การพัฒนาเครื่องมือวัดแรงแบบสามแนวแกนสำหรับการต่อพ่วงสามจุดของรถแทรกเตอร์เกษตรขนาดเล็ก

นายกวี คงมั่น

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเกษตรและอาหาร
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ปีการศึกษา 2555

DEVELOPMENT OF A TRIAXIAL DYNAMOMETER FOR THREE-POINT HITCH ON A SMALL-SCALE AGRICULTURAL TRACTOR

Kawee Khongman

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of Master of Engineering in Agricultural and Food Engineering

Suranaree University of Technology

Academic Year 2012

การพัฒนาเครื่องมือวัดแรงแบบสามแนวแกนสำหรับการต่อพ่วงสามจุด ของรถแทรกเตอร์เกษตรขนาดเล็ก

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

____
(ผศ. ดร.วีระศักดิ์ เลิศสิริโยธิน)
ประธานกรรมการ

____
(ผศ. ดร.พยุงศักดิ์ จุลยุเสน)
กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)

____
(อ. ดร.สามารถ บุญอาจ)
กรรมการ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

____
(ศ. ดร.ชูกิจ ลิมปิจำนงค์)
รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและนวัตกรรม

____
(รศ. ร.อ. ดร.กนต์ธร ชำนิประศาสน์)
คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

กวี คงมั่น: การพัฒนาเครื่องมือวัดแรงแบบสามแนวแกนสำหรับการต่อพ่วงสามจุดของรถแทรกเตอร์เกษตรขนาดเล็ก (DEVELOPMENT OF A TRIAXIAL DYNAMOMETER FOR THREE-POINT HITCH ON A SMALL-SCALE AGRICULTURAL TRACTOR) อาจารย์ที่ปรึกษา: ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พยุงศักดิ์ จุลยุเสน, 67 หน้า.

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาเครื่องมือวัดแรงแบบสามแนวแกนและระบบรวบรวมข้อมูลสำหรับการทดสอบสมรรถนะของรถแทรกเตอร์เกษตรที่ต่อพ่วงแบบสามจุด เครื่องมือวัดแรงสร้างจากทรานสดิวเซอร์แบบ extended circular ring (ECR) สองตัว ประกบไขว้กันทำให้สามารถวัดแรงในสามแนวแกนได้อย่างอิสระต่อกันความแข็งแรงของเครื่องมือวัดแรงแบบ ECR สามแกนและตำแหน่งที่เหมาะสมในการติดตั้งมาตรวัดความเครียดถูกวิเคราะห์โดยใช้วิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ การสอบเทียบเครื่องมือวัดแรงแบบ ECR สามแกน ถูกทำในห้องปฏิบัติการ เครื่องมือวัดแรงแบบ ECR สามแกน ถูกทดสอบในแปลงเกษตรเพื่อวัดแรงฉุดลาก แรงในแนวดิ่ง และแรงด้านข้าง ระบบรวบรวมข้อมูลถูกพัฒนาขึ้นเพื่อวัดความเร็ว ความสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิง การลื่นไถลของรถแทรกเตอร์ และแรงกระทำระหว่างรถแทรกเตอร์กับเครื่องมือเกษตร จากการออกแบบพบว่าเครื่องมือวัดแรงแบบ ECR สามแกน มีค่าความปลอดภัยเท่ากับ 2 และสามารถใช้งานได้กับรถแทรกเตอร์ใน category I ซึ่งมีค่าแรงในแนวราบสูงสุดไม่เกิน 20 กิโลนิวตัน ตำแหน่งที่เหมาะสมที่สุดในการติดตั้งมาตรวัดความเครียดของการวัดแรงในแนวราบ แรงในแนวดิ่ง และแรงในแนวด้านข้าง คือ 58°, 25° และ 25° ตามลำดับ ผลการสอบเทียบเครื่องมือวัดแรงแบบ ECR สามแกน พบว่าค่า cross sensitivities สูงสุดสำหรับการวัดแรงบนแขนบน แขนล่างซ้าย และแขนล่างขวาเท่ากับ 6.90%, 2.80% และ 4.07% ตามลำดับระบบรวบรวมข้อมูลสามารถทำงานได้อย่างถูกต้องแม่นยำ และสะดวกต่อการใช้งาน เครื่องมือวัดแรงและระบบรวบรวมที่ถูกพัฒนาขึ้นมามีประโยชน์ต่อการวิจัยและพัฒนาเครื่องมือเกษตรให้สามารถทำงานได้อย่างเหมาะสมกับสภาวะการทำการเกษตรของประเทศ

สาขาวิชาวิศวกรรมเกษตร ลายมือชื่อนักศึกษา________________________

ปีการศึกษา 2555 ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา__________________

KAWEE KHONGMAN : DEVELOPMENT OF A TRIAXIAL DYNAMOMETER FOR THREE-POINT HITCH ON A SMALL-SCALE AGRICULTURAL TRACTOR. THESIS ADVISOR : ASST. PROF. PAYUNGSAK JUNYUSEN, Ph.D., 67 PP.

TRIAXIAL DYNAMOMETER/FINITE ELEMENT/EXTENDED CIRCULAR RING

This study was aimed to develop a triaxial dynamometer and a data acquisition system for the performance testing of an agricultural tractor. The dynamometer was designed with two extended circular ring (ECR) transducers mounted in back-to-back arrangement with their longitudinal axis at right angles. The ECR dynamometer is capable of measuring forces in three dimensions, i.e. draft, vertical and side forces, independently. The strength of the dynamometer and the optimal strain gauge locations were investigated using the finite element method. The dynamometer calibration was done employing a laboratory universal testing machine. Field tests were conducted to evaluate the performance of the ECR dynamometer under an actual field condition. (Field tests were conducted to measure draft, vertical and side forces.). The data acquisition system was developed in order to measure ground speed, fuel consumption, slip and tractor-implement forces. The designed dynamometer was suitable with a tractor in category I which had the maximum draft force of 20 kN. The factor of safety of the ECR dynamometer was 2. The optimal strain gauge locations for measuring draft, vertical and side forces were 58, 25 and 25, respectively. Calibration results showed that the maximum cross sensitivities for force measurement on top, left lower and right lower links were 6.90%, 2.80% and 4.07% respectively. The data acquisition system performed well with high measurement

accuracy and be easy to use under a field condition. The dynamometer and the data acquisition system were considered useful and applicable for research on agricultural machinery meeting the country's agricultural condition.

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

School of Agricultural Engineering　　Student's Signature____________________

Academic Year 2012　　Advisor's Signature ____________________

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณบุคคลและกลุ่มบุคคลต่อไปนี้ ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษาแนะนำและช่วยเหลืออย่างดียิ่งทั้งในด้านวิชาการและด้านการดำเนินงานวิจัย

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พยุงศักดิ์ จุลยุเสนอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ที่เมตตาให้การ อบรม สั่งสอน ชี้แนะ ช่วยเหลือในการทำการศึกษาวิจัยตลอดจนให้คำแนะนำในการเขียนและตรวจแก้ไข วิทยานิพนธ์จนเสร็จสมบูรณ์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วีระศักดิ์เลิศสิริโยธิน ประธานกรรมการ ที่กรุณาให้การแนะนำในการทำการศึกษาวิจัย และชี้แนะแนวทางการเขียนวิทยานิพนธ์จนเสร็จสมบูรณ์

อาจารย์ ดร.สามารถ บุญอาจ กรรมการ ที่กรุณาให้การแนะนำ และชี้แนะแนวทางการเขียนวิทยานิพนธ์จนเสร็จสมบูรณ์

ขอขอบคุณคณาจารย์และบุคลากรในสาขาวิชาวิศวกรรมเกษตรทุกท่านที่คอยแนะนำ สั่งสอน ทั้งเรื่องการใช้ชีวิต วิชาการ และงานวิจัย ด้วยดีเสมอ

ขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีที่สนับสนุนทุนการศึกษา "ทุนการศึกษาสำหรับผู้มีศักยภาพเข้าศึกษาระดับบัณฑิตศึกษา"

ขอขอบคุณฟาร์มมหาวิทยาลัยที่เอื้อเฟื้อสถานที่ และบุคลากร จนกระทั่งงานวิจัยนี้เสร็จสมบูรณ์

ขอขอบคุณเพื่อนๆ พี่ๆ น้องๆ บัณฑิตศึกษาสาขาวิศวกรรมเกษตรทุกท่าน ที่ให้การช่วยเหลือทั้งในด้านการเรียน การสอบ และการทำวิจัย จนกระทั่งงานวิจัยนี้เสร็จสมบูรณ์

ท้ายนี้ ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณบิดามารดา และญาติมิตรที่ให้การอุปการะอบรมเลี้ยงดูตลอดจน ส่งเสริมการศึกษา และให้กำลังใจเป็นอย่างดีเสมอมาจนกระทั่งวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จ

กวี คงมั่น

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ(ภาษาไทย) .... ก
บทคัดย่อ(ภาษาอังกฤษ) .... ข
กิตติกรรมประกาศ .... ง
สารบัญ .... จ
สารบัญตาราง .... ซ
สารบัญรูป .... ฌ

บทที่

1 บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา 1
1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย 2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย 2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ 2

2 ปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 บทนำ 3
2.2 เครื่องมือวัดแรงแบบพ่วงสามจุด 5
2.3 มาตรวัดความเครียดและวงจร 9
2.4 ระบบรวบรวมข้อมูล 11

3 วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 บทนำ 12
3.2 การหาขนาดและการออกแบบเครื่องมือวัดแรงแบบ ECR สามแกน 13
3.3 วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ 13
3.3.1 การกำหนดเงื่อนไขการจำลองสถานการณ์ 13
3.3.2 การตรวจสอบความแข็งแรง 14
3.3.3 การกระจายตัวของความเครียดและตำแหน่งติดตั้งมาตรวัดความเครียด 14

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.4 การติดตั้งมาตรวัดความเครียด....15
3.5 การสอบเทียบและการตรวจสอบเพื่อยืนยันการใช้งาน....16
3.6 การติดตั้งอุปกรณ์วัดสมรรถนะของรถแทรกเตอร์....16
3.6.1 ชุดวัดแรงฉุดลาก....16
3.6.2 ชุดวัดการสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิง....17
3.6.3 ชุดวัดการลื่นไถลและความเร็วการทำงานของรถแทรกเตอร์....22
3.7 การสร้างระบบรวบรวมข้อมูลโดยใช้โปรแกรมLabVIEW....23
3.8 การทดสอบเครื่องมือวัดแรงแบบECR สามแกน....24

4 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลและอภิปรายผล

4.1 บทนำ....25
4.2 ผลการออกแบบเครื่องมือวัดแรงแบบECR สามแกน....25
4.3 วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์....26
4.3.1 เงื่อนไขการจำลองสถานการณ์....26
4.3.2 ผลการวิเคราะห์ความแข็งแรงของเครื่องมือวัดแรงแบบECR สามแกน....27
4.3.3 ตำแหน่งที่เหมาะสมที่สุดในการติดตั้งมาตรวัดความเครียด....28
4.4 การสร้างเครื่องมือวัดแรงและการติดตั้งมาตรวัดความเครียด....31
4.5 ผลการสอบเทียบและการตรวจสอบเพื่อยืนยันการใช้งาน....35
4.5.1 ผลการสอบเทียบ....35
4.5.2 ผลการตรวจสอบเพื่อยืนยันการใช้งาน....43
4.6 การติดตั้งอุปกรณ์วัดสมรรถนะของรถแทรกเตอร์....45
4.6.1 ชุดวัดแรงฉุดลาก....45
4.6.2 ชุดวัดการสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิง....46
4.6.3 ชุดวัดการลื่นไถลและความเร็วของรถแทรกเตอร์....47
4.7 ระบบรวบรวมข้อมูล....48
4.8 ผลการทดสอบเครื่องมือวัดแรงแบบECR สามแกน....49

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

5 บทสรุป 53
5.1 สรุปผลงานวิจัย..53
5.2 ข้อเสนอแนะ 53
รายการอ้างอิง...55
ภาคผนวก บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่..56
ประวัติผู้เขียน...67

สารบัญตาราง

ตารางที่ **หน้า**

3.1 ความหนาแน่นของน้ำมันดีเซล....... 20
4.1 ขนาดของเครื่องมือวัดแรงแบบ ECR สามแกน....... 26
4.2 สมการการสอบเทียบและค่า cross sensitivities ของเครื่องมือวัดแรงแบบ ECR สามแกน ... 42
4.3 ผลการตรวจสอบความเพื่อยืนยันการใช้งาน....... 44
4.4 ค่าความละเอียดของเซนเซอร์วัดน้ำมันเชื้อเพลิง....... 46
4.5 ผลการทดสอบเครื่องมือวัดแรงด้วยเครื่องขุดมันสำปะหลังแบบต่อพ่วงสามจุด....... 52

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สารบัญรูป

รูปที่ **หน้า**

2.1 การต่อพ่วงแบบสามจุดแบบแขนรั้ง....3
2.2 แรงต่างๆ ที่กระทำต่อเครื่องมือเกษตร....4
2.3 เครื่องมือวัดแรงแบบ ECR (ซ้าย) และเครื่องมือวัดแรงแบบ EOR (ขวา)....6
2.4 ตำแหน่งการติดตั้งมาตรวัดความเครียดของ Chen....6
2.5 แรงและโมเมนต์ที่กระทำบนเครื่องมือวัดแรงแบบ ECR....7
2.6 strain gauge แบบต่างๆ....10
2.7 การต่อ strain gauge เป็นวงจร wheatstone bridge....10
2.8 การทำงานของระบบ DAQ....11
3.1 แผนงานวิจัย....12
3.2 เครื่องมือวัดแรงแบบ ECR (ซ้าย) และเครื่องมือวัดแรงแบบ ECR สามแกน (ขวา)....13
3.3 ตำแหน่งการให้แรง....14
3.4 วงจรมาตรวัดความเครียด....15
3.5 เครื่องขุดมันสำปะหลัง....17
3.6 yokogawa MW100....17
3.7 การติดตั้งเซนเซอร์ในระบบน้ำมันเชื้อเพลิงสำหรับการสอบเทียบ....18
3.8 แผนผังการวัดการสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิงของรถแทรกเตอร์....20
3.9 oval gear flow-meter....21
3.10 เทอร์โมคัปเปิล....21
3.11 NI Daq wireless....22
3.12 proximity sensor....23
3.13 USB-6212 DAQ....23
4.1 การแบ่งเมชด้วยโปรแกรม ANSYS....26
4.2 ตำแหน่งจับยึดของเครื่องมือวัดแรงแบบ ECR สามแกน....27
4.3 ตำแหน่งการให้แรง....27
4.4 ค่าความเครียดเมื่อให้แรงสูงสุดทั้งสามแนวแกนพร้อมกัน....28

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ **หน้า**

4.5 ค่าความเครียดในแนวแกน x เมื่อให้แรงในแนวแกน x (ซ้าย), ค่าความเครียดในแนวแกน y เมื่อให้แรงในแนวแกน x (ขวา)........29
4.6 ค่าความเครียดในแนวแกน x เมื่อให้แรงในแนวแกน y (ซ้าย), ค่าความเครียดในแนวแกน y เมื่อให้แรงในแนวแกน y (ขวา)........29
4.7 ค่าความเครียดในแนวแกน x เมื่อให้แรงในแนวแกน x (ซ้าย), ค่าความเครียดในแนวแกน z เมื่อให้แรงในแนวแกน x (ขวา)........30
4.8 ค่าความเครียดในแนวแกน x เมื่อให้แรงในแนวแกน z (ซ้าย), ค่าความเครียดในแนวแกน z เมื่อให้แรงในแนวแกน z (ขวา)........30
4.9 ตำแหน่งการติดตั้งมาตรวัดความเครียด........31
4.10 แบบ drawing ของเครื่องมือวัดแรงแบบ ECR สามแกน........31
4.11 เครื่องมือวัดแรงแบบ ECR สามแกน........32
4.12 อุปกรณ์ปรับสภาพพื้นผิว........33
4.13 มาตรวัดความเครียด........33
4.14 การติดตั้งมาตรวัดความเครียด........34
4.15 เครื่องมือวัดแรงแบบ ECR สามแกน หลังติดอุปกรณ์ป้องกัน........34
4.16 การสอบเทียบเครื่องมือวัดแรงแบบ ECR สามแกน เมื่อให้แรงในแนวแกน x........35
4.17 การสอบเทียบเครื่องมือวัดแรงแบบ ECR สามแกน เมื่อให้แรงในแนวแกน y........36
4.18 การสอบเทียบเครื่องมือวัดแรงแบบ ECR สามแกน เมื่อให้แรงในแนวแกน z........36
4.19 เครื่องมือที่ใช้สำหรับการอ่านค่าแรง และความเครียด........37
4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงและความเครียดของ ECR ตัวที่ 1 เมื่อให้แรงในแนวแกน x........38
4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงและความเครียดของ ECR ตัวที่ 1 เมื่อให้แรงในแนวแกน y........38
4.22 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงและความเครียดของ ECR ตัวที่ 1 เมื่อให้แรงในแนวแกน z........39
4.23 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงและความเครียดของ ECR ตัวที่ 2 เมื่อให้แรงในแนวแกน x........39
4.24 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงและความเครียดของ ECR ตัวที่ 2 เมื่อให้แรงในแนวแกน y........40
4.25 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงและความเครียดของ ECR ตัวที่ 2 เมื่อให้แรงในแนวแกน z........40
4.26 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงและความเครียดของ ECR ตัวที่ 3 เมื่อให้แรงในแนวแกน x........41

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ **หน้า**

4.27 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงและความเครียดของECR ตัวที่ 3 เมื่อให้แรงในแนวแกน y 41
4.28 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงและความเครียดของECR ตัวที่ 3 เมื่อให้แรงในแนวแกน z.......... 42
4.29 วิธีการตรวจสอบเพื่อยืนยันการใช้งาน.......... 43
4.30 อุปกรณ์วัดค่าความเครียด.......... 43
4.31 การติดตั้งชุดวัดแรงฉุดลาก.......... 45
4.32 ตำแหน่งติดตั้งเครื่องมือวัดแรงบนชุดวัดแรงฉุดลาก.......... 45
4.33 ตำแหน่งติดตั้งชุดวัดน้ำมันเชื้อเพลิง.......... 46
4.34 ตำแหน่งติดตั้ง proximity สำหรับวัดระยะทางล้อขับ.......... 47
4.35 ตำแหน่งติดตั้ง proximity สำหรับวัดระยะทางล้อตาม.......... 47
4.36 หน้าจอแสดงผลค่าการสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิง ความเร็วในการทำงาน ความเร็วล้อขับ และการลื่นไถล.......... 48
4.37 หน้าจอแสดงผลค่าแรงในแนวแกน x y และ z.......... 49
4.38 ค่าความแข็งของดิน (cone index).......... 50
4.39 การทดสอบเครื่องมือวัดแรงด้วยเครื่องขุดมันสำปะหลังแบบต่อพ่วงสามจุด.......... 50
4.40 ตัวอย่างค่าแรงที่วัดได้ของแขนบน.......... 51
4.41 ตัวอย่างค่าแรงที่วัดได้ของแขนล่างซ้าย.......... 51
4.42 ตัวอย่างค่าแรงที่วัดได้ของแขนล่างขวา.......... 52

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

ปัจจุบันประเทศไทยกำลังเผชิญกับปัญหาการลดลงอย่างต่อเนื่องของพื้นที่และแรงงานทางด้านการเกษตร ในขณะที่ความต้องการผลผลิตที่ใช้สำหรับการบริโภคภายในประเทศและการส่งออกมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น การเกษตรของประเทศไทยในยุคปัจจุบันจึงต้องควบคุมการผลิตให้ได้ปริมาณผลผลิตที่เพียงพอต่อความต้องการ วิธีการหนึ่งที่จะสามารถช่วยแก้ปัญหาปริมาณผลผลิตไม่เพียงพอต่อความต้องการคือการพัฒนาเครื่องมือเกษตรให้สามารถทำงานได้อย่างเหมาะสมกับสภาวะการทำการเกษตรของประเทศ

เครื่องมือเกษตรส่วนใหญ่ที่เกษตรกรไทยใช้อยู่ในปัจจุบันถูกออกแบบและพัฒนาจากต่างประเทศ ซึ่งไม่สามารถทำงานได้อย่างเต็มประสิทธิภาพภายใต้สภาวะการทำการเกษตรของประเทศไทย ดังนั้นการพัฒนาเครื่องมือเกษตรให้สามารถทำงานได้อย่างเต็มประสิทธิภาพในแต่ละพื้นที่นั้นจึงเป็นสิ่งที่สำคัญยิ่ง แรงกระทำระหว่างดินและเครื่องมือเกษตรเป็นตัวแปรที่สำคัญสำหรับการพัฒนาเครื่องมือเกษตรให้มีประสิทธิภาพสูง แรงนี้มีผลโดยตรงต่อความสามารถของรถแทรกเตอร์ในด้านต่างๆ เช่น ความสามารถในการฉุดลาก เสถียรภาพ และการบังคับเลี้ยว เป็นต้น ถึงแม้ว่าการวัดแรงกระทำระหว่างดินและเครื่องมือเกษตรโดยตรงนั้นจะทำได้ยาก แต่ถ้าหากสามารถวัดแรงลัพธ์ที่รถแทรกเตอร์ฉุดลากเครื่องมือเกษตร และทราบน้ำหนักของเครื่องมือเกษตรก็สามารถคำนวณหาแรงกระทำระหว่างดินและเครื่องมือเกษตรได้

แรงลัพธ์ที่รถแทรกเตอร์ฉุดลากเครื่องมือเกษตรสามารถวัดได้จากแรงที่กระทำต่อจุดพ่วงระหว่างรถแทรกเตอร์เกษตรและเครื่องมือเกษตรซึ่งประกอบด้วยแรงย่อยสามแรง คือ แรงในแนวราบหรือแรงฉุดลาก (horizontal force or draft force), แรงในแนวดิ่ง (vertical force) และแรงด้านข้าง (side force) การวัดแรงทั้งสามนี้สามารถวัดได้ที่จุดต่อพ่วงระหว่างรถแทรกเตอร์เกษตรกับเครื่องมือเกษตรซึ่งมีลักษณะการต่อพ่วงแตกต่างกันไปตามลักษณะการใช้งาน ได้แก่ คานลาก (drawbar) หรือแขนพ่วง (link) จากการทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้องนั้นมักจะไม่ให้ความสำคัญกับแรงด้านข้างเนื่องจากเป็นแรงที่มีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับแรงในแนวอื่นๆ อย่างไรก็ตามแรงในแนวด้านข้างส่งผลโดยตรงต่อการบังคับเลี้ยวของรถแทรกเตอร์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อนำเครื่องมือเกษตรแบบพ่วง 3 จุดต่อพ่วงกับรถแทรกเตอร์ขนาดเล็กซึ่งเป็นรถแทรกเตอร์ที่เกษตรกรในประเทศนิยมใช้

เครื่องมือเกษตรแบบพ่วงสามจุดเป็นเครื่องมือที่เกษตรกรในประเทศนิยมใช้งาน งานวิจัยนี้มีแนวคิดที่จะสร้างเครื่องมือวัดแรงแบบสามแนวแกนและสร้างระบบรวบรวมข้อมูลสำหรับการทดสอบสมรรถนะของรถแทรกเตอร์เกษตรขนาดเล็กที่ต่อพ่วงแบบสามจุด ส่งผลให้สามารถวัดแรงกระทำระหว่างรถแทรกเตอร์และเครื่องมือเกษตรได้อย่างแม่นยำและถูกต้องค่าแรงที่ถูกวัดสามารถนำไปออกแบบและพัฒนาเครื่องจักรกลเกษตรให้สามารถทำงานได้อย่างเหมาะสมกับสภาวะการทำการเกษตรของประเทศ

1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย

1. เพื่อออกแบบ สร้าง และทดสอบเครื่องมือวัดแรงแบบสามแนวแกนสำหรับการต่อพ่วงสามจุดของรถแทรกเตอร์เกษตรขนาดเล็ก
2. สร้างระบบรวบรวมข้อมูลสำหรับการทดสอบสมรรถนะของรถแทรกเตอร์เกษตรขนาดเล็กที่ต่อพ่วงแบบสามจุด

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

โครงการวิจัยนี้จะทำการออกแบบและสร้างเครื่องมือวัดแรงแบบสามแนวแกนสำหรับการต่อพ่วงสามจุดของรถแทรกเตอร์เกษตรขนาดเล็กที่มีขนาดการต่อพ่วงใน category I และทำการทดสอบการฉุดลากด้วยเครื่องขุดมันสำปะหลัง ณ แปลงเกษตรของฟาร์มมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

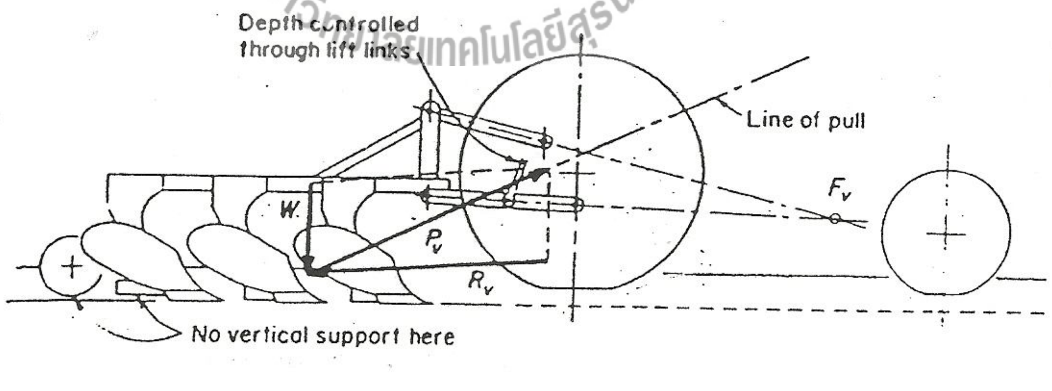
1. ได้เครื่องมือวัดแรงสามแนวแกนสำหรับการต่อพ่วงสามจุดของรถแทรกเตอร์เกษตรขนาดเล็ก ที่เป็นประโยชน์ต่อนักวิจัยในการพัฒนาเครื่องมือทางการเกษตรให้เหมาะสมกับการทำการเกษตรของประเทศ
2. ได้ระบบรวมรวบข้อมูลสำหรับการทดสอบสมรรถนะของรถแทรกเตอร์เกษตรขนาดเล็กที่ต่อพ่วงแบบสามจุด ซึ่งสามารถเพิ่มความสะดวก ถูกต้อง แม่นยำ และรวดเร็ว ในการประมวลผลข้อมูล ทำให้นักวิจัยสามารถทำงานได้ง่ายขึ้น

บทที่ 2
ปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 บทนำ

การต่อพ่วงระหว่างรถแทรกเตอร์และเครื่องมือเกษตรแบ่งออกเป็น 3 แบบ ได้แก่ แบบที่หนึ่งการพ่วงจุดเดียว (one point linkage) หรือ trailed type, แบบที่สองการพ่วงสองจุด (two point linkage) หรือ semi-mounted และแบบที่สามการพ่วงแบบสามจุด (three point linkage) หรือ mounted การพ่วงลากแต่ละแบบมีผลต่อเสถียรภาพและการควบคุมการทำงานและประสิทธิภาพของรถแทรกเตอร์ขณะพ่วงลากเครื่องมือ

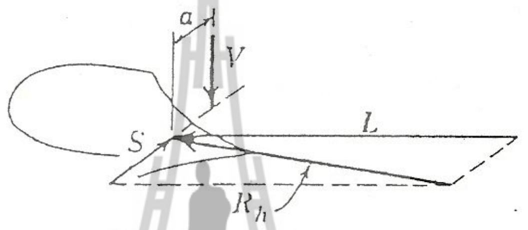
การต่อพ่วงแบบสามจุดในลักษณะแขนพ่วงแบบรั้ง (แนวแขนพ่วงบรรจบกัน) ดังรูปที่ 2.1 เป็นการต่อพ่วงที่เกษตรกรในประเทศไทยนิยมใช้ การต่อพ่วงลักษณะนี้ น้ำหนักของเครื่องมือเกษตรทั้งหมดถูกรองรับโดยรถแทรกเตอร์ เช่น กรณีที่ไถหัวหมูตัดลงไปในดินจนได้ความลึกที่ต้องการแล้ว ไถหัวหมูจะถูกรั้งไว้ด้วยระบบไฮดรอลิก การต่อพ่วงแบบนี้จะมีช่องว่างระหว่างส้นไถกับพื้นร่องไถ และช่องว่างระหว่างล้อคัดท้ายกับพื้น ซึ่งทำให้สามารถควบคุมไถให้สามารถตัดลงไปในดินได้ลึกเพิ่มขึ้นอีกตามต้องการ



รูปที่ 2.1 การต่อพ่วงแบบสามจุดแบบแขนรั้ง

โดยทั่วไปในขณะที่เครื่องมือเกษตรถูกพ่วงลากไปในดิน แรงของดินที่กระทำต่อเครื่องมือเกษตรส่วนที่สัมผัสกับดินหรืออยู่ในดิน อันเนื่องมาจากการเคลื่อนที่ของเครื่องมือเกษตรจะประกอบด้วย

1. แรงที่ใบไถตัด พลิก เคลื่อนย้ายดินเรียกว่า useful soil forces ซึ่งประกอบด้วยแรงลัพธ์ในทิศทางการเคลื่อนที่ของเครื่องมือเกษตร (L), แรงด้านข้าง (S) และแรงในแนวดิ่ง (V) ซึ่งรวมเป็นแรงลัพธ์ R_h ดังแสดงในรูปที่ 2.2
2. แรงเสียดทานของดินที่กระทำต่อเครื่องมือเกษตร parasitic soil force หมายถึง แรงที่ไม่ได้ใช้ในการตัด พลิก หรือเคลื่อนย้ายตามวัตถุประสงค์ของการเตรียมดิน



รูปที่ 2.2 แรงต่างๆ ที่กระทำต่อเครื่องมือเกษตร

การวัดแรงฉุดลากของรถแทรกเตอร์ที่ต่อพ่วงเครื่องมือเกษตรแบบพ่วงลาก (trailed implement) สามารถทำได้โดยการใช้เครื่องวัดแรงแบบคานลาก(drawbar dynamometer) เชื่อมต่อระหว่างรถแทรกเตอร์และเครื่องมือเกษตร ส่วนการวัดแรงฉุดลากของรถแทรกเตอร์ที่ต่อพ่วงเครื่องมือเกษตรแบบพ่วงบนรถแทรกเตอร์ (mounted implement) สามารถทำได้โดยการใช้รถแทรกเตอร์อีกคันหนึ่งลากรถแทรกเตอร์ที่ต่อพ่วงเครื่องมือเกษตรและติดเครื่องมือวัดแรงไว้ระหว่างรถแทรกเตอร์ทั้งสอง ขณะทำการวัดแรงเกียร์ของรถแทรกเตอร์คันหลังอยู่ในตำแหน่งเกียร์ว่าง ผลต่างของแรงที่วัดได้ขณะรถแทรกเตอร์คันหลังถูกลากโดยที่เครื่องมือเกษตรทำงานบนพื้นดินและเครื่องมือเกษตรถูกยกขึ้นจากพื้นดินคือ ค่าแรงฉุดลากของรถแทรกเตอร์คันหลังที่กระทำต่อเครื่องมือเกษตร อย่างไรก็ตามวิธีการวัดแรงแบบนี้มีความยุ่งยากในการปฏิบัติและไม่สามารถทราบค่าแรงในแต่ละข้างของแขนพ่วงทั้งสามแขนได้ ดังนั้นการวัดแรงที่ต้องการทราบค่าแรงที่แขนพ่วงทั้งสามแขนอย่างละเอียดจำเป็นต้องใช้ เครื่องมือวัดแรงแบบพ่วงสามจุด (three-point hitch dynamometer)

2.2 เครื่องมือวัดแรงแบบพ่วงสามจุด

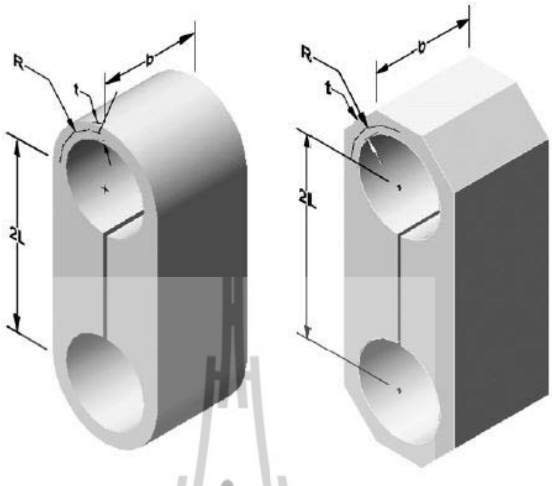
เครื่องมือวัดแรงแบบพ่วงสามจุดถูกออกแบบเพื่อวัดแรงกระทำระหว่างรถแทรกเตอร์และเครื่องมือเกษตรแบบพ่วงแบบสามจุด (three-point hitch implement) การออกแบบเครื่องวัดแรงแบบพ่วงสามจุดนี้สามารถทำได้โดยการสร้างทรานสดิวเซอร์วัดแรง (force transducer) แบบ extended octagonal ring (EOR) ติดตั้งบนชุดต่อพ่วงเร็ว (quick-attaching coupler) เพื่อวัดแรงกระทำที่แขนพ่วงทั้งสามแขนของรถแทรกเตอร์ ทรานสดิวเซอร์วัดแรงแบบ EOR สามารถวัดแรงในแต่ละแนวได้อย่างอิสระต่อกันและมีความแม่นยำสูง โดยไม่ต้องทำการดัดแปลงชิ้นส่วนของรถแทรกเตอร์และเครื่องมือเกษตร ส่วนชุดต่อพ่วงเร็วเป็นโครงสร้างที่ช่วยให้การต่อพ่วงระหว่างรถแทรกเตอร์และเครื่องมือเกษตรทำได้ง่ายและรวดเร็ว ดังนั้นเครื่องมือวัดแรงที่ออกแบบโดยใช้หลักการข้างต้นนี้จะสามารถนำไปใช้งานได้ง่ายและวัดค่าแรงได้อย่างถูกต้องแม่นยำ

เครื่องมือวัดแรงแบบพ่วงสามจุดนี้ นักวิจัยมักต้องสร้างขึ้นเองเมื่อต้องการทดสอบความต้องการแรงฉุดลากของเครื่องมือเกษตร ซึ่งเครื่องมือวัดแรงแต่ละชิ้นถูกออกแบบมาให้สอดคล้องและตอบสนองต่อสภาพการใช้งานของเครื่องมือเกษตรในพื้นที่การเกษตรนั้น ๆ (Alimardani et al., 2008; Kheiralla et al., 2003; Palmer, 1992; Reece, 1961) จากการทบทวนงานวิจัยพบว่า งานวิจัยเกี่ยวกับการออกแบบเครื่องมือวัดแรงแบบพ่วงสามจุดวัดแรงสองแนวแกนมีจำนวนมาก ปัจจุบันนักวิจัยเริ่มให้ความสนใจกับเครื่องมือวัดแรงแบบพ่วงสามจุดวัดแรงสามแนวแกนซึ่งพัฒนามาจากเครื่องมือวัดแรงแบบสองแนวแกนมากขึ้นเพราะสามารถให้รายละเอียดของแรงได้ทุกมิติ (Godwin et al., 1993) และนำข้อมูลของแรงไปพัฒนาเครื่องจักรกลเกษตร เช่น ล้อรถไถเดินตาม ไถจาน เป็นต้นเพื่อนำไปสร้างและพัฒนาล้อรถไถเดินตาม ไถจาน เป็นต้น (Watyotha et al., 2001; Parish et al., 2010)

เครื่องมือวัดแรงแบบ EOR ดังแสดงในรูปที่ 2.3 เป็นอุปกรณ์ที่นิยมสำหรับการวัดแรงและโมเมนต์ในงานวิจัยทางวิศวกรรมเกษตร เพราะสามารถวัดแรงกระทำในแต่ละแนวแกน คือ แรงในแนวราบ และแรงในแนวดิ่ง ได้อย่างอิสระเครื่องมือวัดแรงแบบ EOR ถูกพัฒนามาจากทฤษฎีของเครื่องมือวัดแรงแบบ extended circular ring (ECR) เพราะสามารถขึ้นรูปและติดตั้งมาตรวัดความเครียดได้สะดวกกว่า (McLaughlin, 1996) แต่จากการศึกษางานวิจัยของนักวิจัยบางท่าน พบว่าในบางกรณีตำแหน่งที่เหมาะสมที่สุดในการติดตั้งมาตรวัดความเครียดอยู่ตำแหน่งที่เป็นเหลี่ยมของเครื่องมือวัดแรงแบบ EOR นักวิจัยจึงแก้ปัญหานี้ด้วยการติดตั้งมาตรวัดความเครียดภายในวงแหวนของเครื่องมือวัดแรงแบบ EOR (Chen et al., 2007) ดังรูปที่ 2.4

ด้วยความก้าวหน้าของเทคโนโลยีปัจจุบันในการกัด กลึง ชิ้นงาน ส่งผลให้เครื่องมือวัดแรงแบบ ECR เป็นเครื่องมือวัดแรงที่นิยมใช้กันมากขึ้น เพราะนอกจากจะสามารถขึ้นรูปชิ้นงานได้ง่าย

ขึ้นแล้ว การออกแบบเครื่องมือวัดแรงแบบ ECR ยังมีทฤษฎีรองรับ และสามารถเลือกตำแหน่งติดตั้งมาตรวัดความเครียดที่เหมาะสมที่สุดได้



รูปที่ 2.3 เครื่องมือวัดแรงแบบ ECR (ซ้าย) และเครื่องมือวัดแรงแบบ EOR (ขวา)

รูปที่ 2.4 ตำแหน่งการติดตั้งมาตรวัดความเครียดของ Chen

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ในการติดตั้งมาตรวัดความเครียดเพื่อวัดค่าของแรงที่กระทำบน ECR มาตรวัดความเครียดจะต้องถูกติดตั้งบนผิวของ ECR ตรงตำแหน่งมุม ϕ ที่มีความเค้นและความเครียดน้อยที่สุด เรียกมุม ϕ นี้ว่า nodal angle จากการคำนวณพบว่า มุม nodal ของวงจรวัดแรง F_x และ F_y จะมีค่าเท่ากับ 90^o

และ 39.6 ° ตามลำดับ การติดตั้งมาตรวัดความเครียดตรงตำแหน่งมุมnodal จะทำให้วัดค่าแรง F_x และ F_y อย่างอิสระต่อกัน แต่ในหลายๆ งานวิจัยพบว่ามุม nodal ที่นักวิจัยใช้ไม่ตรงกับค่าทฤษฎี งานวิจัยบางงานจึงทำการหาตำแหน่งติดตั้งมาตรวัดความเครียดใหม่ตามอุปกรณ์วัดแรงที่นักวิจัยสร้างขึ้นมาโดยใช้วิธีfinite element (Chen et al., 2007; Youself et al., 2010)

เครื่องมือวัดแรงแบบ ECR สามารถวัดแรงสองแนวแกนได้เป็นอิสระต่อกัน เมื่อนำมาประยุกต์ใช้วัดแรงกระทำระหว่างรถแทรกเตอร์และเครื่องมือเกษตรแบบพ่วงสามจุด เครื่องมือวัดแรงแบบ ECR สามารถวัดค่าของแรงในแนวราบ (draft force, F_x) และแรงในแนวดิ่ง (veritcal force, F_y) ได้ ดังรูปที่ 2.5 โดยแรงทั้งสองแนวแกนจะทำให้เกิดความเค้นดัด(bending stress, σ) บนผิวของเครื่องมือวัดแรงแบบ ECR การออกแบบเครื่องมือวัดแรงแบบ ECR สามารถคำนวณได้โดยใช้หลักกลศาสตร์เบื้องต้น เมื่อพิจารณาสมการโมเมนต์ดัด จะได้ว่าความเค้นดัดบนผิวของอุปกรณ์วัดแรงแบบECR มีค่าดังสมการ

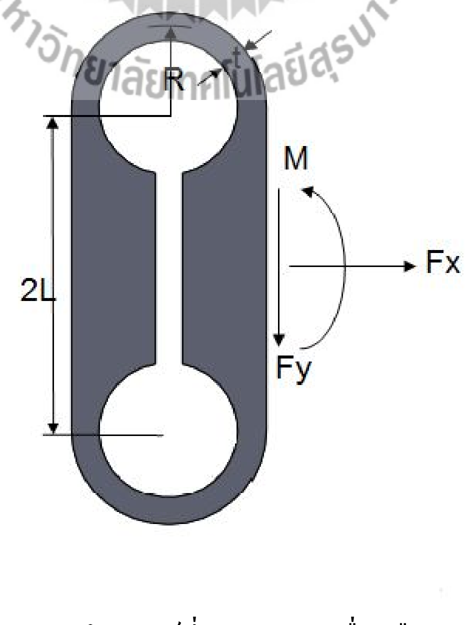
$$\sigma = \frac{Mc}{I} \tag{2.1}$$

โดยที่ σ คือ ความเค้นดัด, MPa

M คือ โมเมนต์ดัด, N.mm

c คือ ระยะระหว่างแกนสะเทินถึงผิวของ ECR, mm

I คือ โมเมนต์ความเฉื่อย, mm^4



รูปที่ 2.5 แรงและโมเมนต์ที่กระทำบนเครื่องมือวัดแรงแบบECR

เมื่อพิจารณาความเค้นดัดที่เกิดขึ้นบนพื้นที่ผิวของเครื่องมือวัดแรงแบบ ECR ที่เป็นรูปสี่เหลี่ยม $(c = \frac{t}{2}, I = \frac{bt^3}{12})$ จะได้

$$\sigma = \frac{6M_\phi}{bt^2} \tag{2.2}$$

โดยที่ M_ϕ คือ โมเมนต์ดัดที่มุมใดๆ, N.mm

b คือ ความกว้างของ ECR, mm

t คือ ความหนาวงแหวนของ ECR, mm

การออกแบบเครื่องมือวัดแรงจะพิจารณาจากค่าโมเมนต์ดัด ($M_Ø$) ซึ่งจะมีค่าแตกต่างกันตามรูปร่างของเครื่องมือวัดแรง สำหรับเครื่องมือวัดแรงแบบ ECR สามารถคำนวณโดยมีพื้นฐานเบื้องต้นมาจากสมการของ (Hoag et al., 1975) และใช้เทคนิคเกี่ยวกับค่าพลังงานความเครียดในการวิเคราะห์โมเมนต์ดัดในหน้าตัดของ ECR ซึ่งต่อมา (McLaughlin, 1996) พบว่ามีข้อผิดพลาดบางประการ จึงได้เสนอสมการเพื่อปรับแก้ข้อผิดพลาดของโมเมนต์ดัดในหน้าตัดของ ECR นั้น ๆ โดยค่าโมเมนต์ดัดที่มุม ϕ ภายใต้แรงกระทำของแรง 2 แรง คือ F_x และ F_y แสดงดังสมการต่อไปนี้

$$M_\phi = \frac{F_x R}{2}\left(\frac{2}{\pi} - \sin\phi\right) + \frac{F_y R}{2}\cos\phi + \frac{M_0\left[\left(2 + \frac{R\pi}{2L}\right) - \left(\frac{2R}{L} + \pi\right)\sin\phi\right]}{\left(8 + \frac{R\pi}{L} + \frac{2L\pi}{R}\right)} ; 0 < \phi < \pi \tag{2.3}$$

$$M_\phi = \frac{F_x R}{2}\left(\frac{2}{\pi} + \sin\phi\right) - \frac{F_y R}{2}\cos\phi - \frac{M_0\left[\left(2 + \frac{R\pi}{2L}\right) - \left(\frac{2R}{L} + \pi\right)\sin\phi\right]}{\left(8 + \frac{R\pi}{L} + \frac{2L\pi}{R}\right)} ; \pi < \phi < 2\pi \tag{2.4}$$

โดยที่ M_o คือ โมเมนต์ภายนอก, N.mm

F_x คือ แรงในแนวราบ, N

F_y คือ แรงในแนวดิ่ง, N

ϕ คือ มุมที่วัดตามเข็มนาฬิกาโดยเริ่มจากทางด้านขวาของวงแหวน, rad

R คือ รัศมีเฉลี่ยของวงแหวนถึงจุดศูนย์กลางวงกลม, mm

L คือ ระยะครึ่งหนึ่งระหว่างจุดศูนย์กลาง,mm

ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดในช่วงขีดจำกัดความยืดหยุ่นของวัสดุเหนียวสามารถหาได้จาก $\sigma = \varepsilon E$ ดังนั้นค่าความเครียดที่เป็นผลมาจากแรงF_x และแรง F_y คำนวณได้จาก

$$\varepsilon = \frac{6M_\phi}{Ebt^2} \tag{2.5}$$

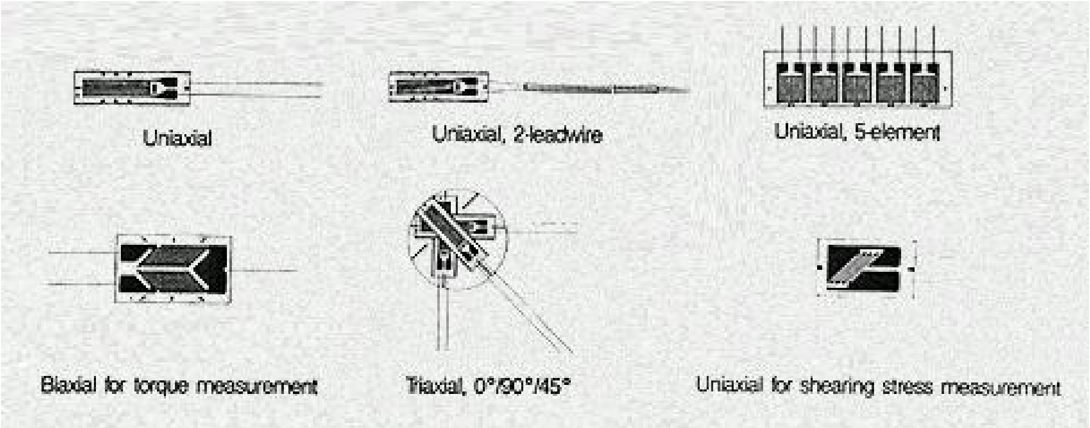
โดยที่ E คือ โมดูลัสความยืดหยุ่น,N/m^2

ความหนาของเครื่องมือวัดแรงแบบECR คำนวณได้จาก

$$t = \sqrt{\frac{6M_\phi}{Eb\varepsilon}} \tag{2.6}$$

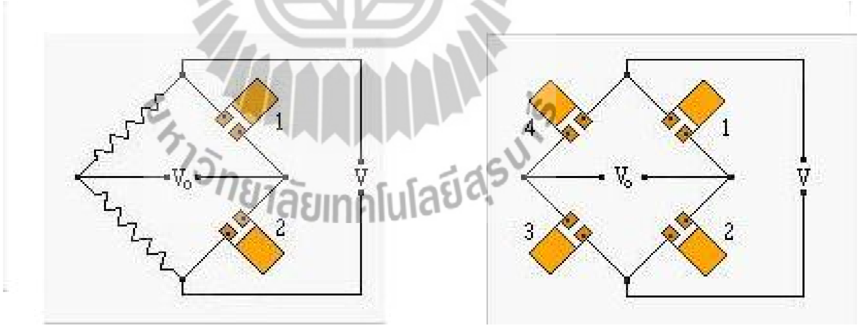
2.3 มาตรวัดความเครียดและวงจร

มาตรวัดความเครียด (strain gauge) เป็นอุปกรณ์ตรวจวัดทางเครื่องกลไฟฟ้าชนิดหนึ่งมีลักษณะเป็นแผ่นโลหะบางและมีคุณสมบัติความต้านทานทางไฟฟ้าส่วนใหญ่ทำจากโลหะผสม copper-nickel alloy สามารถยึดติดกับผิวของส่วนประกอบของเครื่องจักรกลหรือโครงสร้างด้วยตัวยึดหรือกาว มาตรวัดความเครียดสามารถเปลี่ยนแปลงปริมาณของแรงหรือน้ำหนักที่กระทำต่อเครื่องจักรกลหรือโครงสร้างไปเป็นปริมาณทางไฟฟ้าซึ่งสามารถตรวจวัดและแปลงกลับเป็นค่าแรงหรือน้ำหนักที่กระทำได้ จากการสอบเทียบ (calibration) มาตรวัดความเครียดมีรูปแบบต่างๆกันดังแสดงในรูปที่ 2.6 รูปแบบที่นิยมใช้มากที่สุดเป็นแบบแผ่น foil มาตรวัดความเครียดที่ใช้กันในปัจจุบันมีชนิดความต้านทาน(R_g) 120 Ωและ 350 Ω



รูปที่ 2.6 strain gauge แบบต่างๆ

เมื่อชิ้นส่วนของเครื่องจักรกลหรือโครงสร้างถูกภาระ (load) กระทำจะเกิดความเครียดขึ้น และส่งผ่านไปยังมาตรวัดความเครียดซึ่งติดอยู่ที่ผิวเป็นผลให้ความต้านทานทางไฟฟ้าของมาตรวัดความเครียดเปลี่ยนแปลงและแปรผันออกมาเป็นสัญญาณแรงดันไฟฟ้า(voltage) ด้วยวงจรปรับแต่งสัญญาณ (conditioning circuit) แบบ wheatstone bridge ดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 การต่อ strain gauge เป็นวงจร wheatstone bridge

สำหรับวงจร wheatstone bridge ที่ใช้มาตรวัดความเครียด 4 ตัวและมีแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าคงที่ ความสัมพันธ์ระหว่างความเครียด, ε ที่เกิดขึ้นกับการเปลี่ยนแปลงสัญญาณแรงดันไฟฟ้า output (V_0) เป็นไปตามสมการ

$$V_0 = \frac{V}{4} K_s (\varepsilon_1 - \varepsilon_2 + \varepsilon_3 - \varepsilon_4) \tag{2.7}$$

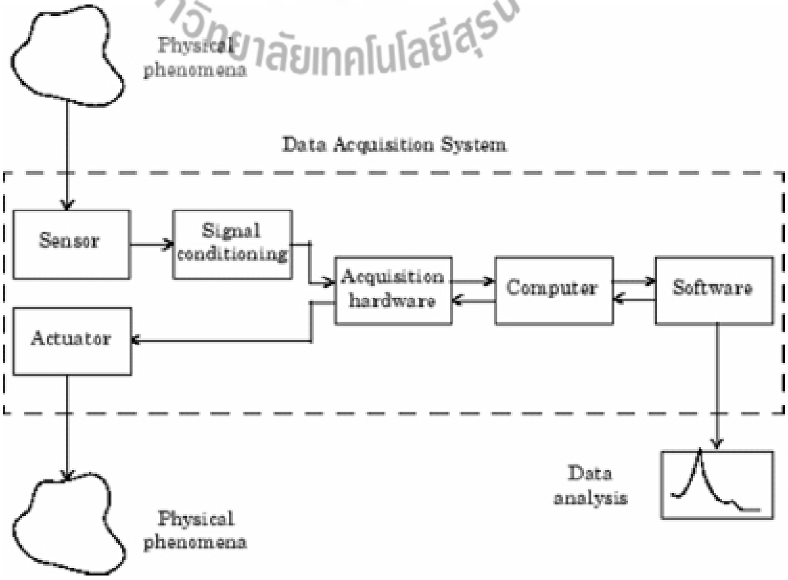
โดยที่ V เป็นค่าแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้วงจร

K_S เป็นค่า gauge factor หรือความไวของ gauge โดยปกติมีค่าประมาณ 2.0

2.4 ระบบรวบรวมข้อมูล

ระบบรวบรวมข้อมูล (data acquisition, DAQ) เป็นการเก็บรวบรวมวิเคราะห์ข้อมูลจริงในงานวิจัยทดลองวิทยาศาสตร์และทดสอบงานทางด้านวิศวกรรมเชิงคุณภาพและประสิทธิผลผ่านคอมพิวเตอร์ โดยมีความแตกต่างจากงานระบบคอมพิวเตอร์ทั่วไปตรงที่มีฮาร์ดแวร์พิเศษเพื่อตรวจจับสัญญาณทางกายภาพทางวิทยาศาสตร์ อาทิเช่น อุณหภูมิ ความดันอากาศ ก๊าซ อัตราการไหล เป็นต้น แปลงเข้าสู่ระบบคอมพิวเตอร์เป็นรูปแบบในลักษณะสัญญาณทางไฟฟ้า เข้าสู่ระบบคอมพิวเตอร์ผ่านซอฟต์แวร์ประยุกต์ที่ถูกพัฒนาขึ้นตามคุณลักษณะของงานวิจัยทดลองนั้นๆ ในลักษณะเวลาจริง (real time) ซึ่งในอดีตมักใช้เป็นระบบเฉพาะเจาะจงลงไปตามประเภทงาน ไม่สามารถใช้งานร่วมกับงานวิจัยอื่นได้ ทั้งยังมีราคาที่สูงมาก ทว่าด้วยความสามารถของคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคลในปัจจุบัน ประกอบกับการใช้งานที่ง่ายขึ้นของซอฟต์แวร์ ระบบปฏิบัติการในลักษณะที่เป็นวินโดว์หรือกราฟฟิก ทำให้การประยุกต์เพื่อนำคอมพิวเตอร์มาใช้ในงานด้านDAQ นี้มีความเป็นไปได้อย่างไม่ยุ่งยาก และให้ความคล่องตัวกับนักวิทยาศาสตร์ นักวิจัยทดลองและวิศวกร ลักษณะการทำงานของระบบDAQ แสดงดังรูปที่ 2.8

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



รูปที่ 2.8 การทำงานของระบบDAQ

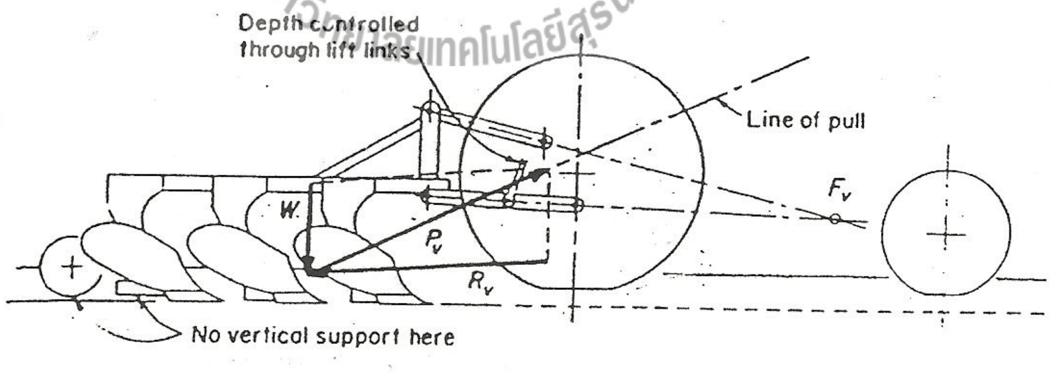
บทที่ 2
ปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 บทนำ

การต่อพ่วงระหว่างรถแทรกเตอร์และเครื่องมือเกษตรแบ่งออกเป็น 3 แบบ ได้แก่ แบบที่หนึ่งการพ่วงจุดเดียว (one point linkage) หรือ trailed type, แบบที่สองการพ่วงสองจุด (two point linkage) หรือ semi-mounted และแบบที่สามการพ่วงแบบสามจุด (three point linkage) หรือ mounted การพ่วงลากแต่ละแบบมีผลต่อเสถียรภาพและการควบคุมการทำงานและประสิทธิภาพของรถแทรกเตอร์ขณะพ่วงลากเครื่องมือ

การต่อพ่วงแบบสามจุดในลักษณะแขนพ่วงแบบรั้ง (แนวแขนพ่วงบรรจบกัน) ดังรูปที่ 2.1 เป็นการต่อพ่วงที่เกษตรกรในประเทศไทยนิยมใช้ การต่อพ่วงลักษณะนี้น้ำหนักของเครื่องมือเกษตรทั้งหมดถูกรองรับโดยรถแทรกเตอร์ เช่น กรณีที่ไถหัวหมูตัดลงไปในดินจนได้ความลึกที่ต้องการแล้ว ไถหัวหมูจะถูกรั้งไว้ด้วยระบบไฮดรอลิก การต่อพ่วงแบบนี้จะมีช่องว่างระหว่างส้นไถกับพื้นร่องไถ และช่องว่างระหว่างล้อคัดท้ายกับพื้น ซึ่งทำให้สามารถควบคุมไถให้สามารถตัดลงไปในดินได้ลึกเพิ่มขึ้นอีกตามต้องการ

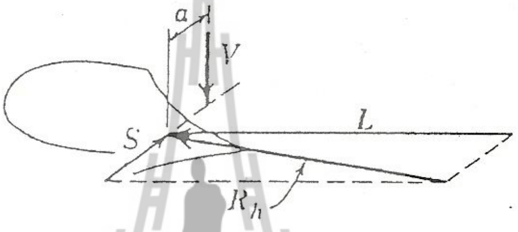
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



รูปที่ 2.1 การต่อพ่วงแบบสามจุดแบบแขนรั้ง

โดยทั่วไปในขณะที่เครื่องมือเกษตรถูกพ่วงลากไปในดิน แรงของดินที่กระทำต่อเครื่องมือเกษตรส่วนที่สัมผัสกับดินหรืออยู่ในดิน อันเนื่องมาจากการเคลื่อนที่ของเครื่องมือเกษตรจะประกอบด้วย

1. แรงที่ใบไถตัด พลิก เคลื่อนย้ายดินเรียกว่า useful soil forces ซึ่งประกอบด้วยแรงลัพธ์ในทิศทางการเคลื่อนที่ของเครื่องมือเกษตร (L), แรงด้านข้าง (S) และแรงในแนวดิ่ง (V) ซึ่งรวมเป็นแรงลัพธ์ R_h ดังแสดงในรูปที่ 2.2
2. แรงเสียดทานของดินที่กระทำต่อเครื่องมือเกษตร parasitic soil force หมายถึง แรงที่ไม่ได้ใช้ในการตัด พลิก หรือเคลื่อนย้ายตามวัตถุประสงค์ของการเตรียมดิน



รูปที่ 2.2 แรงต่างๆ ที่กระทำต่อเครื่องมือเกษตร

การวัดแรงฉุดลากของรถแทรกเตอร์ที่ต่อพ่วงเครื่องมือเกษตรแบบพ่วงลาก (trailed implement) สามารถทำได้โดยการใช้เครื่องวัดแรงแบบคานลาก(drawbar dynamometer) เชื่อมต่อระหว่างรถแทรกเตอร์และเครื่องมือเกษตร ส่วนการวัดแรงฉุดลากของรถแทรกเตอร์ที่ต่อพ่วงเครื่องมือเกษตรแบบพ่วงบนรถแทรกเตอร์ (mounted implement) สามารถทำได้โดยการใช้รถแทรกเตอร์อีกคันหนึ่งลากรถแทรกเตอร์ที่ต่อพ่วงเครื่องมือเกษตรและติดเครื่องมือวัดแรงไว้ระหว่างรถแทรกเตอร์ทั้งสอง ขณะทำการวัดแรงเกียร์ของรถแทรกเตอร์คันหลังอยู่ในตำแหน่งเกียร์ว่าง ผลต่างของแรงที่วัดได้ขณะรถแทรกเตอร์คันหลังถูกลากโดยที่เครื่องมือเกษตรทำงานบนพื้นดินและเครื่องมือเกษตรถูกยกขึ้นจากพื้นดินคือ ค่าแรงฉุดลากของรถแทรกเตอร์คันหลังที่กระทำต่อเครื่องมือเกษตร อย่างไรก็ตามวิธีการวัดแรงแบบนี้มีความยุ่งยากในการปฏิบัติและไม่สามารถทราบค่าแรงในแต่ละข้างของแขนพ่วงทั้งสามแขนได้ ดังนั้นการวัดแรงที่ต้องการทราบค่าแรงที่แขนพ่วงทั้งสามแขนอย่างละเอียดจำเป็นต้องใช้ เครื่องมือวัดแรงแบบพ่วงสามจุด (three-point hitch dynamometer)

2.2 เครื่องมือวัดแรงแบบพ่วงสามจุด

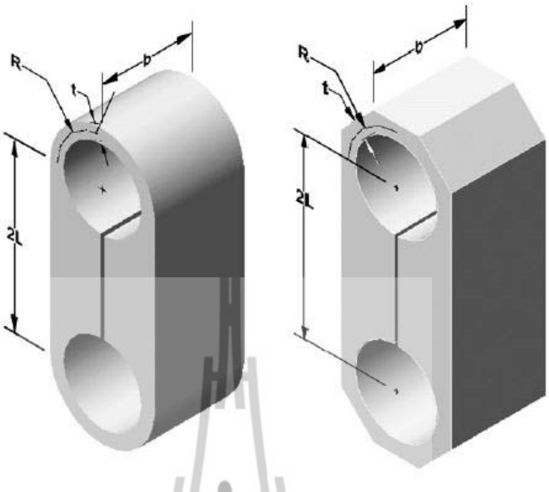
เครื่องมือวัดแรงแบบพ่วงสามจุดถูกออกแบบเพื่อวัดแรงกระทำระหว่างรถแทรกเตอร์และเครื่องมือเกษตรแบบพ่วงแบบสามจุด (three-point hitch implement) การออกแบบเครื่องวัดแรงแบบพ่วงสามจุดนี้สามารถทำได้โดยการสร้างทรานสดิวเซอร์วัดแรง (force transducer) แบบ extended octagonal ring (EOR) ติดตั้งบนชุดต่อพ่วงเร็ว (quick-attaching coupler) เพื่อวัดแรงกระทำที่แขนพ่วงทั้งสามแขนของรถแทรกเตอร์ ทรานสดิวเซอร์วัดแรงแบบ EOR สามารถวัดแรงในแต่ละแนวได้อย่างอิสระต่อกันและมีความแม่นยำสูง โดยไม่ต้องทำการดัดแปลงชิ้นส่วนของรถแทรกเตอร์และเครื่องมือเกษตร ส่วนชุดต่อพ่วงเร็วเป็นโครงสร้างที่ช่วยให้การต่อพ่วงระหว่างรถแทรกเตอร์และเครื่องมือเกษตรทำได้ง่ายและรวดเร็ว ดังนั้นเครื่องมือวัดแรงที่ออกแบบโดยใช้หลักการข้างต้นนี้จะสามารถนำไปใช้งานได้ง่ายและวัดค่าแรงได้อย่างถูกต้องแม่นยำ

เครื่องมือวัดแรงแบบพ่วงสามจุดนี้นักวิจัยมักต้องสร้างขึ้นเองเมื่อต้องการทดสอบความต้องการแรงฉุดลากของเครื่องมือเกษตร ซึ่งเครื่องมือวัดแรงแต่ละชิ้นถูกออกแบบมาให้สอดคล้องและตอบสนองต่อสภาพการใช้งานของเครื่องมือเกษตรในพื้นที่การเกษตรนั้น ๆ (Alimardani et al., 2008; Kheiralla et al., 2003; Palmer, 1992; Reece, 1961) จากการทบทวนงานวิจัยพบว่า งานวิจัยเกี่ยวกับการออกแบบเครื่องมือวัดแรงแบบพ่วงสามจุดวัดแรงสองแนวแกนมีจำนวนมาก ปัจจุบันนักวิจัยเริ่มให้ความสนใจกับเครื่องมือวัดแรงแบบพ่วงสามจุดวัดแรงสามแนวแกนซึ่งพัฒนามาจากเครื่องมือวัดแรงแบบสองแนวแกนมากขึ้นเพราะสามารถให้รายละเอียดของแรงได้ทุกมิติ (Godwin et al., 1993) และนำข้อมูลของแรงไปพัฒนาเครื่องจักรกลเกษตร เช่น ล้อรถไถเดินตาม ไถจาน เป็นต้นเพื่อนำไปสร้างและพัฒนาล้อรถไถเดินตาม ไถจาน เป็นต้น (Watyotha et al., 2001; Parish et al., 2010)

เครื่องมือวัดแรงแบบ EOR ดังแสดงในรูปที่ 2.3 เป็นอุปกรณ์ที่นิยมสำหรับการวัดแรงและโมเมนต์ในงานวิจัยทางวิศวกรรมเกษตร เพราะสามารถวัดแรงกระทำในแต่ละแนวแกน คือ แรงในแนวราบ และแรงในแนวดิ่ง ได้อย่างอิสระเครื่องมือวัดแรงแบบ EOR ถูกพัฒนามาจากทฤษฎีของเครื่องมือวัดแรงแบบ extended circular ring (ECR) เพราะสามารถขึ้นรูปและติดตั้งมาตรวัดความเครียดได้สะดวกกว่า (McLaughlin, 1996) แต่จากการศึกษางานวิจัยของนักวิจัยบางท่าน พบว่าในบางกรณีตำแหน่งที่เหมาะสมที่สุดในการติดตั้งมาตรวัดความเครียดอยู่ตำแหน่งที่เป็นเหลี่ยมของเครื่องมือวัดแรงแบบ EOR นักวิจัยจึงแก้ปัญหานี้ด้วยการติดตั้งมาตรวัดความเครียดภายในวงแหวนของเครื่องมือวัดแรงแบบ EOR (Chen et al., 2007) ดังรูปที่ 2.4

ด้วยความก้าวหน้าของเทคโนโลยีปัจจุบันในการกัด กลึง ชิ้นงาน ส่งผลให้เครื่องมือวัดแรงแบบ ECR เป็นเครื่องมือวัดแรงที่นิยมใช้กันมากขึ้น เพราะนอกจากจะสามารถขึ้นรูปชิ้นงานได้ง่าย

ขึ้นแล้ว การออกแบบเครื่องมือวัดแรงแบบ ECR ยังมีทฤษฎีรองรับ และสามารถเลือกตำแหน่งติดตั้งมาตรวัดความเครียดที่เหมาะสมที่สุดได้



รูปที่ 2.3 เครื่องมือวัดแรงแบบ ECR (ซ้าย) และเครื่องมือวัดแรงแบบ EOR (ขวา)

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

รูปที่ 2.4 ตำแหน่งการติดตั้งมาตรวัดความเครียดของ Chen

ในการติดตั้งมาตรวัดความเครียดเพื่อวัดค่าของแรงที่กระทำบน ECR มาตรวัดความเครียดจะต้องถูกติดตั้งบนผิวของ ECR ตรงตำแหน่งมุม ϕ ที่มีความเค้นและความเครียดน้อยที่สุด เรียกมุม ϕ นี้ว่า nodal angle จากการคำนวณพบว่า มุม nodal ของวงจรวัดแรง F_x และ F_y จะมีค่าเท่ากับ 90°

และ 39.6 º ตามลำดับ การติดตั้งมาตรวัดความเครียดตรงตำแหน่งมุม nodal จะทำให้วัดค่าแรง F_x และ F_y อย่างอิสระต่อกัน แต่ในหลายๆ งานวิจัยพบว่ามุม nodal ที่นักวิจัยใช้ไม่ตรงกับค่าทฤษฎี งานวิจัยบางงานจึงทำการหาตำแหน่งติดตั้งมาตรวัดความเครียดใหม่ตามอุปกรณ์วัดแรงที่นักวิจัยสร้างขึ้นมาโดยใช้วิธี finite element (Chen et al., 2007; Youself et al., 2010)

เครื่องมือวัดแรงแบบ ECR สามารถวัดแรงสองแนวแกนได้เป็นอิสระต่อกัน เมื่อนำมาประยุกต์ใช้วัดแรงกระทำระหว่างรถแทรกเตอร์และเครื่องมือเกษตรแบบพ่วงสามจุด เครื่องมือวัดแรงแบบ ECR สามารถวัดค่าของแรงในแนวราบ (draft force, F_x) และแรงในแนวดิ่ง (veritcal force, F_y) ได้ ดังรูปที่ 2.5 โดยแรงทั้งสองแนวแกนจะทำให้เกิดความเค้นดัด(bending stress, σ) บนผิวของเครื่องมือวัดแรงแบบ ECR การออกแบบเครื่องมือวัดแรงแบบ ECR สามารถคำนวณได้โดยใช้หลักกลศาสตร์เบื้องต้น เมื่อพิจารณาสมการโมเมนต์ดัด จะได้ว่าความเค้นดัดบนผิวของอุปกรณ์วัดแรงแบบ ECR มีค่าดังสมการ

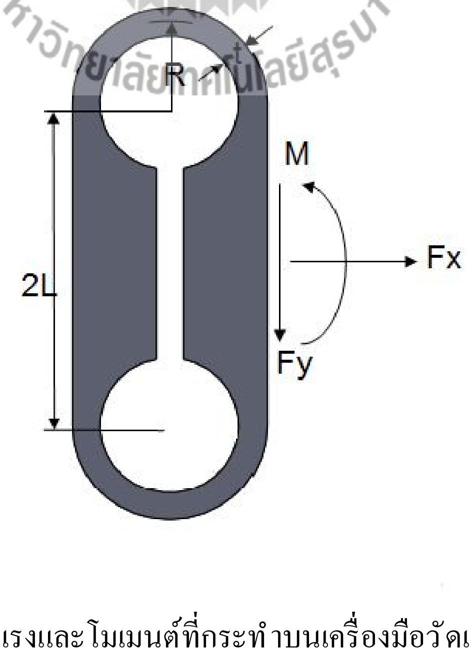
$$\sigma = \frac{Mc}{I} \tag{2.1}$$

โดยที่ σ คือ ความเค้นดัด, MPa

M คือ โมเมนต์ดัด, N.mm

c คือ ระยะระหว่างแกนสะเทินถึงผิวของ ECR, mm

I คือ โมเมนต์ความเฉื่อย, mm^4



รูปที่ 2.5 แรงและโมเมนต์ที่กระทำบนเครื่องมือวัดแรงแบบ ECR

เมื่อพิจารณาความเค้นดัดที่เกิดขึ้นบนพื้นที่ผิวของเครื่องมือวัดแรงแบบ ECR ที่เป็นรูปสี่เหลี่ยม $(c=\frac{t}{2}, I=\frac{bt^3}{12})$ จะได้

$$\sigma = \frac{6M_\phi}{bt^2} \tag{2.2}$$

โดยที่ M_ϕ คือ โมเมนต์ดัดที่มุมใดๆ, N.mm

b คือ ความกว้างของ ECR, mm

t คือ ความหนาวงแหวนของ ECR, mm

การออกแบบเครื่องมือวัดแรงจะพิจารณาจากค่าโมเมนต์ดัด ($M_\emptyset$) ซึ่งจะมีค่าแตกต่างกันตามรูปร่างของเครื่องมือวัดแรง สำหรับเครื่องมือวัดแรงแบบ ECR สามารถคำนวณโดยมีพื้นฐานเบื้องต้นมาจากสมการของ (Hoag et al., 1975) และใช้เทคนิคเกี่ยวกับค่าพลังงานความเครียดในการวิเคราะห์โมเมนต์ดัดในหน้าตัดของ ECR ซึ่งต่อมา (McLaughlin, 1996) พบว่ามีข้อผิดพลาดบางประการ จึงได้เสนอสมการเพื่อปรับแก้ข้อผิดพลาดของโมเมนต์ดัดในหน้าตัดของ ECR นั้น ๆ โดยค่าโมเมนต์ดัดที่มุม ϕ ภายใต้แรงกระทำของแรง 2 แรง คือ F_x และ F_y แสดงดังสมการต่อไปนี้

$$M_\phi = \frac{F_x R}{2}\left(\frac{2}{\pi} - \sin\phi\right) + \frac{F_y R}{2}\cos\phi + \frac{M_0\left[\left(2+\frac{R\pi}{2L}\right) - \left(\frac{2R}{L}+\pi\right)\sin\phi\right]}{\left(8+\frac{R\pi}{L}+\frac{2L\pi}{R}\right)} ; 0 < \phi < \pi \tag{2.3}$$

$$M_\phi = \frac{F_x R}{2}\left(\frac{2}{\pi} + \sin\phi\right) - \frac{F_y R}{2}\cos\phi - \frac{M_0\left[\left(2+\frac{R\pi}{2L}\right) - \left(\frac{2R}{L}+\pi\right)\sin\phi\right]}{\left(8+\frac{R\pi}{L}+\frac{2L\pi}{R}\right)} ; \pi < \phi < 2\pi \tag{2.4}$$

โดยที่ M_o คือ โมเมนต์ภายนอก, N.mm

F_x คือ แรงในแนวราบ, N

F_y คือ แรงในแนวดิ่ง, N

ϕ คือ มุมที่วัดตามเข็มนาฬิกาโดยเริ่มจากทางด้านขวาของวงแหวน, rad

R คือ รัศมีเฉลี่ยของวงแหวนถึงจุดศูนย์กลางวงกลม, mm

L คือ ระยะครึ่งหนึ่งระหว่างจุดศูนย์กลาง,mm

ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดในช่วงขีดจำกัดความยืดหยุ่นของวัสดุเหนียวสามารถหาได้จาก $\sigma = \varepsilon E$ ดังนั้นค่าความเครียดที่เป็นผลมาจากแรงF_x และแรง F_y คำนวณได้จาก

$$\varepsilon = \frac{6M_\phi}{Ebt^2} \tag{2.5}$$

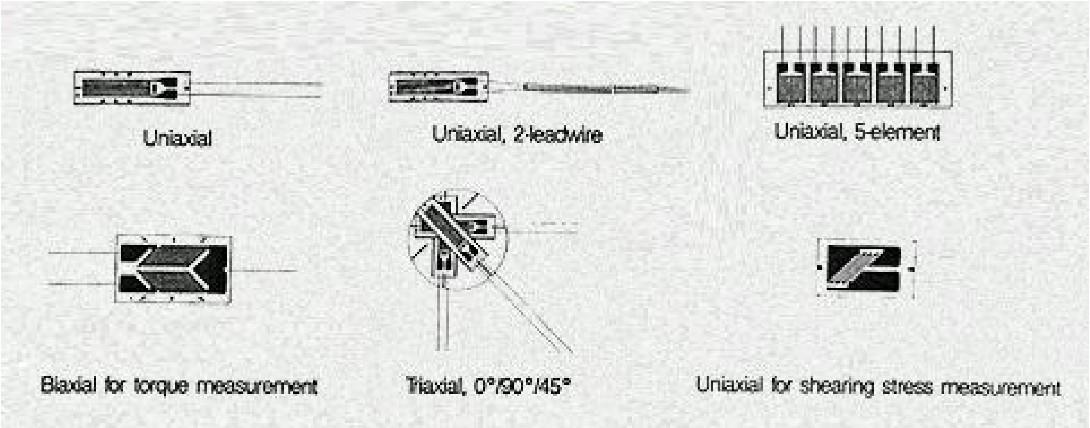
โดยที่ E คือ โมดูลัสความยืดหยุ่น,N/m^2

ความหนาของเครื่องมือวัดแรงแบบECR คำนวณได้จาก

$$t = \sqrt{\frac{6M_\phi}{Eb\varepsilon}} \tag{2.6}$$

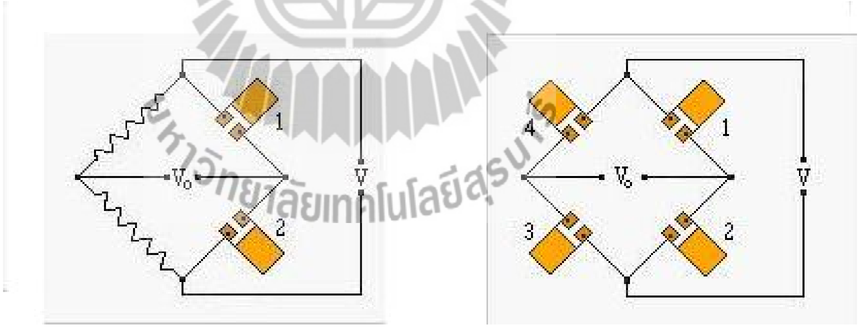
2.3 มาตรวัดความเครียดและวงจร

มาตรวัดความเครียด (strain gauge) เป็นอุปกรณ์ตรวจวัดทางเครื่องกลไฟฟ้าชนิดหนึ่งมีลักษณะเป็นแผ่นโลหะบางและมีคุณสมบัติความต้านทานทางไฟฟ้าส่วนใหญ่ทำจากโลหะผสม copper-nickel alloy สามารถยึดติดกับผิวของส่วนประกอบของเครื่องจักรกลหรือโครงสร้างด้วยตัวยึดหรือกาว มาตรวัดความเครียดสามารถเปลี่ยนแปลงปริมาณของแรงหรือน้ำหนักที่กระทำต่อเครื่องจักรกลหรือโครงสร้างไปเป็นปริมาณทางไฟฟ้าซึ่งสามารถตรวจวัดและแปลงกลับเป็นค่าแรงหรือน้ำหนักที่กระทำได้ จากการสอบเทียบ (calibration) มาตรวัดความเครียดมีรูปแบบต่างๆกันดังแสดงในรูปที่ 2.6 รูปแบบที่นิยมใช้มากที่สุดเป็นแบบแผ่น foil มาตรวัดความเครียดที่ใช้กันในปัจจุบันมีชนิดความต้านทาน(R_g) 120 Ω และ 350 Ω



รูปที่ 2.6 strain gauge แบบต่างๆ

เมื่อชิ้นส่วนของเครื่องจักรกลหรือโครงสร้างถูกภาระ (load) กระทำจะเกิดความเครียดขึ้น และส่งผ่านไปยังมาตรวัดความเครียดซึ่งติดอยู่ที่ผิวเป็นผลให้ความต้านทานทางไฟฟ้าของมาตรวัดความเครียดเปลี่ยนแปลงและแปรผันออกมาเป็นสัญญาณแรงดันไฟฟ้า(voltage) ด้วยวงจรปรับแต่งสัญญาณ (conditioning circuit) แบบ wheatstone bridge ดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 การต่อ strain gauge เป็นวงจร wheatstone bridge

สำหรับวงจร wheatstone bridge ที่ใช้มาตรวัดความเครียด 4 ตัวและมีแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าคงที่ ความสัมพันธ์ระหว่างความเครียด, ε ที่เกิดขึ้นกับการเปลี่ยนแปลงสัญญาณแรงดันไฟฟ้า output (V_0) เป็นไปตามสมการ

$$V_0 = \frac{V}{4} K_s (\varepsilon_1 - \varepsilon_2 + \varepsilon_3 - \varepsilon_4) \tag{2.7}$$

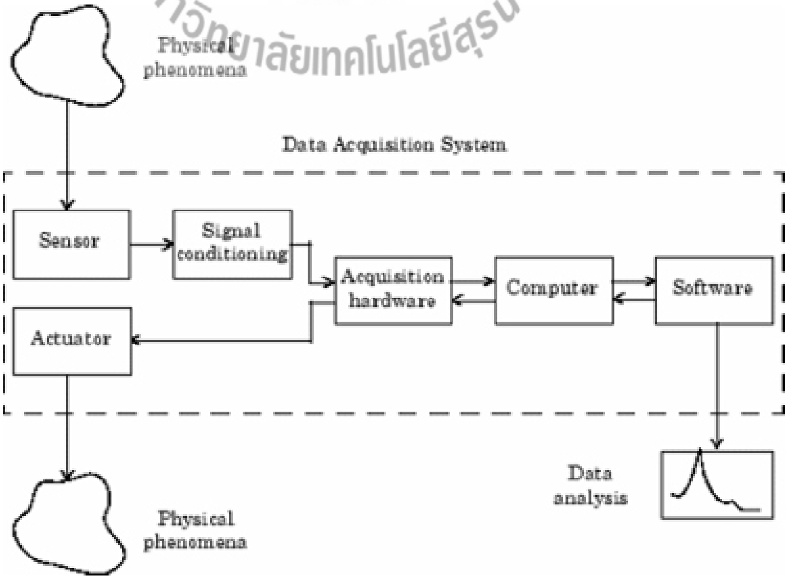
โดยที่ V เป็นค่าแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้วงจร

K_S เป็นค่า gauge factor หรือความไวของ gauge โดยปกติมีค่าประมาณ 2.0

2.4 ระบบรวบรวมข้อมูล

ระบบรวบรวมข้อมูล (data acquisition, DAQ) เป็นการเก็บรวบรวมวิเคราะห์ข้อมูลจริงในงานวิจัยทดลองวิทยาศาสตร์และทดสอบงานทางด้านวิศวกรรมเชิงคุณภาพและประสิทธิผลผ่านคอมพิวเตอร์ โดยมีความแตกต่างจากงานระบบคอมพิวเตอร์ทั่วไปตรงที่มีฮาร์ดแวร์พิเศษเพื่อตรวจจับสัญญาณทางกายภาพทางวิทยาศาสตร์ อาทิเช่น อุณหภูมิ ความดันอากาศ ก๊าซ อัตราการไหล เป็นต้น แปลงเข้าสู่ระบบคอมพิวเตอร์เป็นรูปแบบในลักษณะสัญญาณทางไฟฟ้า เข้าสู่ระบบคอมพิวเตอร์ผ่านซอฟต์แวร์ประยุกต์ที่ถูกพัฒนาขึ้นตามคุณลักษณะของงานวิจัยทดลองนั้นๆ ในลักษณะเวลาจริง (real time) ซึ่งในอดีตมักใช้เป็นระบบเฉพาะเจาะจงลงไปตามประเภทงาน ไม่สามารถใช้งานร่วมกับงานวิจัยอื่นได้ ทั้งยังมีราคาที่สูงมาก ทว่าด้วยความสามารถของคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคลในปัจจุบัน ประกอบกับการใช้งานที่ง่ายขึ้นของซอฟต์แวร์ ระบบปฏิบัติการในลักษณะที่เป็นวินโดว์หรือกราฟฟิก ทำให้การประยุกต์เพื่อนำคอมพิวเตอร์มาใช้ในงานด้านDAQ นี้มีความเป็นไปได้อย่างไม่ยุ่งยาก และให้ความคล่องตัวกับนักวิทยาศาสตร์ นักวิจัยทดลองและวิศวกร ลักษณะการทำงานของระบบDAQ แสดงดังรูปที่ 2.8

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

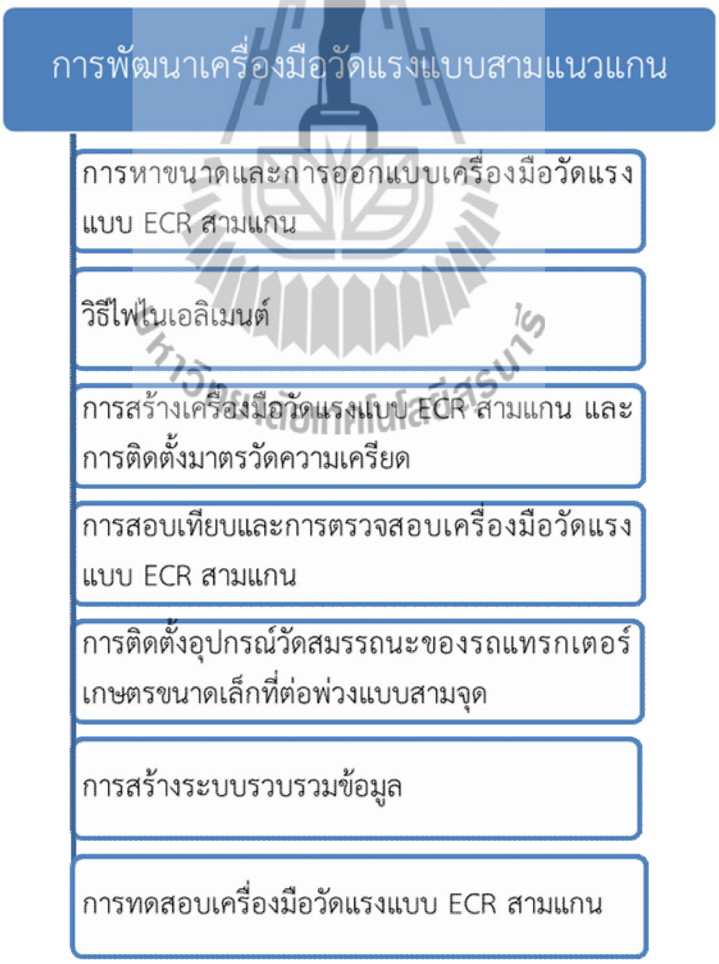


รูปที่ 2.8 การทำงานของระบบDAQ

บทที่ 3
วิธีการดำเนินการวิจัย

3.1 บทนำ

เครื่องมือวัดแรงแบบ ECR สามแกน ถูกสร้างขึ้นโดยใช้ทฤษฎีเดียวกันกับเครื่องมือวัดแรงแบบ ECR โดยมีแนวทางในการศึกษาวิจัยแบ่งออกเป็น 2 ส่วนหลัก ๆ คือส่วนที่หนึ่ง การออกแบบสร้าง และสอบเทียบเครื่องมือวัดแรงแบบ ECR สามแกน ส่วนที่สอง การสร้างระบบรวบรวมข้อมูลของการทดสอบสมรรถนะของรถแทรกเตอร์ขนาดเล็ก แผนงานวิจัยทั้งหมดแสดงดังรูปที่ 3.และรายละเอียดในแต่ละขั้นตอนการทดสอบจะถูกแสดงในหัวข้อต่อไป

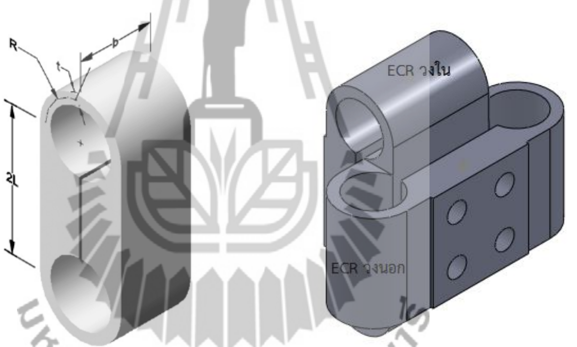


รูปที่ 3.1 แผนงานวิจัย

3.2 การหาขนาดและการออกแบบเครื่องมือวัดแรงแบบ ECR สามแกน

การหาขนาดของเครื่องมือวัดแรงแบบ ECR สามแกนสามารถหาได้จากการกำหนดค่า R, L และ b จากนั้นคำนวณหาค่าความหนา t โดยที่ค่า R จะส่งผลทำให้อุปกรณ์ต่อพ่วงเลื่อนถอยจากตำแหน่งเดิมไปทางด้านหลังของรถแทรกเตอร์มากขึ้น ส่วนค่า L และ b มีผลต่อขนาดของพื้นที่สำหรับการจับยึดเครื่องมือวัดแรงแบบ ECR สามแกน กับโครงสร้าง และเมื่อต้องการให้ความเค้นเป็นไปตามทฤษฎีผนังบาง (thin wall theory) จะต้องให้สัดส่วน $R/t \geq 3$

เครื่องมือวัดแรงแบบ ECR สามแกนถูกพัฒนามาจากเครื่องมือวัดแรงแบบ ECR ดังรูปที่ 3.2 (ซ้าย) โดยนำเครื่องมือวัดแรงแบบ ECR สองตัวมาประกบไขว้กันดังรูปที่ 3.2 (ขวา) เครื่องมือวัดแรงแบบ ECR สามแกนประกอบด้วย ECR วงใน (ติดตั้งกับรถแทรกเตอร์) ทำหน้าที่วัดแรงในแนวราบและแรงในแนวดิ่ง และ ECR วงนอก (ติดตั้งกับเครื่องมือเกษตร) ทำหน้าที่วัดแรงด้านข้าง เครื่องมือวัดแรงแบบ ECR สามแกนถูกออกแบบให้สามารถรับแรงในแนวราบ (F_x) 10 kN, แรงในแนวดิ่ง (F_y) 5 kN และแรงด้านข้าง (F_z) 1 kN



รูปที่ 3.2 เครื่องมือวัดแรงแบบ ECR (ซ้าย) และเครื่องมือวัดแรงแบบ ECR สามแกน (ขวา)

3.3 วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

3.3.1 การกำหนดเงื่อนไขการจำลองสถานการณ์

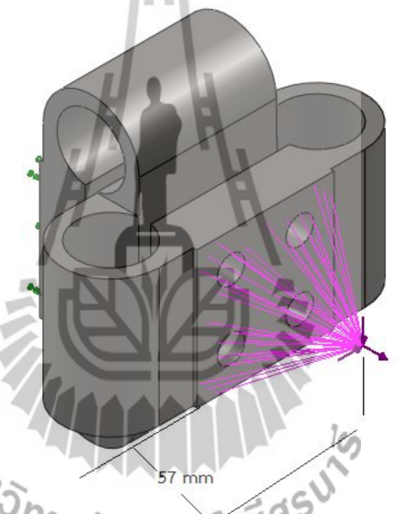
วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ถูกนำมาใช้เพื่อตรวจสอบความแข็งแรง และเลือกตำแหน่งติดตั้งมาตรวัดความเครียดที่เหมาะสม โดยพิจารณาจากการกระจายตัวของความเครียดในช่วงขีดจำกัดยืดหยุ่นเชิงเส้น (linear elastic) การขึ้นรูปเครื่องมือวัดแรงแบบ ECR สามแกน ทำโดยใช้โปรแกรม Solid Works จากนั้นใช้โปรแกรม ANSYS เพื่อแบ่งเมชและวิเคราะห์ผล

การกำหนดเงื่อนไขการจำลองสถานการณ์ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์จะต้องกำหนดให้ใกล้เคียงกับสภาพการทำงานจริงมากที่สุด การทดสอบจะติดตั้งเครื่องมือวัดแรงบนโครงรูปตัวยู ดังนั้นตำแหน่งที่ผิวด้านซ้ายของเครื่องมือวัดแรงแบบ ECR สามแกน ดังรูปที่ 3.2 (ขวา) จะ

มีลักษณะการจับยึดเป็นแบบยึดแน่น (fixed) กับตัวรถแทรกเตอร์ ส่วนตำแหน่งการให้แรงทั้งแกน x, y และ z จะให้ที่ตำแหน่งจุดพ่วงจริงซึ่งอยู่ห่างจากผิวด้านขวาของเครื่องมือวัดแรงแบบ ECR สามแกนเป็นระยะ 57 mm ดังรูปที่ 3.3

3.3.2 การตรวจสอบความแข็งแรง

เครื่องมือวัดแรงแบบ ECR สามแกน ถูกสร้างขึ้นจากเหล็กเหนียว S50C มีค่าความเค้นที่จุดครากประมาณ 375 MPa ตรวจสอบความแข็งแรงโดยใช้โปรแกรม ANSYS ที่ค่าแรงในแนวราบ แรงในแนวดิ่ง และแรงด้านข้าง เท่ากับ 10 kN, 5 kN และ 1 kN ตามลำดับ โดยให้แรงทั้งสามพร้อมกันที่ตำแหน่งจุดพ่วงจริงซึ่งอยู่ห่างจากตำแหน่งผิวของเครื่องมือวัดแรงแบบ ECR สามแกน เป็นระยะ 57 mm ดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 ตำแหน่งการให้แรง

3.3.3 การกระจายตัวของความเครียดและตำแหน่งติดตั้งมาตรวัดความครียด

พื้นผิวของเครื่องมือวัดแรงแบบ ECR มีลักษณะเป็นผิวโค้ง ดังนั้นตำแหน่งที่จะพิจารณาค่าความเครียดต้องพิจารณาจากความเครียดสัมผัส (tangential strain) ซึ่งสามารถพิจารณาได้จากสมการ (Chen, 2007)

$$\varepsilon_{t1} = \frac{\varepsilon_x + \varepsilon_y}{2} + \frac{\varepsilon_x - \varepsilon_y}{2}\cos 2\theta + \frac{\gamma_{xy}}{2}\sin 2\theta \tag{3.1}$$

$$\varepsilon_{t2} = \frac{\varepsilon_x + \varepsilon_z}{2} + \frac{\varepsilon_x - \varepsilon_z}{2}\cos 2\theta + \frac{\gamma_{xz}}{2}\sin 2\theta \tag{3.2}$$

โดยที่ ε_{t1} คือ ค่าความเครียดสัมผัสของเครื่องมือวัดแรงแบบECR วงใน, $\mu\varepsilon$

ε_{t2} คือ ค่าความเครียดสัมผัสของเครื่องมือวัดแรงแบบECR วงนอก, $\mu\varepsilon$

ε_x คือ ค่าความเครียดในแนวแกน x, $\mu\varepsilon$

ε_y คือ ค่าความเครียดในแนวแกน y, $\mu\varepsilon$

ε_z คือ ค่าความเครียดในแนวแกน z, $\mu\varepsilon$

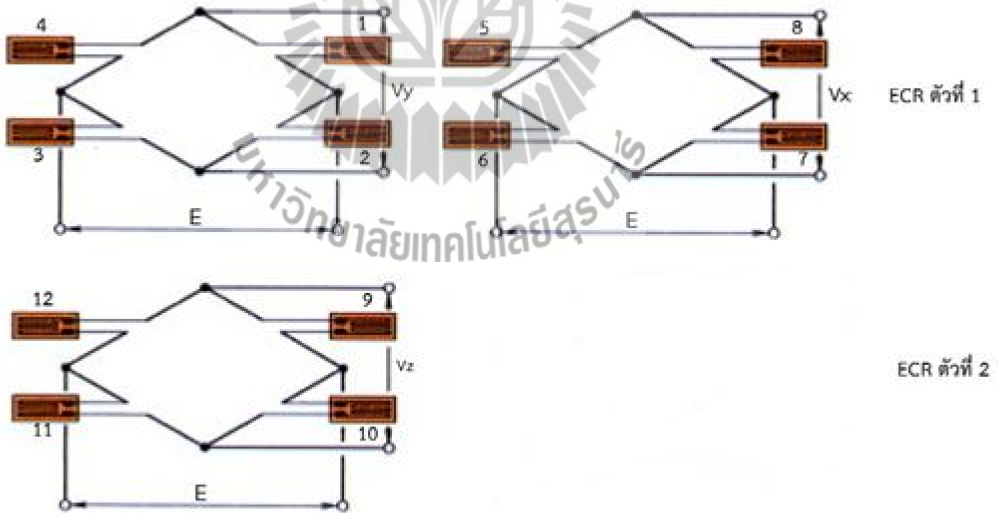
γ_{xy} คือ ค่าความเครียดเฉือนในระนาบ xy, $\mu\varepsilon$

γ_{xz} คือ ค่าความเครียดเฉือนในระนาบ xz, $\mu\varepsilon$

θ คือ ค่ามุมระหว่างแกน x กับตำแหน่งที่วิเคราะห์ (ทิศทวนเข็มมีค่าเป็นบวก), deg.

3.4 การติดตั้งมาตรวัดความเครียด

การติดตั้งมาตรวัดความเครียด ใช้มาตรวัดความเครียดความต้านทาน 120 โอห์ม 4 ตัวต่อกันแบบวงจรวีทสโตรน เครื่องมือวัดแรงแบบ ECR สามแกน แต่ละตัวประกอบด้วย 3 วงจร คือ วงจรวัดแรงในแนวราบหรือแรงฉุดลาก (V_x), วงจรวัดแรงในแนวดิ่ง(V_y) และวงจรวัดแรงด้านข้าง (V_z) ดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 วงจรมาตรวัดความเครียด

3.5 การสอบเทียบและการตรวจสอบเพื่อยืนยันการใช้งาน

ชุดอุปกรณ์สำหรับการเทียบมาตรฐาน เครื่องมือวัดแรงแบบ ECR สามแกน ถูกสร้างขึ้นโดยอาศัยเครื่องuniversal testing machine (UTM) เพื่อกำหนดขนาดของแรงในแนวราบในช่วง 0-10 kN, แรงในแนวดิ่งในช่วง 0-5 kN และแรงในแนวด้านข้าง 0-5 kN โดยมีช่วงของค่าแรงที่ป้อน

ในแนวราบเท่ากับ 0.5 kN และมีช่วงค่าแรงที่ป้อนในแนวดิ่งและแนวด้านข้างเท่ากับ 0.25kN ECR ตัวที่ 1 ถูกใช้เพื่อวัดแรงบนแขนบนของระบบพ่วงแบบสามจุดส่วนตัวที่ 2 และ 3 ถูกใช้เพื่อวัดแรงบนแขนล่างซ้ายและขวา ตามลำดับ การสอบเทียบถูกทดสอบ 3 ครั้งโดยใช้ความเร็วในการทดสอบแรงดึง 0.0254 มิลลิเมตร/วินาที (ASTM E 1856)

การทดสอบเพื่อยืนยันการใช้งานของเครื่องมือวัดแรงแบบ ECR สามแกน แต่ละตัว ทำในห้องปฏิบัติการ โดยใช้ตุ้มน้ำหนักที่ทราบน้ำหนักแน่นอนและกำหนดตำแหน่งการให้แรงอย่างชัดเจนในการทดสอบ

3.6 การติดตั้งอุปกรณ์วัดสมรรถนะของรถแทรกเตอร์

3.6.1 ชุดวัดแรงฉุดลาก

3.6.1.1 การวัดแรงแบบพ่วงสามจุด

ชุดวัดแรงแบบพ่วงสามจุดถูกสร้างโดยการติดตั้งเครื่องมือวัดแรงแบบ ECR สามแกนทั้ง 3 ตัว บนข้อต่อสวมเร็ว (quick-attaching coupler) ที่มีลักษณะเป็นโครงสร้างรูปตัวยูคว่ำ ซึ่งถูกสร้างขึ้นจากเหล็กกล่องโดยมีขนาดเท่ากับ 740 mm x 650 mm x 75 mm ดังรูปที่ 3.5

3.6.1.2 อุปกรณ์ชุดวัดแรงฉุดลาก

เครื่องมือเกษตร เช่น เครื่องขุดมันสำปะหลังดังรูปที่ 3.5 และ เครื่องขยายสัญญาณของมาตรวัดความเครียด ยี่ห้อ Yokogawa MW100 ทำหน้าที่เก็บข้อมูลแรงฉุดลากของรถแทรกเตอร์จากเครื่องมือวัดแรงที่สร้างขึ้นดังรูปที่ 3.6

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

รูปที่ 3.5 เครื่องขุดมันสำปะหลัง

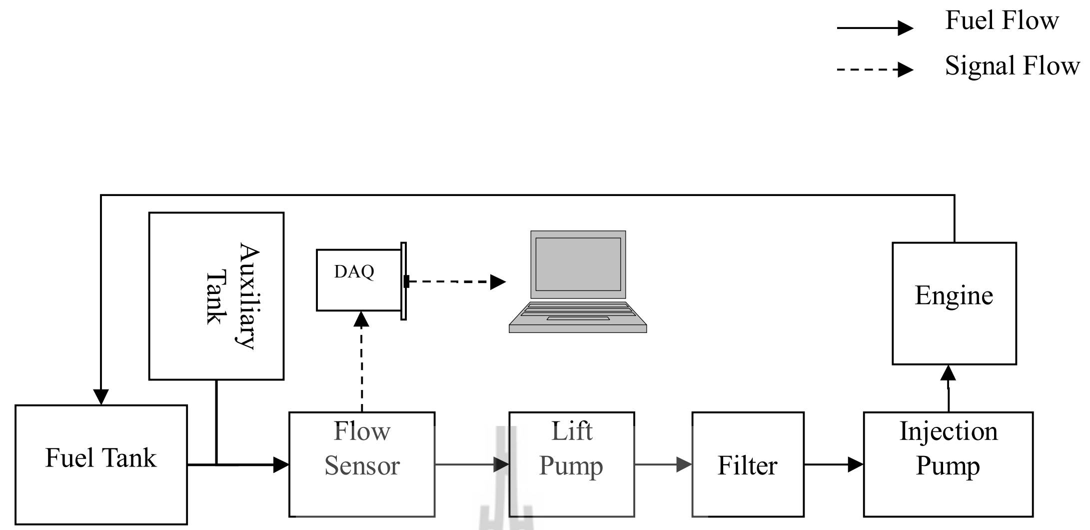
รูปที่ 3.6 Yokogawa MW100

3.6.2 ชุดวัดการสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิง

3.6.2.1 การสอบเทียบชุดวัดการสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิง

ความถูกต้องของการวัดการสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิงขึ้นอยู่กับตัวแปรหลายอย่าง เช่น ความหนืดของน้ำมัน อุณหภูมิของน้ำมัน เซนเซอร์ เป็นต้น ชุดวัดการสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิงที่สร้างประกอบขึ้นจากเซนเซอร์วัดปริมาตรน้ำมัน Oval M-III model LSF40 จำนวน 2 ตัว และหน่วยรวบรวมข้อมูล (data acquisition unit) เนื่องจากเซนเซอร์เหล่านี้ถูกใช้งานมาก่อน จึงจำเป็นต้องเทียบมาตรฐานอีกครั้ง เพราะอาจจะมีการสึกหรอของเซนเซอร์ ซึ่งส่งผลต่อค่าความถูกต้องของการวัดที่ผิดไปจากค่ามาตรฐาน

การสอบเทียบชุดวัดการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง ทำโดยการติดตั้งเซนเซอร์เข้าไปในระบบน้ำมันเชื้อเพลิงของรถแทรกเตอร์ ตรงบริเวณท่อน้ำมันด้านเข้าเครื่องยนต์ระหว่างถังน้ำมันกับปั๊มสูบน้ำมัน(lift pump) ติดตั้งหลอดแก้วที่ทราบปริมาตรเข้ากับปลายของท่อน้ำมันด้านเข้าตรงบริเวณระหว่างถังน้ำมันเชื้อเพลิงกับเซนเซอร์ด้วยข้อต่อแบบสามทาง ดังแสดงในรูปที่ 3.7 การทดสอบทำที่ความเร็วรอบของเครื่องยนต์เท่ากับ 850 rpm และ 1,500 rpm น้ำมันเชื้อเพลิงที่ใช้ในการทดสอบเป็นน้ำมันดีเซลที่มีค่าความหนืดคิเนเมติก(kinematic viscosity) ที่ 40 °C เท่ากับ 4.17 cSt ตามมาตรฐาน ASTM D445 ซึ่งเทียบเป็นค่าความหนืดสัมบูรณ์ (absolute viscosity) ได้เท่ากับ 3.42 mPa.s



(ก)

(ข)

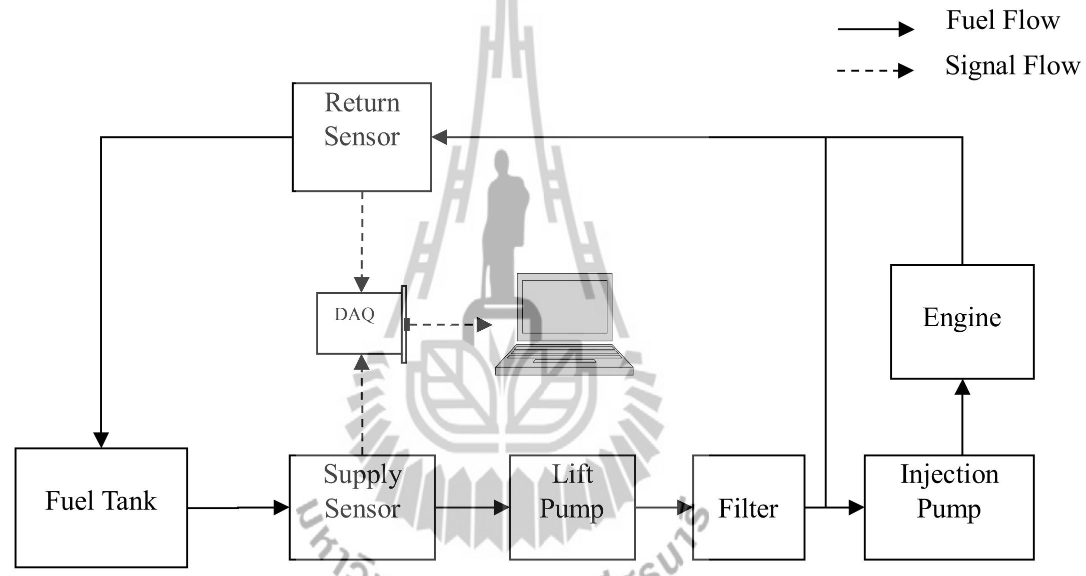
รูปที่ 3.7 การติดตั้งเซนเซอร์ในระบบน้ำมันเชื้อเพลิงสำหรับการสอบเทียบ
(ก) แผนผัง (ข) อุปกรณ์

3.6.2.2 การวัดการสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิงของรถแทรกเตอร์

ชุดวัดน้ำมันเชื้อเพลิงถูกติดตั้งเข้าไปในระบบเชื้อเพลิงของรถแทรกเตอร์ โดยใช้เซนเซอร์จำนวน 2 ตัว ติดตั้งบริเวณท่อน้ำมันด้านเข้าเครื่องยนต์ระหว่างถังน้ำมันกับปั๊มสูบน้ำมันตัว และบริเวณท่อน้ำมันด้านออกจากเครื่องยนต์ระหว่าง ท่อร่วมของน้ำมันที่เหลือจากหัวฉีด

เชื้อเพลิงและน้ำมันที่ไหลผ่านท่อบายพาสของปั๊มฉีดเชื้อเพลิงกับถังน้ำมันอีก 1 ตัว ดังแสดงในรูปที่ 3.8 เทอร์โมคัปเปิลชนิด K ถูกติดตั้งบริเวณด้านหน้าของเซนเซอร์ทั้งสองตัวเพื่อวัดอุณหภูมิของน้ำมันก่อนเข้าเซนเซอร์

เนื่องจากเซนเซอร์ของชุดวัดการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงเป็นเซนเซอร์ที่วัดเชิงปริมาตร ดังนั้นในการวัดการสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิงของรถแทรกเตอร์จำเป็นต้องมีการชดเชยค่าการสิ้นเปลืองอันเนื่องมาจากอุณหภูมิของน้ำมันที่ต่างกันซึ่งสามารถทำได้โดยการแปลงค่าปริมาตรของน้ำมันที่วัดได้ในแต่ละครั้งเป็นค่ามวลของน้ำมันด้วยการคูณด้วยค่าความหนาแน่นของน้ำมัน ดังแสดงในตารางที่ 3.1



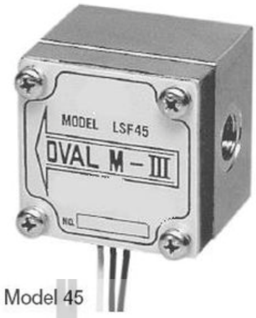
รูปที่ 3.8 แผนผังการวัดการสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิงของรถแทรกเต

ตารางที่ 3.1 ความหนาแน่นของน้ำมันดีเซล

Temperature (°C)	Mass (g)	Volume (cm^3)	Density (g/cm^3)
20	42.5520	51.130	0.8322
30	42.2503	51.130	0.8263
40	41.9156	51.130	0.8198
50	41.5918	51.130	0.8135
60	41.2467	51.130	0.8067

3.6.2.3 อุปกรณ์ชุดวัดน้ำมันเชื้อเพลิง

- Oval gear flow-meter ใช้วัดอัตราการไหลของน้ำมันเชื้อเพลิง



รูปที่ 3.9 oval gear flow-meter

- เทอร์โมคัปเปิล (thermocouple) สำหรับวัดอุณหภูมิน้ำมันเชื้อเพลิง

รูปที่ 3.10 เทอร์โมคัปเปิล

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

- NI Daq wireless สำหรับเก็บข้อมูลความสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิงและอุณหภูมิขาเข้า-ออกของน้ำมันเชื้อเพลิงจาก flow-meter และเทอร์โมคัปเปิล

รูปที่ 3.11 NI Daq wireless

3.6.3 ชุดวัดการลื่นไถล และความเร็วการทำงานของรถแทรกเตอร์

3.6.3.1 การวัดการลื่นไถล

การลื่นไถลของรถแทรกเตอร์หาได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$slip = \frac{S - S_0}{S} x100 \tag{3.3}$$

โดย *slip* คือ อัตราการลื่นไถล, %

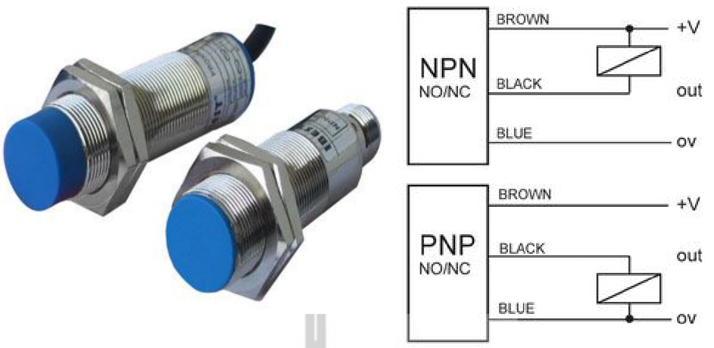
S คือ ระยะการเคลื่อนที่ของล้อขับ,m

S_0 คือ ระยะการเคลื่อนที่ของล้อตาม,m

3.6.3.2 อุปกรณ์ชุดวัดเปอร์เซ็นต์การลื่นไถล

ล้อที่ 5 สำหรับวัดความเร็วในการทำงานของรถแทรกเตอร์ถูกติดตั้งที่ตำแหน่ง drawbar ของรถแทรกเตอร์ ทำหน้าที่เป็นล้อตาม ใช้ proximity ในการระบุระยะการหมุน จากความสัมพันธ์เบื้องต้นงานวิจัยนี้ประยุกต์การใช้งานของ proximity sensor ซึ่งเป็นเซ็นเซอร์ที่ทำงานโดยอาศัยหลักการเหนี่ยวนำ สัญญาณที่ได้จากเซ็นเซอร์เป็นสัญญาณพัลส์ (pulse) ชุดวัดเปอร์เซ็นต์การลื่นไถลประกอบด้วย proximity sensor สองตัว โดยติดที่หนึ่งถูกติดที่ล้อหลังของรถแทรกเตอร์ทำหน้าที่วัดระยะการเคลื่อนที่ของล้อขับ ส่วนตัวที่สองติดตั้งที่ล้อที่ 5 ของรถแทรกเตอร์ ทำหน้าที่วัดระยะการเคลื่อนที่ของล้อตาม

- proximity sensor สำหรับวัดจำนวนการหมุนของล้อรถแทรกเตอร์และล้อที่ 5 ของรถแทรกเตอร์ มีลักษณะดังรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.12 proximity sensor

- USB-6212 DAQ สำหรับเก็บข้อมูลความเร็วของรถ (ข้อมูลจากล้อที่ 5) และความเร็วในการหมุนล้อหลังของรถแทรกเตอร์

รูปที่ 3.13 USB-6212 DAQ

3.7 การสร้างระบบรวบรวมข้อมูลโดยใช้โปรแกรม LabVIEW

ระบบรวบรวมข้อมูลประกอบไปด้วย 2 ส่วน คือส่วนที่หนึ่ง ทำหน้าที่รวบรวมค่าของแรงในแนวแกน x, y และ z ของเครื่องมือวัดแรงสามแนวแกนแบบ ECR แต่ละตัว รวม 9 ช่องสัญญาณ และแสดงผลรวมแรงกระทำในแต่ละแนวแกนของแขนบน แขนล่างซ้าย และแขนล่างขวา จำนวน 3 ช่องสัญญาณ ส่วนที่สอง ทำหน้าที่รวบรวมและแสดงข้อมูลสมรรถนะของรถแทรกเตอร์ เช่น การสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิง ความเร็วในการทำงานของรถแทรกเตอร์ และการลื่นไถล

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

3.8 การทดสอบเครื่องมือวัดแรงแบบ ECR สามแกน

เครื่องมือวัดแรงแบบ ECR สามแกน ถูกทดสอบการใช้งานจริงในแปลงเกษตรของฟาร์มมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี เครื่องมือวัดแรงแบบ ECR สามแกน ถูกติดตั้งอยู่ระหว่างรถแทรกเตอร์และเครื่องมือเกษตร การทดสอบนี้ใช้รถแทรกเตอร์ยี่ห้อNagano ขนาด 35 แรงม้า เป็นต้นกำลังในการฉุดลากเครื่องขุดมันสำปะหลังแบบพ่วงสามจุดและทดสอบโดยเกียร์ L1 ที่รอบเครื่องยนต์ 1,500 รอบต่อนาที การทดสอบจะรวบรวมและแสดงผลค่าแรงฉุดลาก อัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิง ความเร็วรถแทรกเตอร์ขณะทำงานและการลื่นไถล

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

บทที่ 4
ผลการศึกษา และการวิเคราะห์ผล

4.1 บทนำ

บทนี้จะนำเสนอผลการออกแบบเครื่องมือวัดแรงสามแนวแกน ผลของการวิเคราะห์ความแข็งแรงและตำแหน่งที่เหมาะสมที่สุดในการติดตั้งมาตรวัดความเครียดโดยใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ผลของการสอบเทียบเครื่องมือวัดแรง ผลของการติดตั้งระบบรวมรวบข้อมูลในการวัดสมรรถนะของรถแทรกเตอร์ พร้อมทั้งผลการทดสอบในแปลงเกษตรของฟาร์มมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

4.2 ผลการออกแบบเครื่องมือวัดแรงแบบ ECR สามแกน

เครื่องมือวัดแรงแบบ ECR สามแกน ถูกออกแบบให้เหมาะกับรถแทรกเตอร์ category I ในงานวิจัยนี้ใช้รถแทรกเตอร์ยี่ห้อ Nagano NT3500 ที่มีกำลังเครื่องยนต์ 35 hp ในการทดสอบ จากข้อมูลการทดสอบสมรรถนะของรถแทรกเตอร์ที่มีต้นกำลัง 35 hp โดย University of Nebraska, USA (1998) พบว่ารถแทรกเตอร์สามารถสร้างแรงในแนวราบสูงสุดเท่ากับ 19.8 kN และรองรับแรงในแนวดิ่งสูงสุดเท่ากับ 10 kN ดังนั้นค่าแรง F และแรง P ที่นำไปใช้ออกแบบหาขนาด ECR มีค่าเท่ากับ 10 kN และ 5 kN ตามลำดับ โดยมีค่าโมเมนต์ดัดเนื่องจากแรงภายนอกเท่ากับ 0.57 kN.m ดังนั้นเมื่อเลือกค่า R = 24 mm, L = 60 mm และ b = 80 mm สามารถคำนวณขนาดของเครื่องมือวัดแรงแบบ ECR สามแกน โดยใช้สมการที่ (2.6) ได้ดังนี้

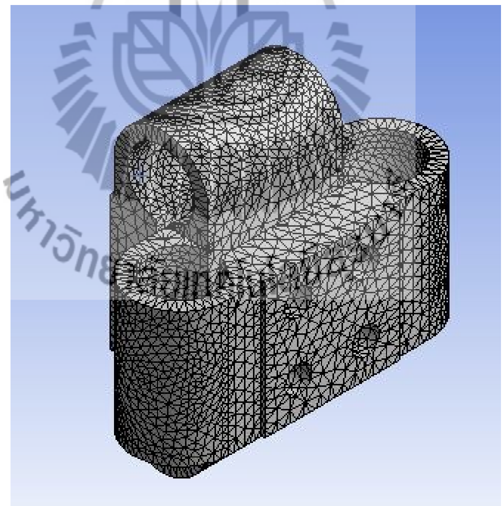
ตารางที่ 4.1 ขนาดของเครื่องมือวัดแรงแบบ ECR สามแกน

Dimension	mm
ความหนา (t)	8
รัศมีเฉลี่ย (R)	24
ระยะระหว่างจุดศูนย์กลางของวงแหวนทั้งสอง (L)	120
ความกว้าง (b)	80

4.3 วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

4.3.1 เงื่อนไขการจำลองสถานการณ์

วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ถูกนำมาใช้เพื่อตรวจสอบความแข็งแรง และเลือกตำแหน่งติดตั้งมาตรวัดความเครียดที่เหมาะสม โดยพิจารณาจากการกระจายตัวของความเครียดในช่วงขีดจำกัดยืดหยุ่นเชิงเส้น (linear elastic) การขึ้นรูปเครื่องมือวัดแรงแบบECR สามแกน ทำโดยใช้โปรแกรม Solid Works จากนั้นใช้โปรแกรมANSYS เพื่อแบ่งเมชและวิเคราะห์ผล ดังแสดงในรูปที่ 4.1

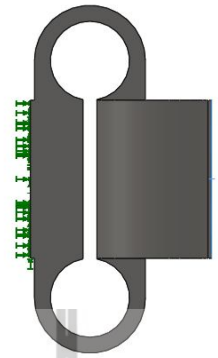


รูปที่ 4.1 การแบ่งเมชด้วยโปรแกรม ANSYS

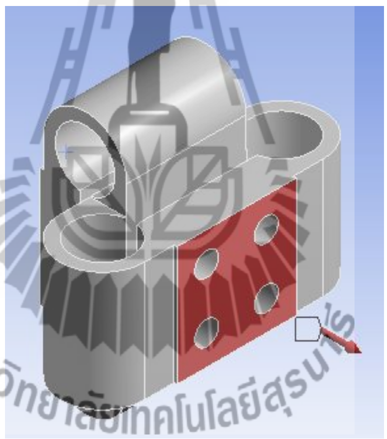
ตำแหน่งการจับยึดอยู่ด้านซ้ายของเครื่องมือวัดแรงแบบ ECR สามแกน (ติดกับรถแทรกเตอร์) ดังรูปที่ 4.2 ลักษณะการจับยึดเป็นแบบยึดแน่น fixed) บนหน้าตัด 80 x 80 mm^2

ตำแหน่งการให้แรงทั้งแกน x, y และ z จะให้ที่ตำแหน่งจุดพ่วงจริงซึ่งอยู่ห่างจากพื้นที่หน้าตัดขนาด 80x 80 mm^2 ทางด้านขวามือของเครื่องมือวัดแรงเบบ ECR สามแกน เป็นระยะ

57 mm ดังรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.2 ตำแหน่งจับยึดของเครื่องมือวัดแรงแบบECR สามแกน

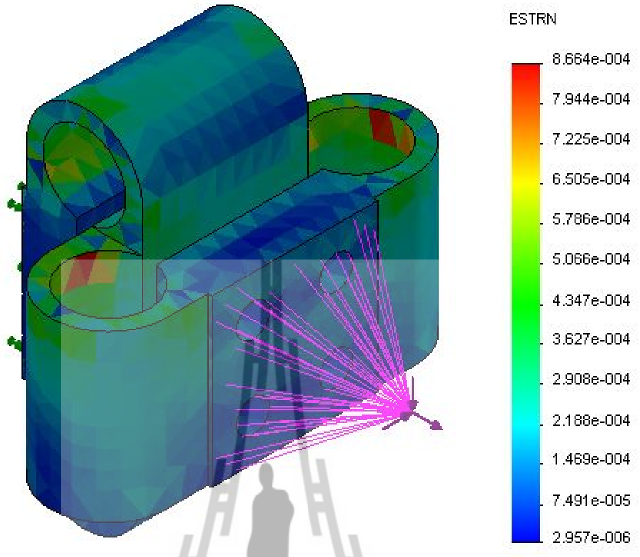


รูปที่ 4.3 ตำแหน่งการให้แรง

4.3.2 ผลการวิเคราะห์ความแข็งแรงของเครื่องมือวัดแรงแบบ ECR สามแกน

เครื่องมือวัดแรงแบบ ECR สามแกน ถูกสร้างจากเหล็กเหนียว S50C ซึ่งมีค่าความต้านแรงดึงคราก (yield strength) ประมาณ 375 MPa และมีค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นเท่ากับ 207 GPa พิจารณาให้เครื่องมือวัดแรงทำงานอยู่ในช่วงขีดจำกัดยืดหยุ่น ดังนั้นความเครียดที่จุดครากมีค่าประมาณ 1,800 $\mu\varepsilon$ ความแข็งแรงของเครื่องมือวัดแรงแบบ ECR สามแกน ถูกตรวจสอบโดยการจำลองสถานการณ์ด้วยการกำหนดแรงในแนวราบเท่ากับ 10 kN แรงในแนวดิ่งเท่ากับ 5 kN และแรงในแนวด้านข้างเท่ากับ 1 kN กระทำที่ตำแหน่งใช้งานจริง พบว่า ค่าความเครียดสูงสุดที่

เกิดขึ้นบนเครื่องมือวัดแรงแบบECR สามแกนมีค่าเท่ากับ 866.4 $\mu\varepsilon$ ดังรูปที่ 4.4 ดังนั้นเครื่องมือวัดแรงนี้สามารถนำไปใช้งานได้อย่างปลอดภัย โดยมีค่าความปลอดภัย2

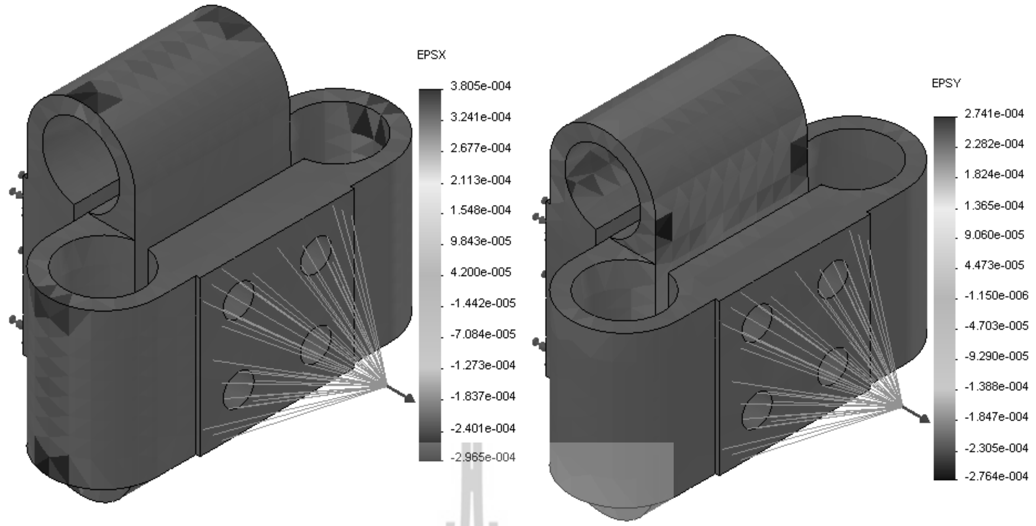


รูปที่ 4.4 ค่าความเครียดเมื่อให้แรงสูงสุดทั้งสามแนวแกนพร้อมกัน

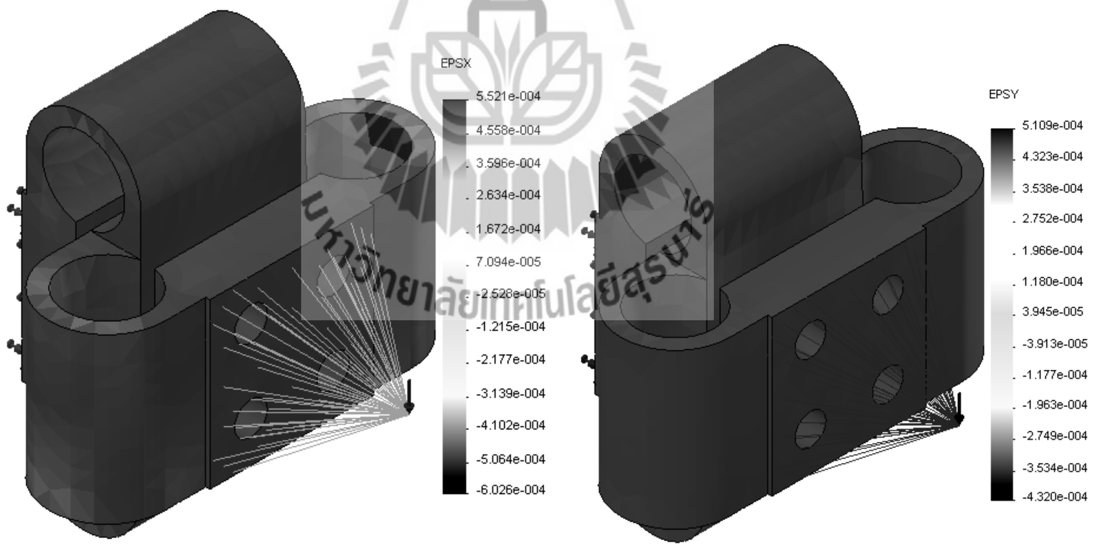
4.3.3 ตำแหน่งที่เหมาะสมที่สุดในการติดตั้งมาตรวัดความเครียด

จากการพิจารณา ε_x , ε_y และ γ_{xy} ของเครื่องมือวัดแรงแบบ ECR สามแกน (ECR วงใน) เมื่อให้แรงในแนวแกน x และ y ทีละแนวแกนดังรูปที่ 4.5 และ 4.6 จากนั้นคำนวณค่าความเค้นสัมผัสโดยใช้สมการที่ (3.1) พบว่าตำแหน่งที่เหมาะสมในการติดตั้งมาตรวัดความเครียดเพื่อวัดแรงในแนวแกน x และ y คือ 58° และ 25° ตามลำดับ

และเมื่อพิจารณา ε_x , ε_z และ γ_{xz} ของเครื่องมือวัดแรงแบบ ECR สามแกน(ECR วงนอก) เมื่อให้แรงในแนวแกน x และ z ทีละแนวแกนดังรูปที่ 4.7 และ 4.8 จากนั้นคำนวณค่าความเค้นสัมผัสโดยใช้สมการที่ (3.2) พบว่าตำแหน่งที่เหมาะสมในการติดตั้งมาตรวัดความเครียดเพื่อวัดแรงในแนวแกน z คือ 25°

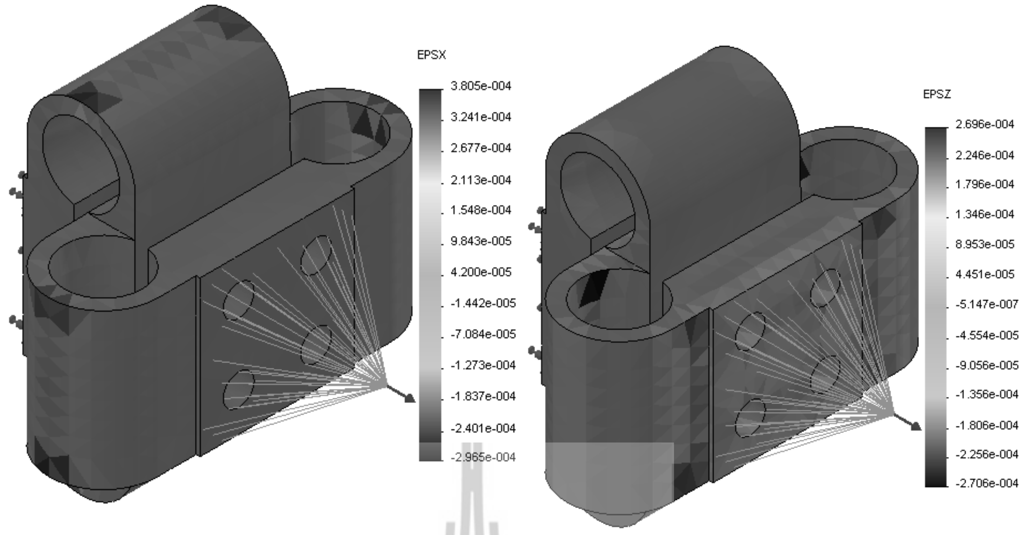


รูปที่ 4.5 ค่าความเครียดในแนวแกน x เมื่อให้แรงในแนวแกน x (ซ้าย),
ค่าความเครียดในแนวแกน y เมื่อให้แรงในแนวแกน x (ขวา)

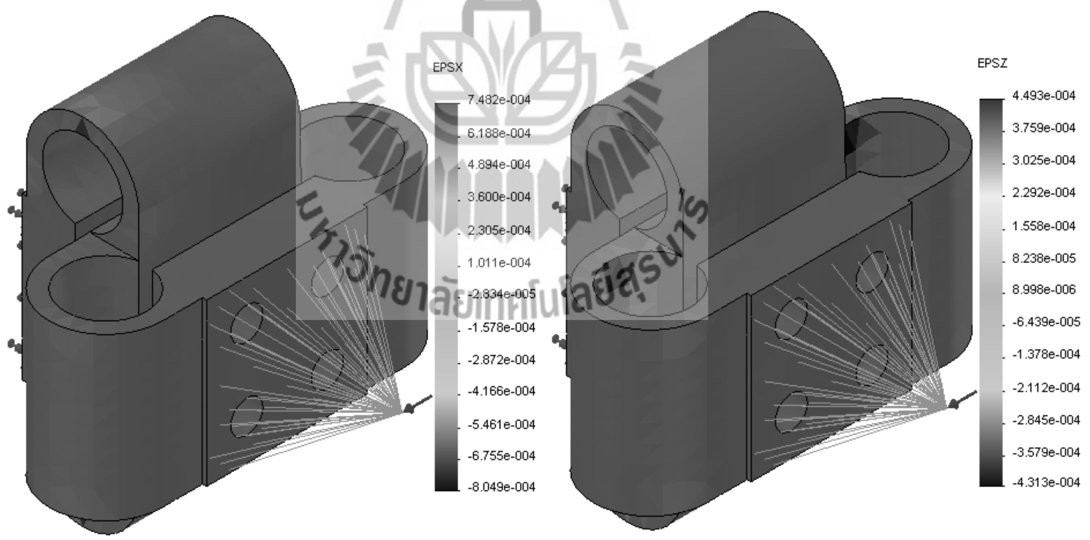


รูปที่ 4.6 ค่าความเครียดในแนวแกน x เมื่อให้แรงในแนวแกน y (ซ้าย),
ค่าความเครียดในแนวแกน y เมื่อให้แรงในแนวแกน y (ขวา)

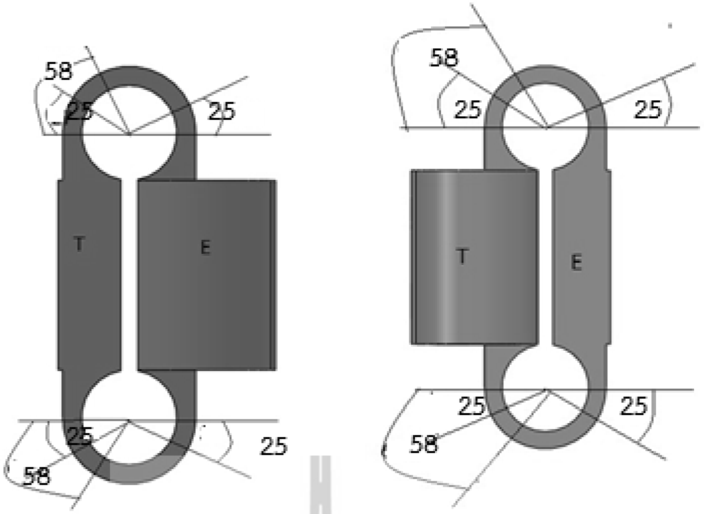
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



รูปที่ 4.7 ค่าความเครียดในแนวแกน x เมื่อให้แรงในแนวแกน x (ซ้าย), ค่าความเครียดในแนวแกน z เมื่อให้แรงในแนวแกน x (ขวา)



รูปที่ 4.8 ค่าความเครียดในแนวแกน x เมื่อให้แรงในแนวแกน z (ซ้าย), ค่าความเครียดในแนวแกน z เมื่อให้แรงในแนวแกน z (ขวา)

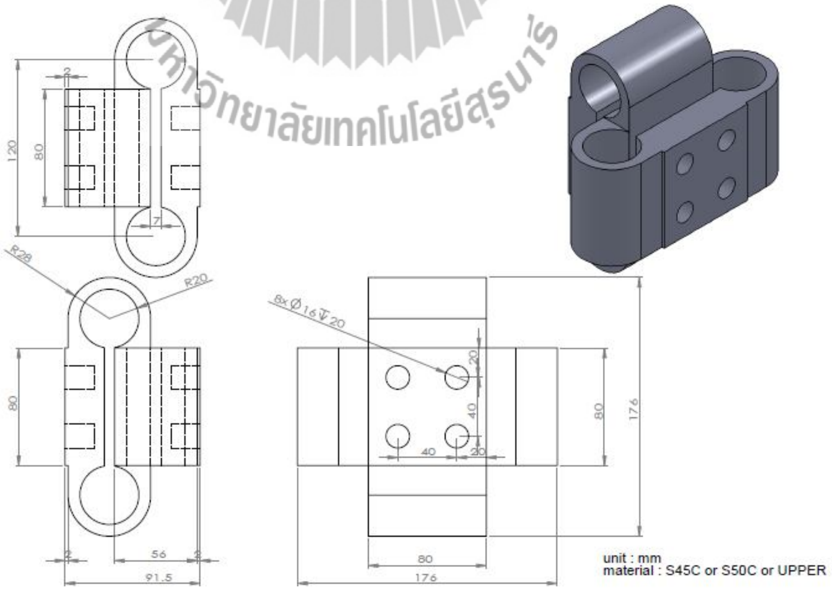


รูปที่ 4.9 ตำแหน่งการติดตั้งมาตรวัดความเครียด

4.4 การสร้างเครื่องมือวัดแรงและการติดตั้งมาตรวัดความเครียด

เครื่องมือวัดแรงแบบ ECR สามแกน ถูกสร้างมาจากเหล็กเหนียว (S50C) เมื่อหาขนาดต่างๆ ของเครื่องมือวัดแรงแบบ ECR สามแกนแล้ว สามารถเขียนแบบ drawing ดังรูปที่ 4.10 และชิ้นงานเมื่อขึ้นรูปเสร็จเรียบร้อยเสดงดังรูปที่ 4.11

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



รูปที่ 4.10 แบบ drawing ของเครื่องมือวัดแรงแบบECR สามแกน

รูปที่ 4.11 เครื่องมือวัดแรงแบบECR สามแกน

เมื่อขึ้นรูปชิ้นงานเรียบร้อยแล้ว ขั้นตอนต่อไปคือการติดตั้งมาตรวัดความเครียดตามตำแหน่งที่ได้วิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

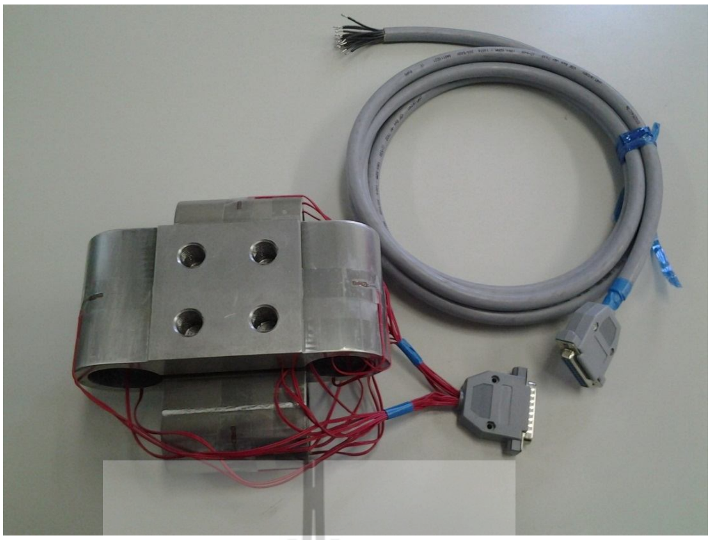
ขั้นตอนในการติดตั้งมาตรวัดความเครียดมีดังต่อไปนี้

1) ปรับสภาพพื้นผิวตำแหน่งที่จะติดตั้งมาตรวัดความเครียด
   - ขัดด้วยกระดาษทรายเบอร์ 220 และ 320ตามลำดับ เพื่อขจัดสีและสนิมออก
   - ใช้ตัวทำละลายเช็ด เพื่อขจัดน้ำมันและจาระบีออก
   - ใช้สารละลายที่มีคุณสมบัติเข้ากับวัสดุยึดติดได้ดีทา เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการยึดเกาะให้ดียิ่งขึ้น
2) ระบุตำแหน่งที่ต้องการติดตั้งมาตรวัดความเครียด
3) นำมาตรวัดความเครียดมาติดลงบนเทปใสติดเทปใสนั้นตามตำแหน่งที่ระบุไว้บนตัวรับแรงให้ตรงกัน
4) ดึงปลายเทปใสออกด้านหนึ่ง แล้วทากาวลงบนตำแหน่งที่ต้องการติดตั้ง
5) ติดตั้งมาตรวัดความเครียดกลับลงไปยังตำแหน่งเดิมโดยใช้เทปเป็นตัวนำ ในขณติดตั้งมาตรวัดความเครียดกลับ ให้กดเพื่อไล่กาวที่เกินออกไป
6) กดบริเวณมาตรวัดความเครียด จนกระทั่งกาวแห้งแล้วจึงแกะเทปออก ทาทับด้วยโพลียูรีเทนอีกครั้งเพื่อป้องกันน้ำและความชื้น

รูปที่ 4.12 อุปกรณ์ปรับสภาพพื้นผิว

รูปที่ 4.13 มาตรวัดความเครียด

เมื่อติดตั้งมาตรวัดความเครียดเรียบร้อย ดังรูปที่ 4.14 เพื่อให้มาตรวัดความเครียดสามารถทำงานได้อย่างปลอดภัยจึงหุ้มด้วย coating (AK-22) ซึ่งมีลักษณะคล้ายดินน้ำมัน ช่วยลดแรงกระแทก และป้องกันความชื้น ไม่ให้เข้าไปสร้างความเสียหายแก่มาตรวัดความเครียด จากนั้นพันด้วยเทปพันสายไฟอีกชั้นเพื่อป้องกันสิ่งสกปรก ดังรูปที่ 4.15



รูปที่ 4.14 การติดตั้งมาตรวัดความเครียด

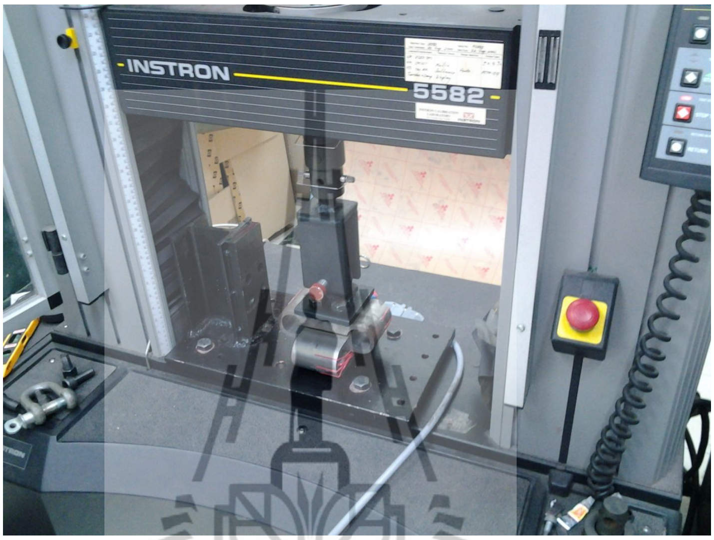
รูปที่ 4.15 เครื่องมือวัดแรงแบบ ECR สามแกน หลังติดอุปกรณ์ป้องกัน

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

4.5 ผลการสอบเทียบและการตรวจสอบเพื่อยืนยันการใช้งาน

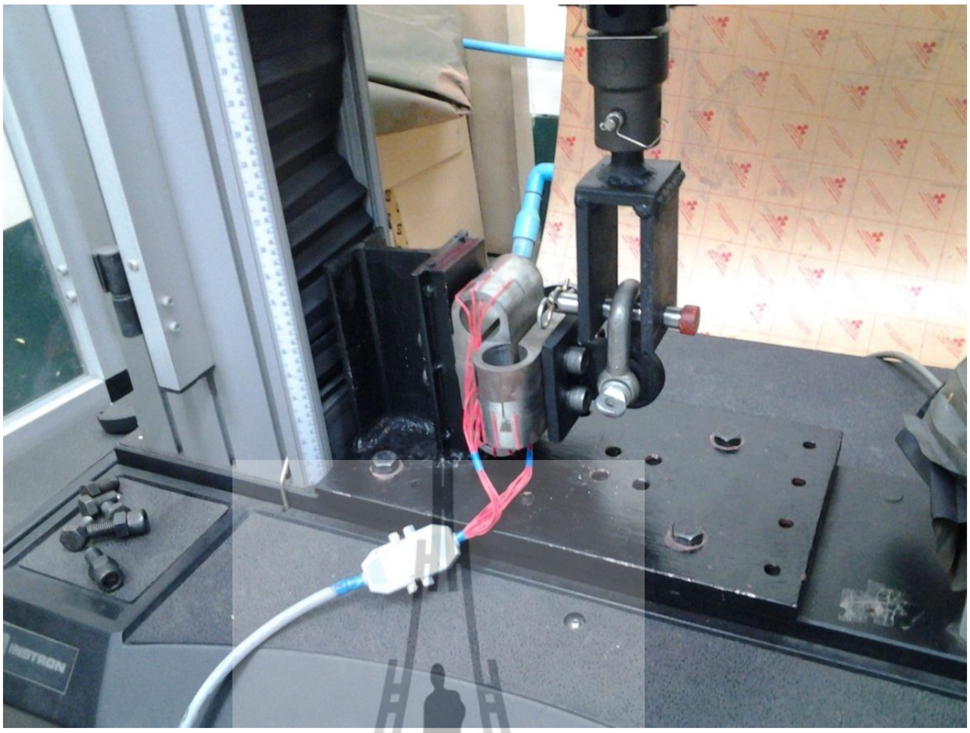
4.5.1 ผลการสอบเทียบ

จากรูปที่ 4.16 – 4.18 แสดงวิธีการสอบเทียบเครื่องมือวัดแรงแบบ ECR สามแกนโดยให้แรงทีละแนวแกนในแนวแกน x, y และ z ตามลำดับและรูปที่ 4.19 แสดงเครื่องมือที่ใช้ในการอ่านค่าแรง และความเครียด

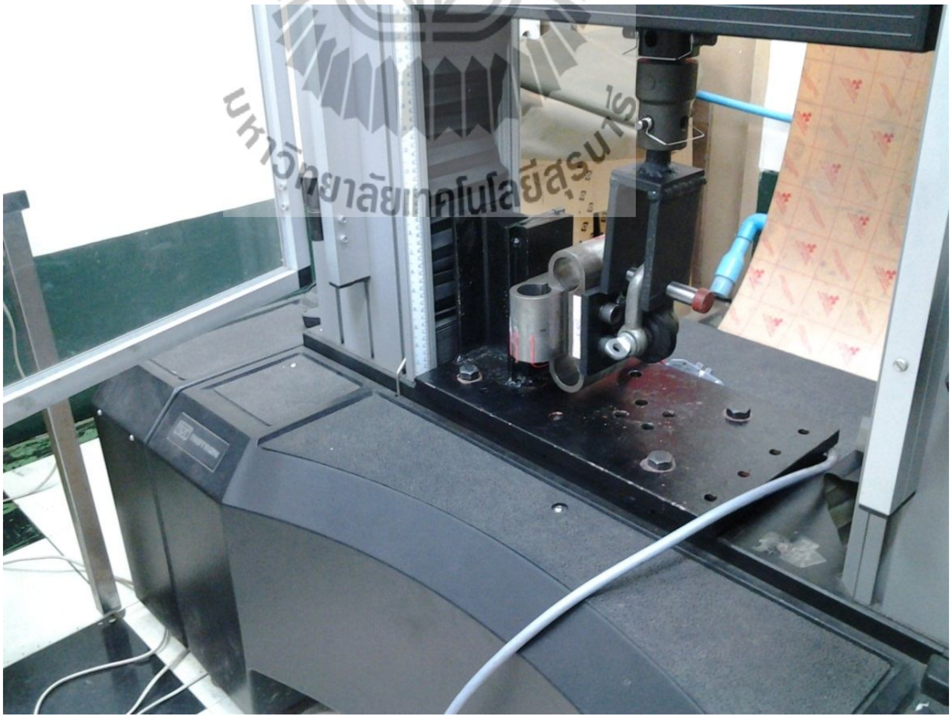


รูปที่ 4.16 การสอบเทียบเครื่องมือวัดแรงแบบ ECR สามแกน เมื่อให้แรงในแนวแกน x

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



รูปที่ 4.17 การสอบเทียบเครื่องมือวัดแรงแบบ ECR สามแกน เมื่อให้แรงในแนวแกน y



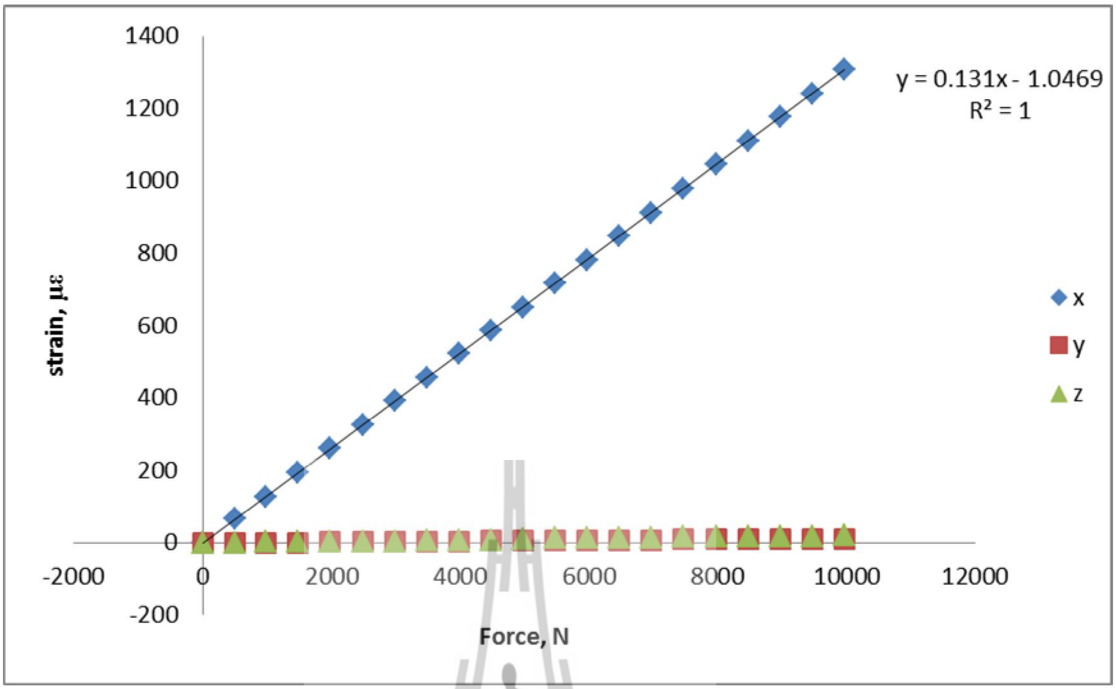
รูปที่ 4.18 การสอบเทียบเครื่องมือวัดแรงแบบ ECR สามแกน เมื่อให้แรงในแนวแกน z

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

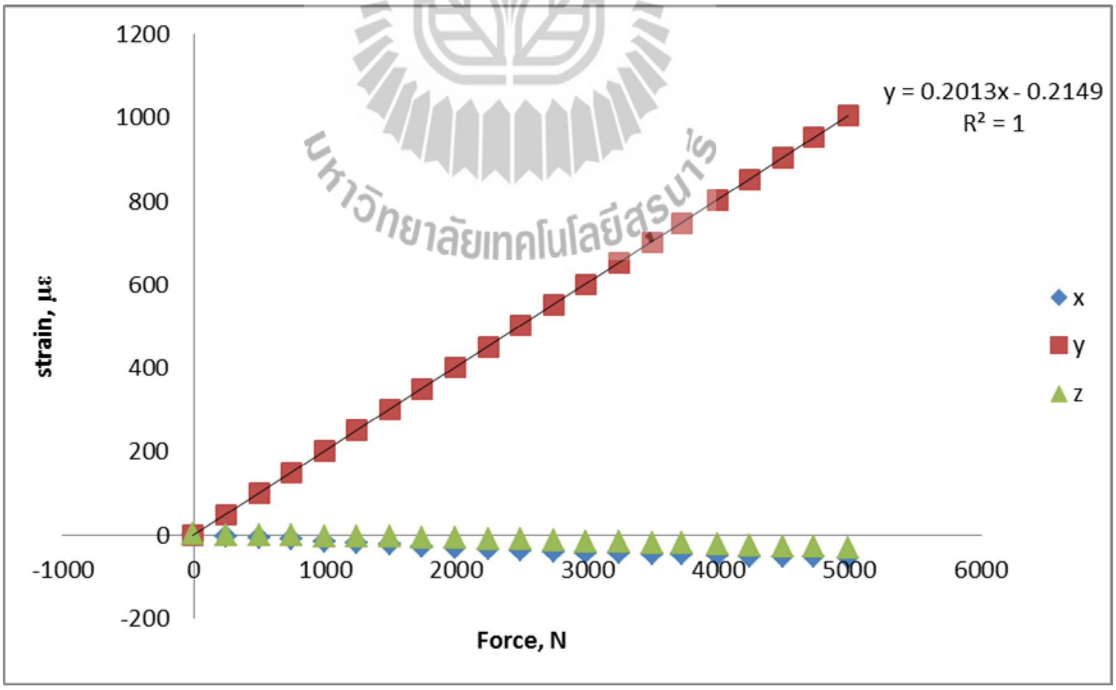
รูปที่ 4.19 เครื่องมือที่ใช้สำหรับการอ่านค่าแรง และความเครียด

ผลการสอบเทียบของเครื่องมือวัดแรงแบบ ECR สามแกน ตัวที่ 1 (สำหรับวัดแรงบนแขนบนของรถแทรกเตอร์) แสดงดังรูปที่ 4.20 – 4.22 ผลการสอบเทียบของเครื่องมือวัดแรงแบบ ECR สามแกน ตัวที่ 2 (สำหรับวัดแรงบนแขนล่างซ้ายของรถแทรกเตอร์) แสดงดังรูปที่ 4.23– 4.25 และผลการสอบเทียบของเครื่องมือวัดแรงแบบ ECR สามแกน ตัวที่ 3 (สำหรับวัดแรงบนแขนล่างขวาของรถแทรกเตอร์) แสดงดังรูปที่ 4.26 – 4.28 พบว่าความสัมพันธ์ระหว่างแรงและความเครียดของทุกแนวแกนเป็นแบบเชิงเส้น โดยมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจสูง (R^2=1) และพบว่าเครื่องมือวัดแรงแบบ ECR สามแกน ทั้งสามตัวที่ถูกสร้างขึ้นสามารถวัดแรงแต่ละแนวแกนได้อย่างถูกต้องแม่นยำ เพราะมีค่าcross sensitivities ต่ำ

ค่า cross sensitivities ของเครื่องมือวัดแรงสองแนวแกนที่นักวิจัยส่วนใหญ่สร้างขึ้นมีค่าไม่เกิน 4 % แต่จากการวิเคราะห์ข้อมูลพบว่า ค่า cross sensitivities (แกน x) เมื่อให้แรงในแนวแกน y ของเครื่องมือวัดแรงแบบECR สามแกน ตัวที่ 1 มีค่าสูงคือ 6.90% สาเหตุอาจเกิดมาจากตำแหน่งในการติดตั้งมาตรวัดความเครียดคลาดเคลื่อนส่วนตำแหน่งอื่น ๆ มีค่าcross sensitivities อยู่ในช่วงที่ยอมรับค่าได้ (ดังตารางที่ 4.2)

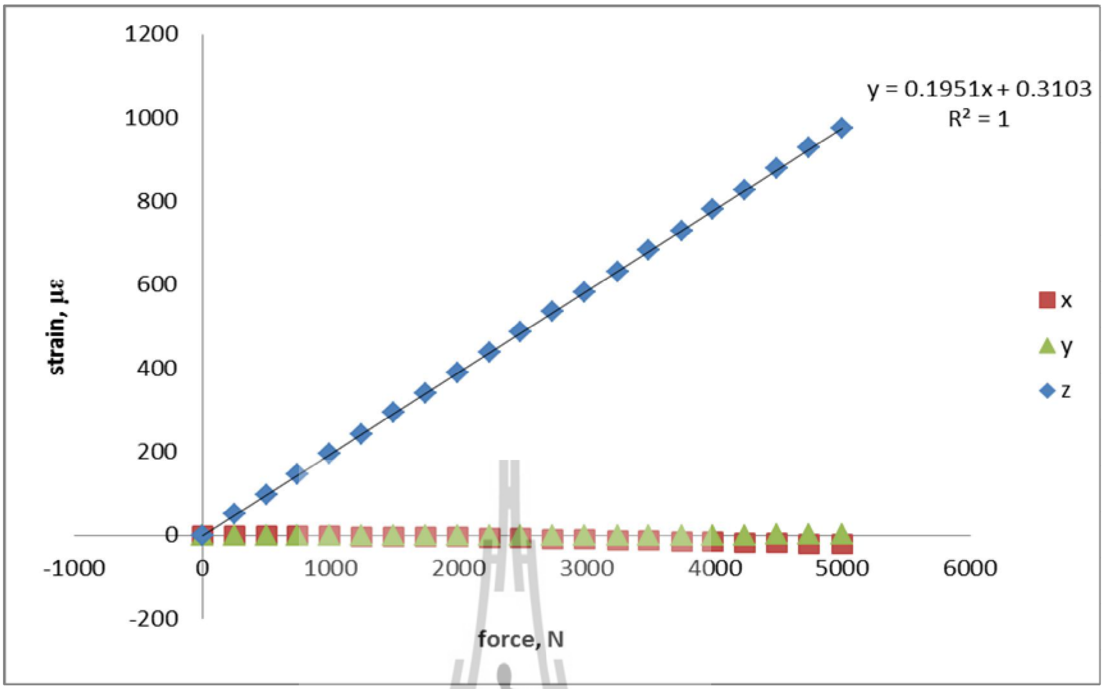


รูปที่ 4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงและความเครียดของECR ตัวที่ 1 เมื่อให้แรงในแนวแกน x

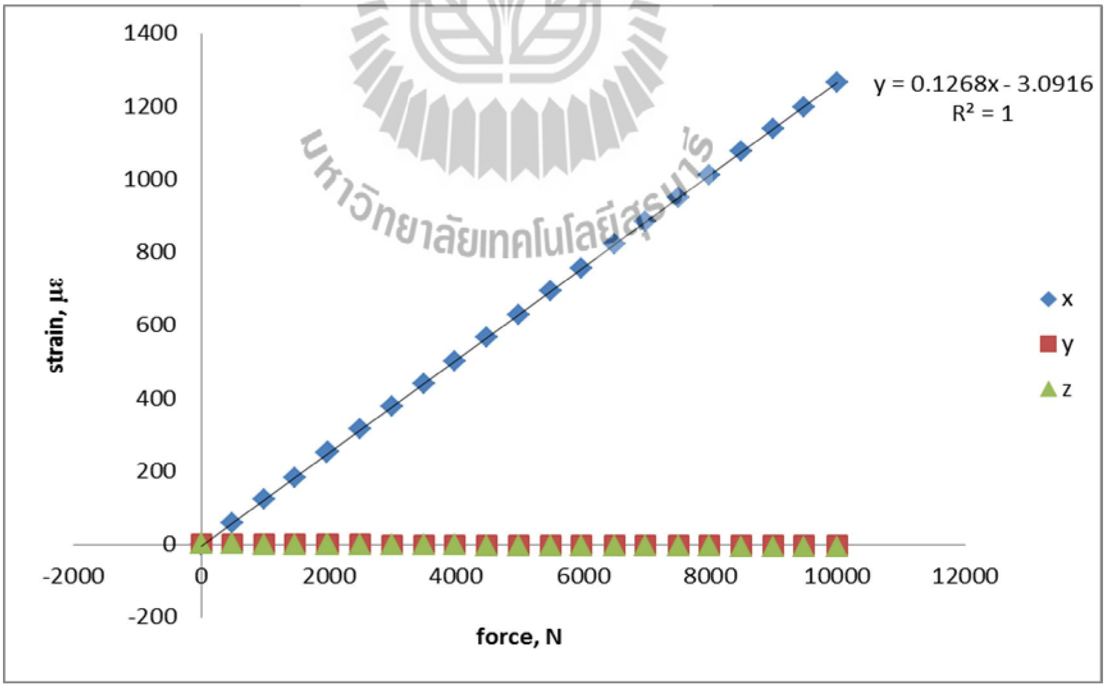


รูปที่ 4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงและความเครียดของECR ตัวที่ 1 เมื่อให้แรงในแนวแกน y

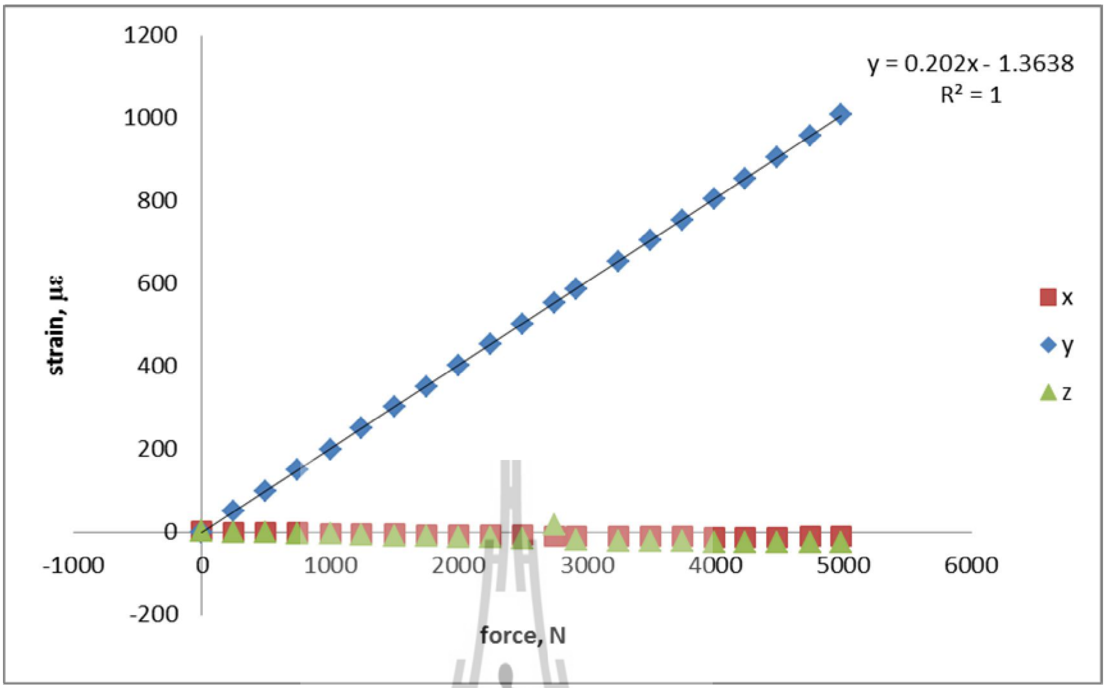
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



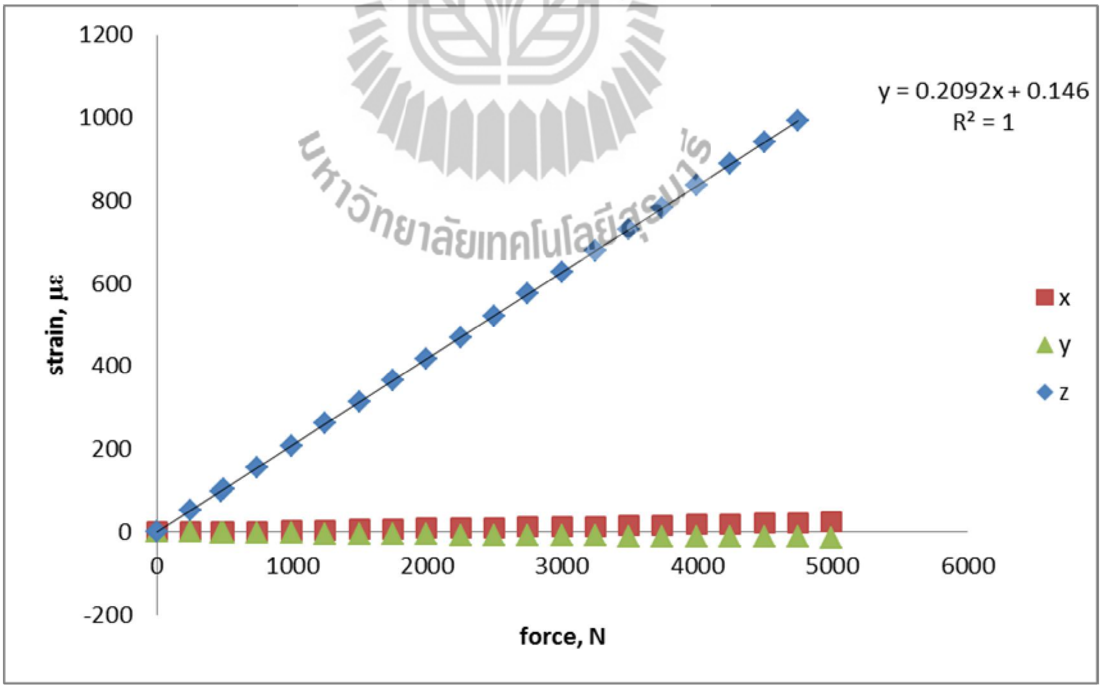
รูปที่ 4.22 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงและความเครียดของECR ตัวที่ 1 เมื่อให้แรงในแนวแกน z



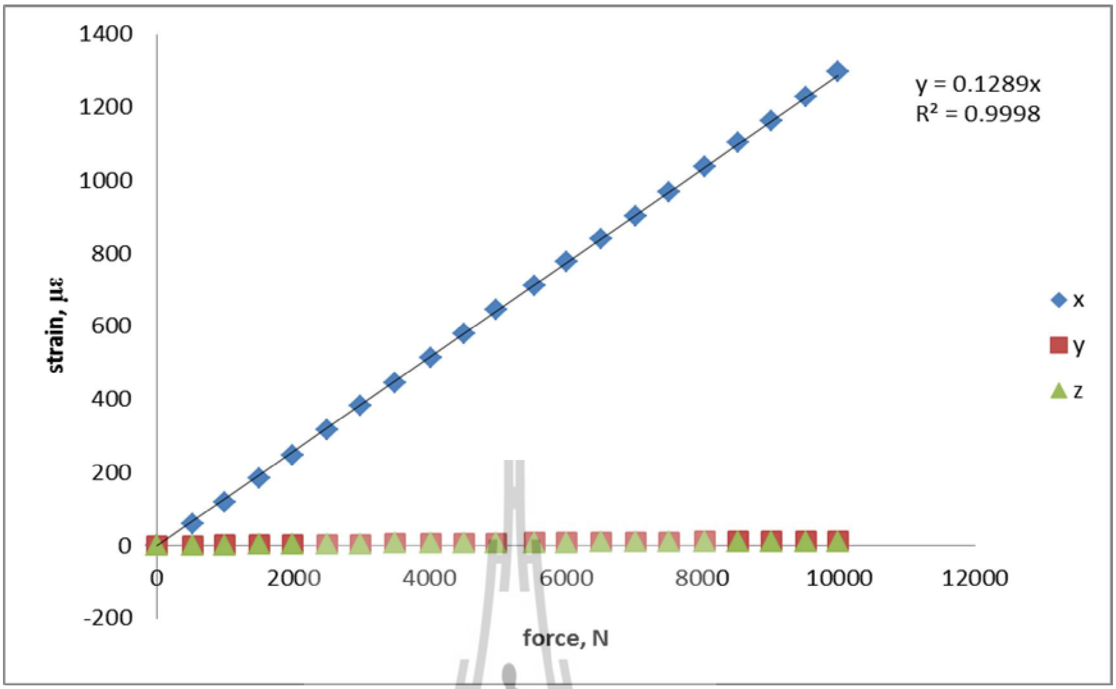
รูปที่ 4.23 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงและความเครียดของECR ตัวที่ 2 เมื่อให้แรงในแนวแกน x



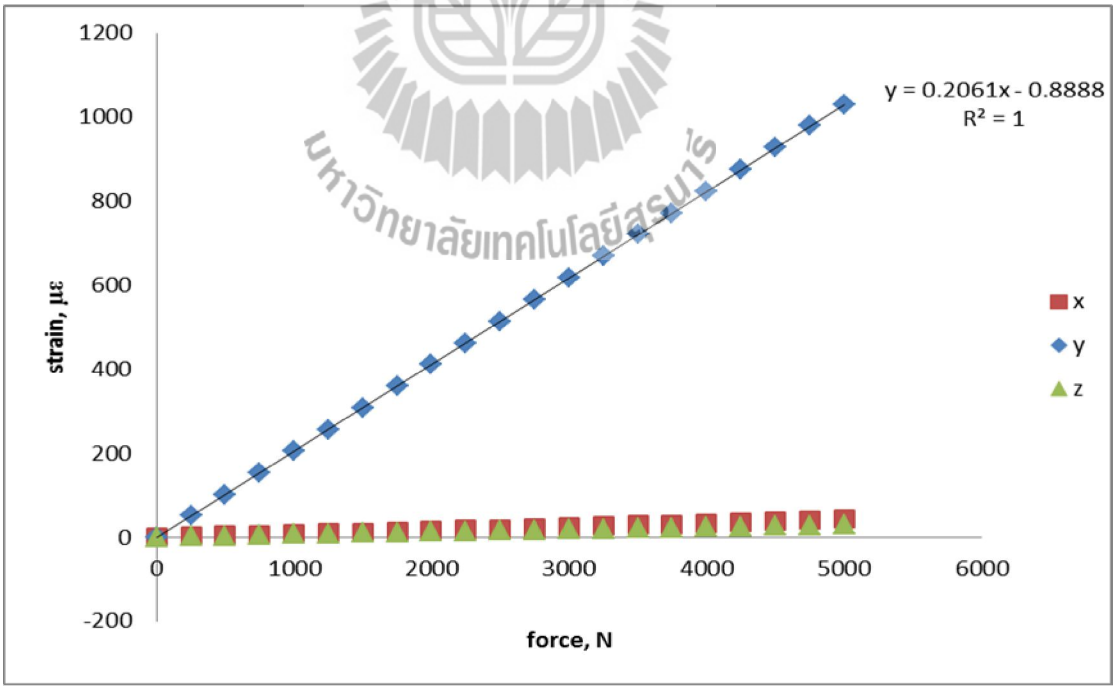
รูปที่ 4.24 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงและความเครียดของECR ตัวที่ 2 เมื่อให้แรงในแนวแกน y



รูปที่ 4.25 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงและความเครียดของECR ตัวที่ 2 เมื่อให้แรงในแนวแกน z

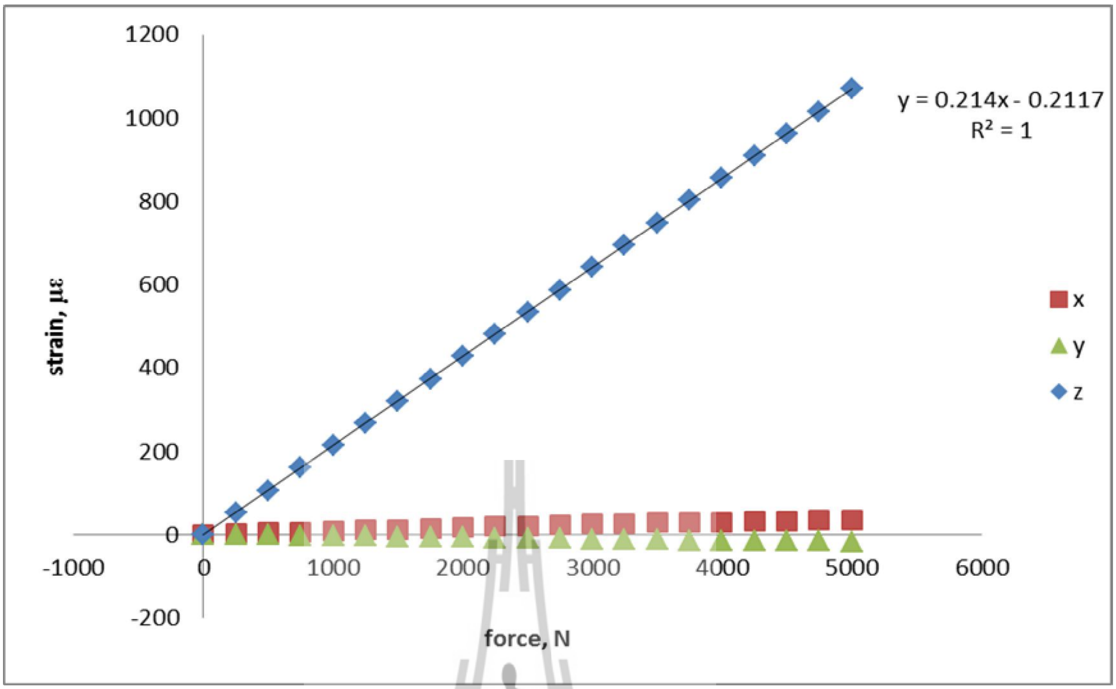


รูปที่ 4.26 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงและความเครียดของECR ตัวที่ 3 เมื่อให้แรงในแนวแกน x



รูปที่ 4.27 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงและความเครียดของECR ตัวที่ 3 เมื่อให้แรงในแนวแกน y

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



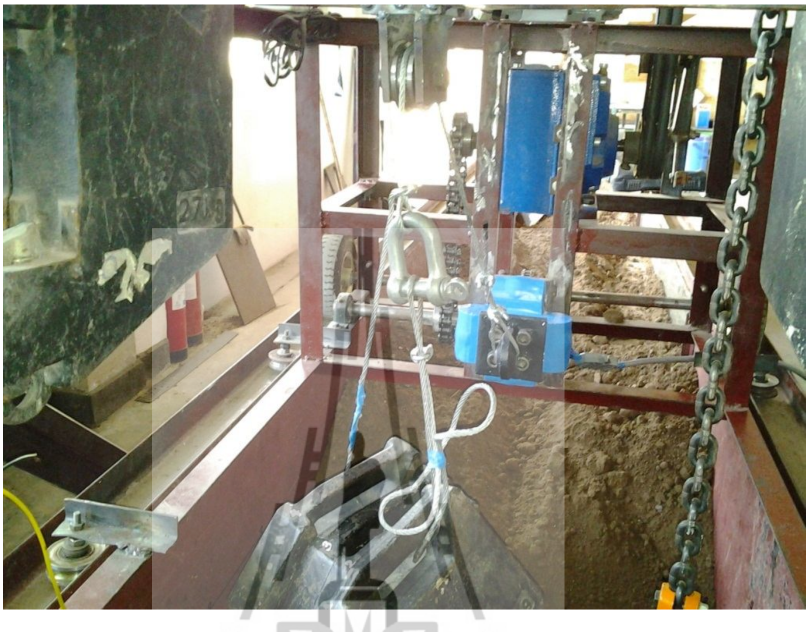
รูปที่ 4.28 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงและความเครียดของECR ตัวที่3 เมื่อให้แรงในแนวแกน z

ตารางที่ 4.2 สมการการสอบเทียบและค่า cross sensitivities ของเครื่องมือวัดแรงแบบ ECR สาม แกน

ตำแหน่ง ECR	แกนที่ให้แรง	สมการการสอบเทียบ	% cross sensitivities		
			x	y	z
ECR (แขนบน)	x	$\varepsilon_x = 0.1310F_x - 1.0469$	-	0.71	1.27
	y	$\varepsilon_y = 0.2013F_y - 0.2149$	6.90	-	2.05
	z	$\varepsilon_z = 0.1951F_z + 0.3103$	1.36	0.29	-
ECR (แขนล่างซ้าย)	x	$\varepsilon_x = 0.1268F_x - 3.0916$	-	0.28	0.56
	y	$\varepsilon_y = 0.2020F_y - 1.3638$	1.41	-	2.80
	z	$\varepsilon_z = 0.2092F_z + 0.1460$	2.08	1.36	-
ECR (แขนล่างขวา)	x	$\varepsilon_x = 0.1289F_x$	-	1.23	0.99
	y	$\varepsilon_y = 0.2061F_y - 0.8888$	4.02	-	3.05
	z	$\varepsilon_z = 0.2140F_z - 0.2117$	4.07	1.52	-

4.5.2 ผลการตรวจสอบเพื่อยืนยันการใช้งาน

ผลการตรวจสอบความถูกต้องของเครื่องมือวัดแรง เมื่อถ่วงตุ้มน้ำหนักที่ทราบค่าแน่นอน ทำมุมกับแนวดิ่ง 29.5 องศา และทำมุมกับแนวระดับ 25.0 องศา แสดงดังตารางที่ 4.3



รูปที่ 4.29 วิธีการตรวจสอบเพื่อยืนยันการใช้งาน

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

รูปที่ 4.30 อุปกรณ์วัดค่าความเครียด

ตารางที่ 4.3 ผลการตรวจสอบเพื่อยืนยันการใช้งาน

เครื่องมือวัดแรงแบบ ECR สามแกน ตัวที่ 1											
แรงจากตุ้มน้ำหนัก, N				แรงที่อ่านค่าได้จากเครื่องมือวัด, N				% error			
x	y	z	total	x	y	z	total	x	y	z	total
115.00	215.41	53.62	250.00	114.20	216.67	53.25	250.64	0.69	0.58	0.69	0.26
229.99	430.81	107.25	500.00	231.50	428.79	106.56	498.80	0.66	0.47	0.64	0.24
344.99	646.22	160.87	750.00	347.31	642.40	159.87	747.57	0.67	0.59	0.63	0.32
459.99	861.63	214.49	1,000.00	462.11	864.95	213.17	1,003.56	0.46	0.38	0.62	0.36
เครื่องมือวัดแรงแบบ ECR สามแกน ตัวที่ 2											
แรงจากตุ้มน้ำหนัก, N				แรงที่อ่านค่าได้จากเครื่องมือวัด, N				% error			
x	y	z	total	x	y	z	total	x	y	z	total
115.00	215.41	53.62	250.00	114.29	217.15	53.32	251.11	0.62	0.81	0.57	0.44
229.99	430.81	107.25	500.00	228.64	434.47	108.29	502.76	0.59	0.85	0.97	0.55
344.99	646.22	160.87	750.00	342.99	640.91	162.30	744.82	0.58	0.82	0.89	0.69
459.99	861.63	214.49	1,000.00	458.14	868.14	216.32	1,005.16	0.40	0.76	0.85	0.52
เครื่องมือวัดแรงแบบ ECR สามแกน ตัวที่ 3											
แรงจากตุ้มน้ำหนัก, N				แรงที่อ่านค่าได้จากเครื่องมือวัด, N				% error			
x	y	z	total	x	y	z	total	x	y	z	total
115.00	215.41	53.62	250.00	114.04	217.32	53.79	251.25	0.83	0.89	0.32	0.50
229.99	430.81	107.25	500.00	228.08	426.44	108.00	495.51	0.83	1.02	0.70	0.90
344.99	646.22	160.87	750.00	342.13	641.38	162.20	744.80	0.83	0.75	0.83	0.69
459.99	861.63	214.49	1,000.00	456.17	851.47	213.14	989.20	0.83	1.18	0.63	1.08

4.6 ตำแหน่งการติดตั้งอุปกรณ์วัดสมรรถนะของรถแทรกเตอร์

4.6.1 ชุดวัดแรงฉุดลาก

ชุดวัดแรงฉุดลากประกอบจากเหล็กกล่อง สามารถต่อพ่วงรถแทรกเตอร์ที่มีระบบต่อพ่วงใน category I ได้ ดังแสดงในรูปที่ 4.31 และ 4.32

รูปที่ 4.31 การติดตั้งชุดวัดแรงฉุดลาก

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

รูปที่ 4.32 ตำแหน่งติดตั้งเครื่องมือวัดแรงบนชุดวัดแรงฉุดลาก

4.6.2 ชุดวัดการสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิง

การสอบเทียบชุดวัดการสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิงถูกทำที่ 2 รอบความเร็วคือ 800 rpm และ 1,500 rpm ตามลำดับ จากการสอบเทียบพบว่า เซนเซอร์ตัวที่ 1 มีค่าความละเอียด (resolution) เท่ากับ 0.275 ml/pulse ณ ทั้งสองความเร็วรอบ ส่วนเซนเซอร์ตัวที่2 มีค่าความละเอียด (resolution) เท่ากับ 0.269 ml/pulse และ 0.271 ml/pulse ดังแสดงไว้ในตารางที่ 4.4 ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่า ความเร็วรอบของเครื่องยนต์ไม่มีผลกระทบต่อค่าความละเอียดของเซนเซอร์ แม้ว่าเซนเซอร์นี้สามารถวัดปริมาตรน้ำมันเชื้อเพลิงที่มีค่าความหนืดสัมบูรณ์ช่วงระหว่าง 0-1,000 mPa.s โดยมีค่าความผิดพลาดไม่เกิน 1 % แต่จากผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่า ค่าความผิดพลาดของเซนเซอร์ตัวที่ 1 และ 2 มีค่าสูงประมาณ 10 % และ 8 % ตามลำดับ ค่าความผิดพลาดนี้น่าจะมีสาเหตุมาจากการสึกหรอของเซนเซอร์อันเนื่องมาจากการใช้งานมาระยะหนึ่งแล้ว

รูปที่ 4.33 ตำแหน่งติดตั้งชุดวัดน้ำมันเชื้อเพลิง

ตารางที่ 4.4 ค่าความละเอียดของเซนเซอร์วัดน้ำมันเชื้อเพลิง

Engine Speed (rpm)	Sensor Resolution (ml/pulse)			Difference from Standard (%)	
	Standard	Sensor 1	Sensor 2	Sensor 1	Sensor 2
800	0.25	0.275	0.269	9.9	7.6
1,500	0.25	0.275	0.271	10.0	8.4

4.6.3 ชุดวัดการลื่นไถลและความเร็วของรถแทรกเตอร์

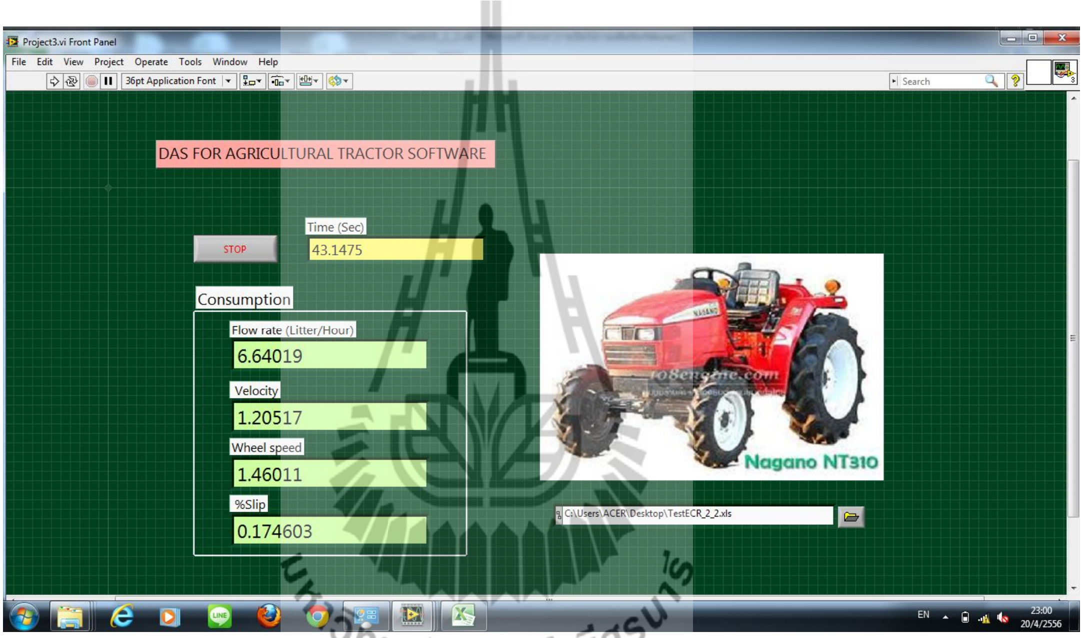
ชุดวัดการลื่นไถลประกอบด้วย เซ็นเซอร์วัดความเร็วของล้อขับ และล้อที่ 5 (fifth wheel) จากการทดสอบพบว่า proximity สำหรับวัดระยะทางของล้อขับดังรูปที่ 4.34 มีค่าความละเอียด (resolution) เท่ากับ 0.5882 m/pulse ส่วน proximity สำหรับวัดระยะทางล้อตามดังรูปที่ 4.35มีค่าความละเอียด (resolution) เท่ากับ 0.4167 m/pulse

รูปที่ 4.34 ตำแหน่งติดตั้ง proximity สำหรับวัดระยะทางล้อขับ

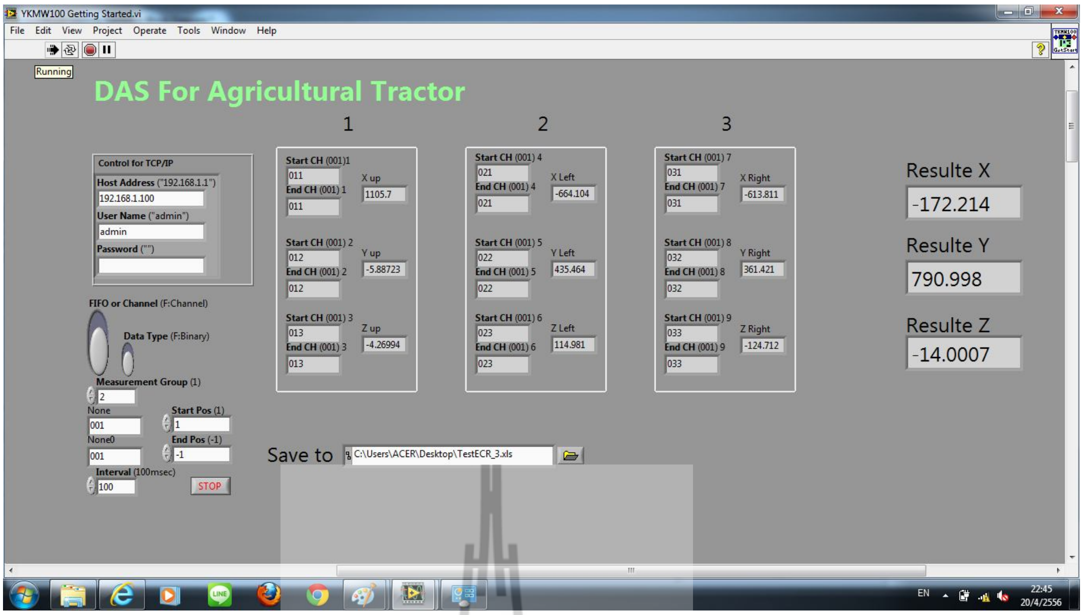
รูปที่ 4.35 ตำแหน่งติดตั้ง proximity สำหรับวัดระยะทางล้อตาม

4.7 ระบบรวบรวมข้อมูล

ระบบรวบรวมข้อมูลประกอบไปด้วย 2 ส่วน คือ ส่วนที่หนึ่ง ทำหน้าที่รวบรวมและแสดงข้อมูลสมรรถนะของรถแทรกเตอร์ เช่น การสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิง ความเร็วในการทำงานของรถแทรกเตอร์ และการลื่นไถล ดังรูปที่ 4.36 ส่วนที่สอง ทำหน้าที่รวบรวมค่าของแรงในแนวแกน x, y และ z ของเครื่องมือวัดแรงสามแนวแกนแบบ ECR แต่ละตัวรวม 9 ช่องสัญญาณ และแสดงผลรวมแรงกระทำในแต่ละแนวแกนของแขนบน แขนล่างซ้าย และแขนล่างขวา จำนวน 3 ช่องสัญญาณดังรูปที่ 4.37



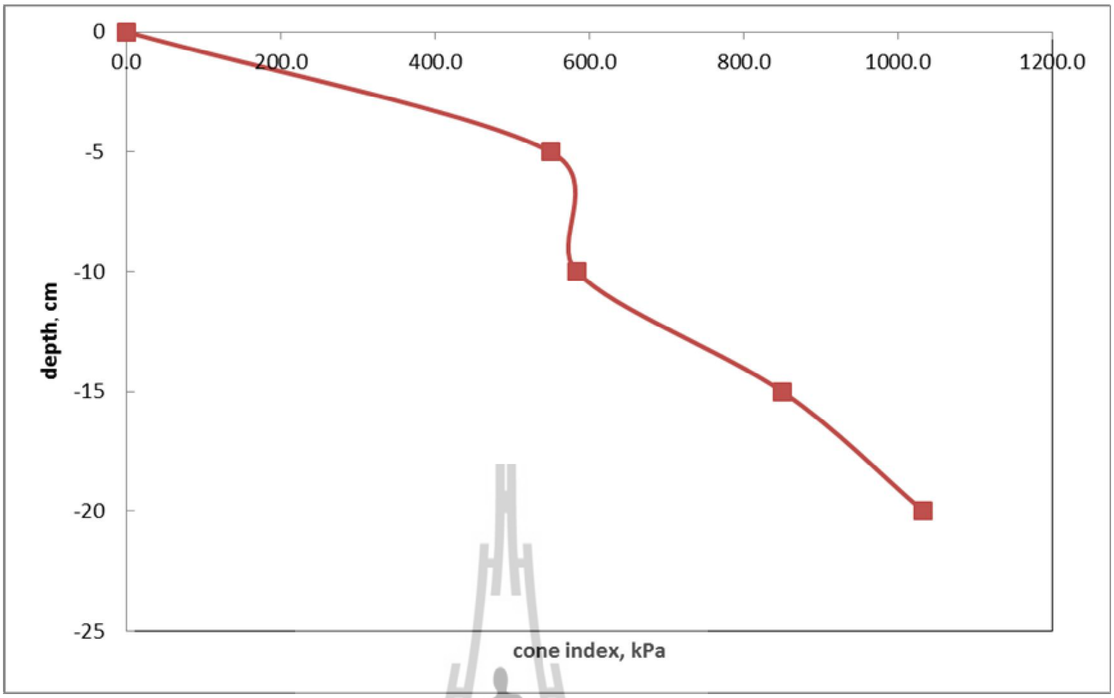
รูปที่ 4.36 หน้าจอแสดงผลค่าการสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิง ความเร็วในการทำงาน ความเร็วล้อขับ และการลื่นไถล



รูปที่ 4.37 หน้าจอแสดงผลค่าแรงในแนวแกน x y และ z

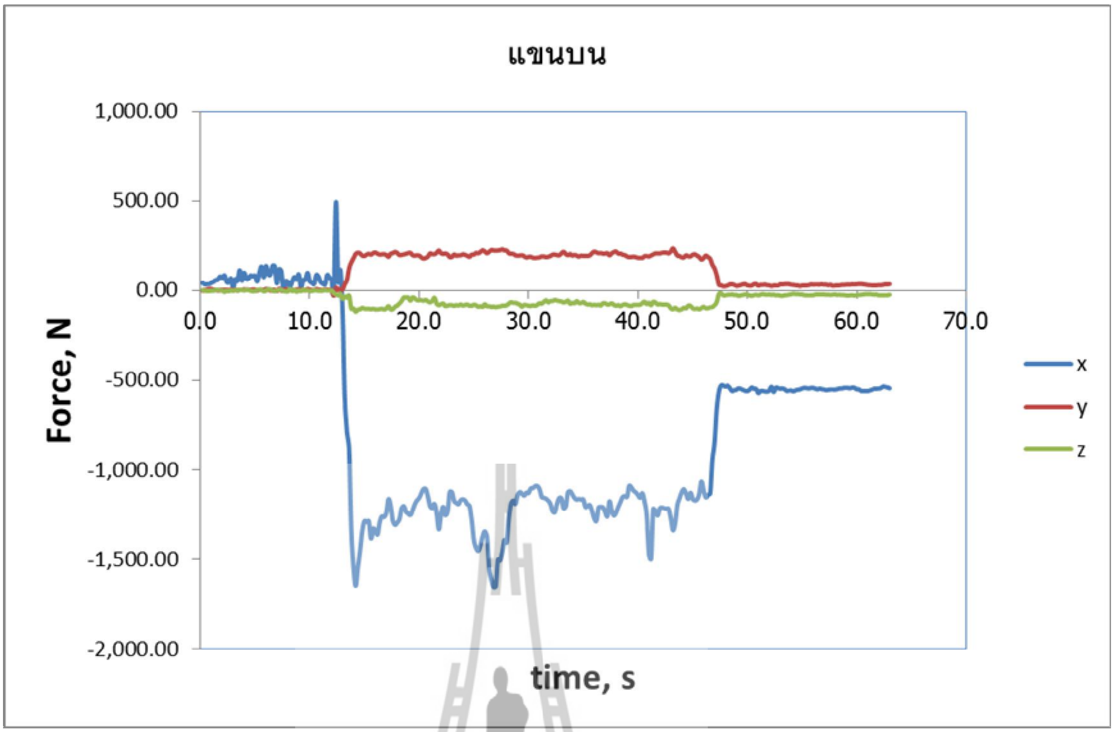
4.8 ผลการทดสอบเครื่องมือวัดแรงแบบ ECR สามแกน

จากผลการทดสอบเบื้องต้นด้วยเครื่องขุดมันสำปะหลังแบบต่อพ่วงสามจุดการทดสอบนี้ใช้รถแทรกเตอร์ยี่ห้อ Nagano ขนาด 35 แรงม้า เป็นต้นกำลังในการฉุดลากเครื่องขุดมันสำปะหลังแบบพ่วงสามจุด และทดสอบโดยเกียร์ L1 ที่รอบเครื่องยนต์ 1,500 รอบต่อนาที สภาพดินที่ใช้ทดสอบเป็นดินทราย (sand 88.34%, silt 8.75% and clay 2.91%) ความชื้น 8.7 (db) ความแข็งของดิน (cone index) แสดงดังรูปที่ 4.38 และการทดสอบเครื่องมือวัดแรงด้วยเครื่องขุดมันสำปะหลังแบบต่อพ่วงสามจุดแสดงดังรูปที่ 4.39

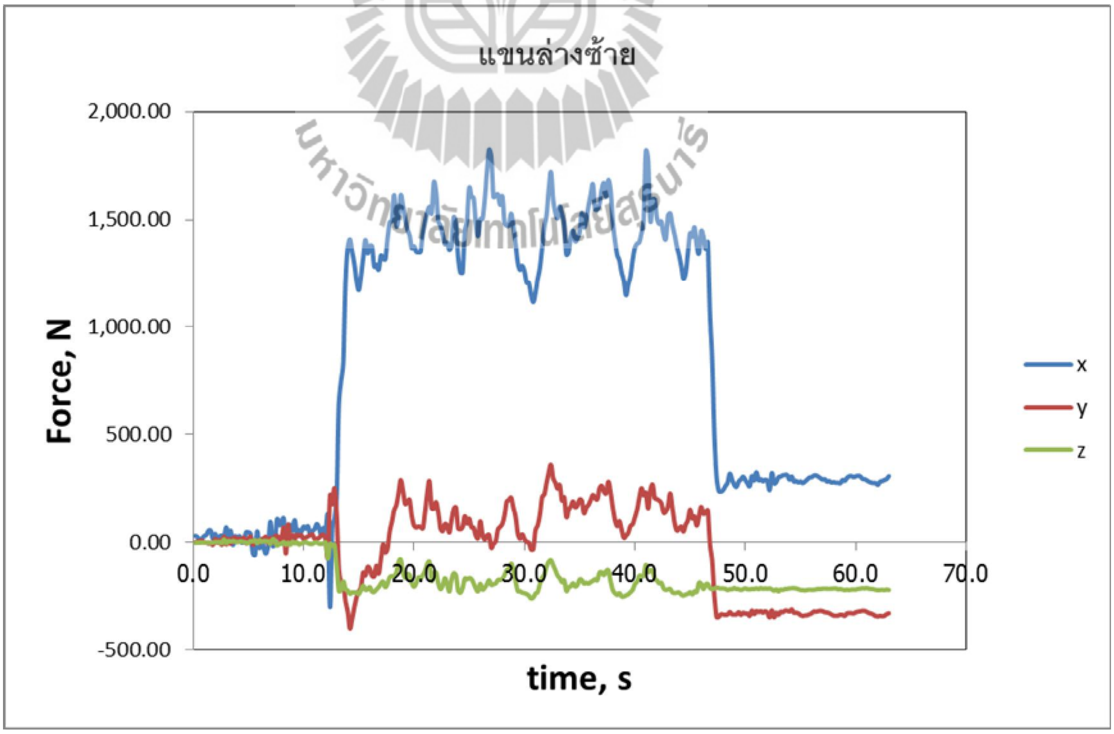


รูปที่ 4.38 ค่าความแข็งของดิน (cone index)

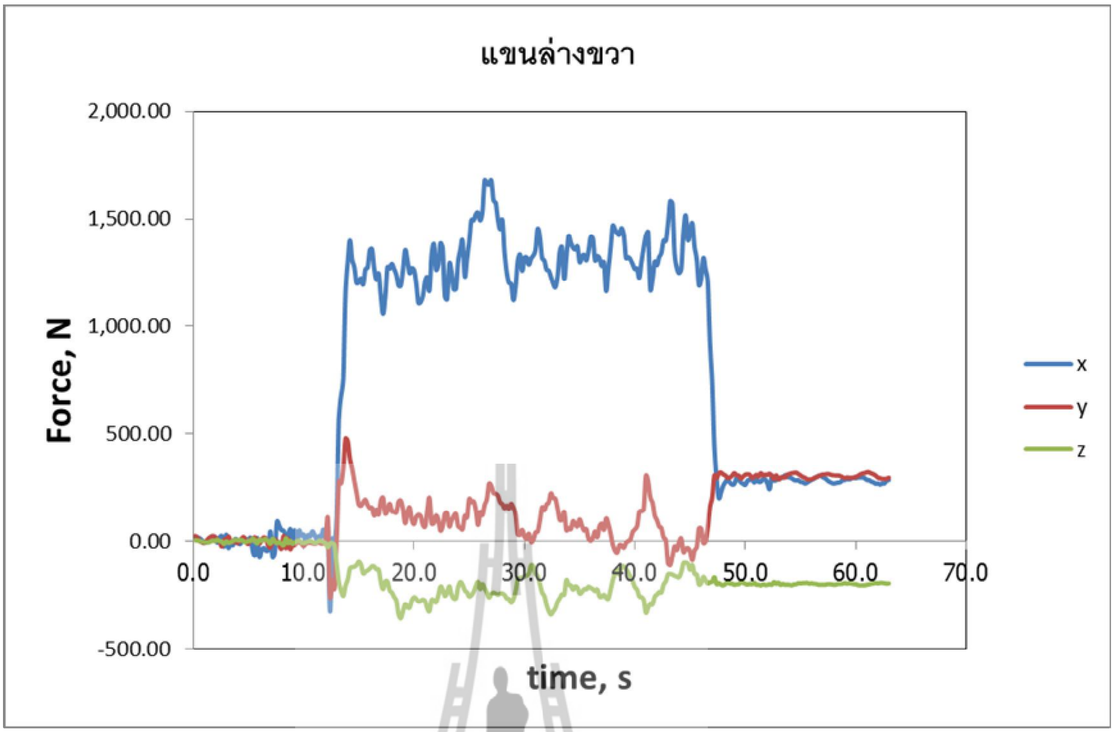
รูปที่ 4.39 การทดสอบเครื่องมือวัดแรงด้วยเครื่องขุดมันสำปะหลังแบบต่อพ่วงสามจุด



รูปที่ 4.40 ตัวอย่างค่าแรงที่วัดได้ของแขนบน



รูปที่ 4.41 ตัวอย่างค่าแรงที่วัดได้ของแขนล่างซ้าย



รูปที่ 4.42 ตัวอย่างค่าแรงที่วัดได้ของแขนล่างขวา

ตารางที่ 4.5 ผลการทดสอบเครื่องมือวัดแรงด้วยเครื่องขุดมันสำปะหลังแบบต่อพ่วงสามจุด

parameter	value	Unit
force_x	1,568.93	N
force_y	421.85	N
force_z	489.92	N
fuel	4.48	L/hr
speed	0.50	m/s
%slip	1.91	%

บทที่ 4
ผลการศึกษา และการวิเคราะห์ผล

4.1 บทนำ

บทนี้จะนำเสนอผลการออกแบบเครื่องมือวัดแรงสามแนวแกน ผลของการวิเคราะห์ความแข็งแรงและตำแหน่งที่เหมาะสมที่สุดในการติดตั้งมาตรวัดความเครียดโดยใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ผลของการสอบเทียบเครื่องมือวัดแรง ผลของการติดตั้งระบบรวมรวบข้อมูลในการวัดสมรรถนะของรถแทรกเตอร์ พร้อมทั้งผลการทดสอบในแปลงเกษตรของฟาร์มมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

4.2 ผลการออกแบบเครื่องมือวัดแรงแบบ ECR สามแกน

เครื่องมือวัดแรงแบบ ECR สามแกน ถูกออกแบบให้เหมาะกับรถแทรกเตอร์ category I ในงานวิจัยนี้ใช้รถแทรกเตอร์ยี่ห้อ Nagano NT3500 ที่มีกำลังเครื่องยนต์ 35 hp ในการทดสอบ จากข้อมูลการทดสอบสมรรถนะของรถแทรกเตอร์ที่มีต้นกำลัง 35 hp โดย University of Nebraska, USA (1998) พบว่ารถแทรกเตอร์สามารถสร้างแรงในแนวราบสูงสุดเท่ากับ 19.8 kN และรองรับแรงในแนวดิ่งสูงสุดเท่ากับ 10 kN ดังนั้นค่าแรง F และแรง P ที่นำไปใช้ออกแบบหาขนาด ECR มีค่าเท่ากับ 10 kN และ 5 kN ตามลำดับ โดยมีค่าโมเมนต์ดัดเนื่องจากแรงภายนอกเท่ากับ 0.57 kN.m ดังนั้นเมื่อเลือกค่า R = 24 mm, L = 60 mm และ b = 80 mm สามารถคำนวณขนาดของเครื่องมือวัดแรงแบบ ECR สามแกน โดยใช้สมการที่ (2.6) ได้ดังนี้

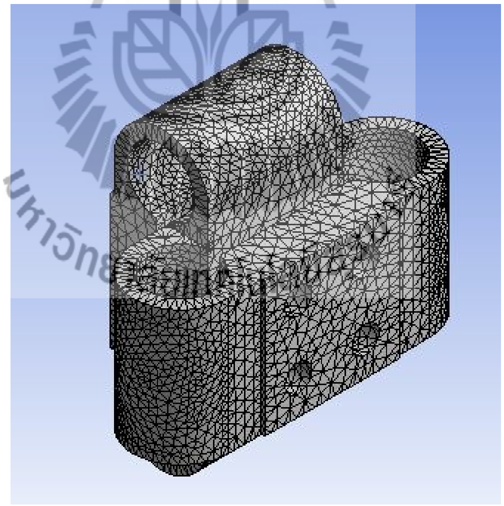
ตารางที่ 4.1 ขนาดของเครื่องมือวัดแรงแบบ ECR สามแกน

Dimension	mm
ความหนา (t)	8
รัศมีเฉลี่ย (R)	24
ระยะระหว่างจุดศูนย์กลางของวงแหวนทั้งสอง (L)	120
ความกว้าง (b)	80

4.3 วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

4.3.1 เงื่อนไขการจำลองสถานการณ์

วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ถูกนำมาใช้เพื่อตรวจสอบความแข็งแรง และเลือกตำแหน่งติดตั้งมาตรวัดความเครียดที่เหมาะสม โดยพิจารณาจากการกระจายตัวของความเครียดในช่วงขีดจำกัดยืดหยุ่นเชิงเส้น (linear elastic) การขึ้นรูปเครื่องมือวัดแรงแบบ ECR สามแกน ทำโดยใช้โปรแกรม Solid Works จากนั้นใช้โปรแกรม ANSYS เพื่อแบ่งเมชและวิเคราะห์ผล ดังแสดงในรูปที่ 4.1

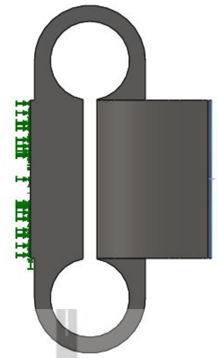


รูปที่ 4.1 การแบ่งเมชด้วยโปรแกรม ANSYS

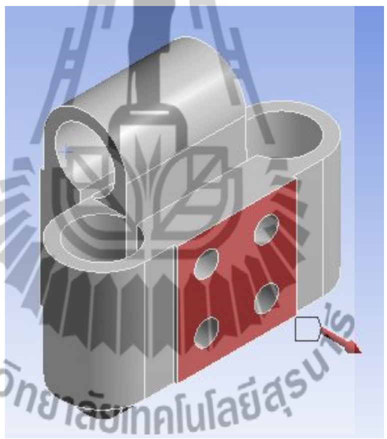
ตำแหน่งการจับยึดอยู่ด้านซ้ายของเครื่องมือวัดแรงแบบ ECR สามแกน (ติดกับรถแทรกเตอร์) ดังรูปที่ 4.2 ลักษณะการจับยึดเป็นแบบยึดแน่น fixed) บนหน้าตัด 80 x 80 mm^2

ตำแหน่งการให้แรงทั้งแกน x, y และ z จะให้ที่ตำแหน่งจุดพ่วงจริงซึ่งอยู่ห่างจากพื้นที่หน้าตัดขนาด 80x 80 mm^2 ทางด้านขวามือของเครื่องมือวัดแรงเบบ ECR สามแกน เป็นระยะ

57 mm ดังรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.2 ตำแหน่งจับยึดของเครื่องมือวัดแรงแบบ ECR สามแกน

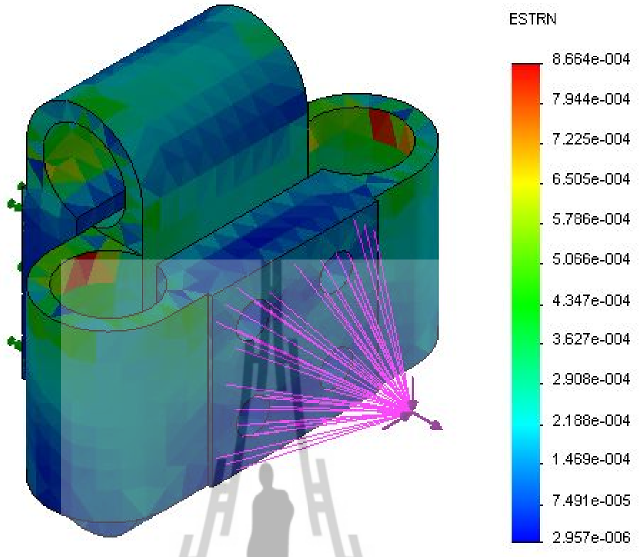


รูปที่ 4.3 ตำแหน่งการให้แรง

4.3.2 ผลการวิเคราะห์ความแข็งแรงของเครื่องมือวัดแรงแบบ ECR สามแกน

เครื่องมือวัดแรงแบบ ECR สามแกน ถูกสร้างจากเหล็กเหนียว S50C ซึ่งมีค่าความต้านแรงดึงคราก (yield strength) ประมาณ 375 MPa และมีค่าโมดุลัสความยืดหยุ่นเท่ากับ 207 GPa พิจารณาให้เครื่องมือวัดแรงทำงานอยู่ในช่วงขีดจำกัดยืดหยุ่น ดังนั้นความเครียดที่จุดครากมีค่าประมาณ 1,800 $\mu\varepsilon$ ความแข็งแรงของเครื่องมือวัดแรงแบบ ECR สามแกน ถูกตรวจสอบโดยการจำลองสถานการณ์ด้วยการกำหนดแรงในแนวราบเท่ากับ 10 kN แรงในแนวดิ่งเท่ากับ 5 kN และแรงในแนวด้านข้างเท่ากับ 1 kN กระทำที่ตำแหน่งใช้งานจริง พบว่า ค่าความเครียดสูงสุดที่

เกิดขึ้นบนเครื่องมือวัดแรงแบบECR สามแกนมีค่าเท่ากับ 866.4 $\mu\varepsilon$ ดังรูปที่ 4.4 ดังนั้นเครื่องมือวัดแรงนี้สามารถนำไปใช้งานได้อย่างปลอดภัย โดยมีค่าความปลอดภัย2

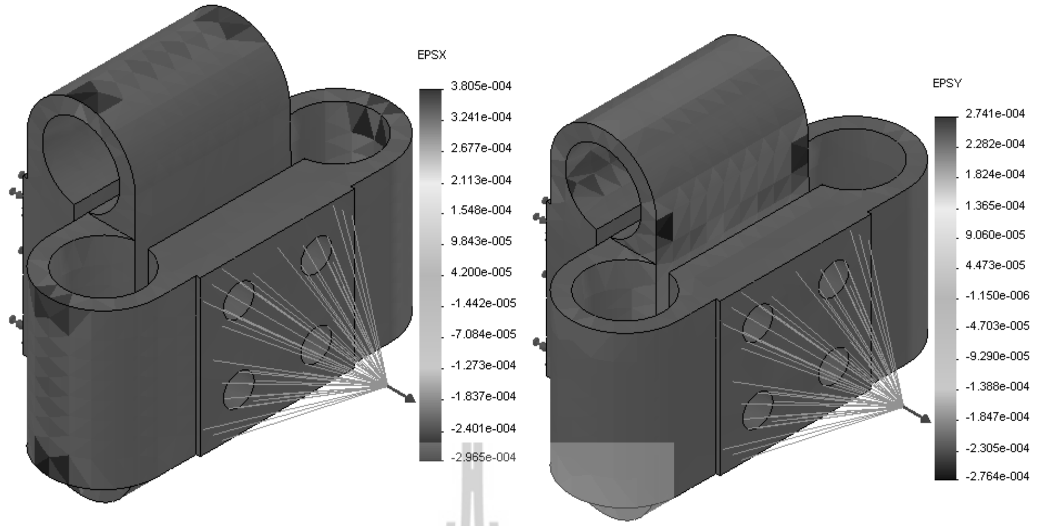


รูปที่ 4.4 ค่าความเครียดเมื่อให้แรงสูงสุดทั้งสามแนวแกนพร้อมกัน

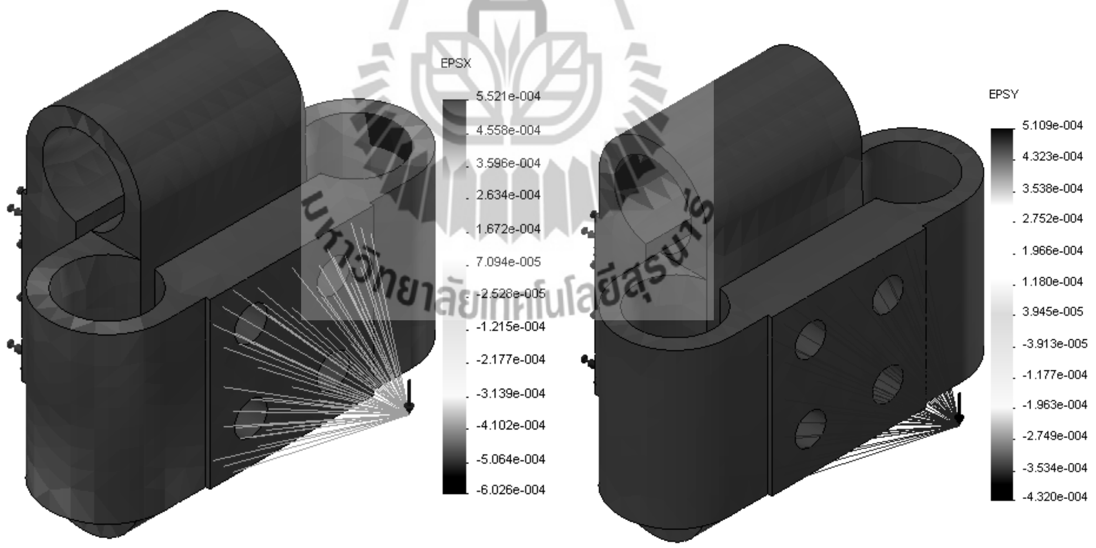
4.3.3 ตำแหน่งที่เหมาะสมที่สุดในการติดตั้งมาตรวัดความเครียด

จากการพิจารณา ε_x , ε_y และ γ_{xy} ของเครื่องมือวัดแรงแบบ ECR สามแกน (ECR วงใน) เมื่อให้แรงในแนวแกน x และ y ทีละแนวแกนดังรูปที่ 4.5 และ 4.6 จากนั้นคำนวณค่าความเค้นสัมผัสโดยใช้สมการที่ (3.1) พบว่าตำแหน่งที่เหมาะสมในการติดตั้งมาตรวัดความเครียดเพื่อวัดแรงในแนวแกน x และ y คือ 58° และ 25° ตามลำดับ

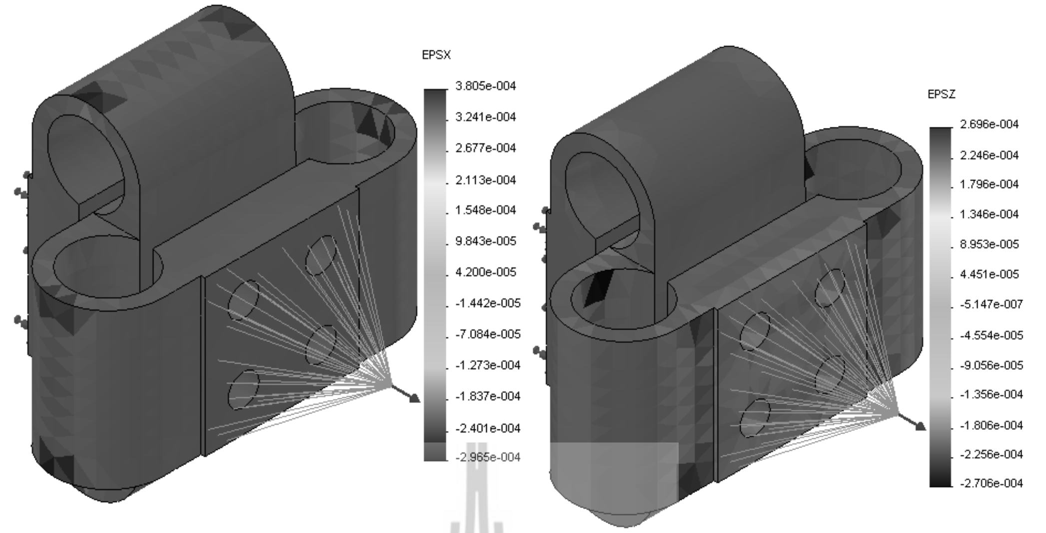
และเมื่อพิจารณา ε_x , ε_z และ γ_{xz} ของเครื่องมือวัดแรงแบบ ECR สามแกน(ECR วงนอก) เมื่อให้แรงในแนวแกน x และ z ทีละแนวแกนดังรูปที่ 4.7 และ 4.8 จากนั้นคำนวณค่าความเค้นสัมผัสโดยใช้สมการที่ (3.2) พบว่าตำแหน่งที่เหมาะสมในการติดตั้งมาตรวัดความเครียดเพื่อวัดแรงในแนวแกน z คือ 25°



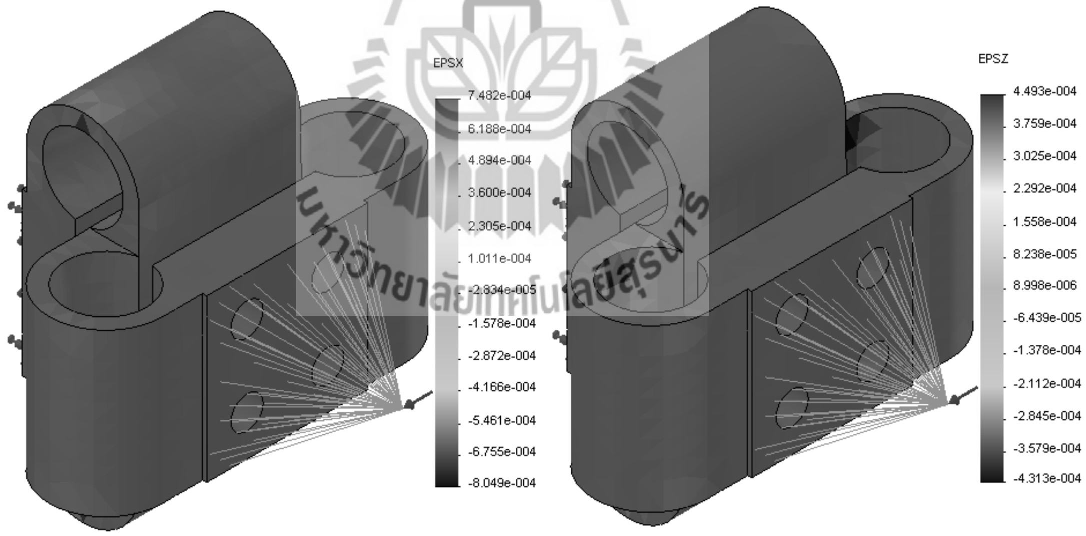
รูปที่ 4.5 ค่าความเครียดในแนวแกน x เมื่อให้แรงในแนวแกน x (ซ้าย),
ค่าความเครียดในแนวแกน y เมื่อให้แรงในแนวแกน x (ขวา)



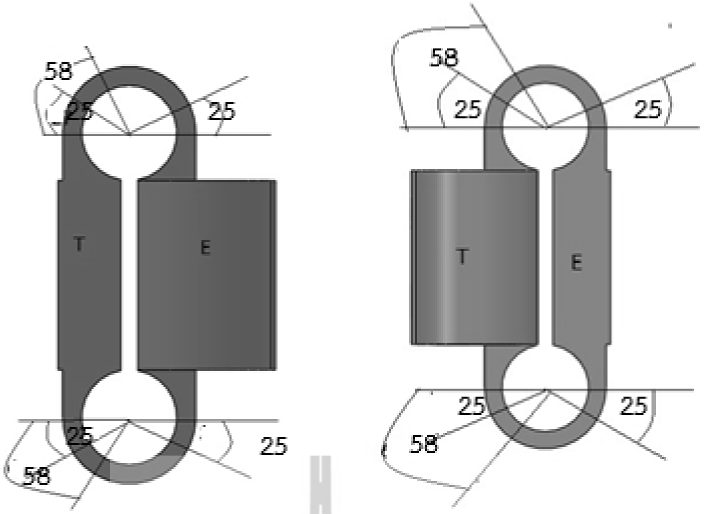
รูปที่ 4.6 ค่าความเครียดในแนวแกน x เมื่อให้แรงในแนวแกน y (ซ้าย),
ค่าความเครียดในแนวแกน y เมื่อให้แรงในแนวแกน y (ขวา)



รูปที่ 4.7 ค่าความเครียดในแนวแกน x เมื่อให้แรงในแนวแกน x (ซ้าย),
ค่าความเครียดในแนวแกน z เมื่อให้แรงในแนวแกน x (ขวา)



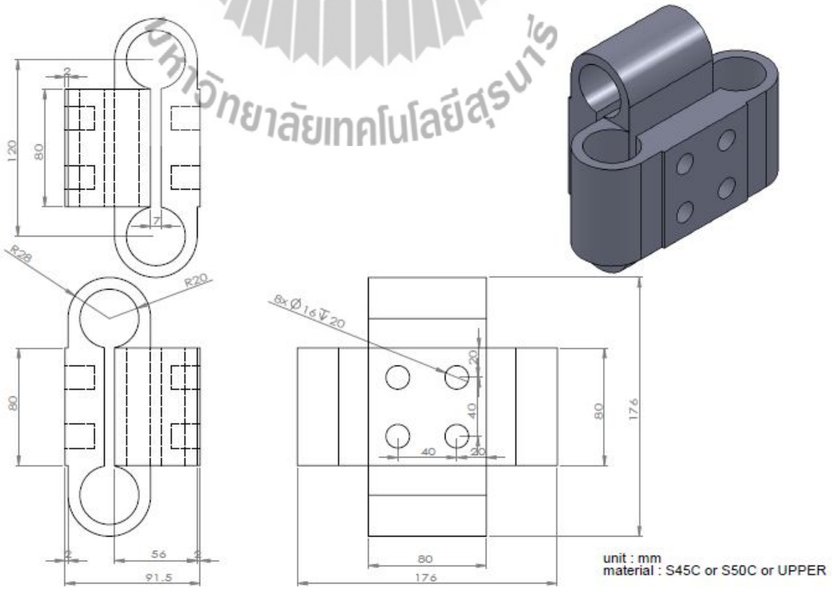
รูปที่ 4.8 ค่าความเครียดในแนวแกน x เมื่อให้แรงในแนวแกน z (ซ้าย),
ค่าความเครียดในแนวแกน z เมื่อให้แรงในแนวแกน z (ขวา)



รูปที่ 4.9 ตำแหน่งการติดตั้งมาตรวัดความเครียด

4.4 การสร้างเครื่องมือวัดแรงและการติดตั้งมาตรวัดความเครียด

เครื่องมือวัดแรงแบบ ECR สามแกน ถูกสร้างมาจากเหล็กเหนียว (S50C) เมื่อหาขนาดต่างๆ ของเครื่องมือวัดแรงแบบ ECR สามแกนแล้ว สามารถเขียนแบบ drawing ดังรูปที่ 4.10 และชิ้นงานเมื่อขึ้นรูปเสร็จเรียบร้อยแสดงดังรูปที่ 4.11



รูปที่ 4.10 แบบ drawing ของเครื่องมือวัดแรงแบบ ECR สามแกน

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

รูปที่ 4.11 เครื่องมือวัดแรงแบบECR สามแกน

เมื่อขึ้นรูปชิ้นงานเรียบร้อยแล้ว ขั้นตอนต่อไปคือการติดตั้งมาตรวัดความเครียดตามตำแหน่งที่ได้วิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

ขั้นตอนในการติดตั้งมาตรวัดความเครียดมีดังต่อไปนี้

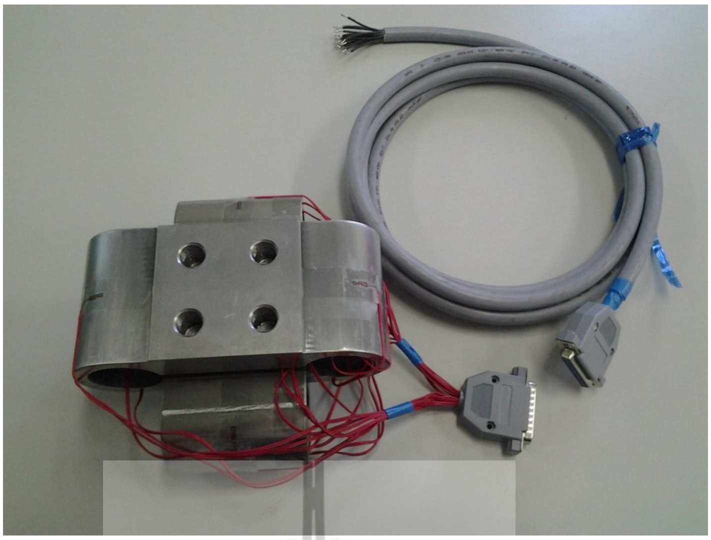
1) ปรับสภาพพื้นผิวตำแหน่งที่จะติดตั้งมาตรวัดความเครียด
   - ขัดด้วยกระดาษทรายเบอร์ 220 และ 320ตามลำดับ เพื่อขจัดสีและสนิมออก
   - ใช้ตัวทำละลายเช็ด เพื่อขจัดน้ำมันและจาระบีออก
   - ใช้สารละลายที่มีคุณสมบัติเข้ากับวัสดุยึดติดได้ดีทา เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการยึดเกาะให้ดียิ่งขึ้น
2) ระบุตำแหน่งที่ต้องการติดตั้งมาตรวัดความเครียด
3) นำมาตรวัดความเครียดมาติดลงบนเทปใสติดเทปใสนั้นตามตำแหน่งที่ระบุไว้บนตัวรับแรงให้ตรงกัน
4) ดึงปลายเทปใสออกด้านหนึ่ง แล้วทากาวลงบนตำแหน่งที่ต้องการติดตั้ง
5) ติดตั้งมาตรวัดความเครียดกลับลงไปยังตำแหน่งเดิมโดยใช้เทปเป็นตัวนำ ในขณติดตั้งมาตรวัดความเครียดกลับ ให้กดเพื่อไล่กาวที่เกินออกไป
6) กดบริเวณมาตรวัดความเครียด จนกระทั่งกาวแห้งแล้วจึงแกะเทปออก

ทาทับด้วยโพลียูรีเทนอีกครั้งเพื่อป้องกันน้ำและความชื้น

รูปที่ 4.12 อุปกรณ์ปรับสภาพพื้นผิว

รูปที่ 4.13 มาตรวัดความเครียด

เมื่อติดตั้งมาตรวัดความเครียดเรียบร้อย ดังรูปที่ 4.14 เพื่อให้มาตรวัดความเครียดสามารถทำงานได้อย่างปลอดภัยจึงหุ้มด้วย coating (AK-22) ซึ่งมีลักษณะคล้ายดินน้ำมัน ช่วยลดแรงกระแทก และป้องกันความชื้น ไม่ให้เข้าไปสร้างความเสียหายแก่มาตรวัดความเครียด จากนั้นพันด้วยเทปพันสายไฟอีกชั้นเพื่อป้องกันสิ่งสกปรก ดังรูปที่ 4.15



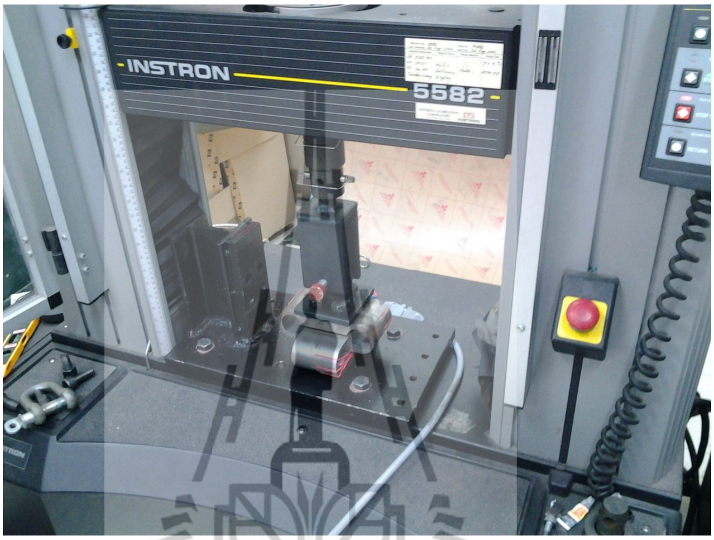
รูปที่ 4.14 การติดตั้งมาตรวัดความเครียด

รูปที่ 4.15 เครื่องมือวัดแรงแบบ ECR สามแกน หลังติดอุปกรณ์ป้องกัน

4.5 ผลการสอบเทียบและการตรวจสอบเพื่อยืนยันการใช้งาน

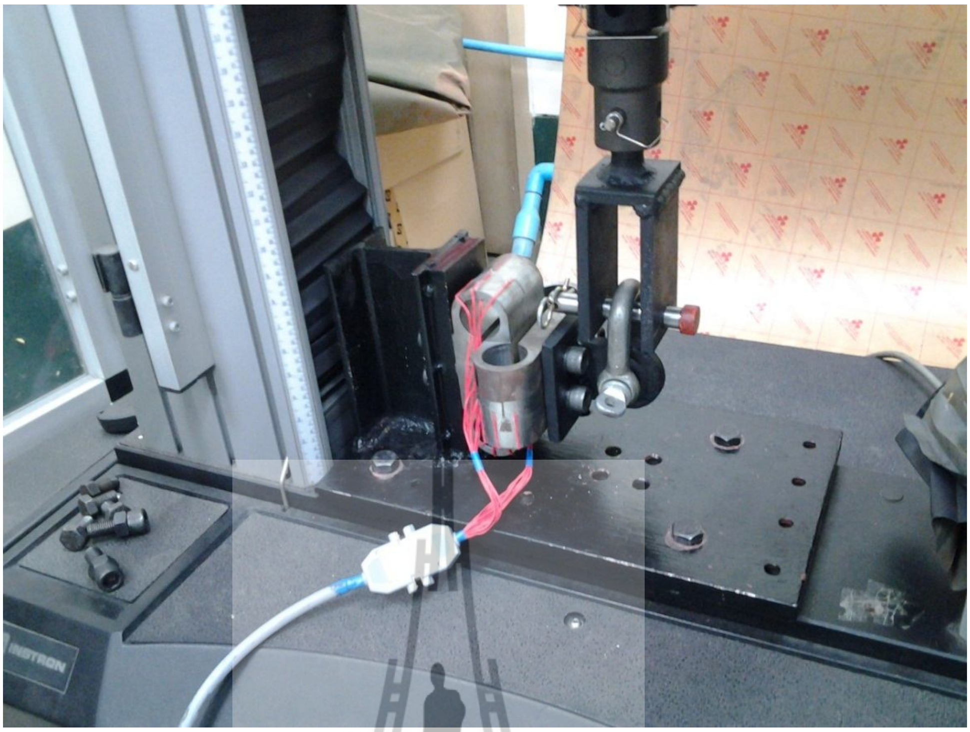
4.5.1 ผลการสอบเทียบ

จากรูปที่ 4.16 – 4.18 แสดงวิธีการสอบเทียบเครื่องมือวัดแรงแบบ ECR สามแกนโดยให้แรงทีละแนวแกนในแนวแกน x, y และ z ตามลำดับและรูปที่ 4.19 แสดงเครื่องมือที่ใช้ในการอ่านค่าแรง และความเครียด

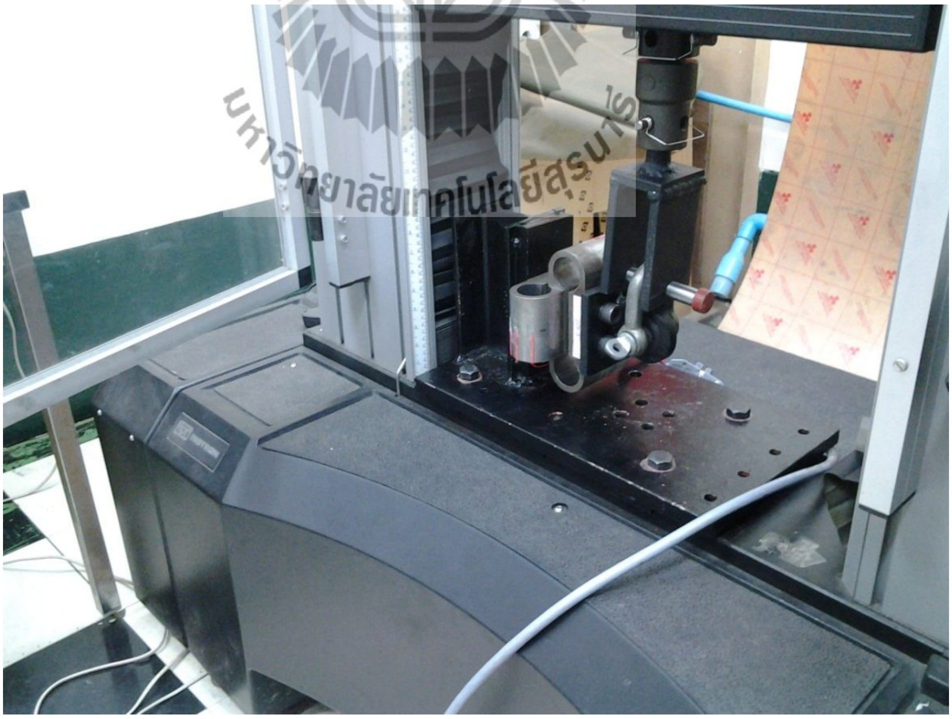


รูปที่ 4.16 การสอบเทียบเครื่องมือวัดแรงแบบ ECR สามแกน เมื่อให้แรงในแนวแกน x

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



รูปที่ 4.17 การสอบเทียบเครื่องมือวัดแรงแบบ ECR สามแกน เมื่อให้แรงในแนวแกน y



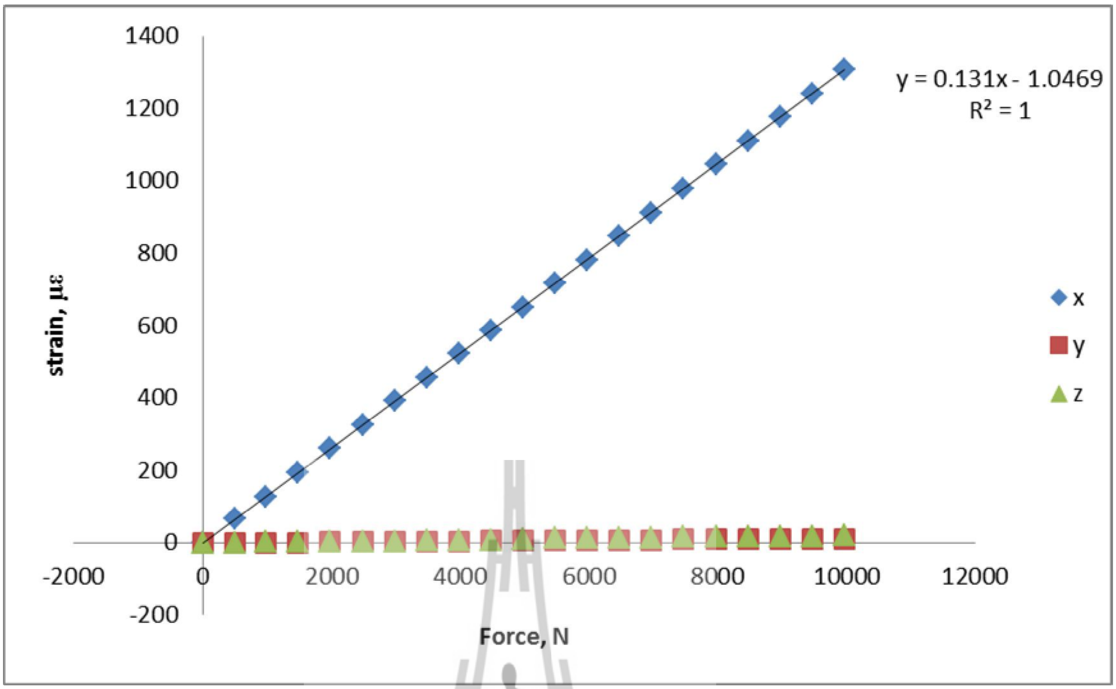
รูปที่ 4.18 การสอบเทียบเครื่องมือวัดแรงแบบ ECR สามแกน เมื่อให้แรงในแนวแกน z

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

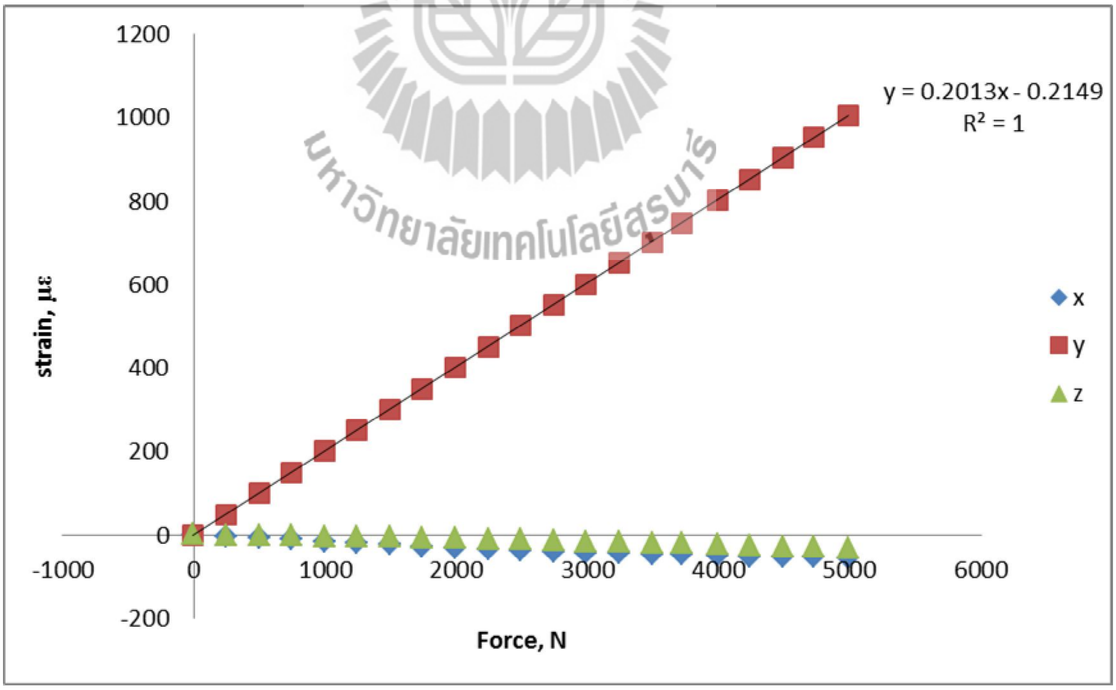
รูปที่ 4.19 เครื่องมือที่ใช้สำหรับการอ่านค่าแรง และความเครียด

ผลการสอบเทียบของเครื่องมือวัดแรงแบบ ECR สามแกน ตัวที่ 1 (สำหรับวัดแรงบนแขนบนของรถแทรกเตอร์) แสดงดังรูปที่ 4.20 – 4.22 ผลการสอบเทียบของเครื่องมือวัดแรงแบบ ECR สามแกน ตัวที่ 2 (สำหรับวัดแรงบนแขนล่างซ้ายของรถแทรกเตอร์) แสดงดังรูปที่ 4.23– 4.25 และผลการสอบเทียบของเครื่องมือวัดแรงแบบ ECR สามแกน ตัวที่ 3 (สำหรับวัดแรงบนแขนล่างขวาของรถแทรกเตอร์) แสดงดังรูปที่ 4.26 – 4.28 พบว่าความสัมพันธ์ระหว่างแรงและความเครียดของทุกแนวแกนเป็นแบบเชิงเส้น โดยมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจสูง (R^2=1) และพบว่าเครื่องมือวัดแรงแบบ ECR สามแกน ทั้งสามตัวที่ถูกสร้างขึ้นสามารถวัดแรงแต่ละแนวแกนได้อย่างถูกต้องแม่นยำ เพราะมีค่าcross sensitivities ต่ำ

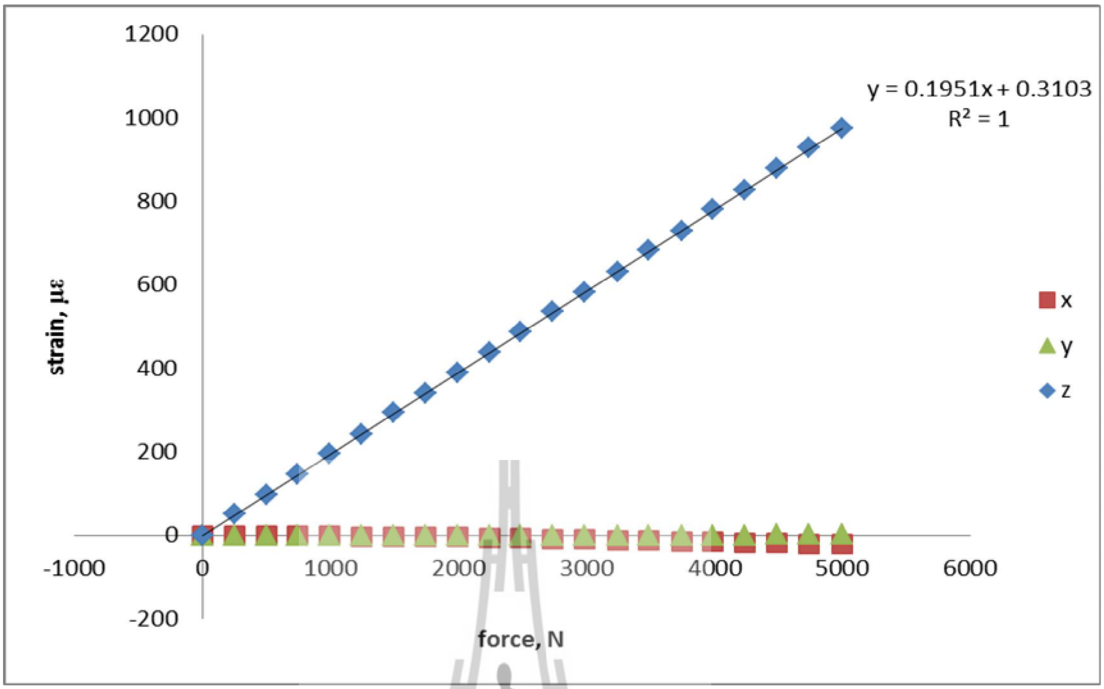
ค่า cross sensitivities ของเครื่องมือวัดแรงสองแนวแกนที่นักวิจัยส่วนใหญ่สร้างขึ้นมีค่าไม่เกิน 4 % แต่จากการวิเคราะห์ข้อมูลพบว่า ค่าcross sensitivities (แกน x) เมื่อให้แรงในแนวแกน y ของเครื่องมือวัดแรงแบบECR สามแกน ตัวที่ 1 มีค่าสูงคือ 6.90% สาเหตุอาจเกิดมาจากตำแหน่งในการติดตั้งมาตรวัดความเครียดคลาดเคลื่อนส่วนตำแหน่งอื่น ๆ มีค่าcross sensitivities อยู่ในช่วงที่ยอมรับค่าได้ (ดังตารางที่ 4.2)



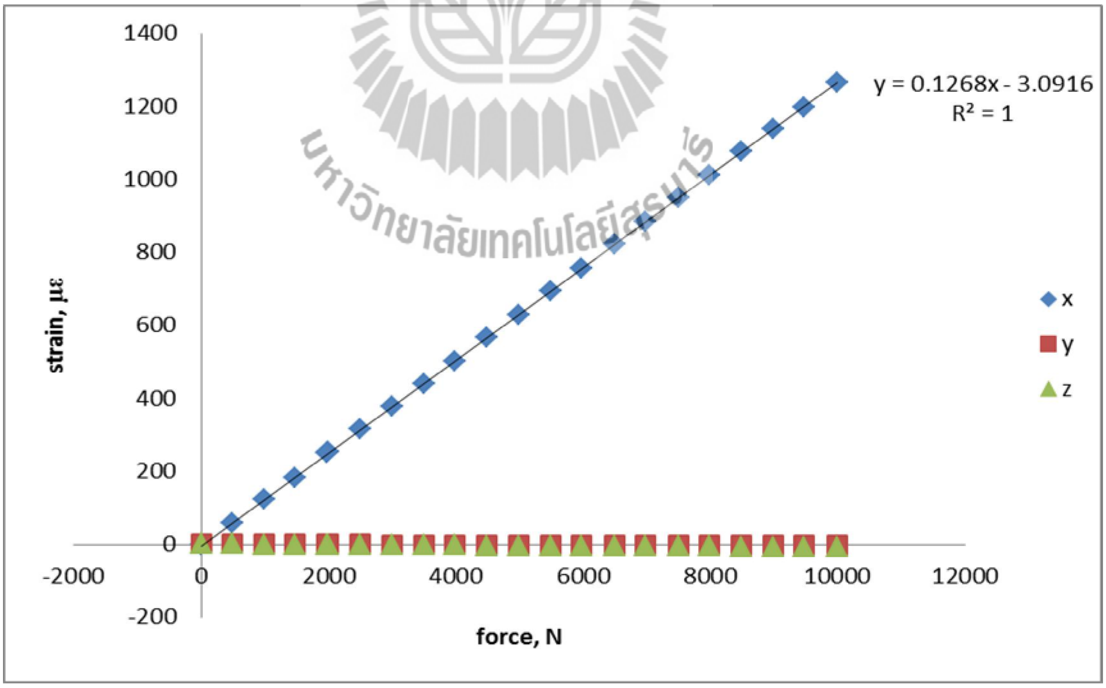
รูปที่ 4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงและความเครียดของECR ตัวที่ 1 เมื่อให้แรงในแนวแกนx



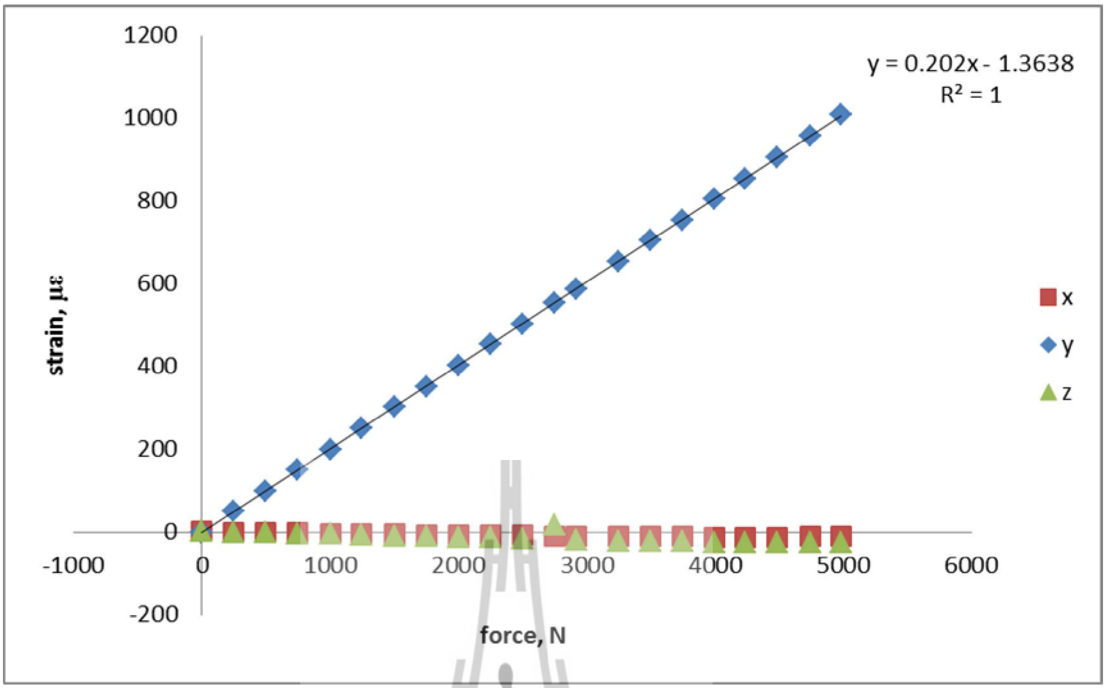
รูปที่ 4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงและความเครียดของECR ตัวที่ 1 เมื่อให้แรงในแนวแกนy



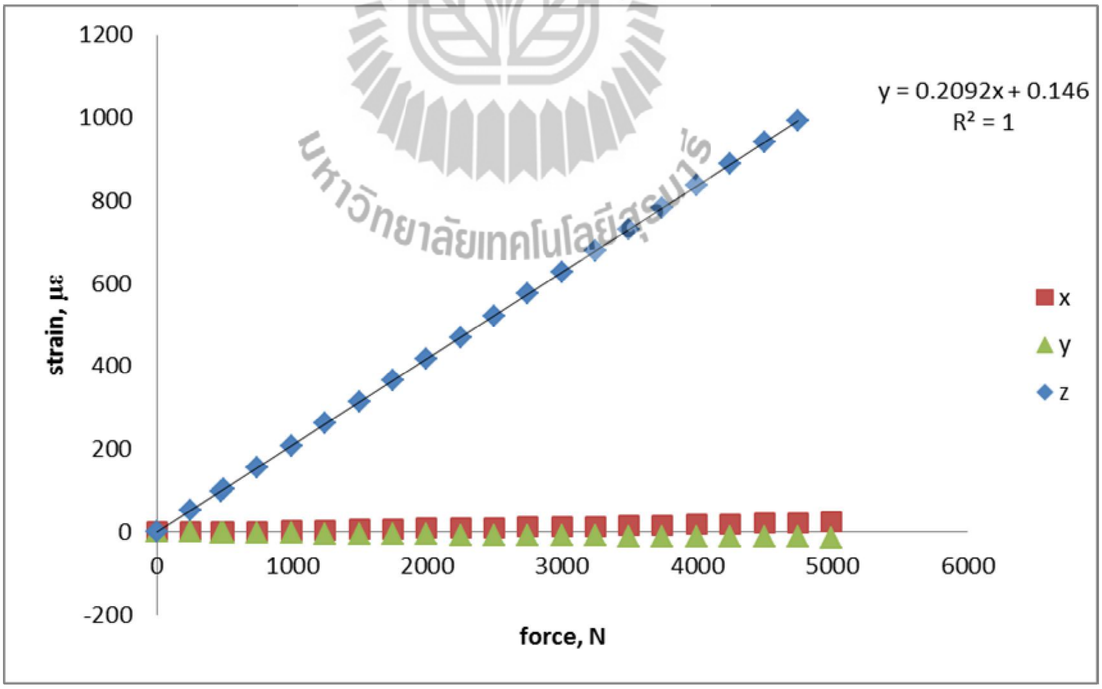
รูปที่ 4.22 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงและความเครียดของECR ตัวที่ 1 เมื่อให้แรงในแนวแกน z



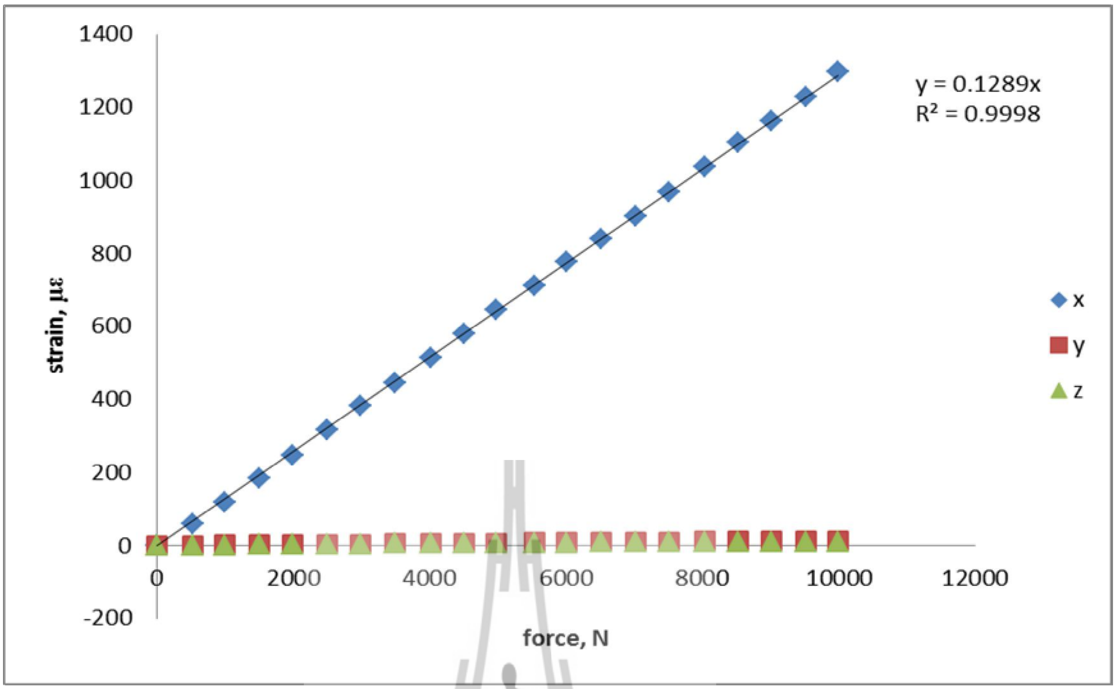
รูปที่ 4.23 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงและความเครียดของECR ตัวที่ 2 เมื่อให้แรงในแนวแกน x



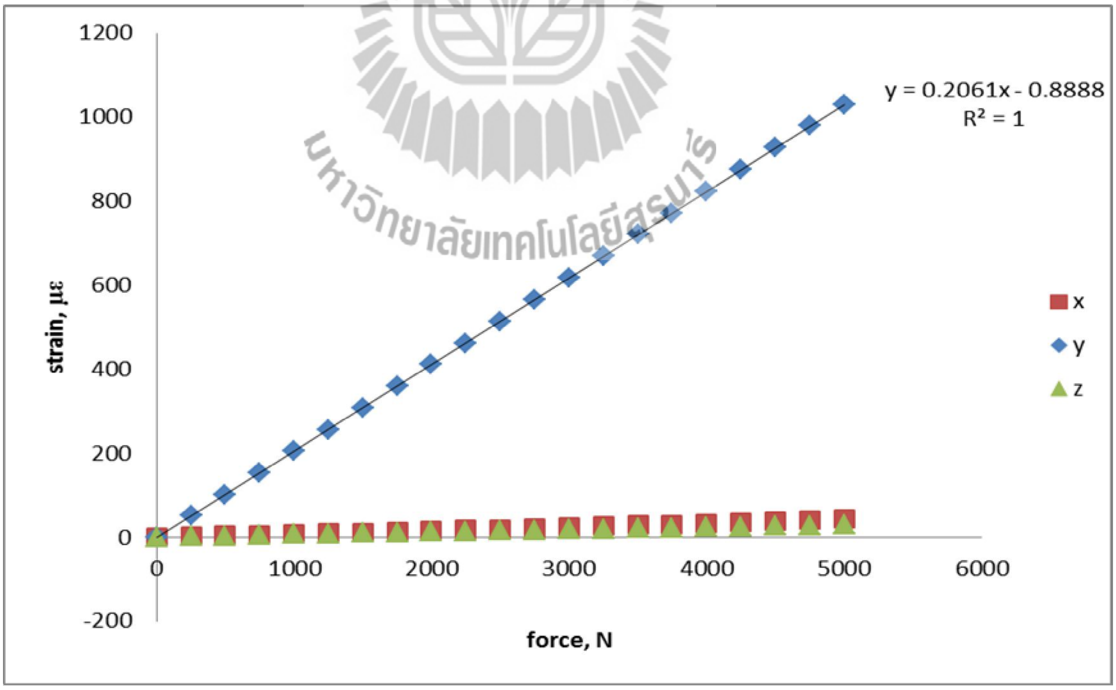
รูปที่ 4.24 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงและความเครียดของECR ตัวที่ 2 เมื่อให้แรงในแนวแกน y



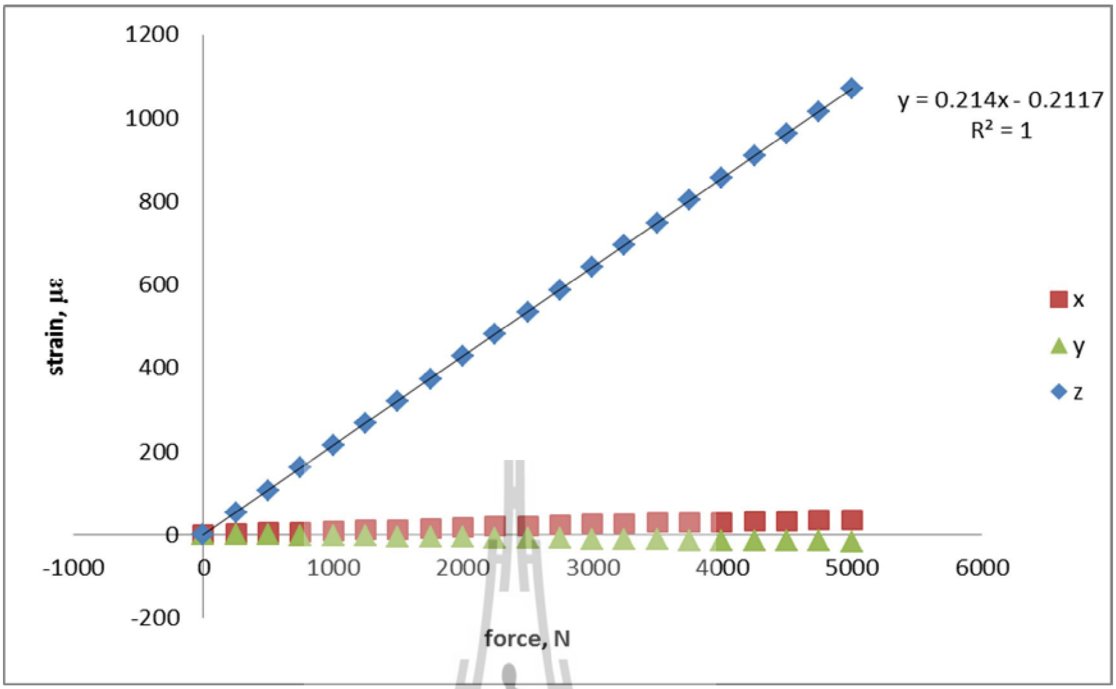
รูปที่ 4.25 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงและความเครียดของECR ตัวที่ 2 เมื่อให้แรงในแนวแกน z



รูปที่ 4.26 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงและความเครียดของECR ตัวที่ 3 เมื่อให้แรงในแนวแกน x



รูปที่ 4.27 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงและความเครียดของECR ตัวที่ 3 เมื่อให้แรงในแนวแกน y



รูปที่ 4.28 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงและความเครียดของECR ตัวที่3 เมื่อให้แรงในแนวแกน z

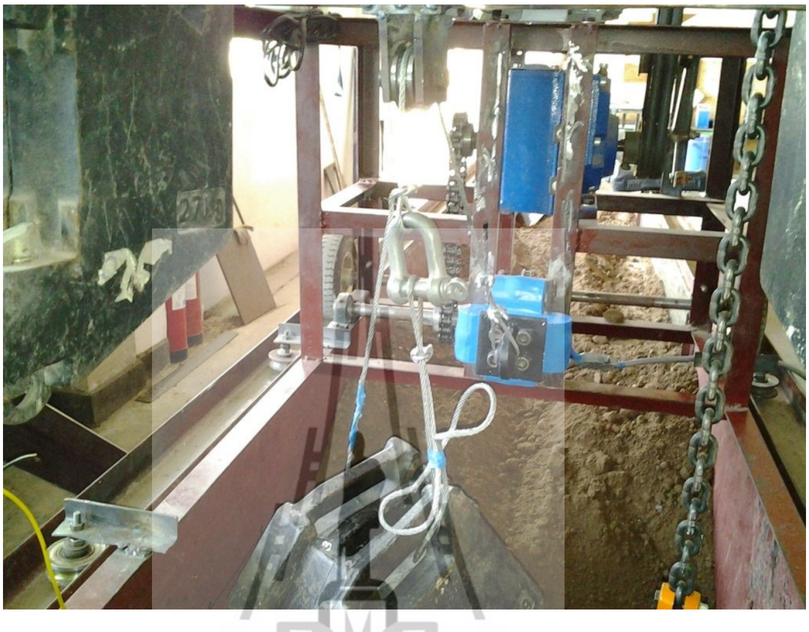
ตารางที่ 4.2 สมการการสอบเทียบและค่า cross sensitivities ของเครื่องมือวัดแรงแบบ ECR สาม แกน

ตำแหน่ง ECR	แกนที่ให้แรง	สมการการสอบเทียบ	% cross sensitivities		
			x	y	z
ECR (แขนบน)	x	$\varepsilon_x = 0.1310F_x - 1.0469$	-	0.71	1.27
	y	$\varepsilon_y = 0.2013F_y - 0.2149$	6.90	-	2.05
	z	$\varepsilon_z = 0.1951F_z + 0.3103$	1.36	0.29	-
ECR (แขนล่างซ้าย)	x	$\varepsilon_x = 0.1268F_x - 3.0916$	-	0.28	0.56
	y	$\varepsilon_y = 0.2020F_y - 1.3638$	1.41	-	2.80
	z	$\varepsilon_z = 0.2092F_z + 0.1460$	2.08	1.36	-
ECR (แขนล่างขวา)	x	$\varepsilon_x = 0.1289F_x$	-	1.23	0.99
	y	$\varepsilon_y = 0.2061F_y - 0.8888$	4.02	-	3.05
	z	$\varepsilon_z = 0.2140F_z - 0.2117$	4.07	1.52	-

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

4.5.2 ผลการตรวจสอบเพื่อยืนยันการใช้งาน

ผลการตรวจสอบความถูกต้องของเครื่องมือวัดแรง เมื่อถ่วงตุ้มน้ำหนักที่ทราบค่าแน่นอน ทำมุมกับแนวดิ่ง 29.5 องศา และทำมุมกับแนวระดับ 25.0 องศา แสดงดังตารางที่ 4.3



รูปที่ 4.29 วิธีการตรวจสอบเพื่อยืนยันการใช้งาน

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

รูปที่ 4.30 อุปกรณ์วัดค่าความเครียด

ตารางที่ 4.3 ผลการตรวจสอบเพื่อยืนยันการใช้งาน

เครื่องมือวัดแรงแบบ ECR สามแกน ตัวที่ 1											
แรงจากตุ้มน้ำหนัก, N				แรงที่อ่านค่าได้จากเครื่องมือวัด, N				% error			
x	y	z	total	x	y	z	total	x	y	z	total
115.00	215.41	53.62	250.00	114.20	216.67	53.25	250.64	0.69	0.58	0.69	0.26
229.99	430.81	107.25	500.00	231.50	428.79	106.56	498.80	0.66	0.47	0.64	0.24
344.99	646.22	160.87	750.00	347.31	642.40	159.87	747.57	0.67	0.59	0.63	0.32
459.99	861.63	214.49	1,000.00	462.11	864.95	213.17	1,003.56	0.46	0.38	0.62	0.36
เครื่องมือวัดแรงแบบ ECR สามแกน ตัวที่ 2											
แรงจากตุ้มน้ำหนัก, N				แรงที่อ่านค่าได้จากเครื่องมือวัด, N				% error			
x	y	z	total	x	y	z	total	x	y	z	total
115.00	215.41	53.62	250.00	114.29	217.15	53.32	251.11	0.62	0.81	0.57	0.44
229.99	430.81	107.25	500.00	228.64	434.47	108.29	502.76	0.59	0.85	0.97	0.55
344.99	646.22	160.87	750.00	342.99	640.91	162.30	744.82	0.58	0.82	0.89	0.69
459.99	861.63	214.49	1,000.00	458.14	868.14	216.32	1,005.16	0.40	0.76	0.85	0.52
เครื่องมือวัดแรงแบบ ECR สามแกน ตัวที่ 3											
แรงจากตุ้มน้ำหนัก, N				แรงที่อ่านค่าได้จากเครื่องมือวัด, N				% error			
x	y	z	total	x	y	z	total	x	y	z	total
115.00	215.41	53.62	250.00	114.04	217.32	53.79	251.25	0.83	0.89	0.32	0.50
229.99	430.81	107.25	500.00	228.08	426.44	108.00	495.51	0.83	1.02	0.70	0.90
344.99	646.22	160.87	750.00	342.13	641.38	162.20	744.80	0.83	0.75	0.83	0.69
459.99	861.63	214.49	1,000.00	456.17	851.47	213.14	989.20	0.83	1.18	0.63	1.08

4.6 ตำแหน่งการติดตั้งอุปกรณ์วัดสมรรถนะของรถแทรกเตอร์

4.6.1 ชุดวัดแรงฉุดลาก

ชุดวัดแรงฉุดลากประกอบจากเหล็กกล่อง สามารถต่อพ่วงรถแทรกเตอร์ที่มีระบบต่อพ่วงใน category I ได้ ดังแสดงในรูปที่ 4.31 และ 4.32

รูปที่ 4.31 การติดตั้งชุดวัดแรงฉุดลาก

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

รูปที่ 4.32 ตำแหน่งติดตั้งเครื่องมือวัดแรงบนชุดวัดแรงฉุดลาก

4.6.2 ชุดวัดการสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิง

การสอบเทียบชุดวัดการสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิงถูกทำที่ 2 รอบความเร็วคือ 800 rpm และ 1,500 rpm ตามลำดับ จากการสอบเทียบพบว่า เซนเซอร์ตัวที่ 1 มีค่าความละเอียด (resolution) เท่ากับ 0.275 ml/pulse ณ ทั้งสองความเร็วรอบ ส่วนเซนเซอร์ตัวที่2 มีค่าความละเอียด (resolution) เท่ากับ 0.269 ml/pulse และ 0.271 ml/pulse ดังแสดงไว้ในตารางที่ 4.4 ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่า ความเร็วรอบของเครื่องยนต์ไม่มีผลกระทบต่อค่าความละเอียดของเซนเซอร์ แม้ว่าเซนเซอร์นี้สามารถวัดปริมาตรน้ำมันเชื้อเพลิงที่มีค่าความหนืดสัมบูรณ์ช่วงระหว่าง 0-1,000 mPa.s โดยมีค่าความผิดพลาดไม่เกิน 1 % แต่จากผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่า ค่าความผิดพลาดของเซนเซอร์ตัวที่ 1 และ 2 มีค่าสูงประมาณ 10 % และ 8 % ตามลำดับ ค่าความผิดพลาดนี้น่าจะมีสาเหตุมาจากการสึกหรอของเซนเซอร์อันเนื่องมาจากการใช้งานมาระยะหนึ่งแล้ว

รูปที่ 4.33 ตำแหน่งติดตั้งชุดวัดน้ำมันเชื้อเพลิง

ตารางที่ 4.4 ค่าความละเอียดของเซนเซอร์วัดน้ำมันเชื้อเพลิง

Engine Speed (rpm)	Sensor Resolution (ml/pulse)			Difference from Standard (%)	
	Standard	Sensor 1	Sensor 2	Sensor 1	Sensor 2
800	0.25	0.275	0.269	9.9	7.6
1,500	0.25	0.275	0.271	10.0	8.4

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

4.6.3 ชุดวัดการลื่นไถลและความเร็วของรถแทรกเตอร์

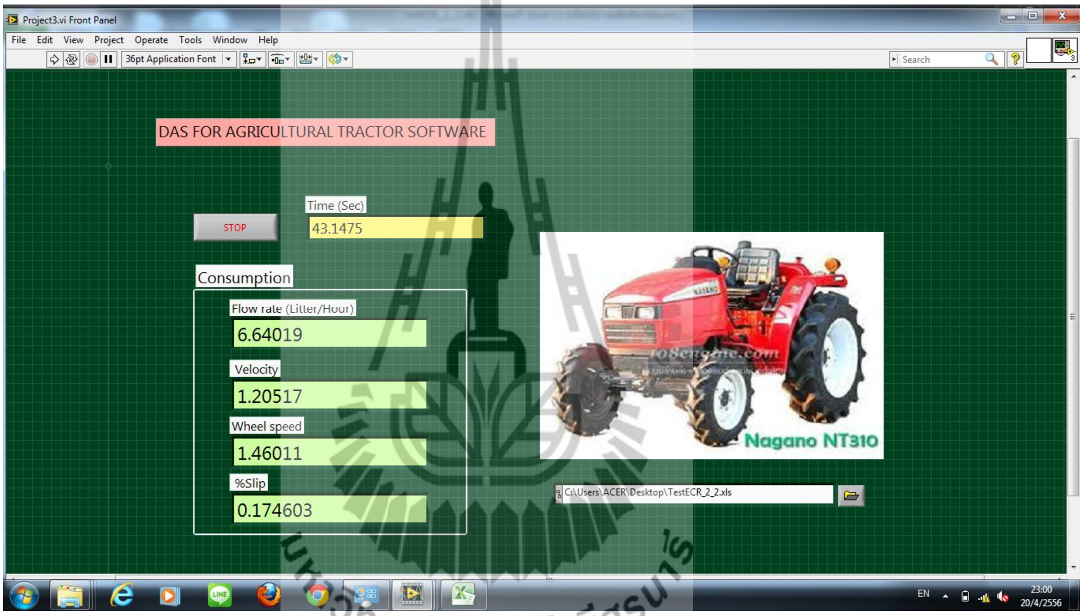
ชุดวัดการลื่นไถลประกอบด้วย เซ็นเซอร์วัดความเร็วของล้อขับ และล้อที่ 5 (fifth wheel) จากการทดสอบพบว่า proximity สำหรับวัดระยะทางของล้อขับดังรูปที่ 4.34 มีค่าความละเอียด (resolution) เท่ากับ 0.5882 m/pulse ส่วน proximity สำหรับวัดระยะทางล้อตามดังรูปที่ 4.35มีค่าความละเอียด (resolution) เท่ากับ 0.4167 m/pulse

รูปที่ 4.34 ตำแหน่งติดตั้ง proximity สำหรับวัดระยะทางล้อขับ

รูปที่ 4.35 ตำแหน่งติดตั้ง proximity สำหรับวัดระยะทางล้อตาม

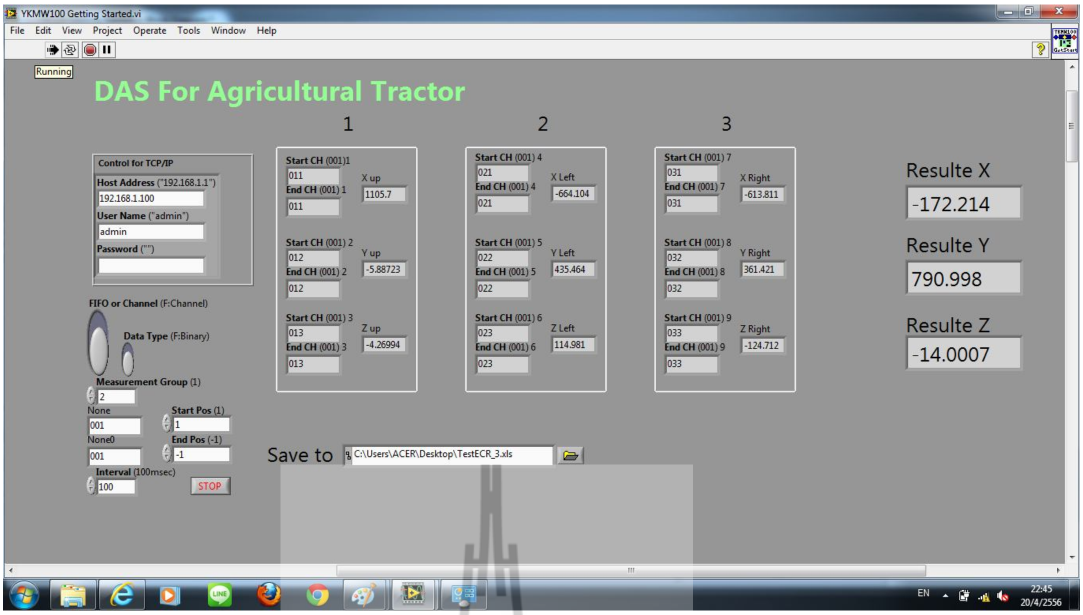
4.7 ระบบรวบรวมข้อมูล

ระบบรวบรวมข้อมูลประกอบไปด้วย 2 ส่วน คือ ส่วนที่หนึ่ง ทำหน้าที่รวบรวมและแสดงข้อมูลสมรรถนะของรถแทรกเตอร์ เช่น การสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิง ความเร็วในการทำงานของรถแทรกเตอร์ และการลื่นไถล ดังรูปที่ 4.36 ส่วนที่สอง ทำหน้าที่รวบรวมค่าของแรงในแนวแกน x, y และ z ของเครื่องมือวัดแรงสามแนวแกนแบบ ECR แต่ละตัวรวม 9 ช่องสัญญาณ และแสดงผลรวมแรงกระทำในแต่ละแนวแกนของแขนบน แขนล่างซ้าย และแขนล่างขวา จำนวน 3 ช่องสัญญาณดังรูปที่ 4.37



มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

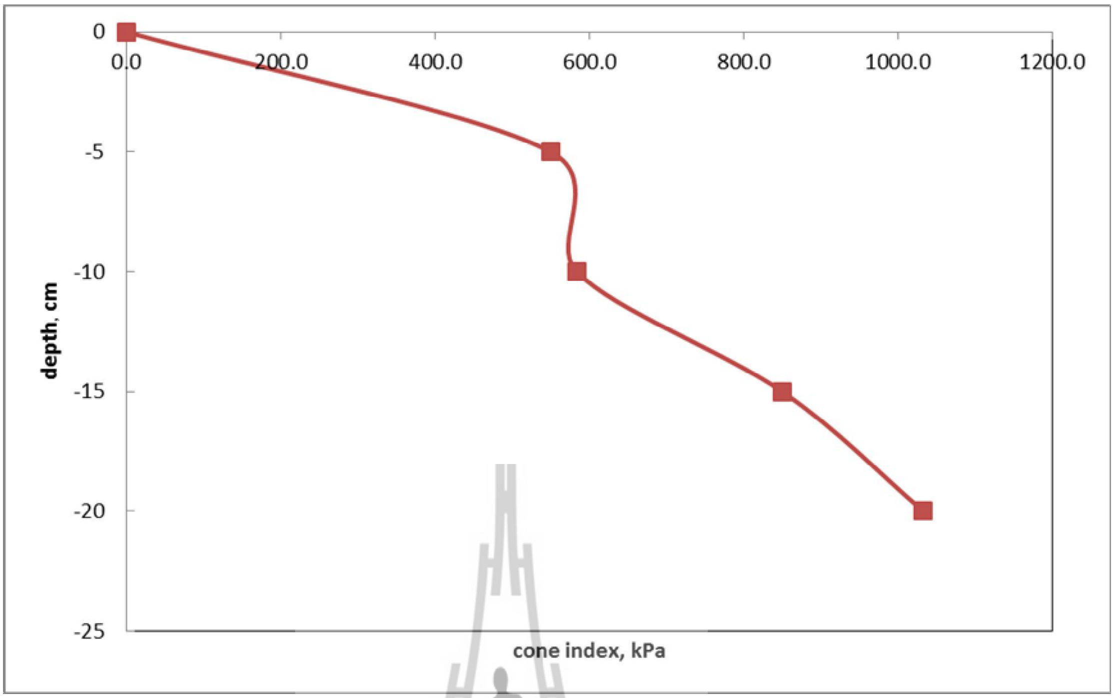
รูปที่ 4.36 หน้าจอแสดงผลค่าการสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิง ความเร็วในการทำงาน ความเร็วล้อขับ และการลื่นไถล



รูปที่ 4.37 หน้าจอแสดงผลค่าแรงในแนวแกน x y และ z

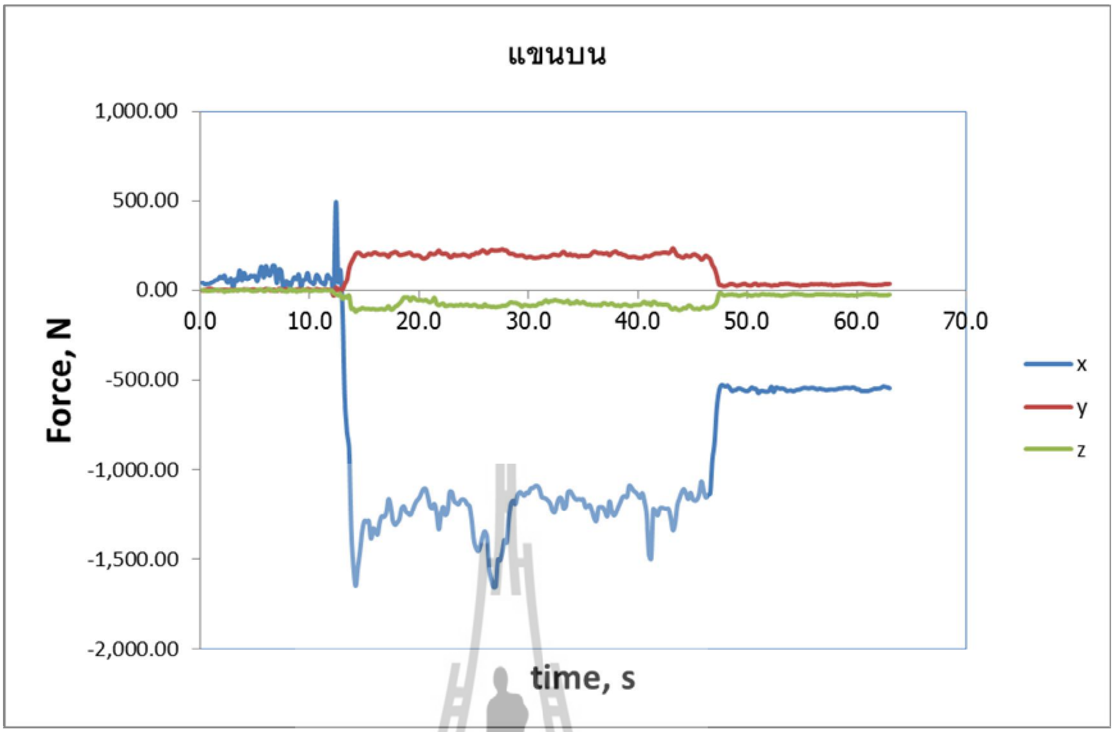
4.8 ผลการทดสอบเครื่องมือวัดแรงแบบ ECR สามแกน

จากผลการทดสอบเบื้องต้นด้วยเครื่องขุดมันสำปะหลังแบบต่อพ่วงสามจุดการทดสอบนี้ใช้รถแทรกเตอร์ยี่ห้อ Nagano ขนาด 35 แรงม้า เป็นต้นกำลังในการฉุดลากเครื่องขุดมันสำปะหลังแบบพ่วงสามจุด และทดสอบโดยเกียร์ L1 ที่รอบเครื่องยนต์ 1,500 รอบต่อนาที สภาพดินที่ใช้ทดสอบเป็นดินทราย (sand 88.34%, silt 8.75% and clay 2.91%) ความชื้น 8.7 (db) ความแข็งของดิน (cone index) แสดงดังรูปที่ 4.38 และการทดสอบเครื่องมือวัดแรงด้วยเครื่องขุดมันสำปะหลังแบบต่อพ่วงสามจุดแสดงดังรูปที่ 4.39

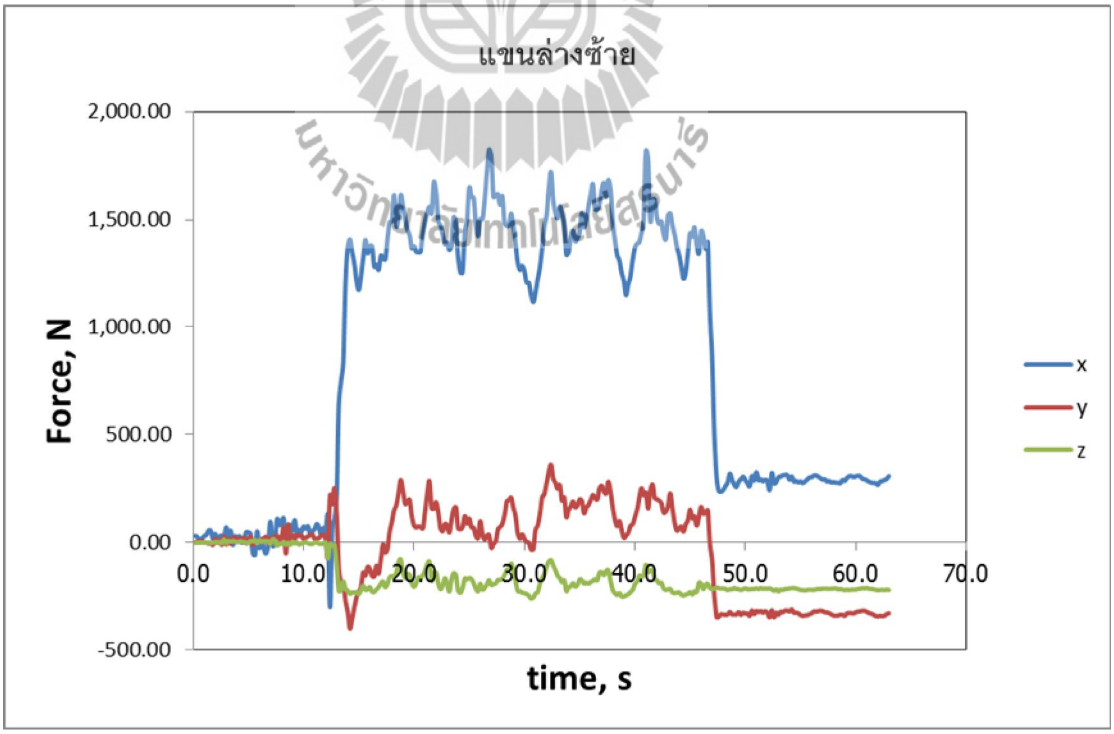


รูปที่ 4.38 ค่าความแข็งของดิน (cone index)

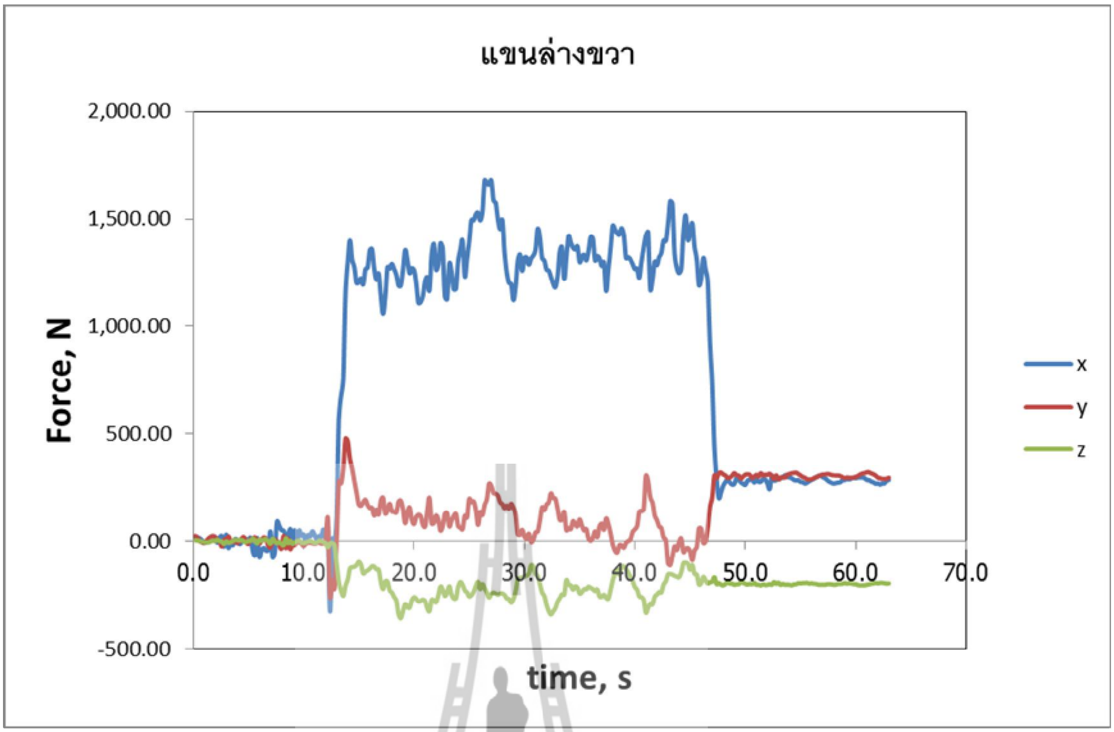
รูปที่ 4.39 การทดสอบเครื่องมือวัดแรงด้วยเครื่องขุดมันสำปะหลังแบบต่อพ่วงสามจุด



รูปที่ 4.40 ตัวอย่างค่าแรงที่วัดได้ของแขนบน



รูปที่ 4.41 ตัวอย่างค่าแรงที่วัดได้ของแขนล่างซ้าย



รูปที่ 4.42 ตัวอย่างค่าแรงที่วัดได้ของแขนล่างขวา

ตารางที่ 4.5 ผลการทดสอบเครื่องมือวัดแรงด้วยเครื่องขุดมันสำปะหลังแบบต่อพ่วงสามจุด

parameter	value	Unit
force_x	1,568.93	N
force_y	421.85	N
force_z	489.92	N
fuel	4.48	L/hr
speed	0.50	m/s
%slip	1.91	%

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

บทที่ 5
บทสรุป

5.1 สรุปผลงานวิจัย

เครื่องมือวัดแรงแบบ ECR สามแกนถูกสร้างขึ้นสำหรับใช้วัดแรงกระทำที่จุดต่อพ่วงของรถแทรกเตอร์ที่มีขนาดการต่อพ่วงใน category I สามารถสรุปผลงานวิจัยได้ดังนี้

1. เครื่องมือวัดแรงแบบ ECR สามแกนนี้ถูกออกแบบตามหลักทฤษฎี และสามารถวัดแรงที่ตำแหน่งจุดพ่วงได้ครบทั้งสามแนวแกน คือแรงในแนวราบ แรงในแนวดิ่ง และแรงด้านข้าง โดยสามารถรับแรงในแนวระดับได้ 10 kN รับแรงในแนวดิ่งได้ 5 kN และสามารถรับแรงในแนวด้านข้างได้ 1 kN เมื่อให้แรงทั้งสามแรงสูงสุดพร้อมกันจะมีค่าความปลอดภัยเท่ากับ 2.08 โดยเครื่องมือวัดแรงแบบ ECR สามแกนที่สร้างขึ้นมีขนาดรูปร่างดังนี้ความหนา 8 mm, รัศมีเฉลี่ย 24 mm, ระยะระหว่างจุดศูนย์กลางของวงแหวนทั้งสอง120 mm และความกว้าง 80mm

2. ตำแหน่งการให้แรงของการจำลองสถานการณ์และการสอบเทียบ กระทำที่ตำแหน่งต่อพ่วงจริง ส่งผลให้ได้ตำแหน่งติดตั้งมาตรวัดความเครียดที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการวัดแรงในแนวแกน x, y และ z คือ 58°, 25° และ 25° ตามลำดับ

3. วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ถูกนำมาใช้เพื่อช่วยวิเคราะห์หาตำแหน่งที่เหมาะสมในการติดตั้งมาตรวัดความเครียด ส่งผลให้เครื่องมือวัดแรงแบบ ECR สามแกน ทั้งสามตัว มีค่า cross sensitivities ต่ำ โดยเครื่องมือวัดแรงแบบ ECR สามแกน ตัวที่ 1, 2 และ 3 มีค่า cross sensitivities สูงสุดเท่ากับ 6.90%, 2.80% และ 4.07% ตามลำดับ4. ระบบรวบรวมข้อมูลที่สร้างขึ้นสามารถวัดค่าแรงฉุดลาก ความสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิง ความเร็วการทำงานของรถแทรกเตอร์ และเปอร์เซ็นต์การลื่นไถล ได้อย่างถูกต้องและเที่ยงตรงทำให้การทำงานในแปลงของนักวิจัยมีความสะดวกยิ่งขึ้น

5.2 ข้อเสนอแนะ

เครื่องมือวัดแรงแบบ ECR สามแกนและระบบรวบรวมข้อมูลที่ถูกสร้างขึ้นสามารถวัดแรงในงานต่าง ๆ ได้หลายด้าน เช่น ค่าแรงฉุดลากของรถไถเดินตาม ค่าแรงฉุดลากของต้นกำลังในsoil bin ค่าน้ำหนักของเครื่องมือต่าง ๆเป็นต้น แต่ต้องอยู่ภายใต้เงื่อนไขสองประการคือ ประการที่หนึ่ง ค่าแรงที่ต้องการวัดจะต้องมีค่าไม่เกินค่าที่ถูกออกแบบไว้ คือแรงในแนวราบไม่เกิน 10kN แรงในแนวดิ่งไม่เกิน 5 kN และแรงด้านข้างไม่เกิน 1 kN ประการที่สอง ระยะระหว่างตำแหน่งให้แรงถึง

ผิวของเครื่องมือวัดแรง(เมื่อต้องการวัดแรงในแนวแกน y และ z) ต้องเท่ากับ 57mm (ซึ่งเป็นระยะที่ใช้ในการออกแบบของงานวิจัยนี้)

เครื่องมือวัดแรงแบบ ECR สามแกนนี้ สามารถนำไปประยุกต์เพื่อวัดค่าโมเมนต์ได้ เช่นการวัดค่าโมเมนต์ของเครื่องมือเกษตรที่ติดตั้งแบบพ่วงข้าง การติดตั้งลักษณะนี้ จุดศูนย์ถ่วงของเครื่องมือต้นกำลัง กับเครื่องมือเกษตรจะอยู่คนละแนวกัน ส่งผลให้มีโมเมนต์เกิดขึ้น หากค่าโมเมนต์นี้มากเกินไปจะส่งผลให้การควบคุมการบังคับเลี้ยวของต้นกำลังทำยากขึ้นถ้านักวิจัยต้องการทราบค่าโมเมนต์นี้ สามารถประยุกต์ใช้เครื่องมือวัดแรงแบบECR สามแกน ได้โดยทำการสอบเทียบค่าโมเมนต์เพิ่ม ซึ่งมีวิธีการคล้ายคลึงกับการสอบเทียบค่าแรงเพียงแต่เปลี่ยนจากค่าแรงที่ทราบค่าเป็นค่าโมเมนต์ที่ทราบค่า ซึ่งจะได้ทำให้ทราบความสัมพันธ์ระหว่างค่าโมเมนต์และความเครียด

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

รายการอ้างอิง

Alimardani, R., Fazel, Z., Akram, A., Mahmoudi, A. and Varnamkhasti, M.G., (2008). **Design and development of a three-point hitch dynamometer.** J. of Agricultural Technology, vol. 4(1), pp. 37-52.

Chen, Y., McLaughlin, N.B. and Tessier, S., (2007). **Double extended octagonal ring (DEOR) dynamometer**, Soil & Tillage Research, vol. 93(2), pp. 462-471.

Godwin, R.J., (1975). **An Extended Octagonal Ring Transducer for Use in Tillage Studies**, *J. of Agricultural Engineers Research*, vol. 20, pp. 347–352.

Godwin, R.J., Reynolds, A.J., O'Dogherty, M.J. and Al Ghazal, A.A., (1993). **A Triaxial Dynamometer for Force and Management Measurement on Tillage Implements**, *J. of Agricultural Engineers Research*, vol. 55, pp. 189–205.

Hoag, D.L. and Yoerger, R.R., (1973). **Design and analysis of load rings**, ASAE Paper No. 73-5548.

Kheiralla, A.F., Yahya, A., Zohadie, M. and Ishak, W., (2003). **Design and development of a three-point auto dynamometer for an agricultural tractor**, ASEAN Journal on Science and Technology for Development, vol. 20(3&4), pp. 271-288.

McLaughlin, N.B., (1996). **Correction of an Error in Equations for Extended Ring Transducers**, Transactions of the ASAE, vol. 39, pp. 443-444.

Reece, A.R., (1961). **A three point linkage dynamometer for mounted implements**, Journal of Agricultural Engineering Research vol. 9, pp. 252-258.

O'Dogherty, M.J., (1996). **The Design of Octagonal Ring Dynamometer**, *J. of Agricultural Engineers Research*, vol. 63, pp. 9–18.

Parish, P.N., Salakha, V.M., Tanya N. and Peeyush S., (2010). **Performance of free rolling and powered tillage discs**, Soil & Tillage Research, vol. 109, pp. 87-93.

Watyotha, C. and Salokhe, V.M., (2001). **Development of a data acquisition system for measuring the characteristics of real time forces by cage wheels**. *J. of Terramechanics*, vol. 38, pp. 201-210.

ภาคผนวก

บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

รายชื่อบทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

กวี คงมั่น, พยุงศักดิ์ จุลยุเสน, คธา วาทกิจและจรูญศักดิ์ สมพงศ์ 2555. **การออกแบบเครื่องมือวัดแรงแบบสามแนวแกนสำหรับการต่อพ่วงสามจุดของรถแทรกเตอร์เกษตร**. การประชุมวิชาการสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทยครั้งที่ 13 ประจำปี 2555, AME 003, โรงแรมอิมพีเรียลแม่ปิง จ. เชียงใหม่. 4-5 เมษายน 2555.

กวี คงมั่น, พยุงศักดิ์ จุลยุเสน, คธา วาทกิจและจรูญศักดิ์ สมพงศ์ 2556. **การพัฒนาเครื่องมือวัดแรงแบบสามแนวแกนสำหรับการต่อพ่วงสามจุดของรถแทรกเตอร์เกษตรขนาดเล็ก.** การประชุมวิชาการสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทยครั้งที่ 14 ประจำปี 2556, TATE 07, โรงแรมหัวหินแกรนด์แอนด์พลาซ่า จ. ประจวบคีรีขันธ์. 1-4 เมษายน 2556.

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

การประชุมวิชาการสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 14
1-4 เมษายน 2556 จังหวัดประจวบคีรีขันธ์

การพัฒนาเครื่องมือวัดแรงแบบสามแนวแกนสำหรับการต่อพ่วงสามจุดของรถแทรกเตอร์เกษตรขนาดเล็ก

Development of a Triaxial Dynamometer for Three-Point Hitch on a Small-Scale Agricultural Tractor

*กวี คงมั่น , พยุงศักดิ์ จุลยุเสน , ศรา วาทกิจ และ จรูญศักดิ์ สมพงศ์

สาขาวิชาวิศวกรรมเกษตร สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
111 ถนนมหาวิทยาลัย ตำบลสุรนารี อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา 30000
ติดต่อผู้เขียน: กวี คงมั่น (kkhongman@sut.ac.th)

บทคัดย่อ

เครื่องมือวัดแรงแบบ extended circular ring (ECR) เป็นอุปกรณ์วัดแรงและโมเมนต์ในงานวิจัยทางวิศวกรรมเกษตรเพราะสามารถวัดแรงกระทำในแต่ละแนวแกนได้อิสระต่อกัน ในงานวิจัยนี้ เครื่องมือวัดแรงแบบ ECR สามแกน ถูกออกแบบให้สามารถวัดแรงกระทำที่จุดต่อพ่วงสามจุดระหว่างรถแทรกเตอร์เกษตรและเครื่องมือเกษตรได้ทั้งสามแนวแกน แรงทั้งสามแนวแกนที่กระทำกับจุดต่อพ่วงสามารถหาได้จากความสัมพันธ์ระหว่างแรงและความเครียดที่เกิดขึ้นในเครื่องมือวัดแรงแบบ ECR สามแกน การกระจายตัวของความเครียดบนเครื่องมือวัดแรงแบบ ECR สามแกน ถูกวิเคราะห์โดยใช้วิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ เพื่อตรวจสอบความแข็งแรงและหาตำแหน่งที่เหมาะสมในการติดตั้งมาตรวัดความเครียด เครื่องมือวัดแรงแบบ ECR สามแกนสามารถใช้งานกับรถแทรกเตอร์ใน category I ซึ่งมีค่าแรงในแนวราบสูงสุดไม่เกิน 20 กิโลนิวตัน มุมที่เหมาะสมในการติดตั้งมาตรวัดความเครียดของการวัดแรงในแนวราบ แรงในแนวดิ่ง และแรงในแนวด้านข้าง คือ 58°, 25° และ 25° ตามลำดับ การสอบเทียบเครื่องมือวัดแรงแบบ ECR สามแกน สำหรับการวัดแรงบนแขนบน แขนล่างซ้าย และแขนล่างขวา ถูกทำในห้องปฏิบัติการ ผลการสอบเทียบเครื่องมือวัดแรงแบบ ECR สามแกน ทั้งสามตัวมีค่า cross sensitivities สูงสุด 8.35%, 2.74% และ 3.07% ตามลำดับ เครื่องมือวัดแรงแบบ ECR สามแกนสามารถนำไปใช้วัดแรงกระทำที่จุดต่อพ่วงระหว่างรถแทรกเตอร์เกษตรและเครื่องมือเกษตรได้อย่างถูกต้อง

คำหลัก: เครื่องมือวัดแรงแบบสามแนวแกน; ไฟไนต์เอลิเมนต์; extended circular ring

1. บทนำ

แรงที่กระทำระหว่างดินและเครื่องมือเกษตรเป็นตัวแปรที่สำคัญสำหรับใช้ในการออกแบบและพัฒนาเครื่องมือเกษตรให้มีประสิทธิภาพสูง แรงนี้มีผลโดยตรงต่อความสามารถของรถแทรกเตอร์ในด้านต่างๆ เช่น ความสามารถในการฉุดลาก เสถียรภาพ และการบังคับเลี้ยว เป็นต้น แรงที่กระทำต่อจุดพ่วงระหว่างรถแทรกเตอร์เกษตรและเครื่องมือเกษตรประกอบด้วยแรงย่อยสามแรง คือ แรงในแนวราบหรือแรงฉุดลาก (horizontal force or draft force) แรงในแนวดิ่ง (vertical force) และแรงด้านข้าง (side force) แรงฉุดลากส่งผล

โดยตรงต่อความสามารถในการฉุดลากของรถแทรกเตอร์ แรงในแนวดิ่งทำให้มีการถ่ายเทน้ำหนัก (weight transfer) จากเครื่องมือเกษตรไปยังรถแทรกเตอร์ซึ่งจะส่งผลต่อความสามารถในการฉุดลากและเสถียรภาพของรถแทรกเตอร์ [1] ส่วนแรงในแนวด้านข้างส่งผลต่อการบังคับเลี้ยวของรถแทรกเตอร์ การวัดแรงทั้งสามนี้สามารถวัดได้ที่จุดต่อพ่วงระหว่างรถแทรกเตอร์เกษตรกับเครื่องมือเกษตรซึ่งมีลักษณะการต่อพ่วงแตกต่างกันไปตามลักษณะการใช้งาน ได้แก่ คานลาก (drawbar) หรือแขนพ่วง (link)

เครื่องมือวัดแรงแบบ extended octagonal ring (EOR) เป็นอุปกรณ์ที่นิยมสำหรับวัดแรงและโมเมนต์ในงานวิจัยทางวิศวกรรมเกษตรเพราะสามารถวัดแรงกระทำในแต่ละแนวแกนได้อิสระต่อกัน แต่ข้อจำกัดของเครื่องมือวัดแรงแบบ EOR คือ ประยุกต์มาจากทฤษฎีของเครื่องมือวัดแรงแบบ ECR [2] และสามารถวัดแรงได้เพียงสองแนวแกน ดังนั้น เพื่อให้การวัดแรงถูกต้องตามทฤษฎีและสามารถวัดแรงที่กระทำต่อจุดพ่วงแบบสามจุดระหว่างรถแทรกเตอร์เกษตรและเครื่องมือเกษตรได้ทั้งสามแนวแกน เครื่องมือวัดแรงแบบ ECR สามแกน จึงถูกพัฒนาขึ้น

เครื่องมือเกษตรแบบพ่วงสามจุดเป็นเครื่องมือที่เกษตรกรในประเทศนิยมใช้งาน งานวิจัยนี้มีแนวคิดที่จะสร้างเครื่องมือสำหรับวัดแรงกระทำที่จุดพ่วงระหว่างรถแทรกเตอร์และเครื่องมือเกษตรเพื่อใช้เป็นข้อมูลสำหรับนักวิจัยในการออกแบบและพัฒนาเครื่องจักรกลเกษตรให้เหมาะสมกับสภาวะการทำการเกษตรของประเทศ

2. ทบทวนวรรณกรรม

การวัดแรงกระทำระหว่างรถแทรกเตอร์และเครื่องมือเกษตรแบบพ่วงลาก ทำได้โดยการใช้เครื่องมือวัดแรงแบบสปริงหรือไฮดรอลิกเชื่อมต่อระหว่างรถแทรกเตอร์และเครื่องมือเกษตร แต่ค่าแรงที่อ่านได้อาจจะมีความแปรปรวนและยากต่อการสังเกตและจดบันทึก สำหรับการวัดแรงกระทำระหว่างรถแทรกเตอร์และเครื่องมือเกษตรแบบพ่วงสามจุด สามารถกระทำได้โดยการใช้รถแทรกเตอร์คันหนึ่งลากรถแทรกเตอร์อีกคันหนึ่งที่ต่อพ่วงกับเครื่องมือเกษตร โดยติดเครื่องมือวัดแรงไว้ระหว่างรถแทรกเตอร์ทั้งสอง ผลต่างของแรงที่วัดได้ขณะรถแทรกเตอร์คันหลังฉุดลากเครื่องมือเกษตรโดยเครื่องมือถูกยกขึ้นจากพื้นดินคือ ค่าแรงกระทำระหว่างรถแทรกเตอร์คันหลังและเครื่องมือเกษตร แต่การวัดแรงที่ต้องการทราบค่าแรงที่แขนลากทั้งสามแขนอย่างละเอียด จำเป็นต้องใช้เครื่องมือวัดแรงแบบพ่วงสามจุด

เครื่องมือวัดแรงแบบพ่วงสามจุดนี้นักวิจัยมักต้องสร้างขึ้นเองเมื่อต้องการทดสอบความต้องการแรงฉุดลากของเครื่องมือเกษตร ซึ่งเครื่องมือวัดแรงแต่ละชิ้นถูกออกแบบมาให้สอดคล้องและตอบสนองต่อสภาพการใช้งานของเครื่องมือเกษตรในพื้นที่การเกษตรนั้น ๆ [3-5] จากการทบทวนงานวิจัยพบว่า งานวิจัยเกี่ยวกับการออกแบบเครื่องมือวัดแรงแบบพ่วงสามจุดวัดแรงสองแนวแกนมีจำนวนมาก ปัจจุบันนักวิจัยเริ่มให้ความสนใจกับเครื่องมือวัดแรงแบบพ่วงสามจุดวัดแรงสามแนวแกนซึ่งพัฒนามาจากการวัดแรงแบบสองแนวแกนมากขึ้น [6-8] เนื่องจากสามารถให้รายละเอียดของแรงในทุก ๆ มิติของแรง ส่งผลให้การออกแบบเครื่องมือ

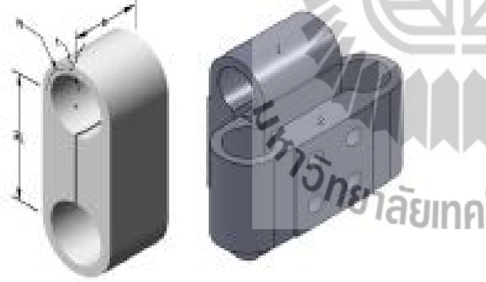
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

เกษตรมีความแม่นยำมากขึ้น ส่งผลดีต่อการพัฒนาภาคการเกษตรของประเทศ

3. วัสดุและวิธีการ

3.1 ข้อมูลพื้นฐานสำหรับการออกแบบเครื่องมือวัดแรงแบบ ECR สามแกน

เครื่องมือวัดแรงแบบ ECR สามแกนถูกพัฒนามาจากเครื่องมือวัดแรงแบบ ECR ดังรูปที่ 1 (ก) โดยนำเครื่องมือวัดแรงแบบ ECR สองตัวมาประกบไขว้กันดังรูปที่ 1 (ข) เครื่องมือวัดแรงแบบ ECR สามแกน ตัวที่ 1 (ติดตั้งกับรถแทรกเตอร์) ทำหน้าที่วัดแรงฉุดลากและแรงในแนวดิ่ง ส่วนตัวที่ 2 (ติดตั้งกับเครื่องมือเกษตร) ทำหน้าที่วัดแรงด้านข้าง เครื่องมือวัดแรงแบบ ECR สามแกน แต่ละตัวสามารถรับแรงฉุดลากสูงสุด (F_x) 10 kN, แรงในแนวดิ่ง (F_y) 5 kN และแรงด้านข้าง (F_z) 1 kN

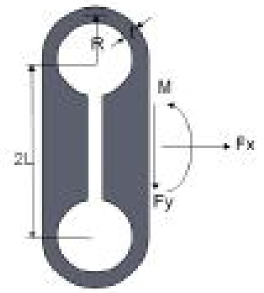


(ก) (ข)

รูปที่ 1 (ก) เครื่องมือวัดแรงแบบ ECR
(ข) เครื่องมือวัดแรงแบบ ECR สามแกน

3.2 การออกแบบเครื่องมือวัดแรงแบบ ECR สามแกน

เครื่องมือวัดแรงแบบ ECR สามแกน ถูกออกแบบโดยใช้ทฤษฎีของเครื่องมือวัดแรงแบบ ECR ซึ่งเป็นทรานสดิวเซอร์วัดแรงชนิดหนึ่งที่สามารถวัดแรงสองแนวแกนได้อิสระต่อกัน สำหรับงานวิจัยนี้เครื่องมือวัดแรงแบบ ECR ถูกสร้างขึ้นเพื่อวัดแรงกระทำที่ตำแหน่งหูห้อยระหว่างอุปกรณ์การเกษตร โดยแรงที่วัดได้คือแรงในแนวราบซึ่งอยู่ในแนวการเคลื่อนที่ของตัวรถ (F_x) และแรงในแนวดิ่ง (F_y) ดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 แรงและโมเมนต์ที่กระทำบนเครื่องมือวัดแรงแบบ ECR

การออกแบบเครื่องมือวัดแรงแบบ ECR สามารถคำนวณได้โดยใช้หลักกลศาสตร์เบื้องต้น เมื่อพิจารณาสมการโมเมนต์ดัด จะได้ว่าความเค้นดัด (bending stress) บนผิวของอุปกรณ์วัดแรงแบบ ECR มีค่าดังสมการ

$$\sigma = \frac{Mc}{I} \qquad (1)$$

โดยที่ σ คือ ความเค้นดัด, MPa
M คือ โมเมนต์ดัด, N-mm
c คือ ระยะครึ่งหนึ่งของความหนา, mm
I คือ โมเมนต์ความเฉื่อย, mm^4

เมื่อพิจารณาความเค้นดัดที่เกิดขึ้นบนผิวของเครื่องมือวัดแรงแบบ ECR เป็นรูปสี่เหลี่ยม ($c = \frac{t}{2}, I = \frac{bt^3}{12}$) จะได้

$$\sigma = \frac{6M_\phi}{bt^2} \qquad (2)$$

โดยที่ M_ϕ คือ โมเมนต์ดัดที่มุมใดๆ , N-mm
b คือ ความกว้างของ ECR, mm
t คือ ความหนาวงแหวนของ ECR, mm

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

การออกแบบเครื่องมือวัดแรงจะพิจารณาจากค่าโมเมนต์ดัด (M_ϕ) ซึ่งจะมีค่าแตกต่างกันตามรูปร่างของเครื่องมือวัดแรง สำหรับเครื่องมือวัดแรงแบบ ECR สามารถคำนวณโดยมีพื้นฐานเบื้องต้นมาจากสมการของ Hoag [9] โดยใช้เทคนิคเกี่ยวกับค่าพลังงานความเครียดในการวิเคราะห์โมเมนต์ดัดในหน้าตัดของ ECR ซึ่งต่อมา McLaughlin [2] พบว่ามีข้อผิดพลาดบางประการ จึงได้เสนอสมการเพื่อปรับแก้ข้อผิดพลาดของโมเมนต์ดัดในหน้าตัดของ ECR นั้น ๆ โดยค่าโมเมนต์ดัดที่มุม ϕ ภายใต้แรงกระทำของแรง 2 แรง คือ F_x และ F_y แสดงดังสมการต่อไปนี้

$$\left[M_\phi = \frac{F_x R}{2}\left(\frac{2}{\pi} - \sin\phi\right) + \frac{F_y R}{2}\cos\phi + \frac{M_0\left[\left(2 + \frac{R\pi}{2L}\right) - \left(\frac{2R}{L} + \pi\right)\sin\phi\right]}{\left(8 + \frac{R\pi}{L} + \frac{2L\pi}{R}\right)} ; 0 < \phi < \pi \right] \quad (3)$$

$$\left[M_\phi = \frac{F_x R}{2}\left(\frac{2}{\pi} + \sin\phi\right) - \frac{F_y R}{2}\cos\phi - \frac{M_0\left[\left(2 + \frac{R\pi}{2L}\right) - \left(\frac{2R}{L} + \pi\right)\sin\phi\right]}{\left(8 + \frac{R\pi}{L} + \frac{2L\pi}{R}\right)} ; \pi < \phi < 2\pi \right] \quad (4)$$

โดยที่ M_o คือ โมเมนต์ภายนอก, N-mm

F_x คือ แรงในแนวราบ, N

F_y คือ แรงในแนวดิ่ง, N

ϕ คือ มุมที่วัดตามเข็มนาฬิกาโดยเริ่มจากทางด้านขวาของวงแหวน, rad

R คือ รัศมีเฉลี่ยของวงแหวนถึงจุดศูนย์กลางวงกลม, mm

L คือ ระยะครึ่งหนึ่งระหว่างจุดศูนย์กลางวงกลมทั้งสอง, mm

ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดในช่วงขีดจำกัดความยืดหยุ่นของวัสดุเหนียวสามารถหาได้จาก $\sigma = \varepsilon E$ ดังนั้นค่าความเครียดที่เป็นผลมาจากแรง F_x และแรง F_y คำนวณได้จาก

$$\varepsilon = \frac{6M_\phi}{Ebt^2} \quad (5)$$

โดยที่ E คือ โมดูลัสความยืดหยุ่น, N/mm^2

ความหนาของเครื่องมือวัดแรงแบบ ECR สามารถคำนวณได้จาก

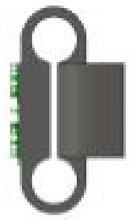
$$t = \sqrt{\frac{6M_\phi}{Eb\varepsilon}} \quad (6)$$

3.3 วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

3.3.1 การกำหนดเงื่อนไขการจำลองสถานการณ์

วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ถูกนำมาใช้เพื่อตรวจสอบความแข็งแรง และเลือกตำแหน่งติดตั้งมาตรวัดความเครียดที่เหมาะสม โดยพิจารณาจากการกระจายตัวของความเครียดในช่วงขีดจำกัดยืดหยุ่นเชิงเส้น (linear elastic) การขึ้นรูปเครื่องมือวัดแรงแบบ ECR สามแกน ทำโดยใช้โปรแกรม Solid Works จากนั้นใช้โปรแกรม ANSYS เพื่อแบ่งเมชและวิเคราะห์ผล ดังรูปที่ 3

รูปที่ 3 การแบ่งเมชด้วยโปรแกรม ANSYS

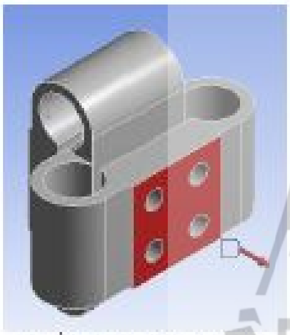


รูปที่ 4 ตำแหน่งจับยึดของเครื่องมือวัดแรงแบบ ECR สามแกน

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตำแหน่งการจับยึดอยู่ด้านซ้ายของเครื่องมือวัดแรงแบบ ECR สามแกน (ติดกับรถแทรกเตอร์) ดังรูปที่ 4 ลักษณะการจับยึดเป็นแบบยึดแน่น (fixed) บนหน้าตัด 80 x 80 mm^2

ตำแหน่งการให้แรงทั้งแกน x, y และ z จะให้ที่ตำแหน่งจุดพ่วงจริงซึ่งอยู่ห่างจากพื้นที่หน้าตัดขนาด 80 x 80 mm^2 ทางด้านขวามือของเครื่องมือวัดแรงสามแกนแบบ ECR เป็นระยะ 57 mm ดังรูปที่ 5



รูปที่ 5 ตำแหน่งการให้แรง

3.3.2 การตรวจสอบความแข็งแรง

เครื่องมือวัดแรงแบบ ECR สามแกน ถูกสร้างขึ้นจากเหล็กเหนียว S50C มีค่าความเค้นที่จุดคราก ประมาณ 375 MPa ตรวจสอบความแข็งแรงที่ค่าแรงสูงสุด F_x = 10 kN, F_y = 5 kN และ F_z = 1 kN โดยให้แรงทั้งสามพร้อมกันที่ตำแหน่งจุดพ่วงจริง

3.3.3 การกระจายตัวของความเครียดและตำแหน่งติดตั้งมาตรวัดความเครียด

พื้นผิวของเครื่องมือวัดแรงแบบ ECR มีลักษณะเป็นผิวโค้ง ดังนั้นตำแหน่งที่จะพิจารณาค่าความเครียดต้องพิจารณาจากความเครียดสัมผัส (tangential strain) ซึ่งสามารถพิจารณาได้จากสมการ

$$\varepsilon_{t1} = \frac{\varepsilon_x + \varepsilon_y}{2} + \frac{\varepsilon_x - \varepsilon_y}{2}\cos 2\theta + \frac{\gamma_{xy}}{2}\sin 2\theta \quad (7)$$

$$\varepsilon_{t2} = \frac{\varepsilon_x + \varepsilon_z}{2} + \frac{\varepsilon_x - \varepsilon_z}{2}\cos 2\theta + \frac{\gamma_{xz}}{2}\sin 2\theta \quad (8)$$

โดยที่ ε_{t1} คือ ค่าความเครียดสัมผัสของเครื่องมือวัดแรงแบบ ECR สามแกน(ติดตั้งแนวตั้ง), $\mu\varepsilon$

ε_{t2} คือ ค่าความเครียดสัมผัสของเครื่องมือวัดแรงแบบ ECR สามแกน(ติดตั้งแนวนอน), $\mu\varepsilon$

ε_x คือ ค่าความเครียดในแนวแกน x, $\mu\varepsilon$

ε_y คือ ค่าความเครียดในแนวแกน y, $\mu\varepsilon$

ε_z คือ ค่าความเครียดในแนวแกน z, $\mu\varepsilon$

γ_{xy} คือ ค่าความเครียดเฉือนในระนาบ xy, $\mu\varepsilon$

γ_{xz} คือ ค่าความเครียดเฉือนในระนาบ xz, $\mu\varepsilon$

θ คือ ค่ามุมระหว่างแกน x กับตำแหน่งที่วิเคราะห์ (ทวนเข็มเป็นบวก), deg

การติดตั้งมาตรวัดความเครียด ใช้มาตรวัดความเครียดความต้านทาน 120 โอห์ม ต่อกันแบบวงจรวีทสโตรน เครื่องมือวัดแรงแบบ ECR สามแกนแต่ละตัวประกอบด้วย 3 วงจร คือวงจรวัดแรงฉุดลาก (V_d), วงจรวัดแรงในแนวดิ่ง (V_v) และวงจรวัดแรงด้านข้าง (V_s) เมื่อติดตั้งเสร็จเรียบร้อยเครื่องมือวัดแรงแบบ ECR สามแกน แสดงดังรูปที่ 6

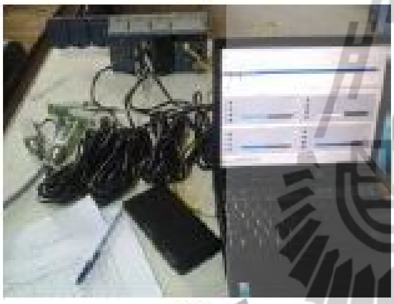
รูปที่ 6 เครื่องมือวัดแรงแบบ ECR สามแกน

3.4 การสอบเทียบในห้องปฏิบัติการ

การสอบเทียบเครื่องมือวัดแรงแบบ ECR สามแกน ทำในห้องปฏิบัติการ อาคารจักรกลเกษตร ฟาร์มมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี โดยติดตั้งบน

กระบะดิน ตำแหน่งที่ให้แรงเป็นตำแหน่งเดียวกันกับตำแหน่งที่ติดตั้งหูพ่วงเพื่อใช้งานจริง การสอบเทียบทำโดยให้แรงในแนวแกน x, y และ z ทีละแนวแกน โดยใช้เครื่อง Yokogawa MW100 ในการขยายค่าสัญญาณความเครียดดังรูปที่ 7

(ก)



(ข)

รูปที่ 7 (ก) แสดงตำแหน่งการสอบเทียบ
(ข) แสดงอุปกรณ์การเก็บข้อมูล

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

4. ผลการทดสอบและการวิเคราะห์ข้อมูล

4.1 การออกแบบเครื่องมือวัดแรงแบบ ECR สามแกน และการตรวจสอบความแข็งแรง

เครื่องมือวัดแรงแบบ ECR สามแกน ถูกสร้างจากเหล็กเหนียว S50C ซึ่งมีค่าความต้านแรงดึงคราก (yield strength) ประมาณ 375 MPa และมีค่าโมดุลัสความยืดหยุ่นเท่ากับ 207 GPa ดังนั้นความเครียดที่จุดครากมีค่าประมาณ 1,800 $\mu\varepsilon$ เมื่อต้องการออกแบบเครื่องมือวัดแรงแบบ ECR สามแกน ให้มีค่าความปลอดภัยที่เพียงพอสำหรับการใช้งาน จึงกำหนดค่าความปลอดภัยเท่ากับ 1.8 ดังนั้นความเครียดออกแบบสูงสุดมีค่าเท่ากับ 1,000 $\mu\varepsilon$ ขนาดของเครื่องมือวัดแรงแบบ ECR สามแกนสามารถหาได้จากการกำหนดค่า R, L และ b จากนั้นคำนวณหาค่าความหนา t โดยที่ค่า R จะส่งผลทำให้อุปกรณ์ต่อพ่วงเลื่อนถอยจากตำแหน่งเดิมไปทางด้านหลังของรถแทรกเตอร์มากขึ้น ส่วนค่า L และ b มีผลต่อขนาดของพื้นที่สำหรับการจับยึดเครื่องมือวัดแรงแบบ ECR สามแกน กับโครงสร้าง และเมื่อต้องการให้ความเค้นเป็นไปตามทฤษฎีผนังบาง (thin wall theory) จะต้องให้สัดส่วน $R/t \geq 3$ เมื่อแรงในแนวราบ (F_x) เท่ากับ 10 kN แรงในแนวดิ่ง (F_y) เท่ากับ 5 kN และโมเมนต์ภายนอก (M_0) เท่ากับ -570 N-m ทิศทางของแรงและโมเมนต์แสดงดังรูปที่ 2 ดังนั้นเมื่อเลือกค่า R = 24 mm, L = 60 mm และ b = 80 mm สามารถคำนวณขนาดของเครื่องมือวัดแรงแบบ ECR สามแกน โดยใช้สมการที่ (6) ได้ดังนี้

Dimension	mm
ความหนา (t)	8
รัศมีเฉลี่ย (R)	24
ระยะระหว่างจุดศูนย์กลางของวงแหวนทั้งสอง (2L)	120
ความกว้าง (b)	80

ความแข็งแรงของเครื่องมือวัดแรงแบบ ECR ถูกตรวจสอบโดยการจำลองสถานการณ์ด้วยการกำหนดแรงในแนวราบเท่ากับ 10 kN แรงในแนวดิ่งเท่ากับ 5 kN และแรงในแนวด้านข้างเท่ากับ 1 kN กระทำที่ตำแหน่งใช้งานจริง พบว่า ค่าความเครียดสูงสุดที่เกิดขึ้นบนเครื่องมือวัดแรงแบบ ECR สามแกนมีค่าเท่ากับ 873.3 $\mu\varepsilon$ ดังนั้นเครื่องมือวัดแรงนี้สามารถนำไปใช้งานได้อย่างปลอดภัย

4.2 ตำแหน่งที่เหมาะสมในการติดตั้งมาตรวัดความเครียด

จากการพิจารณา ε_x, ε_y และ γ_{xy} ของเครื่องมือวัดแรงแบบ ECR สามแกน (ตัวที่ถูกติดตั้งแนวตั้งดังรูปที่ 2 (ข)) เมื่อให้แรงในแนวแกน x และ y ทีละแนวแกนจากนั้นคำนวณค่าความเค้นสัมผัสโดยใช้สมการที่ 7 พบว่าตำแหน่งที่เหมาะสมในการติดตั้งมาตรวัดความเครียดเพื่อวัดแรงในแนวแกน x และ y คือ 58° และ 25° ตามลำดับ

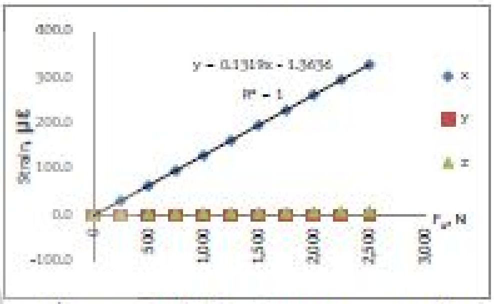
และเมื่อพิจารณา ε_x, ε_z และ γ_{xz} ของเครื่องมือวัดแรงแบบ ECR สามแกน(ตัวที่ถูกติดตั้งแนวนอนดังรูปที่ 2 (ข)) เมื่อให้แรงในแนวแกน x และ z ทีละแนวแกนจากนั้นคำนวณค่าความเค้นสัมผัสโดยใช้สมการที่ 8 พบว่าตำแหน่งที่เหมาะสมในการติดตั้งมาตรวัดความเครียดเพื่อวัดแรงในแนวแกน z คือ 25°

4.3 การสอบเทียบในห้องปฏิบัติการ

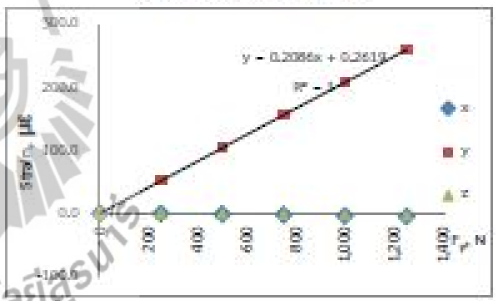
รูปที่ 8, 9 และ 10 แสดงผลการสอบเทียบเครื่องมือวัดแรงแบบ ECR สามแกน (แขนล่างขวา) เมื่อให้แรงทีละแนวแกนในแนวแกน x, y และ z ตามลำดับ ส่วนผลการสอบเทียบของเครื่องมือวัดแรงแบบ ECR สามแกน ตัวอื่นๆ แสดงในตารางที่ 1

จากรูปที่ 8, 9 และ 10 แสดงให้เห็นว่าเครื่องมือวัดแรงแบบ ECR สามแกนที่ถูกสร้างขึ้นสามารถวัดแรงแต่ละแนวแกนได้อย่างถูกต้องแม่นยำ เพราะมีค่า cross sensitivities ต่ำ (ดังตารางที่ 1) และสมการการสอบเทียบมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจสูง (R^2=1) แต่ด้วยข้อจำกัดของอุปกรณ์ใช้ในการสอบเทียบ ส่งผลให้แรงที่ใช้สำหรับการสอบเทียบยังไม่ครอบคลุมช่วงการใช้งาน (ประมาณ 25% ของแรงที่ใช้ออกแบบ)

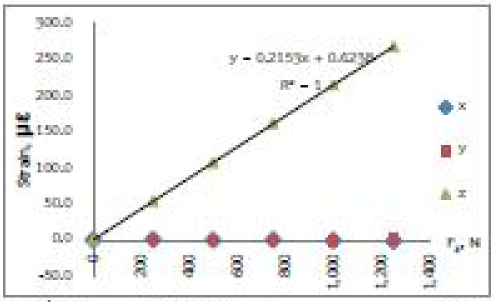
จากการวิเคราะห์ข้อมูล ค่า cross sensitivities (แกน x และ z) ของเครื่องมือวัดแรงแบบ ECR สามแกน (แขนบน) เมื่อให้แรงในแนวแกน y มีค่าสูงคือ 4.81% และ 8.35% ตามลำดับ สาเหตุอาจเกิดมาจากตำแหน่งในการติดตั้งมาตรวัดความเครียดคลาดเคลื่อน



รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงและความเครียด เมื่อให้แรงในแนวแกน x



รูปที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงและความเครียด เมื่อให้แรงในแนวแกน y



รูปที่ 10 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงและความเครียด เมื่อให้แรงในแนวแกน z

ตารางที่ 1 สมการการสอบเทียบและค่า cross sensitivities ของเครื่องมือวัดแรงแบบ ECR สามแกน สำหรับการวัดแรงบนแขนบน แขนล่างซ้าย และแขนล่างขวา

ตำแหน่ง ECR	แกนที่ให้แรง	สมการการสอบเทียบ	% cross sensitivities		
			x	y	z
ECR (แขนบน)	x	$\varepsilon_x = 0.1183F_x - 1.7864$	-	1.09	2.31
	y	$\varepsilon_y = 0.2017F_y - 0.8381$	4.81	-	8.35
	z	$\varepsilon_z = 0.2030F_z + 0.5048$	3.34	2.52	-
ECR (แขนล่างซ้าย)	x	$\varepsilon_x = 0.1256F_x - 0.3409$	-	1.98	0.57
	y	$\varepsilon_y = 0.2038F_y - 0.2048$	1.14	-	2.74
	z	$\varepsilon_z = 0.2100F_z + 0.3524$	2.43	0.99	-
ECR (แขนล่างขวา)	x	$\varepsilon_x = 0.1319F_x - 1.3636$	-	0.31	3.07
	y	$\varepsilon_y = 0.2086F_y + 0.2619$	1.77	-	1.07
	z	$\varepsilon_z = 0.2153F_z + 0.4238$	0.48	0.65	-

5. สรุปผล

1.เครื่องมือวัดแรงสามแนวแกนแบบ ECR นี้ถูกออกแบบตามหลักทฤษฎี [2] และสามารถวัดแรงที่ตำแหน่งจุดพ่วงได้ครบทั้งสามแนวแกน คือแรงในแนวราบ แรงในแนวดิ่ง และแรงด้านข้าง

2.ตำแหน่งการให้แรงของการจำลองสถานการณ์และการสอบเทียบ ควรวัดที่ตำแหน่งต่อพ่วงจริง ส่งผลให้ได้ตำแหน่งติดตั้งมาตรวัดความเครียดที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการวัดแรงในแนวแกน x, y และ z คือ 58°, 25° และ 25° ตามลำดับ

3.วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ถูกนำมาใช้เพื่อช่วยวิเคราะห์หาตำแหน่งที่เหมาะสมในการติดตั้งมาตรวัดความเครียด ส่งผลให้เครื่องมือวัดแรงแบบ ECR สามแกน ทั้งสามตัว มีค่า cross sensitivities ต่ำ

6. เอกสารอ้างอิง

[1] Chen, Y., McLaughlin, N.B. and Tessier, S., (2007). Double extended octagonal ring (DEOR) dynamometer, Soil & Tillage Research, vol. 93(2), pp. 462-471.

[2] McLaughlin, N.B., (1996). Correction of an Error in Equations for Extended Ring Transducers, Transactions of the ASAE, vol. 39, pp. 443-444.

[3] Alimardani, R., Fazel, Z., Akram, A., Mahmoudi, A. and Varnamkhasti, M.G., (2008). Design and development of a three-point hitch dynamometer. J. of Agricultural Technology, vol. 4(1), pp. 37-52.

[4] Kheiralla, A.F., Yahya, A., Zohadie, M. and Ishak, W., (2003). Design and development of a three-point auto dynamometer for an agricultural tractor,

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ASEAN Journal on Science and Technology for Development, vol. 20(3&4), pp. 271-288.

[5] Reece, A.R., (1961). A three point linkage dynamometer for mounted implements, Journal of Agricultural Engineering Research vol. 9, pp. 252-258.

[6] Godwin, R.J., Reynolds, A.J., O'Dogherty, M.J. and Al Ghazal, A.A., (1993). A Triaxial Dynamometer for Force and Management Measurement on Tillage Implements, *J. of Agricultural Engineers Research*, vol. 55, pp. 189–205.

[7] Watyotha, C. and Salokhe, V.M., (2001). Development of a data acquisition system for measuring the characteristics of real time forces by cage wheels. *J. of Terramechanics*, vol. 38, pp. 201-210.

[8] Parish, P.N., Salakha, V.M., Tanya N. and Peeyush S., (2010). Performance of free rolling and powered tillage discs, Soil & Tillage Research, vol. 109, pp. 87-93.

[9] Hoag, D.L. and Yoerger, R.R., (1973). Design and analysis of load rings, ASAE Paper No. 73-5548.

[10] Godwin, R.J., (1975). An Extended Octagonal Ring Transducer for Use in Tillage Studies, *J. of Agricultural Engineers Research*, vol. 20, pp. 347–352.

[11] O'Dogherty, M.J., (1996). The Design of Octagonal Ring Dynamometer, *J. of Agricultural Engineers Research*, vol. 63, pp. 9–18.

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ประวัติผู้เขียน

นายกวี คงมั่น เกิดเมื่อวันที่ 19 เดือนตุลาคม พ.ศ. 2527 ณ จังหวัดชลบุรี สำเร็จการศึกษาระดับชั้นมัธยมศึกษาจากโรงเรียนศรีราชา อำเภอศรีราชา จังหวัดชลบุรี ในปีการศึกษา 2545 และสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีจากสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิชาวิศวกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ในปีการศึกษา 2549 หลังจากสำเร็จการศึกษาได้เข้าทำงานในมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ตำแหน่งผู้ช่วยสอนและวิจัยเป็นเวลา 1 ปี ต่อจากนั้นทำให้เกิดแรงจูงใจที่จะศึกษาต่อใน ระดับปริญญาโท ทางด้านวิศวกรรมเกษตร จึงได้เข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมเกษตร สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ในปี พ.ศ.2554 ในขณะที่ศึกษาอยู่ได้มีโอกาสเป็นผู้ช่วยสอนและวิจัยในสาขาวิชาวิศวกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ซึ่งช่วยให้ผู้วิจัยได้นำประสบการณ์และความรู้ที่ได้จากการเป็นผู้ช่วยสอนและวิจัยมาประยุกต์ใช้กับงานวิจัยได้เป็นอย่างดีจากการทำวิจัยนี้ ทำให้ผู้วิจัยมีความรู้และความเข้าใจทางด้านเครื่องมือวัดแรงเป็นอย่างดีและมีผลงานนำเสนอในงานระดับชาติจำนวน 2 เรื่อง

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี