

การวิเคราะห์และออกแบบโหลดเซลล์โดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

Analysis and design of load cell by using finite element method

นายชนคม ศิริวัฒนานนท์

นายบุญเพชร ปรีชารัตนวงศ์

โครงการทางวิศวกรรมนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยบูรพา

ปีการศึกษา 2556

Analysis and design of load cell by using finite element method

TanakomSiriwattananon

BunpetPreecharattanawong

มหาวิทยาลัยบูรพา
Burapha University

This Civil Engineering Project Submitted in Partial Fulfillment of Requirements For
the Degree of Bachelor of Engineering Department of Civil Engineering, Faculty of
Engineering Burapha University 2013

หัวข้อโครงการ การวิเคราะห์และออกแบบโหนดเซลล์โดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

โดย นายธนคม ศิริวัฒนานนท์

 นายบุญเพชรปรีชารัตนวงศ์

ภาควิชา วิศวกรรมโยธา

ปีการศึกษา 2556

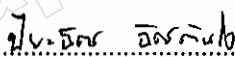
อาจารย์ที่ปรึกษา คร.ปิยะฉัตร ฉัตรตันใจ

 ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา อนุมัติโครงการทาง
วิศวกรรมนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมบัณฑิต



.....หัวหน้าภาควิชาวิศวกรรมโยธา

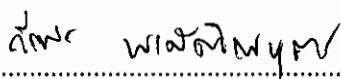
(ดร.พัทธพงษ์ อาสนจินดา)



.....อาจารย์ที่ปรึกษา

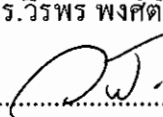
(ดร.ปิยะฉัตร ฉัตรตันใจ)

คณะกรรมการสอบโครงการ



.....กรรมการ

(ดร.วีรพร พงศ์ดิณบุตร)



.....กรรมการ

(ดร. วรรณวรางค์ รัตนานิกม)

บทคัดย่อ

โครงการทางวิศวกรรมนี้มีจุดประสงค์เพื่อศึกษาและออกแบบโหนดเซลล์โดยใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ช่วยในการวิเคราะห์ การเสถียรภาพ โดยเริ่มจากการออกแบบรูปแบบโหนดเซลล์ที่ต้องการ จากการศึกษาครั้งนี้ได้ทำการทดลองรูปแบบโหนดเซลล์ 2 รูปแบบ โดยรูปแบบแรกที่ทำ การออกแบบนั้นได้ใช้ทองเหลืองแต่ผลการวิเคราะห์พบว่ารูปแบบนั้นเป็นรูปแบบที่ไม่สามารถ ติดตั้งสเตรนเกจได้ตามตำแหน่งและทองเหลืองมีจุดครากต่ำ อีกทั้งการออกแบบใช้ความล้าของสเตรนเกจมาเป็นข้อกำหนดในการออกแบบจึงทำให้มีแรงดันไฟฟ้าไหลออกมาน้อยมากดังนั้นจึงมี การออกแบบรูปแบบโหนดเซลล์ตัวใหม่โดยมีแนวคิดมาจากการออกแบบโหนดเซลล์ของ Dr.HIRAKAWA และมีการเปลี่ยนวัสดุเป็นสแตนเลสและใช้ค่าลิมิตสแตนเลสของสเตรนเกจและจุด ครากของสแตนเลสมาเป็นเกณฑ์ในการออกแบบ

ผลจากการวิเคราะห์สามารถนำไปประยุกต์ใช้เพื่อหาจุดที่เกิดความเค้นสูงสุด เพื่อใช้เป็น ตำแหน่งในการติดตั้งชุดสเตรนเกจ และในการศึกษาครั้งนี้ได้ทำการออกแบบโดยใช้แรงในการใช้ งานเป็นข้อกำหนดในการออกแบบโดยแรงที่ใช้ออกแบบมีดังนี้คือ 3kN, 5kN, 7.5kN, 10kN, 15kN และ 20kN สำหรับตัวอย่างที่ได้ทำขึ้นมาใช้งานจริงคือ 5kN พร้อมกันนี้ยังได้สร้างสมการเพื่อใช้เป็น แนวทางในการออกแบบโหนดเซลล์ในกรณีที่ต้องการโหนดเซลล์ที่สามารถรับน้ำหนักได้มากกว่า หรือน้อยกว่าที่กล่าวมาข้างต้นอีกด้วย

จากการสอบเทียบการรับแรงของโหนดเซลล์ที่ออกแบบปรากฏว่าเมื่อเพิ่มน้ำหนักเรื่อยๆ จนถึง 4kN และทำการวาดกราฟความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกับแรงดันไฟฟ้าจะได้ความสัมพันธ์ เส้นตรงและเมื่อน้ำหนักมีค่าลดลงจนถึงศูนย์พบว่ากราฟความสัมพันธ์ที่ได้นั้นมีความสัมพันธ์เป็น เส้นตรงเช่นเดิม ซึ่งแสดงว่าโหนดเซลล์ที่ออกแบบมีความน่าเชื่อถืออีกทั้งกราฟมี ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน (r^2) เท่ากับ 0.9997 แสดงว่ามีความแม่นยำค่อนข้างมากเนื่องจากมีค่าใกล้เคียง 1

Abstract

This engineer project aims to study and design a load cell using finite ABAQUS which is used for deformation analysis, at the beginning; the desirable load cell was designed. This study conducted 2 types of load cell. The first one, using brass, however the analysis revealed as the uninstall able strain gauges according to its location. Furthermore, the brass has lower yield point and the first type used the fatigue of the strain gauge for design criteria. Therefore, the layout design of the new load cells with a new concept from Dr.Hirakawa by Changing materials into a stainless using strain level together with the limit strain of the strain gauges and the yield point of strain steel as the design criteria.

The results of the analysis can be applied find the maximum stress for a position in the installation of stain gauges. In this study was designed using the force as the Terms of the following 3kN, 5kN, 7.5kN, 10kN, 15kN and 20kN. The 5kN was truly made in this study together with its equipment for load cells design guideline. Either more as less weight that weight mentioned above.

The relationship between weight, when was increased until reach 4kN and voltage reveal as the linear relationship. Even if the weight, which was decreased until it reach zero still has the linear relationship. The coefficients (r^2) was 0.9997, indicating the high accuracy of this load cell. The condusion is this design load cells are reliable and accurate.

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี อาศัยความกรุณาและความช่วยเหลืออย่างยิ่งจากอาจารย์ปิยะฉัตร ฉัตรตันใจอาจารย์ที่ปรึกษาปริญญานิพนธ์ผู้ที่คอยให้คำปรึกษาแนะนำแนวคิดและแนวทางสำหรับใช้ดำเนินงาน อีกทั้งยังให้ความช่วยเหลือในทุกๆด้านเป็นอย่างดีเสมอมา

ขอบพระคุณอาจารย์ในภาควิชาวิศวกรรมโยธาทุกท่านที่ได้อบรมสั่งสอนและให้ความรู้ทางด้านวิชาการอันเป็นประโยชน์ ซึ่งสามารถนำมาใช้ในการแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้นได้เป็นอย่างดี

ขอบคุณเพื่อนๆ และรุ่นพี่ในภาควิชาวิศวกรรมโยธาทุกคน รวมถึงผู้ที่เกี่ยวข้องในคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา ที่คอยเป็นกำลังใจให้คำปรึกษาและให้ความช่วยเหลือตลอดมา

ท้ายสุดนี้คุณประโยชน์ที่เกิดจากปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ คณะผู้จัดทำขอมอบให้กับ คณะวิศวกรรมศาสตร์ วิทยาลัยบูรพา เพื่อตอบแทนพระคุณของคณาจารย์และบุคลากรทุกท่านที่ให้ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีและข้าพเจ้าขอให้ผลงานนี้เป็นทรัพย์สินส่วนของมหาวิทยาลัยเพื่อให้รุ่นต่อไปได้ศึกษาต่อยอดความรู้และเป็นประโยชน์ในการศึกษาต่อไป

นายธนคม ศิริวัฒนานนท์

นายบุญเพชรปรีชารัตนวงศ์

สารบัญ

เรื่อง	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ช
สารบัญรูปภาพ	ณ
บทที่ 1 บทนำ	
1.1ความเป็นมาและความสำคัญ	1
1.2 วัตถุประสงค์	3
1.3 ขอบเขตการศึกษา	3
1.4 แผนการดำเนินงาน	4
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	
2.1 บทนำ	5
2.2 สเตรนเกจ(Strain gauge)	7
2.3 วงจรวีตาโตนบริดจ์	8
-2.3.1 บริดจ์แบบสมดุล (Balance Bridge)	9
- 2.3.2 บริดจ์แบบไม่สมดุล(Unbalance Bridge)	10
2.4 ชนิดของโหลดเซลล์ (Load cell)	13
- 2.4.1 โหลดเซลล์แบบลึงค์	13

เรื่อง	หน้า
- 2.4.2 โหลดเซลล์แบบคาน	16
- 2.4.3 ทอร์กเซลล์	19
2.5 วัสดุที่สามารถนำมาทำโหลดเซลล์ได้	21
- 2.5.1 ทองเหลือง(Brass)	21
- 2.5.2 สแตนเลส(Stainless)	21
- 2.5.3 อลูมิเนียม (Aluminum)	23
2.6 งานวิจัยในอดีตที่เกี่ยวข้อง	23
บทที่ 3 วิธีการศึกษา	
3.1 ระเบียบไฟไนต์เอลิเมนต์	28
- 3.1.1 บทนำ	28
- 3.1.2 ระเบียบไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite element method)คืออะไร	30
- 3.1.3 ความคล้ายคลึงระหว่างระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์กับระเบียบวิธีผลต่าง สี่เหลี่ยม	31
- 3.1.4 ข้อแตกต่างระหว่างระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์กับระเบียบวิธีผลต่าง สี่เหลี่ยม	34
3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษา	36
3.3 รูปแบบและการวิเคราะห์ขนาด	37
3.4 คุณสมบัติและการเลือกใช้วัสดุ	39
3.5 การวิเคราะห์โดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์	42

เรื่อง	หน้า
บทที่ 4 การทดลองและวิเคราะห์ผล	
4.1 บทนำ	43
4.2 การวิเคราะห์พฤติกรรมการเสียรูปด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์	44
4.2.1 ขั้นตอนการวิเคราะห์การเสียรูปด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์	44
4.2.2 ผลจากการวิเคราะห์พฤติกรรมการเสียรูป	56
4.3 การขึ้นรูปโลหะ	61
4.4 คุณสมบัติและการติดตั้งสเตรนเกจ(Strain Gauge)	64
4.4.1 การเลือกใช้ Strain Gauge	64
4.4.2 วิธีการติดตั้งสเตรนเกจ (Strain gauge)	66
4.5 การทดสอบประสิทธิภาพของโหลดเซลล์	69
4.5.1 อุปกรณ์	69
4.5.2 ขั้นตอนการทดสอบ	71
4.5.3 ผลวิเคราะห์การทดลอง	72
4.6 การปรับปรุงลักษณะทางกายภาพของโหลดเซลล์เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพ	73
4.7 การวิเคราะห์โหลดเซลล์รูปแบบใหม่โดยใช้ไฟไนต์เอลิเมนต์	76
4.8 การขึ้นรูปโลหะของโหลดเซลล์รูปแบบใหม่	77
4.9 การติดตั้งสเตรนเกจ(Strain Gauge) ของโหลดเซลล์หลังจากการปรับปรุงทางด้านกายภาพ	79
4.10 การทดสอบประสิทธิภาพของโหลดเซลล์หลังจากการปรับปรุงทางด้านกายภาพ	84
4.10.1 ขั้นตอนการทดสอบ	85
4.10.2 การวิเคราะห์และประมวลผล	92

เรื่อง	หน้า
4.11 การประยุกต์ใช้	92
บทที่ 5 สรุปและข้อเสนอแนะ	
5.1 สรุป	99
5.2 ข้อเสนอแนะ	100
เอกสารอ้างอิง	101
ประวัติการศึกษา	102

สารบัญตาราง

เรื่อง หน้า

ตารางที่ 3.1 คุณสมบัติทางกลของอลูมิเนียม(Aluminium)	40
ตารางที่ 3.2 คุณสมบัติทางกลของเหล็กกล้า(Iron)	40
ตารางที่ 3.3 คุณสมบัติทางกลของสแตนเลส(Stainless)	40
ตารางที่ 3.4คุณสมบัติทางกลของทองเหลือง (Brass)	41
ตารางที่ 4.1 ค่า Strain ในแกน X ที่เกิดขึ้นของโหนดเซลล์รูปที่ 1	57
ตารางที่ 4.2 ค่า Strain ในแกน y ที่เกิดขึ้นของโหนดเซลล์รูปที่ 1	58
ตารางที่ 4.3 ค่า Strain ในแกน x ที่เกิดขึ้นของโหนดเซลล์รูปที่ 2	58
ตารางที่ 4.4 ค่า Strain ในแกน y ที่เกิดขึ้นของโหนดเซลล์รูปที่ 2	59
ตารางที่ 4.5 ค่า Strain ที่เกิดขึ้นของโหนดเซลล์รูปที่ 3	60
ตารางที่ 4.6การเลือกใช้สเตรนเกจ(Strain gauge)	64
ตารางที่ 4.7การเลือกใช้ Compensation material	65
ตารางที่ 4.8การเลือกความยาวของเส้นลวด	66
ตารางที่ 4.9คุณสมบัติสแตนเลส(Stainless) เกรด SUS 304	75
ตารางที่ 4.10ตารางบันทึกข้อมูลของตัวอย่างการเพิ่มน้ำหนัก	88
ตารางที่ 4.11ตารางบันทึกข้อมูลของตัวอย่างการลดน้ำหนัก	89
ตารางที่ 4.12 ความสัมพันธ์แรงที่กด (kN) และความหนา (mm)	98

สารบัญภาพ

เรื่อง	หน้า
รูปที่ 2.1 แสดงโครงสร้างของสเตรนเกจ	7
รูปที่ 2.2 จงจรบริดจ์	9
รูปที่ 2.3 บริดจ์แบบสมดุล	9
รูปที่ 2.4 บริดจ์แบบไม่สมดุล	11
รูปที่ 2.5 วงจรบริดจ์ใหม่ที่เกิดจากการลัดวงจรแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า	12
รูปที่ 2.6 แสดงการนำค่า E_{Th} และ R_{Th} มาเขียนวงจรเทียบเคียงเทวินิน	13
รูปที่ 2.7 โหลดเซลล์แบบลิงค์และการต่อใช้งานกับวงจร	13
รูปที่ 2.8 โหลดเซลล์แบบคานประกอบด้วยชิ้นส่วนยึดหยุ่นกับสเตรนเกจ	16
รูปที่ 2.9 ทอร์คเซลล์ทำด้วยเพลากลมและสเตรนเกจ	19
รูปที่ 3.1 แผ่นอลูมิเนียมที่ประกอบด้วยขอบโค้งและขอบตรงรวมทั้งมีรูกลวง 2 ขนาด	29
รูปที่ 3.2 การวิเคราะห์หาผลเฉยบนแผ่นอลูมิเนียมด้วยการใช้ระเบียบวิธีผลต่างสืบเนื่อง	29
รูปที่ 3.3 การวิเคราะห์หาผลเฉยบนแผ่นตัวอย่างโดยวิธีระเบียบไฟไนต์เอลิเมนต์	30
รูปที่ 3.4 การแบ่งรูปร่างของปัญหาออกเป็นเอลิเมนต์ย่อยๆแบบต่างๆกัน	31
รูปที่ 3.5 เอลิเมนต์สามเหลี่ยมแบบอย่างประกอบด้วยสามจุดต่อ	32
รูปที่ 3.6 รูปแบบจำลองวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ก้านเบรกมือ	34
รูปที่ 3.7 รูปแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับกะโหลกศีรษะ	35
รูปที่ 3.8 การประยุกต์ระเบียบไฟไนต์เอลิเมนต์ในการขุดตัวของรถบัส	36
รูปที่ 3.9 โหลดเซลล์แบบสามมิติ	37

เรื่อง	หน้า
รูปที่ 3.10 โหลดเซลล์แบบสองมิติ (Top view)	38
รูปที่ 3.11 โหลดเซลล์แบบสองมิติ (Section A)	38
รูปที่ 3.12 โหลดเซลล์แบบสองมิติ (Section B)	39
รูปที่ 3.13 การวิเคราะห์ห้ระเบียนวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ของโหลดเซลล์	42
รูปที่ 4.1 โปรแกรม Abaqus	44
รูปที่ 4.2 Parts	44
รูปที่ 4.3 Create Parts	44
รูปที่ 4.4 Edit Depths	45
รูปที่ 4.5 Parts 3D	45
รูปที่ 4.6 Create cut : Extrude	45
รูปที่ 4.7 ขอบเขตการเจาะ	46
รูปที่ 4.8 Create Line : Connect	46
รูปที่ 4.9 End Condition	46
รูปที่ 4.10 เจาะกล่องทั้งหมด	47
รูปที่ 4.11 Create Solid : Extrude	47
รูปที่ 4.12 Create Solid : Extrude	47
รูปที่ 4.13 ตัวอย่างชิ้นงานจากการใช้ Create Solid : Extrude	48
รูปที่ 4.14 เจาะรูโดย Create Circle	48
รูปที่ 4.15 Create Circle	48
รูปที่ 4.16 เมนู Materials	49

เรื่อง	หน้า
รูปที่ 4.17 หน้าต่าง Edit Materials	49
รูปที่ 4.18 Create Section	49
รูปที่ 4.19 วัสดุทองเหลือง	50
รูปที่ 4.20 Assign Section	50
รูปที่ 4.21 Instance Parts	50
รูปที่ 4.22 Create Step	50
รูปที่ 4.23 การใส่ Load	51
รูปที่ 4.24 Create Load	51
รูปที่ 4.25 หน้าต่าง Edit Boundary condition	52
รูปที่ 4.26 Create Boundary condition	52
รูปที่ 4.27 การ Mesh Parts	52
รูปที่ 4.28 Seed Parts	53
รูปที่ 4.29 Seed Edge	53
รูปที่ 4.30 Assign Mesh Controls	53
รูปที่ 4.31 Mesh Parts	53
รูปที่ 4.32 Create Job	53
รูปที่ 4.33 Job Manager	54
รูปที่ 4.34 การประมวลผลสำเร็จ	54
รูปที่ 4.35 การประมวลผลไม่สำเร็จ	54
รูปที่ 4.36 ภาพจากไฟไนต์เอลิเมนต์	55

เรื่อง	หน้า
รูปที่ 4.37 Plot Contour Deformed Shape	55
รูปที่ 4.38 ตารางการดูผลที่เกิดขึ้น	55
รูปที่ 4.39 Animate : Scale Factor	56
รูปที่ 4.40 Common Options	56
รูปที่ 4.41 Create XY Data	56
รูปที่ 4.42 การออกแบบรูปที่ 1 โดยเสียรูปในแนวแกน X	57
รูปที่ 4.43 การออกแบบรูปที่ 1 โดยเสียรูปในแนวแกน Y	57
รูปที่ 4.44 การออกแบบรูปที่ 2 โดยเสียรูปในแนวแกน X	58
รูปที่ 4.45 การออกแบบรูปที่ 2 โดยเสียรูปในแนวแกน Y	59
รูปที่ 4.46 การออกแบบโหลดเซลล์ครั้งที่ 3	60
รูปที่ 4.47 ออกแบบ (Drawing)	61
รูปที่ 4.48 ก้อนโลหะทองเหลือง (Brass)	61
รูปที่ 4.49 การเจาะด้วยสว่าน	62
รูปที่ 4.50 เจาะสว่านเสร็จสิ้น	62
รูปที่ 4.51 การใช้เครื่องมินลิ่ง(Milling)	62
รูปที่ 4.52 ใช้เครื่องมินลิ่ง(Milling) เสร็จสิ้น	63
รูปที่ 4.53 รูปแบบสมบูรณ์	63
รูปที่ 4.54 การขัดผิวดโลหะ	66
รูปที่ 4.55 การทำความสะอาด	67
รูปที่ 4.56 การติดกาว	67

เรื่อง	หน้า
รูปที่ 4.57 การติดฉนวนทับตัวสเตรนเกจ	68
รูปที่ 4.58 การต่อวงจรฟูลบริดจ์	68
รูปที่ 4.59 คอมพิวเตอร์พกพา	69
รูปที่ 4.60 โปรแกรม NI MAX	69
รูปที่ 4.61 Multifunction Data Acquisition (DAQ) รุ่น NI USB-6008	70
รูปที่ 4.62 Strain Gauge	70
รูปที่ 4.63 Marshall Machine	71
รูปที่ 4.64 โหลดเซลล์	71
รูปที่ 4.65 ทดสอบโหลดเซลล์	72
รูปที่ 4.66 การออกแบบโหลดเซลล์ใหม่	74
รูปที่ 4.67 วัสดุสแตนเลส (Stainless)	75
รูปที่ 4.68 รูปแบบโหลดเซลล์	76
รูปที่ 4.69 วิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์	76
รูปที่ 4.70 การกลึงด้วยเครื่องมินลิ่ง(Milling)	78
รูปที่ 4.71 ลักษณะการขึ้นรูปของโหลดเซลล์	78
รูปที่ 4.72 Wire Cut Machine	79
รูปที่ 4.73 โหลดเซลล์ที่ปรับปรุงทางด้านกายภาพแล้ว	79
รูปที่ 4.74 การขัดสแตนเลส(Stainless)	80
รูปที่ 4.75 วางตำแหน่ง	80
รูปที่ 4.76 วิธีการวางสเตรนเกจ(Strain Gauge)	81

เรื่อง	หน้า
รูปที่ 4.77 ลักษณะการเสียรูปของโหลดเซลล์	81
รูปที่ 4.78 กาวสำหรับติดสเตรนเกจ(Strain Gauge)	82
รูปที่ 4.79 ติดเทปกาวทับ	82
รูปที่ 4.80 การติดวงจร	83
รูปที่ 4.81 การป้องกันสัญญาณจากภายนอก	83
รูปที่ 4.82การต่อวงจรบริดจ์เข้ากับ Multifunction Data Acquisition (DAQ)	84
รูปที่ 4.83 แอมพลิไฟเออร์ (Amplifier) และหม้อไฟ VIC Transformer	85
รูปที่ 4.84 ขั้นตอนการทดสอบ	86
รูปที่ 4.85 การประมวลผลของโปรแกรม NI MAX	86
รูปที่ 4.86กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรง(Load) และแรงดันไฟฟ้า(Volt) ของตัวอย่างขณะทำการเพิ่มน้ำหนัก	89
รูปที่ 4.87 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรง(Load) และแรงดันไฟฟ้า(Volt) ของตัวอย่างขณะทำการเพิ่มน้ำหนัก	90
รูปที่ 4.88รูปที่ 4.88 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรง(Load)และแรงดันไฟฟ้า(Volt) ของตัวอย่างการเพิ่มน้ำหนักและลดน้ำหนัก	91
รูปที่ 4.89 การประยุกต์ใช้	93
รูปที่ 4.90 โหลดเซลล์ความหนา 0.8 mm	94
รูปที่ 4.91 โหลดเซลล์ความหนา 1.6 mm	94
รูปที่ 4.92 โหลดเซลล์ความหนา 2 mm	95
รูปที่ 4.93 โหลดเซลล์ความหนา 2.4 mm	96
รูปที่ 4.94 โหลดเซลล์ความหนา 3 mm	96

รูปที่ 4.95 โหลดเซลล์ความหนา 3.5 mm

97

มหาวิทยาลัยบูรพา
Burapha University

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

โหลดเซลล์ คือ เซนเซอร์ที่สามารถแปลงค่าแรงกด หรือแรงดึง เป็นสัญญาณทางไฟฟ้าได้ เหมาะสำหรับการทดสอบคุณสมบัติทางกลของชิ้นงาน (Mechanical Properties of Parts) โหลดเซลล์ถูกนำไปใช้ในอุตสาหกรรมหลากหลายประเภท ได้แก่ การชั่งน้ำหนัก การทดสอบแรงกดของชิ้นงาน การทดสอบความแข็งแรงของชิ้นงาน การทดสอบการเข้ารูปชิ้นงาน(Press fit) ใช้สำหรับงานทางด้านวัสดุ โลหะ ทดสอบโลหะ ชิ้นส่วนรถยนต์ วิศวกรรมโยธา ทดสอบคอนกรีต ทดสอบไม้ ฯลฯ แบ่งออกเป็น 5 แบบ ได้แก่ 1.โหลดเซลล์แบบสเตรนเกจ (Strain Gauge Load cell) 2. โหลดเซลล์แบบไฮดรอลิก (Hydraulic load cell) 3. โหลดเซลล์แบบนิวแมติก(Pneumatic Load cell) 4. ไพโซรีซิสทีฟ (Piezoresistive) 5.แมกเนโตสเตริกทีฟ (Magnetostrictive)

แต่โหลดเซลล์ที่นิยมใช้กันอย่างกว้างขวาง และนำมาเป็นหัวข้อของงานวิจัยคือโหลดเซลล์ที่เป็นอุปกรณ์ตรวจวัดความเครียดที่เกิดขึ้นจากแรงที่จะทำการวัด ใช้วิธีโดยมีตัวเสถียร (Strain gauge)เป็นตัวรับรู้ความเครียดแล้วทำการแปลงความเครียดดังกล่าวเป็นแรงดันไฟฟ้าหรือเรียกง่าย ๆ คือโหลดเซลล์แบบสเตรนเกจ (Strain gauge load cell)

โดยทั่วไปแล้วโหลดเซลล์แบบสเตรนเกจจะใช้วงจรที่มีจุดวัดความเครียด 4 จุด (Wheatstone Bridge Circuit) ในการวัดโดยสเตรนเกจตัวด้านทานทั้งสี่จะเชื่อมต่อเข้าด้วยกันเพื่อใช้แปลงแรงที่กระทำกับชิ้นส่วนสเตรน เกจเองไม่ว่าจะเป็นแรงกดหรือแรงดึง แล้วทำการ ส่งสัญญาณออกมาเป็นแรงดันไฟฟ้า โดยที่แรงดันไฟฟ้าที่ได้จะมีหน่วยเป็น mV/V หมายความว่า ถ้าจ่ายแรงดัน 10 V ให้กับ Load cell ที่มี Spec. 2 mV/V ที่รับแรงได้เต็มที่ (Full load) สมมุติว่าน้ำหนักเป็น 2,000 กิโลกรัม ดังนั้นเมื่อมีแรงกระทำต่อ Load cell ที่น้ำหนัก Full load สัญญาณที่จะได้ก็จะได้เท่ากับ 20 mV ซึ่งก็พอจะแจ่มกระจ่างๆ คือ $0 \text{ kg} = 0 \text{ mV}$, $1000 \text{ kg} = 1000 \text{ mV}$ และ $2000 \text{ kg} = 2000 \text{ mV}$

การออกแบบโหนดเซลล์ให้มีประสิทธิภาพสูงที่สุดนั้นผู้ออกแบบจะต้องทราบตำแหน่งที่เกิดความเค้นสูงสุดและค่าความเค้นดังกล่าวจะต้องไม่เกินจุดครากของวัสดุที่นำมาใช้ทำโหนดเซลล์ซึ่งตำแหน่งและค่าของความเค้นนั้นสามารถนำการคำนวณโดยทฤษฎีทางกลศาสตร์มาคำนวณได้แต่ทฤษฎีทางกลศาสตร์นั้นมีข้อจำกัดคือในกรณีที่รูปแบบของชิ้นงานมีรูปร่างที่ซับซ้อนก็จะทำให้การคำนวณนั้นยุ่งยากมากและในบางกรณีจะไม่สามารถคำนวณได้ด้วยมือดังนั้นจึงมีการนำเอาวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เข้ามาช่วยในการวิเคราะห์พฤติกรรมการเสียรูปของโหนดเซลล์

วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์คือ ทำการเติมรูปทรงของ ชิ้นงาน ด้วยชิ้น ส่วน เล็กๆ ที่มีรูปทรงเรขาคณิต เช่น สามเหลี่ยม สี่เหลี่ยม ลูกบาศก์ ประกอบเข้าด้วยกันให้มีขนาดและรูปทรงใกล้เคียงกับต้นแบบให้มากที่สุด เนื่องจากเราสามารถ ประมาณ หาคำตอบที่แน่แท้ ของชิ้นส่วนที่มีรูปทรงเรขาคณิตได้ ดังนั้นเมื่อ เราเติมชิ้นส่วนเล็กๆ เหล่านี้ลงไปในส่วนใหญ่ เราก็สามารถศึกษาพฤติกรรมโดยรวมของระบบได้

โปรแกรมเริ่มต้นจาก การหาวิธีการ เพื่อใช้ในการวิเคราะห์โครงสร้าง ของเครื่องบิน Hrenikoff ได้เสนอการใช้ วิธี frame work เพื่อแก้ปัญหาทาง elasticity เป็นรายแรก ต่อมาในปี ค.ศ. 1943 Courant ก็ได้ตีพิมพ์บทความวิชาการ เกี่ยวกับการนำวิธีการ polynomial interpolation บนขอบเขตสามเหลี่ยม เพื่อใช้เป็นแนวทางในการประมาณผลคำตอบ และนอกจากนี้ Courant ก็ยังแนะนำ การใช้วิธีการของ Rayleigh-Ritz มาใช้ในการหาผลคำตอบ ของปัญหาทางวิศวกรรมอีกด้วย ซึ่งน่าจะเป็นที่มาของวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์นั่นเองจนกระทั่งในปี ค.ศ. 1953 วิศวกรจึงได้นำเอาเครื่องคอมพิวเตอร์ มาแก้สมการของ stiffness matrix เป็นครั้งแรก หลังจากนั้นอีกเจ็ดปี Clough จึงได้ตั้งชื่อวิธีการนี้ว่า วิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ ในปี ค.ศ. 1960

1.2 วัตถุประสงค์

1.เพื่อศึกษาและพัฒนารูปแบบโหลดเซลล์โดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ และ พัฒนาคำนวณแบบของโหลดเซลล์ที่มีประสิทธิภาพในการวัดสูง

2.วิเคราะห์การเสียดรูปของโหลดเซลล์ ความสามารถในการรับน้ำหนักและหาตำแหน่งที่มีความเค้นสูงสุดสำหรับติดตั้งชุดเซนเซอร์

1.3 ขอบเขตการศึกษา

1.การศึกษารูปแบบและข้อจำกัดของโหลดเซลล์จากนั้นจึงทำการเลือกวัสดุที่จะนำมาใช้ทำโหลดเซลล์รวมทั้งรูปทรงของโหลดเซลล์เพื่อให้มีประสิทธิภาพสูงสุด

2.ศึกษาคุณสมบัติทางกลของวัสดุที่จะนำมาใช้ในการทำโหลดเซลล์แล้วนำค่าทางกลนั้นนำมาออกแบบโดยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

3.ศึกษาการใช้งานโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อที่จะสามารถจำลองพฤติกรรมการเสียดรูปได้อย่างถูกต้องและแม่นยำ

4. ศึกษาวิธีการขึ้นรูปโลหะเพื่อให้ได้ชิ้นงานมีขนาดตรงตามแบบที่ต้องการให้ได้มากที่สุด

5. ศึกษาวิธีการติดตั้งเซนเซอร์และคุณสมบัติของเซนเซอร์รุ่นต่างๆ รวมทั้งข้อจำกัดในการใช้งาน

6. ศึกษาการใช้งานระบบเก็บข้อมูล Multifunction Data Acquisition (DAQ) ทำการสอบเทียบเพื่อประเมินประสิทธิภาพและความแม่นยำของโหลดเซลล์

1.4 แผนการดำเนินงาน

การทำงานวิจัยฉบับนี้มีขั้นตอนการศึกษาเริ่มจากการค้นคว้าหาข้อมูลจากบทความของวารสารต่างๆในห้องสมุดและจากสื่อสิ่งพิมพ์ออนไลน์ทางอินเทอร์เน็ตเกี่ยวกับโพลีเซลล์และการประยุกต์ใช้งาน ซึ่งจะนำทฤษฎีและข้อปฏิบัติต่างๆมาเป็นแนวทางในการศึกษาค้นคว้าวิเคราะห์และออกแบบจากนั้นจึงจะตัดสินใจเลือกชิ้นส่วน วัสดุ และ โปรแกรมที่ใช้เพื่อนำไปวิเคราะห์ผลงานวิจัย

หัวข้องาน	ก.ค.				ส.ค.					ก.ย.				ต.ค.				
	1	2	3	4	1	2	3	4	5	1	2	3	4	1	2	3	4	5
1. ทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง																		
2. จัดทำบทที่ 1																		
3. เก็บรวบรวมข้อมูล																		
4. จัดทำบทที่ 2																		
5. จัดทำบทที่ 3																		
6. แก้ไขบทที่ 3																		
7. จัดทำสื่อการนำเสนอ																		

[illegible]

หัวข้องาน	มี.ค.					เม.ย.				พ.ค.				
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	1	2	3	4	5
14. ทำการปฏิบัติการทดลอง														
15. จัดทำบทที่ 4														
16. จัดทำบทที่ 5														
17. จัดทำรูปเล่มและสื่อการนำเสนอ														

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 บทนำ (Introduction)

โหลดเซลล์ คือ เซนเซอร์ที่สามารถแปลงค่าแรงกด หรือแรงดึง เป็นสัญญาณทางไฟฟ้าได้ เหมาะสำหรับการทดสอบคุณสมบัติทางกลของชิ้นงาน (Mechanical Properties of Parts) โหลดเซลล์ถูกนำไปใช้ในอุตสาหกรรมหลากหลายประเภท ได้แก่ การชั่งน้ำหนัก การทดสอบแรงกดของชิ้นงาน การทดสอบความแข็งแรงของชิ้นงาน การทดสอบการเข้ารูปชิ้นงาน (Press fit) ใช้สำหรับงานทางด้านวัสดุ โลหะ ทดสอบโลหะ ชิ้นส่วนรถยนต์ วิศวกรรมโยธา ทดสอบคอนกรีต ทดสอบไม้ ฯลฯ

ในปัจจุบันเครื่องมือวัดน้ำหนักที่นิยมใช้ในงานอุตสาหกรรมคือโหลดเซลล์ (Load cell) แบบสเตรนเกจ (Strain gauge) อย่างไรก็ตามก่อนที่จะโหลดเซลล์จะเป็นที่นิยม เราใช้ตาชั่งแบบคานเป็นเครื่องมือวัดน้ำหนักในงานอุตสาหกรรม โดยใช้ชั่งวัดตั้งแต่ยาเม็ดเล็ก ๆ จนกระทั่งในงานอุตสาหกรรมรถยนต์ ตาชั่งแบบคานเป็นเครื่องมือที่มีความแม่นยำและเชื่อถือได้ หากได้รับการสอบเทียบและบำรุงรักษาอย่างเหมาะสม อย่างไรก็ตามในปัจจุบันได้มีการใช้ระบบชั่งวัดที่มีความทันสมัยมากขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งโหลดเซลล์แบบสเตรนเกจ ซึ่งวิวัฒนาการของโหลดเซลล์ได้เริ่มขึ้นจากการคิดค้นวงจรสะพานไฟฟ้าของ เซอร์ชาลส์วีทสตัน นักวิทยาศาสตร์ชาวอังกฤษ วงจรที่เขาได้คิดค้นขึ้นเหมาะสำหรับใช้วัดการเปลี่ยนแปลงความต้านทานที่เกิดขึ้นในอุปกรณ์วัดความเครียดหรือสเตรนเกจโดยที่อาศัยวงจรไฟฟ้าเพื่อเปลี่ยนค่าที่วัดเป็นค่าทางไฟฟ้าโหลดเซลล์ (Load cell) ทฤษฎีที่กล่าวว่า การเปลี่ยนแปลงความต้านทานทางไฟฟ้าของโลหะจะเกิดขึ้นเมื่อโลหะนั้นถูกกระทำภายใต้โหลด เป็นทฤษฎีที่นิยมใช้ในการวัดค่าความเครียด (Strain) ซึ่งได้รับการพัฒนาต่อมาในคริสต์ศตวรรษ 1940 โดยได้มีการวัดความเครียดให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น โดยการใช้เส้นโลหะขนาดเล็กนำมาขดรวมกันเป็นกลุ่ม (Bonded Metallic Wire Strain Gauge) หรือเรียกวามetallic สเตรนเกจ (Metallic Strain Gauge) ต่อมาตอนยุค 1950 ในช่วงการค้นคว้าทางด้านสารกึ่งตัวนำก็ได้มีการพัฒนาวัสดุประเภท (Piezoresistive) จนกระทั่งนำไปสู่ทรานซิสเตอร์ หลังจากนั้นวัสดุทางสาร

กึ่ง ตัวนำจึงได้ถูกนำมาใช้แทนเส้นลวดโลหะในการผลิตเพื่อเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพและให้
 เหมาะกับ งานหลายประเภทมากยิ่งขึ้นมีชื่อเรียกว่า เซมิคอนดักเตอร์สเตรนเกจ (Semiconductor
 Strain gauge) หรือ (Piezoresistive Sensor Strain Gauge) ไม่เพียงจะสามารถนำมาใช้วัดค่า
 ความเครียดสำหรับหาค่าความเค้น (Stress) แต่สามารถนำมาใช้กับทรานสดิวเซอร์ (Transducer)
 สำหรับวัดค่าต่างๆได้หลายชนิด เช่น โหลดเซลล์ (Load cell) สำหรับวัดแรงทรานสดิวเซอร์สำหรับ
 วัดแรงดันทรานสดิวเซอร์สำหรับวัดแรงบิด เป็นต้น

แม้ในยุคเริ่มต้นการใช้ สเตรนเกจ(Strain gauges)มีความยุ่งยาก แต่ต่อมาอุปกรณ์
 อิเล็กทรอนิกส์มีประสิทธิภาพมากขึ้น ทำให้สเตรนเกจ (Strain gauge)กลายเป็นอุปกรณ์ที่ใช้งานได้
 ง่ายขึ้นในขณะที่มีราคาถูกลง ปัจจุบันนี้แม้ในระดับห้องปฏิบัติการที่ต้องการวัดด้วยความแม่นยำสูง
 ยังคงมีความจำเป็นต้องใช้ตาชั่งแบบคานในการชั่งวัดอยู่ แต่ในงานอุตสาหกรรม ได้มีการใช้โหลด
 เซลล์แบบสเตรนเกจอย่างแพร่หลาย โหลดเซลล์แบบนิวแมติกมักจะใช้ในกรณีที่ต้องการความ
 ปลอดภัยและความสะอาดของสภาพการทำงาน อุปกรณ์ตรวจวัดแบบโหลดเซลล์ที่มีสเตรนเกจนี้มี
 ความแม่นยำอยู่ในช่วง 0.03-0.25% ของช่วงการวัดแบบเต็มสเกล (Full Scale) และเหมาะสมที่จะใช้
 ในงานอุตสาหกรรมเกือบทุกรูปแบบ ในการใช้งานที่ไม่ต้องการความแม่นยำมากนัก เช่น ในการ
 ชั่งถ้าวัดที่เป็นก้อน ๆ หรือการตวงหรือตักน้ำหนักบรรจุทุก แท่นชั่งน้ำหนักแบบที่มีจีดสเกล
 ยังคงมีใช้อยู่อย่างกว้างขวาง อย่างไรก็ตามในการใช้งานแบบนี้ แรงที่กระทำต่อคานกลไกมักจะถูก
 วัดโดยโหลดเซลล์ ทั้งนี้เป็นเพราะโหลดเซลล์มีความเหมาะสมกับการใช้งานในระบบดิจิทัลซึ่ง
 อาจถูกควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์อีกทีหนึ่ง

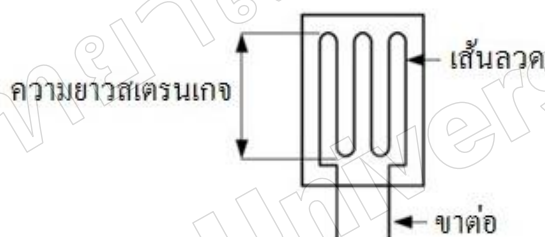
จากเหตุผลดังกล่าวข้างต้นทำให้โหลดเซลล์แบบสเตรนเกจ ซึ่งเป็นเครื่องมือวัดน้ำหนัก
 ชนิดหนึ่งที่สามารถพบ เห็นได้ในโรงงานอุตสาหกรรมเกือบทุกแห่ง ดังนั้นการศึกษาโครงสร้าง
 คุณสมบัติ หลักการทำงาน การนำไปใช้งาน และรายละเอียดอื่นๆ จึงเป็นสิ่งสำคัญต่อการปฏิบัติงาน
 ในโรงงานอุตสาหกรรม

ในส่วนของห้องปฏิบัติการทดสอบวัสดุไม่ว่าจะเป็น การทดสอบคอนกรีตเหล็กหรือแม้แต่
 การทดสอบคุณสมบัติทางกลของดิน ก็นิยมนำโหลดเซลล์แบบสเตรนเกจมาใช้ในการหาค่าแรงที่
 กดทับกับวัสดุ เนื่องจากมีความสะดวกและแม่นยำในการเก็บค่าโดยผ่าน Multifunction Data

Acquisition DAQ ที่สามารถกำหนดความถี่ในการเก็บค่าและยังสามารถติดตามค่าของแรงที่ใช้ได้ตลอดการทดลอง อีกทั้งยังสะดวกต่อการนำข้อมูลการทดสอบไปใช้

2.2 สเตรนเกจ (Strain gauge)

สเตรนเกจเป็นอุปกรณ์ ทรานสดิวเซอร์ แบบพาสซีฟ ซึ่งทำหน้าที่แปลงแรงดึงที่ภาษาทางกลศาสตร์เรียกว่าความเค้นกระทำบนตัวอุปกรณ์ให้เป็น การเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานไฟฟ้า สเตรนเกจนับเป็นอุปกรณ์ที่ได้รับความนิยมอย่างกว้างขวางทั้งในเรื่องของ การชั่งน้ำหนัก การวัดความดัน หรือการวัดความเปลี่ยนแปลงขนาดของวัตถุที่เกิดจากแรงกระทำต่างๆ โดยที่อุปกรณ์ชนิดนี้มีลักษณะดังต่อไปนี้



รูปที่ 2.1 แสดงโครงสร้างของสเตรนเกจ(Strain gauge)

จากรูปตัวสเตรนเกจ ประกอบด้วยส่วนของลวดตัวนำซึ่งถูกตัดไปัดคมาวางตัวอยู่บนแผ่นรองรับที่ปลายแต่ละข้างจะมีจุดเชื่อมต่อวงจรทางไฟฟ้า โดยทั่วไปจะติดตั้งสเตรนเกจบนส่วนประกอบหรือส่วนของโครงสร้างที่ได้รับแรงกระทำ เช่น ตอม่อสะพาน หรือ ส่วนโครงสร้างทางโยธาต่างๆ แรงที่กระทำต่อโครงสร้างจะส่งผลต่อสเตรนเกจ ซึ่งอาจจะดึงให้ตัวนำมีความยาวมากขึ้นในขณะที่ทำให้พื้นที่หน้าตัดของขดลวดตัวนำลดลง ซึ่งมีผลทำให้ค่าความต้านทานของขดลวดตัวนำมีค่าเปลี่ยนแปลงไปจากเดิม ทั้งนี้พิสูจน์ได้โดยสมการ

$$R = \rho L/A \quad (2.1)$$

โดยที่ R เป็นค่าความต้านทานของขดลวดตัวนำมีหน่วยเป็นโอห์ม

ρ เป็นค่าสัมประสิทธิ์ความต้านทานของลวดตัวนำที่ใช้ทำสเตรนเกจมีหน่วยเป็นโอห์ม- เมตร

L เป็นความยาวของขดลวดตัวนำมีหน่วยเป็นเมตร

A เป็นพื้นที่หน้าตัดของลวดตัวนำมีหน่วยเป็นตารางเมตร

เมื่อพิจารณาถึงการเปลี่ยนแปลงคุณลักษณะของลวดตัวนำเมื่อได้รับแรงกระทำแล้ว จะพบว่ามีการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้นสองประการคือ ความยาวของลวดตัวนำเปลี่ยนไปจากเดิม และความต้านทานของลวดตัวนำก็เปลี่ยนไปจากเดิม เพราะฉะนั้นถ้านำค่าทั้งสองชนิดนี้ไปทำการเทียบสัดส่วนกันก็จะได้ค่าตัวประกอบชนิดหนึ่งซึ่งมีชื่อเรียกว่า ค่าตัวประกอบเกจ หรือ Gage factor ซึ่งเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$K = (\Delta R/R)/(\Delta L/L) \quad (2.2)$$

โดยที่ K เป็นค่าตัวประกอบเกจ

ΔR เป็นค่าความต้านทานที่เปลี่ยนแปลงไปของลวดตัวนำหลังจากถูกแรงกระทำ

R เป็นค่าความต้านทานของลวดตัวนำเริ่มแรกก่อนถูกแรงกระทำ

ΔL เป็นค่าความยาวที่เปลี่ยนแปลงไปของลวดตัวนำหลังจากถูกแรงกระทำ

L เป็นค่าความยาวของลวดตัวนำก่อนถูกแรงกระทำ

2.3 วงจรวัดสโตนบริดจ์

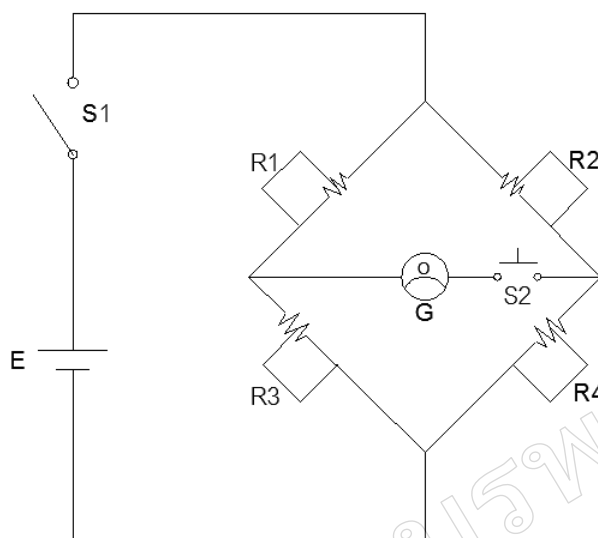
วงจรภายในของเครื่องวัดชนิดนี้ ประกอบด้วย

1) ตัวต้านทานที่ต่อขนานกัน 2 สาขาแต่ละสาขาประกอบด้วยตัวต้านทาน 2 ตัวต่ออนุกรมกัน

2) แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง(E)ต่อขนานกับตัวต้านทานของวงจรทำหน้าที่จ่าย

กระแสไฟฟ้าให้ไหลผ่านตัวต้านทานในวงจร

3) กัลวานอมิเตอร์ (G) ซึ่งต่อกับขั้วสายที่ขนานกัน ทำหน้าที่ตรวจจับ (detect) กระแสไฟฟ้าเพื่อบ่งบอกสภาพของวงจร ในกรณีที่วงจรบริดจ์สมดุลเข็มจะชี้ที่ศูนย์ แต่ถ้าไม่สมดุลเข็มจะเบี่ยงเบน

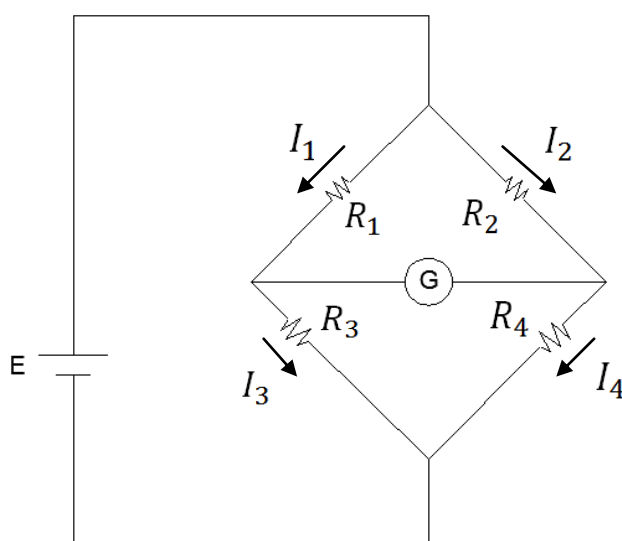


รูปที่ 2.2 วงจรบริดจ์

2.3.1 บริดจ์แบบสมดุล (Balance Bridge)

ขณะที่บริดจ์อยู่ในสภาพสมดุล จะไม่มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่าน กัลวานอมิเตอร์ทำให้เข็มของเครื่องวัดชี้ที่เลข 0

ถ้าต้องการทราบค่าความต้านทาน R_4 จะต้องสับสวิตช์ S1 และสวิตช์ S2 แล้วปรับอัตราส่วนของความต้านทาน R_2/R_1 (Ratio adjust) และความต้านทาน R_3 จนกระทั่งกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านวงจรกัลวานอมิเตอร์มีค่าเป็นศูนย์ แสดงว่าบริดจ์อยู่ในสภาพสมดุล



รูปที่ 2.3 บริดจ์แบบสมดุล

จากสภาพสมดุลของวงจรบริดจ์ (รูปที่ 2.3) ทำให้ทราบว่าแรงดันไฟตกคร่อม R_3 และ R_4 มีค่าเท่ากันตามสมการดังนี้

$$I_3 R_3 = I_4 R_4 \quad (2.3)$$

นอกจากนี้แรงดันไฟที่ตกคร่อม R_1 และ R_2 ยังมีค่าเท่ากันด้วย

$$I_1 R_1 = I_2 R_2 \quad (2.4)$$

ขณะที่ไม่มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านกัลวานอมิเตอร์ (G) แสดงว่า

$$I_1 = I_3 \quad \text{และ} \quad I_2 = I_4$$

แทนค่า I_3 ด้วย I_1 และ I_4 ด้วย I_2 ในสมการ 2.3 จะได้

$$I_1 R_3 = I_2 R_4 \quad (2.5)$$

นำสมการ 2.3หารด้วยสมการ 2.4 จะได้

$$\frac{R_1}{R_3} = \frac{R_2}{R_4}$$

หรือ $R_4 = \frac{R_2 R_3}{R_1} \quad (2.6)$

2.3.2 บริดจ์แบบไม่สมดุล(Unbalance Bridge)

ขณะที่บริดจ์อยู่ในสภาพไม่สมดุล จะมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านกัลวานอมิเตอร์ทำให้เข็มของเครื่องเบี่ยงเบนได้

การเบี่ยงเบนของเข็มจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับความไวของกัลวานอมิเตอร์ กล่าวคือ ถ้ากัลวานอมิเตอร์ 2 เครื่อง ในแต่ละเครื่องมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านเท่ากันเข็มของกัลวานอมิเตอร์ที่มีความไวสูงกว่าจะเบี่ยงเบนมากกว่าเข็มของกัลวานอมิเตอร์อีกเครื่องหนึ่ง

การหาความไวของกัลวานอมิเตอร์ทำได้ 2 แบบ คือ หาค่าในรูประยะการเบี่ยงเบนของเข็มต่อจำนวนกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่าน หรือมุมการเบี่ยงเบนของเข็มต่อจำนวนกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่าน ดังสมการต่อไปนี้

$$S = \frac{\text{มิลลิเมตร}}{\mu A} \text{ หรือ } \frac{\text{องศา}}{\mu A} \text{ หรือ } \frac{\text{เรเดียน}}{\mu A} \quad (2.7)$$

ระยะการเบี่ยงเบนของเข็มหาได้จาก

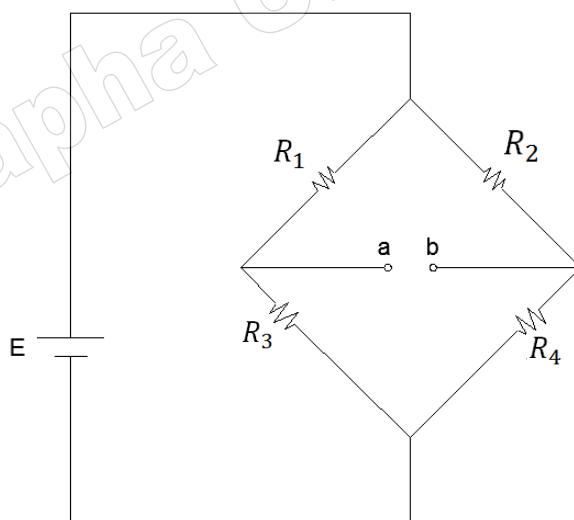
$$D = S \times I_g \quad (2.8)$$

เมื่อ D = ระยะการเบี่ยงเบนของเข็ม (มีหน่วยเป็นมิลลิเมตร)

S = ความไวของกัลวานอมิเตอร์ (มีหน่วยเป็นมิลลิเมตร/ μA)

I_g = กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านกัลวานอมิเตอร์ (มีหน่วยเป็น μA)

ปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านกัลวานอมิเตอร์ (I_g) ที่แสดงภาพไม่สมดุลของวงจร หาได้โดยการนำทฤษฎีเทวินินมารวมวิเคราะห์ ดังนี้



รูปที่ 2.4 บริดจ์แบบไม่สมดุล

เมื่อปลดกัลวานอมิเตอร์ออกจากวงจร แรงดันไฟฟ้าเทียบเคียงเทวินิน คือ ผลต่างของแรงดันไฟฟ้าที่ขั้ว a และ b ดังนั้นเมื่อนำสมการแบ่งแรงดันไฟฟ้า (Voltage Divider) มาร่วมพิจารณาจะได้แรงดันไฟฟ้าที่จุด a มีค่าเป็นดังนี้

$$E_a = E \left(\frac{R_3}{R_1 + R_3} \right) \quad (2.9)$$

และแรงดันไฟฟ้าที่จุด b มีค่าเป็น

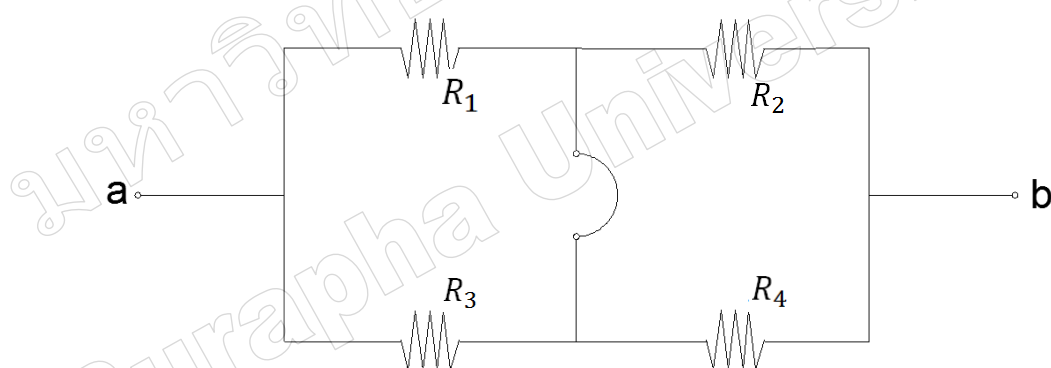
$$E_b = E \left(\frac{R_4}{R_2 + R_4} \right)$$

ผลต่างของแรงดันไฟฟ้า E_a และ E_b คือแรงดันไฟฟ้าเทียบเคียงเทวินิน (E_{Th})

$$E_{Th} = E_a - E_b$$

$$E_{Th} = E \left(\frac{R_3}{R_1 + R_3} \right) - E \left(\frac{R_4}{R_2 + R_4} \right) \quad (2.10)$$

$$E_{Th} = E \left(\frac{R_3}{R_1 + R_3} - \frac{R_4}{R_2 + R_4} \right) \quad (2.11)$$



รูปที่ 2.5 วงจรบริดจ์ใหม่ที่เกิดจากการลัดวงจรแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า

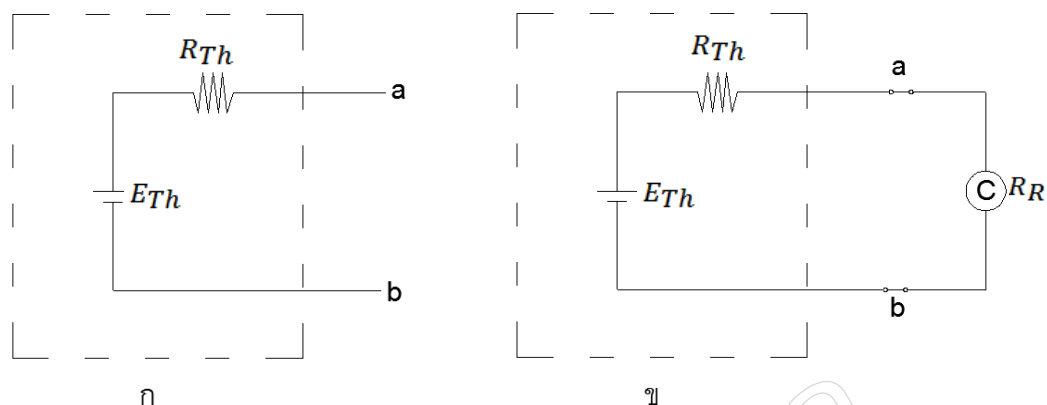
ความต้านทานเทียบเคียงเทวินิน(R_{Th})หาได้โดยลัดวงจรแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า (E) จะได้วงจรบริดจ์ใหม่ดังรูปที่ 2.5

จากรูปที่ 2.5 จะได้สมการความต้านทานเทียบเคียงเทวินินที่เกิดจาก

$$R_{Th} = (R_1 \parallel R_3) + (R_2 \parallel R_4)$$

$$\text{หรือ} \quad R_{Th} = \frac{R_1 R_3}{R_1 + R_3} + \frac{R_2 R_4}{R_2 + R_4} \quad (2.12)$$

นำค่า E_{Th} และ R_{Th} มาเขียนวงจรเทียบเคียงเทวินินได้ดังรูปที่ 2.6 (ก)



รูปที่ 2.6 แสดงการนำค่า E_{Th} และ R_{Th} มาเขียนวงจรเทียบเคียงเทวินิน

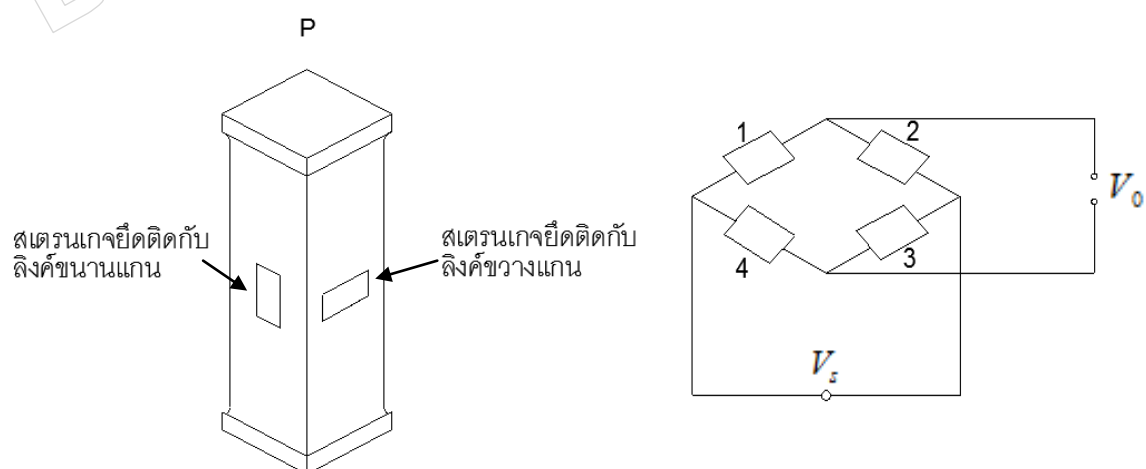
ถ้าต่อกัลวานอมิเตอร์เข้าที่ขั้ว a และ b กระแสไฟฟ้าที่ทำให้เข็มเบี่ยงเบนมีค่าเป็น

$$I_R = \frac{E_{Th}}{R_{Th} + R_R} \quad (2.13)$$

เมื่อ R_g = ความต้านทานของกัลวานอมิเตอร์

2.4 ชนิดของโหลดเซลล์ (Load cell)

2.4.1 โหลดเซลล์แบบลึงค์



รูปที่ 2.7 โหลดเซลล์แบบลึงค์และการต่อใช้งานกับวงจร

โหลดเซลล์แบบลิงค์ (Link-Type Load Cell) อย่างง่ายประกอบด้วยลิงค์ (Link) และสเตรนเกจ 4 อันดังแสดงในรูปที่ 2.7 ภาระ (Load) P สามารถเป็นได้ทั้งภาระแรงดึง (Tensile Load) หรือภาระการอัด (Compressive Load) สเตรนเกจ 2 อันยึดติดกับลิงค์ในแนวนานกับแกนและอีก 2 อันในแนวขวางกับแกนสเตรนเกจทั้ง 4 จะต่อเป็นวีตสโตนบริดจ์โดยเกจที่อยู่ในแนวแกนต่ออยู่ในแขนที่ 1 และ 3 ส่วนเกจที่อยู่ในแนวขวางต่ออยู่กับแนวแขนที่ 2 กับ 4

เมื่อภาระ P กระทำต่อลิงค์ ความเครียดตามแนวแกนและตามแนวขวางจะเกิดขึ้นในลิงค์ และสัมพันธ์ภาระตามสมการ

$$\epsilon_a = \frac{P}{AE} \quad (2.14)$$

$$\epsilon_t = -\frac{\nu P}{AE} \quad (2.15)$$

เมื่อ A คือ พื้นที่หน้าตัดของลิงค์

E คือ โมดูลัสความยืดหยุ่นของวัสดุที่ใช้ทำลิงค์

ν คือ อัตราส่วนปัวซองของวัสดุที่ใช้ทำลิงค์

การตอบสนองของเกจต่อภาระ P ที่กระทำเป็นไปตามสมการ

$$\frac{\Delta R1}{R1} = \frac{\Delta R3}{R3} = Sg \epsilon_a = \frac{SgP}{AE} \quad (2.16)$$

$$\frac{\Delta R2}{R2} = \frac{\Delta R4}{R4} = Sg \epsilon_t = -\frac{\nu SgP}{AE} \quad (2.17)$$

ถ้าสมมุติว่าสเตรนเกจทั้ง 4 ตัวบนลิงค์ เหมือนกันทุกประการ แรงดันเอาต์พุต V_0

จากวีตสโตนบริดจ์หาได้จาก

$$V_0 = \frac{r}{(1+2)^2} \left(\frac{\Delta R1}{R1} - \frac{\Delta R2}{R2} + \frac{\Delta R3}{R3} - \frac{\Delta R4}{R4} \right) V_s \quad (2.18)$$

จะได้
$$V_0 = \frac{SgP(1+V)}{2AE} V_s \quad (2.19)$$

หรือ
$$P = \frac{2AE}{Sg(1+V)} V_0 = C_{v0} \quad (2.20)$$

จากสมการ แสดงว่า ภาระ P เป็นสัดส่วนเชิงเส้นกับแรงดัน เอาต์พุต V_0 และค่าคงตัว สัดส่วน หรือ ค่าคงตัวเปรียบเทียบ คือ

$$P = \frac{2AE}{Sg(1+V)} V_s \quad (2.21)$$

เมื่อ C คือ ค่าคงที่เปรียบเทียบ

ความไวของโหนดเซลล์และวัสดุโหนดบริดจ์รวมกัน คือ

$$S = \frac{V_0}{P} = \frac{1}{C} = \frac{Sg(1+V)}{2AE} V_s \quad (2.22)$$

จากสมการ แสดงว่าความไวของโหนดเซลล์ขึ้นอยู่กับพื้นที่หน้าตัด (A) ความยืดหยุ่นของ วัสดุที่ใช้ทำลึงค์ ตัวประกอบเกจ และแรงดันที่จ่ายให้กับบริดจ์ (V_s)

เรนจ์ (Range) ของแรงที่ให้กับโหนดเซลล์แบบลึงค์ หาได้จากพื้นที่หน้าตัดของลึงค์ และ ความด้า (S_f) ของวัสดุที่ใช้ทำลึงค์ โดย

$$P_{\max} = S_f A \quad (2.23)$$

อัตราส่วนแรงดันที่ภาระสูงสุด (V_0/V_s)_{max} สำหรับโหนดเซลล์แบบลึงค์ หาได้จากการแทนสมการ 2.23 นี้ ลง 2.22 จะได้

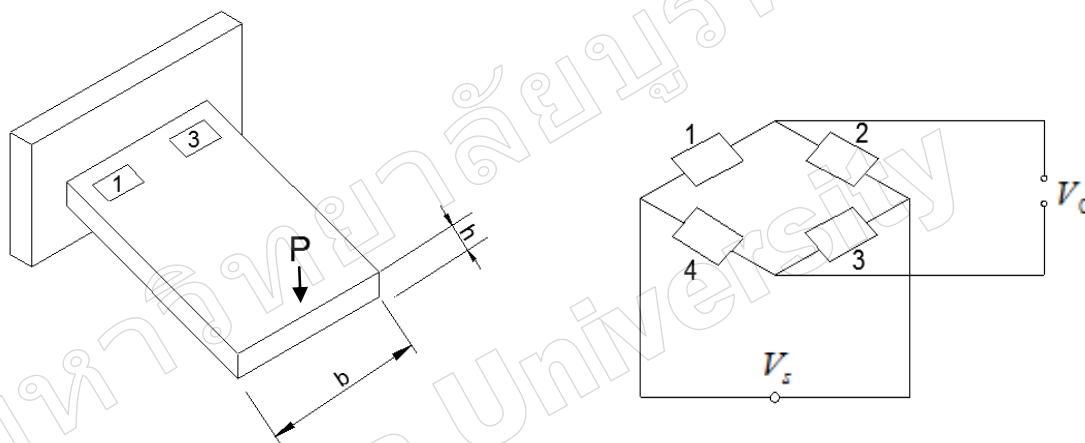
$$\left(\frac{V_0}{V_s} \right)_{\max} = \frac{SgS_f(1+V)}{2E} \quad (2.24)$$

โหลดเซลล์แบบบิลด์ก็อปทั้งหมัดกำหนดค่าเต็มสเกลของภาระ ($P=P_{\max}$) ที่ $(V_0/V_s)^* = 3m V/V$

ด้วยค่าเต็มสเกลเฉพาะของอัตราแรงดัน $(V_0/V_s)^*$ นี้ภาระ P บนโหลดเซลล์จะหาได้จาก

$$P = \frac{V_0/V_s}{V_0/V_s} P_{\max} \quad (2.25)$$

2.4.2 โหลดเซลล์แบบคาน



รูปที่ 2.8 โหลดเซลล์แบบคานประกอบด้วยชิ้นส่วนยึดหยุ่นกับสเตรนเกจ

โหลดเซลล์แบบคาน(Beam-type load cell) ใช้วัดภาระในกรณีที่ใช้โหลดเซลล์แบบบิลด์ก็อปไม่ได้ จากรูปที่ 2.8 ใช้คานยื่น (Cantilever Beam) ทำหน้าที่เป็นชิ้นส่วนยึดหยุ่นซึ่งมีสเตรนเกจ 2 อันติดอยู่ที่ผิวด้านบนและอีก 2 อัน ติดที่ผิวด้านล่าง (ทั้งหมดติดอยู่ในแนวขนานกับแกนของคาน) ทำหน้าที่เป็นตัวรับรู้ โดยสเตรนเกจ ต่อกันเป็นวงวิสต์ไดนามิคส์ ดังรูปที่ 2.8

ภาระ P ทำให้เกิดโมเมนต์ $M(=PX)$ ที่ตำแหน่ง X ทำให้ได้ผลลัพธ์

$$\epsilon_1 = -\epsilon_2 = \epsilon_3 = -\epsilon_4 = \frac{6M}{Ebh^2} = \frac{6Px}{Ebh^2} \quad (2.26)$$

เมื่อ b คือ ความกว้างของหน้าตัดคาน

h คือ ความหนาของหน้าตัดของคาน

การตอบสนองของสเตรนเคหาได้จากสมการ $\frac{\Delta R}{R} = S^g \varepsilon$ และสมการ(2.26) ดังนั้น

$$\frac{\Delta R_1}{R_1} = -\frac{\Delta R_2}{R_2} = -\frac{\Delta R_3}{R_3} = -\frac{\Delta R_4}{R_4} = \frac{6S^g P_x}{Eb h^2} \quad (2.27)$$

แรงดันเอาต์พุต V_0 จากวีตสโตนบริดจ์ ซึ่งเป็นผลจากการกระทำของ ภาระ P หาได้โดยแทนสมการ (2.27)ลงในสมการ

$$V_0 = \frac{r}{(1+r)^2} \left(\frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} - \frac{\Delta R_4}{R_4} \right) V_s \quad (2.28)$$

และสมมติว่าสเตรนเคหาทั้ง 4 เหมือนกันทุกประการ จะได้

$$V_0 = \frac{6S_g P_x}{Eb h^2} V_s \quad (2.29)$$

หรือ

$$P = \frac{Eb h^2}{6S_g x V_s} V_0 = C V_0 \quad (2.30)$$

จากสมการ 2.30แสดงว่าภาระ P เป็นสัดส่วนกับแรงดัน เอาต์พุต V_0 และค่าคงตัวสัดส่วน หรือค่าคงตัวเปรียบเทียบ C คือ

$$C = \frac{Eb h^2}{6S_g x v_x} \quad (2.31)$$

ความไวของโหนดเซลล์และวีตสโตนบริดจ์รวมกัน กำหนดโดยสมการ

$$S = \frac{V_0}{P} = \frac{1}{C} = \frac{6S_g x v_x}{Eb h^2} \quad (2.32)$$

จากสมการ 2.32แสดงว่าความไวของโหนดเซลล์แบบคาน ขึ้นอยู่กับรูปร่างหน้าตัดของคาน (b.h) โมดูลัสความยืดหยุ่นของวัสดุที่ใช้คาน(E) ตำแหน่งของภาระเทียบกับเคา (X) ตัวประกอบเคา (S_g) และแรงดันที่ป้อนให้กับวงบริดจ์ (V_s)

เรนจ์ของภาระของภาระที่ใช้กับโพลีเซลล์แบบคาน ขึ้นอยู่กับรูปร่างหน้าตัดของคาน ตำแหน่งที่ภาระกระทำ และความล้าของวัสดุที่ใช้ทำคาน ถ้าสมมุติว่าเกจติดที่ตำแหน่งใกล้กับฐานรองรับคานจะได้

$$M_{gage} = M_{max}$$

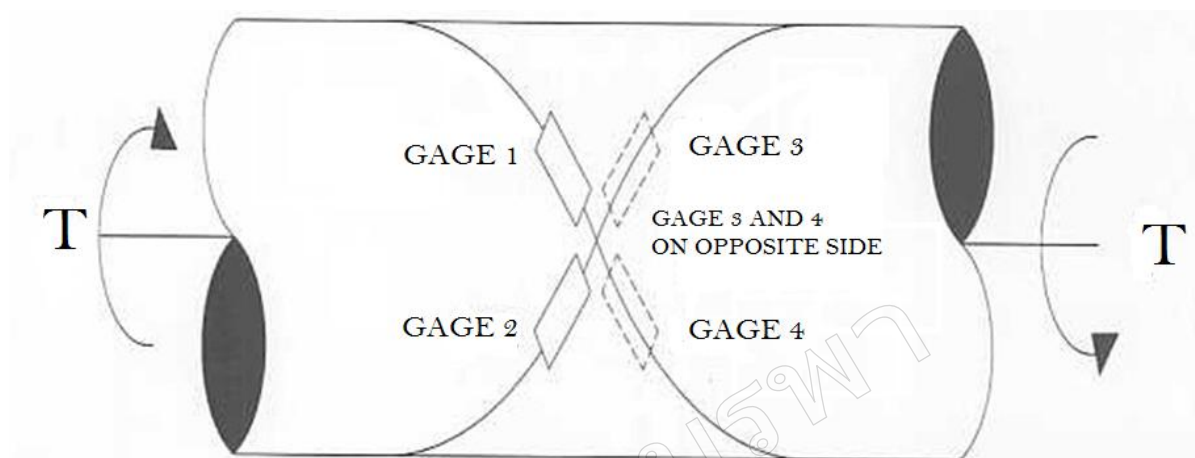
และ
$$P_{max} = \frac{S_f b h^2}{6x} \quad (2.33)$$

อัตราส่วนแรงดันที่ภาระสูงสุด $(V_o/V_s)_{max}$ หาได้จากกรแทนสมการ 2.19 ลงในสมการ 2.20 ดังนั้น

$$\left(\frac{V_o}{V_s} \right)_{max} = \frac{S_g S_f}{E} \quad (2.34)$$

โพลีเซลล์แบบคานที่ขายในท้องตลาดมีอัตราส่วนแรงดัน $(V_o/V_s)^*$ ที่ภาระเต็มสเกลระหว่าง 4 และ 5m V/V

2.4.3 ทอร์กเซลล์



รูปที่ 2.9 ทอร์กเซลล์ทำด้วยเพลากลมและสเตรนเกจ

ทอร์กเซลล์ (Torque Cell) เหมือนโหนดเซลล์ คือประกอบด้วยชิ้นส่วนทางกล (โดยปกติเพลามีส่วนพื้นที่หน้าตัดเป็นรูปทรงกลม) กลับตัวรับรู้คือสเตรนเกจติดอยู่บนเกลียว 2 เส้นที่ตั้งฉากกันโดยแต่ละเส้นทำมุม 45 องศา กับแกนของเพลาดังแสดงในรูปที่ 2.9 เกจ 1 และ 3 ติดอยู่บนเกลียวขวาตัวตรวจวัดความเครียดบวก เกจ 2 และ 4 ติดอยู่บนเกลียวซ้ายตรวจสอบความเครียดลบ ความเค้นเฉือน T ในเพลากลม สัมพันธ์กับทอร์ก T ที่กระทำต่อเพลากลมด้วยสมการ

$$\tau_{xz} = \frac{TD}{2J} = \frac{16T}{\pi D^3} \quad (2.35)$$

เมื่อ D คือ เส้นผ่าศูนย์กลางกลางของเพล

J คือ โมเมนต์เชิงขั้วของความเฉื่อยที่หน้าตัดวงกลมเท่านั้น $\frac{\pi D^4}{32}$

เมื่อเพลากลมอยู่ภายใต้ข้อของความเฉื่อยภายใต้การกระทำของแรงบิดเพียงอย่างเดียวความเค้นตั้งฉาก (Normal Stress) $\sigma_x = \sigma_y = \sigma_z = 0$ จากรูปที่ 2.6 จะได้

$$\sigma_1 = -\sigma_2 = \tau_{xy} = \frac{16T}{\pi D^3} \quad (2.36)$$

ความเครียดหลัก (Principle Strain) $\epsilon_1 = \epsilon_2$ หาได้จากสมการ 2.25 และกฎของฮุก

$$\begin{aligned}\varepsilon_1 &= \frac{1}{E}(\sigma_1 - \nu\sigma_2) = \frac{16T}{\pi D^3} \left(\frac{1+\nu}{E} \right) \\ \varepsilon_1 &= \frac{1}{E}(\sigma_2 - \nu\sigma_1) = \frac{16T}{\pi D^3} \left(\frac{1+\nu}{E} \right)\end{aligned}\quad (2.37)$$

การตอบสนองของสเตรนเกจเป็นไปตามสมการ

$$\frac{\Delta R_1}{R_1} = -\frac{\Delta R_2}{R_2} = \frac{\Delta R_3}{R_3} = -\frac{\Delta R_4}{R_4} = -\frac{16T}{\pi D^3} \left(\frac{1+\nu}{E} \right) S_g \quad (2.38)$$

เมื่อต่อเกจเข้ากับวีตสโตนบริดจ์ ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเอาต์พุต V_0 และทอร์กจะหาโดยแทนสมการ (2.38) ลงสมการ

$$V_0 = \frac{r}{(1+r)^2} \left(\frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} - \frac{\Delta R_4}{R_4} \right) V_s$$

จะได้

$$V_0 = \frac{16T}{\pi D^3} \left(\frac{1+\nu}{E} \right) S_g V_s \quad (2.39)$$

หรือ

$$T = \frac{\pi D^3 E}{16(1+\nu) S_g V_s} V_0 = C v_0 \quad (2.40)$$

เมื่อ

$$C = \frac{\pi D^3 E}{16(1+\nu) S_g V_s} \quad (2.41)$$

ความไวของทอร์กเซลล์ – วีตสโตนบริดจ์รวมกัน กำหนดโดย

$$S = \frac{V_0}{T} = \frac{1}{C} = \frac{16(1+\nu) S_g V_s}{\pi D^3 E} \quad (2.42)$$

เรนจ์ของทอร์กเซลล์ขึ้นอยู่กับเส้นผ่าศูนย์กลางของเพลลา (D) จีดจำกัดสัดส่วน (Sr) ของวัสดุในการบิดสำหรับการประยุกต์ใช้งานแบบสถิตจะได้

$$T_{max} = \frac{\pi D^3 S \tau}{16} \quad (2.43)$$

อัตราส่วนแรงดันทอร์คสูงสุด $(V_0/V_s)^*$ ของทอร์คเซลล์จะถูกกำหนดไว้ระหว่าง 4 และ 5 m V/V
 ทอร์ค T ที่สอดคล้องกับแรงดันเอาต์พุต V_0 ถูกกำหนดโดยสมการ

$$T = \frac{V_0/V_s}{(V_0/V_s)^*} T_{max} \quad (2.44)$$

2.5 วัสดุที่สามารถนำมาทำโพลีเมอร์ได้

2.5.1 ทองเหลือง (Brass)

ทองเหลือง (Brass) เป็นโลหะผสมระหว่างทองแดงและสังกะสี จึงสามารถกล่าวในอีกลักษณะหนึ่งได้ว่า ทองเหลืองเป็นโลหะทองแดงผสม (Copper Alloy) จึงเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า บรอนซ์ (Bronzes) ซึ่งวงการสถาปนิกจำแนกชื่อเรียกของบรอนซ์ตามสีสันและลักษณะที่นำไปใช้งาน ได้แก่ บรอนซ์ขาว (White Bronzes) บรอนซ์เหลือง (Yellow Bronzes) บรอนซ์รูปปั้น (Statuary Bronzes) และบรอนซ์เขียว (Green Bronzes) ซึ่งเปลี่ยนเป็นสีเขียวเมื่อผิวโลหะสัมผัสสภาพอากาศภายนอก โลหะผสมเหล่านี้ล้วนอยู่ในกลุ่มเดียวกับทองเหลืองนั่นเอง

คุณสมบัติทางกลของทองเหลือง

Tensile Strength > 335 N/mm²

Vickers Hardness (0.5): 80

Poisson's Ratio 0.34

2.5.2 สแตนเลส (Stainless)

สแตนเลส (Stainless) หรือตามศัพท์บัญญัติเรียกว่าเหล็กกล้าไร้สนิมเป็นเหล็กที่มีปริมาณคาร์บอนต่ำ (น้อยกว่า 2%) ของน้ำหนักมีส่วนผสมของโครเมียมอย่างน้อย 10.5% กำเนิดขึ้นในปี พ.ศ.1903 เมื่อนักวิทยาศาสตร์พบว่าการเติมนิเกิล โมลิบดีนัม ไททาเนียม นีโอเนียม หรือโลหะอื่นแตกต่างกันไปตามชนิดของคุณสมบัติเชิงกล เข้าไปผสม ในเหล็กกล้าธรรมดาทำให้ เหล็กกล้ามีความต้านทานการเกิดสนิมได้โดยโครเมียมที่เป็นส่วนผสมหลักของสแตนเลส (ประมาณ 10.5 %

หรือมากกว่า) จะทำให้เกิดการสร้างฟิล์มโครเมียมออกไซด์ (Chromium oxide film : CrO₂ หรือเรียกว่า passive film) ที่มองไม่เห็นเกาะติดแน่นอยู่ที่ผิวหน้าทำให้เหล็กกล้ามีความต้านทานการกัดกร่อนฟิล์มปกป้องนี้จะมี ความบางเทียบเท่ากับวาทะกระจาย 1 แผ่นบนตึกสูง 20 ชั้นถ้าฟิล์มที่ผิวหน้านั้นถูกทำลายไม่ว่าจากแรงกลหรือสารเคมีออกซิเจนที่มีอยู่ในบรรยากาศแม้จำนวนน้อยนิดจะเข้าทำปฏิกิริยากับโครเมียมสร้างฟิล์มโครเมียมออกไซด์ทดแทนขึ้นใหม่ด้วยตัวมันเอง

สแตนเลสมีคุณสมบัติที่ไม่เหมือนใครเช่นยากต่อการขึ้นสนิมเมื่อเทียบกับโลหะหรือวัสดุชนิดอื่นๆค่าบำรุงรักษาดำรงต่อการเชื่อมและการขึ้นรูประยะเวลาการใช้งานคุ้มค่างับราคาและสามารถนำกลับมาใช้ได้ใหม่ทั้งหมดจึงทำให้สแตนเลสเป็นโลหะที่ทรงคุณค่าและมีประโยชน์ใช้สอยที่ไร้ขีดจำกัด

2.5.2.1 คุณสมบัติทางกายภาพของสแตนเลส (Stainless)

ค่าความหนาแน่นสูงของสแตนเลสแตกต่างจากวัสดุที่ใช้ในการก่อสร้างอื่นๆอย่างเห็นได้ชัดในส่วนของคุณสมบัติเกี่ยวกับความสามารถทนความร้อนของสแตนเลสมีข้อสังเกต 3 ประการคือ

1.การที่มีจุดหลอมเหลวสูงทำให้มีอัตราความคืบคลานเมื่อเทียบกับเซรามิกที่อุณหภูมิต่ำกว่า 1000 องศา C

2.การที่มีค่านำความร้อนระดับปานกลางทำให้สแตนเลสเหมาะที่จะใช้ในงานที่ต้องทนความร้อน (ผู้คอนเทนเนอร์) หรือต้องการคุณสมบัตินำความร้อนได้ดี (เครื่องถ่ายความร้อน)

3.การมีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวระดับปานกลางจึงสามารถใช้ความยาวมากๆได้โดยใช้ตัวเชื่อมน้อยเช่นในการทำหลังคา

2.5.2.2 คุณสมบัติเชิงกลของสแตนเลส (Stainless)

Tensile Strength > 620 N/mm²

Vickers Hardness (0.5): 80

Poisson's Ratio 0.28

2.5.3 อลูมิเนียม(Aluminium)

อลูมิเนียม เป็นโลหะที่มีน้ำหนักเบาเป็นอันดับสี่ โลหะผสมของอลูมิเนียมใช้กันมากในการสร้างเครื่องบินอลูมิเนียมหนักเพียงหนึ่งในสามของเหล็ก และสามารถนำไฟฟ้าได้ดี ในผิวโลกมีอลูมิเนียมมากกว่าโลหะอื่นๆ ในดินเหนียวอลูมิเนียมเกือบหนึ่งในสี่โดยน้ำหนัก แต่การแยกอลูมิเนียมบริสุทธิ์จากดินทำได้ไม่่ง่ายนัก เขามักแยกอลูมิเนียมจากแร่ ชื่อ บอกไซต์ (Bauxite) ซึ่งมีอลูมิเนียมมากกว่าดิน แร่นี้มีมากในทวีปอเมริกา (ประเทศแคนาดามีมากที่สุด) และในออสเตรเลีย ในประเทศอื่นก็มีบ้างเหมือนกันอลูมิเนียมมีอยู่ในรัตนชาติบางชนิด เช่น พลอยและทับทิม เป็นต้น แร่กากกะรุน (Emery) คือออกไซด์ของอลูมิเนียมเรารู้จักอลูมิเนียมมานานกว่า 140 ปี แต่เนื่องจากราคาแพงจึงมิได้มีผู้ใช้กันแพร่หลาย ทรายบจนกระทั่งถึงสมัยที่อาจผลิตพลังงานไฟฟ้าได้ในราคาต่ำจากน้ำตก โลหะนี้จึงมีราคาถูกลงเพราะการแยกอลูมิเนียมจากแร่ทำได้โดยวิธีไฟฟ้าได้ดีกว่าอย่างอื่น

คุณสมบัติของอลูมิเนียม

- สัญลักษณ์คือ Al ความหนาแน่น 2.7 กก./ม³
- จุดหลอมเหลว 658 องศาเซลเซียส
- ความเค้นแรงดึงของอลูมิเนียมหล่อ 9-12 MPa(9-12 กก./ตร.มม.)
- ความเค้นแรงดึงของอลูมิเนียมอบเหนียว 7 MPa(7 กก./ตร.มม.)
- ความเค้นแรงดึงของอลูมิเนียมรีดแข็ง 13-20 MPa(13-20 กก./ตร.มม.)
- อัตรายืดตัว 3-35%
- Poisson's Ratio 0.334

2.6 งานวิจัยในอดีตที่เกี่ยวข้อง

ในการวิเคราะห์และออกแบบโหลดเซลล์โดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์นี้ได้มีมาเนิ่นนานตั้งแต่ในอดีตและพัฒนาเรื่อยมาจนถึงปัจจุบันซึ่งต่างคนที่ต่างความคิดะนั้นแต่ละความคิดของแต่ละท่านก็ได้ให้คำนิยามไว้มากมายตั้งแต่การออกแบบโหลดเซลล์จนถึงการใช้โปรแกรมซึ่งได้ไว้เป็นข้อมูลอันเป็นประโยชน์แก่คนรุ่นหลังและนำมาต่อยอดให้สู่ออนาคตไว้อย่างต่าง ๆ กัน

Ochial et al. (1986) ได้เริ่มทำการออกแบบโหลดเซลล์โดยหาแรงที่เกิดขึ้นทางแนวดิ่ง (Vertical force) และแรงทางแนวนอน (Horizontal) ของโหลดเซลล์ซึ่งเป็นพื้นฐานในการหาคุณสมบัติทางสถิติศาสตร์และพลศาสตร์ จากผลการทดลองสรุปว่า สามารถนำโหลดเซลล์ที่ออกแบบไปได้ไปใช้กับแขนจับของหุ่นยนต์เพื่อใช้เป็นอุปกรณ์รับรู้แรง ของแขนจับหุ่นยนต์

Hatamura and Ono (1986) ศึกษาและออกแบบตัวตรวจจับแรงและแรงบิดใน 6 แกนเพื่อหาค่าความแม่นยำในการตรวจรับแรงผู้วิจัยได้อธิบายถึงหลักการใช้โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ในการหารางในทิศทางในโครงสร้างแผ่นขนาน (Parallel plate structure) ขนาด, ตำแหน่งในการติดตั้งสเตรนเกจและวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างขณะมีแรงมากระทำ

Arinishi et al.(1992) ได้ทำการศึกษาความเหมาะสมในการออกแบบโครงสร้างรูปทรง 2 มิติซึ่งนำรูปทรง 2 แบบมาวิเคราะห์อีกทั้งนำหลักการของความไม่แน่นอนมาพิจารณาเมื่อมีขนาดความแข็งแรง และแรงกระทำจากภายนอกที่มีการเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลา มาเกี่ยวข้องโดยทำการหาขนาดรูปทรงที่มีค่าเฉลี่ยต่ำที่สุดภายใต้เงื่อนไขที่กำหนด

Chao and Chen (1997) ได้ทำการศึกษาวิธีการในการออกแบบตัวตรวจจับแรง , Employ Calibration Matrix, Condition Number, ความไวในการวัดแรงของสเตรนเกจและจำนวนสเตรนเกจที่จะทำการติดตั้งที่ชุดตรวจจับโดยใช้ในการวัดแรงของสเตรนเกจและจำนวนสเตรนเกจที่จะทำการติดตั้งที่ชุดตรวจจับโดยใช้โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อทำการวิเคราะห์ในโครงสร้างของชุดตรวจจับผลลัพธ์ที่ได้ทำให้ค่าสติเฟ้นส(Stiffness) ลดลงเมื่อเกิดความไวในการ รับแรงสูงสุด,ค่าสถานะทางตัวเลข(Condition number) ต่ำสุด, การเปรียบเทียบทางเมตริกดีเยี่ยม

Kang et al. (1999a) ได้ปรับสมมติฐานของ Hatamura and Ono(1986) โดยพัฒนาการออกแบบตัวตรวจจับแรง และโมเมนต์ของคานอย่างเป็นลำดับขั้นตอนโดยลำดับแรกทำการหาสมการที่ตรวจสอบการโก่งตัวบนผิวงานภายใต้แรงและโมเมนต์จากนั้นนำสมการที่ได้หาขนาดและเอลิเมนต์ของชิ้นงานอีกทั้งนำโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์มาวิเคราะห์เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของสมการที่ได้ และนำผลของไฟไนต์เอลิเมนต์มาหาตำแหน่งในการติดตั้งสเตรนเกจผลที่ได้คือค่าผิดพลาดที่เกิดจากสัญญาณรบกวนลดลงประมาณร้อยละ 3

Kang (2001b) ทำการออกแบบอุปกรณ์ตรวจวัดแรงหลายแกน (Multi-axis force sensor) เพื่อทำการวัดการแพร่กระจายของค่าผิดพลาดที่เกิดขึ้น (Measurement error propagation) ในโครงสร้างและนำโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์มาวิเคราะห์หาตำแหน่งในการติดตั้งสเตรนเกจและวิเคราะห์ค่าผิดพลาดที่เกิดขึ้นในชิ้นงานจากการทดลองสรุปว่าในโครงสร้างการแพร่กระจายของค่าผิดพลาดของตัวตรวจวัดแรงในโครงสร้างเกิดจากความผิดพลาดจากการวัดค่าของความเครียดและคอมไพรีนเมตริกซ์ (Compliance matrix) ก็มีผลกับค่าผิดพลาดที่เกิดขึ้นได้

Jonathan and Susumu (2002) ได้ศึกษาพฤติกรรมของโครงสร้างของโพลีเซลล์ซึ่งเป็นอุปกรณ์วัดแรงผู้วิจัยได้ศึกษาความเค้น และความเครียดที่เกิดขึ้นภายใต้มีแรงมากระทำอีกทั้งได้ทำการวิเคราะห์หาขนาดของโพลีเซลล์เพื่อให้เหมาะกับการใช้งานจากผลลัพธ์ที่ได้แสดงว่าการเปลี่ยนแปลงขนาดของตัวโพลีเซลล์ทำให้ค่าเอาต์พุต(Output)เปลี่ยนไปด้วย

Joo et al. (2002) ได้นำวิธีการของ Ochiai et al.(1986) มาปรับปรุงการออกแบบโพลีเซลล์แบบ 6 แกน โดยการทดลองนี้ได้อธิบายหลักการออกแบบขนาดของโพลีเซลล์และนำไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อลดค่าความผิดพลาดต่อเนื่องที่เกิดขึ้น (Minimum coupling error), หาตำแหน่งในการติดตั้งสเตรนเกจ และการต่อวงจรสเตรนเกจผลลัพธ์ที่ได้ความไวในการตรวจจับแรงในแนวแรง (Force) และโมเมนต์สามารถลดค่าผิดพลาดต่อเนื่องที่เกิดขึ้นได้ร้อยละ 0.38 และสามารถรับแรงได้ถึงร้อยละ 250

Rencis and Terdalkar (2006) ได้ศึกษากระบวนการและวิธีการออกแบบโดยใช้วิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อพัฒนาออกแบบให้ง่ายต่อการวิเคราะห์ชิ้นงานเมื่อมีความต้องการเปลี่ยนแปลงรูปร่างและขนาดของชิ้นส่วนงานได้อย่างรวดเร็วยิ่งขึ้น

Kim (2006) นำทฤษฎีได้ศึกษาไว้แล้วในปี 1999 มาปรับปรุงโครงสร้างของตัวตรวจวัดแรงของหุ่นยนต์แบบ 6 แกนโดยใช้วิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์และทำการวิเคราะห์การติดตั้งชุดสเตรนเกจทั้งนี้ได้ทำการทดสอบคุณลักษณะของอุปกรณ์ที่ออกแบบผลที่ได้จากการทดลองค่าผิดพลาดของการรบกวน (Interference error) จากไฟไนต์เอลิเมนต์เป็นร้อยละ 0 และค่าผิดพลาดจากคุณสมบัติเป็นร้อยละ 2.85 และอัตราการเคลื่อนที่ของค่าแรงดันไฟฟ้าเป็น 0.5 มิลลิโวลต์ต่อโวลต์

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องในประเทศนั้นมีด้วยกันดังนี้

สุนทร กิมสง (1999) ได้ทำวิทยานิพนธ์เกี่ยวกับเครื่องชั่งน้ำหนักแบบคิดราคาในตัว ที่สามารถวัดทั้งปริมาณน้ำหนักและคำนวณราคาในเครื่องเดียวกันเครื่องชั่งนี้ได้ใช้โพลีคาร์บอเนตแบบมีอุปกรณ์ชุดเซนเซอร์อุณหภูมิในตัว ทำการแปลงค่าปริมาณน้ำหนักให้เป็นสัญญาณทางไฟฟ้า แล้วส่งวงจรทางไฟฟ้า แสดงสัญญาณเป็นรูปแบบดิจิตอลเพื่อทำการประมวลผลต่างๆ รวมถึงการรับคำสั่งจากคีย์บอร์ด

ผลที่ได้สามารถชั่งน้ำหนักได้ 5 กิโลกรัม มีความละเอียดในการอ่านค่าที่ 1 กรัม มีความแม่นยำร้อยละ 70 เต็มพิกัด และมีค่าความซ้ำได้สูงสุด 4 กรัมเต็มพิกัด สามารถใช้งานได้ในช่วง 18-15 องศาเซลเซียสสามารถจําราคาสินค้าได้ 500 รายการกำหนดราคาตั้งแต่ 0.01บาทต่อกิโลกรัมถึง 9999.99 บาทต่อกิโลกรัม งานวิจัยนี้ได้ศึกษา ณ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า และในเนื้อหาได้ระบุถึงพื้นฐานเกี่ยวกับโพลีคาร์บอเนตและรูปแบบการติดตั้งสเตรนเกจไว้ในบทที่ 1 ของวิทยานิพนธ์

เพิ่มศักดิ์ เกตุนาม (2007) ได้ทำวิทยานิพนธ์การวิเคราะห์และออกแบบโพลีคาร์บอเนตโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แต่รูปแบบโพลีคาร์บอเนตและระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์นั้นได้แตกต่างโดยสิ้นเชิง รูปแบบโพลีคาร์บอเนตนั้นได้ใช้วิธีแบบคานโดยโพลีคาร์บอเนตได้ออกแบบหน้าตามาสีแบบไม่เหมือนกัน แต่ใช้วิธีแบบคานเหมือนกัน โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ที่ใช้คือ ANSYS และที่สำคัญวัสดุที่เขาใช้ในการทดสอบคือ อลูมิเนียม (Aluminium)

ผลที่ได้การวิเคราะห์และออกแบบโดยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์กับทั้ง 4 แบบ ที่เขาได้นั้นค่าความเค้น (Stress) และความเครียด (Strain) ที่ได้มีผลใกล้เคียงกับการทดลองจากห้องปฏิบัติการจริงนั้นได้บ่งบอกว่าวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์มีความแม่นยำสูงโปรแกรมสามารถทำนายการเกิดแรงได้ดีโดยไม่ต้องเสียเวลาทำหลายตัวอย่างและนำมาใช้ได้ทันที งานวิจัยนี้ได้ศึกษา ณ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาเทคโนโลยีการผลิตทางอุตสาหกรรม อีกทั้งยังได้เผยแพร่การวิเคราะห์และออกแบบโพลีคาร์บอเนตโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ผ่านนิตยสาร ฉบับที่ 64 เมื่อปี พ.ศ. 2551

สุภกิจ รูปจันทร์ (2547) ได้ศึกษาออกแบบโพลีเซลล์ชนิดคอลัมน์โดยวิธีการทดลองและ
 ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ณ มหาวิทยาลัยขอนแก่น สาขาวิศวกรรมเครื่องกล โดยเขาได้ศึกษา
 วิธีการวิเคราะห์และออกแบบโดยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ของโพลีเซลล์เป็นประเภทคอลัมน์
 (อยู่ในบทที่ 2)แบบมีหลายเสา เพื่อไปใช้ในการรับภาระโดยให้มีสมรรถนะในการรับน้ำหนัก 20 ตัน
 และนอกจากนั้นเขาก็ได้ทำการทดลองจริงจากห้องปฏิบัติการแล้วผลจากการศึกษาที่ได้พบว่าค่าที่
 ออกมาจากทั้งสองวิธีทั้งระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์และวิธีทดลองจากห้องปฏิบัติการจริงมีค่าความ
 เหน็ด (Stress) และความเครียด (Strain) ที่ได้ มีผลใกล้เคียงกับการทดลองจากห้องปฏิบัติการจริงนั้น
 ได้บ่งบอกว่าวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์มีความแม่นยำสูงโปรแกรมสามารถทำนายการเกิดแรงได้ดีโดยไม่
 ต้องเสียเวลาทำหลายตัวอย่างและนำมาใช้ได้ทันที

บทที่ 3

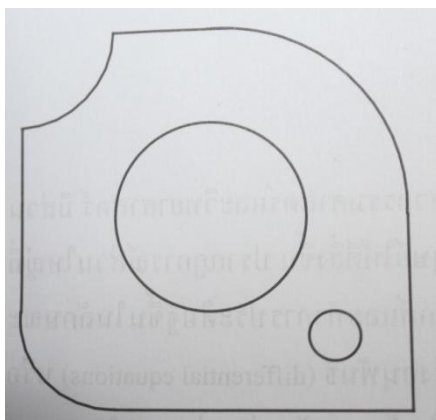
วิธีการศึกษา

3.1ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

3.1.1 บทนำ

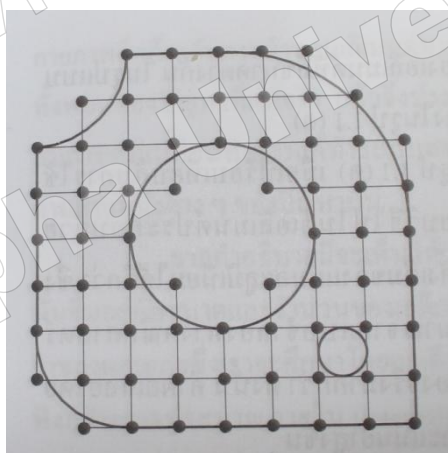
ในความสามารถในการแก้ปัญหาทางวิศวกรรมศาสตร์หรือทางวิทยาศาสตร์นั้นมีส่วนอย่างมากในการสร้างชีวิตของมนุษย์ให้ดีขึ้น ปรากฏการณ์ส่วนใหญ่เกิดขึ้นรอบตัวโดยอธิบายถึงทางหลักการทางวิทยาศาสตร์ได้ซึ่งอาจจะอยู่ในรูปสมการเชิงอนุพันธ์ หรือสมการเชิงอินทิกรัล เป็นต้น สมการเชิงอนุพันธ์จะสามารถประดิษฐ์ขึ้นมาได้ไม่ยากแต่การได้ผลเฉลยที่แม่นยำตรงที่ต้องการและจำเป็นต้องประดิษฐ์ให้ได้รูปทรงที่ดัดนั้นทำได้โดยระเบียบการวิเคราะห์ซึ่งทำได้ยากมากหรืออาจจะไม่ได้เลย ดังนั้นเหตุผลดังกล่าวจึงก่อให้เกิดวิธีการผลเฉลยโดยประมาณเกิดขึ้น ในอดีตวิธีการผลเฉลยโดยประมาณมีหลากหลายแบบ แต่ที่เด่นชัดคือ ระเบียบวิธีผลต่างสลับเนื่อง (Finite difference method)

หลักการที่สำคัญของระเบียบวิธีผลต่างสลับเนื่อง (Finite difference method) คือการหาค่าเฉลยโดยประมาณจากการแปลงสมการเชิงอนุพันธ์ให้อยู่ในรูปแบบสมการผลต่างสลับเนื่องข้อดีของวิธีนี้คือเป็นวิธีที่ง่ายต่อการศึกษาและทำความเข้าใจ รวมไปถึงความสะดวกในการประดิษฐ์ขึ้นเป็นโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ใช้ในการคำนวณแต่ระเบียบวิธีผลต่างสลับเนื่อง (Finite difference method) นั้นมีข้อเสียและข้อผิดพลาดที่มีอยู่หลายประการแต่ที่เป็นปัญหาเด่นชัดที่สุดของระเบียบวิธีผลต่างสลับเนื่อง (Finite difference method) นี้คือ ความไม่สะดวกในการกำหนดขอบเขต (Application of boundary conditions) และที่สำคัญที่สุดคือความยากลำบากในการประยุกต์ระเบียบวิธีผลต่างสลับเนื่อง (Finite difference method) เข้ากับการวิเคราะห์ปัญหาที่มีรูปร่างลักษณะซับซ้อนมากขึ้นซึ่งในปัจจุบันหลีกเลี่ยงไม่ได้เลยว่าการออกแบบผลิตภัณฑ์ให้มีรูปร่างลักษณะซับซ้อนมากยิ่งขึ้นได้กลายเป็นความจำเป็นเพื่อพัฒนาปรับปรุงคุณภาพผลิตภัณฑ์นั้นให้ดีขึ้น



รูปที่ 3.1 แผ่นอลูมิเนียมที่ประกอบด้วยขอบโค้งและขอบตรงรวมทั้งมีรูกลวง 2 ขนาด (จากหนังสือ ไฟไนต์เอลิเมนต์ในงานวิศวกรรม, ปราโมทย์ เดชะอำไพ, 2555)

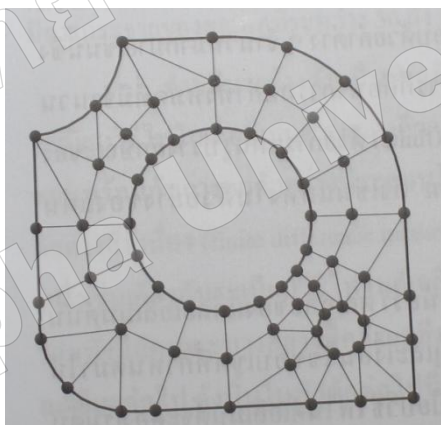
ชิ้นส่วนชิ้นส่วนหนึ่งโดยมีรายละเอียดคือมีความโค้งเว้าและมีวงกลมกลวง 2 วงที่ขนาดแตกต่างกันโดยจะทำการวิเคราะห์ดังภาพต่อไปนี้



รูปที่ 3.2 การวิเคราะห์หาผลเฉลยบนแผ่นอลูมิเนียมด้วยการใช้ระเบียบวิธีผลต่างสืบเนื่อง (จากหนังสือ ไฟไนต์เอลิเมนต์ในงานวิศวกรรม, ปราโมทย์ เดชะอำไพ, 2555)

เมื่อเราจะทำการวิเคราะห์การหาการกระจายของความเค้น (Stress distribution) บนแผ่นตัวอย่างนี้ด้วยวิธีระเบียบวิธีผลต่างสืบเนื่อง (Finite difference method) ดังรูปที่ 3.2 เราพบว่าจากการแบ่งช่องตาราง 4 ช่องต่อกันที่จุดต่อ ซึ่งขนาดขนาดของปัญหาหรือจำนวนตัวไม่รู้ค่า (Number of unknowns) จะขึ้นอยู่กับจำนวนของจุดต่อนี้เองพูดง่าย ๆ ก็คือจำนวนจุดของวิธีนี้ไม่สามารถลงตาม

รอยโค้งเว้าและวงกลมได้และยังทำให้จุดที่เล็กละเอียดออกมาจะเป็นค่าสมการที่เกินจริงและยังทำให้รูปทรงผิดไปอีกด้วย เพราะเหลี่ยมที่เล็กละเอียดออกมาไม่สามารถคำนวณความเป็นจริงของแผ่นตัวอย่างได้ ดังนั้นอุปสรรคและความไม่สะดวกดังกล่าวที่พูดมานั้นมีส่วนที่ก่อให้เกิดระเบียบวิธีการหาผลเฉลยโดยวิธีอีกรูปแบบหนึ่งซึ่งเรียกว่าระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite element method) หรือ FEM ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์นี้สามารถนำมาใช้กับปัญหาที่มีรูปร่างรูปทรงลักษณะซับซ้อนได้เป็นอย่างดี สามารถจำลองรูปร่างลักษณะดั้งเดิมที่แท้จริงได้ใกล้เคียงและเที่ยงตรงกว่าหลักการของระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite element method) นี้ใกล้เคียงกับวิธีผลต่างสืบเนื่อง (Finite difference method) แต่แตกต่างกันตรงที่ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite element method) สามารถแบ่งจุดและเหลี่ยมออกได้โดยไม่ต้องซ้ำกันและไม่จำเป็นต้องขนาดของชิ้นส่วนแต่ละเอลิเมนต์เท่ากัน ดังรูปที่ 3.3 นี้



รูปที่ 3.3 การวิเคราะห์หาผลเฉลยบนแผ่นตัวอย่างโดยวิธีระเบียบไฟไนต์เอลิเมนต์ (จากหนังสือไฟไนต์เอลิเมนต์ในงานวิศวกรรม, ปราโมทย์ เดชะอำไพ, 2555)

ข้อดีอย่างแรกที่เราเห็นได้ชัดเจนจากวิธีระเบียบไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite element method) คือสามารถจำลองรูปของจริงได้ใกล้เคียงกว่ามากไม่ต้องกำหนดขนาดเหลี่ยมต่อจุดให้เท่าๆกันแต่สามารถกำหนดไม่ตามลักษณะของแผ่นตัวอย่าง ดังนั้นค่าเฉลยโดยวิธีระเบียบไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite element method)

3.1.2 ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์(finite element method) คืออะไร

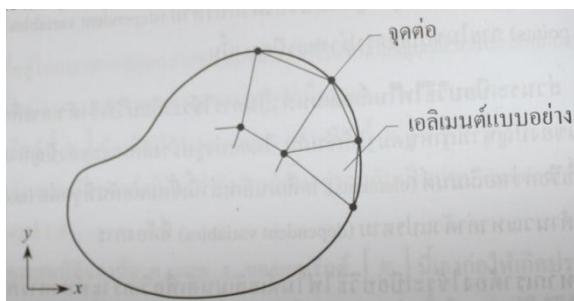
ในการวิเคราะห์ปัญหาใดปัญหานึงนั้น ปัญหานั้นมักประกอบด้วยสมการเชิงอนุพันธ์และเงื่อนไขขอบเขตที่กำหนดให้ผลแม่นยำตรงที่ประดิษฐ์ขึ้นมาได้จะประกอบด้วยค่าของตัวแปรตามของตำแหน่งต่างๆกันบนรูปลักษณะของปัญหานั้น

ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์นี้ยังบ่งชี้เป็นในว่าผลเฉลยของแต่ละเอลิเมนต์นั้นจำเป็นต้องสอดคล้อง (Satisfy) กับสมการเชิงอนุพันธ์และเงื่อนไขขอบเขตที่กำหนดมาให้สำหรับปัญหานั้นๆ ซึ่งหมายความว่าวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จะต้องเริ่มพิจารณาทีละเอลิเมนต์ โดยทำการสร้างสมการสำหรับแต่ละเอลิเมนต์ให้สอดคล้องสมการเชิงอนุพันธ์ของปัญหาที่พิจารณาอยู่นั้นจากนั้นจึงนำสมการของแต่ละเอลิเมนต์มาประกอบเข้าด้วยกันก่อให้เกิดระบบสมการรวม ซึ่งในความหมายทางกายภาพก็คล้ายกับการนำทุกเอลิเมนต์มาประกอบรวมเข้าด้วยกันก่อให้เกิดเป็นรูปร่างลักษณะทั้งหมดของปัญหาที่แท้จริง แล้วจึงประยุกต์เงื่อนไขขอบเขตที่กำหนดมาให้ลงไปในระบบสมการรวมนี้ก่อนทำการแก้ทั้งระบบสมการดังกล่าว เพื่อหาผลเฉลยโดยประมาณที่ต้องการตามตำแหน่งต่างๆของปัญหานั้น

3.1.3 ขั้นตอนทั่วไปของระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ประกอบด้วย 6 ขั้นตอนหลักดังต่อไปนี้

ขั้นตอนที่ 1 การแบ่งขอบเขตรูปของปัญหาออกเป็นเอลิเมนต์ย่อยๆ ดังรูปที่ 3.4 ขอบเขตดังกล่าวอาจเป็นขอบเขตของปัญหาชนิดต่างๆกันเช่น ปัญหาของการไหล ปัญหาที่เกี่ยวกับอุณหภูมิและความร้อน เป็นต้น



รูปที่ 3.4 การแบ่งรูปร่างของปัญหาออกเป็นเอลิเมนต์ย่อยๆแบบต่างๆกัน
(จากหนังสือไฟไนต์เอลิเมนต์ในงานวิศวกรรม, ปราโมทย์ เศษะอำไพ, 2555)

ขั้นตอนที่2การเลือกฟังก์ชันประมาณภายในเอลิเมนต์ (Element interpolation functions) เช่นสมการ เอลิเมนต์สามเหลี่ยมซึ่งเอลิเมนต์นี้ประกอบด้วย 3 จุดต่อที่มีหมายเลข 1,2 และ3 ดังรูปที่ 3.5 โดยที่ จุดต่อเป็นตำแหน่งที่ตั้งของตัวไม่รู้ค่า ซึ่งได้แก่ ϕ_1, ϕ_2 และ ϕ_3 ตามลำดับ ตัวไม่รู้ค่าที่จุดต่ออาจเป็น ค่าของการเสียรูป(Displacement) หากเราวิเคราะห์ปัญหาความยืดหยุ่นในของแข็ง หรืออาจเป็นค่า ของในอุณหภูมิหากเราทำปัญหาเกี่ยวกับการถ่ายเทความร้อน หรืออาจเป็นความเร็วของของไหล เป็นต้น ลักษณะการกระจายของตัวไม่รู้ค่าบนเอลิเมนต์นี้สามารถเขียนได้ให้อยู่ในรูปแบบของ ฟังก์ชันการประมาณภายในและตัวไม่รู้ค่าที่จุดต่อได้ ดังรูปที่ 3.5

$$\phi(x, y) = N_1(x, y)\phi_1 + N_2(x, y)\phi_2 + N_3(x, y)\phi_3$$

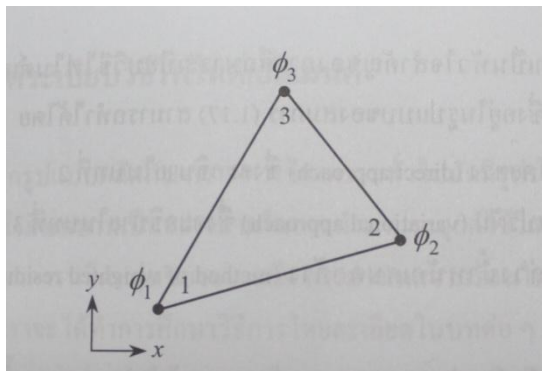
สมการฟังก์ชันการประมาณภายในและตัวไม่รู้ค่าที่จุดต่อ

จากสมการฟังก์ชันการประมาณภายในและตัวไม่รู้ค่าที่จุดต่อโดย $N_i(x, y)$, $i = 1, 2, 3$ แทน ฟังก์ชันประมาณภายในเอลิเมนต์โดยมีตัวไม่รู้ค่าอยู่ ณ ตำแหน่งจุด

$$\phi(x, y) = [N_1 N_2 N_3] \begin{Bmatrix} \phi_1 \\ \phi_2 \\ \phi_3 \end{Bmatrix}$$

$$\phi(x, y) = [N]_{(1 \times 3)} \{\phi\}_{(3 \times 1)}$$

โดย $[N]$ แทนเมทริกซ์ฟังก์ชันการประมาณภายในเอลิเมนต์ และ $\{\phi\}$ แทนเวกเตอร์เมทริกซ์ที่ประกอบด้วยตัวไม่รู้ค่าที่จุดต่อของเอลิเมนต์นั้น ในตำราเล่มนี้ สัญลักษณ์ $\sqcup$ แสดงถึงเมทริกซ์แนวอน และ $\{\}$ แสดงถึงเมทริกซ์แนวตั้งที่เรียกว่าเวกเตอร์



รูปที่ 3.5 เอลิเมนต์สามเหลี่ยมแบบอย่างประกอบด้วยสามจุดต่อ(จากหนังสือไฟไนต์เอลิเมนต์ในงานวิศวกรรม, ปราโมทย์ เดชะอำไพ, 2555)

ขั้นตอนที่ 3การสร้างสมการของเอลิเมนต์ ดังตัวอย่างเช่น สมการของเอลิเมนต์สามเหลี่ยมแบบอย่างดังสมการเมทริกซ์จะอยู่ในรูปแบบดังต่อไปนี้

$$\begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} & k_{13} \\ k_{21} & k_{22} & k_{23} \\ k_{31} & k_{32} & k_{33} \end{bmatrix}_e \begin{Bmatrix} \phi_1 \\ \phi_2 \\ \phi_3 \end{Bmatrix}_e = \begin{Bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \end{Bmatrix}_e$$

จากรูปแบบเมทริกซ์ข้างต้นซึ่งเราจะเขียนย่อๆได้เป็น

$$[K]_e \{\phi\}_e = \{F\}_e$$

ขั้นตอนที่ 4ถือว่าเป็นหัวใจสำคัญของการศึกษาระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ การสร้างสมการของเอลิเมนต์ซึ่งอยู่ในรูปแบบของสมการข้างต้นสามารถทำได้โดยวิธีการโดยตรง (Direct approach) วิธีการแปรผัน (Variational approach) หรือวิธีถ่วงน้ำหนักเศษตกค้าง (Method of weighted residuals) จากสมการของแต่ละเอลิเมนต์ที่ได้มาประกอบรวมกันเข้า ก่อให้เกิดระบบสมการรวม ในรูปแบบดังนี้

$$\sum (\text{element equations}) \Rightarrow [K]_{\text{sys}} \{\phi\}_{\text{sys}} = \{F\}_{\text{sys}}$$

ขั้นตอนที่ 5ทำการประยุกต์เครื่องหมายขอบเขต (Boundary conditions) ลงในระบบสมการรวมข้างต้นแล้วจึงแก้ระบบสมการนี้เพื่อหา $\{\phi\}_{\text{sys}}$ อันประกอบด้วยตัวไม่รู้ค่าที่จุดต่อ (nodal unknown)

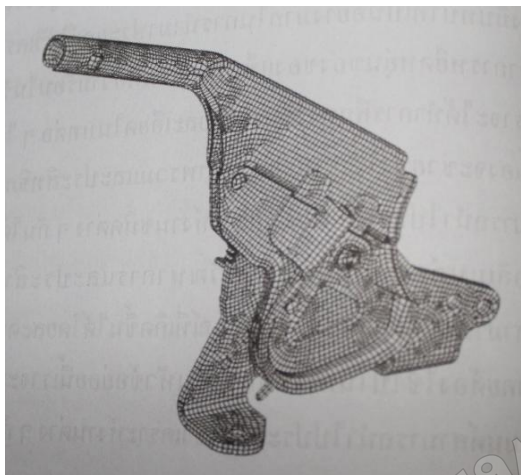
ซึ่งอาจเป็นค่าของการเคลื่อนตัวตามจุดต่างๆ ของโครงสร้าง หรือเป็นค่าของอุณหภูมิที่จุดต่อ หากเป็นปัญหาเกี่ยวกับการถ่ายเทความร้อนหรืออาจเป็นค่าของความเร็วของของไหลตามจุดต่อ เป็นต้น

ขั้นตอนที่ 6 เมื่อคำนวณค่าต่างๆ ที่จุดต่อออกมาได้แล้วก็สามารถนำมาใช้เพื่อหาค่าอื่นๆ ที่ต้องการต่อไปได้อีกเช่น เมื่อรู้ค่าการเสียรูป ตามจุดต่อต่างๆ ของโครงสร้างก็สามารถนำไปหาค่าความเครียด (Strain) และความเค้น (Stress) ได้ตามลำดับ หรือเมื่อรู้ค่าอุณหภูมิที่จุดต่อก็สามารถคำนวณหาปริมาณการถ่ายเทความร้อนได้ เป็นต้นจากขั้นตอนทั้ง 6 ขั้นตอนนี้จะเห็นได้ว่าระเบียบไฟไนต์เอลิเมนต์นี้เป็นระเบียบวิธีที่มีระเบียบแบบแผนอย่างเป็นขั้นตอน โดยมีหัวใจสำคัญอยู่ที่การสร้างสมการเอลิเมนต์ทั้ง 3 วิธีในขั้นตอนที่ 3 คือ วิธีการโดยตรง (Direct approach) วิธีการแปรผัน (Variational approach) หรือวิธีถ่วงน้ำหนักเศษตกค้าง (Method of weighted residuals)

3.1.4 การประยุกต์ระเบียบไฟไนต์เอลิเมนต์

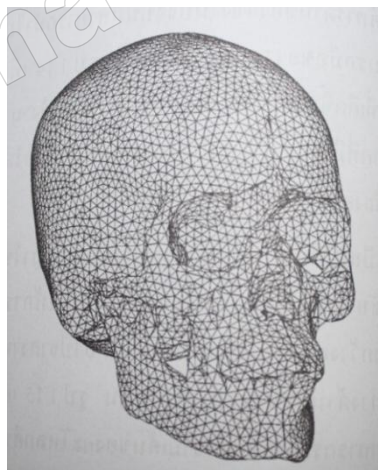
เนื่องจากรูปแบบผลิตภัณฑ์งานทางวิศวกรรมทั่วไปมักมีรูปร่างซับซ้อน ระเบียบไฟไนต์เอลิเมนต์จึงมีบทบาทเป็นอย่างมากในการนำมาประยุกต์ใช้วิเคราะห์ปัญหาต่างๆ ในปัจจุบัน เช่น ปัญหาการถ่ายเทความร้อนในวัตถุและการใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้ควบคู่กับคอมพิวเตอร์ทำให้เราสามารถคำนวณหาปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นได้โดยสะดวก และในขณะเดียวกันสามารถช่วยลดค่าใช้จ่ายที่เคยใช้ในการทดลองจริง

การวิเคราะห์ปัญหาคับระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ในยุคแรกเริ่มจากงานทางด้านกลศาสตร์ของแข็ง (Solid mechanics) และโครงสร้างเป็นส่วนใหญ่ เนื่องจากปรากฏการณ์ต่างๆ ที่เกิดขึ้นในงานทางด้านนี้สามารถทำความเข้าใจได้โดยไม่ยาก วิวัฒนาการระเบียบไฟไนต์เอลิเมนต์ในทางด้านของแข็งสามารถนำไปใช้ออกแบบชิ้นงานที่มีรูปร่างซับซ้อนได้เช่น ก้านเบรกมือ (ดังรูปที่ 3.12)



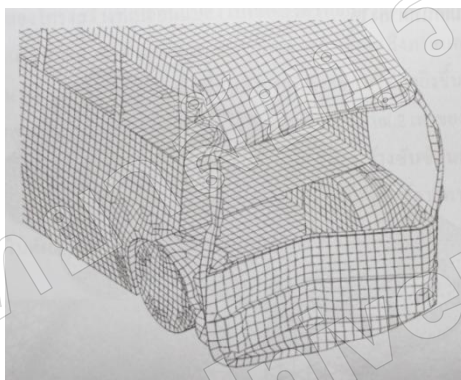
รูปที่ 3.6 รูปแบบจำลองวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ก้านเบรกมือ (จากหนังสือไฟไนต์เอลิเมนต์ในงานวิศวกรรม, ปราโมทย์ เดชะอำไพ, 2555)

เนื่องจากกระเปียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สามารถนำมาใช้แก้สมการเชิงอนุพันธ์สำหรับปัญหาที่มีรูปร่างซับซ้อนได้อย่างมีประสิทธิภาพ ทำให้การประยุกต์ใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์นี้ขยายวงกว้างออกไปนอกเหนือจากทางวิศวกรรม เช่นการใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์กับงานทางด้านการแพทย์ดังรูปที่ 3.7 เป็นต้น



รูปที่ 3.7 รูปแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับกะโหลกศีรษะ (จากหนังสือไฟไนต์เอลิเมนต์ในงานวิศวกรรม, ปราโมทย์ เดชะอำไพ, 2555)

แม้แต่การวิเคราะห์ยานพาหนะก็ยังใช้ระเบียบไฟไนต์เอลิเมนต์และมีส่วนสำคัญอย่างมาก ต่ออุตสาหกรรมรถยนต์เพราะเพื่อให้รถยนต์มีประสิทธิภาพที่จะก่อให้เกิดความปลอดภัยสูงสุด ในขณะเดียวกันก็ยังลดภาระค่าใช้จ่ายในการทดลองด้วยดังรูปที่ 3.14 แสดงการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของรถบัสที่ถูกชนตรงด้านหน้าซ้ายของรถ การออกแบบด้วยการทดลองเพื่อให้ทราบถึงปรากฏการณ์จะสิ้นเปลืองอย่างมากทั้งเวลาและค่าใช้จ่ายเมื่อเทียบกับการวิเคราะห์และออกแบบ ด้วยวิธีคำนวณจากระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ และที่สำคัญมันยังสามารถเปลี่ยนแปลงการออกแบบรูปทรงลักษณะที่ดีผ่านทางระเบียบไฟไนต์เอลิเมนต์ก่อนสร้างขึ้นจริง



รูปที่ 3.8 การประยุกต์ระเบียบไฟไนต์เอลิเมนต์ในการยุดตัวของรถบัส (จากหนังสือไฟไนต์เอลิเมนต์ในงานวิศวกรรม, ปราโมทย์ เดชะอำไพ, 2555)

ในปัจจุบัน การพัฒนาระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ยังคงรุดหน้าไปอย่างต่อเนื่อง เนื่องจากระเบียบวิธีนี้สามารถนำไปวิเคราะห์ปัญหาต่างๆ กันได้อย่างมีประสิทธิภาพระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ได้ถูกนำไปใช้ประยุกต์กับงานในหลายๆแขนง โดยเฉพาะ ทางด้านวิศวกรรม เช่น การเลื่อยรูปไปจากเดิมของโพลีคาร์บอเนตในเครื่อง Compression machine ที่จำเป็นต้องออกแบบในส่วนที่ถูกความร้อนมากกระทำมากทำให้เกิดอายุการใช้งานที่ยืนยาวและการเลื่อยรูปให้น้อยที่สุดโดยผ่านระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ก็ได้ เป็นต้น

3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษา

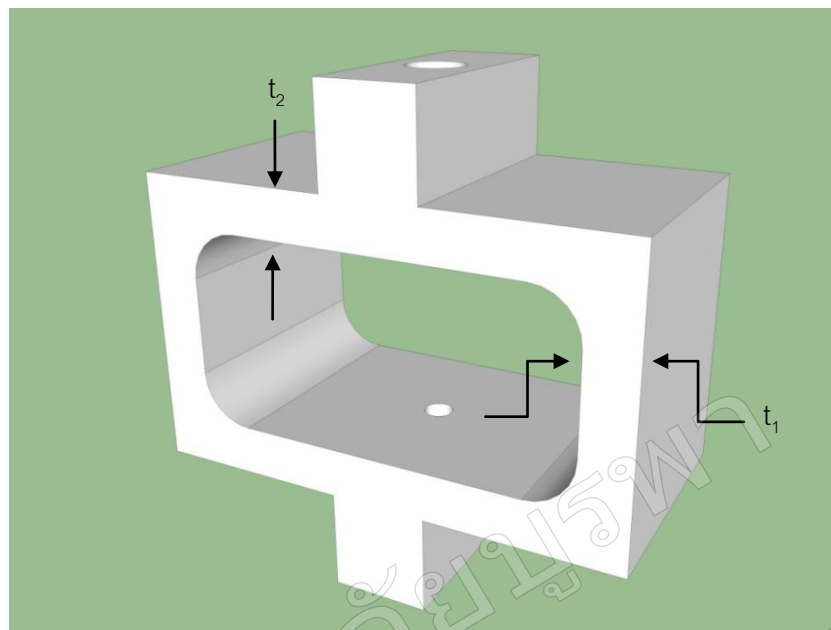
การออกแบบโหลดเซลล์เพื่อนำมาศึกษาและทดสอบนั้นเราได้ใช้รูปร่างลักษณะของโหลดเซลล์ที่เป็นรูป เป็นกล่องซึ่งจะนำมาทดแทนตัว Proving ring ที่มีลักษณะเป็น วงแหวน ในเครื่อง Mashall machine ซึ่งอุปกรณ์ทั้งหมดมีดังนี้

- เครื่องคอมพิวเตอร์
- โปรแกรม ABAQUS
- สเตรนเกจ (Strain gauge)
- เครื่องวัดโวลต์มิเตอร์
- Multifunction Data Acquisition (DAQ) รุ่น NI USB-6008
- โปรแกรม NI MAX
- คຸ້ມນ້ຳໜັກຕາມมาตรฐานของชั่งตวงวัด

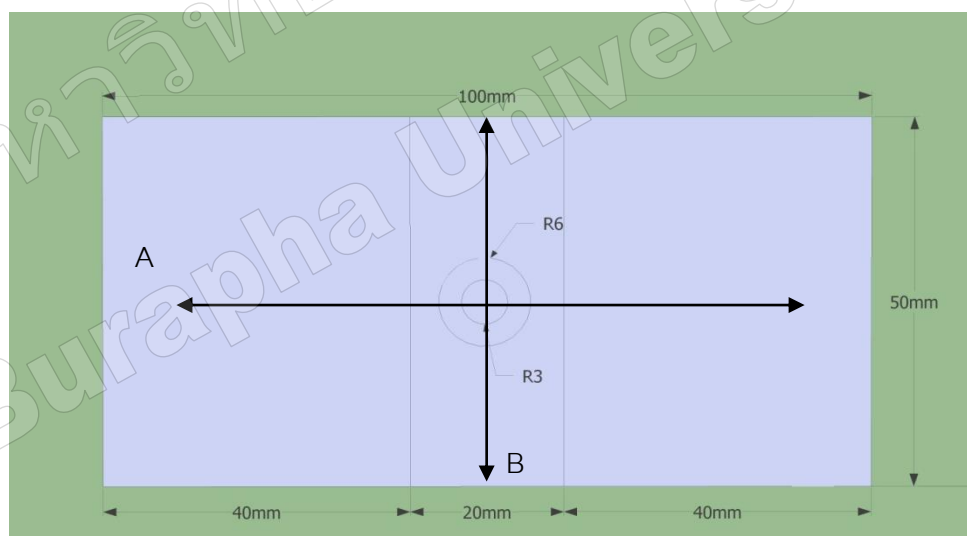
3.3 รูปแบบและการวิเคราะห์ขนาด

การเลือกชนิดโหลดเซลล์ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษารูปแบบโหลดเซลล์แบบรูปทรงคล้ายกล่องสี่เหลี่ยมแต่ใช้หลักการ การเสียบด้วยแรงดึงและแรงอัดแบบคาน (Beam) มาเป็นส่วนช่วยในการวิเคราะห์

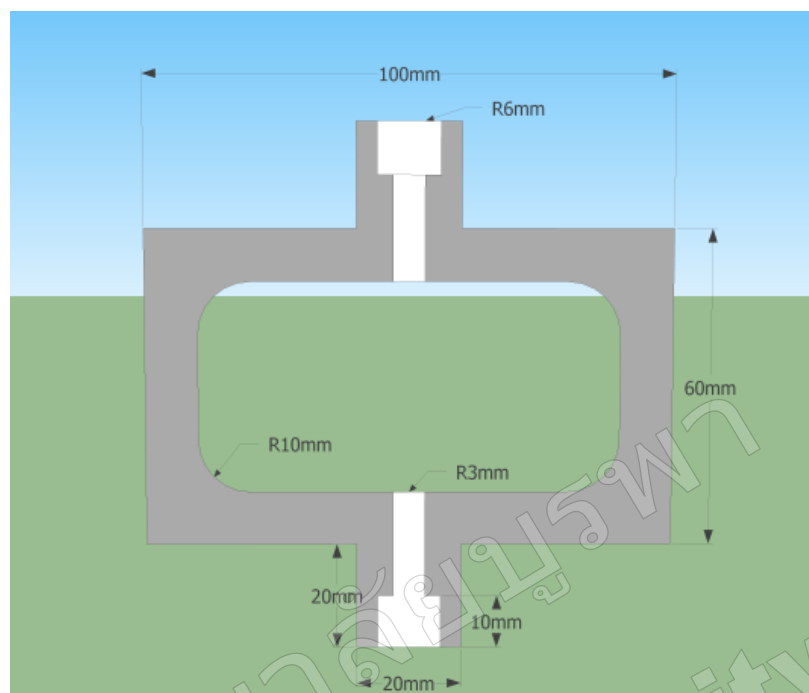
ดังรูปที่ 3.12 ถึง 3.15 โดยจากรูปแบบเดียวกันทั้ง 4 ตัวอย่างจะรับน้ำหนักที่ไม่เท่ากันและทำให้ปริมาตรหน้าตัด (t_2) จะเปลี่ยนไปตามขนาดของแรงสูงสุดที่ได้กำหนดไว้ โดยการ ออกแบบนั้นจะให้หน้าตัด $t_2 < t_1$ เสมอ โดยหน้าตัด t_1 จะเปรียบเสมือนเป็นเสาของโครงสร้าง และหน้าตัด t_2 จะเปรียบเสมือนเป็นคานของโครงสร้าง โดยรูปแบบตามลักษณะ มิติความยาว ของโหลดเซลล์ จะแสดงดังภาพดังต่อไปนี้



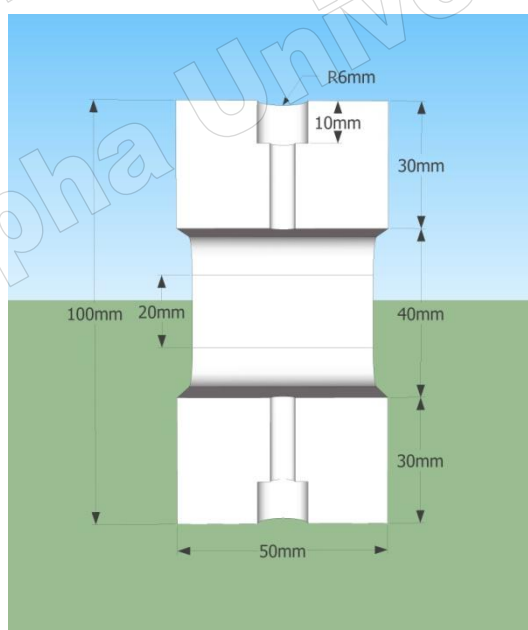
รูปที่ 3.9 โหลดเซลล์แบบสามมิติ



รูปที่ 3.10 โหลดเซลล์แบบสองมิติ (Top view)



รูปที่ 3.11 โหลดเซลล์แบบสองมิติ (Section A)



รูปที่ 3.12 โหลดเซลล์แบบสองมิติ (Section B)

โดยโหลดเซลล์ในงานวิจัยนี้จะมีทั้งหมด 4 ตัวอย่างในรูปแบบเดียวกัน แบ่งตามความสามารถในการรับน้ำหนักสูงสุด โดยสี่ตัวอย่างนี้ จะออกแบบการรับแรง สูงสุดไว้ที่ 5kN, 10kN, 20kN, และ 50kN ซึ่งทั้ง 4 ตัวอย่างที่ได้ออกแบบจะแตกต่างกันตรงที่หน้าตัด t_2 โดยจะเปลี่ยนขนาดความหนาให้

เหมาะสมไปตามกำลังที่รับได้ เช่น โหลดเซลล์ที่รับแรง 5kN ก็มี t_2 น้อยกว่าตัวโหลดเซลล์ที่รับแรง 10kN แต่ต้องอยู่ในช่วง $0 < t_2 < t_1$

3.4 คุณสมบัติและการเลือกใช้วัสดุ

วัสดุที่เราเลือกใช้นั้นเป็นวัสดุจากทองเหลือง (Brass) ซึ่งมีคุณสมบัติทางกลดังตารางที่ 3.4 เพราะทองเหลืองมีน้ำหนักปานกลางแต่ขึ้นรูปได้ง่ายอีกทั้งคุณสมบัติทางกลถือว่าอยู่ในเกณฑ์ปานกลางหากเทียบกับอลูมิเนียม (Aluminium) ที่มีคุณสมบัติทางกลต่ำแต่ขึ้นรูปง่ายและสแตนเลส (Stainless) มีคุณสมบัติทางกลสูงแต่ขึ้นรูปยากดังนั้นการใช้ทองเหลืองจึงเป็นวัสดุที่เหมาะสมสำหรับการนำมาใช้ขึ้นรูปโหลดเซลล์ได้ดีที่สุดถึงแม้ว่าเหล็กกล้าจะมีคุณสมบัติใกล้เคียงกับทองเหลืองแต่เหล็กกล้าขึ้นสนิมได้ง่ายเลยทำให้ไม่เป็นที่นิยมนักในการนำมาทำโหลดเซลล์ ดังตารางเปรียบเทียบคุณสมบัติทางกลของแต่ละโลหะมีดังนี้

Density	2.66×10^{-6}
Poisson's Ratio	0.33
Elastic Modulus	71 GPa
Tensile strength	305 MPa
Yield strength	195 MPa

ตารางที่ 3.1 คุณสมบัติทางกลของอลูมิเนียม (Aluminium)

Density	7.85×10^{-6}
Poisson's Ratio	0.3
Elastic Modulus	200 GPa
Tensile strength	460 MPa
Yield strength	250 MPa

ตารางที่ 3.2 คุณสมบัติทางกลของเหล็กกล้า (Iron)

Density	7.98×10^{-6}
Poisson's Ratio	0.28
Elastic Modulus	193 GPa
Tensile strength	620 MPa
Yield strength	240 MPa

ตารางที่ 3.3 คุณสมบัติทางกลของสแตนเลส(Stainless)

Density	8.6×10^{-6}
Poisson's Ratio	0.34
Elastic Modulus	97 GPa
Tensile strength	335 MPa
Yield strength	193 MPa

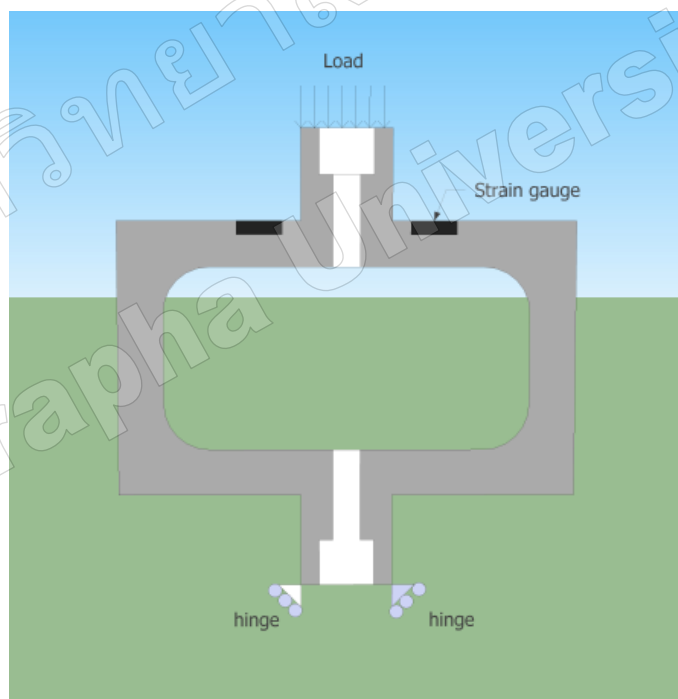
ตารางที่ 3.4 คุณสมบัติทางกลของทองเหลือง(Brass)

จากตารางทั้งตารางที่ 3.1, ตารางที่ 3.2, ตารางที่ 3.3 และตารางที่ 3.4 เราพบว่าค่าคุณสมบัติทางกล Tensile strength ของสแตนเลส นั้นมีค่าสูงสุดและเช่นกันค่า Yield strength ของสแตนเลสก็มากขึ้นด้วยเช่นกัน แต่เนื่องจากสแตนเลสมีราคาแพงและขึ้นรูปได้ยาก ในการศึกษาครั้งนี้ จึงไม่นำสแตนเลส มาใช้ในการศึกษา

ต่อมาค่าคุณสมบัติทางกลของอลูมิเนียมพบว่า Tensile strength มีมากแต่ Yield strength มีน้อยนั้นหมายความว่ามีความเหนียวต่ำกว่าโลหะทุกตัว ที่กล่าวมา ส่วนการใช้โลหะเหล็กก็มีความเสี่ยงต่อการเกิดสนิมมากและคุณสมบัติทางกลอลูมิเนียมที่มีทั้ง Tensile strength และ Yield strength ต่ำด้วยกันทั้งคู่ เมื่อเทียบกับโลหะอื่นๆ ที่กล่าวมา ดังนั้น ในการศึกษาครั้งนี้จึงไม่นำอลูมิเนียมมาใช้ในการศึกษา และเมื่อมาพิจารณาค่าคุณสมบัติทางกลของ ทองเหลืองถึงจะมีค่า Yield strength และ Tensile strength ต่ำกว่าสแตนเลสแต่ด้วยมีกรรมวิธีขึ้นรูปที่ยากกว่าสแตนเลสและค่าแรงในการขึ้นรูปที่ต่ำกว่า อีกทั้งข้อดีของทองเหลืองนั้นก็มีอายุการใช้งานที่ยืนยาวมากกว่าโลหะทุกตัว ที่กล่าวมาและไม่เกิดสนิม ดังนั้นทองเหลืองจึงจะถูกนำมาใช้ในการศึกษาครั้งนี้

3.5 การวิเคราะห์โดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

การศึกษานี้จะใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เข้ามาหาตำแหน่งที่เกิดค่าความเค้นและความเครียดสูงสุดในตัวโหลดเซลล์ และจะนำเอาตำแหน่งดังกล่าวมาใช้เป็นตำแหน่งอ้างอิงเพื่อที่จะทำการติดตั้ง สเตรนเกจ นอกจากนี้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ยังสามารถนำมาออกแบบขนาดความหนา t_2 ที่เหมาะสมซึ่งจะไม่ทำให้ชิ้นส่วนใดๆ ในตัวโหลดเซลล์นั้นเกิดค่าความเค้นที่เกินกว่าจุดคลาก (Yield stress) ของวัสดุเมื่อมีแรงกดทับสูงสุดที่ตัวโหลดเซลล์จะรับได้มากระทำ ซึ่งถ้าหากว่า ชิ้นส่วนใดๆ ในตัวโหลดเซลล์นั้นเกิดค่าความเค้นที่เกินกว่าจุดคลาก ชิ้นส่วนนั้นก็จะเกิดการเสียรูปแบบถาวรและสูญเสียคุณสมบัติทางกลของวัสดุนั้นด้วย ทำให้โหลดเซลล์นั้นเกิดการชำรุดเสียหายหรืออาจจะต้องนำมาหาค่าสัมประสิทธิ์ของโหลดเซลล์ใหม่



รูปที่ 3.13 การวิเคราะห์ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ของโหลดเซลล์

ซึ่งการวิเคราะห์ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ทำได้โดยการวาดรูปของโหลดเซลล์ในแบบสามมิติ เข้าไปในโปรแกรมดังรูปที่ 3.13 การวิเคราะห์ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ของโหลดเซลล์ซึ่งจะมีการกำหนดแรงสูงสุดไว้ด้านบนของตัวโหลดเซลล์ส่วนด้านล่างของตัวโหลดเซลล์นั้นจะกำหนดให้เป็นจุดรองรับกับ Hinge

บทที่ 4

การทดลองและวิเคราะห์ผล

4.1 บทนำ

ในบทนี้จะกล่าวถึงขั้นตอนการดำเนินการทำการทดลอง แนวคิดของการออกแบบ และการวิเคราะห์ผลโดยหลักการแนวคิดในการออกแบบรูปแบบของโหลดเซลล์นั้นได้ประยุคมาจากพฤติกรรมการเสีรูปของคาน (Beam) ที่จะเกิดความเค้นดิ่งที่ด้านล่าง และความเค้นอัดจะเกิดขึ้นด้านบน ซึ่งในการวิเคราะห์พฤติกรรมการเสีรูปของโหลดเซลล์นั้นจะใช้ระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์โดยใช้โปรแกรมอาบาคัส (Abaqus) เข้ามาช่วยในการวิเคราะห์ ทั้งนี้เพื่อหาดำแหน่งที่เกิดค่าความเค้นสูงสุดในโหลดเซลล์แล้วใช้ตำแหน่งดังกล่าวในการติดตั้งสเตรนเกจ (Strain gauge) และเพื่อทำการวิเคราะห์ค่าความเค้นและความเครียดในชิ้นส่วนของตัวโหลดเซลล์หลังจากได้รับแรงกระทำสูงสุดแล้วค่าความเค้นและความเครียดสูงสุดต้องไม่เกิดค่าที่กำหนดของทั้งตัวสเตรนเกจ (Strain gauge) และวัสดุที่นำมาใช้ทำโหลดเซลล์ซึ่งในเบื้องต้นนั้นจะทำการออกแบบและประดิษฐ์โหลดเซลล์ต้นแบบที่มีความสามารถในการรับน้ำหนักที่ 5 kN จากผลการทดสอบประสิทธิภาพของโหลดเซลล์ในรูปแบบแรกนั้นพบว่าเกิดปัญหาในขั้นตอนการออกแบบในเรื่องของการประเมินความเค้นสูงสุดที่ยอมให้เกิดขึ้นได้ของตัวสเตรนเกจ รูปแบบของโหลดเซลล์ และปัญหาของวัสดุที่นำมาใช้ จึงได้มีการปรับปรุงประสิทธิภาพของตัวโหลดเซลล์ใหม่

จากการทดสอบประสิทธิภาพของโหลดเซลล์หลังจากที่ได้รับการปรับปรุงพบว่าประสิทธิภาพและความละเอียดสูงขึ้นกว่าแบบแรกมาก และจากการสอบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกดทับกับแรงดันไฟฟ้าที่ออกมาพบว่ามีความสัมพันธ์เป็นแบบเส้นตรงที่มีค่า R-Square สูงถึง 0.99 แต่จะมีปัญหาในเรื่องของสัญญาณรบกวนซึ่งสามารถปรับปรุงโดยใช้ตัวกรองสัญญาณรบกวนซึ่งจะได้นำมาใช้พัฒนาปรับปรุงต่อไป ทั้งนี้ได้ทำการออกแบบโหลดเซลล์ขนาดต่างๆที่มีความสามารถในการรับน้ำหนักที่ 3kN, 5kN, 7.5kN, 10kN, 15kN และ 20kN เพื่อเป็นแนวทางในการนำมาใช้ให้เหมาะสมกับลักษณะของงาน

4.2 การวิเคราะห์พฤติกรรมการเสียรูปด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

4.2.1 ขั้นตอนการวิเคราะห์การเสียรูปด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

การใช้โปรแกรมอาบาคัส (Abaqus) วิเคราะห์โหนดเซลล์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ทำการวิเคราะห์จากโปรแกรมให้เหมือนดังรูปที่ 3.11 ดังขั้นตอนต่อไปนี้



รูปที่ 4.1 โปรแกรม Abaqus

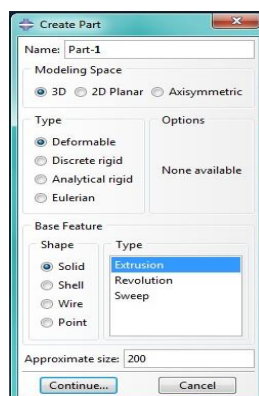
1) ทำการสร้างParts โดยกดเมาส์สองครั้ง Parts



รูปที่ 4.2 Parts

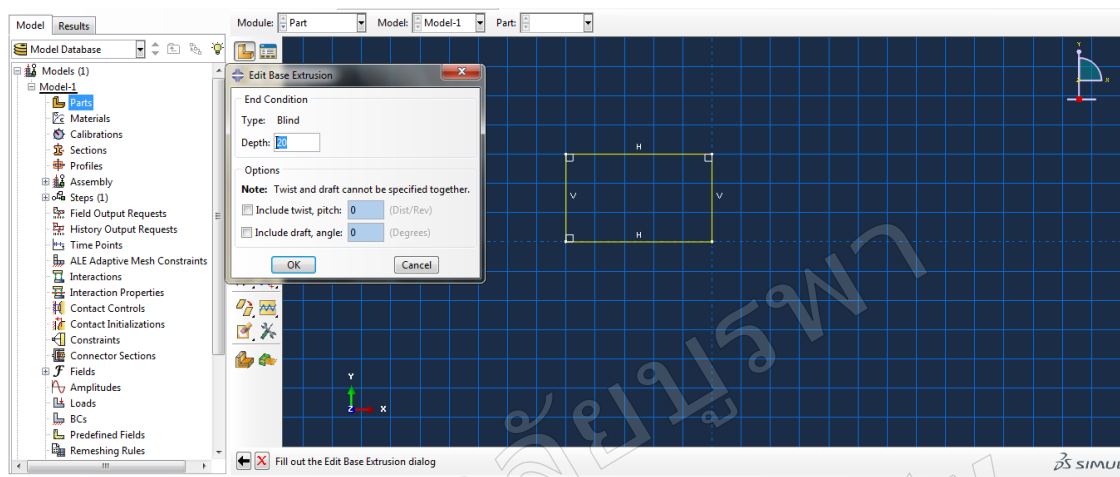
2) เมื่อมีหน้าต่างขึ้นมาให้ตั้งชื่อและเลือกเครื่องหมายตามที่กำหนดไว้ดังรูปที่ 4.2 และกด

Continue.



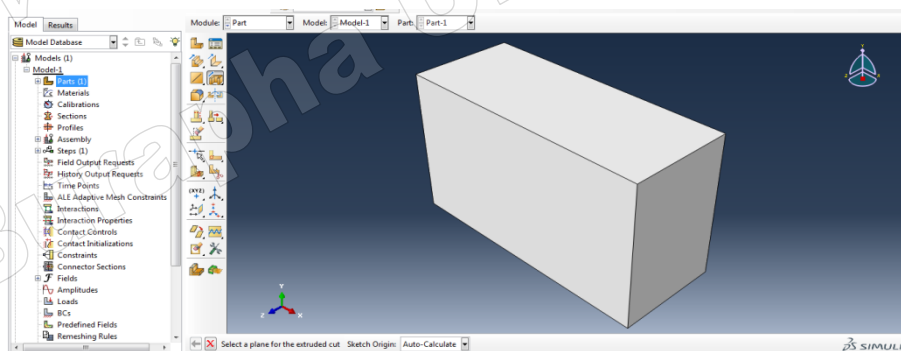
รูปที่ 4.3 Create Parts

3) จากนั้นทำการสร้างรูปเป็นสี่เหลี่ยมด้านหน้าขึ้นมาตามระยะที่กำหนดในรูปที่ 3.11 และเมื่อวาดเสร็จให้กดปุ่ม Esc จากนั้นกด Done และโปรแกรมจะแสดงหน้าต่างขึ้นมาให้เลือกความหนาของตัวอย่าง (Depth) ให้เลือกความหนาตามกำหนดรูปที่ 3.11 จากนั้นกด OK



รูปที่ 4.4 Edit Depths

4) และจะได้ภาพสามมิติเป็นกล่องสี่เหลี่ยมและขั้นตอนต่อมาคือการเจาะกล่องให้เลือกโดยเลือกเมนู Create cut : Extrude

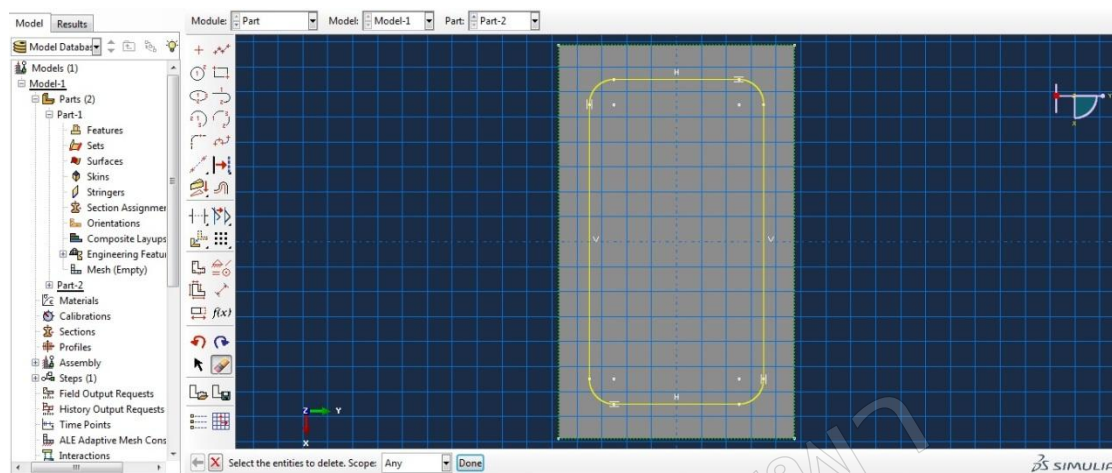


รูปที่ 4.5 Parts 3D



รูปที่ 4.6 Create cut : Extrude

5) เลือกผิวตัวอย่างที่จะทำการเจาะและเลือกขอบเขตเจาะโดยใช้ Create Line : Connect และเมื่อเสร็จขั้นตอนให้กด Esc และกด Done

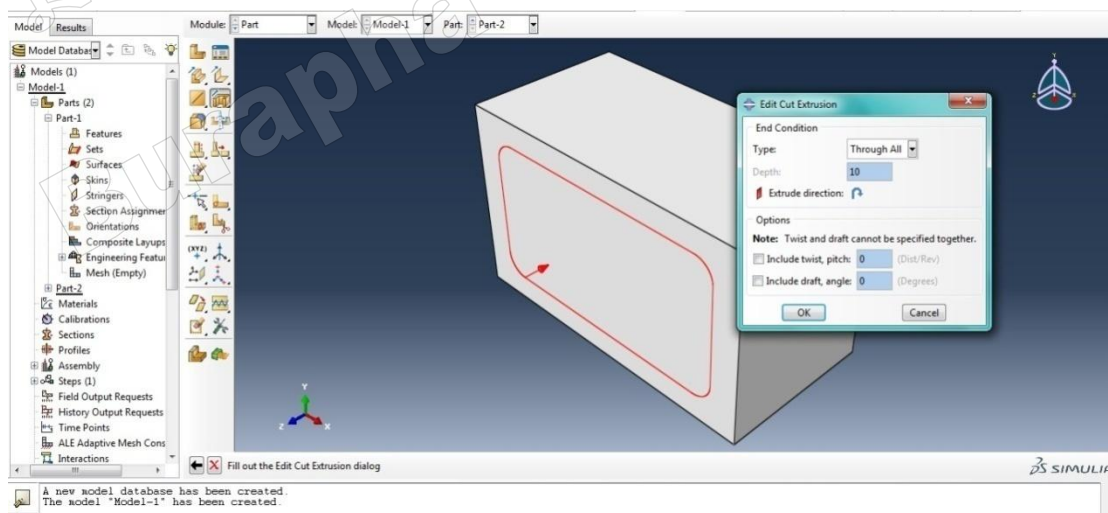


รูปที่ 4.7 ขอบเขตการเจาะ



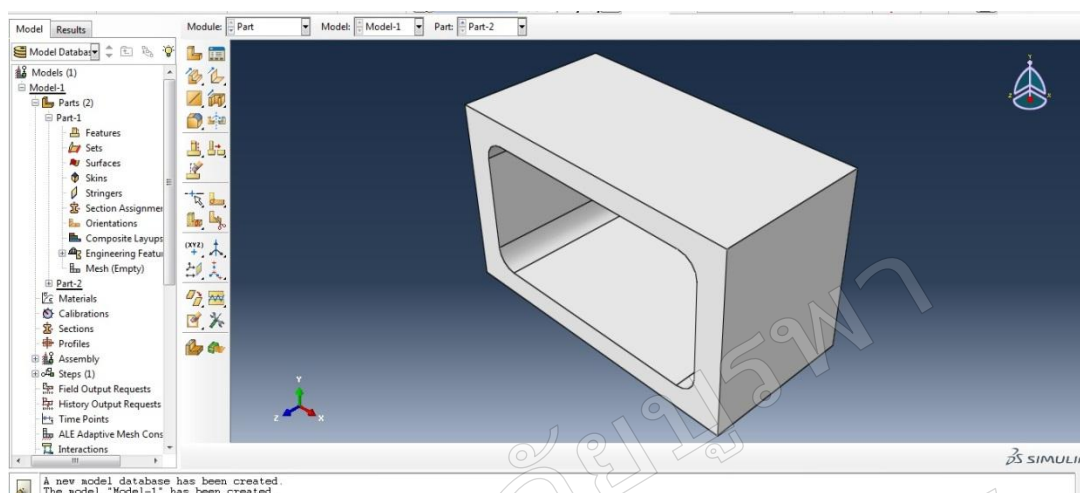
รูปที่ 4.8 Create Line : Connect

6) โปรแกรมจะขึ้นหน้าต่าง End Condition เพื่อถามว่าเราต้องการเจาะแบบให้เลือกตำแหน่ง Type และเลือก Through All และจากนั้นกด OK



รูปที่ 4.9 End Condition

7) โปรแกรมจะทำการเจาะสี่เหลี่ยมออกทั้งหมดและขั้นต่อมาคือการสร้างชิ้นส่วนด้านบนและด้านล่างให้เลือก Create Solid : Extrude

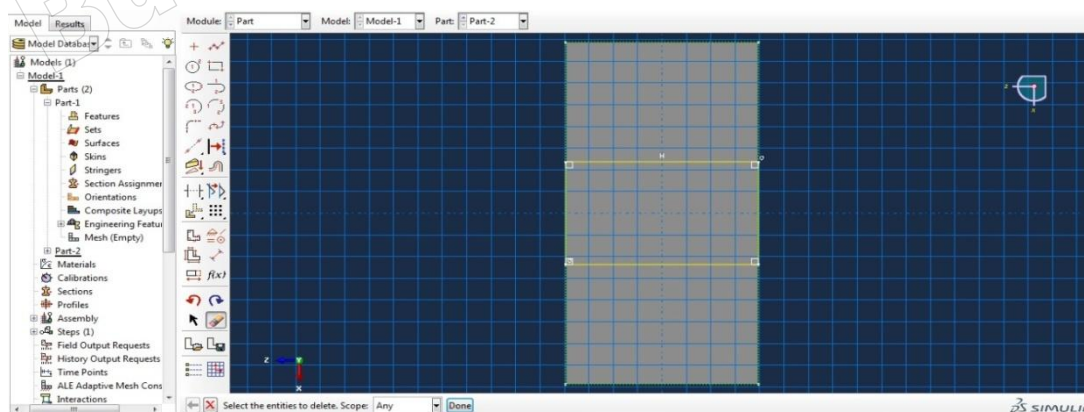


รูปที่ 4.10 เจาะกล่องทั้งหมด



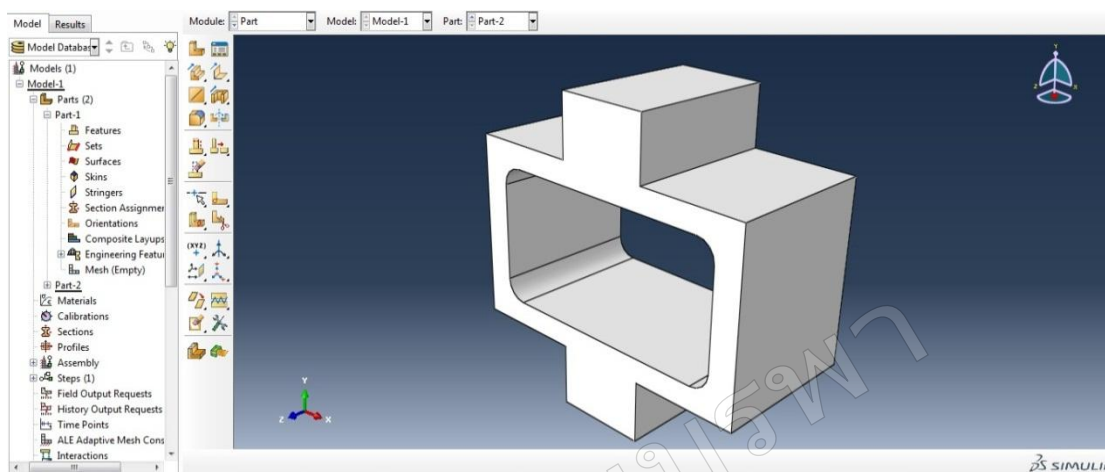
รูปที่ 4.11 Create Solid : Extrude

8) ให้ทำการเลือกผิวหน้าบนสุดของตัวอย่างและทำการวางขอบเขตของชิ้นส่วนเพื่อที่สร้างชิ้นส่วนรับแรงและจากนั้นกด Esc และกด Done



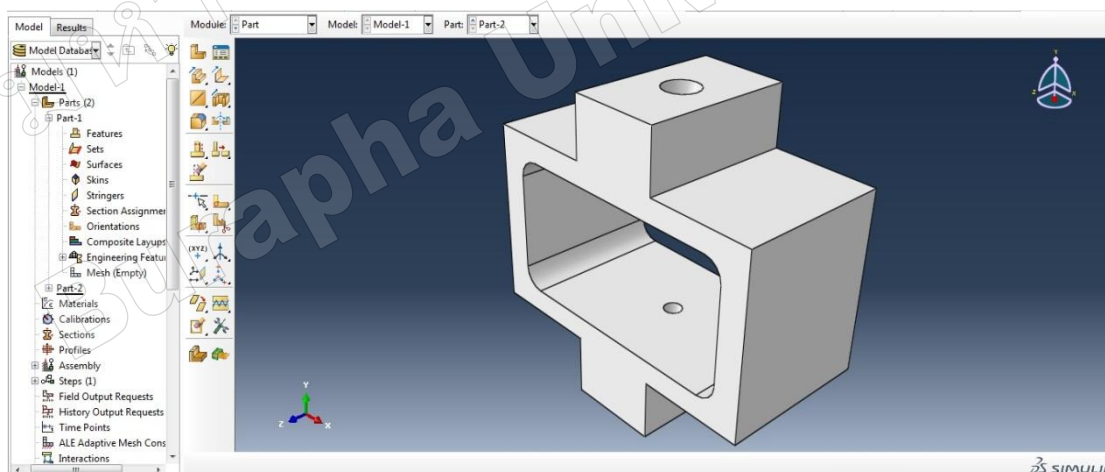
รูปที่ 4.12 Create Solid : Extrude

9) โดยทำอย่างเดิมตั้งแต่ข้อ5) อีกครั้งของผิวด้านล่างตัวอย่างจะได้รูปแบบออกมา



รูปที่ 4.13 ตัวอย่างชิ้นงานจากการใช้ Create Solid : Extrude

10) ทำการเจาะรูด้านบนของตัวอย่างเป็นวงกลมเพื่อเป็นลักษณะScrewยึดโหลดเซลล์โดย
ทำวิธีดังข้อที่ 5) ถึง 9) และใช้เครื่องมือ Create Circle ในการเจาะ

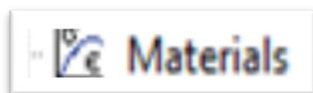


รูปที่ 4.14 เจาะรูโดย Create Circle

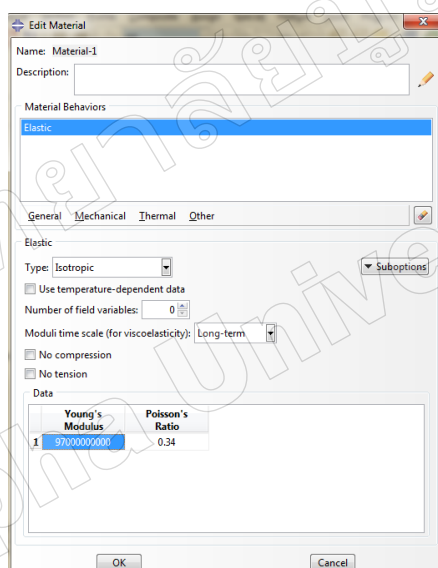


รูปที่ 4.15 Create Circle

11) ขั้นตอนต่อไปเลือก Materials จากหน้าต่างด้านซ้ายมือเมื่อกดคลิกเสร็จจะมีหน้าต่าง Edit Materials ให้ทำการเลือก Mechanical => Elastic => Elastic จากนั้นจะมีช่องให้เลือกค่า Young's Modulus และ Poisson ratio ซึ่งในกรณีนี้ให้ใช้ของทองเหลืองจากตารางที่ 3.4 และเมื่อเสร็จสิ้นให้ กด OK



รูปที่ 4.16 เมนู Materials



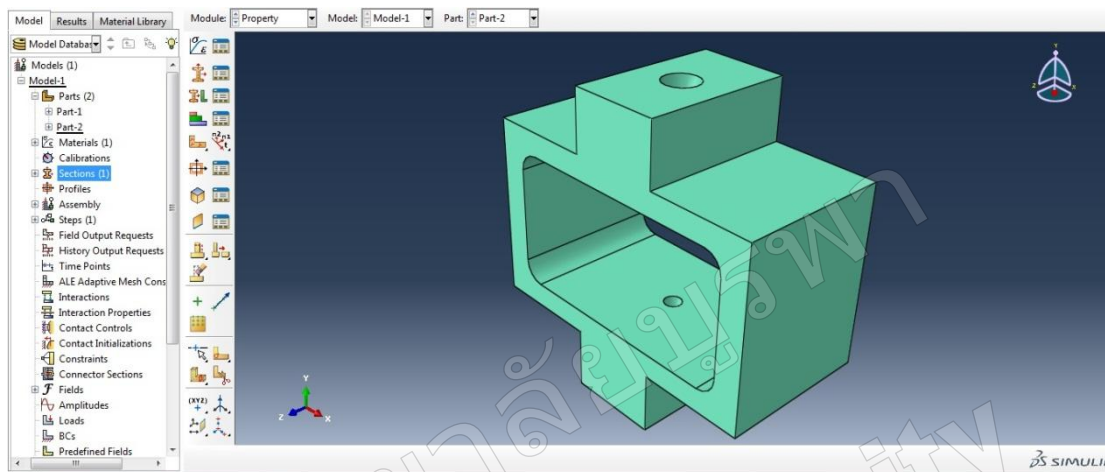
รูปที่ 4.17 หน้าต่าง Edit Materials

12) ขั้นตอนต่อไปคือให้ทำการเลือก Create Section => Homogeneous => Continue. =>ok



รูปที่ 4.18 Create Section

13) จากนั้นเลือก Assign Section =>คลิกรูปสามมิติ =>Doneจะมีหน้าต่างสี่เหลี่ยมขึ้นมาให้
เลือกกด OK ทั้งนี้ ซึ่งชิ้นส่วนสามมิติที่เห็นจากโปรแกรมนั้นจะมีสีเปลี่ยนไปนั้นหมายความว่า
ชิ้นส่วนเราได้กลายเป็นวัสดุคล้ายทองเหลืองแล้ว



รูปที่ 4.19 วัสดุทองเหลือง



รูปที่ 4.20 Assign Section

14) จากนั้นเลือก Assembly => Instance Parts => OK



รูปที่ 4.21 Instance Parts

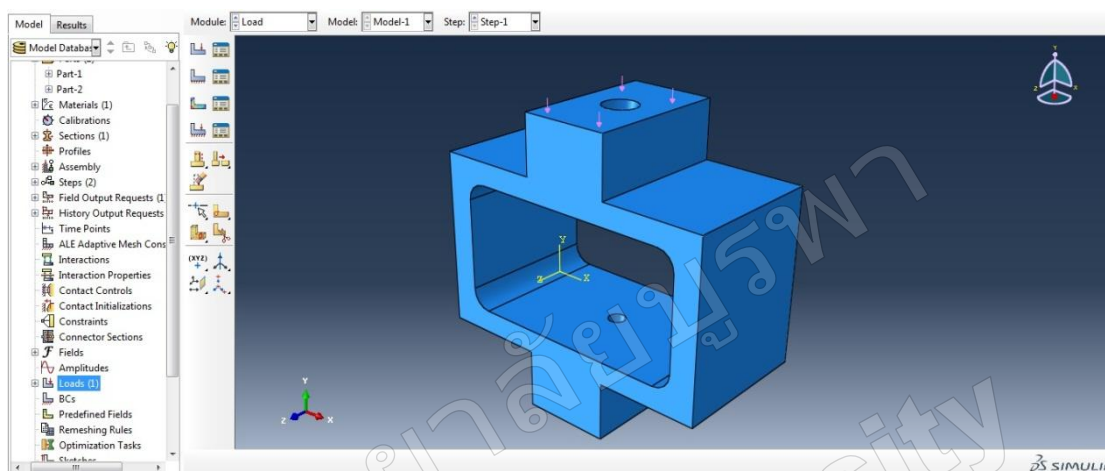
15) จากนั้นเลือก Step => Create Step =>เลือก Static => Continue... => OK



รูปที่ 4.22 Create Step

16) จากนั้นทำการใส่แรงกระทำและจุดรองรับ ณ ตำแหน่งรูปที่ 3.13 โดยขั้นตอนดังนี้

Load => Create Load => Pressure => Continue => เลือกตำแหน่งรับแรง => Done => เลือกน้ำหนักที่ต้องการในช่อง Magnitude => OK

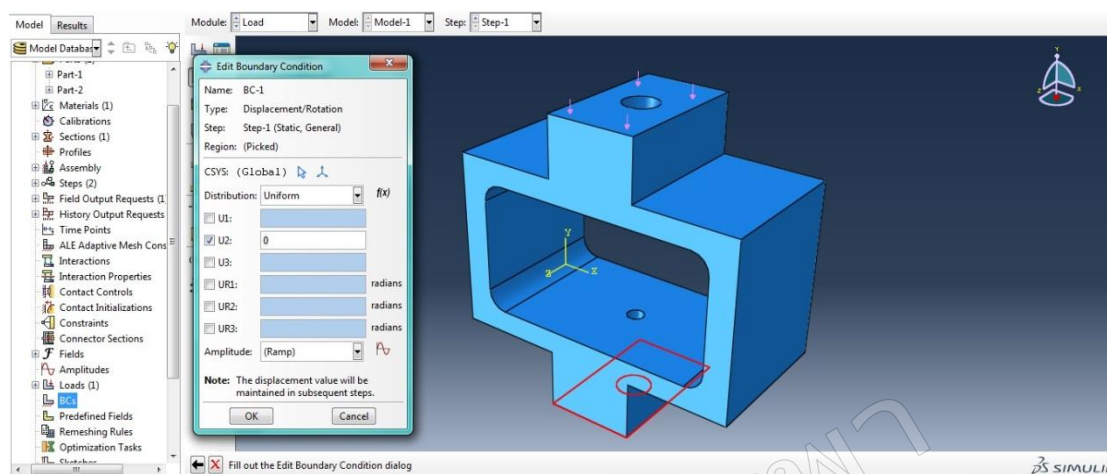


รูปที่ 4.23 การใส่ Load

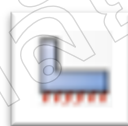


รูปที่ 4.24 Create Load

17) เลือก Create Boundary condition => Displacement => Continue => เลือกตำแหน่งจุดรองรับ => จากนั้นจะมีหน้าต่างขึ้นมาให้กำหนด $U_2 = 0$ เนื่องจากต้องการให้เคลื่อนไหวนเฉพาะแนวตั้งเท่านั้น

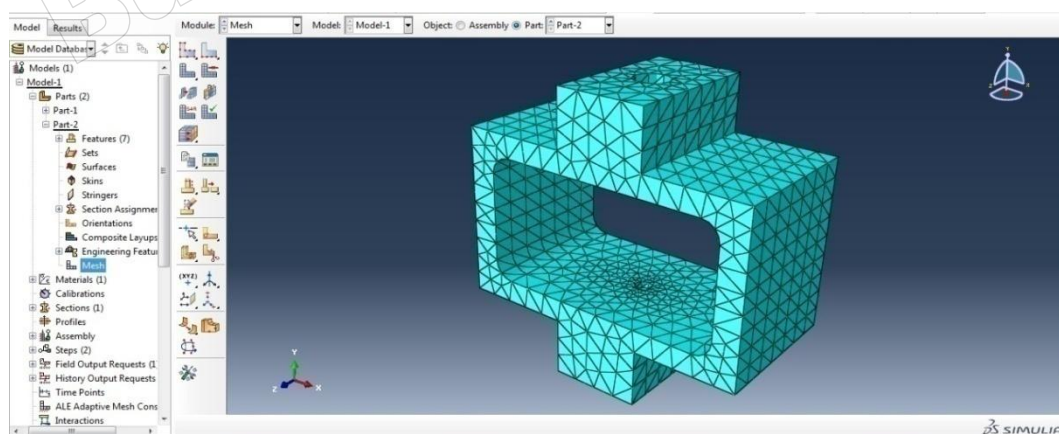


รูปที่ 4.25 หน้าต่าง Edit Boundary condition



รูปที่ 4.26 Create Boundary condition

18) ทำการ Mesh หรือการทำไฟไนต์เอลิเมนต์ให้เกิดภาพเป็นเอลิเมนต์ย่อยโดยวิธีการเลือก Mesh ใน Parts เท่านั้นวัสดุจะเปลี่ยนสีไปและทำการ Seed Parts => OK => Seed Edge => Done => Assign Mesh Controls => Tet => OK จากนั้น จากนั้นทำการกด Mesh Parts => Yes ก็จะเสร็จสิ้นการสร้างรูปไฟไนต์เอลิเมนต์ในโปรแกรม Abaqus



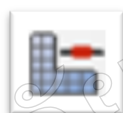
รูปที่ 4.27 การ Mesh Parts



รูปที่ 4.28 Seed Parts



รูปที่ 4.29 Seed Edge



รูปที่ 4.30 Assign Mesh Controls



รูปที่ 4.31 Mesh Parts

19) เมื่อเราทำการออกแบบเสร็จเรียบร้อยแล้วเราก็จะทำการดูผลจากรูปสามมิติว่าเกิดอะไรขึ้นบ้างในวัสดุโดย Job => Create Job => OK

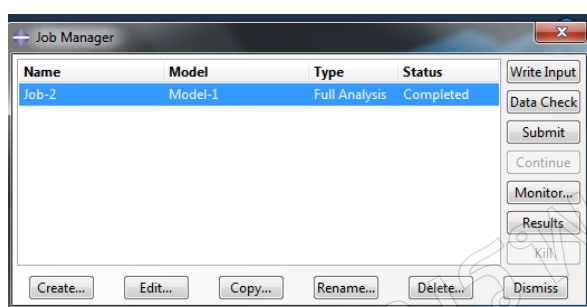


รูปที่ 4.32 Create Job

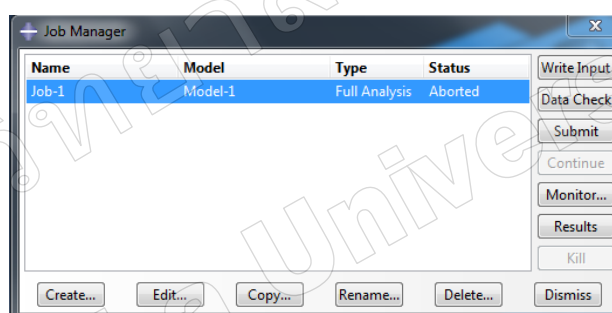
20) จากนั้นกด Job Manager ก็จะมีหน้าต่างขึ้นมาให้ทำตามขั้นตอนดังนี้ Submit => OK จากนั้นรอให้โปรแกรมประมวลผลจนกว่าผลที่ได้จะขึ้น Complete ก็แปลว่าการประมวลผลสำเร็จ แต่ถ้าหากประมวลผลแล้วขึ้นคำว่า Aborted แปลว่าการสร้างตัวอย่างมีข้อผิดพลาดให้ทำการแก้ไข



รูปที่ 4.33 Job Manager

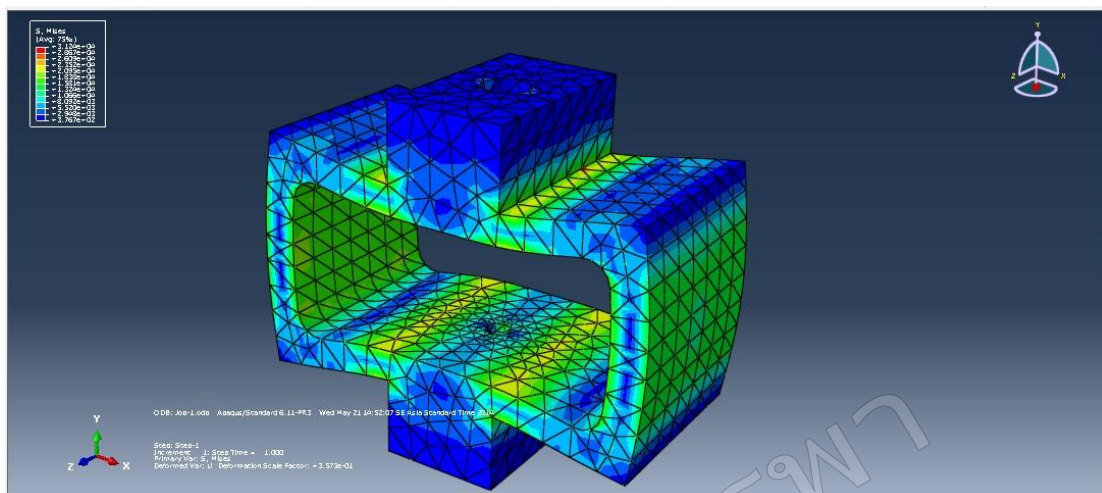


รูปที่ 4.34 การประมวลผลสำเร็จ



รูปที่ 4.35 การประมวลผลไม่สำเร็จ

21) ทำการดูการประมวลโดยกดคำว่า Results ภาพตัวอย่างชิ้นส่วนก็จะประมวลภาพออกมาและหากกด Plot Contour Deformed Shape ก็เป็นลักษณะที่บ่งบอกค่าแรงอัดและแรงดึงต่างๆที่เกิดกับชิ้นส่วน

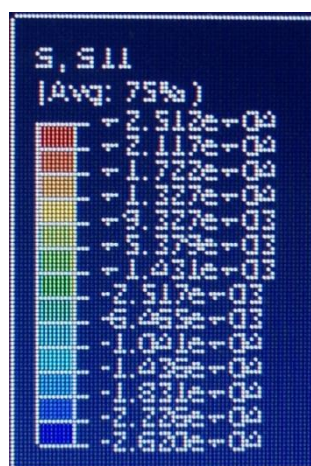


รูปที่ 4.36 ภาพจากไฟไนต์เอลิเมนต์



รูปที่ 4.37 Plot Contour Deformed Shape

22) ค่าแรงอัดและแรงดึงต่างๆที่เกิดขึ้นจะดูได้จากตารางมุมบนซ้ายซึ่งจะบ่งบอกตามสีต่างๆที่มีความเข้มอ่อนไม่เท่ากัน



รูปที่ 4.38 ตารางการดูผลที่เกิดขึ้น

หากต้องการดูให้แน่ใจว่าตัวอย่างชิ้นงานที่ออกแบบเคลื่อนตัวตามแนวแกนที่กำหนดไว้หรือไม่ ให้กด Animate : Scale Factor เพื่อดูการเคลื่อนว่าถูกต้องหรือไม่



รูปที่ 4.39 Animate : Scale Factor

23) หากต้องรู้ค่า Stress และ Strain ที่เกิดจากแต่ละเอลิเมนต์ก็สามารถหาได้จากวิธีการดังต่อไปนี้คือ

- เมื่อทำการ Results ขึ้นงานเสร็จสิ้นแล้วขั้นตอนแรกให้กด Common Options => Labels => Show Element Labels => OK



รูปที่ 4.40 Common Options

- ต่อมาให้เลือก Create XY Data => ODB field output => Continue... => Variables => Strain Component (ให้เลือกเฉพาะ E22 เท่านั้น) => Element/Node => Element Labels => จากนั้นจะมีหน้าต่างออกมาดังรูปให้เลือกเอลิเมนต์ต่างๆที่เราสนใจ => Save => Plot



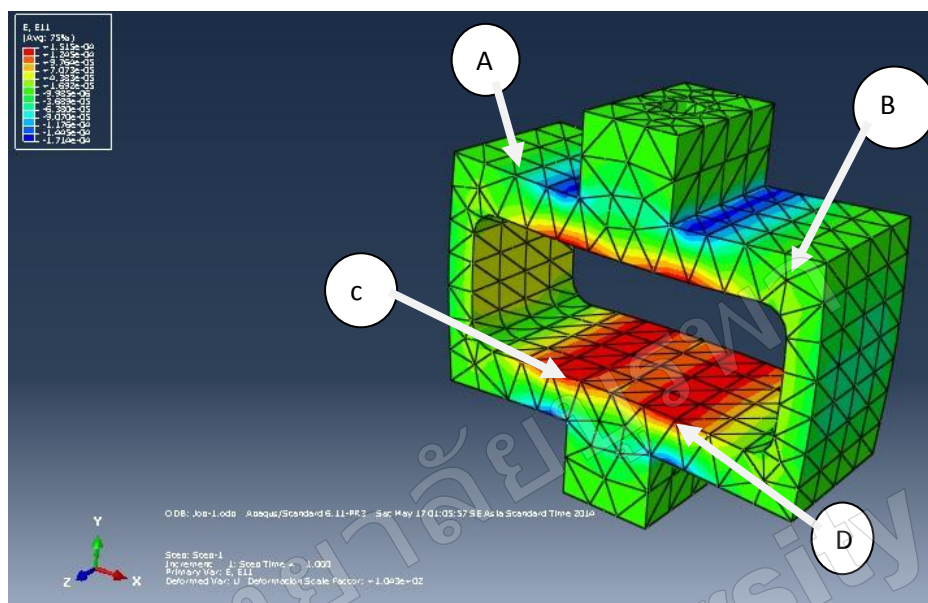
รูปที่ 4.41 Create XY Data

- ขั้นตอนสุดท้ายคือการอ่านค่าที่ได้จากการเลือกเอลิเมนต์ต่างๆที่เราสนใจทำได้โดยเลือกแถบเมนูด้านบนชื่อว่า Report => XY => จากนั้นให้กดเลือกเอลิเมนต์ทั้งหมด => OK
- จากนั้นให้ทำการออกจากโปรแกรม Abaqus และเข้าโปรแกรม Microsoft Excel และเปิดงานที่มีชื่อว่า abaqus.rpt ก็จะได้ค่าในเอลิเมนต์ที่เราสนใจ

4.2.2 ผลจากการวิเคราะห์พฤติกรรมการเสียรูป

จากผลการวิเคราะห์โหนดเซลล์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ทำให้ทราบค่าความเค้นและความเครียดที่แตกต่างกันตามตำแหน่งของโหนดเซลล์ นอกจากนั้นโปรแกรมยังแสดงชนิดของความเค้นและความเครียดตามมาตรวัดดังรูปที่ 4.38 ว่าเป็นพฤติกรรมการเสียรูปที่เกิดจากแรงอัดหรือแรงดึงเครื่องหมายที่แสดงออกมา โดยโหนดเซลล์ในที่นี้สร้างตามการวิเคราะห์รูปร่างโหนด

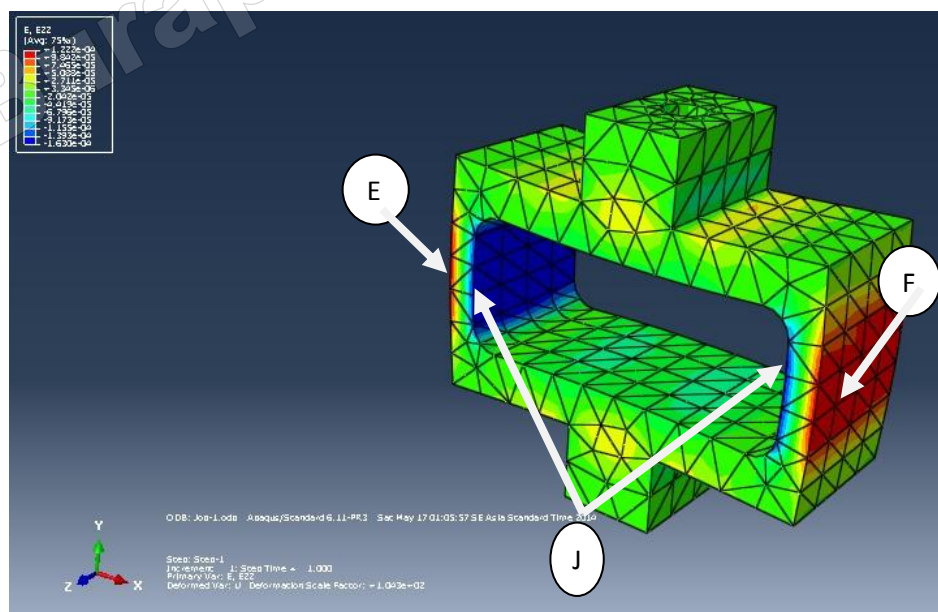
เซลล์เบื้องต้นจากบทที่ 3 และรับภาระได้ 5 kN โดยลักษณะการแสดงผลที่ออกมา มีลักษณะดังต่อไปนี้



รูปที่ 4.42 การออกแบบครั้งที่ 1 โดยเลือกรูปในแนวแกน X

ตำแหน่ง C (T)	ตำแหน่ง D (T)	ตำแหน่ง A (C)	ตำแหน่ง B (C)
0.0001448	0.0001455	0.0000947	0.0000945

ตารางที่ 4.1 ค่า Strain ในแกน X ที่เกิดขึ้นของการออกแบบครั้งที่ 1

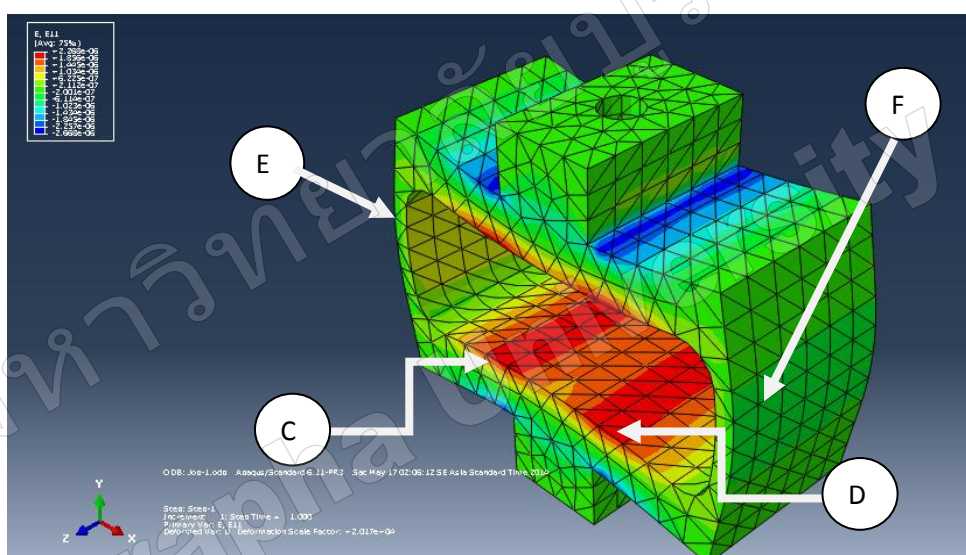


รูปที่ 4.43 การออกแบบครั้งที่ 1 โดยเลือกรูปในแนวแกน Y

ตำแหน่ง E (T)	ตำแหน่ง F (T)	ตำแหน่ง J (C)	ตำแหน่ง J (C)
0.00004548	0.00004550	0.00008802	0.00008810

ตารางที่ 4.2 ค่า Strain ในแกน y ที่เกิดขึ้นของโหลดเซลล์ครั้งที่ 1

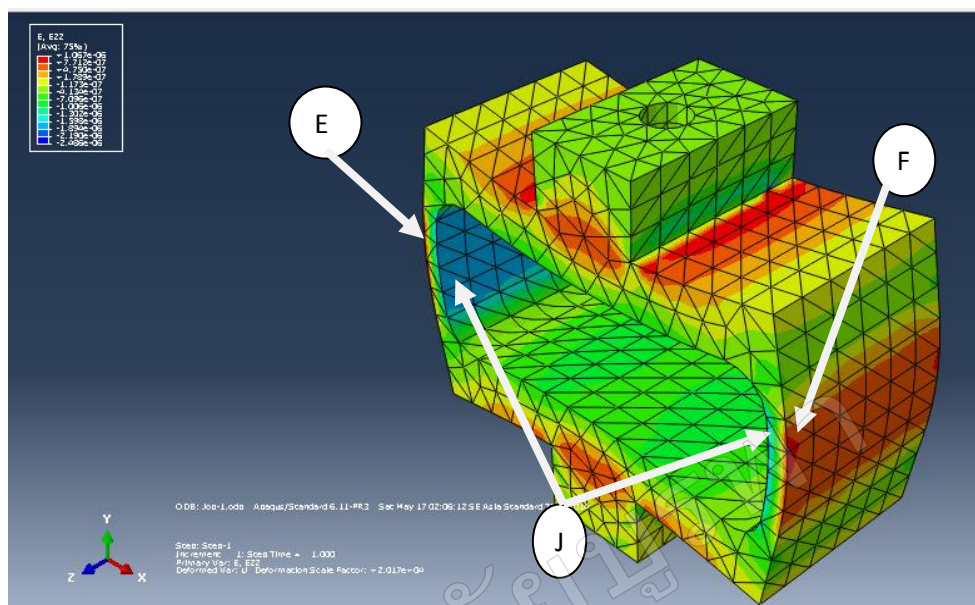
จากรูปที่ 4.42 พบว่าความเค้นและความเครียดสูงสุดจากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมไม่ได้เกิด ในตำแหน่ง A B C และ D ตามที่ได้สมมติฐานไว้ในบทที่ 3 แต่ความเค้นและความเครียดสูงสุดเกิดขึ้นใกล้กับฐานรับแรง ซึ่งหากออกแบบโหลดเซลล์จริงแล้วจะทำให้ไม่สามารถติดสเตรนเกจ (Strain Gauge) ได้ ดังนั้นจึงทำการออกแบบโหลดเซลล์ใหม่โดยบังคับให้เกิดค่าความเค้นอัดสูงสุด ณ ตำแหน่ง E และ F และออกแบบค่าความเค้นดึง ณ ตำแหน่ง C และ D ดังเดิม



รูปที่ 4.44การออกแบบครั้งที่ 2 โดยเลือกรูปในแนวแกน X

ตำแหน่ง C (T)	ตำแหน่ง D (T)	ตำแหน่ง E (C)	ตำแหน่ง F (C)
0.0001081	0.0001092	0.0001236	0.0001240

ตารางที่ 4.3 ค่า Strain ในแกน x ที่เกิดขึ้นของโหลดเซลล์ครั้งที่ 2



รูปที่ 4.45การออกแบบครั้งที่ 2 โดยเลือกรูปในแนวแกน Y

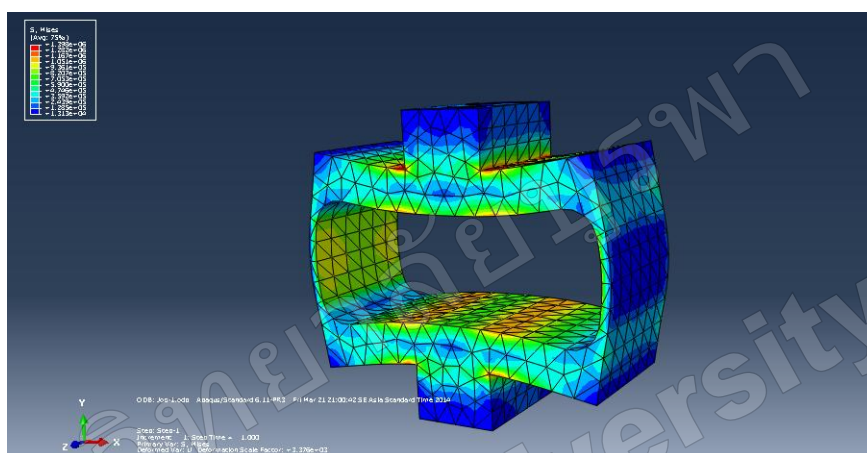
ตำแหน่ง E (T)	ตำแหน่ง F (T)	ตำแหน่ง J (C)	ตำแหน่ง J (C)
0.00006884	0.00006886	0.000118	0.000120

ตารางที่ 4.4 ค่า Strain ในแกน y ที่เกิดขึ้นของโหลดเซลล์ครั้งที่ 2

จากรูปที่ 4.45 ได้ออกแบบให้ ณ ตำแหน่ง E และ F บางลงเท่ากับ 12 mm และจากผลการวิเคราะห์ของโปรแกรมได้ทำให้ค่าความเค้นอัดสูงสุดมากกว่ารูปที่ 4.43 แล้วแต่ผลเสียที่เกิดขึ้นมาคือรูปที่ 4.44 เกิดค่าความเค้นดิ่งน้อยกว่ารูปที่ 4.42 ณ ตำแหน่ง C และ D

ดังนั้นจึงได้เลือกโหลดเซลล์ของการออกแบบรูปที่ 2 โดยใช้ตำแหน่งติดสเตรนเกจ (Strain Gauge) ที่เปลี่ยนไปคือความเค้นอัดสูงสุดได้ติดสเตรนเกจ (Strain Gauge) ในตำแหน่ง J ความเค้นดิ่งสูงสุดติดสเตรนเกจ (Strain Gauge) ในตำแหน่ง E และตำแหน่ง F

แต่ในการออกแบบโหลดเซลล์นั้นได้มีความสัมพันธ์ระหว่างค่าความล้า (Fatigue) ของสเตรนเกจ (Strain Gauge) กับความหนาของโหลดเซลล์ขึ้นดังนั้นจึงต้องออกแบบโหลดเซลล์ใหม่โดยให้มีค่าใกล้เคียงกับค่าความล้า (Fatigue) ของสเตรนเกจ (Strain Gauge) ที่กำหนดไว้คือ 1×10^{-4} mm เพื่อให้วัดค่าได้ละเอียดอ่อน (Sensitive) มากขึ้นและเปลี่ยนแปลงค่าความหนาด้านข้างของตัวอย่างให้บางลงเพื่อเป็นไปตามความสัมพันธ์ดังที่กล่าวไว้ข้างต้นที่ความหนา 10 mm



รูปที่ 4.46 การออกแบบโหลดเซลล์ครั้งที่ 3

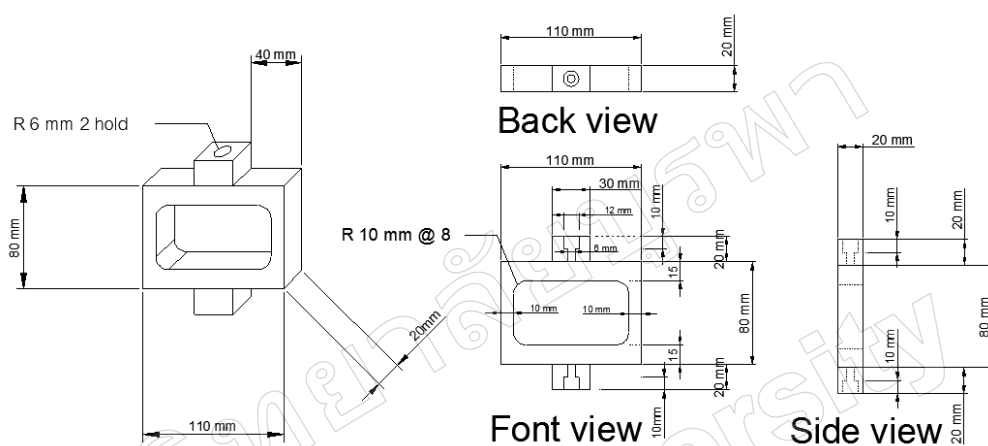
Node 700 (T)	Node 696 (T)	Node 712 (C)	Node 612 (C)
0.0001081	0.0001092	0.000125	0.000127

ตารางที่ 4.5 ค่า Strain ที่เกิดขึ้นของโหลดเซลล์ครั้งที่ 3

ผลจากการวิเคราะห์พบว่ามีค่าความเครียดที่ได้ไม่เกินค่าความล้า (Fatigue) ของสเตรนเกจ (Strain Gauge) มีค่าเท่ากับ 1×10^{-4}

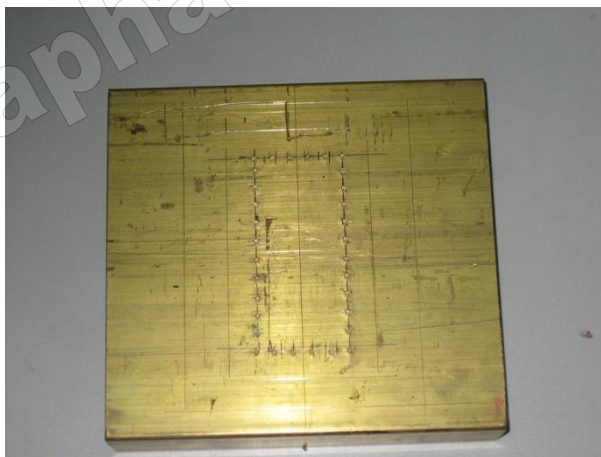
4.3 การขึ้นรูปโลหะ

การเลือกใช้วัสดุทองเหลือง (Brass) จากการสันนิษฐานในบทที่ 3 และขนาดความหนาในส่วนต่างๆของตัวโหลดเซลล์นั้นได้จากผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ดังแสดงในรูปที่ 4.45 และมีขั้นตอนการดำเนินการดังนี้



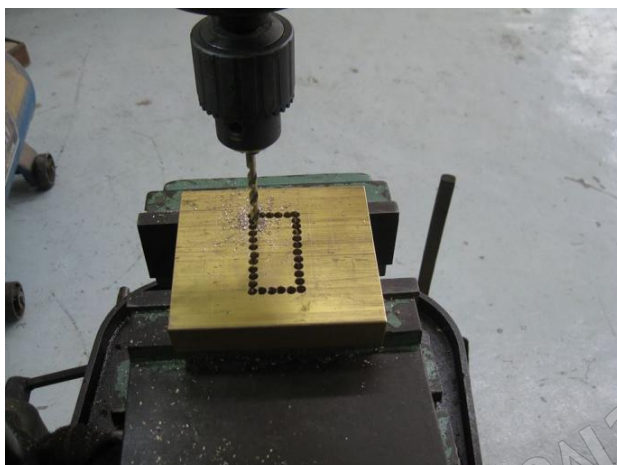
รูปที่ 4.47 ออกแบบ (Drawing)

- 1) ทำเครื่องหมายบริเวณที่ต้องการเจาะให้ตรงกับการออกแบบ (Drawing)



รูปที่ 4.48 ก้อนโลหะทองเหลือง (Brass)

- 2) ทำการเจาะบริเวณสี่เหลี่ยมด้านในเพื่อให้เหมือนกับต้นแบบโดยเจาะแบบอย่างหยาบด้วยเครื่องเจาะสว่านดังแสดงไว้ในรูปที่ 4.49



รูปที่ 4.49 การเจาะด้วยสว่าน



รูปที่ 4.50 เจาะสว่านเสร็จสิ้น

- 3) จากนั้นก็ทำการใช้เครื่องมือกลึง(Milling) ในการกัดผิวของเหลืองให้เรียบและมีความโค้งให้ได้ตามแบบที่กำหนด



รูปที่ 4.51 การใช้เครื่องมือกลึง(Milling)



รูปที่ 4.52 ใช้เครื่องมิลลิ่ง(Milling) เสร็จสิ้น

- 4) เมื่อทำการใช้เครื่องมิลลิ่ง(Milling) กัดด้านในเสร็จสิ้นแล้วจึงทำการกัดด้านนอกต่อเพื่อให้เกิดรูปทรงที่เหมือนกับรูปแบบที่กำหนด



รูปที่ 4.53 รูปแบบสมบูรณ์

การขึ้นรูปโลหะทองเหลืองเพื่อนำไปใช้ในการทดสอบควรมีลักษณะผิวที่ดีที่ราบเรียบมากที่สุดทั้งด้านในและด้านนอกของผิวตัวอย่างเพราะในการเตรียมอุปกรณ์ชุดการติดตั้งสเตรนเกจ(Strain Gauge) นั้นจะต้องทำให้สเตรนเกจ (Strain Gauge) แนบชิดกับวัสดุทั้งระนาบให้ได้เพื่อที่จะไม่มีช่องว่างระหว่างผิวชิ้นงานกับสเตรนเกจ

4.4 คุณสมบัติและการติดตั้งสเตรนเกจ(Strain Gauge)

4.4.1 การเลือกใช้สเตรนเกจ Strain Gauge

ในการเลือกใช้สเตรนเกจ (Strain Gauge) นั้นสิ่งสำคัญที่ควรคำนึงถึงหลักๆ คือวัสดุโลหะที่ใช้ทำโหนดเซลล์, ขนาดพื้นที่หน้าตัดของพื้นผิวโหนดเซลล์และอุณหภูมิห้องที่ใช้ในการทดสอบ เป็นต้น โดยการเลือกใช้มีขั้นตอนหลักๆ ดังนี้

1) การเลือกชุดสเตรนเกจ (Strain gauge)

Gauge series	
F	General purpose Stress concentration use Chain gauge CCFXX, CCFYX
UF	General purpose
WF	Waterproof construction
PF	Polyester foil gauge
P	Polyester wire gauge
FLM / WFLM	Metal-backing strain gauge
MF	Magnetic field use
PM / PMF	Polyester mold strain gauge
YEF / YF / YUF	Post-yield foil gauge
PMFLS / SSM	For asphalt use
LF	Low elastic modulus
PFLW / PLW	For wood long term use
GF	For plastic material use
UBF / BF	For composite material use
CEF	Wide range temperature use
CF	Cryogenic temperature use
QF / ZF	High temperature use
SFA	Stress measurement
AW	Weldable encapsulated gauge
BTM	Bolt axial strain measurement
BTMP	Bolt axial force measurement
DD	One-side gauge
FAC	Crack detection
TF	Temperature measurement

ตารางที่ 4.6 การเลือกใช้สเตรนเกจ(Strain gauge)

จากตารางที่ 4.2 สเตรนเกจ(Strain gauge) ที่นำไปใช้ในงานที่ไม่มีความสลับซับซ้อนมากนักและมีราคาที่เหมาะสมจึงทำให้เลือกชุดสเตรนเกจ (Strain gauge) “ F ” ในการทดสอบ

2) การเลือกใช้ความต้านทานโดยโปรเจกต์ที่ได้ทำการศึกษาครั้งนี้ได้ใช้ความต้านทานแบบมาตรฐานคือ 120 โอห์ม

3) การเลือก Compensation material เลือกใช้ 17 เพราะวัสดุอยู่ในกลุ่มนี้

Compensation material ppm/°C (*3)			
<u>3 Composite material</u>		<u>17 Stainless steel/Copper alloy</u>	
Ceramic (Si ₃ N ₄)	2.6~3.3	SUS 304	16.2
CFRP	3 ~ 5	SUS 310	15.8
<u>5 Composite material</u>		SUS 316	16.0
Ceramic (SiC)	4.6	SUS 321	16.7
CFRP	3 ~ 5	Copper	16.7
<u>8 Composite material</u>		Beryllium copper	16.6
Glass	7.9	Brass	16.7
Titanium	8.9	Bronze	17.0
Titanium alloy(Ti-6Al-4V)	8.8	Constantan	14.9
<u>11 Mild steel (ferritic)</u>		<u>23 Aluminium</u>	
Mild steel (0.1-0.2C)	11.8	Aluminium	23.4
Hard steel (0.4-0.5C)	11.2	Aluminium 2024-T4	23.0
Cast iron	10.5	Lead and its alloy	29.0
Hastelloy-276	11.2	Gypsum	25.0
Inconel 600	13.3	Polyimide	20~30
Inconel 750	12.1	<u>28 Magnesium alloy</u> 27.0	
Monel	13.5	<u>50 Plastics</u>	
SUS 630 (17-4PH)	10.8	Epoxy	45~65
SUS 631 (17-7PH)	10.6	<u>70 Plastics</u>	
Concrete	7~13	Acrylics	70
		ABS	74
		Polyacetal (POM)	80
		Polycarbonate (PC)	66~70
		Polystyrene (PS)	60~80

ตารางที่ 4.7การเลือกใช้Compensation material

4) การเลือกความยาวของสเตรนเกจที่ต้องการใช้งาน จะเลือกตามความเหมาะสมของ
 ใช้งานที่ต้องการใช้จากชั้นงานที่ทำเลือกใช้ความยาว 5 mm

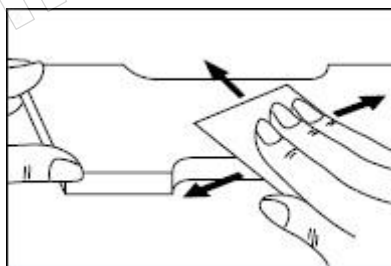
Lead wires pre-attached	
002LE	Paralleled polyimide lead wire of 2cm long
005LE	Paralleled polyimide lead wire of 5cm long
1L	Paralleled vinyl lead wire of 1m long
3L	Paralleled vinyl lead wire of 3m long
5L	Paralleled vinyl lead wire of 5m long
3LT	3-wire paralleled vinyl lead wire of 3m long
5LT	3-wire paralleled vinyl lead wire of 5m long

ตารางที่ 4.8 การเลือกความยาวของเส้นลวด

4.4.2 วิธีการติดตั้งสเตรนเกจ (Strain gauge)

1) เลือกตำแหน่งที่ต้องการติดตั้งสเตรนเกจ (Strain gauge)

2) ใช้กระดาษทรายเบอร์ 1000 ขัดตำแหน่งที่เลือกไว้ให้เรียบที่สุด และใช้กระดาษ
 ทรายเบอร์ 1200 ขัดซ้ำอีกรอบ



รูปที่ 4.54 การขัดผิวโลหะ

- 3) ล้างด้วยน้ำเปล่าเพื่อให้สะอาดด้วยแอลกอฮอล์และตามด้วยน้ำยาล้างเล็บ
(Acetone)



รูปที่ 4.55 การทำความสะอาด

- 4) ทำการหาตำแหน่งและระยะที่แน่นอนในการติดตั้ง

- 5) ทากาวลงบนสเตรนเกจ(Strain gauge)และติดลงไปในพื้นที่ที่กำหนดไว้



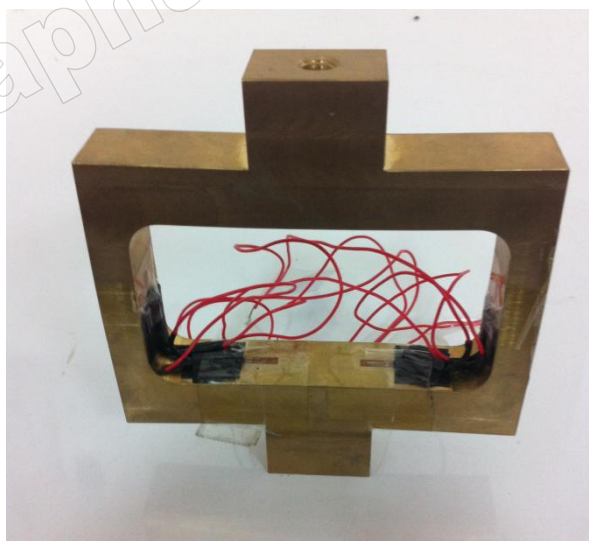
รูปที่ 4.56 การติดกาว

6) ติดฉนวนทับตัวสเตรนเกจ (Strain gauge) เพื่อไม่ให้มีสิ่งใดไปปนเปื้อนและเพื่อไม่ให้เกิดความชื้น



รูปที่ 4.57 การติดฉนวนทับตัวสเตรนเกจ(Strain gauge)

7) ติดตั้งสเตรนเกจ (Strain gauge) ด้วยวิธีต่อแบบวงจรบริดจ์



รูปที่ 4.58 การต่อวงจรบริดจ์

4.5 การทดสอบประสิทธิภาพของโหนดเซลล์

จากรูปที่ 4.58 ได้ทำการศึกษาวิธีการต่างๆ ที่จะสามารถอ่านค่าการเสีรูปจากตัวโหนดเซลล์ได้ใกล้เคียงกับค่าที่ออกแบบโหนดเซลล์จากโปรแกรมให้มากที่สุด โดยมีขั้นตอนการทดสอบและวัสดุอุปกรณ์ดังต่อไปนี้

4.5.1 อุปกรณ์

- 1) คอมพิวเตอร์พกพาหรือ PC (รุ่นใดก็ได้)



รูปที่ 4.59 คอมพิวเตอร์พกพา

- 2) โปรแกรมคอมพิวเตอร์ NI MAX (National Instrument)



รูปที่ 4.60 โปรแกรม NI MAX

โปรแกรมคอมพิวเตอร์ NI MAX เป็นโปรแกรมที่ใช้จัดการระบบงานตรวจสอบ วิเคราะห์ ความคุม บันทึกลงและแสดงค่า โดยภายในตัวโปรแกรมมีรูปแบบ (Function) ที่เรียกว่ารูปแบบการทดสอบ (Test panel) เป็นการอ่านค่าความดันออกมาและใช้ควบคู่กับ Multifunction Data Acquisition (DAQ) ดังรูปที่ 4.61 ในการทดสอบ

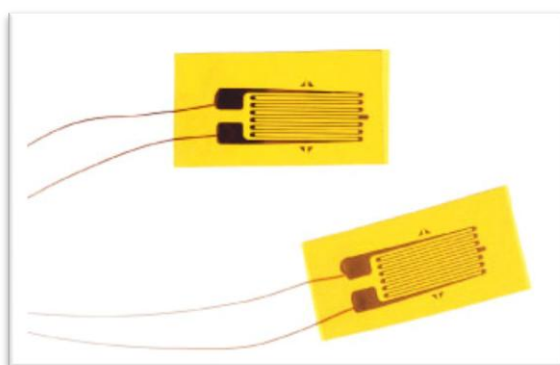
3) Multifunction Data Acquisition (DAQ) รุ่น NI USB-6008



รูปที่ 4.61 Multifunction Data Acquisition (DAQ) รุ่น NI USB-6008

Multifunction Data Acquisition (DAQ) คือฮาร์ดแวร์ (Hard ware) ชิ้นหนึ่งที่ต่อเข้ากับ โปรแกรม NI MAX หรืออื่นๆ ในคอมพิวเตอร์ โดย Multifunction Data Acquisition (DAQ) มีหน้าที่ รับผลและแปลงผลจากค่าความดันของสเตรนเกจ (Strain Gauge) ส่งไปยังโปรแกรม NI MAX เพื่อให้ได้ค่าเป็นปริมาณตัวเลข

4) Strain Gauge



รูปที่ 4.62 Strain Gauge

5) เครื่องให้กำลัง (ให้ Marshall Machine ในการทดสอบ)



รูปที่ 4.63 Marshall Machine

6) โหลดเซลล์ (Load cell) ที่ออกแบบไว้



รูปที่ 4.64 โหลดเซลล์

4.5.2 ขั้นตอนการทดสอบ

1) ทำการติดสเตรนเกจ (Stain gauge) ดังหัวข้อที่ 4.4

2) ต่อ Multifunction Data Acquisition (DAQ) เข้ากับโหลดเซลล์หลังจากนั้นต่อ Multifunction Data Acquisition (DAQ)เข้ากับคอมพิวเตอร์

3) เปิดโปรแกรม NI Max และเครื่องจะเชื่อมต่อกับ Multifunction Data Acquisition (DAQ)ทันที

4) จากนั้นทดสอบโดยให้น้ำหนักกับโหลดเซลล์และดูว่าการต่อวงจรแบบบริดจ์ใช้ได้หรือถูกต้องแล้ว



รูปที่ 4.65 ทดสอบโหลดเซลล์

4.5.3 วิเคราะห์ผลการทดลอง

จากหัวข้อที่ 4.2 ขั้นตอนการวิเคราะห์และการทดลองของโหลดเซลล์ พบว่ามีข้อผิดพลาดหลายประการเกิดขึ้นมีผลทำให้โหลดเซลล์เกิดการเสียรูปถาวรทันทีหลังจากการทดสอบด้วยเครื่องมาร์แชล (Marshall Machine) ซึ่งอาจเป็นผลเนื่องมาจากการใช้ค่าความล้า (Fatigue) ของสเตรนเกจ (Strain gauge) เป็นข้อกำหนดในการออกแบบเพราะเมื่อให้แรงกับวัสดุแล้วผลจากโปรแกรม NI MAX อ่านค่าได้น้อยมากจนไม่สามารถอ่านค่าที่ต่างกันได้ในขณะเดียวพบว่าวัสดุทองเหลืองที่เลือกใช้ออกแบบโหลดเซลล์อ่อนตัวมากหรือมี ค่าความยืดหยุ่น (Yield Strength) ต่ำส่งผลทำให้โหลดเซลล์เกิดการเสียรูปได้ง่ายเมื่อได้รับแรง อีกทั้งรูปแบบของโหลดเซลล์มีการออกแบบ รูปร่าง

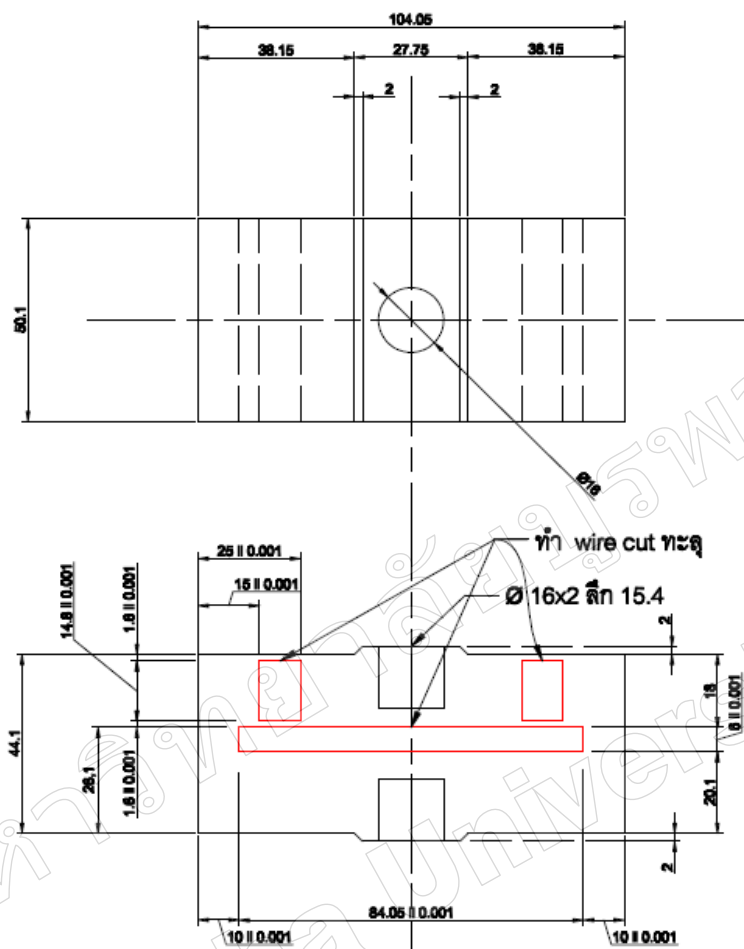
ได้ไม่ดีพอเนื่องจากการบังคับโหนดเซลล์ให้เกิดค่าความเค้นอัดสูงสุดด้านข้างเป็นตำแหน่งที่ไม่เกิดลักษณะของการเสียรูปแบบคาน (Bending) แต่เป็นการเสียรูปแบบเสาแทน เพราะการเสียรูปแบบคานจะแสดงค่าความเค้นอัดและความเค้นดึงสูงสุดออกมาได้ดีกว่า

ดังนั้นจึงได้ทำการออกแบบโหนดเซลล์และวัสดุที่ใช้ใหม่ เพื่อให้โหนดเซลล์มีความเสถียรมากที่สุดและรับน้ำหนักที่ออกแบบไว้ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

4.6 การปรับปรุงลักษณะทางกายภาพของโหนดเซลล์เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพ

จากการวิเคราะห์ผลการทดลองที่กล่าวมาทำให้เกิดแนวคิดในการออกแบบรูปแบบโหนดเซลล์ใหม่ที่ดีกว่ารูปแบบเดิมและการเลือกใช้วัสดุใหม่แทนที่ทองเหลืองเพื่อให้มีความเสถียรและยืดหยุ่นได้ดี ทั้งนี้การวิเคราะห์รูปใหม่ก็ยังคงมีหลักการเดิมคือการเสียรูปของโหนดเซลล์ยังคงเป็นลักษณะของคาน(Beam) เพื่อให้ตรงกับสมมติฐานเดิมที่เคยกล่าวเอาไว้ในบทที่ 3

รูปแบบโหนดเซลล์ใหม่นี้มีแนวความคิดมาจาก Dr. HIRAKAWA จากมหาวิทยาลัยโตเกียวท่านได้มีแนวคิดริเริ่มการออกแบบโหนดเซลล์รูปหนึ่งที่มีความเสถียรและง่ายต่อการวิเคราะห์โดยลักษณะที่ออกแบบเป็นกล่องสี่เหลี่ยมและเจาะตรงกลางเป็นแนวขวางทะลุและแนวตั้งอีกสองช่องโดยเจาะทะลุเช่นเดียวกันดังรูปที่ 4.66



รูปที่ 4.66 การออกแบบโหลเซลล์ใหม่

การเลือกวัสดุของ Dr. HIRAKAWA นั้นใช้วัสดุที่เป็นเหล็ก (Iron) และทองสำริด (Bronze) เป็นส่วนใหญ่จึงทำให้การเลือกวัสดุใหม่นั้นต้องคำนึงถึงทรัพยากรที่มีอยู่ในประเทศว่ามีมากน้อยเพียงใดและมีคุณสมบัติในใช้งานตามที่ต้องการและต้องมีราคาที่เหมาะสม จึงเลือกใช้ “สแตนเลส(Stainless) เกรด SUS 304”

การใช้สแตนเลส (Stainless) เนื่องจากสแตนเลสมีความเหนียวสูงมีค่า Young Modulus ที่ดีกว่าทองเหลือง (สามารถดูได้จากจากตารางที่ 3.3และตารางที่ 3.4)ทำให้วัสดุมีความยืดหยุ่นและทำให้วัสดุที่ออกแบบไว้จะคืนสภาพจากการรับแรงอัดได้ดี



รูปที่ 4.67 วัสดุสแตนเลส (Stainless)

เกรด SUS 304 คือ มาตรฐาน 18/8 เป็นสแตนเลส (Stainless) แบบที่มีการใช้แพร่หลายมากที่สุด ในหลายๆ ผลิตภัณฑ์ในหลายๆ อุตสาหกรรมทั้งภาคอุตสาหกรรม การขนส่ง ภาคการเกษตร วัสดุนี้มีคุณสมบัติยอดเยี่ยมในการถูกขึ้นรูป เชื่อม โดยไม่เสียหาย SUS 304 ยังทนต่อการกัดกร่อนได้ดีในหลายๆ สภาพแวดล้อม จึงทำให้สแตนเลส (Stainless) เกรด SUS 304 เหมาะสมกับการใช้ทำ โหลดเซลล์กับแบบข้างต้นได้ดีที่สุด

ตามมาตรฐาน SUS 304 ทำให้ทราบค่าพารามิเตอร์ Poisson ratio และ Young Modulus ที่ชัดเจนมากขึ้นจากตารางที่ 4.5

Parameter SUS 304 Mechanical Properties	
Subject	Unit
Density (kg/m ³)	8000
Young's Modulus (GPa)	190
Tensile Strength (MPa)	520
Yield Strength (MPa)	240
Poisson's ratio	0.29

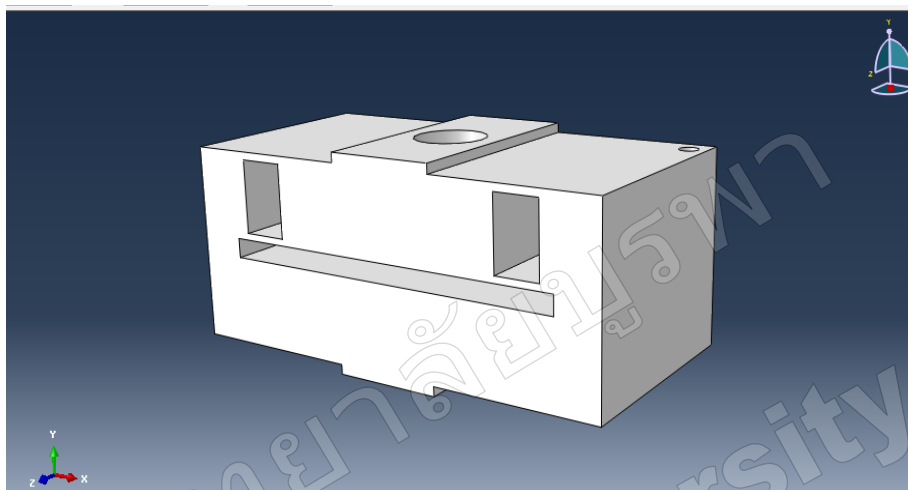
ตารางที่ 4.9 คุณสมบัติสแตนเลส (Stainless) เกรด SUS 304

หมายเหตุ* อ้างอิงจาก <http://www.engineeringtoolbox.com/>

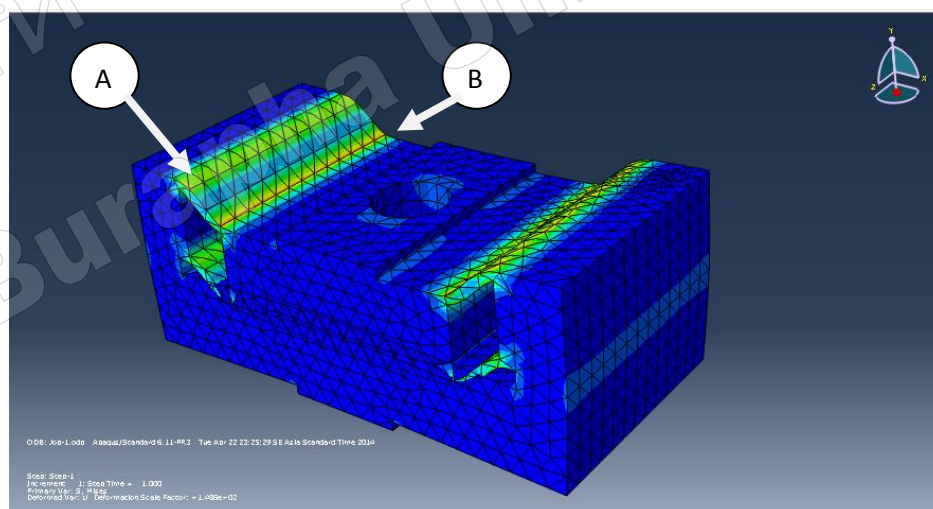
4.7 การวิเคราะห์โหนดเซลล์รูปแบบใหม่โดยใช้ไฟไนต์เอลิเมนต์

จากขั้นตอนการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์โดยโปรแกรมทางไฟไนต์เอลิเมนต์ ตามหัวข้อ

4.2.1 และออกแบบตามรูปที่ 4.66 จะได้ตัวอย่างโหนดเซลล์ที่ 5 kN ดังต่อไปนี้



รูปที่ 4.68 รูปแบบโหนดเซลล์



รูปที่ 4.69 วิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์

จากผลการวิเคราะห์ดังรูปที่ 4.69 พบว่าการออกแบบโหนดเซลล์ใหม่ในโปรแกรมมีค่าความเค้นและความเครียดดึงสูงสุด ณ ตำแหน่ง A และมีค่าความเค้นและความเครียดอัดสูงสุด ณ

ตำแหน่ง B ซึ่งโหลดเซลล์รูปแบบใหม่มีการเคลื่อนตัวเฉพาะแนวแกน Y เท่านั้นจึงทำให้การวิเคราะห์ไม่สลับซับซ้อนเหมือนโหลดเซลล์เดิมที่ขึ้นรูปด้วยทองเหลือง

เกณฑ์ในการออกแบบโหลดเซลล์ ใช้ค่าจำกัดความเค้น (Strain limit) ของสเตรนเกจ (Strain Gauge) และจุดครากของวัสดุมาเป็นข้อกำหนดในการออกแบบ และทำการวิเคราะห์ไฟไนต์ เอลิเมนต์ด้วยโปรแกรม ทางไฟไนต์เอลิเมนต์ เพื่อหาจุดที่เกิด ค่าความเครียด (Stress) และค่าความเค้น (Strain) สูงสุด

เนื่องจากว่าวัสดุที่ใช้ในการออกแบบเป็นสแตนเลสมีค่า Yield strength เท่ากับ 240 MPa ฉะนั้นในการวิเคราะห์โดยใช้แรงกระทำสูงสุดที่กระทำการออกแบบ ค่าความเครียด (Stress) ที่เกิดขึ้นต้องไม่ให้เกินค่า Yield Strength ของสแตนเลส (Stainless) ให้ทำการออกแบบความหนาใหม่ และสเตรนเกจที่เลือกใช้นั้นมี จำกัดความเค้น (Strain limit) ที่ 5% ทำนองเดียวกันถ้าค่าความเค้น (Strain) สูงสุดที่เกิดขึ้นนั้นเกิน 5% ก็ต้องทำการออกแบบใหม่เช่นกัน จากนั้นก็ทำการวิเคราะห์เพื่อหาตำแหน่งที่เกิดค่าความเครียด (Stress) และค่าความเค้น (Strain) สูงสุดเพื่อทำการติดตั้งสเตรนเกจ (Strain Gauge)

4.8 การขึ้นรูปโลหะของโหลดเซลล์รูปแบบใหม่

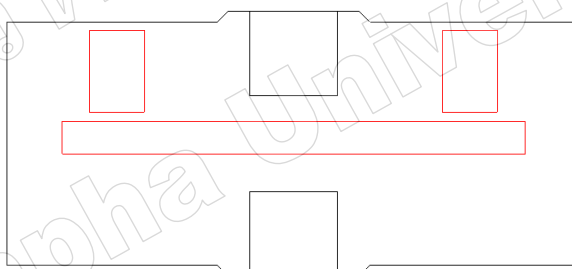
จากการวิเคราะห์โหลดเซลล์รูปแบบใหม่โดยใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ดังหัวข้อที่ 4.7 นั้นได้ทำการขึ้นรูปโลหะใหม่ที่ใช้สแตนเลส (Stainless) เป็นวัสดุ โดยมีขั้นตอนการขึ้นรูปดังต่อไปนี้

- 1) ทำการร่างแบบ (Drawing) ไว้ให้เหมือนดังรูปที่ 4.66 เพื่อทำการขึ้นรูปตามทีออกแบบไว้
- 2) การขึ้นรูปโลหะรูปแบบใหม่นี้แบ่งการขึ้นรูปเป็น 2 ขั้นตอนได้แก่
 - 2.1) ขึ้นรูปโดยใช้เครื่องมือกลึง (Milling) กัดแท่งสแตนเลสเฉพาะด้านนอกตามขนาดที่กำหนดดังรูปที่ 4.70



รูปที่ 4.70 การกลึงด้วยเครื่องมิลลิ่ง(Milling)

2.2) ขึ้นรูปโลหะโดยใช้เครื่อง Wire Cut หรือการตัดโลหะด้วยไฟฟ้าตัดส่วนที่เหลือออกให้ตรงกับรูปแบบที่ต้องการ



รูปที่ 4.71 ลักษณะการขึ้นรูปของโหลดเซลล์

จากรูปที่ 4.71 เส้นสีดำคือส่วนใช้เครื่องมิลลิ่ง(Milling) ในการกัดโลหะให้ได้รูปทรงเส้นสีแดงคือส่วนใช้เครื่อง Wire Cut ในการตัดเอาโลหะออก

เครื่อง Wire Cut จัดเป็นเครื่องจักรประเภทเดียวกับ เครื่อง EDM แต่เปลี่ยนจากการใช้อิเล็กโทรดเป็นตัวตัดเฉือนชิ้นงานมาใช้ลวดเป็นตัวตัดให้ได้รูปร่างตามต้องการในแนวตั้งเครื่อง Wire cut เป็นเครื่องที่ทำงานด้วยความเที่ยงตรงขนาดสูงมาก สามารถควบคุมขนาดได้เล็กกว่า 5 ไมครอน เนื่องจากมีค่าใช้จ่ายสูงในการทำชิ้นงานจึงเหมาะกับงานที่ต้องการความเที่ยงตรงสูงเครื่อง NC และ CNC (Numerical Control and Computerized Numerical Control)



รูปที่ 4.72 Wire Cut Machine

3) โหลดเซลล์ตัวใหม่ที่ขึ้นรูปเสร็จแล้ว



รูปที่ 4.73 โหลดเซลล์ตัวใหม่

4.9 การติดตั้งสเตรนเกจ(Strain Gauge)ของโหลดเซลล์หลังจากการปรับปรุงทางด้านกายภาพ

จากหัวข้อที่ 4.5เรายังคงใช้รูปแบบและระดับต่างๆของสเตรนเกจ (Strain Gauge) เหมือนเดิมเนื่องจากข้อกำหนดและวิธีการเลือกใช้อย่างคงเหมือนจึงไม่ต้องทำการวิเคราะห์เพื่อหา ระดับของสเตรนเกจ(Strain Gauge) ตัวใหม่มาแทนที่ โดยการติดตั้งสเตรนเกจ (Strain Gauge) ของ โหลดเซลล์หลังจากการปรับปรุงทางด้านกายภาพมีขั้นตอนการติดตั้งดังต่อไปนี้

- 1) ขัดผิวของวัสดุตรงตำแหน่งที่ต้องการติดสเตรนเกจ (Strain Gauge) โดยขัดเป็นวงกลมรอบๆ ให้ละเอียดและดูราบเรียบมากที่สุด

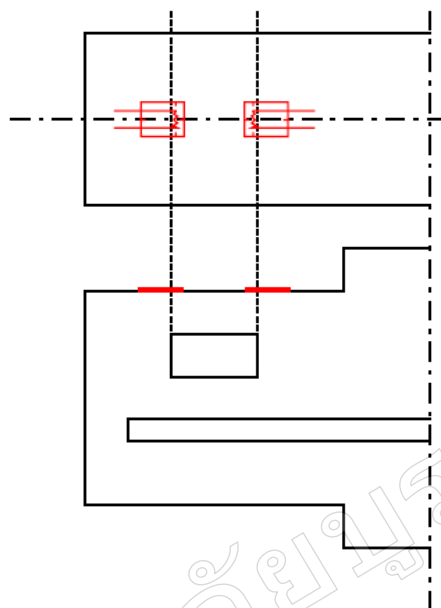


รูปที่ 4.74 การขัดสแตนเลส(Stainless)

- 2) วัดระยะตำแหน่งที่ต้องการจะติดสเตรนเกจ (Strain Gauge) และกำหนดตำแหน่งไว้ด้วยปากกาโดยวัดระยะห่างที่ติดมุมเข้ามาเป็น 1 เท่าของความหนาแน่นด้านบนของโหลดเซลล์ดังรูปที่ 4.76

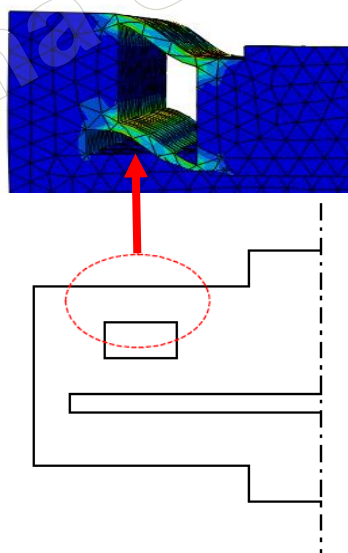


รูปที่ 4.75 วางตำแหน่ง



รูปที่ 4.76 วิธีการวางสเตรนเกจ(Strain Gauge)

การวางแบบของสเตรนเกจ (Strain Gauge) ลักษณะนี้เนื่องจากการเสียรูปของโหลดเซลล์เมื่อให้กำลังแล้วจะมีการเสียรูปเฉียงลงทำให้ในส่วนด้านเสียรูปตรงกลางไม่เกิดประสิทธิผลจึงต้องติดสเตรนเกจ(Strain Gauge)ก่อนออกมาด้านนอกดังรูปที่ 4.77



รูปที่ 4.77 ลักษณะการเสียรูปของโหลดเซลล์

- 3) นำกาวที่ใช้สำหรับติดสเตรนเกจ (Strain Gauge) โดยเฉพาะติดสเตรนเกจ (Strain Gauge) เท่านั้นและเพื่อป้องกันอุปสรรคจากภายนอกจึงต้องติดเทปกาวทับ สเตรนเกจ (Strain Gauge) ไว้

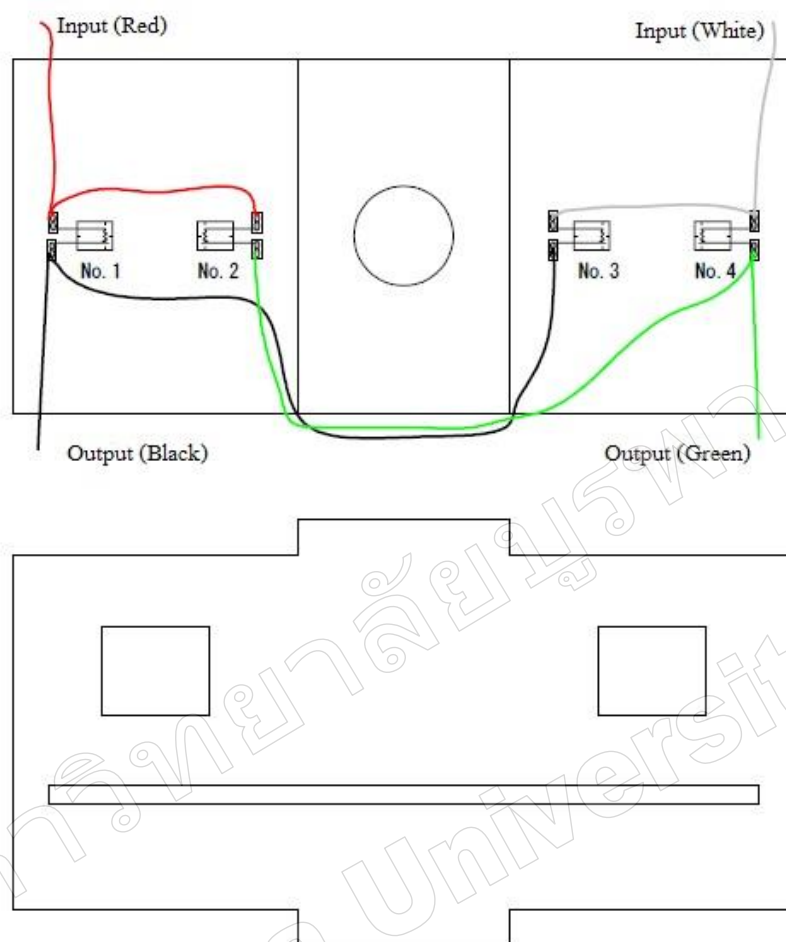


รูปที่ 4.78 กาวสำหรับติดสเตรนเกจ (Strain Gauge)



รูปที่ 4.79 ติดเทปกาวทับ

- 4) การต่อวงจรของสเตรนเกจ (Strain Gauge) นั้นยังคงต่อดั้ววงจรบริดจ์เดิม โดยสเตรนเกจ(Strain Gauge)รับความเค้นอัด 2ตัวสเตรนเกจ(Strain Gauge)รับความเค้นดึง2ตัวดังรูปที่ 4.80



รูปที่ 4.80 การตีดวงจร

- 5) สายไฟสำหรับต่อวงจรไฟฟ้าเข้ากับโพลดเซลล์ที่ดีควรมีชนิด (Shield) ตัวสะท้อนสัญญาณที่ป้องกันไม่ให้สัญญาณจากภายนอกเข้าถึงได้



รูปที่ 4.81 การป้องกันสัญญาณจากภายนอก

4.10 การทดสอบประสิทธิภาพของโพลีเซลล์หลังจากการปรับปรุงทางด้านกายภาพ

จากหัวข้อที่ 4.9 เมื่อติดตั้งสเตรนเกจ (Strain Gauge) เสร็จสิ้นขั้นตอนต่อมาคือการทดสอบประสิทธิภาพของโพลีเซลล์หลังจากการปรับปรุงทางด้านกายภาพ

การทดสอบนั้นเราได้ทดสอบเหมือนกับหัวข้อที่ 4.5 คือการต่อวงจรบริดจ์ของโพลีเซลล์เข้ากับ Multifunction Data Acquisition (DAQ) และคอมพิวเตอร์ดังรูปที่ 4.82 แต่เนื่องจากได้มีอุปสรรคเกิดขึ้นเพราะการแสดงผลจากโปรแกรม นั้นแสดงผลออกมาไม่ละเอียดพอซึ่งสาเหตุนี้เกิดจากแรงดันไฟฟ้า (Volt) ที่ออกมามีค่าต่ำมากทำให้ Multifunction Data Acquisition (DAQ) แสดงผลการทดสอบที่รับได้ไม่ดี ทำให้ผู้ปฏิบัติการไม่สามารถจับบันทึกค่าที่แท้จริงที่เกิดขึ้นกับโพลีเซลล์ได้



รูปที่ 4.82 การต่อวงจรบริดจ์เข้ากับ Multifunction Data Acquisition (DAQ)

ดังนั้นจึงมีวิธีการเพิ่มวงจรไฟฟ้าที่แสดงผลได้ละเอียดมากยิ่งขึ้น โดยมีชิ้นส่วนอุปกรณ์นี้คือ “แอมพลิไฟเออร์ (Amplifier)”

แอมพลิไฟเออร์ (Amplifier) คือวงจรไฟฟ้าขยายสัญญาณและนอกจากจะขยายสัญญาณแล้วยังทำให้แรงดันไฟฟ้า (Volt) ที่มีแรงดันน้อยให้กว้างมากขึ้นเพื่อที่ Multifunction Data Acquisition (DAQ) จะส่งสัญญาณไปยังการแสดงผลของโปรแกรมได้ชัดเจนขึ้นซึ่งเครื่องแอมพลิไฟเออร์

(Amplifier) ไม่มีรูปแบบตายตัวมักจะถูกสร้างตามรูปแบบการใช้งานที่ต่างกันเช่นแอมพลิไฟเออร์ (Amplifier) ในเครื่องเล่นซีดี เครื่องขยายเสียงไมค์และลำโพง เป็นต้น

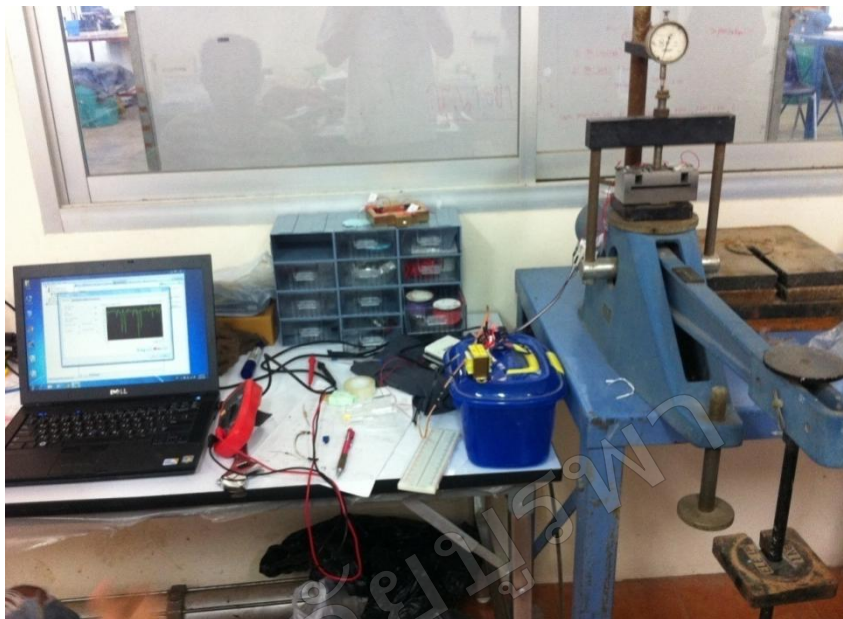
ดังนั้นการศึกษาค้นคว้าและสอบถามผู้เชี่ยวชาญจากที่ต่างๆเพื่อหารูปแบบแอมพลิไฟเออร์ (Amplifier) ที่เหมาะสมกับการขยายสัญญาณเพื่อให้ Multifunction Data Acquisition (DAQ) สามารถอ่านค่าแรงดันไฟฟ้าจาก ตัวโหลดเซลล์ ได้ จึงเริ่มขึ้นและแสดงให้เห็นในรูปที่ 4.83 ซึ่งวงจรไฟฟ้าสีแดงคือแอมพลิไฟเออร์ (Amplifier) หากวงจรไฟฟ้านี้ยังไม่มีตัวต้านทาน แล้วจะมีแรงดันไฟฟ้าไหลผ่านอยู่ที่ 10V แต่หากนำตัวต้านทานใส่แอมพลิไฟเออร์ (Amplifier) แล้วกระแสก็จะไหลผ่านอยู่ 5 V ในที่นี้เราใช้ค่าความต้านทาน 300 โอห์ม



รูปที่ 4.83 แอมพลิไฟเออร์ (Amplifier) และหม้อไฟ VIC Transformer

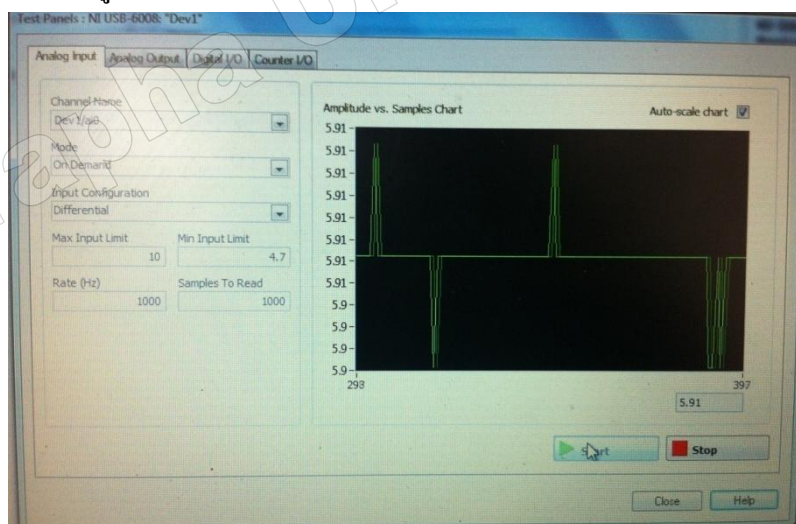
4.10.1 ขั้นตอนการทดสอบ

- 1) ทำการต่อวงจรโดยรวมทั้งหมดดังรูปที่ 4.84 โดยแอมพลิไฟเออร์ (Amplifier) และหม้อไฟ VIC Transformer จะถูกเชื่อมต่อระหว่างวงจรบริดจ์ของสเตรนเกจ (Strain Gauge) และ Multifunction Data Acquisition (DAQ)



รูปที่ 4.84 ขั้นตอนการทดสอบ

- 2) วางโหลดเซลล์ไว้กับเครื่อง Consolidometer โดยการทดสอบนี้ได้ใช้อัตราส่วนของคาน Consolidometer ทดระยะที่ 1:10
- 3) ให้น้ำหนักหรือกำลังการรับแรงกับโหลดเซลล์และอ่านค่าจากโปรแกรม NI MAX ในคอมพิวเตอร์ดังรูปที่ 4.85



รูปที่ 4.85 การประมวลผลของโปรแกรม NI MAX

จากการทดสอบพบว่าต้องใช้การทดสอบสูงสุดที่ 4000 N เท่านั้นเนื่องจากโหลดเซลล์ที่ใช้ขึ้นรูปขึ้นรูปยากและใช้เวลานานในการขึ้นรูปหากใช้น้ำหนักในการทดสอบ 5000 N หรือใกล้เคียงอาจทำให้โหลดเซลล์เสียรูปถาวรได้ และคูแรงดันไฟฟ้า (Volt) ที่เปลี่ยนไปต้องไม่เกิน 10V ดังนั้น

ต้องปรับเปลี่ยนความต้านทานใน แอมพลิฟายเออร์ (Amplifier) เพื่อจะไม่ทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้า (Volt) เกิน 10V ในที่นี้เราใช้ค่าความต้านทาน 300 โอห์ม

ตารางบันทึกข้อมูลตัวอย่างขณะทำการเพิ่มน้ำหนัก

Load(N)	Volt(V)
0	4.79
99.8658	4.89
198.2601	4.99
296.8506	5.09
395.4411	5.2
490.8924	5.3
590.7582	5.4
689.1525	5.51
787.743	5.61
886.3335	5.71
981.7848	5.81
1081.651	5.91
1180.045	6
1278.635	6.09
1377.226	6.21
1472.677	6.29
1572.543	6.39
1670.937	6.51
1769.528	6.62
1868.118	6.74
1964.943	6.85
2064.809	6.96
2163.203	7.07
2261.794	7.18
2360.384	7.29
2455.835	7.39
2555.701	7.49
2654.096	7.6
2752.686	7.7
2851.277	7.81
2946.728	7.91
3046.594	8
3144.988	8.11
3243.578	8.21
3342.169	8.32
3437.62	8.42
3537.486	8.52

3635.88	8.61
3734.471	8.72
3833.061	8.81
3929.199	8.91

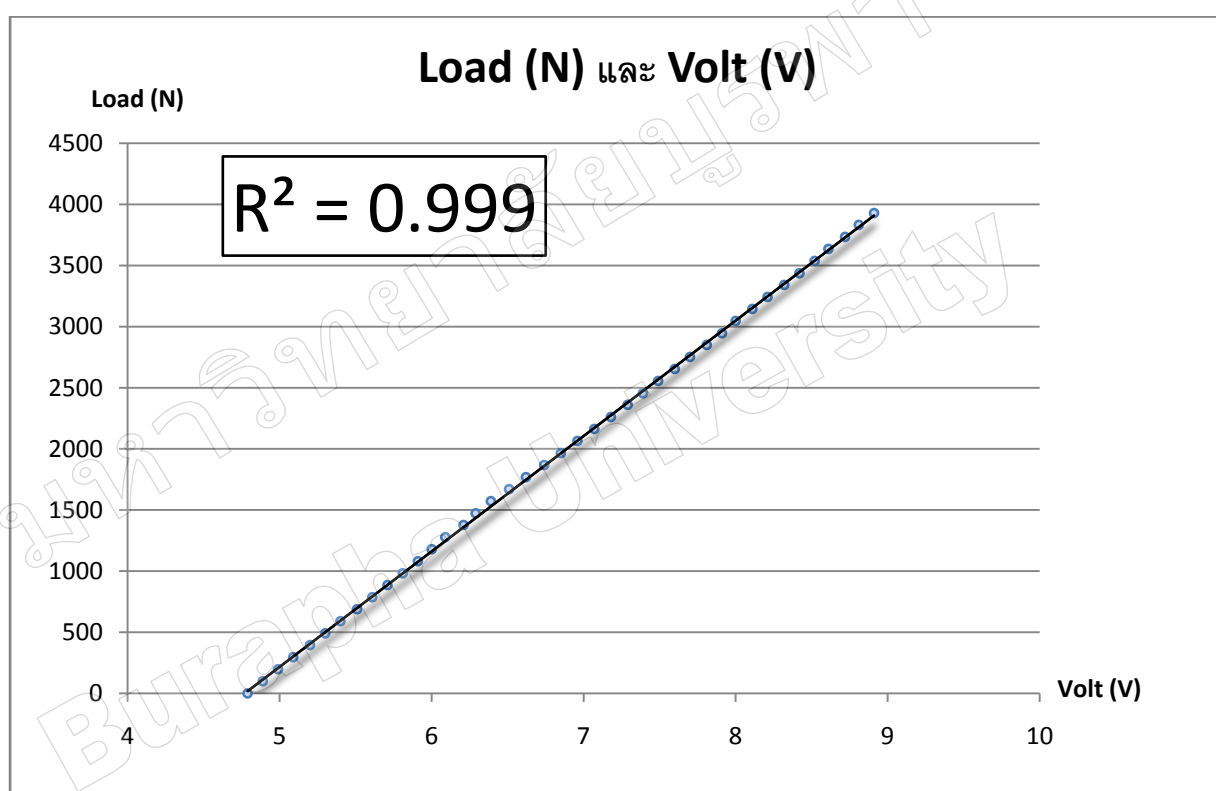
ตารางที่ 4.10 ตารางบันทึกข้อมูลของตัวอย่างการเพิ่มน้ำหนัก

ตารางบันทึกข้อมูลตัวอย่างขณะทำการลดน้ำหนัก

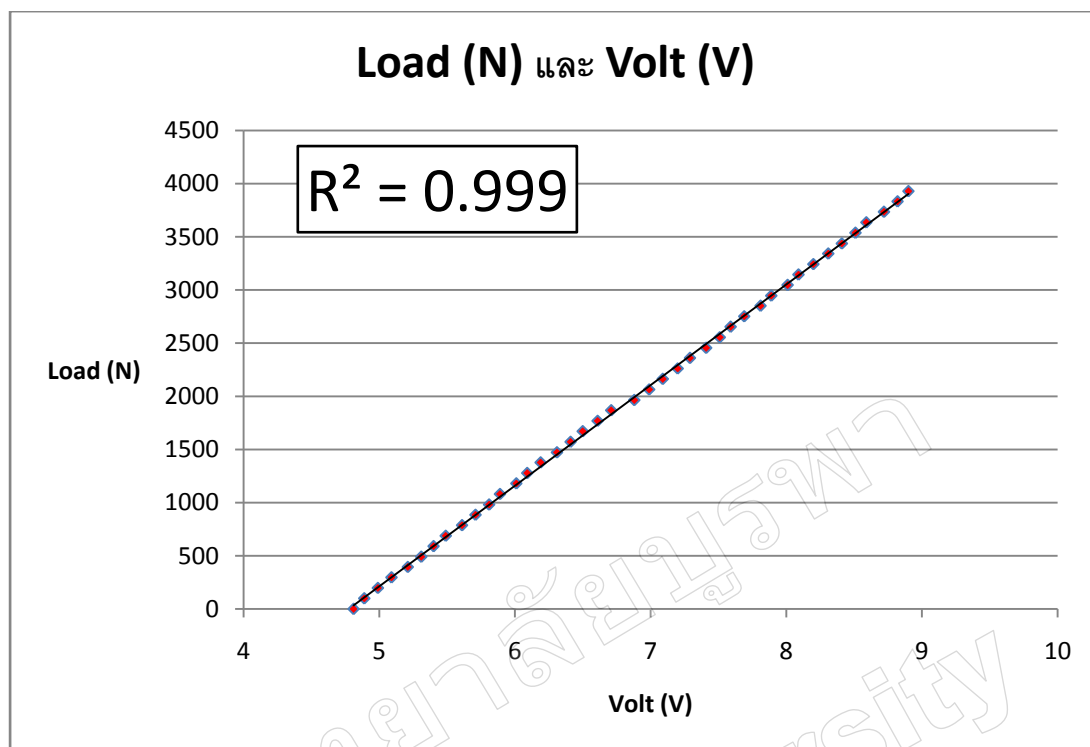
Load(N)	Volt(V)
0	4.81
99.8658	4.89
198.2601	4.99
296.8506	5.09
395.4411	5.21
490.8924	5.31
590.7582	5.4
689.1525	5.49
787.743	5.61
886.3335	5.71
981.7848	5.81
1081.651	5.89
1180.045	6.01
1278.635	6.09
1377.226	6.19
1472.677	6.31
1572.543	6.41
1670.937	6.5
1769.528	6.61
1868.118	6.71
1964.943	6.88
2064.809	6.99
2163.203	7.09
2261.794	7.2
2360.384	7.29
2455.835	7.41
2555.701	7.51
2654.096	7.59
2752.686	7.69
2851.277	7.81
2946.728	7.89
3046.594	8.01
3144.988	8.09
3243.578	8.2
3342.169	8.31

3437.62	8.41
3537.486	8.51
3635.88	8.59
3734.471	8.72
3833.061	8.82
3929.199	8.9

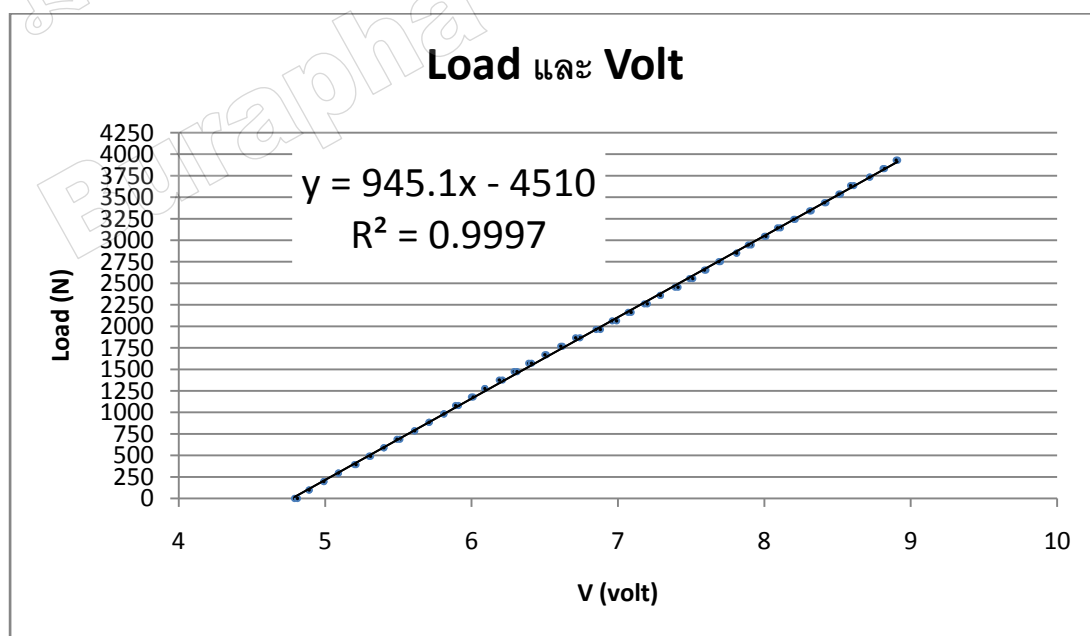
ตารางที่ 4.11 ตารางบันทึกข้อมูลของตัวอย่างการลดน้ำหนัก



รูปที่ 4.86 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรง (Load) และแรงดันไฟฟ้า (Volt) ของตัวอย่างขณะทำการเพิ่มน้ำหนัก



รูปที่ 4.77 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรง(Load) และแรงดันไฟฟ้า(Volt) ของตัวอย่างขณะทำการเพิ่มน้ำหนัก



รูปที่ 4.78 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรง(Load) และแรงดันไฟฟ้า(Volt)ของตัวอย่างการเพิ่มน้ำหนักและลดน้ำหนัก

จากการทดสอบของโพลีเซลล์ได้ทำ “การสอบเทียบ (Calibrate)” ซึ่งเป็นกราฟเส้นแนวโน้มน้ำแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับน้ำหนัก (Load) และค่าแรงดันไฟฟ้า (Volt) ที่เปลี่ยนไปในทุกๆ 100 N ซึ่งเส้นแนวโน้มน้ำสามารถบ่งบอกถึงค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานและสมการเชิงเส้นที่เกิดขึ้นว่ามีความเที่ยงตรงและสามารถเชื่อถือได้มากน้อยเพียงใด

จากผลของการทดสอบก็สามารถสรุปได้ว่าผลทดสอบที่เกิดขึ้นมีความเที่ยงตรงและน่าเชื่อถือได้เพราะว่าจากสมการเส้นแนวโน้มน้ำรูปที่ 4.86 และรูปที่ 4.87 มีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานใกล้เคียงกันและเส้นแนวโน้มน้ำของทั้งสองรูปมีแนวใกล้เคียงกันดังรูปที่ 4.88 นอกจากนี้ยังสามารถพิสูจน์ได้จากการหาความชันของเส้นแนวโน้มน้ำรูปที่ 4.86 และรูปที่ 4.87 ได้ จาก

$$\text{สมการ} \quad \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} \quad (4.1)$$

นำค่าจากตัวอย่างการเพิ่มน้ำหนักแทนในสมการ (4.1) จะได้

$$\frac{199.2601 - 99.8658}{4.99 - 4.89} = 998.943$$

นำค่าจากตัวอย่างการลดน้ำหนักแทนในสมการ (4.1) จะได้

$$\frac{689.1525 - 590.7582}{5.49 - 5.4} = 1003.27$$

จากตัวอย่างของการหาค่าความชันทั้งข้อมูลการเพิ่มน้ำหนักและการลดน้ำหนักพบว่ามีความใกล้เคียงกันประกอบกับปัจจัยข้างต้นแล้วทำให้สามารถสรุปได้ว่าการสอบเทียบ (Calibrate) ของข้อมูลชุดนี้มีความเที่ยงตรงและน่าเชื่อถือได้พอสมควร

4.10.2 การวิเคราะห์และประมวลผล

จากการอ่านค่าในการทดสอบโพลีเซลล์ของโปรแกรม NI MAX เราพบว่าในโปรแกรมมีสัญญาณรบกวนอยู่หรือที่เรียกว่า Noise

Noise เป็นสิ่งที่ไม่ต้องการของพลังงานไฟฟ้าและแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งจะลดคุณภาพของสัญญาณและข้อมูล Noise ปรากฏในระบบดิจิทัล และอะนาล็อก และสามารถมีผลกับไฟล์และการสื่อสารของไฟล์ทั้งหมด รวมถึงข้อความ โปรแกรม ภาพ และเสียงเป็นต้น

ดังรูปที่ 4.85 พบว่า Noise ที่เกิดขึ้นจากการแสดงผลของโปรแกรม NI MAX มีค่าอยู่ที่ 5.917 ถึง 5.907 โวลต์ (V) ซึ่งหมายความว่าในการทดสอบน้ำหนักสูงสุดที่ 4000 N จะเกิดความคลาดเคลื่อนที่ 0.01V ดังนั้นจึงจำเป็นต้องทำการหาความคลาดเคลื่อนของโหลดเซลล์ที่รับภาระ 4000 N นี้ว่าเกิดความคลาดเคลื่อนมากน้อยเพียงใดจากสูตรของการสอบเทียบ (Calibrate) ดังรูปที่ 4.88 โดยจากสมการ

$$y = 945.1x - 4510 \quad (4.2)$$

นำค่าความคลาดเคลื่อนของแรงดันไฟฟ้า (V) $x = 0.01$ แทนในสมการที่ (4.2)

$$\text{จะได้ } y = 9.451 \text{ N}$$

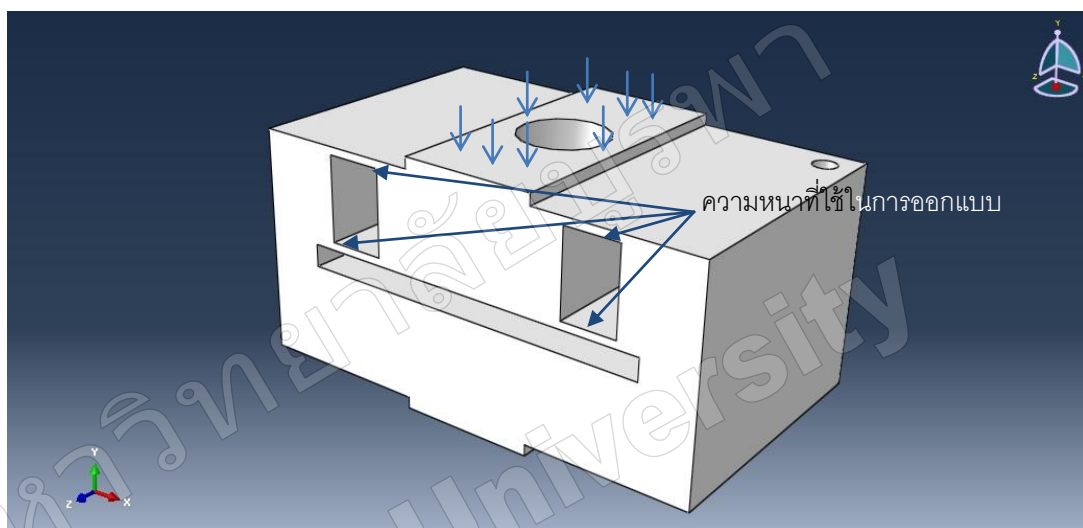
ดังนั้น โหลดเซลล์ที่รับภาระ 4000 N จะเกิดความคลาดเคลื่อนเท่ากับ 9.451 N

ซึ่งจากความคลาดเคลื่อนข้างต้นเป็นค่าความคลาดเคลื่อนที่ไม่มากที่เกิดในวงจรไฟฟ้าแต่ความเป็นจริงสามารถลดปัญหาของ Noise ได้อีกจากหลายๆปัจจัยเช่น การเดินสายดินของกระแสไฟฟ้า ณ ที่ใช้ในอาคารหรือสถานที่นั้นๆ หรือ การทดสอบในห้องปฏิบัติการที่สามารถทดสอบโหลดเซลล์ได้โดยเฉพาะ, การใช้สายไฟที่มีฉนวนป้องกัน (Shield) ในการต่อเข้ากับวงจรไฟฟ้าและโหลดเซลล์ เป็นต้น นอกจากนี้ในวงจรไฟฟ้า ยังสามารถปรับปรุง ได้โดยการใช้ตัวกรองสัญญาณรบกวนซึ่งจะได้นำมาใช้พัฒนาปรับปรุงต่อไป

4.11 การประยุกต์ใช้

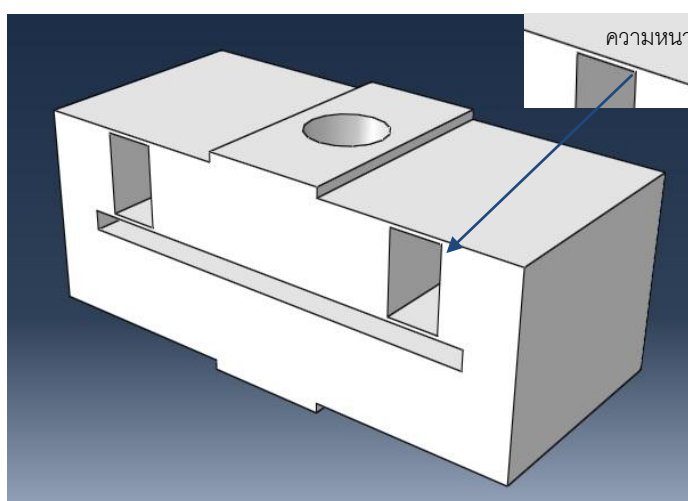
ในการออกแบบโหลดเซลล์ครั้งนี้ได้ทำการออกแบบไว้ 6 ตัวโดยจะใช้น้ำหนักของแรงที่เกิดเป็นเกณฑ์ในการออกแบบดังนี้ คือ 3kN, 5kN, 7.5kN, 10kN, 15kN และ 20kN

- 1) ผลจากการวิเคราะห์ไฟไนต์อีเลเมนต์โดยใช้โปรแกรมทางไฟไนต์อีเลเมนต์ได้ผลดังนี้คือ



รูปที่ 4.89 การประยุกต์ใช้

- 1.1) ถ้าใช้แรงกด 3 kN และใช้ความหนา 1.1 mm จะได้ผลดังนี้



รูปที่ 4.90 โหลดเซลล์ความหนา 1.1 mm

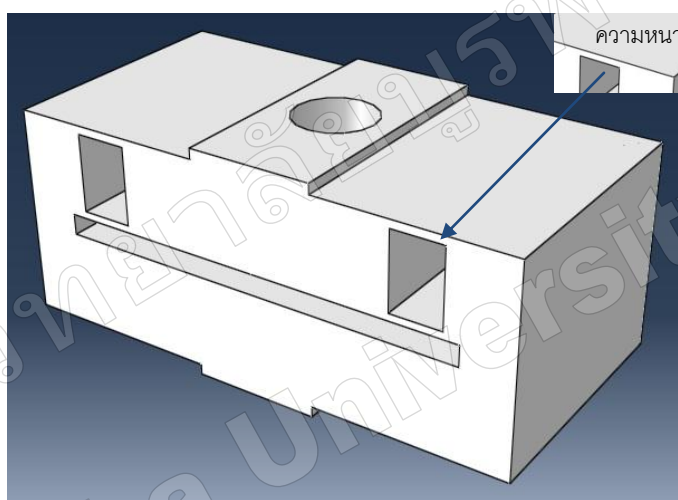
ความเครียดดึงสูงสุด (Tensile Strain Maximum) เท่ากับ 0.00092 คิดเป็น 0.092%

ความเครียดอัดสูงสุด (Compressive Strain Maximum) เท่ากับ 0.00099 คิดเป็น 0.099%

และ ความเค้นดึงสูงสุด (Tensile Stress Maximum) เท่ากับ 192MPa

ความเค้นอัดสูงสุด (Compressive Stress Maximum) เท่ากับ 201.8MPa

1.2) ถ้าใช้แรงกด 5kN และใช้ความหนา 1.6mm จะได้ผลดังนี้



รูปที่ 4.91 โหลดเซลล์ความหนา 1.6 mm

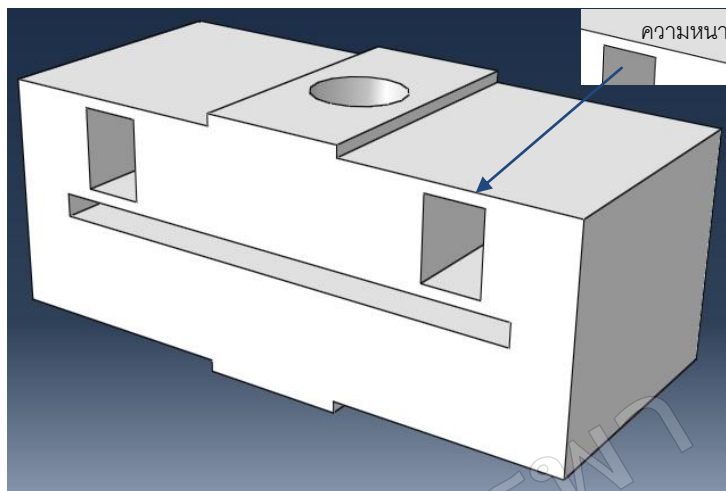
ความเครียดดึงสูงสุด (Tensile Strain Maximum) เท่ากับ 0.001016 คิดเป็น 0.101%

ความเครียดอัดสูงสุด (Compressive Strain Maximum) เท่ากับ 0.001061 คิดเป็น 0.106%

และความเค้นดึงสูงสุด (Tensile Stress Maximum) เท่ากับ 211.4MPa

ความเค้นอัดสูงสุด (Compressive Stress Maximum) เท่ากับ 218.4MPa

1.3) ถ้าใช้แรงกด 7.5kN และใช้ความหนา 2mm จะได้ผลดังนี้



รูปที่ 4.92 โหลดเซลล์ความหนา 2 mm

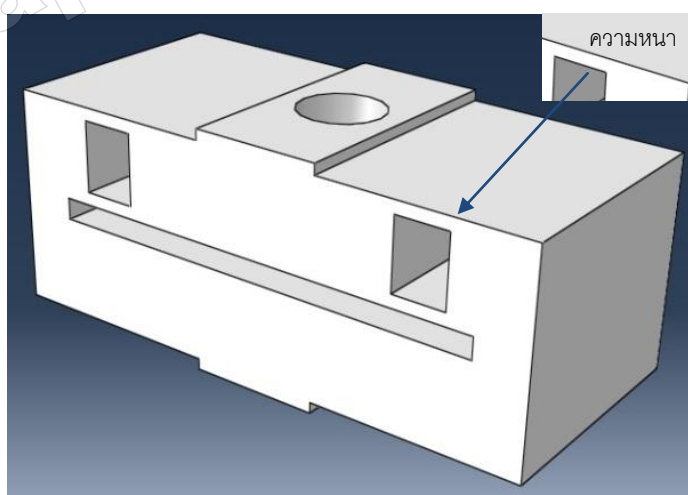
ความเครียดดึงสูงสุด (Tensile Strain Maximum) เท่ากับ 0.000959 คิดเป็น 0.0959%

ความเครียดอัดสูงสุด (Compressive Strain Maximum) เท่ากับ 0.001 คิดเป็น 0.1%

และ ความเค้นดึงสูงสุด (Tensile Stress Maximum) เท่ากับ 196.5MPa

ความเค้นอัดสูงสุด (Compressive Stress Maximum) เท่ากับ 199.3MPa

1.4) ถ้าใช้แรงกด 10kN และใช้ความหนา 2.4mm จะได้ผลดังนี้



รูปที่ 4.93 โหลดเซลล์ความหนา 2.4 mm

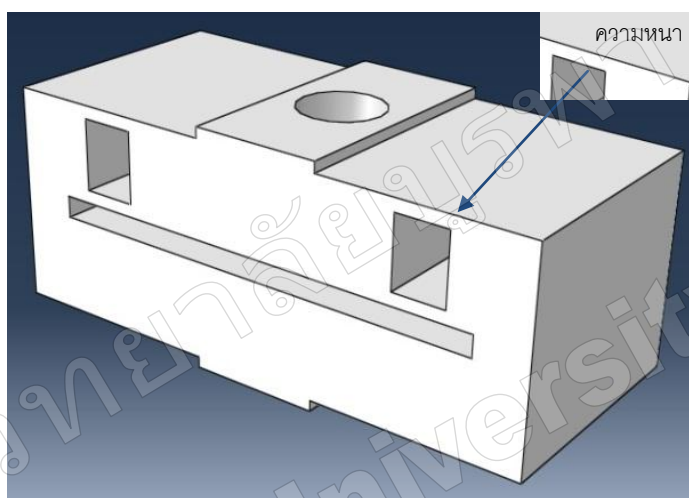
ความเครียดดึงสูงสุด (Tensile Strain Maximum) เท่ากับ 0.0009296 คิดเป็น 0.09296%

ความเครียดอัดสูงสุด (Compressive Strain Maximum) เท่ากับ 0.0009983 คิดเป็น 0.0998%

และความเค้นดึงสูงสุด (Tensile Stress Maximum) เท่ากับ 197.6MPa

ความเค้นอัดสูงสุด (Compressive Stress Maximum) เท่ากับ 197.5MPa

1.5) ถ้าใช้แรงกด 15 kN และใช้ความหนา 3 mm จะได้ผลดังนี้



รูปที่ 4.94 โหลดเซลล์ความหนา 3 mm

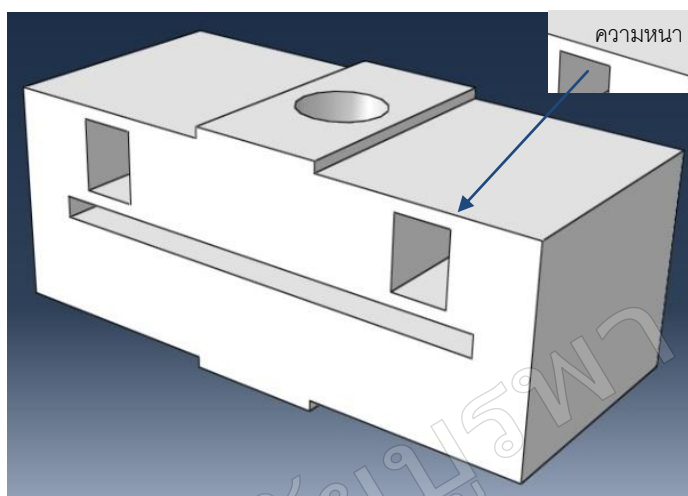
ความเครียดดึงสูงสุด (Tensile Strain Maximum) เท่ากับ 0.0009485 คิดเป็น 0.09485%

ความเครียดอัดสูงสุด (Compressive Strain Maximum) เท่ากับ 0.001018 คิดเป็น 0.1018%

และความเค้นดึงสูงสุด (Tensile Stress Maximum) เท่ากับ 193.5 MPa

ความเค้นอัดสูงสุด (Compressive Stress Maximum) เท่ากับ 200.5 MPa

1.6) ถ้าใช้แรงกด 20kN และใช้ความหนา 3.5 mm จะได้ผลดังนี้



รูปที่ 4.95 โหลดเซลล์ความหนา 3.5 mm

ความเครียดดึงสูงสุด (Tensile Strain Maximum) เท่ากับ 0.0009744 คิดเป็น 0.09744%

ความเครียดอัดสูงสุด (Compressive Strain Maximum) เท่ากับ 0.001041 คิดเป็น 0.1041%

และความเค้นดึงสูงสุด (Tensile Stress Maximum) เท่ากับ 198.6MPa

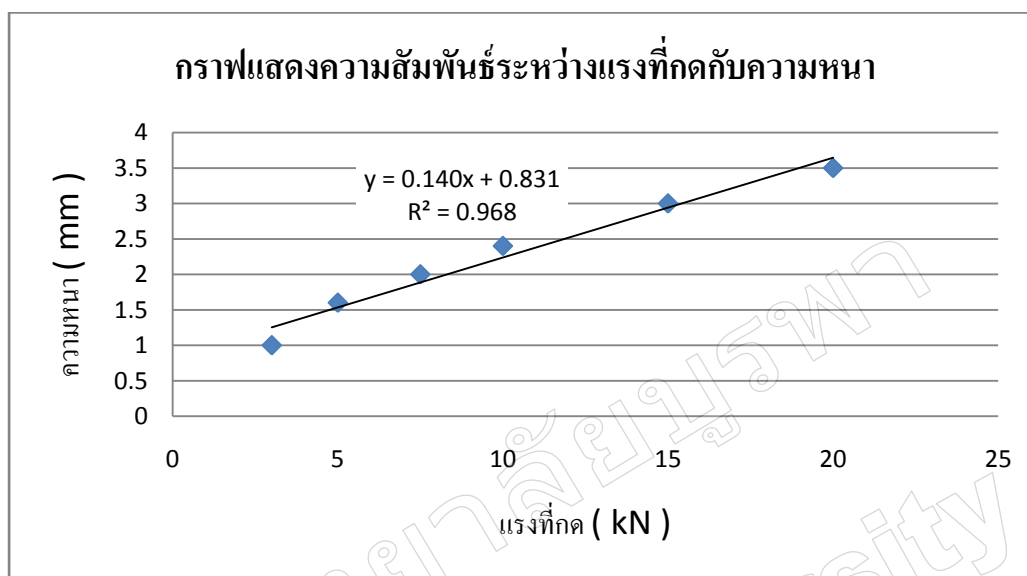
ความเค้นอัดสูงสุด (Compressive Stress Maximum) เท่ากับ 211.5 MPa

2) จากโหลดเซลล์ที่ออกแบบสามารถสรุปได้ดังนี้

แรงที่กด (kN)	ความหนา (mm)
3	1
5	1.6
7.5	2
10	2.4
15	3
20	3.5

ตารางที่ 4.12 ความสัมพันธ์แรงที่กด (kN) และความหนา (mm)

จากข้อมูลข้างต้นสามารถนำมาเขียนกราฟแล้วสร้างเป็นสมการในการออกแบบโดย
กำหนดให้ แรงที่กดเป็นแกน x และความหนาเป็นแกน y



จากกราฟความสัมพันธ์ทำให้ได้สมการ $y = 0.1407x + 0.8312$ ที่ใช้เป็นแนวทางในการ
ออกแบบ
อย่างไรก็ตามสมการที่ได้นั้นก็มีข้อจำกัดในการใช้ออกแบบโพลีเซลล์ดังนี้

- 1.วัสดุที่ใช้ในการออกแบบต้องเป็นสแตนเลส เกรด SUS304 เท่านั้น
- 2.รูปแบบของโพลีเซลล์ต้องมีลักษณะเดียวกับตัวที่ออกแบบในโครงการนี้เท่านั้น

บทที่ 5

สรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุป

การออกแบบโหลดเซลล์โดยวิธีไฟในคัลเลเมนต์สามารถนำไปใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพ รูปแบบเช่น นำไปใช้ในเครื่องชั่งต่างๆ และยังมาสามารถนำมาใช้ในห้องปฏิบัติการเพื่อการเรียนรู้ได้อีกด้วยสำหรับปริยญาณพนธ์เล่มนี้ได้ทำการออกแบบโหลดเซลล์ที่มีความสามารถในการรับน้ำหนัก 5 kN ซึ่งสามารถสรุปได้ดังนี้

1. การออกแบบรูปแบบของโหลดเซลล์ต้องทำการออกแบบให้สามารถใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งรูปแบบที่ทำการออกแบบในตอนแรกนั้นพบว่ามีปัญหาในตำแหน่งที่จะทำการติดตั้งสเตรนเกจเนื่องจากว่าไม่สามารถที่จะติดตั้งได้เพราะว่าติดกับฐานรับแรงซึ่งมีพื้นที่ไม่พอสำหรับติดตั้งสเตรนเกจ และหากทำการติดตั้งด้านข้างก็จะไม่ใช่ตำแหน่งที่เกิดความเค้นและความเครียดสูงสุดซึ่งจะส่งผลให้กระแสไฟฟ้าที่ออกมาไม่เที่ยงอีกทั้งวัสดุที่ใช้นั้นมีความยืดหยุ่นต่ำทำให้เสียรูปได้ง่าย จึงเป็นเหตุให้ต้องทำการออกแบบรูปแบบโหลดเซลล์ใหม่ที่สามารถติดตั้งชุดสเตรนเกจได้และเลือกใช้วัสดุที่มีความยืดหยุ่นสูงเพื่อให้ได้โหลดเซลล์ที่มีคุณภาพ

2. โหลดเซลล์ที่ออกแบบโดยวิธีไฟในคัลเลเมนต์สามารถเชื่อถือได้ ซึ่งเห็นได้จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดกับแรงดันไฟฟ้า เมื่อเพิ่มแรงไปเรื่อยๆจนถึง 4kNปรากฏว่ากราฟมีลักษณะเป็นเส้นตรงและหลังจากการลดแรง กราฟก็กลับมาทับเส้นเดิมแสดงว่าโหลดเซลล์ยังไม่ถึงจุดครากและตำแหน่งที่ติดตั้งสเตรนเกจเกิดความเค้นสูงสุดตามที่ได้ออกแบบไว้

3. การใช้งานจริงของโหลดเซลล์ที่ทำการออกแบบพบว่ามีค่าสัมประสิทธิ์การกำหนด(r^2) เท่ากับ 0.9997 แสดงว่ามีความแม่นยำสูงเพราะว่าเข้าใกล้ 1 มาก

4. การใช้งานโหลดเซลล์พบว่ามีสัญญาณรบกวนเท่ากับ 0.025% เมื่อเทียบกับน้ำหนักกด 4kN ซึ่งสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นนี้อาจมาจากหลายปัจจัย เช่น กระแสไฟฟ้าที่มาจากห้องการ

ทดสอบ สายไฟฟ้าที่ไม่มีตัวป้องกันสัญญาณอย่างไรก็ตามสัญญาณรบกวนนี้ทำให้ลดลงได้โดยใช้ วงจรกรองสัญญาณซึ่งจะได้ทำการพัฒนาต่อไป

5. สามารถใช้สมการ $y = 0.1407x + 0.8312$ ในการออกแบบโดยที่รูปแบบโพลีเซลล์ต้อง เป็นรูปแบบเดียวกับตัวที่ออกแบบไว้แล้วและต้องเป็นสแตนเลส เกรด SUS304 เท่านั้น

5.2 ข้อเสนอแนะ

ข้อเสนอแนะและแนวทางการพัฒนาโพลีเซลล์ต่อไปในอนาคตมีดังต่อไปนี้

- 1) ค่าที่ใช้ในการออกแบบโดยระเบียบไฟในต์เอลิเมนต์ควรใช้ค่า Young Modulus และ Poisson's Ratio จากการทดสอบจาก Material testing หรืออาจจะเป็นการใช้เครื่อง Universal Test Machine (UTM) ในการหา เพื่อจะได้ค่าที่มีความเที่ยงตรงและถูกต้องมากขึ้น
- 2) ป้องกันสัญญาณรบกวน (Noise) ให้เกิดน้อยที่สุดเพื่อให้ได้ค่าที่มีความแม่นยำมากขึ้น
- 3) โปรแกรมที่ใช้ในการอ่านค่าการทดสอบของโพลีเซลล์ควรใช้โปรแกรม Lab View เพราะว่ามีฟังก์ชันในการเลือกใช้งานได้หลากหลายกว่าและสามารถเรียกดูข้อมูลได้ตามที่ต้องการ อีกทั้งยังมีฟังก์ชันกรองสัญญาณอีกด้วย
- 4) การศึกษาครั้งนี้สามารถนำไปต่อยอดเพื่อสร้างโพลีเซลล์ขนาดต่างๆ ตามความเหมาะสมในการใช้งานเช่น การสร้างโพลีเซลล์ที่มีความสามารถในการรับน้ำหนัก 3 kN, 7.5 kN, 10kN, 15kN และ 20kN เป็นต้น

เอกสารอ้างอิง

สุภกิจ รูปจันทร์. 2547. การศึกษาออกแบบโพลีเมอร์ชนิดคอมโพสิตโดยใช้วิธีการทดลองและระเบียบไฟ-

ไฟไนต์เอลิเมนต์. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล
บัณฑิต มหาวิทยาลัยขอนแก่น.

นายสราวุธ เรื่องกิจตระกูล. 2549. กรณีศึกษารูปทรงของโพลีเมอร์ โดยใช้เทคนิคของไฟไนต์เอ-

ลิเมนต์. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมการวัดคุม
บัณฑิต วิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าคุณทหารลาดกระบัง

เพิ่มศักดิ์ เกตุนาม. 2550. การออกแบบโพลีเมอร์โดยใช้วิธีวิเคราะห์ทางไฟไนต์เอลิเมนต์. ปริญญา

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีการผลิตทางอุตสาหกรรม บัณฑิต
มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

สุนทร กิมฮง. 2542. เครื่องชั่งน้ำหนักแบบบิดราคาของที่ชั่งในตัว. ปริญญาวิศวกรรมศาสตร

มหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า บัณฑิต มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ปราโมทย์ เดชะอำไพ. ไฟไนต์เอลิเมนต์ในงานวิศวกรรม. กรุงเทพฯ: บริษัท วี.พริ้นท์ (1991) จำกัด,
2555.

http://www.engineeringtoolbox.com/young-modulus-d_417.html . วันที่ 1 เมษายน พ.ศ. 2557

http://www.engineeringtoolbox.com/poissons-ratio-d_1224.html . วันที่ 5 เมษายน พ.ศ. 2557

ประวัติการศึกษา

ชื่อ-นามสกุล นายชนคม ศิริวัฒนานนท์

วัน-เดือน-ปี ที่เกิด

29 ธันวาคม 2534

ที่อยู่

301 หมู่ที่ 5 ต.วรรณคร อ.ปัว จ.น่าน 55120

โทร. 081-6475620

ประวัติการศึกษา ปริญญาตรี สาขาวิศวกรรมโยธา หลักสูตร

ปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

มหาวิทยาลัยบูรพา

ชื่อ-นามสกุล นาย

บุญเพชร ปริชารัตนวงศ์

วัน-เดือน-ปี ที่เกิด

1 มกราคม 2534

ที่อยู่

156 หมู่ที่ 1 ต.นาไร่หลวง อ.สองแคว จ.น่าน 55120

โทร. 0901154395

ประวัติการศึกษา ปริญญาตรี สาขาวิศวกรรมโยธา หลักสูตร

ปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

มหาวิทยาลัยบูรพา