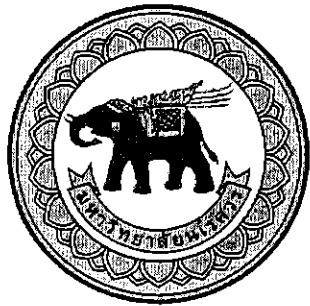


อกินันทนาการ



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

การออกแบบอุปกรณ์วัดแรงในแนวแกนและการบิด Design of axial and torsional load transducer

สำนักหอสมุด มหาวิทยาลัยเรศวร
วันลงทะเบียน... 17 ส.ค. 2559
เลขทะเบียน... 16994564
เลขเรียกหนังสือ... 9 TA

โดย

ผศ.ดร.รัตนา การรุณบุณยานันท์

นายเกติชูร์ กว้างตระกูล

ว.ส.ส.

ฯ

ฯ

ฯ

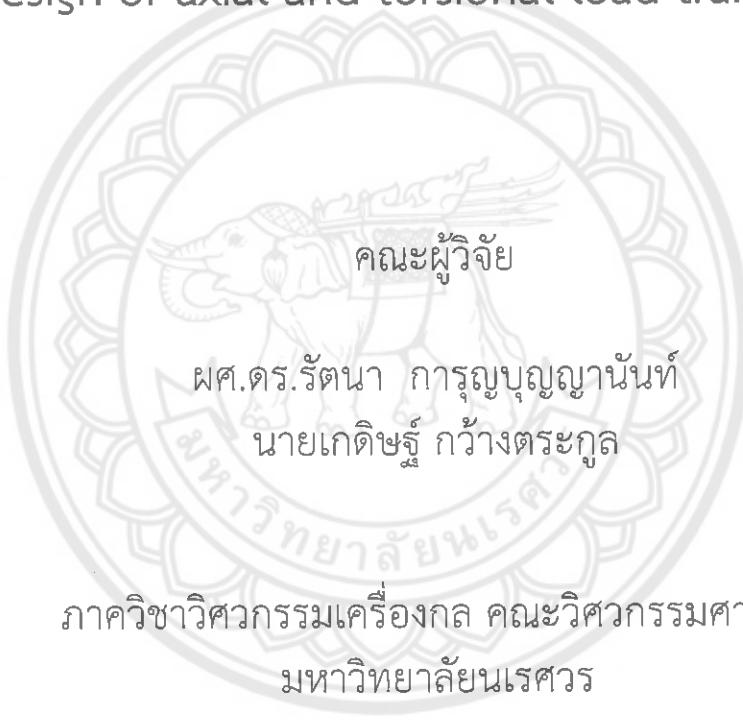
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเรศวร

สนับสนุนโดยกองทุนวิจัยมหาวิทยาลัยเรศวร
ประจำปีงบประมาณ 2556

สัญญาเลขที่ R2556C117

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

การออกแบบอุปกรณ์วัดแรงในแนวแกนและการบิด
Design of axial and torsional load transducer



ผศ.ดร.รัตนา การณบุญญาณนันท์
นายเกติชุรุก กว้างตระกูล

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยนเรศวร

สนับสนุนโดยกองทุนวิจัยมหาวิทยาลัยนเรศวร
ประจำปีงบประมาณ 2556

ชื่อโครงการ : การออกแบบอุปกรณ์วัดแรงในแนวแกนและการบิด
 ชื่อผู้วิจัย: ผศ.ดร.รัตนา การรุณบุญญาณนท์* และ นายเกดิษฐ์ กว้างตระกูล

บทคัดย่อ

โครงการวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบ สร้าง และทดสอบอุปกรณ์วัดแรงในแนวแกนและการบิด (ไฮโลเดเซลล์) ที่สามารถวัดแรงในแนวแกนได้สูงสุด 500 นิวตัน และวัดการบิดได้สูงสุด 50 นิวตัน-เมตร เลือกใช้วัสดุสแตนเลส 304 ทำขึ้นงาน จากการออกแบบและวิเคราะห์ด้วยระบบวิธีไฟเนต์เอลิเม้นต์ด้วยโปรแกรม COMSOL Multiphysics 3.2 ได้รูปแบบชิ้นงานที่มีความเหมาะสมคือชิ้นงานที่มีลักษณะเป็นทรงกระบอกวงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในอก 31 มิลลิเมตร ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 27 มิลลิเมตร สูง 76.2 มิลลิเมตร จะช่วยลดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร จำนวน 4 ครั้ง เจ้าหลักทั้งสองด้าน และทำการเชื่อมร่องขนาดกว้าง 2 มิลลิเมตรในแนวระดับหลังกันระหว่างสองรู เจ้าหลักขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 8 มิลลิเมตรหลักทั้งสองด้านสำหรับร้อยสลัก คือ ด้านบนและด้านล่างของไฮโลเดเซลล์ โดยที่รั้งสองด้านจะเจาะตั้งจากกัน (เมื่อมองจากวิวด้านบน) ติดตั้งสเตrnเกจขนาด 350 โอห์ม ชนิด KFG-5-350-C1-16L30C2R ใช้สเตรนเกจ 4 ตัวต่อวงจร มีจำนวน 2 วงจร คือวงจรสำหรับวัดแรงในแนวแกน และวงจรสำหรับวัดการบิด แต่ละวงจรต่อแบบวีทสโนตนบริดจ์ การทดสอบทำสองวิธีคือ 1) การทดสอบรับแรงในแนวแกนเพียงอย่างเดียวด้วยเครื่องวัดความแข็งแรงของวัสดุ และ 2) ทดสอบรับการบิดเพียงอย่างเดียวด้วยแท่นทดสอบ และ 3) รับแรงในแนวแกนและการบิดพร้อมกันทดสอบด้วยแท่น จากการทดสอบพบว่า กรณีที่ไฮโลเดเซลล์รับการบิดเพียงอย่างเดียว มีค่า rate of sensitivity 0.3520 μ/N , Repeatability error สูงสุด 0.768 %FSO, Hysteresis error สูงสุด 1.761 %FSO, Regression error สูงสุด 1.126 %FSO และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (S) = 10.8532 N สำหรับกรณีที่ไฮโลเดเซลล์รับการบิดเพียงอย่างเดียว มีค่าเท่ากับ 28.5573 $\mu/(N\cdot m)$, 1.187 %FSO, 2.219 %FSO, 0.991 %FSO, และ S = 0.4746 N·m ตามลำดับ ผลจากการทดสอบไฮโลเดเซลล์พบว่ามีสัญญาณแทรกข้าม (crosstalk) เกิดขึ้น จึงทดสอบด้วยการใส่แรงในแนวแกนและการบิดพร้อมกัน จากการทดสอบพบว่า สามารถสร้างสมการการถดถอยที่มี Regression error สูงสุด 2.822 %FSO และ 4.142 %FSO และพบว่า S = 14.1110 N, S = 0.218599 N·m สำหรับประมาณค่าแรงในแนวแกน และประมาณค่าการบิด ตามลำดับ จากงานวิจัยนี้ พบว่า การวิเคราะห์หาสมการการถดถอยที่เหมาะสมไม่สามารถพิจารณาค่า R^2 เพียงอย่างเดียวได้ ให้พิจารณาส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานร่วมด้วย การใช้สมการพหุนามให้มีดีกรีสูงขึ้น สามารถลดส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานลงได้ และการพิจารณาค่า p-value ร่วมด้วย จะทำให้ได้สมการการถดถอยที่มีความถูกต้องมากขึ้น และการออกแบบไฮโลเดเซลล์ให้มีสัญญาณแทรกข้าม (crosstalk) เกิดขึ้นน้อยที่สุด ควรได้รับการศึกษาและวิจัยต่อไป

*D.Eng. (Agricultural Systems and Engineering) ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยแม่ฟ้าหลวง โทร 0-5596-3920-1 โทรสาร 0-5596-4004 email: rattanakar@nu.ac.th

Title : Design of axial and torsional load transducer
 Authors: Asst.Prof.Dr.Rattana Karoonboonyanan^{*} and Kadit Kwangtrakul

Abstract

The objectives of this study are to design, build and test the axial and torsional load transducer or load cell which can measure the axial load up to 500 N and the torsional load up to 50 N·m. Stainless steel 304 was chosen as the material for designing and building the load cell. Each design of load cell was simulated by Finite Element Method (FEM) run on COMSOL Multiphysics 3.2 program. The optimal design was the hollow cylinder of 31 mm OD, 27mm ID and 76.2 mm high. The load cell was 10 mm drilled through for 4 holes with 2-mm slots joining the holes. Pin holes, 8 mm, were drilled at both ends of the load cell in perpendicular directions, viewed from top view. The 350-Ohm strain gauges, KFG-5-350-C1-16L30C2R type, were installed as 2 Wheatstone bridge circuits; one circuit was responsive to axial load and the other to torsional load. Testing of the load cell was conducted in three modes, which are, 1) Axial-only mode, where axial load was applied by Universal Testing Machine (UTM), 2)Torque-only mode, on the herein developed test bench and 3)Combined load mode, on the test bench. The results of axial-only mode showed the rate of sensitivity of $0.3520 \mu/N$, repeatability error up to 0.768 %FSO, hysteresis error up to 1.761 %FSO, regression error up to 1.126 %FSO and standard deviation (S) of 10.8532 N while in torque-only mode, the rate of sensitivity was $28.5573 \mu/(N\cdot m)$ and the errors were respectively, 1.187 %FSO, 2.219 %FSO, 0.991 %FSO and S = 0.4746 N·m. Interference from the loads to the other circuit, or crosstalk, was observed in the experiments; therefore, the load cell was tested in combined load mode to create a set of regression equations to predict the load values, considering the strain signal from both circuits. The resulted equations could predict the load values with the regression error no greater than 2.822 %FSO and 4.142 %FSO with the standard deviations S = 14.1110 N and 0.218599 N·m for the predicted axial load and torque, respectively. This study showed that the suitable regression equations should not be evaluated by the R-square values only; the standard deviations should also be considered. The lower standard deviation could be obtained by using higher degree of polynomial with selective terms, excluding the insignificant coefficients showing high p-values. In next study, the design of load cell to minimize the crosstalk should be studied.

^{*}D.Eng. (Agricultural Systems and Engineering) Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Naresuan University. Tel. (6655) 963920-1 โทรสาร (6655) 96-4004 email: rattanakar@nu.ac.th

กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัย การออกแบบอุปกรณ์วัดแรงในแนวแกนและการบิดนี้ได้รับทุนอุดหนุนจาก กองทุนวิจัยมหาวิทยาลัยนเรศวร ประจำปีงบประมาณ 2556 คณบุคคลดำเนินโครงการขอขอบพระคุณ มหาวิทยาลัยนเรศวรเป็นอย่างสูง

ขอขอบคุณ ดร.ทศพล ตรีรุจิราภพศ์ ที่ให้ความอนุเคราะห์และช่วยแนะนำการใช้เครื่อง ทดสอบความแข็งแรงของวัสดุ

ขอขอบคุณนิสิตภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล รวมทั้งเจ้าหน้าที่ของคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร สำหรับความร่วมมืออย่างดียิ่งในการสอบเทียบอุปกรณ์ต้นแบบ

และสุดท้ายนี้ ขอขอบคุณกองบริหารงานวิจัย มหาวิทยาลัยนเรศวร และผู้ที่เกี่ยวข้องทุกท่าน ที่คุยประสานงาน ช่วยเหลือและให้คำแนะนำที่เป็นประโยชน์ต่อการดำเนินโครงการมาโดยตลอด

คณบุคคลดำเนินโครงการวิจัย

เมษายน 2558



สารบัญ	หน้า
บทคัดย่อ	ก
Abstract	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	
สารบัญรูป	
 บทที่ 1 บทนำ	 1
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	1
1.3 วิธีการดำเนินการวิจัย และสถานที่ทำการทดลอง/เก็บข้อมูล	1
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
1.5 แผนการถ่ายทอดเทคโนโลยีหรือผลการวิจัยสู่กลุ่มเป้าหมาย	2
 บทที่ 2 การออกแบบอุปกรณ์วัดแรงในแนวแกนและการบิด	 3
2.1 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	3
2.2 การพัฒนาอุปกรณ์วัดแรงในแนวแกนและการบิด	5
2.3 การสอบเทียบอุปกรณ์วัดแรงในแนวแกนและการบิด	13
2.4 การวิเคราะห์ผลการสอบเทียบ	19
 บทที่ 3 ผลการทดสอบและการวิเคราะห์	 24
3.1 ผลของแรงกระทำในแนวแกนกับสมการการณ์ถอย	24
3.2 ผลของภาระบิดกับสมการการณ์ถอย	26
3.3 ผลของแรงกระทำในแนวแกนและการบิด (crosstalk) กับสมการการณ์ถอย	29
 บทที่ 4 สรุปผลและข้อเสนอแนะ	 44
4.1 บทสรุป	44
4.2 ข้อเสนอแนะ	46
	54
 บทที่ 5 การใช้ประโยชน์จากการวิจัย	 47
5.1 การประยุกต์ใช้ในโครงการวิจัย การออกแบบและพัฒนาเครื่องปอกเปลือกทุเรียน	47
5.2 การประยุกต์ใช้ในโครงการวิจัย การพัฒนาเครื่องพรวนกำจัดวัชพืชในนาข้าว	48
5.3 การเรียนการสอนในวิชาปฏิบัติการวิศวกรรมเครื่องกล	49
เอกสารอ้างอิง	50
ภาคผนวก	52

สารบัญตาราง

	หน้า	
ตารางที่ 1.1	แผนการดำเนินงาน	4
ตารางที่ 3.1	ข้อมูลการวัดทางกลของอุปกรณ์วัดแรงในแนวแกนและภาระบิดตันแบบ เมื่อรับแรงในแนวแกนเพียงอย่างเดียว	25
ตารางที่ 3.2	ข้อมูลการวัดทางกลของอุปกรณ์วัดแรงในแนวแกนและภาระบิดตันแบบ เมื่อรับภาระบิดเพียงอย่างเดียว	28
ตารางที่ 3.3	ผลของสัญญาณแทรกข้าม (crosstalk) เมื่อไส้ภาระกระทำเพียงอย่าง เดียว	29
ตารางที่ 3.4	ผลการวิเคราะห์สมการพหุนามดีกรี 1 ของแรงในแนวแกน	31
ตารางที่ 3.5	Analysis of variance ของสมการพหุนามดีกรี 1 ของแรงในแนวแกน	31
ตารางที่ 3.6	ผลการวิเคราะห์สมการพหุนามดีกรี 1 ของภาระบิด	31
ตารางที่ 3.7	Analysis of variance ของสมการพหุนามดีกรี 1 ของภาระบิด	31
ตารางที่ 3.8	ผลการวิเคราะห์สมการพหุนามดีกรี 2 ของแรงในแนวแกน	33
ตารางที่ 3.9	Analysis of variance ของสมการพหุนามดีกรี 2 ของแรงในแนวแกน	34
ตารางที่ 3.10	ผลการวิเคราะห์สมการพหุนามดีกรี 2 ของภาระบิด	34
ตารางที่ 3.11	Analysis of variance ของสมการพหุนามดีกรี 2 ของภาระบิด	34
ตารางที่ 3.12	ผลการวิเคราะห์สมการพหุนามดีกรี 3 ของแรงในแนวแกน	37
ตารางที่ 3.13	Analysis of variance ของสมการพหุนามดีกรี 3 ของแรงในแนวแกน	37
ตารางที่ 3.14	ผลการวิเคราะห์สมการพหุนามดีกรี 3 ของภาระบิด	38
ตารางที่ 3.15	Analysis of variance ของสมการพหุนามดีกรี 3 ของภาระบิด	38
ตารางที่ 3.16	ผลการวิเคราะห์สมการพหุนามดีกรี 3 ของแรงในแนวแกนหลังจาก ปรับปรุงสมการ	40
ตารางที่ 3.17	Analysis of variance ของสมการพหุนามดีกรี 3 ของแรงในแนวแกน หลังจากปรับปรุงสมการ	40
ตารางที่ 3.18	ผลการวิเคราะห์สมการพหุนามดีกรี 3 ของภาระบิดหลังจากปรับปรุง สมการ	41
ตารางที่ 3.19	Analysis of variance ของสมการพหุนามดีกรี 3 ของภาระบิดหลังจาก ปรับปรุงสมการ	42
ตารางที่ 3.20	ข้อมูลการวัดทางกลของอุปกรณ์วัดแรงในแนวแกนและภาระบิดตันแบบ เมื่อรับแรงในแนวแกนและภาระบิดพร้อมกัน	42
ตารางที่ 3.21	สมการการถดถอยของอุปกรณ์วัดแรงในแนวแกนและภาระบิดที่ได้ พัฒนา	43
ตารางที่ 4.1	ข้อมูลการวัดทางกลของอุปกรณ์วัดแรงในแนวแกนและภาระบิดตันแบบ เมื่อรับภาระเพียงอย่างใดอย่างหนึ่ง	45
ตารางที่ 4.2	ข้อมูลการวัดทางกลของอุปกรณ์วัดแรงในแนวแกนและภาระบิดตันแบบ เมื่อรับแรงในแนวแกนและภาระบิดพร้อมกัน	46

สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 มิติของอุปกรณ์วัดแรงและการบิดที่เหมาะสม	7
รูปที่ 2.2 มิติของสลัก	7
รูปที่ 2.3 แสดงผลการวิเคราะห์ด้วยระบบเบียบวีรีไฟไนต์เอลิเมนต์เมื่อชิ้นงานรับแรงอัด 500 นิวตัน	8
รูปที่ 2.4 แสดงผลการวิเคราะห์ด้วยระบบเบียบวีรีไฟไนต์เอลิเมนต์เมื่อชิ้นงานรับการบิด 50 นิวตัน·เมตร	9
รูปที่ 2.5 แผนภาพแสดงทิศทางของความเครียดหลักบนระนาบหลัก	10
รูปที่ 2.6 แผนภาพแสดงตำแหน่งการติดตั้งสเตронเกจ	10
รูปที่ 2.7 แผนภาพแสดงการต่อวงจรวีสโตนบริดจ์	11
รูปที่ 2.8 ชิ้นงานที่สร้างขึ้นจากผลการออกแบบ	11
รูปที่ 2.9 ชิ้นงานและอุปกรณ์ประกอบ	11
รูปที่ 2.10 ติดตั้งสเตронเกจและต่อวงจรวีสโตนบริดจ์	12
รูปที่ 2.11 อุปกรณ์วัดแรงในแนวแกนและภาระบิดที่เสริจสมบูรณ์	13
รูปที่ 2.12 การสอบเทียบแรงกระทำในแนวแกนด้วยเครื่องทดสอบความแข็งแรงของวัสดุ (UTM)	14
รูปที่ 2.13 รูปแบบการใส่แรงกระทำในแนวแกน	14
รูปที่ 2.14 แท่นทดสอบและการใช้งาน	15
รูปที่ 2.15 การสอบเทียบภาระบิดด้วยแท่นทดสอบที่ได้พัฒนา	17
รูปที่ 2.16 รูปแบบการใส่ภาระบิด	17
รูปที่ 2.17 การสอบเทียบแรงในแนวแกนและภาระบิดด้วยแท่นทดสอบที่ได้พัฒนา	18
รูปที่ 2.18 รูปแบบการใส่แรงกระทำในแนวแกนและภาระบิด	18
รูปที่ 3.1 แสดงค่าความเครียดของแรงอัดที่อ่านได้จากเครื่อง indicator กับแรงกระทำ	24
รูปที่ 3.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า error ต่างๆ กับแรงกระทำ	25
รูปที่ 3.3 แสดงค่าความเครียดของภาระบิดที่อ่านได้จากเครื่อง indicator กับแรงกระทำ	26
รูปที่ 3.4 แสดงค่าความเครียดของภาระบิดที่อ่านได้จากเครื่อง indicator กับภาระบิดที่กระทำ	26
รูปที่ 3.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า error ต่างๆ กับแรงกระทำ	27
รูปที่ 3.6 แสดงค่าความเครียดของภาระบิดที่อ่านได้จากเครื่อง indicator กับกระทำ	28
รูปที่ 3.7 แสดงค่าความเครียดของภาระบิดกับแรงและภาระบิดที่กระทำ	29
รูปที่ 3.8 แสดงค่าความเครียดของแรงกับภาระบิดและแรงที่กระทำ	30
รูปที่ 3.9 ความสัมพันธ์ระหว่าง Residual ของแรงในแนวแกนกับแรงที่กระทำ	32
รูปที่ 3.10 ความสัมพันธ์ระหว่าง Residual ของภาระบิดกับแรงในแนวแกนที่กระทำ	32
รูปที่ 3.11 ความสัมพันธ์ระหว่าง Residual ของแรงในแนวแกนกับภาระบิดที่กระทำ	32

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 3.12 ความสัมพันธ์ระหว่าง Residual ของการบิดกับการบิดที่กระทำ	32
รูปที่ 3.13 ความสัมพันธ์ระหว่าง Residual ของแรงในแนวแกนกับแรงที่กระทำ	35
รูปที่ 3.14 ความสัมพันธ์ระหว่าง Residual ของการบิดกับแรงในแนวแกนที่กระทำ	35
รูปที่ 3.15 ความสัมพันธ์ระหว่าง Residual ของแรงในแนวแกนกับการบิดที่กระทำ	35
รูปที่ 3.16 ความสัมพันธ์ระหว่าง Residual ของการบิดกับการบิดที่กระทำ	36
รูปที่ 3.17 ความสัมพันธ์ระหว่าง Residual ของแรงในแนวแกนกับแรงที่กระทำ	38
รูปที่ 3.18 ความสัมพันธ์ระหว่าง Residual ของการบิดกับแรงในแนวแกนที่กระทำ	39
รูปที่ 3.19 ความสัมพันธ์ระหว่าง Residual ของแรงในแนวแกนกับการบิดที่กระทำ	39
รูปที่ 3.20 ความสัมพันธ์ระหว่าง Residual ของการบิดกับการบิดที่กระทำ	39
รูปที่ 5.1 เครื่องปอกเปลือกทุเรียนแบบกึ่งอัตโนมัติตันแบบกับเครื่องมือวัด	47
รูปที่ 5.2 ลักษณะของแรงและภาระบิดที่ใช้ในการหมุนเจาะหัวกปอกเปลือกทุเรียน	47
รูปที่ 5.3 ประยุกต์ใช้อุปกรณ์วัดแรงในแนวแกนและการบิดกับการทดสอบลูกพรุน กำจัดวัชพืชในระบบดิน	48
รูปที่ 5.4 ตัวอย่างผลการทดสอบลูกพรุนกำจัดวัชพืชในระบบดิน	48



บทที่ 1 บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย

อุปกรณ์วัดแรงหรือโมเมนต์ (load cell) มีรูปแบบที่หลากหลายขึ้นอยู่กับการนำไปใช้งาน โดยอาศัยหลักการของความเครียด (strain) ซึ่งทำการวัดโดยการติดตั้งสเตรนเกจเข้ากับ load cell และต่อเป็นวงจรวีทสโตรนบริดจ์ และประยุกต์ใช้งานร่วมกับระบบรวบรวมข้อมูล (data acquisition system) รูปแบบของ load cell ที่มีใช้อยู่ในปัจจุบัน เช่น รูปวงแหวน สามารถวัดแรงในแนวแกนได้เพียงทิศทางเดียว (Hoag and Yoerger, 1975; Kumar and Sharma, 2012) หรือการติดสเตรนเกจกับสลักยืดอุปกรณ์ต่อพ่วงรถแทรกเตอร์ ซึ่งสามารถวัดแรงได้ 2 แนวแกน (Karoonboonyanan et al., 2007) สำหรับ Octagonal ring (Karabay, 2005; Saglam and Uluvar, 2001) และ Extended octagonal ring (EOR) (Godwin, 1975; O'Dogherty, 1996) สามารถวัดแรงได้ 2 แนวแกนและโมเมนต์ได้ 1 แนวแกน สำหรับ Double extended octagonal ring (DEOR) สามารถวัดแรงในแนวแกนได้ 3 แนวแกนและโมเมนต์ได้ 2 แนวแกน (Watyotha and Salokhe, 2001) และ อีกรูปแบบหนึ่งคือการติดตั้งสเตรนเกจเข้ากับเพลาโดยตรง ซึ่งวิธีนี้สามารถถอดภาระบิด (torque) ได้

เนื่องจากในงานวิจัยบางอย่าง เช่น การออกแบบอุปกรณ์ปอกเปลือกหูเรียน ซึ่งต้องมีการศึกษาหาแรงที่ใช้ในการกดผลหูเรียนและภาระบิดที่ใช้ในการหมุนเพื่อบีบเปลือกหูเรียนให้มีการฉีกออก ซึ่ง load cell ที่มีอยู่ในปัจจุบันไม่มีรูปแบบใดที่สามารถใช้ในงานดังกล่าวได้ ดังนั้น อุปกรณ์วัดแรงในแนวแกนและภาระบิดที่จะทำการศึกษาเป็นรูปแบบใหม่และมีความสำคัญที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับงานที่ต้องการวัดแรงในแนวแกนและภาระบิดได้

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 1) เพื่อศึกษาและออกแบบอุปกรณ์วัดแรงในแนวแกนและภาระบิดรูปแบบใหม่ที่สร้างได้ง่าย
- 2) เพื่อศึกษาหาตำแหน่งการติดตั้งสเตรนเกจให้เหมาะสมโดยใช้ระบบเบี้ยบวีไฟแน็ตเติลเม้นต์
- 3) เพื่อสร้างและสอบเทียบอุปกรณ์วัดแรงในแนวแกนและภาระบิดที่ได้ทำการออกแบบ

1.3 วิธีการดำเนินการวิจัย และสถานที่ทำการทดลอง/เก็บข้อมูล

- 1) ศึกษาทฤษฎีและรูปแบบของอุปกรณ์วัดภาระ (load cell) รูปแบบต่างๆ
- 2) ออกแบบอุปกรณ์วัดแรงในแนวแกนและภาระบิด และวิเคราะห์ผลการออกแบบโดยใช้ระบบเบี้ยบวีไฟแน็ตเติลเม้นต์เพื่อหารูปแบบ ขนาดของโหลดเซลล์ให้เหมาะสมกับภาระที่ต้องการวัด และตำแหน่งการติดตั้งสเตรนเกจให้เหมาะสม
- 3) สร้างอุปกรณ์วัดแรงในแนวแกนและภาระบิดต้นแบบ
- 4) ทำการติดตั้งสเตรนเกจและต่อวงจรวีทสโตรนบริดจ์
- 5) ออกแบบและสร้างแท่นทดสอบ และอุปกรณ์ประกอบต่างๆ เพื่อใช้ในการสอบเทียบ
- 6) ทำการสอบเทียบอุปกรณ์วัดแรงในแนวแกนและภาระบิด โดยใส่ภาระเพิ่มครั้งละ 10% และลดภาระครั้งละ 10%
- 7) สรุปและวิเคราะห์ผล และจัดทำรายงาน

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) ได้อุปกรณ์วัดแรงในแนวแกนและการบิดรูปแบบใหม่ที่สร้างได้ง่ายและมีความแม่นยำ
- 2) นักวิจัยสามารถนำรูปแบบอุปกรณ์วัดแรงในแนวแกนและการบิดรูปแบบใหม่ที่ทำการศึกษาไปประยุกต์ใช้กับงานวิจัยการออกแบบและพัฒนาเครื่องปอกเปลือกทุเรียน
- 3) ได้บทความวิชาการ
- 4) ได้อุปกรณ์ที่สามารถใช้สอนนิสิตในวิชาปฏิบัติการวิศวกรรมเครื่องกลได้

1.5 แผนการถ่ายทอดเทคโนโลยีหรือผลการวิจัยสู่กลุ่มเป้าหมาย

- 1) ตีพิมพ์บทความวิชาการหรือการนำเสนอในงานประชุมวิชาการ
- 2) ใช้สอนในวิชาปฏิบัติการวิศวกรรมเครื่องกล



บทที่ 2

การออกแบบอุปกรณ์วัดแรงในแนวแกนและการบิด

การออกแบบอุปกรณ์วัดแรงในแนวแกนและการบิด เพื่อให้ได้อุปกรณ์วัดแรงในแนวแกนและภาระบิดรูปแบบใหม่ ที่สามารถสร้างได้ง่าย ไม่ยุ่งยาก และมีความแม่นยำ ประกอบด้วยขั้นตอนดังต่อไปนี้

- 1) ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง : ศึกษาทฤษฎีของอุปกรณ์วัดแรงและโมเมนต์ (load cell) และรวมรวมข้อมูลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
- 2) การออกแบบอุปกรณ์วัดแรงในแนวแกนและการบิด: ออกแบบ วิเคราะห์ผลการออกแบบโดยใช้ระบบไฟฟ้าในตัวอเลิมิเนต์ สร้างชิ้นงานต้นแบบ และทำการติดตั้งสเตรนเกจและต่อวงจรวีทสโตรนบริดจ์
- 3) การสอบเทียบอุปกรณ์วัดแรงในแนวแกนและการบิด: วิธีการสอบเทียบ เครื่องมือหรืออุปกรณ์ที่ใช้ในการสอบเทียบ
- 4) การวิเคราะห์และสรุปผล: วิเคราะห์ผลการทดสอบ สรุปผล และจัดทำรายงาน

รายละเอียดของแต่ละขั้นตอนสรุปได้ดังต่อไปนี้

2.1 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1.1 ทฤษฎีของโหลดเซลล์

โหลดเซลล์คือ เช่นเซอร์หรือทرانสดิวเซอร์ที่สามารถแบ่งค่าแรงกด แรงดึง โมเมนต์หรือภาระบิด เป็นสัญญาณทางไฟฟ้าซึ่งสามารถวัดค่าอุกมาได้ด้วยเครื่องมือวัดทางไฟฟ้า โหลดเซลล์ได้ถูกนำไปใช้กับงานที่หลากหลาย เช่น การทดสอบความแข็งแรงของวัสดุ การทดสอบความแข็งแรงของชิ้นงาน การซั่งน้ำหนัก หรือประยุกต์ที่ใช้เป็นอุปกรณ์วัดภาระ (load) ในทิศทางต่างๆตามที่ต้องการ เป็นต้น

ชนิดของโหลดเซลล์ สามารถแบ่งออกได้เป็น 5 แบบ คือ

- 1) โหลดเซลล์แบบสเตรนเกจ (Strain gage load cell)
- 2) โหลดเซลล์แบบไฮดรอลิก (Hydraulic load cell)
- 3) โหลดเซลล์แบบนิวแมติก (Pneumatic load cell)
- 4) โหลดเซลล์แบบพิโซเรซิสทีฟ (Piezo resistive)
- 5) โหลดเซลล์แบบแมกเนโตสเตร็กทีฟ (Magnetostrictive)

ในงานวิจัยการออกแบบอุปกรณ์วัดแรงและการบิดนี้ ผู้วิจัยได้เลือกใช้โหลดเซลล์แบบสเตรนเกจ ซึ่งมีหลักการทำงานคือ เมื่อมีแรงมาระบิด ความเครียดจะเปลี่ยนแปลงเป็นสัดส่วนโดยตรงกับแรงที่มาระบิด เนื่องจากความเครียดหรือการเสียรูปทางกลไม่สามารถวัดค่าอุกมาได้ง่ายนัก จึงใช้สเตรนเกจซึ่งเป็นตัววัดความต้านทานทางไฟฟ้าตัวหนึ่ง ติดตั้งบนพื้นผิวของชิ้นงาน เมื่อความเครียดของชิ้นงานเปลี่ยนแปลง ความต้านทานทางไฟฟ้าของสเตรนเกจก็จะเปลี่ยนแปลงเป็นด้วยในสัดส่วนโดยตรงกับแรงที่มาระบิด ปกติมักจะใช้สเตรนเกจวัดความเครียด 4 ตัวต่อเป็นวงจร

วีทสโตนบริดจ์ (Wheatstone Bridge Circuit) ส่งสัญญาณอกมาเป็นแรงดันไฟฟ้าโดยที่แรงดันไฟฟ้าที่ได้จะมีหน่วยเป็น mV/V หรืออุปกรณ์แปลงสัญญาณบางชนิด สามารถวัดสัญญาณอกมาเป็นค่าความเครียด (strain) ได้

2.1.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

สเตรนเกจถูกนำมาประยุกต์ใช้ในการวัดความเครียดของชิ้นงานรูปแบบต่างๆ และนำผลการวัดไปหาแรงหรือโมเมนต์ รูปแบบของโหลดเซลล์ มีรูปร่างแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับการนำไปประยุกต์ใช้ ตัวอย่างการออกแบบและพัฒนาโหลดเซลล์ มีดังต่อไปนี้

สุรัสิทธิ์ และ สุภกิจ (2547) ได้ทำการศึกษาและออกแบบโหลดเซลล์ที่สามารถวัดแรงในแนวแกนได้ 20 ตัน ผู้วิจัยได้เลือกใช้โหลดเซลล์แบบหลายเสา (multiple type column load cell) สร้างแบบจำลองเป็นแบบอลิเมนต์สีเหลี่ยมแบนดูดต่อ และเนื่องไปในการออกแบบรูปร่างโหลดเซลล์ คือความเค้นไม่เกินค่าความเค้นพอนมิสเซส ใช้โปรแกรม ANSYS 7.0 ในการวิเคราะห์ เลือกใช้เหล็กกล้าไร้สนิม ASTM-304 และออกแบบให้โครงสร้างเป็นเสาจำนวน 4 เสา เส้นผ่าศูนย์กลางเสากลม 20 มม. ความยาวเสากลม 50 มม. พบร่วมค่า Rate of Sensitivity คือ 0.0044668 μ/N และค่า Hysteresis สูงสุดคือ -10.354 %FSO

Kumar and Sharma (2012) ได้ทำการศึกษาทำแนวการติดตั้งสเตรนเกจบนวงแหวน (ring transducer) โดยวิเคราะห์จากระเบียบวิธีไฟแนนซ์อลิเมนต์ และทำการเปรียบเทียบผลการวัดค่าแรงเมื่อติดสเตรนเกจที่ติดแน่นต่างๆ พบร่วม การติดตั้งสเตรนเกจที่ติดแน่นความเค้นสูงสุด 2 ตัว (ผิวนอกและผิวนอก) และที่ติดแน่นความเค้นต่ำสุด (40 องศากับแนวตั้ง) 2 ตัว (ผิวนอก) จะทำให้ความไวในการวัดแรงลดลงแต่สามารถลด Hysteresis Error ได้

Karoonboonyanan et al. (2007) ทำการวัดแรงดูดลากและแรงกระทำในแนวตั้งของเครื่องมือไกดินดานชนิดสั่นแบบขาเดียว โดยการประยุกต์ใช้สเตรนเกจ 350 โวท์มติดตั้งที่ลักษณะอุปกรณ์ต่อพ่วงรถแทรกเตอร์และที่แขนกลางเพื่อวัดแรงดูดลากและแรงกระทำในแนวตั้ง และแต่ละวงจรใช้สเตรนเกจ 4 ตัวต่อเป็นวงจรวีทสโตนบริดจ์ รวมเป็น 2 วงจร

Nalavade et al. (2010) ศึกษาทำแนวการติดตั้งสเตรนเกจบน Double extended octagonal ring เพื่อเอาไปใช้ในการวัดแรงกระทำบนจานไถแบบใช้กำลังขับ ใช้โปรแกรม ANASYS ในการวิเคราะห์หาทำแนวการติดตั้งสเตรนเกจ และใช้สมบัติของเหล็ก AISI 1010 ในการวิเคราะห์จากการศึกษาพบว่า ทำแนวติดตั้งสเตรนเกจที่เหมาะสมคือ ที่ติดแน่น 34 องศากับแนวตั้ง (แกน y) เพื่อใช้วัดแรงในแนวระดับ (แกน x) และที่ติดแน่น 90 องศากับแนวตั้งเพื่อวัดแรงในแนวแกน y จากการติดตั้งสเตรนเกจที่มุ่งดึงกล่าวพบผลของ cross sensitivity ต่ำกว่า 2 เปอร์เซ็นต์

จากการทบทวนวรรณกรรมจะเห็นได้ว่าทำแนวการติดตั้งสเตรนเกจที่เหมาะสมนั้นขึ้นอยู่กับรูปร่างของโหลดเซลล์ที่ทำการออกแบบเพื่อให้เหมาะสมกับภาระที่จะทำการวัด โดยใช้รูเบียบวิธีไฟแนนซ์อลิเมนต์ซึ่งในกระบวนการวิเคราะห์หาทำแนวที่เหมาะสมก่อนที่จะทำการสร้างชิ้นงานและติดตั้งสเตรนเกจ เพื่อเป็นการลดเวลาและค่าใช้จ่ายในการสร้างโหลดเซลล์

การสอบเทียบความถูกต้องของโหลดเซลล์หลังจากที่มีการสร้างและติดตั้งสเตรนเกจมีความสำคัญ ซึ่งนักวิจัยมีรูปแบบการสอบเทียบที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับรูปแบบของโหลดเซลล์ที่ทำการออกแบบ จากผลของการสอบเทียบ จะต้องทำการวิเคราะห์เพื่อหาสมการการทดถอย ซึ่งมีวิธีการต่างๆ ดังตัวอย่างต่อไปนี้

ISO 376 (2011) ได้ก่อส่วนที่วิธีการสอบเทียบความถูกต้องของอุปกรณ์พิสูจน์แรง (force-proving instruments) ซึ่งมีการแบ่งเป็น 4 แบบคือ

Case A: ค่าแรงจำเพาะ, มีการเพิ่มภาระเพียงอย่างเดียว

Case B: ค่าแรงจำเพาะ, มีการเพิ่มและลดภาระ

Case C: ค่าแรงต่อเนื่อง (interpolation) และมีการเพิ่มภาระเพียงอย่างเดียว

Case D: ค่าแรงต่อเนื่อง (interpolation) และมีการเพิ่มและลดภาระ

สรุนทร์ และคณะ (2546) ได้ใช้อุปกรณ์วัดแรง Extended Octagonal Ring (EOR) ซึ่งติดสเตตัรนเกจ จำนวน 12 ตัว ต่อเป็นวงจรแบบ Full Bridge 3 วงจร สำหรับวัดแรงกด (F) แรงเฉือน (P) และโมเมนต์ (M) ที่เกิดจากแรงด้านทันทันบนระบบที่ตั้งจากกับเพลาใบมีด เพื่อทำการออกแบบรูปร่างและการจัดเรียงใบมีดขอบหมุน จากการสอบเทียบแบบสหคติที่ลักษณะแกน พบว่าเกิดสัญญาณแทรกข้ามชั้นระหว่างวงจรบริจ์ ซึ่งสามารถหาความสัมพันธ์ต่างๆ ได้ดังนี้

$$F = 478789 V_F - 10772 V_P + 41089 V_M$$

$$P = 10889 V_F - 435559 V_P + 10798 V_M$$

$$M = 15007 V_F - 204673 V_P + 3003030 V_M$$

โดย V_F , V_P และ V_M มีหน่วยเป็น โวลต์ (V)

2.2 การพัฒนาอุปกรณ์วัดแรงในแนวแกนและการบิด

2.2.1 ข้อพิจารณาในการออกแบบ

เนื่องจากผู้วิจัยต้องการที่จะศึกษาและออกแบบอุปกรณ์วัดแรงในแนวแกนและการบิด เพื่อนำไปประยุกต์ใช้กับงานวิจัยการออกแบบและพัฒนาเครื่องปอกเปลือกทุเรียน เพื่อศึกษาหารูปแบบการปอกเปลือกที่เหมาะสม จากการศึกษาพบว่า อนุพันธ์ และปราโมทย์ (2552) ได้ทำการศึกษาหาแรงกดและแรงเฉียบเปลือกทุเรียนด้วยการใช้ตาชั่งสปริง กล่าวคือ ตาชั่งสปริงถูกติดตั้งกับแขนหัวใจ ทำการกดหัวใจลงพร้อมกับอ่านค่าแรงกดสูงสุดจนหัวใจมีดผลทุเรียนแล้วหยุดเวลา จากนั้นนำตาชั่งสปริงย้ายไปติดตั้งกับแขนหมุนหัวใจ เริ่มจับเวลาต่อ พร้อมกับดึงแขนหมุนหัวใจหมุนจนผลทุเรียนแยกออกจากกันแล้วหยุดเวลา อ่านค่าแรงสูงสุด จะเห็นได้ว่า วิธีการใช้ตาชั่งสปริงจะได้ข้อมูลแรงใจและแรงเฉียบสูงสุดเท่านั้น ไม่สามารถอธิบายลักษณะหรือพฤติกรรมของแรงที่ใช้ในการเจาะหรือเฉียบเปลือกได้เนื่องจากความละเอียดของข้อมูลไม่เพียงพอ และขีดจำกัดของตาชั่งสปริง ดังนั้น ถ้ามีอุปกรณ์วัดแรงในแนวแกนและการบิดที่มีความละเอียดในการวัดเพียงพอ สามารถเก็บข้อมูลแรงกดและแรงเฉียบหรือการบิดไปพร้อมกัน และสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับการออกแบบและพัฒนาเครื่องปอกเปลือกทุเรียน หรือสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับการวิจัยและพัฒนาอื่นๆ สมควรได้รับการศึกษา

จากการศึกษาทฤษฎีและรูปแบบของโหลดเซลล์รูปแบบต่างๆ ที่มีรายงานและจำหน่ายทางการค้า พบว่าโดยส่วนใหญ่สามารถวัดแรงในแนวแกนได้อย่างเดียว เช่น รูปวงแหวน (ring) แบบเสา (column) รูปตัวเอส รูปตัว C เป็นต้น ซึ่งสามารถวัดแรงในแนวแกนได้เพียงทิศทางเดียว (Hoag and Yoerger, 1975; Kumar and Sharma, 2012) หรือวัดภาระบิดเพียงอย่างเดียวด้วยการติดตั้งสเตตัรนเกจเข้ากับเพลาโดยตรงและส่งสัญญาณผ่าน slip ring หรือเป็น torque transducer ซึ่งเป็นเครื่องมือวัดสำหรับรูปที่สามารถนำไปสามต่อเข้ากับเพลาที่ต้องการวัดภาระบิดได้โดยตรง รูปแบบของโหลดเซลล์ที่สามารถวัดแรงได้ 3 แนวแกนและโมเมนต์ได้ 1 แนวแกน เช่น

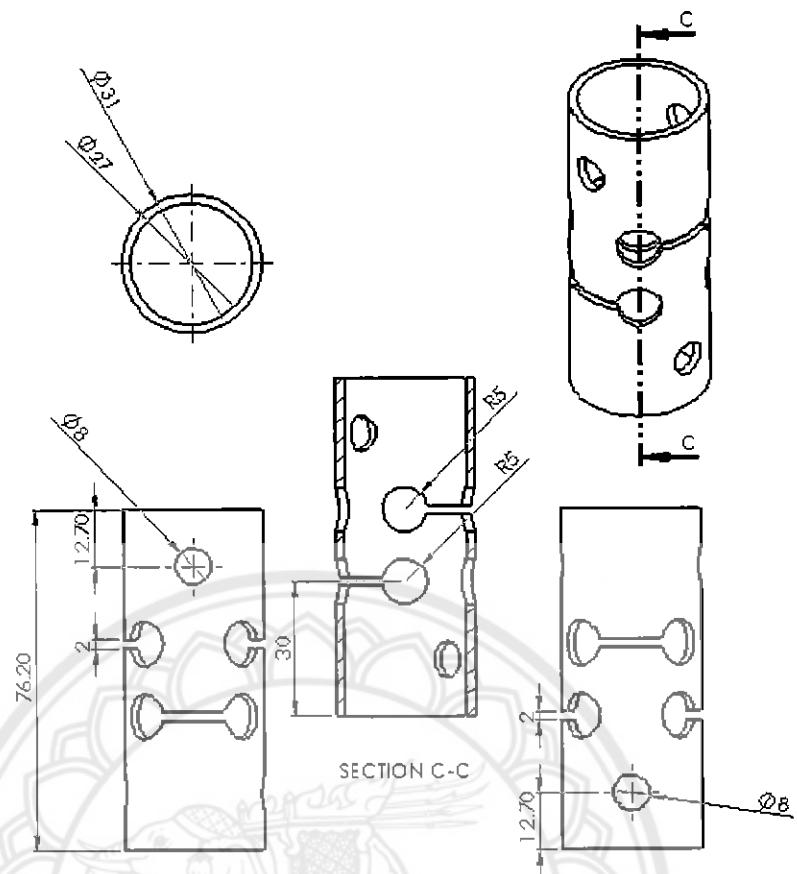
Extended octagonal ring (EOR) (Godwin, 1975; O'Dogherty, 1996) สำหรับ Double extended octagonal ring (DEOR) สามารถวัดแรงในแนวแกนได้ 3 แนวแกนและไม่เมนต์ได้ 2 แนวแกน (Watyotha and Salokhe, 2001) ซึ่งรูปแบบของอุปกรณ์วัดแรงในแนวแกนและการบิดที่จะทำการดำเนินการวิจัยไม่พบรายงานการศึกษามาก่อน

ข้อพิจารณาในการออกแบบอุปกรณ์วัดแรงและการบิด มีดังต่อไปนี้

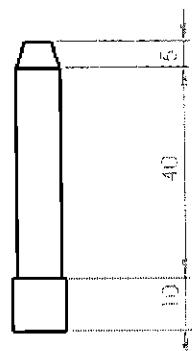
- 1) สามารถรับแรงในแนวแกนได้ 500 นิวตัน และรับการบิดได้ 50 นิวตัน·เมตร
- 2) ใช้วัสดุสแตนเลส 304
- 3) สามารถสร้างขึ้นได้ง่าย ไม่ซับซ้อน
- 4) สามารถทดสอบประกอบอุปกรณ์วัดแรงในแนวแกนและการบิดออกจากชิ้นงานที่จะทำการศึกษาได้ง่าย

2.2.2 การออกแบบและวิเคราะห์ผลการออกแบบโดยใช้ระบบวิเคราะห์ในตัวเรื่องเบี่ยงบิด

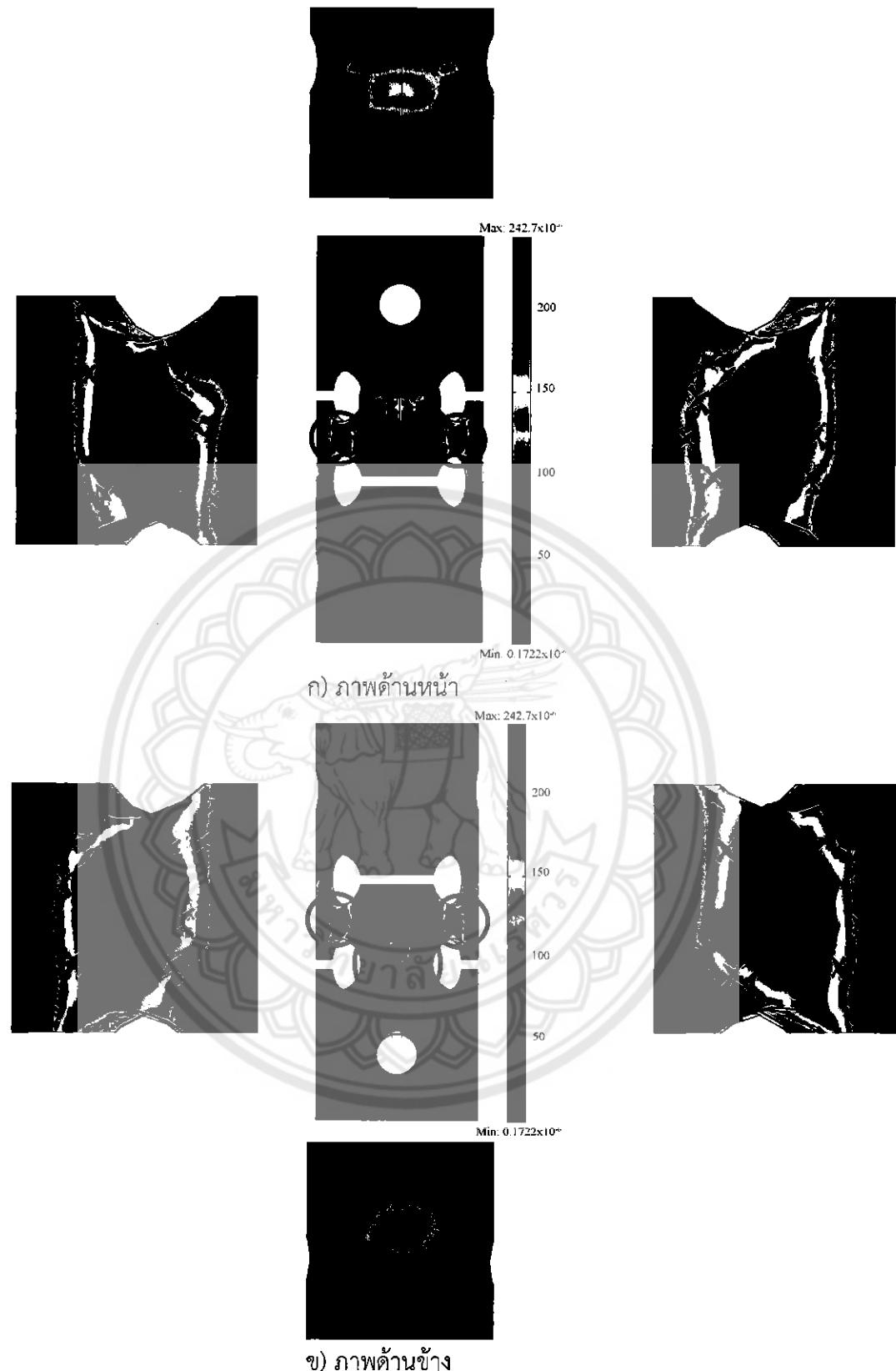
จากการศึกษาและออกแบบอุปกรณ์วัดแรงในแนวแกนและการบิด โดยมีเงื่อนไขในการออกแบบคือ สามารถวัดแรงในแนวแกนได้ 500 นิวตัน และรับการบิดได้ 50 นิวตัน·เมตร สร้างได้ง่าย และทดสอบประกอบได้ง่าย จึงเลือกใช้สลัก (pin) ใน การเชื่อมต่อระหว่างอุปกรณ์วัดกับชิ้นงานที่จะทำการวัดค่า เลือกใช้วัสดุสแตนเลส 304 ซึ่งมีค่า Modulus of Elasticity = 190 GPa จากการออกแบบและวิเคราะห์ด้วยระบบวิเคราะห์ในตัวเรื่องเบี่ยงบิดด้วยโปรแกรม COMSOL Multiphysics 3.2 จากการศึกษาหลายรูปแบบที่จะเป็นไปได้ พบร้า รูปแบบชิ้นงานที่มีความเหมาะสมคือ ชิ้นงานที่มีลักษณะเป็นทรงกระบอกกลวงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 31 มิลลิเมตร ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 27 มิลลิเมตร สูง 76.2 มิลลิเมตร เจาะรูกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร จำนวน 4 รู เจาะทะลุทั้งสองด้าน และทำการเชาะร่องขนาดกว้าง 2 มิลลิเมตรในแนวระดับทะลุถึงกันระหว่างสองรู เจาะรูขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 8 มิลลิเมตร ทะลุทั้งสองด้านสำหรับร้อยสลัก มีทั้งสองด้าน คือ ด้านบนและด้านล่างของโอลด์เซลล์ โดยที่รูทั้งสองด้านจะเจาะตั้งฉากกัน (เมื่อมองจากวิวด้านบน) รายละเอียดและขนาดของโอลด์เซลล์แสดงดังรูปที่ 2.1 สลัก แบ่งเป็น 3 ส่วนคือ 1) ส่วนหัว มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร ยาว 10 มิลลิเมตร มีไว้สำหรับจับและป้องกันการหลุดออกจากโอลด์เซลล์, 2) ส่วนกลาง มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 8 มิลลิเมตร ยาว 40 มิลลิเมตร และ 3) ส่วนท้าย มีความยาว 5 มิลลิเมตร และทำการลดขนาดเป็นมุมเอียงจากขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 8 มิลลิเมตรเหลือ 5 มิลลิเมตร เพื่อสะดวกในการร้อยสลัก รายละเอียดของสลักแสดงดังรูปที่ 2.2 ผลการวิเคราะห์ด้วยระบบวิเคราะห์ในตัวเรื่องเบี่ยงบิด เมื่อใส่แรงอัดขนาด 500 นิวตัน ผ่านสลักขนาด 8 มิลลิเมตร แสดงดังรูปที่ 2.3 และผลการวิเคราะห์จากการรับการบิดขนาด 50 นิวตัน·เมตร ผ่านสลักขนาด 8 มิลลิเมตร แสดงดังรูปที่ 2.4



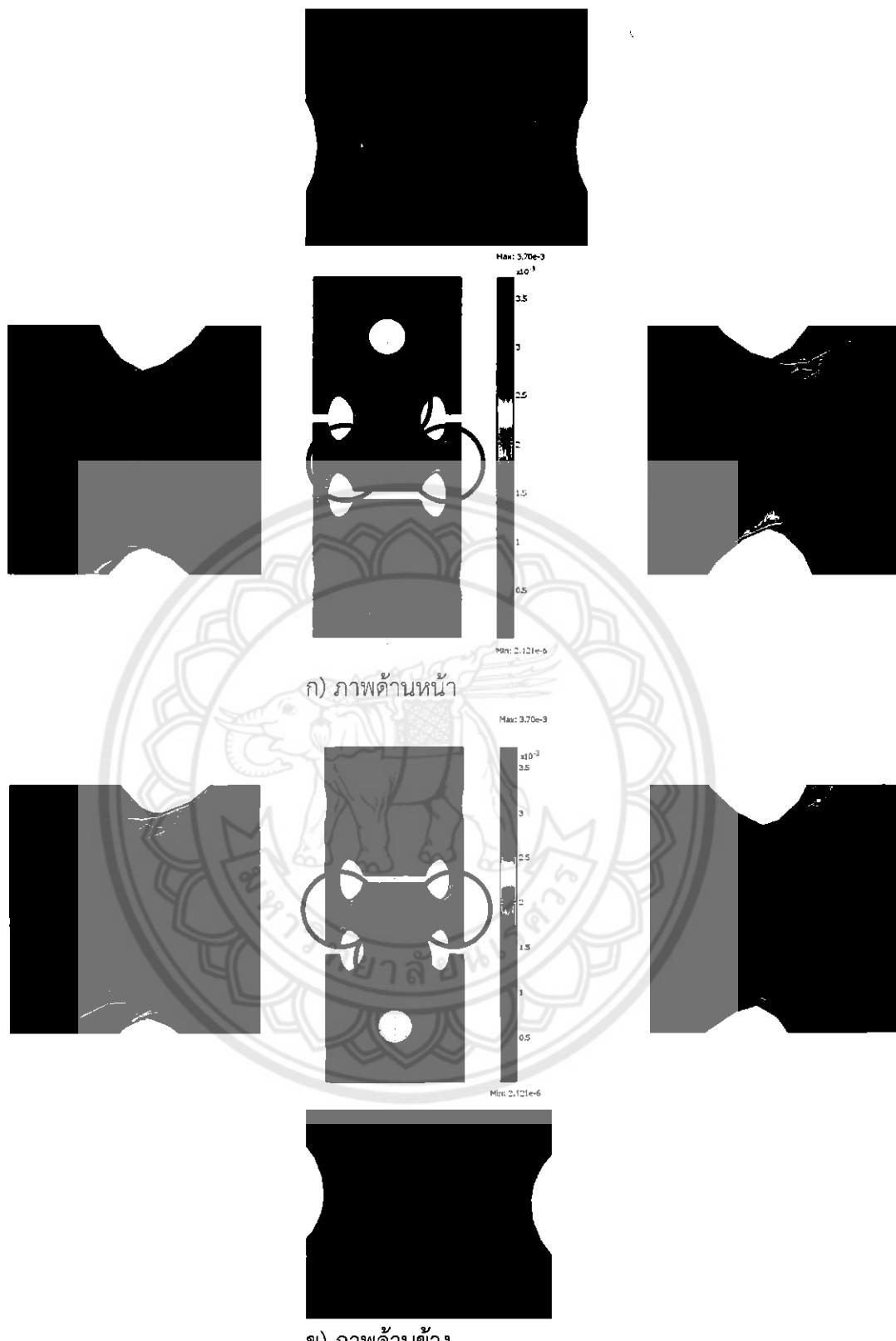
รูปที่ 2.1 มิติของอุปกรณ์วัดแรงและการบิดที่เหมาะสม



รูปที่ 2.2 มิติของ slack

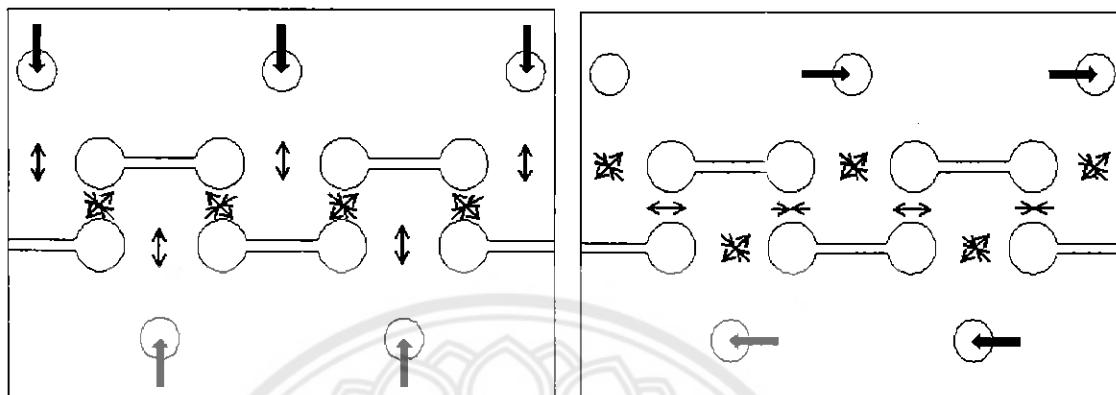


รูปที่ 2.3 แสดงผลการวิเคราะห์ด้วยระบบเบี่ยบวิธีไฟน์เติลิเมนต์เมื่อชั้นงานรับแรงอัด 500 นิวตัน



รูปที่ 2.4 แสดงผลการวิเคราะห์ด้วยระบบวิเคราะห์เมื่อชั้นงานรับภาระบีด 50 นิวตัน·เมตร

จากรูปที่ 2.3 และ 2.4 แสดงขนาดของความเครียดหลัก (Principal strain) ซึ่งแสดงด้วยสัญลักษณ์ และแสดงขนาดและทิศทางของความเครียดหลักบนระนาบหลัก (First principal strain) ซึ่งแสดงขนาดและทิศทางด้วยลูกศร เมื่อชิ้นงานรับแรงในแนวแกนด้วยแรงอัดขนาด 500 นิวตัน และรับภาระบิดในทิศทางทวนเข็มนาฬิกาขนาด 50 นิวตัน·เมตร เมื่อพิจารณาทิศทางของความเครียดหลักบนระนาบหลัก สามารถเขียนสรุปเป็นแผนภาพแสดงดังรูปที่ 2.5

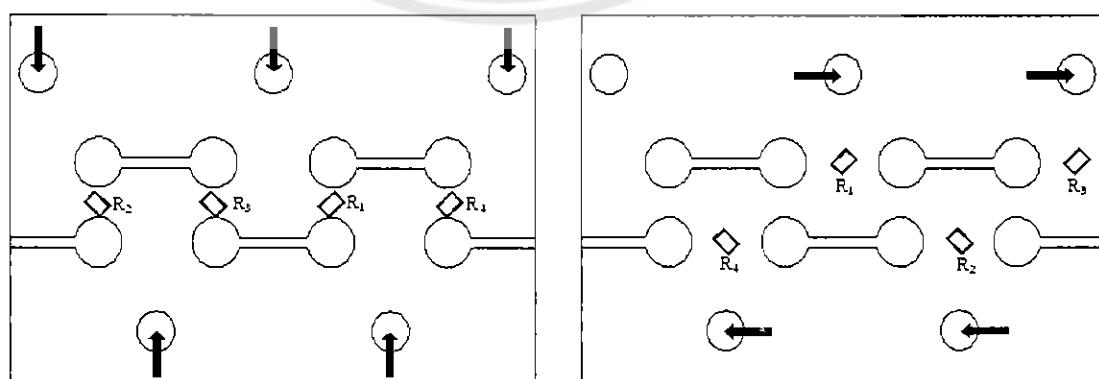


ก) ชิ้นงานรับแรงในแนวแกน

ข) ชิ้นงานรับภาระบิด

รูปที่ 2.5 แผนภาพแสดงทิศทางของความเครียดหลักบนระนาบหลัก

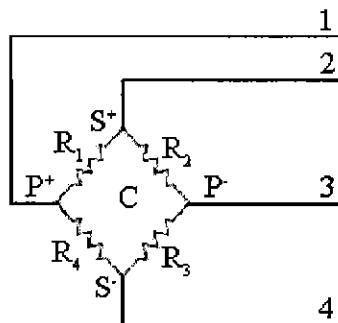
เนื่องจากอุปกรณ์วัดแรงในแนวแกนและการบิดที่ทำการศึกษา จะต้องสามารถวัดแรงและการบิดได้พร้อมกัน ดังนั้น จึงต้องพิจารณาหาตำแหน่งที่มีการเปลี่ยนแปลงความเครียดสูงสุดร่วมกับตำแหน่งที่ไม่ได้รับผลกระทบจากอิทธิพลอื่น เช่น เมื่อไส้แรงอัด จะต้องไม่มีผลต่อการวัดภาระบิด หรือเมื่อไส้ภาระบิด จะต้องไม่มีผลต่อการวัดแรงอัด เป็นต้น และพิจารณาผลตอบความไว (sensitivity output) จึงติดตั้งสเตรนเกจในทิศทางที่เกิดความเครียดหลักสูงสุดและความเครียดหลักต่ำสุด เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 2.5 แสดงตำแหน่งและทิศทางของความเครียดหลักบนระนาบหลัก เมื่อชิ้นงานได้รับแรงอัด (รูปที่ 2.5ก) และเมื่อได้รับภาระบิด (รูปที่ 2.5ข) ตำแหน่งที่จะติดตั้งสเตรนเกจที่เหมาะสมเพื่อที่จะใช้วัดแรงอัดและการบิด แสดงดังรูปที่ 2.6 และการต่อวงจรวีทสโตนบริดจ์ แสดงดังรูปที่ 2.7



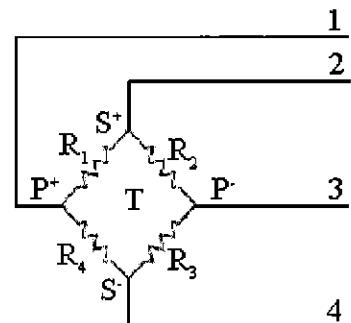
ก) ใช้วัดแรงในแนวแกน

ข) ใช้วัดภาระบิด

รูปที่ 2.6 แผนภาพแสดงตำแหน่งการติดตั้งสเตรนเกจ



ก) วงจรด้วยในแนวแกน



ข) วงจรด้วยการบิด

รูปที่ 2.7 แผนภาพแสดงการต่อวงจรที่สโตร์กอนบริดจ์

2.2.3 การสร้างอุปกรณ์วัดแรงในแนวแกนและการบิดด้านแบบ

2.2.3.1 การสร้างชิ้นงาน

สร้างชิ้นงานด้านแบบตามแบบ โดยใช้แท่งเพลาสแตนเลส 304 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 32 มิลลิเมตร กลึงและคิวนให้ได้ขนาดตามแบบที่ออกแบบไว้ ขั้นตอนที่ต้องทำ ชิ้นงานด้านแบบแสดงดังรูปที่ 2.8 และอุปกรณ์ประกอบ แสดงดังรูปที่ 2.9

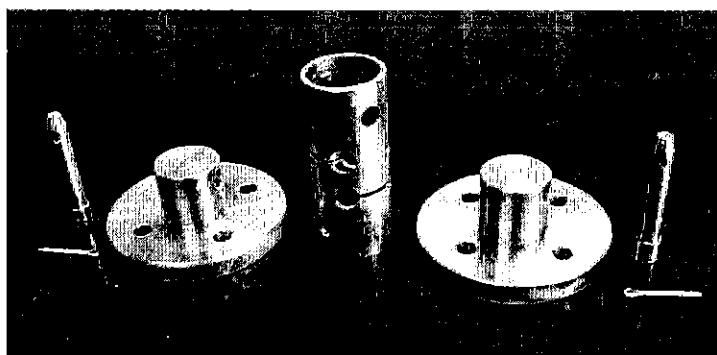


ก) ภาพด้านหน้า

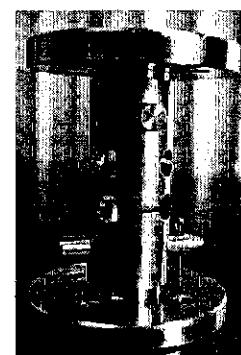


ข) ภาพด้านข้าง

รูปที่ 2.8 ชิ้นงานที่สร้างขึ้นจากผลการออกแบบ



ก) อุปกรณ์ประกอบ



ข) การประกอบชิ้นงาน

รูปที่ 2.9 ชิ้นงานและอุปกรณ์ประกอบ

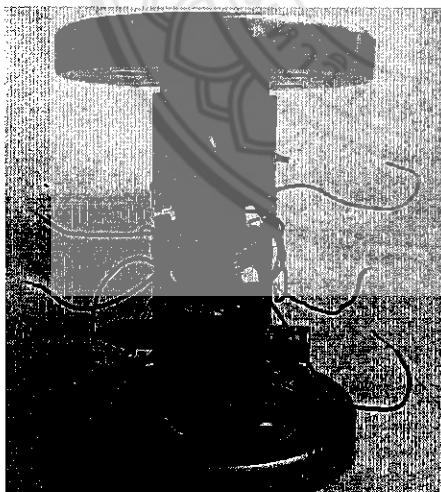
2.2.3.2 การติดตั้งสเตรนเกจและการต่อวงจร

สเตรนเกจและอุปกรณ์ที่เลือกใช้ มีดังต่อไปนี้

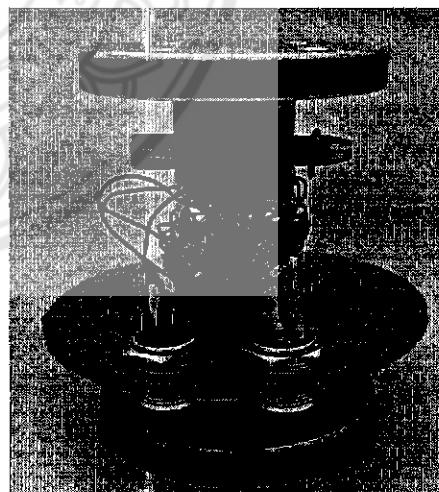
- 1) สเตรนเกจขนาด 350 โอมม์ ชนิด KFG-5-350-C1-16L30C2R ใช้สเตรนเกจ 4 ตัวต่อ วงจร มีจำนวน 2 วงจร
- 2) กาว KYOWA CC33A
- 3) เทอร์มินอล KYOWA Foil Type Gage Terminal Model : T-F7
- 4) วัสดุปิดทับ KYOWA Coating Agent Model : AK-22

ขั้นตอนในการติดตั้งสเตรนเกจมีดังต่อไปนี้

- 1) ขัดผิวชิ้นงานตรงตามตัวแบบที่ติดตั้งสเตรนเกจด้วยกระดาษรายละเอียดเบอร์ 2000 ผิวเรียบมัน
- 2) เช็คทำความสะอาดพื้นผิวด้วยอะซีติน
- 3) ทำความสะอาดพื้นผิวชิ้นงาน
- 4) หยดการบนสเตรนเกจ นำไปติดตั้งในตำแหน่งที่ออกแบบไว้ กดให้แน่นประมาณ 1 นาที ติดตั้งจนครบ ตั้งทึ้งไว้ในอุณหภูมิห้องไม่น้อยกว่า 1 ชั่วโมง
- 5) เชื่อมสายสัญญาณผ่านเทอร์มินอล และปลักเสียบด้วยการบัดกรี ต่อวงจรวิธสโนบридจ์ ตรวจสอบวงจร และตรวจวัดสัญญาณ (รูปที่ 2.10)
- 6) หุ้มด้วยวัสดุปิดทับซึ่งมีลักษณะคล้ายดินน้ำมันเพื่อป้องกันน้ำและความชื้น ปิดทับด้วย เทปสายไฟอิกชันหนึ่ง
- 7) สร้างกล่องใส่ป้องกันการกระแทกอีกชั้นหนึ่ง
- 8) อุปกรณ์วัดแรงในแนวแกนและการเบิดที่เสริสมบูรณ์แล้ว แสดงดังรูปที่ 2.11

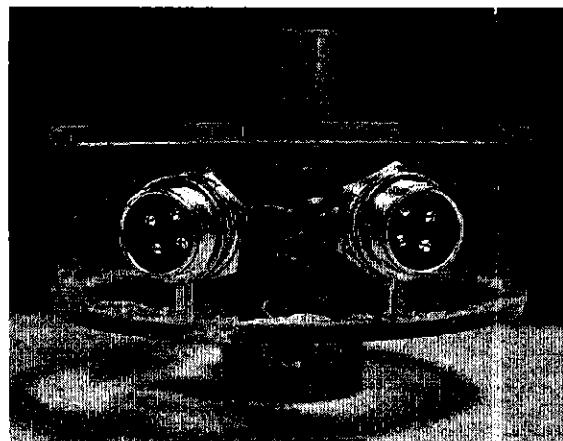


ก) ภาพด้านหน้า



ข) ภาพด้านข้าง

รูปที่ 2.10 ติดตั้งสเตรนเกจและต่อวงจรวิธสโนบридจ์



รูปที่ 2.11 อุปกรณ์วัดแรงในแนวแกนและการบิดที่เสรีjsmburin

2.3 การสอบเทียบอุปกรณ์วัดแรงในแนวแกนและการบิด

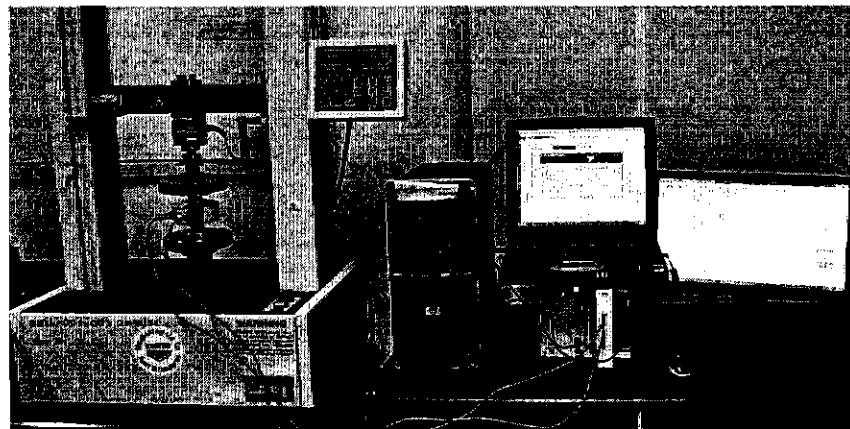
การสอบเทียบอุปกรณ์วัดแรงในแนวแกนและการบิดต้นแบบ ได้ทำการทดสอบโดยการใส่ภาระทิศทางแนวแกนเพื่อศึกษาหาความสัมพันธ์ของแรงต่อค่าความเครียดที่เกิดขึ้นและอ่านได้จากเครื่อง indicator (Universal strain gage module NI-SCXI-1520) และใช้โปรแกรม Instruments Measurement and Automation Explorer อ่านค่าสตูรน์ การทดสอบแบ่งเป็น 3 ส่วนคือ

- 1) การทดสอบหาความสัมพันธ์ระหว่างแรงอัดที่กระทำในแนวแกนกับค่าความเครียดที่อุปกรณ์วัดแรงในแนวแกนและการบิดต้นแบบอ่านค่าได้ ซึ่งทำการทดสอบด้วยเครื่องวัดความแข็งแรงของวัสดุ (UTM)
- 2) การทดสอบหาความสัมพันธ์ระหว่างภาระบิดกับค่าความเครียดที่อุปกรณ์วัดแรงในแนวแกน และภาระบิดต้นแบบอ่านค่าได้ ซึ่งทำการทดสอบด้วยแท่นทดสอบเฉพาะที่ออกแบบและสร้างขึ้น
- 3) การทดสอบหาความสัมพันธ์ระหว่างแรงอัดและการบิดกระทำพร้อมกันกับค่าความเครียดที่อุปกรณ์วัดแรงในแนวแกนและการบิดต้นแบบอ่านค่าได้ ซึ่งทำการทดสอบด้วยแท่นทดสอบที่ออกแบบและสร้างขึ้น

วิธีการและขั้นตอนการทดสอบ ได้ทำการประยุกต์จาก ISO 376:2011(E) รายละเอียดมีดังต่อไปนี้

2.3.1 การสอบเทียบด้วยเครื่องวัดความแข็งแรงของวัสดุ (UTM)

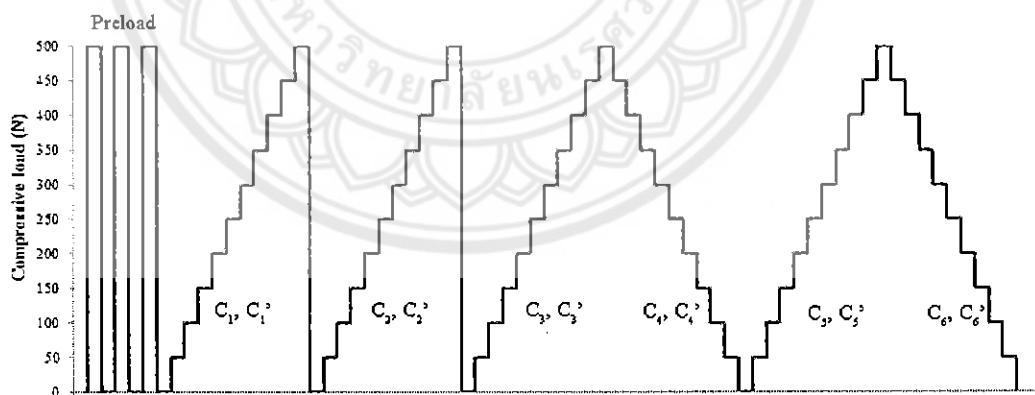
การทดสอบหาความสัมพันธ์ระหว่างแรงอัดที่กระทำในแนวแกนกับค่าความเครียดที่อุปกรณ์วัดแรงในแนวแกนและการบิดต้นแบบอ่านค่าได้ด้วยเครื่อง indicator ซึ่งทำการทดสอบใส่แรงอัดด้วยเครื่องวัดความแข็งแรงของวัสดุ (UTM) ดังรูปที่ 2.12 ใน การทดสอบอุปกรณ์วัดแรงในแนวแกน และภาระบิดนี้ จะทำการทดสอบที่มุม 0 องศา และมุม 180 องศา ด้วยการหมุนแท่นโหลดเซลล์ไป 180 องศา (การหมุนสลับด้านหน้า-ด้านหลัง) และร้อยสลัก



รูปที่ 2.12 การสอบเทียบแรงกระทำในแนวแกนด้วยเครื่องทดสอบความแข็งแรงของวัสดุ (UTM)

ขั้นตอนการทดสอบมีดังต่อไปนี้

- 1) ติดตั้งอุปกรณ์วัดแรงในแนวแกนและการบิดที่ได้ทำการพัฒนาเข้ากับอุปกรณ์จับยึดของเครื่อง UTM ด้วยการร้อยสลักยึด ต่อสายสัญญาณจากอุปกรณ์ต้นแบบกับเครื่อง indicator ใช้โปรแกรม Instruments Measurement and Automation Explorer อ่านและบันทึกค่าความเครียด (รูปที่ 2.12)
- 2) การทำ Pre load เป็นการวอร์มเครื่องก่อนทำการทดสอบ โดยการใส่แรงอัด 0 นิวตันที่เครื่อง UTM และอ่านค่าความเครียดที่อ่านได้จากเครื่อง indicator บันทึกผล จากนั้นทำการใส่แรงอัดเต็มความสามารถของอุปกรณ์วัดแรงในแนวแกนและการบิดที่พัฒนาขึ้นคือ 500 นิวตัน อ่านค่าความเครียดทั้งสองช่องสัญญาณ ทำซ้ำ 3 ช้ำ ดังรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 รูปแบบการใส่แรงกระทำในแนวแกน

- 3) ใส่แรงอัดจากเครื่อง UTM เพิ่มขึ้นครั้งละ 50 นิวตัน บันทึกค่าสเตรนที่อ่านได้จากเครื่อง indicator ทั้งสองช่องสัญญาณ จนกระทั่งเพิ่มแรงอัดถึง 500 นิวตัน และปล่อยแรงออก จนกระทั่งเหลือ 0 นิวตัน ดังซีรี่ย์ C₁ และซีรี่ย์ C₂

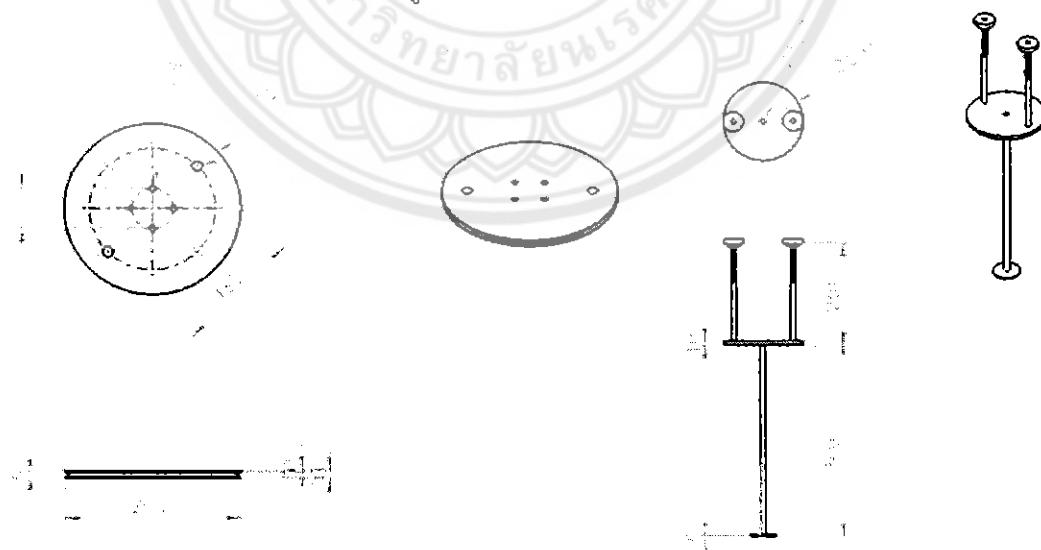
- 4) จากนั้นทำการเพิ่มแรงอัดครึ่งละ 50 นิวตัน จนกระทั้งเพิ่มแรงอัดถึง 500 นิวตัน ดังชีรี่ย์ C_3 และทำการลดแรงอัดครึ่งละ 50 นิวตัน จนกระทั้งเหลือ 0 นิวตัน ดังชีรี่ย์ C_4 ทำการทดสอบซ้ำ ดังชีรี่ย์ C_5 และ C_6
- 5) ทำการหมุนแทนอุปกรณ์วัดแรงในแนวแกนและการบิดตันแบบ 180 องศา (การหมุนสับปันด้านหน้า-ด้านหลัง) และทำการทดสอบซ้ำในข้อ 3 และ 4 ดังชีรี่ย์ C_1' , C_2' , C_3' , C_4' , C_5' และ C_6'
- 6) วิเคราะห์ผลการทดสอบ ดังรายละเอียดในหัวข้อ 2.4.1

2.3.2 การสอบเทียบด้วยแท่นทดสอบสำหรับวัดแรงในแนวแกนและการบิด

2.3.2.1 การออกแบบและสร้างแท่นสำหรับสอบเทียบอุปกรณ์วัดแรงในแนวแกนและการบิด

เนื่องจากต้องการทดสอบอุปกรณ์วัดแรงแนวแกนและการบิดที่พัฒนาเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างการบิดกับค่าสเตรนท์อ่อนได้ และเมื่อใส่แรงอัดและการบิดทั้งสองอย่างพร้อมกัน ซึ่งเครื่อง UTM มีขีดจำกัดไม่สามารถใส่ภาระทั้งสองอย่างพร้อมกันให้กับอุปกรณ์วัดแรงและการบิดที่พัฒนาขึ้นได้ ดังนั้น จึงต้องทำการออกแบบแท่นทดสอบเพื่อใช้สำหรับทำการทดสอบการดึงกล่าว และให้สามารถประยุกต์ใช้กับการทดสอบโดยเดลเซลล์แบบอื่นได้

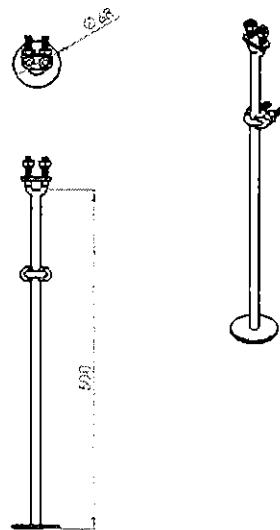
แท่นทดสอบทำเป็นโต๊ะเหล็กขนาดกว้าง 1 เมตร ยาว 1 เมตร สูง 0.9 เมตร มีล้อ 4 ล้อเพื่อความสะดวกในการเคลื่อนย้าย มีที่ปรับระดับที่พื้นเพื่อใช้ปรับระดับให้แท่นทดสอบอยู่ในแนวระดับ และสามารถล็อกตำแหน่งไม่ให้แห้งมีการเคลื่อนตัวขณะทำการทดสอบ การทดสอบภาระบิดจะทำโดยการใส่ก้อนน้ำหนักมาตรฐานบนที่แขวนน้ำหนักด้านข้างทั้งสองด้าน ซึ่งที่แขวนด้านข้างทั้งสองนี้จะถูกแขวนด้วยลวดสลิงที่คล้องผ่านจานบนเช่าร่องและคล้องผ่านชุดรอกที่สามารถปรับระดับสูง-ต่ำได้ และสามารถเลื่อนตำแหน่งซ้าย-ขวาได้ เพื่อให้แนวลวดสลิงอยู่ในทิศทางตั้งฉากและอยู่ในแนวระดับ ที่แขวนน้ำหนักตรงกลางสามารถปรับระดับสูง-ต่ำได้เพื่อปรับให้จานแขวนอยู่ในแนวระดับรายละเอียดของแท่นทดสอบแสดงดังรูปที่ 2.14



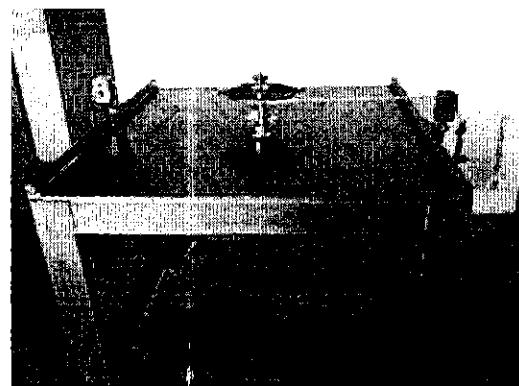
ก) จานเช่าร่อง

ข) ที่แขวนน้ำหนักตรงกลาง

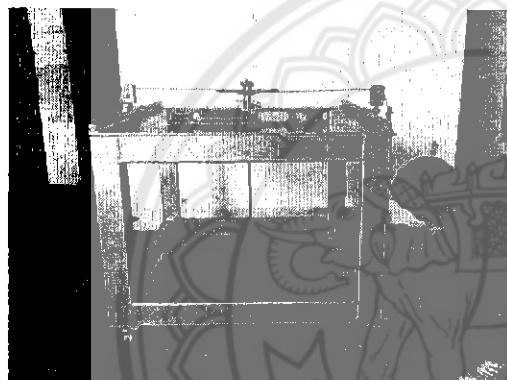
รูปที่ 2.14 แท่นทดสอบและการใช้งาน



ค) ที่แขวนน้ำหนักด้านข้าง



ง) แท่นทดสอบ



จ) การปรับระดับที่พื้น

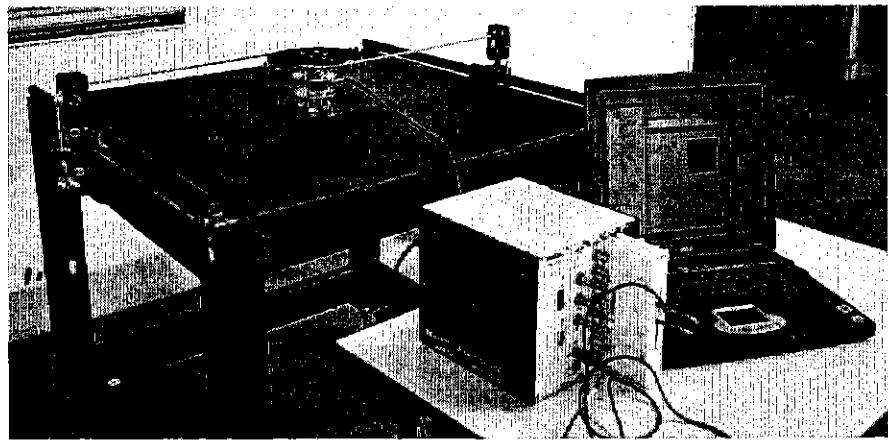
ฉ) การปรับเลื่อนตัวแท่นและปรับระดับความสูง
รูปที่ 2.14 แท่นทดสอบและการใช้งาน (ต่อ)

2.3.2.2 การสอนเทียบด้วยแท่นทดสอบ

การสอนเทียบที่ใช้แท่นทดสอบที่สร้างขึ้นมี 2 กรณี คือ การทดสอบภาระบิดเพียงอย่างเดียว และการทดสอบผลของแรงอัดในแนวแกนและภาระบิดกระทำพร้อมกัน

1) การสอนเทียบภาระบิด มีขั้นตอนการทดสอบมีดังต่อไปนี้

- 1.1) ติดตั้งอุปกรณ์วัดแรงในแนวแกนและภาระบิดที่ได้ทำการพัฒนาเข้ากับแท่นทดสอบ ต่อสายสัญญาณจากอุปกรณ์ต้นแบบกับเครื่อง indicator ใช้โปรแกรม Instruments Measurement and Automation Explorer อ่านและบันทึกค่าความเครียด ทั้งสองช่องสัญญาณ ประกอบที่แขวนน้ำหนักด้านข้างทั้งสอง (รูปที่ 2.15)

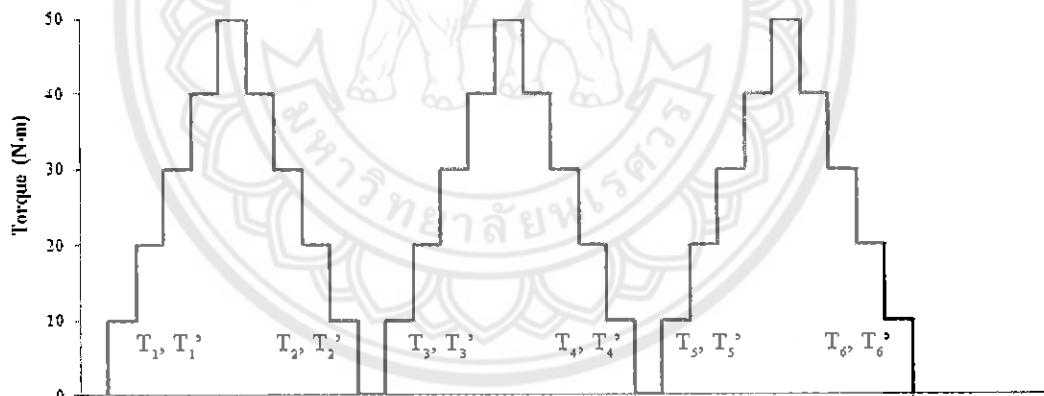


รูปที่ 2.15 การสอบเทียบการบิดด้วยแท่นทดสอบที่ได้พัฒนา

1.2) ทำการทดสอบการบิดในทิศทางทวนเข็มนาฬิกา โดยใช้การบิดด้วยก้อนน้ำหนักขนาด 5 กิโลกรัมทั้งสองด้าน เป็นผลให้เกิดการบิดประมาณ 10 นิวตัน·เมตร บันทึกค่าความเครียดที่อ่านได้จากเครื่อง indicator ใส่การบิดเพิ่มขึ้นครั้งละ 10 นิวตัน·เมตร จนกระหั่งครบ 50 นิวตัน·เมตร จากนั้นทำการลดการบิดครั้งละ 10 นิวตัน·เมตร จนกระหั่งเหลือ 0 นิวตัน·เมตร ทำการทดสอบ 3 ชั้้า รูปแบบการใส่การบิดแสดงดังรูปที่ 2.16

1.3) ทำการทดสอบข้อ 1.2) โดยเปลี่ยนเป็นทิศทางตามเข็มนาฬิกา

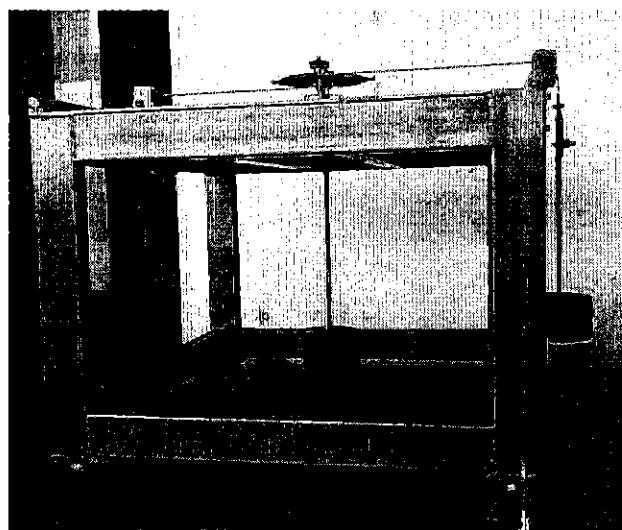
1.4) วิเคราะห์ผลการทดสอบ ดังรายละเอียดในหัวข้อ 2.4.2



รูปที่ 2.16 รูปแบบการใส่การบิด

2) การสอบเทียบแรงในแนวแกนและภาระบิด มีขั้นตอนการทดสอบมีดังต่อไปนี้

2.1) ติดตั้งอุปกรณ์วัดแรงในแนวแกนและภาระบิดที่ได้ทำการพัฒนาเข้ากับแท่นทดสอบ ต่อสายสัญญาณจากอุปกรณ์ต้นแบบกับเครื่อง indicator ใช้โปรแกรม Instruments Measurement and Automation Explorer อ่านและบันทึกค่าความเครียด ทั้งสองช่องสัญญาณ ประกอบที่แขวนน้ำหนักด้านข้างทั้งสอง และที่แขวนน้ำหนักกลาง (รูปที่ 2.17)



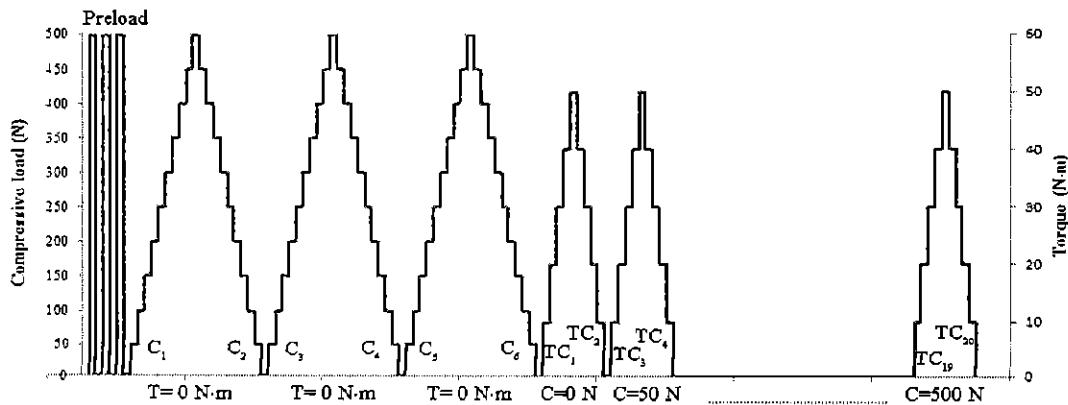
รูปที่ 2.17 การสอบเทียบแรงในแนวแกนและการบิดด้วยแท่นทดสอบที่ได้พัฒนา

2.2) ทำ Pre load โดยบันทึกค่าสเตรนที่อ่านได้จากเครื่อง indicator เมื่ออุปกรณ์วัดแรงและการบิดที่พัฒนาอยู่ในสภาวะไม่มีแรงอัดและการบิดกระทำ จากนั้นทำการใส่แรงอัดในแนวแกนและการบิดเต็มความสามารถของอุปกรณ์วัดแรงในแนวแกนและการบิดที่พัฒนาขึ้นคือ 500 นิวตัน แรง 50 นิวตัน·เมตร ตามลำดับ อ่านค่าความเครียดทั้งสองช่องสัญญาณ ทำซ้ำ 3 ชี้ (รูปที่ 2.18)

2.3) ใส่แรงอัดด้วยก้อนน้ำหนักขนาด 5 กิโลกรัม ลงบนที่แขวนน้ำหนักตระหง่านเพิ่มขึ้นครั้งละ 5 กิโลกรัม บันทึกค่าสเตรนที่อ่านได้จากเครื่อง indicator ทั้งสองช่องสัญญาณ จนกระทั่งเพิ่มแรงอัดถึง 500 นิวตัน และปล่อยแรงออกจนกระทั่งเหลือ 0 นิวตัน

2.4) ใส่การบิดด้วยก้อนน้ำหนักขนาด 5 กิโลกรัมทั้งสองด้าน เป็นผลให้เกิดภาระบิดประมาณ 10 นิวตัน·เมตร บันทึกค่าความเครียดที่อ่านได้จากเครื่อง indicator ทั้งสองช่องสัญญาณ ใส่ภาระบิดเพิ่มขึ้นครั้งละ 10 นิวตัน·เมตร จนกระทั่งครบ 50 นิวตัน·เมตร จากนั้นทำการลดภาระบิดครั้งละ 10 นิวตัน·เมตร จนกระทั่งเหลือ 0 นิวตัน·เมตร ทำการทดสอบ 3 ชี้

2.5) วิเคราะห์ผลการทดสอบ ดังรายละเอียดในหัวข้อ 2.4.2



รูปที่ 2.18 รูปแบบการใส่แรงกระทำในแนวแกนและการบิด

2.4 การวิเคราะห์ผลการสอบเทียบ

จากผลการทดสอบด้วยเงื่อนไขต่างๆ สร้างกราฟและหาสมการการถดถอยระหว่างแรงในแนวแกน ภาระบิด และแรงอัดและภาระบิดกระทำพร้อมกันกับค่าความเครียด (สเตرن) ที่อ่านได้ ประยุกต์ใช้มาตรฐาน ISO 376:2011(E) ในการวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่างๆ ดังต่อไปนี้

1) Reproducibility error, b

ความคลาดเคลื่อนเมื่อทำการติดตั้งอุปกรณ์วัดแรงและภาระบิดใหม่ หรือเปลี่ยนผู้ใช้งาน (ในงานวิจัยนี้หมายถึง การติดตั้งโหลดเซลล์ที่มุม 0 องศาและ 180 องศาเปรียบเทียบกัน)

2) Repeatability error, b'

ความคลาดเคลื่อนเมื่อทำการทดสอบซ้ำด้วยเงื่อนไขที่เหมือนกัน

3) Hysteresis error, v

ความคลาดเคลื่อนเมื่อทำการเพิ่มภาระและลดภาระ

4) Zero error, f_0

ความคลาดเคลื่อนเมื่ออุปกรณ์วัดแรงและภาระบิดไม่มีภาระกระทำ

5) Regression error, f_r

ความคลาดเคลื่อนเมื่อใช้สมการการถดถอยในการคำนวณค่าภาระ หรือสเตرن

โดยใช้โปรแกรม MINITAB ในการวิเคราะห์สมการการถดถอย

2.4.1 การวิเคราะห์ผลการสอบเทียบจากเครื่องทดสอบความแข็งแรงของวัสดุ

พิจารณาจากการทดสอบด้วยเครื่องวัดความแข็งแรงของวัสดุ ซึ่งมีรูปแบบการ испытание d'aprèsที่ 2.13 และทำการทดสอบที่ 0 องศา และหมุนไปอีก 180 องศา

1) Reproducibility error, b

$$b = \left| \frac{\varepsilon_{max} - \varepsilon_{min}}{\bar{\varepsilon}_N} \right| \times 100 \quad (2.1)$$

เมื่อ b = ค่า reproducibility error, % FSO

ε_{max} = ค่าความเครียดที่อ่านได้สูงสุดจากข้อมูลซีรีส์ $C_1, C_2, C_3, C_1', C_2'$ และ C_3' , μ

ε_{min} = ค่าความเครียดที่อ่านได้ต่ำสุดจากข้อมูลซีรีส์ $C_1, C_2, C_3, C_1', C_2'$ และ C_3' , μ

$\bar{\varepsilon}_N$ = ค่าความเครียดเฉลี่ยที่ตำแหน่งไส่แรงสูงสุด 500 นิวตัน จากข้อมูลซีรีส์ $C_1, C_2, C_3, C_1', C_2'$ และ C_3' , μ

2) Repeatability error, b'

$$b' = \left| \frac{\varepsilon_{max} - \varepsilon_{min}}{\bar{\varepsilon}_N} \right| \times 100 \quad (2.2)$$

เมื่อ $b' = \text{ค่า repeatability error, \% FSO}$
 $\varepsilon_{max} = \text{ค่าความเครียดที่อ่านได้สูงสุดจากข้อมูลซีรีส์ } C_1, C_2 \text{ และ } C_3, \mu$
 $\varepsilon_{min} = \text{ค่าความเครียดที่อ่านได้ต่ำสุดจากข้อมูลซีรีส์ } C_1, C_2 \text{ และ } C_3, \mu$
 $\bar{\varepsilon}_N = \text{ค่าความเครียดเฉลี่ยที่ตำแหน่งใส่แรงสูงสุด 500 \text{ นิวตัน จากข้อมูลซีรีส์ } C_1, C_2 \text{ และ } C_3, \mu}$

3) Hysteresis error, ν

$$\nu_1 = \left| \frac{\varepsilon_4 - \varepsilon_3}{\bar{\varepsilon}_N} \right| \times 100 \quad (2.3)$$

$$\nu_2 = \left| \frac{\varepsilon_6 - \varepsilon_5}{\bar{\varepsilon}_N} \right| \times 100 \quad (2.4)$$

$$\nu_3 = \left| \frac{\varepsilon'_4 - \varepsilon'_3}{\bar{\varepsilon}_N} \right| \times 100 \quad (2.5)$$

$$\nu_4 = \left| \frac{\varepsilon'_6 - \varepsilon'_5}{\bar{\varepsilon}_N} \right| \times 100 \quad (2.6)$$

$$\nu = \frac{\nu_1 + \nu_2 + \nu_3 + \nu_4}{4} \quad (2.7)$$

เมื่อ $\nu = \text{ค่าเฉลี่ย hysteresis error, \% FSO}$
 $\varepsilon_3 = \text{ค่าความเครียดที่อ่านได้ข้อมูลซีรีส์ } C_3, \mu$
 $\varepsilon_4 = \text{ค่าความเครียดที่อ่านได้ข้อมูลซีรีส์ } C_4, \mu$
 $\varepsilon_5 = \text{ค่าความเครียดที่อ่านได้ข้อมูลซีรีส์ } C_5, \mu$
 $\varepsilon_6 = \text{ค่าความเครียดที่อ่านได้ข้อมูลซีรีส์ } C_6, \mu$
 $\varepsilon'_3 = \text{ค่าความเครียดที่อ่านได้ข้อมูลซีรีส์ } C'_3, \mu$
 $\varepsilon'_4 = \text{ค่าความเครียดที่อ่านได้ข้อมูลซีรีส์ } C'_4, \mu$
 $\varepsilon'_5 = \text{ค่าความเครียดที่อ่านได้ข้อมูลซีรีส์ } C'_5, \mu$
 $\varepsilon'_6 = \text{ค่าความเครียดที่อ่านได้ข้อมูลซีรีส์ } C'_6, \mu$
 $\bar{\varepsilon}_N = \text{ค่าความเครียดที่ตำแหน่งใส่แรงสูงสุด 500 \text{ นิวตัน จากข้อมูลแต่ละซีรีส์, } \mu}$

4) Zero error, f_0

$$f_0 = \left(\frac{\varepsilon_f - \varepsilon_0}{\bar{\varepsilon}_N} \right) \times 100 \quad (2.8)$$

เมื่อ ε_f = ค่าความเครียดที่ตำแหน่งแรงผลลงเหลือ 0 นิวตัน, μ
 ε_0 = ค่าความเครียดที่ตำแหน่งเริ่มต้น แรง 0 นิวตัน, μ
 $\bar{\varepsilon}_N$ = ค่าความเครียดที่ตำแหน่งสูงสุด 500 นิวตัน, μ

5) Regression error, f_r

$$f_r = \left| \frac{\bar{\varepsilon}_a - \varepsilon_r}{\bar{\varepsilon}_N} \right| \times 100 \quad (2.9)$$

เมื่อ f_r = ค่า regression error, % FSO
 $\bar{\varepsilon}_a$ = ค่าความเครียดเฉลี่ยจากข้อมูลทุกชีรี่ ณ ค่าแรงหนึ่งๆ, μ
 ε_r = ค่าความเครียดที่ได้จากการ regression, μ
 $\bar{\varepsilon}_N$ = ค่าความเครียดเฉลี่ยที่ตำแหน่งสูงสุด 500 นิวตัน จากข้อมูลทุกชีรี่, μ

2.4.2 การวิเคราะห์ผลการสอบเทียบจากแทนทดสอบ

พิจารณาจากการทดสอบด้วยแทนทดสอบ ซึ่งมีรูปแบบการส่ำงการปิด ดังรูปที่ 2.16 และทำการทดสอบโดยส่ำงการปิดในทิศทางทวนเข็มและตามเข็มนาฬิกา พารามิเตอร์ที่ทำการศึกษาค่าความคลาดเคลื่อนมีดังต่อไปนี้

1) Reproducibility error, b

$$b = \left| \frac{\varepsilon_{max} - \varepsilon_{min}}{\bar{\varepsilon}_N} \right| \times 100 \quad (2.10)$$

เมื่อ b = ค่า reproducibility error, % FSO
 ε_{max} = ค่าความเครียดที่อ่านได้สูงสุดจากข้อมูลชีรี่ T_1 และ T_1' , μ
 ε_{min} = ค่าความเครียดที่อ่านได้ต่ำสุดจากข้อมูลชีรี่ T_1 และ T_1' , μ
 $\bar{\varepsilon}_N$ = ค่าความเครียดเฉลี่ยที่ตำแหน่งสูงสุด 500 นิวตัน จากข้อมูลชีรี่ T_1 และ T_1' , μ

2) Repeatability error, b'

$$b' = \left| \frac{\varepsilon_{max} - \varepsilon_{min}}{\bar{\varepsilon}_N} \right| \times 100 \quad (2.11)$$

เมื่อ b' = ค่า repeatability error, % FSO
 ε_{max} = ค่าความเครียดที่อ่านได้สูงสุดจากข้อมูลซีรี่ย์ T₁, T₃ และ T₅, μ
 ε_{min} = ค่าความเครียดที่อ่านได้ต่ำสุดจากข้อมูลซีรี่ย์ T₁, T₃ และ T₅, μ
 $\bar{\varepsilon}_N$ = ค่าความเครียดเฉลี่ยที่ตำแหน่งใส่ภาระปิดสูงสุด 50 นิวตัน·เมตร จากข้อมูล
 ซีรี่ย์ T₁, T₃ และ T₅, μ

3) Hysteresis error, v

$$v_1 = \left| \frac{\varepsilon_2 - \varepsilon_1}{\bar{\varepsilon}_N} \right| \times 100 \quad (2.12)$$

$$v_2 = \left| \frac{\varepsilon_4 - \varepsilon_3}{\bar{\varepsilon}_N} \right| \times 100 \quad (2.13)$$

$$v_3 = \left| \frac{\varepsilon_6 - \varepsilon_5}{\bar{\varepsilon}_N} \right| \times 100 \quad (2.14)$$

$$v_4 = \left| \frac{\varepsilon_2' - \varepsilon_1'}{\bar{\varepsilon}_N} \right| \times 100 \quad (2.15)$$

$$v_5 = \left| \frac{\varepsilon_4' - \varepsilon_3'}{\bar{\varepsilon}_N} \right| \times 100 \quad (2.16)$$

$$v_6 = \left| \frac{\varepsilon_6' - \varepsilon_5'}{\bar{\varepsilon}_N} \right| \times 100 \quad (2.17)$$

$$v = \frac{v_1 + v_2 + v_3 + v_4 + v_5 + v_6}{4} \quad (2.18)$$

เมื่อ v = ค่าเฉลี่ย hysteresis error, % FSO
 ε_1 = ค่าความเครียดที่อ่านได้ข้อมูลซีรี่ย์ T₁, μ
 ε_2 = ค่าความเครียดที่อ่านได้ข้อมูลซีรี่ย์ T₂, μ

- ε_3 = ค่าความเครียดที่อ่านได้ข้อมูลซีรี่ย์ T₃, μ
 ε_4 = ค่าความเครียดที่อ่านได้ข้อมูลซีรี่ย์ T₄, μ
 ε_5 = ค่าความเครียดที่อ่านได้ข้อมูลซีรี่ย์ T₅, μ
 ε_6 = ค่าความเครียดที่อ่านได้ข้อมูลซีรี่ย์ T₆, μ
 ε_1' = ค่าความเครียดที่อ่านได้ข้อมูลซีรี่ย์ T₁', μ
 ε_2' = ค่าความเครียดที่อ่านได้ข้อมูลซีรี่ย์ T₂', μ
 ε_3' = ค่าความเครียดที่อ่านได้ข้อมูลซีรี่ย์ T₃', μ
 ε_4' = ค่าความเครียดที่อ่านได้ข้อมูลซีรี่ย์ T₄', μ
 ε_5' = ค่าความเครียดที่อ่านได้ข้อมูลซีรี่ย์ T₅', μ
 ε_6' = ค่าความเครียดที่อ่านได้ข้อมูลซีรี่ย์ T₆', μ
 ε_N = ค่าความเครียดที่ตำแหน่งสูงสุด 50 นิวตัน·เมตร จากข้อมูลแต่ละซีรี่ย์, μ

4) Zero error, f_0

$$f_0 = \left| \frac{\varepsilon_f - \varepsilon_0}{\varepsilon_N} \right| \times 100 \quad (2.19)$$

- เมื่อ ε_f = ค่าความเครียดที่ตำแหน่งภาระบิดลดลงเหลือ 0 นิวตัน·เมตร, μ
 ε_0 = ค่าความเครียดที่ตำแหน่งเริ่มต้น ภาระบิด 0 นิวตัน·เมตร, μ
 ε_N = ค่าความเครียดที่ตำแหน่งสูงสุด 50 นิวตัน·เมตร, μ

5) Regression error, f_r

$$f_r = \left| \frac{\bar{\varepsilon}_a - \bar{\varepsilon}_r}{\bar{\varepsilon}_N} \right| \times 100 \quad (2.20)$$

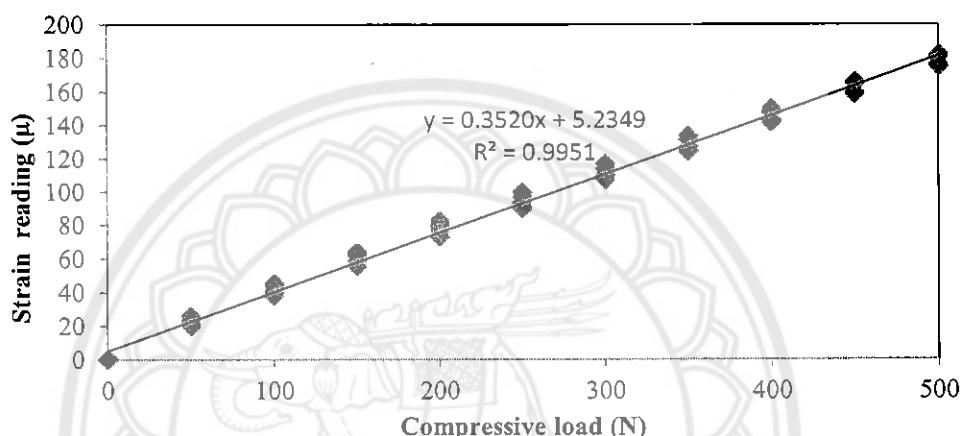
- เมื่อ f_r = ค่า regression error, % FSO
 $\bar{\varepsilon}_a$ = ค่าความเครียดเฉลี่ยจากข้อมูลทุกซีรี่ย์ ณ ค่าภาระบิดหนึ่งๆ, μ
 $\bar{\varepsilon}_r$ = ค่าความเครียดที่ได้จากการ regression, μ
 $\bar{\varepsilon}_N$ = ค่าความเครียดเฉลี่ยที่ตำแหน่งสูงสุด 50 นิวตัน·เมตรจากข้อมูลทุกซีรี่ย์, μ

บทที่ 3

ผลการทดสอบและการวิเคราะห์

3.1 ผลของแรงกระทำในแนวแกนกับสมการการลดต้อย

ผลการทดสอบอุปกรณ์วัดแรงในแนวแกนและการบิดที่ได้พัฒนาเมื่อทำการทดสอบกับเครื่องวัดความแข็งแรงของวัสดุ (UTM – Universal Testing Machine) โดยทำการใส่แรงอัดตามแนวแกนตามรูปแบบการใส่แรงดังรูปที่ 2.13 ผลของแรงอัดในแนวแกนต่อค่าความเครียดของแรงอัดที่อ่านได้จากเครื่อง indicator แสดงดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แสดงค่าความเครียดของแรงอัดที่อ่านได้จากเครื่อง indicator กับแรงกระทำ

เมื่อทำการวิเคราะห์ความเป็นเชิงเส้นของค่าความเครียดต่อแรงกระทำ พบรความสัมพันธ์เชิงเส้น คือ

$$\varepsilon_c = 0.3520 C + 5.2349 \quad (3.1)$$

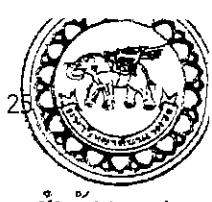
$$R^2 = 0.9951$$

ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (S) = 3.8293μ

เมื่อ ε_c = ค่าความเครียดของแรงในแนวแกน, μ

C = แรงในแนวแกน, N

ผลการวิเคราะห์หาเบอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนต่างๆ แสดงดังรูปที่ 3.2 พบรว่า repeatability error มีค่าน้อยกว่า 1 เปอร์เซ็นต์ hysteresis error และ regression error มีค่าน้อยกว่า 2 เปอร์เซ็นต์ และค่าความคลาดเคลื่อนสูงสุดพบใน reproducibility error มีค่าน้อยกว่า 5 เปอร์เซ็นต์ ซึ่ง reproducibility error นี้วิเคราะห์มาจากข้อมูลการทดสอบที่มุ่ง 0 องศา เปรียบเทียบกับ 180 องศา ทั้งนี้ อาจเนื่องมาจากการทำซ้ำงานไม่ได้ขนาดหรือตำแหน่งที่แม่นยำ



สำนักหอสมุด

17 ส.ค. 2559

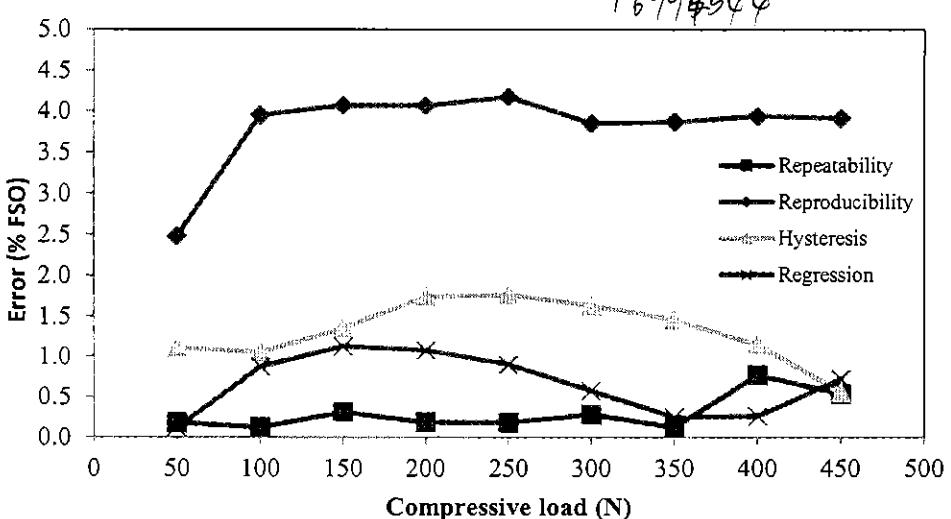
พ.ศ.

๒๕๕๙

-๑๙๕

๕๗๕๙

๒๕๖๒



รูปที่ 3.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า error ต่างๆ กับแรงกระทำ

จากข้อมูลที่ได้ทำการทดสอบและวิเคราะห์ผลอุปกรณ์วัดแรงในแนวแกนและการบิดที่ได้ทำการพัฒนา เมื่อรับแรงในแนวแกนเพียงอย่างเดียว ซึ่งทำการทดสอบด้วยเครื่องวัดความแข็งแรงของวัสดุ สามารถสรุปข้อมูลได้ดังตารางที่ 3.1 และสมการที่ใช้ในการคำนวณเพื่อหาค่าแรงที่วัดได้ คือ

$$C = 2.8274 \varepsilon_c - 13.619 \quad (3.2)$$

$$R^2 = 0.9951$$

ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (S) = 10.8532 N

เมื่อ C = แรงในแนวแกน, N

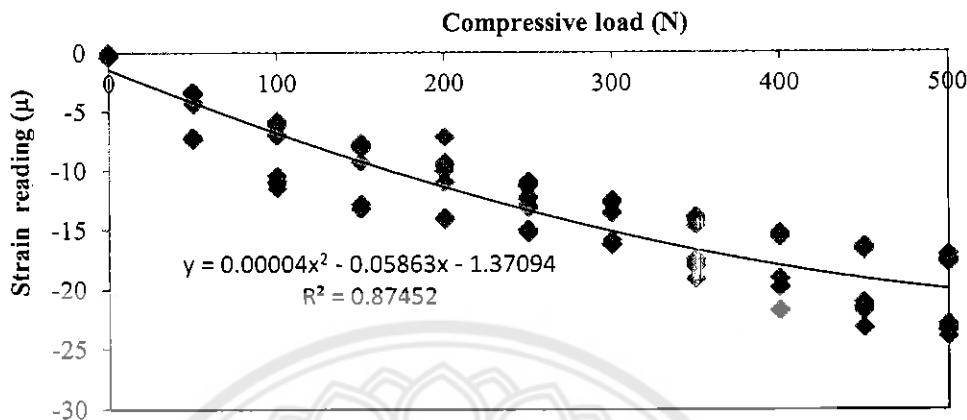
ε_c = ค่าความเครียดของแรงในแนวแกน, μ

ตารางที่ 3.1 ข้อมูลการวัดทางกลของอุปกรณ์วัดแรงในแนวแกนและการบิดต้นแบบเมื่อรับแรงในแนวแกนเพียงอย่างเดียว

Parameters

Range:	Input 0 to 500 N Output 5.2349 to 181.2159 μ
Rate of sensitivity:	0.3520 μ/N
Zero error:	(Max.) 0.052 % FSO
Repeatability error:	(Max.) 0.768 % FSO
Reproducibility error:	(Max.) 4.172 % FSO
Hysteresis error:	(Max.) 1.761 % FSO
Regression error:	(Max.) 1.126 % FSO
	$S = 3.8293 \mu$
	$S = 10.8532 N$

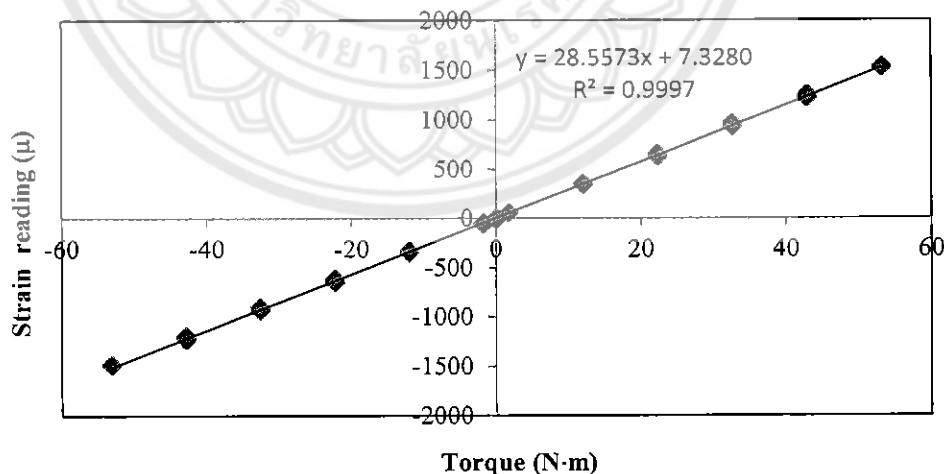
นอกจากการในแนวแกนจะทำให้เกิดสเตรนในวงจรวัดแรงในแนวแกนแล้ว ยังทำให้เกิดสเตรนในวงจรวัดภาระบิดด้วย เรียกปรากฏการณ์นี้ว่า สัญญาณแทรกข้าม (crosstalk) ซึ่งมีความสัมพันธ์กับแรงตามแนวแกนตามรูปที่ 3.3 แต่มีขนาดน้อยมากเมื่อเทียบกับขนาดของความเครียดที่เกิดขึ้นจากการบิดโดยตรง



รูปที่ 3.3 แสดงค่าความเครียดของการบิดที่อ่านได้จากเครื่อง indicator กับแรงกระทำ

3.2 ผลของการบิดกับสมการการลดถอย

ผลการทดสอบอุปกรณ์วัดแรงในแนวแกนและการบิดที่ได้พัฒนาเมื่อทำการทดสอบกับแท่นทดสอบแรงในแนวแกนและการบิดที่ได้พัฒนาขึ้น โดยทำการใส่ภาระบิดในทิศทางทวนเข็มและตามเข็มนาฬิกา ตามรูปแบบการใส่ภาระบิดดังรูปที่ 2.16 ผลของการบิดต่อค่าความเครียดของการบิดที่อ่านได้จากเครื่อง indicator แสดงดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 แสดงค่าความเครียดของการบิดที่อ่านได้จากเครื่อง indicator กับภาระบิดที่กระทำ

เมื่อทำการวิเคราะห์ความเป็นเชิงเส้นของค่าความเครียดต่อการบิดที่กระทำ พบร
ความสัมพันธ์เชิงเส้น คือ

$$\varepsilon_r = 28.5573T + 7.3280 \quad (3.3)$$

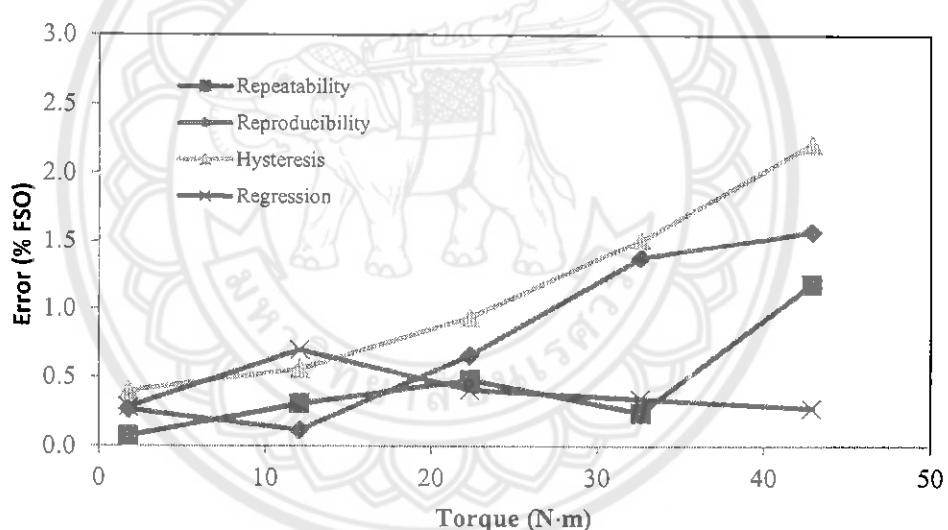
$$R^2 = 0.9997$$

$$\text{ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (S)} = 13.5568 \mu$$

เมื่อ ε_r = ค่าความเครียดของการบิด, μ

T = ภาระบิด, N·m

ผลการวิเคราะห์หาเบอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนต่างๆ แสดงดังรูปที่ 3.5 พบว่า regression error มีค่าน้อยกว่า 1 เปอร์เซ็นต์ ค่า repeatability error และ reproducibility error มีค่าน้อยกว่า 2 เปอร์เซ็นต์ และค่าความคลาดเคลื่อนสูงสุดพบใน hysteresis error แต่มีค่าน้อยกว่า 3 เปอร์เซ็นต์



รูปที่ 3.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า error ต่างๆ กับแรงกระทำ

จากข้อมูลที่ได้ทำการทดสอบและวิเคราะห์ผลอุปกรณ์วัดแรงในแนวแกนและการบิดที่ได้ทำการพัฒนา เมื่อรับภาระบิดเพียงอย่างเดียว ซึ่งทำการทดสอบด้วยแท่นทดสอบที่ทำการออกแบบและสร้างขึ้น สามารถสรุปข้อมูลได้ดังตารางที่ 3.2 และสมการที่ใช้ในการคำนวณเพื่อหาค่าภาระบิดที่วัดได้ คือ

$$T = 0.0035\varepsilon_r - 0.25655 \quad (3.4)$$

$$R^2 = 0.9997$$

$$\text{ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (S)} = 0.4746 \text{ N}\cdot\text{m}$$

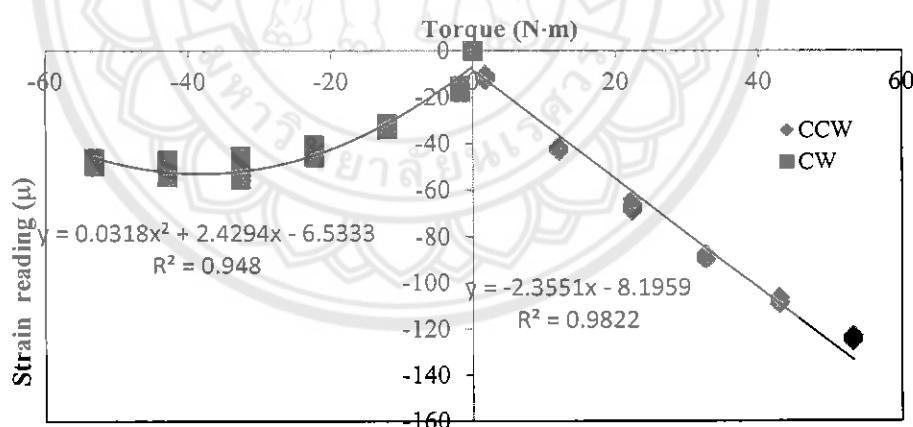
เมื่อ T = กำรบิด, N·m
 ε_s = ค่าความเครียดของกำรบิด, μ

ตารางที่ 3.2 ข้อมูลการวัดทางกลของอุปกรณ์วัดแรงในแนวแกนและการบิดตัวนั้นแบบเมื่อรับกำรบิดเพียงอย่างเดียว

Parameters

Range:	Input 0 to 50 N·m Output 7.3280 to 1435.1930 μ
Rate of sensitivity:	28.5573 $\mu/(N\cdot m)$
Zero error:	(Max.) 0.009 % FSO
Repeatability error:	(Max.) 1.187 % FSO
Reproducibility error:	(Max.) 1.578 % FSO
Hysteresis error:	(Max.) 2.219 % FSO
Regression error:	(Max.) 0.991 % FSO $S = 13.5568 \mu$ $S = 0.4746 N\cdot m$

เนื่องจากมีค่าความเครียดของแรงกระทำในแนวแกนเกิดขึ้นเมื่อใส่กำรบิดต่างๆ แสดงดังรูปที่ 3.6 ซึ่งแสดงให้เห็นว่ามีสัญญาณแทรกข้ามเกิดขึ้น (crosstalk)



รูปที่ 3.6 แสดงค่าความเครียดของกำรบิดที่อ่านได้จากเครื่อง indicator กับกระทำ

จากผลการทดสอบอุปกรณ์วัดแรงในแนวแกนและการบิดที่ได้พัฒนาเมื่ออุปกรณ์ตั้งกล่าวรับกำรกระทำอย่างใดอย่างหนึ่งเพียงอย่างเดียว คือการวัดแรงกระทำในแนวแกนด้วยเครื่องทดสอบความแข็งแรงของวัสดุ และจากการวัดกำรบิดตัวนั้นทดสอบที่พัฒนาขึ้น พบร่วมผลของสัญญาณแทรกข้าม (crosstalk) เกิดขึ้น ผลของสัญญาณแทรกข้ามสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 ผลของสัญญาณแทรกข้าม (crosstalk) เมื่อใส่ภาระกระทำเพียงอย่างเดียว

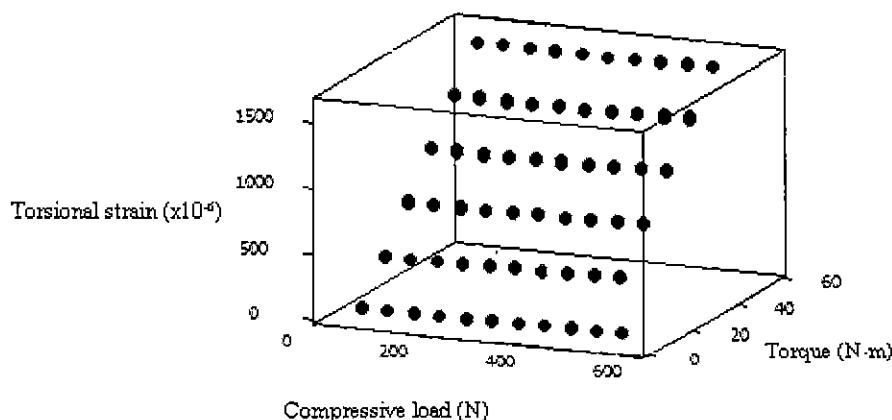
		Applied load	
		500 N	50 N·m
		Compression	Torque
Crosstalk	Compression	100%	70%
	Torque	2%	100%

จากการที่ 3.3 จะเห็นได้ว่า แรงกระทำในแนวแกนมีผลต่อความเครียดของภาระบิดน้อยมาก คือ 2 เปอร์เซ็นต์ของความเครียดของแรงอัดเมื่อรับแรงขนาด 500 นิวตัน ดังนั้น สามารถนำอุปกรณ์วัดแรงในแนวแกนและการบิดที่ออกแบบและพัฒนาขึ้นนี้ไปใช้วัดแรงในแนวแกนที่มีขนาดไม่เกิน 500 นิวตันได้ ถ้าขั้นงานที่ต้องการวัดนั้นมีแรงกระทำในแนวแกนเพียงอย่างเดียว และจากผลการวัด สามารถคำนวณหาแรงในแนวแกนด้วยสมการที่ 3.2 ในทำงนเดียว ก็ต้องการวัดภาระบิดที่มีขนาดไม่เกิน 50 นิวตัน·เมตร และขั้นงานที่ต้องการวัดมีภาระบิดกระทำเพียงอย่างเดียว สามารถนำอุปกรณ์วัดแรงในแนวแกนและการบิดต้นแบบนี้ไปใช้ได้ โดยใช้สมการที่ 3.4 คำนวณขนาดของภาระบิด

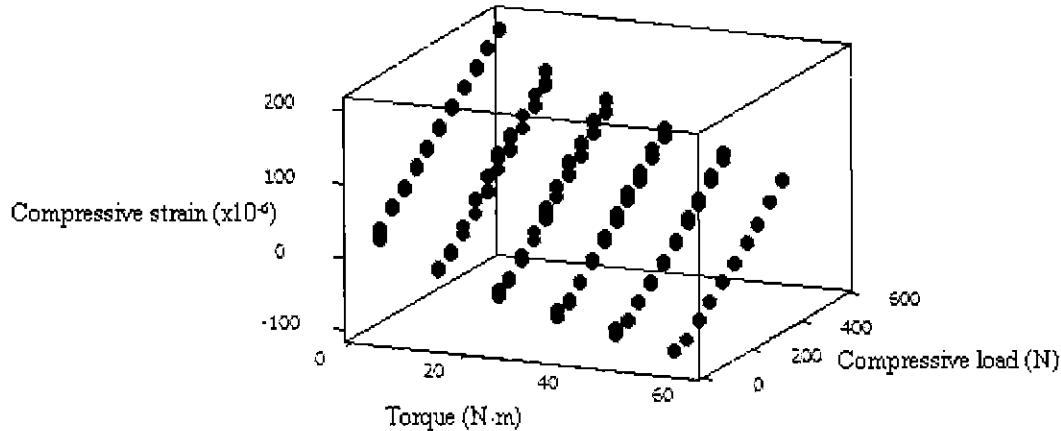
อย่างไรก็ตาม ในการพัฒนาอุปกรณ์วัดแรงในแนวแกนและการบิดนี้ ต้องการที่จะทำการวัดขั้นงานที่มีแรงกระทำในแนวแกนและการบิดพร้อมกัน ซึ่งผลจากการที่ 3.3 แสดงให้เห็นว่า ภาระบิดที่กระทำมีผลกระทบต่อความเครียดของแรงในแนวแกนอย่างมากคือ สูงถึง 70 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้น เพื่อให้ได้สมการการลดถอยที่ใช้งานได้จริง จึงควรศึกษาค่าความเครียดจากวงจรสเตตรน偈หั้งสอง ในขณะที่รับแรงในแนวแกนและการบิดพร้อมกัน เพื่อสร้างสมการการลดถอยพหุคุณ (multiple regression) ที่มีความสามารถในการทำนายแม่นยำขึ้น

3.3 ผลของแรงกระทำในแนวแกนและการบิด (crosstalk) กับสมการการลดถอย

ผลการทดสอบอุปกรณ์วัดแรงในแนวแกนและการบิดที่พัฒนาขึ้นทดสอบแรงและการบิดที่ได้สร้างขึ้น เมื่อใส่แรงและการบิดกระทำพร้อมกันโดยมีรูปแบบการใส่ภาระที่กระทำดังรูปที่ 2.18 ผลจากการทดสอบแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดของภาระบิดกับแรงและการบิดที่กระทำ แสดงดังรูปที่ 3.7 และความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดของแรงกับภาระบิดและแรงที่กระทำ แสดงดังรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.7 แสดงค่าความเครียดของภาระบิดกับแรงและการบิดที่กระทำ



รูปที่ 3.8 แสดงค่าความเครียดของแรงกับการบิดและแรงที่กระทำ

จากรูปที่ 3.17 แสดงให้เห็นว่าความเครียดของการบิดได้รับอิทธิพลจากการบิดโดยตรง คือ เมื่อการบิดสูงขึ้น ค่าความเครียดของการบิดมีค่าสูงขึ้น และพบว่าแรงในแนวแกนมีผลต่อค่าความเครียดของการบิดน้อยมาก สำหรับค่าความเครียดของแรงจะได้รับอิทธิพลโดยตรงจากการบิดและการบิดที่กระทำ คือ ค่าความเครียดของแรงในแนวแกนจะเพิ่มขึ้น เมื่อขนาดของแรงในแนวแกนเพิ่มขึ้น และ/หรือการบิดลดลง (รูปที่ 3.18)

ผลจากการวิเคราะห์ผลการทดสอบโดยใช้ regression analysis ด้วยโปรแกรม Minitab เพื่อหาสมการการทดถอยระหว่างแรงและการบิดกับค่าความเครียดของแรงและค่าความเครียดของการบิด ผลการวิเคราะห์มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

3.3.1 สมการพหุนามดีกรี 1 (สมการระบบตรอง)

สมการพหุนามดีกรี 1 ของแรงในแนวแกน แสดงดังสมการที่ 3.5 รายละเอียดผลการวิเคราะห์แสดงดังตารางที่ 3.4 และ 3.5

$$C = 2.62493 \varepsilon_c + 0.248850 \varepsilon_r + 4.060 \quad (3.5)$$

$$R^2 = 0.979$$

$$\text{ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (S)} = 22.2545 \text{ N}$$

เมื่อ C = แรงในแนวแกน, N

ε_c = ค่าความเครียดของแรงในแนวแกน, μ

ε_r = ค่าความเครียดของการบิด, μ

ตารางที่ 3.4 ผลการวิเคราะห์สมการพหุนามดีกรี 1 ของแรงในแนวแกน

Predictor	Coef	SE Coef	T	P
Constant	4.060	2.427	1.67	0.095
ε_c	2.62493	0.01999	131.29	0.000
ε_t	0.248850	0.002596	95.84	0.000

ตารางที่ 3.5 Analysis of variance ของสมการพหุนามดีกรี 1 ของแรงในแนวแกน

Source	DF	SS	MS	F	P
Regression	2	9075213	4537607	9162.06	0.000
Residual Error	390	193152	495		
Total	392	9268365			

สมการพหุนามดีกรี 1 ของภาระบิด แสดงดังสมการที่ 3.6 รายละเอียดผลการวิเคราะห์แสดงดังตารางที่ 3.6 และ 3.7

$$T = -0.0026811\varepsilon_c + 0.0342249\varepsilon_t - 1.43650 \quad (3.6)$$

$$R^2 = 1.000$$

ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (S) = 0.2494 N·m

เมื่อ T = ภาระบิด, N·m

ε_c = ค่าความเครียดของแรงในแนวแกน, μ

ε_t = ค่าความเครียดของภาระบิด, μ

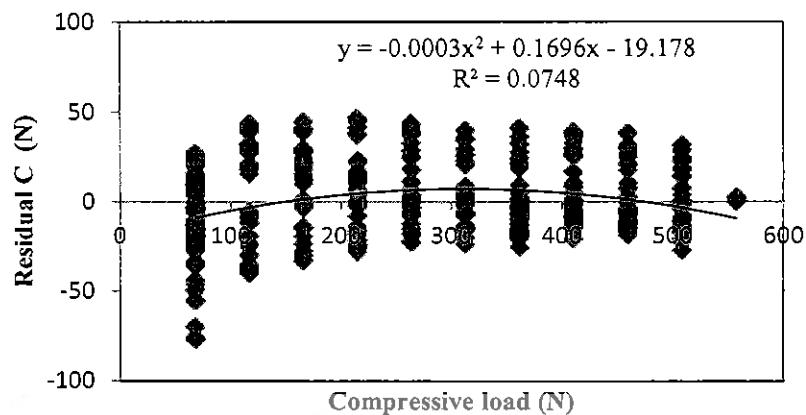
ตารางที่ 3.6 ผลการวิเคราะห์สมการพหุนามดีกรี 1 ของภาระบิด

Predictor	Coef	SE Coef	T	P
Constant	-1.43650	0.02720	-52.81	0.000
ε_c	-0.0026811	0.0002241	-11.97	0.000
ε_t	0.0342249	0.0000291	1176.16	0.000

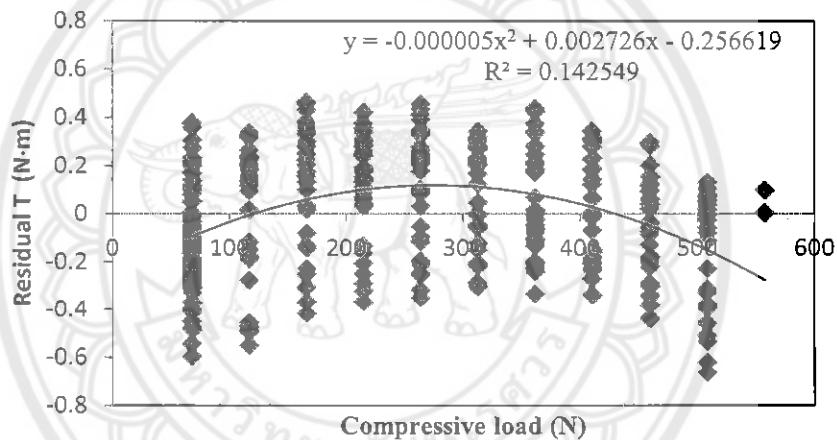
ตารางที่ 3.7 Analysis of variance ของสมการพหุนามดีกรี 1 ของภาระบิด

Source	DF	SS	MS	F	P
Regression	2	118305	59153	950945.92	0.000
Residual Error	390	24	0		
Total	392	118329			

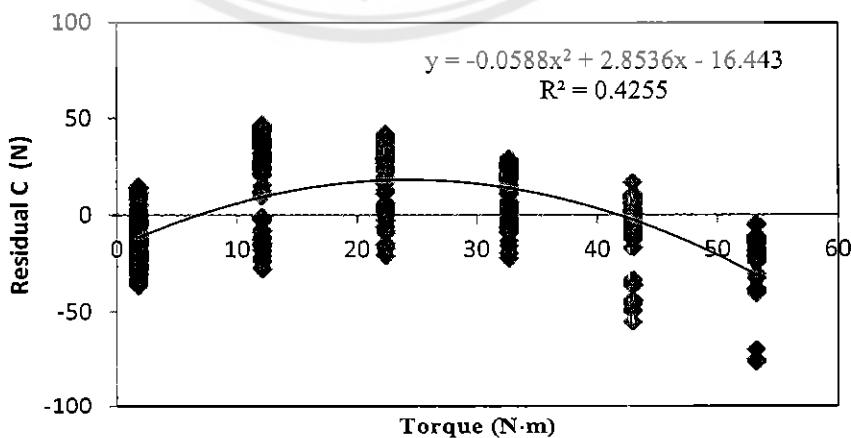
ความสัมพันธ์ระหว่าง Residual ของแรงในแนวแกนและการบิดกับแรงและการบิดที่กระทำ แสดงดังรูปที่ 3.9-3.12



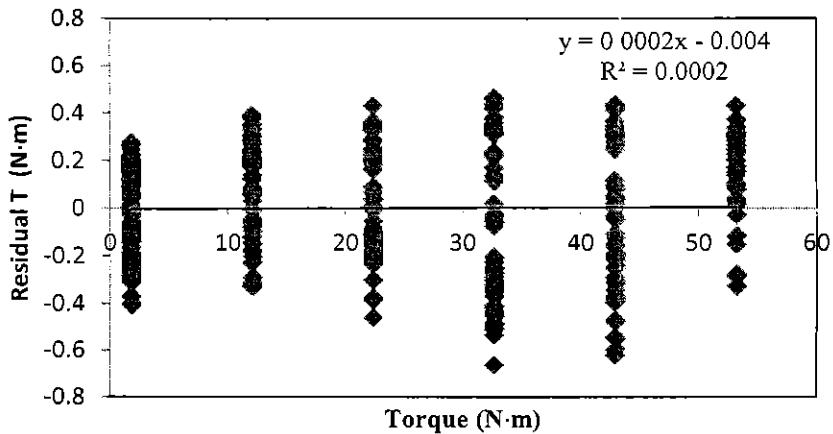
รูปที่ 3.9 ความสัมพันธ์ระหว่าง Residual ของแรงในแนวแกนกับแรงที่กระทำ



รูปที่ 3.10 ความสัมพันธ์ระหว่าง Residual ของการบิดกับแรงในแนวแกนที่กระทำ



รูปที่ 3.11 ความสัมพันธ์ระหว่าง Residual ของแรงในแนวแกนกับการบิดที่กระทำ



รูปที่ 3.12 ความสัมพันธ์ระหว่าง Residual ของการบิดกับการบิดที่กระทำ

จากการวิเคราะห์ผล พบว่า ความสัมพันธ์ระหว่าง residual ของแรงในแนวแกนกับแรงกระทำ (รูปที่ 3.9) กับการบิดที่กระทำ(รูปที่ 3.11) และระหว่าง residual ของการบิดกับแรงกระทำ (รูปที่ 3.10) มีแนวโน้มเป็นเส้นโค้ง ซึ่งแสดงให้เห็นว่า สมการพหุนามดีกรี 1 ยังไม่เหมาะสมสำหรับการทำนายค่าแรงและการบิดที่ทำการวัดค่า จึงต้องทำการวิเคราะห์หาสมการพหุนามดีกรี 2

3.3.2 สมการพหุนามดีกรี 2

สมการพหุนามดีกรี 2 ของแรงในแนวแกน แสดงดังสมการที่ 3.7 รายละเอียดผลการวิเคราะห์แสดงดังตารางที่ 3.8 และ 3.9

$$C = -0.0006230 \varepsilon_c^2 - 0.00006684 \varepsilon_t^2 + 0.00000668 \varepsilon_c \varepsilon_t + 2.66084 \varepsilon_c + 0.349478 \varepsilon_t - 14.233 \quad (3.7)$$

$$R^2 = 0.988$$

$$\text{ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (S)} = 16.6318 \text{ N}$$

เมื่อ C = แรงในแนวแกน, N

ε_c = ค่าความเครียดของแรงในแนวแกน, μ

ε_t = ค่าความเครียดของการบิด, μ

ตารางที่ 3.8 ผลการวิเคราะห์สมการพหุนามดีกรี 2 ของแรงในแนวแกน

Predictor	Coef	SE Coef	T	P
Constant	-14.233	3.114	-4.57	0.000
ε_c^2	-0.0006230	0.0003271	-1.90	0.058
ε_t^2	-0.00006684	0.00000500	-13.37	0.000
$\varepsilon_c \varepsilon_t$	0.00000668	0.00006280	0.11	0.915
ε_c	2.66084	0.06908	38.52	0.000
ε_t	0.349478	0.008643	40.43	0.000

ตารางที่ 3.9 Analysis of variance ของสมการพหุนามดีกรี 2 ของแรงในแนวแกน

Source	DF	SS	MS	F	P
Regression	5	118307	23661	413790.53	0.000
Residual Error	387	22	0		
Total	392				

สมการพหุนามดีกรี 2 ของภาระบิด แสดงดังสมการที่ 3.8 รายละเอียดผลการวิเคราะห์แสดงดังตารางที่ 3.10 และ 3.11

$$T = -0.00002854 \varepsilon_c^2 - 0.00000015 \varepsilon_t^2 + 0.00000487 \varepsilon_c \varepsilon_t + 0.0030379 \varepsilon_c + 0.0345972 \varepsilon_t - 1.58757 \quad (3.8)$$

$$R^2 = 1.000$$

$$\text{ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (S) } = 0.239128 \text{ N}\cdot\text{m}$$

เมื่อ T = ภาระบิด, Nm

ε_c = ค่าความเครียดของแรงในแนวแกน, μ

ε_t = ค่าความเครียดของภาระบิด, μ

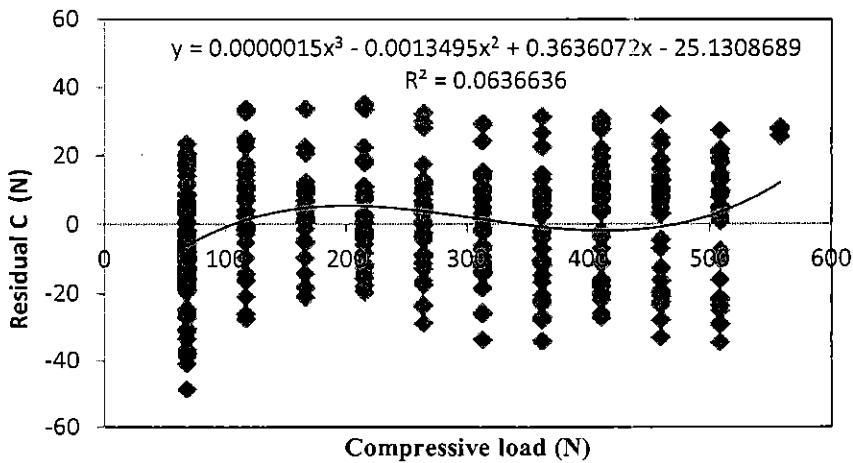
ตารางที่ 3.10 ผลการวิเคราะห์สมการพหุนามดีกรี 2 ของภาระบิด

Predictor	Coef	SE Coef	T	P
Constant	-1.58757	0.04477	-35.46	0.000
ε_c^2	-0.00002854	0.00000470	-6.07	0.000
ε_t^2	-0.00000015	0.00000007	-2.15	0.032
$\varepsilon_c \varepsilon_t$	-0.00000487	0.00000090	-5.39	0.000
ε_c	0.0030379	0.0009932	3.06	0.002
ε_t	0.034972	0.0001243	278.40	0.000

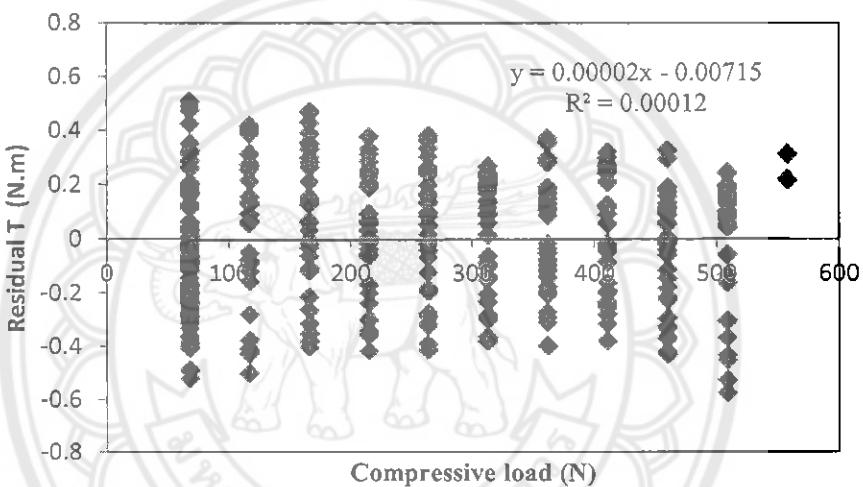
ตารางที่ 3.11 Analysis of variance ของสมการพหุนามดีกรี 2 ของภาระบิด

Source	DF	SS	MS	F	P
Regression	5	118307	23661	413790.53	0.000
Residual Error	387	22	0		
Total	392	118329			

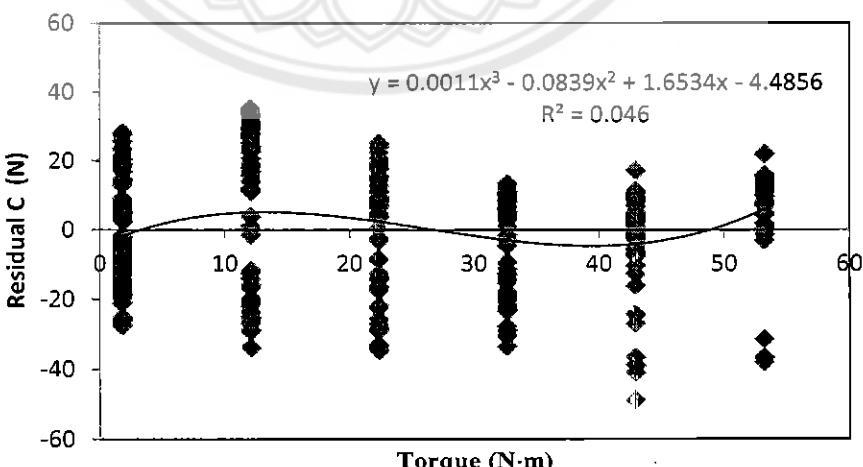
ความสัมพันธ์ระหว่าง Residual ของแรงในแนวแกนและภาระบิดกับแรงและการบิดที่กระทำ แสดงดังรูปที่ 3.13-3.16



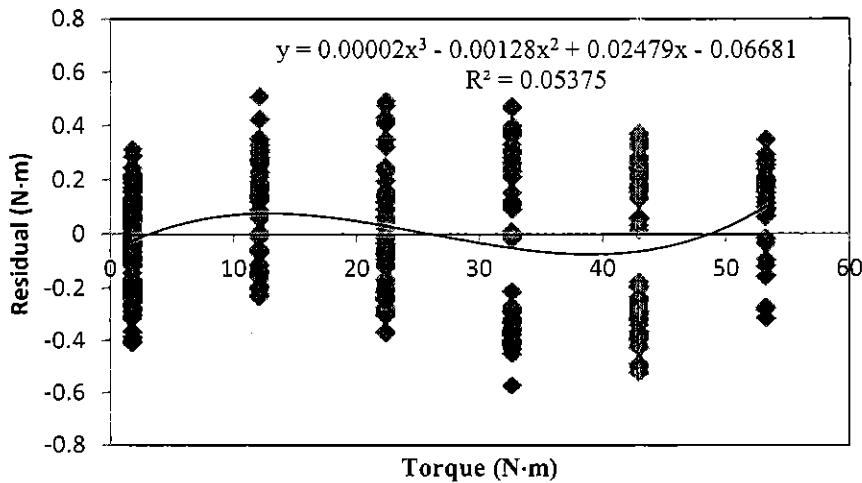
รูปที่ 3.13 ความสัมพันธ์ระหว่าง Residual ของแรงในแนวแกนกับแรงที่กระทำ



รูปที่ 3.14 ความสัมพันธ์ระหว่าง Residual ของการบิดกับแรงในแนวแกนที่กระทำ



รูปที่ 3.15 ความสัมพันธ์ระหว่าง Residual ของแรงในแนวแกนกับการบิดที่กระทำ



รูปที่ 3.16 ความสัมพันธ์ระหว่าง Residual ของแรงบิดกับภาระบิดที่กระทำ

จากการวิเคราะห์ผล พบว่า ความสัมพันธ์ระหว่าง residual ของแรงในแนวแกนกับแรงกระทำ (รูปที่ 3.13) กับภาระบิดที่กระทำ(รูปที่ 3.15) และระหว่าง residual ของภาระบิดกับภาระบิด (รูปที่ 3.16) มีแนวโน้มเป็นเส้นโค้งดีกรี 3 ซึ่งแม้ว่าค่า R-square จะมีค่าต่ำมาก แต่ถือว่ามีแนวโน้มที่จะได้สมการที่ทำงานได้ดีขึ้น ถ้าใช้สมการพหุนามที่มีดีกรีสูงขึ้น เช่น ดีกรี 3 ซึ่งเป็นดีกรีสูงสุดที่อ่านพบรูปในวรรณกรรมเกี่ยวกับอุปกรณ์วัดแรง

3.3.2 สมการพหุนามดีกรี 3

สมการพหุนามดีกรี 3 ของแรงในแนวแกน แสดงดังสมการที่ 3.9 รายละเอียดผลการวิเคราะห์แสดงดังตารางที่ 3.12 และ 3.13

$$\begin{aligned}
 C = & -1837 \times 10^{-9} \varepsilon_c^3 - 5173 \times 10^{-9} \varepsilon_c^2 \varepsilon_t - 239.9 \times 10^{-9} \varepsilon_c \varepsilon_t^2 + 53.14 \times 10^{-9} \varepsilon_t^3 \\
 & + 2587 \times 10^{-6} \varepsilon_c^2 + 642.5 \times 10^{-6} \varepsilon_c \varepsilon_t - 189.18 \times 10^{-6} \varepsilon_t^2 + 2235.1 \times 10^{-3} \varepsilon_c \\
 & + 425.29 \times 10^{-3} \varepsilon_t - 17.184
 \end{aligned} \tag{3.9}$$

$$R^2 = 0.992$$

$$\text{ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (S)} = 14.1276 \text{ N}$$

เมื่อ C = แรงในแนวแกน, N

ε_c = ค่าความเครียดของแรงในแนวแกน, μ

ε_t = ค่าความเครียดของภาระบิด, μ

ตารางที่ 3.12 ผลการวิเคราะห์สมการพหุนามดีกรี 3 ของแรงในแนวแกน

Predictor	Coef	SE Coef	T	P
Constant	-17.184	5.098	-3.37	0.001
ε_c^3	-1837	5939	-0.31	0.757
$\varepsilon_c^2 \varepsilon_t$	-5173	1693	-3.06	0.002
$\varepsilon_c^2 \varepsilon_t^2$	-239.9	182.8	-1.31	0.190
ε_t^3	53.14	11.54	4.61	0.000
ε_c^2	2587	1947	1.33	0.185
$\varepsilon_c \varepsilon_t$	642.5	389.6	1.65	0.100
ε_t^2	-189.18	31.29	-6.05	0.000
ε_c	2235.1	188.9	11.83	0.000
ε_t	425.29	24.69	17.23	0.000

ตารางที่ 3.13 Analysis of variance ของสมการพหุนามดีกรี 3 ของแรงในแนวแกน

Source	DF	SS	MS	F	P
Regression	9	9191922	1021325	5117.12	0.000
Residual Error	383	76443	200		
Total	392	9268365			

สมการพหุนามดีกรี 3 ของภาระบิด แสดงตั้งสมการที่ 3.10 รายละเอียดผลการวิเคราะห์ แสดงตั้งตารางที่ 3.14 และ 3.15

$$\begin{aligned}
 T = & 114.45 \times 10^{-9} \varepsilon_c^3 + 8.16 \times 10^{-9} \varepsilon_c^2 \varepsilon_t + 6.104 \times 10^{-9} \varepsilon_c \varepsilon_t^2 + 1.0185 \times 10^{-9} \varepsilon_t^3 \\
 & - 51.66 \times 10^{-6} \varepsilon_c^2 - 14.724 \times 10^{-6} \varepsilon_c \varepsilon_t - 2.7588 \times 10^{-6} \varepsilon_t^2 + 5.350 \times 10^{-3} \varepsilon_c \\
 & + 36.4373 \times 10^{-3} \varepsilon_t - 1.81935
 \end{aligned} \tag{3.10}$$

$$R^2 = 1.000$$

$$\text{ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (S) = } 0.218857 \text{ N}\cdot\text{m}$$

เมื่อ T = ภาระบิด, $\text{N}\cdot\text{m}$

ε_c = ค่าความเครียดของแรงในแนวแกน, μ

ε_t = ค่าความเครียดของภาระบิด, μ

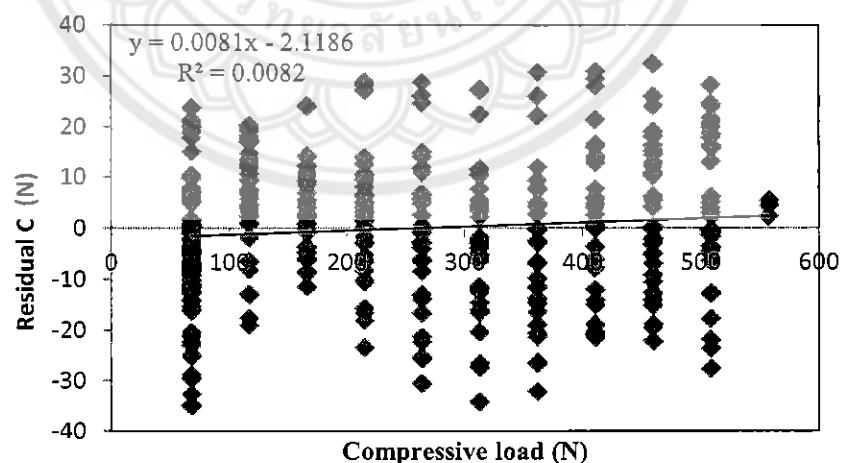
ตารางที่ 3.14 ผลการวิเคราะห์สมการพหุนามดีกรี 3 ของการบิด

Predictor	Coef	SE Coef	T	P
Constant	-1.81935	0.07898	-23.04	0.000
ε_c^3	114.45	92.01	1.24	0.214
$\varepsilon_c^2 \varepsilon_t$	8.16	26.23	0.31	0.756
$\varepsilon_c \varepsilon_t^2$	6.104	2.832	2.16	0.032
ε_t^3	1.0185	0.1788	5.70	0.000
ε_c^2	-51.66	30.16	-1.71	0.088
$\varepsilon_c \varepsilon_t$	-14.724	6.035	-2.44	0.015
ε_t^2	-2.7588	0.4847	-5.69	0.000
ε_c	5.350	2.927	1.83	0.068
ε_t	36.4373	0.3825	95.27	0.000

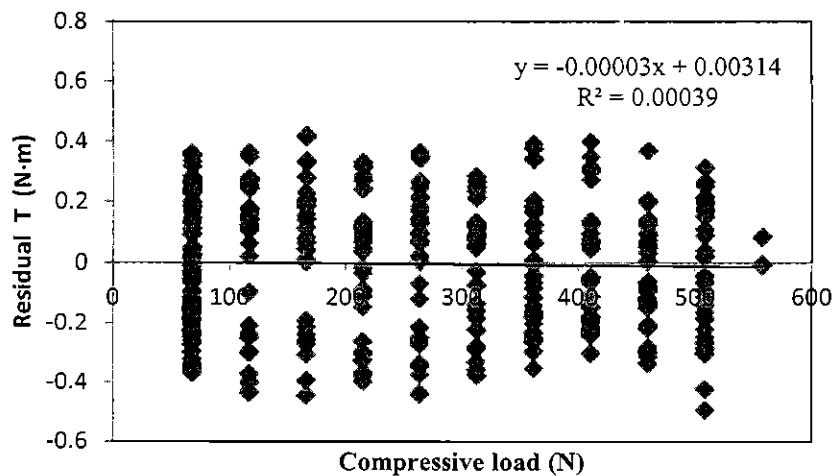
ตารางที่ 3.15 Analysis of variance ของสมการพหุนามดีกรี 3 ของการบิด

Source	DF	SS	MS	F	P
Regression	9	118311	13146	274449.14	0.000
Residual Error	383	18	0		
Total	392	118329			

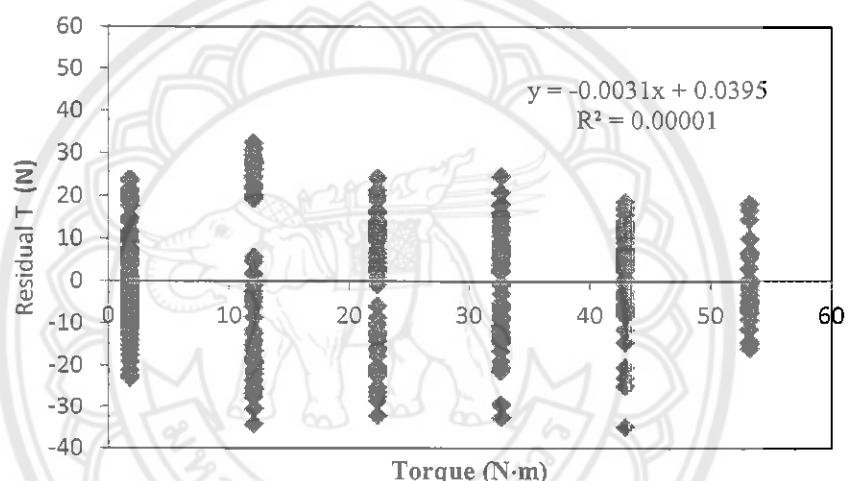
ความสัมพันธ์ระหว่าง Residual ของแรงในแนวแกนและการบิดกับแรงและการบิดที่กระทำ แสดงดังรูปที่ 3.17-3.20



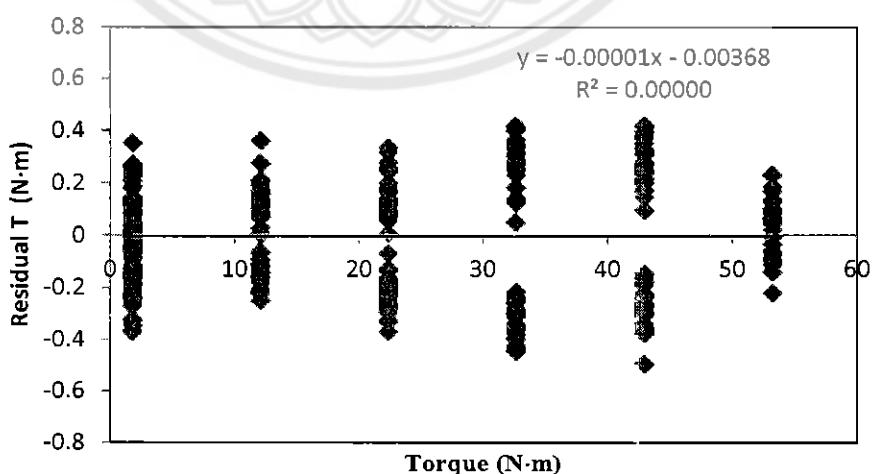
รูปที่ 3.17 ความสัมพันธ์ระหว่าง Residual ของแรงในแนวแกนกับแรงที่กระทำ



รูปที่ 3.18 ความสัมพันธ์ระหว่าง Residual ของการบิดกับแรงในแนวแกนที่กระทำ



รูปที่ 3.19 ความสัมพันธ์ระหว่าง Residual ของแรงในแนวแกนกับการบิดที่กระทำ



รูปที่ 3.20 ความสัมพันธ์ระหว่าง Residual ของการบิดกับการบิดที่กระทำ

จากการวิเคราะห์ผล พบร้า ความสัมพันธ์ระหว่าง residual กับภาระที่กระทำมีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ ไม่มีแนวโน้มที่เด่นชัด แสดงให้เห็นว่า สมการพหุนามดีกรี 3 มีความเหมาะสมอย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาค่า p-value ของพจน์ ε_c^3 ในตารางที่ 3.12 ซึ่งทำนายค่าแรงในแนวแกนพบว่า สัมประสิทธิ์ของพจน์ดังกล่าวไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ คือ $p=0.757$ ซึ่งแสดงให้เห็นว่า พจน์ ε_c^3 นี้ไม่มีผลต่อสมการการลดออยของแรงในแนวแกน ดังนั้นจึงสร้างสมการการลดออยพหุนามดีกรี 3 ใหม่อีกรอบหนึ่งโดยไม่พิจารณาพจน์ของ ε_c^3 แสดงดังสมการที่ 3.11 รายละเอียดผลการวิเคราะห์แสดงดังตารางที่ 3.16 และ 3.17

$$\begin{aligned} C = & -4684.7 \times 10^{-9} \varepsilon_c^2 \varepsilon_t - 196.0 \times 10^{-9} \varepsilon_c \varepsilon_t^2 + 54.60 \times 10^{-9} \varepsilon_t^3 + 2001.8 \times 10^{-6} \varepsilon_c^2 \\ & + 540.5 \times 10^{-6} \varepsilon_c \varepsilon_t - 194.16 \times 10^{-6} \varepsilon_t^2 + 2285.6 \times 10^{-3} \varepsilon_c + 430.03 \times 10^{-3} \varepsilon_t \\ & - 18.219 \end{aligned} \quad (3.11)$$

$$R^2 = 0.992$$

$$\text{ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (S) } = 14.1110 \text{ N}$$

เมื่อ C = แรงในแนวแกน, N

ε_c = ค่าความเครียดของแรงในแนวแกน, μ

ε_t = ค่าความเครียดของภาระบิด, μ

ตารางที่ 3.16 ผลการวิเคราะห์สมการพหุนามดีกรี 3 ของแรงในแนวแกนหลังจากปรับปรุงสมการ

Predictor	Coef	SE Coef	T	P
Constant	-18.219	3.840	-4.74	0.000
$\varepsilon_c^2 \varepsilon_t$	-4684.7	606.5	-7.72	0.000
$\varepsilon_c \varepsilon_t^2$	-196.0	115.1	-1.70	0.089
ε_t^3	54.60	10.52	5.19	0.000
ε_c^2	2001.8	455.9	4.39	0.000
$\varepsilon_c \varepsilon_t$	540.5	207.0	2.61	0.009
ε_t^2	-194.16	26.78	-7.25	0.000
ε_c	2285.56	95.19	24.01	0.000
ε_t	430.03	19.33	22.24	0.000

ตารางที่ 3.17 Analysis of variance ของสมการพหุนามดีกรี 3 ของแรงในแนวแกนหลังจากปรับปรุงสมการ

Source	DF	SS	MS	F	P
Regression	8	9191903	1148988	5770.34	0.000
Residual Error	384	76462	1999		
Total	392	9268365			

พิจารณาสมการพหุนามดีกรี 3 ของการบิด (สมการที่ 3.10) เมื่อพิจารณาค่า p-value ของ พจน์ ε_c^3 และ พจน์ $\varepsilon_c^2\varepsilon_t$, ในตารางที่ 3.14 พบว่า สัมประสิทธิ์ของพจน์ดังกล่าวไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ คือ $p=0.214$ และ $p=0.756$ ตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นว่า พจน์ ε_c^3 และ $\varepsilon_c^2\varepsilon_t$, นี้ น่าจะไม่มีผลต่อสมการการถดถอยของภาระบิด ดังนั้น จึงพิจารณาสมการพหุนามดีกรี 3 ใหม่อีครั้งหนึ่งโดยไม่พิจารณาพจน์ของ ε_c^3 และ $\varepsilon_c^2\varepsilon_t$, จากการวิเคราะห์ผลพบว่า ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (S) เท่ากับ 0.220320 นิวตัน·เมตร ซึ่งมีค่ามากกว่ากรณีที่พิจารณาทุกพจน์ดังสมการที่ 3.10 คือ มีส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน เท่ากับ 0.218857 นิวตัน·เมตร ดังนั้น จึงพิจารณาสมการพหุนามดีกรี 3 ใหม่อีกครั้งหนึ่ง โดยไม่พิจารณาพจน์ของ $\varepsilon_c^2\varepsilon_t$, ซึ่งมีค่า p-value สูงที่สุดเพียงพจน์เดียว แสดงดังสมการที่ 3.12 รายละเอียดผลการวิเคราะห์แสดงดังตารางที่ 3.18 และ 3.19

$$\begin{aligned} T = & 87.73 \times 10^{-9} \varepsilon_c^3 + 5.300 \times 10^{-9} \varepsilon_c \varepsilon_t^2 + 0.9912 \times 10^{-9} \varepsilon_t^3 - 42.528 \times 10^{-6} \varepsilon_c^2 \\ & - 12.939 \times 10^{-6} \varepsilon_c \varepsilon_t - 2.6689 \times 10^{-6} \varepsilon_t^2 + 4.4929 \times 10^{-3} \varepsilon_c + 36.3547 \times 10^{-3} \varepsilon_t \\ & - 1.80092 \end{aligned} \quad (3.12)$$

$$R^2 = 1.000$$

$$\text{ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (S)} = 0.218599 \text{ N}\cdot\text{m}$$

เมื่อ T = ภาระบิด, N·m

ε_c = ค่าความเครียดของแรงในแนวแกน, μ

ε_t = ค่าความเครียดของภาระบิด, μ

ตารางที่ 3.18 ผลการวิเคราะห์สมการพหุนามดีกรี 3 ของการบิดหลังจากปรับปรุงสมการ

Predictor	Coef	SE Coef	T	P
Constant	-1.80092	0.05217	-34.52	0.000
ε_c^3	87.73	32.97	2.66	0.008
$\varepsilon_c \varepsilon_t^2$	5.300	1.158	4.58	0.000
ε_t^3	0.9912	0.1556	6.37	0.000
ε_c^2	-42.528	6.823	-6.23	0.000
$\varepsilon_c \varepsilon_t$	-12.939	1.864	-6.94	0.000
ε_t^2	-2.6689	0.3885	-6.87	0.000
ε_c	4.4929	0.9854	4.56	0.000
ε_t	36.3547	0.2749	132.27	0.000

ตารางที่ 3.19 Analysis of variance ของสมการพหุนามดีกรี 3 ของการบิดหลังจากปรับปรุงสมการ

Source	DF	SS	MS	F	P
Regression	8	118311	14789	309483.26	0.000
Residual Error	384	18	18		
Total	392	118329			

จากข้อมูลที่ได้ทำการทดสอบและวิเคราะห์ผลอุปกรณ์วัดแรงในแนวแกนและการบิดที่ได้ทำการพัฒนา เมื่อรับแรงในแนวแกนและการบิดพร้อมกัน ซึ่งทำการทดสอบด้วยเท้นทดสอบที่พัฒนาขึ้น การคำนวณเพื่อหาค่าแรงในแนวแกนที่วัดได้ใช้สมการที่ 3.11 และใช้สมการที่ 3.12 สำหรับคำนวณหาค่าการบิด รายละเอียดสามารถสรุปข้อมูลได้ดังตารางที่ 3.20

ตารางที่ 3.20 ข้อมูลการวัดทางกลของอุปกรณ์วัดแรงในแนวแกนและการบิดต้นแบบเมื่อรับแรงในแนวแกนและการบิดพร้อมกัน

Parameters	Axial force	Torque
Range:	Input 0 to 500 N	Input 0 to 50 Nm
Repeatability error:	(Max.) 3.182 % FSO	(Max.) 3.770 % FSO
Hysteresis error:	(Max.) 11.636 % FSO	(Max.) 1.761 % FSO
Regression error:	(Max.) 2.822 % FSO	(Max.) 4.142 % FSO
	$S = 14.1110 \text{ N}$	$S = 0.218599 \text{ N}\cdot\text{m}$

จากการทดสอบอุปกรณ์วัดแรงในแนวแกนและการบิดที่พัฒนาให้สามารถรับแรงในแนวแกนสูงสุด 500 นิวตันและสามารถถรับการบิดได้สูงสุด 50 นิวตัน·เมตร ด้วยวิธีการทดสอบด้วยเครื่องทดสอบความแข็งแรงของวัสดุ และทดสอบด้วยเท้นทดสอบที่พัฒนาขึ้น สามารถสรุปสมการการลดถอยได้ดังตารางที่ 3.21

การนำอุปกรณ์วัดแรงในแนวแกนและการบิดที่พัฒนาขึ้นนี้ไปใช้งานจะต้องพิจารณาลักษณะของการที่มีการทำการทำล่าวยืด หรือหักงอ ทั้งสองกระบวนการเพียงอย่างเดียว มีการบิดเพียงอย่างเดียว หรือทั้งสองกระบวนการทำพร้อมกัน เพื่อเลือกใช้สมการให้ถูกต้องตรงกับลักษณะของการที่กระทำนั้นๆ และเพื่อเพิ่มความถูกต้องของการประมาณค่าของภาระที่ต้องการวัดได้

ตารางที่ 3.21 สมการการผลิตอย่างง่ายในการคำนวณแรงในเนื้องานและภาระโดยที่ได้พัฒนา

Load	Test methods	Force equations	Torque equations
Axial force	UTM $S = 10.8532 \text{ N}$	$C = 2.8274 \varepsilon_c - 13.619$ (3.2)	$T = 0.0035 \varepsilon_t - 0.25655$ (3.4) $S = 0.4746 \text{ N}\cdot\text{m}$
Torque	Test base		
Combin ed load	Test base Degree 1 $S = 22.2545 \text{ N}$	$C = 2.62493 \varepsilon_c + 0.248850 \varepsilon_t + 4.060$ (3.5) $T = -0.0026811 \varepsilon_c + 0.0342249 \varepsilon_t - 1.43650$ $S = 0.2494 \text{ N}\cdot\text{m}$	Degree 1 $T = -0.00002854 \varepsilon_c^2 - 0.00000015 \varepsilon_t^2 + 0.00000487 \varepsilon_c \varepsilon_t$ (3.6) $+ 0.0030379 \varepsilon_c + 0.0345972 \varepsilon_t - 1.58757$ $S = 0.239128 \text{ N}\cdot\text{m}$
	Degree 2 $S = 16.6318 \text{ N}$	$C = -0.0006230 \varepsilon_c^2 - 0.00006684 \varepsilon_t^2 + 0.00000668 \varepsilon_c \varepsilon_t$ (3.7) $+ 2.66084 \varepsilon_c + 0.349478 \varepsilon_t - 14.233$	Degree 2 $T = 114.45 \times 10^{-9} \varepsilon_c^3 + 8.16 \times 10^{-9} \varepsilon_c^2 \varepsilon_t + 6.104 \times 10^{-9} \varepsilon_c \varepsilon_t^2$ $+ 1.0185 \times 10^{-9} \varepsilon_t^3 - 51.66 \times 10^{-6} \varepsilon_c^2 - 14.724 \times 10^{-6} \varepsilon_c \varepsilon_t$ $- 2.7588 \times 10^{-6} \varepsilon_t^2 + 5.350 \times 10^{-3} \varepsilon_c + 36.4373 \times 10^{-3} \varepsilon_t$ (3.10) $- 1.81935$ $S = 0.218857 \text{ N}\cdot\text{m}$
	Degree 3 $S = 14.1276 \text{ N}$	$C = -1837 \times 10^{-9} \varepsilon_c^3 - 5173 \times 10^{-9} \varepsilon_c^2 \varepsilon_t - 239.9 \times 10^{-9} \varepsilon_c \varepsilon_t^2$ $+ 53.14 \times 10^{-9} \varepsilon_t^3 + 2587 \times 10^{-6} \varepsilon_c^2 + 642.5 \times 10^{-6} \varepsilon_c \varepsilon_t$ (3.9) $- 189.18 \times 10^{-6} \varepsilon_t^2 + 2235.1 \times 10^{-3} \varepsilon_c + 425.29 \times 10^{-3} \varepsilon_t$ $- 17.184$	Degree 3 Modified $T = 87.73 \times 10^{-9} \varepsilon_c^3 + 5.300 \times 10^{-9} \varepsilon_c \varepsilon_t^2 + 0.9912 \times 10^{-9} \varepsilon_t^3$ $- 42.528 \times 10^{-6} \varepsilon_c^2 - 12.939 \times 10^{-6} \varepsilon_c \varepsilon_t - 2.6689 \times 10^{-6} \varepsilon_t^2$ (3.12) $+ 4.4929 \times 10^{-3} \varepsilon_c + 36.3547 \times 10^{-3} \varepsilon_t - 1.80092$ $S = 0.218599 \text{ N}\cdot\text{m}$

บทที่ 4

สรุปผลและข้อเสนอแนะ

4.1 บทสรุป

การออกแบบ สร้าง และทดสอบอุปกรณ์วัดแรงในแนวแกนและการบิดที่พัฒนาเพื่อใช้ในการวัดแรงในแนวแกนได้สูงสุด 500 นิวตัน และวัดการบิดได้สูงสุด 50 นิวตัน·เมตร สามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้

1) อุปกรณ์วัดแรงในแนวแกนและการบิดที่พัฒนา ทำจากวัสดุสแตนเลส 304 จากการออกแบบและวิเคราะห์ด้วยระบบคอมพิวเตอร์เอลิเมนต์ด้วยโปรแกรม COMSOL Multiphysics 3.2 ได้รูปแบบชิ้นงานที่มีความเหมาะสมคือ ชิ้นงานที่มีลักษณะเป็นทรงกระบอกวงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 31 มิลลิเมตร ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 27 มิลลิเมตร สูง 76.2 มิลลิเมตร เจาะรูกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร จำนวน 4 รู เจาะทะลุทั้งสองด้าน และทำการเชาะร่องขนาดกว้าง 2 มิลลิเมตรในแนวระดับทะลุถึงกันระหว่างห่วงสองห่วง เจาะรูขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 8 มิลลิเมตรระหว่างด้านทั้งสองด้านสำหรับร้อยสลัก มีหัวส่องด้าน คือ ด้านบนและด้านล่างของหลอดเซลล์ โดยที่รูหัวส่องด้านจะเจาะตั้งฉากกัน เมื่อมองจากวิวด้านบน ติดตั้งสเตตอเรนเกจขนาด 350 โอม ชนิด KFG-5-350-C1-16L30C2R ใช้สเตรนเกจ 4 ตัวต่อวงจร มีจำนวน 2 วงจร คือวงจรสำหรับวัดแรงในแนวแกน และวงจรสำหรับวัดการบิด แต่ละวงจรต่อแบบวีทส์โตกบридจ์

2) ออกแบบและสร้างแท่นทดสอบสำหรับวัดแรงในแนวแกนและการบิด เพื่อใช้ในการทดสอบการบิด และทดสอบแรงในแนวแกนและการบิดที่กระทำพร้อมกัน แท่นทดสอบทำเป็นโต๊ะเหล็กขนาดกว้าง 1 เมตร ยาว 1 เมตร สูง 0.9 เมตร มีล้อ 4 ล้อเพื่อความสะดวกในการเคลื่อนย้าย มีที่ปรับระดับที่พื้นเพื่อใช้ปรับระดับให้แท่นทดสอบอยู่ในแนวระดับและสามารถถือค้ำหนาได้ไม่ให้เท่น มีการเคลื่อนตัวขณะทำการทดสอบ การทดสอบการบิดจะทำโดยการใส่ก้อนน้ำหนักบนที่แขวนน้ำหนักด้านซ้ายทั้งสองด้าน ซึ่งที่แขวนด้านซ้ายทั้งสองนี้จะถูกแขวนด้วยลวดสลิงที่คล้องผ่านจานวนเซาะร่องและคล้องผ่านชุดรอกที่สามารถปรับระดับสูง-ต่ำได้ และสามารถเลื่อนตำแหน่งซ้าย-ขวาได้ เพื่อให้แนวลวดสลิงอยู่ในทิศทางตั้งฉากและอยู่ในแนวระดับ ที่แขวนน้ำหนักตรงกลางสามารถปรับระดับสูง-ต่ำได้เพื่อปรับให้ฐานแขวนอยู่ในแนวระดับ

3) อุปกรณ์วัดแรงในแนวแกนและการบิดที่ได้พัฒนา สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานเพื่อวัดแรงในแนวแกนหรือวัดการบิดเพียงอย่างใดอย่างหนึ่งได้ สมการที่ใช้ในการประมาณค่าแรงในแนวแกน คือ

$$C = 2.8274 \epsilon_c - 13.619$$

และสมการที่ใช้ในการประมาณค่าการบิด คือ

$$T = 0.0035 \epsilon_c - 0.25655$$

เมื่อ C = แรงในแนวแกน, N

T = การบิด, N·m

ϵ_c = ค่าความเครียดของแรงในแนวแกน, μ

ϵ_b = ค่าความเครียดของการบิด, μ

ข้อมูลทางเทคนิคแสดงดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ข้อมูลการวัดทางกลของอุปกรณ์วัดแรงในแนวแกนและการบิดตันแบบเมื่อรับภาระเพียงอย่างเดียวอย่างหนึ่ง

Parameters	Axial force	Torque
Range:	Input 0 to 500 N Output 5.2349 to 181.2159 μ	Input 0 to 50 N·m Output 7.3280 to 1435.1930 μ
Rate of sensitivity:	0.3520 μ /N	28.5573 μ /(N·m)
Zero error:	(Max.) 0.052 % FSO	(Max.) 0.009 % FSO
Repeatability error:	(Max.) 0.768 % FSO	(Max.) 1.187 % FSO
Reproducibility error:	(Max.) 4.172 % FSO	(Max.) 1.578 % FSO
Hysteresis error:	(Max.) 1.761 % FSO	(Max.) 2.219 % FSO
Regression error:	(Max.) 1.126 % FSO $S = 3.8293 \mu$ $S = 10.8532 N$	(Max.) 0.991 % FSO $S = 13.5568 \mu$ $S = 0.4746 N\cdot m$

4) ผลการทดสอบอุปกรณ์วัดแรงในแนวแกนและการบิดที่พัฒนาพบว่า มีสัญญาณแทรกข้ามเกิดขึ้น คือ เมื่อใส่แรงกระทำในแนวแกนเพียงอย่างเดียว พบสัญญาณแทรกข้ามเกิดขึ้นที่วงจรวัดแรงในแนวแกนสูงถึง 70 เบอร์เซ็นต์ และเมื่อใส่ภาระบิดเพียงอย่างเดียว พบสัญญาณแทรกข้ามเกิดขึ้นที่วงจรวัดแรงในแนวแกนสูงถึง 70 เบอร์เซ็นต์เมื่อใส่ภาระบิดเต็มความสามารถคือ 50 นิวตัน·เมตร

5) การสอบเทียบอุปกรณ์วัดแรงในแนวแกนและการบิดด้วยการใส่ภาระทั้งสองอย่างไปพร้อมกัน ทำให้ได้สมการการลดถอยที่มีความถูกต้องมากขึ้น ซึ่งมีความจำเป็นสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้กับขั้นงานที่ต้องรับภาระทั้งสองอย่างพร้อมกัน

6) จากผลการทดสอบพบว่า การวิเคราะห์หาสมการการลดถอยที่เหมาะสมไม่สามารถพิจารณาค่า R^2 เพียงอย่างเดียวได้ ให้พิจารณาส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานร่วมด้วย การใช้สมการพหุนามให้มีศักยภาพสูงขึ้น สามารถลดส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานลงได้ และการพิจารณาค่า p-value ร่วมด้วย จะทำให้ได้สมการการลดถอยที่มีความถูกต้องมากขึ้น

7) อุปกรณ์วัดแรงในแนวแกนและการบิดที่ได้พัฒนา สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในงานที่ต้องการวัดแรงในแนวแกนและการบิดที่กระทำพร้อมกันได้ สมการที่ใช้ในการประมาณค่าแรงในแนวแกน

$$\begin{aligned} C = & -4684.7 \times 10^{-9} \varepsilon_c^2 \varepsilon_t - 196.0 \times 10^{-9} \varepsilon_c \varepsilon_t^2 + 54.60 \times 10^{-9} \varepsilon_t^3 + 2001.8 \times 10^{-6} \varepsilon_c^2 \\ & + 540.5 \times 10^{-6} \varepsilon_c \varepsilon_t - 194.16 \times 10^{-6} \varepsilon_t^2 + 2285.6 \times 10^{-3} \varepsilon_c + 430.03 \times 10^{-3} \varepsilon_t \\ & - 18.219 \end{aligned}$$

และสมการที่ใช้ในการประมาณค่าภาระบิด คือ

$$\begin{aligned} T = & 87.73 \times 10^{-9} \varepsilon_c^3 + 5.300 \times 10^{-9} \varepsilon_c \varepsilon_t^2 + 0.9912 \times 10^{-9} \varepsilon_t^3 - 42.528 \times 10^{-6} \varepsilon_c^2 \\ & - 12.939 \times 10^{-6} \varepsilon_c \varepsilon_t - 2.6689 \times 10^{-6} \varepsilon_t^2 + 4.4929 \times 10^{-3} \varepsilon_c + 36.3547 \times 10^{-3} \varepsilon_t \\ & - 1.80092 \end{aligned}$$

เมื่อ $C = \text{แรงในแนวแกน}, \text{N}$
 $T = \text{การะบิด}, \text{N}\cdot\text{m}$
 $\varepsilon_c = \text{ค่าความเครียดของแรงในแนวแกน}, \mu$
 $\varepsilon_r = \text{ค่าความเครียดของภาระบิด}, \mu$

ข้อมูลทางเทคนิคแสดงตั้งตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ข้อมูลการวัดทางกลของอุปกรณ์วัดแรงในแนวแกนและการะบิดตันแบบเมื่อรับแรงในแนวแกนและการะบิดพร้อมกัน

Parameters	Axial force	Torque
Range:	Input 0 to 500 N	Input 0 to 50 N·m
Repeatability error:	(Max.) 3.182 % FSO	(Max.) 3.770 % FSO
Hysteresis error:	(Max.) 11.636 % FSO	(Max.) 1.761 % FSO
Regression error:	(Max.) 2.822 % FSO	(Max.) 4.142 % FSO
	$S = 14.1110 \text{ N}$	$S = 0.218599 \text{ N}\cdot\text{m}$

4.2 ข้อเสนอแนะ

- 1) โหลดเซลล์ที่ดี ควรจะถูกออกแบบให้มีสัญญาณแทรกข้าม (crosstalk) เกิดขึ้นน้อยที่สุด ดังนั้น ควรมีการศึกษา วิจัย เพื่อพัฒนารูปแบบโหลดเซลล์ให้มีความแม่นยำสูงขึ้น
- 2) การสอบเทียบโหลดเซลล์ที่สามารถวัดภาระได้หลายอย่างพร้อมกัน มีความจำเป็นที่ จะต้องทำการสอบเทียบด้วยการใส่ภาระนั้นาพร้อมๆกัน เพื่อให้ได้สมการการณ์ถดถอยที่ถูกต้องแม่นยำมากขึ้น
- 3) การวิเคราะห์หาสมการการณ์ถดถอยที่เหมาะสมนั้น ไม่สามารถพิจารณาค่า R^2 เพียงอย่างเดียว จะต้องพิจารณาส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานให้มีค่าน้อยที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ ซึ่งต้องใช้การวิเคราะห์ทางสถิติร่วมด้วย เพื่อที่จะได้สมการการณ์ถดถอยที่มีความถูกต้องมากขึ้น

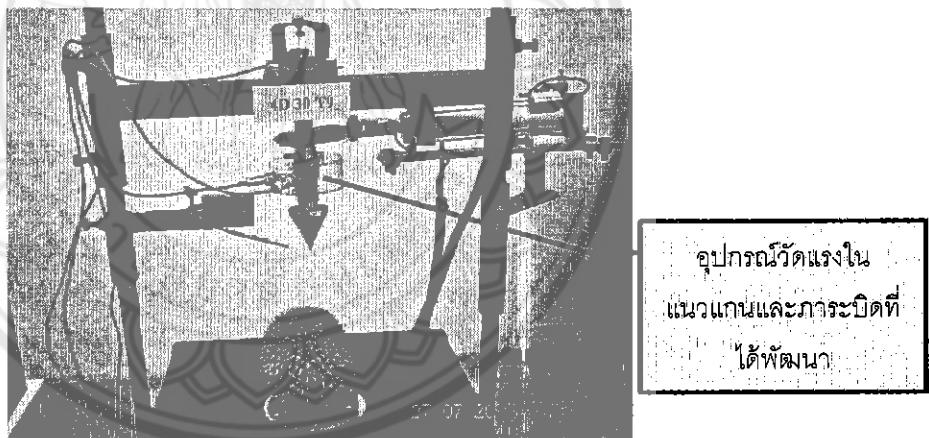
บทที่ 5

การใช้ประโยชน์จากผลงานวิจัย

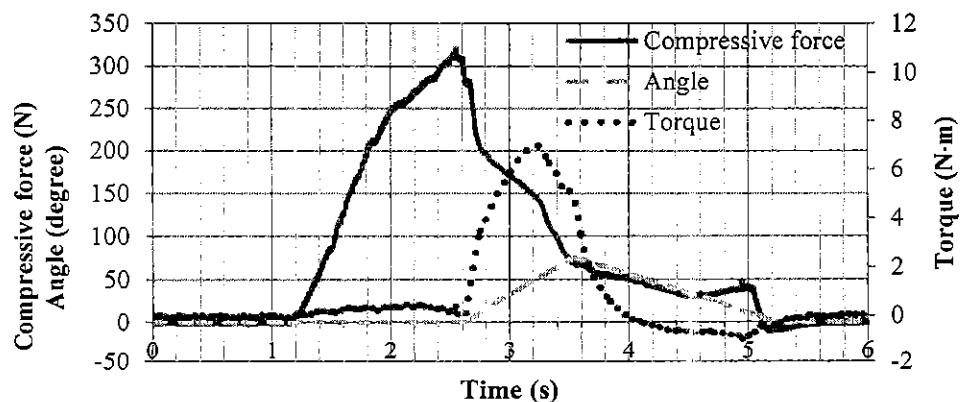
5.1 การประยุกต์ใช้ในโครงการวิจัย การออกแบบและพัฒนาเครื่องปอกเปลือกทุเรียน

รัตนานา และพีระศักดิ์ (2556) ได้รับการสนับสนุนทุนวิจัยจากสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ให้ดำเนินโครงการวิจัย “การวิจัยและพัฒนาเครื่องปอกเปลือกทุเรียนพันธุ์หลังลับแบบกึ่งอัตโนมัติ” แผนงานวิจัย การวิจัยและพัฒนาแบบบูรณาการเพื่อการผลิตทุเรียนพันธุ์หลังและหลินลับและเชิงพาณิชย์อย่างยั่งยืน ปีที่ 2 ในโครงการวิจัยดังกล่าว ทำการศึกษาสมบัติทางกายภาพของทุเรียน ออกแบบและสร้างเครื่องปอกเปลือกทุเรียนแบบกึ่งอัตโนมัติ ซึ่งได้ทำการศึกษาหารูปแบบของหัวเจาะหมุนแห้งเปลือกทุเรียนที่เหมาะสม โดยพิจารณาจากแรงที่ใช้ในการกด ภาระบิดที่ใช้ในการหมุนแห้งเปลือก และประสิทธิภาพในการปอกเปลือก

เครื่องปอกเปลือกทุเรียนต้นแบบที่ทำการออกแบบและสร้าง เพื่อศึกษาการปอกเปลือกทุเรียนเบื้องต้น แสดงดังรูปที่ 5.1 ประกอบด้วย 1) โครงสร้างหลัก, 2) ชุดปอกเปลือกที่ใช้ระบบนิวแมติกส์, 3) ลิมิตสวิทซ์ 4) ระบบเครื่องมือวัด ซึ่งประกอบด้วย ก) อุปกรณ์วัดแรงในแนวแกนและภาระบิดที่ได้พัฒนา และ ข) อุปกรณ์วัดมุม ซึ่งได้นำ Potentiometer มาประยุกต์ใช้ ผลของการวัดแรงและการบิด แสดงดังรูปที่ 5.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการบิดที่ใช้ในการเจาะหมุนแห้งเปลือกทุเรียน



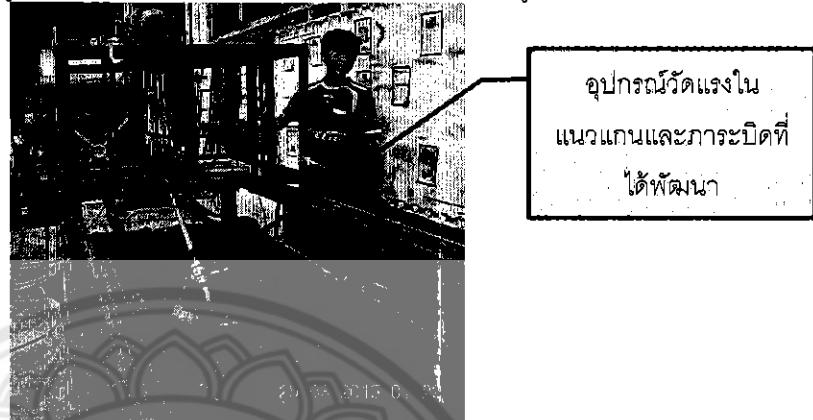
รูปที่ 5.1 เครื่องปอกเปลือกทุเรียนแบบกึ่งอัตโนมัติต้นแบบกับเครื่องมือวัด



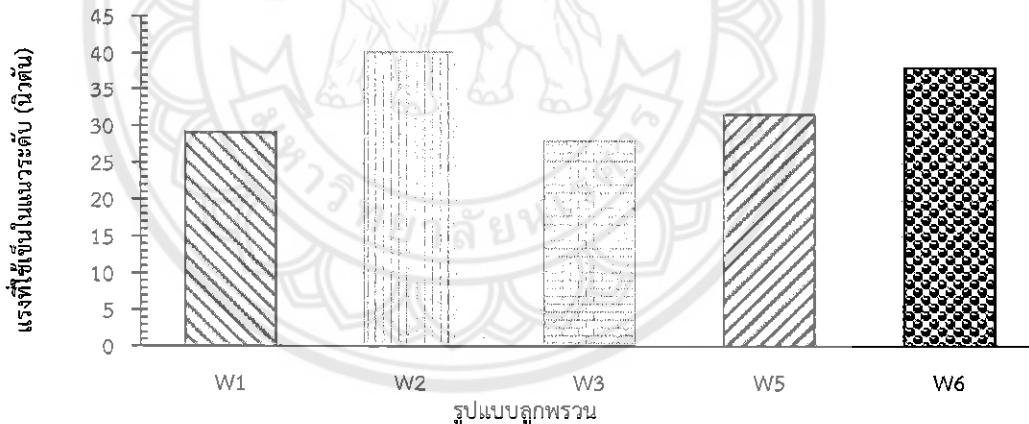
รูปที่ 5.2 ลักษณะของแรงและการบิดที่ใช้ในการหมุนเจาะแห้งเปลือกทุเรียน

5.2 การประยุกต์ใช้ในโครงการวิจัย การพัฒนาเครื่องพรวนกำจัดวัชพืชในนาข้าว

มติชน และรัตน (2556) ได้รับการสนับสนุนทุนวิจัยจากกองทุนวิจัยมหาวิทยาลัยเรศวร ให้ดำเนินโครงการวิจัย “การวิจัยและพัฒนาเครื่องกำจัดวัชพืชในนาข้าว” เพื่อทดสอบ และออกแบบ เครื่องกำจัดวัชพืชในนาข้าว ในส่วนของการศึกษาหารูปแบบของลูกพรวนที่เหมาะสม ได้มีการ ประยุกต์ใช้อุปกรณ์วัดแรงในแนวแกนและการบิดที่ได้พัฒนาเป็นเครื่องมือวัดแรงที่ใช้ในการเข็นเมื่อ ทำการทดสอบในระยะดิน (รูปที่ 5.3) และตัวอย่างผลการทดสอบ แสดงดังรูปที่ 5.4



รูปที่ 5.3 ประยุกต์ใช้อุปกรณ์วัดแรงในแนวแกนและการบิดกับการทดสอบลูกพรวนกำจัดวัชพืชใน ระยะดิน



รูปที่ 5.4 ตัวอย่างผลการทดสอบลูกพรวนกำจัดวัชพืชในระยะดิน

5.3 การเรียนการสอนในวิชาปฏิบัติการวิศวกรรมเครื่องกล

แบบแจ้งยืนยันการนำเสนอผลงานวิจัยไปใช้ประโยชน์

เรียน อธิการบดี

ตามที่..... ผศ.ดร. รัชนา ภาณุพันธุ์..... อาจารย์ประจำสาขาวิศวกรรมศาสตร์.....
สังกัดมหาวิทยาลัยนเรศวร ได้ดำเนินมูลงานวิจัย/ที่น่าสนใจ..... เรื่อง..... การออกแบบอุปกรณ์วัดแรงใบแนวแกนและ
กระเด็น..... และดำเนินการเสร็จสิ้นเมื่อ ..เมษายน 2558.. นั้น

ผลงานวิจัย/งานสร้างสรรค์สามารถนำไปใช้ประโยชน์ในการดำเนินงานของ ...ภาควิชา
วิศวกรรมเครื่องกล คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร..... โดยมีรายละเอียดการนำเสนอไปใช้ประโยชน์ดังนี้

- ผู้ที่/กลุ่มเข้ามายื่นในการถ่ายทอด...
- จำนวนผู้ที่ได้รับประโยชน์..... คน
- สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในด้านใดด้านใดๆ ได้ดังต่อไปนี้เครื่องหมาย ✓ ในด้านที่ใช้ประโยชน์นี้
 - การใช้ประโยชน์เพื่อสาธารณะ
 - ด้านการสร้างเสริมประโยชน์ให้แก่ภาคประชาชน
 - ด้านการบริหารจัดการสำหรับหน่วยงานภาครัฐ
 - ด้านศิลปะและวัฒนธรรม
 - ด้านวิชวิชา
 - การใช้ประโยชน์เพื่อยield
 - นำไปประกอบเป็นข้อมูลการประกอบใช้กฎหมายหรือกำหนดมาตรการ กฎหมายที่ต่าง ๆ โดยองค์กรหรือน่วยงานภาครัฐและเอกชน
 - นำไปประกอบเป็นข้อมูลในการจัดทำหรือปรับปรุงนโยบาย ยุทธศาสตร์ แผนงาน โครงการ กิจกรรม โดยองค์กรหรือน่วยงานภาครัฐและเอกชน
 - การใช้ประโยชน์เชิงพาณิชย์
 - นำไปสู่การพัฒนาวัสดุรูปแบบใหม่หรือผลิตภัณฑ์ซึ่งก่อให้เกิดรายได้ หรือนำไปสู่การเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตหรือการบริการ ทั้งองค์กนหน่วยงานภาครัฐและเอกชน
 - การใช้ประโยชน์ทางวิชาชีพ/ด้านอื่น ๆ (ประยุกต์) นำไปในการเรียนการสอนวิชา 302368 ปฏิบัติการสำหรับวิศวกรรมเครื่องกล 1 (Laboratory for Mechanical Engineering I).....

ในการนี้ จึงได้ขออนุญาตในความกรุณาของหน่วยงานท่านเป็นอย่างสูง

จึงเรียนมาเพื่อโปรดทราบ

ขอแสดงความนับถือ

(ผศ.ดร. รัชนา ภาณุพันธุ์ อ.ยุ้งแก้ว)

ตำแหน่ง. หัวหน้าภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล.
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร
รุ่นที่ ๒๔๙๗๘๖๙๖๖

เอกสารอ้างอิง

- มัทนี สงวนเสริมศรี และ รัตนา การรุณบุญญาณนันท์. 2556. การวิจัยและพัฒนาเครื่องกำจัดวัชพืชในนาข้าว, รายงานความก้าวหน้าในรอบ 12 เดือน. กองทุนวิจัยมหาวิทยาลัยนเรศวร
- รัตนา การรุณบุญญาณนันท์ และ พิรษศักดิ์ ชาญประสาท. 2557. การวิจัยและพัฒนาเครื่องปอกเปลือกทุเรียนพันธุ์หลังลับแบบกึ่งอัตโนมัติ, รายงานความก้าวหน้าครั้งที่ 3. สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ
- สมบัติ อapaดิน. 2533. โหลดเซลล์แบบค่าความต้านทาน, วิทยานิพนธ์ปริญญาโท สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าฯ พระนครเหนือ กรุงเทพ
- สุรศิทธิ์ ปิยะศิลป์ และ สุกิกิจ รูปขั้นร. 2547. การศึกษาออกแบบโหลดเซลล์ชนิดคอลัมน์โดยวิธีการทดลองและระเบียบวิธีไฟแนนซ์เอลิเม้นต์. การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 18, 18-20 ตุลาคม 2547, จังหวัดขอนแก่น
- สุรินทร์ พงศ์ศุภสมิทธิ์, สรวารุ เหล่าพงศ์สวัสดิ์, กฤดา พิสิษฐ์เพบูลย์ และ วัทัญ สันตินิยมการ. 2546. เทคนิคการวัดแรงกระทำที่ใบมีดจอยหมุน. การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 17, 15-17 ตุลาคม 2546, จังหวัดปราจีนบุรี
- อนุพันธ์ เกิดวงศ์รากุล และปราโมทย์ ฤกุล. 2552. การพัฒนาเครื่องผ่าผลทุเรียนเพื่อการบริโภคผลสด, รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์. ศูนย์นวัตกรรมเทคโนโลยีห้องการเก็บเกี่ยว มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน พ.ศ. 2552
- Godwin, R.J. 1975. An extended octagonal ring transducer for use in tillage studies. J. agric. Engng Res. 20: 347-352.
- Hoag, D.L. and Yoerger, R.R. 1975. Analysis and design of load rings. Transactions of ASAE 18(5): 995-1000.
- ISO 376:2011(E). 2001. Metallic materials-Calibration of force-proving instruments used for the verification of uniaxial testing machines.
- Karabay, S. 2005. Analysis of drill dynamometer with octagonal ring type transducers for monitoring of cutting forces in drilling and allied process. Materials and Design 28(2): 673-685.
- Karoonboonyanan, R., Salokhe, V. M., Niyamapa, T. and Nakashima, H. 2007. Vibration effects on the performance of a single-shank subsoiler. Agricultural Engineering International: the CIGR Journal of Scientific Research and Development. Manuscript PM 07 018. Vol. IX. September, 2007.
- Kumar, H. and Sharma, C. 2012. Role of finite element analysis in improving hysteresis error of force transducers. Transactions of the Institute of Measurement and Control 34(8): 1019-1024.
- Nalavade, P.P., Salokhe, V.M. and Niyamapa, T. 2010. Strain node identification by FEM and measurement of disc forces by double extended octagonal ring transducer. Journal of Food, Agriculture & Environment 8(2): 730-735.

- O'Dogherty, M.J. 1996. The design of octagonal ring dynamometers. J. agric. Engng Res. 63: 9-18.
- Saglam, H. and Unuvar, A. 2001. Three-component, strain gage based milling dynamometer design and manufacturing. Transactions of the SDPS 5(2): 95-109.
- Watyotha, C. and Salokhe, V.M. 2001. Development of a data acquisition system for measuring the characteristics of real time forces by cage wheels. Journal of Terramechanics 38: 201-210.





ตาราง ก1. ผลการทดสอบแรงในแนวแกนด้วยเครื่องทดสอบความแข็งแรงของวัสดุ

No.	Angle	Pattern	Compressive (N)	Torque (N·m)	Compressive strain (μ)	Torsional strain (μ)
1	0	C1	0	0	0.050237	-0.017408
2	0	C1	50	0	19.873	-3.2728
3	0	C1	100	0	38.055	-5.7418
4	0	C1	150	0	55.687	-7.6861
5	0	C1	200	0	72.974	-9.2927
6	0	C1	250	0	90.553	-10.845
7	0	C1	300	0	107.77	-12.43
8	0	C1	350	0	125.05	-13.818
9	0	C1	400	0	142.64	-15.239
10	0	C1	450	0	159.46	-16.321
11	0	C1	500	0	176.56	-17.029
12	0	C2	0	0	0.078828	-0.33919
13	0	C2	50	0	19.928	-3.5316
14	0	C2	100	0	38.013	-6.1603
15	0	C2	150	0	55.442	-7.9134
16	0	C2	200	0	73.049	-7.126
17	0	C2	250	0	90.233	-11.321
18	0	C2	300	0	107.43	-12.734
19	0	C2	350	0	124.83	-14.221
20	0	C2	400	0	141.29	-15.527
21	0	C2	450	0	158.89	-16.667
22	0	C2	500	0	175.55	-17.464
23	0	C3	0	0	0.1701	-0.29391
24	0	C3	50	0	20.19	-3.5147
25	0	C3	100	0	38.233	-5.935
26	0	C3	150	0	55.992	-7.8463
27	0	C3	200	0	73.298	-9.5079
28	0	C3	250	0	90.521	-11.083
29	0	C3	300	0	107.93	-12.585
30	0	C3	350	0	124.92	-14.071
31	0	C3	400	0	141.73	-15.313
32	0	C3	450	0	158.51	-16.534
33	0	C3, C4	500	0	175.46	-17.62

ตาราง ก1. ผลการทดสอบแรงในแนวแกนด้วยเครื่องทดสอบความแข็งแรงของวัสดุ (ต่อ)

No.	Angle	Pattern	Compressive	Torque	Compressive strain	Torsional strain
			(N)	(N·m)	(μ)	(μ)
34	0	C4	450	0	159.61	-16.692
35	0	C4	400	0	143.46	-15.594
36	0	C4	350	0	127.3	-14.61
37	0	C4	300	0	110.57	-13.433
38	0	C4	250	0	93.631	-12.193
39	0	C4	200	0	76.453	-10.965
40	0	C4	150	0	58.931	-9.2961
41	0	C4	100	0	40.797	-7.0798
42	0	C4	50	0	22.165	-4.3601
43	0	C4	0	0	0.26953	-0.26592
44	0	C5	0	0	0.26953	-0.26592
45	0	C5	50	0	19.883	-3.3899
46	0	C5	100	0	38.194	-6.0079
47	0	C5	150	0	55.745	-7.9263
48	0	C5	200	0	72.903	-9.5879
49	0	C5	250	0	90.077	-11.184
50	0	C5	300	0	107.32	-12.628
51	0	C5	350	0	124.21	-14.077
52	0	C5	400	0	141.21	-15.361
53	0	C5	450	0	158.37	-16.575
54	0	C5, C6	500	0	174.94	-17.711
55	0	C6	450	0	159.16	-16.594
56	0	C6	400	0	143.09	-15.61
57	0	C6	350	0	126.94	-14.634
58	0	C6	300	0	110.56	-13.571
59	0	C6	250	0	93.516	-12.383
60	0	C6	200	0	76.242	-10.972
61	0	C6	150	0	58.758	-9.2919
62	0	C6	100	0	40.325	-6.9433
63	0	C6	50	0	21.809	-4.3485
64	0	C6	0	0	0.32	-0.20617
65	180	C1'	0	0	0.073851	0.27193
66	180	C1'	50	0	24.171	-7.1002

ตาราง ก1. ผลการทดสอบแรงในแนวแกนด้วยเครื่องทดสอบความแข็งแรงของวัสดุ (ต่อ)

No.	Angle	Pattern	Compressive (N)	Torque (N·m)	Compressive strain (μ)	Torsional strain (μ)
67	180	C1'	100	0	43.955	-10.365
68	180	C1'	150	0	62.711	-12.772
69	180	C1'	200	0	80.235	-13.911
70	180	C1'	250	0	97.688	-15.243
71	180	C1'	300	0	114.3	-16.239
72	180	C1'	350	0	131.35	-17.472
73	180	C1'	400	0	148.32	-19.054
74	180	C1'	450	0	165.49	-21.046
75	180	C1'	500	0	182.4	-22.853
76	180	C2'	0	0	0.15769	0.36996
77	180	C2'	50	0	24.161	-7.2612
78	180	C2'	100	0	45.072	-11.476
79	180	C2'	150	0	62.579	-13.258
80	180	C2'	200	0	80.052	-13.987
81	180	C2'	250	0	97.445	-15.096
82	180	C2'	300	0	114.24	-16.13
83	180	C2'	350	0	131.73	-18.094
84	180	C2'	400	0	148.05	-19.723
85	180	C2'	450	0	165.1	-21.407
86	180	C2'	500	0	181.9	-23.093
87	180	C3'	0	0	0.57425	0.357
88	180	C3'	50	0	24.305	-7.3647
89	180	C3'	100	0	44.577	-10.904
90	180	C3'	150	0	62.524	-13.175
91	180	C3'	200	0	79.845	-14.103
92	180	C3'	250	0	97.2	-15.023
93	180	C3'	300	0	114.07	-16.209
94	180	C3'	350	0	131.05	-17.944
95	180	C3'	400	0	148.11	-19.826
96	180	C3'	450	0	165.22	-21.683
97	180	C3', C4'	500	0	180.25	-23.901
98	180	C4'	450	0	166.39	-23.176

ตาราง ก1. ผลการทดสอบแรงในแนวแกนด้วยเครื่องทดสอบความแข็งแรงของวัสดุ (ต่อ)

No.	Angle	Pattern	Compressive (N)	Torque (N·m)	Compressive strain (μ)	Torsional strain (μ)
99	180	C4'	400	0	150.45	-21.75
100	180	C4'	350	0	134.02	-19.033
101	180	C4'	300	0	116.91	-15.785
102	180	C4'	250	0	99.986	-13.111
103	180	C4'	200	0	83.088	-9.9409
104	180	C4'	150	0	64.527	-8.0626
105	180	C4'	100	0	45.915	-5.9485
106	180	C4'	50	0	26.301	-4.1332
107	180	C4'	0	0	0.62756	-0.30935
108	180	C5'	0	0	0.62756	-0.30935
109	180	C5'	50	0	24.337	-7.3983
110	180	C5'	100	0	44.636	-11.096
111	180	C5'	150	0	62.97	-13.178
112	180	C5'	200	0	79.888	-14.023
113	180	C5'	250	0	96.962	-14.937
114	180	C5'	300	0	114.13	-16.269
115	180	C5'	350	0	131.377	-17.8367
116	180	C5'	400	0	148.03	-19.783
117	180	C5'	450	0	165.46	-21.75
118	180	C5', C6'	500	0	180.17	-23.408
119	180	C6'	450	0	166.35	-23.2
120	180	C6'	400	0	150.23	-21.716
121	180	C6'	350	0	133.63	-19.121
122	180	C6'	300	0	116.98	-16.201
123	180	C6'	250	0	100.13	-12.854
124	180	C6'	200	0	82.505	-9.9922
125	180	C6'	150	0	64.588	-8.0777
126	180	C6'	100	0	46.065	-6.1541
127	180	C6'	50	0	26.303	-4.3017
128	180	C6'	0	0	1.0209	0.21196

ตาราง ก2. ผลการทดสอบการบิดด้วยแท่นทดสอบ

No	Direction	Pattern	Compressive (N)	Torque (N·m)	Compressive strain (μ)	Torsional strain (μ)
1	1	T1	0	0	0.028533	-0.16072
2	1	T1	29.72	1.77	3.5664	49.026
3	1	T1	29.72	12.06	-26.029	333.06
4	1	T1	29.72	22.34	-48.655	633.87
5	1	T1	29.72	32.62	-73.531	926.98
6	1	T1	29.72	42.90	-90.831	1216.8
7	1	T1, T2	29.72	53.18	-110.06	1529.2
8	1	T2	29.72	42.90	-93.839	1253.7
9	1	T2	29.72	32.62	-74.394	957.4
10	1	T2	29.72	22.34	-53.838	656.45
11	1	T2	29.72	12.06	-27.053	351.45
12	1	T2	29.72	1.77	4.4382	57.756
13	1	T2	0.00	0.00	0.17623	5.1483
14	1	T3	0.00	0.00	-0.0496	-0.087444
15	1	T3	29.72	1.77	3.1944	49.306
16	1	T3	29.72	12.06	-27.978	332.85
17	1	T3	29.72	22.34	-50.73	626.44
18	1	T3	29.72	32.62	-72.448	923.24
19	1	T3	29.72	42.90	-90.996	1222.7
20	1	T3, T4	29.72	53.18	-108.55	1538.1
21	1	T4	29.72	42.90	-92.652	1255.7
22	1	T4	29.72	32.62	-72.679	957.64
23	1	T4	29.72	22.34	-52.296	654.64
24	1	T4	29.72	12.06	-25.907	347.51
25	1	T4	29.72	1.77	2.67	54.745
26	1	T4	0.00	0.00	-0.015048	4.5024
27	1	T5	0.00	0.00	0.041093	-0.22676
28	1	T5	29.72	1.77	5.7555	50.17
29	1	T5	29.72	12.06	-26.398	337.6
30	1	T5	29.72	22.34	-51.74	633.06
31	1	T5	29.72	32.62	-72.384	925.12
32	1	T5	29.72	42.90	-90.783	1235.1

ตาราง ก2. ผลการทดสอบการบิดด้วยแท่นทดสอบ (ต่อ)

No	Direction	Pattern	Compressive (N)	Torque (N·m)	Compressive strain (μ)	Torsional strain (μ)
33	1	T5, T6	29.72	53.18	-107.16	1522.3
34	1	T6	29.72	42.90	-91.192	1253.6
35	1	T6	29.72	32.62	-71.845	959.49
36	1	T6	29.72	22.34	-50.931	653.12
37	1	T6	29.72	12.06	-25.68	347.91
38	1	T6	29.72	1.77	5.2083	55.641
39	1	T6	0.00	0.00	-0.20124	3.5869
40	2	T1'	0.00	0.00	0.09486	0.12457
41	2	T1'	29.72	-1.77	-0.6536	-51.088
42	2	T1'	29.72	-12.06	-18.42	-337.41
43	2	T1'	29.72	-22.34	-28.329	-629.85
44	2	T1'	29.72	-32.62	-32.586	-911.98
45	2	T1'	29.72	-42.90	-34.882	-1198.7
46	2	T1', T2'	29.72	-53.18	-32.337	-1492.1
47	2	T2'	29.72	-42.90	-38.375	-1225.7
48	2	T2'	29.72	-32.62	-39.771	-940.87
49	2	T2'	29.72	-22.34	-30.595	-643.72
50	2	T2'	29.72	-12.06	-18.411	-343.58
51	2	T2'	29.72	-1.77	-0.45607	-56.996
52	2	T2'	0.00	0.00	0.31144	-5.6808
53	2	T3'	0.00	0.00	-0.0037041	-0.14134
54	2	T3'	29.72	-1.77	-2.2792	-47.532
55	2	T3'	29.72	-12.06	-15.699	-326.39
56	2	T3'	29.72	-22.34	-24.881	-614.98
57	2	T3'	29.72	-32.62	-29.773	-904.73
58	2	T3'	29.72	-42.90	-31.368	-1194.1
59	2	T3', T4'	29.72	-53.18	-30.562	-1487.8
60	2	T4'	29.72	-42.90	-35.741	-1229.5
61	2	T4'	29.72	-32.62	-37.925	-942.39
62	2	T4'	29.72	-22.34	-28.532	-644.98
63	2	T4'	29.72	-12.06	-18.174	-350.95
64	2	T4'	29.72	-1.77	-1.8036	-62.523

ตาราง ก2. ผลการทดสอบการบิดด้วยแท่นทดสอบ (ต่อ)

No	Direction	Pattern	Compressive (N)	Torque (N·m)	Compressive strain (μ)	Torsional strain (μ)
65	2	T4'	0.00	0.00	0.001389	-12.386
66	2	T5'	0.00	0.00	-0.029286	-0.39673
67	2	T5'	29.72	-1.77	-2.2254	-49.631
68	2	T5'	29.72	-12.06	-17.936	-337.33
69	2	T5'	29.72	-22.34	-29.295	-628.49
70	2	T5'	29.72	-32.62	-31.699	-909.76
71	2	T5'	29.72	-42.90	-34.59	-1213.7
72	2	T5', T6'	29.72	-53.18	-34.295	-1496.9
73	2	T6'	29.72	-42.90	-38.522	-1240.1
74	2	T6'	29.72	-32.62	-39.191	-945.14
75	2	T6'	29.72	-22.34	-30.558	-650.84
76	2	T6'	29.72	-12.06	-17.228	-348.44
77	2	T6'	29.72	-1.77	0.61129	-59.635
78	2	T6'	0.00	0.00	-0.17728	-9.6127

ตาราง ก3. ผลการทดสอบแรงในแนวแกนและภาระปิดด้วยเท้นทดสอบ

No	Pattern	Replicatate	Compressive (N)	Torque (N·M)	Compressive strain (μ)	Torsional strain (μ)
1	C1	1	67.93	1.80	23.042	88.389
2	C1	1	116.89	1.80	48.041	93.729
3	C1	1	165.84	1.80	58.284	94.618
4	C1	1	214.84	1.80	76.413	96.239
5	C1	1	263.79	1.80	92.279	95.363
6	C1	1	312.74	1.80	111.29	97.265
7	C1	1	361.69	1.80	129.37	102.79
8	C1	1	410.70	1.80	149.78	106.38
9	C1	1	459.65	1.80	163.6	106.32
10	C1	1	508.65	1.80	182.68	107.83
11	C1	1	557.65	1.80	199.39	110.1
12	C2	1	67.93	1.80	25.942	90.806
13	C2	1	116.89	1.80	41.705	90.136
14	C2	1	165.84	1.80	64.086	96.751
15	C2	1	214.84	1.80	80.68	99.259
16	C2	1	263.79	1.80	98.14	99.369
17	C2	1	312.74	1.80	116.83	103.77
18	C2	1	361.69	1.80	133.42	105.74
19	C2	1	410.70	1.80	149.56	106.56
20	C2	1	459.65	1.80	165.67	108.56
21	C2	1	508.65	1.80	183.46	109.76
22	C3	2	67.93	1.80	25.719	90.738
23	C3	2	116.89	1.80	45.46	94.538
24	C3	2	165.84	1.80	58.359	91.942
25	C3	2	214.84	1.80	77.347	95.493
26	C3	2	263.79	1.80	91.93	95.781
27	C3	2	312.74	1.80	113.8	98.593
28	C3	2	361.69	1.80	131.57	99.513
29	C3	2	410.70	1.80	148.75	102.71
30	C3	2	459.65	1.80	167.68	105.09
31	C3	2	508.65	1.80	182.6	105.13
32	C3	2	557.65	1.80	200.01	107.46

ตาราง ก3. ผลการทดสอบแรงในแนวแกนและการบิดด้วยเท้นทดสอบ (ต่อ)

No	Pattern	Replicatate	Compressive	Torque	Compressive strain	Torsional strain
			(N)	(N·M)	(μ)	(μ)
33	C4	2	67.93	1.80	25.4434	90.582
34	C4	2	116.89	1.80	43.688	93.681
35	C4	2	165.84	1.80	60.21	92.764
36	C4	2	214.84	1.80	78.348	95.189
37	C4	2	263.79	1.80	92.511	99.471
38	C4	2	312.74	1.80	113.55	102.18
39	C4	2	361.69	1.80	132.57	105.09
40	C4	2	410.70	1.80	148.5	106.72
41	C4	2	459.65	1.80	168.03	110.37
42	C4	2	508.65	1.80	185.32	111.45
43	C5	3	67.93	1.80	25.112	90.809
44	C5	3	116.89	1.80	47.379	94.446
45	C5	3	165.84	1.80	61.567	95.629
46	C5	3	214.84	1.80	79.494	95.67
47	C5	3	263.79	1.80	95.486	96.966
48	C5	3	312.74	1.80	114.26	97.591
49	C5	3	361.69	1.80	134.05	99.773
50	C5	3	410.70	1.80	150.59	102.26
51	C5	3	459.65	1.80	165.57	105.72
52	C5	3	508.65	1.80	185.8	107.52
53	C5	3	557.65	1.80	200.44	110.31
54	C6	3	67.93	1.80	26.316	91.696
55	C6	3	116.89	1.80	43.157	92.634
56	C6	3	165.84	1.80	63.123	95.718
57	C6	3	214.84	1.80	81.745	97.769
58	C6	3	263.79	1.80	95.506	96.935
59	C6	3	312.74	1.80	115.87	100.1
60	C6	3	361.69	1.80	136.05	104.8
61	C6	3	410.70	1.80	152.52	108.6
62	C6	3	459.65	1.80	168.86	109.56
63	C6	3	508.65	1.80	184.79	109.98
64	TC1	1	67.93	1.80	11.564	95.455

ตาราง ก3. ผลการทดสอบแรงในแนวแกนและการบิดด้วยเท้นทดสอบ (ต่อ)

No	Pattern	Replicatate	Compressive (N)	Torque (N·M)	Compressive strain (μ)	Torsional strain (μ)
65	TC1	1	67.93	12.09	-22.421	382.37
66	TC1	1	67.93	22.37	-45.228	681.53
67	TC1	1	67.93	32.66	-61.883	988.03
68	TC1	1	67.93	42.94	-81.278	1291.3
69	TC1	1	67.93	53.22	-100.04	1592.6
70	TC2	1	67.93	1.80	11.725	95.969
71	TC2	1	67.93	12.09	-22.454	391.83
72	TC2	1	67.93	22.37	-50.396	698.35
73	TC2	1	67.93	32.66	-68.598	1004
74	TC2	1	67.93	42.94	-86.455	1303.9
75	TC1	2	67.93	1.80	11.372	92.441
76	TC1	2	67.93	12.09	-20.266	384.66
77	TC1	2	67.93	22.37	-41.792	681.75
78	TC1	2	67.93	32.66	-61.602	984.98
79	TC1	2	67.93	42.94	-76.68	1288.3
80	TC1	2	67.93	53.22	-97.946	1597.7
81	TC2	2	67.93	1.80	10.911	95.506
82	TC2	2	67.93	12.09	-21.566	389.4
83	TC2	2	67.93	22.37	-47.892	696.24
84	TC2	2	67.93	32.66	-68.967	1002.8
85	TC2	2	67.93	42.94	-80.668	1306.3
86	TC1	3	67.93	1.80	11.232	92.294
87	TC1	3	67.93	12.09	-20.217	386.76
88	TC1	3	67.93	22.37	-40.797	686.07
89	TC1	3	67.93	32.66	-60.659	986.47
90	TC1	3	67.93	42.94	-80.515	1291.8
91	TC1	3	67.93	53.22	-98.451	1598.9
92	TC2	3	67.93	1.80	9.9714	93.981
93	TC2	3	67.93	12.09	-16.955	391.48
94	TC2	3	67.93	22.37	-49.426	698.12
95	TC2	3	67.93	32.66	-69.737	1004.9
96	TC2	3	67.93	42.94	-85.767	1307.4

ตาราง ก3. ผลการทดสอบแรงในแนวแกนและการบิดด้วยแท่นทดสอบ (ต่อ)

No	Pattern	Replicatae	Compressive (N)	Torque (N·M)	Compressive strain (μ)	Torsional strain (μ)
97	TC3	1	67.93	1.80	10.235	91.984
98	TC3	1	116.89	12.09	-4.6469	388.17
99	TC3	1	116.89	22.37	-34.052	683.08
100	TC3	1	116.89	32.66	-56.157	982.59
101	TC3	1	116.89	42.94	-74.616	1287.4
102	TC3	1	116.89	53.22	-92.742	1594.2
103	TC4	1	67.93	1.80	12.098	96.45
104	TC4	1	116.89	12.09	-10.364	388.34
105	TC4	1	116.89	22.37	-38.62	696.82
106	TC4	1	116.89	32.66	-59.408	1004.8
107	TC4	1	116.89	42.94	-77.348	1304.4
108	TC3	2	67.93	1.80	11.74	92.685
109	TC3	2	116.89	12.09	-4.2462	388.21
110	TC3	2	116.89	22.37	-33.228	683.34
111	TC3	2	116.89	32.66	-57.422	984.78
112	TC3	2	116.89	42.94	-76.226	1290.3
113	TC3	2	116.89	53.22	-93.948	1597.8
114	TC4	2	67.93	1.80	15.106	98.83
115	TC4	2	116.89	12.09	-10.214	388.58
116	TC4	2	116.89	22.37	-39.078	697.63
117	TC4	2	116.89	32.66	-60.247	1005.9
118	TC4	2	116.89	42.94	-78.662	1306.6
119	TC3	3	67.93	1.80	15.275	96.117
120	TC3	3	116.89	12.09	-4.2378	388.67
121	TC3	3	116.89	22.37	-33.742	683.04
122	TC3	3	116.89	32.66	-57.057	982.26
123	TC3	3	116.89	42.94	-75.953	1288
124	TC3	3	116.89	53.22	-93.308	1593.1
125	TC4	3	67.93	1.80	13.097	97.512
126	TC4	3	116.89	12.09	-10.501	387.36
127	TC4	3	116.89	22.37	-38.118	697.98
128	TC4	3	116.89	32.66	-60.531	1005.8

ตาราง ก3. ผลการทดสอบแรงในแนวแกนและการบิดด้วยเทนท์ทดสอบ (ต่อ)

No	Pattern	Replicatae	Compressive (N)	Torque (N·M)	Compressive strain (μ)	Torsional strain (μ)
129	TC4	3	116.89	42.94	-78.397	1304.4
130	TC5	1	67.93	1.80	16.638	97.999
131	TC5	1	166.02	12.09	18.771	391.5
132	TC5	1	166.02	22.37	-14.414	684.36
133	TC5	1	166.02	32.66	-38.514	982.07
134	TC5	1	166.02	42.94	-58.798	1284
135	TC5	1	166.02	53.22	-76.623	1590.6
136	TC6	1	67.93	1.80	16.704	100.07
137	TC6	1	166.02	12.09	8.0192	387.51
138	TC6	1	166.02	22.37	-19.922	697.77
139	TC6	1	166.02	32.66	-42.122	1005.1
140	TC6	1	166.02	42.94	-61.181	1302.7
141	TC5	2	67.93	1.80	16.781	98.126
142	TC5	2	166.02	12.09	20.732	391.8
143	TC5	2	166.02	22.37	-13.786	684.31
144	TC5	2	166.02	32.66	-38.148	979.65
145	TC5	2	166.02	42.94	-59.404	1281.4
146	TC5	2	166.02	53.22	-77.482	1590.1
147	TC6	2	67.93	1.80	16.132	99.816
148	TC6	2	166.02	12.09	8.0648	387.04
149	TC6	2	166.02	22.37	-19.996	698.09
150	TC6	2	166.02	32.66	-42.811	1003.6
151	TC6	2	166.02	42.94	-62.084	1300.8
152	TC5	3	67.93	1.80	16.074	98.838
153	TC5	3	166.02	12.09	20.03	389.48
154	TC5	3	166.02	22.37	-11.629	682.03
155	TC5	3	166.02	32.66	-38.854	979.82
156	TC5	3	166.02	42.94	-58.663	1281.5
157	TC5	3	166.02	53.22	-75.941	1585.2
158	TC6	3	67.93	1.80	16.062	99.43
159	TC6	3	166.02	12.09	8.1214	386.14
160	TC6	3	166.02	22.37	-19.168	696.42

ตาราง ก3. ผลการทดสอบแรงในแนวแกนและการบิดด้วยเท้นทดสอบ (ต่อ)

No	Pattern	Replicatate	Compressive (N)	Torque (N·M)	Compressive strain (μ)	Torsional strain (μ)
161	TC6	3	166.02	32.66	-41.159	999.59
162	TC6	3	166.02	42.94	-60.976	1299.3
163	TC7	1	67.93	1.80	16.087	97.536
164	TC7	1	214.97	12.09	43.728	396.56
165	TC7	1	214.97	22.37	8.76	687.94
166	TC7	1	214.97	32.66	-18.072	983.81
167	TC7	1	214.97	42.94	-41.436	1285.8
168	TC7	1	214.97	53.22	-62.119	1591
169	TC8	1	67.93	1.80	19.183	100.2
170	TC8	1	214.97	12.09	25.627	390.1
171	TC8	1	214.97	22.37	-2.0367	701.37
172	TC8	1	214.97	32.66	-19.448	990.73
173	TC8	1	214.97	42.94	-45.944	1303.9
174	TC7	2	67.93	1.80	18.903	98.825
175	TC7	2	214.97	12.09	45.668	397.82
176	TC7	2	214.97	22.37	8.5823	687.72
177	TC7	2	214.97	32.66	-16.916	982.55
178	TC7	2	214.97	42.94	-40.561	1283.6
179	TC7	2	214.97	53.22	-60.889	1587.2
180	TC8	2	67.93	1.80	17.278	98.113
181	TC8	2	214.97	12.09	26.083	388.2
182	TC8	2	214.97	22.37	-0.46238	699.39
183	TC8	2	214.97	32.66	-23.303	1003.7
184	TC8	2	214.97	42.94	-44.32	1301.7
185	TC7	3	67.93	1.80	17.086	98.25
186	TC7	3	214.97	12.09	43.17	395.94
187	TC7	3	214.97	22.37	10.686	689.03
188	TC7	3	214.97	32.66	-17.631	984.37
189	TC7	3	214.97	42.94	-41.679	1284.7
190	TC7	3	214.97	53.22	-62.013	1588.1
191	TC8	3	67.93	1.80	19.423	99.961
192	TC8	3	214.97	12.09	26.385	389.03

ตาราง ก3. ผลการทดสอบแรงในแนวแกนและการบิดด้วยเท้นทดสอบ (ต่อ)

No	Pattern	Replicatate	Compressive (N)	Torque (N·M)	Compressive strain (μ)	Torsional strain (μ)
193	TC8	3	214.97	22.37	-0.22636	700.28
194	TC8	3	214.97	32.66	-23.701	1003.7
195	TC8	3	214.97	42.94	-45.046	1300.5
196	TC9	1	67.93	1.80	19.087	99.199
197	TC9	1	263.84	12.09	65.978	397.85
198	TC9	1	263.84	22.37	29.121	691.51
199	TC9	1	263.84	32.66	1.3734	983.58
200	TC9	1	263.84	42.94	-22.763	1282.9
201	TC9	1	263.84	53.22	-44.392	1585.9
202	TC10	1	67.93	1.80	20.515	102.92
203	TC10	1	263.84	12.09	45.661	387.34
204	TC10	1	263.84	22.37	18.561	698.53
205	TC10	1	263.84	32.66	-5.4992	1003
206	TC10	1	263.84	42.94	-26.972	1300.8
207	TC9	2	67.93	1.80	20.326	102.15
208	TC9	2	263.84	12.09	67.896	399.58
209	TC9	2	263.84	22.37	32.759	688.47
210	TC9	2	263.84	32.66	4.5215	983.23
211	TC9	2	263.84	42.94	-21.71	1285.4
212	TC9	2	263.84	53.22	-42.484	1583.9
213	TC10	2	67.93	1.80	19.816	100.3
214	TC10	2	263.84	12.09	47.133	388.62
215	TC10	2	263.84	22.37	20.059	700.42
216	TC10	2	263.84	32.66	-3.0754	1003.4
217	TC10	2	263.84	42.94	-25.14	1300.5
218	TC9	3	67.93	1.80	19.558	99.5
219	TC9	3	263.84	12.09	65.506	403.11
220	TC9	3	263.84	22.37	32.069	691.05
221	TC9	3	263.84	32.66	2.8815	986.56
222	TC9	3	263.84	42.94	-22.617	1286.8
223	TC9	3	263.84	53.22	-44.738	1586.9
224	TC10	3	67.93	1.80	20.708	103.53

ตาราง ก3. ผลการทดสอบแรงในแนวแกนและการเบิดด้วยแท่นทดสอบ (ต่อ)

No	Pattern	Replicatae	Compressive	Torque	Compressive strain	Torsional strain
			(N)	(N·M)	(μ)	(μ)
225	TC10	3	263.84	12.09	46.178	391.51
226	TC10	3	263.84	22.37	22.217	694.62
227	TC10	3	263.84	32.66	-6.0974	1005.9
228	TC10	3	263.84	42.94	-27.124	1303.8
229	TC11	1	67.93	1.80	20.543	101.04
230	TC11	1	312.79	12.09	85.466	403.25
231	TC11	1	312.79	22.37	49.506	693.6
232	TC11	1	312.79	32.66	22.437	987.91
233	TC11	1	312.79	42.94	-4.0867	1287.5
234	TC11	1	312.79	53.22	-26.998	1586.1
235	TC12	1	67.93	1.80	21.684	103.46
236	TC12	1	312.79	12.09	65.271	392.38
237	TC12	1	312.79	22.37	37.891	702.84
238	TC12	1	312.79	32.66	12.221	1006
239	TC12	1	312.79	42.94	-9.1395	1302
240	TC11	2	67.93	1.80	21.338	102.6
241	TC11	2	312.79	12.09	88.218	405.6
242	TC11	2	312.79	22.37	53.982	694.92
243	TC11	2	312.79	32.66	24.662	988.76
244	TC11	2	312.79	42.94	-2.2654	1288.3
245	TC11	2	312.79	53.22	-24.876	1586.8
246	TC12	2	67.93	1.80	20.727	102.08
247	TC12	2	312.79	12.09	67.024	393.54
248	TC12	2	312.79	22.37	39.671	704.69
249	TC12	2	312.79	32.66	14.37	1005.7
250	TC12	2	312.79	42.94	-6.6885	1302.5
251	TC11	3	67.93	1.80	20.327	101.93
252	TC11	3	312.79	12.09	79.827	403.12
253	TC11	3	312.79	22.37	49.832	692.87
254	TC11	3	312.79	32.66	21.238	988.84
255	TC11	3	312.79	42.94	-4.9925	1287
256	TC11	3	312.79	53.22	-27.649	1585.9

ตาราง ก3. ผลการทดสอบแรงในแนวแกนและการบิดด้วยเทนท์ทดสอบ (ต่อ)

No	Pattern	Replicate	Compressive (N)	Torque (N·M)	Compressive strain (μ)	Torsional strain (μ)
257	TC12	3	67.93	1.80	22.08	104.24
258	TC12	3	312.79	12.09	65.193	392.03
259	TC12	3	312.79	22.37	37.884	698.63
260	TC12	3	312.79	32.66	13.804	1003.3
261	TC12	3	312.79	42.94	-9.1218	1300.4
262	TC13	1	67.93	1.80	21.564	102.73
263	TC13	1	361.79	12.09	98.974	404.21
264	TC13	1	361.79	22.37	71.457	695.09
265	TC13	1	361.79	32.66	41.791	989.52
266	TC13	1	361.79	42.94	14.98	1285.5
267	TC13	1	361.79	53.22	-9.0701	1583.8
268	TC14	1	67.93	1.80	21.705	103.64
269	TC14	1	361.79	12.09	83.3	393.41
270	TC14	1	361.79	22.37	57.209	702.94
271	TC14	1	361.79	32.66	31.718	1004.6
272	TC14	1	361.79	42.94	9.3419	1301
273	TC13	2	67.93	1.80	21.453	102.87
274	TC13	2	361.79	12.09	100.77	405.35
275	TC13	2	361.79	22.37	73.792	695.85
276	TC13	2	361.79	32.66	43.975	989.76
277	TC13	2	361.79	42.94	16.735	1285.3
278	TC13	2	361.79	53.22	-7.4966	1585.6
279	TC14	2	67.93	1.80	21.278	105.01
280	TC14	2	361.79	12.09	84.923	395.46
281	TC14	2	361.79	22.37	58.882	704.06
282	TC14	2	361.79	32.66	32.77	1005.3
283	TC14	2	361.79	42.94	11.057	1300.7
284	TC13	3	67.93	1.80	20.616	103.61
285	TC13	3	361.79	12.09	104.82	405.22
286	TC13	3	361.79	22.37	75.695	701.13
287	TC13	3	361.79	32.66	44.533	994.66
288	TC13	3	361.79	42.94	17.579	1290.9

ตาราง ก3. ผลการทดสอบแรงในแนวแกนและการบิดด้วยเทนท์ทดสอบ (ต่อ)

No	Pattern	Replicate	Compressive (N)	Torque (N·M)	Compressive strain (μ)	Torsional strain (μ)
289	TC13	3	361.79	53.22	-6.5317	1589.4
290	TC14	3	67.93	1.80	19.972	102.94
291	TC14	3	361.79	12.09	86.348	396.8
292	TC14	3	361.79	22.37	60.045	706.08
293	TC14	3	361.79	32.66	33.416	1008.5
294	TC14	3	361.79	42.94	11.67	1304.7
295	TC15	1	67.93	1.80	19.687	102.12
296	TC15	1	410.74	12.09	119.39	408.82
297	TC15	1	410.74	22.37	87.776	702.35
298	TC15	1	410.74	32.66	58.864	994.01
299	TC15	1	410.74	42.94	30.415	1290.9
300	TC15	1	410.74	53.22	6.2429	1588.3
301	TC16	1	67.93	1.80	20.288	103.16
302	TC16	1	410.74	12.09	102.84	397.76
303	TC16	1	410.74	22.37	73.244	706.57
304	TC16	1	410.74	32.66	48.298	1007.9
305	TC16	1	410.74	42.94	24.779	1304.7
306	TC15	2	67.93	1.80	19.841	102.57
307	TC15	2	410.74	12.09	121.49	411.26
308	TC15	2	410.74	22.37	91.514	700.79
309	TC15	2	410.74	32.66	61.626	991.74
310	TC15	2	410.74	42.94	33.044	1290.3
311	TC15	2	410.74	53.22	8.6808	1589
312	TC16	2	67.93	1.80	20.824	102.35
313	TC16	2	410.74	12.09	102.26	397.65
314	TC16	2	410.74	22.37	75.218	707.21
315	TC16	2	410.74	32.66	48.902	1009.9
316	TC16	2	410.74	42.94	27.282	1303.5
317	TC15	3	67.93	1.80	20.573	101.67
318	TC15	3	410.74	12.09	120.83	409.98
319	TC15	3	410.74	22.37	92.006	700.77
320	TC15	3	410.74	32.66	62.317	994.39

ตาราง ก3. ผลการทดสอบแรงในแนวแกนและการบิดด้วยเท้นทดสอบ (ต่อ)

No	Pattern	Replicatate	Compressive (N)	Torque (N·M)	Compressive strain (μ)	Torsional strain (μ)
321	TC15	3	410.74	42.94	34.936	1289.4
322	TC15	3	410.74	53.22	9.301	1588.6
323	TC16	3	67.93	1.80	24.47	108.42
324	TC16	3	410.74	12.09	103.42	397.87
325	TC16	3	410.74	22.37	76.336	708.39
326	TC16	3	410.74	32.66	49.417	1009.9
327	TC16	3	410.74	42.94	27.922	1304.9
328	TC17	1	67.93	1.80	24.22	107.31
329	TC17	1	459.75	12.09	138.8	411.93
330	TC17	1	459.75	22.37	109.26	702.96
331	TC17	1	459.75	32.66	81.769	1004.25
332	TC17	1	459.75	42.94	52.528	1292.1
333	TC17	1	459.75	53.22	26.853	1590.9
334	TC18	1	67.93	1.80	27.667	105.75
335	TC18	1	459.75	12.09	121.15	398.69
336	TC18	1	459.75	22.37	94.804	709.35
337	TC18	1	459.75	32.66	68.244	1011.4
338	TC18	1	459.75	42.94	45.752	1305.8
339	TC17	2	67.93	1.80	27.042	105.02
340	TC17	2	459.75	12.09	140.32	414.61
341	TC17	2	459.75	22.37	113.01	708.12
342	TC17	2	459.75	32.66	83.374	1004.9
343	TC17	2	459.75	42.94	55.316	1297.6
344	TC17	2	459.75	53.22	29.587	1594.9
345	TC18	2	67.93	1.80	23.146	104.13
346	TC18	2	459.75	12.09	123.99	403.15
347	TC18	2	459.75	22.37	96.404	714.29
348	TC18	2	459.75	32.66	70.624	1014.4
349	TC18	2	459.75	42.94	48.258	1310.5
350	TC17	3	67.93	1.80	22.555	103.8
351	TC17	3	459.75	12.09	140.35	411.31
352	TC17	3	459.75	22.37	113.09	706.88

ตาราง ก3. ผลการทดสอบแรงในแนวแกนและการบิดด้วยเท้นทดสอบ (ต่อ)

No	Pattern	Replicatate	Compressive (N)	Torque (N·M)	Compressive strain (μ)	Torsional strain (μ)
353	TC17	3	459.75	32.66	80.164	1003.6
354	TC17	3	459.75	42.94	52.963	1300.2
355	TC17	3	459.75	53.22	27.618	1596.4
356	TC18	3	67.93	1.80	23.36	105.55
357	TC18	3	459.75	12.09	123.43	401.24
358	TC18	3	459.75	22.37	95.812	711.84
359	TC18	3	459.75	32.66	69.296	1014.5
360	TC18	3	459.75	42.94	46.402	1311.4
361	TC19	1	67.93	1.80	22.861	104.64
362	TC19	1	508.70	12.09	161.81	414.51
363	TC19	1	508.70	22.37	132.94	709.1
364	TC19	1	508.70	32.66	100.5	1003.5
365	TC19	1	508.70	42.94	72.005	1301.2
366	TC19	1	508.70	53.22	45.927	1597.6
367	TC20	1	67.93	1.80	23.474	105.09
368	TC20	1	508.70	12.09	141.86	404.19
369	TC20	1	508.70	22.37	113.49	715.42
370	TC20	1	508.70	32.66	87.042	1017.9
371	TC20	1	508.70	42.94	64.835	1313.1
372	TC19	2	67.93	1.80	22.966	104.12
373	TC19	2	508.70	12.09	163.2	417.07
374	TC19	2	508.70	22.37	130.75	709.01
375	TC19	2	508.70	32.66	102.93	1005.9
376	TC19	2	508.70	42.94	75.175	1302.6
377	TC19	2	508.70	53.22	49.109	1601.7
378	TC20	2	67.93	1.80	26.934	108.53
379	TC20	2	508.70	12.09	144.89	406.69
380	TC20	2	508.70	22.37	116.8	718.06
381	TC20	2	508.70	32.66	89.809	1022.6
382	TC20	2	508.70	42.94	66.963	1320.1
383	TC19	3	67.93	1.80	21.935	108
384	TC19	3	508.70	12.09	160.87	417.35

ตาราง ก3. ผลการทดสอบแรงในแนวแกนและการบิดด้วยเท้นทดสอบ (ต่อ)

No	Pattern	Replicatate	Compressive (N)	Torque (N·M)	Compressive strain (μ)	Torsional strain (μ)
385	TC19	3	508.70	22.37	130.65	708.91
386	TC19	3	508.70	32.66	100.11	1004.8
387	TC19	3	508.70	42.94	73.023	1300.9
388	TC19	3	508.70	53.22	47.459	1598.4
389	TC20	3	67.93	1.80	22.352	103.41
390	TC20	3	508.70	12.09	144.53	404.19
391	TC20	3	508.70	22.37	115.3	715.83
392	TC20	3	508.70	32.66	88.727	1018.8
393	TC20	3	508.70	42.94	66.233	1313.4

