

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

กรณีศึกษาการออกแบบโหลดเซลล์เพื่อประยุกต์ใช้เป็นอุปกรณ์วัดแรงบิด

CASE STUDY TO APPLY LOAD CELL TO TORQUE

MESUREMENT



เลขหมู่.....  
เลขทะเบียน.....**61986**  
วัน,เดือน,ปี...**25 ก.ค. 2549**

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

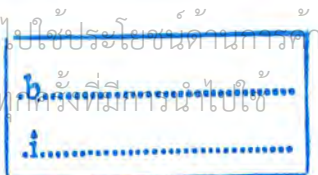
สาขาวิชาวิศวกรรมการวัดคุม

ภาควิชาวิศวกรรมการวัดคุม คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



# CASE STUDY TO APPLY LOAD CELL TO TORQUE MESUREMENT



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT  
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF  
BACHELOR OF ENGINEERING IN INSTRUMENTATION ENGINEERING  
DEPARTMENT OF INSTRUMENTATION ENGINEERING  
FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อปริญญานิพนธ์	กรณีศึกษาการสร้างโหลดเซลล์เพื่อประยุกต์ใช้เป็นอุปกรณ์วัดแรงบิด	
	CASE STUDY TO APPLY LOAD CELL TO TORQUE	
	MESUREMENT	
นักศึกษาผู้จัดทำ	นายรัตนชล	อินทรประเสริฐ
	นายปัญญา	ทัศนวิมาน
อาจารย์ที่ปรึกษา	รศ.ดร. กิตติ	ศิริเศรษฐ
	รศ.ประภาส	อุลลภกิตติพันธ์
	ผศ.ไสว	พงษ์สวัสดิ์
ปีการศึกษา	2547	

**บทคัดย่อ**

อุปกรณ์ตรวจวัดแรงบิดโดยมากใช้วัดกำลังของมอเตอร์ หรืออุปกรณ์ที่หมุน ซึ่งในบางครั้งแรงบิดได้ถูกกำหนดให้มีการวัดแรงบิดในระหว่างกระบวนการต่างๆ และในโปรเจกต์นี้ได้นำแนวคิดทางกลศาสตร์มาสร้างเครื่องมือเครื่องวัดขึ้น ซึ่งเป็นเครื่องมือชนิดหนึ่งที่ใช้ในการวัดแรงและโมเมนต์ มุมที่เกิดบนประแจทอด ซึ่งได้มีการติดตั้งเครื่องมือวัด(สแตนครี) ไปบนตัวโหลดเซลล์ ซึ่งเมื่อมีการหมุนค้ำของ ประแจทอดค่าของแรงออกมาในรูปของแรงดันไฟฟ้าซึ่งจะแสดงผลของค่านี้นบนคอมพิวเตอร์ซึ่งผลจากการวัดเป็นผลมาจาก axial force, shear force, และ Bending Moment ที่เกิดบนค้ำ หรือ beam โดยแนวคิดในการออกแบบถูกสร้างขึ้นจากทฤษฎีไฟไนติเมนต์ และในการทดลอง โดยแสดงค่าความถูกต้องและค่าความไวเชิงเส้นของเครื่องมือวัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

<b>Thesis Title</b>	Case Study to Apply Load Cell to Torque Measurement	
<b>Authors</b>	Mr.Rattanachol Intaraprasret	
	Mr.Pun	Tadviman
<b>Thesis Advisor</b>	Assoc.Prof.Dr.Kitti	Tirasesth
	Assoc.Prof.Praps	Aukakimapan
	Asst.Prof.Sawai	Pangswatd
<b>Year</b>	2004	

## ABSTRACT

Torque meter that almost measure power of motor or the rotate device and in process connection that require Fix torque value. This project apply static theory to design Torque Meter. Torque is a device which's used to measure the forces and moments in the Torque Wrench. The attachment of a Torque Wrench to an instrumented test (Strain Gage) with a load cell introduces signal that measurement from strain gage. As the Handle rotates, the load cell coordinate system also rotates, resulting of forces in electrical signal and display force value to the computer. This propose of this thesis is to design, assembly and test design of a load cell to measure the axial force, shear force, and bending moment at the end of a handle beam. This thesis applies finite element, the design validation and optimization tools for design and ANALYSIS/METHODS to describe the design Torque Wrench. We can get the linear, precision and of the equipment from experiments.

## กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาบัตรเล่มนี้สำเร็จสมบูรณ์ได้ ขอขอบพระคุณ รศ. ประภาส อุคคกิมพินธุ์และอาจารย์ที่ปรึกษาปริญญาบัตร ที่ให้ความรู้ แนวความคิด และให้คำปรึกษาแก้ไขปัญหาในขณะทำการวิจัยมาโดยตลอด และขอขอบคุณพี่กฤษณ์ เสมอพิทักษ์ ที่ให้ความช่วยเหลือในให้คำปรึกษาเรื่องโปรแกรมที่ใช้ในการแสดงผลและห้องLab ในการทดลอง ขอขอบคุณเพื่อนๆ พี่ๆ และน้องๆ ทุกคน ที่เป็นกำลังใจให้ปริญญาบัตรฉบับนี้สำเร็จลงด้วยดี

สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณ คุณพ่อ และคุณแม่ ผู้ให้กำเนิด ให้ความอุปการะ และสนับสนุนทางการศึกษามาโดยตลอด

คณะผู้จัดทำ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VI
สารบัญภาพ.....	VII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1ความเป็นมาและเหตุจูงใจของการวิจัย.....	1
1.2วัตถุประสงค์ของปริิญาานิพนธ์.....	1
1.3ขอบเขตของปริิญาานิพนธ์.....	1
1.4ขั้นตอนการศึกษา.....	2
บทที่ 2 แนวคิดพื้นฐานเกี่ยวกับเครื่องมือวัด.....	3
2.1 บทนำ.....	4
2.2 ความสัมพันธ์ของถอร์ควัดทางกล.....	4
2.3 การวัดแรง ทอร์ค.....	4
2.4 ชิ้นส่วนสำรับวัดแรง.....	5
2.5 การวัดทอร์ค.....	10
2.6 ทอร์คเซลล์.....	11
2.7 รูปแบบการติดตั้ง Strain Gage ลงบนโหดเซต.....	13
บทที่ 3 หลักการและทฤษฎีที่ใช้ในการออกแบบ Load Cell.....	16
3.1 กล่าวนำ.....	16
3.2 วิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์คืออะไร.....	17
3.3 การประยุกต์วิธีการ ไฟไนต์เอลิเมนต์.....	21
3.4ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดในสามมิติ.....	22
3.5การออกแบบเพื่อรับแรงแบบ STATIC.....	25

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
3.6 การประยุกต์ใช้จุดความเค้นสูงในการออกแบบ DUMMY (โพลีคาร์บอเนต).....	27
3.7 การออกแบบและสร้าง โพลีคาร์บอเนตเพื่อทำการวัดแรง.....	28
<b>บทที่ 4 ผลการทดลอง.....</b>	<b>40</b>
4.1 กล่าวนำ.....	40
4.2 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง.....	40
4.3 ขั้นตอนการทดลอง.....	41
4.4 ผลการทดลอง.....	43
4.7 สรุปผลการทดลอง.....	56
<b>บทที่ 5 บทสรุป.....</b>	<b>57</b>
5.1 บทสรุป.....	57
5.2 ข้อเสนอแนะและแนวทางการพัฒนา.....	57
<b>บรรณานุกรม.....</b>	<b>58</b>
<b>ภาคผนวก.....</b>	<b>59</b>

# สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
4.1 แสดงตำแหน่งความเค้นที่เกิดบน โหลดเซล.....	45
4.2 แสดงค่าความเค้นที่โหลดเซล.....	48



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
2.1 แสดงแผนภูมิกระบวนการวัด.....	4
2.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแกนกับแรงที่กระทำ.....	5
2.3 แสดงโพลดเซลล์แบบดิงค์และการต่อใช้งานกับวงจร.....	5
2.4 แสดงโพลดเซลล์แบบคานประกอบด้วยชิ้นส่วนยึดหยุ่นกับสเตรนเกจ.....	8
2.5 แสดงแรงบิดที่เกิดบนทรงกระบอกกลวง.....	10
2.6 แสดงทอร์กเซลล์ทำด้วยเพลากลมและสเตรนเกจ.....	11
3.1 แสดงการวิเคราะห์หาผลเฉลยบนแผ่นอลูมิเนียมด้วยการใช้วิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์.....	17
3.2 แสดงการแบ่งรูปร่างลักษณะของปัญหาออกเป็นเอลิเมนต์แบบต่าง ๆ.....	18
3.3 แสดงเอลิเมนต์สามเหลี่ยมแบบอย่างประกอบด้วยจุดสัมผัสต่อ.....	19
3.4 แสดงการประยุกต์วิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ในการคำนวณการขยับตัวของรถ.....	22
3.5 แสดงรูปเอลิเมนต์สามมิติที่มีความเค้นดึงฉาก.....	22
3.6 แสดงการกระจายความเค้นรอบๆ รูรูปไข่ภายในวัสดุขนาดใหญ่ที่ถูกดึง.....	26
3.7 แสดง การให้ภาพพจน์เกี่ยวกับความเค้นสูง.....	27
3.8 แสดงให้เห็นจุดที่เข้าไปเป็นจุดที่เกิดความเค้นสูง.....	28
3.9 แสดงรูปร่างของแนวค้ำของประแจมือ.....	29
3.10 แสดงทิศทางของแรงที่ค้ำคาน.....	30
3.12 แสดงรูปของโพลดเซลล์เมื่อออกแรงกระทำ.....	31
3.13 แสดงการกำหนดพื้นที่หน้าตัดเปลี่ยนแปลง.....	32
3.15 แสดงกราฟความเค้นที่เกิดจกแรงที่มากกระทำที่ปลาย.....	33
3.17 แสดงเป็นรูปร่างที่ออกแบบขึ้น.....	35
3.18 แสดงการออกแบบหัวบล็อกสำหรับขึ้น.....	36
3.19 แสดงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่มีข้อจับได้ถนัด.....	36
3.20 แสดงขนาดความยาวที่เหมาะสมกับมือ.....	37
3.21 แสดงค้ำจับที่ทำการออกแบบ.....	37
3.22 แสดงรูปประแจทอร์กที่ทำการออกแบบ.....	38
3.23 แสดงรูปถ่ายประแจวัดแรงบิด. 3.24 โดอะแกรมวงจรที่ใช้ขยายสัญญาณที่ได้จากการวัด....	39
3.25 แสดงรูปถ่ายวงจรที่ได้ในการวัด.....	39
4.1 แสดงELW 10 15 000.....	40

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญภาพ(ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4.2 แสดงLENZE HANS-LENZE-STRABI D-31855 AERZEN.....	41
4.3 แสดงการกำหนดคิโลิเมนต์ให้ประแจทอร์ค.....	42
4.4 แสดงการต่ออุปกรณ์เพื่อทำการซิ่ง.....	42
4.5 แสดงการต่ออุปกรณ์เพื่อวัดแรงบิด.....	43
4.6 แสดงความเค้นที่เกิดจากน้ำหนัก 10 kg.....	43
4.7 แสดงกราฟแสดงความเค้นที่ตัวโหดเซล.....	44
4.8 แสดงFactor of safety ที่ 10 kg.....	44
4.9 แสดงความเครียดที่เกิดจากแรงบิด 4 N-m.....	46
4.10 แสดง Factor of safety ที่ 4 N-m.....	46
4.11 แสดงการวิเคราะห์เฉพาะโหดเซลที่ 10 kg.....	47
4.12 แสดงFactor of safety โหดเซลที่ 10 kg.....	47
4.13 แสดงกราฟการทดลองซิ่งที่ 200 กรัม.....	49
4.14 แสดง กราฟการทดลองซิ่งที่ 400 กรัม.....	50
4.15 แสดงกราฟการทดลองซิ่งที่ 1 กิโลกรัม.....	50
4.16 แสดง กราฟการทดลองซิ่งที่ 2 กิโลกรัม.....	51
4.17 แสดงกราฟการทดลองซิ่งที่ 3 กิโลกรัม.....	51
4.18 แสดงกราฟการทดลองซิ่งที่ 4 กิโลกรัม.....	52
4.19 แสดงกราฟการทดลองซิ่งน้ำหนักแบบต่อเนื่อง.....	52
4.20 แสดง กราฟการทดลองซิ่งน้ำหนักแบบต่อเนื่อง.....	53
4.21 แสดงกราฟการทดลองวัดแรงบิดที่ 1 N-m.....	53
4.22 แสดงกราฟการทดลองวัดแรงบิดที่ 2 N-m.....	54
4.23 แสดงกราฟการทดลองวัดแรงบิดที่ 3 N-m.....	54
4.24 แสดงกราฟการทดลองวัดแรงบิดที่ 4 N-m.....	55
4.25 แสดงกราฟการทดลองวัดแรงบิดที่ 5 N-m.....	55
4.26 แสดงกราฟค่าเฉลี่ยของการวัดแรงบิด.....	56

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและเหตุจูงใจของการวิจัย

ปัจจุบันงานในโรงงานอุตสาหกรรมหลายอย่างมีความจำเป็นต้องใช้สลักเกลียวในการยึดวัสดุ 2 อย่างเข้าด้วยกัน ดังนั้นการใช้งานสลักเกลียวในการยึดงานบางประเภทจะจำเป็นที่กำหนดแรงบิดที่เหมาะสมที่จะวัดแรงบิดที่สลักเกลียว เพื่อให้ยึดกันของวัสดุ 2 อย่างยึดอยู่ในความแน่นของแรงบิดที่เหมาะสม ซึ่งการที่จะขันสลักเกลียวให้ได้แรงบิดตามต้องการนั้นจำเป็นจะต้องใช้ประแจวันแรงบิดมาช่วยในการขันสลักเกลียว ซึ่งประแจวัดแรงบิดในจำนวนมากในปัจจุบันจะใช้ชุดกลไกเป็นตัวอุปกรณ์วัดแรงบิด แต่ในโรงงานนี้เป็นการศึกษาความเครียดที่เกิดบนโพลีคาร์บอเนตซึ่งการเปลี่ยนแปลงความเค้นบนโพลีคาร์บอเนตจะทำให้ได้สัญญาณแรงดันไฟฟ้าออกมา

### 1.2 วัตถุประสงค์

- 1) ศึกษาเพื่อทำการหารูปทรงของโพลีคาร์บอเนตที่ดีที่สุดเพื่อที่จะใช้เป็นอุปกรณ์ตรวจวัดความเครียดที่เกิดขึ้นจากแรงที่จะทำการวัด
- 2) ทำการออกแบบและสร้างประแจวัดแรงบิดที่ให้ผลการตรวจรู้แรงที่เกิดขึ้นออกมาในรูปแบบสัญญาณไฟฟ้า
- 3) ทดสอบประแจวัดแรงบิดที่สร้างขึ้นเพื่อดูว่าทฤษฎีที่ทำการศึกษา และแนวคิดในการออกแบบสามารถนำไปใช้วัดแรงบิดได้จริงหรือไม่

### 1.3 ขอบเขตของปริิญาานิพนธ์

- 1) ใช้โปรแกรมวิเคราะห์ทางด้านไฟฟ้าเป็นต้นลิเมนต์ในการออกแบบโพลีคาร์บอเนต
- 2) ศึกษาทฤษฎีและหาวิธีการทดสอบแรงที่ที่ดีที่สุดที่จะติดบนตัวโพลีคาร์บอเนต
- 3) ออกแบบและสร้างวงจรที่จะใช้รับสัญญาณการเปลี่ยนแปลงค่าความเค้นตามจากสแตนเกจติดตั้งบนโพลีคาร์บอเนต
- 4) สร้างโพลีคาร์บอเนต หัวรับแรงบิด และด้ามจับจากเครื่อง CNC ที่มีอยู่
- 5) แสดงค่าของแรงที่วัดได้บนหน้าจอกอมพิวเตอร์
- 6) ทำการสอบเทียบประแจวัดแรงบิดกับชุดเครื่องมือสร้างแรงบิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 1.4 ขั้นตอนในการศึกษา

- 1) ศึกษาโปรแกรมไฟไนต์อิลิเมนต์ที่จะนำมาใช้ในการออกแบบ
- 2) นำรูปร่างที่ออกแบบได้ทดสอบในโปรแกรมวิเคราะห์เพื่อทำการวิเคราะห์ว่ามีมีแรงมากระทำแล้วจะเกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างไร
- 3) นำวัสดุต่างๆมาลองสร้างเป็น โหลดเซลล์ขึ้น เช่น อะคริลิก, สแตนเลส
- 4) นำค่าจากการวัดมาสรุปและตัดตัดสินใจเลือกวัสดุที่จะใช้ในการทำเครื่องมือ
- 5) ออกแบบรูปร่างของเครื่องมือวัดแรงบิด



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

# แนวคิดพื้นฐานเกี่ยวกับเครื่องมือวัด

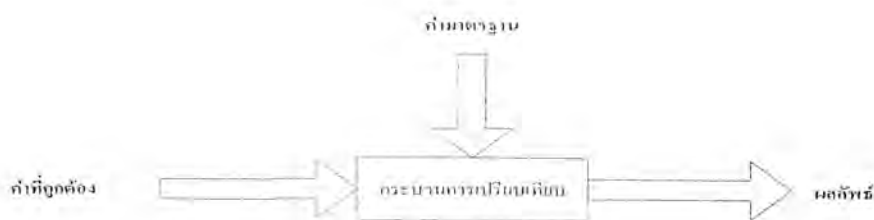
### 2.1 บทนำ

ในปัจจุบันพัฒนาการทางด้านเครื่องมือวัดเป็นไปอย่างรวดเร็วเครื่องมือวัดมีใช้ในทุกระบบทางสาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี แม้แต่ในชีวิตประจำวันของเราก็เข้ามาเกี่ยวข้องกับ เช่น นาฬิกาที่ทุกคนใช้ดูเวลา

การวัดได้มีผู้นิยามว่าเป็นการแยกสัญญาณจากระบบหรือกระบวนการ ซึ่งแทนพารามิเตอร์หรือตัวแปรสมรรถนะของระบบ การควบคุมทำได้ดีขึ้นได้หรือไม่สัมพันธ์กับอุปกรณ์การวัด ตัวอย่างที่ดีก็คือ ร่างกายมนุษย์ มนุษย์รับรู้ข่าวสารต่าง ๆ ที่อยู่รอบตัวได้โดยผ่านตัวรับรู้ เช่น มองเห็น ได้กลิ่น ได้ยิน สัมผัส เป็นต้น ข่าวสารจะถูกเปลี่ยนเป็นคลื่นไฟฟ้าและถูกส่งผ่านไปยังสมองซึ่งทำหน้าที่ประมวลผลข้อมูลและตัดสินใจเคลื่อนไหว เพื่อให้วัตถุประสงค์ สมรรถนะหรือประสิทธิภาพการทำงานจะลดลงเมื่อการรับรู้ลดลง เช่นความสามารถในการขับรถลดลง เมื่อความสามารถในการเห็นลดลงหรือกล่าวอีกนัยหนึ่งได้ว่าความสามารถของมนุษย์สามารถปรับปรุงให้ดีขึ้นได้ถ้าการรับรู้ได้รับการขยายขอบเขต

จุดประสงค์แรกของการวัดในทางวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีคือเพื่อแสดงค่าหรือแนวโน้มของตัวแปรบางตัวที่เป็นปริมาณทางกายภาพ ค่าหรือ แนวโน้มนี้อ่านได้จากอุปกรณ์หรือเครื่องมือวัด ค่าตามพื้นฐานที่สำคัญก็คือ ค่าหรือแนวโน้มของปริมาณที่วัดได้มีความสัมพันธ์กับค่าจริงอย่างไร หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งว่าจะสร้างรูปแบบการวัดอย่างไรเพื่อให้การวัดแสดงผลข้อมูลได้ถูกต้องไม่คลุมเครือ จะใช้ระบบการวัดอย่างไรเพื่อให้วิศวกรสามารถแปลงผลข้อมูลที่ได้จากการวัด ได้อย่างง่ายและมีความมั่นใจในข้อมูลนั้น

กระบวนการวัดหรือการวัดค่าการวัดประกอบด้วยการเปรียบเทียบ ค่ามาตรฐาน (Standard) กับ ค่าที่วัดได้ (measured) ซึ่งปริมาณทางกายภาพที่ถูกสังเกตและปริมาณที่ป้อนเข้าสู่กระบวนการวัด และผลลัพธ์หรือออกมาแผนภูมิกระบวนการวัดแสดงดังภาพที่ 2.1



ภาพที่ 2.1 แสดงแผนภูมิกระบวนการวัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.2 ความสำคัญของการวัดทางกล

ข้อมูลของปริมาณภายใต้สภาวะจริงของตัวแปรทางกายภาพ และกระบวนการจะได้อาจจากการวัด ถ้าไม่เช่นนั้นแล้วปริมาณเหล่านั้นจะได้อาจจากการประมาณเท่านั้น 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

ทรานสดิวเซอร์ที่ใช้วัดแรง ทอร์ก หรือความดัน โดยทั่วไปประกอบด้วยส่วนที่ยึดหยุ่นหรือการเปลี่ยนแปลงเป็นระยะโค้ง หรือความเครียด และตัวรับรู้ โดยปกติจะใช้สแตนเลส เป็นตัวรับรู้แรงที่เกิดขึ้นในรูปของความเครียดและนำค่าความเครียดที่เกิดขึ้นเปลี่ยนในรูปของสัญญาณไฟฟ้าเพื่อนำไปประมวลผล

## 2.3 การวัดแรง ทอร์ก

ทรานสดิวเซอร์แรง (Force Transducers) ใช้สำหรับแปลงผันแรงทางกายภาพให้เป็นสัญญาณไฟฟ้า ในทางกลศาสตร์สามารถจำแนกแรงออกเป็น 2 ประเภทใหญ่ๆ คือ

### 2.3.1 แรงจลน์ (Cinematic force)

เป็นแรงที่ทำให้วัตถุเปลี่ยนแปลงความเร็วในการเคลื่อนที่ เช่น แรงที่กระทำบนข้อมือหุ่นยนต์เนื่องจากความเร่งของมวลของวัตถุในระหว่างการบังคับให้เคลื่อนที่

### 2.3.2 แรงสถิต (Static force)

เป็นแรงที่กระทำบนวัตถุ โดยไม่เกี่ยวกับการเคลื่อนที่ เช่น แรงที่กระทำโดยมือของหุ่นยนต์บนผิวของวัตถุในระหว่างการจับยึดวัตถุ

แรงวัดต่างๆไป ทรานสดิวเซอร์แรงจะแปลงผันพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้า โดยวัดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างทางกายภาพของทรานสดิวเซอร์ซึ่งเป็นตัวการทำให้เกิดขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.4 ชิ้นส่วนสำหรับวัดแรง

ชิ้นส่วนยึดหยุ่นเป็นอุปกรณ์ที่สำคัญสำหรับการวัดทั้งแรงจลน์และแรงสถิต เมื่อมีแรงกระทำต่อชิ้นส่วนยึดหยุ่นจะมีผลทำให้เกิดการกระจัดหรือความเครียดขึ้นในตัวชิ้นส่วนยึดหยุ่น ชิ้นส่วนยึดหยุ่นนี้อาจทำอยู่ในรูปของทรงกระบอก วงแหวน คานยื่น แท่งวัสดุ ไดอะแฟรม สำหรับการแสดงขนาดของแรงที่นิยมใช้โดยผ่านการกระจัดเช่น

### 2.4.1 การเบนไปของปลายคานสัมพันธ์กับแรง $P$ ที่กระทำ

ภาพที่ 2.2 แสดงแสดงความสัมพันธ์ระหว่างคานกับแรงที่กระทำ

$$P = \frac{3EI}{L^3} \delta$$

(2.1)

เมื่อ  $I$  คือค่าโมเมนต์ของความเฉื่อยของคานรอบแกนที่ผ่านศูนย์กลาง ในทิศทางของการเบน

#### 2.4.1.1 โหลดเซลล์แบบลึงค์



ภาพที่ 2.3 แสดงโหลดเซลล์แบบลึงค์และการต่อใช้งานกับวงจร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โหลดเซลล์แบบลิงค์ (link-type load cell) อย่างง่ายประกอบด้วยลิงค์ (link) และ สदनเกจ 4 อัน ดังแสดงในภาพที่ 2.3 ภาระ (Load) P สามารถเป็นไปได้ทั้งภาระแรงดึง (Tensile load) หรือ ภาระแรงอัด (compressive load) สदनเกจ 2 อันยึดติดกับลิงค์ในแนวขนานกับแกนและอีก 2 อันในแนวขวางกับแกน สदनเกจทั้ง 4 จะต่อเป็นวีตสโตนบริดจ์โดยเกจที่อยู่ในแนวแกนต่ออยู่ในแขนที่ 1 และ 3 ส่วนเกจที่อยู่ในแนวขวางต่ออยู่กับแนวแขน 2 กับ 4

เมื่อภาระ P กระทำต่อลิงค์ ความเครียดตามแนวแกนและตามแนวขวางจะเกิดขึ้นในลิงค์ และสัมพันธ์กับภาระตามสมการ

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

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

เมื่อ A เป็นพื้นที่หน้าตัดของลิงค์

E เป็นโมดูลัสความยืดหยุ่นของวัสดุที่ใช้ทำลิงค์

\nu เป็นอัตราส่วนปัวซองของวัสดุที่ใช้ทำลิงค์

การตอบสนองของเกจต่อภาระ P ที่กระทำเป็นไปตามสมการ

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

$$\frac{\Delta R2}{R2} = \frac{\Delta R4}{R4} = Sg \epsilon a = -\frac{\nu SgP}{AE} \quad (2.5)$$

ถ้าสมมุติว่าสदनเกจทั้ง 4 ตัวบนลิงค์ เหมือนกันทุกประการ แรงดันเอาต์พุต  $V_0$  จากวีตสโตนบริดจ์ หาได้จาก การแทนค่า สมการ (b) ลงสมการ

$$V_0 = \frac{r}{(1+r)^2} \left( \frac{\Delta R1}{R1} - \frac{\Delta R2}{R2} + \frac{\Delta R3}{R3} - \frac{\Delta R4}{R4} \right) V_s \quad (2.6)$$

จะได้

$$V_0 = \frac{SgP(1+\nu)}{2AE} V_s \quad (2.7)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หรือ 
$$P = \frac{2AE}{Sg(1+V)V_s} V_0 = C v_0 \quad (2.8)$$

จากสมการ แสดงว่า ภาวะ P เป็นสัดส่วนเชิงเส้นกับแรงดัน เอาต์พุต  $V_0$  และค่าคงตัวสัดส่วน หรือ ค่าคงตัวปรับเทียบ

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

เมื่อ C คือค่าคงที่ปรับเทียบ ความไวของโพลีเมอร์และวัสดุโตนบริดจ์รวมกัน

คือ 
$$S = \frac{V_0}{P} = \frac{1}{C} = \frac{Sg(1+V)}{2AE} V_s \quad (2.9)$$

จากสมการ แสดงว่าความไวของโพลีเมอร์ขึ้นอยู่กับพื้นที่หน้าตัด (A) โมดูลัสความยืดหยุ่นของวัสดุที่ใช้ทำลึงค์ ตัวประกอบเกอ และแรงดันที่จ่ายให้กับบริดจ์ ( $V_s$ )

เรนจ์ (Range) ของแรงที่ให้กับโพลีเมอร์แบบลึงค์ หาได้จากพื้นที่หน้าตัดของลึงค์ และความถี่ ( $S_f$ ) ของวัสดุที่ใช้ทำลึงค์ โดย

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

อัตราส่วนแรงดันที่ภาระสูงสุด ( $V_0/V_s$ )<sub>max</sub> สำหรับโพลีเมอร์แบบลึงค์ หาได้จากการแทนสมการ 8.12 นี้ ลง 8.8 จะได้

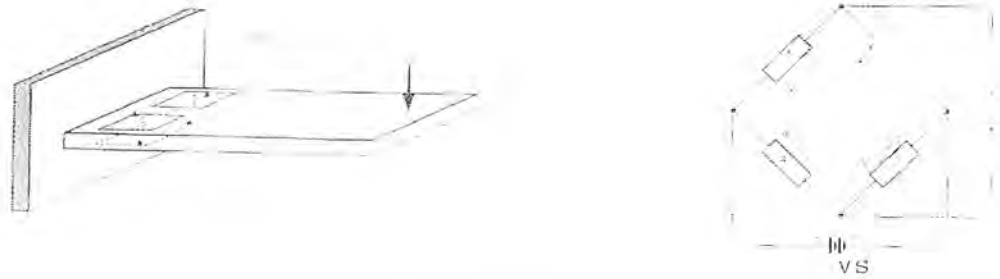
$$\left( \frac{V_0}{V_s} \right)_{\max} = \frac{SgS_f(1+V)}{2E} \quad (2.11)$$

โพลีเมอร์แบบลึงค์เกือบทั้งหมดกำหนดค่าเต็มสเกลของภาวะ ( $P=P_{\max}$ ) ที่  $(V_0/V_s)^* = 3mV/V$  ด้วยค่าเต็มสเกลเฉพาะ ของอัตราส่วนแรงดัน  $(v_0/v_s)^*$  นี้ภาวะ P บนโพลีเมอร์จะหาได้จาก

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.1.2 โหลดเซลล์แบบคาน



ภาพที่ 2.4 แสดง โหลดเซลล์แบบคานประกอบด้วยชิ้นส่วนยึดหยุ่นกับสเตรนเกจ

โหลดเซลล์แบบคาน(Beam-type load cell) ใช้วัดภาระในกรณีที่ใช้โหลดเซลล์แบบ  
 ลิงค์ไม่ได้ จากภาพที่ 2.4(ก) ใช้คานยื่น (cantilever Beam) ทำหน้าที่เป็นชิ้นส่วนยึดหยุ่นซึ่งมีสเตรน  
 เกจ 2 อัน ติดอยู่ที่ผิวด้านบน และอีก 2 อัน ติดที่ผิวด้านล่าง (ทั้งหมดติดอยู่ในแนวขนานกับแกน  
 ของคาน) ทำหน้าที่เป็นตัวรับรู้ โดยสเตรนเกจ ต่อกันเป็นวงรีตส โคนบรีดจ์ ดังภาพที่ 2.4(ข)

ภาระ P ทำให้เกิด โมเมนต์  $M(=Px)$  ที่ตำแหน่ง x ทำให้ ได้ผลลัพธ์

$$\epsilon_1 = -\epsilon_2 = \frac{6M}{Ebh^2} = \frac{6Px}{Ebh^2} \tag{2.13}$$

เมื่อ B คือความกว้างของหน้าตัดคาน

H คือความหนาของหน้าตัดคาน

การตอบสนองของสเตรนเกจหาได้จากสมการ  $\frac{\Delta R}{R} = S_e \epsilon$  และ สมการ (2.13) ดังนั้น

$$\frac{\Delta R_1}{R_1} = -\frac{\Delta R_2}{R_2} = \frac{\Delta R_3}{R_3} = -\frac{\Delta R_4}{R_4} = \frac{6S_e Px}{Ebh^2} \tag{2.14}$$

แรงดันเอาต์พุต  $V_0$  จากวีตส โคนบรีดจ์ ซึ่งเป็นผลจากการกระทำของ ภาระ P หาได้โดยแทนสมการ  
 (2.14) ลงในสมการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$V_o = \frac{r}{(1+r)^2} \left( \frac{\Delta R1}{R1} - \frac{\Delta R2}{R2} + \frac{\Delta R3}{R3} - \frac{\Delta R4}{R4} \right) V_s \quad (2.15)$$

และสมมติว่าสแตคเกททั้ง 4 เหมือนกันทุกประการ จะได้

$$V_o = \frac{6S_x P x}{EbH^2} V_s \quad (2.16)$$

หรือ

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

จากสมการ 2.17 แสดงว่าภาระ P เป็นสัดส่วนกับแรงดัน เอาต์พุต  $V_o$  และค่าคงตัวสัดส่วน หรือค่าคงตัวเปรียบเทียบ C คือ

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

ความไวของ โหลดเซลล์และวัสดุโตนบริดจ์ร่วมกัน กำหนดโดยสมการ

$$S = \frac{F_o}{P} = \frac{1}{C} = \frac{6S_x x r}{EbH^2} \quad (2.19)$$

จากสมการ 2.19 แสดงว่าความไวของโหลดเซลล์แบบคาน ขึ้นอยู่กับรูปร่างหน้าตัดของคาน (b, h) โมดูลัสความยืดหยุ่นของวัสดุที่ใช้ทำคาน (E) ตำแหน่งของภาระเทียบกับเกจ (x) ตัวประกอบเกจ (Sg) และแรงดันที่ป้อนให้กับวงจรบริดจ์ ( $V_s$ )

เรนจ์ของภาระของภาระที่ใช้กับโหลดเซลล์แบบคาน ขึ้นอยู่กับรูปร่างหน้าตัดของคาน ตำแหน่งที่ภาระกระทำ และความถี่ของวัสดุที่ใช้ทำคาน ถ้าสมมติว่าเกจติดที่ตำแหน่งใกล้กับฐานรองรับคานจะได้

$$M_{susc} = M_{max}$$

และ

$$P_{max} = \frac{S_x b h^2}{6x} \quad (2.20)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อัตราส่วนแรงดันที่ภาระสูงสุด  $(V_o/V_s)_{\max}$

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

โหลดเซลล์แบบคายที่ขายในท้องตลาดมีอัตราส่วนแรงดัน  $(V_o/V_s)^*$  ที่ภาระเต็มสากระหว่าง 4 และ 5 mV/V

## 2.5 การวัดทอร์ก

ทอร์กหรือ โมเมนต์อาจวัดโดยการสังเกตการบิดเบี่ยงเบนเชิงมุมของแท่งวัสดุหรือ ทรงกระบอกกลวง ดังแสดงในรูปที่ 2.5 โมเมนต์กำหนดโดย สมการ

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

เมื่อ  $M$  เป็นโมเมนต์ N.m

$G$  เป็นโมดูลัสความยืดหยุ่นเฉือน N/m<sup>2</sup>

$R_i$  เป็นรัศมีภายใน m

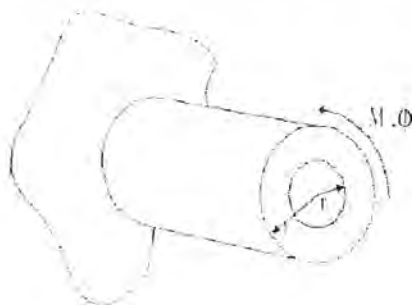
$R_o$  เป็นรัศมีภายนอก m

$L$  เป็นความยาวของทรงกระบอก m

$\phi$  เป็นมุมที่เบี่ยงเบนไป rad

โดย

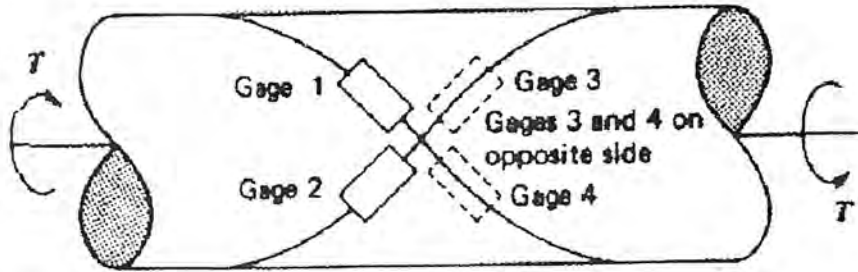
$$G = \frac{E}{2(1+\mu)} \quad (2.23)$$



ภาพที่ 2.5 แสดงแรงบิดที่กิดบนทรงกระบอกกลวง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.6 ทอร์รกเซล



ภาพที่ 2.6 แสดง ทอร์รกเซลทำด้วยเพลากลมและสเตรนเกจ

ทอร์รกเซล (Torque cell) เหมือนโกลดเซล คือประกอบด้วยชิ้นส่วนทางกล (โดยปกติ คือเพลาชึ่งมีส่วนพื้นที่หน้าตัดเป็นรูปทรงกลม) คลิปตัวรับรู้อุปกรณ์เกจติดอยู่บนเกลียว 2 เส้นที่ตั้งฉากกัน โดยแต่ละเส้นทำมุม 45 องศากับแกนของเพลาดังแสดงในภาพที่ 2.8 เกจ 1 และ 3 ติดอยู่บนเกลียว ขวามตัวตรวจวัดความเครียดบวก เกจ 2 และ 4 ติดอยู่บนเกลียวซ้ายตรวจสอบความเครียดลบ ความเค้นเฉือน  $\tau$  ในเพลากลม สัมพันธ์กับทอร์รก  $T$  ที่กระทำต่อเพลากลมด้วยสมการ

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

เมื่อ  $D$  คือเส้นผ่าศูนย์กลางของเพล

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

เมื่อเพลากลมอยู่ภายใต้ชั่วของความเฉื่อยภายใต้การกระทำของแรงบิดเพียงอย่างเดียวความเค้นตั้งฉาก (Normal stress)  $\sigma_x = \sigma_y = \sigma_z = 0$  จากรูปที่ 8.12(ข) จะได้

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

ความเครียดหลัก (principle strain)  $\epsilon_1 = \epsilon_2$  หาได้จากกฎของฮุก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

$$\varepsilon_2 = \frac{1}{E}(\sigma_2 - \nu\sigma_1) = -\frac{16T}{\pi D^3} \left( \frac{1+\nu}{E} \right) \quad (2.26)$$

การตอบสนองของสแตนเกจเป็นไปตามสมการ

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

เมื่อต่อเกจเข้ากับวัดสโตนบริดจ์ ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดัดเอาต์พุต  $V_o$  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-วัดสโตนบริดจ์รวมกัน 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) ชีตจำกัดสัดส่วน ( $S\tau$ ) ของวัสดุในการบิดสำหรับการประยุกต์ใช้งานแบบสถิตจะได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

อัตราส่วนแรงดันต่อทอร์กสูงสุด (VO/Vs)\* ของทอร์กเซลล์จะถูกกำหนดไว้ระหว่าง 4 และ 5 mV/V ทอร์ก T ที่สอดคล้องกับแรงดันเอาต์พุต Vo ถูกกำหนดโดยสมการ

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

### 2.7 รูปแบบการติดตั้ง Strain Gage ลงบนโหลดเซลล์

Gage Method	Application	Circuit	output	Remark
1-active-gage 2-wire Nr. of gage: 1	<p>Monoaxial stress (uniform tension or compression)</p>		$C_o = \frac{E}{4} K_s \epsilon_o$ <ul style="list-style-type: none"> <li><math>K_s</math> Gage factor</li> <li><math>\epsilon_o</math> Strain</li> <li><math>E</math> Bridge voltage</li> <li><math>\epsilon_o</math> Output voltage</li> <li><math>R_g</math> Gage resistor</li> <li><math>R</math> Fixed resistor</li> </ul>	No temp. compensation; x1 output; nonlinearity correction needed for large strain
1-active-gage 3-wire Nr. of gage: 1	<p>Monoaxial stress (uniform tension or compression)</p>		$C_o = \frac{E}{4} K_s \epsilon_o$	No temp. compensation; thermal effect on leadwires cancelled; x1 output; nonlinearity correction needed for large strain
1-active-gage (2 in series) 2-wire (cancelling bending strain) Nr. of gages: 2	<p>Bending</p> <p>Monoaxial stress (uniform tension or compression)</p>		$C_o = \frac{E}{4} K_s \epsilon_o$ <ul style="list-style-type: none"> <li><math>R_{g1}</math> Strain <math>\epsilon_1</math></li> <li><math>R_{g2}</math> Strain <math>\epsilon_2</math></li> <li><math>\epsilon_o = \frac{\epsilon_1 + \epsilon_2}{2}</math></li> <li><math>R</math> Fixed resistor</li> <li><math>R_{g1} + R_{g2} = R</math></li> </ul>	No temperature compensation; bending strain cancelled; x1 output

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

Bending

Monoaxial stress (uniform tension or compression)

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

$R_{g1}$  ..... Strain :  $\epsilon_1$   
 $R_{g2}$  ..... Strain :  $\epsilon_2$

$$\epsilon_0 = \frac{\epsilon_1 - \epsilon_2}{2}$$

$R$  : 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

Bending

Monoaxial stress (uniform tension or compression)

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

$R_{g1}$  ..... Strain :  $\epsilon_1$   
 $R_{g2}$  ..... Strain :  $\epsilon_2$

$$\epsilon_0 = \frac{\epsilon_1 - \epsilon_2}{2}$$

$R$  : 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)

Bending

$$e_0 = \frac{(1 + \nu) E}{4} K_s \epsilon_0$$

$\nu$  : Poisson's ratio

$R_{g1}$  : Gage resistor  
 $R_{g2}$  : Gage resistor  
 $R$  : Fixed resistor

Temperature compensation; thermal effect on leadwires cancelled; x1 output

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

Bending stress

Monoaxial stress

$$e_0 = \frac{E}{2} K_s \epsilon_0$$

$R_{g1}$  ..... Strain :  $\epsilon_0$   
 $R_{g2}$  ..... Strain :  $\epsilon_0$

$R$  : Fixed resistor

Monoaxial stress (uniform tension or compression)

Monoaxial stress (uniform tension or compression)

$$e_0 = \frac{E}{2} K_s \epsilon_0$$

$R_{g1}$  ..... Strain :  $\epsilon_0$   
 $R_{g2}$  ..... Strain :  $\epsilon_0$

$R$  : 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)

$$e_0 = \frac{E}{2} K_s \epsilon_0$$

$R_{g1}$  ..... Strain :  $\epsilon_0$   
 $R_{g2}$  ..... Strain :  $\epsilon_0$

$R$  : 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; x2 output

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ในเชิงพาณิชย์  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**4-active-gage (bending strain measuring)**  
 Nr. of gages: 4

Bending stress

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

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

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)

$\epsilon_0 = \frac{(1+\nu)E}{2} K_s \cdot \epsilon_0$

$\nu$ : Poisson's ration

$R_{g1}, R_{g3}, \dots$  Strain:  $\epsilon_0$   
 $R_{g2}, R_{g4}, \dots$  Strain:  $-\nu \epsilon_0$

Temperature compensation: thermal effect on leadwires cancelled: x2(1+ $\nu$ ) output

**Active-dummy (4-gage method)**  
 Nr. of gages: 4

Monoaxial stress (uniform tension or compression)

Active gage  
 Dummy gage

$\epsilon_0 = \frac{E}{2} K_s \cdot \epsilon_0$

$R_{g1}, R_{g3}, \dots$  Strain:  $\epsilon_0$   
 $R_{g2}, R_{g4}, \dots$  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

$\epsilon_0 = \frac{E}{2} K_s \cdot \epsilon_0$

$R_{g1}$  Twisting strain:  $\epsilon_0$   
 $R_{g2}$  Twisting strain:  $-\epsilon_0$   
 R: Fixed resistor

Temperature compensation: thermal effect on leadwires cancelled: x2 output

**4-active-gage (twisting strain measuring)**  
 Nr. of gages: 4

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

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

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

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

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### บทที่ 3

## หลักการและทฤษฎีที่ใช้ในการออกแบบ

### โพลดเซล

#### 3.1 กล่าวนำ

ความสามารถในการแก้ปัญหาทางด้านวิศวกรรมศาสตร์และวิทยาศาสตร์ มีส่วนอย่างมากในการสร้างเสริมปรับปรุงความเป็นอยู่ของมนุษย์ให้ดียิ่งขึ้น ปรากฏการณ์ส่วนใหญ่ที่เกิรอบตัวสามารถอธิบายได้โดยกฎเกณฑ์ทางฟิสิกส์และทำการประดิษฐ์ขึ้นมาในลักษณะของสมการต่างๆ ได้ ซึ่งอาจอยู่ในรูปของสมการเชิงอนุพันธ์ ดังตัวอย่างเช่น การคำนวณหารการกระจายทางอุณหภูมิบนเครื่องยนต์อาจเริ่มมาจากการสมการอนุพันธ์ที่อธิบายสถานะของความสมดุลในการถ่ายเทความร้อน [1] การอธิบายสถานะของความสมดุลออกแบบโครงสร้างเครื่องบินนั้นอาจเริ่มจากสมการอนุพันธ์ที่อธิบายสถานะของความสมดุลของโครงสร้างนั้นภายใต้แรงกดดันของอากาศในขณะที่ทำการบิน [2] รวมไปถึง การทำนายทิศทางและความเร็วของกระแสลมจากพายุไต้ฝุ่นเพื่อจะออกข่าวเตือนประชาชนในพื้นที่ที่ไต้ฝุ่นจะเคลื่อนตัวไปในการอพยพหนีก็อาจเริ่มมาจากสมการเชิงอนุพันธ์ที่อธิบายสถานะของความสมดุลของกรไหล เป็นต้น

สมการเชิงอนุพันธ์ที่สอดคล้องกับปัญหาต่าง ๆ นั้น ปกติจะประดิษฐ์ได้โดยไม่ยากเลย หากแต่ว่าผลเฉลยแม่นยำตรงที่ต้องการและจำเป็นต้องการทำการหาออกมาโดยวิธีวิเคราะห์ นั้นทำได้ยากลำบากหรือ จะหาไม่ได้เลยก็ได้ เหตุผลดังกล่าวคือให้เกิดวิธีการหาผลเฉลยโดยประมาณนั้นมีหลายๆ วิธีการ วิธีการที่ได้รับความนิยมกันอย่างกว้างขวางในอดีตที่ผ่านมา คือ วิธีการผลต่างสี่เหลี่ยม (Finite Difference Method)

หลักการที่สำคัญของวิธีการผลต่างสี่เหลี่ยมก็คือการหาผลเฉลยโดยประมาณ โดยเริ่มจากการเขียนสมการเชิงอนุพันธ์ให้อยู่ในรูปแบบของระบบสมการผลต่างสี่เหลี่ยม (System of Difference Method) ข้อดีของวิธีการผลต่างสี่เหลี่ยมนี้ก็คือ วิธีดังกล่าวเป็นวิธีการที่ง่ายต่อการศึกษาและการทำความเข้าใจ รวมไปถึงความสะดวกในการเขียน โปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อใช้ในการประมวลผลเฉลยของปัญหานั้นๆ ส่วนข้อเสียของการใช้วิธีการผลต่างสี่เหลี่ยมก็มีหลายประการเช่น ความไม่สะดวกในการกำหนดเงื่อนไขขอบเขต (Application of Boundary Conditions) และที่สำคัญที่สุดก็คือความยากลำบากในการประยุกต์วิธีการนี้เพื่อใช้กับปัญหาที่มีรูปร่างลักษณะซับซ้อน ซึ่งการออกแบบสิ่งที่มีรูปร่างลักษณะซับซ้อนในปัจจุบันนี้ ได้กลายเป็นสิ่งจำเป็นเพื่อ การพัฒนาปรับปรุงคุณภาพสิ่งของนั้น ๆ ให้ดียิ่งขึ้น

สาเหตุของความยากลำบากดังกล่าวมีส่วนก่อให้เกิดวิธีหาผลเฉลยโดยประมาณวิธีใหม่ที่เรียกว่าวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ (Finite Element Method) ที่นิยมเรียกด้วยคำว่า FEM ซึ่งวิธีนี้สามารถ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่หรือใช้ซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาต  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นำมาใช้กับปัญหาที่มีรูปร่างซับซ้อนเช่นใดก็ได้ โดยสามารถจำลองรูปร่างลักษณะดั้งเดิมที่แท้จริงได้ใกล้เคียงเที่ยงตรงกว่าหลักการของวิธีการนี้ในขั้นต้นก็คล้ายกับวิธีการผลต่างสี่เหลี่ยม ก่่าวคือเริ่มจากการแบ่งรูปร่างของปัญหาออกเป็นเนื้อที่หลายๆชิ้นที่เรียกว่า อิลิเมนต์ เช่นในตัวอย่างของแผ่นอะลูมิเนียมเดิมนี้สามารถแบ่งแผ่นอะลูมิเนียมออกเป็น อิลิเมนต์ขนาดต่าง ๆ กัน โดยอิลิเมนต์ต่าง ๆ นี้อาจอยู่ในรูปลักษณะของสามเหลี่ยม และสี่เหลี่ยมด้านไม่เท่าก็ได้ ดังเช่นดัง ภาพที่ 3.1



ภาพที่ 3.1 แสดงการวิเคราะห์หาผลเฉลยบนแผ่นอะลูมิเนียมด้วยการใช้วิธีการไฟไนต์อิลิเมนต์

ผลประโยชน์สิ่งแรกที่ได้เห็นชัดเจนจากภาพที่ 1.1 ก็คือ วิธีการไฟไนต์อิลิเมนต์ประกอบด้วยอิลิเมนต์ขนาดต่างๆกันที่สามารถจำลองรูปร่างลักษณะดั้งเดิมของแผ่นอะลูมิเนียมได้ทางคณิตศาสตร์ (Mathematical Model) ที่มีรูปร่างลักษณะใกล้เคียงกับของจริงดั้งเดิมมากที่สุด ดังนั้นค่าผลเฉลยโดยประมาณที่จะคำนวณออกมาก็มีความแม่นยำมากขึ้น

### 3.2 วิธีการไฟไนต์อิลิเมนต์คืออะไร

ในการแก้ปัญหาใดปัญหาหนึ่ง ปัญหาหนึ่งจะประกอบด้วยสมการเชิงอนุพันธ์ และเงื่อนไขขอบเขตที่กำหนดมาให้ ค่าผลเฉลยแม่นยำตรง ของปัญหาดังกล่าวจะประกอบด้วยค่าของตัวแปรต่างๆกันตามตำแหน่งบนรูปร่างลักษณะของปัญหานั้น หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งก็คือ ค่าผลเฉลยแม่นยำจะประกอบด้วยค่าต่างๆทั้งหมด นับเป็นจำนวนอนันต์ค่า แทนที่จะทำการหาค่าแม่นยำที่ประกอบด้วยค่าต่างๆ จำนวนมากมายเช่นนี้ซึ่งสำหรับปัญหาในทางปฏิบัติจะทำได้ หลักการก็คือ การทำการเปลี่ยนค่าทั้งหมดที่มีจำนวนอิลิเมนต์ค่านั้นมาเป็นค่าโดยประมาณซึ่งมีจำนวนที่นับได้ (finite) ด้วยการแทนรูปร่างลักษณะของปัญหาด้วยอิลิเมนต์ (element) ซึ่งมีขนาดต่าง ๆ กัน ดังเช่นที่ได้แสดงในตัวอย่างแผ่นอะลูมิเนียม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงหรือทำซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิธีการดังกล่าวซึ่งเป็นที่นิยมว่า ผลเฉลยของแต่ละอิเลเมนต์นั้นจำเป็นต้องสอดคล้อง (Satisfy) กับสมการเชิงอนุพันธ์และเงื่อนไขขอบเขตที่กำหนดมาให้ในปัญหานั้นๆ ซึ่งหมายความว่า หลักการของวิธีการไฟไนต์อิเลเมนต์จะเริ่มต้นจากการพิจารณาอิเลเมนต์แต่ละอิเลเมนต์ โดยการสร้างมาการสำหรับแต่ละอิเลเมนต์ที่ตั้งอยู่บนรากฐานที่ว่า สมการที่สร้างขึ้นจำเป็นต้องสอดคล้องกับสมการเชิงอนุพันธ์ของปัญหาที่ทำการเกิดระบบสมการชุดใหญ่ ซึ่งในความหมายทางกายภาพก็คล้ายกับการนำทุกอิเลเมนต์มาประกอบความเข้าด้วยกันก่อให้เกิดเป็นรูปร่างลักษณะทั้งหมดของปัญหาที่แท้จริง จากนั้นจึงทำการกำหนดเงื่อนไขขอบเขตที่ให้มาลงในระบบสมการชุดใหญ่นี้แล้ว จึงทำการแก้สมการดังกล่าว ซึ่งจะก่อให้เกิดผลเฉลยโดยประมาณ ณ ตำแหน่งต่าง ๆ ของปัญหานั้น

วิธีการไฟไนต์อิเลเมนต์ประกอบด้วยขั้นตอนใหญ่ๆ ทั้งหมด 6 ขั้นตอน ต่อไปนี้

ขั้นตอนที่ 1 การแบ่งขอบเขตรูปร่างลักษณะของปัญหาที่ต้องการหาผลลัพธ์นั้นออกเป็น อิเลเมนต์ย่อยๆ ดังแสดงในภาพที่ 3.2 ขอบเขตดังกล่าวอาจเป็นขอบเขตของปัญหาชนิดต่างๆกัน เช่นปัญหาความยืดหยุ่นในของแข็ง (Elasticity problem) ปัญหาที่เกี่ยวกับอุณหภูมิและความร้อน (Thermal Problem) รวมทั้งปัญหาของไหล (Fluid problem)

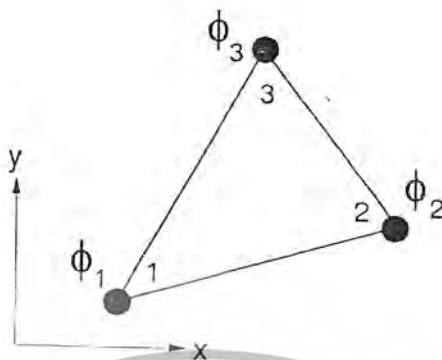


ภาพที่ 3.2 แสดงการแบ่งรูปร่างลักษณะของปัญหาออกเป็นอิเลเมนต์แบบต่างๆ

ขั้นตอนที่ 2 การเลือกฟังก์ชันที่ประมาณภายในอิเลเมนต์ (Element Interpolation Functions) เช่น อิเลเมนต์สามเหลี่ยม ( อิเลเมนต์แบบอย่างดังแสดงในภาพที่ 3.2) อิเลเมนต์ดังกล่าวประกอบด้วย 3 จุดต่อที่มีหมายเลข 1,2,3 ดังแสดงในภาพที่ 3.3 ตัวที่ไม่รู้ค่าที่จุดต่อเหล่านี้ อาจเป็นค่าการยืดตัวหดตัว (Displacement) หรือนำปัญหาความยืดหยุ่นในของแข็ง หรืออาจเป็นค่าอุณหภูมิหากเรานำปัญหาเกี่ยวกับการถ่ายเทความร้อน หรือไม่ก็อาจเป็นความเร็วของของไหลเกี่ยวกับการไหลเป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลักษณะการกระจายของตัวไม่รู้ค่าบนอิลิเมนต์นี้สามารถเขียนให้อยู่ในรูปของฟังก์ชันการประมาณภายในในแต่ละตัวไม่รู้ค่าที่จุดต่อได้ ดังนี้



ภาพที่ 3.3 แสดงอิลิเมนต์สามเหลี่ยมแบบอย่างประกอบด้วยจุดสามจุดต่อ โดยมีค่าไม่รู้ค่าอยู่ ณ ตำแหน่งที่จุดต่อ

โดย  $N_i(x,y), i=1,2,3$  คือ ฟังก์ชันการประมาณภายในอิลิเมนต์ สมการ (3.1) สามารถเขียนให้อยู่ในรูปของเมทริกซ์ ได้ดังนี้คือ

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

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

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

โดย  $[N]$  คือเมทริกซ์ของฟังก์ชันการประมาณภายในอิลิเมนต์ และ  $\{\phi\}$  คือ เวกเตอร์เมทริกซ์ที่ประกอบด้วยตัวไม่รู้ค่าที่จุดต่อของอิลิเมนต์นั้น ในที่นี้ สัญลักษณ์  $[]$  แสดงถึงเมทริกซ์แถวอน (Row Matrix) และ  $\{\}$  แสดงถึงเมทริกซ์แถวตั้ง (Column Matrix)

ขั้นตอนที่ 3 การสร้างสมการอิลิเมนต์(element equations) ดังตัวอย่างเช่นสมการของอิลิเมนต์

สามเหลี่ยมแบบอย่างดังภาพที่ 3.3 จะอยู่ในรูปแบบดังนี้ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

ซึ่งย่อได้เป็น

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

ขั้นตอนที่ 3 นี้ถือว่าเป็นหัวใจสำคัญของวิธีการ ไฟไนต์อิลิเมนต์ การสร้างสมการของอิลิเมนต์ซึ่งอยู่ในรูปแบบของสมการ (3.2) สามารถทำได้โดย

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

ขั้นตอนที่ 4 การนำสมการของแต่ละอิลิเมนต์ที่ได้มาประกอบกัน ก่อให้เกิดระบบสมการพร้อมกันขึ้น (System of Simultaneous Equations) ในรูปแบบดังนี้

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

ขั้นตอนที่ 5 ทำการประยุกต์เงื่อนไขขอบเขต (Boundary Conditions) ลงในสมการ (3.4) แล้วจึงแก้สมการนั้นเพื่อหา  $\{\phi\}_{\text{sys}}$  อันประกอบด้วยตัวไม่รู้ค่าที่จุดต่อ (Notal Unknown) ซึ่งอาจจะเป็นค่าของการเคลื่อนตัว ณ ตำแหน่งต่างๆของโครงสร้าง หรือค่าของ อุณหภูมิที่จุดต่างๆหากเป็นปัญหาที่เกี่ยวข้องกับการถ่ายเทความร้อน หรืออาจเป็นค่าของความเร็วของของไหลหากเป็นปัญหาที่เกี่ยวข้องกับการไหล เป็นต้น

ขั้นตอนที่ 6 เมื่อคำนวณค่าต่างๆที่จุดต่อออกมาได้แล้วก็สามารถทำการหาค่าอื่นๆที่ต้องการทราบต่อไปได้ เช่น เมื่อรู้ค่าการเคลื่อนตัว (Displacement) ณ ตำแหน่งต่างๆของโครงสร้างเราก็สามารถนำไปใช้ในการหาความเครียด (Strain) และความดัน (Stress) ได้ต่อ

จากขั้นตอนทั้ง 6 ขั้นตอนนี้ จะเห็นได้ว่าวิธีการไฟไนต์อิลิเมนต์เป็นวิธีการที่มีระบบแบบแผนเป็นแผนเป็นขั้นเป็นตอน โดยมีหัวใจที่สำคัญคือการสร้างสมการอิลิเมนต์ (ขั้นตอนที่ 3)

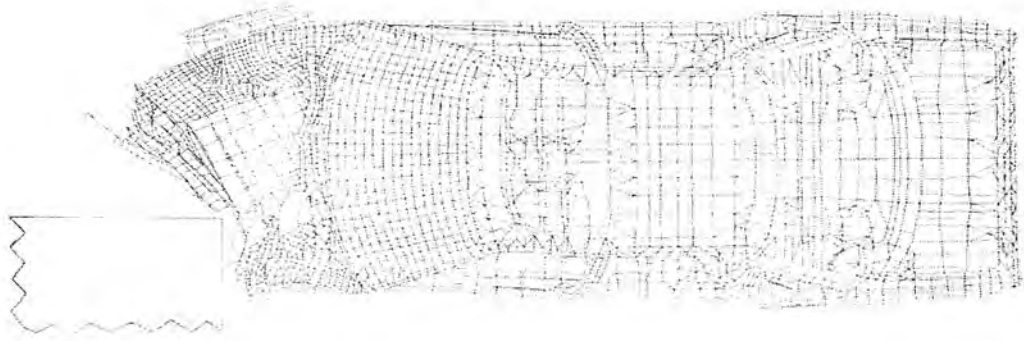
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3 การประยุกต์วิธีการไฟในต้อลิเมนต์

เนื่องจากรูปแบบของชิ้นงานต่างๆ ในทางวิศวกรรมโดยปกติจะมีความซับซ้อน วิธีการไฟในต้อลิเมนต์จึงมีบทบาทเป็นอย่างมากในการช่วยแก้ปัญหาต่างๆ นับตั้งแต่ปัญหาการยึดหยุ่นของของแข็ง การถ่ายเทความร้อนในวัตถุ ตลอดจนการไหลของของไหล ความเข้าใจนี้เองช่วยให้เรามองเห็นภาพรวมและประสิทธิภาพของวิธีการไฟในต้อลิเมนต์ที่สามารถนำไปใช้ประยุกต์กับงานชนิดต่างๆ กันได้หากปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นกับงานชนิดนั้นๆ สามารถอธิบายได้ด้วยสมการเชิงอนุพันธ์ ประสิทธิภาพของการไฟในต้อลิเมนต์ควบคู่ไปกับกับวิวัฒนาการทางคอมพิวเตอร์ทำให้เราสามารถคำนวณหาปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นโดยสะดวกและในขณะเดียวกันช่วยลดค่าใช้จ่ายที่จำเป็นต้องใช้ได้มาก

การแก้ปัญหาด้วยวิธีการไฟในต้อลิเมนต์ในสมัยแรกเริ่มเห็นในทางด้านกลศาสตร์ของแข็ง (Solid Mechanics) และโครงสร้างเป็นส่วนใหญ่ เนื่องจากปรากฏการณ์ต่างที่เกิดขึ้นในทางด้านนี้สามารถทำความเข้าใจได้โดยไม่ยากนักวิวัฒนาการของวิธีการไฟในต้อลิเมนต์ทางด้านของแข็งนี้ในปัจจุบันสามารถนำไปใช้คู่กับเครื่องมือแบบจำลองที่มีรูปร่างซับซ้อน เช่น เพลาคือเหลี่ยม เครื่องยนต์ดังแสดงในรูป การไฟในต้อลิเมนต์แบบสามมิติจำนวนมากที่มีขนาดต่างๆ กัน ประกอบกันขึ้นมา และสามารถจำลองรูปแบบของเพลาดังกล่าวได้อย่างเที่ยงตรงเนื่องจากวิธีการไฟในต้อลิเมนต์สามารถใช้แก้สมการเชิงอนุพันธ์สำหรับปัญหาที่มีรูปร่างลักษณะซับซ้อนได้อย่างมีประสิทธิภาพ

วิธีการไฟในต้อลิเมนต์มีส่วนช่วยเป็นอย่างมากในการศึกษาและออกแบบยานพาหนะเพื่อก่อให้เกิดประสิทธิภาพสูงซึ่งรวมทั้งทั้งความปลอดภัยที่สูงสุด และขณะเดียวกันก็เพื่อช่วยลดค่าใช้จ่ายที่ต้องใช้ในการทดลอง ดังภาพที่ 3.4 แสดงการจำลองแบบไฟในต้อลิเมนต์และการยุบตัวของโครงสร้างรถยนต์ขนาดเกิดการชน การออกแบบโครงสร้างที่เหมาะสมเป็นสิ่งสำคัญต่อความปลอดภัยดังตัวอย่างเช่น กานที่วางตัวตามแนวยาวของตัวรถควรให้เกิดแค่การหดตัวที่สั้นลงในขณะที่เกิดการชน โดยให้มีการโก่งงอขึ้นน้อยที่สุด เป็นต้น การออกแบบด้วยการทดลองเพื่อให้เกิดปรากฏการณ์ที่ต้องการจะสิ้นเปลืองเวลาและค่าใช้จ่ายมากเมื่อเปรียบเทียบกับการออกแบบด้วยการคำนวณซึ่งสามารถทำการเปลี่ยนรูปแบบได้โดยง่ายทำให้ผู้ออกแบบสามารถเปลี่ยนแปลงลักษณะรูปแบบรถได้โดยง่ายและรวดเร็วเพื่อที่จะได้รูปแบบที่จะก่อให้เกิดประสิทธิภาพที่สูงสุดก่อนที่จะนำไปสร้างเป็นแบบจริงเพื่อใช้ในการทดลองและการทำการผลิตต่อไป



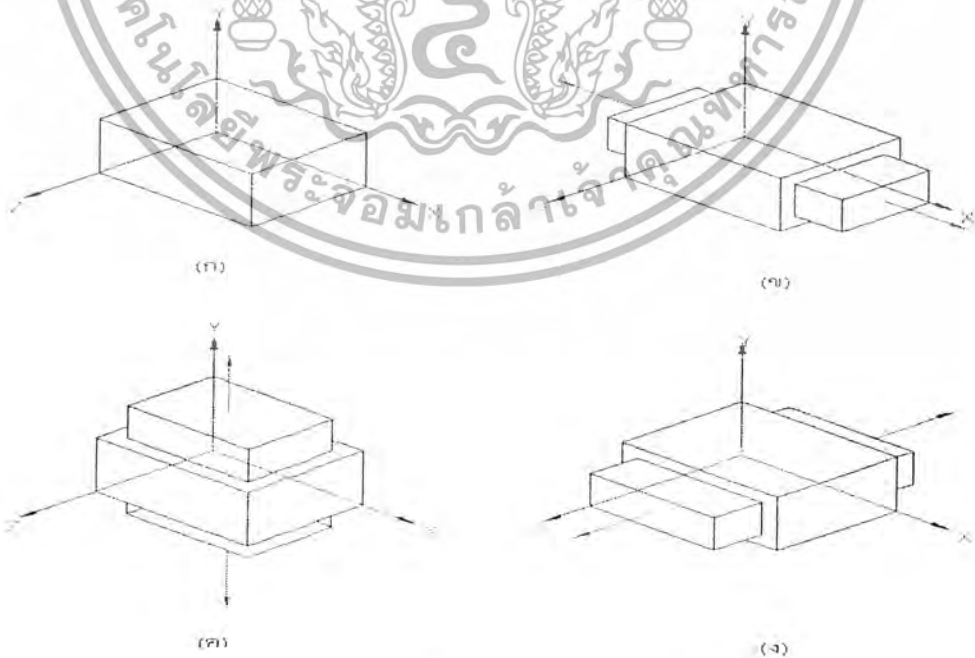
ภาพที่ 3.4 แสดงการประยุกต์วิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ในการคำนวณการขยับตัวของรถในขณะเกิดการชน

### 3.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดในสามมิติ

รูปแบบของอีลิเมนต์สามมิติ ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของวัสดุที่มีพื้นผิวสม่ำเสมอ สามารถหาได้ดังรูป ซึ่งความเค้น ในแกน  $x, y, z$  เป็นอิสระต่อกัน

ขั้นแรกจะพิจารณาการเปลี่ยนแปลงความยาวของอีลิเมนต์ในทิศทาง  $x$  โดยสมมุติ  $\sigma_x$  และ  $\sigma_y$  เท่ากับ 0 เช่นในรูป (ข) ดังนั้นความเครียดในทิศทาง  $x$  คือ

$$\epsilon'_x = \sigma_x / E \tag{3.5}$$



ภาพที่ 3.5 แสดงรูปอีลิเมนต์สามมิติที่มีความเค้นตั้งฉาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่ง  $\varepsilon$  คือ Young's Modulus จากรูป ก ซึ่งมีเฉพาะ  $\sigma_y$  ในทิศทาง  $y(+\sigma_y)$  จะทำให้เกิดความเครียดมีค่าเป็นลบในทิศทาง  $x$  คือ

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

ซึ่งค่า  $V$  คือ Poisson Ratio

ในการทำนองเดียวกันถ้ามีเฉพาะ  $\sigma_z$  กระทำในทิศทาง  $Z$  เช่นในรูป ก ความเครียดในทิศทาง  $X$  ก็คือ

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

ดังนั้นในกรณีที่มีอิทธิพลทั้งสามได้  $\sigma_x, \sigma_y$  และ  $\sigma_z$  เราสามารถหาความเครียดในทิศทาง  $x$  ได้โดยสมการรวม 3.5,3.6,3.7

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

ส่วนความเครียดในทิศทาง  $y$  และ  $z$  ภายใต้ความเค้นเดียวกันที่กล่าวมาแล้วคือ

$$\begin{aligned} \varepsilon_y &= \frac{1}{E}(\sigma_y - V\sigma_x + V\sigma_z) \\ \varepsilon_z &= \frac{1}{E}(\sigma_z - V\sigma_x - V\sigma_y) \end{aligned} \quad (3.9)$$

ในสมการ (3.8),(3.9) ถ้าทราบ  $\varepsilon_x, \varepsilon_y$  และ  $\varepsilon_z$  ก็สามารถหาความเค้น  $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$  ได้คือ

$$\begin{aligned} \sigma_x &= \frac{E}{(1+V)(1-2V)} [\varepsilon_x(1-V) + V\varepsilon_y + V\varepsilon_z] \\ \sigma_y &= \frac{E}{(1+V)(1-2V)} [\varepsilon_x + \varepsilon_y(1-V) + V\varepsilon_z] \\ \sigma_z &= \frac{E}{(1+V)(1-2V)} [V\varepsilon_x + \varepsilon_x(1-V) + \varepsilon_y(1-V)] \end{aligned} \quad (3.10)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการของ ฮุก  $\sigma = \varepsilon E$  ซึ่ง  $\sigma$  คือความเค้นตั้งฉากในทำนองเดียวกับ ความสัมพันธ์ของความเค้นเฉือน  $Z$  และความเครียดเฉือน  $\gamma$  คือ

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

ซึ่ง  $G$  คือมอดูลัสเฉือนนั้นความเครียดเฉือนที่ด้านทั้ง 3 ของอิเลเมนต์ คือ

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

ส่วนความเครียดเฉือนอีกสามด้านตรงข้ามจะมีขนาดเท่ากันแต่ทิศทางตรงกันข้ามถ้าทราบค่า ความเครียดเฉือนทั้งสามก็สามารถหาความเครียดได้คือ

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

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

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

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

เมทริกซ์  $[D]$  จะเป็นเมทริกซ์กำลังสองซึ่งเรียกว่า เมทริกซ์แสดงความสัมพันธ์ ระหว่างความเค้น ความเครียด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

### 3.5 การออกแบบเพื่อรับแรงแบบ STATIC

#### ทฤษฎี

##### จุดความเค้นสูง (Stress Concentration)

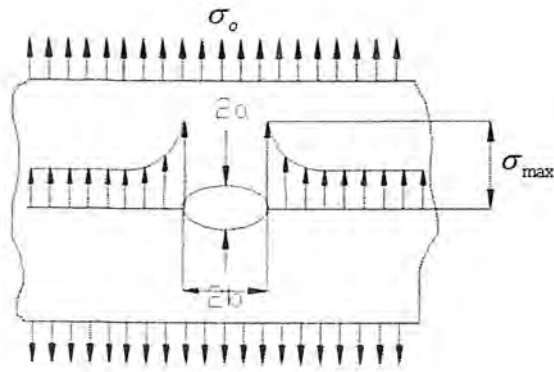
ในการสร้างสมการพื้นฐานของความเค้นไม่ว่าจะเป็น การดึง กด หรือ บิดนั้นได้มีการตั้งสมมติฐานเอาไว้ว่าชิ้นงานที่กำลังพิจารณาอยู่นั้นไม่มีการเปลี่ยนแปลงขนาดหน้าตัดอยู่ แต่ในการออกแบบเครื่องจักรกลนั้นจะต้องมีการเปลี่ยนแปลงขนาดหน้าตัดของชิ้นส่วน ในการเปลี่ยนแปลงขนาดหน้าตัดของชิ้นส่วนจะทำให้การกระจายความเค้นเป็นไปอย่างไม่สม่ำเสมอรอบ ๆ ตำแหน่งที่มีการเปลี่ยนแปลงหน้าตัด ดังนั้นสมการความเค้นพื้นฐานจึงใช้ไม่ได้ในกรณีนี้ จุดที่ไม่ต่อเนื่องต่าง ๆ เหล่านี้เรียกว่า (Stress Riser) และบริเวณนั้นเรียกว่าจุดความเค้นสูง (Stress Concentration)

จุดความเค้นสูงในทางทฤษฎีทางเรขาคณิตใช้ค่า  $K_T$  หรือ  $K_{TS}$  เป็นเครื่องหมายค่าเหล่านี้เขียนเป็น

$$\text{สมการได้ว่า} \quad K_T = \frac{\sigma_{\max}}{\sigma_n} \quad K_{TS} = \frac{\tau_{\max}}{\tau_n} \quad (3.16)$$

##### การหาปัจจัยของความเค้นสูงสุด

การหาค่าปัจจัยของความเค้นสูงสุดสามารถจะคำนวณได้จากรูปร่างทางเรขาคณิตของชิ้นส่วนในรูปเป็นรูปของแผ่นวัสดุขนาดใหญ่ที่ถูกดึงโดยแรงเค้นทางด้านดึงมีค่าเท่ากับ



ภาพที่ 3.6 แสดงการกระจายความเค้นรอบ ๆ รูรูปไข่ภายในวัสดุขนาดใหญ่ที่ถูกดึง

รูรูปไข่ในวัสดุจะมีค่าความเค้นที่ขอบมีค่าเท่ากับ

$$\sigma_{max} = \sigma_0 \left( 1 + \frac{2b}{a} \right) \tag{3.17}$$

ถ้าหากว่า a เท่ากับ b รูรูปไข่ก็จะกลายเป็น วงกลมซึ่งสมการข้างบนจะกลายเป็น

$$\sigma_{max} = 3\sigma_0 \tag{3.18}$$

ดังนั้น  $K_T = 3$  ในตัวอย่างนี้ให้สังเกตว่าแผ่นใหญ่มากและ  $\sigma_0$  คือความเค้นที่เกิดขึ้นในตำแหน่งห่างจากรูรูปไข่มาก ๆ

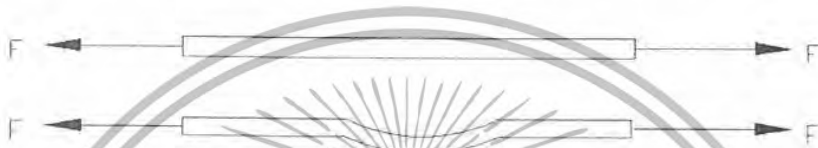
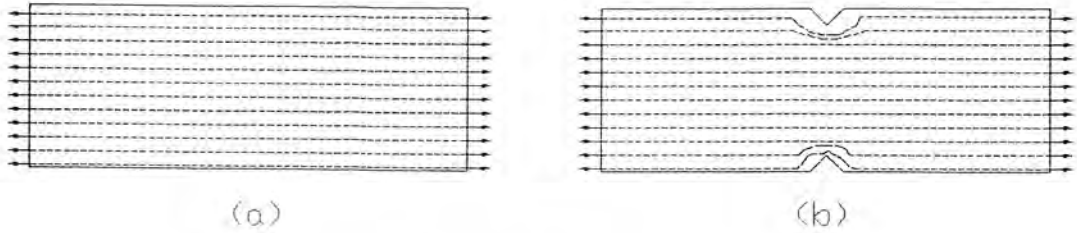
สมการ  $\sigma_{max} = \sigma_0 \left( 1 + \frac{2b}{a} \right)$  สามารถจะใช้ในการหาความเค้นในปลายของรอยแตกซึ่งฉากกับทิศทางของความเค้น (Transverse Crack) โดยทำให้ค่าของ a เล็กมากเมื่อเปรียบเทียบกับ b ในกรณีนี้ค่า  $K_T$  จะเป็นค่าที่ใหญ่มาก ในกรณีที่กลับกันคือรอยแตะนั้นชี้ไปในทิศทางของความเค้น (Longitudinal Crack) ซึ่งค่าของ b น้อยมากเมื่อเทียบกับ a ก็จะทำให้  $K_T$  มีค่าใกล้เคียงกับหนึ่ง

ในการออกแบบผู้ออกแบบควรมีความรู้สึกว่าจุดความเค้นสูงจะเกิดขึ้นที่ตำแหน่งใดได้บ้าง ซึ่งความรู้สึกนี้อาจจะใช้ในการนำไปหาค่า  $K_T$  ได้ ถ้าหากว่าไม่สามารถทำการทดลองได้โดยตรง

การเปรียบเทียบต่อไปนี้อาจจะใช้ในการให้ภาพพจน์เกี่ยวกับความเค้นสูงได้ ภาพที่ 3.7 แสดงให้เห็นแท่งวัสดุที่มีหน้าตัดคองที่ถูกดึงซึ่งเราสามารถสร้างภาพของแรงได้ดังรูป a ในเส้นแรงแต่ละเส้นจะหมายถึงแรงส่วนหนึ่งในวัสดุเมื่อหน้าตัดคองที่ความห่างของเส้นจะเท่ากัน แต่หากเรา

ตัดร่องลงไปในแต่ละรูป b ก็จะทำให้ความเค้นเพิ่มขึ้น ในส่วนที่ไกลออกไปจะมีความห่างของเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เส้นเท่ากัน แต่บริเวณร่องเส้นจะชิดกันเพื่อหลบร่อง ความรุนแรงจะเป็นสัดส่วนกับการบิดตัวของเส้น การอธิบายทำได้คือวิธีโดยดูจากภาพที่3 ซึ่งแสดงให้เห็นเส้นแ่งวัสดุสองเส้นแ่งหนึ่งตรงอีกแ่งคดให้โค้ง ถ้าพิจารณาที่แรงเท่ากันจะเห็นว่าแ่งที่โค้งเปลี่ยนขนาดได้มากกว่าแ่งที่ตรง



ภาพที่ 3.7 แสดงกราฟให้ภาพพจน์เกี่ยวกับความเค้นสูง

การเปรียบเทียบแรงด้วยเส้นนี้สำคัญเนื่องจากว่าเป็นวิธีการมองดูว่าถ้าไม่ถึงได้มีจุดความเค้นสูงเกิดขึ้น

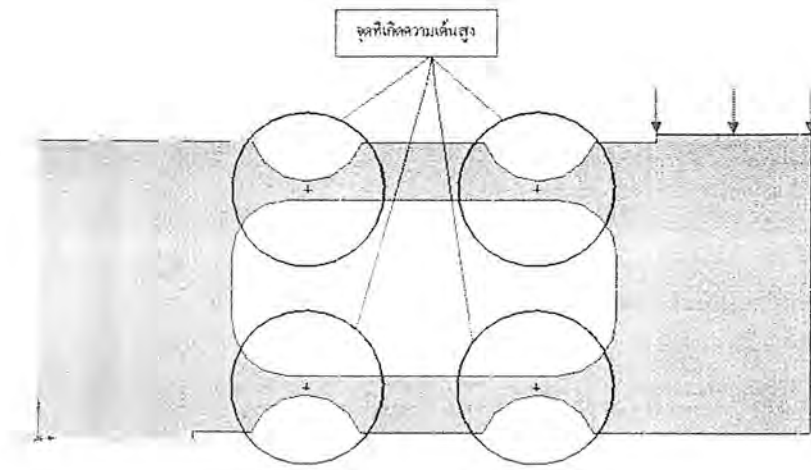
**3.6 การประยุกต์ใช้จุดความเค้นสูงในการออกแบบ DUMMY (โหลดเซล)**

จากความสัมพันธ์ของกฎของฮุก  $\sigma = E\epsilon$  ถ้าเราใช้ความรู้ในเรื่องของจุดความเค้นสูง โดยเรากำหนดจุดที่ติดตั้ง สแตนเกจ ขึ้นบนแล้วออกแบบรูปทรงของจุดที่ติดตั้งเป็นจุดที่มีความเค้นสูงซึ่งจากกฎของฮุกความเค้นที่เกิดขึ้นย่อมจะส่งผลให้ค่าความเครียดที่เกิดบริเวณนั้นมีค่ามากขึ้นเป็นลักษณะแปรผันตรง การที่เราสร้างให้จุดติดตั้ง สแตนเกจ ให้มีความเครียดสูงก็จะส่งผลต่อความไวในการตรวจวัดของ สแตนเกจ มี ค่าสูงขึ้น แต่ในการออกแบบจะต้องระวังไม่ให้ค่าความเครียดสูงเกินจุด YEILD POINT ของวัสดุที่ใช้เพราะจะทำให้เกิดการเสียรูปอย่างถาวร

ภาพที่ 3.8 เป็นตัวDummy ที่ทำการย่อส่วนมาจากที่มีขายจะเห็นได้ว่าในส่วนที่ออกแบบให้เว้าเข้าไปนั้นเป็นจุดที่เกิดความเค้นสูงและก็เป็นจุดที่ผู้ผลิตทำการติดตั้ง สแตนเกจ ไว้ตรงนั้น

จากการศึกษารูปแบบของ โหลดเซล ที่มีขายถ้าเราจะทำการออกแบบเองโดยใช้โปรแกรม COSMOS เป็นตัวช่วยออกแบบเราไม่จำเป็นต้องหาสมการของDUMMY ที่เราจะติดตั้งเพียงแต่ต้องออกแบบให้ DUMMY มีค่าความปลอดภัยตามมาตรฐานและจุดที่จะติดตั้ง สแตนเกจ มีความเครียดมากพอและมีค่าที่เบี่ยงสั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 3.8 แสดงให้เห็นจุดเว้าเข้าไบนั้นเป็นจุดที่เกิดความเค้นสูง

### 3.7 การออกแบบและสร้างโหลดเซลล์เพื่อทำการวัดแรง

การออกแบบโหลดเซลล์ เพื่อที่จะทำการวัดแรงได้อย่างมีประสิทธิภาพนั้น จะต้องนำเอาทฤษฎีทางคณิตศาสตร์ของวีลคมาช่วยในการออกแบบ โดยก่อนจะทำการออกแบบรูปร่างของโหลดเซลล์จะต้องคำนึงถึงว่าแรงที่จะทำการตรวจวัดเกิดขึ้นในลักษณะใด ยกตัวอย่างเช่นต้องการวัดแรงที่เกิดจากการดึง อาจจะใช้โหลดเซลล์ในลักษณะรูปตัว S เพื่อที่จะให้เกิดความเค้นสูงในบริเวณที่เป็นส่วนโค้งหรือหากต้องการวัดแรงที่เกิดจากน้ำหนักหรือแรงกดจะใช้โหลดเซลล์ที่ออกแบบเป็นรูปคาน

การออกแบบโดยใช้ทฤษฎีทางกลศาสตร์อย่างเดียวมาช่วยในการออกแบบจะทำให้รู้เพียงคร่าวๆว่าแรงที่จะเกิดมีมากที่สุดที่ตรงไหน และจุดใดของรูปร่างโหลดเซลล์ที่มีโอกาสจะเกิดความเสียหายมากที่สุด ลักษณะรูปร่างของความเค้นที่เกิดกับโหลดเซลล์จะเป็นเช่นไร เมื่อมีแรงมากระทำสิ่งเหล่านี้ไม่สามารถวิเคราะห์ได้ด้วยทฤษฎีทางกลศาสตร์ทั่วไป และไม่สามารถให้คำตอบเกี่ยวกับปัญหาเหล่านี้ได้ ต้องใช้ทฤษฎีของไฟไนต์อีลิเมนต์มาช่วยในการวิเคราะห์และออกแบบ

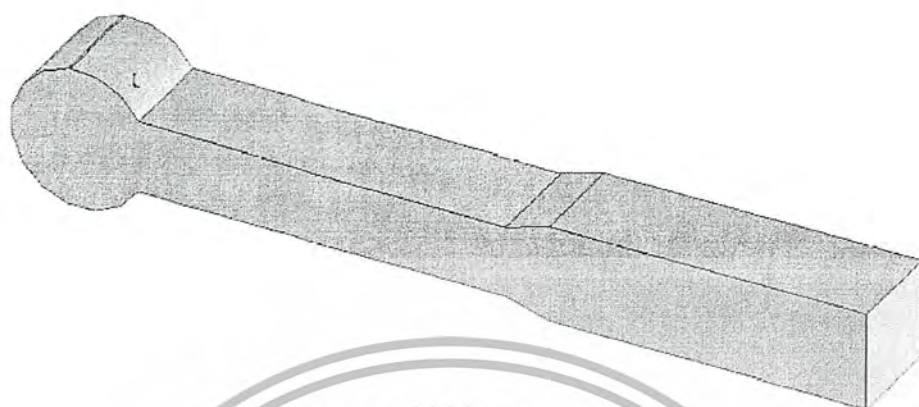
ขั้นแรกของการออกแบบ โหลดเซลล์

สิ่งที่ต้องการวัดก็คือแรงบิดที่เกิดจากการหมุนของ Bolt . screw หรือ เฟลาของ Motor ลักษณะของอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดจะเป็นลักษณะรูปร่างของประแจบล็อกเพื่อใช้ขัน Bolt หรือ Screw ดังรูป

แรงที่เกิดขึ้นจากการหมุนของเฟลาของมอเตอร์หรือแรงที่เกิดจากการขัน Bolt หรือ Screw จะทำให้ประแจได้รับแรง และเกิดความเค้นดังภาพที่ 3.10 และสิ่งที่ต้องการวัดก็คือแรงบิดที่เกิดจากการหมุนซึ่งที่จะทำการตรวจวัดได้โดยโหลดเซลล์ ดังนั้นบริเวณที่จะใส่โหลดเซลล์เข้าไปก็คือบริเวณที่ประแจเกิดความเครียดมากที่สุด จากรูปร่างและทิศทางของความเค้นที่เกิดขึ้นจะเห็นได้ว่า

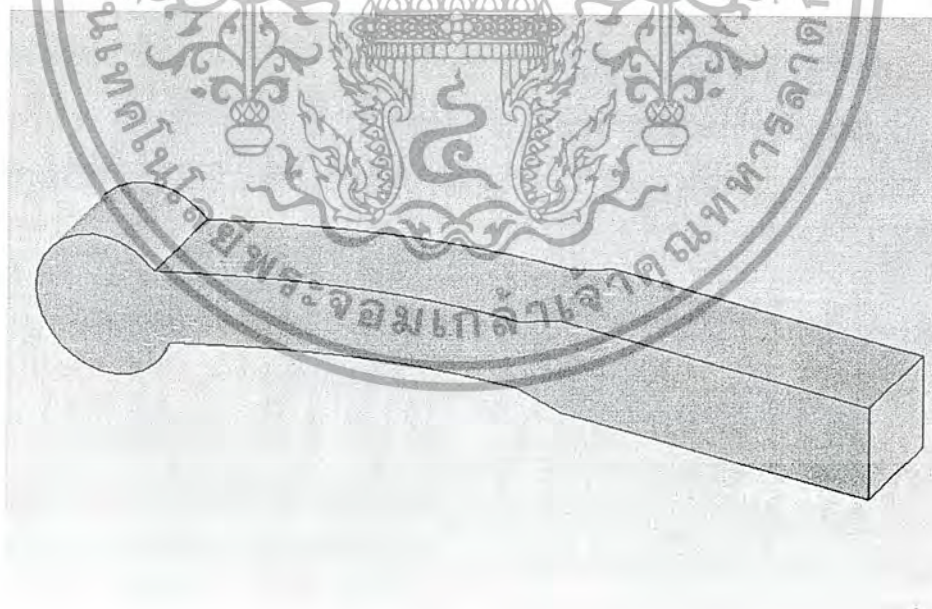
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่วนที่ได้รับแรงเค้นสูงสุดนั้นมีลักษณะในการรับแรงคล้ายกับ โหลดเซลล์ประเภทคานที่ใช้ในการชั่งน้ำหนัก



ภาพที่ 3.9 แสดงรูปร่างของแนวคิดของประแจล็อก

การออกแบบโหลดเซลล์ซึ่งต้องคำนึงถึงก็คือความเค้นสูงสุดที่โหลดเซลล์จะทำการวัดได้โดยหากความเค้นที่เกิดกับ โหลดเซลล์มากเกินไปแล้วจะส่งผลให้โหลดเซลล์เกิดการเสียรูปได้



ภาพที่ 3.10 แสดงทิศทางของแรงที่เกิดบนคาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยถ้าเป็นคานที่มีพื้นที่หน้าตัดคงที่นั้นสามารถที่จะคำนวณหาความเค้นสูงสุดที่จะเกิดกับคานโดยสัดส่วน

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

เมื่อ  $M$  = โมเมนต์ที่หาจากผังโมเมนต์ของคาน

$\sigma$  = แรงความเค้นที่เกิดขึ้น

$I$  = โมเมนต์ความเฉื่อยของ พื้นที่หน้าตัดคาน

$C$  = จุดศูนย์กลางของคาน

การที่จะหาความเค้นที่ยอมรับได้จะต้องหาค่าของ  $M, I$ , และ  $C$

ค่าของ  $M$  หาได้จากผังโมเมนต์คาน  $I$  และ  $C$  หาได้จาก



ภาพที่ 3.11 แสดงคาน

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

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

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

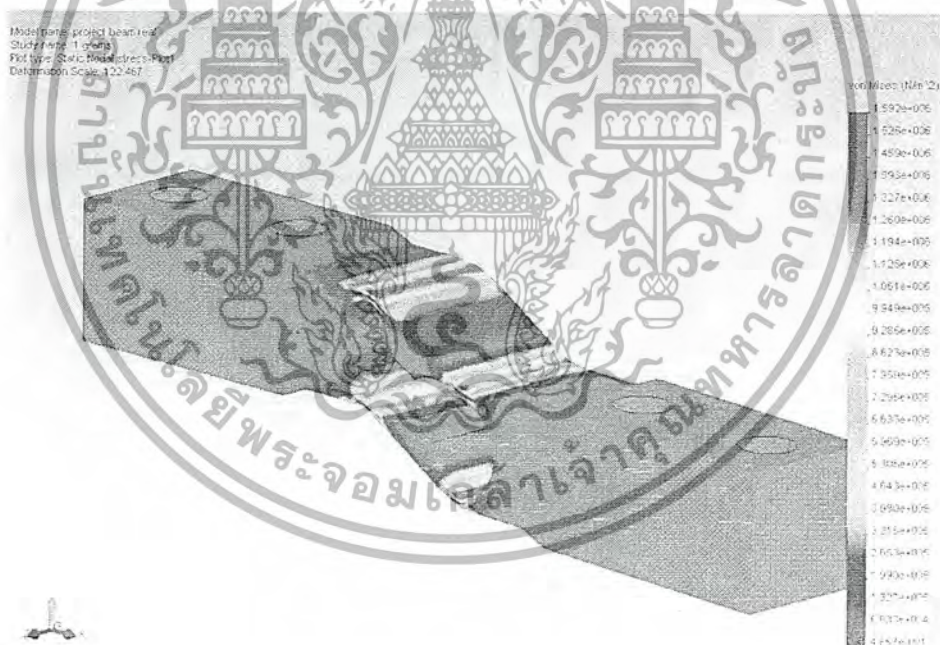
$$= \frac{h^3 b}{12}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เพราะฉะนั้น

$$\begin{aligned}\sigma &= \frac{Mc}{I} = M \frac{h}{2} \left( \frac{12}{h^3 b} \right) \\ &= \frac{\sigma M}{h^2 b}\end{aligned}\quad (3.20)$$

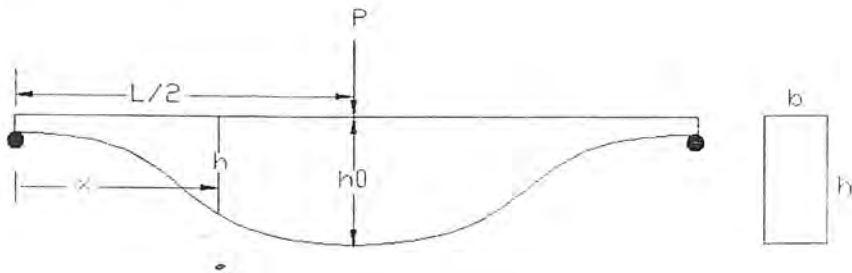
จากสมการข้างต้นจะทำให้รู้ค่าความเค้นสูงสุดที่จะยอมรับได้ ( $\sigma_{\max}$ ) แต่การออกแบบคานให้มีพื้นที่หน้าตัดคงที่นั้นจะทำให้ความเค้นที่เกิดขึ้นกับคานนั้นมีค่าไม่สูงเมื่อเทียบกับปริมาณของวัสดุที่เสียไป ทางแก้ไขคือการออกแบบโหลดเซลให้มีส่วนโค้งเว้าตามทฤษฎีของการเกิดจุดความเค้นสูงซึ่งโหลดเซลที่มีขายตามท้องตลาดจะใช้วิธีนี้ แต่เมื่อนำมาวิเคราะห์ดังรูปจะเห็นได้ว่าจุดความเค้นสูง มีการเกิดบริเวณแคบ ซึ่งเมื่อทำการคิดสแตตเอนเกจไปแล้วจะทำให้สแตตเอนเกจได้รับความเค้นไม่เท่ากันตลอดทั้งแผ่นจะทำให้สแตตเอนเกจได้รับความเค้นบริเวณพื้นที่หน้าตัดเล็กเกิดความเค้นสูงขึ้นมากโดยแสดงให้เห็นในภาพที่ 3.12 ซึ่งจากรูปการแสดงให้เห็นถึงว่าเมื่อมีแรงมากระทำบนโหลดเซลจะเกิดการเปลี่ยนแปลง และเกิดแรงตรงจุดใดบ้าง



ภาพที่ 3.12 แสดงรูปของโหลดเซลเมื่อถูกแรงมากระทำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การที่จะทำให้ทั่วทั้งบริเวณของคานที่จะทำการติดตั้งเสถียรที่มีความเค้นเท่ากันจะต้องให้พื้นที่หน้าตัดของคานเปลี่ยนแปลงได้จากตัวอย่าง



ภาพที่ 3.13 แสดงการกำหนดพื้นที่หน้าตัดเปลี่ยนแปลง

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

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

จากสมการ

$$\sigma = \frac{6M}{h^2b} = \frac{3P}{h^2b}x$$

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

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

เพราะฉะนั้น

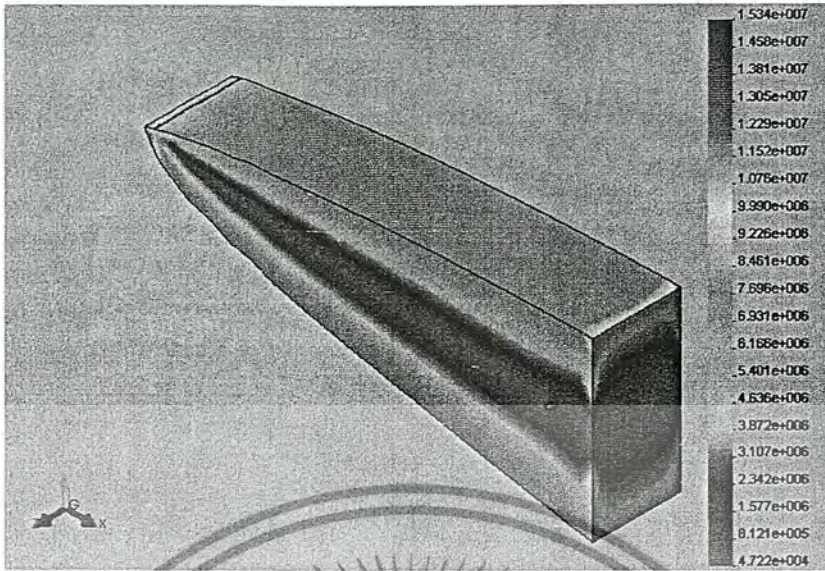
$$h_0^2 = \frac{3PL}{2\sigma_x b}$$

$$x \left( \frac{2h_0^2}{L} \right) = \frac{3Px}{\sigma_x b} = h_0^2 \quad (3.21)$$

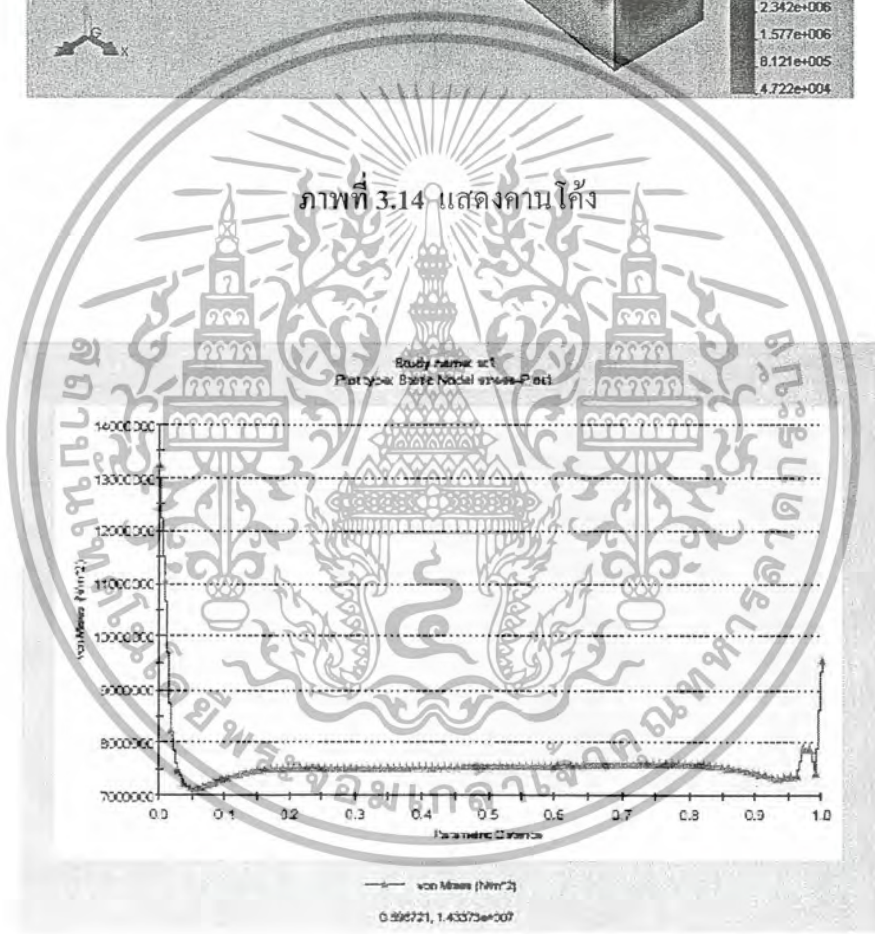
เพราะฉะนั้น

$$h^2 = x \left( \frac{2h_0^2}{L} \right) \quad (3.22)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 3.14 แสดงคานโค้ง

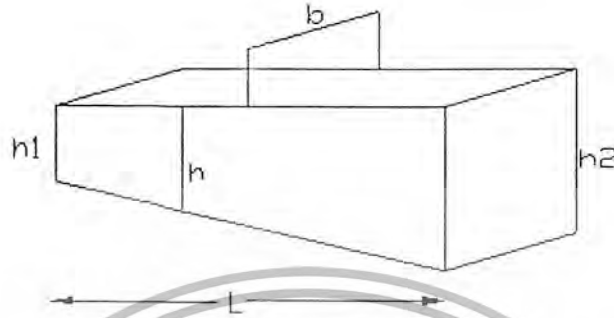


ภาพที่ 3.15 แสดงกราฟความเค้นที่เกิดจากแรงที่มากกระทำที่ปลาย

จากกราฟภาพที่ 3.15 เป็นการแสดงให้เห็นค่าของความเค้นของคานพื้นที่หน้าตัดไม่คงที่ว่ามีค่าความเค้นเกิดขึ้นอย่างสม่ำเสมอ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แต่เนื่องจากว่ารูปร่างที่ได้นี้เป็นส่วนโค้งเว้าซึ่งการที่จะทำการขึ้นรูปโลหะให้เป็นรูปทรง  
เช่นนี้ทำได้ยากดังนั้นโหลดเซลแบบคานที่สามารถที่จะทำการขึ้นรูปได้จริง ๆ แล้ว จะต้องเป็น  
ลักษณะของรูปทรงที่เป็นเส้นตรงดังภาพที่ 3.16



ภาพที่ 3.16 แสดงคานเอียง

การคำนวณหาความเค้นแต่ละจุดสามารถหาได้จากสมการด้านล่าง

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

ให้  $h_2 = kh_1$  ( $k=1, 2, 3, \dots, n$ )

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

จาก

$$\frac{MC}{I} = \frac{6Px}{bh^3}$$

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

$$\sigma = \frac{PL^2}{bhL^2((k-1)x + L)^2} \quad (3.23)$$

การออกแบบโหลดเซลแบบนี้จะทำให้การกระจายตัวของความเค้นมีค่ามาและสามารถขึ้น  
รูปได้จริง แต่ทุกบริเวณจะมีความเค้นที่ไม่เท่ากับการที่จะหาจุดที่ความเค้นมากที่สุดจะหาได้จาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

$$0 = (k-1)x + L - x(k-1)((k-1)x + L)(2) \quad (3.24)$$

เมื่อรู้ทั้งวิธีคิดและขนาดของแรงที่จำทำการวัดแล้วก็จะทำให้ได้รูปร่างของ โหลดเซลล์ที่จะทำการสร้างจากนั้นจึงทำการออกแบบและตรวจสอบว่าสามารถจะรับแรงจากการวัดได้จริงหรือไม่ จากทฤษฎีทำให้ออกแบบได้ตามภาพที่ 3.17

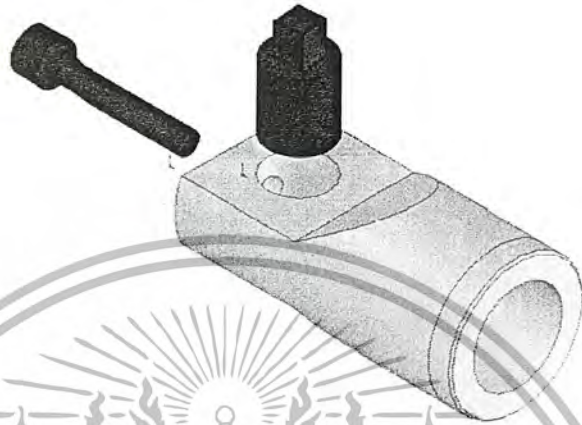


ภาพที่ 3.17 แสดงเป็นรูปร่างที่ออกแบบขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

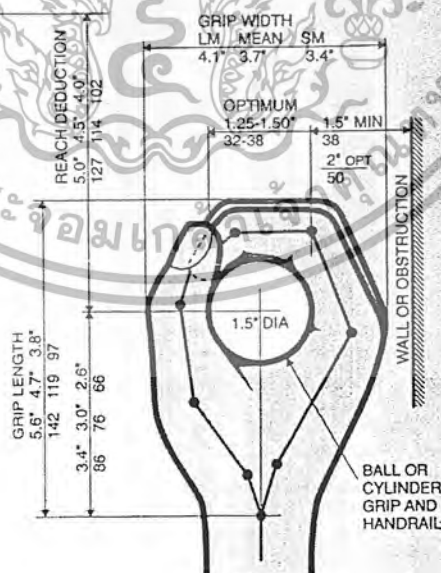
### 3.8 การออกแบบประแจวัดทอร์ค

การออกแบบหัวบล็อกที่ใช้ในการขัน ออกแบบให้เป็นหัวบล็อกที่สามารถเปลี่ยนขนาดของบล็อกที่ใช้ขันได้ลักษณะดังภาพที่ 3.18



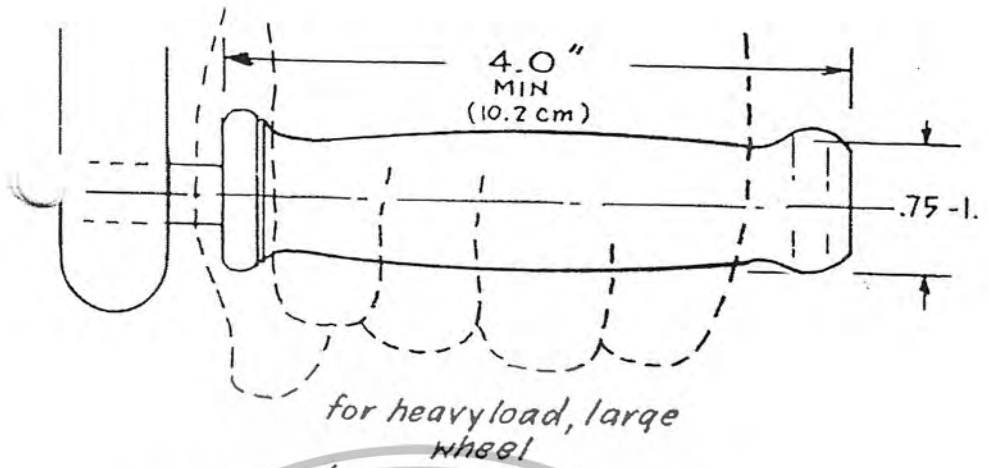
ภาพที่ 3.18 แสดงการออกแบบหัวบล็อกสำหรับขัน

การออกแบบค้ำจับจะ ใช้กำแพกเตอร์ของมือมาช่วยในการออกแบบโดยดูได้จากดังภาพที่ 3.19 และ 3.20



ภาพที่ 3.19 แสดงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่มีจับได้นัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 3.20 แสดงขนาดความยาวที่เหมาะสมกับมือ



ภาพที่ 3.21 แสดงด้ามจับที่ทำการออกแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

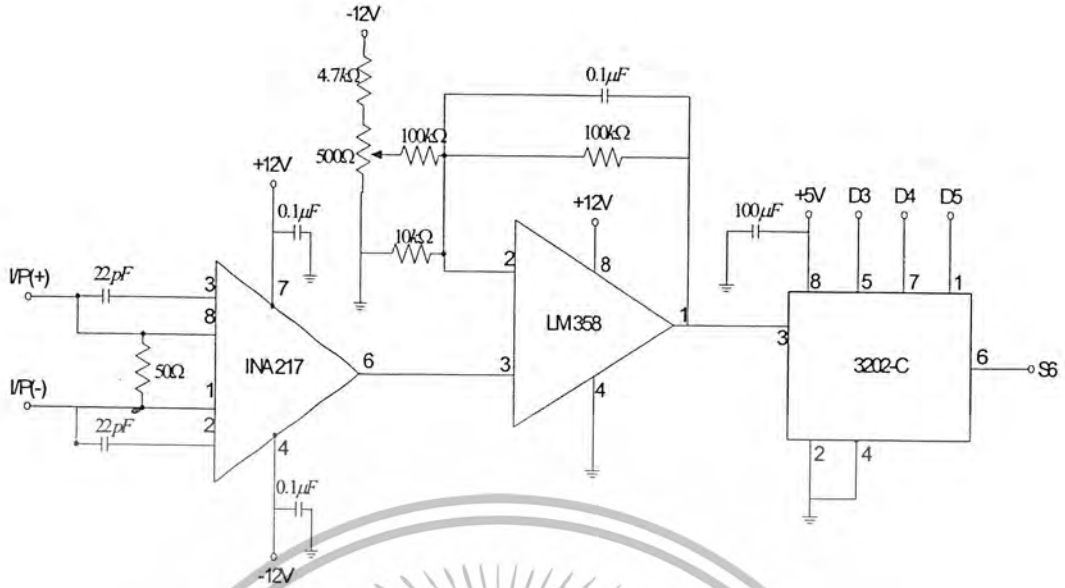


ภาพที่ 3.22 แสดงรูปประแจหรือที่ทำการออกแบบ

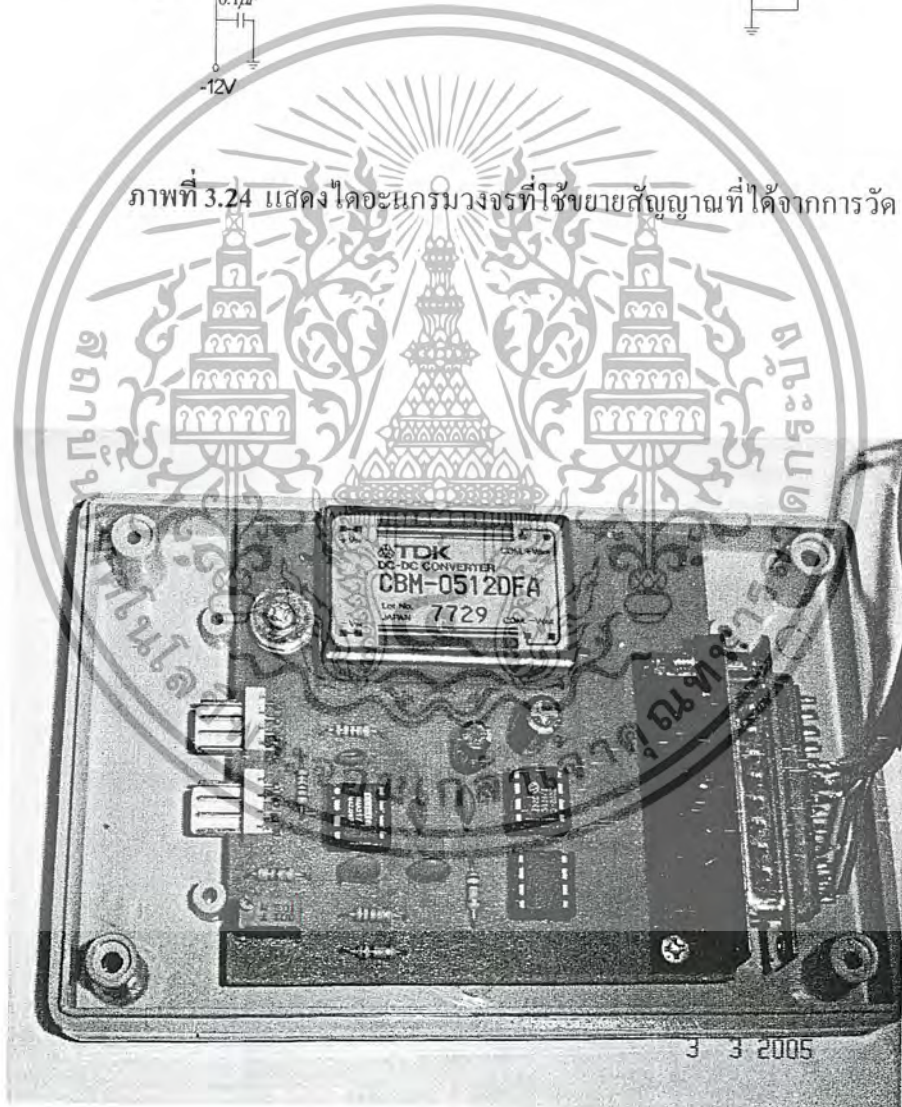


ภาพที่ 3.23 แสดงรูปถ่ายของประแจวัดแรงบิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 3.24 แสดงไดอะแกรมวงจรที่ใช้ขยายสัญญาณที่ได้จากการวัด



ภาพที่ 3.25 แสดงรูปถ่ายวงจรที่ใช้ในการวัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

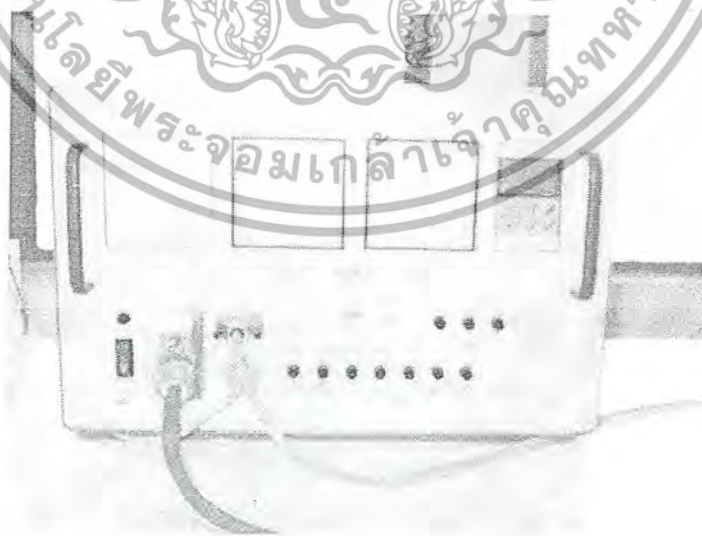
### ผลการทดลอง

#### 4.1 กล่าวนำ

จุดประสงค์ของการทดลองคือ ต้องการที่จะทำการทดลองสอบดูว่า โหลดเซลล์ที่ได้รับการออกแบบและสร้างขึ้นนั้นสามารถที่จะทำการวัดแรงทางกลได้จริงหรือไม่ โดยการทดลองแบ่งเป็น 2 ส่วน โดยส่วนแรกเป็นการทดลองรูปร่างของโหลดเซลล์ และประแจทอร์คที่ทำการออกแบบไว้ โดยใช้โปรแกรมวิเคราะห์ทางด้านไฟไนต์เอลิเมนต์ ส่วนที่ 2 เป็นการทดสอบประแจทอร์คที่ทำการออกแบบไว้โดยใช้โปรแกรมที่วิเคราะห์ทางด้านไฟไนต์เอลิเมนต์ ส่วนที่ 2 เป็นการทดสอบประแจทอร์คที่สร้างขึ้นมาแล้วโดยการทดสอบการชั่งน้ำหนักที่ปลายของประแจทอร์ค และทำการทดสอบวัดแรงบิดที่สร้างขึ้น โดยเจนเนอเรเตอร์

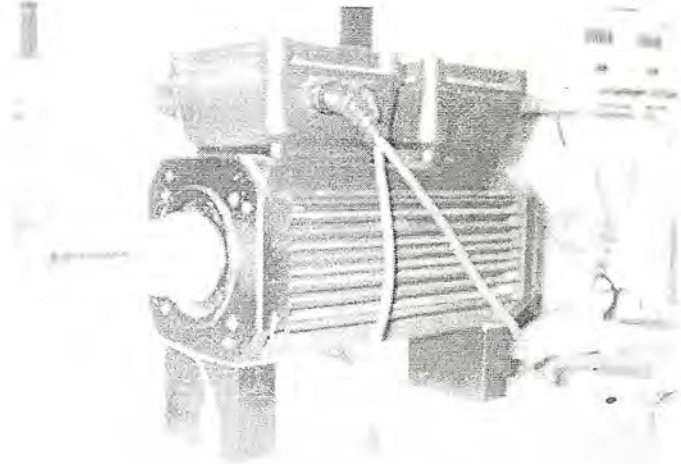
#### 4.2 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

- 1) มัลติมิเตอร์ Fluk 87
- 2) อุปกรณ์ควบคุมเซอร์โวมอเตอร์ ELWE 10 15 000 STEUERGRAT SERVO BRENSE/CONTROL SERVO BREKE
- 3) เจเนอเรเตอร์ LENZE HANS-LENZE-STRABT D-31855 AERZEN



ภาพที่ 4.1 แสดง ELW 10 15 000

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.2 แสดง LENZE HANS-LENZE-STRAßE D-31855 AERZEN

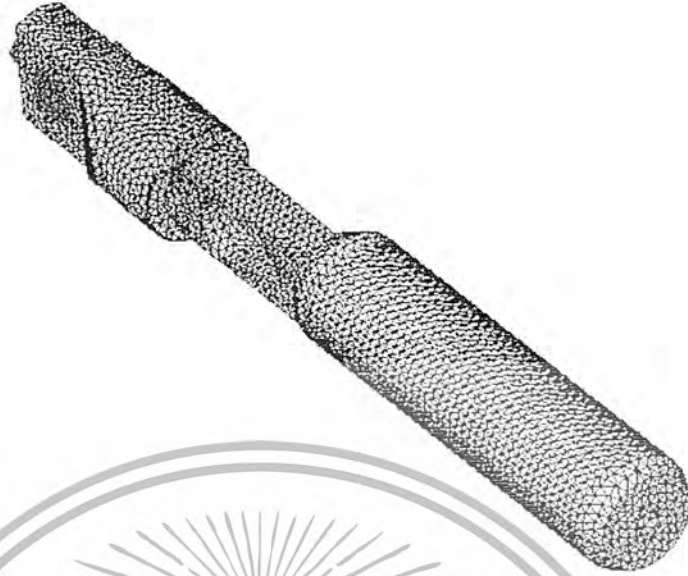
#### 4.3 ขั้นตอนการทดลอง

ส่วนที่ 1 การทดลองโดยใช้โปรแกรมวิเคราะห์ทางไฟในต์อิลิมินต์

- 1) สร้างภาพที่ 3 มิติที่ต้อกาที่จะวิเคราะห์เข้าไปในโปรแกรมที่ทำกรวิเคราะห์
- 2) กำหนด ชนิดของวัสดุให้กับรูปทรง 3 มิติ
- 3) สร้างอิลิมินต์ให้กับรูปทรง 3 มิติ โดยขนาดของอิลิมินต์ข้งเล็กข้งส้งผลต่อความถูกต้องในการวิเคราะห์มากข้งนั้น
- 4) กำหนดรูปแบบของแรงและขนาดที่จะมาลกระทำบนรูปทรง 3 มิติ
- 5) ทำการวิเคราะห์โดยให้โปรแกรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

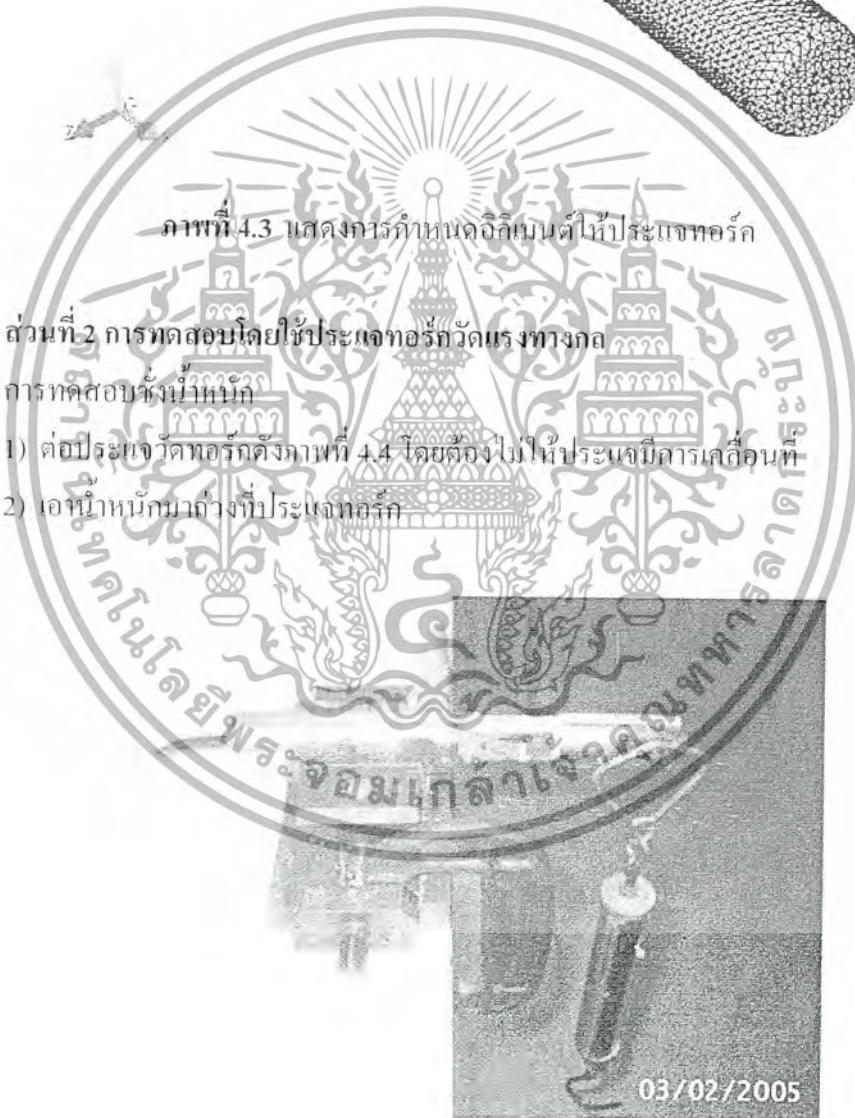
Model name: AssentTee;  
Study name: test;  
Mesh type: Solid mesh



ภาพที่ 4.3 แสดงการกำหนดคอลลีเมนต์ให้ประแจทอรัค

ส่วนที่ 2 การทดสอบโดยใช้ประแจทอรัควัดแรงทางกล  
การทดสอบรับน้ำหนัก

- 1) ต่อประแจวัดทอรัคดังภาพที่ 4.4 โดยต้องไม่ให้ประแจมีการเคลื่อนที่
- 2) เอาน้ำหนักมาวางที่ประแจทอรัค



ภาพที่ 4.4 แสดงการต่ออุปกรณ์เพื่อทำการชั่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### การทดสอบแรงบิด

- 1) ทำการติดตั้งให้กับคอนโทเรลอร์ให้ที่อยู่ในโหมดของการสร้างแรงบิด
- 2) ต่อประแจทอกเข้ากับเจนเนอเรเตอร์ดังภาพที่ 4.5
- 3) ทำการวัดแรงบิดที่ได้จากประแจทอร์ก



ภาพที่ 4.5 แสดงการต่ออุปกรณ์เพื่อวัดแรงบิด

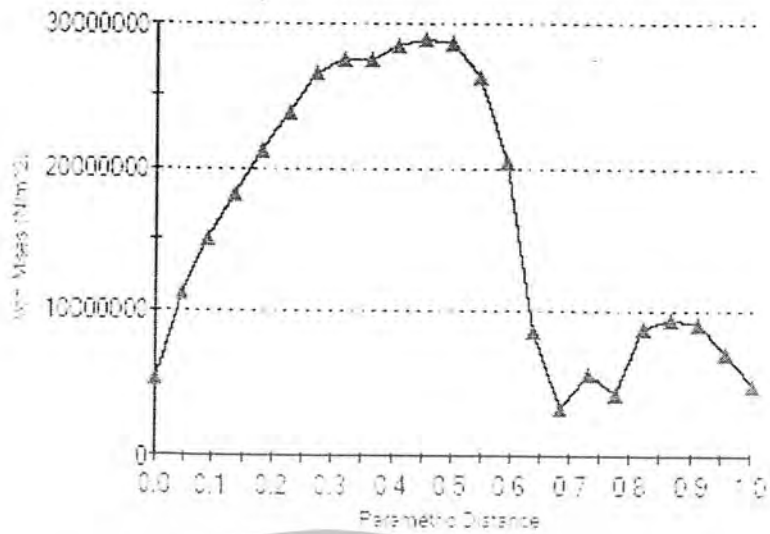
### 4.4 ผลการทดลอง

ส่วนที่ 1 การทดลองโดยใช้โปรแกรมจิกเระทรี ผลการทดลองวิเคราะห์ประแจทอร์กเมื่อให้ประแจทอร์กทำการชั่งน้ำหนัก 10 kg จากข้อมูลในตารางที่ 1 ทำให้รู้ได้ว่าควรติดตั้งเกจที่จุดใด



ภาพที่ 4.6 แสดงความถี่ที่เกิดจากน้ำหนัก 10 kg

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.7 แสดงกราฟแสดงความเค้นที่ตัวโหนดเซล



ภาพที่ 4.8 แสดง Factor of safety ที่ 10 kg

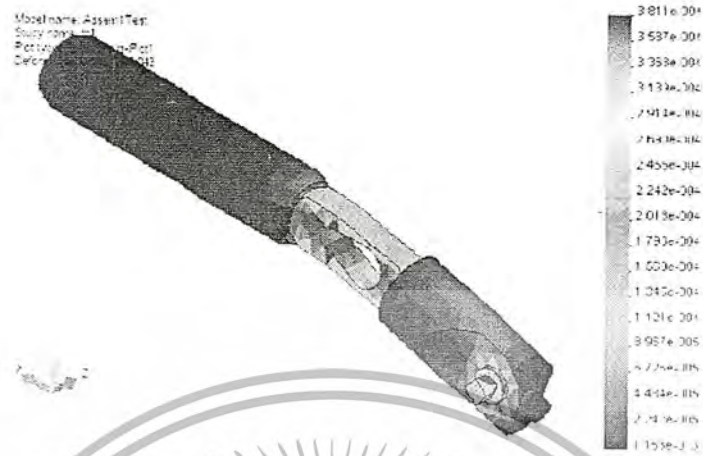
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 ตำแหน่งความเค้นที่เกิดบน โหลดเซลล์

Node	von Mises (N/m <sup>2</sup> )	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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการวิเคราะห์ประแจทอร์ค เมื่อให้ประแจทอร์คทำการวัดแรงบิดที่ 4 N-m

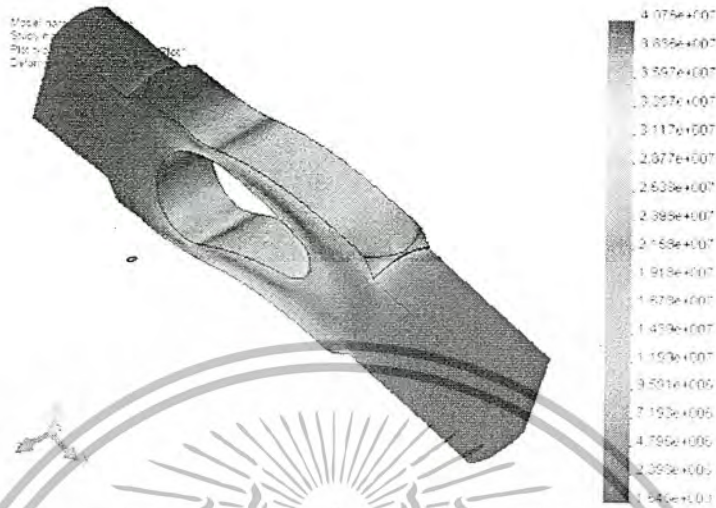


ภาพที่ 4.9 แสดงความเครียดที่เกิดจากแรงบิด 4 N-m



ภาพที่ 4.10 แสดง Factor of safety ที่ 4 N-m

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.11 แสดงการวิเคราะห์แรง โหลดเซลล์ที่ 10 kg



ภาพที่ 4.12 แสดงFactor of safety โหลดเซลล์ที่ 10 kg

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2 แสดงค่าความเค้นที่โหนดเซลล์

Node	von Mises (N/m <sup>2</sup> )	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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

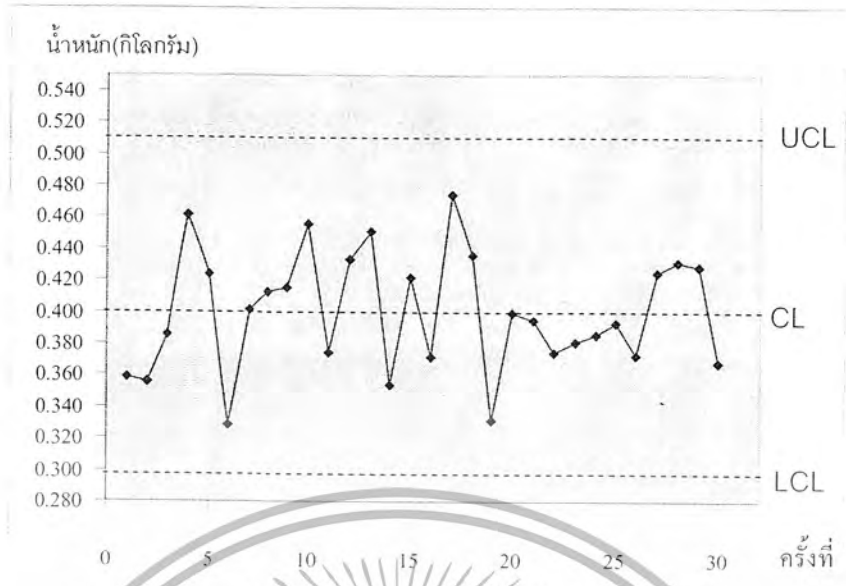
1443	8.70E+06	28.905	10.5	6
1442	5.60E+06	27.632	10.5	6
1441	3.50E+06	26.358	10.5	6
1440	1.67E+06	25.085	10.5	6
1439	7.77E+05	23.812	10.5	6
1438	3.46E+05	22.539	10.5	6
1437	4.26E+05	21.266	10.5	6
1436	4.50E+05	19.992	10.5	6
536	1.90E+05	18.719	10.5	6

ส่วนที่ 2 ผลการทดลอง ใช้ประแจอรรถทำถารซ่งน้ำหนัก



ภาพที่ 4.13 แสดงกราฟการทดลองซ่งที่ 200 กรัม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

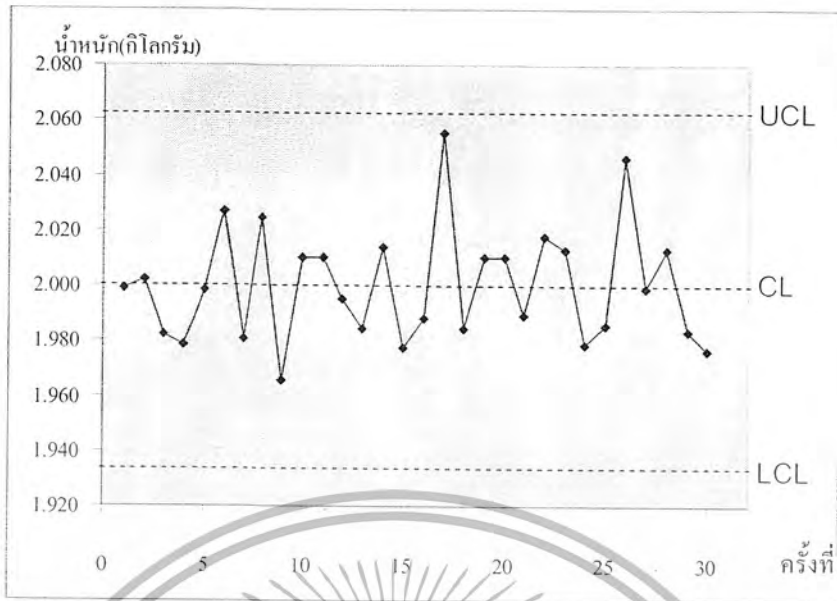


ภาพที่ 4.14 แสดงกราฟการทดลองครั้งที่ 400 กรัม



ภาพที่ 4.15 แสดงกราฟการทดลองครั้งที่ 1 กิโลกรัม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

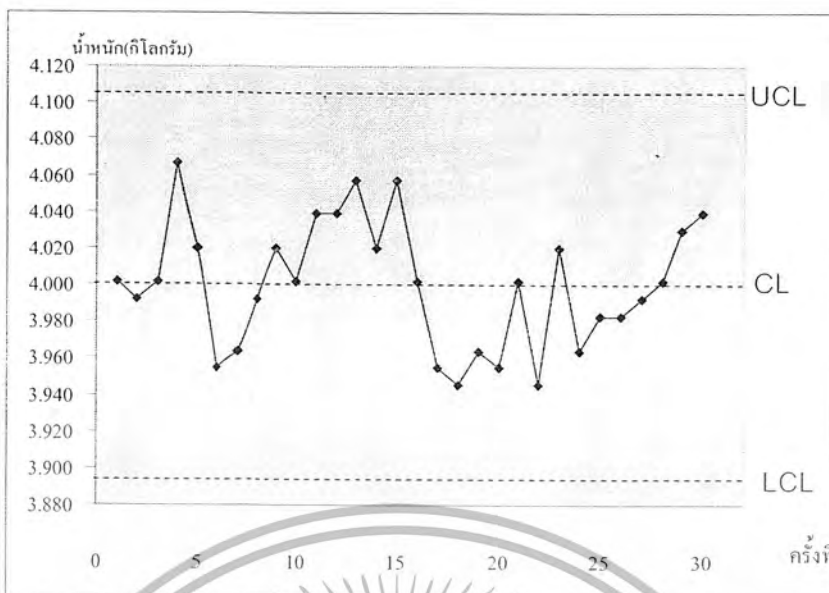


ภาพที่ 4.16 แสดงกราฟการทดลองครั้งที่ 2 กิโลกรัม



ภาพที่ 4.17 แสดงกราฟการทดลองครั้งที่ 3 กิโลกรัม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

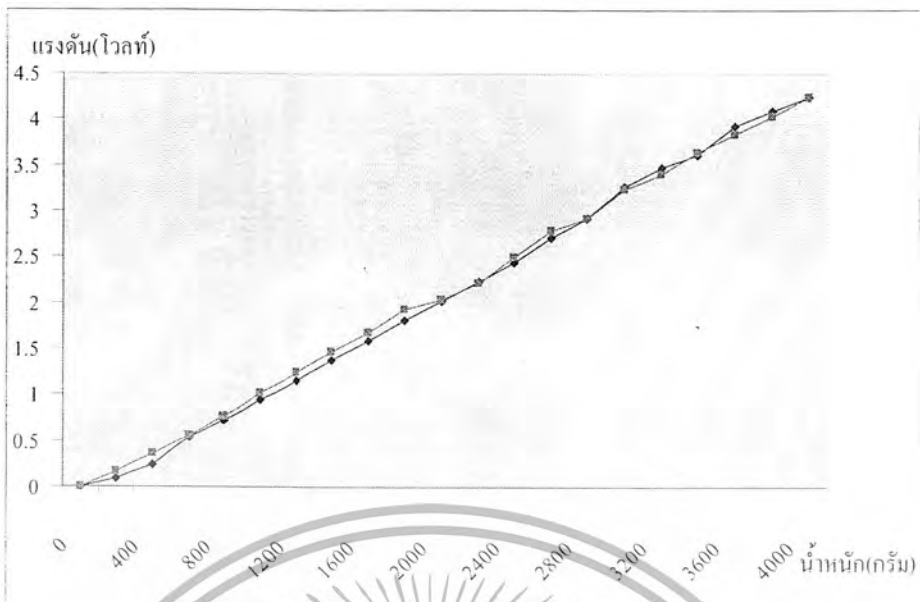


ภาพที่ 4.18 แสดงกราฟการทดลองซึ่งที่ 4 กิโลกรัม



ภาพที่ 4.19 แสดงกราฟการทดลองซึ่งน้ำหนักแบบต่อเนื่อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



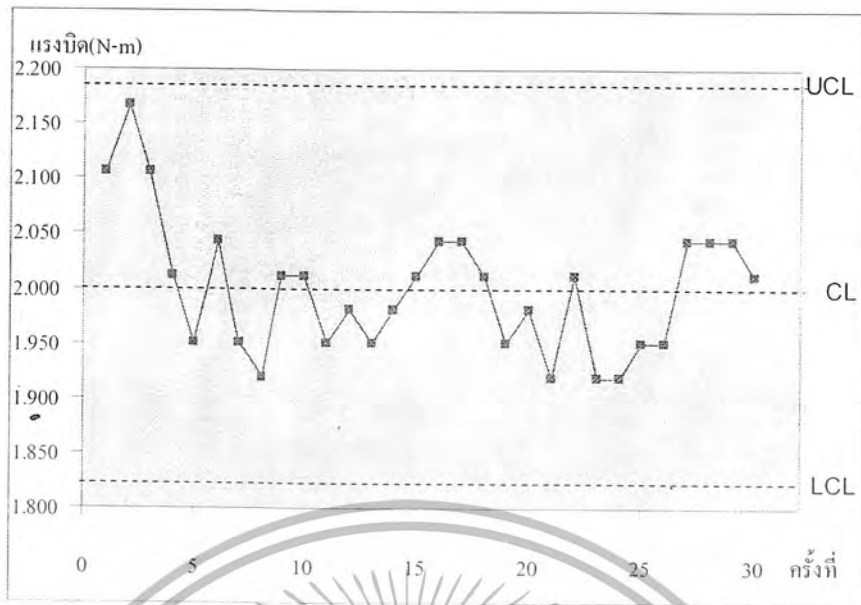
ภาพที่ 4.20 แสดงกราฟการทดลองห้้น้ำหนักแบบต่อเนื่อง

ผลการทดลองใช้ประแจทอร์ควัดแรงบิด



ภาพที่ 4.21 แสดงกราฟการทดลองวัดแรงบิดที่ 1 N-m

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

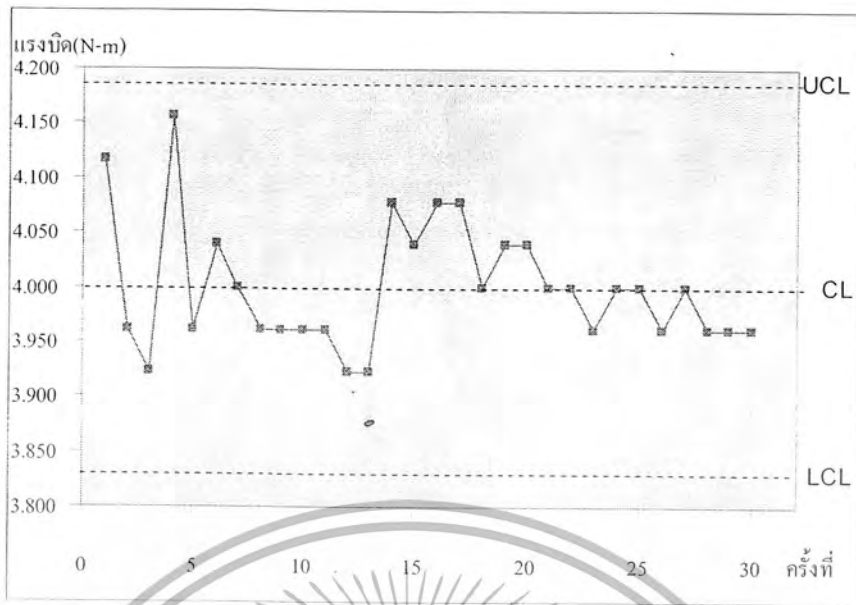


ภาพที่ 4.22 แสดงกราฟการทดลองวัดแรงบิดที่ 2 N-m



ภาพที่ 4.23 แสดงกราฟการทดลองวัดแรงบิดที่ 3 N-m

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

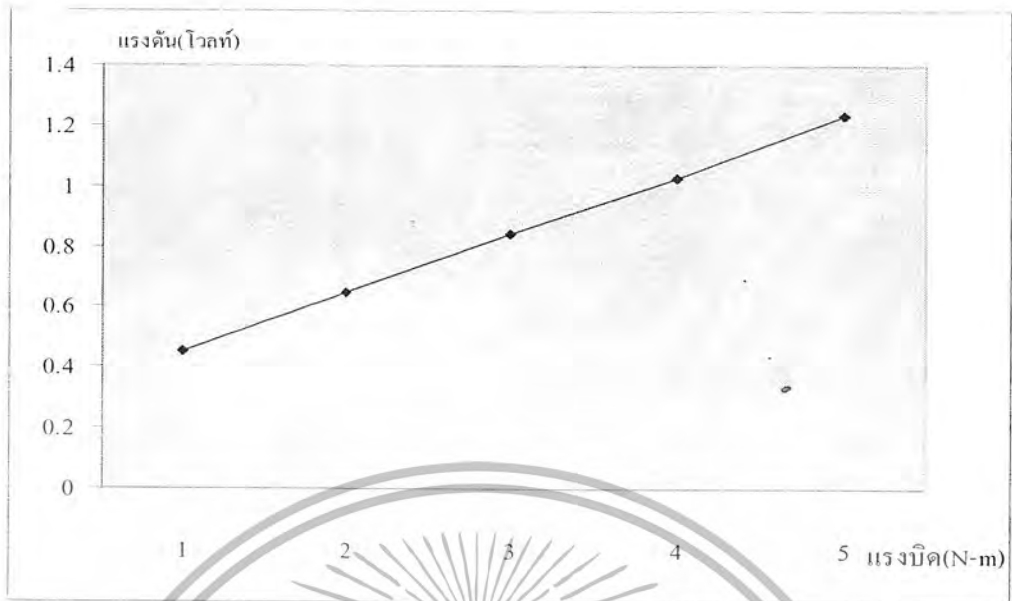


ภาพที่ 4.24 แสดงกราฟการทดลองวัดแรงบิดที่ 4 N-m



ภาพที่ 4.25 แสดงกราฟการทดลองวัดแรงบิดที่ 5 N-m

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.26 แสดงกราฟค่าเฉลี่ยของการวัดแรงบิด

#### 4. สรุปผลการทดลอง

จากผลการทดลองวิเคราะห์โดยใช้โปรแกรมวิเคราะห์ทางด้านไฟไนต์อีลิเมนต์จะทำให้สามารถกำหนดจุดที่จะทำการติดตั้ง สวมรอยได้ว่าจะใช้โหนดโหนดที่มีความเหมาะสมที่สุดในการติดตั้ง อีกทั้งยังช่วยตรวจสอบว่าโหนดเซลล์มีส่วนไหนที่อาจเกิดความเสียหายหากมีแรงมากระทำเกินกว่าที่ออกแบบไว้ การทดลองนี้ประจําเทอร์กัมาวัดแรงทางกล จากผลของการวัดจะเห็นได้ว่าในช่วงน้ำหนักหรือแรงบิดที่ค่าหนึ่งการทดลองนั้น ผลตอบสนองของโหนดเซลล์ค่อนข้างที่จะเป็นเชิงเส้นดี และมีช่วงการกระจายของผลการทดลองอยู่ในช่วง  $\pm 3\%$

## บรรณานุกรม

1. R.C.HIBBELLER เขียน, รศ.ดร.บุตริฉัตร ฉัตรวีระ, วทัญญพ เดชพันธ์ “กลศาสตร์วัสดุ เล่ม2 (Mechanics of Materials)” พิมพ์ครั้งที่ 1 ,กรุงเทพ บริษัทเพียร์สัน เอ็ดดูเคชั่น อินโดไชน่า จำกัด ,2545
2. รศ.ดร. ปราโมทย์ เดชะอำไพ “ไฟไนต์เอลิเมนต์ในทางวิศวกรรม”,พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพ, โรงพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย 2537
3. สมศักดิ์ กิริติวุฒิสเรชญ์ “หลักเครื่องมือวัดในทางอุตสาหกรรม”,พิมพ์ครั้งที่ 14 .กรุงเทพ,สมาคมส่งเสริม เทคโนโลยี(ไทย-ญี่ปุ่น)
4. ตะวัน สุจริตกุล “ เอกสารประกอบการสอน วิชา การออกแบบเครื่องจักรกล 1 “,ภาควิชา เครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ,2528
5. “คู่มือการสอบเทียบเครื่องมือวัดทางอุตสาหกรรม “,พิมพ์ครั้งที่ 1 ,กรุงเทพ,สมาคมส่งเสริม เทคโนโลยี(ไทย-ญี่ปุ่น)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้