

กรณีศึกษาการออกแบบรูปทรงของโหลดเซลล์โดยใช้เทคนิคของไฟไนต์อีลิเมนต์

CASE STUDY OF SHAPE DESIGN OF LOADCELL USING
FINITE ELEMENT METHOD

ศราวุธ เรืองกิจตระการ
SARAVUT REANGKITTAKARN

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมกลการวิบูลย์

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2549

ISBN 974-15-2748-9

**CASE STUDY OF SHAPE DESIGN OF LOADCELL USING
FINITE ELEMENT METHOD**

SARAVUT REANGKITTAKARN

**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING IN INSTRUMENTATION ENGINEERING
SCHOOL OF GRADUATE STUDIES
KING MONKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

2006

ISBN 974-15-2748-9

COPYRIGHT 2006

SCHOOL OF GRADUATE STUDIES

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

หัวข้อวิทยานิพนธ์	กรณีศึกษาการออกแบบรูปทรงของ โหลดเซลล์ โดยใช้เทคนิคของ ไฟไนต์เอลิเมนต์
นักศึกษา	นายสราวุธ เรืองกิจตระการ
รหัสนักศึกษา	46068008
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมการวัดคุม
พ.ศ.	2549
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	รศ.ประภาส อุคคกิมพาน์

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอการออกแบบรูปทรงของโหลดเซลล์โดยใช้เทคนิคของไฟไนต์เอลิเมนต์ การใช้วิธีการทางไฟไนต์เอลิเมนต์ ออกแบบรูปทรงของโหลดเซลล์ และวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างรูปทรงของโหลดเซลล์กับลักษณะของความเครียดที่เกิดขึ้น โดยการวิเคราะห์หาผลทางไฟไนต์เอลิเมนต์ใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ประยุกต์ (COSMOS Simulation Program) ผลที่ได้จากการวิเคราะห์ จะนำมา ประยุกต์ในการหาค่าตำแหน่งที่เหมาะสมในการติดตั้งตัวสเตรนเกจ เพื่อที่จะให้ได้ โหลดเซลล์ที่มีคุณภาพ จากการทดลองแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพที่ดีของเทคนิคที่นำเสนอ

Thesis Title Case Study of Shape Design of Load Cell Using Finite Element Method
Student Mr. Saravut Reaugkittakarn
Student ID. 46068008
Degree Master of Engineering
Program Instrumentation Engineering
Year 2006
Thesis Advisor Assoc.Prof Prapart Ukakimapurn

ABSTRACT

In this paper, the application of finite element method to design the shape of load cell as an illustrative case study is described. The relationship between the various shapes of load cell and their stress characteristic were analyzed by COSMOS simulation program. The results obtained from the proposed analysis can be applied to determine the appropriate position of strain gauges for good quality load cell. The experimental results show the good efficiency of the proposed technique.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จได้ด้วยความกรุณาจากอาจารย์ที่ปรึกษา รศ. ประภาส อุคคกิมานันท์ , ผศ. ไสว พงศ์สวัสดิ์ และ ผศ.ดร. อัมพวัน ใจกล้า ที่ให้ความช่วยเหลือ ให้คำชี้แนะช่วยแก้ปัญหา ตลอดจนให้ความรู้และประสบการณ์ที่ดีแก่ข้าพเจ้า

ขอขอบพระคุณ กรรมการสอบหัวข้อและ โครงร่างวิทยานิพนธ์ที่ได้กรุณาให้คำแนะนำ ตลอดจนข้อชี้แนะ จนในที่สุดทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงได้

ขอขอบคุณ ภาควิชาวิศวกรรมการวัดคุมและคณะอาจารย์ที่ให้ใช้เครื่องมือและสถานที่ตลอดทั้ง คอยให้คำปรึกษาที่ดีตลอดมา

ขอขอบคุณเพื่อน ๆ น้อง ๆ ร่วมรุ่นที่ทำงานวิจัยด้วยกัน

สำหรับคุณงามความดีอันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอมอบให้กับคณะอาจารย์ทุกท่าน ซึ่งเป็นที่เคารพยิ่ง

สรารุช เรืองกิจตระการ

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VI
สารบัญรูป.....	VII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	1
1.3 สมมติฐานของการศึกษา.....	2
1.4 ขอบเขตการวิจัย.....	2
1.5 ขั้นตอนของการศึกษา.....	2
บทที่ 2 แนวคิดพื้นฐานเกี่ยวกับเครื่องมือวัด.....	4
2.1 บทนำ.....	4
2.2 ความสำคัญของการวัดทางกล.....	5
2.3 การวัดแรง ทอร์ก.....	5
2.3.1 แรงทางจลน์.....	5
2.3.2 แรงสถิต.....	5
2.4 ชิ้นส่วนสำหรับวัดแรง.....	6
2.4.1 การเบนไปของปลายคานสัมพันธ์กับแรง P ที่กระทำ.....	6
2.4.1.1 โหลดเซลล์แบบลิงค์.....	6
2.4.1.2 โหลดเซลล์แบบคาน.....	9
2.5 การวัดทอร์ก.....	12
2.6 ทอร์กเซลล์.....	13
2.7 รูปแบบการติดตั้ง Strain Gage ลงบนโหลดเซลล์.....	15
บทที่ 3 หลักการและทฤษฎีที่ใช้ในการออกแบบโหลดเซลล์.....	19
3.1 บทนำ.....	19
3.2 วิธีการไฟไนต์อีลิเมนต์.....	20

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.3 การประยุกต์วิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์.....	24
3.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดในสามมิติ.....	25
3.5 การออกแบบเพื่อรองรับแรงแบบ STATIC.....	28
3.6 การประยุกต์ใช้จุดความเค้นสูงในการออกแบบ DUMMY (LOADCELL)	30
3.7 การออกแบบและสร้างโหนดเซลล์เพื่อทำการวัดแรง.....	31
3.8 การออกแบบหัวบล็อกและด้ามจับ.....	40
บทที่ 4 ผลการทดลอง.....	45
4.1 บทนำ.....	45
4.2 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง.....	44
4.3 ขั้นตอนการทดลอง.....	45
4.4 ผลการทดลอง.....	47
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	56
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	56
5.2 ข้อเสนอแนะและแนวทางพัฒนา.....	56
บรรณานุกรม.....	57
ภาคผนวก.....	58
ภาคผนวก ก. ส่วนประกอบของโหนดเซลล์.....	59
ภาคผนวก ข. ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์และได้รับการตีพิมพ์.....	63
ประวัติผู้เขียน.....	69

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 คุณสมบัติของวัสดุที่นำมาสร้างโพลีเมอร์.....	44
4.2 คุณสมบัติของสเตรนเกจ.....	44
4.1 ตำแหน่งความเค้นที่เกิดขึ้นบนโพลีเมอร์.....	49
4.2 แสดงค่าความเค้นที่โพลีเมอร์.....	51

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 แผนภูมิกระบวนการวัด.....	4
2.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างคานกับแรงที่กระทำ.....	6
2.3 โหลดเซลล์แบบลิงค์และการต่อใช้งานกับวงจร.....	6
2.4 โหลดเซลล์แบบคานประกอบด้วยชิ้นส่วนยึดหยุ่นกับสเตรนเกจ.....	9
2.5 แรงบิดที่เกิดบนทรงกระบอกกลวง.....	12
2.6 ทอร์กเซลล์ทำด้วยเพลากลมและสเตรนเกจ.....	13
3.1 การวิเคราะห์หาผลเฉลยบนแผ่นอลูมิเนียมด้วยการใช้วิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์.....	20
3.2 การแบ่งรูปร่างลักษณะของปัญหาออกเป็นเอลิเมนต์แบบต่างๆ.....	21
3.3 เอลิเมนต์สามเหลี่ยมประกอบด้วยจุดสามจุดต่อ โดยมีค่าไม่รู้ค่าอยู่ ณ ตำแหน่งที่จุดต่อ.....	22
3.4 การประยุกต์วิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ในการคำนวณการยุบตัวของรถ.....	25
3.5 รูปเอลิเมนต์สามมิติที่มีความเค้นตั้งฉาก.....	25
3.6 การกระจายความเค้นรอบๆ รูรูปไข่ภายในวัสดุขนาดใหญ่ที่ถูกดึง.....	29
3.7 การให้ภาพพจน์เกี่ยวกับความเค้นสูง.....	30
3.8 แสดงให้เห็นจุดเว้าเข้าไปนั้นเป็นจุดที่เกิดความเค้นสูง.....	31
3.9 รูปร่างของคานตามแนวคิด.....	32
3.10 ทิศทางของแรงที่เกิดบนคาน.....	33
3.11 รูปคานที่มีพื้นที่หน้าตัดคงที่.....	34
3.12 รูปของโหลดเซลล์เมื่อถูกแรงมากระทำ.....	35
3.13 รูปคานที่มีพื้นที่หน้าตัดเล็กตามกฎของฮุก.....	36
3.14 รูปการทดสอบด้วยโปรแกรม COSMOS ของคานแบบพื้นที่หน้าตัดไม่คงที่ แบบมีลักษณะเป็นเส้นตรง.....	37
3.15 กราฟความเค้นที่เกิดจากแรงที่มากระทำที่ปลาย.....	37
3.16 รูปทรงโหลดเซลล์ที่มีพื้นที่หน้าตัดไม่คงที่ แบบมีลักษณะเป็นเส้นตรง.....	38
3.17 รูปร่างโหลดเซลล์ที่ออกแบบขึ้น.....	39
3.18 การออกแบบหัวบล็อกสำหรับใช้ในการชั่งน้ำหนัก.....	40
3.19 แสดงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่มีมือจับได้ถนัด.....	40
3.20 ขนาดความยาวที่เหมาะสมกับมือ.....	41
3.21 ค้ำจับที่ทำการออกแบบ.....	41

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.22 รูปโพลคเซลล์ที่ทำการออกแบบ.....	42
3.23 รูปถ่ายของโพลคเซลล์.....	42
3.24 ไดอะแกรมวงจรที่ใช้ขยายสัญญาณที่ได้จากการวัด.....	43
3.25 รูปถ่ายวงจรที่ได้ในการวัด.....	43
4.1 การกำหนดอิมิตแดนซ์ให้โพลคเซลล์.....	46
4.2 การต่ออุปกรณ์เพื่อทำการชั่ง.....	46
4.3 ความเค้นที่เกิดจากน้ำหนัก 10 kg.....	47
4.4 กราฟแสดงความเค้นที่ตัวโพลคเซลล์.....	47
4.5 Factor of Safety ที่ 10 kg.....	48
4.6 การวิเคราะห์เฉพาะ โพลคเซลล์ที่ 10 kg.....	46
4.7 Factor of Safety โพลคเซลล์ที่ 10 kg.....	50
4.8 กราฟการทดลองชั่งที่ 200 กรัม.....	52
4.9 กราฟการทดลองชั่งที่ 400 กรัม.....	53
4.10 กราฟการทดลองชั่งที่ 1 กิโลกรัม.....	53
4.11 กราฟการทดลองชั่งที่ 2 กิโลกรัม.....	54
4.12 กราฟการทดลองชั่งที่ 3 กิโลกรัม.....	54
4.13 กราฟการทดลองชั่งที่ 4 กิโลกรัม.....	55
4.14 กราฟการทดลองชั่งน้ำหนักแบบต่อเนื่อง.....	55

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

โพลกเซลล์เป็นอุปกรณ์ตรวจวัดความเครียดที่เกิดขึ้นจากแรงที่จะทำการวัด โดยมีตัวสเตรนเกจเป็นตัวรับรู้แรงที่เกิดขึ้นในรูปของความเครียด และแปลงความเครียดเป็นสัญญาณไฟฟ้าเพื่อนำไปประมวลผล ในปัจจุบันได้มีการนำโพลกเซลล์ไปใช้กันอย่างแพร่หลายในอุปกรณ์เครื่องชั่งต่างๆ

การออกแบบรูปทรงของโพลกเซลล์ จะต้องนำทฤษฎีทางกลศาสตร์มาช่วยในการออกแบบ อย่างไรก็ตามการออกแบบรูปทรงของโพลกเซลล์โดยใช้ทฤษฎีทางกลศาสตร์นั้นทำให้เราทราบเพียงว่า แรงจะเกิดขึ้นมากที่สุดเท่าใด จึงจะทำให้ตัวโพลกเซลล์ได้รับความเสียหาย ลักษณะรูปร่างความเค้นที่เกิดขึ้นกับโพลกเซลล์จะเป็นเช่นไร ไม่สามารถที่จะหาได้จากทฤษฎีทางกลศาสตร์ ต้องใช้ทฤษฎีทางไฟไนต์อิลิเมนต์มาช่วยในการวิเคราะห์และออกแบบ

ปัญหาในการออกแบบรูปทรงของโพลกเซลล์แบบคาน

กรณีที่ 1 การออกแบบรูปทรงโพลกเซลล์แบบคานที่มีพื้นที่หน้าตัดสม่ำเสมอ ข้อเสียของการออกแบบรูปทรงโพลกเซลล์แบบนี้คือ ความเค้นที่เกิดขึ้นกับคานมีค่าไม่สูงพอเมื่อเทียบกับปริมาณของวัสดุที่เสียไป

กรณีที่ 2 การออกแบบรูปทรงของโพลกเซลล์แบบคานให้มีส่วนโค้งเว้าตามทฤษฎีการเกิดจุดความเค้นสูง เป็นวิธีการเดียวกับการออกแบบโพลกเซลล์ที่มีจำหน่ายกันอยู่ ข้อเสียของการออกแบบรูปทรงโพลกเซลล์แบบนี้คือ เมื่อนำมาวิเคราะห์ทางไฟไนต์อิลิเมนต์ จุดความเค้นสูงจะเกิดขึ้นในบริเวณแคบ ส่งผลให้ติดตัวสเตรนเกจในตำแหน่งที่เหมาะสมได้ยากและทำให้ตัวสเตรนเกจได้รับความเค้นไม่เท่ากันตลอดแผ่น ซึ่งมีผลกับประสิทธิภาพของตัวโพลกเซลล์ ตลอดจนการขึ้นโลหะให้เป็นรูปทรงโพลกเซลล์แบบนี้ยังทำได้ยากอีกด้วย

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

งานวิจัยฉบับนี้ต้องการนำเสนอกรณีศึกษาการออกแบบรูปทรงของโพลกเซลล์โดยใช้เทคนิคของไฟไนต์อิลิเมนต์ โดยการนำโปรแกรมคอมพิวเตอร์มามีส่วนช่วยในการออกแบบเพื่อหารูปทรงของโพลกเซลล์ที่เหมาะสม โดยทำการสร้างแบบจำลองรูปทรงของโพลกเซลล์ในคอมพิวเตอร์ และทำการวิเคราะห์หาผลทางไฟไนต์อิลิเมนต์ผ่านทางโปรแกรมคอมพิวเตอร์ประยุกต์ (COSMOS) ทำให้สามารถเปลี่ยนแปลงรูปทรงของโพลกเซลล์ได้ง่าย รวดเร็ว เพื่อที่จะให้ได้รูปทรงโพลกเซลล์ที่เหมาะสมที่สุดก่อนที่จะนำไปสร้างแบบจริง เนื่องจากการ

ออกแบบด้วยการทดลองจริงเพื่อให้เกิดปรากฏการณ์ที่ต้องการกับชิ้นงานสิ้นเปลืองเวลาและค่าใช้จ่ายมาก

1.3 สมมุติฐานของการศึกษา

หลักการสำคัญของ โพลดเซลล์คือ การออกแบบรูปทรงที่เหมาะสม ซึ่งนำวิธีการออกแบบรูปทรง 2 ลักษณะขึ้นมาเป็นกรณีศึกษา คือ การออกแบบรูปทรงที่มีพื้นที่หน้าตัดสม่ำเสมอ และการออกแบบรูปทรงโพลดเซลล์แบบที่มีส่วนโค้งเว้าโดยอาศัยทฤษฎีจุดความเค้นสูง โดยจะเห็นได้ว่าการออกแบบรูปทรงของ โพลดเซลล์ที่มีพื้นที่หน้าตัดสม่ำเสมอ นั้น ค่าความเค้นที่เกิดขึ้นกับคานามีค่าไม่สูงพอเมื่อเทียบกับปริมาณวัสดุที่เสียไป และการออกแบบรูปทรงโพลดเซลล์แบบที่มีส่วนโค้งเว้าโดยอาศัยทฤษฎีจุดความเค้นสูงนั้น ความเค้นจะเกิดขึ้นบริเวณแคบๆ ส่งผลให้ติดตั้งตัวสเตรนเกจในตำแหน่งที่เหมาะสมได้ยากและทำให้ตัวสเตรนเกจได้รับความเค้นไม่เท่ากันตลอดแผ่นซึ่งมีผลกับประสิทธิภาพของตัวโพลดเซลล์ ดังนั้นจึงได้มีการปรับเปลี่ยนรูปทรงของโพลดเซลล์ให้เป็นแบบที่มีพื้นที่หน้าตัดสม่ำเสมอ ซึ่งก็คือการออกแบบรูปทรงโพลดเซลล์แบบที่มีพื้นที่หน้าตัดไม่สม่ำเสมอนี้ ความเค้นที่ได้มีบริเวณกว้างและสม่ำเสมอตลอดจนการขึ้นรูปโลหะสามารถทำได้ง่าย สามารถแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้นกับรูปทรงโพลดเซลล์ทั้งสองแบบดังกล่าวข้างต้นได้

1.4 ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย

งานวิจัยการออกแบบรูปทรงของ โพลดเซลล์ตามสมมุติฐานคือรูปทรงโพลดเซลล์แบบพื้นที่หน้าตัดสม่ำเสมอ การออกแบบเบื้องต้นจะออกแบบโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ในการออกแบบรูปทรงและทำการวิเคราะห์ผลทางไฟไนต์อิเลิเมนต์โดยโปรแกรม COSMOS เมื่อได้ผลจากการจำลองทางคอมพิวเตอร์แล้วจึงนำค่าที่ได้มาทำการขึ้นรูปโพลดเซลล์จริง เพื่อทำการทดสอบว่าได้ค่าการวัดออกมาได้ตรงกับทฤษฎีที่ได้ตั้งสมมุติฐานไว้

1.5 ขอบเขตการวิจัย

เริ่มต้นด้วยการศึกษาและทดสอบหลักการและข้อจำกัดของ โพลดเซลล์แบบเดิม แล้วจึงออกแบบรูปทรงของโพลดเซลล์ขึ้นมาใหม่ดังแสดงในรูปที่ 3.14 โดยการจำลองรูปแบบในคอมพิวเตอร์และทำการวิเคราะห์ผลทางไฟไนต์อิเลิเมนต์ผ่านโปรแกรม COSMOS ค่าความเค้นที่ได้จะออกมาอย่างสม่ำเสมอตลอดพื้นที่ สามารถนำตัวสเตรนเกจมาติดตั้งได้ง่าย การทดสอบทางโปรแกรม COSMOS จะถูกนำมาทดสอบโดยการขึ้นรูปเพื่อสร้างโพลดเซลล์ตามแบบจำลอง และนำผลที่ได้จากการจำลองรูปแบบโพลดเซลล์มาเปรียบเทียบกับโพลดเซลล์ที่ได้ขึ้นรูปจริง

1.6 ขั้นตอนของการศึกษา

การทำงานวิจัยฉบับนี้มีขั้นตอนการศึกษาเริ่มจากการค้นคว้าจากบทความของวารสารต่าง ๆ เกี่ยวกับโพลีเซลล์และการประยุกต์ใช้งาน ซึ่งจะนำทฤษฎีมาเป็นแนวทางในการออกแบบและสร้างแบบจำลองคณิตศาสตร์ด้วยโปรแกรม COSMOS แล้วจึงสร้างโพลีเซลล์ต้นแบบขึ้นมา นำต้นแบบมาทดสอบด้วยโพลีที่เป็นน้ำหนักรวมต่าง ๆ หลังจากนั้นจึงวิเคราะห์ผลงานวิจัยที่ได้

บทที่ 2

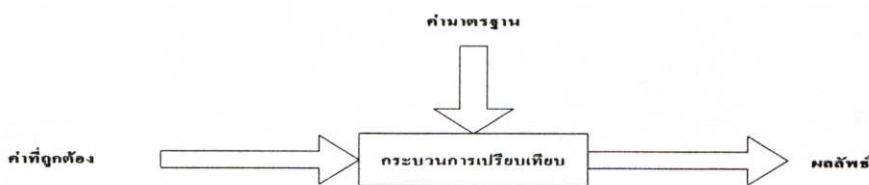
แนวคิดพื้นฐานเกี่ยวกับเครื่องมือวัด

2.1 บทนำ

ในปัจจุบันพัฒนาการทางด้านเครื่องมือวัดเป็นไปอย่างรวดเร็วเครื่องมือวัดมีใช้ในทุกแขนงทางสาขาวิทยาศาสตร์เทคโนโลยี และในชีวิตประจำวันของเราเครื่องมือวัดก็เข้ามาเกี่ยวข้อง การวัดได้มีผู้นิยามว่าเป็นการแยกสัญญาณจากระบบ หรือกระบวนการ ซึ่งแทนพารามิเตอร์หรือตัวแปรสมรรถนะของระบบ การควบคุมทำได้ดีขึ้นได้หรือไม่สัมพันธ์กับอุปกรณ์การวัด ตัวอย่างที่ดีก็คือ ร่างกายมนุษย์ มนุษย์รับรู้ข่าวสารต่างๆ ที่อยู่รอบตัวได้โดยผ่านตัวรับรู้ เช่น มองเห็น ได้กลิ่น ได้ยิน สัมผัส เป็นต้น ข่าวสารจะถูกเปลี่ยนเป็นคลื่นไฟฟ้าและถูกส่งผ่านไป ยังสมองซึ่งทำหน้าที่ประมวลผลข้อมูลและตัดสินใจเคลื่อนไหว เพื่อให้วัตถุประสงค์ สมรรถนะ หรือประสิทธิภาพการทำงานจะลดลงเมื่อการรับรู้เลวลง เช่นความสามารถในการขับรถลดลง เมื่อความสามารถในการเห็นลดลงหรือกล่าวอีกนัยหนึ่งได้ว่าความสามารถของมนุษย์สามารถปรับปรุงให้ดีขึ้นได้ถ้าการรับรู้ได้รับการขยายขอบเขต

จุดประสงค์แรกของการวัดในทางวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีคือ เพื่อแสดงค่าหรือแนวโน้มของตัวแปรบางตัวซึ่งเป็นปริมาณทางกายภาพ ค่าหรือ แนวโน้มนี้อ่านได้จากอุปกรณ์หรือเครื่องมือวัด ค่าตามพื้นฐานที่สำคัญก็คือ ค่าหรือแนวโน้มของปริมาณที่วัดได้มีความสัมพันธ์กับค่าจริงอย่างไร หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งว่าจะสร้างรูปแบบการวัดอย่างไรเพื่อให้การวัดแสดงผลข้อมูลได้ถูกต้องไม่คลุมเคลือ จะใช้ระบบการวัดอย่างไรเพื่อให้วิศวกรสามารถแปลงผลข้อมูลที่ได้จากการวัด ได้อย่างง่ายและมีความมั่นใจในข้อมูลนั้น

กระบวนการวัดหรือการกระทำการวัดประกอบด้วยการเปรียบเทียบ ค่ามาตรฐาน (Standard) กับ ค่าที่วัดได้ (Measurement) ซึ่งปริมาณทางกายภาพที่ถูกสังเกตและปริมาณที่ป้อนเข้าสู่กระบวนการวัด และผลลัพธ์ออกมาแผนภูมิกระบวนการวัดแสดงดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 แผนภูมิกระบวนการวัด

2.2 ความสำคัญของการวัดทางกล

ข้อมูลของปริมาณภายใต้สภาวะจริงของตัวแปรทางกายภาพ และกระบวนการจะได้รับการวัด ถ้าไม่เช่นนั้นแล้วปริมาณเหล่านั้นจะได้รับการประมาณเท่านั้น การวัดเป็นหลักการพื้นฐานสำหรับงานวิจัย การออกแบบ และการพัฒนาทั้งหมด การวัดยังเป็นส่วนประกอบหลักในกระบวนการควบคุม การทำงานในปัจจุบันยังต้องการการวัดสำหรับการตรวจสอบสมรรถนะที่ถูกต้องเช่น โรงไฟฟ้าสมัยใหม่ ความเที่ยงตรงในระบบกระบวนการผลิตทั้งหลาย โดยเฉพาะ CNC อุปกรณ์ไมโครอิเล็กทรอนิกส์ประมาณที่วัด เช่น อุณหภูมิ ความดัน อัตราการไหล และแอมพลิจูดของการสั่น ต้องคอยเฝ้าดูให้คงที่เพื่อความมั่นใจในสมรรถนะที่ถูกต้องของระบบ

การใช้เครื่องมือวัดในกระบวนการอุตสาหกรรม เครื่องจักรที่ทำงานอัตโนมัติ การควบคุมแบบต่างๆ และอุปกรณ์เกี่ยวกับความปลอดภัย ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงแนวคิดในการวัด นอกจากนั้นระบบเครื่องมือวัดยังทำหน้าที่ขยายการรับรู้ของมนุษย์ การวัดมีความสำคัญเป็นอย่างยิ่งต่อระบบการค้า เพราะราคาสินค้าตั้งอยู่บนพื้นฐานของจำนวนวัสดุค่าพลังงาน ค่าใช้จ่ายของเวลา และแรงงาน

ทรานส์ดิวเซอร์ที่ใช้วัดแรง ทอร์ก หรือความดัน โดยทั่วไปประกอบด้วยส่วนที่ยึดหยุ่นหรือการเปลี่ยนแปลงเป็นระยะ โง่ง หรือความเครียด และตัวรับรู้ โดยปกติจะใช้สเตรนเกจ เป็นตัวรับรู้แรงที่เกิดขึ้นในรูปความเครียด และนำค่าความเครียดที่เกิดขึ้นเปลี่ยนในรูปของสัญญาณไฟฟ้าเพื่อนำไปประมวลผล

2.3 การวัดแรง ทอร์ก

ทรานส์ดิวเซอร์แรง (Force Transducers) ใช้สำหรับแปลงผันแรงทางกายภาพให้เป็นสัญญาณไฟฟ้า ในทางกลศาสตร์สามารถจำแนกแรงออกเป็น 2 ประเภทใหญ่ๆ คือ

2.3.1 แรงจลน์ (Kinematic Force)

เป็นแรงที่ทำให้วัตถุเปลี่ยนแปลงความเร็วในการเคลื่อนที่ เช่น แรงที่กระทำบนข้อมือหุ่นยนต์เนื่องจากความเร่งของมวลของวัตถุในระหว่างการบังคับให้เคลื่อนที่

2.3.2 แรงสถิต (Static Force)

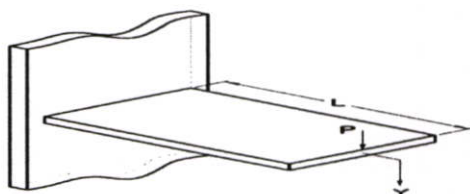
เป็นแรงที่กระทำบนวัตถุโดยไม่เกี่ยวกับการเคลื่อนที่ เช่น แรงที่กระทำโดยมือของหุ่นยนต์บนผิวของวัตถุในระหว่างการจับยึดวัตถุ

แรงวัดต่างๆ ไป ทรานส์ดิวเซอร์แรงจะแปลงผันพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้า โดยวัดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างทางกายภาพของทรานส์ดิวเซอร์ซึ่งเป็นตัวการทำให้เกิดขึ้น

2.4 ชั้นส่วนสำหรับวัดแรง

ชั้นส่วนยึดหยุ่นเป็นอุปกรณ์ที่สำคัญสำหรับการวัดทั้งแรงจลน์และแรงสถิต เมื่อมีแรงกระทำต่อชั้นส่วนยึดหยุ่นจะมีผลทำให้เกิดการกระจัดหรือความเครียดขึ้นในตัวชั้นส่วนยึดหยุ่น ชั้นส่วนยึดหยุ่นนี้อาจทำอยู่ในรูปของทรงกระบอก วงแหวน คานยื่น แท่งวัสดุ ใคอะแพรม สำหรับการแสดงขนาดของแรงที่นิยมใช้โดยผ่านการกระจัดเช่น

2.4.1 การเบนไปของปลายคานสัมพันธ์กับแรง P ที่กระทำ

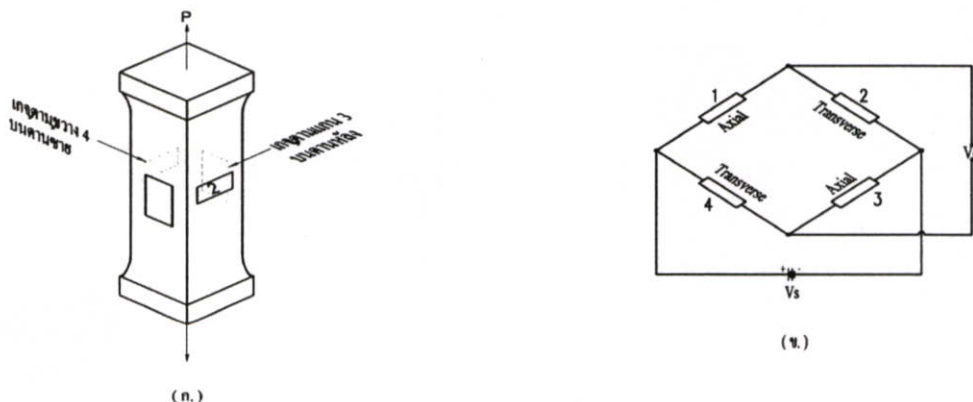


รูปที่ 2.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างคานกับแรงที่กระทำ

$$P = \frac{3EI}{L^3} y \quad (2.1)$$

เมื่อ I คือ ค่าโมเมนต์ของความเฉื่อยของคานรอบแกนที่ผ่านศูนย์กลาง ในทิศทางของการเบน
 E คือ ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของวัสดุ

2.4.1.1 โหลดเซลล์แบบลิ่งค์



รูปที่ 2.3 โหลดเซลล์แบบลิ่งค์และการต่อใช้งานกับวงจร

โพลีเซลล์แบบลิงค์ (Link-Type Load Cell) อย่างง่ายประกอบด้วยลิงค์ (Link) และ สเตรนเกจ 4 อัน ดังแสดงในรูปที่ 2.3 ภาระ (Load) P สามารถเป็นไปได้ทั้งภาระแรงดึง (Tensile Load) หรือภาระแรงอัด (Compressive Load) สเตรนเกจ 2 อันยึดติดกับลิงค์ในแนวขนานกับแกน และอีก 2 อันในแนวขวางกับแกน สเตรนเกจทั้ง 4 จะต่อเป็นวีดสโตนบริดจ์โดยเกจที่อยู่ในแนวแกนต่ออยู่ในแขนที่ 1 และ 3 ส่วนเกจที่อยู่ในแนวขวางต่ออยู่กับแนวแขนที่ 2 กับ 4

เมื่อภาระ P กระทำต่อลิงค์ ความเครียดตามแนวแกนและตามแนวขวางจะเกิดขึ้นในลิงค์ และสัมพันธ์กับภาระตามสมการ

$$\epsilon a = \frac{P}{AE} \quad (2.2)$$

$$\epsilon a = -\frac{vP}{AE} \quad (2.3)$$

เมื่อ A คือ พื้นที่หน้าตัดของลิงค์

E คือ โมดูลัสความยืดหยุ่นของวัสดุที่ใช้ทำลิงค์

v คือ อัตราส่วนปัวซองของวัสดุที่ใช้ทำลิงค์

การตอบสนองของเกจต่อภาระ P ที่กระทำเป็นไปตามสมการ

$$\frac{\Delta R1}{R1} = \frac{\Delta R3}{R3} = Sg\epsilon a = \frac{SgP}{AE} \quad (2.4)$$

$$\frac{\Delta R2}{R2} = \frac{\Delta R4}{R4} = Sg\epsilon t = -\frac{VSgP}{AE} \quad (2.5)$$

ถ้าสมมุติว่าสเตรนเกจทั้ง 4 ตัวบนลิงค์ เหมือนกันทุกประการ แรงดันเอาต์พุต V_o จากวีดสโตนบริดจ์ หาได้จากการแทนค่า สมการ (b) ลงสมการ

$$V_o = \frac{r}{(1+r)^2} \left(\frac{\Delta R1}{R1} - \frac{\Delta R2}{R2} + \frac{\Delta R3}{R3} - \frac{\Delta R4}{R4} \right) V_s \quad (2.6)$$

จะได้

$$V_o = \frac{SgP(1+V)}{2AE} V_s$$

หรือ

$$P = \frac{2AE}{Sg(1+V)} V_o = C_v o \quad (2.7)$$

จากสมการ แสดงว่า ภาระ P เป็นสัดส่วนเชิงเส้นกับแรงดัน เอาต์พุต V_0 และค่าคงตัวสัดส่วน หรือ ค่าคงตัวเปรียบเทียบ คือ

$$P = \frac{2AE}{Sg(1+V)V_s} \quad (2.8)$$

เมื่อ C คือ ค่าคงที่เปรียบเทียบ

ความไวของ โหลดเซลล์และวัสดุโตนบริดจ์รวมกัน คือ

$$S = \frac{V_0}{p} = \frac{1}{C} = \frac{Sg(1+v)}{2AE} V_s \quad (2.9)$$

จากสมการ แสดงว่าความไวของ โหลดเซลล์ขึ้นอยู่กับพื้นที่หน้าตัด(A) โมดูลัสความยืดหยุ่นของ วัสดุที่ใช้ทำลึงค์ ตัวประกอบเกจ และแรงดันที่จ่ายให้กับบริดจ์ (V_s)

เรนจ์(Range) ของแรงที่ให้กับ โหลดเซลล์แบบลึงค์ หาได้จากพื้นที่หน้าตัดของลึงค์ และ ความถี่ (S_f) ของวัสดุที่ใช้ทำลึงค์ โดย

$$P_{\max} = S_f A \quad (2.10)$$

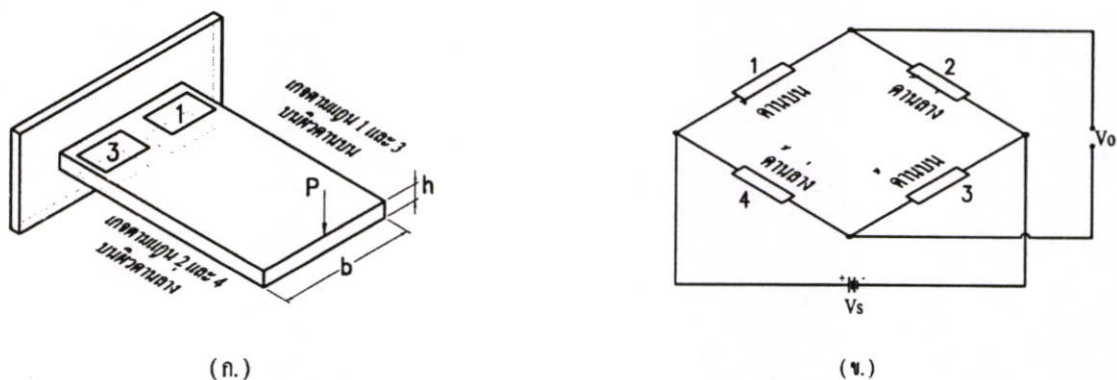
อัตราส่วนแรงดันที่ภาระสูงสุด $(V_0/V_s)_{\max}$ สำหรับ โหลดเซลล์แบบลึงค์ หาได้จากการ แทนสมการ 2.10 นี้ ลง 2.9 จะได้

$$\left(\frac{V_0}{V_s} \right)_{\max} = \frac{S_g S_f (1+V)}{2E} \quad (2.11)$$

โหลดเซลล์แบบลึงค์เกือบทั้งหมดกำหนดค่าเต็มสเกลของภาระ ($P=P_{\max}$) ที่ $(V_0/V_s)^* = 3mV/V$ ด้วยค่าเต็มสเกลเฉพาะ ของอัตราส่วนแรงดัน $(v_0/v_s)^*$ นี้ภาระ P บน โหลดเซลล์จะหาได้จาก

$$P = \frac{V_0/V_s}{V_0/V_s^*} P_{\max} \quad (2.12)$$

2.4.1.2 โหลดเซลล์แบบคาน



รูปที่ 2.4 โหลดเซลล์แบบคานประกอบด้วยชิ้นส่วนยึดหยุ่นกับสเตรนเกจ

โหลดเซลล์แบบคาน(Beam-type load cell) ใช้วิธีการในกรณีที่ใช้โหลดเซลล์แบบลิงค์ไม่ได้ จากรูปที่ 2.4(ก) ใช้คานยื่น (cantilever Beam) ทำหน้าที่เป็นชิ้นส่วนยึดหยุ่นซึ่งมีสเตรนเกจ 2 อัน ติดอยู่ที่ผิวด้านบน และอีก 2 อัน ติดที่ผิวด้านล่าง (ทั้งหมดติดอยู่ในแนวขนานกับแกนของคาน) ทำหน้าที่เป็นตัวรับรู้ โดยสเตรนเกจ ต่อกันเป็นวงวัดสโตนบริดจ์ ดังรูปที่ 2.4(ข)

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

$$\varepsilon_1 = -\varepsilon_2 = \varepsilon_3 = -\varepsilon_4 = \frac{6M}{Ebh^2} = \frac{6Px}{Ebh^2} \quad (2.13)$$

เมื่อ b คือ ความกว้างของหน้าตัดคาน
 h คือ ความหนาของหน้าตัดของคาน

การตอบสนองของสเตรนเกจหาได้จากสมการ $\frac{\Delta R}{R} = S_g \varepsilon$ และ สมการ (2.13) ดังนั้น

$$\frac{\Delta R_1}{R_1} = -\frac{\Delta R_2}{R_2} = \frac{\Delta R_3}{R_3} = -\frac{\Delta R_4}{R_4} = \frac{6S_g Px}{Ebh^2} \quad (2.14)$$

แรงดันเอาต์พุต V_o จากวัดสโตนบริดจ์ ซึ่งเป็นผลจากการกระทำของ ภาระ P หาได้โดยแทนสมการ (2.14) ลงในสมการ

$$V_o = \frac{r}{(1+r)^2} \left(\frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} - \frac{\Delta R_4}{R_4} \right) V_s \quad (2.15)$$

และสมมุติว่าสเตรนเกจทั้ง 4 เหมือนกันทุกประการ จะได้

$$V_o = \frac{6S_s Px}{EbH^2} V_s \quad (2.16)$$

หรือ

$$P = \frac{EbH^2}{6S_g x V_s} V_o = C v_o \quad (2.17)$$

จากสมการ 2.17 แสดงว่าภาระ P เป็นสัดส่วนกับแรงดัน เอาต์พุต V_o และค่าคงตัวสัดส่วน หรือค่าคงตัวเปรียบเทียบ C คือ

$$C = \frac{EbH^2}{6S_g x v_x} \quad (2.18)$$

ความไวของโพลดเซลล์และวีตสโตนบริดจ์รวมกัน กำหนดโดยสมการ

$$S = \frac{V_o}{P} = \frac{1}{C} = \frac{6s_g xv}{EbH^2} \quad (2.19)$$

จากสมการ 2.19 แสดงว่าความไวของโพลดเซลล์แบบคาน ขึ้นอยู่กับรูปร่างหน้าตัดของคาน (b,h) โมดูลัสความยืดหยุ่นของวัสดุที่ใช้ทำคาน (E) ตำแหน่งของภาระเทียบกับเกจ (x) ตัวประกอบเกจ (S_g) และแรงดันที่ป้อนให้กับวงจรบริดจ์ (V_s)

เรนจ์ของภาระของภาระที่ใช้กับโพลดเซลล์แบบคาน ขึ้นอยู่กับรูปร่างหน้าตัดของคาน ตำแหน่งที่ภาระกระทำ และความถี่ของวัสดุที่ใช้ทำคาน ถ้าสมมุติว่าเกจติดที่ตำแหน่งใกล้กับฐานรองรับคานจะได้

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

และ

$$P_{max} = \frac{S_f bh^2}{6x} \quad (2.20)$$

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

$$\left(\frac{V_o}{V_s}\right)_{\max} = \frac{S_g S_f}{E} \quad (2.21)$$

โพลดเซลล์แบบคานที่ขายในท้องตลาดมีอัตราส่วนแรงดัน $(V_o/V_s)^*$ ที่ภาวะเต็มสากระหว่าง 4
และ 5 mV/V

2.5 การวัดทอร์ก

ทอร์กหรือ โมเมนต์อาจวัด โดยการสังเกตการณ์เบี่ยงเบนเชิงมุมของแท่งวัสดุหรือ ทรงกระบอกกลวง ดังแสดงในรูปที่ 2.5 โมเมนต์กำหนดโดย สมการ

$$M = \frac{\pi G (r_o^4 - r_i^4)}{2L} \phi \quad (2.22)$$

เมื่อ M คือ โมเมนต์ N.m

G คือ โมดูลัสความยืดหยุ่นเฉือน N/m²

r_i คือ รัศมีภายใน m

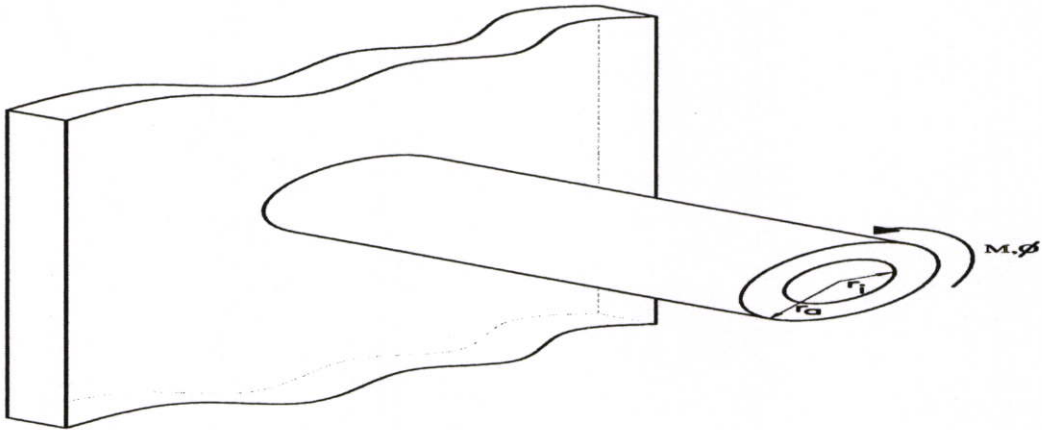
r_o คือ รัศมีภายนอก m

L คือ ความยาวของทรงกระบอก m

ϕ คือ มุมที่เบี่ยงเบนไป rad

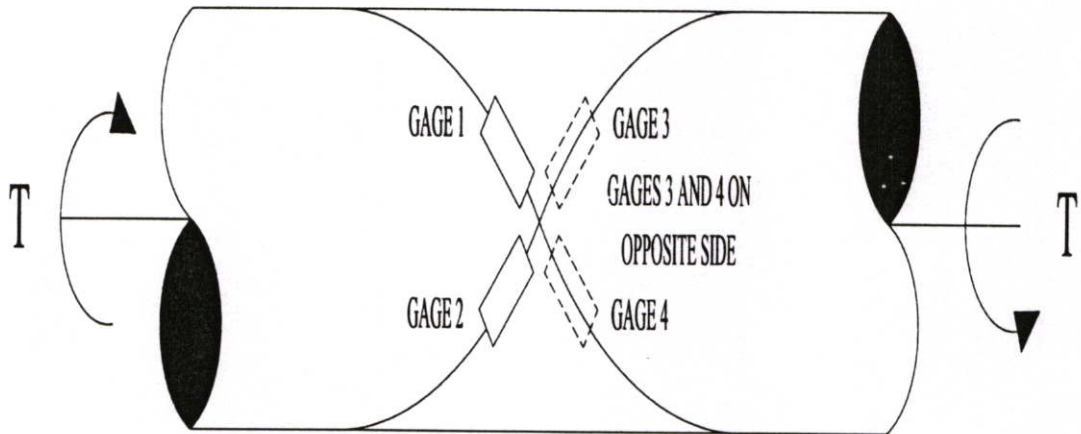
โดย

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (2.23)$$



รูปที่ 2.5 แรงบิดที่เกิดบนทรงกระบอกกลวง

2.6 ทอร์กเซลล์



รูปที่ 2.6 ทอร์กเซลล์ทำด้วยเพลากลมและสเตรนเกจ

ทอร์กเซลล์ (Torque Cell) เหมือน โหลดเซลล์ คือประกอบด้วยชิ้นส่วนทางกล (โดยปกติ คือ เพลลา ซึ่งมีส่วนพื้นที่หน้าตัดเป็นรูปทรงกลม) กลับริบรับรู้คือสเตรนเกจติดอยู่บนเกลียว 2 เส้นที่ตั้งฉากกัน โดยแต่ละเส้นทำมุม 45 องศา กับแกนของเพลลา ดังแสดงในรูปที่ 2.6 เกจ 1 และ 3 ติดอยู่บนเกลียวขวาตัวตรวจวัดความเครียดบวก เกจ 2 และ 4 ติดอยู่บนเกลียวซ้ายตรวจสอบความเครียดลบ ความเค้นเฉือน τ ในเพลากลม สัมพันธ์กับทอร์ก T ที่กระทำต่อเพลากลมด้วยสมการ

$$\tau_{xz} = \frac{TD}{2J} = \frac{16T}{\pi D^3} \quad (2.24)$$

เมื่อ D คือ เส้นผ่าศูนย์กลางของเพลลา

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

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

$$\sigma_1 = -\sigma_2 = \tau_{xy} = \frac{16T}{\pi D^3} \quad (2.25)$$

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

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

$$\varepsilon_1 = \frac{1}{E}(\sigma_2 - \nu\sigma_1) = -\frac{16T}{\pi D^3} \left(\frac{1+\nu}{E} \right) \quad (2.26)$$

การตอบสนองของสเตรนเกจเป็นไปตามสมการ

$$\frac{\Delta R_1}{R_1} = -\frac{\Delta R_2}{R_2} = \frac{\Delta R_3}{R_3} = -\frac{\Delta R_4}{R_4} = -\frac{16T}{\pi D^3} \left(\frac{1+\nu}{E} \right) Sg \quad (2.27)$$

เมื่อต่อเกจเข้ากับวีตส โตนบรีดจ์ ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเอาต์พุต V_o และทอร์กจะหาโดยแทนสมการ (2.27) ลงสมการ

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

จะได้

$$V_o = \frac{16T}{\pi D^3} \left(\frac{1+\nu}{E} \right) Sg V_s \quad (2.28)$$

หรือ

$$T = \frac{\pi D^3 E}{16(1+\nu) Sg V_s} V_o = C V_o \quad (2.29)$$

เมื่อ

$$C = \frac{\pi D^3 E}{16(1+\nu) Sg V_s} \quad (2.30)$$

ความไวของทอร์กเซลล์-วีตส โตนบรีดจ์รวมกัน กำหนดโดย

$$S = \frac{V_o}{T} = \frac{1}{C} = \frac{16(1+\nu) Sg V_s}{\pi D^3 E} \quad (2.31)$$

เรนจ์ของทอร์กเซลล์ขึ้นอยู่กับเส้นผ่านศูนย์กลางของเพลลา(D) ชีดจำกัดสัดส่วน ($S\tau$) ของวัสดุในการบิดสำหรับการประยุกต์ใช้งานแบบสถิตจะได้

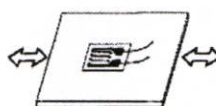
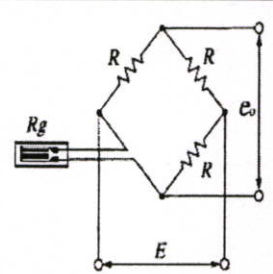
$$T_{\max} = \frac{\pi D^3 S\tau}{16} \quad (2.32)$$

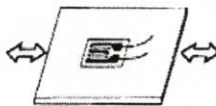
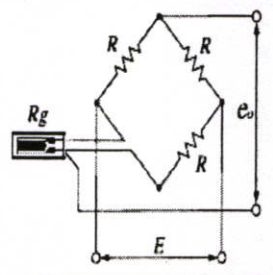
อัตราส่วนแรงดันต่อแรงดันสูงสุด (VO/Vs)* ของเทอร์มิสเตอร์จะถูกกำหนดไว้ระหว่าง 4 และ 5 mV/V
 เทอร์มิสเตอร์ T ที่สอดคล้องกับแรงดันเอาต์พุต Vo ถูกกำหนดโดยสมการ

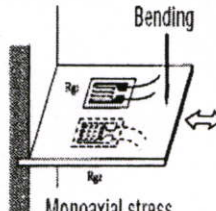
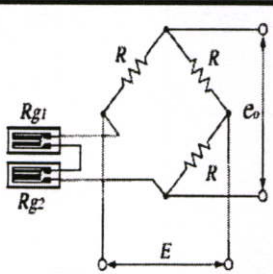
$$T = \frac{Vo/Vs}{(Vo/Vs)^*} T_{max} \tag{2.33}$$

2.7 รูปแบบการติดตั้ง สเตรนเกจลงบนโหลดเซลล์

Gage Method	Connection system	Application	Circuit	output	Remark
-------------	-------------------	-------------	---------	--------	--------

<p>1-active-gage 2-wire</p> <p>Nr. of gage: 1</p>	 <p>Monoaxial stress (uniform tension or compression)</p>		<p>$e_o = \frac{E}{4} K_s \cdot \epsilon_o$</p> <p>$K_s$: Gage factor ϵ_o : Strain E : Bridge voltage e_o : Output voltage R_g : Gage resistor R : Fixed resistor</p>	<p>No temp. compensation; x1 output; nonlinearity correction needed for large strain</p>
---	--	--	---	--

<p>1-active-gage 3-wire</p> <p>Nr. of gage: 1</p>	 <p>Monoaxial stress (uniform tension or compression)</p>		<p>$e_o = \frac{E}{4} K_s \cdot \epsilon_o$</p>	<p>No temp. compensation; thermal effect on leadwires cancelled; x1 output; non-linearity correction needed for large strain</p>
---	--	---	--	---

<p>1-active-gage (2 in series) 2-wire (cancelling bending strain)</p> <p>Nr. of gages: 2</p>	 <p>Bending</p> <p>Monoaxial stress (uniform tension or compression)</p>		<p>$e_o = \frac{E}{4} K_s \cdot \epsilon_o$</p> <p>$R_{g1}$ Strain : ϵ_1 R_{g2} Strain : ϵ_2</p> <p>$\epsilon_o = \frac{\epsilon_1 + \epsilon_2}{2}$</p> <p>$R$: Fixed resistor $R_{g1} + R_{g2} = R$</p>	<p>No temperature compensation; bending strain cancelled; x1 output</p>
--	---	---	---	--

1-active-gage
(2 in series)
3-wire
(cancelling
bending strain)
Nr. of gages: 2

Monoaxial stress
(uniform tension or compression)

Bending

$E_o = \frac{E}{4} K_s \cdot \epsilon_o$
 $R_{g1} \dots \dots$ Strain : ϵ_o
 $R_{g2} \dots \dots$ Strain : ϵ_o
 $\epsilon_o = \frac{\epsilon_1 + \epsilon_2}{2}$
 R : Fixed resistor
 $R_{g1} + R_{g2} = R$

No temperature compensation; thermal effect on leadwires cancelled; bending strain cancelled; x1 output

1-active-gage
(2 in series)
3-wire
(cancelling
bending strain)
Nr. of gages: 2

Monoaxial stress
(uniform tension or compression)

Bending

$E_o = \frac{E}{4} K_s \cdot \epsilon_o$
 $R_{g1} \dots \dots$ Strain : ϵ_o
 $R_{g2} \dots \dots$ Strain : ϵ_o
 $\epsilon_o = \frac{\epsilon_1 + \epsilon_2}{2}$
 R : Fixed resistor
 $R_{g1} + R_{g2} = R$

No temperature compensation; thermal effect on leadwires cancelled; bending strain cancelled; x1 output

2-active-gage
(at right angles)
Nr. of gages: 2

Monoaxial stress
(uniform tension or compression)

$E_o = \frac{(1 + \nu)E}{4} K_s \cdot \epsilon_o$
 ν : Poisson's ratio
 R_{g1}, R_{g2} : Gage resistor
 $R_{g1} \dots \dots$ Strain : ϵ_o
 $R_{g2} \dots \dots$ Strain : $-\nu \epsilon_o$
 R : Fixed resistor

Temperature compensation; thermal effect on leadwires cancelled; x (1+ ν) output

2-active-gage
(cancelling
bending strain)
Nr. of gages: 2

Bending stress

$E_o = \frac{E}{2} K_s \cdot \epsilon_o$
 $R_{g1} \dots \dots$ Strain : ϵ_o
 $R_{g2} \dots \dots$ Strain : $-\epsilon_o$
 R : Fixed resistor

Monoaxial stress
(uniform tension or compression)

$E_o = \frac{E}{2} K_s \cdot \epsilon_o$
 $R_{g1} \dots \dots$ Strain : ϵ_o
 $R_{g2} \dots \dots$ Strain : ϵ_o
 R : Fixed resistor

No temp. compensation; bending strain cancelled by gages cemented on front and back; nonlinearity compensation needed for large strain; x2 output

Opposite 2-active-gage 3-wire

Nr. of gages: 2

Monoaxial stress (uniform tension or compression)

$\epsilon_o = \frac{E}{2} K_s \cdot \epsilon_o$

R_{g1} Strain : ϵ_o
 R_{g2} Strain : ϵ_o
 R : Fixed resistor

No temp. compensation; thermal effect on leadwires cancelled; bending strain cancelled by gages cemented on front and back; x2 output; correction of nonlinearity needed

4-active-gage (bending strain measuring)

Nr. of gages: 4

Bending stress

$\epsilon_o = K_s \cdot \epsilon_o \cdot E$

R_{g1}, R_{g3} Bending strain : ϵ_o
 R_{g2}, R_{g4} Bending strain : $-\epsilon_o$

Temp. compensation; thermal effect on leadwires cancelled; compression (tension) strain cancelled; x4 output

4-active-gage (gages at right angles)

Nr. of gages: 4

Monoaxial stress (uniform tension or compression)

$\epsilon_o = \frac{(1 + \nu)E}{2} K_s \cdot \epsilon_o$

ν : Poisson's ration
 R_{g1}, R_{g3} Strain : ϵ_o
 R_{g2}, R_{g4} Strain : $-\nu\epsilon_o$

Temperature compensation; thermal effect on leadwires cancelled; x2(1+ ν) output

Active-dummy (4-gage method)

Nr. of gages: 4

Monoaxial stress (uniform tension or compression)

Active gage

Dummy gage

$\epsilon_o = \frac{E}{2} K_s \cdot \epsilon_o$

R_{g1}, R_{g3} Strain : ϵ_o
 R_{g2}, R_{g4} Strain : 0

Temperature compensation; thermal effect on leadwires cancelled; bending strain cancelled by gages cemented on front and back; x2 output

2-active-dummy (twisting strain measuring)

Nr. of gages: 2

Twisting strain measuring

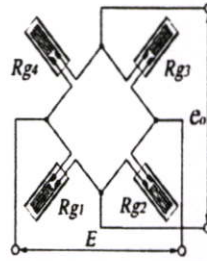
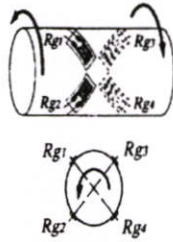
$\epsilon_o = \frac{E}{2} K_s \cdot \epsilon_o$

R_{g1} Twisting strain : ϵ_o
 R_{g2} Twisting strain : $-\epsilon_o$
 R : Fixed resistor

Temperature compensation; thermal effect on leadwires cancelled; x2 output

4-active-gage
(twisting strain
measuring)

Nr. of gages: 4



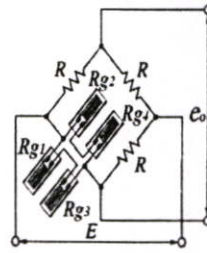
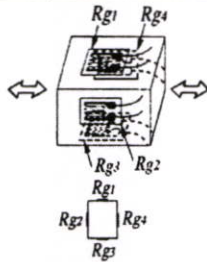
$$e_0 = K_s \cdot \epsilon_0 \cdot E$$

R_{g1}, R_{g3}, \dots
Twisting strain: ϵ_0
 R_{g2}, R_{g4}, \dots
Twisting strain: $-\epsilon_0$

Temperature
compensation:
thermal effect
on leadwires
cancelled;
bending strain
cancelled;
x4 output

4-active-gage
(mean strain
measuring)

Nr. of gages: 4



$$e_0 = \frac{E}{4} K_s \cdot \epsilon_0$$

$$\epsilon_0 = \frac{\epsilon_1 + \epsilon_2 + \epsilon_3 + \epsilon_4}{4}$$

R : Fixed resistor
 $R = R_{g1} = R_{g2} = R_{g3} = R_{g4}$

No Temp.
compensation;
mean stress
measuring;
x1 output;
correction of
nonlinearity
needed for large
strain

บทที่ 3

หลักการและทฤษฎีที่ใช้ในการออกแบบโพลดเซลล์

3.1 บทนำ

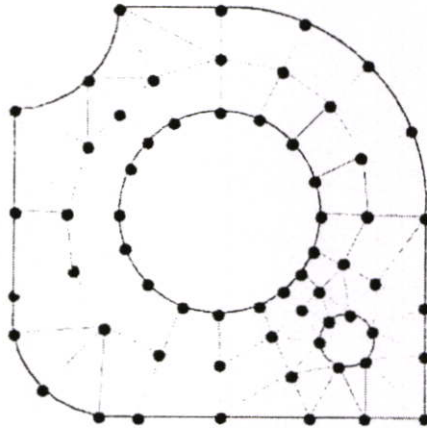
ความสามารถในการแก้ปัญหาทางด้านวิศวกรรมศาสตร์และวิทยาศาสตร์ มีส่วนอย่างมากในการส่งเสริมปรับปรุงความเป็นอยู่ของมนุษย์ให้ดียิ่งขึ้น ปรากฏการณ์ส่วนใหญ่ที่เกิรอบตัวสามารถอธิบายได้โดยกฎเกณฑ์ทางฟิสิกส์และทำการประดิษฐ์ขึ้นมาในลักษณะของสมการต่างๆได้ ซึ่งอาจอยู่ในรูปของสมการเชิงอนุพันธ์ ดังตัวอย่างเช่น การคำนวณหาการกระจายทางอุณหภูมิบนเครื่องยนต์อาจเริ่มมาจากสมการอนุพันธ์ที่อธิบายสถานะของความสมดุลในการถ่ายเทความร้อน [1] การอธิบายสถานะของความสมดุลออกแบบ โครงสร้างเครื่องบินนั้นอาจเริ่มจากสมการอนุพันธ์ที่อธิบายสถานะของความสมดุลของโครงสร้างนั้นภายใต้แรงกดดันของอากาศในขณะที่ทำการบิน [2] รวมไปถึง การทำนายทิศทางและความเร็วของกระแสลมจากพายุไต้ฝุ่นเพื่อจะออกข่าวเตือนประชาชนในพื้นที่ที่ได้ฝุ่นจะเคลื่อนตัวไปในการอพยพหนีก็อาจเริ่มมาจากสมการเชิงอนุพันธ์ที่อธิบายสถานะของความสมดุลของการไหล เป็นต้น

สมการเชิงอนุพันธ์ที่สอดคล้องกับปัญหาต่าง ๆ นั้น ปกติจะประดิษฐ์ได้โดยไม่ยากเลย หากแต่ว่าผลเฉลยแม่นยำตรงที่ต้องการ จำเป็นต้องทำการหาออกมาโดยวิธีวิเคราะห์ นั้นทำได้ยากลำบากหรือ จะหาไม่ได้เลยก็ได้ เหตุผลดังกล่าวก่อให้เกิดวิธีการหาผลเฉลยโดยประมาณ นั้นมีหลายๆ วิธีการ วิธีการที่ได้รับความนิยมกันอย่างกว้างขวางในอดีตที่ผ่านมา คือ วิธีการผลต่างสี่เหลี่ยม (Finite Difference Method)

หลักการที่สำคัญของวิธีการผลต่างสี่เหลี่ยมก็คือการหาค่าผลเฉลยโดยประมาณ โดยเริ่มจากการเขียนสมการเชิงอนุพันธ์ให้อยู่ในรูปแบบของระบบสมการผลต่างสี่เหลี่ยม (System of Difference Method) ข้อดีของวิธีการผลต่างสี่เหลี่ยมนี้ก็คือ วิธีดังกล่าวเป็นวิธีการที่ง่ายต่อการศึกษาและการทำความเข้าใจ รวมไปถึงความสะดวกในการเขียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อใช้ในการประมวลผลเฉลยของปัญหานั้นๆ ส่วนข้อเสียของการใช้วิธีการผลต่างสี่เหลี่ยมก็มีหลายประการเช่น ความไม่สะดวกในการกำหนดเงื่อนไขขอบเขต (Application of Boundary Conditions) และที่สำคัญที่สุดก็คือความยากลำบากในการประยุกต์วิธีการนี้เพื่อใช้กับปัญหาที่มีรูปร่างลักษณะซับซ้อน ซึ่งการออกแบบสิ่งที่มีรูปร่างลักษณะซับซ้อนในปัจจุบันนี้ ได้กลายเป็นสิ่งจำเป็นเพื่อ การพัฒนาปรับปรุงคุณภาพสิ่งของนั้นๆให้ดียิ่งขึ้น

สาเหตุของความยากลำบากดังกล่าวมีส่วนก่อให้เกิดวิธีหาผลเฉลย โดยประมาณวิธีใหม่ที่เรียกว่าวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method) ที่นิยมเรียกด้วยคำว่า FEM ซึ่งวิธีนี้สามารถนำมาใช้กับปัญหาที่มีรูปร่างซับซ้อนเช่นใดก็ได้ โดยสามารถจำลองรูปร่างลักษณะดั้งเดิมที่แท้จริง

ได้ใกล้เคียงเที่ยงตรงกว่าหลักการของวิธีการนี้ในขั้นต้นก็คล้ายกับวิธีการผลต่างสี่เหลี่ยม ก่อร่างคือเริ่มจากการแบ่งรูปร่างของปัญหาออกเป็นเนื้อที่หลายๆชิ้นที่เรียกว่า อิลิเมนต์ เช่นในตัวอย่างของแผ่นอลูมิเนียมเดิมนี้สามารถแบ่งแผ่นอลูมิเนียมออกเป็นอิลิเมนต์ขนาดต่างๆกัน โดยอิลิเมนต์ต่างๆนี้อาจอยู่ในรูปลักษณะของสามเหลี่ยม และสี่เหลี่ยมคางหมูไม่เท่าก็ได้ ดังเช่นดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 การวิเคราะห์หาผลเฉลยบนแผ่นอลูมิเนียมเดิมด้วยการใช้วิธีการไฟไนต์อิลิเมนต์

ผลประโยชน์สิ่งแรกที่ได้เห็นชัดเจนจากรูป 3.1 ก็คือ วิธีการไฟไนต์อิลิเมนต์ประกอบด้วยอิลิเมนต์ขนาดต่างๆกันที่สามารถจำลองรูปร่างลักษณะดั้งเดิมของแผ่นอลูมิเนียมได้ทางคณิตศาสตร์ (Mathematical Model) ที่มีรูปร่างลักษณะใกล้เคียงกับของจริงดั้งเดิมมากที่สุด ดังนั้นค่าผลเฉลยโดยประมาณที่จะคำนวณออกมาก็มีความแม่นยำมากขึ้น

3.2 วิธีการไฟไนต์อิลิเมนต์

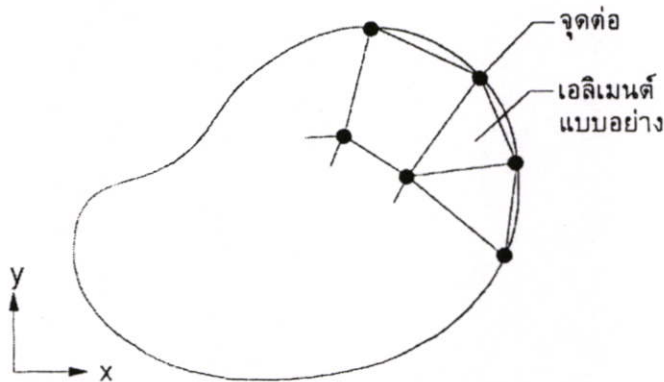
ในการแก้ปัญหาใดปัญหาหนึ่ง ปัญหาหนึ่งจะประกอบด้วยสมการเชิงอนุพันธ์ และเงื่อนไขขอบเขตที่กำหนดมาให้ ค่าผลเฉลยแม่นยำตรง ของปัญหาดังกล่าวจะประกอบด้วยค่าของตัวแปรต่างๆกันตามตำแหน่งบน รูปร่างลักษณะของปัญหาหนึ่ง หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งก็คือ ค่าผลเฉลยแม่นยำตรงจะประกอบด้วยค่าต่างๆทั้งหมด นับเป็นจำนวนอนันต์ค่า แทนที่จะทำการหาค่าแม่นยำตรงที่ประกอบด้วยค่าต่างๆ จำนวนมากมายเช่นนี้ซึ่งสำหรับปัญหาในทางปฏิบัติจะทำได้ หลักการก็คือการทำการเปลี่ยนค่าทั้งหมดที่มีจำนวนอิลิเมนต์ค่านั้นมาเป็นค่าโดยประมาณซึ่งมีจำนวนที่นับได้ (Finite) ด้วยการแทนรูปร่างลักษณะของปัญหาด้วยอิลิเมนต์ (Element) ซึ่งมีขนาดต่างๆกัน ดังเช่น ได้แสดงในตัวอย่างแผ่นอลูมิเนียม

วิธีการดังกล่าวซึ่งบ่งเป็นนัยว่า ผลเฉลยของแต่ละ อิลิเมนต์นั้นจำเป็นต้องสอดคล้อง (Satisfy) กับสมการเชิงอนุพันธ์และเงื่อนไขขอบเขตที่กำหนดมาให้ในปัญหานั้นๆ ซึ่งหมายความว่า

ว่า หลักการของวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์จะเริ่มต้นจากการ พิจารณาเอลิเมนต์ทีละเอลิเมนต์ โดยการ สร้างสมการสำหรับแต่ละเอลิเมนต์ที่ตั้งอยู่บนรากฐานที่ว่า สมการที่สร้างขึ้นจำเป็นต้องสอดคล้อง กับสมการเชิงอนุพันธ์ของปัญหาที่ทำการเกิดระบบสมการชุดใหญ่ ซึ่งในความหมายทางกายภาพ ก็คล้ายกับการนำทฤษฎีเอลิเมนต์มาประกอบความเข้าด้วยกันก่อให้เกิดเป็นรูปร่างลักษณะทั้งหมด ของปัญหาที่แท้จริง จากนั้นจึงทำการกำหนดเงื่อนไขขอบเขตที่ให้มาลงในระบบสมการชุดใหญ่นี้ แล้วจึงทำการแก้สมการดังกล่าว ซึ่งจะก่อให้เกิดผลเฉลยโดยประมาณ ณ ตำแหน่งต่างๆ ของ ปัญหา นั้น

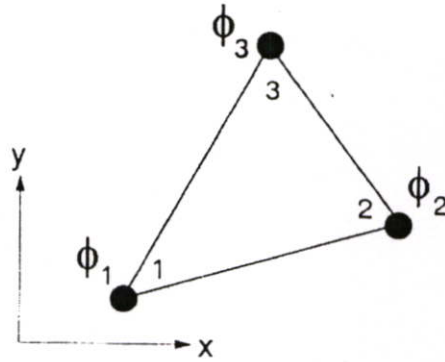
วิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ประกอบด้วยขั้นตอนใหญ่ๆ ทั้งหมด 6 ขั้นตอน ต่อไปนี้

ขั้นตอนที่ 1 การแบ่งขอบเขตรูปร่างลักษณะของปัญหาที่ต้องการหาผลลัพธ์นั้นออกเป็นเอลิเมนต์ย่อยๆ ดังแสดงในรูป 3.2 ขอบเขตดังกล่าวอาจเป็นขอบเขตของปัญหาชนิดต่างๆกัน เช่น ปัญหา ความยืดหยุ่นในของแข็ง (Elasticity Problem) ปัญหาที่เกี่ยวกับอุณหภูมิและความร้อน (Thermal Problem) รวมทั้งปัญหาของการไหล (Fluid Problem)



รูปที่ 3.2 การแบ่งรูปร่างลักษณะของปัญหาออกเป็นเอลิเมนต์แบบต่างๆ

ขั้นตอนที่ 2 การเลือกฟังก์ชันประมาณภายในเอลิเมนต์ (Element Interpolation Functions) เช่น เอลิเมนต์สามเหลี่ยม (เอลิเมนต์แบบอย่างดังแสดงในรูปที่ 3.3) เอลิเมนต์ดังกล่าวประกอบด้วย 3 จุดต่อ ที่มีหมายเลข 1, 2 และ 3 ดังแสดงในรูป 3.3 ตัวที่ไม่รู้ค่าที่จุดต่อเหล่านี้ อาจเป็นค่าการยืดตัวหดตัว (Displacement) ถ้าเรากำลังศึกษาปัญหาความยืดหยุ่นในของแข็ง หรืออาจเป็นค่าอุณหภูมิถ้าเรากำลังศึกษา ปัญหาเกี่ยวกับการถ่ายเทความร้อน หรือไม่ก็อาจเป็นความเร็วของของเหลวเกี่ยวกับการไหลเป็นต้น ลักษณะการกระจายของตัวไม่รู้ค่าบน เอลิเมนต์นี้สามารถเขียนให้อยู่ในรูปของ ฟังก์ชันการประมาณภายในแต่ละตัวไม่รู้ค่าที่จุดต่อได้ ดังนี้



รูปที่ 3.3 อีลิเมนต์สามเหลี่ยมประกอบด้วยจุดสามจุดต่อ โดยมีค่าไม่รู้ค่าอยู่ ณ ตำแหน่งที่จุดต่อ

โดย $N_i(x,y)$, $i = 1,2,3$ คือ ฟังก์ชันประมาณภายในอีลิเมนต์
สมการ (3.1) สามารถเขียนให้อยู่ในรูปของเมทริกซ์ได้ดังนี้คือ

$$\phi(x,y) = N_1(x,y) \phi_1 + N_2(x,y) \phi_2 + N_3(x,y) \phi_3 \quad (3.1)$$

โดย $N_i(x,y)$, $i=1,2,3$ คือ ฟังก์ชันประมาณภายในอีลิเมนต์

สมการ(3.1) สามารถเขียนให้อยู่ในรูปแบบของเมทริกซ์ได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \phi(x,y) &= [N_1 \quad N_2 \quad N_3] \begin{Bmatrix} \phi_1 \\ \phi_2 \\ \phi_3 \end{Bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} N \\ (1 \times 3) \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \phi \\ (3 \times 1) \end{Bmatrix} \end{aligned}$$

โดย $[N]$ คือเมทริกซ์ของฟังก์ชันการประมาณภายในอีลิเมนต์ และ $\{\phi\}$ คือ เวกเตอร์เมทริกซ์ที่ประกอบด้วยตัวไม่รู้ค่าที่ จุดต่อของ อีลิเมนต์นั้น ในที่นี้ สัญญลักษณ์ $[]$ แสดงถึง เมทริกซ์แถว นอน (Row Matrix) และ $\{\}$ แสดงถึงเมทริกซ์แถวตั้ง (Column Matrix)

ขั้นตอนที่ 3 การสร้างสมการอีลิเมนต์ (Element Equations) ดังตัวอย่างเช่นสมการของอีลิเมนต์ สามเหลี่ยมแบบอย่างดังรูปที่ 3.3 จะอยู่ในรูปแบบดังนี้

$$\begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} & K_{13} \\ K_{21} & k_{22} & k_{23} \\ k_{31} & k_{32} & k_{33} \end{bmatrix}_e \begin{Bmatrix} \phi_1 \\ \phi_2 \\ \phi_3 \end{Bmatrix}_e = \begin{Bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \end{Bmatrix}_e \quad (3.2)$$

ซึ่งย่อได้เป็น

$$[K]_e \{\phi\}_e = \{F\}_e \quad (3.3)$$

ขั้นตอนที่ 3 นี้ถือว่าเป็นหัวใจสำคัญของวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ การสร้างสมการของเอลิเมนต์ซึ่งอยู่ในรูปแบบของสมการ (3.2) สามารถทำได้โดย

- ก. วิธีการโดยตรง(Direct Approach)
- ข. วิธีการแปรผัน(Variation Approach)
- ค. วิธีการถ่วงน้ำหนักเศษตกค้าง(Method of Weighted Residuals)

ขั้นตอนที่ 4 การนำสมการของแต่ละเอลิเมนต์ที่ได้มาประกอบกัน ก่อให้เกิดระบบสมการพร้อมกันขึ้น (System of Simultaneous Equations) ในรูปแบบดังนี้

$$\Sigma(\text{element equations}) \longrightarrow [K]_{\text{sys}} \{\phi\}_{\text{sys}} = \{F\}_{\text{sys}} \quad (3.4)$$

ขั้นตอนที่ 5 ทำการประยุกต์เงื่อนไขขอบเขต (Boundary Conditions) ลงในสมการ (3.4) แล้วจึงแก้สมการนั้นเพื่อหา $\{\phi\}_{\text{sys}}$ อันประกอบด้วยตัวไม่รู้ค่าที่จุดต่อ (Node Unknowns) ซึ่งอาจจะเป็นค่าของการเคลื่อนตัว ณ ตำแหน่งต่างๆของโครงสร้าง หรือค่าของ อุณหภูมิที่จุดต่างๆหากเป็นปัญหาที่เกี่ยวกับการถ่ายเทความร้อน หรืออาจเป็นค่าของความเร็วของของไหลหากเป็นปัญหาที่เกี่ยวกับการไหลเป็นต้น

ขั้นตอนที่ 6 เมื่อคำนวณค่าต่างๆที่จุดต่อออกมาได้แล้วก็สามารถทำการหาค่าอื่นๆที่ต้องการทราบต่อไปได้ เช่น เมื่อรู้ค่าการเคลื่อนตัว (Displacement) ณ ตำแหน่งต่างๆของโครงสร้างเราก็สามารถนำไปใช้ในการหาความเครียด (Strain) และความดัน (Stress) ได้ต่อจากขั้นตอนทั้ง 6 ขั้นตอนนี้ จะเห็นได้ว่าวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์เป็นวิธีการที่มีระบบแบบแผนเป็นขั้นเป็นตอน โดยมีหัวใจที่สำคัญคือการสร้างสมการเอลิเมนต์ (ขั้นตอนที่ 3)

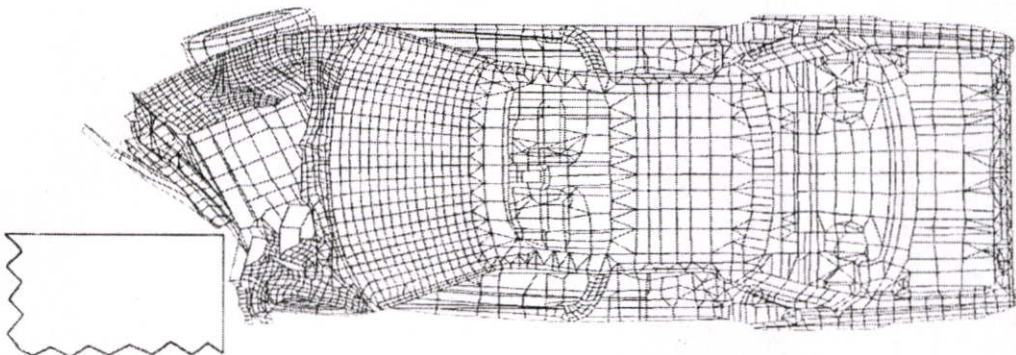
3.3 การประยุกต์วิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์

เนื่องจากรูปแบบของชิ้นงานต่างๆในทาง วิศวกรรมโดยปกติจะมีความซับซ้อน วิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์จึงมีบทบาทเป็นอย่างมากในการช่วยแก้ปัญหาต่างๆ นับตั้งแต่ปัญหาการยึดหยุ่นของของแข็ง การถ่ายเทความร้อนในวัตถุ ตลอดจนการไหลของของไหล ความเข้าใจนี้เองช่วยให้เรามองเห็นภาพรวมและประสิทธิภาพของวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ที่สามารถนำไปใช้ประยุกต์กับ

งานชนิดต่าง ๆ กันได้หากปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นกับงานชนิดนั้นๆ สามารถอธิบายได้ด้วยสมการเชิงอนุพันธ์ ประสิทธิภาพของการไฟไนต์เอลิเมนต์ควบคู่ไปกับวิวัฒนาการทางคอมพิวเตอร์ทำให้เราสามารถคำนวณหาปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้น โดยสะดวกและในขณะเดียวกันช่วยลดค่าใช้จ่ายที่จำเป็นต้องใช้ได้มาก

การแก้ปัญหาด้วยวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ในสมัยแรกเริ่มเห็นในทางด้านกลศาสตร์ของแข็ง(Solid Mechanics) และโครงสร้างเป็นส่วนใหญ่ เนื่องจากปรากฏการณ์ต่างที่เกิดขึ้นในทางด้านนี้สามารถทำความเข้าใจได้โดยไม่ยากนักวิวัฒนาการของวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ทางด้านของแข็งนี้ในปัจจุบันสามารถนำไปใช้คู่กับการออกแบบชิ้นงานที่มีรูปร่างซับซ้อน เช่น เพลาค้อเหวี่ยงเครื่องยนต์ การใช้ไฟไนต์เอลิเมนต์แบบสามมิติจำนวนมากที่มีขนาดต่างๆกันประกอบกันขึ้นมาและสามารถจำลองรูปแบบของเพลาดังกล่าวได้อย่างเที่ยงตรงเนื่องจากวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์สามารถใช้แก้สมการเชิงอนุพันธ์สำหรับปัญหาที่มีรูปร่างลักษณะซับซ้อนได้อย่างมีประสิทธิภาพ

วิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์มีส่วนช่วยเป็นอย่างมากในการศึกษาและออกแบบยานพาหนะเพื่อก่อให้เกิดประสิทธิภาพสูงขึ้นรวมทั้งเพื่อความปลอดภัยที่สูงสุด และขณะเดียวกันก็เพื่อช่วยลดค่าใช้จ่ายที่ต้องใช้ในการทดลอง ดังรูปที่ 3.4 แสดงการจำลองแบบไฟไนต์เอลิเมนต์และการยุบตัวของโครงสร้างรถยนต์ขนาดเกิดการชน การออกแบบโครงสร้างที่เหมาะสมเป็นสิ่งสำคัญต่อความปลอดภัยดังตัวอย่างเช่น คานที่วางตัวตามแนวยาวของตัวรถควรให้เกิดแต่การหดตัวที่สั้นลงในขณะที่เกิดการชนโดยให้มีการโก่งงอขึ้นน้อยที่สุด เป็นต้น การออกแบบด้วยการทดลองเพื่อให้เกิดปรากฏการณ์ที่ต้องการจะสิ้นเปลืองเวลาและค่าใช้จ่ายมากเมื่อเปรียบเทียบกับ การออกแบบด้วยการคำนวณซึ่งสามารถทำการเปลี่ยนแปลงได้โดยง่ายทำให้ผู้ออกแบบสามารถเปลี่ยนแปลงลักษณะรูปแบบรถได้โดยง่ายและรวดเร็วเพื่อที่จะได้รูปแบบที่จะก่อให้เกิดประสิทธิภาพที่สูงสุดก่อนที่จะนำไปสร้างเป็นแบบจริงเพื่อใช้ในการทดลองและการทำการผลิตต่อไป



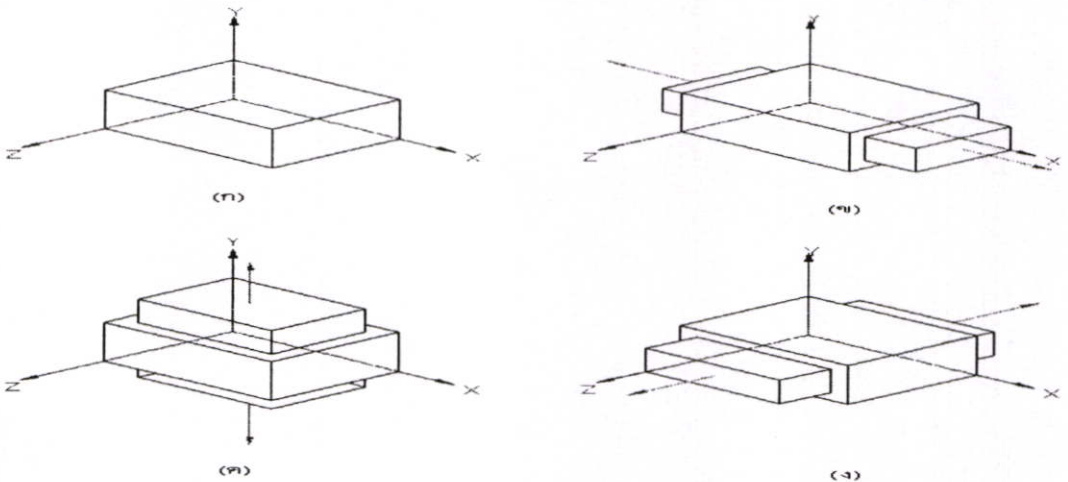
รูปที่ 3.4 การประยุกต์วิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ในการคำนวณการยุบตัวของรถ

3.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดในสามมิติ

รูปแบบของอิลิเมนต์สามมิติ ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของวัสดุที่มีพื้นที่ผิวสม่ำเสมอ สามารถหาได้ดังรูป ซึ่งความเค้น ในแกน x, y, และ z เป็นอิสระต่อกัน

ขั้นแรกจะพิจารณาการเปลี่ยนแปลงความยาวของอิลิเมนต์ในทิศทาง x โดยสมมุติ σ_x และ σ_y เท่ากับ 0 เช่นในรูป (ข) ดังนั้นความเครียดในทิศทาง x คือ

$$\varepsilon'_x = \frac{\sigma_x}{E} \quad (3.5)$$



รูปที่ 3.5 รูปอิลิเมนต์สามมิติที่มีความเค้นตั้งฉาก

ซึ่ง E คือ Young's Modulus จากรูป ค ซึ่งมีเฉพาะ σ_y ในทิศทาง y ($+\sigma_y$) จะทำให้เกิดความเครียดมีค่าเป็นลบในทิศทาง x คือ

$$\varepsilon''_x = -\nu\sigma_y/E \quad (3.6)$$

ซึ่งค่า ν คือ Poisson Ratio

ในการทำนองเดียวกันถ้ามีเฉพาะ σ กระทำในทิศทาง Z เช่นในรูป ค ความเครียดในทิศทาง X ก็คือ

$$\varepsilon''_x = -\nu\sigma_z/E \quad (3.7)$$

ดังนั้น ในกรณีที่อิทธิพลภายใต้ σ_x, σ_y และ σ_z เราสามารถหาความเครียดในทิศทาง X ได้ โดยการรวมสมการ 3.5, 3.6 และ 3.7 จะได้

$$\varepsilon_x = \varepsilon_x' + \varepsilon_x'' + \varepsilon_x''' = \frac{1}{E}(\varepsilon_x' + \varepsilon_x'' + \varepsilon_x''') = \frac{1}{E}(\sigma_x - \nu\sigma_y - \nu\sigma_z) \quad (3.8)$$

ส่วนความเครียดในทิศทาง Y และ Z ภายใต้ความเค้นเดียวกับที่กล่าวมาแล้วคือ

$$\varepsilon_y = \frac{1}{E}(\sigma_x - \nu\sigma_y - \nu\sigma_z)$$

$$\varepsilon_z = \frac{1}{E}(\sigma_x - \nu\sigma_y - \nu\sigma_z) \quad (3.9)$$

ในสมการ 3.8 และ 3.9 ถ้าทราบ $\varepsilon_x, \varepsilon_y$ และ ε_z ก็สามารถหาความเค้น $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ ได้คือ

$$\sigma_x = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)}[\varepsilon_x(1-\nu) + \nu\varepsilon_y + \nu\varepsilon_z]$$

$$\sigma_y = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)}[\varepsilon_x + \varepsilon_y(1-\nu) + \nu\varepsilon_z]$$

$$\sigma_z = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)}[\nu\varepsilon_x + \varepsilon_y(1-\nu) + \nu\varepsilon_z] \quad (3.10)$$

จากสมการของ ฮุก $\sigma = \varepsilon E$ ซึ่ง σ คือความเค้นตั้งฉากในทำนองเดียวกันกับความสัมพันธ์ของความเค้นเฉือน Z และความเครียดเฉือน γ คือ

$$\tau = G\gamma \quad (3.11)$$

ซึ่ง G คือมอดูลัสเฉือนนั้นความเครียดเฉือนที่ด้านทั้ง 3 ของอิทธิพล คือ

$$\gamma_{xy} = \frac{\tau_{xy}}{G}, \gamma_{yz} = \frac{\tau_{yz}}{G}, \gamma_{zx} = \frac{\tau_{zx}}{G} \quad (3.12)$$

ส่วนความเครียดเฉือนอีกสามด้านตรงข้ามจะมีขนาดเท่ากันแต่ทิศทางตรงกันข้ามถ้าทราบค่าความเครียดเฉือนทั้งสามก็สามารถหาความเครียดได้คือ

$$\varepsilon_{xy} = G\gamma_{xy}, \varepsilon_{yz} = G\gamma_{yz}, \varepsilon_{zx} = G\gamma_{zx} \quad (3.13)$$

เนื่องจาก $G = \frac{E}{2(1+\nu)}$ ดังนั้นความเค้นในสมการ 3.10 และ 3.13 เขียนในรูปของสมการเมตริกซ์ได้คือ

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \varepsilon_{xy} \\ \varepsilon_{yz} \\ \varepsilon_{zx} \end{Bmatrix} = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} * \begin{Bmatrix} 1-\nu & \nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ & 1-\nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ & & 1-\nu & 0 & 0 & 0 \\ & & & \frac{1-2\nu}{2} & 0 & 0 \\ & & & & \frac{1-2\nu}{2} & 0 \\ & & & & & \frac{1-2\nu}{2} \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ \gamma_{xy} \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{zx} \end{Bmatrix} \quad (3.14)$$

หรือเขียนในรูปย่อคือ $\{\sigma\} = [D][\varepsilon]$.

เมตริกซ์ [D] จะเป็นเมตริกซ์กำลังสองซึ่งเรียกว่า เมตริกซ์แสดงความสัมพันธ์ ระหว่างความเค้นความเครียด

$$[D] = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{Bmatrix} 1-\nu & \nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ & 1-\nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ & & 1-\nu & 0 & 0 & 0 \\ & & & \frac{1-2\nu}{2} & 0 & 0 \\ & & & & \frac{1-2\nu}{2} & 0 \\ & & & & & \frac{1-2\nu}{2} \end{Bmatrix} \quad (3.15)$$

3.5 การออกแบบเพื่อรับแรงแบบ STATIC

ทฤษฎี จุดความเค้นสูง (Stress Concentration)

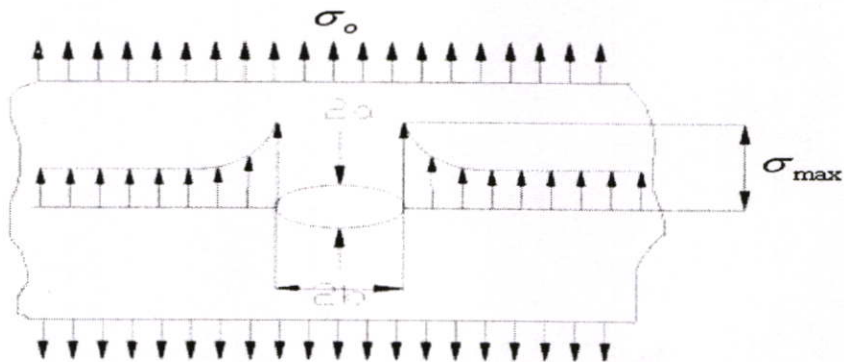
ในการสร้างสมการพื้นฐานของความเค้น ไม่ว่าจะเป็นการดึง กด หรือ บิดนั้นได้มีการตั้งสมมติฐานเอาไว้ว่าชิ้นงานที่กำลังพิจารณาอยู่นั้นไม่มีการเปลี่ยนแปลงขนาดพื้นที่หน้าตัด แต่ในการออกแบบเครื่องจักรกลนั้นจะต้องมีการเปลี่ยนแปลงพื้นที่หน้าตัดของชิ้นส่วน ในการเปลี่ยนแปลงพื้นที่หน้าตัดของชิ้นส่วนจะทำให้การกระจายความเค้นเป็นไปอย่างไม่สม่ำเสมอรอบ ๆ ตำแหน่งที่มีการเปลี่ยนแปลงพื้นที่หน้าตัด ดังนั้นสมการความเค้นพื้นฐานจึงใช้ไม่ได้ในกรณีนี้ จุดที่ไม่ต่อเนื่องต่าง ๆ เหล่านี้เรียกว่า (Stress Riser) และบริเวณนั้นเรียกว่าจุดความเค้นสูง (Stress Concentration)

จุดความเค้นสูงในทางทฤษฎีทางเรขาคณิตใช้ตัว K_T หรือ K_{TS} เป็นเครื่องหมายค่าเหล่านี้เขียนเป็น

$$\text{สมการได้ว่า} \quad K_T = \frac{\sigma_{\max}}{\sigma_o}, \quad K_{TS} = \frac{\tau_{\max}}{\tau_o} \quad (3.16)$$

การหาค่าปัจจัยของความเค้นสูงสุด

การหาค่าปัจจัยของความเค้นสูงสุดสามารถจะคำนวณได้จากรูปร่างทางเรขาคณิตของชิ้นส่วนในรูปเป็นรูปของแผ่นวัสดุขนาดใหญ่ที่ถูกดึงโดยแรงเค้นทางด้านดึงมีค่าเท่ากับ



รูปที่ 3.6 การกระจายความเค้นรอบ ๆ รูรูปไข่ภายในวัสดุขนาดใหญ่ที่ถูกดึง

รูปร่างในวัสดุจะมีค่าความเค้นที่ขอบมีค่าเท่ากับ

$$\sigma_{\max} = \sigma_o \left(1 + \frac{2b}{a} \right) \quad (3.17)$$

ถ้าหากว่า a เท่ากับ b รูปร่างก็จะกลายเป็นวงกลมซึ่งสมการข้างบนจะกลายเป็น

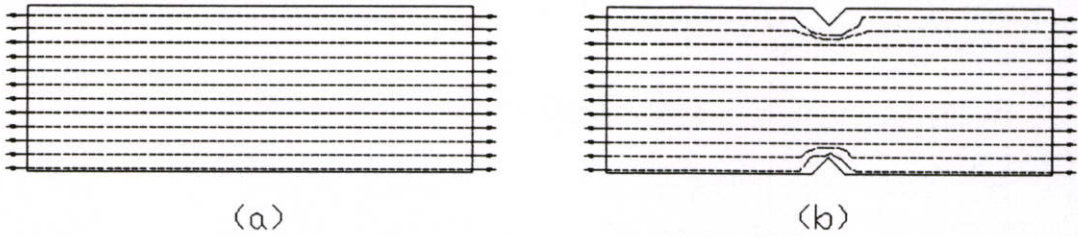
$$\sigma_{\max} = 3\sigma_o \quad (3.18)$$

ดังนั้น $K_T = 3$ ในตัวอย่างนี้ให้สังเกตว่าแผ่นใหญ่มากและ σ_o คือความเค้นที่เกิดขึ้นในตำแหน่งห่างจากรูปร่างมาก ๆ

สมการ $\sigma_{\max} = \sigma_o \left(1 + \frac{2b}{a} \right)$ สามารถใช้ในการหาความเค้นในปลายของรอยแตกซึ่งฉากกับทิศทางของความเค้น (Transverse Crack) โดยทำให้ค่าของ a เล็กมากเมื่อเปรียบเทียบกับ b ในกรณีนี้ค่า K_T จะเป็นค่าที่ใหญ่มาก ในกรณีที่กลับกันคือรอยแตกนั้นชี้ไปในทิศทางของความเค้น (Longitude Crack) ซึ่งค่าของ b น้อยมากเมื่อเทียบกับ a ก็จะทำให้ K_T มีค่าใกล้เคียงหนึ่ง

ในการออกแบบ ผู้ออกแบบควรมีความรู้สึ่ว่าจุดความเค้นสูงจะเกิดขึ้นที่ตำแหน่งใดได้บ้าง ซึ่งความรู้สึกลักษณะนี้อาจจะใช้ในการนำไปหาค่า K_T ได้ ถ้าหากว่าไม่สามารถทำการทดลองได้โดยตรง

การเปรียบเทียบต่อไปนี้อาจจะใช้ในการให้ภาพพจน์เกี่ยวกับความเค้นสูงได้ รูปที่ 3.7 แสดงให้เห็นแท่งวัสดุที่มีหน้าตัดคงที่ถูกต้องซึ่งเราสามารถสร้างรูปของแรงได้ดังรูป a ในเส้นแรงแต่ละเส้นจะหมายถึงแรงส่วนหนึ่งในวัสดุเมื่อพื้นที่หน้าตัดคงที่ความห่างของเส้นจะเท่ากัน แต่หากเราตัดร่องลงไปในแต่ละรูป b ก็จะทำให้ความเค้นเพิ่มขึ้น ในส่วนที่ไกลออกไปจะมีความห่างของเส้นเท่ากัน แต่บริเวณร่องเส้นจะชิดกันเพื่อหลบร่อง ความรุนแรงจะเป็นสัดส่วนกับการบิดตัวของเส้น การอธิบายทำได้อีกวิธีโดยดูจากรูปที่ 3.7 ซึ่งแสดงให้เห็นเส้นแท่งวัสดุสองเส้นแท่งหนึ่งตรงอีกแท่งคดให้โค้ง ถ้าพิจารณาที่แรงเท่ากันจะเห็นว่าแท่งที่โค้งเปลี่ยนขนาดได้มากกว่าแท่งที่ตรง

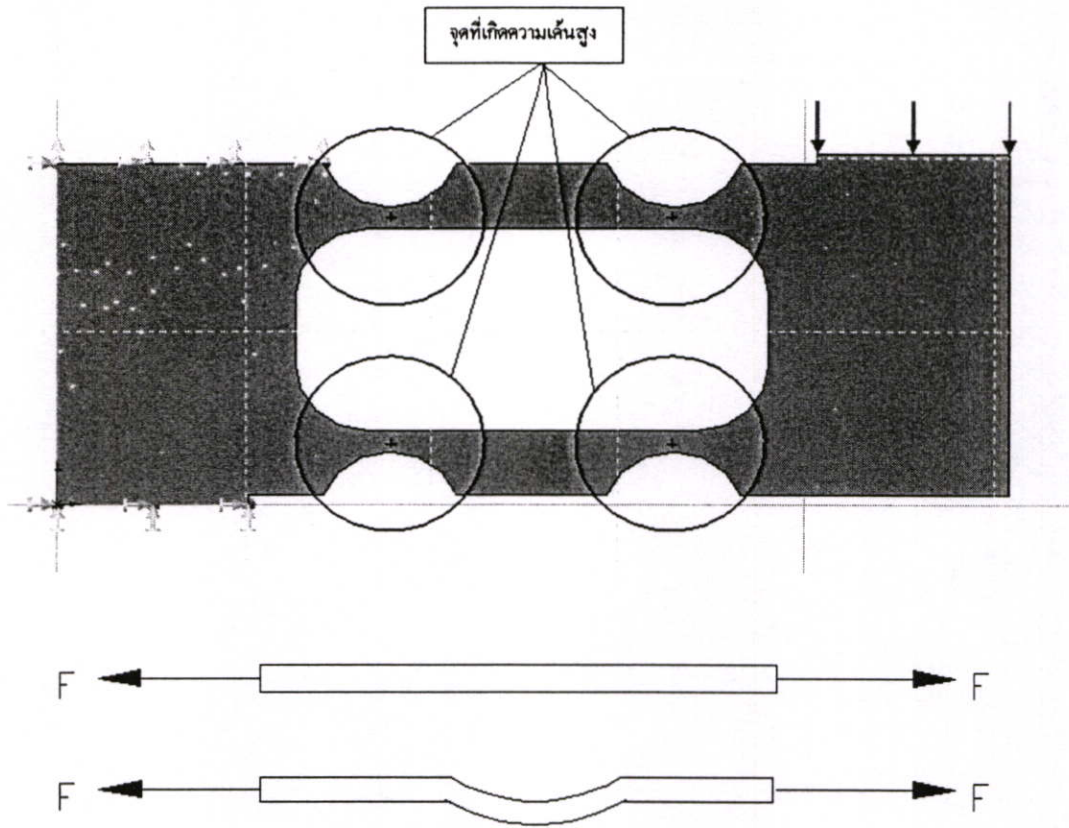


รูปที่ 3.7 การให้ภาพพจน์เกี่ยวกับความเค้นสูง

การเปรียบเทียบแรงด้วยเส้นนี้สำคัญเนื่องจากว่าเป็นวิธีการมองดูว่าทำไมถึงได้มีจุดความเค้นสูงเกิดขึ้น

3.6 การประยุกต์ใช้จุดความเค้นสูงในการออกแบบ DUMMY (LOAD CELL)

จากความสัมพันธ์ของกฎของฮุก $\sigma = E\varepsilon$ ถ้าเราใช้ความรู้ในเรื่องของจุดความเค้นสูง โดยเรากำหนดจุดที่ติดตั้ง สเตรนเกจ ขึ้นมาหลังจากนั้นทำการออกแบบรูปทรงของจุดที่ติดตั้งเป็นจุดที่มีความเค้นสูงซึ่งจากกฎของฮุกความเค้นที่เกิดขึ้นย่อมจะส่งผลให้ความเครียดที่เกิดบริเวณนั้นมีค่ามากขึ้นเป็นลักษณะแปรผันตรง การที่เราสร้างให้จุดติดตั้ง สเตรนเกจ ให้มีความเครียดสูงก็จะส่งผลต่อความไวในการตรวจวัดของ สเตรนเกจ มีค่าสูงขึ้น แต่ในการออกแบบจะต้องระวังไม่ให้ค่าความเครียดสูงเกินจุด YIELD POINT ของวัสดุที่ใช้เพราะจะทำให้เกิดการเสียรูปอย่างถาวร



รูปที่ 3.8 แสดงให้เห็นจุดเว้าเข้าไปนั้นเป็นจุดที่เกิดความเค้นสูง

รูปที่ 3.8 เป็นตัว DUMMY ที่ทำการย่อส่วนมาจากที่มีขายทั่วไปจะเห็นได้ว่าในส่วนที่ ออกแบบให้เว้าเข้าไปนั้นเป็นจุดที่เกิดความเค้นสูงและก็เป็นจุดที่ผู้ผลิตทำการติดตั้ง สเตรนเกจ ไว้ ตรงนั้น

จากการศึกษารูปแบบของ โหลดเซลล์ ที่มีขายทั่วไป ถ้าเราจะทำการออกแบบเองโดยใช้ โปรแกรม COSMOS เป็นตัวช่วยออกแบบเราไม่จำเป็นต้องหาสมการของ DUMMY ที่เราจะติดตั้ง เพียงแต่ต้องออกแบบให้ DUMMY มีค่าความปลอดภัยตามมาตรฐานและจุดที่จะติดตั้ง สเตรนเกจ มีความเครียดมากพอและมีค่าเป็นเชิงเส้น

3.7 การออกแบบและสร้าง โหลดเซลล์เพื่อทำการวัดแรง

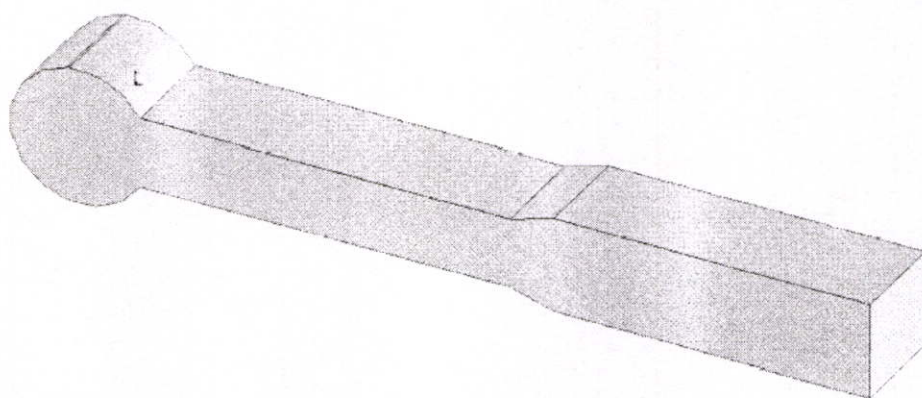
การออกแบบ โหลดเซลล์ เพื่อที่จะทำการวัดแรงได้อย่างมีประสิทธิภาพนั้น จะต้องนำเอา ทฤษฎีทางด้านกลศาสตร์ของวัสดุมาช่วยในการออกแบบ โดยก่อนจะทำการออกแบบรูปร่างของ โหลดเซลล์จะต้องคำนึงถึงว่าแรงที่จะทำการตรวจวัดเกิดขึ้นในลักษณะใด ยกตัวอย่างเช่นต้องการ วัดแรงที่เกิดจากการดึง อาจจะออกแบบโหลดเซลล์ในลักษณะรูปตัว S เพื่อที่จะให้เกิดความเค้น

สูงในบริเวณที่เป็นส่วนโค้งหรือหากต้องการวัดแรงที่เกิดจากน้ำหนักหรือการกดจะใช้โพลดเซลล์ที่ออกแบบเป็นรูปคาน

การออกแบบโดยใช้ทฤษฎีทางกลศาสตร์อย่างเดียวนำมาช่วยในการออกแบบจะทำให้รู้เพียงคร่าวๆว่าแรงที่จะเกิดมีมากที่สุดเท่าไร และจุดใดของรูปทรงโพลดเซลล์ที่มีโอกาสจะเกิดความเสียหายมากที่สุด ลักษณะรูปร่างของความเค้นที่เกิดกับโพลดเซลล์จะเป็นเช่นไร เมื่อมีแรงมากระทำ สิ่งเหล่านี้ไม่สามารถวิเคราะห์ได้ด้วยทฤษฎีทางกลศาสตร์ทั่วไป และไม่สามารถให้คำตอบเกี่ยวกับปัญหาเหล่านี้ได้ ต้องใช้ทฤษฎีของไฟไนต์อิเลเมนต์มาช่วยในการวิเคราะห์และออกแบบ

ขั้นแรกของการออกแบบโพลดเซลล์

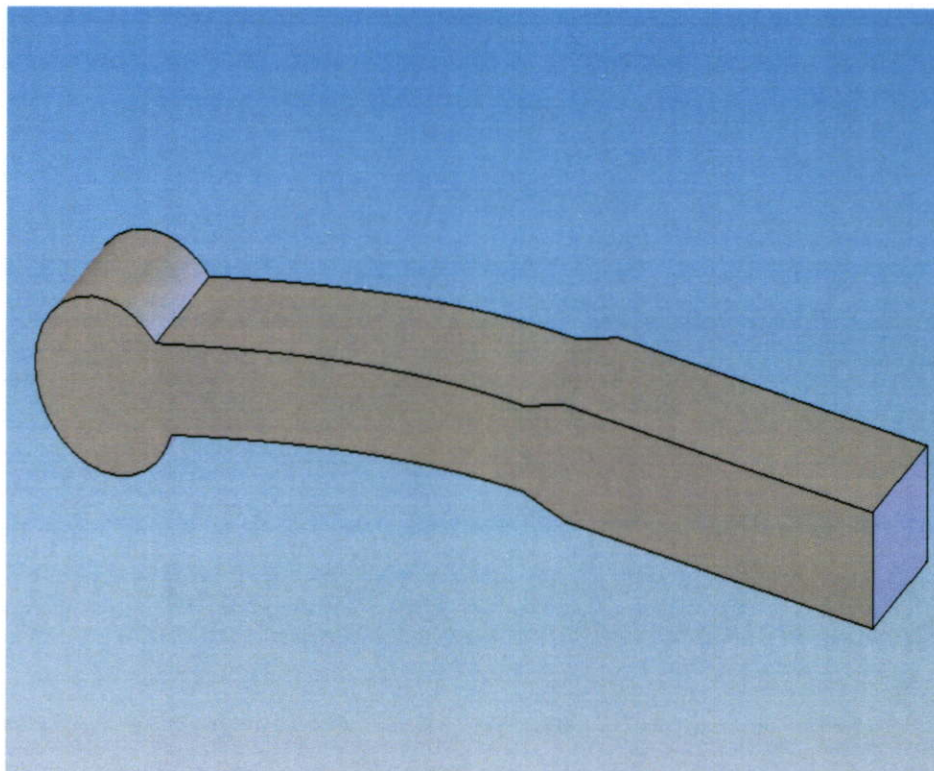
สิ่งที่ต้องการวัดก็คือแรงที่เกิดจากการชั่งน้ำหนัก ลักษณะของอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดจะเป็นลักษณะรูปร่างของคานเพื่อใช้ในการชั่งน้ำหนัก ดังรูป



รูปที่ 3.9 รูปร่างของคานตามแนวคิด

แรงที่เกิดขึ้นจากการชั่งน้ำหนักหรือแรงกดทับที่ปลายคาน จะทำให้คานได้รับแรงและเกิดความเค้นดังรูปที่ 3.10 และสิ่งที่ต้องการวัดก็คือแรงที่เกิดจากการชั่งน้ำหนักซึ่งที่จะทำการตรวจรู้ได้โดยโพลดเซลล์ ดังนั้นบริเวณที่จะใส่โพลดเซลล์เข้าไปก็คือบริเวณที่คานเกิดความเครียดมากที่สุด จากรูปร่างและทิศทางของความเค้นที่เกิดขึ้นจะเห็นได้ว่าส่วนที่ได้รับแรงเค้นสูงสุดนั้นมีลักษณะในการรับแรงคล้ายกับโพลดเซลล์ประเภทคานที่ใช้ในการชั่งน้ำหนัก

การออกแบบโพลดเซลล์สิ่งที่ต้องคำนึงถึงก็คือความเค้นสูงสุดที่โพลดเซลล์จะทำการวัดได้ซึ่งหากความเค้นที่เกิดกับโพลดเซลล์มากเกินไปแล้วจะส่งผลให้โพลดเซลล์เกิดการเสียรูปได้



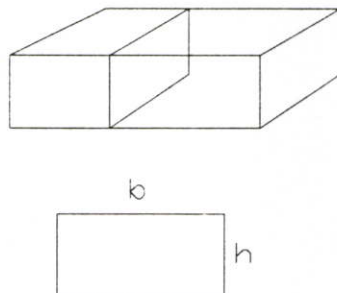
รูปที่ 3.10 ทิศทางของแรงที่เกิดบนคาน

โดยถ้าเป็นคานที่มีพื้นที่หน้าตัดคงที่นั้นสามารถที่จะคำนวณหาความเค้นสูงสุดที่เกิดกับคานโดยสัดส่วน คือ

$$\frac{M}{\sigma} = \frac{I}{C} \quad (3.19)$$

- เมื่อ
- M คือ โมเมนต์ที่หาจากผังโมเมนต์ของคาน
 - σ คือ แรงความเค้นที่เกิดขึ้น
 - I คือ โมเมนต์ความเฉื่อยของ พื้นที่หน้าตัดคาน
 - C คือ จุดศูนย์กลางของคาน

การที่จะหาความเค้นที่ยอมรับได้จะต้องหาค่าของ M , I และ C
โดย ค่าของ M หาได้จากฝั่งโมเมนต์คาน I และ C หาได้จาก



รูปที่ 3.11 รูปคานที่มีพื้นที่หน้าตัดคงที่

$$c = \frac{h}{2}$$

$$I = \iiint_r h^2 \sigma(h,b) d\sigma$$

$$= \int_{-\frac{b}{2}}^{\frac{b}{2}} \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} h^2 db dh$$

$$= \frac{1}{3} \left(\frac{h^3}{8} + \frac{h^3}{8} \right) \left(\frac{b}{2} + \frac{b}{2} \right)$$

$$= \frac{h^3 b}{12}$$

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

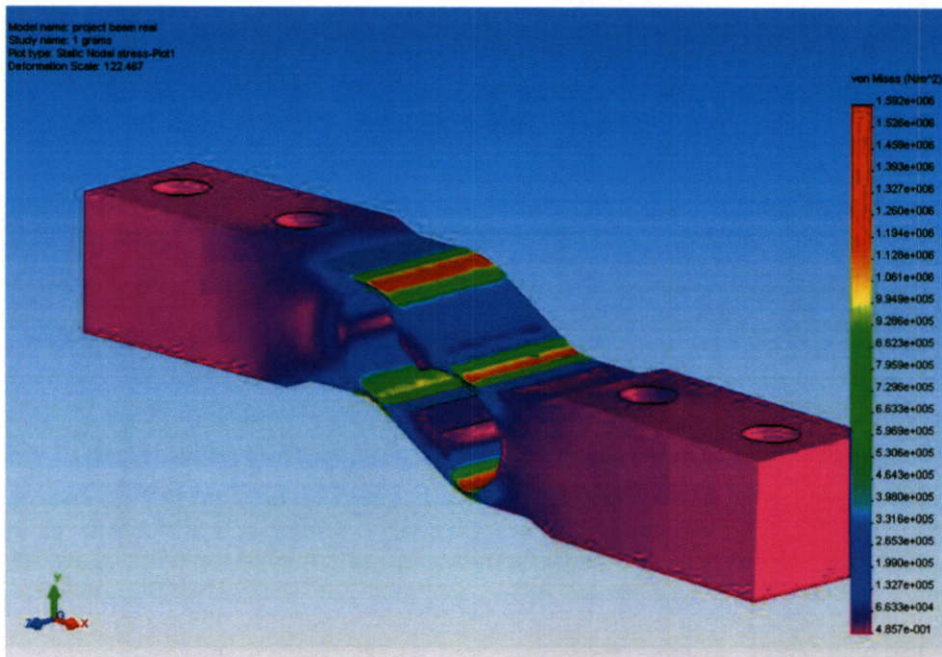
$$= M \frac{h}{2} \left(\frac{12}{h^3 b} \right)$$

$$= \frac{\sigma M}{h^2 b}$$

(3.20)

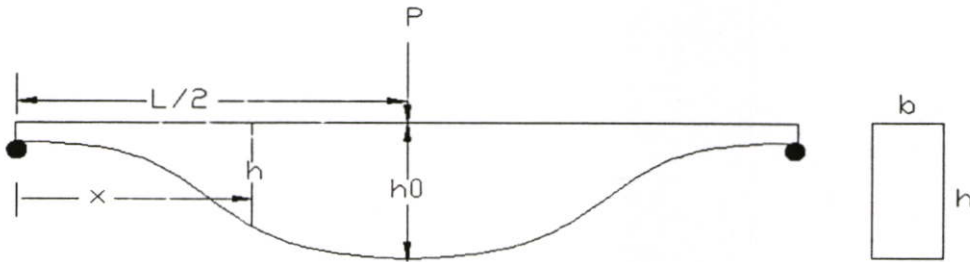
เพราะฉะนั้น

จากสมการที่ 3.20 จะทำให้รู้ค่าความเค้นสูงสุดที่จะยอมรับได้ (σ_{max}) แต่การออกแบบคานให้มีพื้นที่หน้าตัดคงที่นั้นจะทำให้ความเค้นที่เกิดขึ้นกับคานนั้นมีค่าไม่สูงเมื่อเทียบกับปริมาณของวัสดุที่เสียไป ทางแก้ไขคือการออกแบบโพลคเชลล์ให้มีส่วนโค้งเว้าตามทฤษฎีของการเกิดจุดความเค้นสูงซึ่งโพลคเชลล์ที่มีขายทั่วไปจะใช้วิธีนี้ แต่เมื่อนำมาวิเคราะห์ดังรูปจะเห็นว่าจุดความเค้นสูง มีการเกิดบริเวณแคบ ซึ่งเมื่อทำการติดสเตรนเกจไปแล้วจะทำให้สเตรนเกจได้รับความเค้นไม่เท่ากันตลอดทั้งแผ่นมีผลให้สเตรนเกจได้รับความเค้นบริเวณพื้นที่หน้าตัดที่มีขนาดเล็กซึ่งเป็นจุดที่เกิดความเค้นสูงขึ้นมากกว่าพื้นที่บริเวณอื่น โดยแสดงให้เห็นในรูปที่ 3.12 ซึ่งจากรูปการแสดงให้เห็นถึงว่าเมื่อมีแรงมากระทำบน โพลคเชลล์จะเกิดการเปลี่ยนแปลง และเกิดแรงตรงจุดใดบ้าง



รูปที่ 3.12 รูปของโพลคเชลล์เมื่อถูกแรงมากระทำ

การที่จะทำให้ทั่วทั้งบริเวณของคานที่จะทำการติดตั้งสเตรนเกจมีความเค้นเท่ากันจะต้องให้พื้นที่หน้าตัดของคานเปลี่ยนแปลงหาได้จากตัวอย่าง



รูปที่ 3.13 รูปคานที่มีพื้นที่หน้าตัดเล็กตามกฎของฮุก

ฝั่งโมเมนต์ที่ $0 \leq x \leq \frac{L}{2}$ ได้

$$M = \frac{P}{2}x \quad (3.21)$$

จากสมการ 3.21 จะได้

$$= \frac{\sigma M}{h^2 b}$$

$$= \frac{3P}{h^2 b}x$$

$$h^2 = \frac{3Px}{\sigma b} \quad (3.22)$$

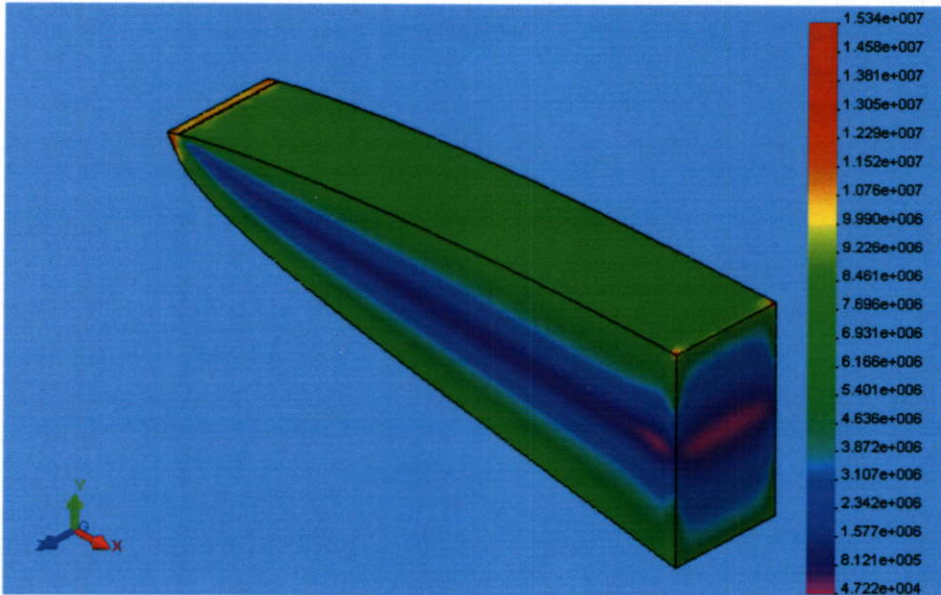
ให้ที่ $h=h_0$ และ $x=L/2$ เกิด $\sigma = \sigma_x$

$$h_0^2 = \frac{3PL}{2\sigma_x b}$$

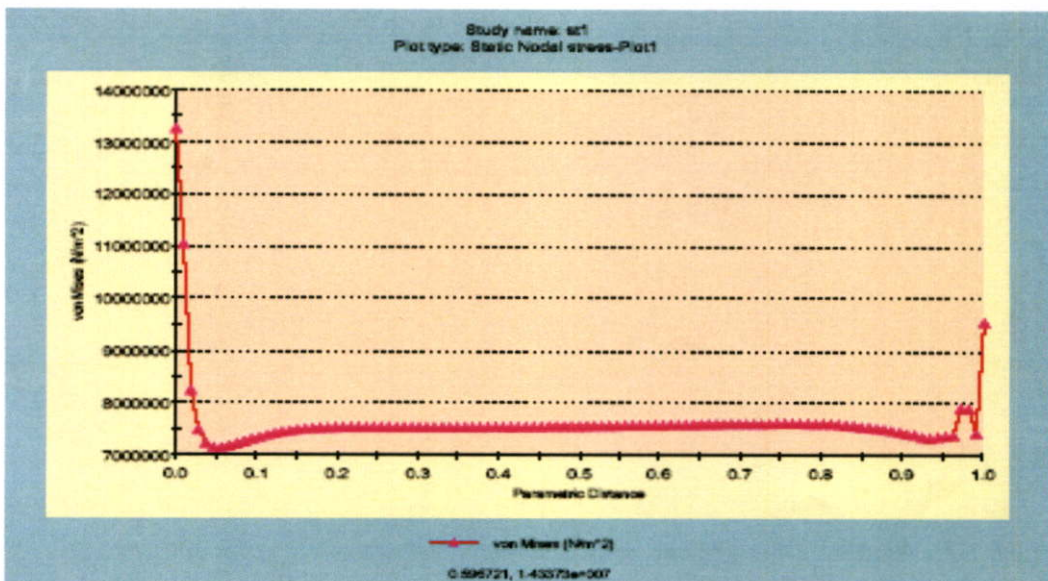
$$x \left(\frac{2h_0^2}{L} \right) = \frac{3Px}{\sigma_x b} = h_0^2$$

เพราะฉะนั้น

$$h^2 = x \left(\frac{2h_0^2}{L} \right) \quad (3.23)$$

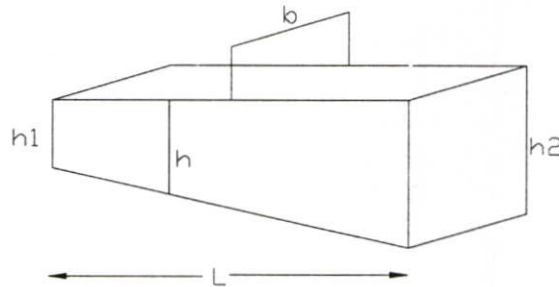


รูปที่ 3.14 รูปการทดสอบด้วยโปรแกรมCOSMOSของคานแบบพื้นที่หน้าตัดไม้คงที่แบบลักษณะเป็นเส้นตรง



รูปที่ 3.15 กราฟความเค้นที่เกิดจากแรงที่มากระทำที่ปลาย

จากกราฟรูปที่ 3.15 เป็นการแสดงให้เห็นค่าของความเค้นของคานพื้นที่หน้าตัดไม่คงที่ว่ามี ความเค้นเกิดขึ้นอย่างสม่ำเสมอ แต่เนื่องจากว่ารูปร่างที่ได้นี้เป็นส่วนโค้งเว้าซึ่งการที่จะทำการขึ้นรูปโลหะให้เป็นรูปทรงเช่นนี้ ทำได้ยากดังนั้น โพลคเซลล์แบบคานที่สามารถที่จะทำการขึ้นรูปได้จริง ๆ แล้ว จะต้องเป็นลักษณะของรูปทรงที่เป็นเส้นตรงดังรูป 3.16



รูปที่ 3.16 รูปทรงโพลคเซลล์ที่มีพื้นที่หน้าตัดไม่คงที่ แบบมีลักษณะเป็นเส้นตรง

การคำนวณหาความเค้นแต่ละจุดสามารถหาได้จากสมการด้านล่าง

$$h = \frac{h_2 - h_1}{L}x + h_1 \quad (3.24)$$

ให้ $h_2 = kh_1$ ($k=1,2,3,\dots,n$)

จาก

$$h = \frac{h_1}{L}((k-1)x + L)$$

$$\sigma = \frac{MC}{I} = \frac{6Px}{bh^2}$$

$$\sigma = \frac{Pxh_1((k-1)x + L)}{L} \left(\frac{6L^3}{h_1^3((k-1)x + L)^3} \right)$$

$$\sigma = \frac{PL^2}{bh_1^2((k-1)x + L)^2} \quad (3.25)$$

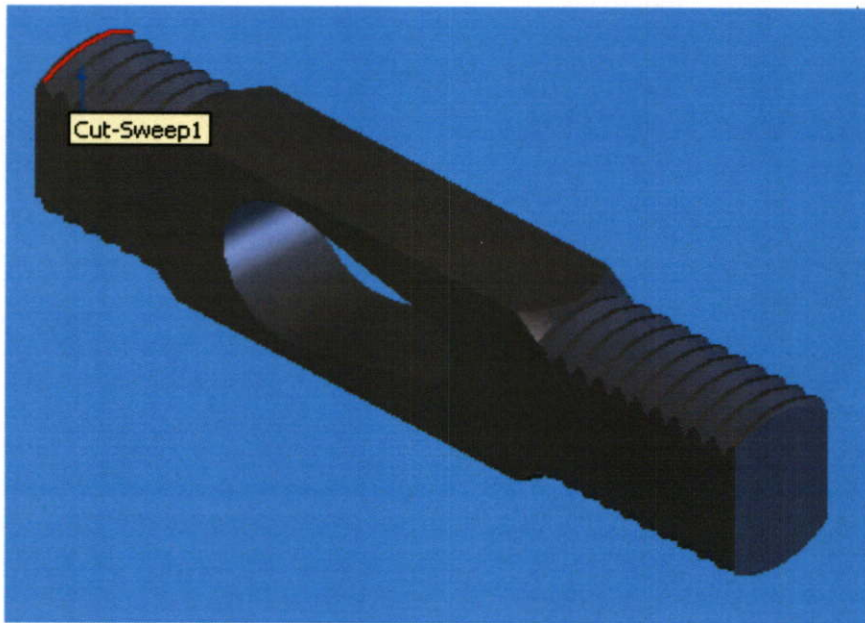
การออกแบบโพลคเซลล์แบบนี้จะทำให้การกระจายตัวของความเค้นมีค่ามากและสามารถขึ้นรูปได้จริง แต่ทุกบริเวณจะมีความเค้นที่ไม่เท่ากับการที่จะหาจุดที่ความเค้นมากที่สุดจะหาได้จาก

$$\frac{d\sigma}{dx} = 0$$

$$0 = \frac{d\sigma}{dx} = \left(\frac{\sigma PL^2}{bh_1^2} \right) \frac{((k-1)x + L - x(k-1))((k-1)x + L)(2)}{((k-1)x + L)^4} \quad (3.26)$$

$$0 = (k-1)x + L - x(k-1)((k-1)x + L)(2)$$

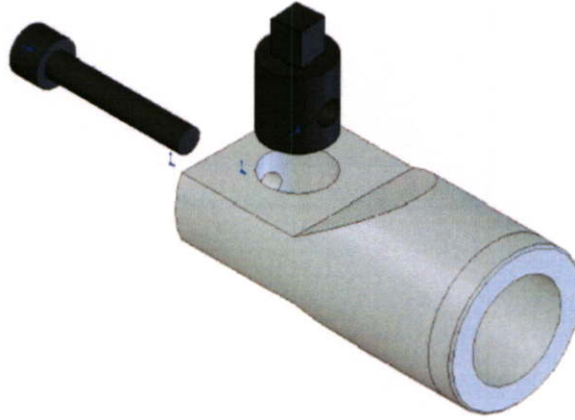
เมื่อรู้ทั้งวิธีคิดและขนาดของแรงที่จำทำการวัดแล้วก็จะทำให้ได้รูปร่างของโพลคเซลล์ที่จะทำการสร้าง จากนั้นจึงทำการออกแบบและตรวจสอบว่าสามารถจะรับแรงจากการวัดได้จริงหรือไม่ จากทฤษฎีทำให้ออกแบบได้ตามรูปที่ 3.17



รูปที่ 3.17 รูปร่างโพลคเซลล์ที่ออกแบบขึ้น

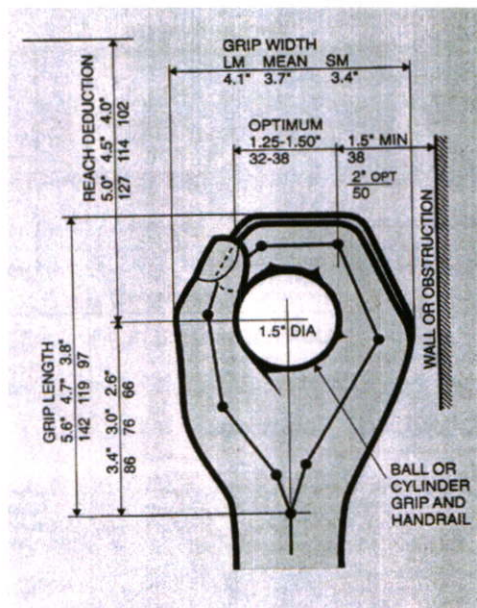
3.8 การออกแบบหัวบล็อกและค้ำจับ

การออกแบบหัวบล็อกที่ใช้ในการชั่งน้ำหนัก ออกแบบให้เป็นหัวบล็อกที่สามารถเปลี่ยนขนาดของบล็อกที่ใช้ค้ำเพื่อชั่งน้ำหนักได้ตามลักษณะดังรูปที่ 3.18

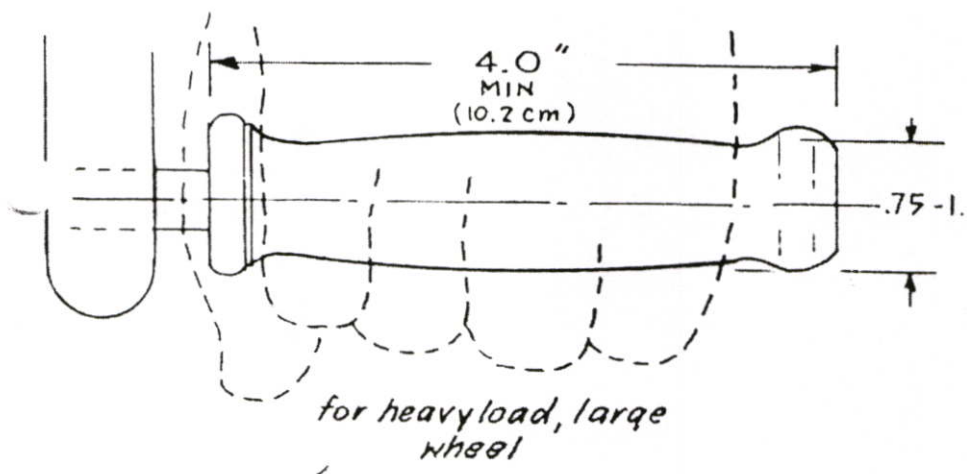


รูปที่ 3.18 การออกแบบหัวบล็อกสำหรับการชั่งน้ำหนัก

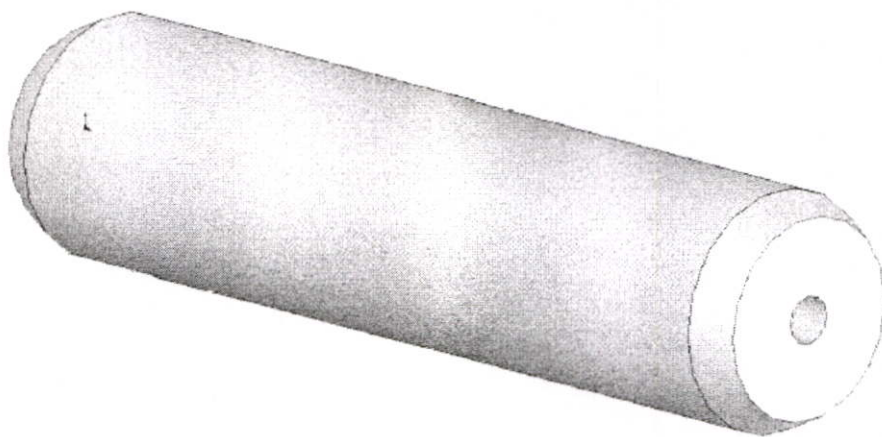
การออกแบบค้ำจับจะใช้ค่าแฟกเตอร์ของมือมาช่วยในการออกแบบ โดยดูได้จากดังรูปที่ 3.19 และ 3.20



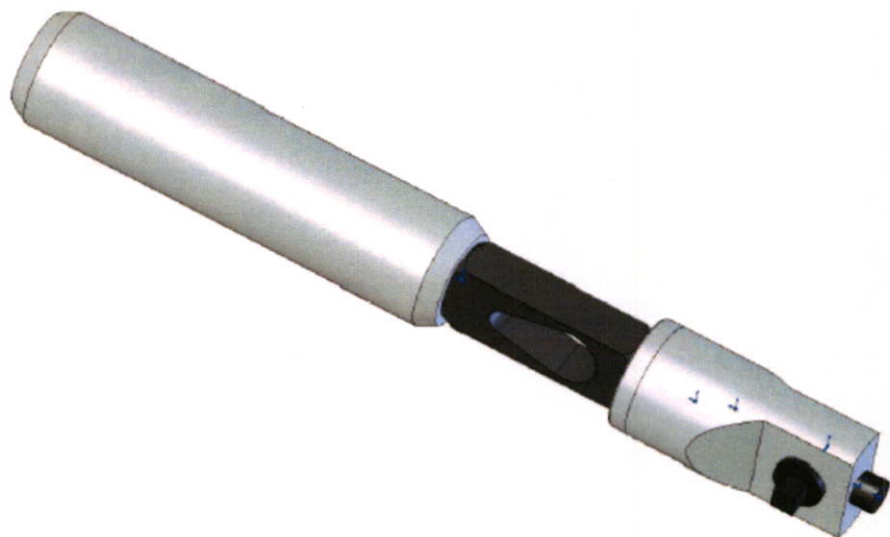
รูปที่ 3.19 แสดงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่มือจับได้ถนัด



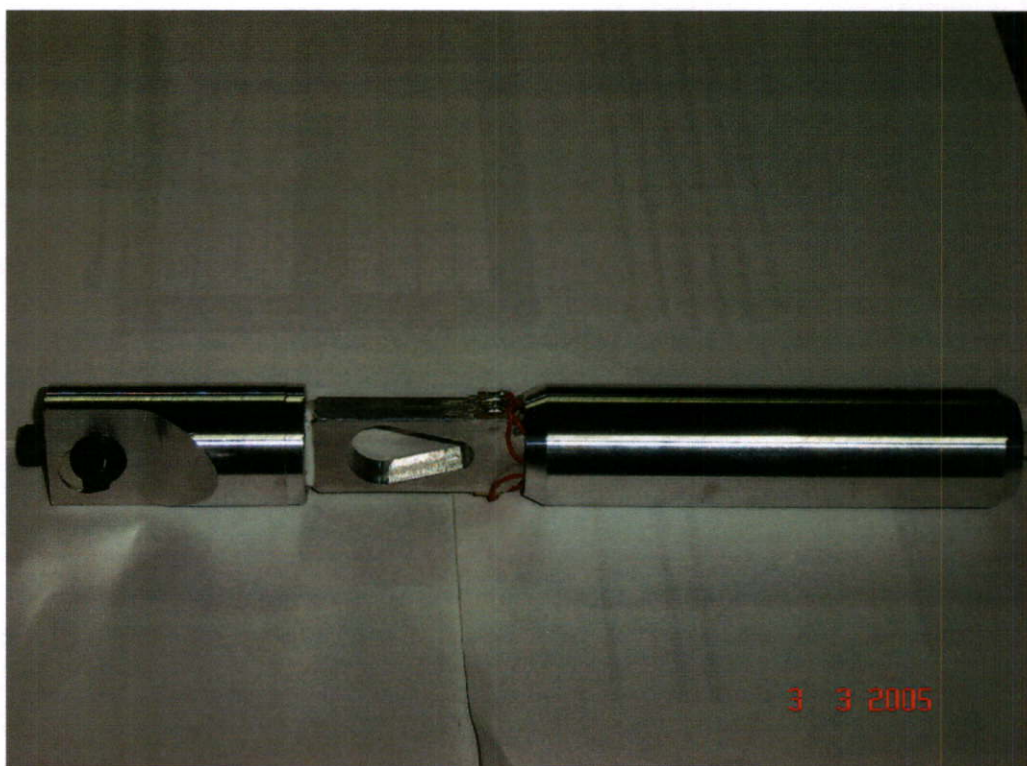
รูปที่ 3.20 ขนาดความยาวที่เหมาะสมกับมือ



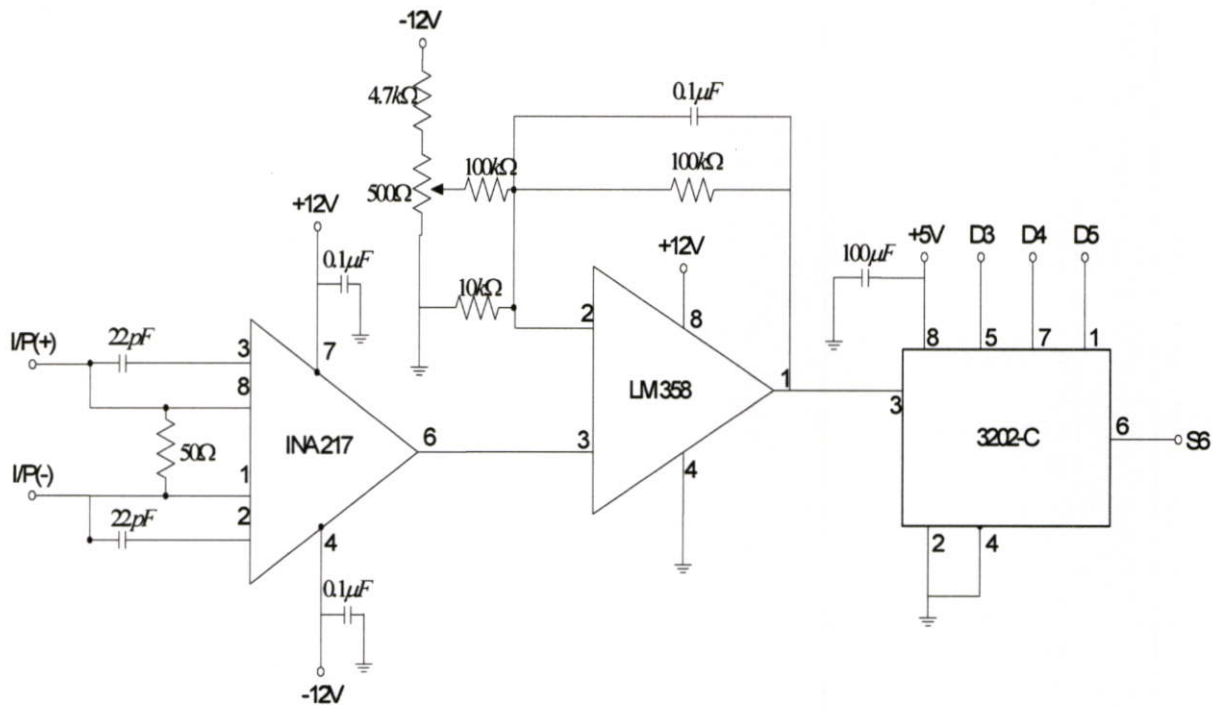
รูปที่ 3.21 ค้ำจับที่ทำการออกแบบ



รูปที่ 3.22 รูปโพลดเซลล์ที่ทำการออกแบบ



รูปที่ 3.23 รูปถ่ายของโพลดเซลล์



รูปที่ 3.24 โค้ดแอมป์วงจรที่ใช้ขยายสัญญาณที่ได้จากการวัด



รูปที่ 3.25 รูปถ่ายวงจรที่ใช้ในการวัด

ตารางที่ 3.1 คุณสมบัติของวัสดุที่นำมาสร้างโหลดเซลล์

	โหลดเซลล์	หัวบล็อกด้ามจับ	
Material	Aluminum 6063	Aluminum 7075	
Elastic Modulus	68.9 E9	71.99 E9	N/m ²
Poisson's Ratio	0.33	0.33	NA
Shear Modulus	25.8 E9	27 E9	N/m ²
Mass Density	2700	2700	kg/m ³
Tensile Strength	172 E6	124.084 E 6	N/m ²
Yeild Strength	8.96E+07	5.5145 E7	N/m ²
Thermal Conductivity	200	120	W/(m.K)
Specific Heat	0.9	0.96	J/(g*celcias)

ตารางที่ 3.2 คุณสมบัติของสเตรนเกจ

Brand	KYOWA
Type	KFG-5-120-C1-23
Temperature Compensation For	Aluminum
Gage Length	5 mm.
Gage Resistance (24°C, 50%RH)	119.8 ± 0.2 Ω
Gage Factor (24°C, 50%RH)	2.16 ± 1.0 %
Adoptable Thermal Expansion	23.4 PPM/°C
Transverse Sensitivity(24°C, 50%RH)	0.40%
Aplicable Gage Cement	----/°C
Temperature Coefficient of Gage Factor	CC-33A, PC-6

บทที่ 4

ผลการทดลอง

4.1 บทนำ

จุดประสงค์ของการทดลองคือ ต้องการที่จะทำการทดลองสอบดูว่า โหลดเซลล์ที่ได้รับการออกแบบและสร้างขึ้นนั้นสามารถที่จะทำการวัดแรงทางกลได้จริงหรือไม่ โดยการทดลองแบ่งเป็น 2 ส่วน โดยส่วนที่ 1 เป็นการทดลองรูปร่างของโหลดเซลล์ ที่ทำการออกแบบไว้โดยใช้โปรแกรมวิเคราะห์ทางด้านไฟไนต์อิลิเมนต์ ส่วนที่ 2 เป็นการทดสอบโหลดเซลล์ที่สร้างขึ้นมาแล้วโดยการทดสอบการชั่งน้ำหนักที่ปลายของโหลดเซลล์

4.2 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

- 1) มัลติมิเตอร์
- 2) แม่แรงสำหรับจับยึดค้ำจับ
- 3) คุ้มน้ำหนักมาตรฐานสำหรับการชั่งวัด

4.3 ขั้นตอนการทดลอง

ส่วนที่ 1 การทดลองโดยใช้โปรแกรมวิเคราะห์ทางไฟไนต์อิลิเมนต์

- 1) สร้างภาพที่ 3 มิติที่ต้องการจะวิเคราะห์เข้าไปในโปรแกรม COSMOS เพื่อทำการวิเคราะห์
- 2) กำหนด ชนิดของวัสดุให้กับรูปทรง 3 มิติ
- 3) สร้างอิลิเมนต์ให้กับรูปทรง 3 มิติ โดยขนาดของอิลิเมนต์ยิ่งเล็กยิ่งส่งผลต่อความถูกต้องในการวิเคราะห์มากยิ่งขึ้น
- 4) กำหนดรูปแบบของแรงและขนาดที่จะมากกระทำบนรูปทรง 3 มิติ
- 5) ทำการวิเคราะห์โดยใช้โปรแกรม

Model name: Assem1Test
 Study name: test1
 Mesh type: Solid mesh



รูปที่ 4.1 การกำหนดคอลลิเมนต์ให้โพลลเซลล์

ส่วนที่ 2 การทดสอบโดยใช้โพลลเซลล์ชั่งน้ำหนัก

การทดสอบชั่งน้ำหนัก

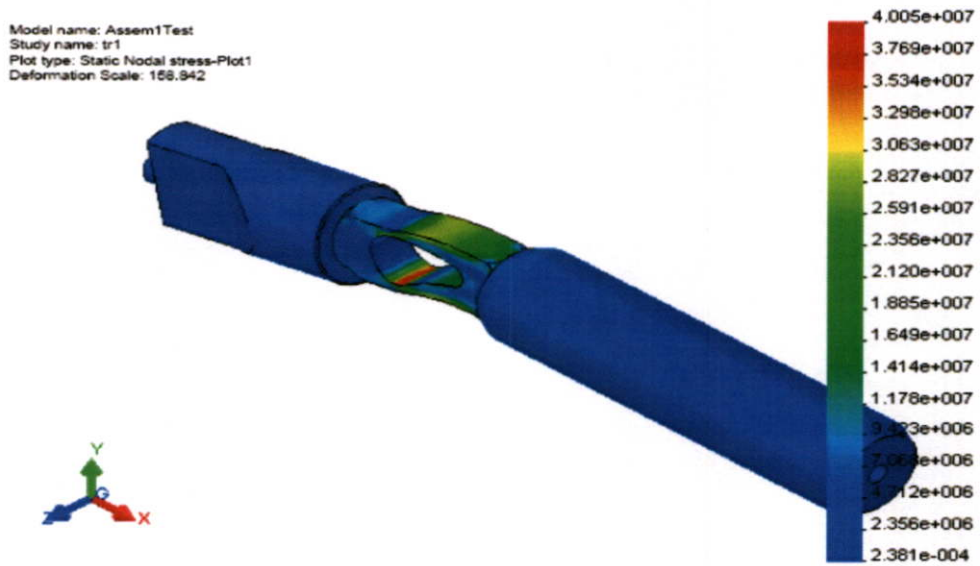
- 1) ต่อโพลลเซลล์ดังภาพที่ 4.2 โดยต้องไม่ให้ด้ามจับมีการเคลื่อนที่
- 2) เอน้ำหนักมาถ่วงที่หัวบล็อกลูก



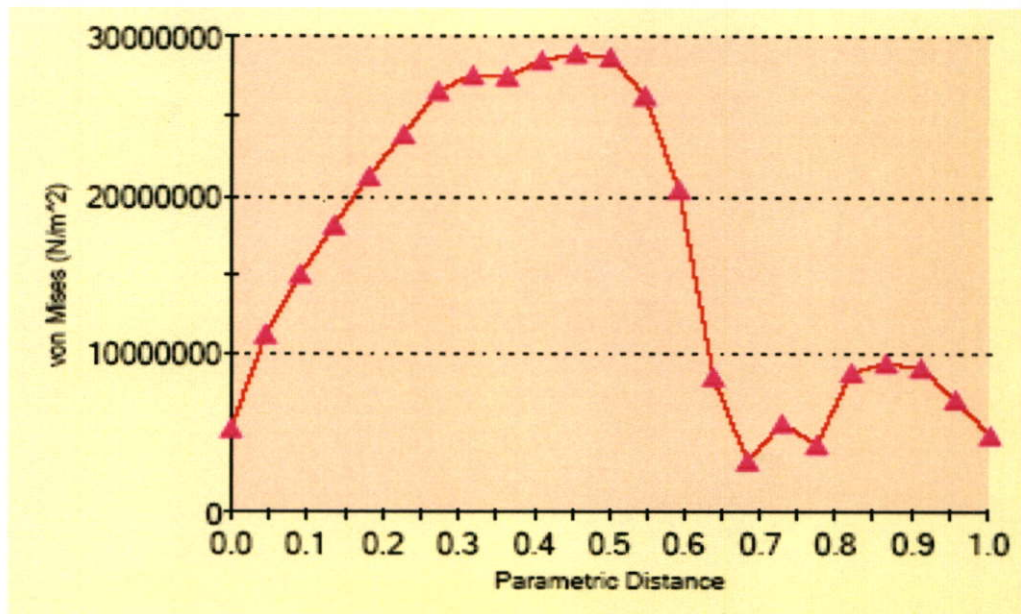
รูปที่ 4.2 การต่ออุปกรณ์เพื่อทำการชั่ง

4.4 ผลการทดลอง

ส่วนที่ 1 การทดลองโดยใช้โปรแกรม COSMOS ทำการวิเคราะห์ ผลการทดลองวิเคราะห์โหนดเซลล์ เมื่อให้โหนดเซลล์ทำการชั่งน้ำหนัก 10 kg จากข้อมูลในตารางที่ 1 ทำให้รู้ว่าควรติดตั้งสเตรนเกจที่จุดใด

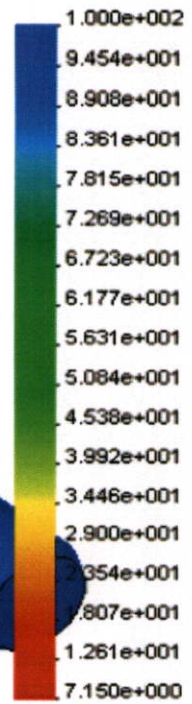


รูปที่ 4.3 ความเค้นที่เกิดจากน้ำหนัก 10 kg



รูปที่ 4.4 กราฟแสดงความเค้นที่ตัวโหนดเซลล์

Model name: Assem1Test
Study name: test1
Plot type: Design Check-Plot1
Criterion : Max von Mises Stress
Factor of safety distribution, Min FOS = 7.1



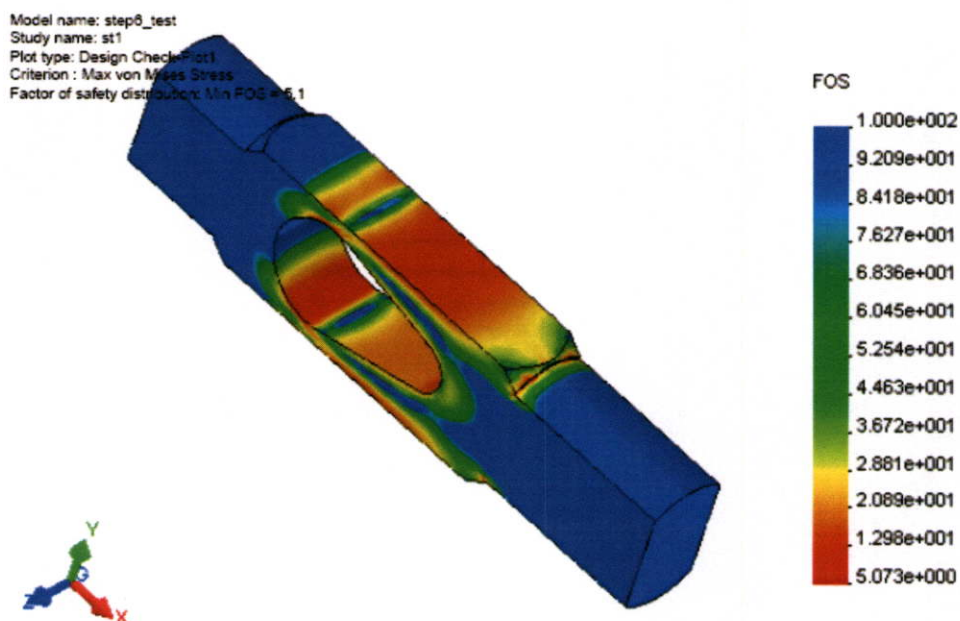
รูปที่ 4.5 Factor of Safety ที่ 10 kg

ตารางที่ 4.1 ตำแหน่งความเค้นที่เกิดบนโหนดเซลล์

Node	von Mises (N/m ²)	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)	Component
23738	5.44E+06	71.224	14.423	-0.85663	step6_test-1
25990	1.14E+07	69.199	14.423	-0.85663	step6_test-1
23737	1.51E+07	67.173	14.423	-0.85663	step6_test-1
25997	1.82E+07	65.148	14.423	-0.85663	step6_test-1
23736	2.13E+07	63.122	14.423	-0.85663	step6_test-1
26001	2.39E+07	61.097	14.423	-0.85663	step6_test-1
23735	2.67E+07	59.071	14.423	-0.85663	step6_test-1
26009	2.76E+07	57.045	14.423	-0.85663	step6_test-1
23734	2.76E+07	55.02	14.423	-0.85663	step6_test-1
26016	2.86E+07	52.994	14.423	-0.85663	step6_test-1
23733	2.90E+07	50.969	14.423	-0.85663	step6_test-1
26022	2.88E+07	48.943	14.423	-0.85663	step6_test-1
23732	2.64E+07	46.918	14.423	-0.85663	step6_test-1
26027	2.05E+07	44.892	14.423	-0.85663	step6_test-1
23731	8.71E+06	42.867	14.423	-0.85663	step6_test-1
26031	3.41E+06	40.841	14.423	-0.85663	step6_test-1
23730	5.78E+06	38.816	14.423	-0.85663	step6_test-1
26038	4.44E+06	36.79	14.423	-0.85663	step6_test-1
23729	8.98E+06	34.765	14.423	-0.85663	step6_test-1
26043	9.57E+06	32.739	14.423	-0.85663	step6_test-1
23728	9.24E+06	30.714	14.423	-0.85663	step6_test-1
26738	7.26E+06	28.688	14.423	-0.85663	step6_test-1
23624	5.02E+06	26.663	14.423	-0.85663	step6_test-1



รูปที่ 4.6 การวิเคราะห์เฉพาะโหนดเซลล์ที่ 10 kg



รูปที่ 4.7 Factor of Safety โหนดเซลล์ที่ 10 kg

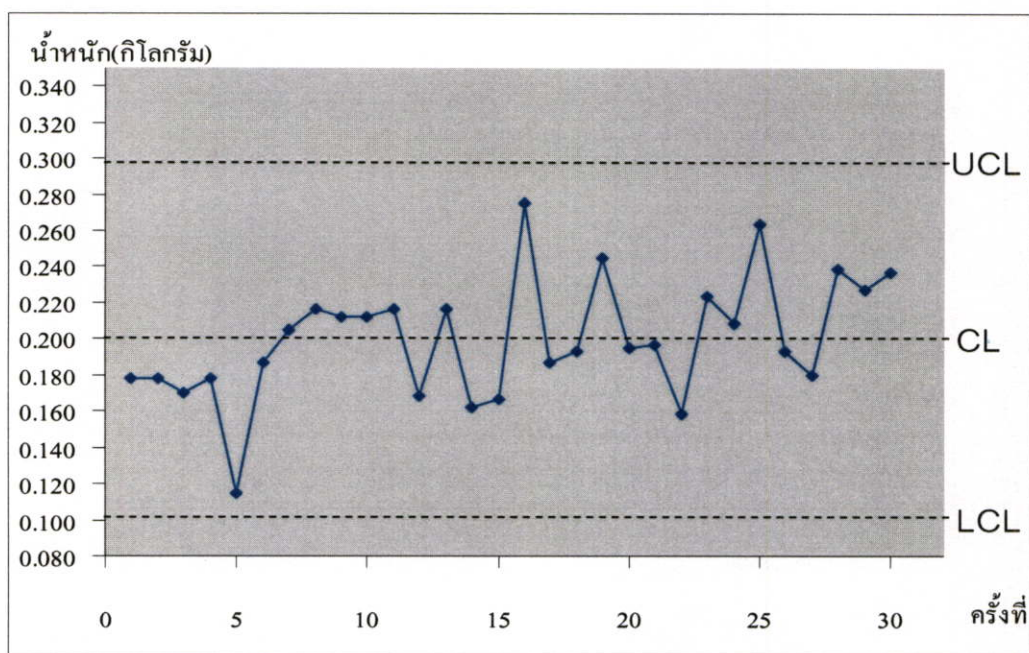
ตารางที่ 4.2 แสดงค่าความเค้นที่โหนดเซลล์

Node	von Mises (N/m ²)	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)
1470	2.33E+06	63.281	10.5	6
1469	4.68E+06	62.008	10.5	6
1468	6.08E+06	60.734	10.5	6
1467	7.03E+06	59.461	10.5	6
1466	8.01E+06	58.188	10.5	6
1465	9.14E+06	56.915	10.5	6
1464	1.04E+07	55.642	10.5	6
1463	1.16E+07	54.368	10.5	6
1462	1.26E+07	53.095	10.5	6
1461	1.34E+07	51.822	10.5	6
1460	1.40E+07	50.549	10.5	6
1459	1.43E+07	49.276	10.5	6
1458	1.45E+07	48.003	10.5	6
1457	1.48E+07	46.729	10.5	6
1456	1.50E+07	45.456	10.5	6
1455	1.52E+07	44.183	10.5	6
1454	1.52E+07	42.91	10.5	6
1453	1.51E+07	41.637	10.5	6
1452	1.48E+07	40.363	10.5	6
1451	1.41E+07	39.09	10.5	6
1450	1.26E+07	37.817	10.5	6
1449	1.02E+07	36.544	10.5	6
1448	5.94E+06	35.271	10.5	6
1447	3.20E+06	33.997	10.5	6
1446	8.62E+06	32.724	10.5	6
1445	1.20E+07	31.451	10.5	6
1444	1.14E+07	30.178	10.5	6

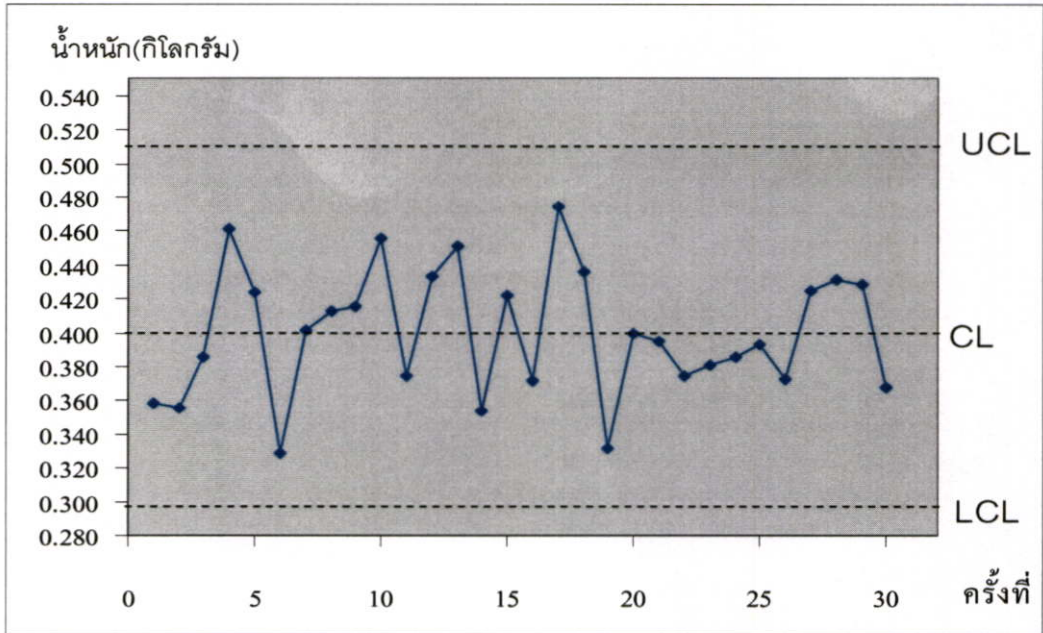
ตารางที่ 4.2 (ต่อ)

1443	8.70E+06	28.905	10.5	6
1442	5.60E+06	27.632	10.5	6
1441	3.50E+06	26.358	10.5	6
1440	1.67E+06	25.085	10.5	6
1439	7.77E+05	23.812	10.5	6
1438	3.46E+05	22.539	10.5	6
1437	4.26E+05	21.266	10.5	6
1436	4.50E+05	19.992	10.5	6
536	1.90E+05	18.719	10.5	6

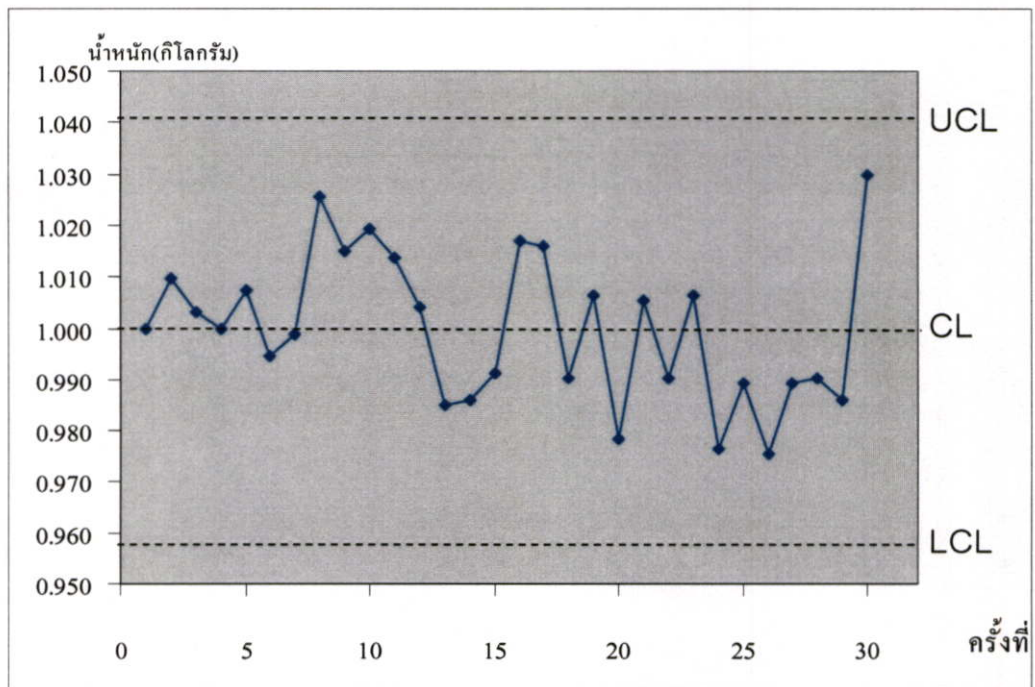
ส่วนที่ 2 ผลการทดลอง ใช้โพลีเอทิลีนทำกรงน้ำหนัก



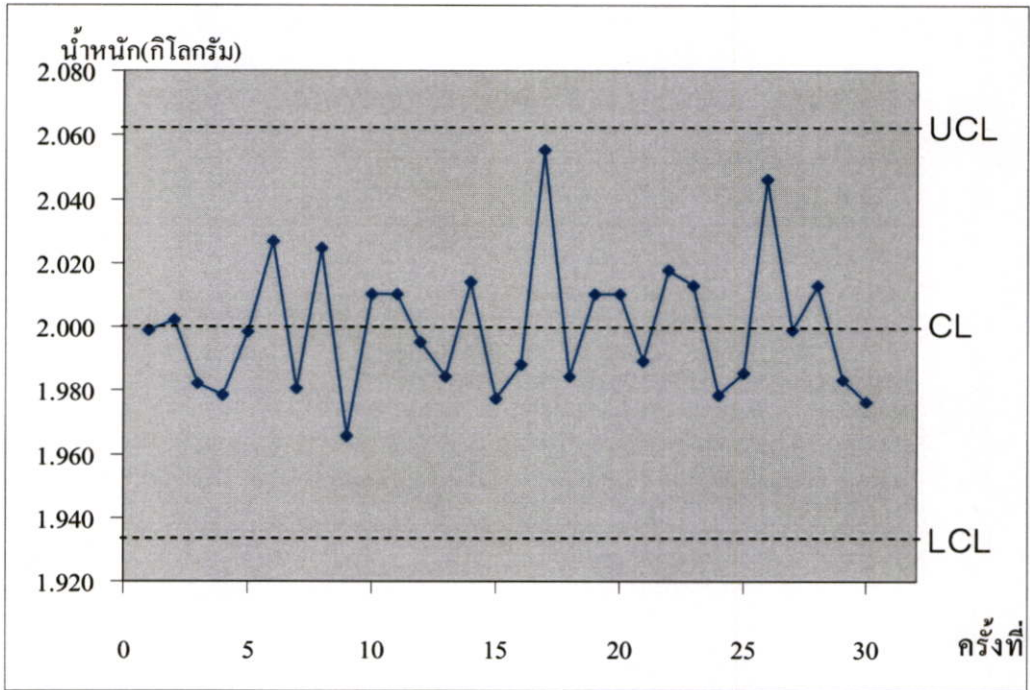
รูปที่ 4.8 กราฟการทดลองครั้งที่ 200 กรัม



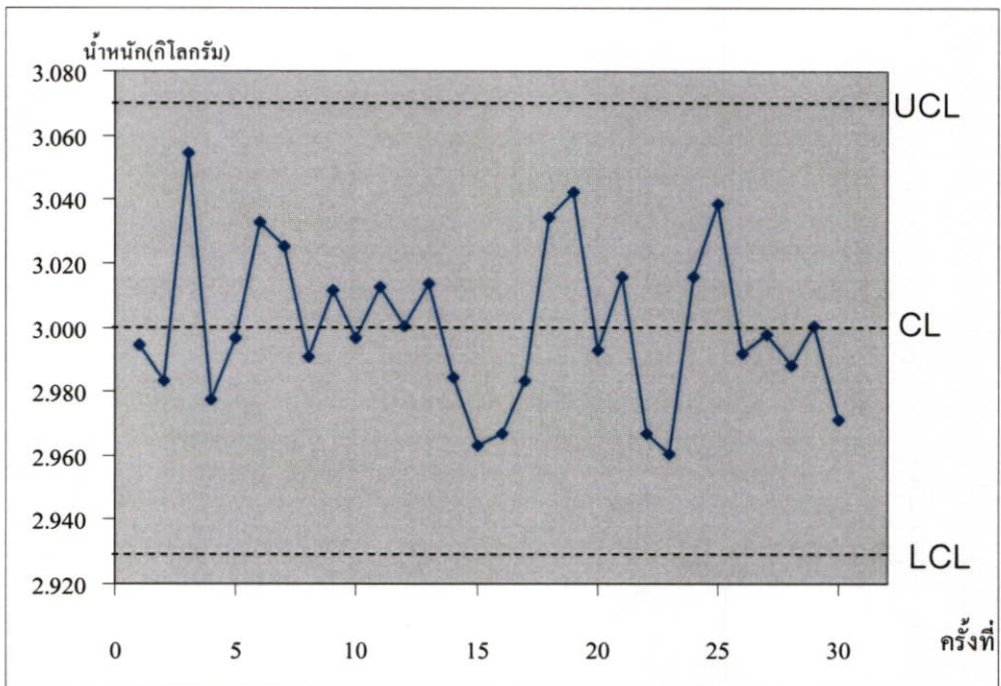
รูปที่ 4.9 กราฟการทดลองครั้งที่ 400 กรัม



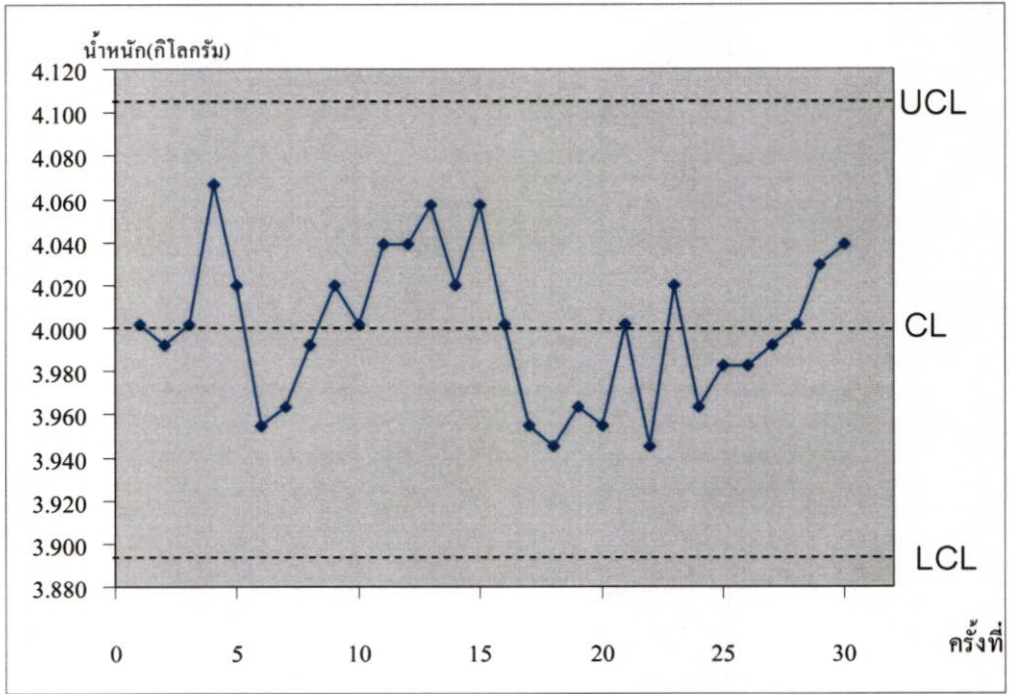
รูปที่ 4.10 กราฟการทดลองครั้งที่ 1 กิโลกรัม



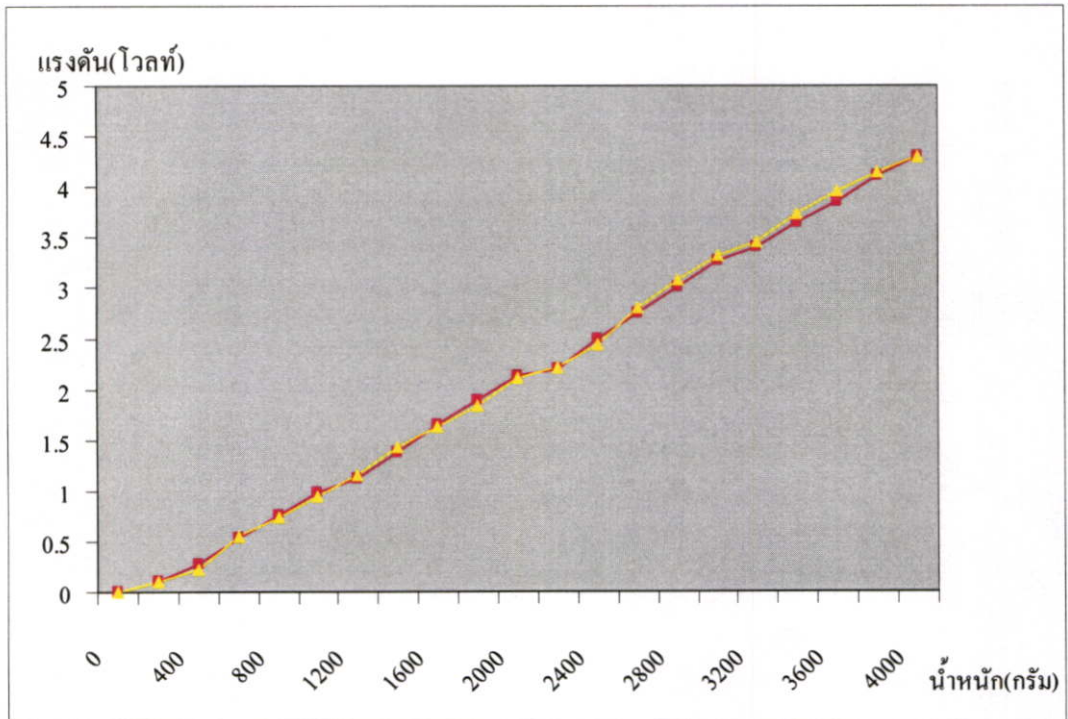
รูปที่ 4.11 กราฟการทดลองซ่งที่ 2 กิโลกรัม



รูปที่ 4.12 กราฟการทดลองซ่งที่ 3 กิโลกรัม



รูปที่ 4.13 กราฟการทดลองซั้งที่ 4 กิโลกรัม



รูปที่ 4.14 กราฟการทดลองซั้งน้ำหนักแบบต่อเนื่อง

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

จากผลการทดลองวิเคราะห์โดยใช้ โปรแกรมวิเคราะห์ทางด้านไฟไนต์อิลิเมนต์จะทำให้สามารถกำหนดจุดที่จะทำการติดตั้ง สเตรนเกจได้ว่าจุดใดบน โหลดเซลล์มีความเหมาะสมที่สุดใน การติดตั้งอีกทั้งยังช่วยตรวจสอบว่าโหลดเซลล์มี ส่วนไหนที่อาจเกิดความเสียหายหากมีแรงมา กระทำเกินกว่าที่ออกแบบไว้ จากผลของการวัดจะเห็นได้ว่าในช่วงน้ำหนักที่กำหนดเพื่อการ ทดลองนั้น ผลตอบสนองของโหลดเซลล์ค่อนข้างที่จะเป็นเชิงเส้นดี และมีช่วงการกระจายของผล การทดลองอยู่ในช่วง $\pm 3\sigma$

5.2 ข้อเสนอแนะและแนวทางพัฒนา

ข้อเสนอแนะสำหรับการปรับปรุงการออกแบบ โหลดเซลล์ในการออกแบบและสร้าง โหลดเซลล์ ยังมีส่วนที่เป็นข้อควรปรับปรุงเพื่อให้การวัดแรงทางกลของโหลดเซลล์ได้ผลดียิ่งขึ้น จึงมีข้อ-เสนอแนะให้ปรับปรุงดังนี้

- 1) รูปของโหลดเซลล์ที่ทำการออกแบบเอาไว้ั้นในการวัดแรงที่มีการเปลี่ยนแปลงแรง อย่างรวดเร็วหรือแรงที่มีขนาดการเปลี่ยนแปลงแบบไดนามิกยังทำได้ไม่ดีเท่าที่ควร
- 2) ถ้าสามารถแก้ปัญหาการถ่ายเทความร้อนของวัสดุพลาستيكได้จะสามารถที่จะนำ พลาستيكนั้นมาใช้เป็นโหลดเซลล์ที่ให้ผลการวัดไวสูงมาก
- 3) ถ้าสามารถแก้ปัญหของสัญญาณรบกวนที่เข้ามาในวงจรขยายสัญญาณได้จะทำให้ค่า ที่เบี่ยงเบนในการวัดต่ำลง

บรรณานุกรม

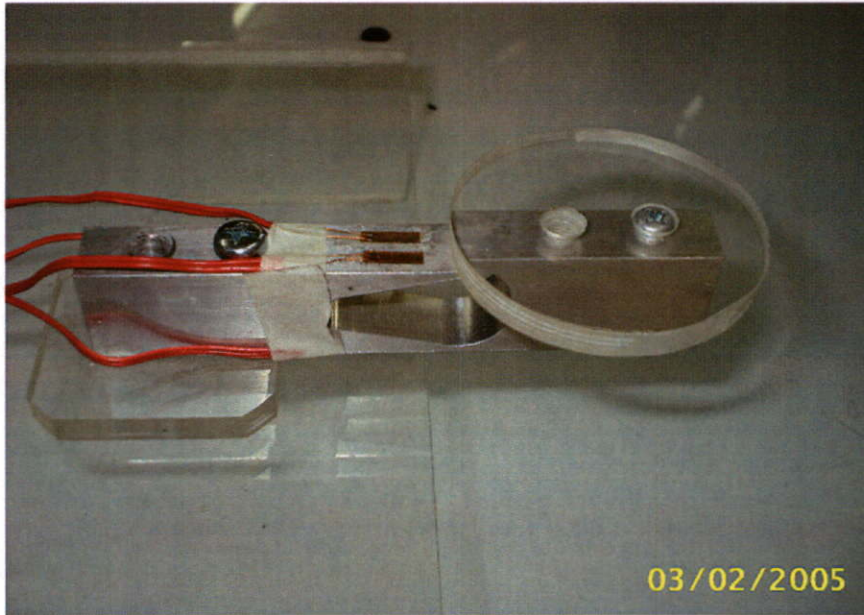
- [1] Li Erping, A L Kidd and P M McEwan “**CAD Design of Current Sensitive Electromagnetic Actuators**”, Proceedings of 4 th int. Sym. On Short-circuit Currents in Power Systems. Liege, September 1990.
- [2] The scope of strain gauge principle Bethe, K.; Comp Euro’ 89., “**VLSI and Computer Peripherals and their Interconnection Networks**”, Proceedings. 8-12 May 1989
Page(s):3/31-3/38
- [3] William M. Murry and William R. Miller, **The Bonded Electrical Resistance Strain gauge**, Oxford University Press, 1992.
- [4] **Concepts and Applications of Finite Element Analysis**, 4 th Edition by Robert D. Cook, David S. Malkus, Michael E. Plesha, Robert J. Witt.
- [5] **Strain Gage User’ Handbook** by R.L.Hannah(Editor)
- [6] **Engineering Mechanics of Solids** (2 nd Edition) By Egor P. Popov.
- [7] **Mechanics of Solid Materials** by Jean Lemaitre, Jean-Louis Chaboche.
- [8] Saravut Reangkittakarn, Jettiya Sripituk, Sawai Pongswatd, Pittaya Pannil and Prapart Ukakimapurn “**Case Study of Shape Design of Load Cell Using Finite Element Method**” ICCAS2005 International Conference on Control, Automation and System, KINTEX, Gyeonggi-Do, Korea, June 2-5, 2005

ภาคผนวก

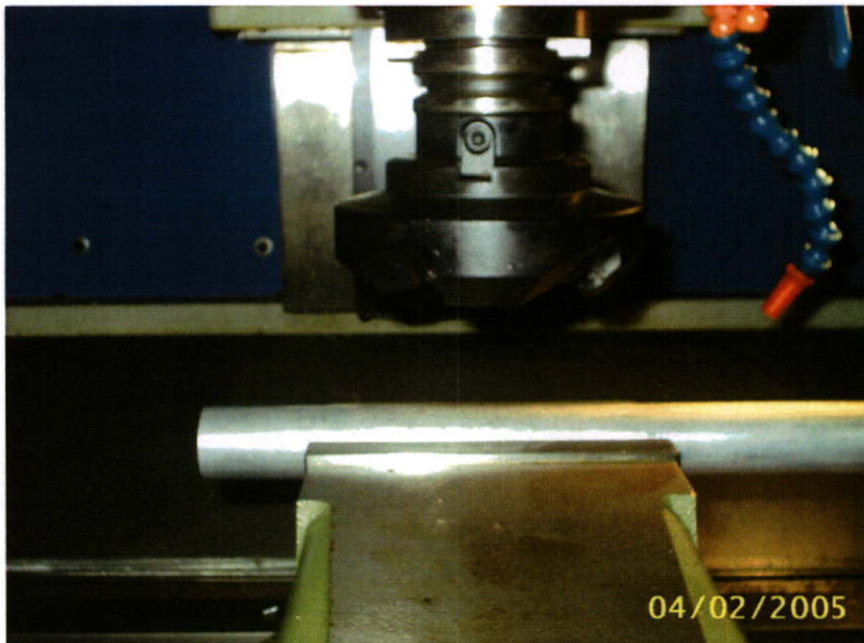
ภาคผนวก ก.
ส่วนประกอบของโพลีเซลล์

ขอบเขตของโพลีเซลล์ที่ทำการทดสอบ

- น้ำหนักที่วัดได้ 0 – 10 กิโลกรัม



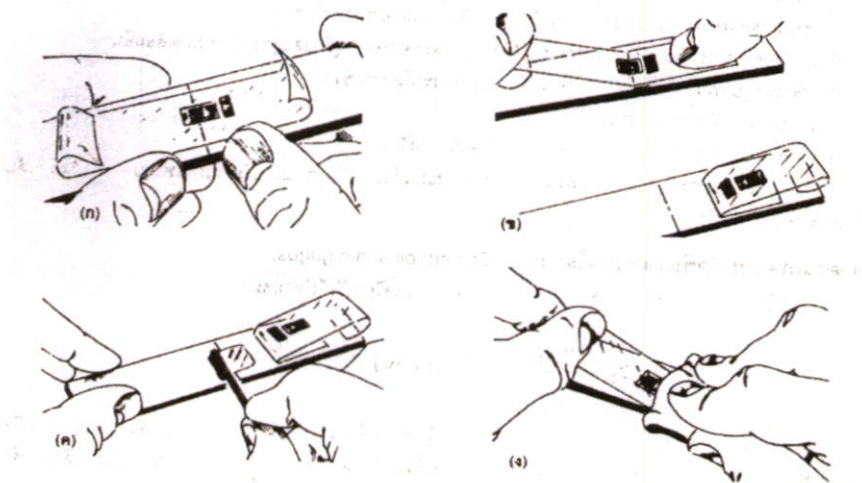
รูปที่ ก.1 โพลีเซลล์ที่ทำการออกแบบ



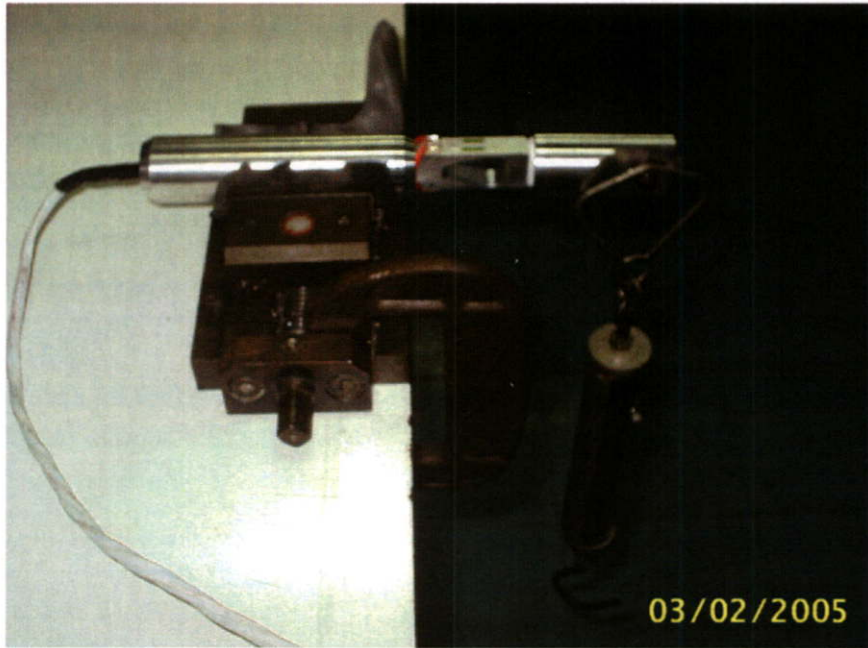
รูปที่ ก.2 การขึ้นรูปโพลีเซลล์โดยเครื่อง CNC



รูปที่ ก.3 วงจรขยายสัญญาณการวัด



รูปที่ ก.4 การทดสอบทรานเจกอลบนโพลดเซลล์



รูปที่ ก.5 การชั่งน้ำหนักด้วยโพลลเชลล์

ภาคผนวก ข.

ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์และได้รับการตีพิมพ์

ICCAS 2005

International Conference on Control, Automation, and Systems

June 2-5, 2005

KINTEX, Gyeonggi-Do, KOREA



KOREA INTERNATIONAL EXHIBITION CENTER

Welcome Message

Conference Organization

Conference Information

Plenary Talks & Invited Talks

Table of Contents

Author Index

Financial Contribution

Search This CD-ROM

SICE - ICCAS 2006

CD-ROM Help

EXIT



Case Study of Shape Design of Load Cell Using Finite Element Method

Saravut Reaugkittakarn, Jettiya Sripituk, Sawai Pongswatd, Pittaya Pannil, Prapart Ukakimapurn

Department of Instrumentation Engineering Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Ladkrabang, Bangkok, Thailand

(Tel: 66-2-739-2407; Email: kupapar@kmitl.ac.th, sara_earb@yahoo.com)

Abstract: In this paper, the application of finite element method to design the shape of load cell as an illustrative case study is described. The relationship between the various shapes of load cell and their stress characteristic were analyzed by COSMOS simulation program. The results obtained from the proposed analysis can be applied to determine the appropriate position of strain gauges for good quality load cell. The experimental results show the good efficiency of the proposed technique.

Keyword: COSMOS, Finite Element Method, Strain gauge, Load cell

1. INTRODUCTION

Currently, equipment or components such as mechanical part, transformer, and security equipments are designed and modeled using CAD (Computer Aided Design) before continuing to build an actual one [1]. This is because it is easy to specify and modify the constraints when modeling using CAD. Moreover, it is convenient and fast as well as the numerical design using software can be easily calculated. One of the most widely used numerical methods is Finite Element Method. This method can facilitate when studying and designing of a part. Not only is this method is highly effective and safe, but also the costs of testing can be reduced.

Strain gauge based load cell is one of the most commonly used type in industry especially when dealing with force such as tension, press, torque, and moment [2-3]. Designing load cell according to the mechanics can only explain the maximum force and the position highly potential to damage. However, the characteristics of stress on load cell cannot be analyzed using theory of mechanics. Therefore, the finite element method is necessary to analyze and design load cell [4].

This paper proposes the case study of shape design of load cell using finite element method. Load cell to be designed is the one used to measure the torque by modeling it in the form of beam which the maximum stress is of importance since extra stress can permanently disfigure load cell. The experiment starts with designing and modeling load cell using CAD. Then the shape of modeled load cell is analyzed using COSMOS simulation program. The stress characteristic obtained will be further used to determine the optimal position of strain gauge for good quality load cell.

2. THEORY AND CONCEPT

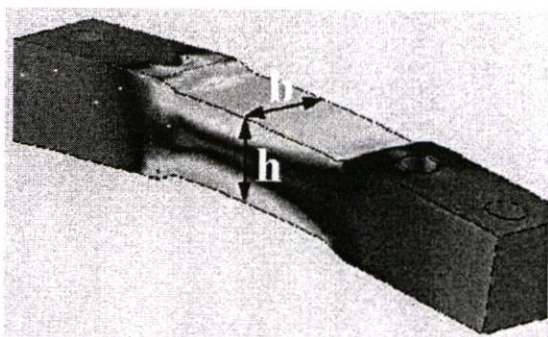


Fig. 1 Dummy load cell with the constant cross-sectional area

The shapes of dummy load cell as bending beam type can be designed with the constant and non-constant cross-sectional areas [5-6]. The maximum stress of dummy load cell with the constant cross-sectional area as shown in Fig. 1 can be stated as

$$\frac{M}{\sigma} = \frac{I}{c} \quad (1)$$

where M is the moment
 σ is the stress
 I is the moment inertia
 c is the center of beam

The moment inertia I and the center of beam c can be given by

$$c = \frac{h}{2} \quad (2)$$

$$I = \iint_r h^2 \sigma(h, b) d\sigma = \int_{-\frac{b}{2}}^{\frac{b}{2}} \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} h^2 db dh = \frac{h^3 b}{12} \quad (3)$$

where b is the width of cross-sectional area
 h is the thickness of cross-sectional area

Based on Eqs. (1) ~ (3), the stress σ can be written as

$$\sigma = \frac{Mc}{I} = \frac{6M}{h^2 b} \quad (4)$$

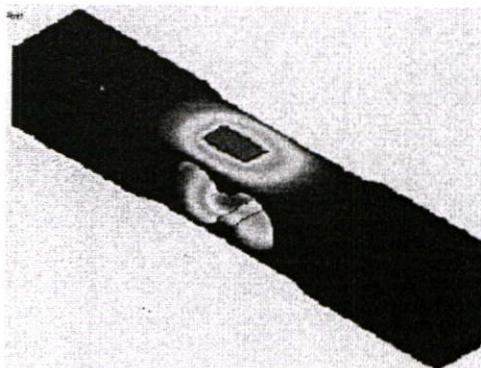


Fig. 2 Curve dummy load cell



Fig. 3 Dummy load cell with curve cross-sectional area

To improve the stress sensitivity (effectiveness) of dummy load cell with the constant cross-sectional area, the dummy load cell with curve cross-sectional area as shown in Fig. 2 is available. Fig. 3 shows its stress characteristic, the moment M can be expressed as

$$M = \frac{P}{2}x \tag{5}$$

where P is the pressure (σ), and $0 \leq x \leq \frac{L}{2}$

Substituting Eq. (5) into Eq. (4), we obtain

$$h^2 = \frac{3Px}{\sigma b} \tag{6}$$

Based on Eq. (6), If we design $h = h_0$, and $x = L/2$, the stress σ will be equal to the normal stress acting on x -axis σ_x ($\sigma = \sigma_x$). Then, the thickness of cross-sectional area h becomes

$$h^2 = x \left(\frac{2h_0^2}{L} \right) \tag{7}$$

Since the dummy load cell with curve cross-sectional area is difficult to build up in practically. Therefore, the purpose of this paper is to present the shape design of dummy load cell with non-constant cross-sectional areas as shown in Fig. 4.

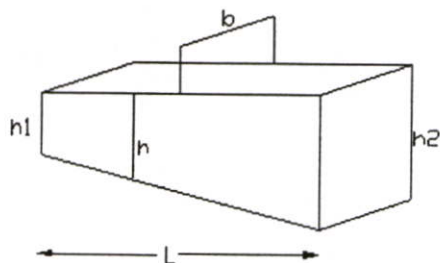


Fig. 4 Dummy load cell with non-constant cross-sectional area

From Fig. 4, the stress characteristic can be expressed as

$$h = \frac{h_2 - h_1}{L}x + h_1 \tag{8}$$

Based on Eq. (8), If we design $h_2 = kh_1$, where $k = 1, 2, \dots, n$, we obtain

$$h = \frac{h_1}{L}[(k-1)x + L] \tag{9}$$

Substituting Eq. (9) into Eq. (4), the stress can be rewritten as

$$\sigma = \frac{PL^2}{bh_1^2[(k-1)x + L]^2} \tag{10}$$

The position with maximum stress can be given by

$$\frac{d\sigma}{dx} = 0 \tag{11}$$

Substituting Eq. (10) into Eq. (11), we obtain

$$(k-1)x + L - x(k-1)[(k-1)x + L](2) = 0 \tag{12}$$

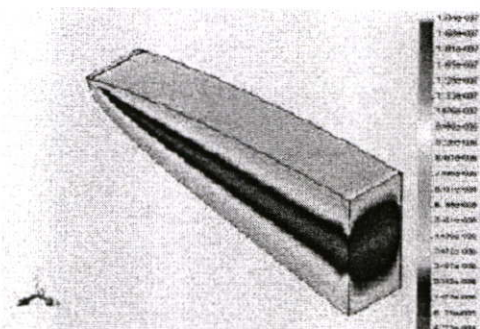


Fig.5 Stress of Dummy load cell with non-constant cross-sectional area

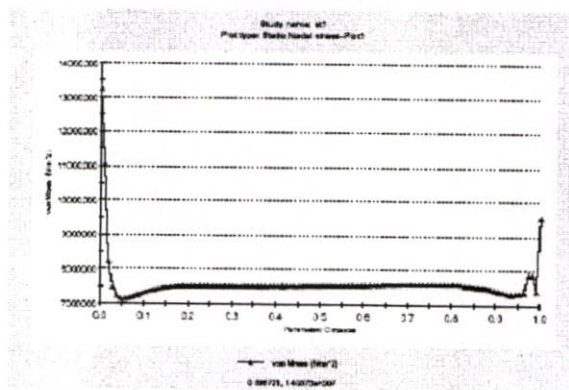


Fig. 6 Stress characteristic related with the applied force

The stress of load cell as shown in Fig. 4 was analyzed using finite element method. The analysis results obtained from COSMOS simulation program are showing in Fig. 5 and Fig. 6. It is clearly seen that, Its stress characteristic is distributed uniformly over the area. Moreover, it is easy to build an actual one.

3. DESIGN AND IMPLEMENTATION OF LOAD CELL

In this paper, the application of finite element method is used to design the shape of load cell as an illustrative case study. The experiment starts with designing and modeling load cell using CAD. Then the shape of modeled load cell is analyzed using COSMOS program. The results obtained will be further used to determine the appropriate position of strain gauge installation.

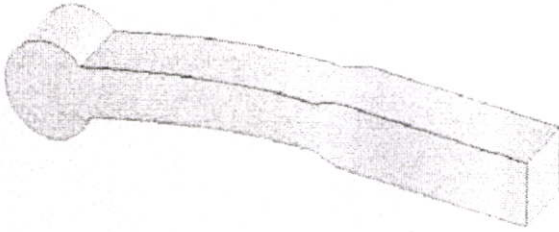


Fig. 7 Modeling of wrench design

The studied load cell to be designed is the one used to measure the torque by modeling it in the form of beam as shown in Fig. 7. For torque measurement of bolt spin should be install the load cell at the handle of wrench. The application of load cell with the proposed concept as referred in Eqs. (7), (10), and (12) for wrench design is shown in Fig. 8.

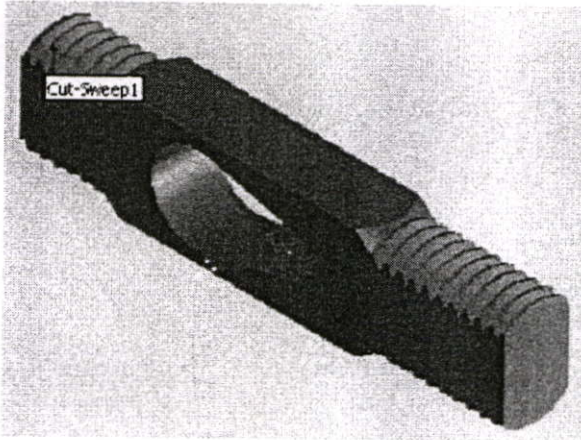


Fig. 8 Modeling of dummy load cell in wrench design

From Fig. 8, the studied dummy load cell was implemented based on the use of CNC machine with 5083 aluminum as the raw material. The plies of the both ends are designed for connecting with the head and handle of the wrench. Fig. 9 and Table 1 show the COSMOS simulated result of studied dummy load cell when the applied force is about 10kg. From stress characteristic as shown in Table 1, the appropriate position to install the strain gauges is determined. The maximum stress is the importance factor for choosing. From Table 1, the appropriate positions of x are 50.96 to 65.148 mm. 4-Active gauge installations as shown in Fig. 10, four 120-ohm gauges with a diameter of 5 mm are used in the experiment.

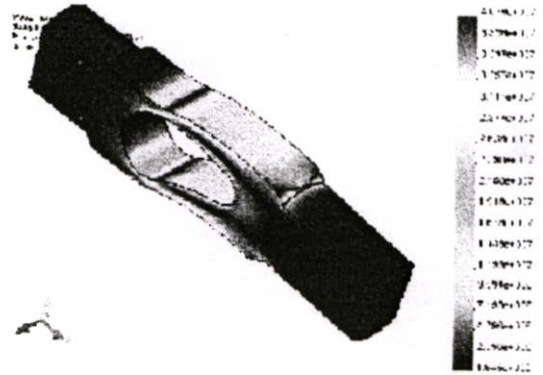


Fig. 9 Simulated stress characteristic of studied load cell

Table 1 Relationships between the position x and their stress

Node	von Mises (N/m ²)	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)	Component
23738	5.44E+06	71.224	14.423	-0.85663	step6 test-1
25990	1.14E+07	69.199	14.423	-0.85663	step6 test-1
23737	1.51E+07	67.173	14.423	-0.85663	step6 test-1
25997	1.82E+07	65.148	14.423	-0.85663	step6 test-1
23736	2.13E+07	63.122	14.423	-0.85663	step6 test-1
26001	2.39E+07	61.097	14.423	-0.85663	step6 test-1
23735	2.67E+07	59.071	14.423	-0.85663	step6 test-1
26009	2.76E+07	57.045	14.423	-0.85663	step6 test-1
23734	2.76E+07	55.02	14.423	-0.85663	step6 test-1
26016	2.86E+07	52.994	14.423	-0.85663	step6 test-1
23733	2.90E+07	50.969	14.423	-0.85663	step6 test-1
26022	2.88E+07	48.943	14.423	-0.85663	step6 test-1
23732	2.64E+07	46.918	14.423	-0.85663	step6 test-1
26027	2.05E+07	44.892	14.423	-0.85663	step6 test-1
23731	8.71E+06	42.867	14.423	-0.85663	step6 test-1
26031	3.41E+06	40.841	14.423	-0.85663	step6 test-1
23730	5.78E+06	38.816	14.423	-0.85663	step6 test-1
26038	4.44E+06	36.79	14.423	-0.85663	step6 test-1
23729	8.98E+06	34.765	14.423	-0.85663	step6 test-1
26043	9.57E+06	32.739	14.423	-0.85663	step6 test-1
23728	9.24E+06	30.714	14.423	-0.85663	step6 test-1
26738	7.26E+06	28.688	14.423	-0.85663	step6 test-1
23624	5.02E+06	26.663	14.423	-0.85663	step6 test-1

To amplify the output signal of strain gauge, the amplifier as shown in Fig. 11 is used. Its circuit diagram is shown in Fig. 12. Fig. 13 shows the implementation of designed wrench as illustrative case study in this paper.

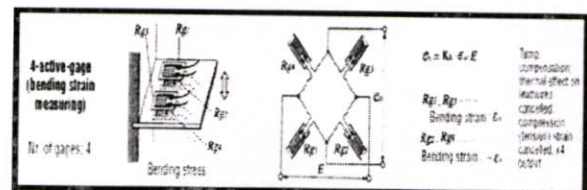


Fig. 10 4-Active gauge installations

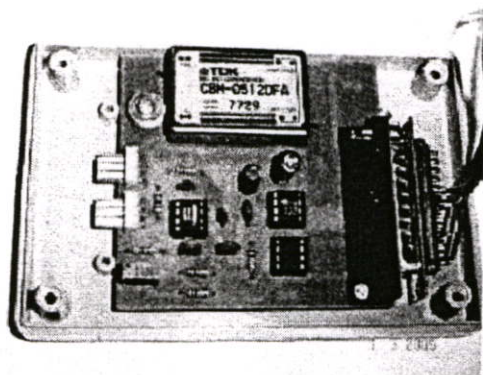


Fig. 11 Amplifier of strain gauge output signal

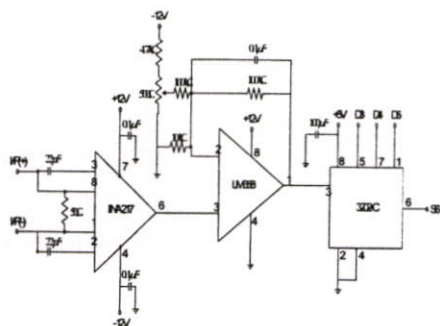


Fig. 12 Circuit diagram of the amplifier

4. EXPERIMENTAL RESULTS



Fig. 13 Designed wrench in weighing system

The performances of the proposed technique were studied using weighing system as shown in Fig. 13. The experimental results as the voltage signals are shown in Fig. 14, when the raising and falling varied weight (0 to 4kg and 4 to 0kg) are applied. The hysteresis error of measurement about 1.725% of span observed.

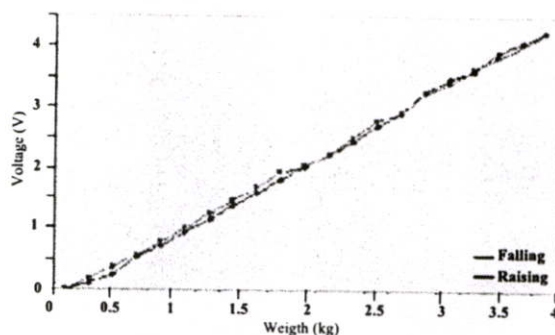


Fig. 14 Experimental results for hysteresis test

5. CONCLUSION

The case study of shape design of load cell using finite element method is described in this paper. The experiment starts with designing and modeling load cell using CAD. Then the shape of modeled load cell is analyzed using COSMOS simulation program. The stress characteristic obtained will be further used to determine the appropriate position of strain gauges for good quality load cell. The experimental results show the good efficiency of the proposed technique.

REFERENCES

- [1] Li Erping, A L Kidd and P M McEwan, "CAD Design of Current Sensitive Electromagnetic Actuators", Proceedings of 4th int. Sym. on Short-circuit Currents in Power Systems. Liege, September 1990.
- [2] The scope of the strain gage principle Bethe, K.; CompEuro '89., 'VLSI and Computer Peripherals. VLSI and Microelectronic Applications in Intelligent Peripherals and their Interconnection Networks', Proceedings.8-12 May 1989 Page(s):3/31 - 3/38
- [3] William M. Murry and William R. Miller, The Bonded Electrical Resistance Strain gage, Oxford University Press, 1992.
- [4] Concepts and Applications of Finite Element Analysis, 4th Edition by Robert D. Cook, David S. Malkus, Michael E. Plesha, Robert J. Witt
- [5] Strain Gage Users' Handbook by R. L. Hannah (Editor
- [6] Engineering Mechanics of Solids (2nd Edition) by Egor P. Popov
- [7] Mechanics of Solid Materials by Jean Lemaitre, Jean-Louis Chaboche

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล	นาย สราวุธ เรืองกิจตระการ
วัน เดือน ปีเกิด	10 พฤษภาคม 2520 ที่จังหวัดชลบุรี
ที่อยู่	40/5 ถ.ระเบียบกิจอนุสรณ์ ต.บางคล้า อ.บางคล้า จ.ฉะเชิงเทรา 24110 โทร 0-9106-0455
ประวัติการศึกษา	2543 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมการวัดคุม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ประวัติการทำงานและผลงานวิจัย	
พ.ศ.2542-2545	วิศวกร บริษัท คิงส์เอ็นเนอจี จำกัด
พ.ศ.2545-2546	อาจารย์ประจำแผนกช่างไฟฟ้ากำลัง วิทยาลัยการอาชีพบางปะกง จังหวัด ฉะเชิงเทรา
พ.ศ.2546-2547	Electrical Engineer IDS Joint Venture (Italian-Thai Development, Dai-Dan, Sumitomo Densetsu) Suvarnabhumi International Airport Project
พ.ศ.2546-2547	Assistant Project Co-ordinator IDS Joint Venture (Italian-Thai Development, Dai-Dan, Sumitomo Densetsu) Suvarnabhumi International Airport Project
พ.ศ.2546-ปัจจุบัน	RFI/RFC Manager IDS Joint Venture (Italian-Thai Development, Dai-Dan, Sumitomo Densetsu) Suvarnabhumi International Airport Project
พ.ศ.2548	รางวัลนำเสนอผลงานยอดเยี่ยมจากงานวิจัยเรื่อง Case Study of Shape Design of Load Cell Using Finite Element Method, ของงาน ICCAS2005 ที่ประเทศเกาหลี