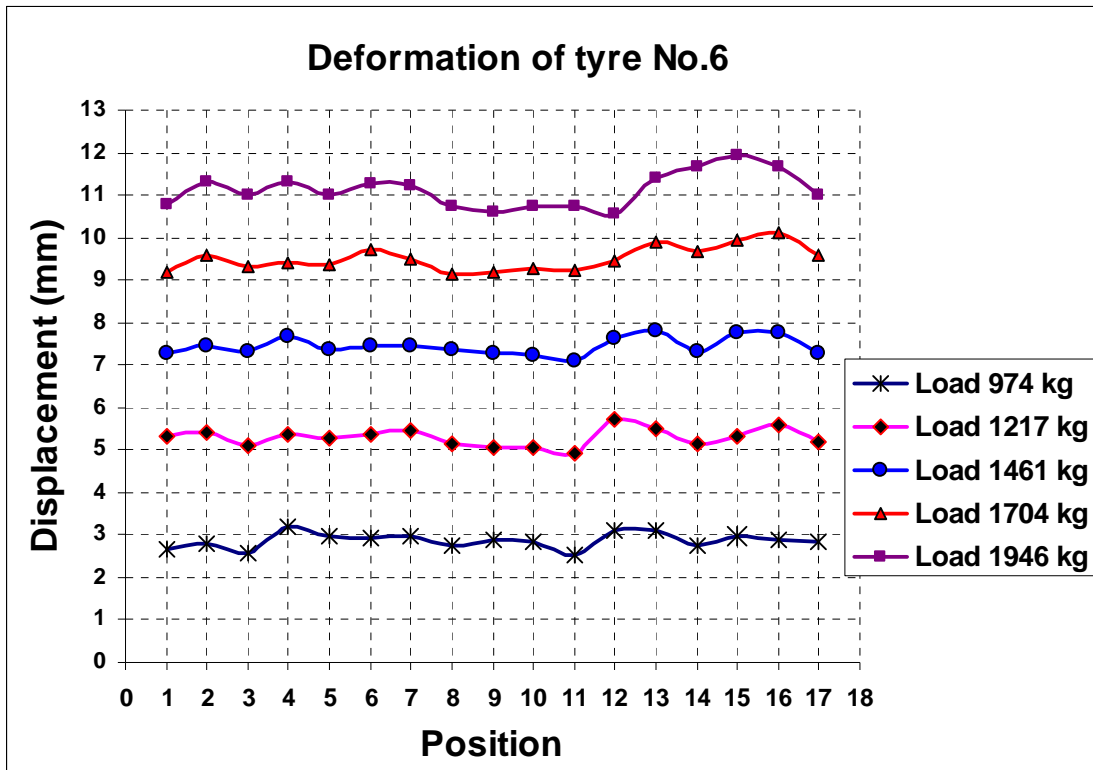
Load (kg)	974	1,217	1,461	1,704	1,946
SD	0.06	0.16	0.25	0.30	0.28
Max (mm)	2.819	5.370	7.525	9.455	10.835
Min (mm)	2.567	4.806	6.643	8.450	9.934
Max-Min (mm)	0.252	0.565	0.882	1.005	0.901
Mean (mm)	2.714	5.121	7.117	8.976	10.439

รูปที่ a4 แสดงระยะยุบตัวของล้ออย่างตัวอย่าง 4 ที่แรงกระทำต่าง ๆ



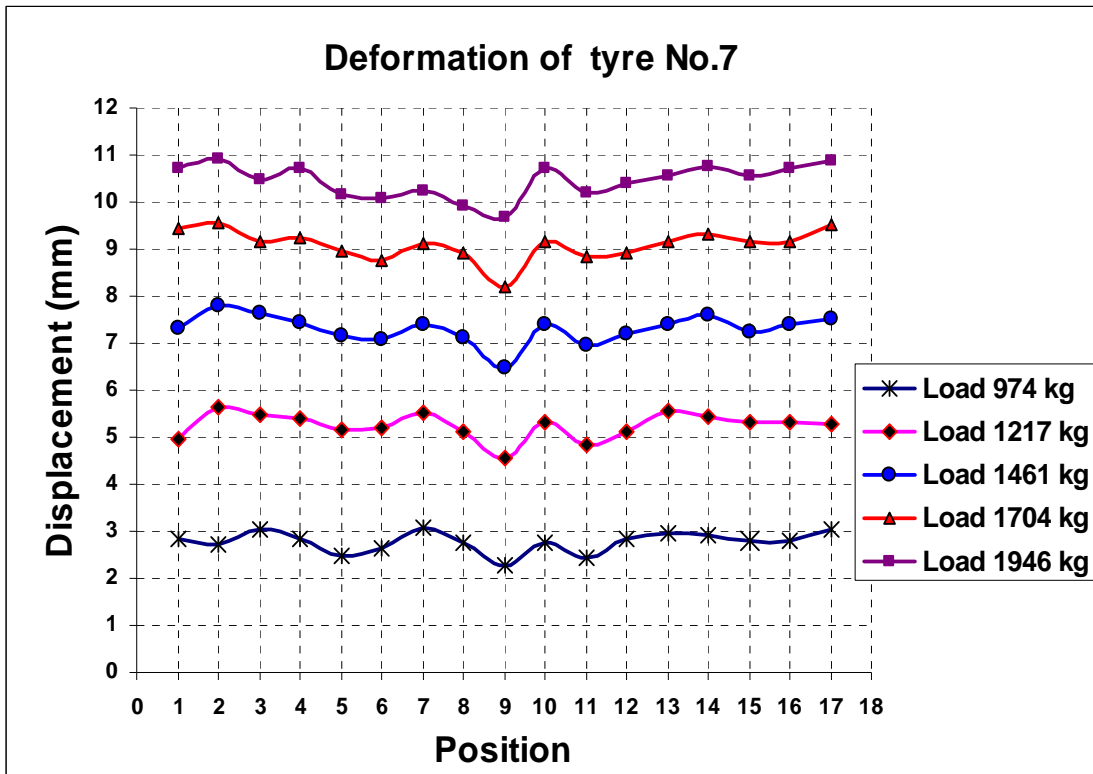
Load (kg)	974	1,217	1,461	1,704	1,946
SD	0.21	0.21	0.23	0.22	0.22
Max (mm)	3.117	5.769	7.949	9.894	11.303
Min (mm)	2.473	5.097	7.125	9.133	10.543
Max-Min (mm)	0.644	0.672	0.824	0.761	0.760
Mean (mm)	2.826	5.375	7.578	9.492	10.917

รูปที่ a5 แสดงระยะยุบตัวของล้ออย่างตัวอย่าง 5 ที่แรงกระทำต่าง ๆ



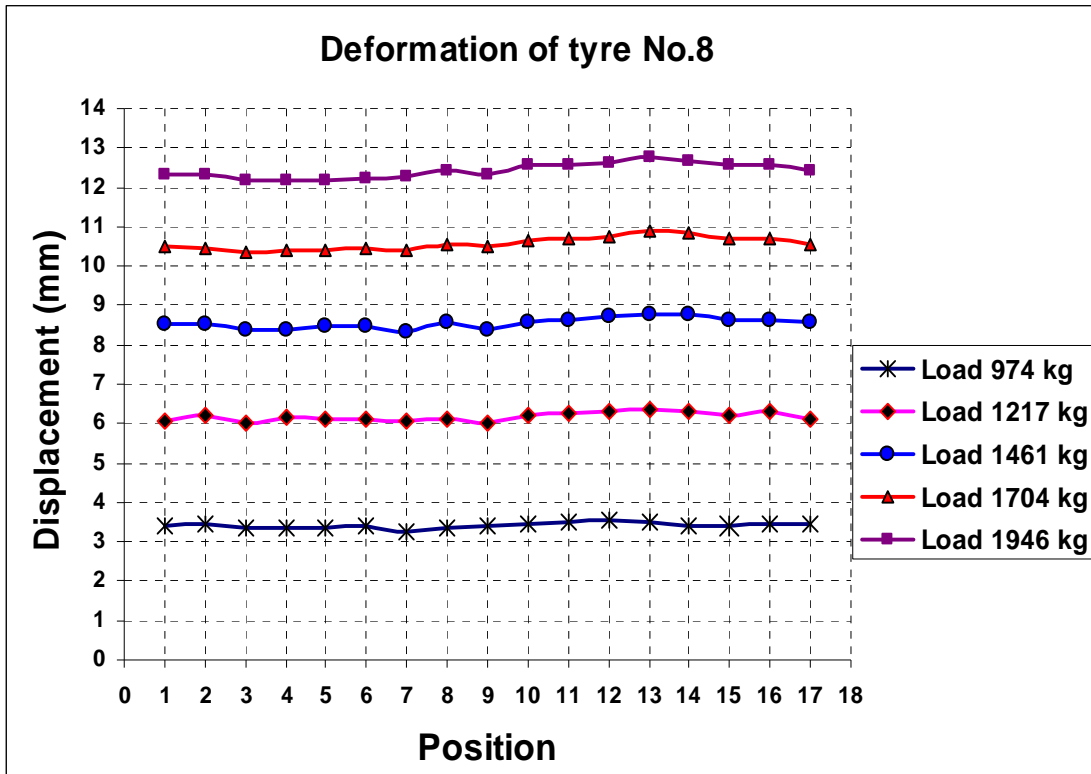
Load (kg)	974	1,217	1,461	1,704	1,946
SD	0.18	0.20	0.20	0.28	0.39
Max (mm)	3.201	5.739	7.799	10.128	11.926
Min (mm)	2.549	4.935	7.105	9.145	10.572
Max-Min (mm)	0.653	0.804	0.694	0.983	1.354
Mean (mm)	2.868	5.295	7.446	9.504	11.113

รูปที่ a6 แสดงระยะยุบตัวของล้ออย่างตัวอย่าง 6 ที่แรงกระทำต่าง ๆ



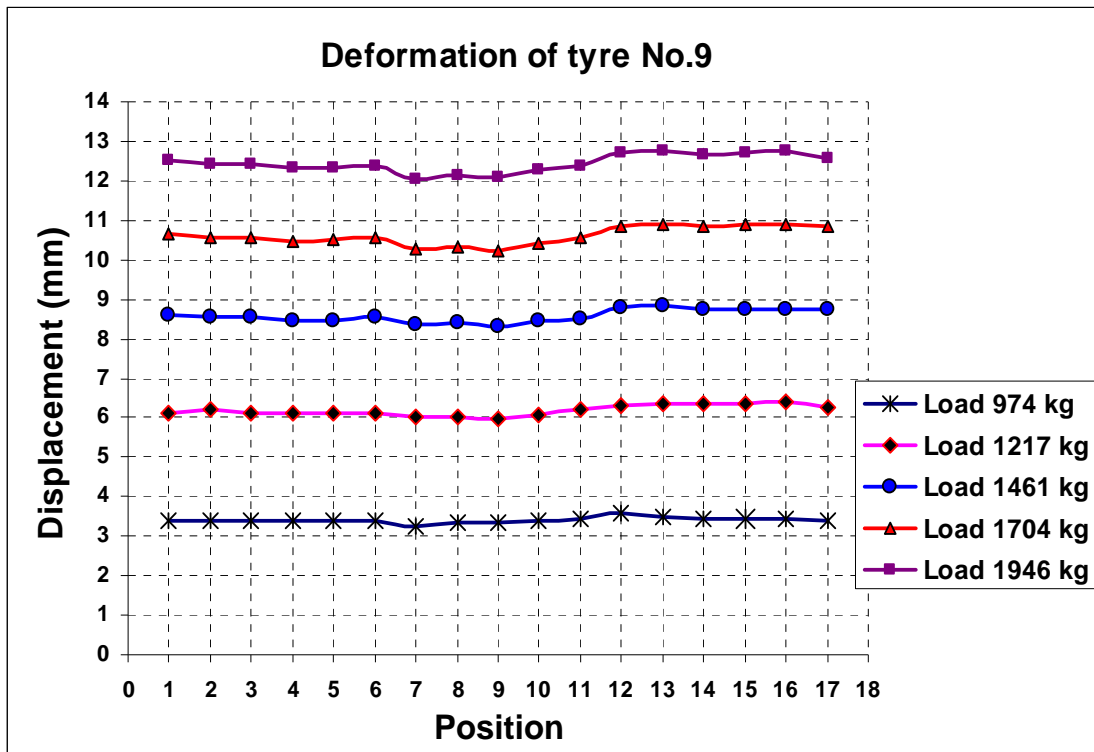
Load (kg)	974	1,217	1,461	1,704	1,946
SD	0.21	0.27	0.29	0.31	0.35
Max (mm)	3.093	5.629	7.784	9.556	10.922
Min (mm)	2.292	4.561	6.475	8.219	9.661
Max-Min (mm)	0.801	1.068	1.309	1.337	1.261
Mean (mm)	2.784	5.246	7.303	9.095	10.452

รูปที่ a7 แสดงระยะยุบตัวของล้อยางตัวอย่าง 7 ที่แรงกระทำต่าง ๆ



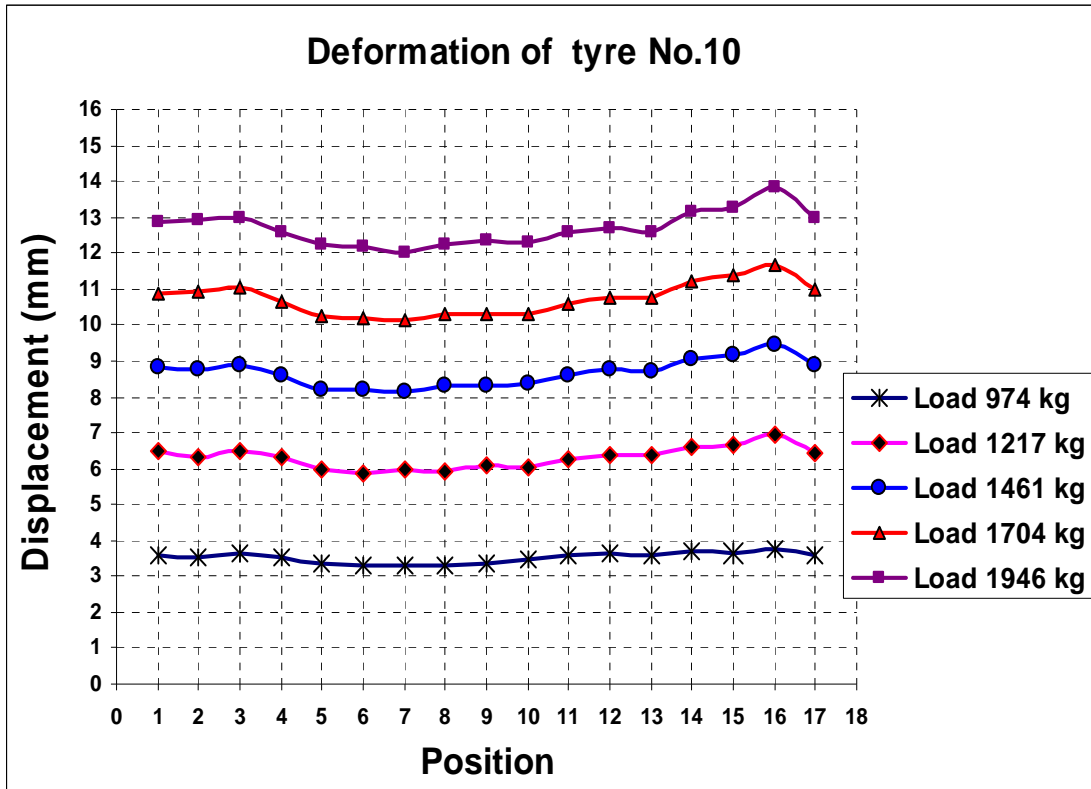
Load (kg)	974	1,217	1,461	1,704	1,946
SD	0.06	0.10	0.13	0.16	0.18
Max (mm)	3.541	6.368	8.788	10.871	12.769
Min (mm)	3.272	6.024	8.308	10.343	12.189
Max-Min (mm)	0.269	0.344	0.479	0.528	0.580
Mean (mm)	3.415	6.177	8.548	10.574	12.427

รูปที่ a8 แสดงระยะยุบตัวของล้ออย่างตัวอย่าง 8 ที่แรงกระทำต่าง ๆ



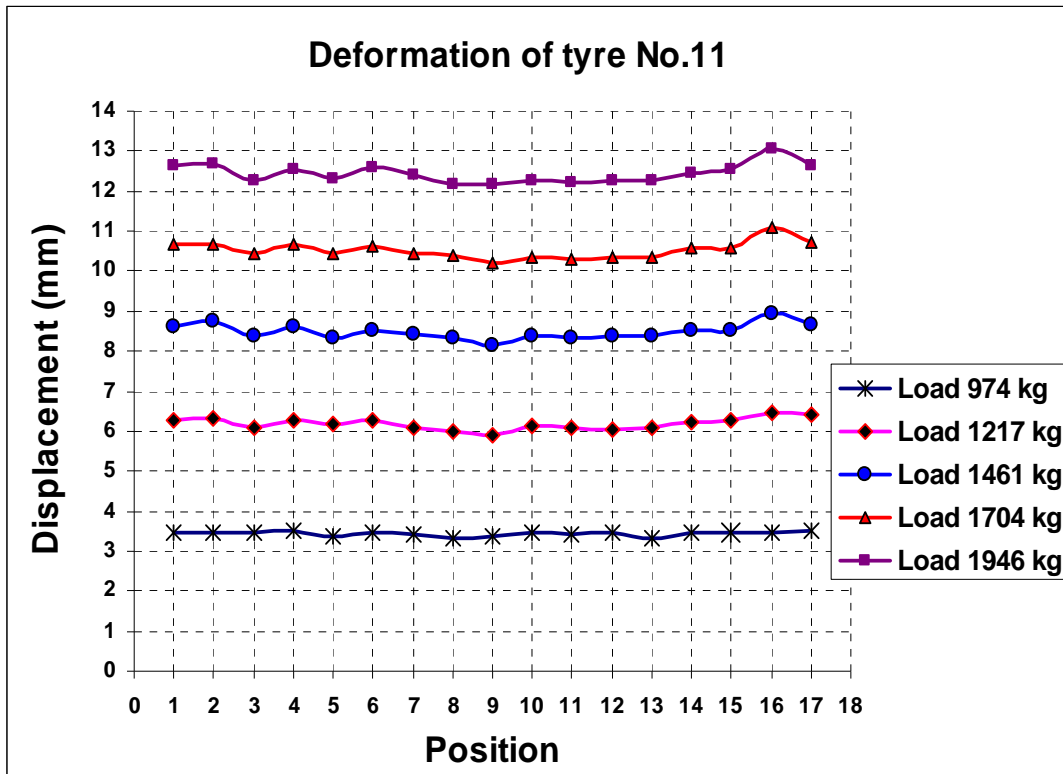
Load (kg)	974	1,217	1,461	1,704	1,946
SD	0.06	0.13	0.16	0.22	0.22
Max (mm)	3.564	6.420	8.859	10.910	12.757
Min (mm)	3.270	5.980	8.314	10.240	12.044
Max-Min (mm)	0.294	0.440	0.546	0.669	0.712
Mean (mm)	3.415	6.190	8.581	10.605	12.434

รูปที่ a9 แสดงระยะยุบตัวของล้ออย่างตัวอย่าง 9 ที่แรงกระทำต่าง ๆ



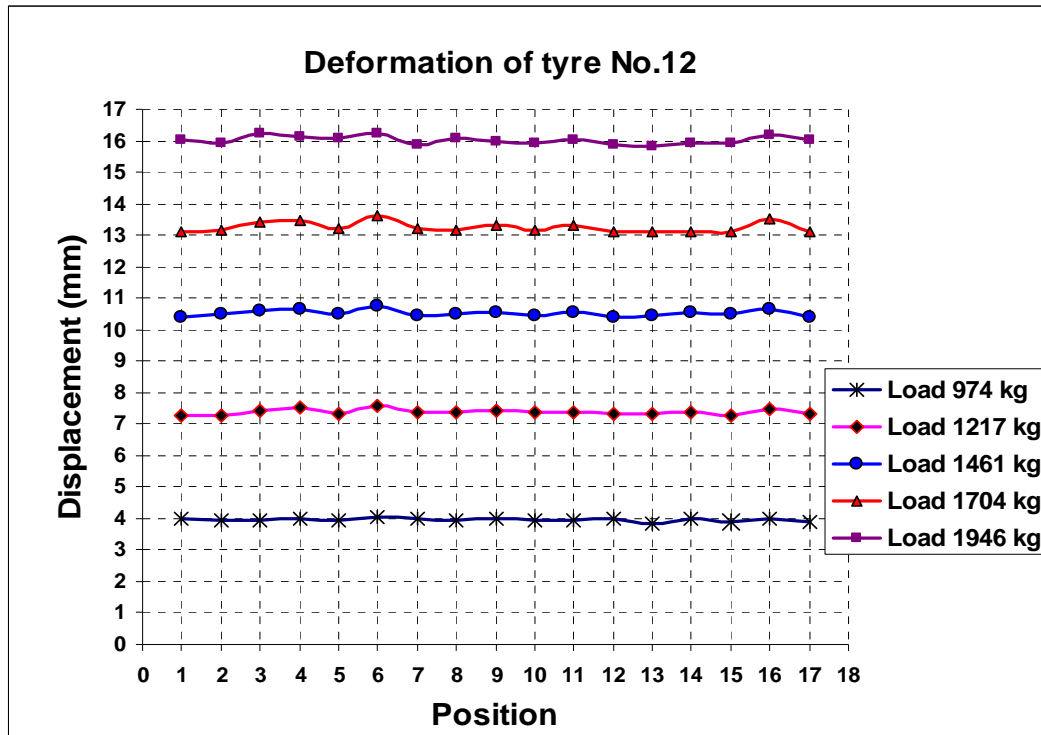
Load (kg)	974	1,217	1,461	1,704	1,946
SD	0.15	0.28	0.36	0.43	0.46
Max (mm)	3.776	6.919	9.441	11.647	13.843
Min (mm)	3.275	5.861	8.161	10.127	12.010
Max-Min (mm)	0.500	1.058	1.280	1.519	1.832
Mean (mm)	3.519	6.297	8.665	10.730	12.690

รูปที่ a10 แสดงระยะยุบตัวของล้อยางตัวอย่าง 10 ที่แรงกระทำต่าง ๆ



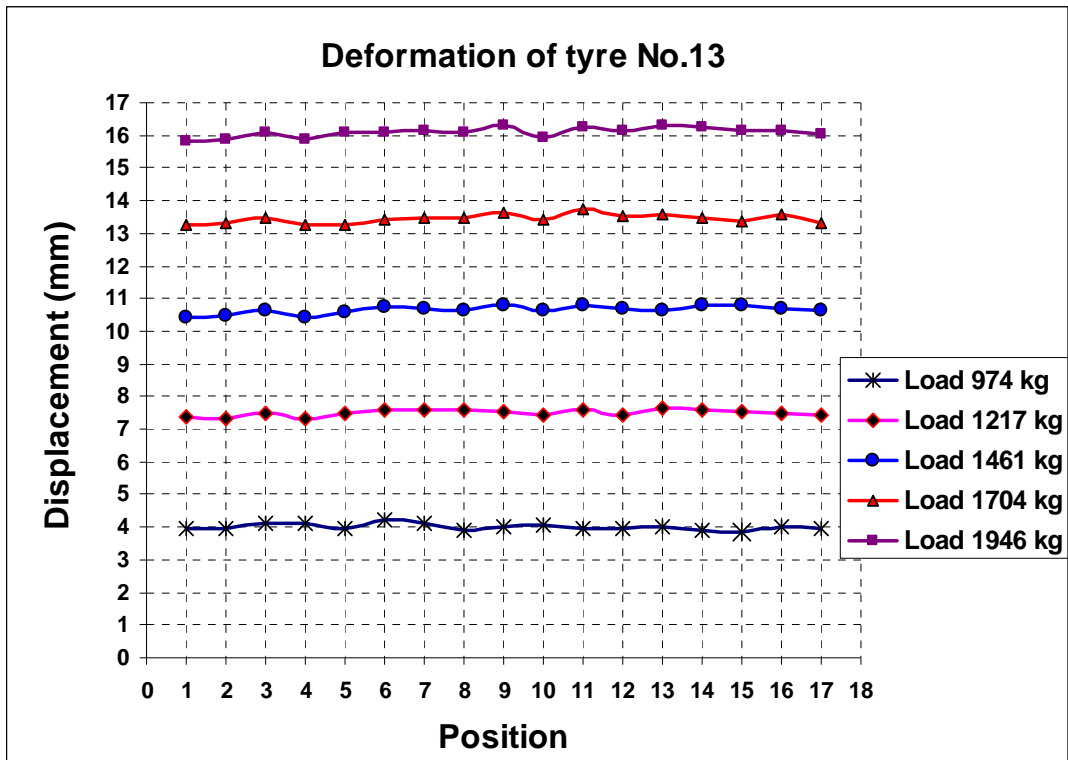
Load (kg)	974	1,217	1,461	1,704	1,946
SD	0.05	0.15	0.18	0.21	0.23
Max (mm)	3.514	6.471	8.938	11.101	13.047
Min (mm)	3.323	5.885	8.149	10.218	12.181
Max-Min (mm)	0.191	0.586	0.789	0.883	0.866
Mean (mm)	3.434	6.180	8.487	10.527	12.442

รูปที่ a11 แสดงระยะยุบตัวของล้อยางตัวอย่าง 11 ที่แรงกระทำต่าง ๆ



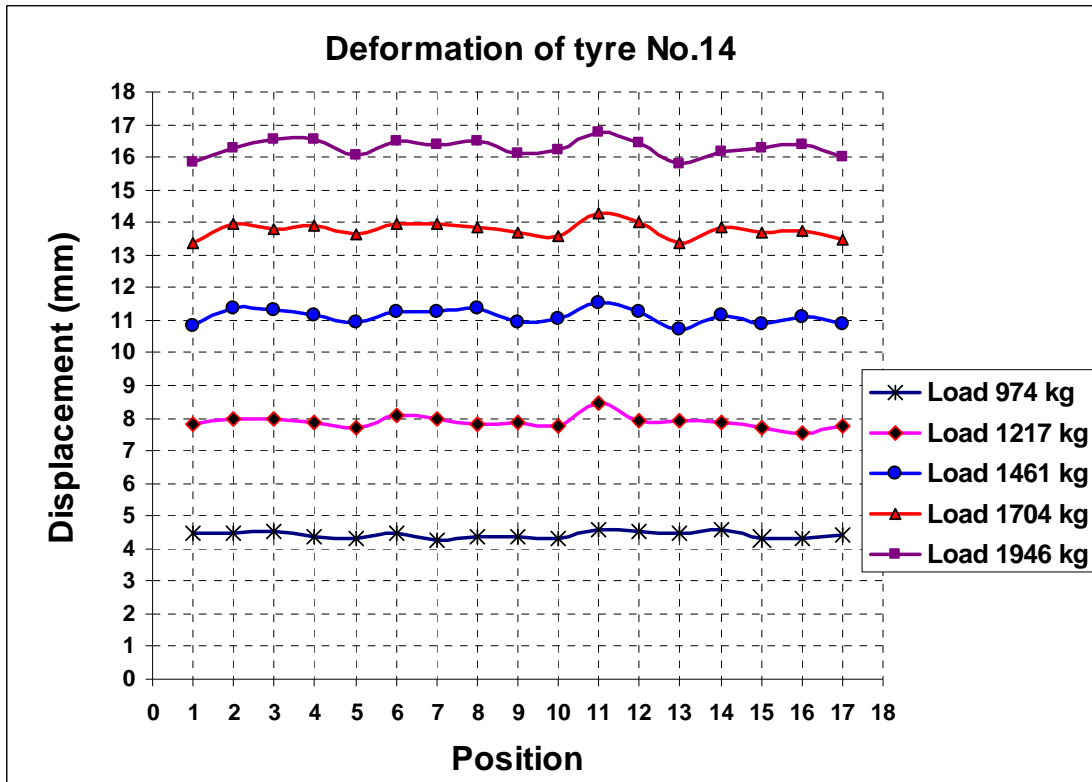
Load (kg)	974	1,217	1,461	1,704	1,946
SD	0.04	0.09	0.10	0.16	0.12
Max (mm)	4.043	7.597	10.744	13.637	16.235
Min (mm)	3.854	7.261	10.402	13.083	15.836
Max-Min (mm)	0.190	0.336	0.342	0.554	0.399
Mean (mm)	3.959	7.375	10.522	13.250	16.019

รูปที่ a12 แสดงระยะยุบตัวของล้ออย่างตัวอย่าง 12 ที่แรงกระทำต่าง ๆ



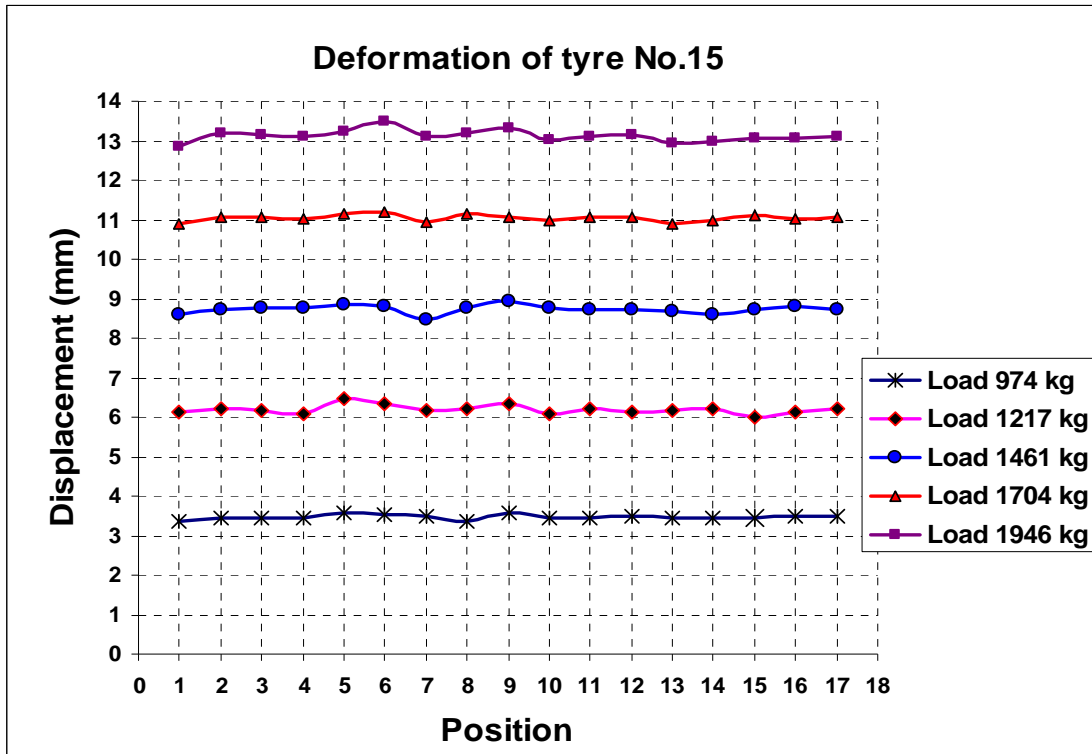
Load (kg)	974	1,217	1,461	1,704	1,946
SD	0.09	0.09	0.12	0.13	0.14
Max (mm)	4.233	7.627	10.806	13.712	16.322
Min (mm)	3.850	7.306	10.422	13.247	15.821
Max-Min (mm)	0.383	0.321	0.384	0.466	0.501
Mean (mm)	3.999	7.499	10.653	13.444	16.095

รูปที่ a13 แสดงระยะยุบตัวของล้อยางตัวอย่าง 13 ที่แรงกระทำต่าง ๆ



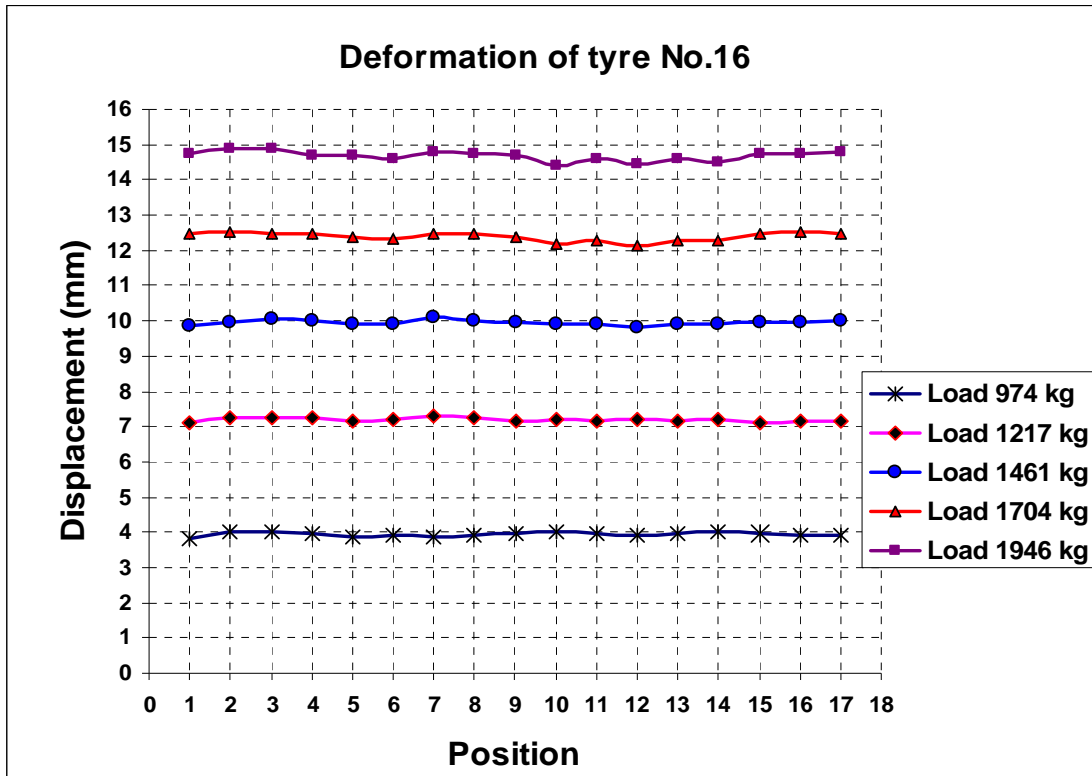
Load (kg)	974	1,217	1,461	1,704	1,946
SD	0.10	0.18	0.22	0.23	0.26
Max (mm)	4.566	8.434	11.526	14.263	16.759
Min (mm)	4.240	7.570	10.728	13.371	15.767
Max-Min (mm)	0.326	0.864	0.798	0.893	0.992
Mean (mm)	4.413	7.886	11.119	13.775	16.279

รูปที่ a14 แสดงระยะยุบตัวของล้อยางตัวอย่าง 14 ที่แรงกระทำต่าง ๆ



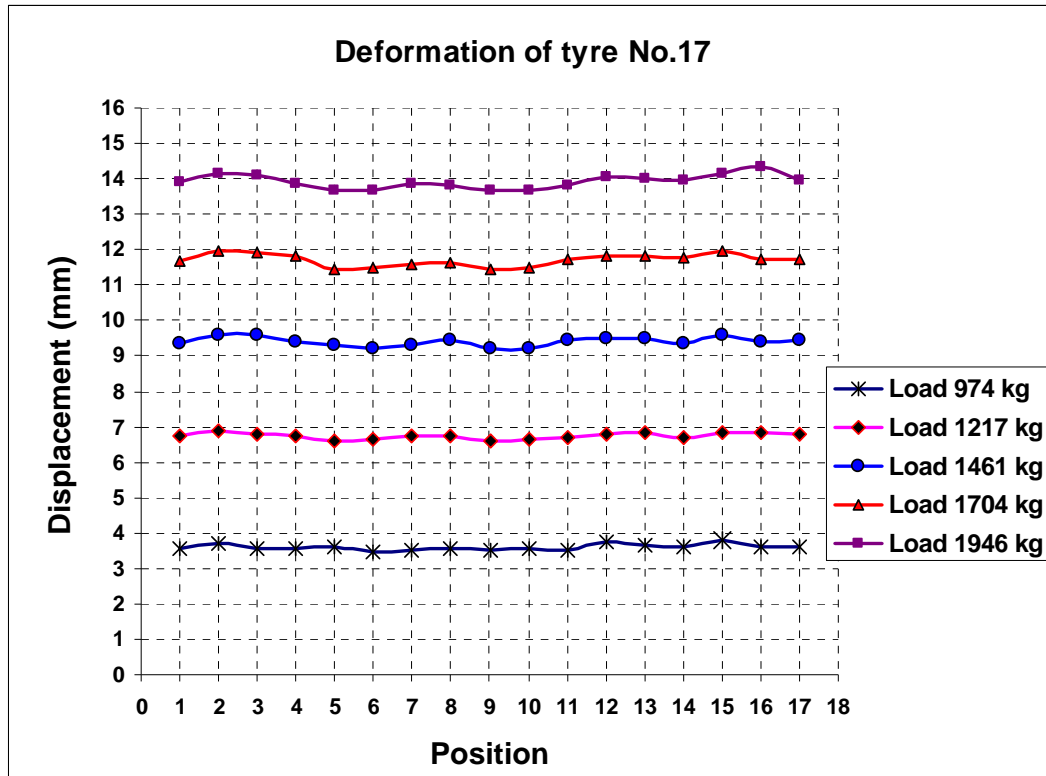
Load (kg)	974	1,217	1,461	1,704	1,946
SD	0.06	0.11	0.10	0.08	0.14
Max (mm)	3.560	6.478	8.950	11.187	13.493
Min (mm)	3.347	5.994	8.487	10.874	12.865
Max-Min (mm)	0.213	0.484	0.463	0.313	0.628
Mean (mm)	3.460	6.194	8.734	11.038	13.124

รูปที่ a15 แสดงระยะยุบตัวของล้ออย่างตัวอย่าง 15 ที่แรงกระทำต่าง ๆ



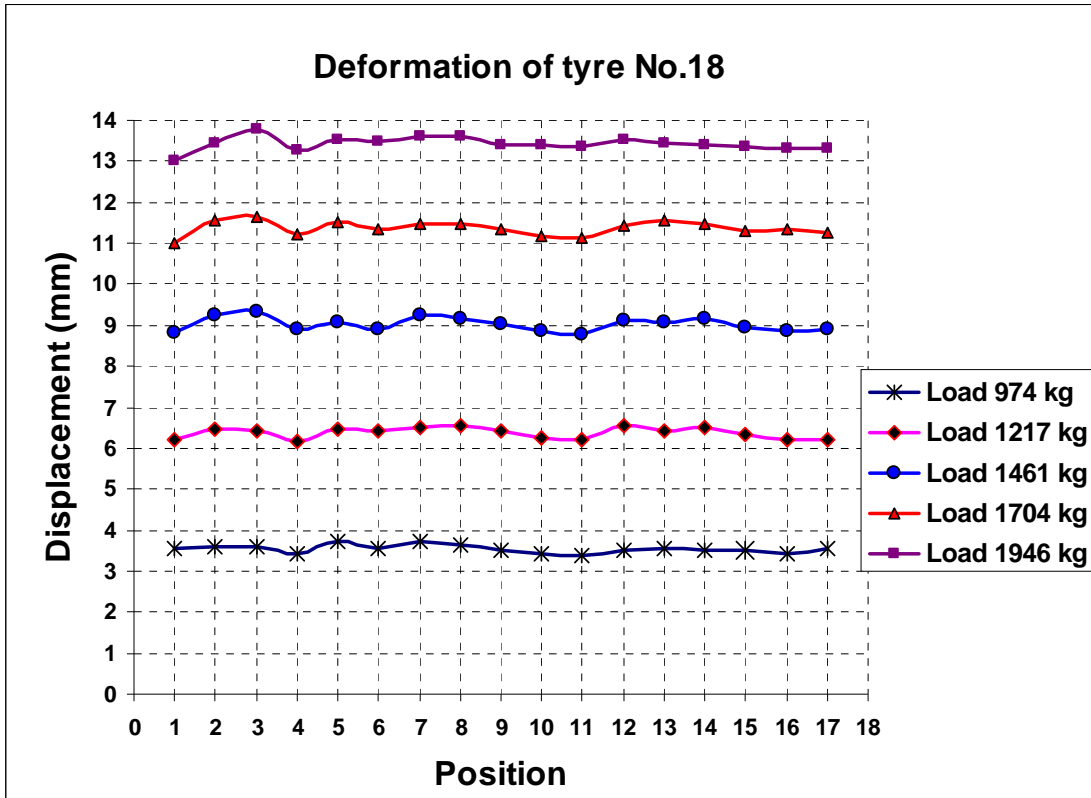
Load (kg)	974	1,217	1,461	1,704	1,946
SD	0.05	0.05	0.07	0.11	0.13
Max (mm)	4.016	7.299	10.084	12.506	14.881
Min (mm)	3.822	7.097	9.822	12.144	14.412
Max-Min (mm)	0.194	0.202	0.263	0.362	0.470
Mean (mm)	3.942	7.188	9.946	12.384	14.679

รูปที่ a16 แสดงระยะยุบตัวของล้อยางตัวอย่าง 16 ที่แรงกระทำต่าง ๆ



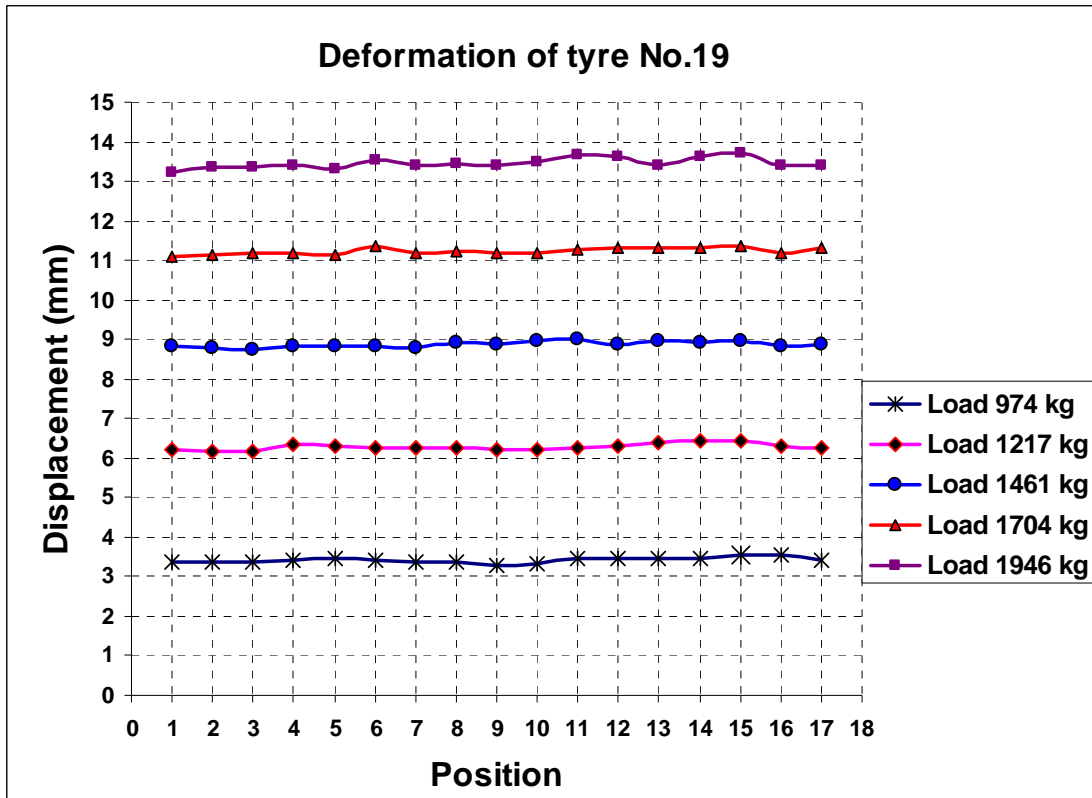
Load (kg)	974	1,217	1,461	1,704	1,946
SD	0.08	0.08	0.12	0.16	0.19
Max (mm)	3.800	6.883	9.599	11.968	14.315
Min (mm)	3.469	6.605	9.212	11.428	13.653
Max-Min (mm)	0.332	0.278	0.387	0.541	0.662
Mean (mm)	3.596	6.737	9.398	11.707	13.916

รูปที่ a17 แสดงระยะยุบตัวของล้อยางตัวอย่าง 17 ที่แรงกระทำต่าง ๆ



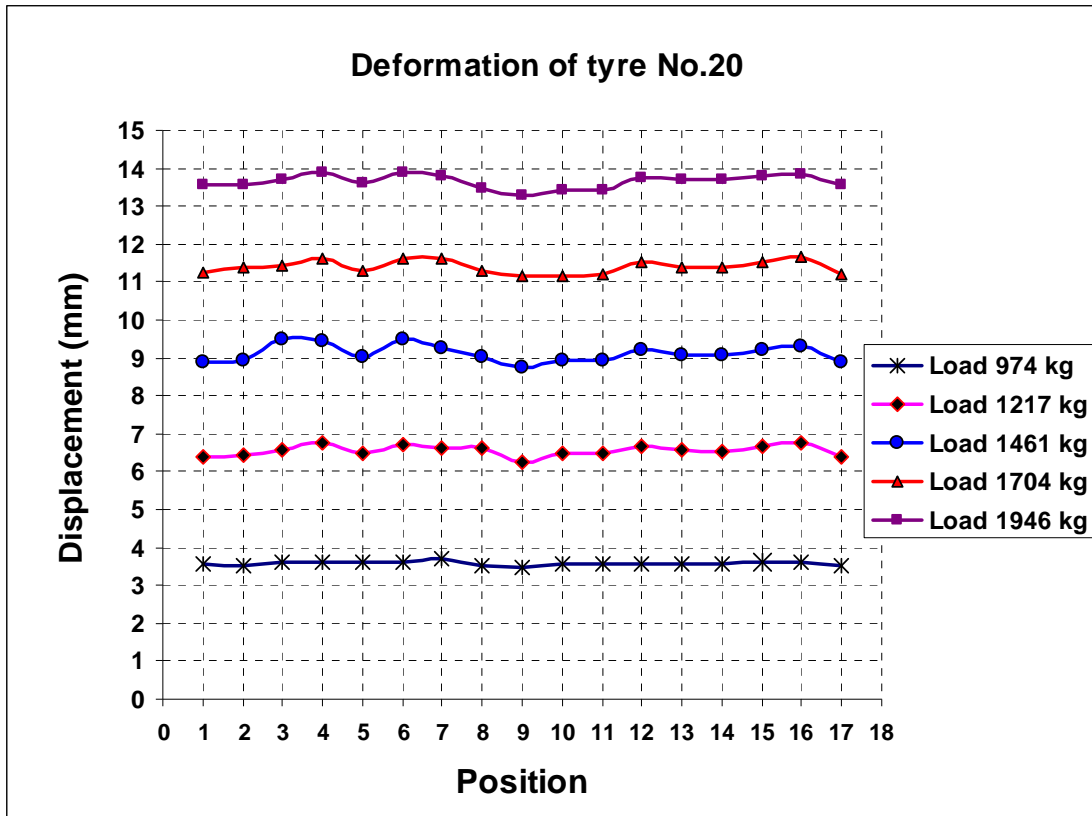
Load (kg)	974	1,217	1,461	1,704	1,946
SD	0.10	0.13	0.16	0.16	0.17
Max (mm)	3.737	6.561	9.316	11.639	13.788
Min (mm)	3.395	6.165	8.783	11.003	12.997
Max-Min (mm)	0.342	0.396	0.533	0.636	0.791
Mean (mm)	3.538	6.371	9.030	11.369	13.428

รูปที่ a18 แสดงระยะยุบตัวของล้อยางตัวอย่าง 18 ที่แรงกระทำต่าง ๆ



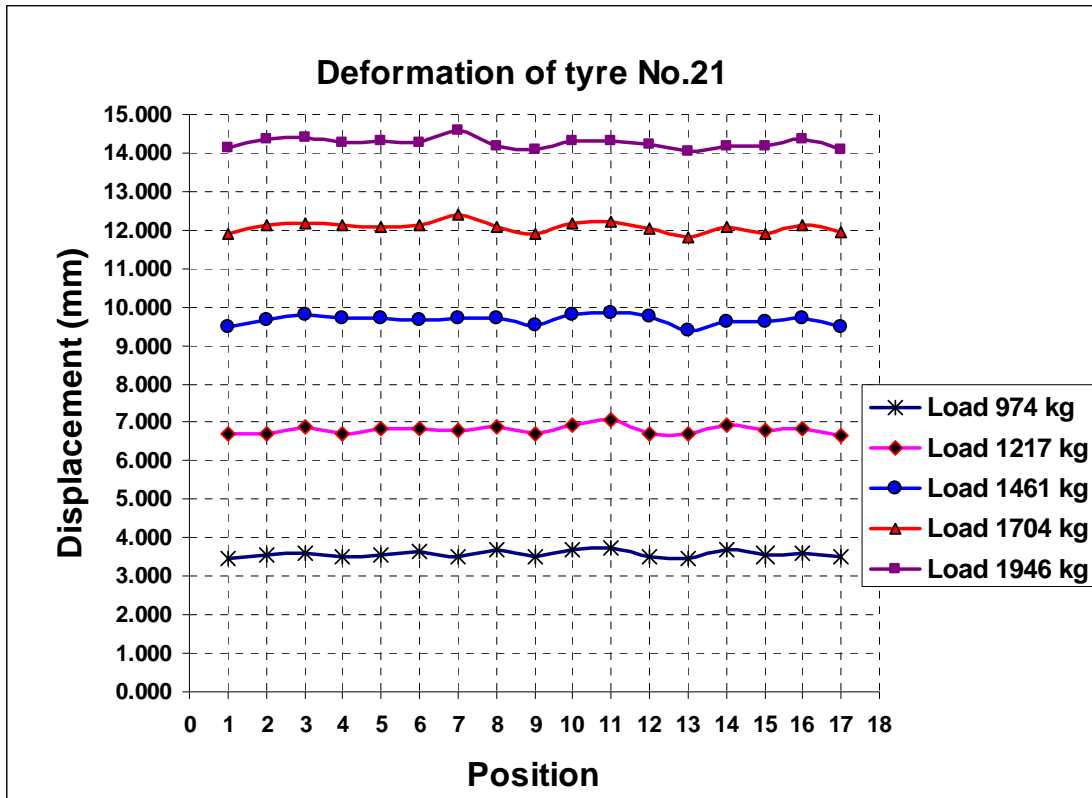
Load (kg)	974	1,217	1,461	1,704	1,946
SD	0.07	0.08	0.07	0.08	0.13
Max (mm)	3.543	6.444	8.991	11.378	13.714
Min (mm)	3.267	6.171	8.722	11.103	13.238
Max-Min (mm)	0.276	0.273	0.269	0.276	0.476
Mean (mm)	3.417	6.285	8.870	11.239	13.457

รูปที่ a19 แสดงระยะยุบตัวของล้อยางตัวอย่าง 19 ที่แรงกระทำต่าง ๆ



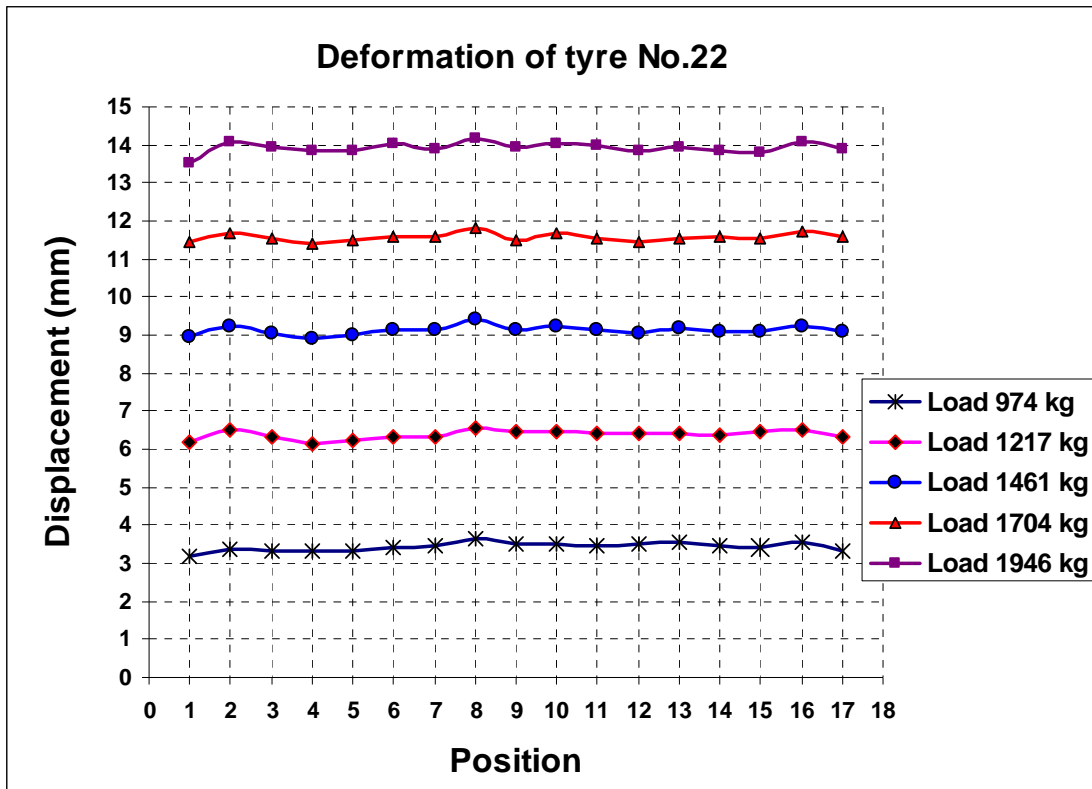
Load (kg)	974	1,217	1,461	1,704	1,946
SD	0.05	0.13	0.22	0.17	0.17
Max (mm)	3.713	6.760	9.500	11.647	13.888
Min (mm)	3.471	6.257	8.765	11.141	13.301
Max-Min (mm)	0.242	0.503	0.735	0.506	0.587
Mean (mm)	3.577	6.549	9.111	11.397	13.650

รูปที่ a20 แสดงระยะยุบตัวของล้อยางตัวอย่าง 20 ที่แรงกระทำต่าง ๆ



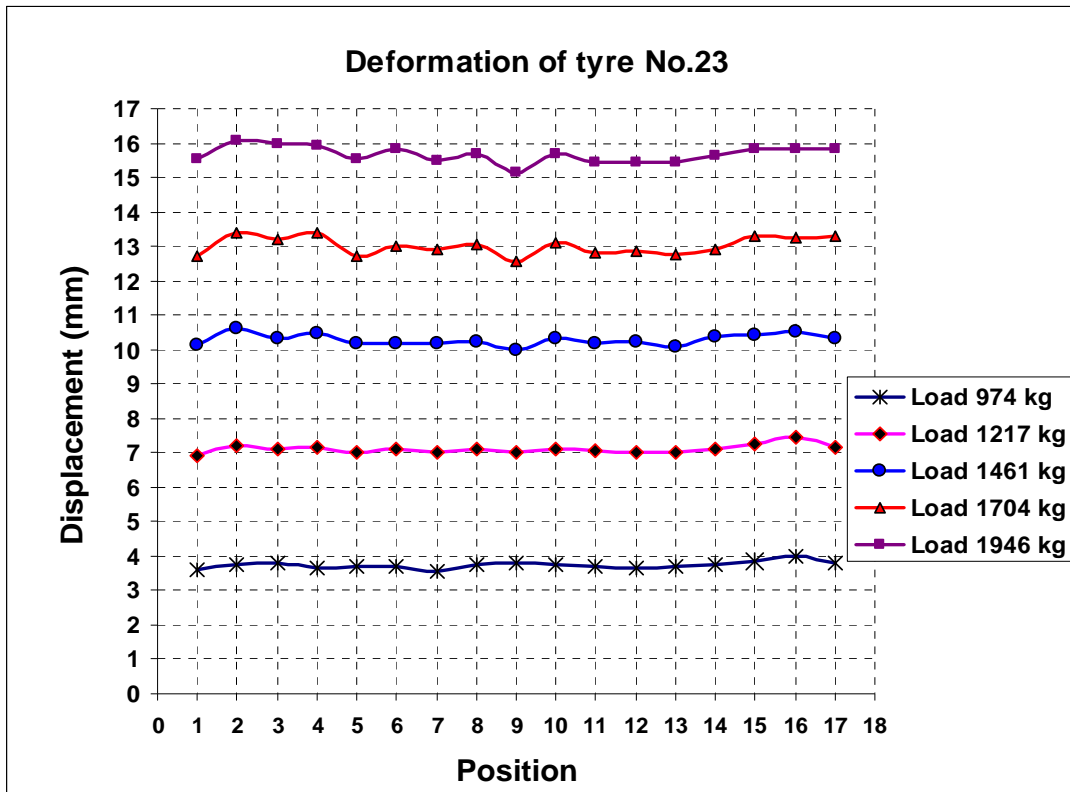
Load (kg)	974	1,217	1,461	1,704	1,946
SD	0.09	0.11	0.12	0.14	0.13
Max (mm)	3.734	7.048	9.828	12.394	14.575
Min (mm)	3.475	6.662	9.413	11.797	14.061
Max-Min (mm)	0.259	0.385	0.415	0.597	0.514
Mean (mm)	3.578	6.802	9.658	12.064	14.255

รูปที่ a21 แสดงระยะยุบตัวของล้อยางตัวอย่าง 21 ที่แรงกระทำต่าง ๆ



Load (kg)	974	1,217	1,461	1,704	1,946
SD	0.11	0.11	0.12	0.10	0.14
Max (mm)	3.656	6.553	9.394	11.801	14.164
Min (mm)	3.205	6.139	8.888	11.390	13.512
Max-Min (mm)	0.451	0.413	0.506	0.411	0.652
Mean (mm)	3.436	6.387	9.123	11.557	13.920

รูปที่ a22 แสดงระยะยุบตัวของล้อยางตัวอย่าง 22 ที่แรงกระทำต่าง ๆ



Load (kg)	974	1,217	1,461	1,704	1,946
SD	0.10	0.12	0.16	0.25	0.24
Max (mm)	3.972	7.468	10.617	13.412	16.084
Min (mm)	3.538	6.910	9.963	12.588	15.153
Max-Min (mm)	0.435	0.558	0.654	0.824	0.931
Mean (mm)	3.732	7.110	10.281	13.017	15.670

รูปที่ a23 แสดงระยะขยุบตัวของล้อยางตัวอย่าง 23 ที่แรงกระทำต่าง ๆ

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ สกุล	นายวีระชัย เก้าเอียน		
รหัสประจำตัวนักศึกษา	4812063		
วุฒิการศึกษา	วุฒิ	ชื่อสถาบัน	ปีที่สำเร็จการศึกษา
	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมเครื่องกล)	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์	2548

ทุนการศึกษา (ที่ได้รับในระหว่างการศึกษา)

ทุนศึกษยก้นกุฎิ ระดับปริญญาโท คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

การตีพิมพ์เผยแพร่ผลงาน

วีระชัย เก้าเอียน, เจริญยุทธ เดชวายุกุล, วิริยะ ทองเรือง, คณดิถ เจษฎ์พัฒนานนท์, พฤทธิกร สมิตไมตรี, การทดสอบความแข็งตึงของล้อยางตันสองชั้น.
การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 20
วันที่ 18-20 ตุลาคม 2549. นครราชสีมา; 2549.