

การปรับปรุงความแข็งแรงของถังอัดอากาศขนาด 64 ลิตรด้วยวิธีไฟไนต์
เอลิเมนต์

STRENGTH ENHANCEMENT OF 64-LITRE PRESSURE VESSEL USING
FINITE ELEMENT METHOD



สกันธ์ เสงี่ยมสุวรรณ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์

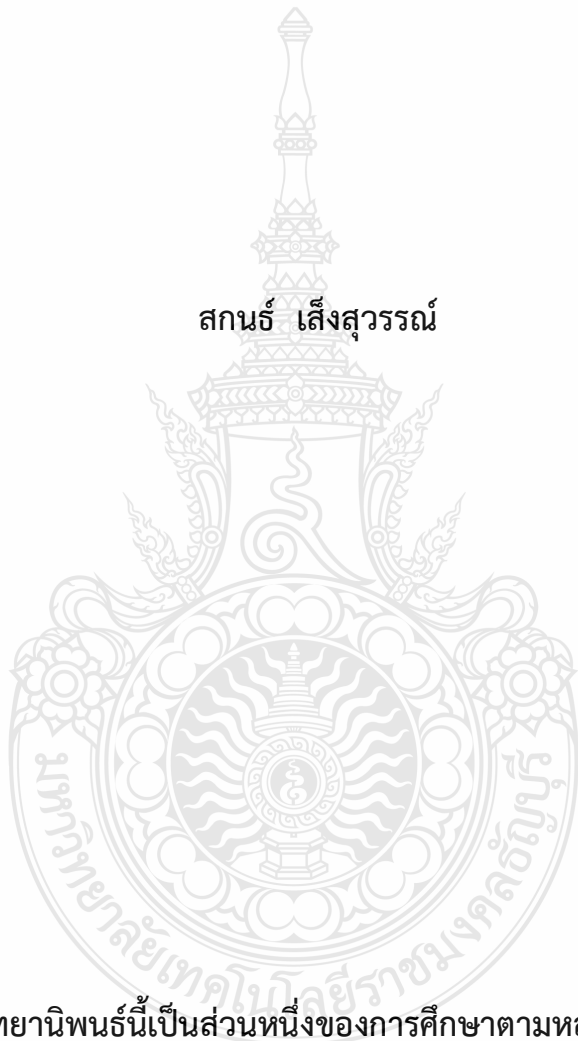
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ปีการศึกษา 2562

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

การปรับปรุงความแข็งแรงของถังอัดอากาศขนาด64ลิตรด้วยวิธีไฟไนต์
เอลิเมนต์

สภานิติบัญญัติ



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ปีการศึกษา 2562
ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การปรับปรุงความแข็งแรงของถังเก็บอากาศขนาด64ลิตรด้วยวิธีไฟไนต์
เอลิเมนต์

Strength Enhancement of 64-litre Pressure Vessel Using Finite
Element Method

ชื่อ - นามสกุล

นายสกันธ์ เส็งสุวรรณ

สาขาวิชา

วิศวกรรมเครื่องกล


อาจารย์ที่ปรึกษา

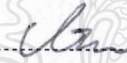
ผู้ช่วยศาสตราจารย์พิพัฒน์ ปราโมทย์, Ph.D.


ปีการศึกษา

2562

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



..... ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์มนูศักดิ์ จานทอง, Dr.-Ing.)


..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ปรัชญา เปรมปราณีรัชต์, Ph.D.)


..... กรรมการ
(อาจารย์มานพ แยมแพง, พร.ด.)


..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์พิพัฒน์ ปราโมทย์, Ph.D.)

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี อนุมัติวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็น
ส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโท


..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ศิวกร อ่างทอง, Ph.D.)
วันที่ 17 เดือน เมษายน พ.ศ. 2563

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การปรับปรุงความแข็งแรงของถังเก็บอากาศขนาด 64 ลิตรด้วยวิธีไฟ- ไฟไนต์เอลิเมนต์
ชื่อ - นามสกุล	นายสกันธ์ เส็งสุวรรณ
สาขาวิชา	วิศวกรรมเครื่องกล
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์พิพัฒน์ ปราโมทย์, Ph.D.
ปีการศึกษา	2562

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาและปรับปรุงความแข็งแรงของถังเก็บอากาศที่ส่งผลต่ออัตราการขยายตัวที่เกิดขึ้นภายในถัง ขณะทดสอบในการวิจัยจะใช้วิธีไฟไฟไนต์เอลิเมนต์ในการวิเคราะห์และสร้างแบบจำลองเพื่อใช้เปรียบเทียบกับผลการทดสอบทางกายภาพระหว่างถังแบบเดิมและถังที่ปรับปรุงความแข็งแรงแล้ว โดยกระบวนการทดลองจะอ้างอิงกับมาตรฐาน มอก.1252-2537

ในกระบวนการทดลองจะใช้ถังแบบเดิมที่มีความหนาเท่ากับ 1.5 มิลลิเมตร และถังที่ปรับปรุงแล้วมีความหนาเท่ากับ 2.6 มิลลิเมตร ขนาดของถังที่ใช้ทดสอบเป็นขนาด 64 ลิตรโดยวัสดุที่ใช้คือเหล็ก SS400 ในสถานะความดันในถังเป็นความดันบรรยากาศ ถังเก็บอากาศทั้งสองแบบมีขนาดเส้นรอบวงเท่ากับ 950 มิลลิเมตร และมาตรฐานการทดสอบความดันที่ใช้ในการทดสอบจะเป็นไปตามมาตรฐาน มอก.1252-2537 โดยใช้วิธีวัดความเครียดแบบ manual และเซ็นเซอร์วัดความเครียดชนิด FLA-6-11-1L ที่ต่อร่วมกับอุปกรณ์อ่านค่าความเครียด โดยอุปกรณ์อ่านค่าความเครียดมีสองแบบคือไมโครคอนโทรลเลอร์แบบอาดูโนที่ต่อร่วมกับวงจรวิสโตนบริดจ์และเครื่องวัดความเครียดแบบพกพา รุ่น TC-32K

ในการทดลองด้วยวิธีไฟไฟไนต์เอลิเมนต์ถังแบบเดิมมีอัตราการขยายตัวเท่ากับ 0.049% และแบบจำลองหลังการปรับปรุงมีอัตราการขยายตัวเท่ากับ 0.025% ส่วนการทดสอบทางกายภาพมีผลการวัดด้วยอุปกรณ์วัดความเครียดแบบ manual ถังแบบเดิมมีอัตราการขยายตัวเท่ากับ 0.105% ขณะที่ถังแบบใหม่มีค่าเป็น 0.065% การวัดด้วยเซ็นเซอร์โดยไมโครคอนโทรลเลอร์แบบอาดูโนที่ต่อร่วมกับวงจรวิสโตนบริดจ์ถังแบบเดิมมีอัตราการขยายตัวเท่ากับ 0.048% และถังแบบใหม่มีอัตราการขยายตัวเท่ากับ 0.024% การวัดด้วยเซ็นเซอร์ร่วมกับเครื่องวัดความเครียดรุ่น TC-32K ถังแบบเดิมมีอัตราการขยายตัวเท่ากับ 0.062% และถังแบบใหม่มีอัตราการขยายตัวเท่ากับ 0.030% ส่วนน้ำหนักของถังแบบใหม่เพิ่มขึ้น 71.59% สรุปได้ว่าการปรับปรุงความแข็งแรงของถังความดันแบบใหม่มีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นจริงซึ่งใกล้เคียงกับค่าที่ออกแบบไว้ในแบบจำลองด้วยระเบียบวิธีไฟไฟไนต์เอลิเมนต์และการปรับปรุงความแข็งแรงของถังจะส่งต่อน้ำหนักของถังด้วย

คำสำคัญ : ถังเก็บความดัน ความแข็งแรง ระเบียบวิธีไฟไฟไนต์เอลิเมนต์

Thesis Title	Strength Enhancement of 64-litre Pressure Vessel Using Finite Element Method
Name - Surname	Mr. Sakon Sangsuwan
Program	Mechanical Engineering
Thesis Advisor	Assistant Professor Pipat Pramot, Ph.D.
Academic Year	2019

ABSTRACT

The purpose of this research was to study and enhance the strength of pressure vessel affecting the rate of the circumference expansion within the pressure vessel. During the experiment, the finite element method was used to analyze and create a model to compare with the physical test results between traditional pressure vessel and the pressure vessel that had been improved strength. The experimental process referred to standards TIS. 1252-2537.

In the experiment, traditional pressure vessel with a thickness of 1.5 millimeters and strength enhanced pressure vessel with a thickness of 2.6mm were used. Both pressure vessels were 64 liters, and both were made of SS400 steel. Under atmospheric pressure, both pressure vessels had a circumference of 950 millimeters. The pressure testing standard used in the test referred to TIS1252-2537. The measurements for circumference of the pressure vessels were measured manually using a FLA-6-11-1L type strain gauge sensor with the strain reading device. There were two types of reading devices: Arduino microcontroller with a Wheatstone bridge circuit and the TC-32K handheld data logger.

The results of the research showed that in the experiment using the finite element method, traditional pressure vessel had expansion of about 0.049% and the strength enhanced pressure vessel had expansion of about 0.025%. In the physical expansion test using manual measurements, the traditional pressure vessel had expansion of about 0.105% and the strength enhanced pressure vessel had expansion of about 0.065%. The expansion measurements using sensors with the Arduino

microcontroller connected to the Wheatstone bridge circuit had expansion about 0.048% for the traditional pressure vessel and 0.024% for the strength enhanced pressure vessel. The expansion measurements using sensors with the TC-32K handheld data logger had expansion about 0.062 % for the traditional pressure vessel and 0.030% for the strength enhanced pressure vessel and the increased mass was 71.59 % for strength enhancement of the air storage tank. In conclusion, the strength enhanced pressure vessel had actual strength as strong as the model created by the finite element method and the strength-enhancement of the pressure vessel affected to the weight of the pressure vessel.

Keywords: pressure vessel, strength enhancement, finite element method



กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยดี ผู้เขียนขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. พัทฒน์ ปราโมทย์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์เป็นอย่างสูง ที่ได้ให้คำปรึกษา ให้ข้อเสนอแนะและให้แนวทางในการแก้ปัญหา ตลอดจนให้ข้อคิดต่างๆ ที่เป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่อการทำวิจัย รวมทั้งให้อุปกรณ์จำเป็นสำหรับ ใช้ประกอบการวิจัย และที่สำคัญคือให้ความดูแลและสอบถามถึงความก้าวหน้าของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ตลอดมา จนทำให้ผู้เขียนมีกำลังใจทำงานจนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ผู้เขียนรู้สึกซาบซึ้งในความกรุณาเป็นอย่างสูง

ขอขอบคุณกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.มนูศักดิ์ จานทอง ดร.มานพ แยมแพง ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. พัทฒน์ ปราโมทย์ และอาจารย์ผู้ทรงคุณวุฒิจากมหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปรัชญา เปรมปราณีรัชต์ ที่ได้ให้คำแนะนำเพิ่มเติม พร้อมทั้งข้อเสนอแนะ เพื่อให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณภาคีวิศวกรเครื่องกลและบุคลากรที่เกี่ยวข้องทุกท่าน ที่ได้เอื้อเฟื้ออุปกรณ์ และเครื่องมือในการทำวิจัย พร้อมทั้งยังอำนวยความสะดวกให้แก่ผู้วิจัยให้สามารถทำวิจัยได้อย่างราบรื่น

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา ครูอาจารย์ ญาติพี่น้อง และผู้เกี่ยวข้องทุกท่านที่คอยสนับสนุน ให้กำลังใจ และช่วยเหลือจนทำให้การทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

สกนธ์ เส็งสุวรรณ

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	(3)
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	(4)
กิตติกรรมประกาศ.....	(6)
สารบัญ.....	(7)
สารบัญตาราง.....	(9)
สารบัญรูป.....	(10)
บทที่ 1 บทนำ.....	12
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	12
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	13
1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย.....	13
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	13
บทที่ 2 งานวิจัยหรือทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	14
2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์.....	14
2.2 ทฤษฎีไฟไนต์เอลิเมนต์.....	16
2.3 ขั้นตอนของวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์.....	17
2.4 มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก. 1252-2537.....	21
2.5 ภาชนะทรงกระบอกผนังบาง.....	22
2.6 ภาชนะทรงกระบอกผนังหนา.....	22
บทที่ 3 วิธีการดำเนินวิจัย.....	24
3.1 แผนการดำเนินงานวิจัย.....	24
3.2 ขั้นตอนการดำเนินงาน.....	25
3.3 สร้างแบบจำลองของถังเก็บอากาศขนาด64ลิตรและทดสอบด้วยวิธีไฟไนต์.....	25
3.4 การทดสอบทางกายภาพ.....	27
3.5 เซ็นเซอร์วัดความเครียด (Strain gauge).....	31
3.6 การติดตั้งเซ็นเซอร์วัดความเครียด.....	32
3.7 ไมโครคอนโทรลเลอร์อาดูอิโน้.....	35
3.8 โมดูล HX711 weight sensor amplifier dual channel module.....	36

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.9 วิทส์โตนปริดจ์.....	37
3.10 เครื่องวัดความเครียดแบบพกพารุ่นTC-32K.....	38
บทที่ 4 ผลการทดลอง	39
4.1 การทดสอบถึงเก็บอากาศด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์.....	39
4.2 การทดสอบทางกายภาพแบบแมนนวล	40
4.3 การทดสอบด้วยเซ็นเซอร์วัดความเครียดต่อร่วมกับไมโครคอนโทรลเลอร์.....	41
4.4 การทดสอบด้วยเซ็นเซอร์วัดความเครียดต่อร่วมกับเครื่องอ่านความเครียดแบบพกพา.....	42
4.5 ผลการศึกษา.....	44
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	46
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	46
5.2 ปัญหาที่พบในการทำวิจัย	46
5.3 ข้อเสนอแนะและแนวทางการพัฒนา.....	46
บรรณานุกรม.....	47
ภาคผนวก.....	49
ภาคผนวก ก แสดงวิธีการคำนวณการหาอัตราการขยายตัวของถังอัดอากาศ.....	50
ภาคผนวก ข แบบตอบรับการนำเสนอบทความวิจัยในการประชุมวิชาการ.....	56
ประวัติผู้เขียน	68

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 3.1 แผนการดำเนินงานวิจัย.....	24
ตารางที่ 3.2 ตารางคุณสมบัติทางกล	26
ตารางที่ 4.1 การทดสอบทางกายภาพด้วยเซ็นเซอร์วัดความเครียดชนิด FLA-6-11-1L ที่ต่อร่วมกับอุปกรณ์อ่านค่าแบบไมโครคอนโทรลเลอร์แบบอาดูโนที่ต่อร่วม วงจรวีลิตอนปริตจ์ของถังแบบเดิม	41
ตารางที่ 4.2 การทดสอบทางกายภาพด้วยเซ็นเซอร์วัดความเครียดชนิด FLA-6-11-1L ที่ต่อร่วมกับอุปกรณ์อ่านค่าแบบไมโครคอนโทรลเลอร์แบบอาดูโนที่ต่อร่วม วงจรวีลิตอนปริตจ์ของถังที่ทำการปรับปรุงความแข็งแรง.....	42
ตารางที่ 4.3 การทดสอบทางกายภาพด้วยเซ็นเซอร์วัดความเครียดชนิด FLA-6-11-1L ที่ต่อร่วมกับอุปกรณ์อ่านค่าแบบพกพารุ่น TC-32K ของถังแบบเดิม.....	43
ตารางที่ 4.4 การทดสอบทางกายภาพด้วยเซ็นเซอร์วัดความเครียดชนิด FLA-6-11-1L ที่ต่อร่วมกับอุปกรณ์อ่านค่าแบบพกพารุ่น TC-32K ของถังที่ทำการปรับ ปรุงความแข็งแรง.....	43
ตารางที่ 4.5 เปรียบเทียบอัตราการขยายตัวของถังแบบเดิมและถังที่ปรับปรุงความแข็งแรง.....	44



สารบัญรูป

	หน้า
ภาพที่ 2.1 การทดสอบแรงดันของถังก๊าซปิโตเลียมเหลว.....	14
ภาพที่ 2.2 แบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ของหัวรีฟอร์ม.....	15
ภาพที่ 2.3 ตำแหน่งการติดตั้งเสตนเกจบนโต๊ะบริหารแบบ N-K table	15
ภาพที่ 2.4 แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์แบบวิธี h-adaptive.....	16
ภาพที่ 2.5 การแบ่งชิ้นส่วนเอลิเมนต์ย่อย	17
ภาพที่ 2.6 ท่อนโลหะรับแรงตามแนวแกน.....	18
ภาพที่ 2.7 ภาพขณะทรงกระบอกผนังบางภายใต้ความดันภายในโดยที่เอลิเมนต์ความเค้นมีองค์ประกอบความเค้น เฉพาะในแนวแกน x และ y เท่านั้น ปัญหานี้จึงถูกกำหนดให้เป็นปัญหาระนาบ.....	22
ภาพที่ 2.8 ภาพขณะทรงกระบอกผนังหนาภายใต้ความดันภายในโดยที่เอลิเมนต์ความเค้นมีองค์ประกอบความเค้น สามแนวแกน x-y-z.....	23
ภาพที่ 3.1 แบบจำลองของถังอัดอากาศขนาด 64 ลิตร.....	25
ภาพที่ 3.2 การแบ่งแบบจำลองเป็นเอลิเมนต์เล็กๆ.....	26
ภาพที่ 3.3 ผลการทดสอบด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์.....	27
ภาพที่ 3.4 เครื่องอัดอากาศขนาดเล็กแบบลูกสูบ.....	27
ภาพที่ 3.5 วิธีการวัดอัตราการขยายตัวแบบแมนนวล.....	28
ภาพที่ 3.6 การติดตั้งเซ็นเซอร์วัดความเครียดชนิด FLA-6-11-1L ที่ถังเก็บอากาศ.....	29
ภาพที่ 3.7 การติดตั้งไมโครคอนโทรลเลอร์แบบอาดูโนกับวงจรวิสโตนบริดจ์.....	30
ภาพที่ 3.8 การติดตั้งเครื่องวัดความเครียดแบบพกพา รุ่น TC-32K กับเซ็นเซอร์วัดความเครียดชนิด FLA-6-11-1L.....	31
ภาพที่ 3.9 เซ็นเซอร์วัดความเครียดชนิด FLA-6-11-1L.....	32
ภาพที่ 3.10 การกำจัดสิ่งสกปรกและสีที่เคลือบอยู่บนผิวที่ต้องการวัด.....	32
ภาพที่ 3.11 การกำจัดคราบไขมัน และทำความสะอาดผิว.....	33
ภาพที่ 3.12 การทำเครื่องหมายที่ต้องการติดตั้ง.....	33
ภาพที่ 3.13 การหยอดกาว.....	33
ภาพที่ 3.14 การติดตั้งเซ็นเซอร์วัดความเครียดบริเวณที่ต้องการวัดค่า	34
ภาพที่ 3.15 การกดที่ตัวเซ็นเซอร์วัดความเครียดผ่านแผ่นโพลียูเรเทน.....	34
ภาพที่ 3.16 การติดตั้งเซ็นเซอร์วัดความเครียดเสร็จสมบูรณ์.....	35

สารบัญรูป(ต่อ)

	หน้า
ภาพที่ 3.17 ไมโครคอนโทรลเลอร์แบบอาดูโน.....	35
ภาพที่ 3.18 โมดูล HX711 weight sensor amplifier dual channel module.....	36
ภาพที่ 3.19 การต่อ HX711 weight sensor amplifier dual channel module กับ Load cell...	36
ภาพที่ 3.20 วงจรวีทสโตนบริดจ์.....	37
ภาพที่ 3.21 สเตอรนเกจถูกนำมาต่อเข้ากับวงจรแทนที่ R1	37
ภาพที่ 3.22 เครื่องวัดความเครียดแบบพกพารุ่น TC-32K	38
ภาพที่ 4.1 ผลการทดสอบด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ของถังแบบเดิม	39
ภาพที่ 4.2 ผลการทดสอบด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ของถังที่ทำการปรับปรุงความแข็งแรง.....	40
ภาพที่ 4.3 กราฟแสดงอัตราการขยายตัวระหว่างถังแบบเดิมและถังที่ทำการปรับปรุง.....	45



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ถังเก็บอากาศ (Air Tank) คืออุปกรณ์ที่ทำหน้าที่กักเก็บลมอัดที่เครื่องอัดอากาศผลิตออกมา และรักษาปริมาณลมอัดให้เพียงพอกับการใช้งาน เพื่อนำไปใช้งานโดยจะจ่ายไปตามท่อลม ให้กับเครื่องจักรหรืออุปกรณ์ต่างๆ รวมทั้งระบบนิวเมติกส์ในโรงงานทั้งขนาดเล็กและขนาดใหญ่ ปัจจุบันตามโรงงานและอุตสาหกรรมทั่วโลกใช้งานอย่างกว้างขวางในเครื่องจักรอัตโนมัติเพื่อ ประหยัดแรงและงาน บางประเภทที่ทำงานซ้ำซาก รวมทั้งงานที่มีความร้อนมีกรดเป็นอันตรายเช่น สารเคมีที่เป็นอันตรายต่อคนงาน ถังเก็บอากาศเป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่เก็บอากาศที่ได้จากเครื่องอัดอากาศ และนำเอาระบบลมอัดไปใช้งานอย่างกว้างขวาง เช่น เครื่องจักรที่ใช้ประกอบชิ้นส่วนในการผลิตสินค้าจำนวนมากๆ เครื่องบรรจุผลิตภัณฑ์หีบห่อ เครื่องจักรอุตสาหกรรมอาหาร เครื่องจักรงานไม้ เครื่องหล่อโลหะ เครื่องเชื่อม เครื่องจักรอุตสาหกรรมผลิตเหล็ก เครื่องขนถ่ายวัสดุ เครื่องพิมพ์ และเครื่องจักรอื่นๆอีกมากมาย ที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้ เหตุผลหนึ่งที่น่าเอาระบบลมอัดไปใช้อัดอากาศจึงทำให้ต้องรับความดันสูง ดังนั้นจึงต้องคำนึงถึงความสามารถในการรับแรงดันของถังเก็บอากาศเพื่อให้เกิดความปลอดภัยในการทำงาน เพื่อที่จะลดข้อผิดพลาดและมีความปลอดภัยในการทำงาน การสร้างแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์เพื่อทำการวิเคราะห์ความแข็งแรงของถังก่อนการสร้างจริง วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอการใช้วิธีไฟไนต์อีลิเมนต์มาทำการศึกษาความแข็งแรงของถังเก็บอากาศ และทำการปรับปรุงให้มีความแข็งแรงเพิ่มมากขึ้น โดยการศึกษาจะทำการสร้างแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์เพื่อนำมาเปรียบเทียบกับ การทดลองทางกายภาพ โดยใช้วิธีวัดความเครียดแบบ manual และเซ็นเซอร์วัดความเครียด (Strain gauge) ชนิด FLA-6-11-1L มาทำการวัดค่าแรง เนื่องจากมีความถูกต้องแม่นยำและเป็นที่น่าเชื่อถือใน หน่วยงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง โดยอุปกรณ์วัดความเครียดมีสองแบบคือ ไมโครคอนโทรลเลอร์แบบอาณูโนที่ต่อ ร่วมกับวงจรวีทสโตนบริดจ์และเครื่องวัดแบบพกพารุ่น TC-32K ขนาดของถังที่ใช้ทดสอบเป็นขนาด 64 ลิตรโดยใช้วัสดุ SS400 และมาตรฐานความดันที่ใช้ในการทดสอบจะเป็นไปตามมาตรฐาน มอก.1252-2537

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 1.2.1 ศึกษาความแข็งแรงของถังเก็บอากาศของถังเหล็กด้วยระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์
- 1.2.2 เพื่อเปรียบเทียบผลระหว่างการทดสอบทางกายภาพและวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์
- 1.2.3 เพื่อทดสอบถังเก็บอากาศของเครื่องอัดอากาศขนาดเล็กแบบลูกสูบให้เป็นไปตาม

มาตรฐาน มอก.1252-2537

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1.3.1 ขนาดของถังเก็บอากาศที่ใช้ในการทดสอบจะเป็นขนาด 64 ลิตร มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 950 มิลลิเมตร

1.3.2 ใช้โปรแกรมสำเร็จรูปในการสร้างแบบจำลอง

1.3.3 ความดันที่ใช้ในการทดสอบจะเป็นไปตามมาตรฐาน มอก.1252-2537 ที่ใช้ความดัน 13 บาร์

1.3.4 อุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดอัตราการขยายตัวจะมี 2 แบบคือ แบบ manual และแบบเซ็นเซอร์วัดความเครียด มีความแม่นยำในการคลาดเคลื่อนไม่เกิน 0.015 %

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 มีความรู้ความเข้าใจในการวิเคราะห์ถังเก็บอากาศด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

1.4.2 มีความรู้ความเข้าใจในการทดสอบถังเก็บอากาศตามมาตรฐาน มอก. 1252-2537

1.4.3 มีความรู้ความเข้าใจในการเลือกใช้อุปกรณ์อ่านค่าความเครียด

1.4.4 สามารถนำความรู้ที่ได้ไปพัฒนาและประยุกต์ใช้ในการเพิ่มความแข็งแรงของถังเก็บอากาศ

ได้

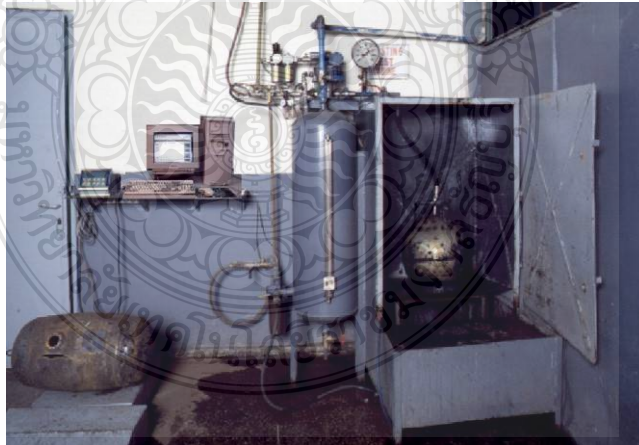
บทที่ 2

งานวิจัยหรือทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้จะกล่าวถึงงานวิจัยต่างๆที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์ความแข็งแรงของวัสดุโดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ มาตรฐานและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

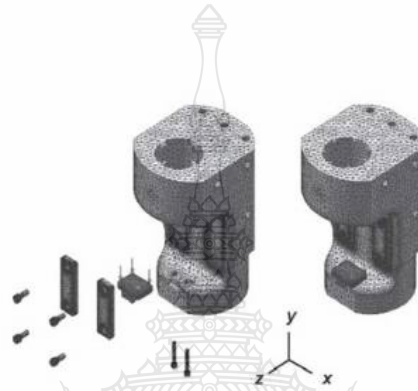
2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์

M.EgemenAksoley และคณะ จาก Department of Design and Manufacturing Engineering ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับความต้านทานของถังก๊าซปิโตรเลียมเหลว (LPG) ที่ผลิตจากแผ่นโลหะคาร์บอนที่มีความหนาแตกต่างกัน ซึ่งวิเคราะห์โดยการทดสอบค่าความดันและวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบ Non-linear (FEM) ด้วยการเพิ่มค่าความดันภายในวาล์ว การออกแบบถังก๊าซปิโตรเลียมเหลวที่ผลิตจากแผ่นโลหะถูกนำมาใช้ในกรณีศึกษานี้ได้ใช้การคำนวณเชิงวิเคราะห์โดยคำนึงถึงมาตรฐานที่เกี่ยวข้อง การทดสอบแรงดันวิกฤตได้ถูกนำมาทดสอบสมรรถภาพซึ่งมีแนวโน้มที่จะลดความหนาของแผ่นโลหะที่ใช้ในการผลิตถังก๊าซ LPG ในอุตสาหกรรมลง ผลจากกรณีศึกษาแสดงให้เห็นว่าสามารถผลิตถังก๊าซ LPG ได้ตามมาตรฐาน โดยลดความหนาของแผ่นโลหะลงเหลือ 3 ถึง 2.8 มิลลิเมตร ผลการวิเคราะห์จากวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แสดงค่าที่ใกล้เคียงกับผลของแรงดันวิกฤตที่ได้จากการทดลอง



รูปที่ 2.1 การทดสอบแรงดันของถังก๊าซปิโตรเลียมเหลว [1]

วรวิทย์ วรรณาวิน และคณะ [2] จากคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร ได้ศึกษาการวิเคราะห์ความเข้มของความเค้นที่เกิดขึ้นภายในหัวรีฟอร์มโดยระเบียบวิธีไฟไนต์-เอลิเมนต์ ซึ่งหัวรีฟอร์มมีลักษณะเป็น C-Clamp ใช้ในการบีบอัดหน้าแป้นเสื้อเพลลาขับหลัง โปรแกรม SolidWorks และ Cosmos ใช้ในการสร้างแบบจำลองและวิเคราะห์ตามลำดับ ผลการทดสอบจริงและไฟไนต์เอลิเมนต์มีความคลาดเคลื่อน 8.1% สรุปว่าแบบจำลองที่สร้างขึ้นสามารถใช้ในการวิเคราะห์ปัญหานี้ได้



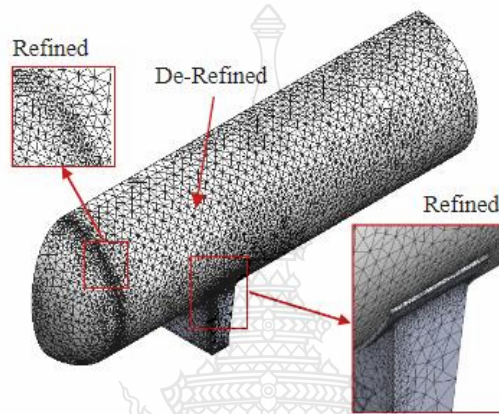
รูปที่ 2.2 แบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ของหัวรีฟอร์ม [2]

สุทธา หิรัญธนวัฒน์ และคณะ [3] จากคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ศึกษาการวัดค่าแรงจากการบริหารข้อเข่าแบบ Bending Stress ด้วยอุปกรณ์สเตรนเกจ เพื่อทดแทนเครื่องบริหารข้อเข่าแบบไอโซคิเนติกที่ยังมีไม่เพียงพอต่อความต้องการใช้งาน เนื่องจากราคาของอุปกรณ์ที่สูงระบบกลไกมีความซับซ้อน และเทคโนโลยีสมัยใหม่ ยากต่อการผลิตภายในประเทศ ในบทความนี้อธิบายถึงขั้นตอนและวิธีการทดลอง ในส่วนของ การวัดแรงที่เกิดจากการบริหารข้อเข่าแบบ Bending Stress ด้วยอุปกรณ์สเตรนเกจ จากการทดลองเปรียบเทียบความผิดพลาดผลการคำนวณเทียบกับผลจากการทดลองพบว่าระบบที่สร้างขึ้นมีค่าเฉลี่ยความผิดพลาดเท่ากับร้อยละ 6.81



รูปที่ 2.3 ตำแหน่งติดตั้งเสตนเกจบนโต๊ะบริหารแบบ N-K table [3]

อรรถพล ชัยมนัสกุล จากคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธนบุรี ได้ศึกษาผลกระทบของตัวแปรที่มีต่อความเค้นในถังแรงดันแนวนอนและแท่นรองรับด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยใช้แบบจำลองสามมิติและวิเคราะห์เพียง 1 ส่วน 4 ของแบบจำลอง และจากการศึกษาพบว่าความเค้นในถังแรงดันและแท่นรองรับจะลดลงเมื่ออัตราส่วน A/L เท่ากับ 0.2 และอัตราส่วน L/R น้อยกว่า 14 ขนาดของแท่นรองรับที่เหมาะสมสามารถช่วยลดค่าความเค้นในถังแรงดันและแท่นรองรับลงได้



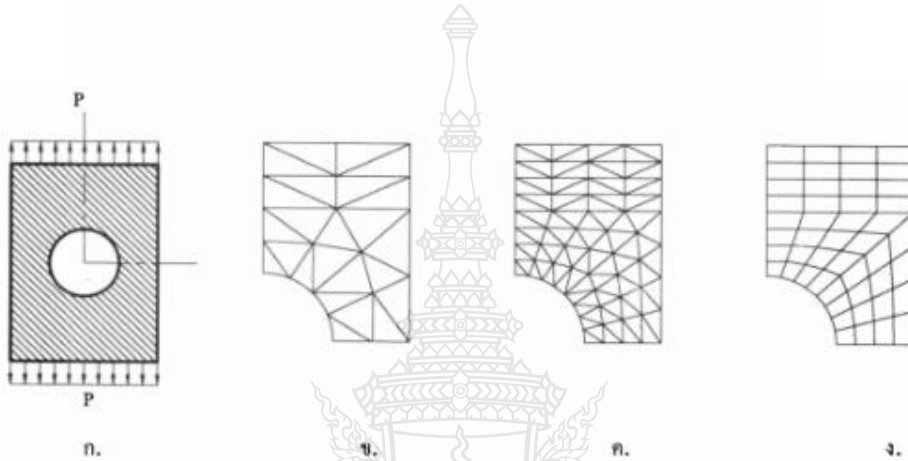
รูปที่ 2.4 แบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์และการปรับปรุงเอลิเมนต์แบบวิธี h-adaptive [4]

2.2 ทฤษฎีไฟไนต์เอลิเมนต์

วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เป็นวิธีเชิงตัวเลขวิธีหนึ่งที่ใช้สำหรับแก้สมการเชิงอนุพันธ์และเป็นวิธีที่นิยมใช้วิเคราะห์แก้ปัญหาทางด้านวิศวกรรมศาสตร์อย่างกว้างขวาง ซึ่งสามารถใช้วิเคราะห์ปัญหาทางด้านกลศาสตร์ของแข็ง เช่น วิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงรูปร่าง และความเค้นของชิ้นส่วนเครื่องจักรกล โครงสร้างเครื่องบิน ตัวอาคาร สะพานและโครงสร้างอื่นๆ ที่ซับซ้อนได้เป็นอย่างดี ไม่ว่าจะวัสดุที่ใช้ในการวิเคราะห์นั้นจะอยู่ในสภาพยืดหยุ่น (Elastic) หรือในสภาพยืดตัว (Plastic) นอกจากนี้จะใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์วิเคราะห์ปัญหาทางด้านสถิติศาสตร์ตามที่กล่าวมาแล้ว ยังสามารถใช้วิเคราะห์ปัญหาทางด้านพลศาสตร์ เช่น การสั่นสะเทือนของชิ้นส่วนเครื่องจักรกล การสั่นสะเทือนของโครงสร้างรวมทั้งยังสามารถใช้วิเคราะห์ปัญหาด้านการถ่ายเทความร้อนการไหลของของไหล การถ่ายเทมวล เป็นต้น

การวิเคราะห์โครงสร้างหรือชิ้นส่วนเครื่องจักรกลโดยทั่วไปที่ไม่ซับซ้อน เราสามารถที่จะหาสมการความสัมพันธ์ระหว่างสิ่งที่ต้องการทราบ เช่น การกระจัดที่ตำแหน่งใดๆ ของชิ้นส่วนได้โดยอาศัยสมการเชิงอนุพันธ์ และผลเฉลยที่ได้รับจะเรียกว่าผลเฉลยแม่นยำตรง (Exact solution) แต่มีชิ้นส่วนเครื่องจักรกล และโครงสร้างจำนวนมากที่มีรูปร่างลักษณะที่ซับซ้อนที่ประกอบด้วยโค้งเว้าต่างๆ ทำให้

พื้นที่หน้าตัดของชิ้นส่วนไม่สม่ำเสมอและบางบริเวณอาจมีการเปลี่ยนแปลงของโหนดโดยฉับพลัน หรือใช้วัสดุต่างชนิดกันเหล่านี้เป็นต้น จึงทำให้มีผลไม่สามารถจะหาผลเฉลยแม่นยำตรงจากสมการอนุพันธ์สามัญหรือสมการอนุพันธ์ย่อยได้ ฉะนั้นจำเป็นต้องหาวิธีอื่น เช่น ไฟไนต์เอลิเมนต์ที่สามารถจะประมาณค่าผลเฉลยโดยการแก้ระบบสมการเชิงพีชคณิต แทนการแก้สมการเชิงอนุพันธ์ การแก้ด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ดังกล่าวชิ้นส่วนหรือชิ้นส่วนประกอบของปัญหาจะถูกแบ่งออกเป็นส่วนใหญ่ๆอย่างต่อเนื่อง ตามรูปร่างลักษณะที่แท้จริงของชิ้นส่วน เราเรียกชิ้นส่วนย่อยเหล่านี้ว่า ไฟไนต์เอลิเมนต์



รูปที่ 2.5 การแบ่งชิ้นส่วนเอลิเมนต์ย่อย (ก) แผ่นโลหะมีรูตรงกลางและมีโหลด P กระทำ (ข) เอลิเมนต์สามเหลี่ยมหายาบ (ค) เอลิเมนต์สามเหลี่ยมละเอียด (ง) เอลิเมนต์สี่เหลี่ยมโค้ง [13]

ผลเฉลยที่ได้รับจะเป็นผลเฉลยที่จุดต่อ (Node) ของแต่ละเอลิเมนต์ การวิเคราะห์เราจะวิเคราะห์ทีละเอลิเมนต์แล้วนำมารวมกันเป็นผลเฉลยของระบบ

2.3 ขั้นตอนของวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

หลักการของวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ก็คือ การจะแบ่งโครงสร้างออกเป็นส่วนใหญ่ๆ ซึ่งเรียกว่า ไฟไนต์เอลิเมนต์ ฟังก์ชันการกระจัด (Displacement Function) ที่นำมาแทนเอลิเมนต์จะต้องป็นฟังก์ชันที่ต่อเนื่อง แต่ละเอลิเมนต์เชื่อมโยงกันด้วยจุดต่อ (Node) หรือผิวขอบหรือผิวรอบเอลิเมนต์สัมผัสกัน และอาศัยคุณสมบัติทางกลของวัสดุที่ใช้ทำโครงสร้างหรือชิ้นงาน เราสามารถหาการกระจัด ความเค้น-ความเครียด ที่เกิดขึ้นที่จุดต่อต่างๆของแต่ละเอลิเมนต์ที่ประกอบเป็นโครงสร้างหรือชิ้นงาน

ขั้นตอนต่างๆของวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ที่ใช้ในการวิเคราะห์โครงสร้างหรือชิ้นส่วน เช่น สปริง ท่อน โลหะ เพลลาโครงข้อหมุน โครงข้อแข็ง แผ่นโลหะ ถึงความดัน ภายใต้ภาวะต่างๆของโหมด มีขั้นตอนทั่วไปคล้ายๆกันดังนี้

2.3.1 การแบ่งโครงสร้างเป็นเอลิเมนต์ย่อยและการเลือกชนิดของเอลิเมนต์

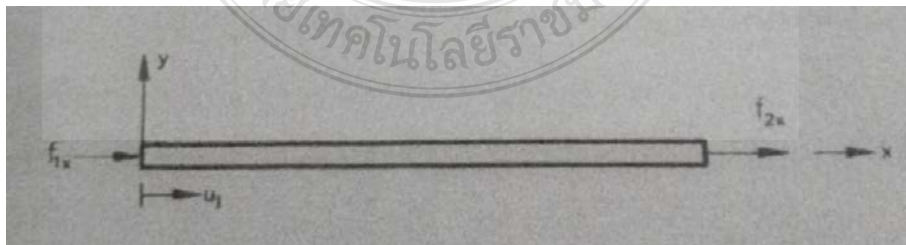
การแบ่งโครงสร้างออกเป็นเอลิเมนต์ย่อย จะต้องคำนึงถึงรูปร่างลักษณะของโครงสร้างเดิมคือแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite element model) จะต้องเหมือนหรือสอดคล้องกับโครงสร้างเดิมให้มากที่สุด คือบริเวณที่เป็นส่วนเว้า ส่วนโค้ง หรือมีรู หรือบริเวณที่มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างอย่างฉับพลันก็จำเป็นต้องแทนด้วยเอลิเมนต์ที่มีขนาดเล็กเพียงพอที่จะให้ผลการวิเคราะห์ได้ถูกต้องแม่นยำ ส่วนบริเวณที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างมากนักก็จะแทนด้วยเอลิเมนต์ที่มีขนาดใหญ่ขึ้น แต่ถ้าแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ประกอบด้วยจำนวนเอลิเมนต์มากเกินไปจนความจำเป็นก็จะทำให้ค่าใช้จ่ายในการคำนวณสูง และอาจจะทำให้ไม่สามารถหาผลเฉลยได้ถ้าเครื่องคอมพิวเตอร์มีความละเอียดในการคำนวณไม่เพียงพอ ส่วนการเลือกใช้ชนิดของเอลิเมนต์นั้นจะต้องคำนึงถึงรูปร่างลักษณะของโครงสร้างและการกระทำของโหลด รวมทั้งความละเอียดของผลเฉลยที่ผู้วิเคราะห์ต้องการคืออาจจะใช้เอลิเมนต์ชนิดมิติเดียว สองมิติ สามมิติ หรือเอลิเมนต์ชนิดแกนสมมาตร (Axisymmetric element)

2.3.2 การเลือกฟังก์ชันการกระจัด

จะต้องเลือกฟังก์ชันการกระจัดภายในเอลิเมนต์ ให้สอดคล้องกับจำนวนจุดต่อของเอลิเมนต์หรือสอดคล้องกับระดับความเสรีของเอลิเมนต์ ฟังก์ชันการกระจัดนิยมใช้กันคือ พอลิโนเมียลฟังก์ชัน ซึ่งอาจเป็นกำลังหนึ่ง, กำลังสอง, กำลังสามส่วนฟังก์ชันที่เป็นอนุกรมทางเลขาคณิตก็สามารถเลือกใช้ได้ แต่ไม่เป็นที่นิยมใช้ ทั้งนี้เพราะพอลิโนเมียลฟังก์ชันให้ความสะดวกในการวิเคราะห์มากกว่า ในกรณีของปัญหาสองมิติ ฟังก์ชันการกระจัดที่จุดต่อจะเขียนอยู่ในเทอมของพิกัดของระนาบ เช่น ระนาบ x-y เป็นต้น ฟังก์ชันการกระจัดที่จะเลือกใช้จะต้องทำให้ผลเฉลยที่ความต่อเนื่องทั้งภายในเอลิเมนต์และแบบจำลองของระบบรวม

2.3.3 กำหนดความสัมพันธ์ระหว่างความเครียด/การกระจัด และความเค้น/ความเครียด

การหาสมการไฟไนต์เอลิเมนต์ของแต่ละเอลิเมนต์จำเป็นต้องอาศัยความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดกับการกระจัดและความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดในกรณีของมิติเดียว



รูปที่ 2.6 ท่อนโลหะรับแรงตามแนวแกน [13]

การยืดตัว u ของเอลิเมนต์ในทิศทางใดทิศทางหนึ่ง เช่น ทิศทาง x จะมีความสัมพันธ์กับความเครียด ε_x ในกรณีที่ ε_x มีค่าน้อย $\varepsilon_x = du/dx$ และถ้าวัสดุอยู่ในช่วงยืดหยุ่น จากกฎของฮุกความสัมพันธ์ของความเค้นและความเครียดคือ $\sigma_x = E\varepsilon_x$ ซึ่ง σ_x คือความเค้นในทิศทาง x และ E คือค่ามอดูลัสของการยืดหยุ่น ผลเฉลยของการกระจัด ความเค้น ความเครียด โดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จะถูกต้องแม่นยำเพียงใด ย่อมขึ้นอยู่กับคุณสมบัติทางกลของวัสดุที่นำมาใช้ในการคำนวณ และความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดกับการกระจัด และความเค้นกับความเครียดจะมีลักษณะเป็นสมการเชิงเส้นหรือไม่เป็นสมการเชิงเส้น

2.3.4 หาสทิวเนสมเมทริกซ์และสมการของเอลิเมนต์ สามารถหาได้หลายวิธีเช่น

2.3.4.1 วิธีสมดุลโดยตรง (Direct equilibrium method)

เป็นวิธีที่ง่ายที่สุด เราสามารถหาสทิวเนสมเมทริกซ์และสมการของแรงในเทอมการกระจัดที่จุดต่อของเอลิเมนต์ได้โดยใช้เงื่อนไขการสมดุลของแรงในเอลิเมนต์ ส่วนมากจะใช้สทิวเนสมเมทริกซ์ของเอลิเมนต์มิติเดียว เช่น เอลิเมนต์สปริง ท่อนโลหะ เพลลา และคานเป็นต้น

2.3.4.2 วิธีงานหรือพลังงาน (Work or energy method) และทฤษฎีของแคสติเกลียโน (Castigliano's theorem) ก็จะสามารถหาสมการของเอลิเมนต์และหาสทิวเนสมเมทริกซ์ของเอลิเมนต์สองและสามมิติได้โดยสะดวก สำหรับวิธีของงานสมมุติฐานนั้นสามารถใช้หาสทิวเนสมเมทริกซ์ของวัสดุทุกชนิดและวิธีพลังงานศักย์ต่ำสุดและทฤษฎีแคสติเกลียโน ใช้หาสทิวเนสมเมทริกซ์ของเอลิเมนต์ของวัสดุยืดหยุ่นเชิงเส้นเท่านั้น อย่างไรก็ตามทั้งสามหลักการ สามารถหาสทิวเนสมเมทริกซ์ของวัสดุยืดหยุ่นได้เหมือนกัน แต่ในหนังสือนี้จะเน้นการหาสทิวเนสมเมทริกซ์ของเอลิเมนต์ โดยอาศัยหลักการของพลังงานต่ำสุด เพราะเป็นหลักการที่นิยมใช้กันอย่างกว้างขวาง สำหรับการวิเคราะห์โครงสร้างในช่วงยืดหยุ่น

2.3.4.3 วิธีเวทเรซิดิว (method of weighted residual)

วิธีของเวทเรซิดิวที่นิยมกันมากคือวิธีของกาเลอร์กิน (Galerkin's method) ซึ่งมีประโยชน์มากสำหรับการหาสมการของเอลิเมนต์ และให้ผลเช่นเดียวกับวิธีพลังงาน ส่วนมากมักจะนิยมใช้ในกรณีที่วิธีพลังงานศักย์ต่ำสุดใช้ได้ไม่สะดวก เช่น ปัญหาการไหลของของเหลว การถ่ายเทความร้อน การเคลื่อนมวล (Mass transport)

โดยอาศัยวิธีใดวิธีหนึ่งจากสามวิธีตามที่กล่าวมาแล้ว เราจะได้รับสมการสมดุลของแรงในเทอมของสทิวเนสมเมทริกซ์ และการกระจัดที่จุดต่อของเอลิเมนต์ดังกล่าว สามารถเขียนอยู่ในรูปของเมทริกซ์ได้ดังนี้

$$\begin{Bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \\ \vdots \\ f_n \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} & \cdot & \cdot & k_{1n} \\ k_{21} & k_{22} & \cdot & \cdot & k_{2n} \\ k_{31} & k_{32} & \cdot & \cdot & k_{3n} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & k_{4n} \\ k_{n1} & k_{n2} & \cdot & \cdot & k_{nn} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} d_1 \\ d_2 \\ d_3 \\ \cdot \\ d_n \end{Bmatrix} \quad (2.1)$$

$$\{f\} = [k]\{d\}$$

- ซึ่ง $\{f\}$ คือ เมทริกซ์แรงกระทำที่จุดต่อ
 $[k]$ คือ สทiffness ของเอลิเมนต์
 $\{d\}$ คือ การกระจัดที่จุดต่อซึ่งยังไม่ทราบค่า
 n คือ จำนวนของระดับความเสรีของเอลิเมนต์

2.3.5 หาสมการรวมของระบบและการกำหนดเงื่อนไขขอบ

สมการรวมของระบบโครงสร้างสามารถจะหาได้จาก การรวมสมการแต่ละเอลิเมนต์ ในชั้นที่ 4 เข้าด้วยกัน ด้วยวิธีซ้อนทับ (Superposition Method) หรือเรียกว่า วิธีสทiffness โดยตรง (Direct stiffness method) โดยอาศัยหลักการของการสมมูลของแรงที่จุดต่อของเอลิเมนต์ และการต่อเนื่อง (Continuity) ของโครงสร้าง สมการรวมของระบบโครงสร้างเขียนในรูปเมทริกซ์ได้คือ

$$\{f\} = [k]\{d\} \quad (2.2)$$

- $\{f\}$ คือ เมทริกซ์รวมของจุดต่อ
 $[k]$ คือ stiffness matrix รวมของระบบ
 $\{d\}$ คือ เมทริกซ์รวมของการกระจัดของระบบ

เนื่องจากเมทริกซ์ $[k]$ เป็นเมทริกซ์เอกฐาน (Singular matrix) จึงไม่สามารถหาค่า $\{d\}$ ได้โดยตรง จึงจำเป็นต้องอาศัยเงื่อนไขขอบ (Boundary) เพื่อช่วยให้เมทริกซ์ $[k]$ ไม่เป็นเมทริกซ์เอกฐาน และสามารถหาค่าการกระจัดที่แต่ละจุดต่อที่ต้องการได้

2.3.6 หาการกระจัดของระบบ

หลังจากกำหนดเงื่อนไขขอบหรือเงื่อนไขบังคับแล้ว เราสามารถจะหาการกระจัด d_1, d_2, \dots, d_n ได้โดยการแก้สมการพีชคณิตพร้อมๆกัน คือ

$$\begin{Bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \\ \vdots \\ F_n \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} & - & - & K_{1n} \\ K_{21} & K_{22} & - & - & K_{2n} \\ K_{31} & K_{32} & \cdot & \cdot & K_{3n} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ K_{n1} & K_{n2} & \cdot & \cdot & K_{nn} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} d_1 \\ d_2 \\ d_3 \\ \vdots \\ d_n \end{Bmatrix} \quad (2.3)$$

การหาการกระจัด $\{d\}$ อาจจะใช้วิธีเกาส์ (Gauss's elimination method) หรือวิธีสมมุติ (Iteration method) การกระจัด $\{d\}$ อาจหาได้โดยการคูณสมการข้างต้นด้วย $[K]^{-1}$ ตลอด

2.3.7 การหาค่าความเครียดและความเค้น

ถ้าทราบค่าการกระจัด u ก็สามารถหาความเครียดจาก $\epsilon_x = du/dx$ และค่าความเค้นจาก $\sigma_x = E\epsilon_x$

2.3.8 การตีความผลลัพธ์

จากผลลัพธ์ที่คำนวณได้ในขั้นตอนที่ 6 และ 7 ก็สามารถทราบได้ว่าที่จุดต่อใดของเอลิเมนต์หรือบริเวณใดของโครงสร้างหรือชิ้นส่วนที่จะต้องให้ความสนใจเป็นพิเศษ เช่น บริเวณที่มีการกระจัดสูง หรือบริเวณใดที่มีความเค้นสูง และเราสามารถจะลดขนาดของการกระจัด และ/หรือความเค้นนั้นได้อย่างไร ทั้งนี้จะต้องเปลี่ยนแปลงรูปร่างหรือมิติของโครงสร้างชิ้นส่วนให้เหมาะสมยิ่งขึ้นหรืออาจจะต้องเลือกใช้วัสดุชนิดอื่นที่เหมาะสมกว่า

2.4 มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก. 1252-2537

มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมนี้ครอบคลุมเฉพาะ เครื่องอัดอากาศขนาดเล็กแบบลูกสูบที่อัดด้านเดียว (Sing-acting) ระบายความร้อนด้วยอากาศ ประเภทมีน้ำมันหล่อลื่น และประเภทไม่มีน้ำมันหล่อลื่นชนิดอัดอากาศชั้นตอนเดียว (Single-stage) ที่มีความดันสูงสุด 200-1000 กิโลปาสคาล และชนิดอัดอากาศสองชั้นตอน (Two-stage) ที่มีความดันสูงสุด 700-1400 กิโลปาสคาลซึ่งมีต้นกำลังเป็นมอเตอร์เหนี่ยวนำที่มีกำลังด้านนอกที่กำหนดไม่เกิน 11 กิโลวัตต์ หรือเครื่องยนต์สันดาปภายในที่มีกำลังที่กำหนดต่อเนื่องไม่เกิน 11 กิโลวัตต์ อุณหภูมิโดยรอบการทำงานอยู่ในช่วง -15 ถึง 40 องศาเซลเซียสที่ความดันบรรยากาศ

2.3.1 ถังเก็บอากาศตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก. 1252-2537

ความดันใช้งานสูงสุดของถังเก็บอากาศต้องมากกว่าความดันสูงสุดของเครื่องอัดอากาศส่วนหัว และส่วนท้ายของถังเก็บอากาศควรเป็นไปตาม JIS B 8247 วัสดุที่ใช้ทำถังเก็บอากาศต้องเป็น SS41

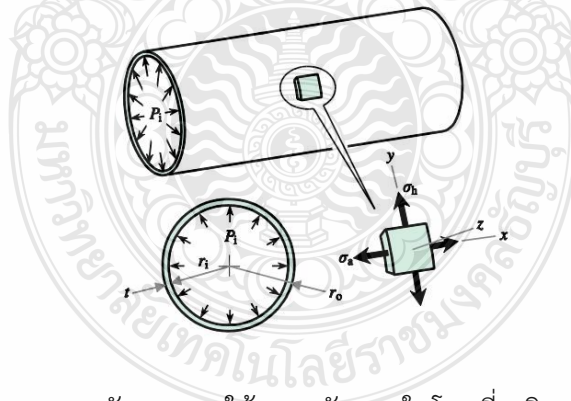
ตาม JIS G 3101 หรือ SGP ใช้กับ ความดันไม่เกิน 980 กิโลปาสคาล ตาม JIS G 3452 ถึงเก็บอากาศเมื่อติดตั้งตัวเครื่องอัดอากาศและอุปกรณ์อื่น แล้วต้องรับน้ำหนักของอุปกรณ์ต่างๆ ได้โดยไม่เกิดการเสียรูปในระหว่างการใช้งานการรักษาและการขนส่งการทดสอบทำโดยพินิจ

2.5 ภาวะทรงกระบอกผนังบาง

ใน ‘ทฤษฎีผนังบาง’ ค่าความเค้นที่เกิดขึ้นในภาชนะภายใต้ความดันทรงกระบอกผนังบางจะเป็นไป ตามลักษณะของปัญหาความเค้นระนาบ สามารถคำนวณหาได้โดยอาศัยความสัมพันธ์

$$\begin{aligned}\sigma_h &= \frac{P_i d_i}{2t} \\ \sigma_a &= \frac{P_i d_i}{4t}\end{aligned}\quad (2.4)$$

โดยที่ P_i , σ_h และ σ_a คือ ความดันภายในภาชนะ (internal pressure) ความเค้นในแนวเส้นรอบวง (hoop stress) และความเค้นในแนวแกน (axial or longitudinal stress) ตามลำดับ จากสมการเราจะพบว่า สำหรับการพิสูจน์ทราบที่มาของสมการ (2.4) นั้นผู้เรียนสามารถค้นคว้าได้ในหนังสือ กลศาสตร์ของวัสดุ



รูปที่ 2.7 ภาวะทรงกระบอกผนังบางภายใต้ความดันภายในโดยที่เอลิเมนต์ความเค้นมีองค์ประกอบความเค้น เฉพาะในแนวแกน x และ y เท่านั้น ปัญหานี้จึงถูกกำหนดให้เป็นปัญหาระนาบ [5]

2.6 ภาวะทรงกระบอกผนังหนา

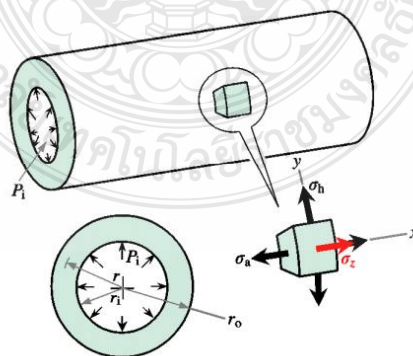
แม้ว่าสมการ (2.4) จะใช้ออกแบบภาวะทรงกระบอกผนังบางภายใต้ความดันได้ในเบื้องต้นก็ตาม แต่ก็อาจมีความคลาดเคลื่อนสูง แนวคิดการวิเคราะห์ปัญหาจึงพิจารณาตามความหนาของผนังซึ่ง

ไม่สามารถกำหนดให้เป็นปัญหาระนาบ คือ มีค่าความเค้นในแนวแกน z และแปรเปลี่ยนค่าตามความหนาของผนังภาชนะ (รูปที่ 2.8) ซึ่งเรียกว่า ‘ทฤษฎีผนังหนา’ ความเค้นทั้งสามองค์ประกอบหาค่าได้จากสูตรดังนี้

$$\begin{aligned}\sigma_h &= \frac{P_i r_i^2}{r_o^2 - r_i^2} \left(1 + \frac{r_o^2}{r^2} \right) \\ \sigma_z &= \frac{P_i r_i^2}{r_o^2 - r_i^2} \left(1 - \frac{r_o^2}{r^2} \right) \\ \sigma_a &= \frac{P_i r_i^2}{r_o^2 - r_i^2}\end{aligned}\quad (2.5)$$

การได้มาซึ่งสมการ (2.5) นั้นต้องอาศัยทฤษฎีสภาพยืดหยุ่น (theory of elasticity) ที่มีความซับซ้อนพอควรและยังต้องใช้ข้อเท็จจริงทางด้านคณิตศาสตร์ชั้นสูง อย่างไรก็ตามผู้เรียนสามารถค้นคว้าหาอ่านได้เพิ่มเติม สมการ (2.5) ในรูปแบบดั้งเดิมนั้นจะประกอบด้วยพจน์ต่าง ๆ ที่คำนึงถึงผลของความดันภายใน และความดันภายนอก (P_o) ซึ่งตัวอย่างของกรณีนี้ที่เห็นได้อย่างชัดเจนคือ การวางท่อผนังหนาใต้ดินหรือใต้น้ำ สำหรับกรณีที่ไม่มีความดันภายนอกกระทำต่อภาชนะทรงกระบอก พจน์หนึ่งในสมการ (2.5) ที่แสดงถึงผลที่เกิดจากความดันภายนอกก็จะหายไปตามหลักคณิตศาสตร์

นอกจากนี้พึงสังเกตว่าความเค้น σ_z ในสมการ (2.5) จะมีค่าเท่ากับศูนย์ (0) ที่ผิวด้านนอกของภาชนะทรงกระบอก ขณะที่ความเค้น σ_h จะมีค่าไม่เท่ากับศูนย์ (0) และความเค้น σ_a จะมีค่าเท่ากันตลอดความยาวของภาชนะทรงกระบอกนั้น



รูปที่ 2.8 ภาชนะทรงกระบอกผนังหนาภายใต้ความดันภายในโดยที่เอลิเมนต์ความเค้นมีองค์ประกอบความเค้นทั้ง สามแนวแกน x-y-z [5]

บทที่ 3 วิธีการดำเนินการวิจัย

3.1 แผนการดำเนินงานวิจัย

ตารางที่ 3.1 แผนการดำเนินงานวิจัย

ขั้นตอนการดำเนินงาน	พ.ศ. 2561					พ.ศ. 2562										พ.ศ. 2563									
	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.	มิ.ย.		
ศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	—																								
สร้างแบบจำลองทั้งถึงแบบเดิมและถึงที่ทำการปรับปรุงความแข็งแรง	—	—																							
ทดสอบด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์	—	—																							
สร้างถึงจริงตามแบบจำลอง			—	—																					
ออกแบบชุดทดสอบทางกายภาพ				—	—																				
ทดสอบทางกายภาพทั้งแบบManual และแบบเซ็นเซอร์วัดความเครียด					—	—																			
บันทึกผล และเปรียบเทียบระหว่างการทดสอบด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ และวิธีกายภาพ										—	—														
วิเคราะห์และแก้ไขปัญหา														—	—										
จัดทำบทความทางวิชาการเพื่อตีพิมพ์วารสาร																		—	—						
สรุป สอบและจัดทำรูปเล่ม																		—	—						

แผนการดำเนินการทำวิจัย —————

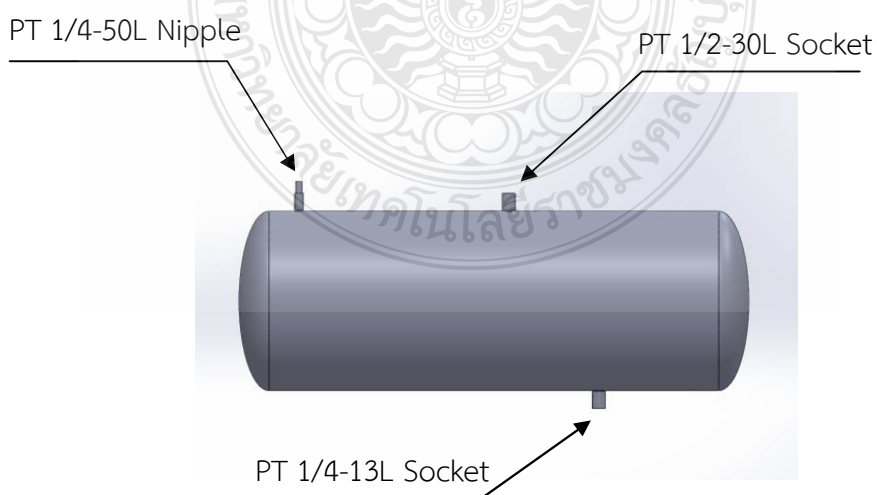
การดำเนินการทำวิจัย

3.2 ขั้นตอนการดำเนินงาน

- 3.2.1 ศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
- 3.2.2 สร้างแบบจำลองของถังเก็บอากาศทั้งถังแบบเดิมและถังที่ทำการปรับปรุงความแข็งแรง
- 3.2.3 ทดสอบด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์
- 3.2.4 สร้างถังจริงตามแบบจำลอง
- 3.2.5 ออกแบบชุดทดสอบทางกายภาพ
- 3.2.6 ทดสอบทางกายภาพทั้งแบบ Manual และแบบเซ็นเซอร์วัดความเครียด
- 3.2.7 บันทึกผล และเปรียบเทียบระหว่างการทดสอบด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ และวิธีกายภาพ
- 3.2.8 วิเคราะห์และแก้ไขปัญหา
- 3.2.9 จัดทำบทความทางวิชาการ เพื่อตีพิมพ์วารสาร
- 3.2.10 สรุป สอบและจัดทำรูปเล่ม

3.3 สร้างแบบจำลองของถังเก็บอากาศขนาด 64 ลิตร และทดสอบด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

วิธีการเริ่มจากการสร้างแบบจำลองของถังเก็บอากาศด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป ที่จะใช้ในการเก็บข้อมูลอัตราการขยายตัวของถังเก็บอากาศ เพื่อเปรียบเทียบกับ การทดสอบทางกายภาพ จะต้องสร้างแบบจำลองสามมิติด้วยอัตราส่วน 1:1 ขนาดของถังที่ใช้ในการทดสอบเป็นขนาด 64 ลิตร มีเส้นรอบวงเท่ากับ 950 มิลลิเมตร และถังแบบเดิมความหนาผนังเท่ากับ 1.5 มิลลิเมตร และถังที่ปรับปรุงความแข็งแรงความหนาผนังเท่ากับ 2.6 มิลลิเมตร



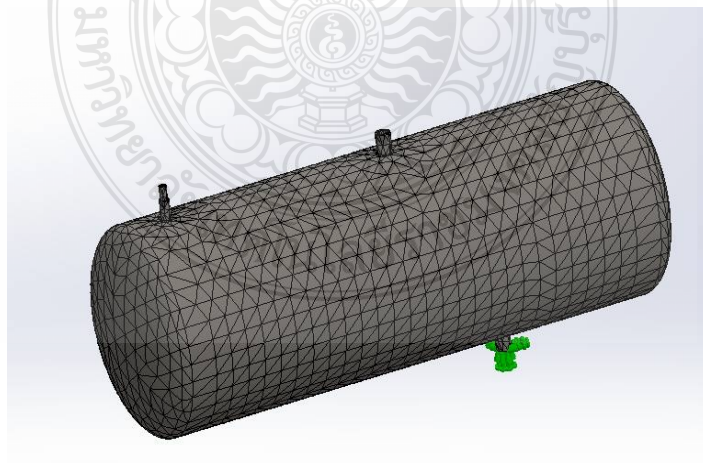
รูปที่ 3.1 แบบจำลองของถังอัดอากาศขนาด 64 ลิตร

ในขั้นตอนที่สอง จะทำการนำแบบจำลองที่สร้างขึ้นมากำหนดคุณสมบัติทางกลของวัสดุ โดยวัสดุที่ใช้ในงานวิจัยนี้คือเหล็ก SS400 ดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 ตารางคุณสมบัติทางกลของวัสดุ [6]

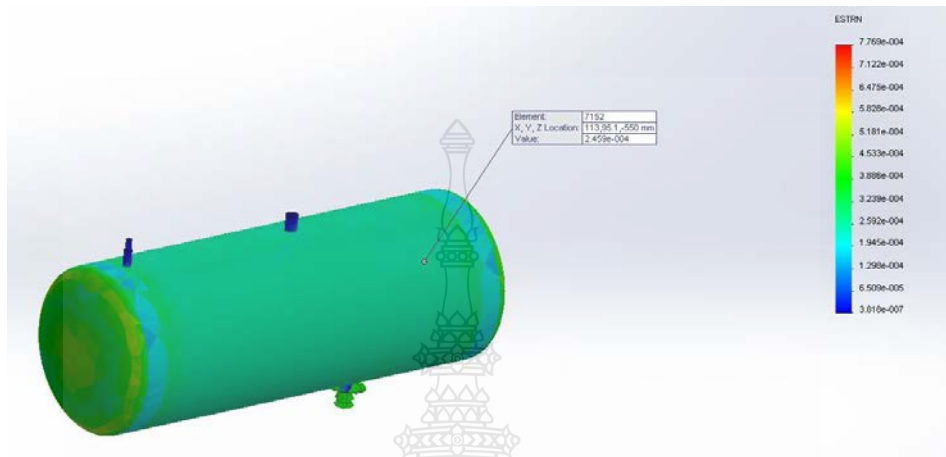
ชั้น คุณภาพ	R_{eH} หรือ $R_{p0.2}$ ต่ำสุด MPa				R_m MPa	ความหนาของเหล็กแผ่น mm	ชั้น ทดสอบ แรงดึง	A ต่ำสุด %	
	ความหนาของเหล็กแผ่น mm								
	ไม่เกิน 16	มากกว่า 16 ถึง 40	มากกว่า 40 ถึง 100	มากกว่า 100					
SS330	205	195	175	165	330 ถึง 430	เหล็กแผ่นม้วน	ไม่เกิน 5	No. 5	26
						เหล็กแผ่นหนา/ แผ่นบาง	มากกว่า 5 ถึง 16	No. 1A	21
							มากกว่า 16 ถึง 50	No. 1A	26
						เหล็กแผ่นหนา	มากกว่า 40	No. 4	28*
SS400	245	235	215	205	400 ถึง 510	เหล็กแผ่นม้วน	ไม่เกิน 5	No. 5	21
						เหล็กแผ่นหนา/ แผ่นบาง	มากกว่า 5 ถึง 16	No. 1A	17
							มากกว่า 16 ถึง 50	No. 1A	21
						เหล็กแผ่นหนา	มากกว่า 40	No. 4	23*
SS490	285	275	255	245	490 ถึง 610	เหล็กแผ่นม้วน	ไม่เกิน 5	No. 5	19
						เหล็กแผ่นหนา/ แผ่นบาง	มากกว่า 5 ถึง 16	No. 1A	15
							มากกว่า 16 ถึง 50	No. 1A	19
						เหล็กแผ่นหนา	มากกว่า 40	No. 4	21*
SS540	400	390	-	-	ต่ำสุด 540	เหล็กแผ่นม้วน	ไม่เกิน 5	No. 5	16
						เหล็กแผ่นหนา/ แผ่นบาง	มากกว่า 5 ถึง 16	No. 1A	13
							มากกว่า 16 ถึง 40	No. 1A	17

ในขั้นตอนที่สาม ทำการแบ่งแบบจำลองของถังเก็บอากาศออกเป็นเอลิเมนต์เล็กๆ ดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 การแบ่งแบบจำลองเป็นเอลิเมนต์เล็กๆ

ในขั้นตอนที่สี่ กำหนดเงื่อนไขในการทดสอบ ความดันที่ใช้ในการทดสอบให้เป็นไปตามมาตรฐาน มอก. 1252-2537 แรงดันที่ใช้ในการทดสอบคือ 13 บาร์ โดยผลลัพธ์ที่ได้จะแสดงในลักษณะเฉดสีเพื่อ บอกว่าอัตราการขยายตัวของถังเก็บอากาศ เกิดขึ้นที่จุดใดมากที่สุด ดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 ผลการทดสอบด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

3.4 การทดสอบทางกายภาพ

เพื่อให้การทดสอบทางกายภาพสามารถทำการทดสอบได้ จึงต้องสร้างถังเก็บอากาศจริงขนาด 64 ลิตร วัสดุที่ใช้คือ SS400 และมีเส้นรอบวงเท่ากับ 950 มิลลิเมตร ตามที่ได้ออกแบบไว้ในแบบจำลอง โดยใช้เครื่องอัดอากาศขนาดเล็กแบบลูกสูบ อัดแรงดันเข้าไปภายในถัง ดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 เครื่องอัดอากาศขนาดเล็กแบบลูกสูบ

โดยจะใช้วิธีวัดอัตราการขยายตัวแบบ Manual และแบบเซ็นเซอร์วัดความเครียด รายละเอียดมีดังนี้

3.4.1 วิธีการวัดอัตราการขยายตัวแบบ Manual ดังรูปที่ 3.5 โดยเริ่มทำการวัดเส้นรอบวงของถังเก็บอากาศในสถานะที่ความดันในถังเป็นความดันบรรยากาศ จากนั้นทำการอัดความดันเข้าไปในถังเท่ากับ 13 บาร์ มาตรฐานแรงดันที่ใช้ในการทดสอบจะเป็นไปตามมาตรฐาน มอก. 1252-2537 ทำให้ถังเกิดการขยายตัว จากนั้นทำการวัดเส้นรอบวงของถังอีกครั้ง เพื่อดูว่าเส้นรอบวงของถังเปลี่ยนแปลงไปจากเดิมเท่าไร สามารถอธิบายได้ในรูปแบบความเครียดดัง ในสมการที่ 3.1

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L} \quad (3.1)$$

โดยที่ ε คือ ค่าความเครียด

ΔL คือ เส้นรอบวงของถังที่เปลี่ยนแปลงไป (มิลลิเมตร)

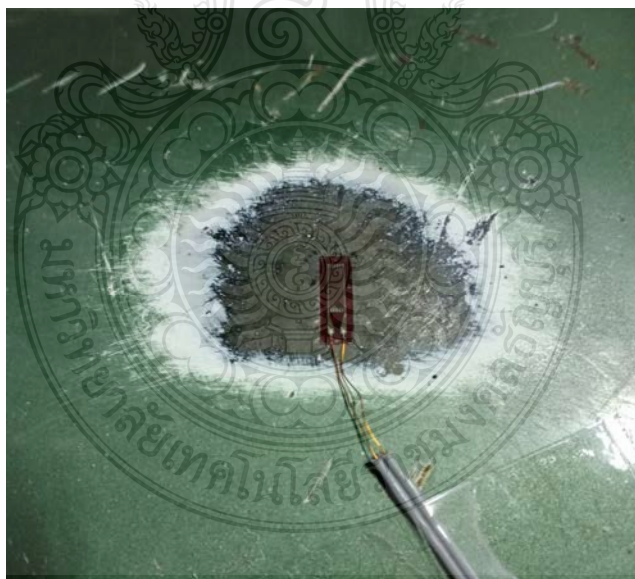
L คือ เส้นรอบวงเดิมของถังก่อนอัดอากาศ (มิลลิเมตร)



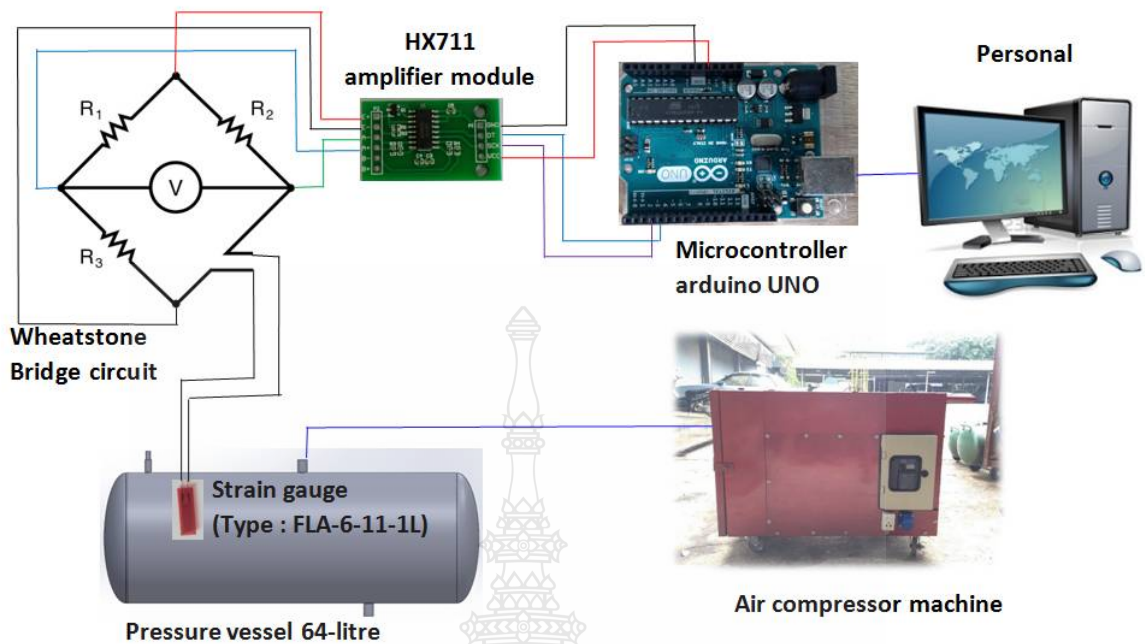
รูปที่ 3.5 วิธีวัดอัตราการขยายตัวแบบ manual

3.4.2 วิธีการวัดค่าความเครียดด้วยเซ็นเซอร์ชนิด FLA-6-11-1L ที่ต่อร่วมกับอุปกรณ์วัดความเครียดแบบไมโครคอนโทรลเลอร์แบบอาดูโนที่ต่อร่วมกับวงจรวีลสโตนบริดจ์ วิธีการอ่านค่าความเครียดด้วยวิธีนี้ จะต้องสร้างชุดอุปกรณ์อ่านค่าความเครียด โดยมีรายละเอียดดังนี้

เริ่มจากกำหนดจุดที่ต้องการติดตั้งเซ็นเซอร์วัดความเครียด ใช้กระดาษทรายสำหรับขัดโลหะเบอร์ 120 ถึง 180 ขัดที่บริเวณที่ต้องการวัดค่าความเครียดของถังเก็บอากาศ และขัดทำความสะอาดอีกครั้ง ติดเซ็นเซอร์วัดความเครียดลงบนถังเก็บอากาศด้วยกาว โดยต้องติดตั้งในสภาวะความดันในถังเป็นความดันบรรยากาศดังรูปที่ 3.6 โดยใช้เซ็นเซอร์วัดความเครียดชนิด FLA-6-11-1L มี Gauge length เท่ากับ 6 มิลลิเมตร และมีค่าความต้านทานเท่ากับ 120 โอห์ม จากนั้นต่อร่วมกับวงจรวีลสโตนบริดจ์ ตัวต้านทานที่ใช้ในวงจรเท่ากับ 120 โอห์ม จากนั้นนำเอาหัววัดที่ได้มาขยายสัญญาณด้วยอุปกรณ์ HX711 Sensor Amplifier Dual Channel Module และต่อร่วมกับไมโครคอนโทรลเลอร์แบบอาดูโน ดังรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.6 การติดตั้งเซ็นเซอร์วัดความเครียดชนิด FLA-6-11-1L ที่ถังเก็บอากาศ



รูปที่ 3.7 การติดตั้งไมโครคอนโทรลเลอร์แบบอาดูโนกับวงจรวีทสโตนบริดจ์

อ่านค่าผ่านไมโครคอนโทรลเลอร์แบบ Arduino UNO จากนั้นให้แสดงค่าที่ Serial Monitor อัตราการขยายตัวที่วัดได้เป็นค่าความเครียด โดยใช้เซ็นเซอร์วัดความเครียดต่อกับวงจรวีทสโตนบริดจ์ ซึ่งค่าความเครียดที่คำนวณได้ จะอยู่ในรูปของแรงดันไฟฟ้า จะต้องทำการเปลี่ยนค่าแรงดันไฟฟ้าที่อ่านเป็นค่าความเครียด โดยคำนวณจากวงจรวีทสโตนบริดจ์ ในสมการที่ 3.2

$$\Delta e = \frac{E}{4} K \varepsilon \quad (3.2)$$

โดยที่ e คือ ค่าแรงดันไฟฟ้าที่วัดได้ (มิลลิโวลต์)

E คือ แรงดันที่จ่ายให้กับวงจรวีทสโตนบริดจ์ (มิลลิโวลต์)

K คือ ค่า Gauge Factor ของเซ็นเซอร์วัดความเครียด

ε คือ ค่าความเครียดของถังเก็บอากาศ

3.4.3 การวัดความเครียดแบบเซ็นเซอร์ชนิด FLA-6-11-1L ที่ต่อร่วมกับอุปกรณ์การวัดความเครียดแบบพกพารุ่น TC-32K มีขั้นตอนการทดลองดังนี้

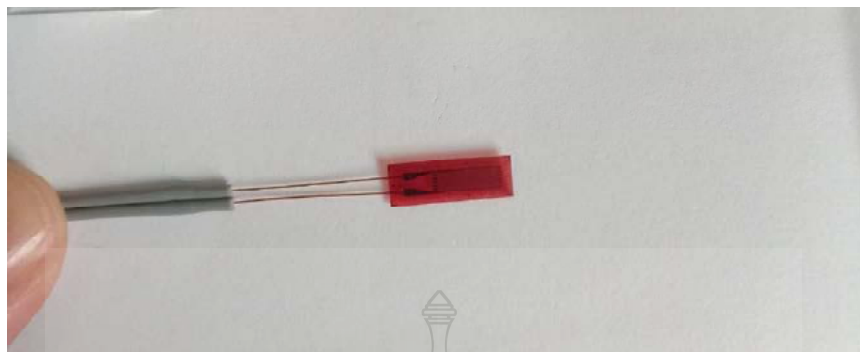
ติดตั้งเซ็นเซอร์วัดความเครียดชนิด FLA-6-11-1L ที่ถึงเก็บอากาศ ในสภาวะที่ความดันภายในถังเป็นความดันบรรยากาศ จากนั้นนำเซ็นเซอร์วัดความเครียดต่อร่วมกับอุปกรณ์วัดความเครียดแบบพกพารุ่น TC-32K ดังรูปที่ 3.8 ทำการอัดแรงดันเข้าไปในถังเก็บอากาศเท่ากับ 13 บาร์ อ่านค่าที่ได้จากอุปกรณ์วัดความเครียดแบบพกพารุ่น TC-32K แล้วนำค่าทั้งหมดที่ทดสอบมาทำการเปรียบเทียบ



รูปที่ 3.8 การติดตั้งเครื่องวัดความเครียดแบบพกพารุ่น TC-32K กับเซ็นเซอร์วัดความเครียดชนิด FLA-6-11-1L

3.5 เซ็นเซอร์วัดความเครียด (Strain gauge)

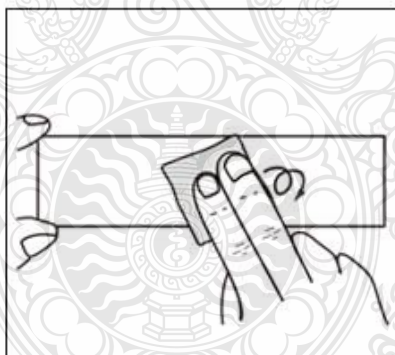
เซ็นเซอร์วัดความเครียด (Strain Gauge) ชนิด FLA-6-11-1L เป็นอุปกรณ์วัดความเครียด โดยอาศัยหลักการเปลี่ยนแปลงความต้านทานไฟฟ้า พฤติกรรมของวัสดุเมื่อวัสดุมีการเปลี่ยนแปลงขนาด เซ็นเซอร์วัดความเครียดประกอบด้วยขดลวดที่ทำจากโลหะผสมที่มีความไวของการเปลี่ยนแปลงความต้านทานไฟฟ้าต่อความเครียดสูง ขดลวดโลหะนี้จะยึดติดบนแผ่นฟิล์มโพลีเอสเตอร์ ระยะของเกจเท่ากับ 6 มิลลิเมตร , Gauge Factor เท่ากับ 2.10 ± 1 เปอร์เซ็นต์ ดังรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 เซ็นเซอร์วัดความเครียดชนิด FLA-6-11-1L

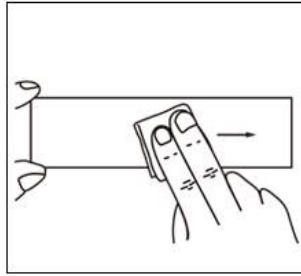
3.6 การติดตั้งเซ็นเซอร์วัดความเครียด

3.6.1 ใช้กระดาษทราย (เบอร์#200 ถึง #300) ขัดผิวที่ต้องการติดตั้งเซ็นเซอร์วัดความเครียด โดยขัดให้เป็นพื้นที่กว้างกว่าขนาดของตัวของเซ็นเซอร์วัดความเครียด ในบางกรณีให้ใช้หินเจียรทำการกำจัดสี, สนิม หรือสารชุบผิวออกก่อนการขัดผิวด้วยกระดาษทราย ดังรูปที่ 3.10



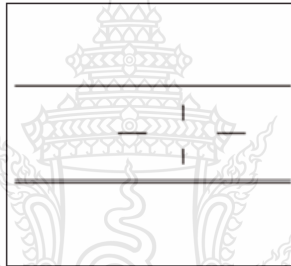
รูปที่ 3.10 การกำจัดสิ่งสกปรกและสีที่เคลือบอยู่บนผิวที่ต้องการวัด [7]

3.6.2 ใช้กระดาษชำระในงานอุตสาหกรรม (SILBON paper) ชูบอะซีโตนในการทำความสะอาดผิววัดถูบริเวณที่ต้องการติดตั้งเซ็นเซอร์วัดความเครียด โดยลงน้ำหนักมือในการเช็ดทำความสะอาดไปทิศทางเดียวเพื่อให้สิ่งสกปรกที่หลุดออกจากพื้นผิวไม่ย้อนกลับไปเกาะพื้นผิวอีก ดังรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.11 การกำจัดคราบไขมัน และทำความสะอาดผิว [7]

3.6.3 ใช้ดินสอหรือเหล็กขีดในการทำเครื่องหมายพื้นที่ที่ต้องการติดตั้งตามทิศทางของความเครียดที่ต้องการวัด กรณีที่ใช้เหล็กขีดต้องระวังอย่าทำรอยขีดลึกจนเกินไป ดังรูปที่ 3.12



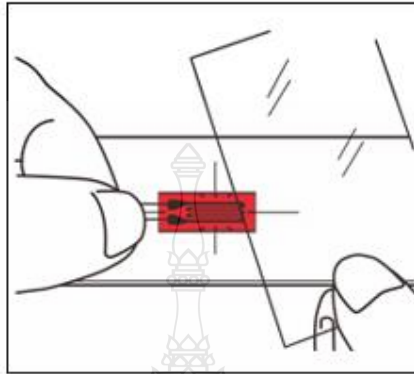
รูปที่ 3.12 การทำเครื่องหมายที่ต้องการติดตั้ง [7]

3.6.4 พิจารณาแยกผิวด้านหน้าและด้านหลังของเซ็นเซอร์วัดความเครียดเพื่อให้แน่ใจก่อน จากนั้นหยอดกาวลงไปบนผิวด้านหลังของเซ็นเซอร์วัดความเครียด อย่าทำการเกลี่ยกาวเพราะจะทำให้การระเหยของกาวระหว่างการเซ็ตตัวเกิดขึ้นเร็วกว่าปกติ ส่งผลให้ความแข็งแรงในการยึดเกาะลดลง ดังรูปที่ 3.13



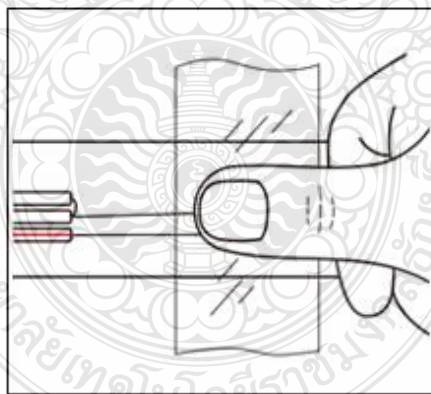
รูปที่ 3.13 การหยอดกาว [7]

3.6.5 หลังจากหยอดกาวแล้วให้วางเซ็นเซอร์วัดความเครียดลงบนพื้นผิวบริเวณที่ต้องการติดตั้ง ในขณะเดียวกันให้ทำการปรับตำแหน่งโดยเล็งจากสัญลักษณ์ที่ทำไว้ก่อนหน้า ดังรูปที่ 3.14



รูปที่ 3.14 การติดตั้งเซ็นเซอร์วัดความเครียดบริเวณที่ต้องการวัดค่า [7]

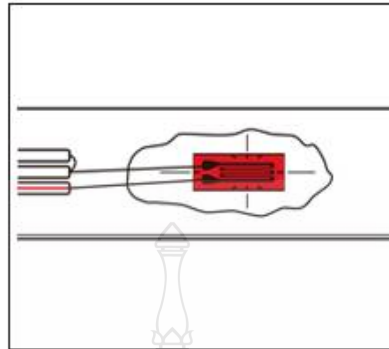
3.6.6 ปิดทับตัวเซ็นเซอร์วัดความเครียดด้วยแผ่นโพลีเอทเธนที่มาพร้อมกับตัวเซ็นเซอร์วัดความเครียด แล้วกดไปที่ตัวเซ็นเซอร์วัดความเครียดผ่านแผ่นโพลีเอทเธนด้วยนิ้วโป้ง ดังรูปที่ 3.15



รูปที่ 3.15 การกดที่ตัวเซ็นเซอร์วัดความเครียดผ่านแผ่นโพลีเอทเธน [7]

3.6.7 ภายหลังจากกดตัวเซ็นเซอร์วัดความเครียดด้วยนิ้วโป้งเป็นเวลานานหนึ่งนาทีแล้ว ให้นำแผ่นโพลีเอทเธนออก และตรวจสอบดูว่าเซ็นเซอร์วัดความเครียดถูกติดตั้งเรียบร้อยแล้ว เมื่อทำครบขั้นตอน

ทั้งหมดที่กล่าวมาแล้วกระบวนการติดตั้งเสร็จสิ้น อย่างไรก็ตามเซ็นเซอร์วัดความเครียดจะพร้อมสำหรับการวัดค่าที่ให้ผลดีภายหลังการติดตั้งแล้วเสร็จเป็นเวลา 60 นาทีขึ้นไป ดังรูปที่ 3.16



รูปที่ 3.16 การติดตั้งเซ็นเซอร์วัดความเครียดเสร็จสมบูรณ์ [7]

3.7 ไมโครคอนโทรลเลอร์แบบอาดูโน้

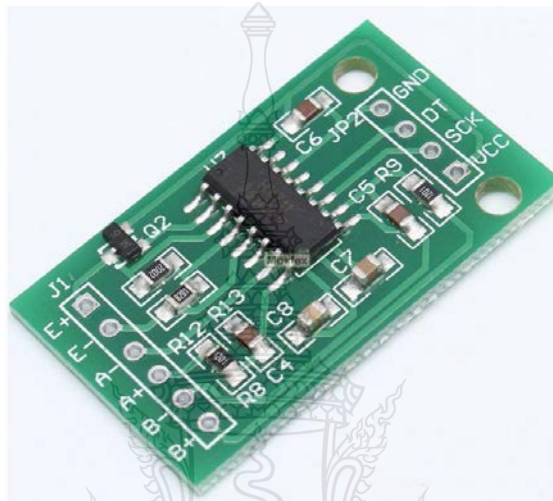
ไมโครคอนโทรลเลอร์แบบอาดูโน้ เป็นบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล AVR ที่มีการพัฒนาแบบ Open Source มีการเปิดเผยข้อมูลทั้งด้าน Hardware และ Software ตัว บอร์ด Arduino ถูกออกแบบมาให้ใช้งานได้ง่าย ดังนั้นจึงเหมาะสำหรับผู้เริ่มต้นศึกษา ทั้งนี้ผู้ใช้งานยังสามารถดัดแปลงเพิ่มเติม พัฒนาต่อยอดทั้งตัวบอร์ด หรือโปรแกรม ความง่ายของบอร์ด Arduino ในการต่ออุปกรณ์เสริมต่างๆ คือผู้ใช้งานสามารถต่อวงจรอิเล็กทรอนิกส์จากภายนอกแล้วเชื่อมต่อเข้ามาที่ขา I/O ของบอร์ด หรือเพื่อความสะดวกสามารถเลือกต่อกับบอร์ดเสริม (Arduino Shield) ประเภทต่างๆ เช่น Arduino XBee Shield, Arduino Music Shield, Arduino Relay Shield, Arduino Wireless Shield, Arduino GPRS Shield เป็นต้น มาเปรียบกับบอร์ดบนบอร์ด Arduino แล้วเขียนโปรแกรมพัฒนาต่อได้ ดังรูปที่ 3.17



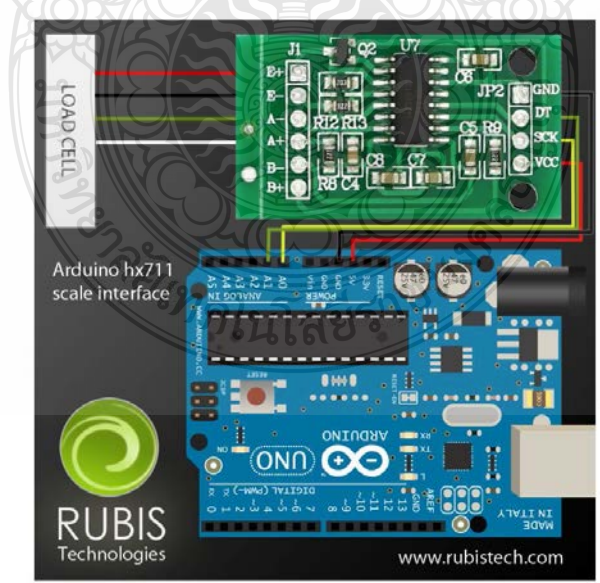
รูปที่ 3.17 ไมโครคอนโทรลเลอร์แบบอาดูโน้

3.8 โมดูล HX711 weight sensor amplifier dual channel module

โมดูล HX711 เป็นโมดูลสำหรับขยายสัญญาณจาก Load cell เซ็นเซอร์น้ำหนัก ซึ่งปกติมีค่าน้อยมากๆ ตัวโมดูลนี้จะขยายสัญญาณ ออกเป็นสัญญาณดิจิทัล 24bit I2C ทำให้สามารถนำ Arduino NodeMCU Raspberry Pi หรือ MCU อื่นๆมาอ่านค่าได้ง่ายๆ สายเชื่อมต่อเข้า MCU มี 2 เส้น สามารถใช้ไฟเลี้ยงได้ตั้งแต่ 2.6-5.5v และอีกด้านของโมดูลสามารถต่อกับ Load cell ได้ ดังรูปที่ 3.19



รูปที่ 3.18 โมดูล HX711 weight sensor amplifier dual channel module [14]

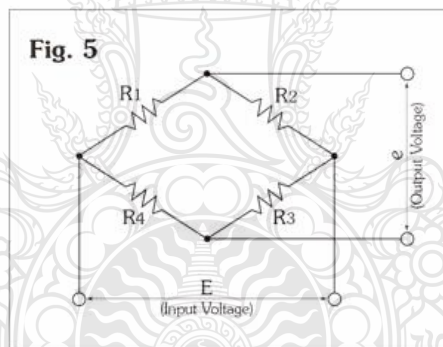


รูปที่ 3.19 การต่อ HX711 weight sensor amplifier dual channel module กับ Load cell [14]

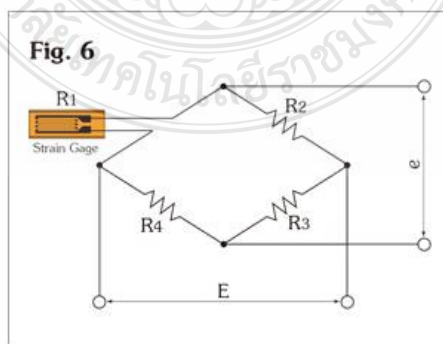
3.9 วิสโตนบริดจ์

วิสโตนบริดจ์เป็นวงจรไฟฟ้าเหมาะสมสำหรับการตรวจวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไปของสเตรนเกจ โดยบริดจ์ประกอบด้วยความต้านทานจำนวน 4 ตัวดังแสดงในรูปที่ 3.20 กรณีที่ : $R1 = R2 = R3 = R4$ หรือ $R1 \times R2 = R3 \times R4$ เมื่อทำการป้อนความต่างศักย์ให้ด้านอินพุตแล้ว ความต่างศักย์ด้านเอาต์พุต e จะมีค่าเป็นศูนย์ สถานะนี้เรียกว่าวงจรบริดจ์สมดุล เมื่อวงจรบริดจ์เสียสมดุลจากการสูญเสียสภาพตามเงื่อนไขข้างต้นแล้ว ความต่างศักย์ด้านเอาต์พุตที่วงจรจ่ายออกมาจะสัมพันธ์กับค่าความต้านทานทางไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไปของสเตรนเกจ

ดังนั้นที่แสดงในรูปที่ 3.21 สเตรนเกจถูกนำมาต่อเข้ากับวงจรแทนที่ $R1$ เมื่อสเตรนเกจได้รับความเครียดแล้วค่าความต้านทานทางไฟฟ้าจะเปลี่ยนแปลงไป ΔR ความต่างศักย์ด้านเอาต์พุต e จะมีค่าตามนี้ $e = (1/4) \times (\Delta R / R \times E)$, และ $(\Delta R / R) = K_s \times \varepsilon$ ดังนั้น $e = (1/4) \times K_s \times \varepsilon \times E$ เนื่องจากเราทราบค่าตัวแปรทุกตัวยกเว้น ε ดังนั้น ความเครียดสามารถทราบค่าได้โดยการวัดความต่างศักย์ด้านเอาต์พุตของวงจรบริดจ์



รูปที่ 3.20 วงจรวิสโตนบริดจ์ [8]



รูปที่ 3.21 สเตรนเกจถูกนำมาต่อเข้ากับวงจรแทนที่ $R1$ [8]

3.10 เครื่องวัดความเครียดแบบพกพารุ่น TC-32K

1. มีหน้าจอแสดงผล สามารถแสดงผลแบบตัวเลขได้
2. มีแบตเตอรี่ในตัว และสามารถบันทึกข้อมูลลงใน CF Card ได้ เหมาะกับงานทดสอบภาคสนาม
3. สามารถรับสัญญาณอินพุท จากสเตรนเกจ สเตรนเกจทรานสดิวเซอร์ ได้สูงสุด 5 ช่องสัญญาณ
4. รองรับสัญญาณจากเซนเซอร์ที่มีสัญญาณเอาพุทเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงได้
5. รองรับสัญญาณจากเทอร์โมคัปเปิ้ล Pt RTD เพื่อวัดอุณหภูมิได้
6. มีความละเอียดในการวัดอยู่ที่ 1 ไมโครสเตรน
7. สามารถต่อกับคอมพิวเตอร์ผ่านทางพอร์ต USB และ RS-232



รูปที่ 3.22 เครื่องวัดความเครียดแบบพกพารุ่น TC-32K

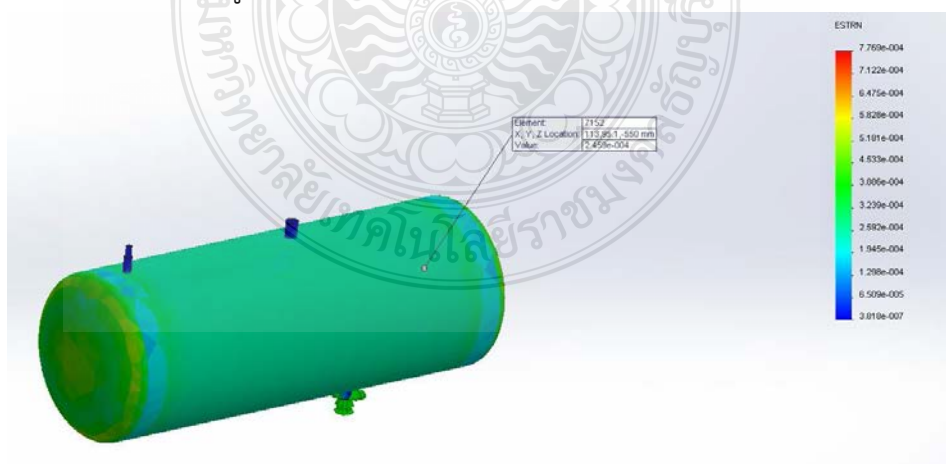
บทที่ 4

ผลการทดลอง

ในบทนี้จะกล่าวถึงผลการทดสอบที่แบ่งออกเป็น 4 ส่วน คือ 1) การทดสอบถังเก็บอากาศด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ 2) การทดสอบถังเก็บอากาศทางกายภาพแบบ Manual 3) การทดสอบถังเก็บอากาศทางกายภาพแบบเซ็นเซอร์วัดความเครียดชนิด FLA-6-11-1L ที่ต่อร่วมกับอุปกรณ์อ่านค่าไมโครคอนโทรลเลอร์แบบอาดูโนที่ต่อร่วมกับวงจรวีทีเอสโตนบริดจ์ และ 4) การทดสอบถังเก็บอากาศทางกายภาพแบบเครื่องวัดความเครียดแบบพกพารุ่น TC-32K

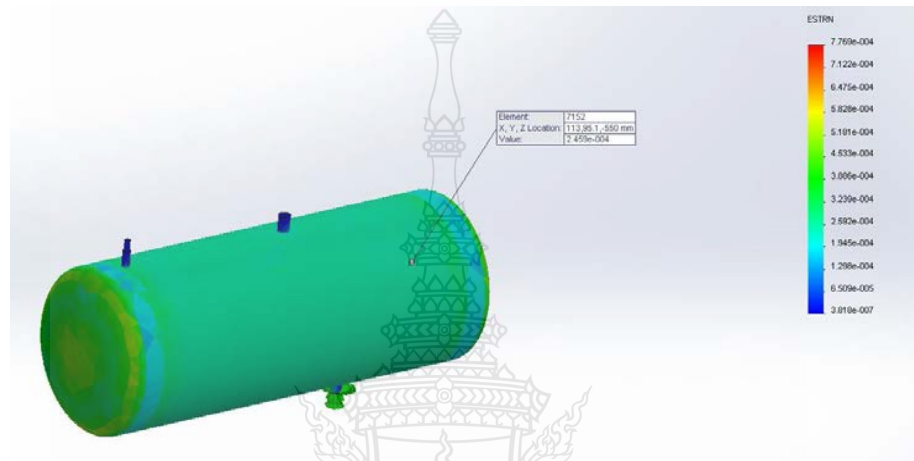
4.1 การทดสอบถังเก็บอากาศด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

เริ่มจากสร้างแบบจำลองด้วยอัตราส่วนเท่ากับ 1:1 และมีเส้นรอบวงของถังเท่ากับ 950 มิลลิเมตร มีความหนาของถังเท่ากับ 1.5 มิลลิเมตร จากนั้นทำการกำหนดคุณสมบัติของวัสดุ วัสดุที่ใช้คือ SS400 มีค่า Yield Strength เท่ากับ 245 Mpa, ค่า Tensile Strength เท่ากับ 400 Mpa จากนั้นทำการแบ่ง Mesh สำหรับทำการวิเคราะห์ ความดันที่ใช้ในการวิเคราะห์คือ 13 บาร์ โดยการกำหนดค่าความดันมาจากมาตรฐาน มอก. 1252-1237 จากนั้นวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยผลลัพธ์ที่ได้จะแสดงในลักษณะของเฉดสีเพื่อบอกว่าตำแหน่งไหนมีค่ามากหรือน้อย ค่าความเครียดหลังจากทำการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์มีค่าเท่ากับ 0.0004923 โดยเส้นรอบวงของถังเพิ่มขึ้นจาก 950 มิลลิเมตรเป็น 950.467 มิลลิเมตร หรือมีอัตราการขยายตัวเท่ากับ 0.049% และอัตราการขยายตัวของถังเก็บความดันที่ยอมรับได้อยู่ที่คือ 47.5 มิลลิเมตร



รูปที่ 4.1 ผลการทดสอบด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ของถังแบบเดิม

เพื่อให้ถังมีความแข็งแรงเพิ่มมากขึ้น จึงทำการจำลองขนาดความหนาของผนังถังเก็บอากาศเพิ่มขึ้นจาก 1.5 มิลลิเมตร เป็น 2.6 มิลลิเมตร ค่าความเครียดหลังจากทำการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์มีค่าเท่ากับ 0.0002459 โดยเส้นรอบวงของถังเพิ่มขึ้นจาก 950 มิลลิเมตรเป็น 950.234 มิลลิเมตร หรือมีอัตราการขยายตัวเท่ากับ 0.025% และอัตราการขยายตัวของถังเก็บความดันที่ยอมรับได้คือ 47.5 มิลลิเมตร



รูปที่ 4.2 ผลการทดสอบด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ของถังที่ทำการปรับปรุงความแข็งแรง

การออกแบบถังแบบเดิม และถังที่ทำการปรับปรุงความแข็งแรง ถังทั้งสองแบบมีเส้นรอบวงของถังเท่ากับ 950 มิลลิเมตร มีความแตกต่างตรงที่ขนาดความหนาของถัง โดยถังแบบเดิมมีขนาดของผนังถังเท่ากับ 1.5 มิลลิเมตร น้ำหนักของถังเท่ากับ 1324.14 กรัม ถังที่ทำการปรับปรุงความแข็งแรงมีขนาดของผนังถังเท่ากับ 2.6 มิลลิเมตร น้ำหนักของถังเท่ากับ 2272.11 กรัม หรือมีน้ำหนักเพิ่มขึ้นจากเดิมเท่ากับ 71.59%

4.2 การทดสอบทางกายภาพแบบแมนนวล

เริ่มจากวัดเส้นรอบวงของถังเก็บอากาศในสภาวะที่ความดันภายในถังเป็นความดันบรรยากาศได้เท่ากับ 950 มิลลิเมตร อัตราแรงดันเข้าไปในถังเท่ากับ 13 บาร์ จากนั้นทำการวัดเส้นรอบวงอีกครั้ง ถังแบบเดิมมีอัตราการขยายตัวเท่ากับ 0.105% และถังที่ปรับปรุงความแข็งแรงมีอัตราการขยายตัวเท่ากับ 0.065%

4.3 การทดสอบทางกายภาพด้วยเซ็นเซอร์วัดความเครียดชนิด FLA-6-11-1L ที่ต่อร่วมกับอุปกรณ์อ่านค่าความเครียดแบบไมโครคอนโทรลเลอร์แบบอาณูโน้ที่ต่อร่วมกับวงจรวีลสโตนบริดจ์

เริ่มจากตั้งตั้งเซ็นเซอร์วัดความเครียดชนิด FLA-6-11-1L ที่ถึงเก็บอากาศ อัดอากาศเข้าอากาศเข้าไปในถังเก็บอากาศเท่ากับ 13 บาร์ จากนั้นอ่านค่าอัตราการขยายตัวอีกครั้ง ถังแบบเดิมมีอัตราการขยายตัวเท่ากับ 0.048% และถึงที่ทำการปรับปรุงความแข็งแรงมีอัตราการขยายตัวเท่ากับ 0.024%

ตารางที่ 4.1 การทดสอบทางกายภาพด้วยเซ็นเซอร์วัดความเครียดชนิด FLA-6-11-1L ที่ต่อร่วมกับอุปกรณ์อ่านค่าความเครียดแบบไมโครคอนโทรลเลอร์แบบอาณูโน้ที่ต่อร่วมกับวงจรวีลสโตนบริดจ์ ของถังแบบเดิม

n	แรงดันไฟฟ้าที่วัดได้ (มิลลิโวลต์)	ค่าความเครียดของถัง เก็บความดัน	เส้นรอบวงที่เปลี่ยนแปลงไป (มิลลิเมตร)	อัตราการขยายตัว (%)
1	130.52	0.0753	0.4520	0.0476
2	130.35	0.0752	0.4514	0.0475
3	130.42	0.0753	0.4517	0.0475
4	130.45	0.0753	0.4518	0.0476
5	130.37	0.0752	0.4510	0.0475
6	130.41	0.0753	0.4516	0.0475
7	130.37	0.0752	0.4515	0.0475
8	130.26	0.0752	0.4511	0.0475
9	130.25	0.0752	0.4511	0.0475
10	130.32	0.0752	0.4513	0.0475
Average	130.36	0.0752	0.4515	0.0475
Max	130.52	0.0753	0.4520	0.0476
Min	130.22	0.0752	0.4510	0.0475

ตารางที่ 4.2 การทดสอบทางกายภาพด้วยเซ็นเซอร์วัดความเครียดชนิด FLA-6-11-1L ที่ต่อร่วมกับอุปกรณ์อ่านค่าความเครียดแบบไมโครคอนโทรลเลอร์แบบอาดูโนที่ต่อร่วมกับวงจรวีสดินบริดจ์ ของถังที่ทำการปรับปรุงความแข็งแรง

n	แรงดันไฟฟ้าที่วัดได้ (มิลลิโวลต์)	ค่าความเครียดของถัง เก็บความดัน	เส้นรอบวงที่เปลี่ยนแปลงไป (มิลลิเมตร)	อัตราการขยายตัว (%)
1	65.75	0.0380	0.2277	0.0240
2	65.38	0.0377	0.2264	0.0238
3	65.80	0.0380	0.2279	0.0240
4	65.79	0.0380	0.2278	0.0240
5	65.87	0.0380	0.2281	0.0240
6	65.90	0.0380	0.2282	0.0240
7	65.90	0.0380	0.2282	0.0240
8	65.91	0.0380	0.2283	0.0240
9	65.86	0.0380	0.2281	0.0240
10	65.90	0.0380	0.2282	0.0240
Average	65.81	0.0380	0.2279	0.0240
Max	65.91	0.0380	0.2283	0.0240
Min	65.38	0.0377	0.2264	0.0238

4.4 การทดสอบทางกายภาพด้วยเซ็นเซอร์วัดความเครียดชนิด FLA-6-11-1L ที่ต่อร่วมกับอุปกรณ์อ่านค่าความเครียดแบบพกพารุ่น TC-32K

เริ่มจากตั้งตั้งเซ็นเซอร์วัดความเครียดชนิด FLA-6-11-1L ที่ถังเก็บอากาศ อัดอากาศเข้าอากาศเข้าไปในถังเก็บอากาศเท่ากับ 13 บาร์ จากนั้นอ่านค่าอัตราการขยายตัวอีกครั้ง ถังแบบเดิมมีอัตราการขยายตัวเท่ากับ 0.062% และถังที่ทำการปรับปรุงความแข็งแรงมีอัตราการขยายตัวเท่ากับ 0.030%

ตารางที่ 4.3 การทดสอบทางกายภาพด้วยเซ็นเซอร์วัดความเครียดชนิด FLA-6-11-1L ที่ต่อร่วมกับ อุปกรณ์วัดความเครียดแบบพกพารุ่น TC-32K ของถังแบบเดิม

n	ค่าความเครียดของถังเก็บความดัน	เส้นรอบวงที่เปลี่ยนแปลงไป (มิลลิเมตร)	อัตราการขยายตัว (%)
1	0.0981	0.5886	0.0620
2	0.0971	0.5826	0.0613
3	0.0977	0.5862	0.0617
4	0.0982	0.5892	0.0620
5	0.0984	0.5904	0.0621
6	0.0985	0.5910	0.0622
7	0.0987	0.5922	0.0623
8	0.0988	0.5928	0.0624
9	0.0985	0.5910	0.0622
10	0.0984	0.5904	0.0621
Average	0.0982	0.5894	0.0620
Max	0.0988	0.5928	0.0624
Min	0.0971	0.5826	0.0613

ตารางที่ 4.4 การทดสอบทางกายภาพด้วยเซ็นเซอร์วัดความเครียดชนิด FLA-6-11-1L ที่ต่อร่วมกับ อุปกรณ์วัดความเครียดแบบพกพารุ่น TC-32K ของถังที่ทำการปรับปรุงความแข็งแรง

n	ค่าความเครียดของถังเก็บความดัน	เส้นรอบวงที่เปลี่ยนแปลงไป (มิลลิเมตร)	อัตราการขยายตัว (%)
1	0.0482	0.2892	0.0304
2	0.0481	0.2886	0.0304
3	0.0483	0.2898	0.0305
4	0.0485	0.2910	0.0306
5	0.0482	0.2892	0.0304
6	0.0481	0.2886	0.0304
7	0.0482	0.2892	0.0304
8	0.0483	0.2898	0.0305
9	0.0484	0.2904	0.0306

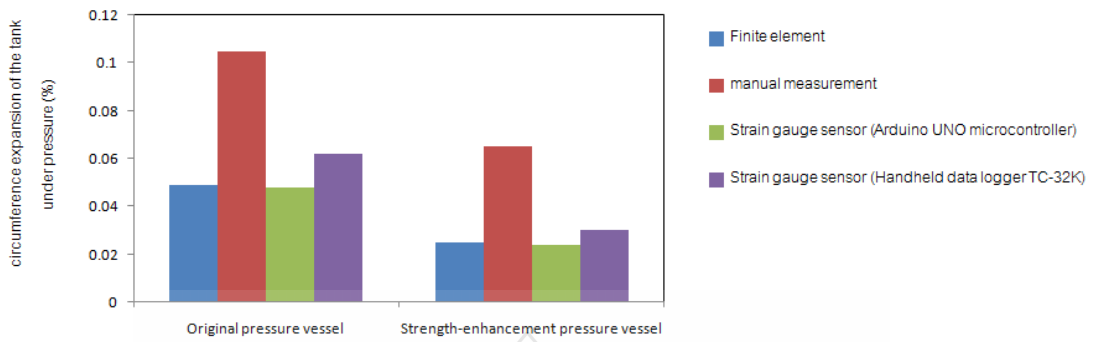
10	0.0483	0.2898	0.0305
Average	0.0483	0.2896	0.0305
Max	0.0485	0.2910	0.0306
Min	0.0481	0.2886	0.0304

4.5 ผลการศึกษา

อัตราการขยายตัวของถังเก็บอากาศ เมื่อนำมาเปรียบเทียบระหว่างวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์กับการทดลองทางกายภาพ จะเห็นได้ว่าการทดสอบทางกายภาพมีความคลาดเคลื่อนเกิดขึ้น ซึ่งในแต่ละวิธีมีสาเหตุที่แตกต่างกัน เช่น การทดสอบด้วยวิธี Manual มีความคลาดเคลื่อนเกิดขึ้นมากที่สุด เนื่องจากวิธีนี้ใช้เครื่องมือวัดที่มีหน่วยวัดเป็นแบบสเกลาร์ซึ่งมีจุดทศนิยมเพียงหนึ่งตำแหน่ง วัสดุที่ใช้ในการวัดก็มีความยืดหยุ่น จึงทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนในการทดสอบที่สูง และการทดสอบทางกายภาพด้วยเซ็นเซอร์วัดความเครียดชนิด FLA-6-11-1L ที่ต่อร่วมกับอุปกรณ์อ่านค่าความเครียดแบบไมโครคอนโทรลเลอร์แบบอาอูโน้ที่ต่อร่วมกับวงจรวีสโตนบริดจ์ วิธีนี้มีค่าความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุด ซึ่งวิธีนี้จะใช้เซ็นเซอร์วัดความเครียด (Strain gauge) ติดตั้งที่ถังเก็บความดัน จะอาศัยหลักการการเปลี่ยนแปลงความต้านทานไฟฟ้าเมื่อถังเก็บความดันเกิดการขยายตัว เนื่องจากเซ็นเซอร์วัดความเครียด (Strain gauge) ที่ใช้ในการทดสอบมีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและความชื้น จึงส่งผลให้ค่าอัตราการขยายตัวที่ได้คลาดเคลื่อนไปจากวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ และการทดสอบทางกายภาพด้วยเซ็นเซอร์วัดความเครียดชนิด FLA-6-11-1L ที่ต่อร่วมกับอุปกรณ์วัดความเครียดแบบพกพารุ่น TC-32K สาเหตุของความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นจะเหมือนกับวิธีที่สอง แต่สาเหตุที่ทำให้ความคลาดเคลื่อนเพิ่มขึ้นจากวิธีที่สองคือการติดตั้งเซ็นเซอร์วัดความเครียด (Strain gauge) ไม่ตรงกับตำแหน่งที่ทำเครื่องหมายไว้ก่อนทำการติดตั้ง จึงส่งผลให้เกิดความคลาดเคลื่อนสูงกว่าวิธีที่สอง

ตารางที่ 4.5 ตารางเปรียบเทียบอัตราการขยายตัวของถังแบบเดิม และถังที่ปรับปรุงความแข็งแรง

วิธีการทดสอบ	ถังแบบเดิม (%)	ถังที่ปรับปรุงความแข็งแรง(%)
ไฟไนต์เอลิเมนต์	0.049	0.025
แมนนวล	0.105	0.065
เซ็นเซอร์วัดความเครียดต่อร่วมกับไมโครคอนโทรลเลอร์	0.048	0.024
เซ็นเซอร์วัดความเครียดต่อร่วมกับอุปกรณ์อ่านค่าความเครียดแบบพกพา	0.062	0.030



รูปที่ 4.3 กราฟแสดงอัตราการขยายตัวระหว่างถังแบบเดิม และถังที่ทำการปรับปรุง



บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

ในงานวิจัยนี้ทำการศึกษาเพื่อสร้างแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ เพื่อพยากรณ์ผลเฉลย ปัญหาทางด้านวิศวกรรม เพื่อหาอัตราการขยายตัวของถังเก็บความดัน โดยมีเป้าหมายการออกแบบถังเก็บความดันให้เป็นไปตามมาตรฐาน มอก. 1252-2537 จากทดลองการปรับปรุงความแข็งแรงของถังเก็บความดันแบบใหม่ มีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นจริงซึ่งใกล้เคียงกับค่าที่ออกแบบไว้ในแบบจำลองด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ และถังทั้งสองแบบเป็นไปตามมาตรฐาน มอก. 1252-2537 จากการทดสอบภายใต้แรงดัน 13 บาร์ ถังเก็บความดันไม่เกิดการเสียรูป ถังทั้งสองแบบมีอัตราการขยายตัวไม่เกิน 47.5 มิลลิเมตร ซึ่งเป็นค่าที่ยอมรับได้ และวิธีการวัดอัตราการขยายตัวโดยใช้เซ็นเซอร์วัดความเครียด มีความถูกต้องและแม่นยำกว่าการวัดแบบแมนนวลโดยการเปรียบเทียบกับวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ อธิบายได้จากผลการทดลอง จึงมีความเหมาะสมเป็นแนวทางที่จะนำไปพัฒนาการวัดอัตราการขยายตัวของถังเก็บอากาศได้ แต่ข้อเสียคือการปรับปรุงความแข็งแรงของถังเก็บความดันด้วยวิธีเพิ่มความหนาของผนังถังเก็บความดัน จะส่งผลทำให้น้ำหนักของถังเก็บความดันเพิ่มขึ้นตามไปด้วย จากผลการทดสอบของงานวิจัยนี้ถึงที่ทำการปรับปรุงความแข็งแรงมีน้ำหนักเพิ่มขึ้นเท่ากับ 947.97 กรัม หรือเพิ่มขึ้นเท่ากับ 71.59%

5.2 ปัญหาที่พบในการทำวิจัย

ปัญหาการอ่านค่าอัตราการขยายตัวของถังเก็บอากาศทางกายภาพด้วยเซ็นเซอร์วัดความเครียด อุณหภูมิห้องเป็นตัวแปรที่ทำให้อ่านค่าอัตราการขยายตัวคลาดเคลื่อน เนื่องจากอุปกรณ์เซ็นเซอร์วัดความเครียดไวต่อการวัดผลมาก

5.3 ข้อเสนอแนะและแนวทางการพัฒนา

5.3.1 ควรทดสอบอัตราการขยายตัวของถังเก็บอากาศในห้องที่ควบคุมอุณหภูมิ และความชื้น

5.3.2 ควรนำซิลิโคนมาเคลือบที่เซ็นเซอร์วัดความเครียดในขณะที่ทำการทดสอบ เพื่อป้องกันการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและความชื้น

บรรณานุกรม

- [1] M. Egemen Aksoley, Babur Ozcelik, Ismail Bican, Comparison of bursting pressure result of LPG tank using experimental and finite element method, Department of Design and manufacturing Engineering, Gebze Institute of technology, Gebze-Kocaeli, Turkey Journal of Hazardous Materials 151 (2008) 699-709
- [2] วรวิทย์ วรรณาวิน, สมชาย เหลืองสอด และประกอบ ชาตฤกษ์. (2554). การวิเคราะห์ความเค้มของความเค้นที่เกิดขึ้นในหัวรีฟอร์มด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์, วรสารวิชาการและวิจัย มทร.พระนคร, 5(1), 13-23
- [3] สุทธา หิรัญธนวัฒน์, ชูศักดิ์ ลิ้มสกุล, บุญเจริญ วงศ์กิตติศึกษา, พรชัย พงษ์ภัทรานนต์ และสุระพล เขียวมนตรี. (2555). การวัดค่าแรงจากการบริหารข้อเข้าแบบ Bending Stress ด้วยอุปกรณ์สเตรนเกจ. ในการประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่4 (น. 120-124). หนองคาย: เครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล.
- [4] อรรถพล ชัยมนัสกุล. (2556). การศึกษาความเค้นในถังแรงดันแนวนอนและแท่นรองรับด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ในวารสารวิชาการ มหาวิทยาลัยธนบุรี ครั้งที่7 (น. 26-34)
- [5] พิเชษฐ์ พิณีจ (2560) ความเค้นในภาชนะทรงกระบอกผนังบางภายใต้ความดันภายใน มหาวิทยาลัยพระจอมเกล้าธนบุรี (น. 1-12)
- [6] กระทรวงอุตสาหกรรม. (2541) มาตรฐานอุตสาหกรรมเหล็กกล้าคาร์บอนรีดร้อนแผ่นม้วนแผ่นแถบแผ่นหนาและบาง สำหรับงาน โครงสร้างทั่วไป(แก้ไขครั้งที่1). สืบค้น 19 มีนาคม 2562, จาก <https://www.tisi.go.th/data/standard/fulltext/TIS-1479-2540m.pdf>.

บรรณานุกรม(ต่อ)

- [7] kyowa-ei.co.th/tha/technical/strain_gages/bonding_procedure.html. Retrieved 5 September 2019 from https://www.kyowa-ei.co.th/tha/technical/strain_gages/bonding_procedure.html.
- [8] kyowa-ei.co.th/tha/technical/strain_gages/wheatstone-bridge.html. Retrieved 8 September 2019 from https://www.kyowa-ei.co.th/tha/technical/strain_gages/wheatstone-bridge.html.
- [9] Arduino. (Online). Getting Started with Arduino UNO. Retrieved 30 April 2019, from [https://www.arduino.cc/en/Guide/Arduino UNO](https://www.arduino.cc/en/Guide/Arduino%20UNO).
- [10] Strain gauge. (Online). General use strain gauge. Retrieved 5 September 2019, from https://tml.jp/e/product/strain_gauge/f_list.html.
- [11] Tokyo measuring instruments lab. (Online). Strain gauge bridge circuit. Retrieved 5 September 2019 from https://www.tml.jp/eng/document/catalog/StrainGauges_E1007E.pdf.
- [12] Handheld data logger. (Online). Handheld data logger TC-32K. Retrieved 5 September 2019, from [https://tml.jp/eng/document/instrument/TC- 32K_E3000D.pdf](https://tml.jp/eng/document/instrument/TC-32K_E3000D.pdf).
- [13] e-training.tpqi.go.th/training/740/chapter/259/content
- [14] HX711 Weight Sensor Amplifier Dual Channel Module สำหรับต่อ load cell. Retrieved 5 September 2019 , from <https://www.mosfex.com/product/98/โมดูล-hx711-weight-sensor-amplifier-dual-chanel-module-สำหรับต่อ-load-cell-พร้อมขา>.



ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

แสดงวิธีคำนวณการหาอัตราการขยายตัวของถังอัดอากาศ



ก.1 แสดงวิธีคำนวณการวัดอัตราการขยายตัวของถังเก็บอากาศแบบ Manual



ภาพที่ ก.1 แสดงการวัดอัตราการขยายตัวแบบ Manual

จากสมการ

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L}$$

โดยที่

ε คือ ค่าความเครียดของถัง

ΔL คือ เส้นรอบวงของถังที่เปลี่ยนแปลงไป (มิลลิเมตร)

L คือ เส้นรอบวงเดิมของถังก่อนอัดอากาศ (มิลลิเมตร)

ถังแบบเดิม

จาก $L = 950$ มิลลิเมตร , $\Delta L = 0.62$ มิลลิเมตร

$$\varepsilon = \frac{0.62}{950} = 0.000652$$

ดังนั้นค่าความเครียดของถังเท่ากับ 0.000652

หรือคิดเป็น % จะได้

$$\text{อัตราการขยายตัวของถังเท่ากับ} = \frac{100 \times 0.62}{950} = 0.065\%$$

ถังที่ทำการปรับปรุงความแข็งแรง

จาก $L = 950$ มิลลิเมตร , $\Delta L = 1$ มิลลิเมตร

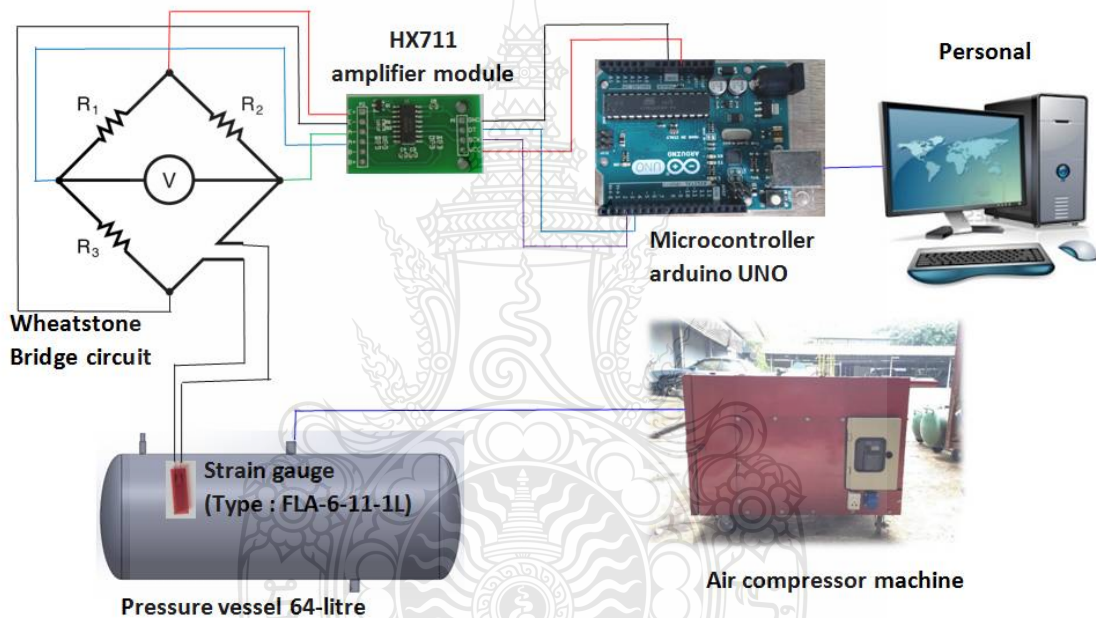
$$\varepsilon = \frac{1}{950} = 0.00105$$

ดังนั้นค่าความเครียดของถังเท่ากับ 0.00105

หรือคิดเป็น % จะได้

$$\text{อัตราการขยายตัวของถังเท่ากับ} = \frac{100 \times 1}{950} = 0.105\%$$

ก.2 แสดงวิธีคำนวณการวัดอัตราการขยายตัวของถังเก็บอากาศด้วยเซ็นเซอร์วัดความเครียดชนิด FLA-6-11-1L ที่ต่อร่วมกับอุปกรณ์อ่านค่าความเครียดแบบไมโครคอนโทรลเลอร์แบบอาดูโนที่ต่อร่วมกับวงจรวีทสโตนบริดจ์



ภาพที่ ก.2 แสดงการวัดอัตราการขยายตัวด้วยเซ็นเซอร์วัดความเครียดชนิด FLA-6-11-1L ที่ต่อร่วมกับอุปกรณ์อ่านค่าความเครียดแบบไมโครคอนโทรลเลอร์แบบอาดูโนที่ต่อร่วมกับวงจรวีทสโตนบริดจ์

จากสมการ

$$\Delta e = \frac{E}{4} K \varepsilon$$

โดยที่ e คือ ค่าแรงดันไฟฟ้าที่วัดได้ (มิลลิโวลต์)

E คือ แรงดันที่จ่ายให้กับวงจรวีทสโตนบริดจ์ (มิลลิโวลต์)

K คือ ค่า Gauge Factor ของเซ็นเซอร์วัดความเครียด

ε คือ ค่าความเครียดของถังเก็บอากาศ

ถังแบบเดิม

จาก $e = 130.36$ มิลลิโวลต์ , $E = 3300$ มิลลิโวลต์ , $K = 2.10$

$$\varepsilon = \frac{130.36 \times 4}{3300 \times 2.10} = 0.0752$$

ดังนั้นค่าความเครียดของถังเท่ากับ 0.0752

หาเส้นรอบวงที่เปลี่ยนแปลงไปได้จาก

$$\Delta L = \varepsilon \times L$$

โดยที่ค่า L คือค่าความยาวของStrain gauge เท่า 6 มิลลิเมตร

ดังนั้น

$$\Delta L = 0.0752 \times 6 = 0.45 \text{ มิลลิเมตร}$$

หรือคิดเป็น % จะได้

$$\text{อัตราการขยายตัวของถังเท่ากับ} = \frac{100 \times 0.45}{950} = 0.047\%$$

ถังที่ปรับปรุงความแข็งแรง

จาก $e = 65.81$ มิลลิโวลต์ , $E = 3300$ มิลลิโวลต์ , $K = 2.10$

$$\varepsilon = \frac{65.81 \times 4}{3300 \times 2.10} = 0.0379$$

ดังนั้นค่าความเครียดของถังเท่ากับ 0.0379

หาเส้นรอบวงที่เปลี่ยนแปลงไปได้จาก

$$\Delta L = \varepsilon \times L$$

โดยที่ค่า L คือค่าความยาวของStrain gauge เท่า 6 มิลลิเมตร

ดังนั้น

$$\Delta L = 0.0379 \times 6 = 0.2274 \text{ มิลลิเมตร}$$

หรือคิดเป็น % จะได้

$$\text{อัตราการขยายตัวของถังเท่ากับ} = \frac{100 \times 0.2274}{950} = 0.024\%$$

ก.3 แสดงวิธีคำนวณการวัดอัตราการขยายตัวของถังเก็บอากาศด้วยเซ็นเซอร์วัดความเครียดชนิด FLA-6-11-1L ที่ต่อร่วมกับอุปกรณ์อ่านค่าความเครียดแบบพกพารุ่น TC-32K



ภาพที่ ก.3 แสดงการวัดอัตราการขยายตัวด้วยเซ็นเซอร์วัดความเครียดชนิด FLA-6-11-1L ที่ต่อร่วมกับอุปกรณ์อ่านค่าความเครียดแบบพกพารุ่น TC-32K

ถังแบบเดิม

เครื่องอ่านค่าความเครียดเฉลี่ยได้เท่ากับ $\varepsilon = 0.0982$

หาเส้นรอบวงที่เปลี่ยนแปลงไปได้จาก

$$\Delta L = \varepsilon \times L$$

โดยที่ค่า L คือค่าความยาวของ Strain gauge เท่า 6 มิลลิเมตร
ดังนั้น

$$\Delta L = 0.0982 \times 6 = 0.5892 \text{ มิลลิเมตร}$$

หรือคิดเป็น % จะได้

$$\text{อัตราการขยายตัวของถังเท่ากับ} = \frac{100 \times 0.5892}{950} = 0.062\%$$

ถังที่ทำการปรับปรุงความแข็งแรง

เครื่องอ่านค่าความเครียดเฉลี่ยได้เท่ากับ $\varepsilon = 0.0483$

หาเส้นรอบวงที่เปลี่ยนแปลงไปได้จาก

$$\Delta L = \varepsilon \times L$$

โดยที่ค่า L คือค่าความยาวของStrain gauge เท่า 6 มิลลิเมตร
ดังนั้น

$$\Delta L = 0.0483 \times 6 = 0.2898 \text{ มิลลิเมตร}$$

หรือคิดเป็น % จะได้

$$\text{อัตราการขยายตัวของลึงเท่ากับ} = \frac{100 \times 0.2898}{950} = 0.030\%$$



ภาคผนวก ข

แบบตอบรับการนำเสนอบทความวิจัยในการประชุมวิชาการระดับชาติ





“วิจัยเพื่อการพัฒนาบัณฑิตกรรมสู่ความยั่งยืน”

RUSCON 4

การประชุมวิชาการระดับชาติ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ ครั้งที่ 4

23 - 24 เมษายน 2563

ณ อาคาร 20 และ อาคาร 21 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ
ศูนย์นวัตกรรมฯ เทพเทวี

ประเภทการนำเสนอ

ภาคบรรยาย (Oral Presentation) และ ภาคโปสเตอร์ (Poster Presentation)

กำหนดส่งผลงาน

- ลงทะเบียนส่งผลงานและเปิดรับบทความ (Abstract) 1 ต.ค. - 16 พ.ย. 2562
- ประกาศผลพิจารณาคัดเลือก 1 ต.ค. - 29 พ.ย. 2562
- ส่งบทความฉบับสมบูรณ์ ตั้งแต่ 29 พ.ย. 2562 เป็นต้นไป
- ส่งบทความฉบับสมบูรณ์ (Full paper) 1 ธ.ค. 2562 - 15 ม.ค. 2563
- ประกาศผลการพิจารณาคัดเลือกบทความฉบับสมบูรณ์ 28 ก.พ. 2563
- วันสุดท้ายของการส่งบทความฉบับสมบูรณ์ (ฉบับแก้ไข) 16 มี.ค. 2563
- ชำระเงิน แบบ Early bird 28 ก.พ. - 31 มี.ค. 2563
- แบบปกติ 1 เม.ย. - 24 เม.ย. 2563
- นำเสนอผลงาน 23 - 24 เม.ย. 2563
- ตำนานโหลด Proceedings ตั้งแต่ 25 พ.ค. 2563

กลุ่มสาขาวิชาที่เปิดรับบทความ

- สาขาวิศวกรรมศาสตร์และอุตสาหกรรมวิจัย
- สาขาวิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีสารสนเทศ
- สาขาเกษตรศาสตร์และอุตสาหกรรมอาหาร
- สาขานิติศาสตร์และนิติศาสตร์
- สาขาสังคมศาสตร์ มนุษยศาสตร์และจิตวิทยา
- สาขาการศึกษา

วารสารที่รองรับการประชุมวิชาการ

- วารสารวิชาการ มทร. สุวรรณภูมิ (TCI 1)
 - วารสารวิชาการ มทร. สุวรรณภูมิ มนุษยศาสตร์และสังคมศาสตร์ (TCI 1)
 - วารสารงานวิจัยคอมพิวเตอร์และสารสนเทศ มทร. สุวรรณภูมิ (TCI 2)
 - วารสารวิชาการ มทร. สุวรรณภูมิ สาขาเกษตรศาสตร์และอุตสาหกรรมอาหาร (TCI 2)
- หมายเหตุ : ภาชนะงานวิจัยที่ส่งมาคัดเลือก
ต้องพิมพ์ในวารสารวิชาการดังกล่าว



สถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ
60 หมู่ 3 ต.หินตราอ.พระนครศรีอยุธยา จ.พระนครศรีอยุธยา 13000
ผู้ประสานงาน คุณอาทิตย์ / คุณพรพิณ โทร 097 770 8866

☎ 035 709 097

🌐 www.rdi.rmutsb.ac.th

✉ rdi@rmutsb.ac.th

📄 www.facebook.com/rdi.rus2014

ลงทะเบียนส่งผลงานเข้าร่วมงาน

และดูรายละเอียดเพิ่มเติมได้ที่

www.ruscon.rmutsb.ac.th



มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ

การประชุมวิชาการระดับชาติมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ ครั้งที่ 4
“วิจัยเพื่อการพัฒนานวัตกรรมสู่ความยั่งยืน”

23-24 เมษายน 2563 ณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ ศูนย์นนทบุรี(เขตเหนือ) จังหวัดนนทบุรี

20 กุมภาพันธ์ 2563

เรื่อง ต้อนรับการนำเสนอบทความวิจัยในการประชุมวิชาการระดับชาติ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ ครั้งที่ 4
เรียน นายสกันต์ เส็งสุวรรณ , ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พิพัฒน์ ปราโมทย์

ตามที่ท่านได้ส่งบทความวิจัยเรื่อง การปรับปรุงความแข็งแรงของถังเก็บอากาศขนาด 64 ลิตร ด้วยวิธี
ไฟโนต์เอเลเมนต์ (รหัสบทความ 63.111039) เพื่อนำเสนอภาค ภาคบรรยาย ในการประชุมวิชาการระดับชาติ
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ ครั้งที่ 4 หัวข้อ “วิจัยเพื่อการพัฒนา
นวัตกรรมสู่ความยั่งยืน” กำหนด
จัดขึ้นระหว่างวันที่ 23-24 เมษายน 2563 ณ อาคาร 20 และอาคาร 21 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ
ศูนย์นนทบุรี (เขตเหนือ) จังหวัดนนทบุรี นั้น

ในการนี้ คณะกรรมการฝ่ายวิชาการ ขอแจ้งให้ทราบว่า บทความวิจัยของท่านได้รับการตอบรับให้นำเสนอ
ในการประชุมวิชาการดังกล่าว สำหรับตารางเวลาการนำเสนอ จะแจ้งให้ทราบในลำดับต่อไป ทั้งนี้ ผู้เข้าร่วมการประชุม
วิชาการสามารถเข้าร่วมประชุมได้โดยไม่ถือเป็นวันลา และสามารถเบิกค่าใช้จ่ายต่างๆ จากต้นสังกัดได้ เมื่อได้รับอนุมัติ
จากผู้บังคับบัญชาแล้ว

ขอแสดงความนับถือ

รองศาสตราจารย์ภัทร วิจารณ์พันธ์
ประธานคณะกรรมการฝ่ายวิชาการ

สถาบันวิจัยและพัฒนา
โทรศัพท์ / โทรสาร 0 3570 9097
อีเมล: rdi@mutsb.ac.th
<http://www.ruscon.mutsb.ac.th>

การปรับปรุงความแข็งแรงของถังเก็บอากาศขนาด64ลิตรด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ Strength Enhancement of 64-litre Pressure Vessel Using Finite Element Method

สกนธ์ เส็งสุวรรณ^{1*} และพิพัฒน์ ปราโมทย์²

Sakon Sangsuwan^{1*} and Pipat Pramot²

บทคัดย่อ

บทความนี้เกี่ยวกับการศึกษาและปรับปรุงความแข็งแรงของถังเก็บอากาศที่ส่งผลต่ออัตราการขยายตัวที่เกิดขึ้นภายในถังขณะทดสอบในการวิจัยจะใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ในการวิเคราะห์และสร้างแบบจำลองเพื่อใช้เปรียบเทียบกับผลการทดสอบทางกายภาพระหว่างถังแบบเดิมและถังที่ปรับปรุงแล้ว ขนาดของถังที่ทดสอบเป็นขนาด64ลิตรโดยวัสดุที่ใช้คือ SS400 ในสภาวะความดันในถังเป็นความดันบรรยากาศ ถังเก็บอากาศทั้งสองแบบมีขนาดเส้นรอบวงเท่ากับ 950 มิลลิเมตร และมาตรฐานการทดสอบความดันที่ใช้ในการทดสอบจะเป็นไปตามมาตรฐาน มอก.1252-2537 โดยใช้วิธีวัดความเครียดแบบแมนนวลและเซ็นเซอร์วัดความเครียดชนิด FLA-6-11-1L ที่ต่อร่วมกับอุปกรณ์อ่านค่าความเครียด โดยอุปกรณ์อ่านค่าความเครียดมีสองแบบคือไมโครคอนโทรลเลอร์แบบฮาร์ดแวร์ที่ต่อร่วมกับวงจรวิทสโตนบริดจ์และเครื่องวัดความเครียดแบบพกพา รุ่น TC-32K ในการทดลองด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ถังแบบเดิมมีอัตราการขยายตัวเท่ากับ 0.049 % และแบบจำลองหลังการปรับปรุงมีอัตราการขยายตัวเท่ากับ 0.025 % ส่วนการทดสอบทางกายภาพมีผลการวัดด้วยอุปกรณ์วัดความเครียดแบบแมนนวล ถังแบบเดิมมีอัตราการขยายตัวเท่ากับ 0.105 % ขณะที่ถังแบบใหม่มีค่าเป็น 0.065 % การวัดด้วยเซ็นเซอร์โดยไมโครคอนโทรลเลอร์แบบฮาร์ดแวร์ที่ต่อร่วมกับวงจรวิทสโตนบริดจ์ถังแบบเดิมมีอัตราการขยายตัวเท่ากับ 0.048 % และถังแบบใหม่มีอัตราการขยายตัวเท่ากับ 0.024 % การวัดด้วยเซ็นเซอร์ร่วมกับเครื่องวัดความเครียดรุ่น TC-32K ถังแบบเดิมมีอัตราการขยายตัวเท่ากับ 0.062 % และถังแบบใหม่มีอัตราการขยายตัวเท่ากับ 0.030 % สรุปได้ว่าการปรับปรุงความแข็งแรงของถังความดันแบบใหม่มีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นจริงซึ่งใกล้เคียงกับค่าที่ออกแบบไว้ในแบบจำลองด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

คำสำคัญ: ถังเก็บความดัน การเพิ่มความแข็งแรง ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

Abstract

This article studies and enhances strength of the pressure vessel that concerns with the circumference expansion of the tank under pressure. In this research, the finite element method is used to analyze and to create a pressure vessel model to compare the physical test of the original pressure vessel to this strength-enhancement pressure vessel. The original pressure vessel and the strength-enhancement pressure vessel are both 64 liters, and both are made from SS400 iron. Under the atmospheric pressure, pressure vessels have a circumference of 950 millimeters. The pressure testing standard used in the test refers to TIS1252-2537. The measurements for circumference of pressure vessels are measured manually and measured using a FLA-6-11-1L type strain gauge sensor with the strain reading device. There are two types of reading devices: Arduino microcontroller with a Wheatstone bridge circuit and the TC-32K handheld data logger. The expansion results from the finite element method are 0.049 % for the original pressure vessel and 0.025 % for the strength-enhancement pressure vessel. The results of the physical expansion test using the manual measurement are 0.105 % for the original pressure vessel and 0.065 % for the strength-enhancement pressure vessel. The expansion measurements using sensors with the Arduino microcontroller connected to the Wheatstone bridge circuit are 0.048 % for the original pressure vessel and 0.024 % for the strength-enhancement pressure vessel. The expansion measurements using sensors with the TC-32K handheld data logger are 0.062 % for the original pressure vessel and 0.030 % for the strength-enhancement pressure vessel. The conclusion is the strength-enhancement pressure vessel has an actual better strength, which has similar value to the model made by the finite element method.

Keywords: pressure vessel, strength enhancement, finite element method

¹สาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ปทุมธานี 12110

¹ Mechanical Engineering Rajamangala University of Technology Thanyaburi Pathum Thani 12110

*Corresponding author. E-mail: sakon_s@mail.rmutt.ac.th

เบอร์โทรศัพท์ผู้ส่งบทความ : 080-6020411

1. บทนำ (Introduction)

ถังเก็บอากาศ (Air Tank) คืออุปกรณ์ที่ทำหน้าที่กักเก็บลมอัดที่เครื่องอัดอากาศผลิตออกมาและรักษาปริมาณลมอัดให้เพียงพอกับการใช้งาน เพื่อนำไปใช้งานโดยจะจ่ายไปตามท่อลม ให้กับเครื่องจักรหรืออุปกรณ์ต่างๆ รวมทั้งระบบนิวเมติกส์ในโรงงานทั้งขนาดเล็กและขนาดใหญ่ ปัจจุบันตามโรงงานและอุตสาหกรรมทั่วโลกใช้งานอย่างกว้างขวางในเครื่องจักรอัตโนมัติคือ ประหยัดแรงและงานบางประเภทที่ทำงานซ้ำซาก รวมทั้งงานที่มีความร้อนมีกรดเป็นอันตรายเช่น สารเคมีที่เป็นอันตรายต่อคนงาน ถังเก็บอากาศเป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่เก็บอากาศที่ได้จากเครื่องอัดอากาศ และนำเอาระบบลมอัดไปใช้งานอย่างกว้างขวาง เช่น เครื่องจักรที่ใช้ประกอบขึ้นชิ้นส่วนในการผลิตสินค้าจำนวนมากๆ เครื่องบรรจุผลิตภัณฑ์หีบห่อ เครื่องจักรอุตสาหกรรมอาหาร เครื่องจักรงานไม้ เครื่องหล่อโลหะ เครื่องเชื่อม เครื่องจักรอุตสาหกรรมผลิตเหล็ก เครื่องขนถ่ายวัสดุ เครื่องพิมพ์ และเครื่องจักรอื่นๆอีกมากมาย ที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้ เหตุผลหนึ่งที่น่าเอาระบบลมอัดไปใช้อัดอากาศจึงทำให้ต้องรับความดันสูง ดังนั้นจึงต้องคำนึงถึงความสามารถในการรับแรงดันของถังเก็บอากาศเพื่อให้เกิดความปลอดภัยในการทำงาน เพื่อที่จะลดข้อผิดพลาดและมีความปลอดภัยในการทำงาน เช่น การสร้างถังเก็บความดันให้ได้มาตรฐาน มอก. 1252-2537 ภายใต้แรงดัน 13 บาร์ โดยที่ถังเก็บความดันไม่เกิดการเสียรูป และอัตราการขยายตัวของถังเก็บความดันที่ยอมรับได้คือ 47.5 มิลลิเมตร อรรถ ชัยมนัสกุล จากคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธนบุรี ได้ศึกษาผลกระทบของตัวแปรที่มีต่อความเค้นในถังแรงดันแนวนอนและแท่นรองรับด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ จากการศึกษาพบว่าขนาดของแท่นรองรับที่เหมาะสมสามารถช่วยลดค่าความเค้นในถังแรงดันและแท่นรองรับได้ เนื่องจากหลักการไฟไนต์เอลิเมนต์เป็นเพียงการพยากรณ์ผลเฉลยของปัญหาทางด้านวิศวกรรมเท่านั้น ดังนั้นการนำมาใช้เป็นแนวทางสำหรับการศึกษาควาทที่จะทำการทดสอบจริงด้วย วิทยานิพนธ์ฉบับนี้น่าเสนอการใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์มาทำการศึกษาความแข็งแรงของถังเก็บอากาศ และทำการปรับปรุงให้มีความแข็งแรงเพิ่มมากขึ้น โดยการศึกษาจะทำการสร้างแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์เพื่อนำมาเปรียบเทียบกับผลการทดลองทางกายภาพ โดยใช้วิธีวัดความเครียดแบบ manual และเซ็นเซอร์วัดความเครียด (Strain gauge) ชนิด FLA-6-11-1L มาทำการวัดค่าอัตราการขยายตัวของถังเก็บความดันขนาด 64 ลิตร เนื่องจากมีความถูกต้องแม่นยำและเป็นที่น่าเชื่อถือในหน่วยงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง โดยอุปกรณ์วัดความเครียดมีสองแบบคือ ไมโครคอนโทรลเลอร์แบบฮาร์ดแวร์ที่ต่อร่วมกับวงจรวัดแรงดันและเครื่องวัดแบบพกพา (Data logger) รุ่น TC-32K ขนาดของถังที่ใช้ทดสอบเป็นขนาด 64 ลิตรโดยใช้วัสดุเหล็ก SS400 และมาตรฐานความดันที่ใช้ในการทดสอบจะเป็นไปตามมาตรฐาน มอก.1252-2537

2. วิธีการศึกษา (Methodology)

การศึกษาเริ่มจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องศึกษาข้อมูลมาตรฐาน มอก. 1252-2537 และรายละเอียดต่างๆของถังเก็บอากาศขนาด 64 ลิตร และความแข็งแรงของวัสดุที่ใช้ในการทำวิจัย แผนการทดลองที่ใช้ในการทำวิจัยคือ จะสร้างแบบจำลองของถังเก็บอากาศขนาด 64 ลิตร เส้นผ่านศูนย์กลางของถังเท่ากับ 950 มิลลิเมตร โดยถังแบบเดิมมีความหนาผนังเท่ากับ 1.5 มิลลิเมตร และถังที่ปรับปรุงความแข็งแรงมีความหนาผนังเท่ากับ 2.6 มิลลิเมตร และวิเคราะห์อัตราการขยายตัวด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ เพื่อใช้เปรียบเทียบกับผลการทดลองทางกายภาพ ระหว่างถังแบบเดิมและถังที่ปรับปรุงความแข็งแรง จากการศึกษาวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่าผลการทดสอบทดสอบทางกายภาพโดยการวัดค่าอัตราการขยายตัวของถังเก็บอากาศ มีอุปกรณ์และวิธีการอยู่หลายแบบ แต่ในงานวิจัยนี้ จะใช้วิธีวัดค่าความเครียดแบบแมนนวลและเซ็นเซอร์ชนิด FLA-6-11-1L ที่ต่อร่วมกับอุปกรณ์วัดความเครียด โดยอุปกรณ์วัดความเครียดมีสองแบบคือ ไมโครคอนโทรลเลอร์แบบฮาร์ดแวร์ที่ต่อร่วมกับวงจรวัดแรงดันและเครื่องวัดความเครียดแบบพกพา รุ่น TC-32K

2.1 การทดสอบแบบจำลองด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

2.1.1 การสร้าง CAD Geometry คือการสร้างแบบจำลองของถังเก็บอากาศด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป Solid Works ที่จะใช้ในการเก็บข้อมูลอัตราการขยายตัวของถังเก็บอากาศ เพื่อใช้เปรียบเทียบกับ การทดสอบทางกายภาพ จะต้องสร้างแบบจำลองสามมิติด้วยมาตรฐาน 1:1 ขนาดของถังที่ใช้ในการทดสอบเป็นขนาด 64 ลิตร มีขนาดเส้นรอบวงเท่ากับ 950 มิลลิเมตร ถังแบบเดิมมีความหนาผนังของถังเท่ากับ 1.5 มิลลิเมตร น้ำหนักของถังเท่ากับ 1324.14 กรัม และถังที่ปรับปรุงความแข็งแรงมีความหนาผนังเท่ากับ 2.6 มิลลิเมตร น้ำหนักของถังเท่ากับ 2272.11 กรัม ดังรูปที่ 1

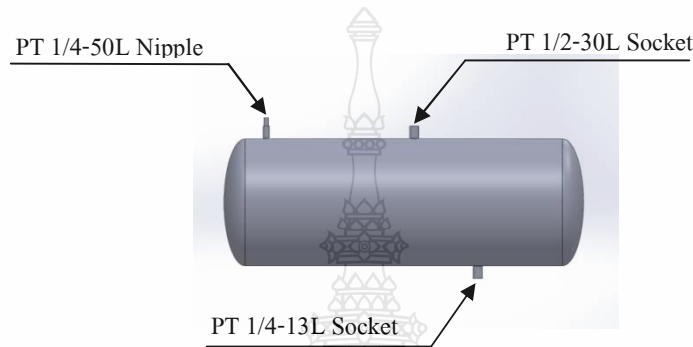


Figure 1 The pressure vessel model.

2.1.2 การ Pre-Processing คือการนำ Math model มากำหนดสมบัติทางกลของวัสดุ วัสดุที่ใช้ในการทดสอบเป็นเหล็ก SS400 โดยที่ ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นเท่ากับ 210 GPa อัตราส่วนนิวของ 0.26 ความแข็งแรงดึงเท่ากับ 510 MPa ความเค้นจุดครากเท่ากับ 245 MPa และมีมวลหนาแน่นเท่ากับ 7860 kg/m³

การกำหนดเงื่อนไขในการทดสอบอัตราการขยายตัวของถังเก็บความดันให้เป็นไปตามมาตรฐาน มอก. 1252-2537 โดยแรงดันที่ใช้ในการทดสอบคือ 13 บาร์ โดยที่ถังเก็บความดันต้องไม่เกิดการเสียรูป และอัตราการขยายตัวของถังเก็บอากาศที่ยอมรับได้คือ 47.5 มิลลิเมตร



Figure 2 Finite element analysis pre-processing.

การแบ่งเอลิเมนต์ของแบบจำลอง เป็นการแบ่งจำลองเป็นเอลิเมนต์เล็กๆ ดังรูปที่ 2 ด้วยเอลิเมนต์แบบสามเหลี่ยม

2.1.3 การ Post Processing คือการวิเคราะห์ผลลัพธ์ โดยผลลัพธ์ที่ได้จะแสดงในลักษณะเฉดสีเพื่อบอกว่า อัตราการขยายตัวของถังเก็บอากาศ เกิดขึ้นที่บริเวณใดมากที่สุด จากการวิเคราะห์ดังแบบเดิมมีอัตราการขยายตัวเท่ากับ 0.049 % และถังที่ปรับปรุงความแข็งแรงมีอัตราการขยายตัวเท่ากับ 0.025 % ดังรูปที่ 3

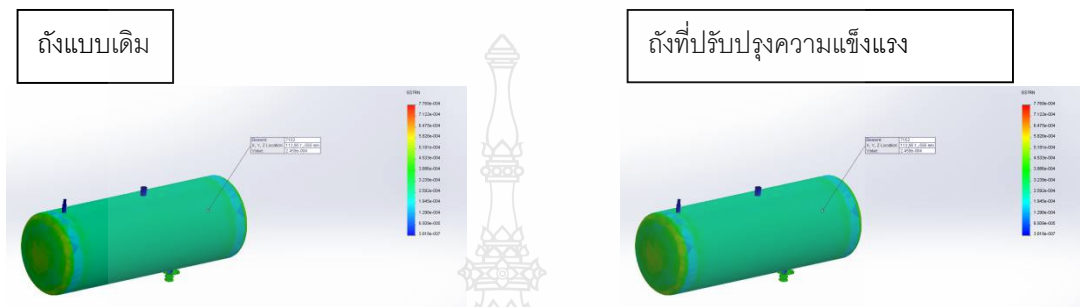


Figure 3 Finite element analysis post-processing.

2.2 การทดสอบทางกายภาพ

เพื่อให้การทดสอบทางกายภาพสามารถทำการทดสอบได้ จึงต้องสร้างถังเก็บอากาศจริงตามที่ได้ออกแบบไว้ในแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ จากนั้นอัดความดันเข้าไปในถังเก็บอากาศเท่ากับ 13 บาร์ โดยใช้เครื่องอัดอากาศขนาดเล็กแบบลูกสูบดังรูปที่ 4



Figure 4 The air compressor machine.

โดยจะใช้วิธีวัดอัตราการขยายตัวแบบ manual และแบบเซ็นเซอร์วัดความเครียด รายละเอียดมีดังนี้

2.2.1 วิธีการวัดอัตราการขยายตัวแบบแมนนวลดังรูปที่ 5 ทำการวัดเส้นรอบวงของถังเก็บอากาศในสภาวะที่ความดันในถังเป็นความดันบรรยากาศ จากนั้นทำการอัดความดันเข้าไปในถังเท่ากับ 13 บาร์ มาตรฐานแรงดันที่ใช้ในการทดสอบจะเป็นไปตามมาตรฐาน มอก. 1252-2537 ทำให้ถังเกิดการขยายตัว จากนั้นทำการวัดเส้นรอบวงของถัง

อีกครั้ง เพื่อดูว่าเส้นรอบวงของถังเปลี่ยนแปลงไปจากเดิมเท่าไร สามารถอธิบายได้ในรูปแบบความเครียดดัง ดังสมการที่ 1

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L}$$

(1)

โดยที่ ε คือ ค่าความเครียด
 ΔL คือ เส้นรอบวงของถังที่เปลี่ยนแปลงไป (มิลลิเมตร)
 L คือ เส้นรอบวงเดิมของถัง (มิลลิเมตร)



Figure 5 The measurements for circumference of pressure vessels are the manual measurement.

2.2.2 วิธีการวัดค่าความเครียดแบบเซ็นเซอร์ชนิด FLA-6-11-1L ที่ต่อร่วมกับอุปกรณ์วัดความเครียดแบบไมโครคอนโทรลเลอร์แบบฮาร์ดแวร์ที่ต่อร่วมกับวงจรวีทสโตนบริดจ์ วิธีการอ่านค่าความเครียดด้วยวิธีนี้ จะต้องสร้างชุดอุปกรณ์อ่านค่าความเครียด โดยมีรายละเอียดดังนี้

เริ่มจากกำหนดจุดที่ต้องการติดตั้งเซ็นเซอร์วัดความเครียด ใช้กระดาษทรายสำหรับขัดโลหะเบอร์ 120 ถึง 180 ขัดที่บริเวณที่ต้องการวัดค่าความเครียดของถังเก็บอากาศ และขัดทำความสะอาดอีกครั้ง ติดเซ็นเซอร์วัดความเครียดลงไปบนถังเก็บอากาศด้วยกาว โดยต้องติดตั้งในสภาวะความดันในถังเป็นความดันบรรยากาศดังรูปที่ 6 โดยใช้เซ็นเซอร์วัดความเครียดชนิด FLA-6-11-1L มี Gauge length เท่ากับ 6 มิลลิเมตร และมีค่าความต้านทานเท่ากับ 120 โอห์ม และมี Gauge factor เท่ากับ 2.10 จากนั้นต่อร่วมกับวงจรวีทสโตนบริดจ์ ตัวต้านทานที่ใช้ในวงจรเท่ากับ 120โอห์ม และ จากนั้นนำเอาท์พุทที่ได้มาขยายสัญญาณด้วยอุปกรณ์ HX711 Sensor Amplifier Dual Channel Module และต่อร่วมกับไมโครคอนโทรลเลอร์แบบฮาร์ดแวร์ ดังรูปที่ 7



Figure 6 The installation of the FLA-6-11-1L type strain gauge sensor on the pressure vessel.

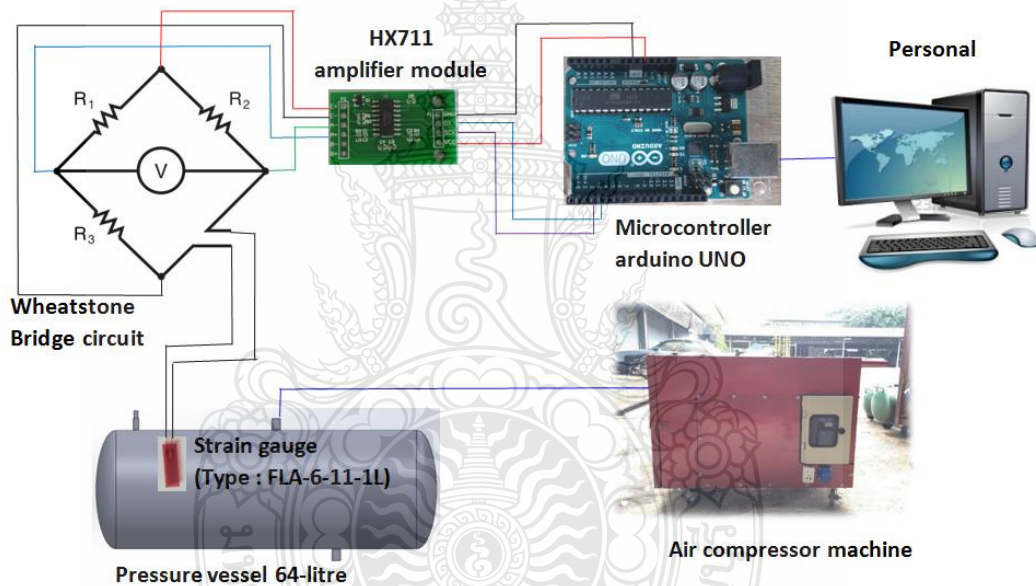


Figure 7 The installation of the arduino microcontroller with the Wheatstone bridge circuit with the FLA-6-11-1L type strain gauge sensor.

อ่านค่าผ่านไมโครคอนโทรลเลอร์แบบ Arduino UNO จากนั้นให้แสดงค่าที่ Serial Monitor อัตราการขยายตัวที่วัดได้เป็นค่าความเครียด โดยใช้เซ็นเซอร์วัดความเครียดต่อร่วมกับวงจรวีทสโตนบริดจ์ ซึ่งค่าความเครียดที่คำนวณได้จะอยู่ในรูปของแรงดันไฟฟ้า จะต้องทำการเปลี่ยนค่าแรงดันไฟฟ้าที่อ่านเป็นค่าความเครียด โดยคำนวณจากวงจรวีทสโตนบริดจ์ ในสมการที่ 2

$$\Delta e = \frac{E}{4} K \varepsilon \quad (2)$$

- โดยที่ e คือ ค่าแรงดันไฟฟ้าที่วัดได้ (มิลลิโวลต์)
 E คือ แรงดันที่จ่ายให้กับวงจรโวลต์อินบริดจ์ (มิลลิโวลต์)
 K คือ ค่า Gauge Factor ของเซ็นเซอร์วัดความเครียด
 ε คือ ค่าความเครียดของถังเก็บอากาศ

2.2.3 การวัดความเครียดแบบเซ็นเซอร์ชนิด FLA-6-11-1L ที่ต่อร่วมกับอุปกรณ์การวัดความเครียดแบบพกพา (Data logger) รุ่น TC-32K มีขั้นตอนการทดลองดังนี้

ติดตั้งเซ็นเซอร์วัดความเครียดชนิด FLA-6-11-1L ที่ถังเก็บอากาศ ในสภาวะที่ความดันภายในถังเป็นความดันบรรยากาศ จากนั้นนำเซ็นเซอร์วัดความเครียดต่อร่วมกับอุปกรณ์วัดความเครียดแบบพกพา รุ่น TC-32K ดังรูปที่ 8 ทำการอัดแรงดันเข้าไปในถังเก็บอากาศเท่ากับ 13 บาร์ อ่านค่าที่ได้จากอุปกรณ์วัดความเครียดแบบพกพา รุ่น TC-32K แล้วนำค่าทั้งหมดที่ทดสอบมาทำการเปรียบเทียบ



Figure 8 The installation of the handheld data logger TC-32K with the FLA-6-11-1L type strain gauge sensor.

ผลการศึกษา (Results)

ในการทดลองเพื่อหาอัตราการขยายตัวของถังเก็บอากาศ เมื่อนำค่ามาเปรียบเทียบระหว่างวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์กับการทดสอบทางกายภาพ โดยออกแบบให้ความหนาของผนังถังเก็บความดันมีขนาดเพิ่มขึ้น ค่าอัตราการขยายตัวของถังเก็บความดันจะลดน้อยลง และความแข็งแรงของถังเก็บความดันจะเพิ่มขึ้น แต่น้ำหนักของถังเก็บความดันก็จะมีน้ำหนักเพิ่มขึ้นตามไปด้วย การทดลองทั้ง 4 วิธีสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 1

Table 1 Compare the physical test of original pressure vessel and strength-enhancement pressure vessel.

Method	Original pressure vessel (%)	Strength-enhancement pressure vessel (%)
Finite element	0.049	0.025
manual	0.105	0.065
Microcontroller	0.048	0.024
TC-32K	0.062	0.030

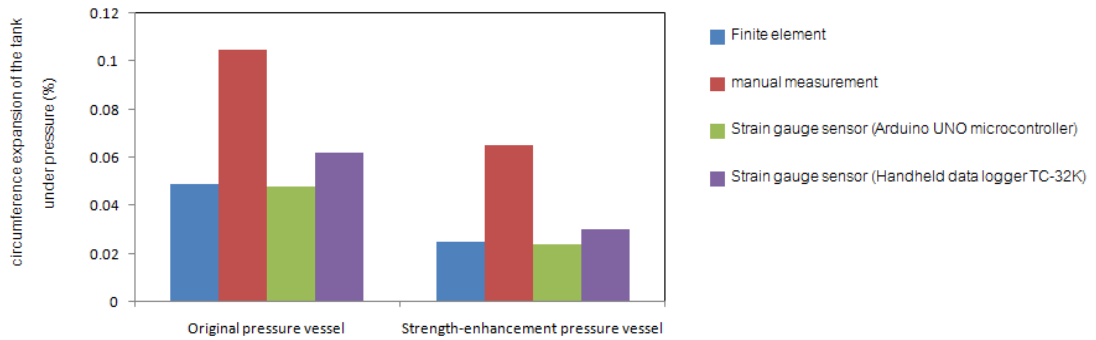


Figure 9 The circumference expansion graph of the original pressure vessel and strength-enhancement pressure vessel.

อภิปรายผล (Discussion)

จากผลการทดสอบด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ และการทดสอบทางกายภาพจึงอธิบายได้ว่าการเพิ่มความหนาของถังเก็บอากาศจาก 1.5 มิลลิเมตร เป็น 2.6 มิลลิเมตร สามารถเพิ่มความแข็งแรงของถังเก็บความดันได้ จากผลการทดสอบถังเก็บความดันทั้งถังแบบเดิม และถังแบบที่ปรับปรุงความแข็งแรงเป็นไปตามมาตรฐาน มอก. 1252-2537 โดยภายใต้แรงดัน 13 บาร์ถังเก็บความดันไม่เกิดการเสียรูป และอัตราการขยายตัวของถังเก็บความดันมีอัตราการขยายตัวไม่เกิน 47.5 มิลลิเมตร วิธีการวัดอัตราการขยายตัวของถังเก็บอากาศแบบแมนนวลที่มีหน่วยวัดเป็นมิลลิเมตร มีความคลาดเคลื่อนมากกว่าแบบเซ็นเซอร์วัดความเครียด โดยอาศัยหลักการเปลี่ยนแปลงความต้านทานไฟฟ้าเมื่อวัสดุมีการเปลี่ยนแปลงขนาด เนื่องจากเซ็นเซอร์วัดความเครียด (Strain gauge) ที่ใช้ทดสอบมีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและความชื้น ดังนั้นในการทดสอบการขยายตัวของถังเก็บความดันโดยใช้เซ็นเซอร์วัดความเครียด (Strain gauge) จำเป็นต้องรักษาอุณหภูมิและความชื้นให้คงที่

สรุป (Conclusion)

ในงานวิจัยนี้ทำการศึกษาเพื่อสร้างแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ เพื่อพยากรณ์ผลเฉลยปัญหาทางด้านวิศวกรรม เพื่อหาอัตราการขยายตัวของถังเก็บความดัน เพื่อมุ่งไปสู่การออกแบบถังเก็บความดันให้เป็นไปตามมาตรฐาน มอก. 1252-2537 จากทดลองการปรับปรุงความแข็งแรงของถังเก็บความดันแบบใหม่ มีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นจริงซึ่งค่าใกล้เคียงกับค่าที่ออกแบบไว้ในแบบจำลองด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ และถังทั้งสองแบบเป็นไปตามมาตรฐาน มอก. 1252-2537 จากการทดสอบภายใต้แรงดัน 13 บาร์ ถังเก็บความดันไม่เกิดการเสียรูป ถังทั้งสองแบบมีอัตราการขยายตัวไม่เกิน 47.5 มิลลิเมตร ซึ่งเป็นค่าที่ยอมรับได้ และวิธีการวัดอัตราการขยายตัวโดยใช้เซ็นเซอร์วัดความเครียด มีความถูกต้องและแม่นยำกว่าการวัดแบบแมนนวล อธิบายได้จากผลการทดลอง จึงมีความเหมาะสมเป็นแนวทางที่จะนำไปพัฒนาการวัดอัตราการขยายตัวของถังเก็บอากาศได้ แต่ข้อเสียคือการปรับปรุงความแข็งแรงของถังเก็บความดันด้วยวิธีเพิ่มความหนาของผนังถังเก็บความดัน จะส่งผลทำให้น้ำหนักของถังเก็บความดันเพิ่มขึ้นตามไปด้วย จากผลการทดสอบของงานวิจัยนี้ถึงที่ทำการปรับปรุงความแข็งแรงมีน้ำหนักเพิ่มขึ้นเท่ากับ 947.97 กรัม หรือ 71.59 %

คำขอบคุณ (Acknowledgement)

ขอขอบคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยราชภัฏวชิรญาณบุรีสำหรับงบประมาณสนับสนุนงานวิจัยนี้ ในโครงการเรื่องการปรับปรุงความแข็งแรงของถังเก็บอากาศขนาด64ลิตรด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

เอกสารอ้างอิง (References)

- กระทรวงอุตสาหกรรม. (2541) มาตรฐานอุตสาหกรรมเหล็กกล้าคาร์บอนรีดร้อนแผ่นม้วนแผ่นแถบแผ่นหนาและบาง สำหรับงานโครงสร้างทั่วไป(แก้ไขครั้งที่1). สืบค้น 19 มีนาคม 2562, จาก <https://www.tisi.go.th/data/standard/fulltext/TIS-1479-2540m.pdf>.
- วิวิทย์ วรรณานัน, สมชาย เหลืองสด และประกอบ ชาตฤกษ์. (2554). การวิเคราะห์ความเค้มของความเค้นที่เกิดขึ้นในหัววีฟฟอร์มด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์, วรสารวิชาการและวิจัย มทร.พระนคร, 5(1), 13-23
- สุทธา หิรัญธนวัฒน์, ชูศักดิ์ ลิ้มสกุล บุญเจริญ วงศ์กิตติศึกษา, พรัชชัย พฤกษ์ภัทรานันต์ และสุระพล เขียว มนต์วี. (2555). การวัดค่าแรงจากการบริหารข้อเข่าแบบ Bending Stress ด้วยอุปกรณ์สเตรนเกจ. ใน การประชุม วิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่4 (น. 120-124). หนองคาย: เครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล.
- อรรถพล ชัยมนัสกุล, (2556). การศึกษาความเค้นในถังแรงดันแนวนอนและแท่นรองรับด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ วรสารวิชาการ มหาวิทยาลัยธนบุรี ครั้งที่7 (น. 26-34)
- Arduino. (Online). Getting Started with Arduino UNO. Retrieved 30 April 2019, from [https://www.arduino.cc/en/Guide/Arduino UNO](https://www.arduino.cc/en/Guide/Arduino%20UNO).
- Handheld data logger. (Online). Handheld data logger TC-32K. Retrieved 5 September 2019, from https://tml.jp/eng/document/instrument/TC-32K_E3000D.pdf.
- Strain gauge. (Online). General use strain gauge. Retrieved 5 September 2019, from https://tml.jp/e/product/strain_gauge/f_list.html.
- Tokyo measuring instruments lab. (Online). Strain gauge bridge circuit. Retrieved 5 September 2019 from https://www.tml.jp/eng/document/catalog/StrainGauges_E1007E.pdf.

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล	นายสกันธ์ เส็งสุวรรณ
วัน เดือน ปีเกิด	18 เมษายน 2529
ที่อยู่	226 ม.2 ต.นครสวรรค์ออก อ.เมือง จ.นครสวรรค์ 60000
การศึกษา	ปริญญาตรี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ประสบการณ์การทำงาน	1. Product design engineer (Daiwa kasei thailand) 2. Engineer (Citizen seimitsu thailand)
เบอร์โทรศัพท์	080-6020411
อีเมล	sakon_pa@hotmail.com
ID Line	sakonpick

