



การออกแบบและประเมินแผ่นวัดแรงสำหรับรถฟอร์มูล่านักศึกษา

DESIGN AND EVALUATION OF FLAT-BED SCALE
FOR FORMULA STUDENT RACE CAR

นายธนวีร์ บุญหล้า

THANAWEE BUNLA

นายณทีธร ฐวภัทร

NATEETON TUVAPAT

นายบุญฤทธิ์ วิศาลโกะ

BOONYARIT WISANPHOCA

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

หลักสูตรวิศวกรรมเครื่องกล

ภาควิชาวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์ จังหวัดชุมพร

ปีการศึกษา 2561

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การออกแบบและประเมินแผ่นวัดแรงสำหรับรถฟอร์มูล่านักศึกษา

DESIGN AND EVALUATION OF FLAT-BED SCALE
FOR FORMULA STUDENT RACE CAR

นายธนวีร์ บุญหล้า

THANAWEE BUNLA

นายนทีธร ฐวภัทร

NATEETON TUVAPAT

นายบุญฤทธิ์ วิศาลโกคะ

BOONYARIT WISANPHOCA

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

หลักสูตรวิศวกรรมเครื่องกล

ภาควิชาวิศวกรรมศาสตร์


สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์ จังหวัดชุมพร

ปีการศึกษา 2561

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

DESIGN AND EVALUATION OF FLAT-BED SCALE
FOR FORMULA STUDENT RACE CAR

The seal of King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang is a large, circular emblem. It features a central sunburst with rays emanating from it. Below the sunburst are two ornate, tiered structures resembling traditional Thai stupas or pagodas, flanking a central, more complex architectural element. The entire emblem is surrounded by a decorative border containing Thai text. The text at the top of the border reads 'สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง' (King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang). The text at the bottom of the border reads 'กระทรวงศึกษาธิการ' (Ministry of Education, Culture and Sport).

THANAWEE BUNLA
NATEETON TUVAPAT
BOONYARIT WISANPHOCA

A PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMENT
FOR THE DEGREE OF BACHELOR OF ENGINEERING IN MECHANICAL ENGINEERING
DEPARTMENT OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
PRINCE OF CHUMPHON
2018

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2019

DEPARTMENT OF ENGINEERING

KING MONKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

PRINCE OF CHUMPHON

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาควิชาวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์ จังหวัดชุมพร
ใบรับรองปริญญาานิพนธ์

หัวข้อปริญญาานิพนธ์ การออกแบบและประเมินแผ่นวัดแรงสำหรับรถฟอร์มูล่านักศึกษา
Project Title DESIGN AND EVALUATION OF FLAT-BED SCALE FOR
FORMULA STUDENT RACE CAR

ชื่อนักศึกษา นายธนวีร์ บุญหล้า รหัสประจำตัว 58512061
นายนทีธร ฐวภัทร รหัสประจำตัว 58512068
นายบุญฤทธิ์ วิศาลโกตะ รหัสประจำตัว 58512075

ปริญญา วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล

อาจารย์ที่ปรึกษา ดร.ชมพูนุช กุลเกตุวงศ์

ปริญญาานิพนธ์
อาจารย์ที่ปรึกษา ดร.ดิษฐพร ตุงไธธานนท์

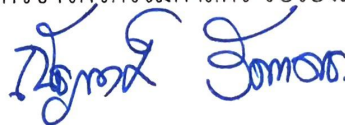
ปริญญาานิพนธ์ร่วม

คณะกรรมการสอบปริญญาานิพนธ์			ลายมือชื่อ
ผศ.จรัสชัย	เย็นหยับ	กรรมการสอบ	
ดร.ณัฐพร	สุวรรณพยัคฆ์	กรรมการสอบ	
ดร.ชมพูนุช	กุลเกตุวงศ์	อาจารย์ที่ปรึกษา	
ดร.ดิษฐพร	ตุงไธธานนท์	อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	

วัน/เดือน/ปี ที่สอบ 27 พฤษภาคม พ.ศ. 2562 เวลา 9.00 – 10.00 น.

สถานที่สอบ ณ ห้องประชุมวิทยาศาสตร์ อาคารปฏิบัติการวิทยาศาสตร์ ชั้น 1

ภาควิชาวิศวกรรมศาสตร์ รับรองแล้ว



(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐพงศ์ รัตนเดช)

หัวหน้าภาควิชาวิศวกรรมศาสตร์

วันที่ 4 มิถุนายน พ.ศ. 2562

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อปริญญานิพนธ์	การออกแบบและประเมินแผ่นวัตแรงสำหรับรถฟอร์มูล่านักศึกษา	
ชื่อนักศึกษา	นายธนวีร์ บุญหล้า	รหัสประจำตัว 58512061
	นายนทีธร ฐวภัทร	รหัสประจำตัว 58512068
	นายบุญฤทธิ์ วิศาลโกคะ	รหัสประจำตัว 58512075
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต	
สาขาวิชา	วิศวกรรมเครื่องกล	
อาจารย์ที่ปรึกษา	อาจารย์ชมพูนุช กุลเกตุวงศ์	
ปริญญานิพนธ์		
อาจารย์ที่ปรึกษา	อาจารย์ดิษฐพร ตุงโสมานนท์	
ปริญญานิพนธ์ร่วม		

บทคัดย่อ

การปรับตั้งศูนย์ล้อรถฟอร์มูล่านักศึกษาให้เหมาะสมมีผลต่อเสถียรภาพการขับขี่ในระหว่างแข่งขัน ในช่วงหลายปีที่ผ่านมาการปรับตั้งมุมและน้ำหนักของรถฟอร์มูล่าทีม Terminal จะใช้เครื่องชั่งสปริงซึ่งมีความละเอียดไม่เพียงพอเมื่อเทียบกับเครื่องชั่งดิจิทัล ดังนั้นโครงการนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบ สร้างและประเมินคุณลักษณะของแผ่นวัตแรงสำหรับล้อรถฟอร์มูล่า โดยแผ่นวัตแรงประกอบจากโพลีเอทิลีนความหนาแน่นสูงที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางวงในและวงนอกเท่ากับ 40 และ 48 mm ตามลำดับ มีการติดตั้งโครงแบบ Full Wheatstone bridge และ Quarter Wheatstone bridge ทำการสอบเทียบโพลีเอทิลีนความหนาแน่นสูงทั้ง 4 แบบพบว่าโพลีเอทิลีนชนิด Full Wheatstone bridge แบบเดี่ยวมีค่าที่วัดได้มากกว่าโพลีเอทิลีนมาตรฐานถึง 2 เท่า ในทางกลับกันผลลัพธ์ของโพลีเอทิลีนความหนาแน่นสูงที่ประกอบเป็นแผ่นวัตแรงได้แก่ Full Wheatstone bridge แบบรวม และ Quarter Wheatstone bridge ที่ติดตั้งโครงแบบทั้งแบบด้านในและด้านนอกวงแหวนมีค่าใกล้เคียงกับโพลีเอทิลีนมาตรฐาน ค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์ของแผ่นวัตแรงชนิด Full Wheatstone bridge แบบรวมน้อยกว่า Quarter Wheatstone bridge คิดเป็น 0.7% อย่างไรก็ตามแผ่นวัตแรงจากวงจร Wheatstone bridge ทั้ง 2 แบบสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการวัดแรงตามแนวตั้งได้

คำสำคัญ: โพลีเอทิลีนความหนาแน่นสูง, Wheatstone bridge, แผ่นวัตแรง

Project Title	Design and Evaluation of Flat-bed Scale for Formula Student Race Car	
Student	Mr.Thanawee Bunla	Student ID 58512061
	Mr.Nateeton Tuvapat	Student ID 58512068
	Mr.Boonyarit Wisanphoca	Student ID 58512075
Degree	Bachelor of Engineering	
Program	Mechanical Engineering	
Project Advisor	Miss Chompoonud Kulketwong	
Project Co-advisor	Mr.Dithaporn Thungsotanon	

ABSTRACT

A proper wheel alignment for a formula student race car affects a driving stability during racing. Many years ago, the Terminal team balanced the angle and the weight of its formula cars from a spring weighing scale that it had a lower resolution than a digital one. Therefore, this project aimed to design, fabricate and evaluate the characteristics of the force plates for the formula wheels. The force platforms were made from the ring transducers, the inner and outer diameters of 40 and 48 mm, respectively, that were bonded the strain gauge in the circuits of full Wheatstone bridge and quarter Wheatstone bridge. The 4 types of ring transducers were calibrated and the results were shown that the value of the single-full Wheatstone bridge was two times higher than the standard load cell. On the other hand, the values of the ring transducers that were assembled as the force plate, i.e. the four-full and the quarter Wheatstone bridge in the patterns of inside and outside strain gauge mounting position were closer to the standard one. The average relative error of the four-full bridge platform was less than 0.7% of the quarter pattern. However, the 2 types of Wheatstone bridge could be used to measure the vertical force for the balancing application.

Keywords: Ring transducer, Wheatstone bridge, Force plate

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ประจำสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพรเขตอุดมศักดิ์ จังหวัดชุมพร ที่ให้คำปรึกษา ช่วยเหลือเป็นแบบอย่างที่ดี ปริญญาณิพนธ์เล่มนี้จะเสร็จสมบูรณ์ไม่ได้เลย หากขาดอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์และอาจารย์ที่ปรึกษาร่วมของข้าพเจ้าทั้งอาจารย์ชมพูนุช กุลเกตุวงศ์ และอาจารย์ดิษฐพร ตุงโสธานนท์ ที่คอยให้คำแนะนำ คำปรึกษา และความรู้ที่เป็นประโยชน์เสมอมา

สุดท้ายนี้ข้าพเจ้าขอขอบคุณบิดามารดาที่ข้าพเจ้าเคารพรักยิ่งที่สนับสนุนและส่งเสริมการเรียนรู้ การศึกษา ทั้งยังให้กำลังใจ และคอยชื่นชมข้าพเจ้าตลอดมา ข้าพเจ้าจะรำลึกในพระคุณและขอกราบขอบพระคุณมา ณ ที่นี้

ธนวีร์ บุญหล้า
นทีธร ฐวภัทร
บุญฤทธิ วิศาลโกชะ
พฤษภาคม 2562

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	VI
สารบัญรูป	VII
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ	1
1.3 ขอบเขตของโครงการ	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
1.5 ขั้นตอนการดำเนินงาน	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	5
2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	5
2.1.1 ความเค้น (stress)	5
2.1.2 ความเครียด (Strain)	6
2.1.3 ค่า Young's modulus หรือ Modulus of elasticity	7
2.1.4 วงจร Wheatstone Bridge	7
2.1.5 โหลดเซลล์	11
2.1.6 ตั้งศูนย์ถ่วงล้อ	14
2.1.7 แผ่นวัดแรง	15
2.1.8 Center of gravity	16
2.1.9 Corner Weight	17
2.1.10 ความคลาดเคลื่อนไม่เป็นเชิงเส้น (Non-linearity error)	18
2.1.11 ฮิสเทอรีซิส (Hysteresis)	18
2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	19

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3 อุปกรณ์และวิธีการ	28
3.1 โหลดเซลล์แบบวงแหวน	28
3.2 แผ่นวัดแรง	34
3.3 การปรับสมดุลรถ	41
บทที่ 4 ผลและวิจารณ์ผล	45
4.1 การออกแบบโหลดเซลล์วงแหวน	45
4.2 การเปรียบเทียบวิธีติดตั้งสเตรนเกจ	46
4.3 การเปรียบเทียบลักษณะการวางโหลดเซลล์แบบวงแหวนชนิด Quarter Wheatstone bridge	50
4.4 การเปรียบเทียบแผ่นวัดแรงที่ติดตั้งโหลดเซลล์แบบ Quarter Wheatstone bridge และ Full Wheatstone bridge	52
4.5 ผลการทดสอบแผ่นวัดแรงกับรถฟอร์มูล่า	56
4.6 การประยุกต์ใช้งานแผ่นวัดแรง	58
บทที่ 5 สรุปและข้อเสนอแนะ	60
5.1 สรุปผลการทดลอง	60
5.2 ปัญหาที่พบในการทดสอบ	61
5.3 ข้อเสนอแนะ	61
เอกสารอ้างอิง	62
ภาคผนวก	65
ภาคผนวก ก ตารางการวิเคราะห์ผลการสอบเทียบและค่าความคลาดเคลื่อนเฉพาะจุด	66
ภาคผนวก ข การออกแบบชิ้นโหลดเซลล์แบบวงแหวนและแผ่นเพลต	76
ภาคผนวก ค การเขียนโปรแกรม LabVIEW	79
ประวัติผู้จัดทำ	81

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานี้เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1.1	ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน	4
4.1	ผลการสอบเทียบน้ำหนักโพลดเซลล์มาตรฐานกับโพลดเซลล์ที่ติดตั้ง สเตรนเกจแบบต่างๆ	46
4.2	ผลการสอบเทียบแผ่นวัดแรงชนิดต่างๆ	54
4.3	ค่าอีทเทอริซิสมและความคลาดเคลื่อนความไม่เป็นเชิงเส้นของแผ่นวัดแรง	46
ก.1	ตารางน้ำหนักของโพลดเซลล์กรณีติดตั้งแบบวงเดียวและใช้ร่วมกัน 4 ตัวของ Full Wheatstone bridge	72
ก.2	ตารางน้ำหนักของโพลดเซลล์แบบ Quarter Wheatstone bridge (in และ out)	73
ก.3	ตารางผลการเปรียบเทียบค่าเปอร์เซ็นต์คลาดเคลื่อนเฉพาะจุดของโพลดเซลล์	74
ก.4	ตารางการสอบเทียบผลน้ำหนักที่อ่านได้จากการวางโพลดเซลล์แบบ Quarter Wheatstone bridge ทั้งแบบวางขนานและวางไขว้	75
ก.5	ตารางการเปรียบเทียบค่าเปอร์เซ็นต์คลาดเคลื่อนเฉพาะจุดของการวางโพลด เซลล์แบบ Quarter Wheatstone bridge ทั้งแบบวางขนานและวางไขว้	76
ก.6	ตารางการเปรียบเทียบแผ่นวัดแรงที่ติดตั้งโพลดเซลล์แบบ Quarter Wheatstone bridge และ Full Wheatstone bridge	77
ก.7	ตารางการเปรียบเทียบค่าเปอร์เซ็นต์คลาดเคลื่อนเฉพาะจุดของแผ่นวัดแรงที่ ติดตั้งโพลดเซลล์แบบ Full Wheatstone bridge และ Quarter Wheatstone bridge	78
ก.8	ตารางการสอบเทียบผลน้ำหนักที่ได้ของแผ่นวัดแรง (ล้อหน้า)	79
ก.9	ตารางการสอบเทียบผลน้ำหนักที่ได้ของแผ่นวัดแรง (ล้อหลัง)	80

สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
1.1	ขั้นตอนการดำเนินงาน	3
2.1	ลักษณะของแรงกระทำในลักษณะต่างๆ	5
2.2	ลักษณะการทำงานของวงจร Wheatstone bridge	8
2.3	การติดตั้งวงจรแบบ Quarter Wheatstone bridge	9
2.4	การติดตั้งวงจรแบบ Half Wheatstone bridge (ก) สเตรนเกจแทน R_1 และ R_1 (ข) สเตรนเกจแทน R_1 และ R_3	9
2.5	การติดตั้งสเตรนเกจกับคานปลายอิสระ	10
2.6	การติดตั้งวงจรแบบ Full Wheatstone bridge	10
2.7	โพลดเซลล์แบบสเตรนเกจ	11
2.8	โพลดเซลล์แบบไฮดรอลิก	12
2.9	โพลดเซลล์แบบไพโซซีซีทีพี	12
2.10	โพลดเซลล์แบบแมกเนโตสเตร์กทีฟ	13
2.11	โพลดเซลล์รูปวงแหวน	13
2.12	โพลดเซลล์รูปวงแหวนเมื่อได้รับแรงดึง	14
2.13	ลักษณะของแรงหนีศูนย์กลางและแรงบิดที่เกิดขึ้นในล้อรถเมื่อล้อรถมีความไม่สมดุล	14
2.14	การถ่วงล้อเพื่อให้เกิดความสมดุล	15
2.15	แผ่นวัดแรง	16
2.16	จุดศูนย์ถ่วงบนพื้นที่ความเอียงต่างกัน	16
2.17	การปรับแต่งสมดุลของรถ	17
2.18	กราฟแสดงตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับ Non-linearity	18
2.19	กราฟแสดงตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับสมการฮีสเทอรีซิส	19
2.20	ลักษณะของแรงที่เกิดขึ้น	20

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
2.21	ลักษณะการทำงานของระบบ	20
2.22	การโคลงของรถขณะขับขึ้น	21
2.23	ระบบจำลองของการวัด	22
2.24	ลักษณะขั้นตอนการทำงานของระบบ	22
2.25	ลักษณะการทำงานอย่างง่ายของระบบ WIM	23
2.26	(ก) ตัวอย่างแท่นออกตัวของนักว่ายน้ำน้ำ (ข) ตำแหน่งและการติดตั้งเกจวัด ความเครียด	24
2.27	เครื่องมือวัดแรงที่กระทำระหว่างเท้าและพื้น	25
2.28	ลักษณะโดยทั่วไปของแผ่นวัดแรง	25
2.29	(ก) ผลการ Simulation (ข) ชิ้นงานต้นแบบ	26
2.30	แผ่นวัดแรงต้นแบบ	27
2.31	ตัวอย่างค่าที่ได้จากการทดลองแกน x	27
3.1	การไฟไนต์อีลิเมนต์เพื่อหาขนาดที่เหมาะสมสำหรับการสร้างโหลดเซลล์ (ก) ค่า ความเครียดที่ผ่านการไฟไนต์อีลิเมนต์ (ข) ค่าความเค้นที่ผ่านการไฟไนต์อีลิเมนต์	29
3.2	ขนาดของโหลดเซลล์แบบวงแหวน	30
3.3	การขึ้นรูปชิ้นงานต้นแบบ	30
3.4	เจาะชิ้นงานต้นแบบ	31
3.5	ตำแหน่งติดตั้งสเตรนเกจบนโหลดเซลล์ แบบ Full Wheatstone bridge	32
3.6	ตำแหน่งติดตั้งสเตรนเกจบน Load cell แบบ Quarter Wheatstone bridge (ก) Quarter Wheatstone bridge (out) (ข) Quarter Wheatstone bridge (in)	32
3.7	ชุดชิ้นงานต้นแบบสำหรับมาร์คจุดติดสเตรนเกจ	33
3.8	มาร์คจุดชิ้นงานต้นแบบด้วยเวอร์เนียไฮเกจ	33

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า	
3.9	ลักษณะจุดติดตั้งสเตรนเกจทั้งด้านในและด้านนอก	34
3.10	แผ่นเพลตสำหรับยึดกับโพลดเซลล์	35
3.11	การขึ้นรูปแผ่นเพลต	36
3.12	โพลดเซลล์และอุปกรณ์ภายในแผ่นวัดแรงที่ 1	36
3.13	โพลดเซลล์และอุปกรณ์ภายในแผ่นวัดแรงที่ 2	37
3.14	โพลดเซลล์และอุปกรณ์ภายในแผ่นวัดแรงทั้ง 4 แผ่น	37
3.15	การสอบเทียบโพลดเซลล์แบบวงแหวน	38
3.16	แผนผังตำแหน่งการสอบเทียบแผ่นวัดแรง (ก) ตำแหน่งติดตั้งแบบ Full Wheat Stone Bridge ทั้ง 4 ตัว (ข) ตำแหน่งติดตั้งแบบ Cross quarter Wheatstone bridge (in) และ Cross quarter Wheatstone bridge (out) (แบบไขว้กัน) (ค) ตำแหน่งติดตั้งแบบ Parallel quarter Wheatstone bridge (in) และ Parallel quarter Wheatstone bridge (out) (แบบขนานกัน)	39
3.17	การสอบเทียบ Force platform จุดศูนย์กลาง	41
3.18	การปรับสมดุรถ (ก) รูปด้านข้างการปรับสมดุรถฟอร์มูล่ากับแผ่นวัดแรง (ข) รูปด้านหลังการปรับสมดุรถฟอร์มูล่ากับแผ่นวัดแรง (ค) การตั้งความสูงล้อด้วยเลเซอร์ (ง) ยกรถฟอร์มูล่าด้วยรถยก	42
4.1	(ก) ค่าความเค้นโดยระเบียบวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ของโพลดเซลล์ (ข) ค่าความเครียดโดยระเบียบวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ของโพลดเซลล์	45
4.2	การเปรียบเทียบน้ำหนักของโพลดเซลล์กรณีติดตั้งแบบวงเดียวและใช้ร่วมกัน 4 ตัวของ Full Wheatstone bridge และน้ำหนักของโพลดเซลล์แบบ Quarter Wheatstone bridge (in และ out)	49
4.3	ผลการสอบเทียบค่าเปอร์เซ็นต์คลาดเคลื่อนเฉพาะจุดของโพลดเซลล์	49
4.4	การเปรียบเทียบผลน้ำหนักที่อ่านได้จากการวางโพลดเซลล์แบบ Quarter Wheatstone bridge ทั้งแบบวางขนานและวางไขว้	51
4.5	การเปรียบเทียบค่าเปอร์เซ็นต์คลาดเคลื่อนเฉพาะจุดของการวางโพลดเซลล์แบบ Quarter Wheatstone bridge ทั้งแบบวางขนานและวางไขว้	51

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.6	การเปรียบเทียบแผ่นวัดแรงที่ติดตั้งโพลดเซลล์แบบ Quarter Wheatstone bridge และ Full Wheatstone bridge	52
4.7	การเปรียบเทียบค่าเปอร์เซ็นต์คลาดเคลื่อนเฉพาะจุดของแผ่นวัดแรงที่ติดตั้งโพลดเซลล์แบบ Full Wheatstone bridge และ Quarter Wheatstone bridge	53
4.8	การเปรียบเทียบผลน้ำหนักที่ได้ของแผ่นวัดแรง	56
4.9	(ก) น้ำหนักที่อ่านได้จากการชั่งน้ำหนักกรรพอร์มูล่าที่แสดงในโปรแกรม LabVIEW (ข) น้ำหนักที่อ่านได้จากการชั่งน้ำหนักกรรพอร์มูล่าที่แสดงในโปรแกรม LabVIEW หลังปรับด้วย Corner weight ครั้งที่ 1 (ค) น้ำหนักที่อ่านได้จากการชั่งน้ำหนักกรรพอร์มูล่าที่แสดงในโปรแกรม LabVIEW หลังปรับด้วย Corner weight ครั้งที่ 2	57
4.10	การติดตั้งกรรพอร์มูล่านักศึกษา กับแผ่นวัดแรง	59
ก.1	Ring Transducer	77
ก.2	แผ่นเพลต	78
ข.1	การเขียนโปรแกรม LabVIEW	80

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

การแข่งขันฟอร์มูล่านักศึกษา [1] มีจัดขึ้นทุกปี และรถแข่งของสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์ จังหวัดชุมพร เป็นหนึ่งในทีมที่ผ่านเกณฑ์ที่ทางสมาคมได้กำหนดไว้ จึงสามารถเข้าแข่งในรูปแบบและกติกาต่างๆ ได้ แต่รูปแบบการแข่งขันมีหลากหลายเช่น การแข่งขันจับเวลาการทดสอบอัตราเร่ง 75 เมตร การทดสอบการทรงตัวของรถแบบวิ่งเป็นวงกลมซ้ายขวา การทดสอบอัตรากินน้ำมันเชื้อเพลิงและการทดสอบวิ่งแข่งในสนามหนึ่งรอบ การเตรียมและปรับแต่งรถจึงมีความสำคัญอย่างมาก จากการแข่งขันหลายๆ ครั้งที่ผ่านมา การตั้งศูนย์ล้อได้ใช้เพียงเครื่องชั่งสปริงสำหรับวัดน้ำหนักของล้อรถแต่ละล้อ แต่ค่าที่ได้จากเครื่องชั่งสปริงไม่ละเอียดและแม่นยำเพียงพอต่อการตั้งสมดุลของรถแข่ง ซึ่งอาจส่งผลให้สูญเสียเสถียรภาพ [2-3] มีผลต่อการควบคุมตัวรถ ความเร็ว เวลาและคะแนนสะสมอีกด้วย การวัดแรงของรถแข่งฟอร์มูล่านักศึกษาจึงจำเป็นต้องทราบค่าที่มีความละเอียดสูง [4-5] เพื่อที่จะสามารถปรับแต่งตัวรถให้เหมาะสมกับรูปแบบการแข่งขันต่างๆ ทว่าการใช้เครื่องมือวัดแรงส่วนใหญ่นิยมใช้ในการศึกษาทางด้านชีวกลศาสตร์และการยศาสตร์อาทิเช่นการเคลื่อนไหวร่างกายของมนุษย์ [6-7-8] อาจารย์ทั้งสิ่งมีชีวิตอื่นๆ เช่นม้า หรือ มด [9] เป็นต้น โดยเครื่องมือนี้เรียกว่าแผ่นวัดแรงซึ่ง มีลักษณะเป็นแผ่นทรานสดิวเซอร์ขนาดใหญ่และมีราคาสูง เนื่องจากข้อจำกัดด้านราคาของแผ่นวัดแรงจึงไม่มีการนำไปใช้ในงานด้านอื่นๆ มากนักหากสร้างแผ่นวัดแรงที่มีราคาถูกลง [10-11] เคลื่อนย้ายได้ง่ายและใช้สำหรับรถแข่งฟอร์มูล่านักศึกษาได้จะสามารถวัดแรงที่ล้อทั้งสองข้างได้ละเอียดแม่นยำยิ่งขึ้น และจะทำให้การตั้งล้อก่อนการแข่งขันง่ายขึ้นด้วย

ดังนั้น โครงการนี้จึงทำการออกแบบและสร้างชุดแผ่นวัดแรงสำหรับตั้งสมดุลรถแข่งฟอร์มูล่านักศึกษาที่มีราคาถูกลงมีความแม่นยำสามารถใช้งานนอกสถานที่ได้และทำการเปรียบเทียบการต่อโหลดเซลล์วงแหวนด้วยวงจรแบบ Full Wheatstone bridge และ Quarter Wheatstone bridge เพื่อประเมินความเหมาะสมในการใช้งานแผ่นวัดแรง

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

1.2.1 เพื่อออกแบบและสร้างแผ่นวัดแรงโดยใช้โหลดเซลล์วงแหวนที่ต่อวงจรแบบ Full Wheatstone bridge และ Quarter Wheatstone bridge

1.2.2 เพื่อเปรียบเทียบและประเมินความเหมาะสมต่อการใช้งานของวงจรที่ติดตั้งบนโหลดเซลล์ และลักษณะการจัดเรียงโหลดเซลล์บนแผ่นวัดแรงสำหรับตั้งสมดุลล้อรถฟอร์มูล่านักศึกษา

1.3 ขอบเขตของโครงการ

1.3.1 แผ่นวัดแรงใช้ได้กับล้อขนาด 405/670-13

1.3.2 น้ำหนักล้อรวมลมยางแต่ละข้างไม่เกิน 80 kg

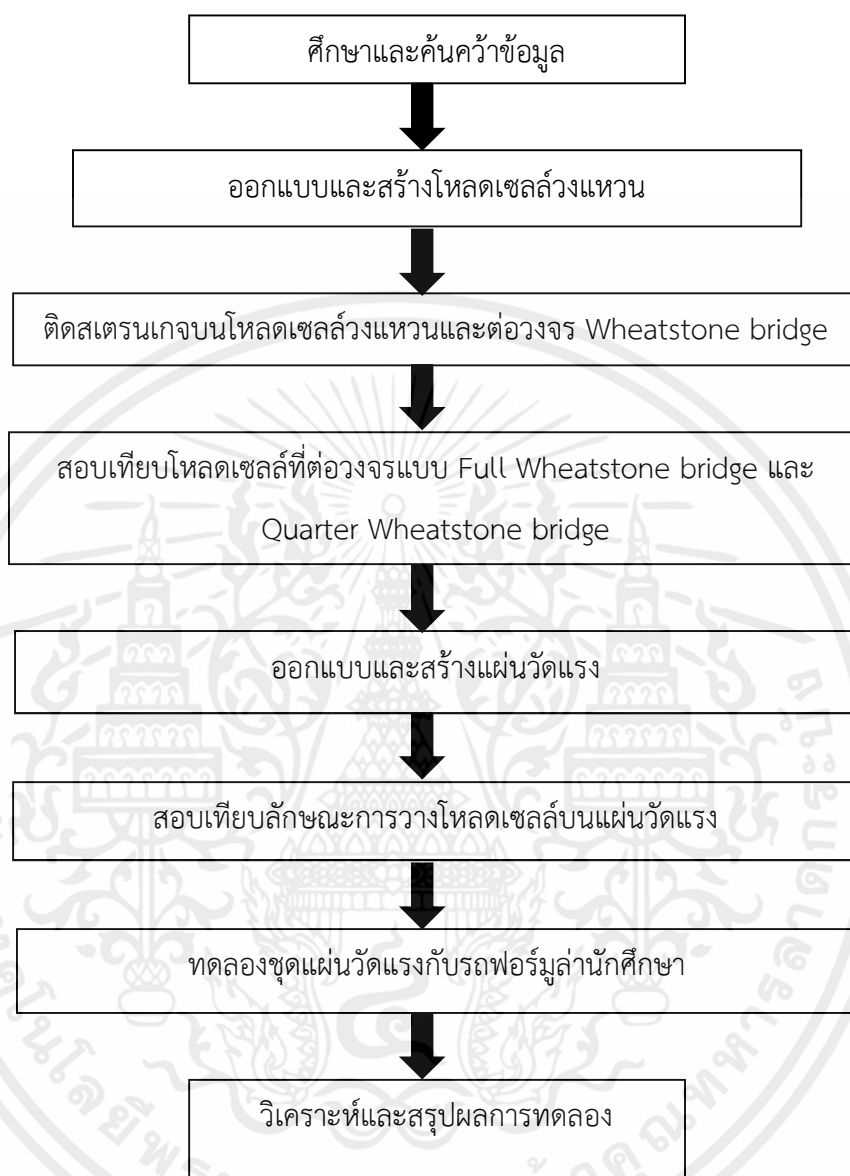
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ได้แผ่นวัดแรงสำหรับวัดน้ำหนักล้อของรถฟอร์มูล่านักศึกษา



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.5 ขั้นตอนการดำเนินงาน



รูปที่ 1.1 ขั้นตอนการดำเนินงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 1.1 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน

ขั้นตอนการดำเนินงาน	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.
	61	61	61	61	61	62	62	62	62
1. รวบรวมข้อมูลและศึกษา งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	←→								
2. ออกแบบและ สร้างแบบจำลอง	←→								
3. สร้างเครื่องมือ	←→								
4. ทดสอบและปรับปรุง แก้ไขปัญหา	←→								
5. เก็บผลการทดลอง วิเคราะห์และสรุปผลทดลอง	←→								
6. ทำรูปเล่ม	←→								

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้ได้รวบรวมทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการสร้างแผ่นวัดแรง ได้แก่ แรง คุณสมบัติของวัสดุ รวมถึงวงจร Wheatstone bridge และโพลดเซลล์ชนิดต่างๆ รวมทั้งงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

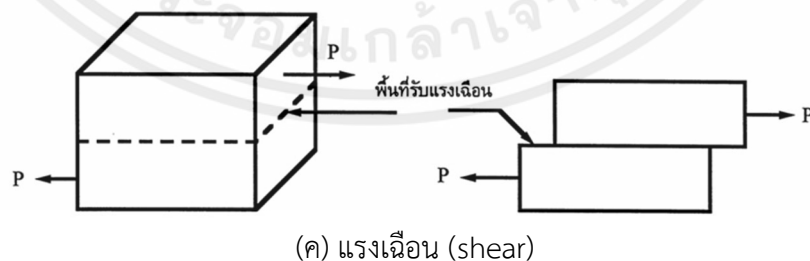
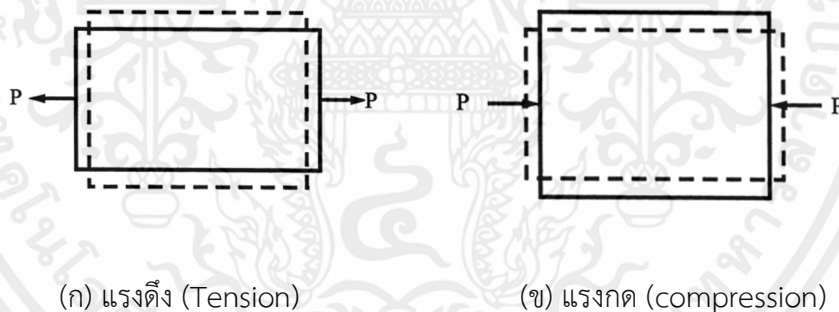
2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับชิ้นงานและสเตรนเกจ ได้แก่ ความเค้น ความเครียด ค่ายังโมดูลัส

2.1.1 ความเค้น (Stress)

แรงภายในเนื้อวัสดุที่ต้านแรงกระทำจากภายนอกในลักษณะกดหรือดึงออก เพื่อรักษารูปทรงเดิมของตัววัสดุไว้ โดยทั่วไปความเค้นสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ชนิด ตามลักษณะของแรงที่มากระทำ [13]

1. ความเค้นแรงดึง (Tensile stress) แรงภายในเนื้อวัสดุที่ต้านแรงดึงที่กระทำจากภายนอกเพื่อรักษารูปทรงเดิมไว้ ดังรูปที่ 2.1(ก)



รูปที่ 2.1 ลักษณะของแรงกระทำในลักษณะต่างๆ [14]

2. ความเค้นแรงอัด (Compressive stress) คือ แรงภายในเนื้อวัสดุที่ต้านแรงกดที่กระทำจากภายนอก เพื่อรักษารูปร่างเดิมไว้ ดังรูปที่ 2.1

3. ความเค้นแรงเฉือน (Shear stress) คือ แรงภายในเนื้อวัสดุที่ต้านแรงที่กระทำให้วัตถุฉีกขาดออกจากกัน เพื่อรักษารูปร่างเดิมของวัสดุไว้ ดังรูปที่ 2.1 (ค) ในทางปฏิบัติความเค้น จะเกิดขึ้น 3 แบบพร้อมๆ กัน

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (2.1)$$

โดยที่ σ คือ ความเค้น (N/m^2 , Pa)
 F คือ แรงภายนอกที่กระทำกับวัตถุ (N)
 A คือ พื้นที่หน้าตัดของวัตถุ (m^2)

2.1.2 ความเครียด (Strain)

ความเครียด คือ การเปลี่ยนแปลงรูปร่างของวัสดุไปจากเดิม เมื่อวัสดุได้รับแรงกระทำในลักษณะต่างๆ [13]

$$\epsilon = \frac{l - l_0}{l_0} \quad (2.2)$$

โดยที่ ϵ คือ ความเครียด (in/in, m/m)
 l คือ ความยาวที่เปลี่ยนไปของวัสดุ (in, m)
 l_0 คือ ความยาวเดิมของวัสดุ (in, m)

โดยทั่วไปนิยมแสดงในรูปแบบของเปอร์เซ็นต์ความเครียด (Percent strain หรือ Percent elongation) ซึ่งหาได้จาก [15]

$$\begin{aligned} \% \text{ engineering strain} &= \text{engineering strain} \times 100 \\ &= \text{elongation} \end{aligned}$$

ซึ่งลักษณะของความเครียดสามารถแบ่งเป็น 2 ชนิดใหญ่ๆ คือ

1. การเปลี่ยนรูปแบบอีลาสติกหรือความเครียดแบบคืนรูป (Elastic deformation หรือ Elastic strain) การที่วัสดุนั้นๆ กลับสู่สภาพเดิมได้ เมื่อปลดแรงที่กระทำอยู่ออก

2. การเปลี่ยนรูปแบบพลาสติกหรือความเครียดแบบคงรูป (Plastic deformation หรือ Plastic strain) การที่วัสดุเกิดการเสียรูปถาวรหรือเมื่อได้รับแรงใดๆ กระทำแล้ว ไม่สามารถกลับคืนสู่สภาพเดิมก่อนรับแรงได้

นอกจากความเครียดทั้ง 2 ชนิดนี้แล้ว มีความเครียดอีกชนิดหนึ่งที่มีลักษณะเป็นแบบกึ่งอีลาสติก คือมีการกลับสู่สภาพเดิมเมื่อนำแรงออก แต่จะไม่กลับสู่สภาพเดิมอย่างสมบูรณ์ [14]

2.1.3 ค่า Young's modulus หรือ Modulus of elasticity

ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดในโลหะ เป็นค่าที่บอกถึงความแข็งเกร็งของวัสดุหรือความสามารถในการคงสภาพเดิมเมื่อได้รับแรงกระทำมีหน่วยเป็น N/m^2 สมการที่ใช้คำนวณเป็นดังสมการที่ 2.3 [16]

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon} \quad (2.3)$$

เมื่อ $\sigma = F / A$
และ $\epsilon = (l - l_0) / l_0$
จะได้สมการเป็นสมการที่ 2.4

$$E = \frac{F / A}{(l - l_0) / l_0} \quad (2.4)$$

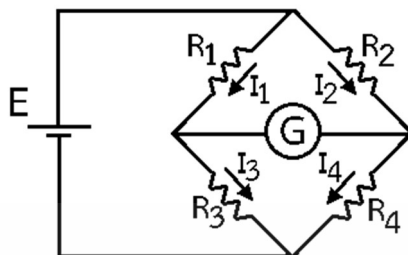
โดยที่ E คือ ค่า Young's modulus

2.1.4 วงจร Wheatstone Bridge

Wheatstone Bridge คือ วงจรที่ใช้วัดค่าความต้านทานไฟฟ้าในวงจรไฟฟ้ากระแสตรงที่ให้ความแม่นยำและความถูกต้องในการวัดสูง นิยมนำมาใช้วัดค่าความต้านทานไฟฟ้าในสเตรนเกจ หลักการทำงานของวงจร Wheatstone Bridge คือ วงจรบริดจ์จะสมดุลได้ก็ต่อเมื่อกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่าน G (แกลวานอมิเตอร์) ในวงจรมีค่าเท่ากับ 0 ซึ่งการจะให้กระแสไฟฟ้าในวงจรเท่ากับ 0 มีเงื่อนไขดังนี้ $R_1/R_2 = R_3/R_4$ โดยวงจรแบบ Full bridge นี้จะใช้สเตรนเกจติดตั้งแทนที่ตัวต้านทานทั้ง 4 ตัว โดยทั่วไปที่บริเวณ R_1 จะเป็นค่าความต้านทานที่ต้องการวัด และ R_3 จะเท่ากับ R_4 ส่วน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

R2 จะเป็นตัวต้านทานที่สามารถปรับค่าได้ (ดังรูปที่ 2.2) เพื่อให้วงจรเกิดความสมดุลเข้ากับเงื่อนไข [17]



รูปที่ 2.2 ลักษณะการทำงานของวงจร Wheatstone bridge [17]

Quarter Wheatstone bridge คือการติดตั้งสเตรนเกจเข้าไปแทนที่ตัวต้านทานตัวใดตัวหนึ่ง ดังแสดงในรูปที่ 2.3 ซึ่งเมื่อได้รับแรงหรือมีความเครียดเกิดขึ้นจะส่งผลให้ค่าความต้านทานทางไฟฟ้าเปลี่ยนไป ทำให้สามารถทราบค่าความเครียดที่เกิดขึ้นได้ จากการวัดค่าความต่างศักย์หรือเอาท์พุทที่ออกมาจากวงจรนี้ ดังแสดงในสมการที่ 2.5

$$e = \frac{1}{4} \times \frac{\Delta R}{R} \times E$$

และ

$$\Delta R = K_s \times \epsilon$$

ดังนั้น

$$e = \frac{1}{4} \times K_s \times \epsilon \times E \quad (2.5)$$

โดยที่ e คือ ค่าความต่างศักย์เอาท์พุท (V)

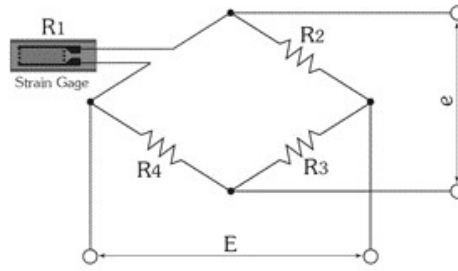
ΔR คือ ค่าความต้านทานไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่อสเตรนเกจ R1 เกิดความเครียด (Ω)

R คือ ค่าความต้านทานทางไฟฟ้า (Ω)

E คือ ค่าความต่างศักย์อินพุท (V)

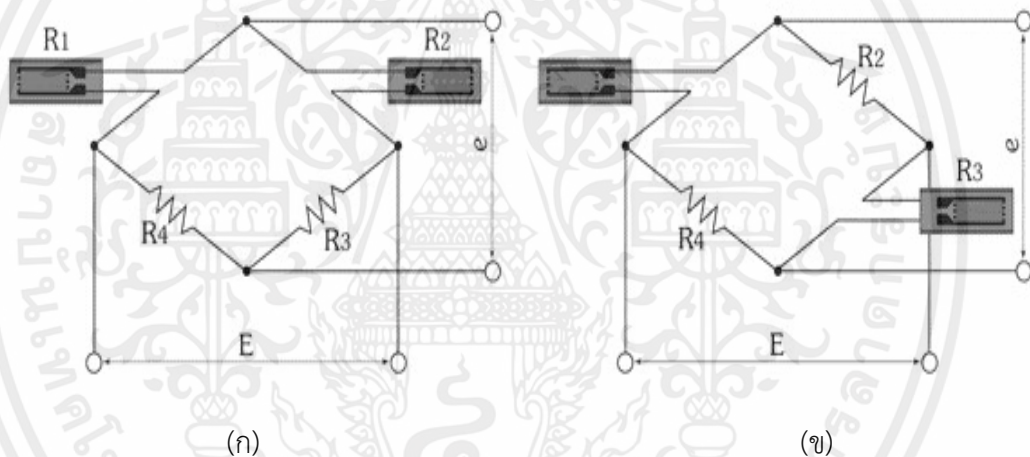
K_s คือ เกจแฟคเตอร์หรือค่าที่บอกถึงความสามารถในการยืด-หดตัวของสเตรนเกจ

ϵ คือ ค่าความเครียด (in/in, m/m)



รูปที่ 2.3 การติดตั้งวงจรแบบ Quarter Wheatstone bridge [18]

Half Wheatstone bridge คือ การติดตั้งสเตรนเกจ 2 ตัวเข้าไปในวงจร ลักษณะดังรูปที่ 2.4 (ก) และ (ข) ซึ่งเมื่อติดตั้งวงจรในลักษณะนี้จะส่งผลให้เมื่อเกิดความเครียดในสเตรนเกจตัวใดตัวหนึ่ง ส่วนสเตรนเกจอีกตัวหนึ่งอาจส่งผลให้ค่าความเครียดเกิดขึ้นในลักษณะสลับสับหรือหักล้างกันขึ้นอยู่กับลักษณะการติดตั้ง



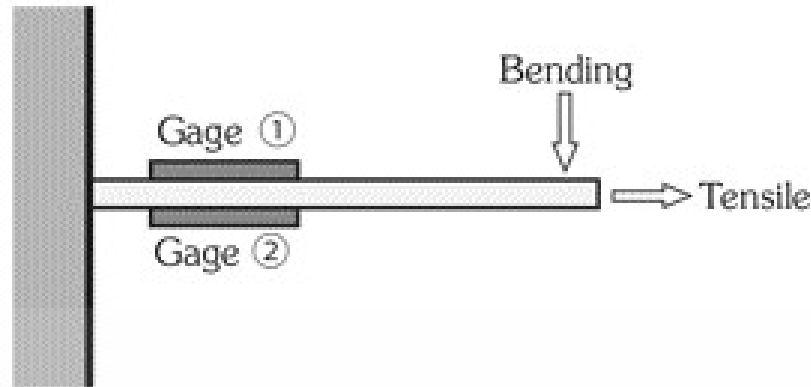
รูปที่ 2.4 การติดตั้งวงจรแบบ Half Wheatstone bridge [18]

(ก) สเตรนเกจแทน R_1 และ R_2 (ข) สเตรนเกจแทน R_1 และ R_3

วงจรแบบ Half Wheatstone bridge นิยมนำมาใช้ในกรณีที่ปลายคานด้านหนึ่งเป็นอิสระ ใช้วัดแรงที่กระทำจากภายนอกในลักษณะดัดหรือดึง โดยติดตั้งสเตรนเกจในตำแหน่งเดียวกันแต่อยู่คนละฝั่งกันดังแสดงในรูปที่ 2.5 และคำนวณค่าเอาท์พุทได้จากสมการที่ 2.6 กรณีคานปลายอิสระ

$$e = \frac{1}{4} \times K_s \times (\epsilon_1 - \epsilon_2) \times E \quad (2.6)$$

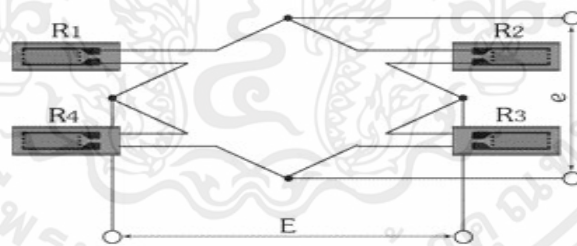
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.5 การติดตั้งสเตรนเกจกับคานปลายอิสระ [18]

Full Wheatstone bridge คือการติดตั้งสเตรนเกจเข้าไปแทนที่ตัวต้านทานทั้ง 4 ตัว ในวงจรการติดตั้งแบบ Full Wheatstone bridge (รูปที่ 2.6) นี้ก็นำมาสร้างอุปกรณ์ตรวจวัดที่ใช้สเตรนเกจทำงานร่วมด้วย ไม่นิยมนำมาใช้วัดความเครียดเพียงอย่างเดียว ซึ่งสามารถคำนวณค่าเอาต์พุตได้จากสมการที่ 2.7

$$e = \frac{1}{4} \times \left(\frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} - \frac{\Delta R_4}{R_4} \right) \times E \quad (2.7)$$



รูปที่ 2.6 การติดตั้งวงจรแบบ Full Wheatstone bridge [18]

ซึ่งถ้าสเตรนเกจทั้ง 4 ตัวมีคุณสมบัติและค่าเกจแฟกเตอร์ K_s เหมือนกันจะได้ตั้งสมการที่ 2.8

$$e = \frac{1}{4} \times K_s \times (\epsilon_1 - \epsilon_2 + \epsilon_3 - \epsilon_4) \times E \quad (2.8)$$

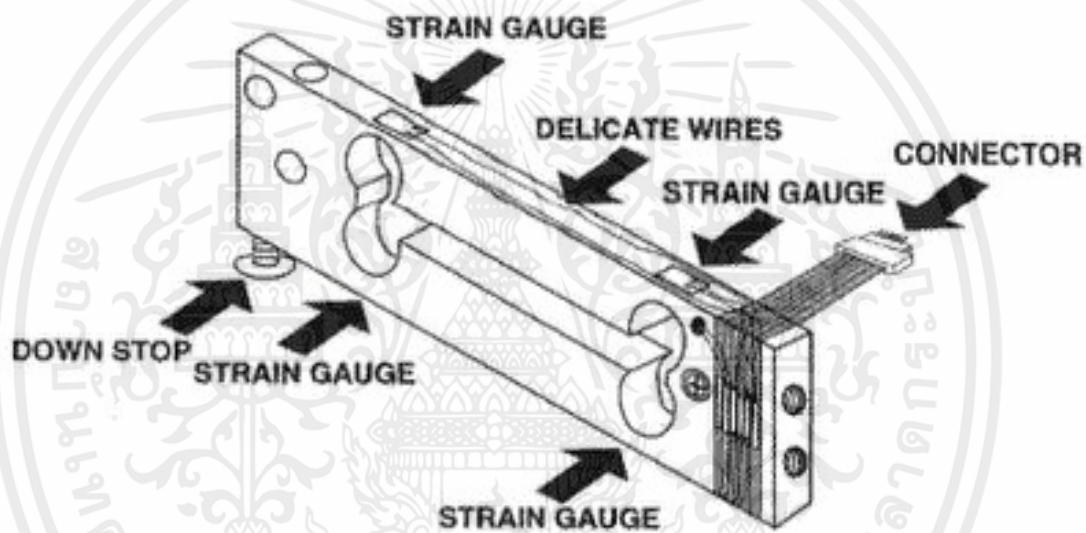
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.5 โหลดเซลล์

โหลดเซลล์ คือ อุปกรณ์ที่สามารถแปลงค่าของแรงหรือน้ำหนักที่ได้รับให้อยู่ในรูปของสัญญาณทางไฟฟ้าได้ นิยมนำไปใช้ในงานอุตสาหกรรมหลายประเภท เช่น การทดสอบคุณสมบัติทางกลของวัสดุ การทดสอบความสามารถในการรับแรงของชิ้นงาน เป็นต้น แบ่งออกได้ดังนี้ [19]

1. โหลดเซลล์แบบสเตรนเกจ (Strain gauge load cell)

โหลดเซลล์ชนิดนี้มีหลักการทำงานคือ เมื่อโหลดเซลล์ได้รับแรงที่มากระทำแล้วเกิดความเครียด โหลดเซลล์จะเปลี่ยนค่าความเค้นหรือความเครียดที่เกิดขึ้นให้เป็นสัญญาณทางไฟฟ้าหรือมีค่าความต่างศักย์เกิดขึ้น (รูปที่ 2.7) โดยทั่วไปโหลดเซลล์ชนิดนี้จะใช้ร่วมกับสเตรนเกจ 4 ตัวที่ติดตั้งกับวงจร Wheatstone bridge [19]



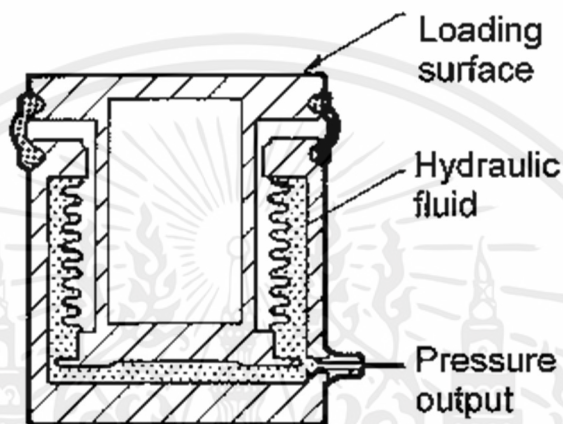
รูปที่ 2.7 โหลดเซลล์แบบสเตรนเกจ [19]

2. โหลดเซลล์แบบไฮดรอลิก (Hydraulic load cell)

หลักการทำงานของโหลดเซลล์ชนิดนี้ คือ การวัดค่าน้ำหนักจากกระบวนการเปลี่ยนแปลงความดันในของเหลวภายในระบบ เมื่อได้รับแรงกระทำที่บริเวณจุดรับน้ำหนัก โดยน้ำหนักที่ได้รับจะถูกส่งผ่านไปยังลูกสูบและส่งต่อไปที่แผ่นไดอะเฟรมทำให้แผ่นไดอะเฟรมถูกกดอัดและเกิดผลต่างความดันของของเหลวภายในแผ่นไดอะเฟรมขึ้น (รูปที่ 2.8) การวัดแรงทำได้โดยวัดจากความดันของของเหลวที่เกิดขึ้นและโหลดเซลล์ชนิดนี้ไม่สามารถรับแรงได้เกิน 1000 psig อีกทั้งยังไม่ต้องใช้ไฟฟ้าในการวัด [19]

3. โหลดเซลล์แบบนิวแมติกส์ (Pneumatic load cell)

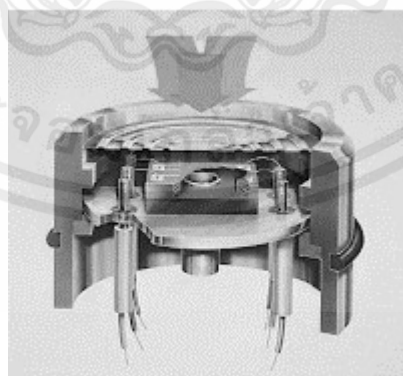
หลักการทำงานของโหลดเซลล์ชนิดนี้จะคล้ายกับการทำงานของโหลดเซลล์แบบไฮดรอลิก คือ ใช้หลักการสมดุลแรงแต่จะมีความแม่นยำกว่า เนื่องจากมีช่องว่างหลายช่องทำให้เกิดการหน่วงของของไหลภายในระบบเพื่อลดแรงสั่นสะเทือน นิยมใช้กับงานที่ไม่หนักมากและต้องการความสะอาด แต่มีข้อเสียคือการตอบสนองที่ช้าและต้องควบคุมอากาศกับปริมาณไฮโดรเจนให้เหมาะสม [19]



รูปที่ 2.8 โหลดเซลล์แบบไฮดรอลิก [19]

4. โหลดเซลล์แบบไพโซเรซิสทีฟ (Piezoresistive)

มีหลักการทำงานเหมือนกับสเตรนเกจและสามารถให้สัญญาณเอาต์พุตออกมาได้อย่างเสถียรเหมาะกับการใช้ในงานที่ไม่ซับซ้อน (รูปที่ 2.9) [19]

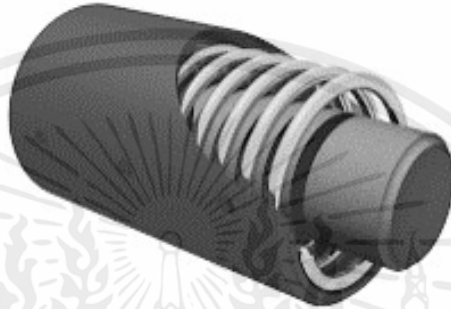


รูปที่ 2.9 โหลดเซลล์แบบไพโซเรซิสทีฟ [19]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. โหลดเซลล์แบบแมกเนโตสเตริกทีฟ (Magnetostrictive)

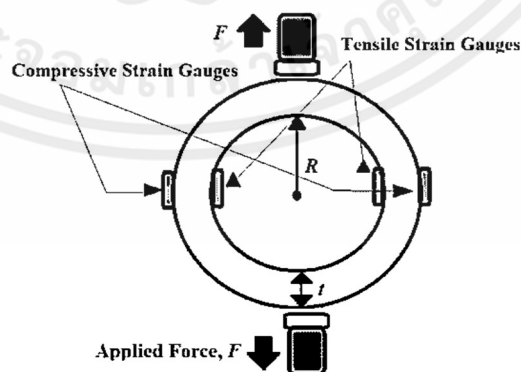
มีหลักการทำงานโดยอาศัยหลักการการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กหรือการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณแม่เหล็กของแม่เหล็กถาวรที่อยู่ภายในเมื่อได้รับแรงกระทำจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็กเมื่อสนามแม่เหล็กมีการเปลี่ยนแปลง แม่เหล็กถาวรก็จะส่งสัญญาณที่มีความสัมพันธ์กับแรงที่มากระทำ ทำงานโดยตรวจวัดการเคลื่อนที่ของแกนแม่เหล็กและวัดการเหนี่ยวนำของขดลวดแม่เหล็กไฟฟ้าที่เปลี่ยนไป (รูปที่ 2.10) [19]



รูปที่ 2.10 โหลดเซลล์แบบแมกเนโตสเตริกทีฟ [19]

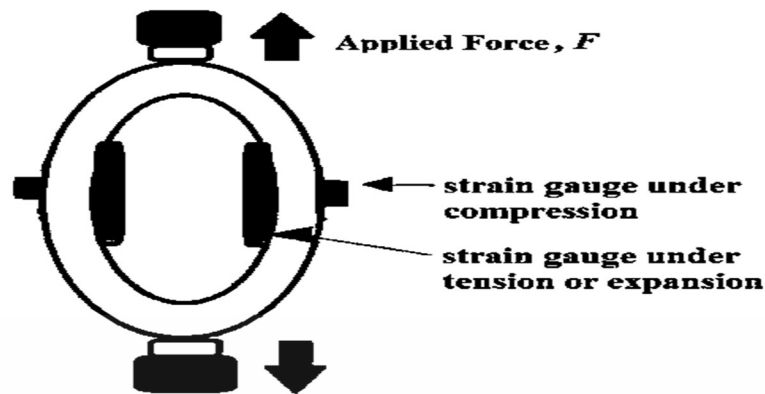
6. โหลดเซลล์แบบวงแหวน

อุปกรณ์ตรวจวัดชนิดนี้จะมีลักษณะเป็นทรงกระบอกสั้นๆ บริเวณเนื้อผิวด้านในกลาง ดังรูปที่ 2.11 ติดตั้งสเตรนเกจที่บริเวณผิวขอบของวงกลม สามารถวัดแรงที่กระทำได้ทั้งแรงอัดและแรงดึง โดยเมื่อใส่แรงดึงกระทำกับโหลดเซลล์ โหลดเซลล์จะมีการยืดตัวเล็กน้อยส่งผลให้ค่าความต้านทานไฟฟ้าในสเตรนเกจเปลี่ยนไปและเมื่อต่อเข้ากับวงจร Wheatstone bridge ก็จะสามารถอ่านค่าของแรงหรือน้ำหนักที่มากระทำได้ [20]



รูปที่ 2.11 โหลดเซลล์รูปวงแหวน [20]

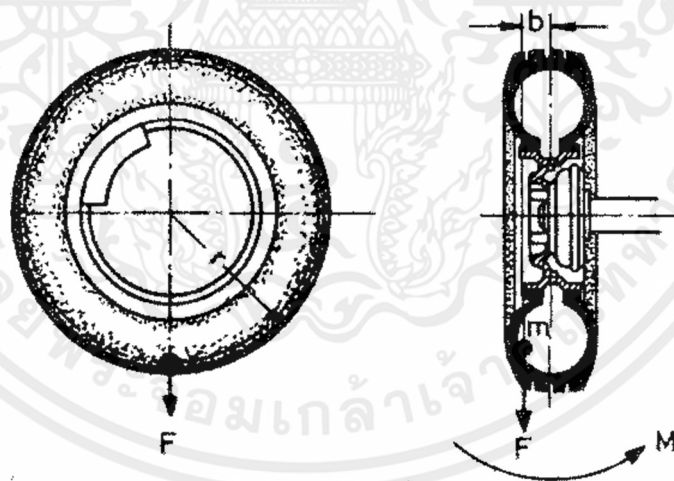
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.12 โหลดเซลล์รูปวงแหวนเมื่อได้รับแรงดึง [20]

2.1.6 สมดุลล้อ

สมดุลล้อคือการที่ล้อสามารถทำงานได้อย่างสม่ำเสมอหรือไม่เกิดการสั่นคลอนไปมาขณะที่มีการเคลื่อนที่มี 2 ประเภทได้แก่ ความสมดุลแบบสถิติกและแบบไดนามิก ความไม่สมดุลของล้อเกิดจากการที่มีน้ำหนักที่จุดใดจุดหนึ่งของล้อมากกว่าปกติซึ่งจะทำให้เกิดแรงหนีศูนย์กลางและเกิดแรงบิดตามมาในที่สุด [21] ดังแสดงในรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 ลักษณะของแรงหนีศูนย์กลางและแรงบิดที่เกิดขึ้นในล้อรถเมื่อล้อรถมีความไม่สมดุล [21]

การที่ล้อมีมวลที่จุดใดจุดหนึ่งมากกว่าจุดอื่นๆ จะส่งผลให้การหมุนที่เกิดขึ้นไม่คงที่หรือมีการสั่นสะเทือนเกิดขึ้น จึงจำเป็นต้องมีความเข้าใจในตัวแปรที่ส่งผลต่อการสั่นสะเทือนของล้อ เพื่อให้การทำสมดุลล้อเป็นไปอย่างถูกต้องและเกิดความปลอดภัยขณะขับขี่ ซึ่งสามารถคำนวณแรงหนีศูนย์กลางได้จากสมการที่ 2.9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$F = m \frac{v^2}{r} \quad (2.9)$$

โดยที่ F คือ แรงหนีศูนย์กลางเนื่องจากความไม่สมดุล (N)

m คือ มวลของส่วนที่มีน้ำหนักเกิน (kg)

V คือ ความเร็วของรถ (m/s)

r คือ รัศมีของล้อรถ (m)

M คือ แรงบิดที่เกิดขึ้นจาก แรง $F \times b$ เมื่อ b คือระยะจากกึ่งกลางล้อจนถึงจุดศูนย์กลางของจุดที่ไม่สมดุล ($N \cdot m$)

การทำให้ล้อสมดุลคือการกำจัดแรง F ที่เป็นส่วนเกินโดยการใส่น้ำหนักที่มีขนาดเท่ากันเข้าไปที่ด้านตรงข้ามของตำแหน่งของแรงส่วนเกิน (รูปที่ 2.14) จะทำให้สามารถหักล้างแรงหนีศูนย์กลางและแรงบิดที่เกิดขึ้นได้



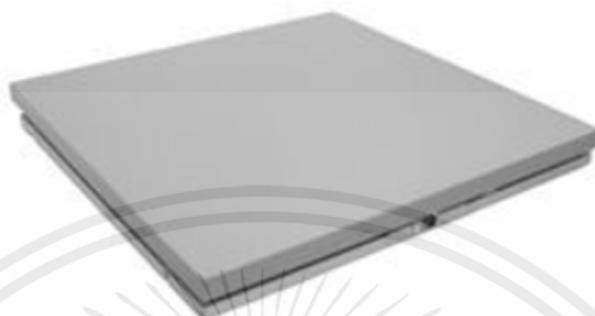
รูปที่ 2.14 การถ่วงล้อเพื่อให้เกิดความสมดุล [21]

2.1.7 แผ่นวัดแรง

แผ่นวัดแรงเป็นอุปกรณ์ที่ใช้วัดแรงปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเมื่อมีแรงมากระทำ โดยสามารถวัดได้ทั้งแรงในแนวตั้งและแรงเฉือนขึ้นอยู่กับประเภทของแผ่นวัดแรง แผ่นวัดแรงชุดหนึ่งจะประกอบไปด้วยการทำงานร่วมกันของเซนเซอร์ (โพลดเซลล์) เพื่อวัดแรงและค่าของตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับแรงที่กระทำ เช่น แรงต้านข้างและแรงแนวนอน ลักษณะโดยทั่วไปของแผ่นวัดแรงคือมีรูปทรงสี่เหลี่ยม (รูปที่ 2.15) ส่วนขนาดของแผ่นวัดแรงนั้นจะใหญ่หรือเล็กขึ้นอยู่กับการนำไปใช้งาน แผ่นวัดแรงมีหลักการการทำงานโดยทั่วไปคล้ายกันคือ มีโพลดเซลล์อยู่ภายในเพื่อใช้วัดค่าความเครียดที่เกิดขึ้น เมื่อมีแรงมา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

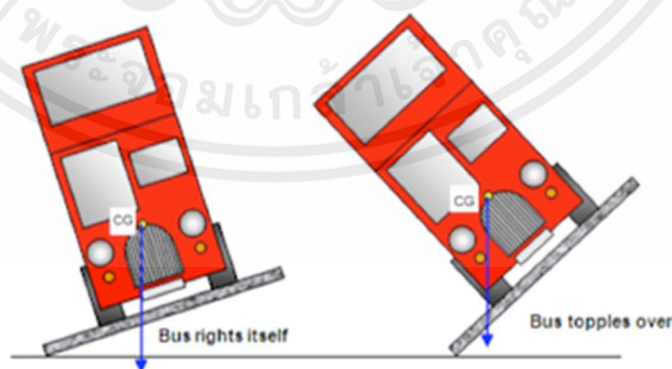
กระทำที่แผ่นวัดแรงสเตรนเกจภายในโพลดเซลล์จะเกิดการยืดหรือหวั่นไหวส่งผลให้ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าภายในสเตรนเกจเปลี่ยนไปและแสดงผลค่าแรงที่กระทำผ่านอุปกรณ์แปลงสัญญาณ [22]



รูปที่ 2.15 แผ่นวัดแรง [22]

2.1.8 จุดศูนย์ถ่วง

จุดศูนย์ถ่วง (Center of gravity, CG) คือ จุดที่น้ำหนักมีการกระจายตัวอยู่อย่างสม่ำเสมอ และทุกด้านอยู่ในสมดุล ศูนย์กลางของแรงโน้มถ่วงเป็นแนวคิดที่สำคัญในการพิจารณาความมั่นคงของโครงสร้าง ความเสถียรจะมีค่ามากที่สุดในวัตถุที่มีจุดศูนย์ถ่วงต่ำและฐานกว้าง ยิ่งวัตถุมีความสูงและหนักมากจะยิ่งมีโอกาสหงายท้องเมื่อถูกแรงโน้มถ่วง (รูปที่ 2.16) แสดงให้เห็นถึงการขับเคลื่อนในสองระดับที่แตกต่างกัน ส่วนที่สองนั้นชันมากพอที่จะทำให้จุดศูนย์ถ่วงตกลงไปด้านนอกฐานของยานพาหนะซึ่งจะทำให้ล้มลง [23]

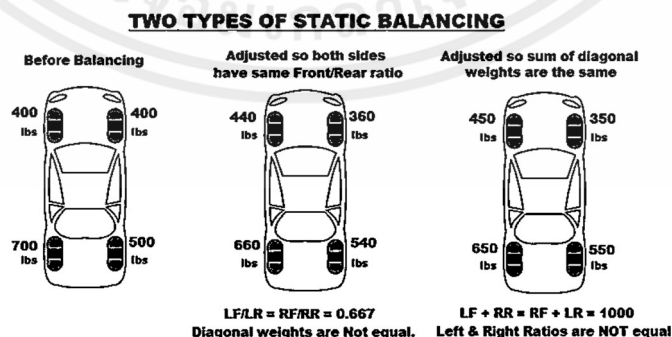


รูปที่ 2.16 จุดศูนย์ถ่วงบนพื้นที่ความเอียงต่างกัน [23]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.9 มุมปรับน้ำหนัก (Corner Weight)

หนึ่งในสิ่งที่สำคัญที่สุดในการปรับแต่งรถยนต์เพื่อการแข่งขันคือการกระจายน้ำหนักคงที่และเปอร์เซ็นต์น้ำหนักไขว้ การปรับสมดุลมุมเป็นขั้นตอนที่การกระจายน้ำหนักแบบทแยงมุมบนยางรถยนต์จะเท่ากัน สำหรับสิ่งนี้ผู้ขับขี่จำเป็นต้องอยู่ในรถ ต้องมีปริมาณน้ำมันเชื้อเพลิงในถังที่ถูกต้องและของเหลวอื่นๆ ทั้งหมดจะต้องถูกเติมให้เต็มเพื่อจำลองสภาพการแข่งขันจริงภายในประเภทมอเตอร์สปอร์ตหลายประเภท การถ่วงน้ำหนักรถยนต์ก่อนการแข่งขันมีความสำคัญเนื่องจากน้ำหนักมีผลกระทบต่อเวลาและความสามารถของรถ การปรับแต่งสามารถเพิ่มประสิทธิภาพของรถได้อย่างมากและทำให้ผู้ขับขี่สามารถควบคุมได้ง่ายขึ้น การชั่งน้ำหนักในแต่ละมุมจะบอกให้ทราบว่ารถมีมวลโดยรวมและมวลของแต่ละล้อมีค่าเท่าไร หากมีมวลที่ไม่สม่ำเสมอบนล้อจะทำให้ยางมีระดับการยึดเกาะที่แตกต่างกันซึ่งจะทำให้การควบคุมรถเป็นไปได้โดยไม่สะดวกและทำให้รถไม่เสถียร การกระจายน้ำหนักด้านหน้าไปด้านหลังมีความสำคัญเช่นกันเพราะช่วยให้แรงดุดของล้อเพิ่มขึ้น การปรับแต่งด้วยการเพิ่มมวลด้านหน้าหรือด้านหลังขึ้นอยู่กับว่าล้อใดที่ส่งกำลังมากที่สุดไปยังพื้นดิน เพื่อให้ได้รถแข่งที่ได้รับการปรับแต่งอย่างดีจึงจำเป็นต้องปรับแต่งให้ใกล้เคียง 50/50 มากที่สุด อย่างไรก็ตามการปรับแต่งสามารถเปลี่ยนเพื่อเพิ่มน้ำหนักด้านหน้าหรือด้านหลังของรถ (รูปที่ 2.17) เปอร์เซ็นต์ที่สำคัญมากสำหรับรถแข่งคือเปอร์เซ็นต์น้ำหนักไขว้ ค่าเปอร์เซ็นต์น้ำหนักไขว้จะต้องใกล้เคียงกับ 50% มากที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้เพื่อให้รถเข้าโค้งเหมือนกันทางด้านซ้ายและด้านขวา เปอร์เซ็นต์ความแตกต่างด้านหน้าและด้านหลังที่เหมาะสมเปลี่ยนไปได้ขึ้นอยู่กับประเภทการขับเคลื่อนของรถ ได้แก่ ขับเคลื่อนด้านหน้า ด้านหลังหรือขับเคลื่อนสี่ล้อ สำหรับรถขับเคลื่อนล้อหน้าการมีมวลมากขึ้นเล็กน้อยบนล้อหน้าเป็นสิ่งที่ดีสำหรับการยึดเกาะดังนั้นการแบ่งส่วนหน้าไปทางหลัง 55/45 เปอร์เซ็นต์จึงส่งผลดี สำหรับรถขับเคลื่อนล้อหลังการแบ่งเปอร์เซ็นต์หน้าหลัง 45/55 ทำให้แรงดึงด้านหลังมากขึ้น อย่างไรก็ตามรถแข่งที่ขับเคลื่อนด้วยล้อหลังจำนวนมากมีความใกล้เคียงของการแบ่งอัตราส่วนน้ำหนัก หน้า-หลัง 50/50 และสำหรับรถขับเคลื่อนสี่ล้อนั้นการแบ่ง 50/50 นั้นส่งผลดีมากที่สุดเพราะจะให้แรงดุดที่ล้อทั้งสี่ [24]



รูปที่ 2.17 การปรับแต่งสมดุลของรถ [25]

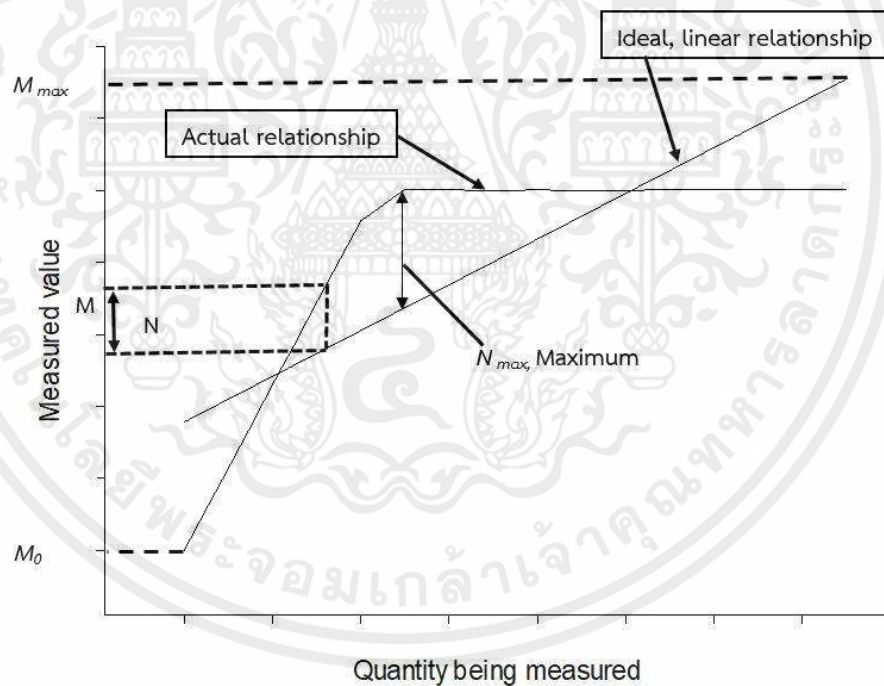
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.10 ความคลาดเคลื่อนไม่เป็นเชิงเส้น (Non-linearity error)

ความคลาดเคลื่อนไม่เป็นเชิงเส้น (รูปที่ 2.18) คือ ค่าความแตกต่างระหว่างค่าจริงที่ได้ และค่าความสัมพันธ์เชิงเส้น (Linear relationship) ซึ่งค่าความสัมพันธ์เชิงเส้น คือ ค่าความสัมพันธ์ระหว่างค่าเอาต์พุตและค่าอินพุต โดยค่าเอาต์พุตที่ได้นั้นเป็นสัดส่วนโดยตรงกับค่าอินพุต ซึ่งความคลาดเคลื่อนไม่เป็นเชิงเส้นหาได้จากสมการที่ 2.10 [26]

$$\text{Non-linearity} = \frac{N_{\max}}{M_{\max} - M_0} \times 100\% \quad (2.10)$$

โดยที่ N_{\max} คือ ช่วงความแตกต่างของชุดข้อมูลในแกน Y
 M_{\max} คือ ค่าสูงสุดที่วัดได้
 M_0 คือ ค่าเริ่มต้นก่อนการวัด



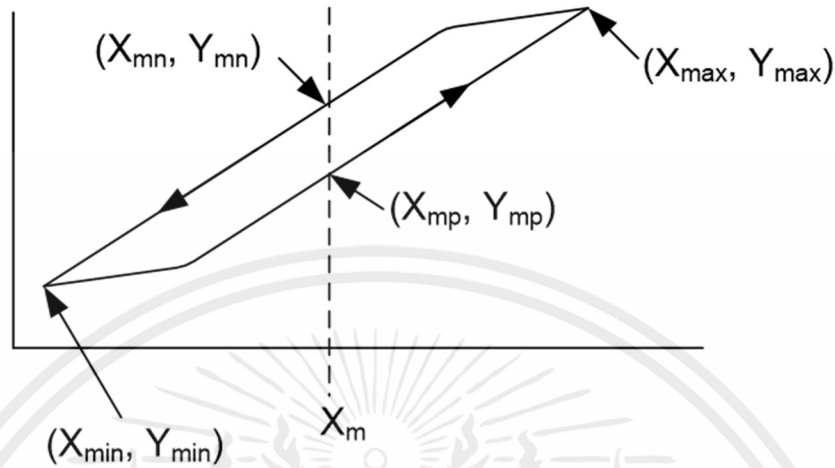
รูปที่ 2.18 กราฟแสดงตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับ Non-linearity

2.1.11 ฮิสเทอรีซิส (Hysteresis)

ฮิสเทอรีซิส คือ ค่าความแตกต่างในการวัดของเครื่องมือวัดที่น้ำหนักเดิม เช่น เมื่อนำน้ำหนักมาชั่งบนตราชั่งจนถึงค่าสูงสุดค่าหนึ่ง แล้วค่อยๆ นำน้ำหนักออก ค่าที่อ่านได้จากการนำน้ำหนักออก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นั้นอาจไม่เท่าเดิมในช่วงการวัดช่วงหนึ่ง (รูปที่ 2.19) ซึ่งช่วงเหล่านี้สามารถบอกได้ว่าเครื่องมีวัดมีความคลาดเคลื่อนหรือความแม่นยำมากน้อยเพียงใด สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.11 [27]



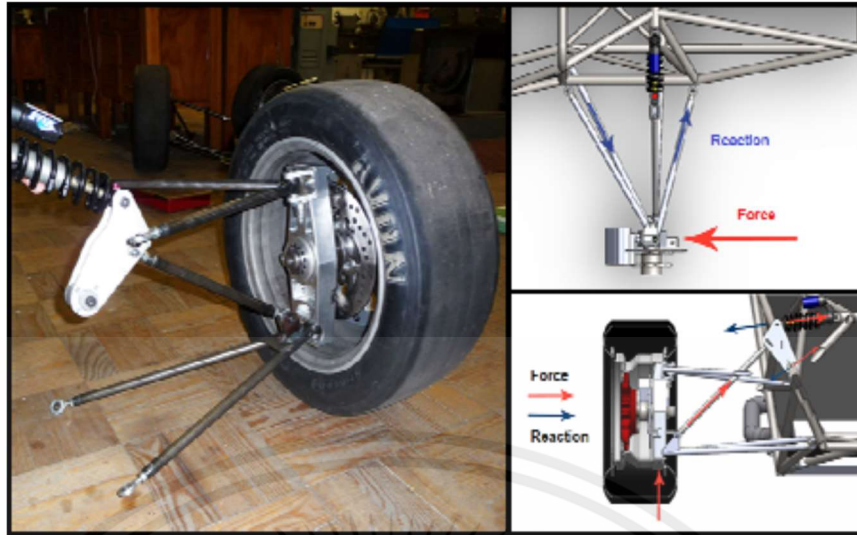
รูปที่ 2.19 กราฟแสดงตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับสมการฮิสเทอรีซิส [27]

$$\text{Hysteresis}\% = \frac{|Y_{mn} - Y_{mp}|}{Y_{\max} - Y_{\min}} \times 100 \quad (2.11)$$

โดยที่ Y_{mn} คือ ค่า Y ในช่วงที่น้ำหนักค่อยๆ ลดลง
 Y_{mp} คือ ค่า Y ในช่วงที่น้ำหนักค่อยๆ เพิ่มขึ้น
 Y_{\max} คือ ค่า Y สูงสุด
 Y_{\min} คือ ค่า Y ต่ำสุด

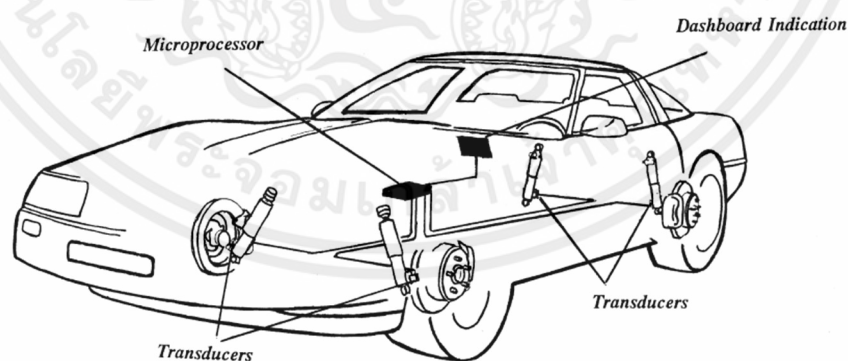
2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Roseiro et al. [1] ทดสอบระบบโครงข่ายประสาทเทียม (neural network) เพื่อหาปริมาณของแรงที่กระทำในทิศทางแนวนอนและแนวตั้งในคัมล้อ ซึ่งแรงดังกล่าวจะถูกส่งไปยังระบบขับเคลื่อนประเภทรูปทรงสามเหลี่ยม แล้วส่งต่อไปที่ตัวถังของรถ การศึกษานี้ทำโดยอาศัยระบบ neural network ข้อมูลการทดลองที่ถูกวัดจากการใช้สเตรนเกจและโพลดเซลล์ แสดงให้เห็นว่าเป็นไปได้ที่จะใช้กระบวนการนี้ในการหาแรงที่กระทำกับคัมล้อในทิศทางแนวตั้ง-แนวนอน ส่วนในการใช้งานจริง ข้อมูลที่ได้รับขณะขับซึ่งจริงจะเป็นประโยชน์อย่างมากในการปรับแต่งสมรรถนะของรถให้มีความเหมาะสมกับสภาพพื้นถนนต่างๆ ให้มีความเหมาะสม (รูปที่ 2.20)



รูปที่ 2.20 ลักษณะของแรงที่เกิดขึ้น [1]

Craighead [2] ได้เสนอแนวคิดในการตรวจวัดแรงดันลมยางและหาค่าการสั่นสะเทือนแนวตั้งในล้อรถยนต์ขณะวิ่งโดยใช้ทรานสดิวเซอร์ 4 ตัว ติดไว้ที่ล้อทั้งสี่ที่ควบคุมโดยไมโครโปรเซสเซอร์ (รูปที่ 2.21) และแสดงผลไปยังหน้าจอขณะขับขี่ ผลการทดลองเบื้องต้นแสดงให้เห็นว่าแรงดันลมยางที่ทรานสดิวเซอร์วัดได้มีความแม่นยำ 12% และสามารถตรวจสอบการหน่วงและระดับความไม่สมดุลของล้อได้ซึ่งสามารถ เป็นต้นแบบที่มีราคาถูกได้และจะช่วยให้ผู้ขับขี่สามารถทราบถึงแรงดันของยาง สภาพของระบบป้องกันการสั่นสะเทือนและสมดุลล้อ เพื่อเพิ่มความปลอดภัย ความสะดวกสบายในการใช้งานและลดต้นทุนการผลิตรถยนต์ได้

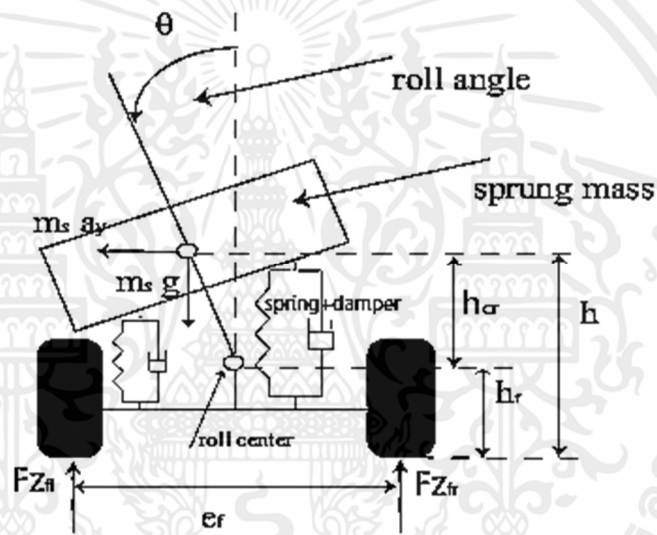


รูปที่ 2.21 ลักษณะการทำงานของระบบ [2]

Doumiati et al. [3] ได้เสนอขั้นตอนการประมาณค่าการถ่ายโอนภาระที่กระทำด้านข้างของรถยนต์หรือการกระจายตัวของแรงขณะเลี้ยวรถ (รูปที่ 2.22) และแรงตามปกติของล้อที่สัมผัสกับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พื้นถนนโดยได้ทำการพัฒนาระบบการประมวลผลแบบเรียลไทม์ โดยใช้โมเดลยานพาหนะที่เรียบง่ายในการประเมินความแม่นยำของแรงที่ปะทะในแนวตั้งบนพื้นล้อ โมเดลการถ่ายโอนโพลสด้านข้างที่พัฒนาขึ้นนี้อยู่บนพื้นฐานของความสมดุลของรถยนต์ (Vehicle's roll dynamics) ในความเป็นจริงศูนย์การหมุนของรถจะไม่เสถียร แต่ในการศึกษานี้ศูนย์ล้อได้ถูกกำหนดค่าให้คงที่เพื่อลดความซับซ้อนของแบบจำลอง ซึ่งเป็นผลมาจากการเร่งความเร็วและการเลี้ยวของยานพาหนะ การกระจายโพลสดในยานพาหนะสามารถเกิดการเปลี่ยนแปลงได้อย่างมากระหว่างที่ยานพาหนะมีการเคลื่อนไหว ยิ่งไปกว่านั้นรูปแบบช่วงล่างที่จำลองขึ้นมา นั้นถือว่าเป็นแบบอุดมคติซึ่งไม่ได้สอดคล้องกับความเป็นจริงเสมอไป การศึกษาในอนาคตจะปรับปรุงวิธีการประมวลผล คำนึงถึงความผิดปกติของถนน และมุมของถนนซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อถ่ายโอนภาระโพลสด

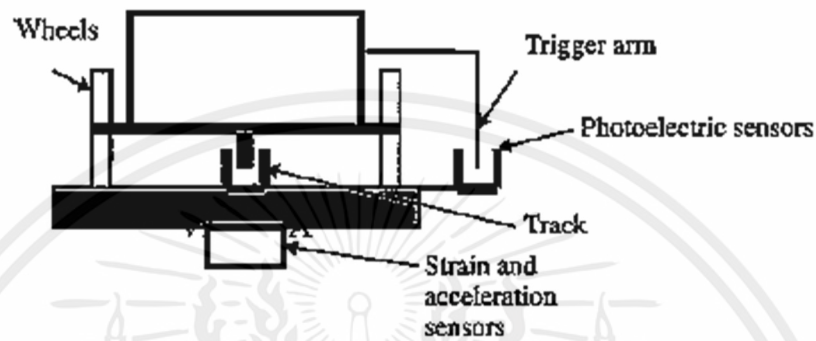


รูปที่ 2.22 การโคลงของรถขณะขับ [3]

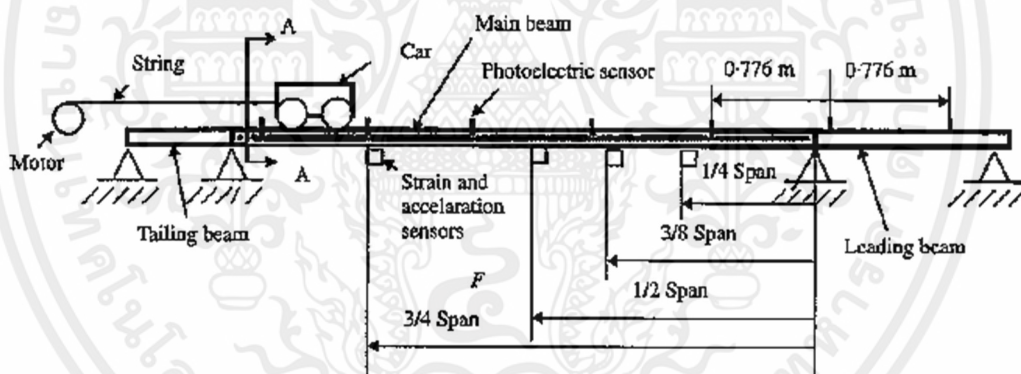
Zhu and Law. [4] ได้เสนอวิธีการระบุแรงที่เกิดขึ้นจากการสั่นสะเทือนบนสะพานหรือทางด่วนที่มียานพาหนะเคลื่อนที่อยู่ตลอด โดยใช้ทฤษฎี Orthotropic plate และหลักการ Superposition ร่วมกับขั้นตอนการทำให้เป็นมาตรฐานของ Tikhonov หรือกระบวนการที่เรียกว่า Ridge regression เป็นกระบวนการวิเคราะห์การถดถอยแบบพาราเมตริกเพื่อแก้ปัญหาการร่วมเชิงเส้นพหุระหว่างตัวแปรต้น (Multicollinearity) เรียกอีกอย่างว่าการแก้ปัญหากำลังสองน้อยสุดที่ไม่เป็นเชิงเส้น [5] ระบบได้รับการพัฒนาขึ้นสำหรับการวัดแรงขณะที่ยานพาหนะเคลื่อนที่ ทดสอบและบันทึกผลในห้องปฏิบัติการโดยใช้ระบบที่จำลองขึ้นมา (รูปที่ 2.23) ให้มีสภาวะและเงื่อนไขเดียวกันกับสถานการณ์จริง โดยใช้คานที่มีความยาว 3768 mm พื้นที่ภาคตัดขวาง $100 \times 25 \text{ mm}^2$ ค่า Young's modulus $2.1 \times 10^9 \text{ N/m}^2$ ความหนาแน่นของมวล 2300 kg/m^3 อัตราส่วนปัวซอง 0.3 เป็นคานหลัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(Main beam) ดังรูปที่ 2.24 ติดตั้งสเตรนเกจ 7 ตัว ที่ด้านล่างของคานเพื่อวัดโมเมนต์ดัดที่เกิดขึ้น ให้นยานพาหนะวิ่งในลักษณะดังรูปที่ 2.24 ความเร็วเฉลี่ยที่ใช้มีค่าเท่ากับ 1.856 m/s จากการทดลอง แสดงให้เห็นว่าวิธีนี้มีประสิทธิภาพสูงในการระบุแรงที่มีการเคลื่อนที่ แต่การระบุแรงที่เกิดจากการวัด ความเร่งจะให้ค่าข้อมูลที่แม่นยำกว่าการระบุแรงที่วัดจากค่าความเครียด



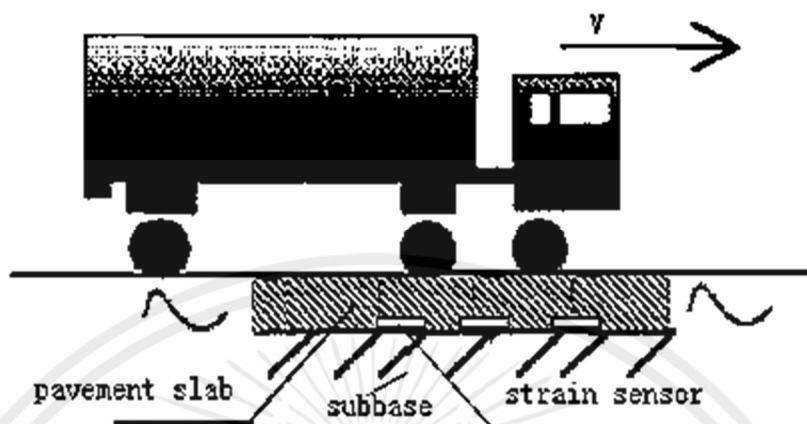
รูปที่ 2.23 ระบบจำลองของการวัด [4]



รูปที่ 2.24 ลักษณะขั้นตอนการทำงานของระบบ [4]

Zhang et al. [6] ได้เสนอการใช้วิธีการตอบสนองต่อความเครียดของผิวทางด้วยระบบ Weight in Motion (WIM) ที่มีต้นทุนต่ำ น้ำหนักเบา และมีขนาดเล็ก ร่วมกับสเตรนเกจแบบฝังในคอนกรีต (รูปที่ 2.25) ระบบที่ใช้เซนเซอร์หลายตัวได้รับการออกแบบและปรับใช้บนทางด่วน ค่าที่ได้จะถูกสอบเทียบกับน้ำหนักมาตรฐานของยานพาหนะนั้นๆ ด้วยเครื่องชั่งมาตรฐาน ระบบที่นำเสนอนี้ใช้เวลาในการวัดนานกว่าวิธี WIM ที่ใช้อยู่ในปัจจุบันแต่ระบบมีความแม่นยำกว่า นอกจากนี้ยังทนทาน ประหยัดต้นทุน ง่ายต่อการบำรุงรักษา มีความกลมกลืนไปกับพื้นถนน และยังเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม จากการทดสอบพบว่ามีความเป็นไปได้ที่จะใช้สเตรนเกจแบบฝังที่นำเสนอนี้ เนื่องจากชุดข้อมูลที่ทำ

การวัดได้นั้นมีค่าความผิดพลาดสูงสุดอยู่ที่ 3.3% และการใช้สเตรนเกจแบบหลายตัวให้ค่าความแม่นยำมากกว่าการใช้สเตรนเกจแบบตัวเดียว

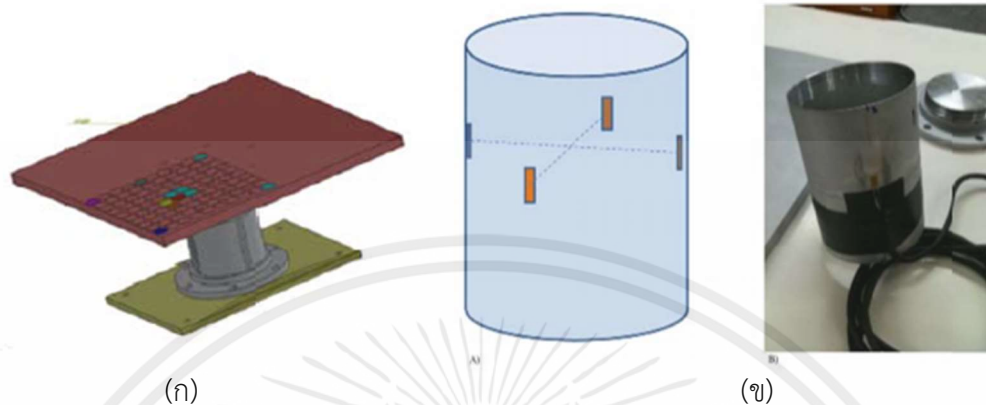


รูปที่ 2.25 ลักษณะการทำงานอย่างง่ายของระบบ WIM [6]

Mourão et al. [7] ออกแบบและสร้างต้นแบบแผ่นวัดแรง 3 มิติ โดยใช้แกนรับน้ำหนักเป็น โหลดเซลล์อลูมิเนียมทรงกระบอก ทดสอบต้นแบบโดยใช้การกดที่แรง 42 N จากด้านบนลักษณะ ดังรูปที่ 2.26 (ก) และคำนวณผลลัพธ์ที่เกิดขึ้นกับโหลดเซลล์ต้นแบบด้วยโปรแกรม ANSYS 14.0 โหลดเซลล์ติดตั้งสเตรนเกจ 4 ตัว ดังรูปที่ 2.26 (ข) สเตรนเกจถูกติดตั้งแบบ Quarter Wheatstone bridge เข้ากับบอลูมิเนียมทรงกระบอกหนา 0.1 mm และเก็บข้อมูลด้วยอุปกรณ์แปลงสัญญาณ แอนะล็อกเป็นดิจิทัล NI-9237 แบบ 4 ช่องสัญญาณ ผลลัพธ์ที่ได้แสดงให้เห็นว่าแผ่นวัดแรงต้นแบบนี้ ไม่สามารถวัดค่าศูนย์กลางของความดันที่เกิดขึ้นได้อย่างถูกต้อง อาจเป็นผลมาจากการออกแบบ ชิ้นงานที่ยังไม่ดีพอ ทั้งนี้ชิ้นงานต้นแบบนี้ยังสามารถนำไปพัฒนาต่อในการหาแรงที่เกิดขึ้นที่แทนออก ตัวของนักว่ายน้ำ

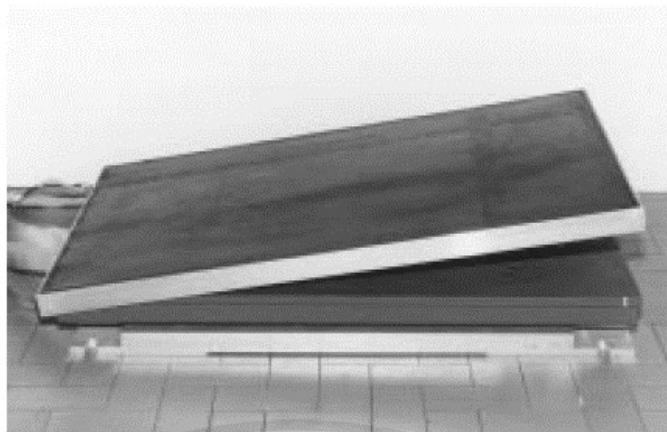
Giacomozzi et al. [8] พัฒนาเครื่องมือวัดแรงที่กระทำระหว่างเท้าและพื้น (รูปที่ 2.27) แผ่นวัดแรงนี้ได้รับการออกแบบและสร้างขึ้นโดยใช้เทคโนโลยีที่มีต้นทุนต่ำ เครื่องมือนี้ทำงานโดย ประเมินผลลัพธ์ของแรงปฏิกิริยาพร้อมกันได้แก่ แรงในแนวตั้ง เวลา และตำแหน่งของจุดศูนย์กลาง ของความดัน (COP) จากการสอบเทียบเซนเซอร์พบว่ามีความแม่นยำมาก ข้อมูลและผลลัพธ์ของแรง ที่วัดได้นั้นเป็นสิ่งจำเป็นสำหรับการคำนวณแรงเฉือนที่กระทำต่อพื้นซึ่งสอดคล้องกับเซนเซอร์ วัดความดันแต่ละตัว คุณสมบัติที่โดดเด่นของเครื่องมือนี้คือสามารถวัดค่า COP ได้และมีความแม่นยำ สูงในการวิเคราะห์การเดินพบว่าอุปกรณ์นี้มีประโยชน์ต่อการวิจัยที่เกี่ยวกับโรคที่เกี่ยวข้องกับการเดิน ทั้งด้านการเตรียมผู้ป่วย อุปกรณ์ไม่เป็นภาระต่อผู้ใช้และประหยัดพื้นที่ในการปฏิบัติงาน แต่เนื่องจาก

อุปกรณ์เหล่านี้ยังมีความละเอียดไม่เพียงพอซึ่งจำเป็นต้องใช้ความซับซ้อนทางกลและอิเล็กทรอนิกส์ในการออกแบบให้มากขึ้น อาจส่งผลเสียต่อการใช้งานในระยะยาว



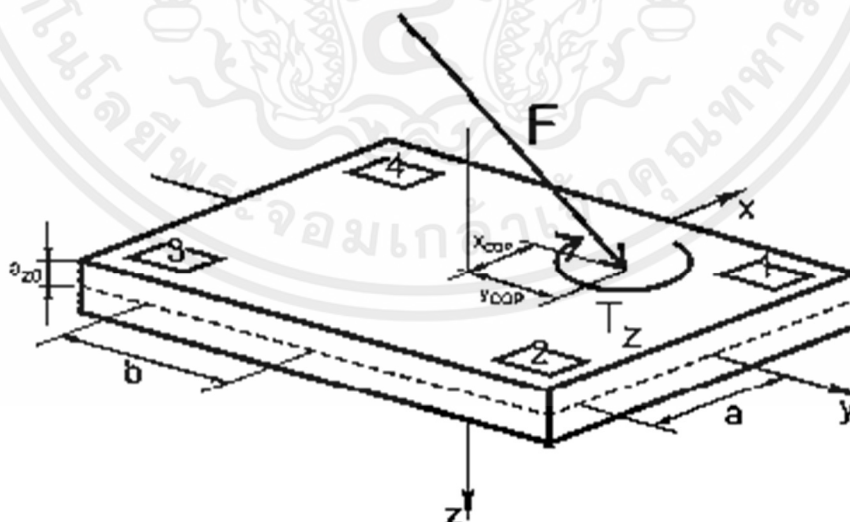
รูปที่ 2.26 (ก) ตัวอย่างแทนออกตัวของน้กว่ายน้ำ (ข) ตำแหน่งและการติดตั้งเกจวัดความเครียด [7]

Scorza et al. [9] ได้ทบทวนหลักการทำงานของแผ่นวัดแรงทั่วไป แผ่นวัดแรงส่วนใหญ่จะเป็นโลหะรูปทรงสี่เหลี่ยม (รูปที่ 2.28) ขนาดทั่วไปประมาณ $0.6 \times 0.6 \text{ m}^2$ โดยมีโหนดเซลล์ติดตั้งไว้ที่มุมของแผ่นโลหะทั้ง 4 มุม และการวิเคราะห์แรงปฏิกิริยาของพื้นดินส่วนใหญ่มีความเกี่ยวข้องกันกับการนำแผ่นวัดแรงไปใช้เพื่อคำนวณศูนย์กลางของแรงดัน ซึ่งการวัดแรงปฏิกิริยาของแผ่นวัดแรงส่งผลโดยตรงต่อการคำนวณ ค่าความผิดพลาดอาจเกิดจากการติดตั้งที่ไม่เหมาะสมส่งผลให้เกิดปัญหาขณะทดสอบ โดยเฉพาะอย่างยิ่งการสอบเทียบเป็นสิ่งจำเป็นสำหรับการทดสอบทั้งแบบสถิตยศาสตร์และจลน์ศาสตร์ โดยส่วนใหญ่นิยมใช้การสอบเทียบแบบสถิตยศาสตร์หรือไม่มีการเคลื่อนไหวเนื่องจากมีข้อผิดพลาดน้อยกว่า อย่างไรก็ตามการสอบเทียบแผ่นวัดแรงแบบพลศาสตร์ยังคงต้องทำการศึกษาเพิ่มเติม สำหรับการประเมินประสิทธิภาพของแผ่นวัดแรงและการสร้างแผ่นวัดแรงที่แม่นยำและสามารถใช้งานได้จริงกับการเดินในมนุษย์ และเมื่อไม่นานมานี้ได้มีการนำแผ่นวัดแรงมาใช้กับระบบออปโตอิเล็กทรอนิกส์ (Opto-electronic) เพื่อรวมคุณสมบัติทางพลศาสตร์ในการลดค่าความผิดพลาดที่อาจเกิดขึ้น แม้จะมีผลลัพธ์ที่มีแนวโน้มและความสามารถในการวิเคราะห์เกี่ยวกับการสอบเทียบของระบบรวมทั้งหมด แต่ยังไม่เป็นที่ยอมรับในทางทฤษฎีและทางเทคนิค



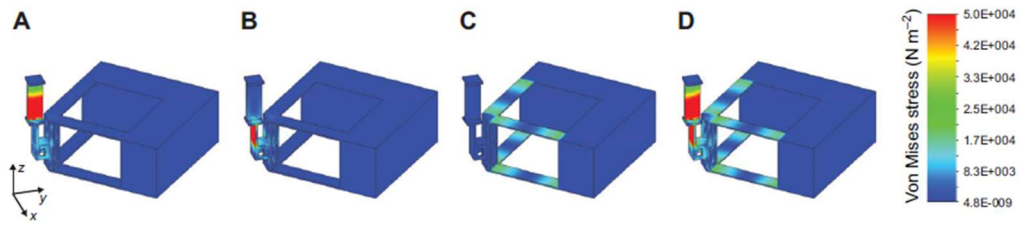
รูปที่ 2.27 เครื่องมือวัดแรงที่กระทำระหว่างเท้าและพื้น [8]

Reinhardt et al. [10] ได้นำเสนอการออกแบบและสร้างต้นแบบแผ่นวัดแรงขนาดเล็กระดับไมครอน เซนเซอร์ที่ใช้ขึ้นถูกสร้างสร้างโดยใช้เทคโนโลยี Stereolithography ที่มีความแม่นยำสูง อีกทั้งยังติดตั้งอุปกรณ์ Semiconductor strain gauges และใช้วัสดุเป็นโพลีคาร์บอนเนต จากการทดสอบพบว่าเครื่องมือมีการตอบสนองต่อสัญญาณเชิงเส้นสูงในช่วงของการสอบเทียบที่ $\pm 1300 \mu\text{N}$ และสามารถตอบสนองแรงได้มากที่สุดถึง 4 mN ข้อมูลเหล่านี้แสดงให้เห็นถึงความเหมาะสมของเครื่องมือวัดแรงปฏิกิริยาทางพื้นดินของมด (Formica polycetena) จากการออกแบบโดยใช้ Solidworks และกระบวนการคำนวณถึงคุณสมบัติของแผ่นและแรงที่เกิดขึ้นทำให้ได้ชิ้นงานต้นแบบที่มีลักษณะดังรูปที่ 2.29 (ก) และ 2.29 (ข)

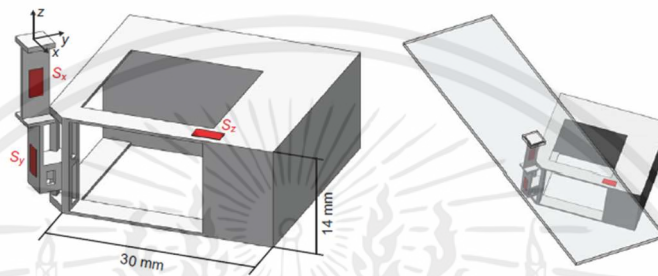


รูปที่ 2.28 ลักษณะโดยทั่วไปของแผ่นวัดแรง [9]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



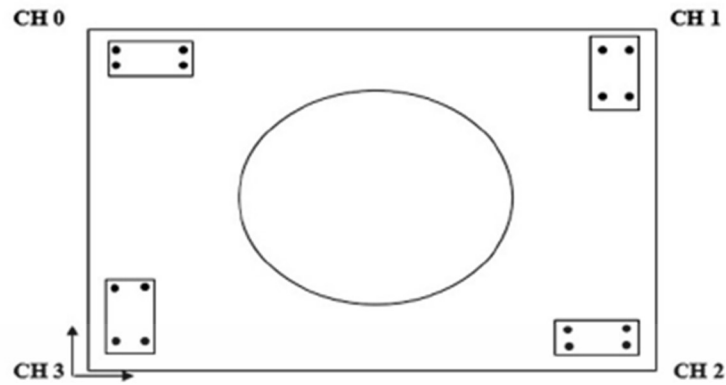
(ก)



(ข)

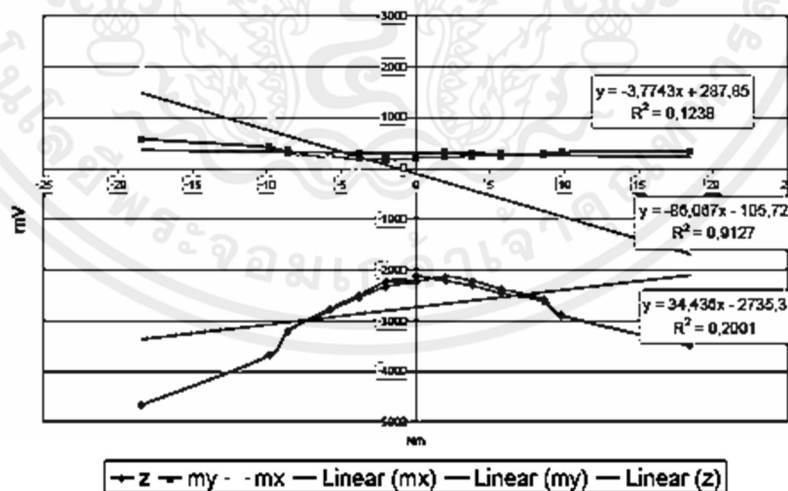
รูปที่ 2.29 (ก) ผลการ Simulation (ข) ชิ้นงานต้นแบบ [10]

Silva et al. [11] ได้เสนอการออกแบบแผ่นวัดแรงต้นทุนต่ำที่ประกอบด้วยโหนดเซลล์ 4 ตัว จัดวางในลักษณะดังรูปที่ 2.30 แผ่นวัดแรงที่เสนอนี้ได้รับการพัฒนาตามมาตรฐานสากลของการวัดด้วยสเตรนเกจ 4 ตัว โดยใช้สเตรนเกจรุ่น J2A-06-SO38-350 ที่พัฒนาเพื่อวัดระดับไมโครแพคเตอร์ กำลังขยายเท่ากับ 2 รับภาระกระทำได้สูงสุด 3600 N และแผ่นวัดแรงมีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัส ยาวขนาด 500 mm ทำจากอลูมิเนียม 5052F หนา 10 mm น้ำหนัก 6.30 kg โดยแผ่นวัดแรงมีค่ายังโมดูลัสเท่ากับ 7.31×10^{10} N/m² Poisson's coefficient มีค่าเท่ากับ 0.3333 ความหนาแน่น 2.70×10^3 Kg/m³ Yield Strength 8.07×10^7 N/m² และการวางโหนดเซลล์ทั้ง 4 ตัววางโดยให้มีระยะห่างจากขอบของแผ่นวัดแรงทุกด้านเท่ากับ 0.03 m อีกทั้งยังต่อวงจรแบบ Full Wheatstone bridge ภายในโหนดเซลล์แต่ละตัว และมีต้นทุนการผลิตอยู่ที่ประมาณ 1,000 \$ ซึ่งถูกกว่าราคาของแผ่นวัดแรงที่มีจำหน่ายทั่วไป ผลการสอบเทียบแสดงให้เห็นถึงค่าฮิสเทอรีซิสที่ต่ำ และค่าจากตัวแปรอื่นๆ มีค่าอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ จากการวิเคราะห์ผลได้ความว่าอุปกรณ์นี้มีต้นทุนต่ำและเหมาะสมกับการนำมาใช้ในการทดลองที่เกี่ยวข้องกับวิทยาศาสตร์



รูปที่ 2.30 แผ่นวัดแรงดันแบบ [11]

Alvarenga et al. [12] ได้สร้างแผ่นวัดแรงและเซนเซอร์ขั้นตอนการสอบเทียบสำหรับการประเมินความเสถียรในสเตรนเกจของแผ่นวัดแรงที่มีต้นทุนต่ำ โหลดเซลล์ที่ใช้มีลักษณะเป็นรูปวงแหวนและติดตั้งวงจรแบบ Full Wheatstone bridge แผ่นวัดแรงทำมาจากเหล็ก 1020 ที่มีความกว้าง 500 mm ยาว 500 mm และหนา 6 mm สอบเทียบเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างแรงที่ใช้กับแผ่นวัดแรงและแรงดันไฟฟ้าขาออก รวมถึงความเป็นเชิงเส้น ดังรูปที่ 2.31 ฮิสเทอรีซิส ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน การสอบเทียบถูกคำนวณด้วยเมทริกซ์ เปรียบเทียบกับเครื่องชั่งดิจิทัลที่มีความแม่นยำจากการทดสอบพบว่าค่า ฮิสเทอรีซิสมีค่าประมาณ 5% แสดงให้เห็นถึงความเป็นไปได้ในการใช้งานอุปกรณ์นี้ทางด้านวิทยาศาสตร์



รูปที่ 2.31 ตัวอย่างค่าที่ได้จากการทดลองแกน x [12]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

อุปกรณ์และวิธีการ

ในบทนี้ได้กล่าวถึงการออกแบบโพลตเซลล์วัดแรงในแนวตั้งวิธีการติดตั้งสเตรนเกจแบบวงจรร Full Wheatstone bridge และ Quarter Wheatstone bridge จากนั้นทำการสอบเทียบเพื่อหาความสัมพันธ์ของแรงและค่าความดันไฟฟ้าขาออกเพื่อนำมาใช้เป็นแผ่นวัดแรงสำหรับตั้งสมดุลล้อของรถฟอร์มูล่า

3.1 โพลตเซลล์แบบวงแหวน

โพลตเซลล์แบบวงแหวนมีการพัฒนาตั้งแต่ ปี ค.ศ. 1980 [28] เพื่อใช้ในการวัดแรงและน้ำหนักของรถบรรทุกหรือเครื่องจักรบรรทุก ลักษณะของวงแหวนจะมีการขึ้นรูปที่ง่ายจึงได้นำมาประยุกต์ในการทดลองนี้

3.1.1 วิธีการออกแบบโพลตเซลล์แบบวงแหวน

3.1.1.1 วัสดุและอุปกรณ์

1. คอมพิวเตอร์
2. โปรแกรม SOLIDWORKS 2014

3.1.1.2 วิธีดำเนินการ

1. ศึกษาคุณสมบัติของวัสดุที่จะนำมาทำวงแหวน
2. ออกแบบขนาดวงแหวน โดยมีเส้นผ่านศูนย์กลางนอก 30-50 mm หนา 2-5 mm สูง 30 mm
3. ทำการไฟไนต์อีลีเมนต์ด้วยน้ำหนัก 80 kg เพื่อหาขนาดที่เหมาะสมสำหรับสร้างโพลตเซลล์แบบวงแหวน ดังรูปที่ 3.1 (ก) และ (ข)

3.1.2 การขึ้นรูปโพลตเซลล์แบบวงแหวน

3.1.2.1 วัสดุและอุปกรณ์

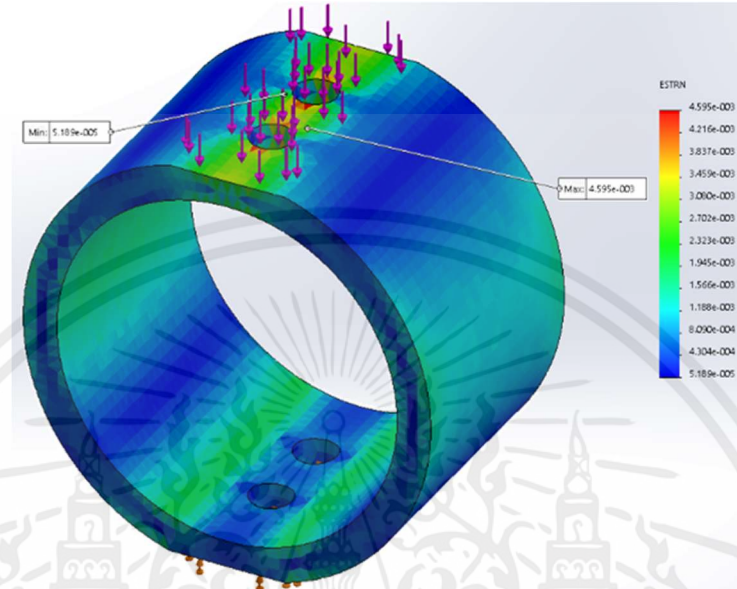
1. เพลาลูมิเนียมตันเบอร์ 7075 เส้นผ่านศูนย์กลาง 2"
2. เวอร์เนียร์ไฮเกจ ยี่ห้อ Mitutoyo Serial No.03002

3.1.2.2 กระบวนการขึ้นรูปชิ้นงาน

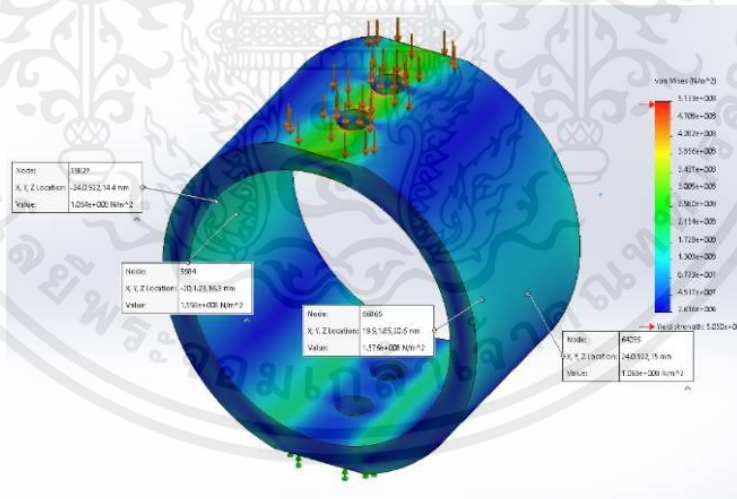
1. ตัดอลูมิเนียมให้ได้ขนาดความยาวประมาณ 30 mm
2. กลึงอลูมิเนียมให้มีเส้นผ่านศูนย์กลางนอกและใน 48 mm และ 40 mm ตามลำดับ รูปที่ 3.2 (ค) และรูปที่ 3.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. กัดชิ้นงานเพื่อสร้างบ่าขนาด 10 mm ทั้งด้านบนและด้านล่าง ดังรูปที่ 3.2 (ข)
4. เจาะรูขนาด 5 mm จำนวน 2 รูโดยเว้นระยะจากขอบชิ้นงานด้านล่าง 10 mm ทั้งด้านบนและด้านล่าง ดังรูปที่ 3.2 (ก) และ รูปที่ 3.4



(ก)

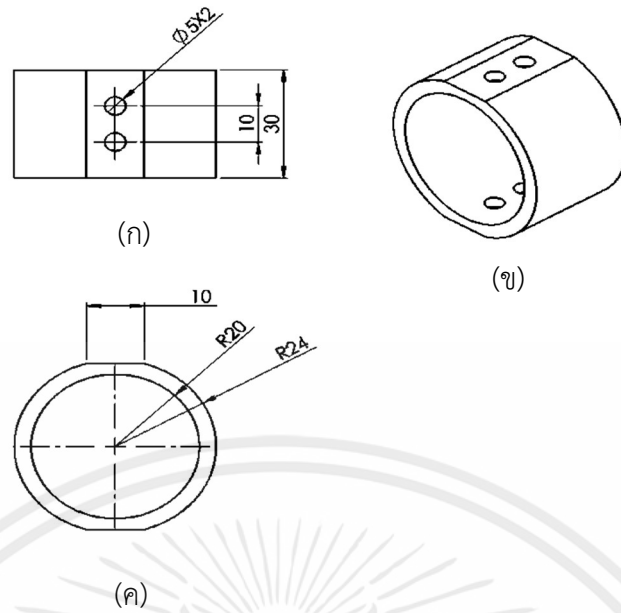


(ข)

รูปที่ 3.1 การไฟไนต์อิลิเมนต์เพื่อหาขนาดที่เหมาะสมสำหรับการสร้างโพลดเชลล์

(ก) ค่าความเครียดที่ผ่านการไฟไนต์อิลิเมนต์ (ข) ค่าความเค้นที่ผ่านการไฟไนต์อิลิเมนต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.2 ขนาดของโหนดเซลล์แบบวงแหวน (ก) ขนาดรูสำหรับยึดนอต (ข) ภาพไอโซเมตริก โหนดเซลล์แบบวงแหวน (ค) ขนาดโหนดเซลล์วงแหวน



รูปที่ 3.3 การขึ้นรูปชิ้นงานต้นแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



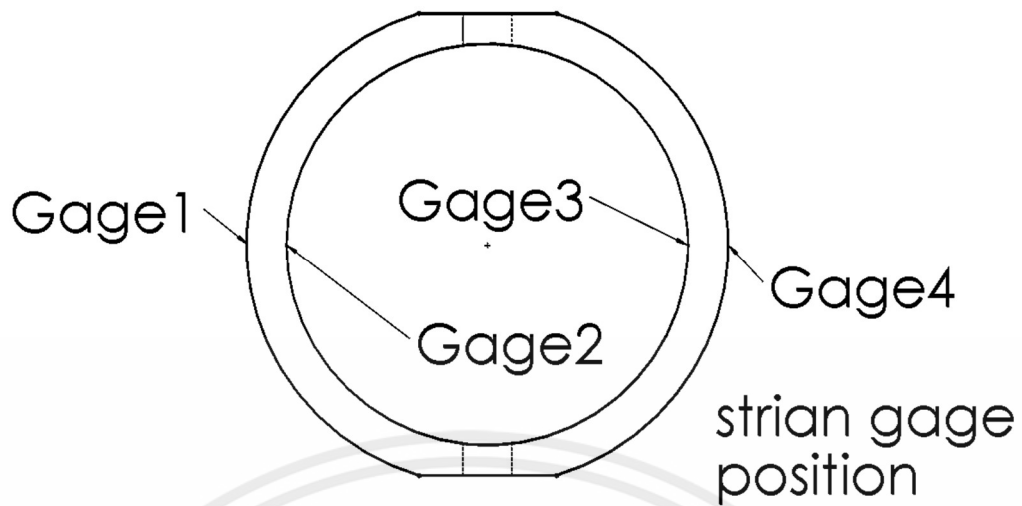
รูปที่ 3.4 เจาะชิ้นงานต้นแบบ

3.1.3 การติดตั้งสเตรนเกจ

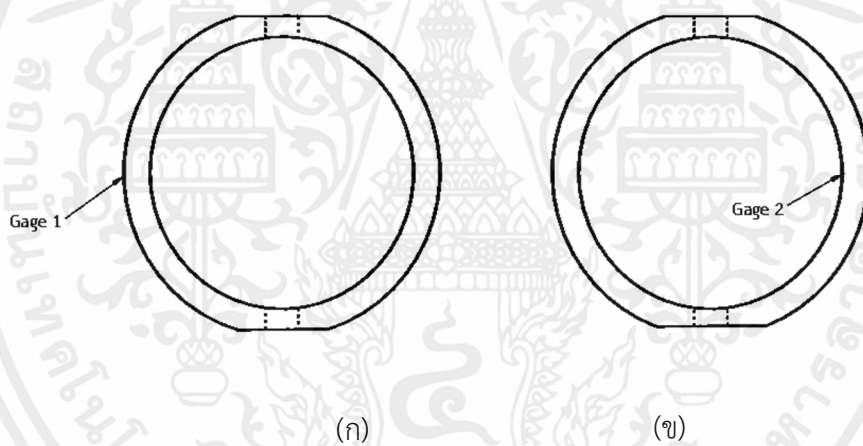
3.1.3.1 วัสดุและอุปกรณ์

1. วงแหวนอลูมิเนียม 7075
2. สเตรนเกจ KYOWA (รุ่น KFG-1-120-C1-23) มีค่า Gage resistance $120 \pm 0.4 \Omega$ และ Gage factor $2.09 \pm 1.0\%$
3. Strain gage instantaneous adhesive ยี่ห้อ KYOWA รุ่น CC-33A
4. SB tape (white Butyl rubber) ยี่ห้อ TML
5. Cellophane tape ยี่ห้อ 3M
6. Vernier Caliper ยี่ห้อ Mitutoyo Digimatic Caliper (รุ่น CD-8"ASX)
7. เทปพันสายไฟ 3M รุ่น 1710
8. นาฬิกาจับเวลา
9. กระดาษทราย เบอร์ 320, 400
10. Acetone
11. ผ้าก๊อซ ตรารถพยาบาล ขนาด 3"×3"

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.5 ตำแหน่งติดตั้งสเตรนเกจบนโหลดเซลล์ แบบ Full Wheatstone bridge



รูปที่ 3.6 ตำแหน่งติดตั้งสเตรนเกจบน Load cell แบบ Quarter Wheatstone bridge
(ก) Quarter Wheatstone bridge (out) (ข) Quarter Wheatstone bridge (in)

3.1.3.2 วิธีการติดตั้งสเตรนเกจ

1. ขัดวงแหวนอลูมิเนียมด้วยกระดาษทรายเบอร์ 320 และ 400 ตามลำดับ (รูปที่ 3.7)
2. เช็ดด้วย Acetone
3. ทำการมาร์คจุดด้วยเวอร์เนียไฮเกจลงบนชิ้นงานอลูมิเนียม ดังรูปที่ 3.5, 3.8 และรูปที่ 3.9
4. ติดตั้งสเตรนเกจเข้ากับ Cellophane tape ลงบนบริเวณที่มาร์ค

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.7 ชัดชิ้นงานต้นแบบสำหรับมาร์คจุดติดสเตรนเกจ



รูปที่ 3.8 มาร์คจุดชิ้นงานต้นแบบด้วยเวอร์เนียรีเอเกจ

5. ลอก Cellophane tape ออกเล็กน้อยเพื่อติดสเตรนเกจเข้ากับวงแหวนอลูมิเนียม โดยใช้ Strain gage instantaneous adhesive ในการติด
6. ใช้แรงกด 220 kPa บริเวณที่ติดสเตรนเกจ เป็นเวลา 90 วินาที
7. ลอก Cellophane tape ออกโดยระวังไม่ให้สเตรนเกจติดออกมาด้วย
8. ติด SB tape ลงบนสเตรนเกจ
9. ใช้เทปพันสายไฟพันรอบจุดที่ติด SB tape โดยลักษณะการติดตั้งสเตรนเกจ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

9.1 Full Wheatstone bridge ติดตั้งสเตรนเกจด้านนอกและด้านใน ทั้ง 4 จุด (รูปที่ 3.5)

9.2 Quarter Wheatstone bridge ติดตั้งสเตรนเกจจุดละ 1 ชิ้น (รูปที่ 3.6)



รูปที่ 3.9 ลักษณะจุดติดตั้งสเตรนเกจทั้งด้านในและด้านนอก

3.2 แผ่นวัดแรง

โครงสร้างของแผ่นวัดแรงประกอบด้วยโพลดเซลล์และแผ่นเพลต 2 แผ่น สำหรับจับยึดโพลดเซลล์เข้ากับแผ่นเพลตใช้ในการวัดแรงของรถฟอร์มูล่านักศึกษาขนาดหน้ากว้าง 26 cm

3.2.1 วัสดุและอุปกรณ์

1. เหล็กแผ่น หนา 12 mm ขนาด 300×300 mm²
2. โพลดเซลล์แบบวงแหวน
3. 12 VDC dual power supply (12V to 5V)
4. Amplifier รุ่น INA 128UA
5. Step Up Converter Module Adjustable Static Power Voltage Regulator
6. Step Down Converter Module Adjustable Static Power Voltage Regulator
7. Fuse 12 VDC
8. Connector plug 2 pin
9. Connector plug 5 pin
10. Connector plug 9 pin

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

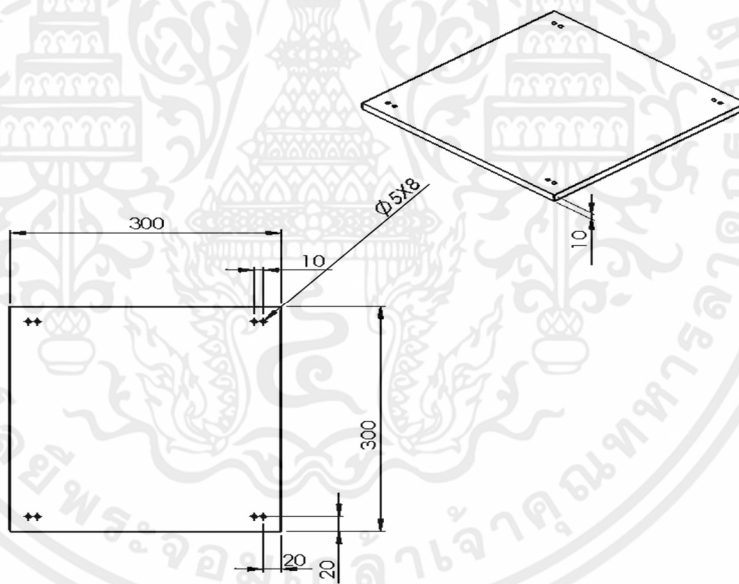
11. ตัวแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิทัล (NI USB-6001)

3.2.2 วิธีการสร้างแผ่นวัดแรงในแนวตั้ง

1. ตัดแผ่นเหล็กขนาดกว้าง 300 mm ยาว 300 mm (รูปที่ 3.10)
2. เจียรระไนราบแผ่นเพลต 1 mm ทั้ง 2 ด้าน (รูปที่ 3.11)
3. เจาะรูขนาด 5 mm จำนวน 8 รู เพื่อจับยึดแผ่นเพลตกับโพลดเซลล์
4. ติดตั้งเซ็นโพลดเซลล์และอุปกรณ์ (รูปที่ 3.14) ได้แก่

4.1 แผ่นวัดแรงที่ 1 (รูปที่ 3.12) จะติดตั้งโพลดเซลล์แบบ Full Wheatstone bridge โดยใช้สายสัญญาณของแต่ละโพลดเซลล์ต่อเข้ากับตัวแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิทัล (NI USB-6210) และสายภาคจ่ายไฟต่อเข้ากับ Dual power supply

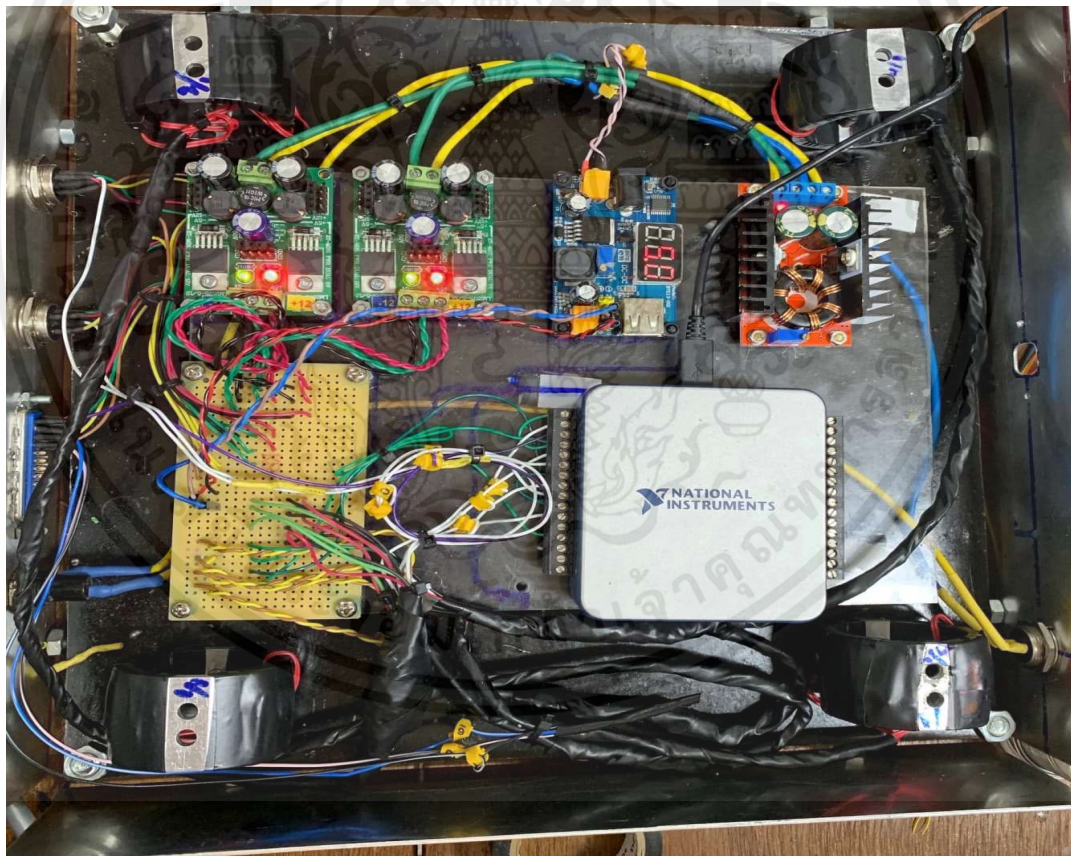
4.2 แผ่นวัดแรงที่ 2 (รูปที่ 3.13), 3, 4 จะติดตั้งโพลดเซลล์แบบ Quarter Wheatstone bridge โดยใช้ INA 128 amplifier เป็นภาคขยายสัญญาณและต่อสายสัญญาณและภาคจ่ายไฟเข้ากับ Connector plug



รูปที่ 3.10 แผ่นเพลตสำหรับยึดกับโพลดเซลล์

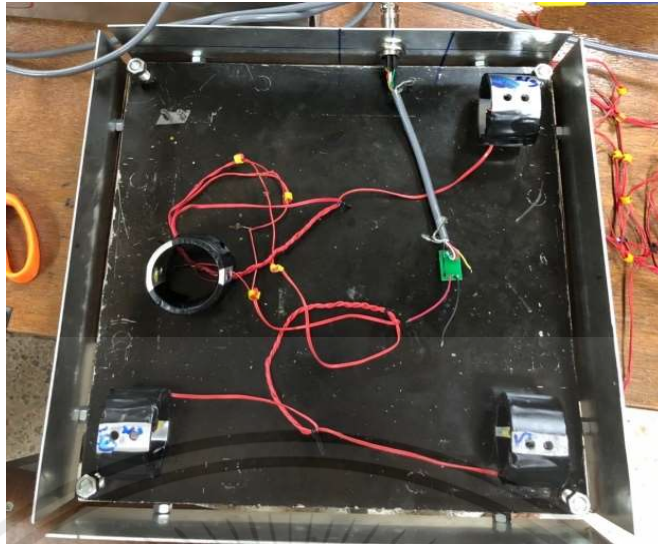


รูปที่ 3.11 การขึ้นรูปแผ่นเพลต

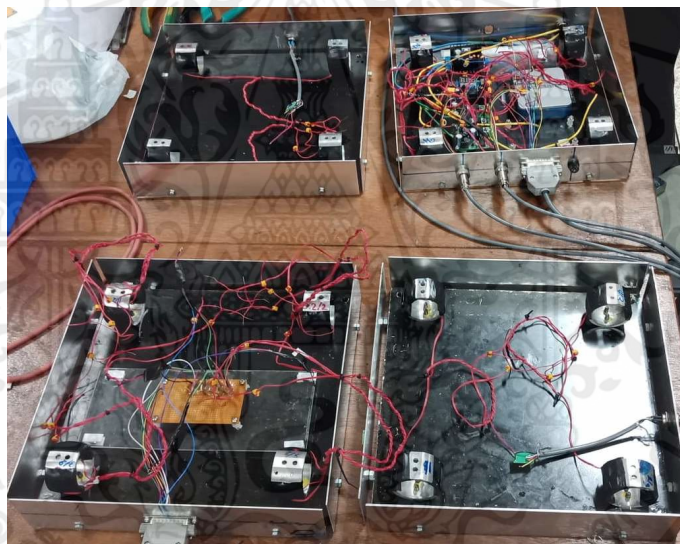


รูปที่ 3.12 โหลดเซลล์และอุปกรณ์ภายในแผ่นวัดแรงที่ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.13 โหลดเซลล์และอุปกรณ์ภายในแผ่นวัดแรงที่ 2



รูปที่ 3.14 โหลดเซลล์และอุปกรณ์ภายในแผ่นวัดแรงทั้ง 4 แผ่น

3.2.3 สอบเทียบโหลดเซลล์แบบวงแหวนทั้ง 3 แบบ

การสอบเทียบโหลดเซลล์จะใช้แรงกดในแนวตั้งกระทำต่อโหลดเซลล์ซึ่งทำการปรับเทียบกับโหลดเซลล์ทั้ง 3 แบบ (Full Wheatstone Bridge, Quarter Wheatstone bridge (in) และ Quarter Wheatstone bridge (out) (รูปที่ 3.15) ประมวลผลและบันทึกผลโดยใช้โปรแกรม LabVIEW และแสดงผลผ่านหน้าจอกอมพิวเตอร์ โดยเก็บค่าแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ย (Average Voltage) ในระยะเวลา 1 min หลังจากแรงที่ใช้ในการกดสมดุล

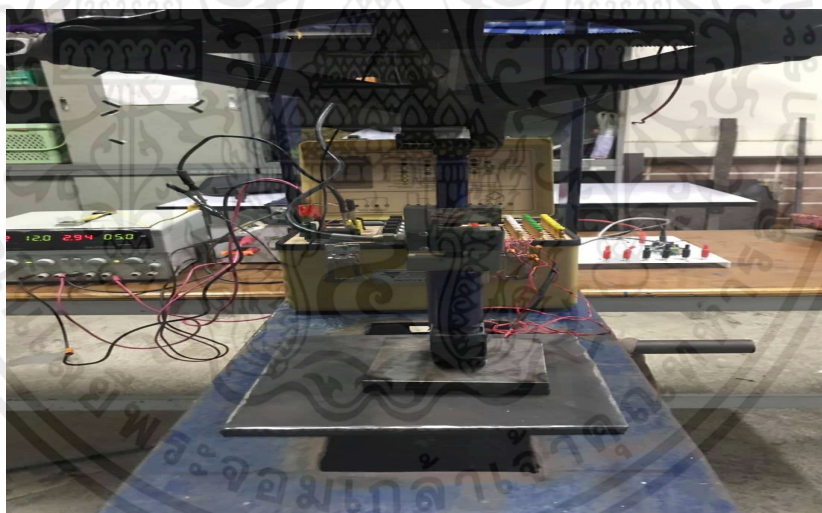
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.3.1 วัสดุและอุปกรณ์

1. แม่แรง (1100 kg)
2. โหลดเซลล์แบบ S ยี่ห้อ ZEGA beam Keed-300kg (พิกัดน้ำหนัก 300 kg, Total error $\pm 0.02\%$ F.S., Sensitivity 2.0 ± 0.003 mV/V)
3. แบตเตอรี่รถยนต์ GS รุ่น 46B24L-MF ขนาด 12V 45A
4. ตัวแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิทัล (NI USB-6001)
5. คอมพิวเตอร์
6. โปรแกรม LabVIEW 2014

3.2.3.2 ขั้นตอนการสอบเทียบโหลดเซลล์

1. ปรับแม่แรงให้ได้น้ำหนักในช่วง 0-30 kg โดยเพิ่มขึ้นทีละ 5 kg , ช่วง 30-90 kg โดยเพิ่มขึ้นทีละ 10 kg และ ช่วง 90-150 kg โดยเพิ่มขึ้นทีละ 20 kg และลดน้ำหนักลงในช่วงเดียวกันกับช่วงเพิ่ม
2. ทำการประมวลผลและบันทึกผ่าน LabVIEW ทำซ้ำกันสามครั้งทั้งสามแบบ ประมวลผลและเก็บค่าแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยในช่วงระยะเวลา 1 min หลังจากแรงที่ใช้ในการทดสอบ



รูปที่ 3.15 การสอบเทียบโหลดเซลล์แบบวงแหวน

3.2.4 สอบเทียบแผ่นวัดแรง

การสอบเทียบแผ่นวัดแรงกระทำที่จุดศูนย์กลาง(รูปที่ 3.17)โดยใช้แม่แรงให้แรงในแนวตั้ง และใช้โหลดเซลล์ในการอ่านค่าและแสดงผลผ่านหน้าจอคอมพิวเตอร์ (รูปที่ 3.16 (ก)-(ค)) ประมวลผลและบันทึกผลโดยใช้โปรแกรม LabVIEW โดยจะเก็บค่าแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยในระยะเวลา 1 min หลังจากแรงที่ใช้ในการทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.4.1 วัสดุและอุปกรณ์

1. แม่แรง (1100 Kg)
2. โหลดเซลล์แบบ S ยี่ห้อ ZEGA beam Keed-300kg (พิกัดน้ำหนัก 300 kg)

Total error $\pm 0.02\%$ F.S. Sensitivity 2.0 ± 0.003 mV/V)

3. แบตเตอรี่รถยนต์ GS รุ่น 46B24L-MF ขนาด 12V 45A
4. ตัวแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิทัล (NI- USB 6210)
5. ระดับน้ำ
6. คอมพิวเตอร์
7. โปรแกรม LabVIEW 2014

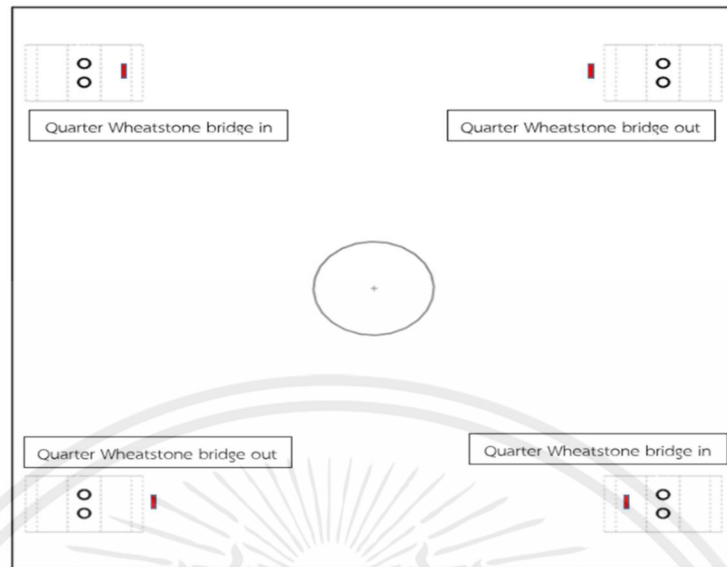
3.2.4.2 ขั้นตอนการสอบเทียบแผ่นวัดแรง

1. ตั้งระดับความสูงของแผ่นเพลตวัดแรงด้วยระดับน้ำ
2. ปรับแม่แรงให้ได้น้ำหนักในช่วง 0-30 kg โดยเพิ่มขึ้นทีละ 5 kg , ช่วง 30-90 kg โดยเพิ่มขึ้นทีละ 10 kg และ ช่วง 90-150 kg โดยเพิ่มขึ้นทีละ 20 kg และลดน้ำหนักลงในช่วงเดียวกันกับช่วงเพิ่ม
3. ประมวลผลและบันทึกผลด้วย LabVIEW ทำซ้ำกันสามครั้งทั้งสี่แผ่น และแสดงผลผ่านหน้าจอคอมพิวเตอร์ เก็บค่าแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยในระยะเวลา 1 min หลังจากแรงที่ใช้ในการกดเข้าสู่สมดุล



(ก)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



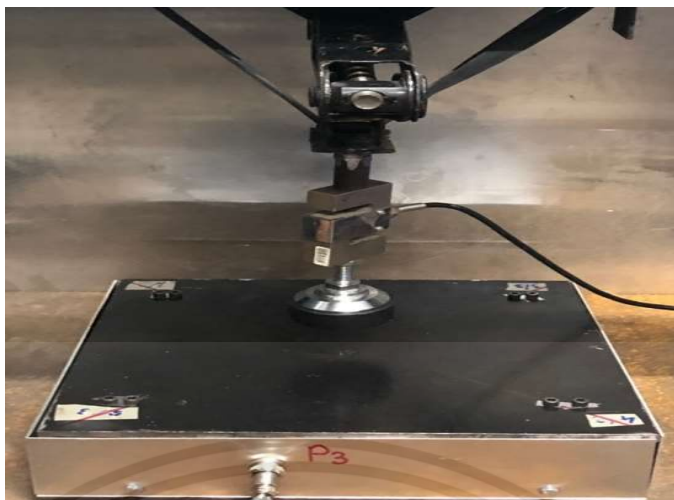
(ข)



(ค)

รูปที่ 3.16 แผนผังตำแหน่งการสอบเทียบแผ่นวัดแรง (ก) ตำแหน่งติดตั้งแบบ Full WheatStone Bridge ทั้ง 4 ตัว (ข) ตำแหน่งติดตั้งแบบ Cross quarter Wheatstone bridge (in) และ Cross quarter Wheatstone bridge (out) (แบบไขว้กัน)
 (ค) ตำแหน่งติดตั้งแบบ Parallel quarter Wheatstone bridge (in) และ Parallel quarter Wheatstone bridge (out) (แบบขนานกัน)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.17 การสอบเทียบ Force platform จุดศูนย์กลาง

3.3 การปรับสมดุลรถ

เนื่องจากสมดุลของรถมีผลต่อเข้าโค้งของรถฟอร์มูล่านักศึกษา การตั้งศูนย์ของรถหรือการปรับน้ำหนักล้อของรถทั้งสองให้เท่ากัน จะสามารถเข้าโค้งได้ดีขึ้นและควบคุมทิศทางของรถได้ง่ายขึ้น

3.3.1 วัสดุและอุปกรณ์

1. รถฟอร์มูล่านักศึกษา (รูปที่ 3.18 (ก))
2. ชุดแผ่นวัดแรงพร้อมตัวแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิทัล
3. คอมพิวเตอร์
4. โปรแกรม LabVIEW 2014
5. เครื่องตั้งระดับเลเซอร์ ยี่ห้อ EUROX รุ่น Fireball PL-V5
6. แบตเตอรี่รถยนต์ GS รุ่น 46B24L-MF ขนาด 12V 45A
7. รถยกยี่ห้อ Ermy รุ่น SFH1016 พิกัดน้ำหนัก 1000 kg

3.3.2 ขั้นตอนการทดลอง

1. ติดตั้งชุดแผ่นวัดแรงพร้อมตัวแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิทัลและปรับตั้งระนาบความสูงของแผ่นเพลตให้เท่ากันด้วยเครื่องตั้งระดับเลเซอร์ (รูปที่ 3.18 (ข) และ (ค))
2. ใช้รถยกยกรถฟอร์มูล่าให้อยู่เหนือแผ่นวัดแรงทั้งสองแผ่นและตั้งล้อให้ตรงกับจุดศูนย์กลางของแผ่นเพลต (รูปที่ 3.18 (ง))
3. เปิดโปรแกรม LabVIEW รอให้ค่าแรงดันไฟเฉลี่ยเข้าสู่สมดุล
4. ยกรถฟอร์มูล่าลง เพื่อวัดน้ำหนักของรถและบันทึกผล
5. วิเคราะห์ผลการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)



(ข)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ค)



(ง)

รูปที่ 3.18 การปรับสมดุลรถ (ก) รูปด้านข้างการปรับสมดุลรถฟอร์มูล่ากับแผ่นวัดแรง

(ข) รูปด้านหลังการปรับสมดุลรถฟอร์มูล่ากับแผ่นวัดแรง (ค) การตั้งความสูงล้อด้วยเลเซอร์

(ง) ยกรถฟอร์มูล่าด้วยรถยก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.3 ขั้นตอนการทดลอง

1. ติดตั้งชุดแผ่นวัดแรงพร้อมตัวแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิทัลและปรับตั้งระนาบความสูงของแผ่นเพลตให้เท่ากันด้วยเครื่องตั้งระดับเลเซอร์ (รูปที่ 3.18 (ข)และ(ค))
2. ใช้รถยกยกฟอร์มูล่าให้อยู่เหนือแผ่นวัดแรงทั้งสี่แผ่นและตั้งล้อให้ตรงกับจุดศูนย์กลางของแผ่นเพลต (รูปที่ 3.18 (ง))
3. เปิดโปรแกรม LabVIEW รอให้ค่าแรงดันไฟเฉลี่ยเข้าสู่สมดุล
4. ยกรถฟอร์มูล่าลง เพื่อวัดน้ำหนักของรถและบันทึกผล
5. วิเคราะห์ผลการทดลอง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

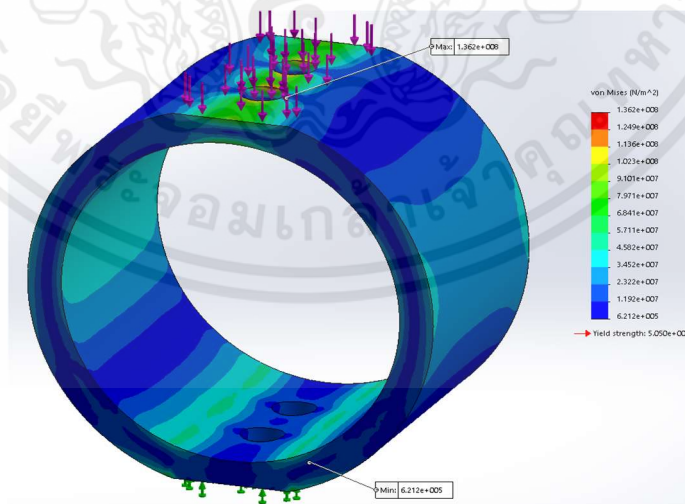
บทที่ 4

ผลและวิจารณ์ผล

ในบทนี้แสดงผลการเปรียบเทียบลักษณะการตีสเตรนเกจ การเปรียบเทียบตำแหน่งในการวางโหนดเซลล์แบบวงแหวน และการเปรียบเทียบน้ำหนักที่แผ่นวัดแรงสามารถอ่านค่าได้ระหว่างการใช้โหนดเซลล์แบบ Full Wheatstone bridge และ Quarter Wheatstone bridge เพื่อหาแบบการใช้งานแผ่นวัดแรงที่มีเหมาะสมกับการใช้ตั้งศูนย์ล้อรถฟอร์มูล่านักศึกษา

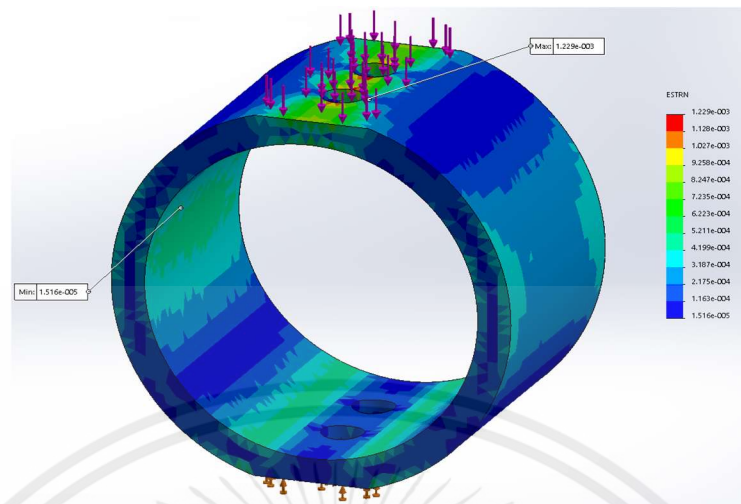
4.1 การออกแบบโหนดเซลล์วงแหวน

การออกแบบโหนดเซลล์ลักษณะวงแหวนทำจากอลูมิเนียม 7075 จากการศึกษาวิจัยของ Mourão et al. [7] พบว่าอลูมิเนียมเป็นวัสดุที่เหมาะสมใช้สร้างเครื่องมือวัดเพื่อใช้รับน้ำหนักช่วง 70-150 kg โดยอลูมิเนียม 7075 มีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นอยู่ที่ 7.2×10^{10} N/m² จากรูปที่ 4.1 (ก) ความเค้นของโหนดเซลล์มีค่าความเค้นสูงสุดอยู่ที่ 1.36×10^8 N/m² และต่ำสุดที่ 6.21×10^5 N/m² และจากรูปที่ 4.1 (ข) ความเครียดของโหนดเซลล์มีค่าความเครียดสูงสุดที่ 1.23×10^{-3} mm/mm และต่ำสุดที่ 1.52×10^{-5} mm/mm เพื่อหาตำแหน่งในการติดตั้งสเตรนเกจและขนาดของวงแหวนอลูมิเนียมที่เหมาะสม พบว่าขนาดที่เหมาะสมคือขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางวงในและวงนอกเป็น 40 mm และ 48 mm ตามลำดับ ส่วนความยาวที่เหมาะสมของชิ้นวงแหวนคือ 30 mm ซึ่งจะทำให้ติดตั้งสเตรนเกจบริเวณกลางชิ้นวงแหวนได้อย่างสะดวก



(ก)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ข)

รูปที่ 4.1 (ก) ค่าความเค้นโดยระเบียบวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ของโหนดเซลล์
(ข) ค่าความเครียดโดยระเบียบวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ของโหนดเซลล์

4.2 การเปรียบเทียบวิธีติดตั้งสเตรนเกจ

จากการสอบเทียบแรงตามแนวตั้งจากโหนดเซลล์แบบวงแหวนที่มีการติดตั้งสเตรนเกจแบบ Full Wheatstone bridge ทั้งแบบวงแหวนเดี่ยวและวงแหวนรวม รวมถึงแบบ Quarter Wheatstone bridge (in) และ (out) ที่น้ำหนักกด 150 kg ได้ผลดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ผลการสอบเทียบน้ำหนักโหนดเซลล์มาตรฐานกับโหนดเซลล์ที่ติดตั้งสเตรนเกจแบบต่าง ๆ

Input load (kg)	Single-full Wheatstone bridge (kg)	Four-full Wheatstone bridge (kg)	Quarter Wheatstone bridge (in) (kg)	Quarter Wheatstone bridge (out) (kg)
0	0 ^{ns} (0)	0 ^{ns} (0)	0 ^{ns} (0)	0 ^{ns} (0)
5	11.352 ^b (0.149)	6.668 ^a (2.430)	4.774 ^a (0.062)	4.649 ^a (0.274)
10	22.719 ^b (0.176)	11.698 ^a (2.554)	9.834 ^a (0.105)	9.744 ^a (0.346)
15	34.128 ^b (0.597)	16.459 ^a (2.798)	14.823 ^a (0.111)	14.745 ^a (0.415)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 (ต่อ)

Input load (kg)	Single-full Wheatstone bridge (kg)	Four-full Wheatstone bridge (kg)	Quarter Wheatstone bridge (in) (kg)	Quarter Wheatstone bridge (out) (kg)
20	45.880 ^b (0.249)	21.826 ^a (2.879)	19.626 ^a (0.101)	19.682 ^a (0.584)
25	56.958 ^b (0.346)	26.254 ^a (2.628)	24.518 ^a (0.082)	24.992 ^a (0.699)
30	68.713 ^b (0.438)	31.690 ^a (2.321)	29.399 ^a (0.152)	29.889 ^a (0.559)
40	91.165 ^c (0.315)	43.070 ^b (2.885)	39.291 ^a (0.350)	40.123 ^{ab} (0.723)
50	99.983 ^b (0.198)	51.612 ^a (2.527)	48.950 ^a (0.191)	50.249 ^a (0.760)
60	99.946 ^b (0.176)	61.467 ^a (2.150)	58.381 ^a (0.806)	60.447 ^a (0.676)
70	99.457 ^c (0.529)	72.144 ^b (3.176)	68.834 ^a (0.609)	70.618 ^{ab} (0.785)
80	99.886 ^b (0.147)	81.492 ^a (2.244)	78.842 ^a (0.871)	81.338 ^a (1.370)
90	99.435 ^b (0.764)	91.963 ^a (3.286)	88.710 ^a (1.028)	91.010 ^a (0.830)
110	99.886 ^a (0.214)	111.873 ^c (2.842)	108.575 ^b (1.683)	110.766 ^{bc} (1.01)
130	99.833 ^a (0.225)	132.122 ^b (3.611)	129.935 ^b (1.672)	129.803 ^b (0.60)
150	99.777 ^a (0.234)	151.586 ^c (2.773)	147.757 ^b (2.849)	149.195 ^{bc} (0.61)

*หมายเหตุ ns คือ ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P > 0.05$)

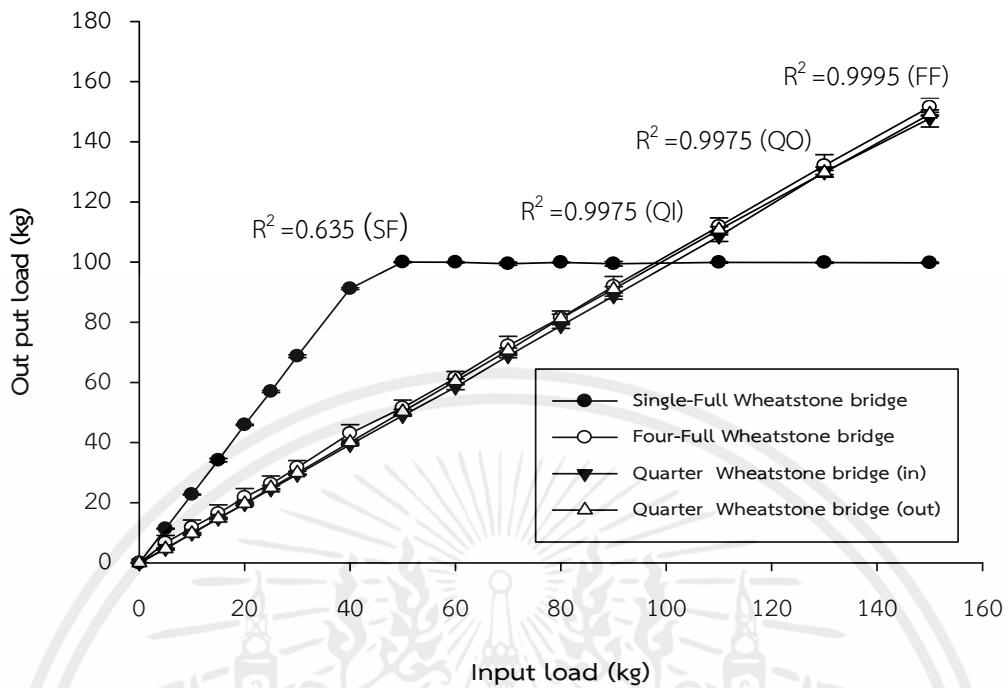
a,b สัญลักษณ์ต่างในแนวนอนเดียวกันมีความแตกต่างทางสถิติ ($P \leq 0.05$)

จากตารางที่ 4.1 ที่สภาวะเริ่มต้นซึ่งไม่มีโหลดใดๆ กระทำต่อโหลดเซลล์จะไม่มี ความแตกต่าง เกิดขึ้น เมื่อเริ่มให้ที่น้ำหนัก 5, 10, 15, 20, 25, 30 kg จะมีการแสดงผลทางสถิติคล้ายกันคือ โหลดเซลล์แบบวงแหวนที่ติดตั้งสเตรนเกจ Full Wheatstone bridge กรณีติดตั้งแบบวงเดียวจะค่า มากที่สุด ส่วนแบบ Quarter Wheatstone bridge (in) และ (out) จะมีค่าน้อยกว่าน้ำหนักที่วัดได้ จาก Full Wheatstone bridge กรณีติดตั้งแบบหลายวง ช่วงน้ำหนัก 40 kg พบว่าค่าน้อยสุดอยู่ที่ Quarter Wheatstone bridge (in) โดยมีค่า 39.291 kg Quarter Wheatstone bridge (out) มีค่า 40.123 kg และ Full Wheatstone bridge รวมวัดค่าได้ 43.070 kg ในขณะที่ Full Wheatstone bridge กรณีติดตั้งแบบวงเดียวกลับมีค่าสูงถึง 91.165 kg ที่น้ำหนักกด 50 และ 60 kg ผลที่วัดได้ของ Quarter Wheatstone bridge ทั้งสองแบบ และ Full Wheatstone bridge กรณี ติดตั้งแบบหลายวงมีค่าที่ใกล้เคียงกัน ซึ่งค่าเหล่านี้มีน้อยกว่า Full Wheatstone bridge กรณีติดตั้ง แบบวงเดียว ที่น้ำหนัก 70 kg Quarter Wheatstone bridge (in) จะมีค่าน้อยที่สุดอยู่ที่ 68.834 kg ส่วน Full Wheatstone bridge กรณีติดตั้งแบบหลายวงจะมีค่า 72.144 kg ซึ่งมากกว่า Quarter

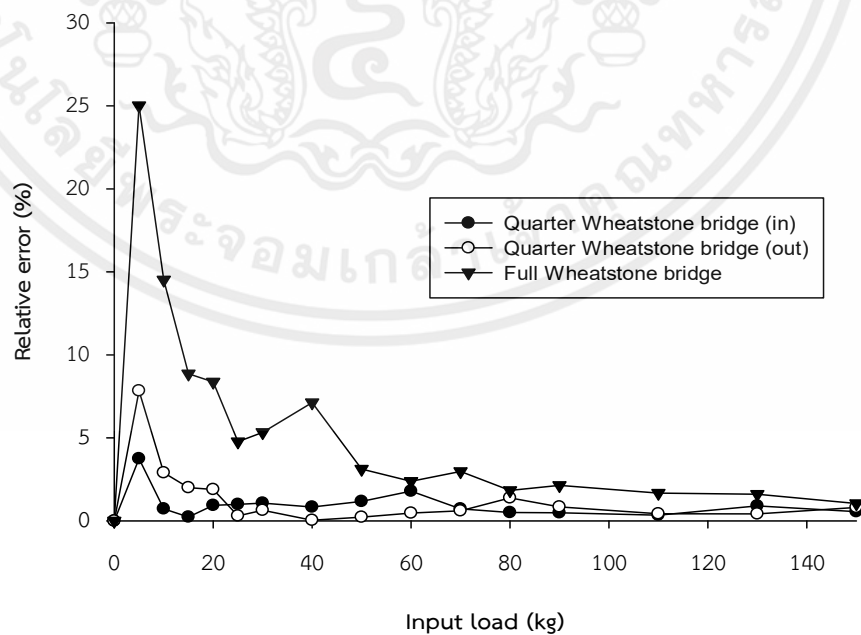
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Wheatstone bridge (out) ที่วัดค่าได้ 70.618 kg ส่วน Full Wheatstone bridge กรณีติดตั้งแบบวงเดียวจะมีค่ามากที่สุดคือ 99.457 kg เมื่อป้อนน้ำหนัก 80 และ 90 kg ค่าที่แสดงจาก Full Wheatstone bridge กรณีติดตั้งแบบหลายวงและ Quarter Wheatstone bridge ทั้ง in และ out จะมีค่าน้อยกว่า Full Wheatstone bridge กรณีติดตั้งแบบวงเดียว อย่างไรก็ตามจะพบความแตกต่างที่น้ำหนักกตมีค่ามากกว่า 100 kg โดยเมื่อให้น้ำหนักที่ 110 kg ค่าที่น้อยสุดพบที่ Full Wheatstone bridge กรณีติดตั้งแบบวงเดียว ส่วน Quarter Wheatstone bridge (in) จะมีค่าน้อยกว่า Quarter Wheatstone bridge (out) ในขณะที่ Full Wheatstone bridge กรณีติดตั้งแบบหลายวงจะมีค่ามากที่สุด เมื่อพิจารณาที่น้ำหนักกต 130 kg จะพบว่าแนวโน้มของ Full Wheatstone bridge กรณีติดตั้งแบบวงเดียวมีค่าสูงสุดไม่เกิน 100 kg แต่โหลดเซลล์แบบอื่นสามารถวัดค่าได้ใกล้เคียงสอดคล้องโหลดเซลล์มาตรฐานที่ 129.803-132.122 kg และที่น้ำหนักกต 150 kg จะพบว่าแนวโน้มของโหลดเซลล์ทั้ง 4 แบบ มีค่าไปในทิศทางเดียวกันที่น้ำหนักกต 130 kg ดังนั้นจากตารางที่ 4.1 จึงสรุปได้ว่าโหลดเซลล์ที่ติดตั้งสเตรนเกจแบบ Full Wheatstone bridge กรณีติดตั้งแบบวงเดียวไม่สามารถอ่านค่าน้ำหนักที่ใช้ในการสอบเทียบได้ถูกต้องโดยในช่วง 0-50 kg จะอ่านค่าออกมาเกินจากค่ามาตรฐาน 2 เท่า และในช่วงน้ำหนักมาตรฐานมากกว่า 50 kg โหลดเซลล์จะอ่านค่าสูงสุดได้ประมาณ 100 kg เมื่อนำข้อมูลมาสร้างกราฟดังรูปที่ 4.2 จะพบว่าค่า R^2 ของโหลดเซลล์ชนิดนี้มีค่าเพียง 0.635 ซึ่งมีค่า R^2 ที่น้อยเมื่อเทียบกับรูปแบบการติดตั้งสเตรนเกจแบบอื่นๆ

จากรูปที่ 4.2 ค่าความผิดพลาดของ Full Wheatstone bridge กรณีติดตั้งแบบวงเดียวอาจเกิดจากการขึ้นรูปของชิ้นงาน หรือการติดตั้งสเตรนเกจบนโหลดเซลล์ทำให้ค่าที่อ่านได้ไม่สอดคล้องกับน้ำหนักที่กดลงบนชิ้นงาน ส่วนการติดตั้งสเตรนเกจบนโหลดเซลล์แบบ Quarter Wheatstone bridge (in และ out) สามารถอ่านค่าได้อย่างเหมาะสมโดยทั้ง 2 แบบมีค่า $R^2=0.9975$ เท่ากัน แต่จากการสอบเทียบหากนำโหลดเซลล์ชนิด Full Wheatstone bridge กรณีติดตั้งแบบวงเดียวมาต่อเข้ากับโหลดเซลล์ชนิดเดียวกันเป็นกรณีติดตั้งแบบหลายวง ค่าที่วัดได้จะมีความแม่นยำมากกว่า ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Zhang et al. [6] ที่อธิบายผลการทดสอบการติดตั้งโหลดเซลล์หลายตัวบนแผ่นวัดแรง พบว่าการใช้งานโหลดเซลล์หลายตัวให้ค่าความแม่นยำมากกว่าการใช้สเตรนเกจแบบเดียว



รูปที่ 4.2 การเปรียบเทียบน้ำหนักของโหนดเซลล์กรณิตั้งแบบวงเดียวและใช้ร่วมกัน 4 ตัวของ Full Wheatstone bridge และน้ำหนักของโหนดเซลล์แบบ Quarter Wheatstone bridge (in และ out)



รูปที่ 4.3 ผลการสอบเทียบค่าเปอร์เซ็นต์คลาดเคลื่อนเฉพาะจุดของโหนดเซลล์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.2 พบว่าเมื่อโหลดเซลล์เป็น Full Wheatstone bridge กรณีติดตั้งแบบหลายวง จะมีความเป็นเชิงเส้นสูงกว่ากรณีติดตั้งแบบวงเดียวคือ $R^2=0.9995$ ซึ่งใกล้เคียง 1 แต่เมื่อเปรียบเทียบกับรูปแบบการติดตั้งสเตรนเกจ Quarter Wheatstone bridge จะพบว่ามีความแม่นยำในการอ่านค่าน้ำหนักยิ่งน้อยกว่าแบบ Quarter Wheatstone bridge ที่แสดงค่าความเป็นเชิงเส้น $R^2=0.9975$

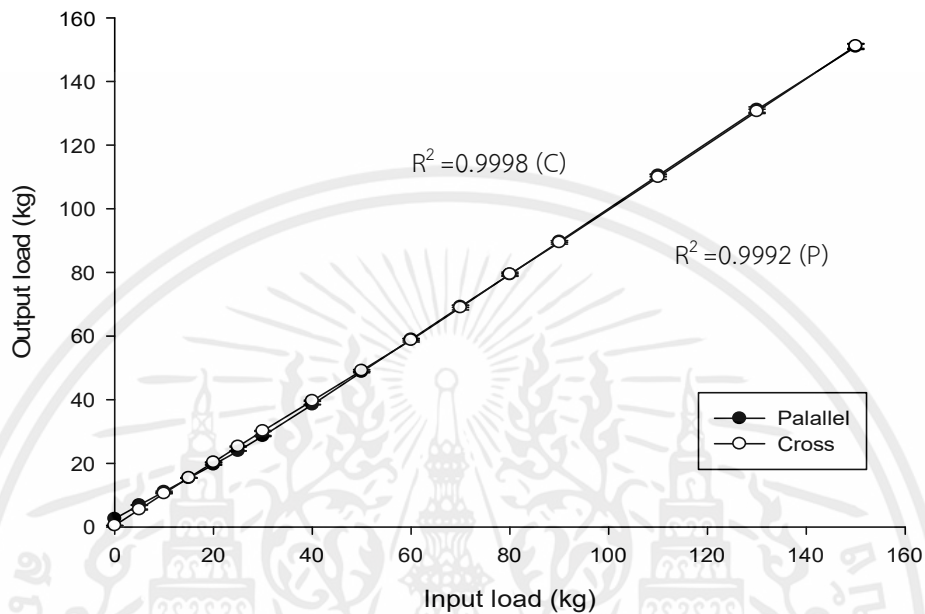
จากการเปรียบเทียบการติดตั้งสเตรนเกจแบบต่างๆ จากตารางที่ 4.1 พบว่าการติดตั้งโหลดเซลล์วงแหวนกรณีติดตั้งแบบหลายวง และ Quarter Wheatstone bridge มีความเหมาะสมกับการใช้งาน ด้วยเหตุนี้การติดตั้งกรณีติดตั้งแบบวงเดียวของ Full Wheatstone bridge จะไม่นำมากล่าวถึงในรูปที่ 4.3 และพบว่ารูปแบบการติดตั้งสเตรนเกจแบบ Quarter Wheatstone bridge เพียงตัวเดียวสามารถใช้แทนการติดตั้ง Full Wheatstone bridge กรณีติดตั้งแบบหลายวงที่ใช้ทรัพยากรมากกว่าได้และยังมีความเสถียรภาพมากกว่าโดยค่า Relative error ของ Full Wheatstone bridge มีค่าสูงสุดที่ 25% ในช่วงน้ำหนัก 5 kg โดยจะค่อยๆ ลดลงและคงที่ในช่วงน้ำหนักกดที่มีค่ามากกว่า 20 kg ขึ้นไป ในขณะที่ Quarter Wheatstone bridge (out) มีค่า Relative error สูงสุดที่ 7.83% ที่น้ำหนักกด 5 kg และเริ่มคงที่ในช่วง 20 kg ขึ้นไปเช่นเดียวกัน Quarter Wheatstone bridge (in) ที่มีค่า Relative error สูงสุดที่ 3.7% ที่ 5 kg แต่เริ่มคงที่ในช่วงน้ำหนักกดตั้งแต่ 10 kg เป็นต้นไป ซึ่งโดยภาพรวมการใช้โหลดเซลล์ที่มีการติดตั้งสเตรนเกจแบบ Full Wheatstone bridge ไม่เหมาะกับการใช้แบบเดี่ยวแต่ควรใช้ร่วมกัน 4 ตัวเพื่อสร้างแผ่นวัดแรง

4.3 การเปรียบเทียบลักษณะการวางโหลดเซลล์แบบวงแหวนชนิด Quarter Wheatstone bridge

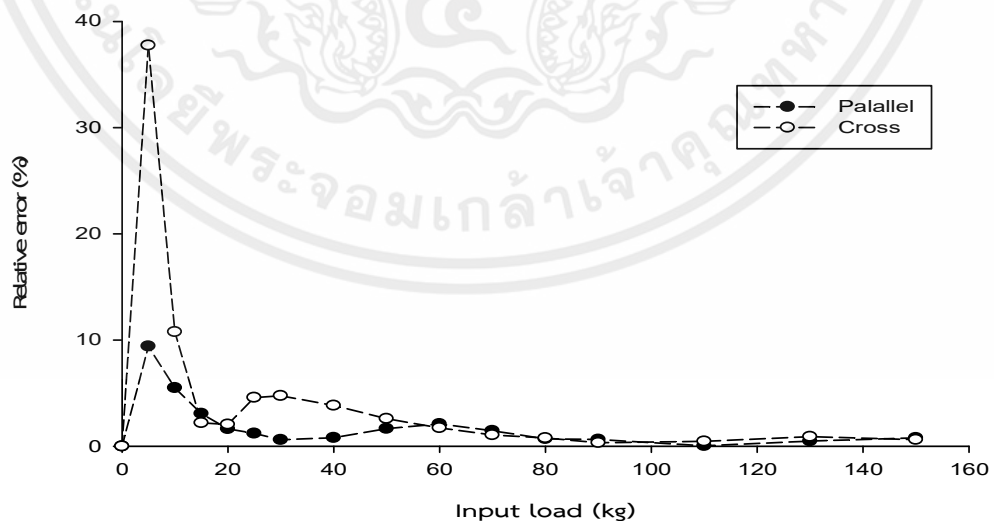
การสอบเทียบการวางโหลดเซลล์ 2 แบบ ได้แก่ การวางโหลดเซลล์แบบ Cross quarter Wheatstone bridge (แบบไขว้กัน) ดังรูปที่ 3.16 (ข) และการวางโหลดเซลล์แบบ Parallel quarter Wheatstone bridge (แบบขนานกัน) ดังรูปที่ 3.16 (ค) เพื่อหารูปแบบในการวางที่เหมาะสมของการติดตั้งสเตรนเกจแบบ Quarter Wheatstone bridge ในแผ่นวัดแรงโดยในการสอบเทียบมีการเก็บผลโดยให้โหลดกระทำกับโหลดเซลล์แบบวงแหวนครั้งละ 5 kg, 10 kg, 30 kg ตั้งแต่ 0-30 kg, 30-90 kg, 90-150 kg ตามลำดับ

พบว่าการวางโหลดเซลล์แบบ Cross quarter Wheatstone bridge กราฟมีความเป็นเชิงเส้นโดยที่ค่า $R^2=0.9998$ ซึ่งมากกว่าแบบ Parallel quarter Wheatstone bridge ที่มีค่า $R^2=0.9992$ (รูปที่ 4.4) การวางโหลดเซลล์แบบไขว้กันมีความเหมาะสมกับการนำไปใช้งานมากกว่า แต่จากการพิจารณาค่า Relative error (รูปที่ 4.5) พบว่าการวางโหลดเซลล์วงแหวนแบบไขว้กันมีค่า Relative error สูงมากถึง 37% ในช่วง 5 kg และจะลดลงและคงที่ใกล้เคียงกันช่วง 60-150 kg ในขณะที่การวางโหลดเซลล์วงแหวนแบบขนานจะมีค่าเปอร์เซ็นต์คลาดเคลื่อนเฉพาะจุดสูงสุด 10% ที่น้ำหนัก 5 kg และค่อนข้างคงที่ช่วง 20-150 kg ซึ่งพบว่าแนวโน้มการวางโหลดเซลล์วงแหวนแบบขนานจะมี

ความแม่นยำมากกว่าแบบไขว้ อย่างไรก็ตามการใช้งานแผ่นวัดแรงเพื่อตั้งศูนย์ล้อรถ พอร์มูล่า นักศึกษานั้นจะต้องใช้งานที่ 60-80 kg ดังนั้น Cross quarter Wheatstone bridge จึงมีความเหมาะสมกว่าเนื่องจากค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยน้อยกว่าคิดเป็น 0.374%



รูปที่ 4.4 การเปรียบเทียบผลน้ำหนักที่อ่านได้จากการวางโหลดเซลล์แบบ Quarter Wheatstone bridge ทั้งแบบวางขนานและวางไขว้

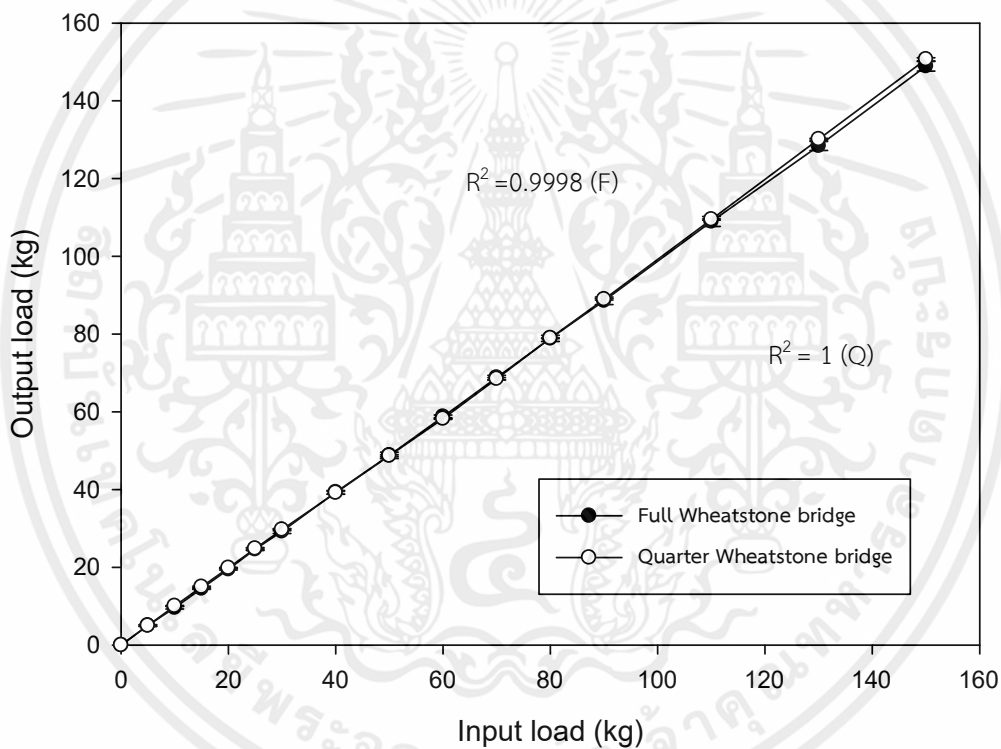


รูปที่ 4.5 การเปรียบเทียบค่าเปอร์เซ็นต์คลาดเคลื่อนเฉพาะจุดของการวางโหลดเซลล์แบบ Quarter Wheatstone bridge ทั้งแบบวางขนานและวางไขว้

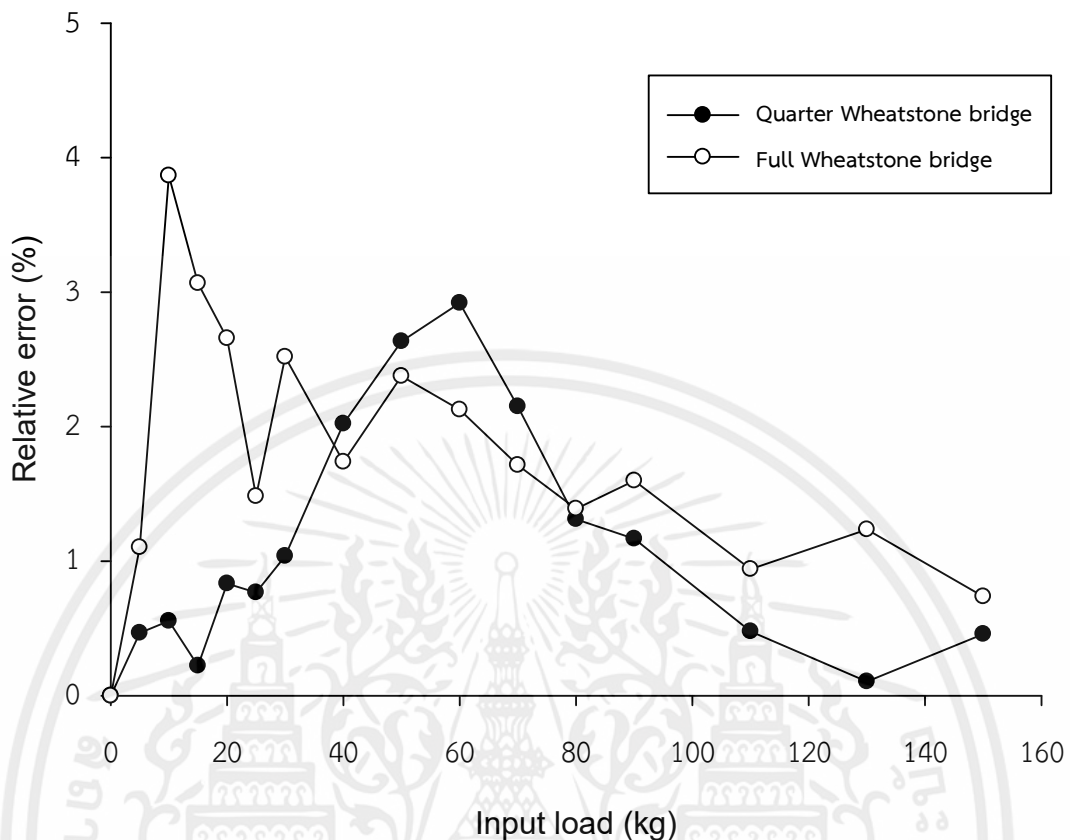
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4 การเปรียบเทียบแผ่นวัดแรงที่ติดตั้งโหลดเซลล์แบบ Quarter Wheatstone bridge และ Full Wheatstone bridge

จากการเปรียบเทียบน้ำหนักที่แผ่นวัดแรงอ่านค่าได้ทั้ง 2 แบบ ได้แก่ Quarter Wheatstone bridge และ Full Wheatstone bridge โดยในการสอบเทียบมีการเก็บผลโดยให้โหลดกระทำกับโหลดเซลล์แบบวงแหวนครึ่งละ 5 kg, 10 kg, 30 kg ตั้งแต่ 0-30 kg, 30-90 kg, 90-150 kg ตามลำดับ เพื่อเปรียบเทียบการทำงานของแผ่นวัดแรงแบบ Quarter Wheatstone bridge พบว่าการติดตั้งโหลดเซลล์ทั้ง 2 แบบสามารถอ่านค่าได้ใกล้เคียงกับน้ำหนักมาตรฐานที่ใช้จริง และยังพบว่าแผ่นวัดแรงเหมาะกับการติดตั้งโหลดเซลล์แบบ Quarter Wheatstone bridge มากกว่าเพราะมีค่า $R^2=1$ ซึ่งมีความเหมาะสมกว่าแบบ Full Wheatstone bridge ที่มีค่า $R^2=0.9998$ ดังรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 การเปรียบเทียบแผ่นวัดแรงที่ติดตั้งโหลดเซลล์แบบ Quarter Wheatstone bridge และ Full Wheatstone bridge



รูปที่ 4.7 การเปรียบเทียบค่าเปอร์เซ็นต์คลาดเคลื่อนเฉพาะจุดของแผ่นวัดแรงที่ติดตั้งโหลดเซลล์แบบ Full Wheatstone bridge และ Quarter Wheatstone bridge

จากรูปที่ 4.7 พบว่ารูปแบบการติดตั้งโหลดเซลล์แบบ Full Wheatstone bridge เหมาะสมกว่าแบบ Quarter Wheatstone bridge โดยพิจารณาจากจุดที่มีค่าเปอร์เซ็นต์คลาดเคลื่อนเฉพาะจุดสูงสุดบนแผ่นวัดแรงที่ติดตั้งโหลดเซลล์แบบ Full Wheatstone bridge มีค่าเปอร์เซ็นต์คลาดเคลื่อนเฉพาะจุดมากที่สุดอยู่ที่ 3.86% ที่น้ำหนักกด 10 kg และเริ่มลดลงอย่างคงที่ช่วง 50-110 kg โดยมีค่า Relative error ในช่วง 60-80 kg ประมาณ 1.74% ส่วนแผ่นวัดแรงที่ติดตั้งโหลดเซลล์แบบ Quarter Wheatstone bridge มีค่า Relative error สูงสุดที่น้ำหนัก 60 kg คิดเป็น 2.91% จากนั้นจะลดลงและคงที่ โดยมีค่า Relative error เฉลี่ยอยู่ในช่วง 60-80 kg ที่ 2.12% เนื่องจากการตั้งศูนย์ล้อฟอร์มูล่านักศึกษาอยู่ในช่วง 60-80 kg จึงต้องพิจารณาหาค่าที่เหมาะสมของแผ่นวัดแรงแต่ละแบบดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ผลการสอบเทียบแผ่นวัดแรงชนิดต่างๆ

Input load (kg)	Front left wheel (kg)	Front right wheel (kg)	Rear left wheel (kg)	Rear right wheel (kg)
0	0 ^{ns} (0)	0 ^{ns} (0)	0 ^{ns} (0)	0 ^{ns} (0)
5	3.956 ^a (0.444)	5.016 ^b (0.342)	5.219 ^b (0.354)	4.692 ^{ab} (0.768)
10	8.578 ^a (0.447)	10.062 ^{bc} (0.12)	10.459 ^c (0.494)	9.289 ^{ab} (0.661)
15	13.538 ^a (0.241)	15.000 ^b (0.09)	15.340 ^b (0.233)	14.649 ^b (0.090)
20	18.507 ^a (0.064)	19.943 ^b (0.19)	20.236 ^b (0.308)	19.618 ^b (0.158)
25	23.565 ^a (0.226)	25.408 ^b (0.44)	25.587 ^b (0.389)	24.820 ^b (0.260)
30	28.544 ^a (0.514)	30.495 ^c (0.61)	30.726 ^c (0.344)	29.465 ^b (0.347)
40	38.593 ^a (0.290)	40.468 ^c (0.60)	40.680 ^c (0.182)	39.602 ^b (0.229)
50	48.626 ^a (0.480)	50.275 ^b (0.69)	50.743 ^b (0.590)	49.175 ^a (0.468)
60	58.864 ^a (0.309)	60.407 ^b (0.42)	60.586 ^b (0.660)	59.165 ^a (0.209)
70	68.666 ^a (0.372)	70.476 ^b (0.229)	70.710 ^b (0.478)	69.318 ^a (0.246)
80	78.897 ^a (0.483)	80.346 ^b (0.239)	80.439 ^b (0.295)	79.482 ^a (0.268)
90	88.737 ^a (0.088)	90.672 ^b (0.292)	90.468 ^b (0.295)	89.228 ^a (0.347)
110	108.990 ^a (0.423)	110.444 ^b (0.650)	110.250 ^b (0.209)	109.786 ^{ab} (0.52)
130	129.058 ^a (0.396)	130.349 ^b (0.535)	130.516 ^b (0.236)	129.364 ^a (0.213)
150	149.001 ^a (0.231)	149.275 ^{ab} (0.42)	150.109 ^b (0.686)	150.020 ^b (0.405)

*หมายเหตุ ns คือ ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P > 0.05$)

a,b สัญลักษณ์ต่างในแนวนอนเดียวกันมีความแตกต่างทางสถิติ ($P \leq 0.05$)

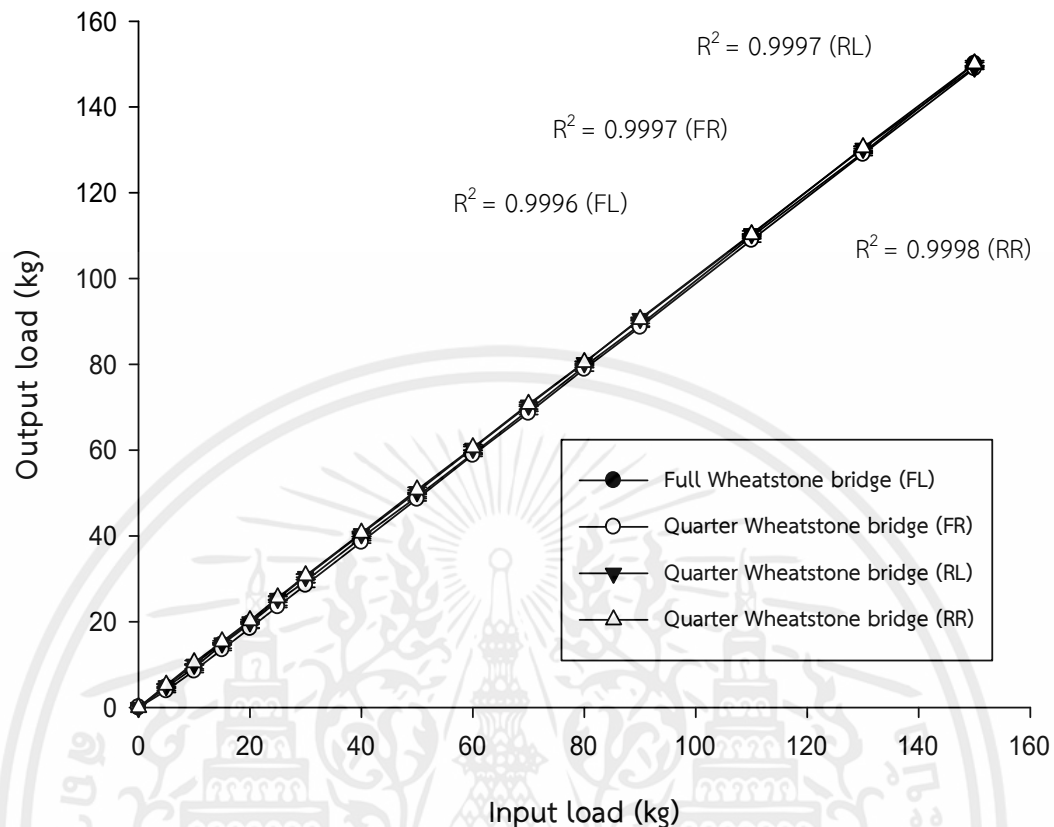
จากตารางที่ 4.2 เป็นผลการสอบเทียบแผ่นวัดแรงสำหรับตั้งศูนย์รถฟอร์มูล่า โดยล้อหน้าซ้ายจะเป็นแผ่นวัดแรงที่ติดตั้งโพลดเซลล์วงแหวนแบบ Full Wheatstone bridge ทั้ง 4 ตัว ส่วนแผ่นวัดแรงที่เหลืออีก 3 แผ่นติดตั้งโพลดเซลล์แบบ Quarter Wheatstone bridge จากการวิเคราะห์ทางสถิติพบว่าแผ่นวัดแรงแบบ Full Wheatstone bridge ที่ล้อหน้าซ้ายจะมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($P \leq 0.05$) กับล้อหน้าขวาและล้อซ้ายหลังอย่างเห็นได้ชัด โดยจะมีความแตกต่างจากน้ำหนักกดจากโพลดเซลล์มาตรฐานประมาณ 1-1.5 kg คิดเป็นความต่างเฉลี่ย 4.88% แต่เมื่อพิจารณาโพลดเซลล์แบบ Quarter Wheatstone bridge พบว่าที่แผ่นวัดแรงของล้อหน้า จะมีความแตกต่างของแต่ละน้ำหนักกดแตกต่างจากค่าที่วัดได้จากโพลดเซลล์มาตรฐาน 0-0.7 kg โดยคิดเป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าเฉลี่ย 0.62% เมื่อพิจารณาผลทางสถิติพบว่าค่าที่ได้แตกต่างกับแผ่นวัดแรงล้อย้ำหน้าค่อนข้างชัดเจน เมื่อเปรียบเทียบกับแผ่นวัดแรงล้อย้ำหลังจะพบว่าค่าที่วัดได้มีแนวโน้มมากกว่าค่าที่วัดได้จากโพลดเซลล์มาตรฐานเช่นเดียวกัน โดยค่าที่สอบเทียบของล้อย้ำหน้าจะมีค่าต่ำกว่า สำหรับแผ่นวัดแรงแผ่นวัดแรงล้อย้ำหลังจะมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานตั้งแต่ 0.1-0.8 kg โดยมีเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดเฉลี่ย 1.47% เมื่อเทียบกับน้ำหนักกดจากโพลดเซลล์มาตรฐาน ทั้งนี้เมื่อวิเคราะห์ผลทางสถิติจะพบว่าแผ่นวัดแรงแสดงค่าออกมาแตกต่างกับแผ่นวัดแรงล้อย้ำหน้าอย่างเห็นได้ชัดเจน เช่นเดียวกับแผ่นล้อย้ำหน้า และในกรณีแผ่นวัดแรงล้อย้ำหลัง ค่าที่ได้จากตารางที่ 4.2 ในช่วง 5-40 kg จะมีค่าเฉลี่ยที่วัดได้มากกว่าแผ่นล้อย้ำหน้าอย่างชัดเจน แต่เมื่อให้น้ำหนักกดตั้งแต่ 50 kg เป็นต้นไป ค่าที่ได้กลับไม่แตกต่างจากแผ่นวัดแรงล้อย้ำหน้ามากนัก ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับน้ำหนักกดกับโพลดเซลล์มาตรฐานพบว่ามีความแตกต่างอยู่ในช่วง 0.01-0.8 kg มีค่าความผิดพลาดเฉลี่ยประมาณ 1.7% จากการสอบเทียบน้ำหนักกดของแผ่นวัดแรงทั้ง 4 แบบจึงจะได้ว่าแผ่นวัดแรงที่ต่อวงจรแบบ Full Wheatstone bridge จะมีค่าความแตกต่างเทียบกับโพลดเซลล์มาตรฐานมากที่สุดในขณะที่ Quarter Wheatstone bridge ทั้ง 3 แผ่นมีค่าความแตกต่างใกล้เคียงกัน

จากรูปที่ 4.8 แสดงผลการสอบเทียบแผ่นวัดแรงของล้อย้ำทั้งสี่เพื่อหาค่าฮิสเทอรีซิส (Hysteresis error) และค่าความคลาดเคลื่อนของความไม่เป็นเชิงเส้น (Non-linearity error) โดยให้น้ำหนักกดจากโพลดเซลล์มาตรฐานกระทำกับแผ่นวัดแรงในช่วง 0-30 kg โดยเพิ่มขึ้นครั้งละ 5 kg ในช่วง 30-90 kg เพิ่มขึ้นครั้งละ 10 kg และในช่วง 90-150 kg เพิ่มขึ้นครั้งละ 30 kg และทำการลดน้ำหนักลงในทิศทางเดียวกันกับการใส่น้ำหนักเพิ่ม จะได้ผลของแผ่นวัดแรงดังตารางที่ 4.3 ที่ล้อย้ำซึ่งมีการต่อวงจรแบบ Full Wheatstone bridge มีค่า $R^2 = 0.9996$ ค่าฮิสเทอรีซิสเฉลี่ย 1.10% และค่าคลาดเคลื่อนของความไม่เป็นเชิงเส้น 0.403% ในขณะที่แผ่นวัดแรงที่ต่อวงจรแบบ Quarter Wheatstone bridge ของล้อย้ำหน้า ล้อย้ำหลัง และล้อย้ำหลัง มีค่า R^2 มีค่า 0.9997, 0.9997, 0.9998 ตามลำดับ ค่าฮิสเทอรีซิสของแผ่นวัดแรงล้อย้ำหน้าจะมีค่าฮิสเทอรีซิสน้อยที่สุดที่ 0.20% ที่ล้อย้ำหลัง 0.96% และล้อย้ำหลังมีค่ามากที่สุดที่ 1.19% ซึ่งมากกว่า Full Wheatstone bridge

จากการสอบเทียบกลับพบว่าค่าฮิสเทอรีซิสของแผ่นวัดแรงแบบ Quarter Wheatstone bridge แสดงค่าที่ได้โดยส่วนใหญ่น้อยกว่า Full Wheatstone bridge ซึ่งไม่สอดคล้องกับการทดลองของ Alvarenga et al. [12] ที่ได้สอบเทียบโพลดเซลล์ทั้งสองแบบกับเครื่องชั่งดิจิทัลมาตรฐานและพบว่า การติดตั้งโพลดเซลล์แบบ Full Wheatstone bridge จะเกิดค่าฮิสเทอรีซิสต่ำกว่าโพลดเซลล์ชนิด Quarter Wheatstone bridge สำหรับค่าความไม่เป็นเชิงเส้นแผ่นวัดแรงทั้งสี่จะใกล้เคียงกัน จากนั้นจึงนำแผ่นวัดแรงไปใช้วัดน้ำหนักเพื่อตั้งศูนย์รถฟอร์มูล่าต่อไป



รูปที่ 4.8 การเปรียบเทียบผลน้ำหนักที่ได้ของแผ่นวัดแรง

ตารางที่ 4.3 ค่าฮิสเทอรีซิสและความคลาดเคลื่อนความไม่เป็นเชิงเส้นของแผ่นวัดแรง

Position	Pattern of Wheatstone bridge	Hysteresis error (%)	Non-linearity error (%)
Front Wheel left	Full	1.10	0.403
Front Wheel Right	Quarter	0.2	0.247
Rear Wheel left	Quarter	0.96	0.461
Rear Wheel Right	Quarter	1.19	0.451

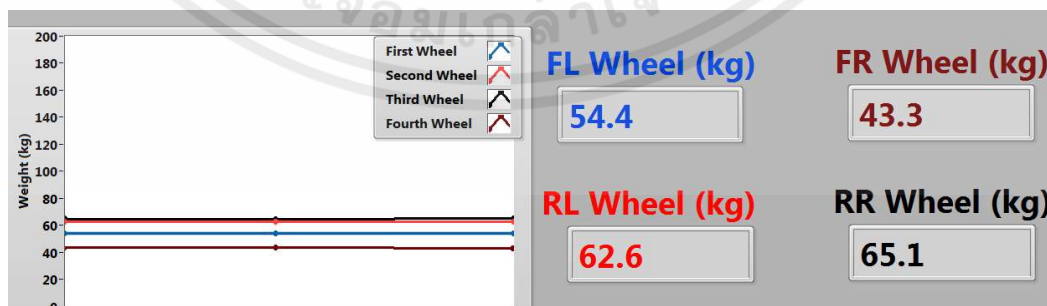
4.5 ผลการทดสอบแผ่นวัดแรงกับรถฟอร์มูล่า

จากการทดสอบกับรถฟอร์มูล่า นักศึกษาพบว่า การใช้แผ่นวัดแรงแบบ Full Wheatstone bridge มีความแม่นยำและมีความไวต่อการตอบสนองมากกว่าค่าน้ำหนักที่อ่านได้จากแผ่นวัดแรงแบบ Quarter Wheatstone bridge จะมีความคลาดเคลื่อนที่วัดได้อยู่ที่ช่วง 2-5 kg ส่วนการติดตั้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

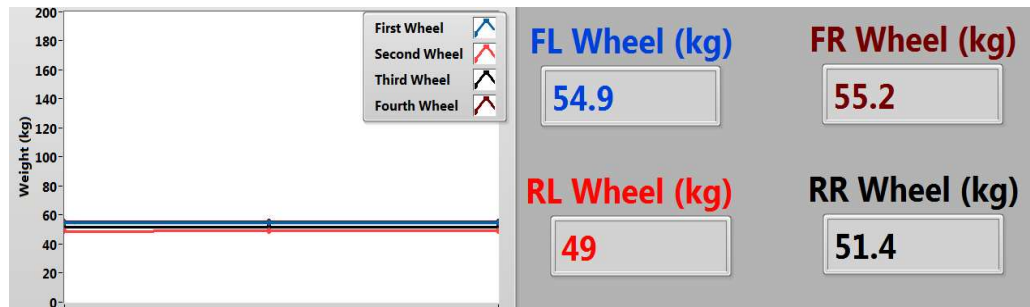
แบบ Quarter Wheatstone bridge จะมีค่าความคลาดเคลื่อนอยู่ที่ช่วงประมาณ 10-20 kg โดยล้อหน้าซ้ายเป็นแผ่นวัดแรงที่ติดตั้งโพลดเซลล์แบบ Full Wheatstone bridge ส่วนล้อหน้าขวา ล้อหลังซ้าย และล้อหลังขวาเป็นแผ่นวัดแรงที่ติดตั้งโพลดเซลล์แบบ Quarter Wheatstone bridge หลังจกทำการเปรียบเทียบค่าน้ำหนักก่อนและหลังการปรับแต่ง Corner weight หรือ มุมปรับน้ำหนักของล้อฟอร์มูล่าพบว่าแผ่นวัดแรงที่ติดตั้งโพลดเซลล์แบบ Quarter Wheatstone bridge ไม่เหมาะกับการใช้งานซึ่งน้ำหนักเพื่อปรับสมดุลรถฟอร์มูล่า ซึ่งสอดคล้องกับการทดลองของ Zhang et al. [6] พบว่าการใช้โพลดเซลล์ที่มากกว่าหนึ่งตัวบนแผ่นวัดแรงจะให้ความแม่นยำและมีความเสถียรมากกว่า

ในการใช้งานมุมปรับน้ำหนักของล้อฟอร์มูล่าต้องใช้รดยกของแบบไฮดรอลิกยกรถฟอร์มูล่าเพื่อสะดวกต่อการชั่งน้ำหนักแต่ละครั้ง ต้องปรับให้แผ่นวัดแรงทั้งสี่มีความสูงใกล้เคียงกันมากที่สุดเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดความคลาดเคลื่อนในการชั่งน้ำหนัก จากรูปที่ 4.9 (ก) การชั่งน้ำหนักล้อรถฟอร์มูล่า นักศึกษาครั้งแรกนั้นทำการเก็บค่าน้ำหนักของล้อหน้าขวา ล้อหน้าซ้าย ล้อหลังขวา และล้อหลังขวาได้ค่าน้ำหนักเท่ากับ 54.4, 43.3, 62.6 และ 65.1 kg ตามลำดับ แต่ในการใช้งานรถฟอร์มูล่า นักศึกษาต้องการให้น้ำหนักของรถถ่ายไปด้านหลังมากกว่าด้านหน้า จึงต้องปรับให้สองล้อด้านหน้ามีน้ำหนักอยู่ที่ 50 kg และสองล้อด้านหลังมีน้ำหนักอยู่ที่ 60 kg โดยมีความคลาดเคลื่อนไม่เกิน 1-2 kg จึงยกรถฟอร์มูล่าขึ้น ทำการปรับมุมปรับน้ำหนักของล้อฟอร์มูล่า และชั่งน้ำหนักอีกสองครั้งได้ผลดังรูปที่ 4.9 (ข) และ รูปที่ 4.9 (ค) จากการเปรียบเทียบพบว่า ล้อหน้าขวา ล้อหลังซ้าย และล้อหลังขวาที่มีการติดตั้งโพลดเซลล์แบบ Quarter Wheatstone bridge บนแผ่นวัดแรงมีค่าน้อยกว่าความเป็นจริงจึงไม่เหมาะกับการใช้งานชั่งน้ำหนักเพื่อตั้งศูนย์ล้อรถฟอร์มูล่า นักศึกษา เนื่องจากมีความคลาดเคลื่อนเกิดขึ้นสูงมากในช่วง 5-20 kg ซึ่งเกิดจากพื้นที่หน้าสัมผัสของรถฟอร์มูล่าที่มีการกระจายตัวมากกว่าในการสอบเทียบที่ใช้เพียงแผ่นวงกลมที่วัดเพียงตรงกลางของแผ่นวัดแรง ดังนั้นในการเลือกใช้แผ่นวัดแรงสำหรับปรับตั้งมุมปรับน้ำหนักของรถฟอร์มูล่า นักศึกษาในครั้งนี้ จึงควรเลือกใช้แผ่นวัดแรงที่มีการติดตั้งโพลดเซลล์แบบ Full Wheatstone bridge ที่สามารถวัดแรงกระจายบนหน้าสัมผัสยางในบริเวณกว้างได้

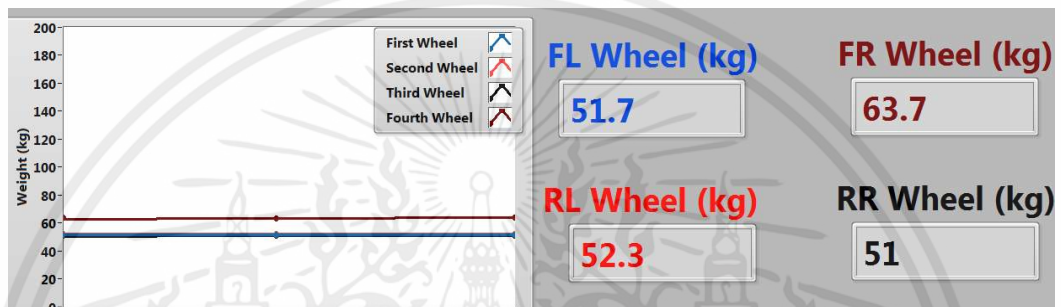


(ก)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ข)



(ค)

รูปที่ 4.9 (ก) หน้าหน้าที่อ่านได้จากการชั่งน้ำหนักรถฟอร์มูล่าที่แสดงในโปรแกรม LabVIEW
 (ข) หน้าหน้าที่อ่านได้จากการชั่งน้ำหนักรถฟอร์มูล่าที่แสดงในโปรแกรม LabVIEW หลังปรับด้วย
 Corner weight ครั้งที่ 1 (ค) หน้าหน้าที่อ่านได้จากการชั่งน้ำหนักรถฟอร์มูล่าที่แสดงในโปรแกรม
 LabVIEW หลังปรับด้วย Corner weight ครั้งที่ 2

4.6 การประยุกต์ใช้งานแผ่นวัดแรง

เนื่องจากแผ่นวัดแรงเป็นเครื่องมือวัดที่ใช้วัดแรงแนวตั้งซึ่งสามารถประยุกต์ใช้งานได้หลากหลาย เช่น การชั่งน้ำหนักมนุษย์ การชั่งน้ำหนักผลผลิตทางการเกษตร ด้วยความสามารถในการวัดแรงแนวตั้งของแผ่นวัดแรงนี้ทางชมรมฟอร์มูล่านักศึกษาจึงนำไปใช้วัดค่าน้ำหนักของปีก (Wing) รถฟอร์มูล่านักศึกษาเพื่อปรับความชันปีกรับลมได้แก่มุม 0, 45, 55° ตามลำดับทดสอบวิ่งด้วยความเร็วที่ 20, 40, 60 และ 80 km/h โดยใช้แผ่นวัดแรงที่ติดตั้งโหนดเซลล์แบบ Full Wheatstone bridge ดังรูปที่ 4.10 ซึ่งผลที่ได้มีความใกล้เคียงกับผลเชิงระเบียนวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ที่ใช้ทำนายโดยมีความคลาดเคลื่อนสูงสุดอยู่ที่ 2-10 N ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้



Flat-bed scale

รูปที่ 4.10 การติดตั้งปีกรถฟอร์มูลานักศึกษากับแผ่นวัดแรงแบบ Full Wheatstone

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

การสร้างแผ่นวัดแรงเพื่อตั้งศูนย์ล้อรถฟอร์มูล่านักศึกษา ได้ออกแบบชิ้นโพลีเอสเตอร์แบบ วงแหวนโดยเลือกใช้อลูมิเนียม 7075 ที่นิยมใช้ทำเครื่องมือวัด โดยช่วงที่เหมาะสมในการวัดแรง อยู่ระหว่าง 50-90 kg จากการสอบเทียบเพื่อหารูปแบบการติดตั้งสเตรนเกจบนชิ้นโพลีเอสเตอร์แบบต่างๆ พบว่าการติดตั้งสเตรนเกจ Full Wheatstone bridge กรณีติดตั้งแบบวงเดียวไม่สามารถอ่านค่าน้ำหนักได้อย่างถูกต้อง โดยในช่วง 0-50 kg จะอ่านค่าออกมาเกินค่ามาตรฐาน 2 เท่า และหลังจาก 50 kg จะอ่านค่าออกมาเกินกว่า 90 kg และมีค่า $R^2=0.635$ จึงไม่เหมาะหากจะเอามาใช้งานแบบตัวเดียวในขณะที่การติดตั้งสเตรนเกจแบบ Quarter Wheatstone bridge สามารถนำมาใช้กรณีติดตั้งแบบวงเดียวได้เพราะมีค่า $R^2=0.9995$ ส่วนจากการพิจารณาการติดตั้งสเตรนเกจ Full Wheatstone bridge กรณีติดตั้งแบบหลายวง มีค่า $R^2=0.9975$ มีค่าเหมาะสมกว่ากรณีติดตั้งแบบวงเดียวแต่อย่างไรก็ตามก็ยังคงน้อยกว่าแบบที่ติดตั้งสเตรนเกจแบบ Quarter Wheatstone bridge ส่วนการเปรียบเทียบรูปแบบการวางโพลีเอสเตอร์บนแผ่นวัดแรงทั้งแบบ Cross quarter Wheatstone bridge (แบบไขว้กัน) และการวางโพลีเอสเตอร์แบบ Parallel quarter Wheatstone bridge (แบบขนานกัน) พบว่ารูปแบบที่เหมาะสมกว่าคือการวางโพลีเอสเตอร์แบบไขว้กันเนื่องจากมีค่า R^2 อยู่ที่ 0.9998 และมีค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยอยู่ที่ 4.646% ส่วนแบบขนาน R^2 อยู่ที่ 0.9993 และมีค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยอยู่ที่ 1.876% การพิจารณาผลการเปรียบเทียบแผ่นวัดแรง พบว่าในช่วงน้ำหนัก 60-80 kg แผ่นวัดแรงล้อหน้าซ้ายที่ติดตั้งโพลีเอสเตอร์แบบ Full Wheatstone bridge มีค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนเฉพาะจุด 1.07% ซึ่งน้อยกว่าล้ออื่นๆ ที่ติดตั้งโพลีเอสเตอร์แบบ Quarter Wheatstone bridge ที่มีค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยประมาณ 1.78% พบว่าผลการสอบเทียบโดยแผ่นวัดแรงแบบ Full Wheatstone bridge มีความแม่นยำและความไวในการตอบสนองมากกว่าแผ่นวัดแรงแบบ Quarter Wheatstone bridge ซึ่งแผ่นวัดแรงแบบ Quarter Wheatstone bridge มีค่าคลาดเคลื่อนเกิดขึ้น 5-20 kg แต่แผ่นวัดแรงแบบ Full Wheatstone bridge จะคลาดเคลื่อนเพียง 1-3 kg ดังนั้นแผ่นวัดแรงแบบ Full Wheatstone bridge จึงเหมาะกับการนำมาใช้งานตั้ง ศูนย์ล้อฟอร์มูล่า

5.2 ปัญหาที่พบในการทดสอบ

- 5.2.1 การวางแผนวัดแรงบนพื้นขรุขระและไม่สม่ำเสมอจะเกิดค่าความคลาดเคลื่อน
- 5.2.2 การวางแผนวัดแรงทั้ง 4 แผ่นเพื่อตั้งศูนย์ล้อจะต้องตั้งความสูงแผ่นวัดแรงให้เท่ากัน

5.3 ข้อเสนอแนะ

- 5.2.1 จากการทดสอบกับรถฟอร์มูล่านักศึกษาควรติดตั้งโหลดเซลล์แบบ Full Wheatstone bridge ทั้ง 4 แผ่นจึงจะให้ผลลัพธ์ที่แม่นยำและมีความไวในการตอบสนองมากกว่า
- 5.2.2 การขึ้นรูปโหลดเซลล์ต้องมีขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางวงนอกเท่ากันทุกชิ้น
- 5.2.3 การขึ้นรูปแผ่นวัดแรงต้องมีการเก็บความละเอียดความเรียบบนผิวเพื่อลดความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากชิ้นงาน
- 5.2.4 ควรทำตัวรับความสูงที่ได้มาตรฐานได้แผ่นวัดแรงทุกแผ่นเพื่อแก้ปัญหาพื้นที่ไม่สม่ำเสมอ
- 5.2.5 ในการเลือกใช้ตัวแปลงสัญญาณ NI-6001 ที่มีช่องสัญญาณเพียง 8 ช่องจึงสามารถใช้งาน Full Wheatstone bridge ได้เพียง 1 แผ่นควรเปลี่ยนเป็นตัวแปลงสัญญาณที่มีขนาดใหญ่ขึ้น หรือเปลี่ยนเป็นตัวแปลงสัญญาณดิจิทัล
- 5.2.6 ควรทำการป้องกันสัญญาณรบกวน เช่น การใช้เทปพันสายไฟ หรือ ใช้กระดาษฟอยล์พันรอบสายตัวขยายสัญญาณ

เอกสารอ้างอิง

- [1] Roseiro, Luis et al. (2013). "Identification of the forces in the suspension system of a race car using artificial neural networks." In **Computational intelligence and decision making. Intelligent systems, control and automation: Science and engineering** 61, 469-477. Edited by Ana Madureira, Cecilia Reis and Viriato Marques. Dordrecht: Springer.
- [2] Craighead, I A. (1997). "Sensing tyre pressure, damper condition and wheel balance from vibration measurements." **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering** 211, 4 (April): 257-65.
- [3] Doumiati, Moustapha et al. (2009). "Virtual sensors, application to vehicle tire-road normal forces for road safety." In **2009 American Control Conference**, 3337-3343. St. Louis, MO, USA, June 10-12, 2009. IEEE.
- [4] Zhu, X. Q., and S. S. Law. (2000). "Identification of vehicle axle loads from bridge dynamic responses." **Journal of Sound and Vibration** 236, 4 (September): 705-724.
- [5] NIDA. (2019). **Businedd analytics and data science**. Accessed May 1. Available from <https://businessanalyticsnida.wordpress.com/2016/09/18/32-kinds-of-regression/>
- [6] Zhang, Wenbin, Chunguang Suo, and Qi Wang. (2008). "A novel sensor system for measuring wheel loads of vehicles on highways." **Sensors** 8, 12 (December): 7671-7689.
- [7] Mourão, Luis, et al. (2016). "Design and construction of a 3D force plate prototype for developing an instrumented swimming start block." **Journal of Biomedical Engineering and Informatics** 2, 2 (September): 99-108.
- [8] Giacomozzi, Claudia, and Velio Macellari. (1997). "Piezo-dynamometric platform for a more complete analysis of foot-to-floor interaction." **IEEE Transactions on Rehabilitation engineering** 5, 4 (December): 322-330.
- [9] Scorza, Andrea et al. (2018). "A review on methods and devices for force platforms calibration in medical applications." **Journal of Engineering Science & Technology Review** 11, 1 (January): 10-18.

- [10] Reinhardt, Lars, and Reinhard Blickhan. (2014). "Ultra-miniature force plate for measuring triaxial forces in the micronewton range." **Journal of Experimental Biology** 217, 5 (March): 704-710.
- [11] Silva, Marcelo G., Pedro V.S. Moreira, and Henrique M. Rocha. (2017). "Development of a low cost force platform for biomechanical parameters analysis." **Research on Biomedical Engineering** 33, 3 (June): 259-268.
- [12] Alvarenga, Raphaela et al. (2011). "Construction and calibration of a low-cost force plate for human balance evaluation." **Portuguese Journal of Sport Sciences** 11, Supplement 2: 961-964.
- [13] บริษัท เคียวว่า เต็นเกียว (ไทยแลนด์) จำกัด. (2562). **ความเค้นและความเครียด**. เข้าถึงเมื่อ 1 พฤษภาคม. เข้าถึงได้จาก https://www.kyowa-ei.co.th/tha/technical/strain_gages/stress-strain.html
- [14] The Machinery reform. (2562). **ความเค้นและความเครียด**. เข้าถึงเมื่อ 1 พฤษภาคม. เข้าถึงได้จาก <http://www.tmr-engineering.com/ความเค้นและความเครียด/>
- [15] พิสิทธ์ราชมงคล. (2562). **Percent Elongation**. เข้าถึงเมื่อ 2 พฤษภาคม. เข้าถึงได้จาก <http://www.atom.rmutphysics.com/charud/oldnews/0/286/7/5/deformation/tensile/tensile/elongation.html>
- [16] ศูนย์เครือข่ายข้อมูลอาหารครบวงจร. (2562). **Young's Modulus / Modulus of Elasticity**. เข้าถึงเมื่อ 3 พฤษภาคม. เข้าถึงได้จาก <http://www.foodnetworksolution.com/wiki/word/2542/youngs-modulus-modulus-of-elasticity>
- [17] Navapadol Kittiamornkul. (2562). **วงจรถัดและกฎของเคอร์ชอฟ**. เข้าถึงเมื่อ 3 พฤษภาคม. เข้าถึงได้จาก <https://navapadol.files.wordpress.com/2015/09/e0b89ae0b897e0b897e0b8b5e0b9884.pdf>
- [18] บริษัท เคียวว่า เต็นเกียว (ไทยแลนด์) จำกัด. (2562). **วีทสโตน บริดจ์**. เข้าถึงเมื่อ 3 พฤษภาคม. เข้าถึงได้จาก https://www.kyowaei.co.th/tha/technical/strain_gages/wheatstone-bridge.html
- [19] เครื่องมือวัดและควบคุม. (2562). **Load cell โหลดเซลล์**. เข้าถึงเมื่อ 4 พฤษภาคม. เข้าถึงได้จาก <http://ins-rayong.blogspot.com/2014/06/load-cell.html>

- [20] Engineering Tutorial. (2019). **Proving ring type load cell**. Accessed May 5. Available from <https://www.youtube.com/watch?v=glSF7KaEC78>
- [21] Author. (2560). **วิธีการถ่วงล้อยนต์**. เข้าถึงเมื่อ 5 พฤษภาคม. เข้าถึงได้จาก <http://www.auto2drive.com/วิธีถ่วงล้อยนต์/>
- [22] Hawkin Dynamics Staff. (2019). **Force plate**. Accessed May 5. Available from <https://www.hawkindynamics.com/blog/what-is-a-force-plate>
- [23] Cadic, Emily. (2019). **What is center of gravity? - Definition, equation & examples**. Accessed May 6. Available from <https://study.com/academy/lesson/what-is-center-of-gravity-definition-equation-examples.html#lesson>
- [24] Suspension Secrets. (2019). **How to corner weight your car**. Accessed May 6. Available from <http://suspensionsecrets.co.uk/how-to-corner-weight-your-car/?i=3>
- [25] IANVWH. (2019). **What is corner weighting?** Accessed May 7. Available from <https://www.vwheritage.com/blog/2017/06/09/what-is-corner-weighting/>
- [26] Kenton, Will. (2019). **Nonlinearity**. Accessed May 8. Available from <https://www.investopedia.com/terms/n/nonlinearity.asp>
- [27] Missouri University of Science and Technology. (2019). **Hysteresis**. Accessed May 9. Available from https://brokenlink.mst.edu/cgi-bin/cgiwrap/brklink/handler.pl/web.mst.edu/~cottrell/.../Explanation%20of%20Hysteresis%20calculation.doc?fbclid=IwAR0oIhqFHWtgBL_13d7AqPU3rzxyPuffw--pvPYEHmTvnBj8e44sQ9GheU
- [28] บริษัท เทคโนโลยี Xiamen Loadcell จำกัด. (2562). **เซนเซอร์สถานะการชั่งน้ำหนักสายพานและแนวโน้มการพัฒนา**. เข้าถึงเมื่อ 6 พฤษภาคม. เข้าถึงได้จาก <http://m.th.lct2003.com/news/strain-weighing-sensor-technology-status-and-d-5199348.html?fbclid=IwAR2bNu-LRE5hH0p5JMgU1KpyNfFztdsX1yVqj5JpggzVr0wz1uTiXMdHDS>



ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.1 ตารางน้ำหนักของโพลดเซลล์กรณีติดตั้งแบบวงเดียวและใช้ร่วมกัน 4 ตัวของ Full Wheatstone bridge

Weight (kg)	Single-Full Wheatstone bridge (kg)			Quarter Wheatstone bridge in (kg)		
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3
0	0	0	0	0	0	0
5	11.334	11.5088	11.2118	4.7721	4.7122	4.8366
10	22.572	22.6696	22.9146	9.8297	9.7312	9.9403
15	33.464	34.6198	34.3012	14.8137	14.717	14.9381
20	45.596	45.9741	46.0684	19.6226	19.5259	19.7282
25	56.806	57.3559	56.7122	24.4684	24.473	24.6132
30	68.216	68.879	69.0441	29.5169	29.2267	29.4537
40	91.057	91.5206	90.918	39.6875	39.0242	39.1623
50	100.09	100.1003	99.7552	48.9184	48.7774	49.1553
60	100.06	100.0323	99.7434	57.5136	58.5224	59.1074
70	100.05	99.2411	99.0696	69.3149	68.1495	69.0385
80	100.03	99.8889	99.7371	79.421	77.841	79.2644
90	100.01	98.5698	99.7187	89.6245	87.5971	88.9098
110	99.999	100.0203	99.6398	109.9765	106.7084	109.0392
130	99.943	99.9813	99.5746	129.3251	131.8263	128.6526
150	99.903	99.9209	99.507	150.1694	144.6132	148.4871

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.2 ตารางน้ำหนักของโหนดเซลล์แบบ Quarter Wheatstone bridge
(in และ out)

Weight (kg)	Quarter Wheatstone bridge in (kg)			Quarter Wheatstone bridge out (kg)		
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3
0	0	0	0	0	0	0
5	4.7721	4.7122	4.8366	4.4293	4.5626	4.9556
10	9.8297	9.7312	9.9403	9.3759	9.7955	10.062
15	14.8137	14.717	14.9381	14.3179	14.7685	15.1472
20	19.6226	19.5259	19.7282	19.095	19.6864	20.2642
25	24.4684	24.473	24.6132	24.3217	24.9372	25.7162
30	29.5169	29.2267	29.4537	29.2963	29.962	30.4073
40	39.6875	39.0242	39.1623	39.4213	40.0727	40.874
50	48.9184	48.7774	49.1553	49.4917	50.2431	51.0117
60	57.5136	58.5224	59.1074	59.7439	60.5044	61.0925
70	69.3149	68.1495	69.0385	69.8821	70.5275	71.4434
80	79.421	77.841	79.2644	80.2405	80.8997	82.8726
90	89.6245	87.5971	88.9098	90.2415	90.8987	91.891
110	109.9765	106.7084	109.0392	109.9688	110.4233	111.9069
130	129.3251	131.8263	128.6526	129.3499	129.4613	130.5972
150	150.1694	144.6132	148.4871	148.6218	149.1205	149.8437

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.3 ตารางผลการสอบเทียบค่าเปอร์เซ็นต์คลาดเคลื่อนเฉพาะจุดของโพลดเซลล์

Weight (kg)	Quarter Wheatstone bridge in (%)	Quarter Wheatstone bridge out (%)	Full Wheatstone bridge (%)
0	0	0	0
5	3.744	7.8351	25.0187
10	0.7214	2.8979	14.5166
15	0.23	2.0056	8.8629
20	0.9365	1.8891	8.3676
25	0.9931	0.3018	4.7751
30	1.0713	0.6423	5.3332
40	0.8332	0.0381	7.1275
50	1.1706	0.2281	3.124
60	1.7932	0.4729	2.3869
70	0.7241	0.6086	2.9722
80	0.5013	1.3805	1.8308
90	0.4865	0.8448	2.1342
110	0.3469	0.4253	1.6746
130	0.9035	0.4208	1.6059
150	0.5506	0.8092	1.046

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.4 ตารางการเปรียบเทียบผลน้ำหนักที่อ่านได้จากการวางโพลดเซลล์แบบ Quarter Wheatstone bridge ทั้งแบบวางขนานและวางไขว้

Weight (kg)	Cross quarter			Parallel quarter		
	Wheatstone bridge			Wheatstone bridge		
	(kg)	(kg)	(kg)	(kg)	(kg)	(kg)
	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3
0	2.6067	2.6067	2.6067	0.4951	0.4951	0.4951
5	6.9138	6.7785	6.9701	5.6232	5.3668	5.4219
10	11.1645	10.8375	11.2278	10.6348	10.4949	10.5182
15	15.3783	15.325	15.286	15.5648	15.355	15.4599
20	19.585	19.4403	19.7448	20.3316	20.4132	20.2341
25	23.8038	23.8489	23.9165	25.3665	25.1101	25.4258
30	28.4378	28.5393	28.7535	30.2052	30.0051	30.3314
40	38.3937	38.4694	38.5331	39.7019	39.4805	39.8651
50	48.4398	48.8908	48.7832	48.958	49.0607	49.5036
60	58.6813	59.1511	59.0742	58.0893	58.9207	59.2121
70	69.5579	69.232	68.9829	68.0931	69.3867	69.48
80	79.6563	79.3447	79.154	78.6873	79.8178	79.8178
90	89.8756	89.8448	89.4041	88.827	89.9109	89.5768
110	110.937	110.4526	110.103	109.118	110.506	110.2623
130	132.078	131.0546	130.3756	129.842	130.9125	131.1107
150	151.898	150.334	150.526	150.333	151.2968	151.8806

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.5 ตารางการเปรียบเทียบค่าเปอร์เซ็นต์คลาดเคลื่อนเฉพาะจุดของการวาง
โพลดเซลล์แบบ Quarter Wheatstone bridge ทั้งแบบวางขนานและวางไขว้

Weight (kg)	Relative error Cross quarter Wheatstone bridge (%)	Relative error Parallel quarter Wheatstone bridge (%)
0	0	0
5	9.413	37.7492
10	5.4932	10.7658
15	3.0659	2.1983
20	1.6315	2.0497
25	1.2032	4.5744
30	0.6019	4.7437
40	0.7938	3.8365
50	1.6518	2.5909
60	2.0988	1.7186
70	1.4477	1.0605
80	0.6988	0.7687
90	0.6242	0.3243
110	0.0344	0.4524
130	0.4784	0.8995
150	0.7803	0.613

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.6 ตารางการเปรียบเทียบแผ่นวัดแรงที่ติดตั้งโหลดเซลล์แบบ Quarter Wheatstone bridge และ Full Wheatstone bridge

Weight (kg)	Full Wheatstone bridge (kg)			Quarter Wheatstone bridge (kg)		
	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3
0	0	0	0	0	0	0
5	5.3038	4.8554	5.0063	5.1696	4.8542	4.9062
10	9.2587	9.8987	9.6829	10.2216	9.964	9.9812
15	14.3932	14.741	14.4861	15.1915	14.8066	14.9021
20	19.2727	19.6171	19.5163	19.9968	19.8466	19.6563
25	24.2614	24.802	24.8246	25.0724	24.5267	24.8263
30	28.9163	29.8653	28.9524	29.9502	29.4041	29.7114
40	38.9962	39.858	39.0604	39.5236	38.8455	39.2051
50	48.7496	49.6491	48.037	48.8545	48.3914	48.8032
60	58.901	59.0746	58.1962	58.0596	58.216	58.471
70	68.9027	69.3359	68.1635	68.1442	68.6444	68.6959
80	78.9286	79.6443	78.0913	78.824	79.0381	78.9904
90	88.7303	89.4225	87.5326	89.0457	89.0949	88.7085
110	108.6492	110.3834	107.8648	109.5007	109.6162	109.3074
130	128.2962	129.5934	127.2906	130.3925	129.9495	130.0684
150	149.0815	150.0127	147.5864	151.0494	150.2606	150.7514

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.7 ตารางการเปรียบเทียบค่าเปอร์เซ็นต์คลาดเคลื่อนเฉพาะจุดของแผ่นวัดแรงที่ติดตั้ง โหลดเซลล์แบบ Full Wheatstone bridge และ Quarter Wheatstone bridge

Weight (kg)	Relative error Full Wheatstone bridge (%)	Relative error Quarter Wheatstone bridge (%)
5	0.4669	1.1035
10	0.5558	3.8657
15	0.2219	3.066
20	0.8337	2.6564
25	0.7663	1.4827
30	1.0382	2.5177
40	2.0215	1.7378
50	2.6339	2.3762
60	2.9185	2.1267
70	2.1502	1.7133
80	1.3114	1.3899
90	1.167	1.598
110	0.4775	0.9402
130	0.1052	1.2358
150	0.4581	0.7376

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.8 ตารางการเปรียบเทียบผลน้ำหนักที่ได้ของแผ่นวัดแรง (ล้อย่น้า)

Weight (kg)	Full Wheatstone bridge (FL) (kg)			Quarter Wheatstone bridge (FR) (kg)		
	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3
	0	0	0	0	0	0
5	4.8554	3.8553	5.3641	3.4639	4.3252	4.0796
10	9.8987	8.586	9.3826	8.0639	8.7943	8.8759
15	14.741	14.5605	14.6467	13.6329	13.7169	13.2643
20	19.6171	19.7759	19.4603	18.567	18.4404	18.5127
25	24.802	25.0887	24.5702	23.7351	23.6506	23.309
30	29.8653	29.2465	29.2819	28.2682	29.1373	28.2266
40	39.858	39.4147	39.5337	38.415	38.9272	38.4366
50	49.6491	48.713	49.1619	48.0939	49.0268	48.757
60	59.0746	59.4041	59.0169	58.5636	59.1817	58.8458
70	69.3359	69.5547	69.0643	68.4876	69.0933	68.4163
80	79.6443	79.6193	79.1819	78.5411	79.4473	78.7036
90	89.4225	88.8275	89.4331	88.6362	88.7947	88.7814
110	110.3834	109.3893	109.5862	108.8183	109.5359	108.6171
130	129.5934	129.1722	129.3251	128.655	129.4475	129.0704
150	150.0127	149.6185	150.4285	148.8148	149.2596	148.9282

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.9 ตารางการเปรียบเทียบผลน้ำหนักที่ได้ของแผ่นวัดแรง (ล้อหลัง)

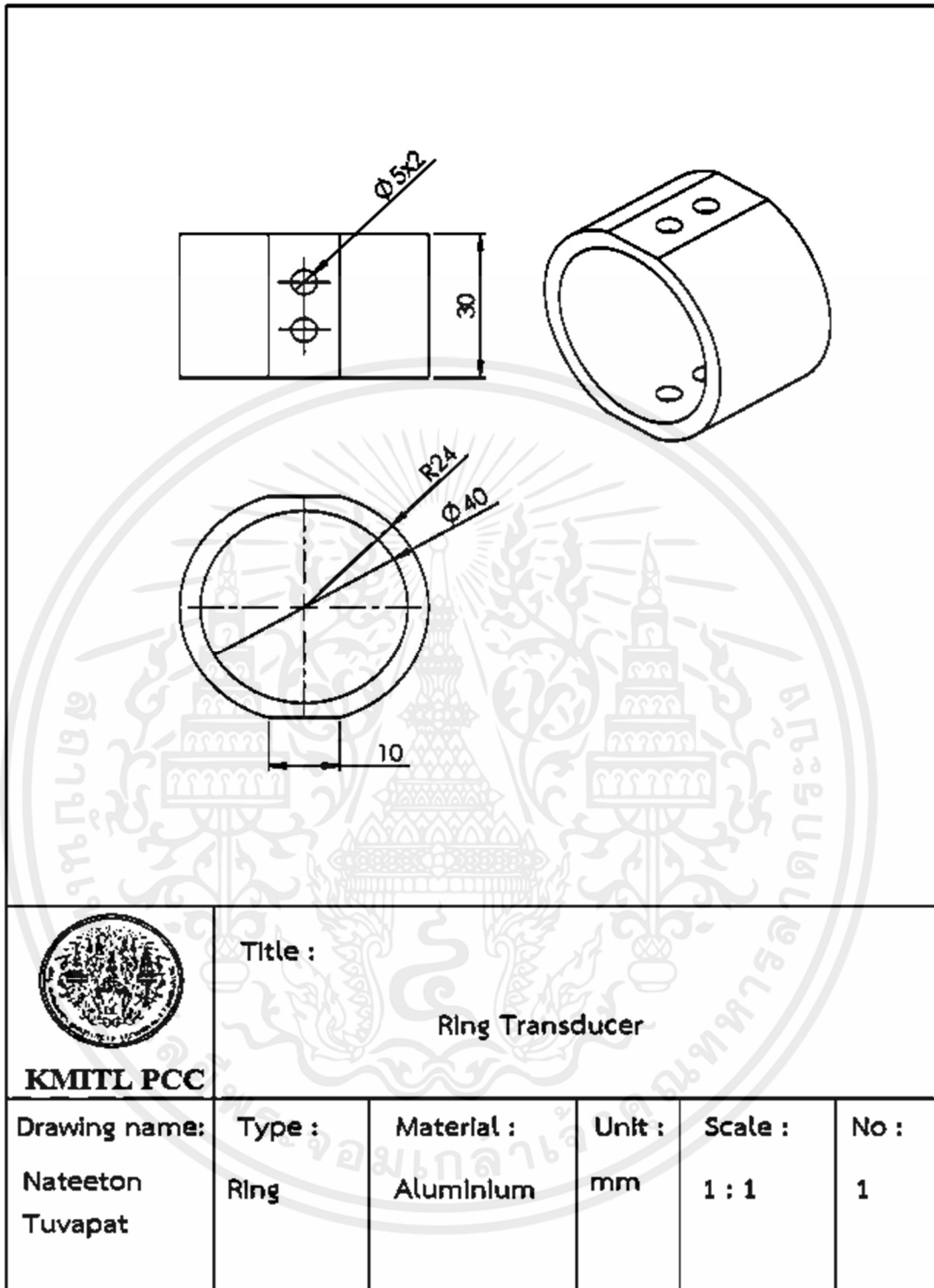
Weight (kg)	Quarter Wheatstone bridge (RL) (kg)			Quarter Wheatstone bridge (RR) (kg)		
	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3
	0	0	0	0	0	0
5	5.1226	4.6331	5.2923	4.8782	5.1952	5.585
10	9.9267	10.1543	10.1045	9.94	10.5133	10.9229
15	14.9331	14.9586	15.1087	15.1154	15.3224	15.5814
20	19.8331	20.1695	19.8249	19.9324	20.228	20.5488
25	24.9354	25.466	25.8214	25.2303	25.5285	26.0014
30	29.9418	30.388	31.1564	30.5806	30.478	31.1187
40	40.189	40.0501	41.1649	40.4784	40.8333	40.727
50	49.8504	50.6324	50.3411	50.1283	50.7953	51.3057
60	60.8006	59.9521	60.4669	59.9285	60.5787	61.2493
70	70.4088	70.2883	70.7314	70.8563	70.1749	71.0973
80	80.5388	80.0788	80.4198	80.1319	80.4644	80.7206
90	90.3493	90.7467	90.9191	90.7363	90.1528	90.5152
110	109.8744	111.1516	110.3065	110.2491	110.4597	110.0405
130	130.7736	129.7482	130.5261	130.339	130.4245	130.7833
150	148.9886	149.0724	149.7641	149.3797	150.2049	150.741

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



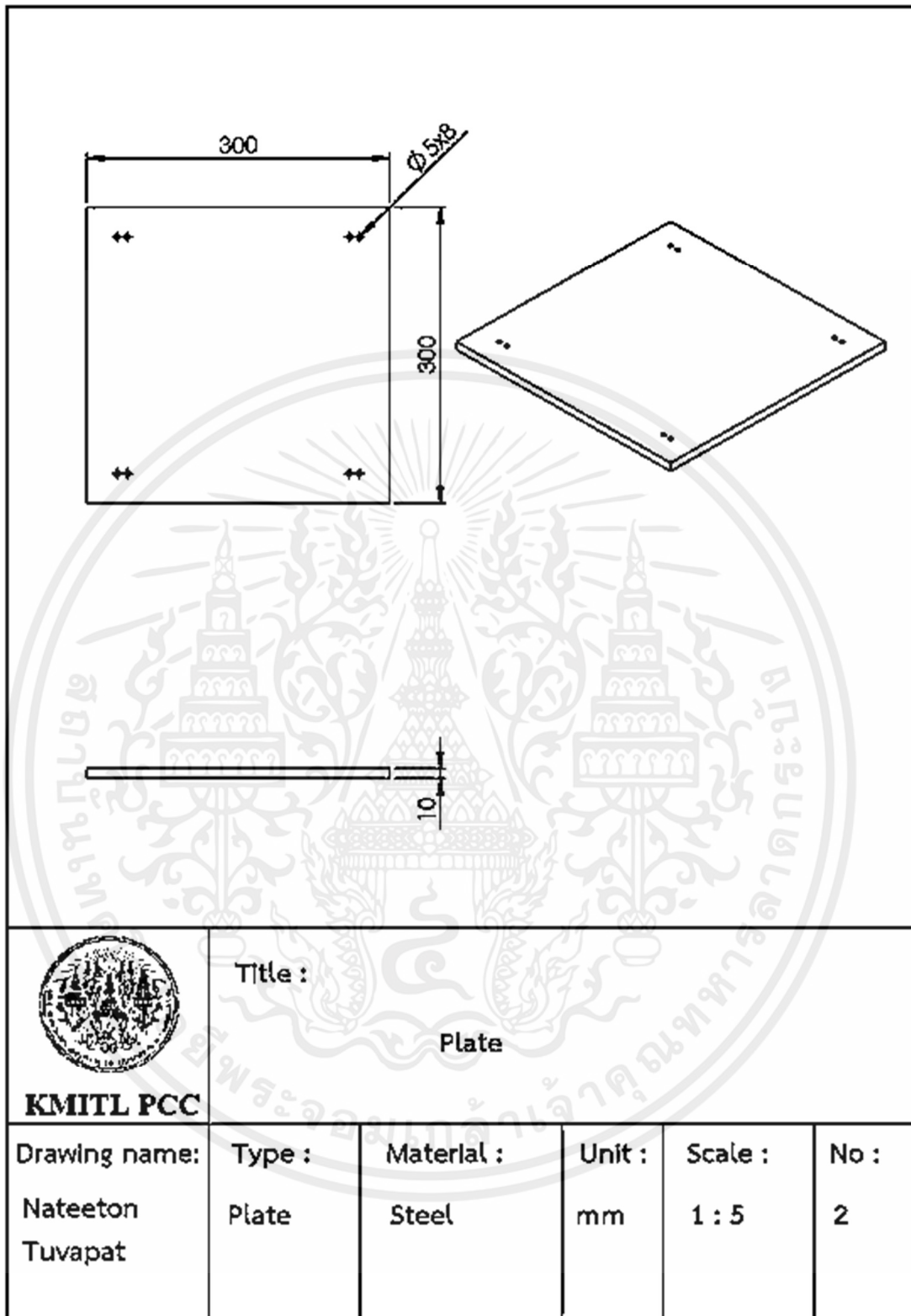
ภาคผนวก ข
การออกแบบชิ้นโพลตเซลล์แบบวงแหวนและแผ่นเพลต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ข.1 Ring Transducer

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

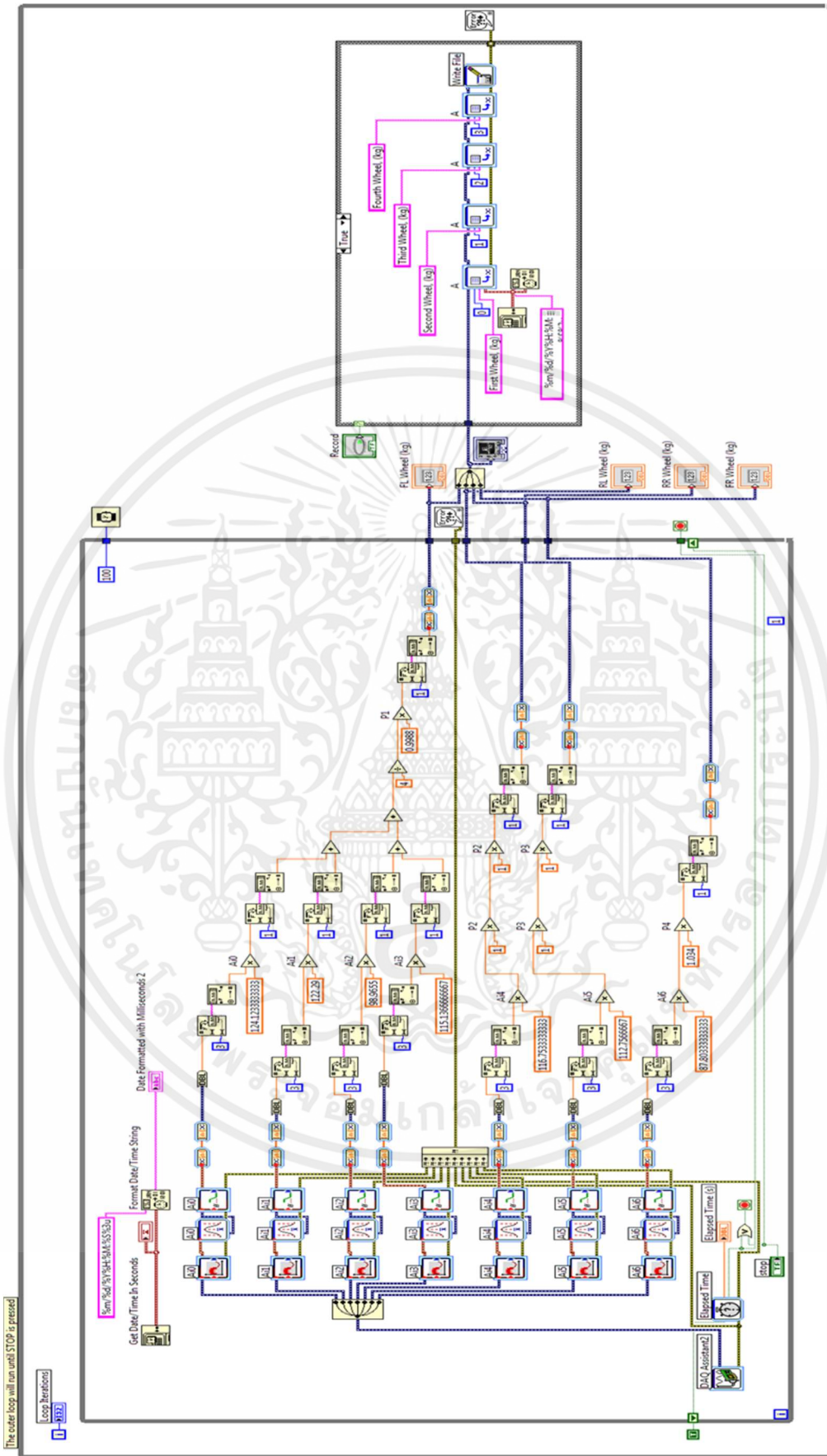


รูปที่ ข.2 แผ่นเหล็ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ค.1 การเขียนโปรแกรม LabVIEW

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน



ชื่อ-นามสกุล นายธนวีร์ บุญหล้า
 วัน เดือน ปีเกิด วันที่ 10 พฤษภาคม พ.ศ. 2540
 ภูมิลำเนา จังหวัดปทุมธานี
 ที่อยู่ 18/165 หมู่ 13 ต.คลองหนึ่ง อ.คลองหลวง
 จ.ปทุมธานี 12120
 E-mail Safetysoulsaver@gmail.com

ประวัติการศึกษา

- สำเร็จการศึกษาประถมศึกษาจากโรงเรียนวันครู 2502
- สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมต้นจากโรงเรียนหอวัง ปทุมธานี
- สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมปลายจากโรงเรียนหอวัง ปทุมธานี
- สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
 วศ.บ. (วิศวกรรมเครื่องกล) ปีการศึกษา 2561 จากสถาบัน
 เทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขต
 ชุมพรเขตอุดมศักดิ์

ผลงานและกิจกรรม

- Summer camp in Harbin Institute of Technology, China
- ฝึกงานที่สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ
 (ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ MTEC)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน



ชื่อ-นามสกุล นายนทีธร ชูภักดิ์
 วัน เดือน ปีเกิด วันที่ 6 พฤศจิกายน พ.ศ.2539
 ภูมิลำเนา จังหวัดนครปฐม
 ที่อยู่ 22/9 หมู่ 2 ต.แหลมบัว อ.นครชัยศรี
 จ.นครปฐม 73120
 E-mail Thuwapart55@gmail.com

ประวัติการศึกษา

- สำเร็จการศึกษาประถมศึกษาจากโรงเรียนวัดไผ่ล้อม (พุลประชาอุปถัมภ์)
- สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมต้นจากโรงเรียนรัตนโกสินทรสม โภชบวรนิเวศศาลายา ในพระสังฆราชูปถัมภ์
- สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมปลายจากโรงเรียนรัตนโกสินทร สมโภชบวรนิเวศศาลายา ในพระสังฆราชูปถัมภ์
- สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต วศ.บ. (วิศวกรรมเครื่องกล) ปีการศึกษา 2561 จากสถาบัน เทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขต ชุมพรเขตอรุณศักดิ์

ผลงานและกิจกรรม

- Summer camp in Harbin Institute of Technology, China
- ฝึกงานที่สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (ศูนย์นาโนเทคโนโลยีแห่งชาติ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน



ชื่อ-นามสกุล นายบุญฤทธิ์ วิศาลโกคะ
 วัน เดือน ปีเกิด วันที่ 15 เมษายน พ.ศ. 2540
 ภูมิลำเนา จังหวัดกรุงเทพมหานคร
 ที่อยู่ 528 ถ.เสียบคลองภาษีเจริญฝั่งใต้ แขวง
 หนองแขม เขตหนองแขม กรุงเทพมหานคร
 10160
 E-mail zipboonreal@gmail.com

ประวัติการศึกษา

- สำเร็จการศึกษาประถมศึกษาจากโรงเรียนยอแซฟอุปถัมภ์
- สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมต้นจากโรงเรียนยอแซฟอุปถัมภ์
- สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมปลายจากโรงเรียนยอแซฟอุปถัมภ์
- สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
 วศ.บ. (วิศวกรรมเครื่องกล) ปีการศึกษา 2561 จากสถาบัน
 เทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขต
 ชุมพรเขตอุดมศักดิ์

ผลงานและกิจกรรม

- Summer camp in Harbin Institute of Technology, China
- ฝึกงานที่ National Institute of Technology, Kushiro
 College, Japan
- ฝึกงานที่สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ
 (ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ MTEC)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้