สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การออกแบบและสร้างโหลดเซลล์

Design and Fabrication of Load cells

โดย

นายสมชาย กุลเสวกวิบูลย์

นายสุรชัย อัศวชัยสิทธิกูล

นายสมคิด เอกพานิช

อาจารย์ที่ปรึกษา

ดร. อุนนัต พิณโสภณ

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน 61847
วัน,เดือน,ปี 21 ก.ค. 2549

b. 11580616
i.

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาตรีวิศวกรรมศาสตร์บัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2547

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์ปีการศึกษา 2547

ภาควิชา วิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การออกแบบและสร้างโหลดเซลล์

Design and Fabrication of Load cells

ผู้จัดทำ

1. นายสมชาย กุลเสวกวิบูลย์ รหัส 45015434
2. นายสุรชัย อัศวชัยสิทธิกุล รหัส 45015442
3. นายสมคิด เอกพานิช รหัส 45015481

อาจารย์ที่ปรึกษา

(ดร. อุนนัต พิณโสภณ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การออกแบบและสร้างโหลดเซลล์

นายสมชาย กุลเสวกวิบูลย์ 45015434
นายสุรชัย อัศวชัยสิทธิกุล 45015442
นายสมคิด เอกพานิช 45015481
ดร.อุนนัติ พิณโสภณ อาจารย์ที่ปรึกษา

บทคัดย่อ

โครงงานนี้เป็นการศึกษาการออกแบบและสร้างโหลดเซลล์ โหลดเซลล์ถูกออกแบบให้รับภาระได้ 50 kg และ 200kg และเป็นโหลดเซลล์ชนิด web type โหลดเซลล์ถูกออกแบบโดยใช้โปรแกรมทางไฟไนเอลิเมนต์ ต้นทุนในการสร้างโหลดเซลล์จะมีราคาถูกในระดับพันบาท

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Design and Fabrication of Load cells

Somchai Kunsawekviboon
Surachai Assavachaisittikul
Somkid Akpanis
Dr. Unnut Pinsopon

Abstract

This project present the design and fabrication of load cell . The load cell is of the web type , and is designed to accept the maximum load of 50 kg and 200 kg . It is designed with the use of finite element soft ware . The load cell would be low coasted about a few thousands bath.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงได้ก็เพราะได้รับความช่วยเหลือ และให้การสนับสนุนจากหลายๆ ฝ่ายด้วยกัน บุคคลแรกที่ต้องกล่าวถึงเพราะเป็นส่วนสำคัญที่ทำให้ปริญญานิพนธ์นี้สำเร็จลงได้ก็คือ ดร. อุนนัต พิณโสภณ อาจารย์ที่ปรึกษาปริญญานิพนธ์ที่ให้ความเอาใจใส่ แนะนำ ช่วยเหลือและให้คำปรึกษาที่ดีเสมอมาซึ่งต้องขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบคุณ ดร. มนต์ศักดิ์ พิมสาร ที่ให้คำปรึกษาด้านการใช้โปรแกรม abaqus และขอขอบคุณคณาจารย์ทุกท่านที่ช่วยให้คำปรึกษาจนได้ผลงานที่มีคุณภาพ ขอขอบคุณ ลุงมณฑา เทียมเมือง ที่ให้ความช่วยเหลือทางด้านอุปกรณ์และการปฏิบัติงานในการทำปริญญานิพนธ์ครั้งนี้

นายสมชาย กุลเสวกวิบูลย์

นายสุรชัย อัศวชัยสิทธิกุล

นายสมคิด เอกพานิช

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

		หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย		I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ		II
กิตติกรรมประกาศ		III
สารบัญ		IV
สารบัญรูป		V
สารบัญตาราง		VII
บทที่ 1	บทนำ	1
	1.1 ความสำคัญและที่มา	1
	1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	1
	1.3 ขอบเขตงานวิจัย	1
	1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	1
	1.5 วิธีการดำเนินงาน	2
บทที่ 2	ทฤษฎีทรานส์ดิวเซอร์	3
	2.1.1 ทรานส์ดิวเซอร์แรง	3
	2.1.2 ชิ้นส่วนยืดหยุ่นสำหรับวัดแรง	3
	2.1.3 โหลดเซลล์แบบลิงค์	6
	2.1.4 โหลดเซลล์แบบคาน	8
	2.1.5 โหลดเซลล์แบบวงแหวน	9
	2.1.6 โหลดเซลล์ชนิดเชียร์ – เวบ	11
	2.2 การโก่งของคาน	12
	2.2.1 การหาระยะโก่งของคานด้วยวิธี อินทิกัล 2 ครั้ง	12
	2.2.2 การหาระยะโก่งงอคานด้วยวิธีพื้นที่-โมเมนต์	13
	2.2.3 การโก่งของคานปลายยื่น	18
	2.2.4 การโก่งในคานที่มีจุดรองรับอย่างง่าย	18
	2.2.5 การหาระยะโก่งด้วยวิธีซุปเปอร์โพซิชั่น	19
	2.3 สเตรนเกจชนิดความต้านทาน	22
	2.3.1 สเตรนเกจแบบกัดขึ้นรอยแผ่นโลหะบาง	22
	2.3.2 การติดตั้งสเตรนเกจ	23
	2.4 วงจรปรับแต่งสัญญาณวีตสโตนบริดจ์	25
บทที่ 3	การคำนวณและการออกแบบ	31
	3.1 การออกแบบขั้นพื้นฐาน	31
	3.2 การออกแบบพื้นฐานโดยใช้ทฤษฎีการออกแบบ	32

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

	3.2.1 การคำนวณ	32
	3.3 การวิเคราะห์ Loadcell โดยใช้โปรแกรม Abaqus	33
บทที่ 4	แบบและวิธีการสร้าง	40
	4.1 หลักการทำงาน	40
	4.2 การใช้งาน	40
	4.3 การประยุกต์นำโหลดเซลล์ไปใช้งาน	41
บทที่ 5	สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง	44
	5.1 สรุป	44
	5.2 วิจารณ์ผลการทดลอง	45
ภาคผนวก ก.	วงจรวีตสโตนบริดจ์	46
ภาคผนวก ข.	วงจรแหล่งจ่าย	47
ภาคผนวก ค.	รายละเอียดโปรแกรมเครื่องกัด CNC	48
ภาคผนวก ง.	รายละเอียดโปรแกรมเครื่องชั่ง	52
บรรณานุกรม		54

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 สปริง	3
รูปที่ 2.2 แท่งวัสดุ	4
รูปที่ 2.3 คานยื่น	4
รูปที่ 2.4 วงแหวน	5
รูปที่ 2.5โหลดเซลล์แบบลิงค์	6
รูปที่ 2.6 คาน	8
รูปที่ 2.7 โหลดเซลล์แบบวงแหวน	10
รูปที่ 2.8 โหลดเซลล์แบบเชียร์- เวบ	11
รูปที่ 2.9 แสดงการโก่งของคานที่เกิดจากภาระภายนอกกระทำ	12
รูปที่ 2.10 แสดงภาระกระทำต่อคาน	14
รูปที่ 2.11 แสดงการเขียน $t_{A/B}$ และ $t_{B/A}$	15
รูปที่ 2.12 แสดงเครื่องหมายของ Deviation	16
รูปที่ 2.13 แสดงไดอะแกรมโมเมนต์	17
รูปที่ 2.14แสดงการหาค่าระยะโก่งโดยใช้หลักการ Tangential Deviation	18
รูปที่ 2.15 แสดงการติดตั้งสเตรนเกจ	23
รูปที่ 2.16 แสดงการจัดสเตรนเกจ 4 แบบ ในวงจรวีตสโตนบริดจ์	25
รูปที่ 2.17 การจัดบริดจ์โดยใช้สเตรนเกจรับรู้ความเครียด 2 ตัว	29
รูปที่ 3.1 แสดงโครงสร้างภายใน	31
รูปที่ 3.2 แสดงแขนรับน้ำหนักเป็น Cantilevered Beam	32
รูปที่ 3.3 แสดงโหลดเซลล์ที่ออกแบบ	33
รูปที่ 3.4 แสดงประกอบ PART	34
รูปที่ 3.5 แสดงการกำหนดบริเวณจุดยึด	35
รูปที่ 3.6 แสดงการตี Mesh	36
รูปที่ 3.7แสดงความเค้นที่เกิดในคานโหลดเซลล์ขนาด 50 kg	37
รูปที่ 3.8 แสดงระยะการยุบตัวของคานโหลดเซลล์ขนาด 50 kg	37
รูปที่ 3.9 แสดงความเค้นที่เกิดตามแนวแกนโหลดเซลล์ขนาด 50 kg	38
รูปที่ 3.10 แสดงความเค้นที่เกิดในคานโหลดเซลล์ขนาด 200 kg	38
รูปที่ 3.11 แสดงระยะการยุบตัวของคานโหลดเซลล์ขนาด 200 kg	39
รูปที่ 3.12 แสดงความเค้นที่เกิดตามแนวแกนโหลดเซลล์ขนาด 200 kg	39
รูปที่ 4.1 ตัวโหลดเซลล์ที่ได้สร้างและออกแบบขึ้นใช้งานจริง	40

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.2 แสดงตำแหน่งการวางโหลดเซลล์ 41
รูปที่ 4.3แรงปฏิกิริยาที่เกิดที่โหลดเซลล์ 4 ตัว 42
รูปที่4.4 แสดงขั้นตอนการทำงานของโปรแกรม 42
รูปที่ 5.1 กราฟแสดงการเปรียบเทียบขณะเพิ่มและลดโหลดของโหลดเซลล์ 200 kg 44
รูปที่ 5.2 กราฟแสดงการเปรียบเทียบขณะเพิ่มและลดโหลดของโหลดเซลล์ 50 kg ทั้ง 4 ตัว 44

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 3.1แสดงค่าพื้นที่ของไดอะแกรมโมเมนต์ และค่า $\bar{x}$ ของภาระที่กระทำกับคานปลายยื่น	19
ตารางที่ 3.2 แสดงค่าพื้นที่ ประเภทของภาระ โมเมนต์สูงสุด ความลาดชันที่ปลาย สมการระยะโก่ง ระยะโก่งสูงสุด	21
ตารางที่ 5.1แสดงคุณสมบัติของโหลดเซลล์แต่ละตัว	45

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่1
บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มา

ในปัจจุบันโหลดเซลล์ (Load cell) เป็นอุปกรณ์พื้นฐานที่ใช้ในการวัดขนาดของแรง และน้ำหนักที่มีการนำมาใช้กันในอุตสาหกรรมต่างๆอย่างแพร่หลายและในสถาบันการศึกษา แต่ราคาของโหลดเซลล์ที่มีจำหน่ายในท้องตลาดขณะนี้มีราคาค่อนข้างสูง โหลดเซลล์แบบ web type จะมีราคาไม่ต่ำกว่าสองหมื่นบาทจึงได้เกิดแนวคิดในการประดิษฐ์โหลดเซลล์(Load cell) ขึ้นมาเพื่อใช้ในงานอุตสาหกรรม และสถาบันการศึกษาต่างๆ เพื่อหวังที่จะทำโหลดเซลล์(Load cell) ที่ผลิตออกมามีราคาไม่กี่พันบาทที่เหมาะสมแก่การนำไปใช้งานและนำเอาทฤษฎีที่ศึกษาเกี่ยวกับการออกแบบต่างๆ มาทำการสร้างโหลดเซลล์ใช้งานจริงและเพื่อเป็นการศึกษาเกี่ยวกับการนำโปรแกรมไฟไนเอลิเมนต์(F.E.M)มาใช้ในการวิเคราะห์และออกแบบเพื่อที่จะมาหาขนาดการสร้างชิ้นส่วนต่างๆของโหลดเซลล์(Load cell) ให้มีขนาดที่เหมาะสม และเพื่อเป็นแนวทางในการนำโหลดเซลล์(Load cell) ที่คิดขึ้นมาไปพัฒนาให้มีคุณสมบัติใกล้เคียงกับโหลดเซลล์(Load cell) ที่มีใช้อยู่กันตามท้องตลาดและมีราคาที่ถูกกว่าในท้องตลาดและเหมาะสมกับการใช้งานต่างๆ และเพื่อที่จะได้มีราคาที่เหมาะสมกับการนำมาใช้งานบางงานที่ไม่ต้องการความละเอียดมากนักเพราะจะได้ลดต้นทุนในการสร้างเครื่องต่างๆที่ต้องนำโหลดเซลล์(Load cell) ไปประยุกต์ใช้ให้มีราคาต้นทุนที่ต่ำลง

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาวิธีการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมไฟไนเอลิเมนต์ Abaqus มาใช้ในทางวิศวกรรม

1.2.2 เพื่อศึกษากรรมวิธีในการผลิตและออกแบบโหลดเซลล์(Load cell)

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1.3.1เป็นการศึกษาและออกแบบโหลดเซลล์ (Load cell) ที่สามารถรับภาระได้สูงสุดคือ 50 kg และ 200 kg

1.3.2 เป็นการศึกษาและออกแบบโหลดเซลล์ชนิด web typeที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์ 100 mm. และสูง 45 mm.

1.3.3 เป็นการศึกษาและออกแบบโหลดเซลล์โดยไม่คำนึงถึงการชดเชยอุณหภูมิ

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 มีโหลดเซลล์ที่มีราคาต่ำกว่าท้องตลาดไว้ใช้งานในสถาบันอุดมศึกษา

1.4.2 ส่งเสริมงานวิจัยในเชิงวิศวกรรมในประเทศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.5 วิธีการดำเนินงาน

1.5.1 หาข้อมูลของโหลดเซลล์ที่มีขายตามท้องตลาด

1.5.2 ร่างรูปแบบของตัวโหลดเซลล์

1.5.3 หาข้อมูลของอลูมิเนียมที่มีขายตามท้องตลาด

1.5.4 คำนวณในทางทฤษฎีเพื่อหาขนาดของคานและสัดส่วนแรงดัน

1.5.5 สร้างโมเดลในโปรแกรม ABAQUS เพื่อวิเคราะห์

1.5.6 หาข้อมูลของสเตรนเกจ

1.5.7นำอลูมิเนียมที่ซื้อมาทำการขึ้นรูป

1.5.8 นำโหลดเซลล์มาติดสเตรนเกจและต่อวงจรวีตสโตนบริดจ์ภายในตัวโหลดเซลล์

1.5.9 นำโหลดเซลล์ไปทดลองเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างภาระที่กระทำกับแรงดันเอาต์พุต

1.5.10 ปรับแต่งตัวโหลดเซลล์

1.5.11 สรุปผลการทดลองและทำปริญญานิพนธ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2
ทฤษฎีที่ใช้ในการออกแบบโหลดเซลล์

2.1.ทฤษฎีทรานส์ดิวเซอร์

ทรานส์ดิวเซอร์ที่ใช้วัดแรง ทอร์ก หรือความดันโดยทั่วไป ประกอบด้วย ส่วนยืดหยุ่น หรือการเปลี่ยนแปลงเป็นระยะโก่งหรือความเครียด และตัวรับรู้ โดยปกติจะใช้สเตรนเกจ อย่างไรก็ตาม บางครั้งอาจใช้ LVDT หรือ โพเทนซิโอมิเตอร์สำหรับการวัดแบบสถิตหรือกึ่งสถิต

2.1.1 ทรานส์ดิวเซอร์แรง

ทรานส์ดิวเซอร์แรง (Force Transducers) ใช้สำหรับแปลงผันแรงทางกายภาพให้เป็นสัญญาณไฟฟ้า ในทางกลศาสตร์ สามารถจำแนกแรงออกเป็น 2 ประเภทใหญ่ ๆ คือ

1. แรงจลน์ (Kinematic force) เป็นแรงที่ทำให้วัตถุเปลี่ยนแปลงความเร็วในการเคลื่อนที่ เช่น แรงที่กระทำบนมือหุ่นยนต์เนื่องจากความเร่งของมวลของวัตถุในระหว่างการยังคับให้เคลื่อนที่

2. แรงสถิต (Static force) เป็นแรงที่กระทำบนวัตถุโดยไม่เกี่ยวข้องกับการเคลื่อนที่ เช่น แรงที่กระทำโดยมือของหุ่นยนต์บนผิดของวัตถุในระหว่างการจับยึดวัตถุ

การวัดแรงทั่ว ๆ ไป ทรานส์ดิวเซอร์แรงจะแปลงผันพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้า โดยการวัดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างทางกายภาพของทรานส์ดิวเซอร์ซึ่งแรงเป็นตัวการทำให้เกิดขึ้น

2.1.2 ชิ้นส่วนยืดหยุ่นสำหรับวัดแรง

ชิ้นส่วนยืดหยุ่นเป็นอุปกรณ์ที่สำคัญสำหรับการวัดทั้งแรงจลน์และแรงสถิต เมื่อมีแรงกระทำต่อชิ้นส่วนยืดหยุ่นอาจทำอยู่ในรูปของทรงกระบอก วงแหวน แท่งวัสดุ ไดอะแฟรม ฯลฯ สำหรับการแสดงขนาดแรงที่นิยมใช้โดยผ่านการวัดการกระจัด เช่น

- สปริง ในกรณีนี้แรงจะหาได้จาก

$$P = ky \qquad \text{.....(2.1)}$$

เมื่อ k เป็นค่าคงตัวของสปริง

Y เป็นระยะกระจัดจากจุดสมดุล

รูปที่ 2 .1 สปริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- **แท่งวัสดุ** จากรูปที่ 2.2 แรงที่วัดได้จะเป็นไปตามสมการ

$$P = \frac{AE\,y}{L} \qquad \text{.....(2.2)}$$

เมื่อ A เป็นพื้นที่หน้าตัด

E เป็นค่าโมดุลัสความยืดหยุ่นของวัสดุ

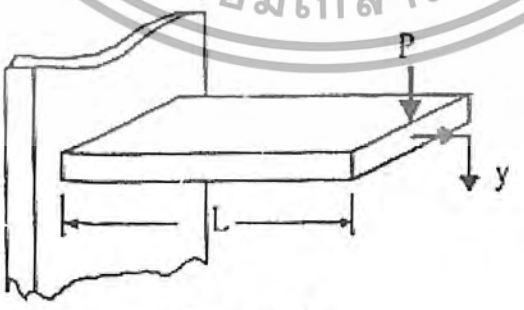
L เป็นความยาว

รูปที่ 2.2 แท่งวัสดุ

- **คายยื่น** Cantilever beam การเบนไปของปลายคานสัมพันธ์กับแรง P ที่กระทำจากรูป 2. 3

$$P = \frac{3EI\,y}{L^3} \qquad \text{.....(2.3)}$$

เมื่อ I คือโมเมนต์ความเฉื่อยของคานรอบแกนที่ผ่านศูนย์กลาง ในทิศทางของการเบน



รูปที่ 2. 3 คานยื่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

-วงแหวน จากรูป 2.4 เมื่อมีแรง H และ V มากระทำต่อวงแหวนความเครียดที่เกิดขึ้น

เมื่อ $\theta = 90$

หาได้จากสมการ

$$\varepsilon_{90} = 1.09 \frac{Vr}{Ewt^2} \quad \text{.....(2.4)}$$

เมื่อ $\theta = 39.6$ ความเครียด

หาได้จากสมการ

$$\varepsilon_{39.6} = 2.31 \frac{Hr}{Ewt^2} \quad \text{... .....(2.5)}$$

เมื่อ r คือรัศมีเฉลี่ยของวงแหวน

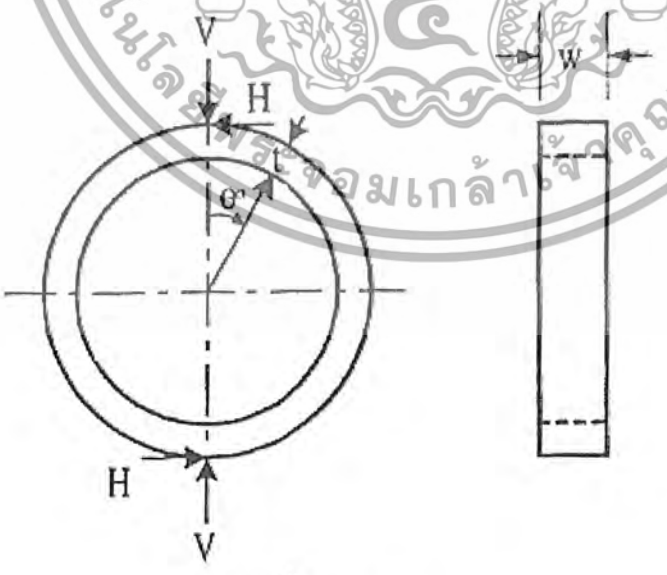
จากสมการ 4 และ 5 จะเห็นว่าที่ θ =90 ความเครียดเป็นผลเนื่องจากแรง V เพียงอย่างเดียวและที่ $\theta = 39.6$ ความเครียดเป็นผลเนื่องจากแรง H เพียงอย่างเดียว ดังนั้นองค์ประกอบทั้งสองสามารถแยกกันวัดได้

สมการสำหรับการโก่งตัวในทิศทางของ V และ H คือ

$$\delta_V = 9.42 \frac{Vr^3}{Ewt^3} \quad \text{.....(2.6)}$$

$$\delta_H = 1.79 \frac{Hr^3}{Ewt^3} \quad \text{.....(2.7)}$$

การวัดและเครื่องมือวัด



รูปที่ 2.4 วงแหวน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.3 โหลดเซลล์แบบลิงค์

รูปที่ 2.5 โหลดเซลล์แบบลิงค์

โหลดเซลล์แบบลิงค์ (Link –type load cell)ดังรูปที่2.5 อย่างง่ายประกอยด้วยลิงค์ (Link) และสเตรนเกจ (Strain gage) 4อันดังแสดงในรูปภาระ (Load) P สามารถเป็นไปได้ทั้งภาระแรงดึง (Tensile load) หรือภาระแรงอัด (Compressive load) สเตรนเกจ2 อันยึดติดกับลิงค์ในแนวขนานกับแกนและอีก2อันในแนวขวางกับแกน สเตรนเกจทั้ง 4 จะต่อเป็นวงจร วีตสโตนบริดจ์โดยเกจที่อยู่ในแนวแกนต่ออยู่ในแขน 1 และ 3 ส่วนเกจที่อยู่ในแนวขวางต่ออยู่กับแขน 2 และ 4

เมื่อภาระ P กระทำต่อลิงค์ ความเครียดตามแนวแกนและตามแนวขวางจะเกิดขึ้นในลิงค์และสัมพันธ์กับภาระตามสมการ

$$\left.\begin{aligned} \varepsilon_a &= \frac{P}{AE} \\ \varepsilon_t &= \frac{-\nu P}{AE} \end{aligned}\right\} \quad \text{.....a}$$

เมื่อ A เป็นพื้นที่หน้าตัดของลิงค์

E เป็นโมดุลัสความยืดหยุ่นของวัสดุที่ใช้ทำลิงค์

ν เป็นอัตราส่วนปัวซองของวัสดุที่ใช้ทำลิงค์

การตอบสนองของเกจต่อภาระ P ที่กระทำเป็นไปตามสมการ

$$\left.\begin{aligned} \frac{\Delta R_1}{R_1} &= \frac{\Delta R_3}{R_3} = \delta_l \varepsilon_a = \frac{S_g P}{AE} \\ \frac{\Delta R_2}{R_2} &= \frac{\Delta R_4}{R_4} = \delta_l \varepsilon_t = -\nu \frac{S_g P}{AE} \end{aligned}\right\} \quad \text{.....b}$$

ถ้าสมมติว่าสเตรนเกจทั้ง 4 ตัวบนลิงค์เหมือนกันทุกประการ แรงดันเอาต์พุต V_o จากวีตสโตนบริดจ์ หาได้จากการแทนค่าสมการ b ลงในสมการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

จะได้ $$V_o = \frac{S_g P(1+\nu) V_s}{2AE} \quad \text{.....(2.8)}$$

หรือ $$P = \frac{2AE}{S_g (1+\nu) V_s} V_o = C V_o \quad \text{..... (2.9)}$$

สมการ 9 แสดงว่า ภาระ P เป็นสัดส่วนเชิงเส้นกับแรงดันเอาต์พุต V_o และค่าคงตัวสัดส่วน หรือค่าคงตัวปรับเทียบคือ

$$C = \frac{2AE}{S_g (1+\nu) V_s} \quad \text{.....(2.10)}$$

เมื่อ C คือค่าคงตัวปรับเทียบ

ความไวของวีตสโตนบริดจ์รวมกันคือ

$$S = \frac{V_o}{P} = \frac{1}{C} = \frac{S_g (1+\nu) V_s}{2AE} \quad \text{..... (2.11)}$$

จากสมการ 11 แสดงว่าความไวของโหลดเซลล์ขึ้นอยู่กับพื้นที่หน้าตัดของลิงค์ (A) โมดุลัสความยืดหยุ่นของวัสดุที่ใช้ทำลิงค์(ε , ν) ตัวประกอบเกจ (S_g) และแรงดันที่จ่ายให้กับบริดจ์(V_s)

เรนน์(Range) ของแรงที่ให้กับโหลดเซลล์แบบลิงค์ หาได้จากพื้นที่หน้าตัดของลิงค์และความล้า (S_f) ของวัสดุที่ใช้ทำลิงค์ โดย

$$P_{max} = S_f A \quad \text{..... (2.12)}$$

อัตราส่วนแรงดันที่ภาระสูงสุด $\left(\frac{V_o}{V_s} \right)_{max}$ สำหรับโหลดเซลล์แบบลิงค์หาได้จากสมการ

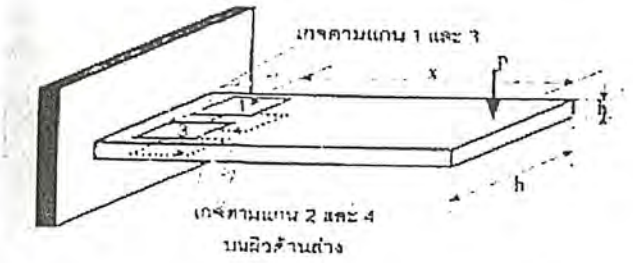
$$\left(\frac{V_o}{V_s} \right)_{max} = \frac{S_g S_f (1+\nu)}{2E} \quad \text{..... (2.13)}$$

โหลดเซลล์แบบลิงค์เกือบทั้งหมดกำหนดค่าเต็มสเกลของภาระ($P = P_{max}$) ที่ $(V_o/ V_s)^* = 3$ ด้วยค่าเต็มสเกลเฉพาะของอัตราส่วนแรงดัน $(V_o/ V_s)^*$ นี้ภาระ P บนโหลดเซลล์จะหาได้จาก

$$P = \frac{V_o/ V_s}{(V_o/ V_s)^*} P_{max} \quad \text{.....(2.14)}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.4 โหลดเซลล์แบบคาน



(ก)

รูป 2.6

โหลดเซลล์แบบ (Beam – type loadcell) ใช้วัดภาระในกรณีที่ใช้โหลดเซลล์แบบลิงค์ไม่ได้จาก รูป 2. 6 ใช้คานยื่น (Cantiliver beam) ทำหน้าที่เป็นชิ้นส่วนยืดหยุ่นซึ่งมีสเตรนเกจ 2 อัน ติดอยู่บนผิวด้านบนและอีก 2 อันอยู่ด้านล่าง (ทั้งหมดติดอยู่ในแนวขนานของคาน) ทำหน้าที่เป็นตัวรับรู้ โดยสเตรนเกจต่อกันเป็นวงจรวีตสโตนบริดจ์

ภาระ P ทำให้เกิดโมเมนต์ M = PX ที่ตำแหน่ง X ทำให้ได้ผลลัพธ์

$$\varepsilon_1 = -\varepsilon_2 = \varepsilon_3 = -\varepsilon_4 = \frac{6M}{Ebh^2} \quad \text{.....a}$$

เมื่อ b คือความกว้างของหน้าตัดคาน

Hคือความหนาของหน้าตัดคาน

การตอบสนองของสเตรนเกจหาได้จากสมการ $\frac{\Delta R}{R} = G_f \varepsilon$ และสมการ a

$$\frac{\Delta R_1}{R_1} = \frac{-\Delta R_2}{R_2} = \frac{\Delta R_3}{R_3} = \frac{-\Delta R_4}{R_4} = \frac{6S_g M}{Ebh^2} \quad \text{.....b}$$

แรงดันเอาต์พุต V_o จากวีตสโตนบริดจ์ ซึ่งเป็นผลจากภาระแรงกระทำหาได้โดยแทนสมการ b

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

และสมมติว่าสเตรนเกจทั้ง 4 เหมือนกันทุกประการ

$$V_o = \left(\frac{6S_g M}{Ebh^2}\right) V_s \quad \text{.....} \quad (2.15)$$

หรือ

$$P = \left(\frac{Ebh^2}{6S_g X V_s}\right) V_o = C V_o \text{.....} (2.16)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการแสดงว่าภาระ P เป็นสัดส่วนกับแรงดันเอาต์พุต V_o และค่าคงตัวสัดส่วนหรือค่าคงตัวปรับเทียบ C คือ

$$C = \left(\frac{Ebh^2}{6S_g X V_s} \right) \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad (2.17)$$

ความไวของโหลดเซลล์และวีตสโตนบริดจ์รวมกันกำหนดโดยสมการ

$$S = \frac{V_o}{P} = \frac{1}{C} = \frac{6S_g X V_s}{Ebh^2} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad (2.18)$$

จากสมการ 18แสดงว่าความไวของโหลดเซลล์แบบคาน ขึ้นอยู่กับรูปร่างหน้าตัดของคาน(b , h) โมดุลัสความยืดหยุ่นของวัสดุที่ใช้ทำคาน (E) ตำแหน่งของภาระเทียบกับเกจ (X) ตัวประกอบเกจ(S_g) และแรงดันที่ป้อนให้กับวงจรบริดจ์

เรนจ์ของภาระที่ใช้กับโหลดเซลล์แบบคานขึ้นอยู่กับรูปร่างหน้าตัดของคาน ตำแหน่งที่ภาระกระทำ และความล้าของวัสดุที่ใช้ทำคาน ถ้าสมมติว่าเกจติดอยู่ใกล้กับฐานรองรับคานจะได้

$$M_{gage} = M_{Max}$$

และ

$$P_{max} = \frac{S_f bh^2}{6X} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad (2.19)$$

อัตราส่วนแรงดันที่ภาระสูงสุด$(V_o / V_s)_{Max}$ หาได้จากการแทนสมการ 2.19 ลงใน15

$$\frac{V_o}{V_s}_{max} = \frac{S_g S_f}{E} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad (2.20)$$

โหลดเซลล์แบบคานที่มีขายในท้องตลาดมีอัตราส่วนแรงดัน$(V_o / V_s)^*$ ที่ภาระเต็มระหว่าง 4และ5mv/v

2.1.5 โหลดเซลล์แบบวงแหวน

ส่วนประกอบของโหลดเซลล์แบบวงแหวน (Ring-type loadcell) ดังรูป 2.7 มีวงแหวนพรูฟวิง (Proving ring) เป็นส่วนยืดหยุ่นและมีตัวรับรู้ซึ่งสามารถใช้ได้ทั้ง สเตรนเกจ และ LVTD ดังแสดงดังรูป

ถ้าใช้ LVTD วัดการกระจัดอันเนื่องมาจากการอัดหรือดึงในแนวเส้นผ่านศูนย์กลางของวงแหวน และความสัมพันธ์ระหว่างการกระจัด δ กับภาระ P จะเป็นไปตามสมการ (โดยประมาณ)

$$\delta = 9.42 \frac{PR^3}{Ewt^3} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (2.21)$$

เมื่อ R เป็นรัศมีของวงแหวน

E เป็นโมดุลัสความยืดหยุ่นของวัสดุ

W เป็นความกว้างของวงแหวน

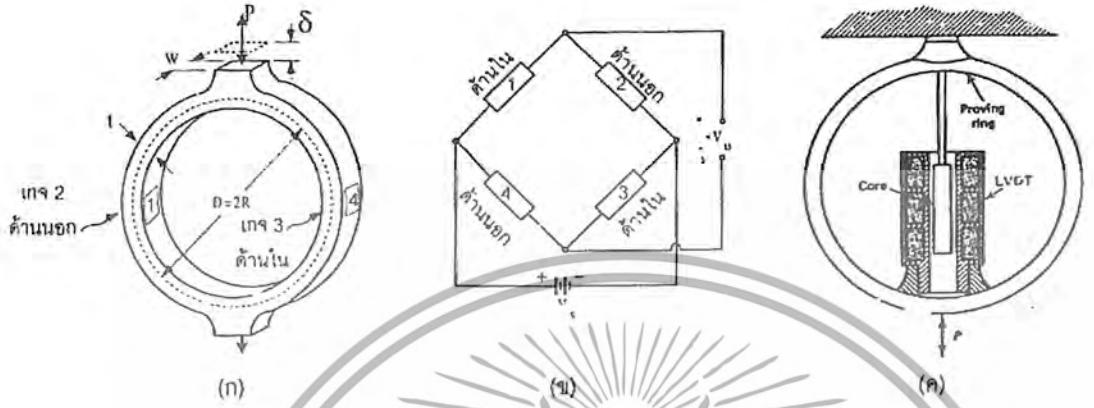
T เป็นความหนาของวงแหวน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แรงดันเอาต์พุต V_o ของLVTD สามารถแสดงโดยสมการ

$$V_o = S\delta V_s \quad \text{..... (2.22)}$$

เมื่อ S เป็นค่าความไวของเกจ



รูป 2.7 โหลดเซลล์แบบวงแหวน

ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันออกกับภาระหาได้จากการแทนสมการ 2.21 ลงในสมการ 2.22

$$V_o = \frac{9.42\ SPR^3 V_s}{Ewt^3} \quad \text{..... (2.23)}$$

หรือ

$$P = \frac{0.11 Ewt^3 V_o}{SR^3 V_s} = \frac{C V_o}{SR^3 V_s} \quad \text{..... (2.24)}$$

$$C = 0.11\left(\frac{Ewt^3}{SR^3 V_s}\right) V_o \quad \text{..... (2.25)}$$

ความไวของวงแหวน LVTD รวมกัน

$$S_t = \frac{V_o}{P} = \frac{1}{C}\ \frac{9.42\ SPR^3 V_s}{Ewt^3} \quad \text{..... (2.26)}$$

เรนจ์ของโหลดเซลล์แบบวงแหลนถูกควบคุมโดยความแข็งของวัสดุ ถ้าโหลดเซลล์ใช้วัดแรงที่กระทำเป็นวัฏจักร (Cyclic load) ความล้า (Fatigue) S_f เป็นสิ่งสำคัญที่ต้องพิจารณา

ความเค้นสูงสุดในชิ้นส่วนวงแหวนอยู่ที่ผิวด้านในของวงแหวนตรงที่เส้นผ่านศูนย์กลางตั้งฉากกับแนวภาระ ค่าประมาณของความเค้นที่ตำแหน่งนี้ คือ

$$\sigma = \frac{1.09\ PR}{Wt^2} \quad \text{..... (2.27)}$$

จากสมการ 27 สำหรับการวัดภาระที่กระทำเป็นจังหวะ

$$P = \frac{0.92\ Wt^2 S_t}{R} \quad \text{..... (2.28)}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อัตราส่วนแรงดันที่ภาระสูงสุด $(V_o/V_s)_{Max}$

$$\frac{V_o}{V_s}_{max} = \frac{8.67R^2 S S_f}{Et} \quad \text{.....(2.29)}$$

ด้วยค่าเต็มสเกลเฉพาะของอัตราส่วนแรงดัน $(V_o/V_s)^*$ นี้ภาระ P บนโหลดเซลล์จะหาได้จาก

$$P = \frac{V_o/V_s}{(V_o/V_s)^*} P_{max} \quad \text{.....(2.30)}$$

2.1.6 โหลดเซลล์ชนิดเชียร์ - เวบ

โหลดเซลล์ชนิดเชียร์ – เวบ (Shear – web –type load cell) เรียกอีกอย่างหนึ่งว่า โหลดเซลล์แบบแฟลต (Flat load cell)ดังรูป 2.8 มีประโยชน์สำหรับการใช้งาน เมื่อที่ว่างในแนวภาระมีจำกัด

โหลดเซลล์ชนิดเชียร์เวบประกอบด้วยดุมรับภาระข้างใน (Inner loadcell hub) และหน้าจานรองรับข้างนอก (Outer supporting flange) ซึ่งต่อกันด้วยเชียร์-เวบ ดังรูป สเตรนเกจ ชนิดรับแรงเฉือนติดตั้งอยู่ในรูเล็ก ๆ ที่ถูกเจาะเข้าไปในเชียร์-เวบ

โหลดเซลล์แบบแฟลตมีขนาดกระทัดรัด สามารถประยุกต์ใช้ได้กับงานพลวัต โดยเฉพาะเมื่อต้องการวัดภาระในขณะที่ภาระสั่นมีความถี่สูง ขนาดของแรงที่วัดโดยใช้โหลดเซลล์แบบแฟลตหาได้จากการวัดความถี่ธรรมชาติของโหลดเซลล์

$$f_n = 3.13\sqrt{\frac{k}{w_x + w_e}} \quad \text{.....(2.31)}$$

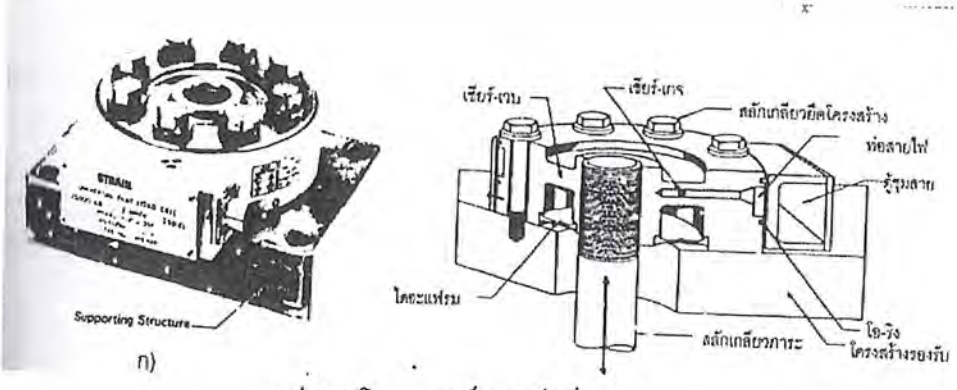
เมื่อ f_n คือ ความถี่ธรรมชาติ ของทรานส์ดิวเซอร์ (Hz)

k คือ ค่าคงตัวของสปริงหรือ Stiffness ของโหลดเซลล์ (lb/in)

W_e คือ น้ำหนักประสิทธิผลของส่วนแอกตีฟของโหลดเซลล์ (lb)

W_x คือ น้ำหนักภายนอกที่ติดกับดุม (lb)

ความถี่ธรรมชาติที่แสดงในตาราง คำนวณภายใต้สมมติฐานว่าไม่มีน้ำหนักภายนอก (W_x) ติดกับโหลดเซลล์



ก)

รูป 2. 8 โหลดเซลล์แบบเชียร์- เวบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 การโก่งของคาน (Deflection of Beams)

ในหัวข้อนี้เราจะพิจารณาถึงคานที่ถูกภาระภายนอกกระทำ การออกแบบคานจะพิจารณาถึงความแข็งแรงของคานด้วย ตัวอย่างในการออกแบบเครื่องมืองานโลหะ สำหรับงานที่ต้องการความแม่นยำ เช่น เพลาเครื่องกลึง เครื่องกัด หรือเครื่องเจียระไน ต้องรักษาไม่ให้การเปลี่ยนรูป การเปลี่ยนรูปที่ต้องคำนึงอย่างหนึ่งก็คือ การโก่งของคาน

2.2.1 การหาระยะโก่งของคานด้วยวิธี อินทิกัล 2 ครั้ง (Double Integration Method)

รูปที่ 2.9 แสดงการโก่งของคานที่เกิดจากภาระภายนอกกระทำ

จากรูปที่ 1 แสดงการโก่งงอของคาน โดยเลือกปลายคานทางด้านซ้าย เป็นจุดกำเนิดของแกน X ตลอดความยาวและแกน ทิศทางขึ้นเป็นบวก เป็นระยะการโก่งของคาน การโก่งจะเกิดขึ้นดังรูป 1

ค่าของ $\tan\theta = \dfrac{dy}{dx}$

เมื่อ θ เล็กมาก $\tan\theta = \theta$

$$\therefore \quad \theta = \frac{dy}{dx}$$

Differential 2 ข้าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะได้ $\frac{d\theta}{dx} = \frac{d^2y}{dx^2}$

ถ้าเราพิจารณาการแปรเปลี่ยนของ θ ที่ตำแหน่งความยาว ds ต่างๆกัน ซึ่งสาเหตุเกิดจากการตัดสินในคาน เราจะได้ $ds = \rho d\theta$

ค่า ρ เป็นรัศมีของส่วนโค้ง

$$\therefore \quad \frac{1}{\rho} = \frac{d\theta}{ds} \approx \frac{d\theta}{dx}$$

หรือ $\frac{1}{\rho} = \frac{d^2y}{dx^2}$

จากสูตรของการดัดงอ (Flexure Formula) จะได้ $\frac{1}{\rho} = \frac{M}{EI}$

$\therefore$ แทนค่า $\frac{d^2y}{dx^2} = \frac{M}{EI}$

$$EI\frac{d^2y}{dx^2} = M$$

สมการนี้เป็นสมการความแตกต่างของส่วนโค้งยืดหยุ่นของคาน ค่า EI เราเรียกว่า Flexural Rigidity คาน โดยปกติแล้วค่า EI จะคงที่ตลอดความยาวของคาน แต่ถ้าเปลี่ยนชนิดของคานหรือเปลี่ยนหน้าตัดในเพลาเดียวกัน ค่า EI จะไม่คงที่

ถ้าเรา take integrate จะได้

$$EI\frac{dy}{dx} = \int Mdx + C_1 \qquad (2.32)$$

take integrate อีกครั้งหนึ่งเราจะได้

$$EI\int dy = \iint Mdx.dx + C_1x + C_2 \qquad (2.33)$$

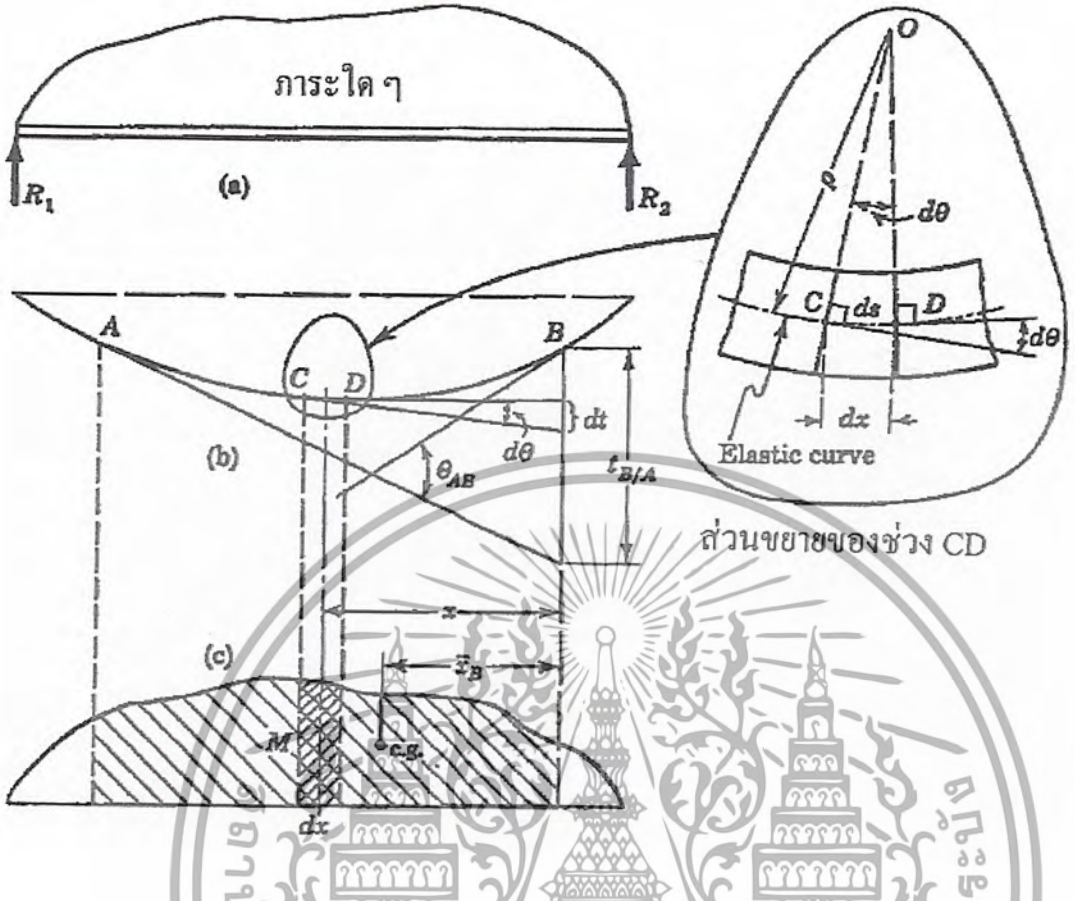
$$EIy = \iint Mdx.dx + C_1x + C_2 \qquad (2.34)$$

สมการ Ely นี้เป็นสมการการหาระยะโก่งของคาน โดยการอินทริกัลป์จากสมการโมเมนต์ของคาน 2 ครั้ง ณ ตำแหน่งนั้นๆ บนหน้าตัดคาน

2.2.2 การหาระยะโก่งงอคานด้วยวิธีพื้นที่-โมเมนต์ (Theorems of Area-Moment Method)

การหาค่าระยะการโก่งของคานด้วยวิธีโมเมนต์-พื้นที่ เราจะพิจารณาพื้นที่ไดอะแกรมโมเมนต์บนคานดังรูปที่ 2.10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.10 แสดงภาระกระทำต่อคาน

พิจารณาที่ตำแหน่ง C และ D บนคานของรูปที่ 2 (b)

ค่าของ $\frac{1}{\rho} = \frac{M}{EI}$ แต่ $ds = \rho\, d\theta$ $\therefore \frac{1}{\rho} = \frac{d\theta}{ds}$

$$\therefore \quad \frac{1}{\rho} = \frac{M}{EI} = \frac{d\theta}{ds}$$

$\therefore$ หรือ $\frac{M}{EI} \cdot ds$

ระยะ ds มีค่าเท่ากับการ Projection ของระยะ dx

$$\therefore \quad d\theta = \frac{M}{EI} \cdot dx$$

อินทิกัลทั้งสองข้างจะได้ $\int_{\theta_A}^{\theta_B} d\theta = \int_{x_A}^{x_B} \frac{M}{EI}\, dx$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\theta_{AB} = \int_{\theta_A}^{\theta_B} d\theta$$

$$\theta_{AB} = \frac{1}{EI}\int_{x_A}^{x_B} M \ dx$$

จากรูปที่ 2 (b) ; $dt = xd\theta$

ดังนั้น $t_{B/A} = \int dt = \int xd\theta$

$\therefore$ จาก $d\theta = \frac{M}{EI} \cdot dx$

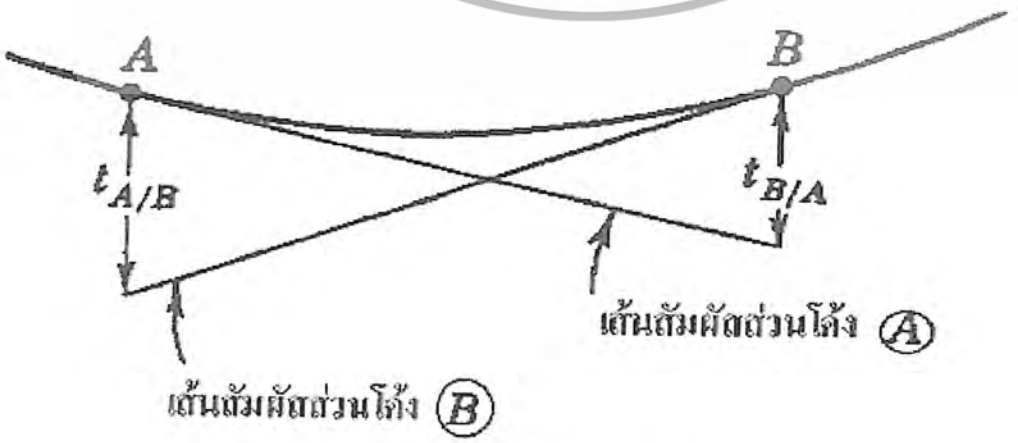
เอาค่า X คูณทั้งสองข้าง

$$xd\theta = \frac{M}{EI} \cdot dx$$

$$\int_{t_A}^{t_B} dt = \int_{x_A}^{x_B} \frac{M}{EI} x. \ dx$$

$$t_{B/A} = \frac{1}{EI}\int_{x_A}^{x_B} x.M dx$$

ความยาว $t_{B/A}$ เป็นการ Deviation ของ B จากการลากเส้นสัมผัสที่จุด A หรือกำหนด Tangential Deviation ของ B เทียบกับ A ตัว Subscript บ่งบอกถึงวัดจาก B ไปหา A ดังรูปที่ 3



รูปที่ 2.11 แสดงการเขียน $t_{A/B}$ และ $t_{B/A}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พิจารณาความสัมพันธ์ของสมการของ

$$\theta_{AB} = \int_{\theta_A}^{\theta_B} d\theta = \frac{1}{EI}\int_{x_A}^{x_B} Mdx$$

และสมการของ $t_{B/A} = \frac{1}{EI}\int_{x_A}^{x_B} x.Mdx$ จะให้ทฤษฎีของพื้นที่-โมเมนต์ จากไดอะแกรมของโมเมนต์ เราจะพบว่า Mdx คือ พื้นที่ของตำแหน่งจาก A หรือ B ถ้าเรารวม $\int Mdx$ ของ Element เข้าด้วยกันจะได้ทฤษฎี 1 ดังนี้

$$\theta_{AB} = \frac{1}{EI}(area)_{AB}$$

ถ้าขยายทางพีชคณิตเราจะได้ทฤษฎี 1 ดังนี้

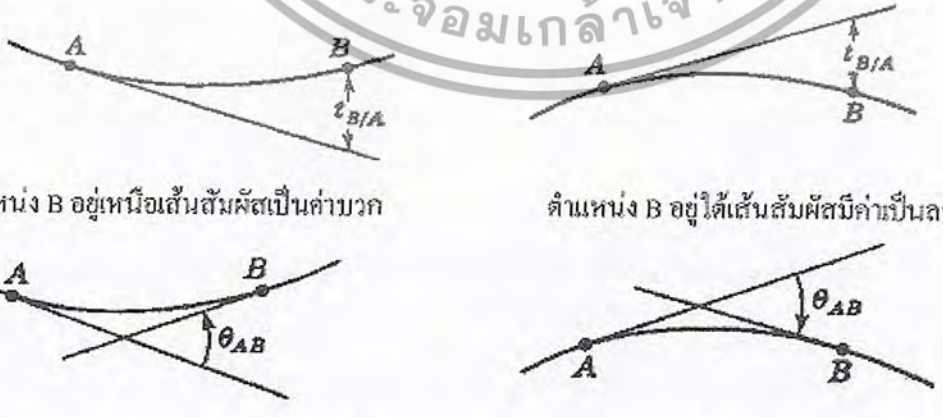
ทฤษฎีที่ 1 เปลี่ยนความลาดชันระหว่างเส้นสัมผัสส่วนโค้งอิลาสติก ณ ตำแหน่งจุด A และ B จะเท่ากับค่าของ $\frac{1}{EI}$ คูณด้วยพื้นที่ไดอะแกรมโมเมนต์ระหว่างจุด A และ B

จากรูปไดอะแกรมของโมเมนต์ค่า x(Mdx) คือ โมเมนต์พื้นที่รอบจุด B ของส่วนไดอะแกรมโมเมนต์ระหว่าง A และ B ฉะนั้น เราจะได้ทฤษฎีที่ 2 ดังนี้

$$t_{BA} = \frac{1}{EI}(area)_{BA}.\overline{X}_B$$

ทฤษฎีที่ 2 Deviation จุด B สัมพันธ์กับเส้นสัมผัสส่วนโค้งอิลาสติก ณ จุดทุก ๆ จุดในทิศทางตั้งฉากกับตำแหน่งจุดกำเนิดของคาน จะมีค่าเท่ากับ $\frac{1}{EI}$ คูณด้วยโมเมนต์พื้นที่รอบ B ของส่วนไดอะแกรมโมเมนต์ระหว่างจุด A และ B ค่าของ EI เรียกว่า Flexidity

เครื่องหมายการวัดค่าระยะ $t_{B/A}$ และ θ_{AB} มีวิธีการวัดดังรูปที่ 4



ตำแหน่ง B อยู่เหนือเส้นสัมผัสเป็นค่าบวก

ตำแหน่ง B อยู่ใต้เส้นสัมผัสมีค่าเป็นลบ

ความลาดชันของ θ_{AB} หมุนทวนเข็มนาฬิกา ของเส้นสัมผัสมีค่าเป็นบวก

ความลาดชันของ θ_{AB} หมุนตามเข็มนาฬิกา ของเส้นสัมผัสมีค่าเป็นลบ

รูปที่ 2.12 แสดงเครื่องหมายของ Deviation

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าธนบุรี

การใช้ไดอะแกรมโมเมนต์ (Moment Diagrams by Parts)

เพื่อที่ใช้ทฤษฎีของโมเมนต์-พื้นที่ เราจะสามารถคำนวณค่าพื้นที่ส่วนของไดอะแกรมโมเมนต์และโมเมนต์แต่ละพื้นที่รอบแกนก่อน เราต้องอินทิกัล 2 ครั้ง คือ $\int Mdx$ และ $\int x(Mdx)$ ระหว่างค่าจำกัดที่ต้องการ จุดประสงค์ก็เพื่อแบ่งไดอะแกรมโมเมนต์ของพื้นที่ โดยที่เราทราบจุดศูนย์ถ่วงของพื้นที่

โครงสร้างของ Diagrams by Parts ขึ้นกับ 2 หลักการใหญ่ ๆ ดังนี้

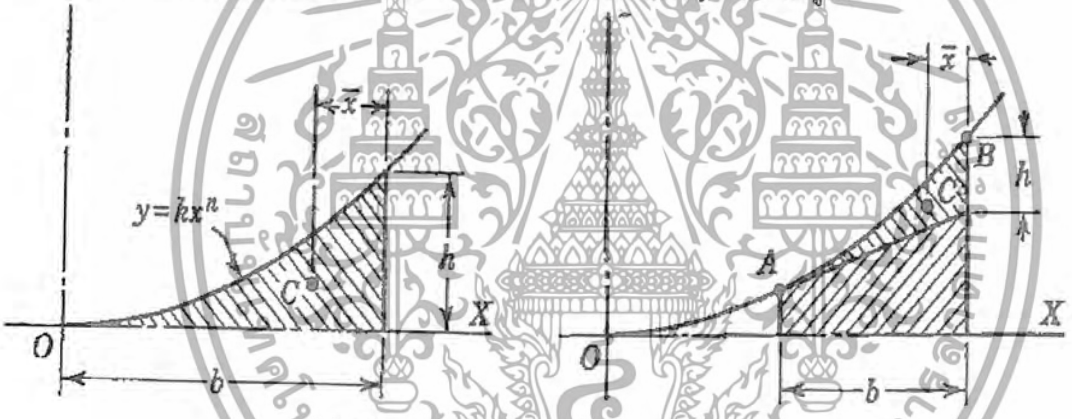
1) ผลลัพธ์ของโมเมนต์ดัด ณ ตำแหน่งหน้าตัดใด ๆ โดย load ที่กระทำ คือ ผลรวมทางพีชคณิตของโมเมนต์ดัด ณ ตำแหน่งหน้าตัด โดย load กระทำแยกออกจากกัน สถานะนี้เราจำได้

$$M = (n\,M)_L = (n\,M)_R$$

ค่าของ $(n\,M)_L$ บ่งบอกถึงผลรวมของโมเมนต์ เกิดจากแรงทั้งหมดที่เกิดทางด้านซ้ายของหน้าตัดคูณด้วยระยะตั้งฉาก

$(n\,M)_R$ บ่งบอกถึงผลรวมของโมเมนต์ เกิดจากแรงทั้งหมดที่เกิดทางด้านขวาของหน้าตัดคูณด้วยระยะตั้งฉาก

2) ผลโมเมนต์ของ load หนึ่ง ๆ จะแปรเปลี่ยนโดยใช้สมการ $y = kx^n$ ดังรูป 5



รูปที่ 2.13 แสดงไดอะแกรมโมเมนต์

รูปกราฟนี้แสดงสมการ $y = kx^n$

พื้นที่ของกราฟ (area) $= \dfrac{1}{n+1}.bh$

ตำแหน่งจุดศูนย์ถ่วง ; $(\bar{x}) = \dfrac{1}{n+2}.b$

ค่าของ b คือฐาน , h คือความสูง

ในการคำนวณพื้นที่ภายใต้ส่วนโค้งระหว่างตำแหน่ง A และ B ใช้สูตร

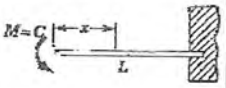
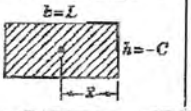
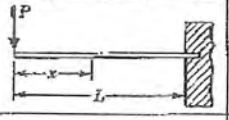
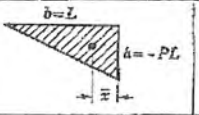
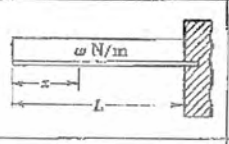
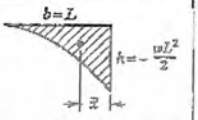
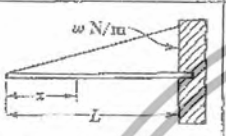
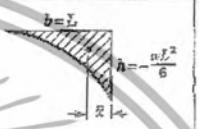
$$\text{(area)} = \frac{1}{n+1}.bh \quad \text{และ} \quad (\bar{x}) = \frac{1}{n+2}.b$$

ค่าของ n เป็นค่า Drgree แต่ละสมการเช่น $n = 0$, $n = 2$

ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับสมการ $y = kx^n$ หาได้จากตารางที่ 1 ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
61847

ตารางที่ 2.1แสดงค่าพื้นที่ของไดอะแกรมโมเมนต์ และค่า $\bar{x}$ ของภาระที่กระทำกับคานปลายยื่น

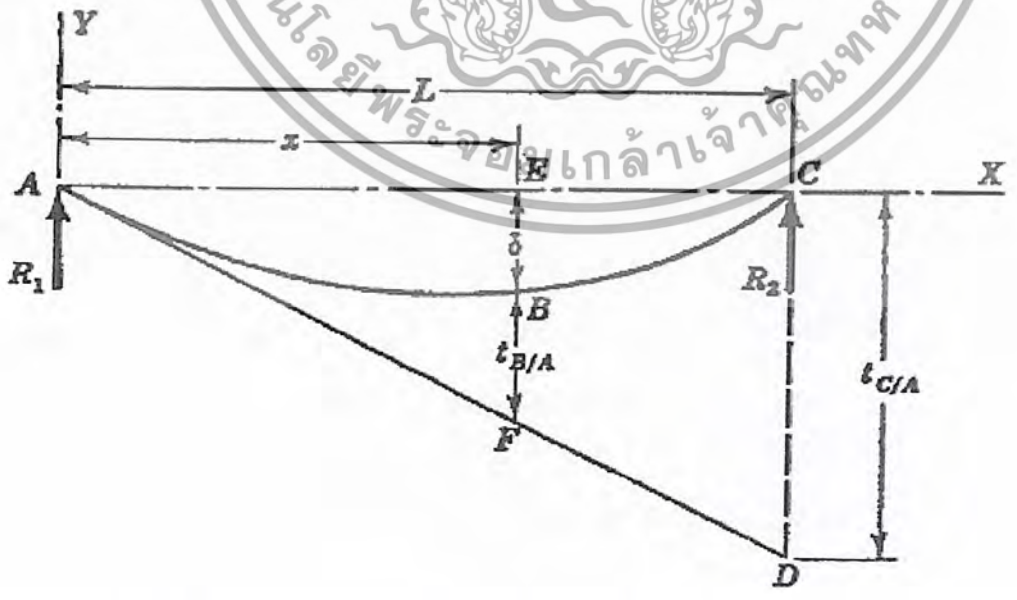
ประเภทของภาระ	คานปลายยื่น	สมการโมเมนต์	ดีกรีของสมการโมเมนต์	ไดอะแกรมโมเมนต์	AREA	$\bar{x}$
Couple		$M = -C$	Zero (i.e., $M = -Cx^0$)		$\frac{1}{1}bh$	$\frac{1}{2}b$
Concentrated		$M = -Px$	1st		$\frac{1}{2}bh$	$\frac{1}{3}b$
Uniformly distributed		$M = -\frac{w}{2}x^2$	2nd		$\frac{1}{3}bh$	$\frac{1}{4}b$
Uniformly varying		$M = -\frac{w}{6L}x^3$	3rd		$\frac{1}{4}bh$	$\frac{1}{5}b$

2.2.3 การโก่งของคานปลายยื่น (Deflection of Canitiever Beam)

การโก่งของคานปลายยื่นนี้ จะใช้วิธี Tangential Deviation ที่เกิดขึ้น ณ ตำแหน่งต่าง ๆ บนคาน ซึ่งค่าของ Tangential Deviation นี้เป็นการวัดค่าในแนวตั้งจากจุด A เทียบกับเส้นสัมผัสที่ลากจากจุด B ของคาน ดังรูป 3 ที่กล่าวมาแล้ว

2.2.4 การโก่งในคานที่มีจุดรองรับอย่างง่าย (Deflection in Simply Supported Beam)

ในการหาค่าระยะโก่งของคานอย่างง่ายนี้ นอกจากจะใช้วิธีการอินทิกัล 2 ครั้งแล้ว ยังสามารถใช้วิธีพื้นที่ โมเมนต์ โดยใช้หลักการของ Tangential Deviation ได้ดังรูปที่ 5 ต่อไปนี้



รูปที่ 2.14 แสดงการหาค่าระยะโก่งโดยใช้หลักการ Tangential Deviation

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 2.14 หาค่า ระยะโก่งของคานได้ตามลำดับขั้นตอนดังนี้

1) $t_{C/A} = \frac{1}{EI}(area)_{AC} . \bar{x}$

2) จากความสัมพันธ์ระหว่างสามเหลี่ยมคล้ายหา EF ในเทอมของ $t_{C/A}$

จะได้ $\frac{EF}{x} = \frac{CD}{L}$

$\therefore \quad EF = \frac{x.t_{C/A}}{L}$; (ค่า CD = $t_{C/A}$)

3) คำนวณหา $t_{B/A}$ จากความสัมพันธ์

$$t_{B/A} = \frac{1}{EI}(area)_{BA} . \bar{x}_B$$

4) เนื่องจาก EF คือผลรวมของ δ และ $t_{B/A}$ ค่าของ δ หาได้ดังนี้

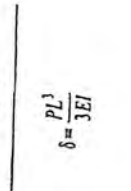
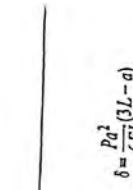
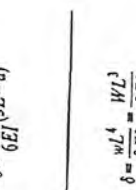
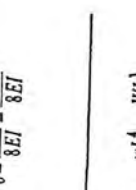
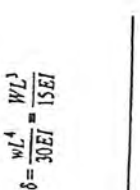
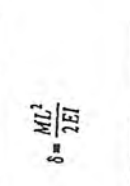
$$\delta = EF - t_{B/A}$$

2.2.5 การหาระยะโก่งด้วยวิธีซุปเปอร์โพซิชั่น (Superposition)

นอกจากจะหาระยะโก่งด้วยกรรมวิธีอินทริกัล 2 ครั้ง หรือวิธีโมเมนต์-พื้นที่แล้ว ยังสามารถหาค่าระยะโก่งโดยวิธี Superposition ได้อีกด้วย ซึ่งกรรมวิธีนี้จะใช้วิธีแยกรูปออกเป็นรูปย่อยแล้วใช้ตารางที่ 2.2

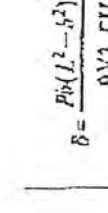
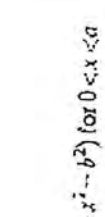
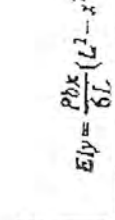
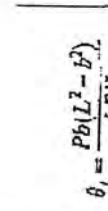
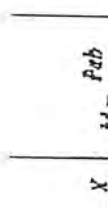
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.2 แสดงค่าพื้นที่ ประเภทของภาระ โมเมนต์สูงสุด ความลาดชันที่ปลาย สมการระยะโก่ง ระยะโก่งสูงสุด

กรณีที่	ประเภทของภาระ (Load)	โมเมนต์สูงสุด	ความลาดชันที่ปลาย	สมการของระยะโก่ง (กำหนดเป็นบวก)	ระยะโก่งสูงสุด
1		$M = -PL$	$\theta = \frac{PL^2}{2EI}$	$Ely = \frac{Px^2}{6}(3L - x)$	$\delta = \frac{PL^3}{3EI}$
2		$M = -Pa$	$\theta = \frac{Pa^2}{2EI}$	$Ely = \frac{Px^2}{6}(3a - x)$ for $0<x<a$ $Ely = \frac{Pa^2}{6}(3x - a)$ for $a<x<L$	$\delta = \frac{Pa^2}{6EI}(3L - a)$
3		$M = -\frac{wL^2}{2}$ $= -\frac{WL}{2}$	$\theta = \frac{wL^3}{6EI}$ $= \frac{WL^2}{6EI}$	$Ely = \frac{wx^2}{24}(6L^2 - 4Lx + x^2)$	$\delta = \frac{wL^4}{8EI} = \frac{WL^3}{8EI}$
4		$M = -\frac{wL^2}{6}$ $= -\frac{WL}{3}$	$\theta = \frac{wL^3}{24EI}$ $= \frac{WL^2}{12EI}$	$Ely = \frac{wx^2}{120L}(10L^3 - 10L^2x + 5Lx^2 - x^3)$	$\delta = \frac{wL^4}{30EI} = \frac{WL^3}{15EI}$
5		$M = -M$	$\theta = \frac{ML}{EI}$	$Ely = \frac{Mx^2}{2}$	$\delta = \frac{ML^2}{2EI}$
6		$M = \frac{PL}{4}$	$\theta_L = \theta_R = \frac{PL^2}{16EI}$	$Ely = \frac{Px}{12}\left(\frac{3}{4}L^2 - x^2\right)$ for $0<x<\frac{L}{2}$	$\delta = \frac{PL^3}{48EI}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.2 (ต่อ) แสดงค่าพื้นที่ ประเภทของภาระ โมเมนต์สูงสุด ความลาดชันที่ปลาย สมการระยะโก่ง ระยะโก่งสูงสุด

7		$M=\frac{Pab}{L}$ at $x=a$	$\theta_1=\frac{Pb(L^2-b^2)}{6EIL}$ $\theta_2=\frac{Pa(L^2-a^2)}{6EIL}$	$Ely=\frac{Pbx}{6L}(L^2-x^2-b^2)$ for $0<x<a$ $Ely=\frac{Pb}{6L}\left[\frac{L}{b}(x-a)^3+(L^2-b^2)x-x^3\right]$ for $a<x<L$	$\delta=\frac{Pb(L^2-b^2)^{3/2}}{9\sqrt{3}\,EIL}$ at $x=\sqrt{\frac{L^2-b^2}{3}}$ At center (not max.) $\delta=\frac{Pb}{48EI}(3L^2-4b^2)$ when $a>b$
8		$M=\frac{wL^2}{8}$ $=\frac{WL}{8}$	$\theta_1=\theta_R=\frac{wL^3}{24EI}$	$Ely=\frac{wx}{24}(L^3-2Lx^2+x^3)$	$\delta=\frac{5wL^4}{384EI}=\frac{5WL^3}{384EI}$
9		$M=\frac{wL^2}{9\sqrt{3}}$ $=\frac{2WL}{9\sqrt{3}}$	$\theta_1=\frac{7wL^3}{360EI}$ $\theta_R=\frac{8wL^3}{360EI}$	$Ely=\frac{wx}{360L}(7L^4-10L^2x^2+3x^4)$	$\delta=\frac{2.5wL^4}{384EI}=\frac{5WL^3}{384EI}$ at $x=0.519L$
10		$M=\frac{wL^2}{12}$ $=\frac{WL}{8}$	$\theta_1=\theta_R=\frac{5wL^3}{192EI}$	$Ely=\frac{wx}{960L}(25L^4-40L^2x^2+16x^4)$ for $0<x<\frac{L}{2}$	$\delta=\frac{wL^4}{120EI}=\frac{WL^3}{60EI}$
11		$M=M$	$\theta_L=\frac{ML}{6EI}$ $\theta_R=\frac{ML}{3EI}$	$Ely=\frac{Mlx}{6}\left(1-\frac{x^2}{L^2}\right)$	$\delta=\frac{ML^2}{9\sqrt{3}\,EI}$ at $x=\frac{L}{\sqrt{3}}$ At center (not max.) $\delta=\frac{ML^2}{16EI}$
12		$M=M$	$\theta_L=\frac{ML}{3EI}$ $\theta_R=\frac{ML}{6EI}$	$Ely=\frac{Mx}{6L}(L-x)(2L-x)$	$\delta=\frac{ML^2}{9\sqrt{3}\,EI}$ at $x=\left(L-\frac{L}{\sqrt{3}}\right)$, At center (not max.) $\delta=\frac{ML^2}{16EI}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3สเตรนเกจชนิดความต้านทาน

สเตรนเกจคืออุปกรณ์ที่ความต้านทานของตัวมันเปลี่ยนแปลงเมื่อถูกทำให้ยืดหรือหด หรือถูกทำให้เกิดความเครียด ดังนั้นสเตรนเกจจึงเป็นอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับวัดความเครียดมากที่สุด คุณลักษณะต่างๆ ที่ควรจะพิจารณาในการตัดสินใจเลือกใช้สเตรนเกจในงานเฉพาะอย่าง มีดังนี้

1. ค่าคงตัวเปรียบเทียบ (Calibration constant) ของสเตรนเกจควรจะเสถียร ไม่ควรเปลี่ยนตามเวลา อุณหภูมิ หรือตัวประกอบแวดล้อมอื่นๆ
2. สเตรนเกจควรจะสามารถวัดความเครียด (strain) ด้วยความแม่นยำ ±1 μ in/in (μm/m) ในช่วงความเครียดขนาดใหญ่ (หรือความผิดพลาด ± 10%)
3. ขนาดเกจ (ความยาว I_g และความกว้าง W_g ของเกจ) ควรจะเล็กเพื่อว่าความเครียดจะถูกประมาณด้วยความผิดพลาดเล็กน้อย
4. การตอบสนองของเกจซึ่งถูกควบคุมด้วยความเฉื่อยของตัวเกจ ควรเพียงพอที่จะบันทึกความเครียดพลวัต (Dynamics strain) ด้วยองค์ประกอบความถี่มากกว่า 100 Hz.
5. ระบบเกจควรจะมีทั้งแบบอ่านค่า ณ ที่ตำแหน่งติดตั้ง และอ่านระยะไกล
6. เอาต์พุตจากเกจในระหว่างช่วงการอ่าน ควรจะเป็นอิสระจากอุณหภูมิ และพารามิเตอร์แวดล้อมอื่นๆ
7. เกจ และอุปกรณ์ช่วย ทั้งคู่ควรมีราคาถูกเพื่อใช้ประโยชน์กว้างขวาง
8. ระบบเกจควรติดตั้ง และสามารถใช้งานง่าย
9. เกจควรจะตอบสนองแบบเชิงเส้นต่อความเครียดในช่วงกว้าง
10. เกจควรจะเหมาะสำหรับใช้เป็นส่วนรับรู้ในระบบทรานดิวส์เซอร์อื่นๆ เมื่อปริมาณที่ไม่ทราบค่าเช่น ความดัน ถูกวัดในเทอมของความเครียด

2.3.1 สเตรนเกจแบบกัดขึ้นรอยแผ่นโลหะบาง

ค่าความไว S_A ของโลหะตัวนำต่อความเครียดเป็นไปตามสมการ

$$S_A = \frac{dR/R}{\varepsilon_a} = \frac{d\rho/\rho}{\varepsilon_a} + (1+2\nu) \quad \text{.....(2.35)}$$

ซึ่งเป็นไปได้ที่จะวัดความเครียดด้วยลวดยาวตรง ถ้าทำการตรวจวัดการเปลี่ยนแปลงความต้านทาน เมื่อลวดถูกกระทำให้เกิดความเครียด อย่างไรก็ตามการใช้วัด dR (ในทางปฏิบัติ ΔR) มีแหล่งจ่ายกำลังซึ่งถูกจำกัดกระแส และกำลังสูญเสีย (Power dissipated) ของเกจเองก็ถูกจำกัด ด้วยเหตุผลนี้โดยปกติสเตรนเกจจะถูกสร้างขึ้นมาให้มีความต้านทาน 120 Ω หรือมากกว่า ด้วยความต้ารนทานที่สูงส่วนมากแล้วสเตรนเกจมไม่สามารถที่จะทำได้ในลักษณะลวดเส้นตรงยาวเพราะทำให้เกจยาวมากเกินไป

เมื่อสเตรนเกจชนิดความต้านทานไฟฟ้ารู้จักครั้งแรก (1936-1956) นั้น เกจทำจากเส้นลวดที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กมากมีรูปร่างเป็นตาราง ภายหลังปี 1950 เกจส่วนใหญ่จะทำจาก Ultra-thin metal foil โดยการใช้กระบวนการโพโตเอตชิง (Protoetching process) กระบวนการนี้สามารถจะทำเกจในลักษณะใดก็ได้ โดยเกจจะมีขนาดเล็กมาก เกจมาตรฐานที่ใช้ปัจจุบันมีความต้านทาน 120 Ω และ 350

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Ω แต่ในบางกรณี อาจใช้ 500 Ω และ 1000 Ω เกจแผ่นโลหะบางส่วนมากทำจาก Constant , Karmar หรือ Isoelastic alloys

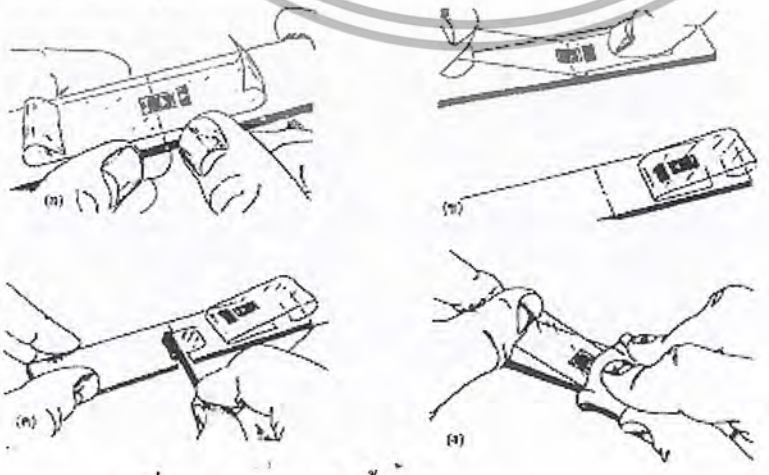
สเตรนเกจหรือกริดฟิล์มโลหะขึ้นรอยนี้ จะมีลักษณะบอบบางเปราะและฉีกขาดได้ง่าย เพื่อเป็นการหลีกเลี่ยงปัญหาดังกล่าว ฟิล์มโลหะที่ถูกผนึกไว้กับแผ่นพลาสติกบงก่อนเข้ากระบวนการโฟโตเอตชิง แผ่นพลาสติกบางจะทำหน้าที่เป็นวัสดุรองรับ ตัวรองรับจะมีเครื่องหมายเส้นกึ่งกลางของความยาวและความกว้างของเกจ เพื่อความสะดวกในการติดตั้ง และทำหน้าที่เป็นฉนวนไฟฟ้า ระหว่างสเตรนเกจกับวัสดุตัวอย่างที่นำสเตรนเกจมาติดตั้ง

สเตรนเกจที่ใช้งานกันอยู่ทั่วๆไปนั้นจะใช้ Polyimide plastic ที่มีความเหนียวและยืดหยุ่นเป็นวัสดุรองรับ สำหรับการใช้สเตรนเกจเป็นทรานสดิวเซอร์ ซึ่งความถูกต้องแม่นยำและความเป็นเชิงเส้นมีความสำคัญมากๆจะใช้อีพอกซี่ที่บางมาก เปราะและมีโมดุลัสสูงเป็นตัวรองรับ เมื่อสเตรนเกจนำไปใช้งานที่มีความเครียดเป็นวัฏจักรระดับสูง หรือเมื่อใช้ที่อุณหภูมิสูง -750 $^{\circ}$F (400°C) จะใช้อีพอกซีเสรีมใยแก้ว (Glass- rreinforceed epoxy) เป็นตัวรองรับ

สำหรับการใช้งานที่อุณหภูมิสูงมากๆเกจที่สามารถถอดตัวรองรับออกได้ก็มีใช้ ตัวรองรับจะถูกถอดออกระหว่างการติดตั้งเกจ ตัวยึดเซรามิกจะถูกใช้เพื่อรักษารูปร่างของสเตรนเกจ และเป็นฉนวนระหว่างเกจวัสดุตัวอย่างที่ติดเกจ

2.3.2 การติดตั้งสเตรนเกจ

การติดตั้งสเตรนเกจชนิดเคลือบ ซึ่งเป็นเกจที่มีความแม่นยำและมีคุณภาพสูง ต้องติดกับวัสดุตัวอย่าง (Speciment) ด้วยตัวยึด หรือกาที่ถูกต้อง และด้วยวิธีการยึดที่ถูกวิธี ตัวยึดหรือกาวทำหน้าที่สำคัญที่สุด ในระบบวัดความเครียดเพราะว่าเป็นตัวส่งผ่านการกระจัดที่ผิวหน้าของวัสดุตัวอย่างไปยังสเตรนเกจ โดยไม่มีการเพี้ยน จากประสบการณ์พบว่าการเลือกตัวยึดหรือกาว และการอบกาว ที่ไม่ถูกต้องหรือกาวมีความยืดหยุ่นหนืด (Visco elactic) จะทำให้เกิดฮีสเตอร์ซีส และสัญญาณสูญหาย เนื่องจากการผ่อนคลายความเค้น การติดตั้งที่ให้ผลลัพธ์ดีที่สุดคือ เมื่อติดตั้งแล้วแข็งแรง ความหนืดต่ำ อบกาวอย่างดี ซึ่งมีรูปแบบเป็นเส้นเชื่อมยืดหยุ่นที



รูปที่ 2.15 แสดงการติดตั้งสเตรนเกจ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผิวของชิ้นส่วนซึ่งจะเอาเกจไปติดตั้งต้องมีการเตรียมอย่างระมัดระวังก่อนการติดตั้งเกจ การเตรียมนี้จะประกอบด้วยการขัดสีและฝุ่นออก แล้วใช้กระดาษทรายขัดผิวให้เรียบ ไม่ต้องให้เป็นมันวาว ใช้สารละลายกำจัดไขมันและน้ำออกสุดท้ายผิวของชิ้นงาน หรือวัสดุตัวอย่างอย่างควรกัดด้วยสารสะลาย เพื่อให้กาวติดผิวชิ้นส่วนหรือของตัวอย่างถูกต้อง ตามกระบวนการทางเคมี

ต่อจากนั้นก็กำหนดตำแหน่งติดตั้งบนวัสดุตัวอย่างและเกจโดยไม่ต้องใช้กาว ทำเครื่องหมายบางๆ บนเทปใสที่ติดเกจไว้ ดังแสดงในรูป 1-(ก) จากนั้นก็ดึงปลายเทปใสข้างหนึ่งขึ้น แล้วทำเครื่องหมายใต้ตำแหน่งเกจบนวัสดุตัวอย่างนั้นตามรูปที่ 1-(ข) ผสมกาวแล้วทาบนวัสดุตัวอย่างตรงที่ทำเครื่องหมายใต้เกจดังรูปที่1- (ค) ติดเกจลงที่ตำแหน่งเดิมด้วยเทปกดเกจด้วยนิ้วจนกระทั่งกาวส่วนเกินที่อยู่ใต้เกจถูกรีดออกมาที่ขอบของเกจเป็นเส้นเชื่อมบางๆ ดังรูป 1(ง)

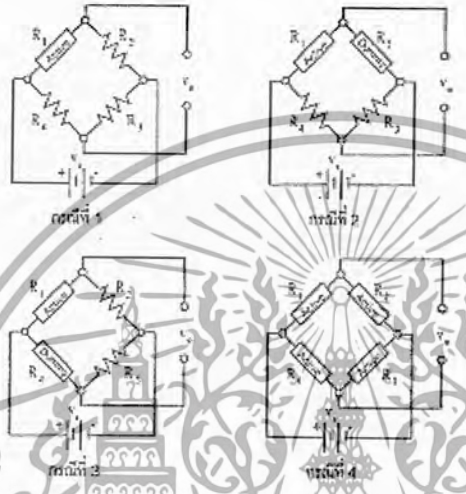
เมื่อทำการติดตั้งเกจนั้น กาวจะต้องอยู่ภายใต้แรงกดและอุณหภูมิที่ถูกต้องในช่วงเวลาที่ต้องการ เพื่อให้แน่ใจว่าการอบกาวนั้นสมบูรณ์ กระบวนอบนั้นเป็นสิ่งสำคัญเพราะว่ากาวจะขยายตัวในระหว่างมีความร้อนเกิดขึ้น จากประสบการณ์ปริมาณมากก็อาจจะทำให้เกจผิดรูปไปเนื่องจากกาวมีความแข็งแรงเพียงพอที่จะมีผลต่อการเปลี่ยนรูปของเกจ การเปลี่ยนแปลงปริมาตรของกาวมีอิทธิพลต่อความต้านทานของเกจ ที่สำคัญอย่างยิ่งคือการหดตัวหลังการอบ ซึ่งมีผลต่อความต้านทานของเกจตลอดไปภายหลังกาวถูกอบอย่างสมบูรณ์ ถ้าการวัดความเครียดของเกจซึ่งกาวมีการโพลิเมอร์ไรซ์ไม่สมบูรณ์เป็นเวลานาน สัญญาณจากเกจจะเลื่อนไหลไปตามเวลา และความแม่นยำของข้อมูลจะเสื่อมไปอย่างมาก

ในการติดตั้งเกจ กาวที่ใช้มีสองชนิดคือ ไซยาโนอะครีเลต (Cyanoacrylate) และอีพอกซีไซยาโนอะครีเลต (Epoxy cyanoacrylate) มีข้อดีคือใช้ติดตั้งง่ายไม่ต้องการความร้อนสามารถใช้แรงกดเบาๆ โดยใช้หัวแม่มือเพียง 10 นาทีก็พอที่จะทำให้เกิดการพอลิเมอร์ไรซ์ได้สมบูรณ์ ข้อเสียของกาวชนิดนี้คือเสื่อมความแข็งแรง เมื่อใช้ไปนานๆเมื่อดูดซับน้ำ และเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นในเรื่องเหล่านี้อีพอกซี่จะดีกว่า อย่างไรก็ตามอีพอกซีใช้ยากกว่าเพราะต้องใช้ความดัน ภายหลังการติดกาวเรียบร้อยแล้วควรจะป้องกันเกจจากน้ำ โดยการเคลือบด้วยขี้ผึ้ง หรือ น้ำยาขัดเงาพอลียูริเทน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4 วงจรปรับแต่งสัญญาณวีตสโตนบริดจ์

วีตสโตนบริดจ์เป็นวงจรที่ธรรมดาที่สุดที่ใช้แปลงผันการเปลี่ยนแปลง $\Delta R / R$ จากสเตรนเกจเป็นแรงดันเอาต์พุต V_O การใช้งานสำหรับจุดประสงค์นี้จะได้พิจารณาในหัวข้อนี้ คำถามแรกที่เกี่ยวกับการใช้วีตสโตนบริดจ์สำหรับการวัดความเครียด คือจะต่อเกจเข้าที่ตำแหน่งไหนของบริดจ์ คำตอบของคำถามนี้พิจารณาจากการจัดเรียงบริดจ์ที่ใช้กันทั่วไป 4 กรณีดังนี้



รูป 2.16 แสดงการจัดสเตรนเกจ 4 แบบ ในวงจรวีตสโตนบริดจ์

กรณีที่1 การจัดบริดจ์เพื่อใช้งานเกจเพียงตัวเดียว โดยติดตั้งเกจไว้บนตำแหน่ง R_1 ซึ่งจะได้เกจสำหรับวัดความเครียดได้ทั้งแบบสถิตและพลวัต เมื่อไม่จำเป็นต้องคำนึงถึงการชดเชยอุณหภูมิ ความต้านทาน $R_1 = R_g$ และความต้านทานอื่นๆ อีก 3 ตัว จะถูกเลือกเพื่อให้มีความไวมากที่สุด ในขณะที่ต้องการรักษาเงื่อนไขการสมดุลไว้ที่ $R_1 R_3 = R_2 R_4$

ความไว S_s ของระบบสเตรนเกจวีตสโตนบริดจ์นิยามว่าเป็นผลคูณของความไวของเกจ S_e

$$S_s = S_g S_c = \frac{\Delta R_g / R_g}{\varepsilon}\left(\frac{\Delta V_0}{\Delta R_g / R_g}\right) = \frac{\Delta V_0}{\varepsilon} \qquad \text{.....(2.36)}$$

จากสมการ $\dfrac{\Delta R}{R} = S_g \varepsilon$ และ $S_{cv} = \dfrac{r}{1+r}\sqrt{P_t R_t}$

จะได้

$$S_s = \frac{r}{1+r} S_g \sqrt{P_g R_g} \qquad \text{.....(2.37)}$$

จากสมการ 5.2 แสดงว่าความไวของระบบถูกควบคุมโดยประสิทธิภาพของวงจร r/(1+r)และคุณลักษณะของสเตรนเกจ S_g, P_g, R_g ที่สำคัญที่สุดคือคุณลักษณะของสเตรนเกจซึ่งเปลี่ยนได้ช่วงกว้างด้วยการเลือกเกจ S_g, R_g ขึ้นอยู่กับวัตถุที่มาใช้ทำเกจ และรูปแบบของเกจ ส่วนกำลังสูญเสีย P_g เป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คุณลักษณะของเกจที่ยากที่จะกำหนดลงไปเนื่องจาก P_g ขึ้นอยู่กับการนำความร้อน และความสามารถในการรับความร้อนของวัสดุตัวอย่างที่จะนำเกจไปติด ดังนั้นจึงนิยามความหนาแน่นกำลัง(Power density) P_D ขึ้นมาโดยใช้พิจารณาโดยนิยามว่า

$$P_D = \frac{P_g}{A} \qquad \text{.....(2.38)}$$

เมื่อ P_g = คือกำลังสูญเสียที่เกจสามารถขับออกมา

A = คือพื้นที่ของเกจส่วนที่เป็นกริด

ความหนาแน่นกำลัง P_D ที่แนะนำสำหรับวัสดุต่างๆ และ ของทดสอบชนิดต่างๆ กำหนดในตาราง2.3

ตาราง2.3ความหนาแน่นกำลังที่แนะนำ

Power Density p_D		
W/in²	W/mm²	Speciment Conditions
5-10	0.008-0.016	Heavy aluminum or coppersections
2-5	0.003-0.008	Heavy steel sections
1-2	0.0015-0.003	Thin steel sections
0.2-0.5	0.0003-0.0008	Fiberglass, glass, ceramics
0.02-0.05	0.00003-0.00008	Unfilled plastics

จากรูปที่2.16 เมื่อแขนของบริดจ์ทั้ง 4 มีความต้านทานเท่ากัน r= 1 ในกรณีนี้แรงดันบริดจ์หาได้จากสมการ

$$V_s = 2\sqrt{Ap_D R_g} \qquad \text{.....(2.39)}$$

เมื่อ r ≠ 1 แรงดันบริดจ์ จะหาได้จากสมการ

$$V_s = (1+r)\sqrt{Ap_D R_g} \qquad \text{.....(2.40)}$$

กำลังสูญเสียความร้อนที่ถูกปล่อยออกมาโดยเกจจะเปลี่ยนแปลงโดยขอบเขตที่กว้างมาก ขึ้นอยู่กับขนาดของเกจและวัสดุตัวอย่างที่นำเกจไปติดตั้ง

ความไวของระบบสามารถทำให้สูงสุดได้โดยเลือกเกจที่มีความต้านทานสูงๆและมีพื้นที่กริดมากๆซึ่งมีความผิดพลาดที่ยอมรับได้ที่ไม่เปลี่ยนแปลง อันเนื่องจากผลของความยาวและความกว้างของเกจ

ตัวประกอบที่สอง ที่ควบคุมความไวของระบบคือประสิทธิภาพของวงจร r/(1+r) ค่าของr ควรเลือกให้ประสิทธิภาพวงจรเพิ่มขึ้นแต่ไม่ควรสูงมากจนต้องเพิ่มแรงดันที่กำหนดโดนสมการ 5.5 โดยปกติ r จะอยู่ในช่วง 3-5 ซึ่งจะให้ประสิทธิภาพของวงจรอยู่ระหว่าง 75-83%

กรณีที่ 2 การจัดวงจรบริดจ์แบบนี้จะใช้เกจ 2 ตัว ตัวหนึ่งเป็นเกจ แอกตีฟ (Active gage) ใช้สำหรับการวัดต่อกับแขน R_1 เกจอีกตัวหนึ่งเป็นเกจหลอก (Cummy gage) ต่อกับแขน R_2 ทำหน้าที่เป็นตัวตัดสัญญาณเอาต์พุตของเกจแอกตีฟที่เปลี่ยนไป เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของสิ่งแวดล้อมในช่วงที่ทำการวัด R_3 , R_4 ต่อด้วยความต้านทานคงตัว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เกจแอกตีฟและเกจหลอกต้องมรลักษณะเหมือนกันเกจหลอกควรติดตั้งในตำแหน่งที่ไม่มีความเค้นเกิดขึ้นและต้องอยู่ในสภาวะแวดล้อมอุณหภูมิเดียวกันกับตัวอุปกรณ์และตัวแอกตีฟ

วิธีการจัดเกจเพื่อชอเชย(Compensate)สำหรับอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงความต้านทานของเกจแอกตีฟและเกจหลอก

$$\left(\frac{\Delta R_g}{R_g}\right)_a = \left(\frac{\Delta R_g}{R}\right)_c + \left(\frac{\Delta R_g}{R_g}\right)_{\Delta T} \qquad \text{.....(a)}$$

$$\left(\frac{\Delta R_g}{R_g}\right)_d = \left(\frac{\Delta R_g}{R_g}\right)_{\Delta t} \qquad \text{.....(b)}$$

ในสมการ a และ b ตัวห้อย a และ d แทนActive และ Dummy ตามลำดับตัวห้อย ε และ ΔT แทนผลของความเครียดและอุณหภูมิตามลำดับ แทนสมการ a และ b ลงในสมการ

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

โดยที่ $\Delta R_3 = \Delta R_4 = 0$ จะได้

$$\Delta V_0 = V_S \frac{r}{1+r^2}\left[\left[\frac{\Delta R_g}{R_g}\right]_c + \left[\frac{\Delta R_g}{R_g}\right]_{\Delta T} - \left[\frac{\Delta R_g}{R_g}\right]_{\Delta T}\right] \qquad \text{.....(2.41)}$$

ดังนั้น

$$\Delta V_0 = V_s \frac{r}{(1+r)^2}\left(\frac{\Delta R_g}{R_g}\right)$$

จากสมการจะเห็นว่า มีสาเหตุมาจากการให้ความเครียดกับเกจแอกตีฟ และการชอเชยอุณหภูมิสามารถทำได้สำเร็จ

ด้วยการจัดบริดจ์แบบนี้มีผลให้ r= 1 ดังนั้นความไวระบบจากสมการ(5.2)จะเป็น

$$S_s = \frac{1}{2} S_g \sqrt{P_g R_g} \qquad \text{.....(2.42)}$$

จากสมการ 2.42 แสดงว่าการใช้เกจหลอกที่แขน R_2 ของวีตสโตนบริดจ์เพื่อผลการชดเชยอุณหภูมิ ทำให้ประสิทธิภาพวงจรลดลงเหลือ 50% ลักษณะเด่นที่ไม่ต้องการนี้สามารภหลีกเลี่ยงได้ โดยการจัดเลียงบริดจ์ใหม่ ตามกาณีที่ 3

กรณีที่ 3 ในกาณีที่ 3 นี้ เกจหลอกจะต่อเข้ากับแขน R_4 แทนแขน R_2 เกจแอกทีฟยังคงอยู่ในแขน R_1, R_3, R_4 ยังคงใช้ค่าความต้านทานที่มีค่าความต้านทานคงตัวด้วยการติดตั้งเกจหลอกในตำแหน่งนี้ r จะไม่ถูกจำกัดโดยเงือนไขของการสมดุลและความไวยังคงเหมือนเดิมตามสมการ(5.2)การชดเชยอุณหภูมิเหมือนกับ กรณีที่2 แต่ไม่มีการสูญเสียประสิทธิภาพของวงจรเมื่อเกจหลอกถูกใช้เพื่อชดเชยอุณหภูมิ แขน R_4 จะเป็นตำแหน่งที่ดีที่สุดสำหรับเกจหลอก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กรณีที่4 ในกรณีนี้จะใช้เกจแอกตีฟ 4 ตัว ต่อเข้ากับแขนบริดจ์แขนละเกจ ดังนั้น r = 1 เมื่อเกจติดตั้งอยู่บนวัสดุตัวอย่างเช่น คานยื่น (Cantiliver beam) ที่โก่งงอด้วยความเครียดดึง (Tensile strains) บนเกจ 1 และ เกจ 3 ซึ่งอยู่ที่ผิวของคานและความเครียดอัด (Compressive strains) บนเกจ 2 และ เกจ 4 บนผิวด้านล่างของคานดังนั้น

$$\frac{\Delta R_1}{R_1} = -\frac{\Delta R_2}{R_2} = \frac{\Delta R_3}{R_3} = -\frac{\Delta R_4}{R_4} \qquad \text{..... (C)}$$

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

จะได้ $\Delta V_o = \frac{1}{4} V_s \left[4\frac{\Delta R_g}{R_g}\right] = V_s \frac{R_g}{R_g}$ .....(2.43)

วิตสโตนบริดจ์ได้เพิ่มความต้านทานที่เปลี่ยนค่าได้เป็น 4 ตัวทำให้แรงดันเอาต์พุตเพิ่มขึ้น ดังนั้นความไวของระบบ

$$S_s = \frac{1}{2}\left(4S_g\sqrt{p_g R_g}\right) = 2S_g\sqrt{p_g R_g} \qquad \text{.....(2.44)}$$

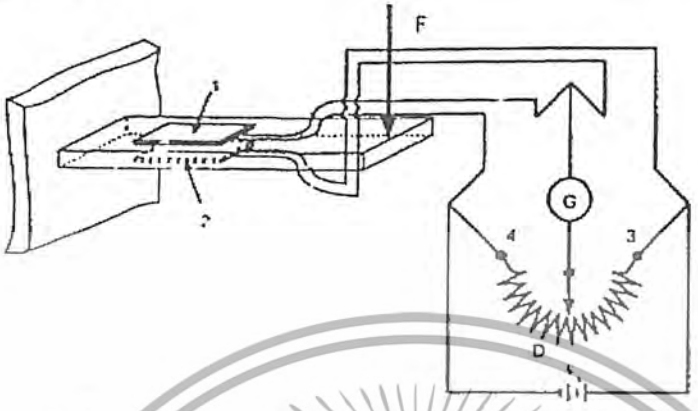
จะเห็นได้ว่ากรณีนี้ความไวของระบบที่ดีที่สุดแต่ราคาเพิ่มมากขึ้น ในกรณีต้องการเพิ่มความไวของระบบอาจใช้วงจรขยายที่มีคุณภาพสูงและอัตราขยายสูงแทนจะถูกกว่า ยกเว้นมีจุดประสงค์อื่นด้วยจึงจะใช้กรณีที่ 4

2.4.1ค่าคงตัวบริดจ์

สเตรนเกจที่นำไปติดกับวัสดุตัวอย่างเพื่อรับรู้ความเครียดเมื่อนำมาต่อเข้ากับวงจรบริดจ์เอาต์พุตที่ออกจากวงจรบริดจ์แต่ละแบบจะไม่เท่ากัน เมื่อนำเอาต์พุตนี้ไปเทียบกับเอาต์พุตที่ได้จากวงจรบริดจ์ในกรณีที่ใช้เกจเพียงตัวเดียวจะได้ค่าคงตัวค่าหนึ่ง เรียกว่า ค่าคงตัวบริดจ์ (Bridge constant) ซึ่งนิยามโดยสมการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

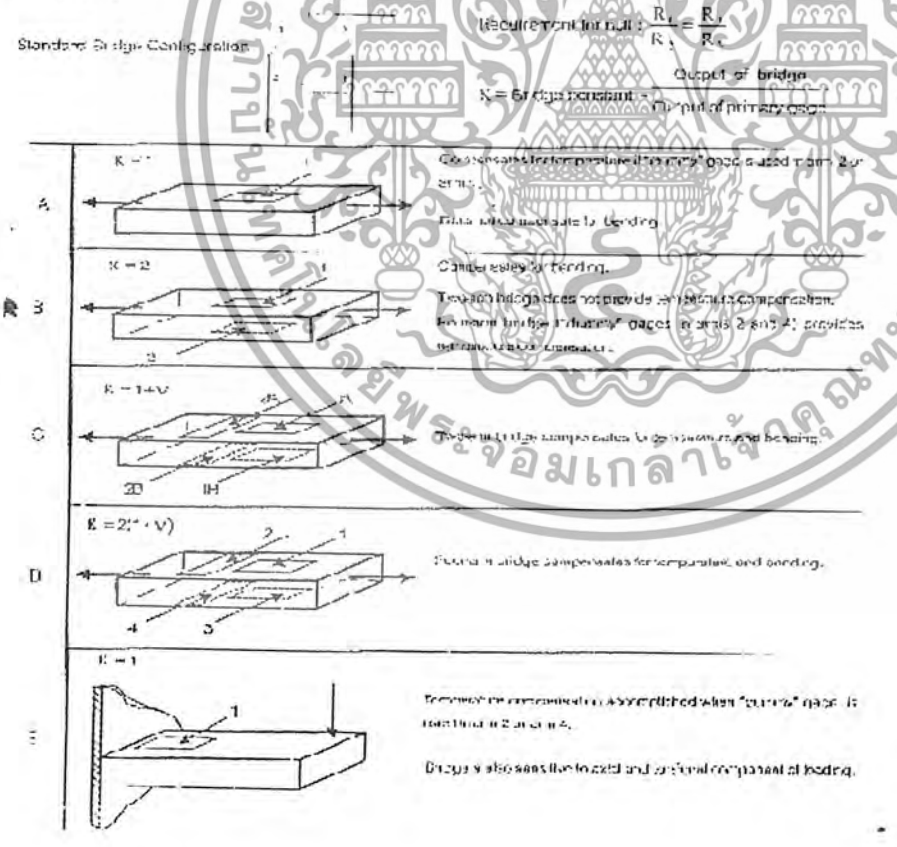
จากรูป 2.16 ค่าคงตัวบริดจ์จะมีค่าเท่ากับ 2 เพราะบริดจ์ให้เอาต์พุตออกมาเป็น 2 เท่าของที่ได้จากการใช้เกจเพียงตัวเดียวรับรู้ความเครียด ถ้าใช้เกจ 4 ตัว ดังกาณีที่ 4 เกจ แต่ละตัวจะให้เอาต์พุตออกมา 1 ใน 4 ของเอาต์พุตจากวงจรบริดจ์



รูปที่ 2.17 การจัดบริดจ์โดยใช้สเตรนเกจรับรู้ความเครียด 2 ตัว

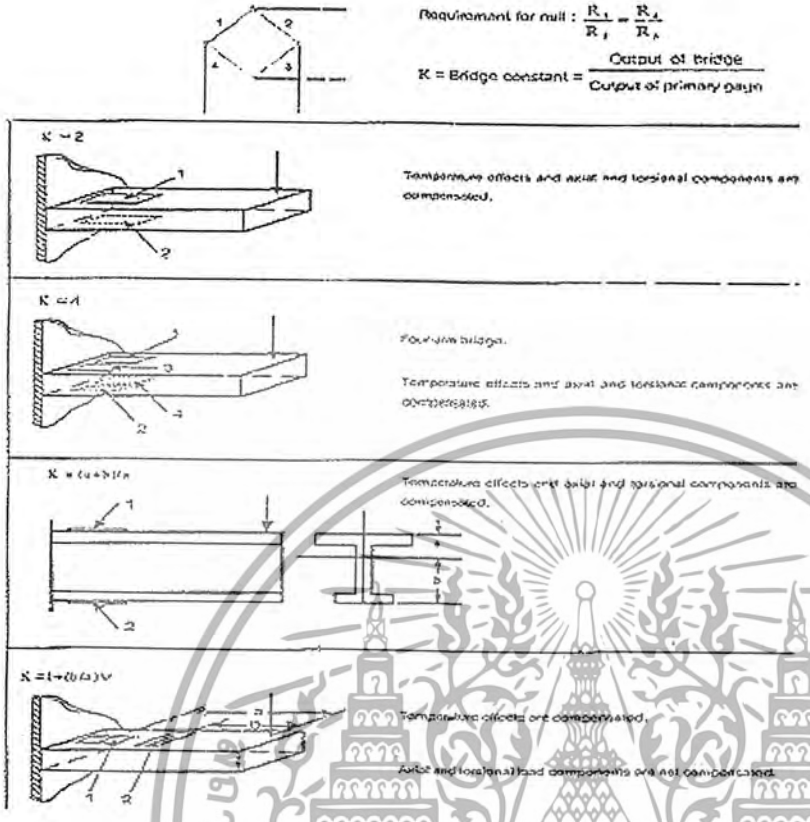
ดังนั้นค่าคงตัวบริดจ์จะเป็น 4 ในกรณีที่ติดตั้งเกจเพื่อรับรู้ความเครียดตามขวาง ค่าคงตัวบริดจ์จะเป็นฟังก์ชั่นของอัตราส่วนปัวซองดังแสดงตาราง2.4

ตาราง 2.4 ข้อแนะนำในการติดตั้งสเตรนเกจ

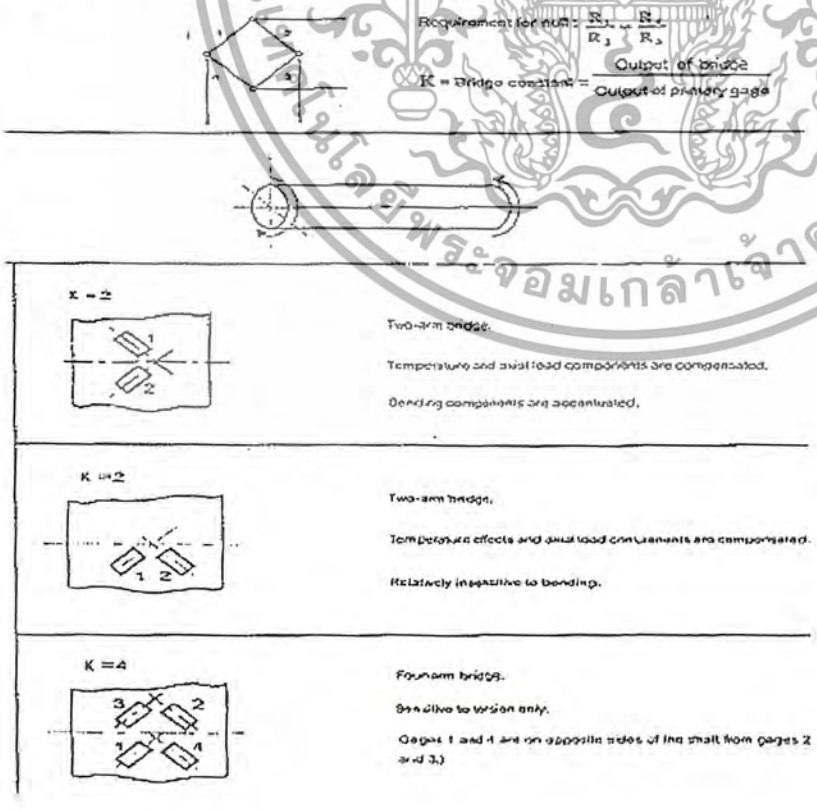


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ต่อ ตาราง 2.4 ข้อแนะนำในการติดตั้งสเตรนเกจ



ต่อ ตาราง2.4 ข้อแนะนำในการติดตั้งสเตรนเกจ



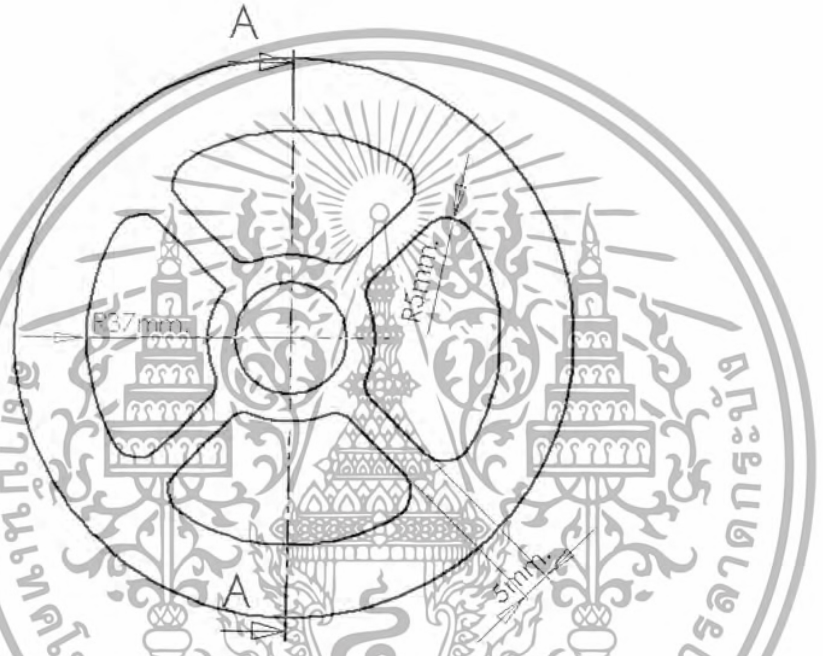
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่3
การคำนวณและการออกแบบ

3.1 การออกแบบขั้นพื้นฐาน

การออกแบบโหลดเซลล์นั้นได้ทำการออกแบบโหลดเซลล์ขึ้นมา 2 ขนาดด้วยกันคือ

1. โหลดเซลล์ที่รับโหลดสูงสุด 50 kg
2. โหลดเซลล์ที่รับโหลดสูงสุด 200 kg



รูปที่ 3.1 แสดงโครงสร้างภายใน

ในการออกแบบโหลดเซลล์นั้น เราจะทำการออกแบบเฉพาะช่วงแขนที่ใช้รองรับน้ำหนักเท่านั้น ส่วนขนาดอื่นๆนั้นเราจะกำหนดขึ้นมาเอง ซึ่งโหลดเซลล์ 2ขนาดนี้จะมีขนาดต่างๆเหมือนกันแต่จะมีขนาดความกว้างและความหนาของแขนที่ใช้รองรับน้ำหนักเท่านั้นที่แตกต่างกัน ในการออกแบบขนาดความกว้างและความหนาของแขนที่จะใช้เป็นส่วนรองรับน้ำหนักนั้น จะมีการออกแบบด้วยกัน 2 ขั้นตอนดังนี้

1. การออกแบบพื้นฐานโดยใช้ทฤษฎีการออกแบบ
2. การออกแบบโดยการใช้โปรแกรม ไฟไนเอลิเมนต์ มาหาขนาดที่เหมาะสมที่สุด

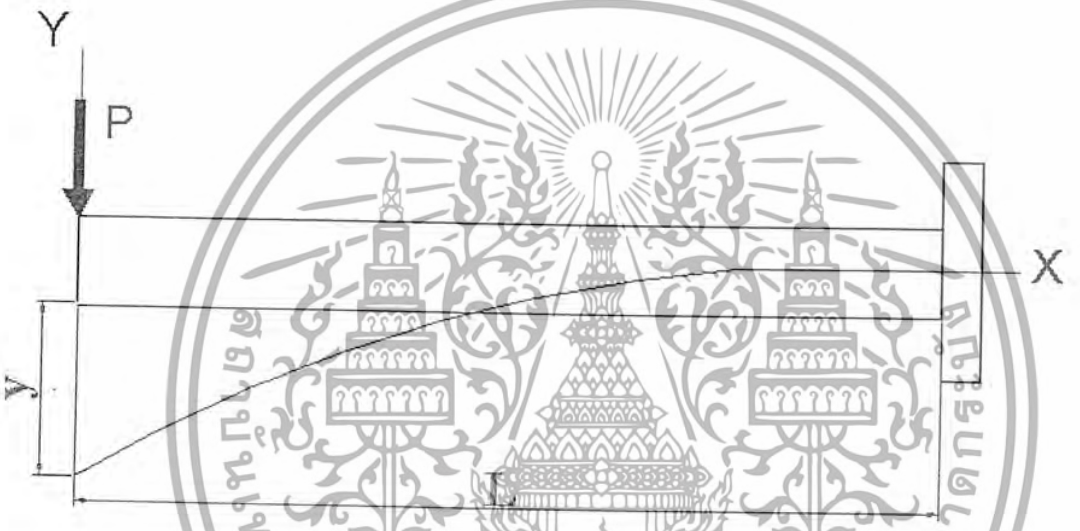
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2การออกแบบพื้นฐานโดยใช้ทฤษฎีการออกแบบ

การทำการออกแบบโหลดเซลล์ทั้ง 2 ขนาดคือโหลดเซลล์ที่รับภาระสูงสุดได้50 kg และโหลดเซลล์ที่รับภาระสูงสุดได้ 200 kg จะมีหลักการออกแบบที่เหมือนกัน ดั้งนั้นในปริญญานิพนธ์เล่มนี้จึงจะขอแสดงวิธีการออกแบบของโหลดเซลล์ขนาด 200kg เท่านั้น

3.2.1 การคำนวณ

จากรูปที่ 3.2 เราจะเห็นว่า แขนรับน้ำหนักจะเป็นแบบสี่แขนยึดติดกัน ดังนั้นเราจึงทำการสมมติว่าแขนรับน้ำหนักเป็น Cantilevered Beam โดยเราแบ่งมาพิจารณาเพียงแขนเดียว



รูปที่ 3.2 แสดงแขนรับน้ำหนักเป็น Cantilevered Beam

วัสดุที่ใช้นั้นมีค่าความเค้นดึงกราก (σ_y) มีค่าเท่ากับ 117Mpa และมีความยาวของแขนรับน้ำหนักเท่ากับ 22 mm และขนาดของโหลดที่มากระทำสูงสุดคือ 200 kg แต่เนื่องจากเราแยกมาพิจารณาออกมาเพียงแขนเดียว โหลดที่มากระทำสูงสุดจึงต้อง หาร4 ดังนั้น เราจะคิดโหลดที่มากระทำเพียง 50 kg จากทฤษฎีการออกแบบเราเลือกใช้ค่าความปลอดภัยเท่ากับ $N_y = 3$

โมเมนต์ดัดที่หน้าตัด AA ; $M = 50kgx9.81\ m/s^2 \times 22mm = 10791\ N/mm^2$

โมเมนต์ความเฉื่อยของพื้นที่ $I = \frac{bh^3}{12}$ โดยเราทำการกำหนดให้ 2b=h

ดังนั้น จะได้ $I = \frac{h^4}{24}$

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความเค้นดัดในคาน $\sigma_b = \frac{Mc}{I}$

$$\frac{117}{3}\frac{N}{mm^2} = \frac{64,746}{h^3}$$

ดังนั้น $h = 12$ mm

จาก $2b = h$ ดังนั้น $b = 6$

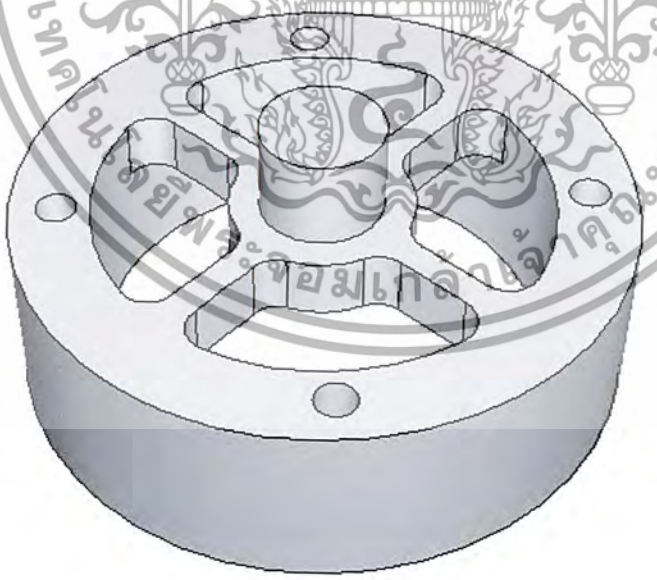
3.3 การวิเคราะห์ Loadcell โดยใช้โปรแกรม Abaqus

วิธีทำ

นำค่าที่ได้จากการคำนวณมาสร้างโมเดลในโปรแกรม ABAQUS โดยกำหนดใช้ค่าความหนาของคาน = 12 mm และค่าความกว้างของคาน = 6 mm. ผลที่ได้จากการ Simulation มีค่าน้อยค่าที่คำนวณไว้มากเพราะที่ตัวโหลดเซลล์มี Fillet ที่คานทั้ง 4 จึงทำการลดขนาดคานลงมาเป็นความหนา = 10 mm. และค่าความกว้าง = 5 mm.

Module Part

Part 1 เป็นตัวโหลดเซลล์ สร้างเป็นแบบ 3D ค่า Approximate size 0.2



รูปที่ 3.3 แสดงโหลดเซลล์ที่ออกแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Module Properties

ทำการสร้าง Material

ทำการสร้างวัสดุโดยตั้งชื่อว่า Alumminum วัสดุมีค่า E (Young's modulus) = 73.1 Gpa และ Piosson's ratio = 0.35

Assign Section

Assign ตัว load cell ให้มีคุณสมบัติเป็น Alumminum

Module Assemby

ประกอบ PART โดยการ Instance ตัว Loadcell และทำการ Partition ที่ผิวล่างเพื่อสร้างเป็น Set A

รูปที่ 3.4 แสดงการประกอบ Part

Module step

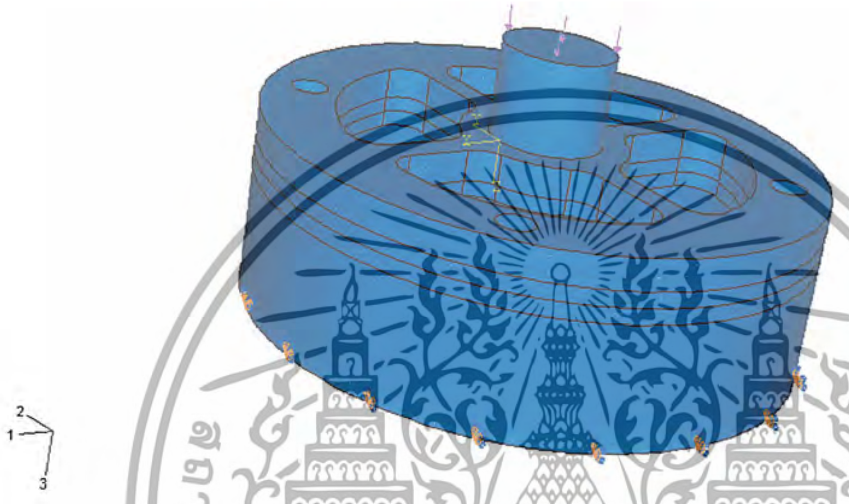
สร้าง 1 step วิเคราะห์ เป็นแบบ static และกำหนดเวลาให้เป็น 0.005สร้าง Field Output Request editor ก่อนสร้างต้องสร้าง set A ที่ตัวLoadcell ก่อนจากนั้น ไปสร้าง Field Output โดย สร้างแต่ U (Translation and rotation)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Module Load

สร้าง Load โดยสร้างเป็น static general

สร้าง Boundary Condition เป็นแบบ Displacement/Rotation โดยยึดที่ฐานโดยกำหนดค่า = u1,u2,u3,ur1,ur2,ur3 = 0



รูป 3.5 แสดงการกำหนดบริเวณจุดยึด

Module Mesh

ก่อนจะทำการ Mesh ให้กับ Assembly จะต้องทำการแบ่ง Partition ก่อนเพราะสีบน Model ของตัว Loadcell นั้นเป็นสีส้มจะต้องทำให้เป็นสีเขียวหรือสีเหลืองก่อน วิธีการทำคือ เข้าไปที่ Partition เลือกที่ cell แล้วเลือกที่โมเดล แล้วเลือกแบบ three point แล้วเลือกตัดที่แนวนอนของตัว Loadcell โดยตัดที่ตัวที่รับแรงกดที่ๆ 2 คือในรูน็อต ที่ๆ 3 คือ ใต้ตัวคานตัว Loadcell ก็จะเป็นสีเหลืองทั้งหมด

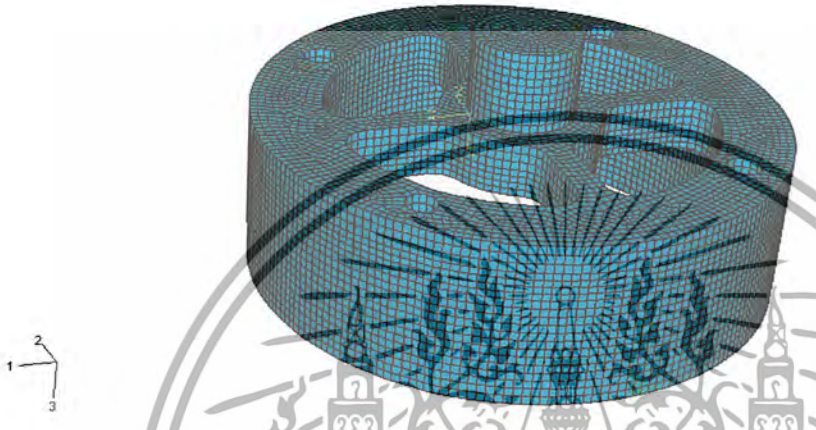
Mesh seed

ทำการวาง seed part ให้กับตัวโหลดเซลล์ กำหนดให้เท่ากับ 0.002

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Mesh Assembly

กดเลือกแล้ว Drag เม็ท์ให้ครอบคลุมทั้งตัว Loadcell และก้อน Mass ก็จะได้ผลลัพธ์ดังรูปข้างล่าง



รูปที่ 3.6 แสดงการตี Mesh

NUMBER OF ELEMENTS IS 19890

NUMBER OF NODES IS 24912

NUMBER OF NODES DEFINED BY THE USER 24912

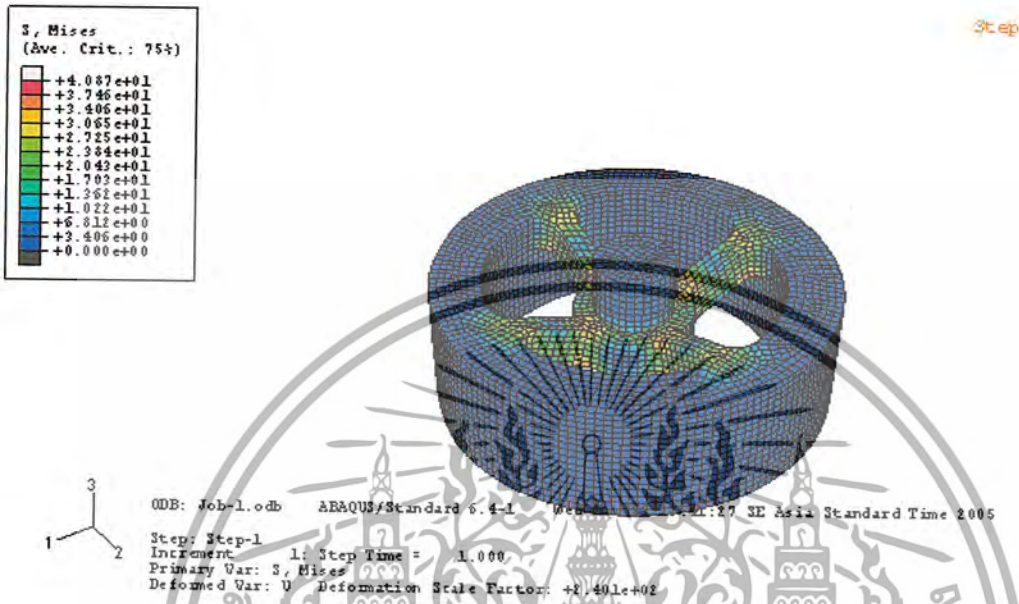
TOTAL NUMBER OF VARIABLES IN THE MODEL 74739

(DEGREES OF FREEDOM PLUS ANY LAGRANGE MULTIPLIER VARIABLES)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

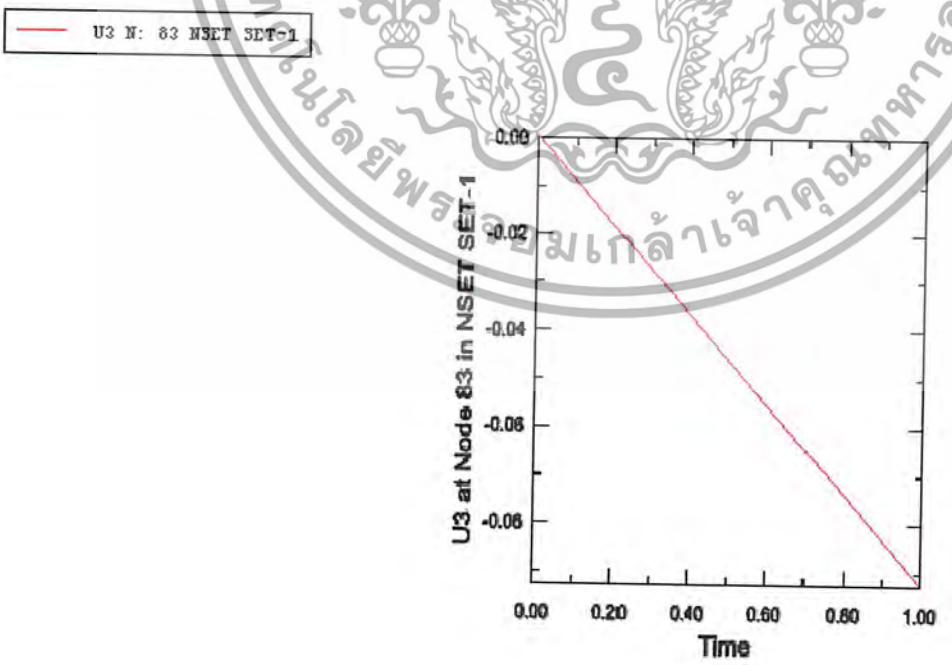
3.4 ผลจากการวิเคราะห์

ค่าความเค้นสูงสุดของโหลดเซลล์ขนาด 50 kg



รูปที่ 3.7 แสดงความเค้นที่เกิดในคานโหลดเซลล์ขนาด 50 kg

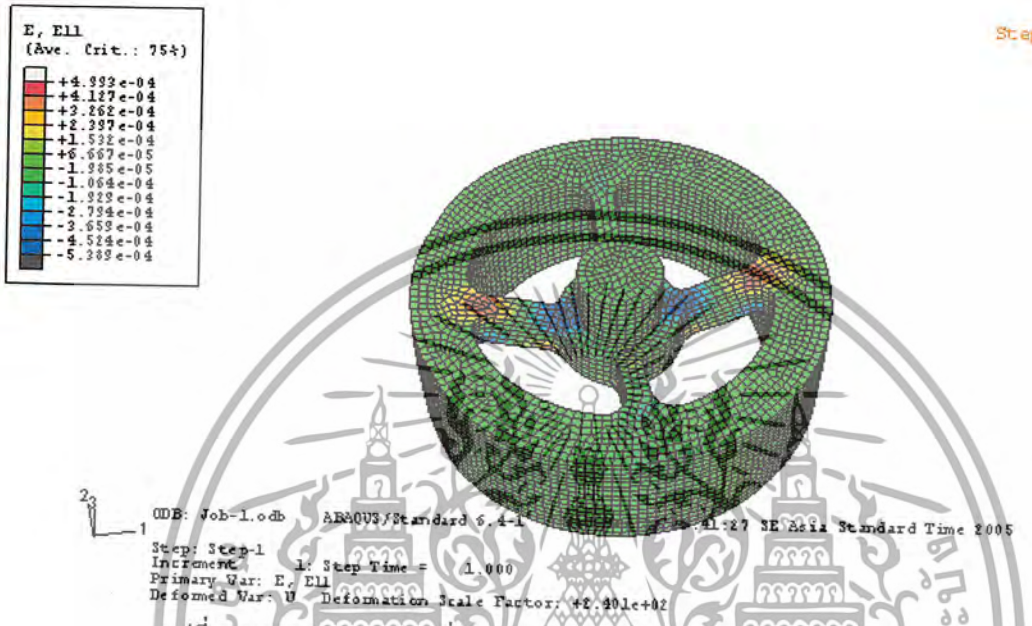
กราฟแสดงระยะยุบตัวของคาน



รูปที่ 3.8 แสดงระยะการยุบตัวของคานโหลดเซลล์ขนาด 50 kg

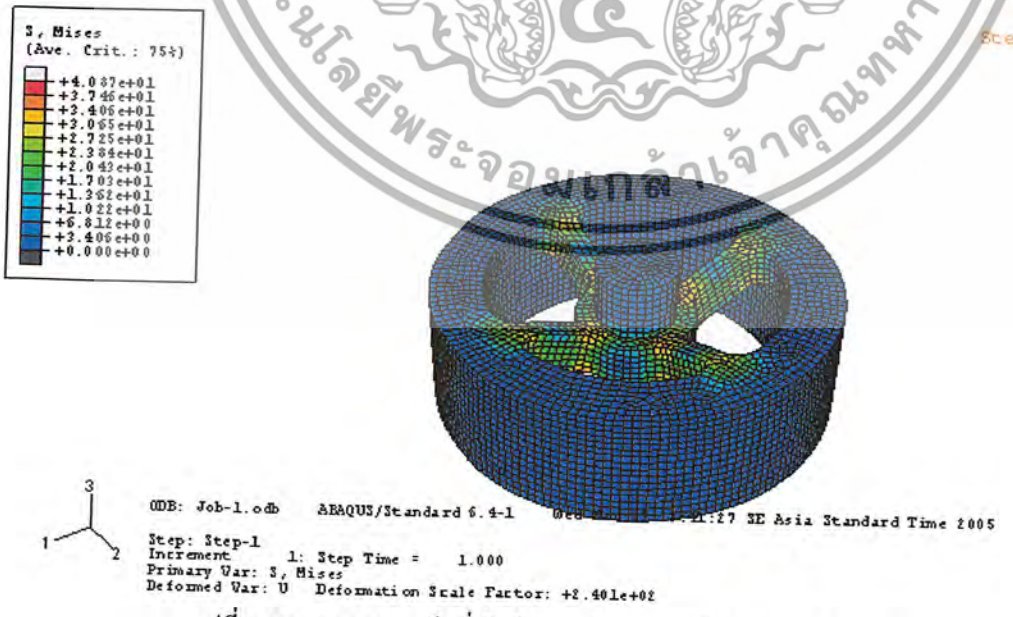
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปแสดงค่าความเครียดตามแนวแกน



รูปที่ 3.9 แสดงความเครียดที่เกิดตามแนวแกนโหลดเซลล์ขนาด 50 kg

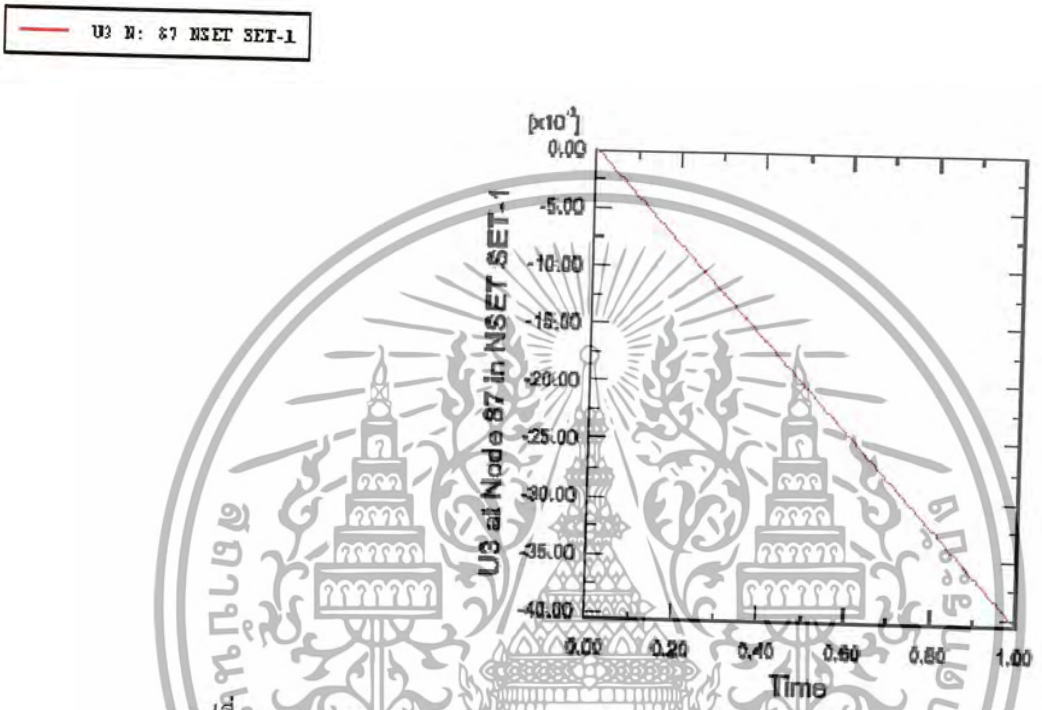
ค่าความเค้นสูงสุดของโหลดเซลล์ 200 kg



รูปที่ 3.10 แสดงความเค้นที่เกิดในคานโหลดเซลล์ขนาด 200 kg

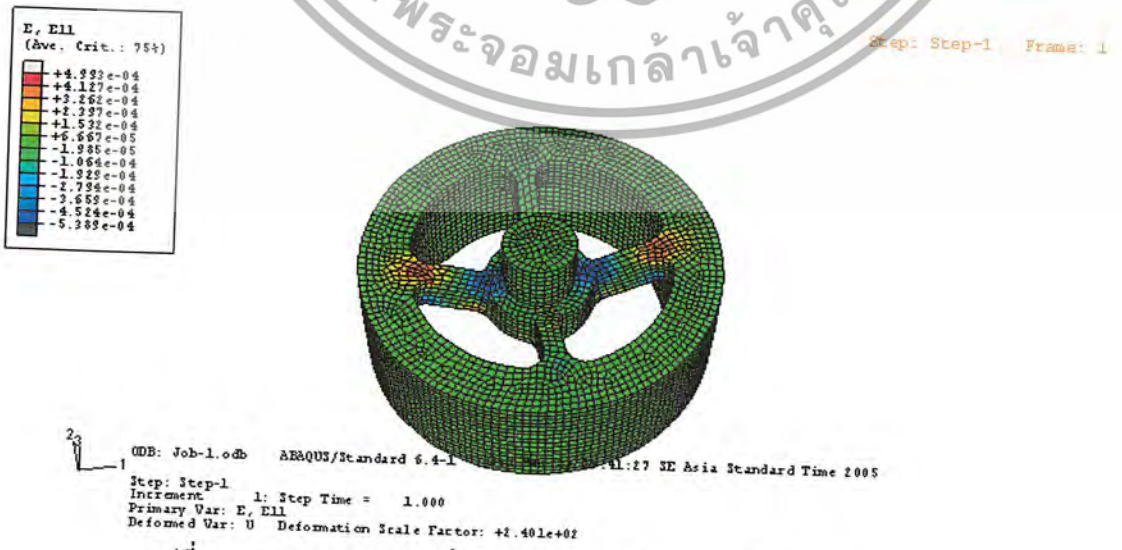
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กราฟแสดงระยะยุบตัวของคาน



รูปที่ 3.11 แสดงระยะการยุบตัวของคานโหลดเซลล์ขนาด 200 kg

กราฟแสดงค่าความเครียดตามแนวแกน



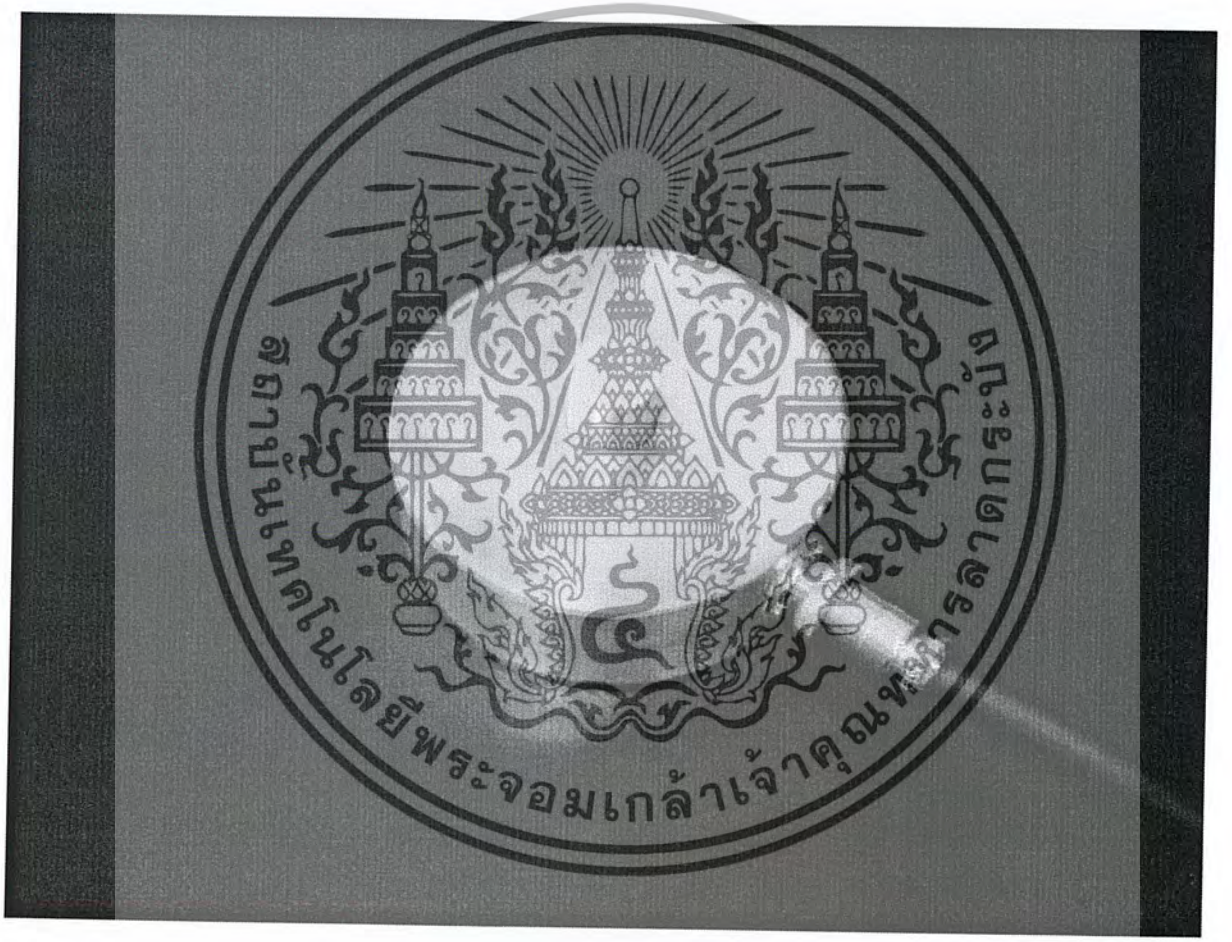
รูปที่ 3.12 แสดงความเครียดที่เกิดตามแนวแกนโหลดเซลล์ขนาด 200 kg

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4
หลักการทำงานและการประยุกต์ใช้งาน

4.1 หลักการทำงาน

หลักการทำงานคือเมื่อมีโหลดมากระทำที่เดื่อยที่ตัวโหลดเซลล์ ก็จะส่งผลให้แขนรับโหลดที่อยู่ข้างในเกิดการเปลี่ยนแปลงความเครียด ทำให้สเตรนเกจที่ติดอยู่ด้านในได้รับความเครียด ทำให้ค่าความต้านทานของสเตรนเกจเกิดการเปลี่ยนแปลง



รูปที่ 4.2 แสดงรูปโหลดเซลล์

4.2 การใช้งาน

โหลดเซลล์นี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานในงานต่างได้เช่น การทำเครื่องชั่งน้ำหนัก การใช้งานกับเครื่องกายภาพบำบัด เป็นต้น โดยการใช้งานคือทำการติดตั้งโหลดเซลล์เข้ากับอุปกร์ต่างๆโดยให้ทำการยึดเดื่อยให้ติดกับอุปกรณ์นั้นๆ โหลดเซลล์นี้สามารถรับแรงกดได้เพียงอย่างเดียว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2การใช้งาน

โหลดเซลล์นี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานในงานต่างได้เช่น การทำเครื่องชั่งน้ำหนัก การใช้งานกับเครื่องกายภาพบำบัด เป็นต้น โดยการใช้งานคือทำการติดตั้งโหลดเซลล์เข้ากับอุปกร์ต่างๆโดยให้ทำการยึดเดื่อยให้ติดกับอุปกรณ์นั้นๆ โหลดเซลล์นี้สามารถรับแรงกดได้เพียงอย่างเดียว

4.3การประยุกต์นำโหลดเซลล์ไปใช้งาน

ปัจจุบันนิยมใช้โหลดเซลล์เป็นอุปกรณ์ในการวัดแรงมีใช้กันอย่างแพร่หลายทั้งในโรงงานอุตสาหกรรมและในสถาบันการศึกษา เช่น ใช้ในเครื่องชั่งน้ำหนักรถบรรทุก และใช้ในเครื่อง Tensile Test แต่โหลดเซลล์ที่ใช้นั้นมีราคาค่อนข้างสูง จึงได้นำโหลดเซลล์ที่ผลิตขึ้นมาประยุกต์ทำเป็นเครื่องชั่งทำหนัก Digital โดยใช้โหลดเซลล์ขนาด 50 กิโลกรัม 4 ตัว มาใช้งานเครื่องชั่งน้ำหนักนี้สามารถรับภาระสูงสุดได้ 200 กิโลกรัม โดยจะใช้ Micro Controller ในการประมวลผลและแสดงผลลัพ์ผ่านทางหน้าจอ LCD

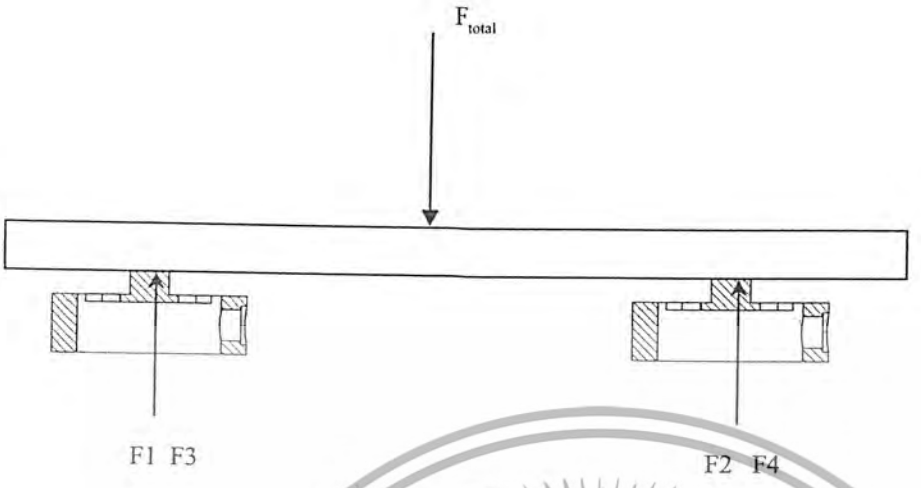
อุปกรณ์

1. โหลดเซลล์ขนาด 50 กิโลกรัม 4 ตัว
2. Amplifier 4 วงจร
3. Micro Controller Pic 16F877 1 ชุด
4. หน้าจอ LCD

แนวคิดที่ใช้ในการออกแบบ

รูปที่ 4.3 แสดงตำแหน่งการวางโหลดเซลล์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.4 แรงปฏิกิริยาที่เกิดที่โหลดเซลล์ 4 ตัว

เขียนสมการได้ดังนี้

$\sum F = 0$

$$F_{total} = F_1 + F_2 + F_3 + F_4$$

นำหลักการนี้มาใช้ในการเขียน โปรแกรมเพื่อประมวลผลต่อไป

รูปที่4.5 แสดงขั้นตอนการทำงานของโปรแกรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

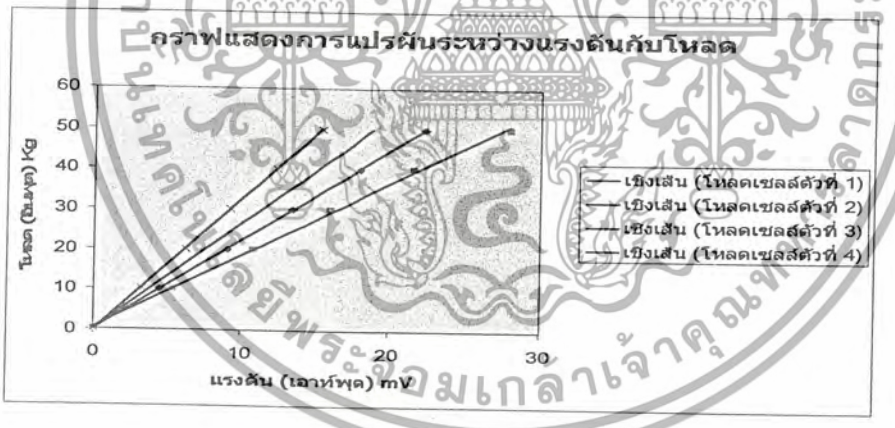
หลักการทำงาน

เมื่อมีภาระที่แท่นเหยียบเกิดขึ้น โหลดเซลล์ทั้ง 4 จะยุบตัวลงจะทำให้เกิดแรงดัน Output ค่าแรงดัน Output นี้จะถูกส่งไปยัง Amplifier เพื่อขยายสัญญาณค่าแรงดัน Output ที่ถูกขยายสัญญาณแล้วนี้จะถูกส่งเข้าไปยัง Micro Controller เพื่อประมวลผลโดยผ่านทาง Port RA_0 , RA_1 , RA_2 , RA_3 โดยที่ Port นี้จะทำการแปลงสัญญาณอนาลอกเป็น Digital เรียบร้อยแล้ว ค่าที่รับเข้ามานี้จะถูกคำนวณโดยใช้สมการเชิงเส้นของโหลดเซลล์แต่ละตัว เพื่อแปลงค่าเป็นน้ำหนัก และนำค่าที่ได้ของโหลดเซลล์แต่ละตัวมาบวกกัน และส่งค่าไปแสดงผลผ่านทางหน้าจอ LCD

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่5
สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง

รูปที่5.1กราฟแสดงการเปรียบเทียบขณะเพิ่มและลดโหลดของโหลดเซลล์ 200 kg



รูปที่5.2 กราฟแสดงการเปรียบเทียบขณะเพิ่มและลดโหลดของโหลดเซลล์ 50 kg ทั้ง 4 ตัว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Load Cell	input (5v)	Hysteresis %	Sentivity	%relative error สูงสุด
1	5	1.6393	0.1203	4.596
2	5	4.0000	0.1003	4.070
3	5	2.1505	0.1831	4.902
4	5	1.3513	0.1486	0.649
200 kg	5	3.2258	0.0312	3.900

รูปที่5.3 แสดงตารางแสดงคุณสมบัติของโหลดเซลล์แต่ละตัว

5.1 สรุป

จากกราฟที่ได้มาเราสามารถกล่าวได้ดังนี้คือกราฟที่ได้มาค่อนข้างเป็นเชิงเส้น แต่ค่าความชันที่ได้มีค่าไม่เท่ากันสาเหตุอันเนื่องมาจากการ Machine เพราะว่าหลักจากที่ได้การ Machine ไม่สามารถที่จะนำวัสดุไปอบคลายความเค้นได้เพราะว่าไม่ทราบค่าส่วนผสมในเนื้อวัสดุ ทำให้โหลดเซลล์แต่ละตัวมีค่าความเค้นตกค้างไม่เท่ากัน แต่สามารถแก้ไขได้ด้วยการคาลิเบชั่น เพราะว่ากราฟของโหลดเซลล์แต่ละตัวนั้นเป็นเชิงเส้น ทำให้สามารถนำโหลดเซลล์นี้ไปประยุกต์ใช้ในงานต่างๆได้จริง

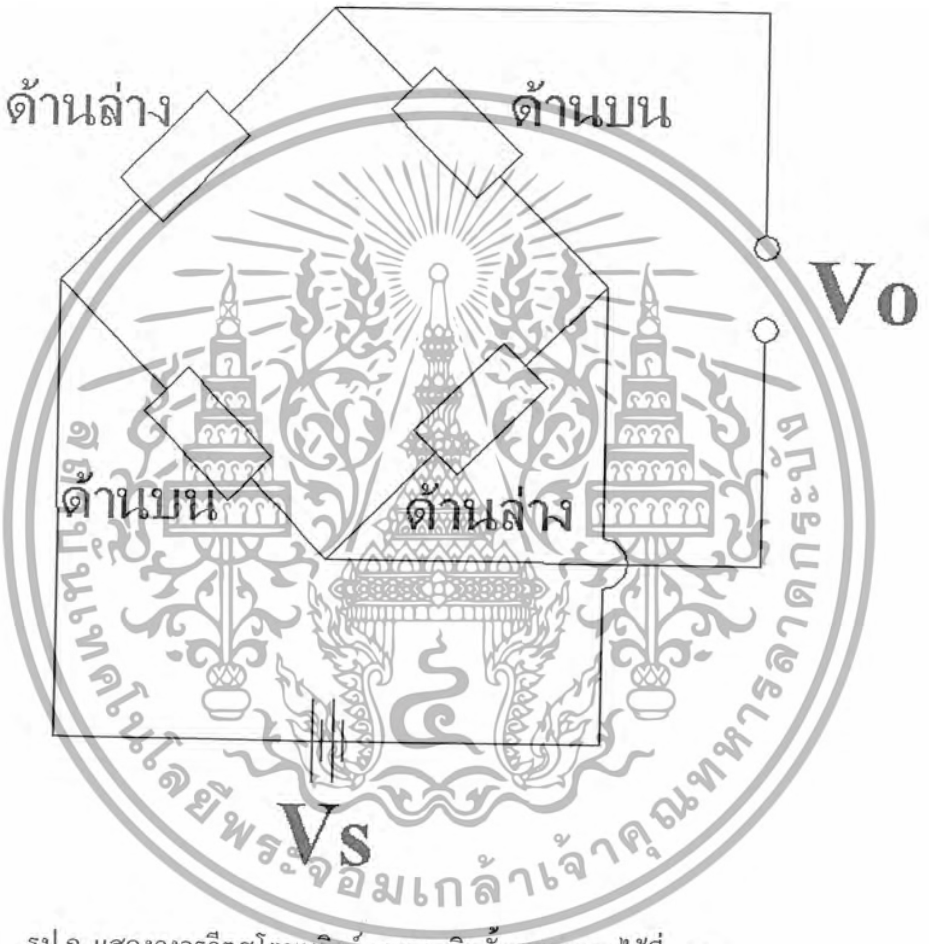
5.2วิจารณ์ผลการทดลอง

เนื่องจากวัสดุที่นำมาใช้ทำโหลดเซลล์ขึ้นมานั้นเป็นวัสดุที่มีคุณภาพต่ำ คือไม่มีส่วนผสมของวัสดุที่แน่นอนทำให้หลังจากการ Machine ไม่สามารถที่จะไปอบคลายความเค้นได้ ทำให้เกิดความเค้นตกค้างในโหลดเซลล์แต่ละตัว เป็นเหตุให้สมการของโหลดเซลล์แต่ละตัวไม่เหมือนกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก.

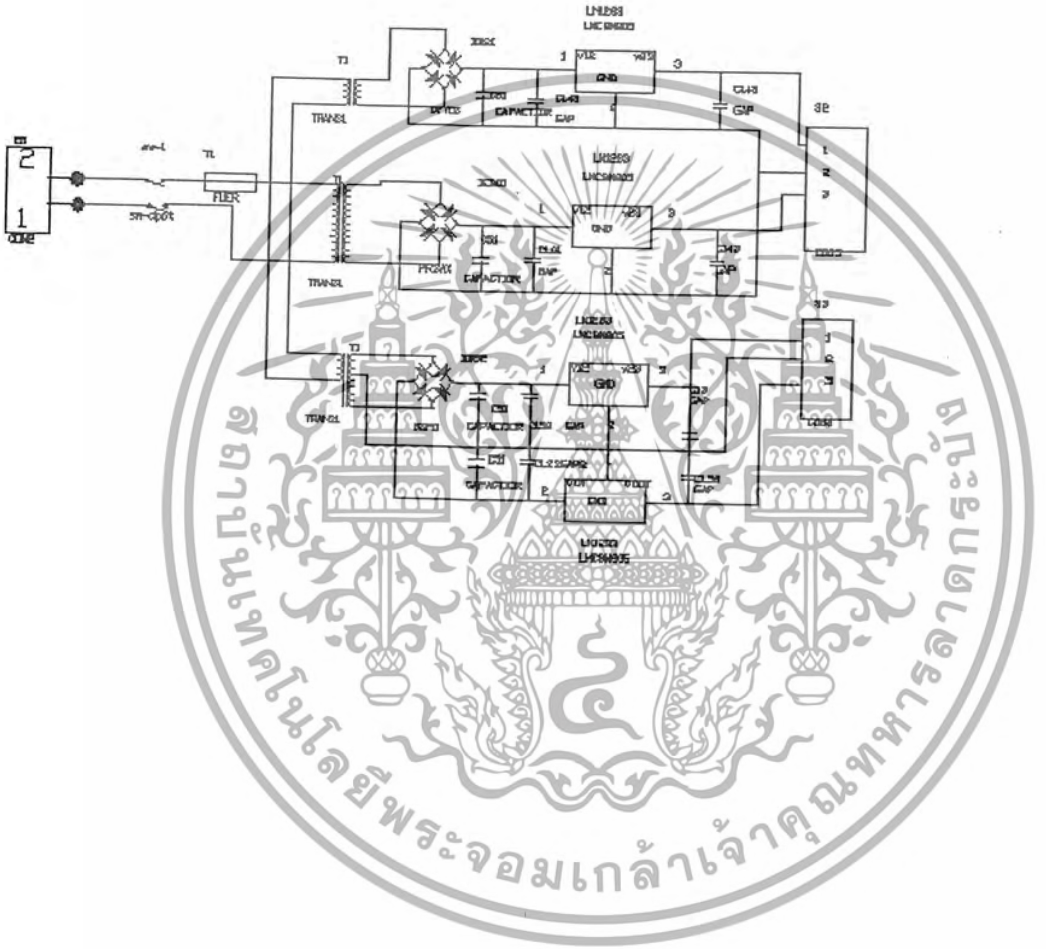
วงจรวีตสโตนบริดจ์



รูป ก. แสดงวงจรวีตสโตนบริดจ์และการติดตั้งสเตรนเกจไว้ที่คาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

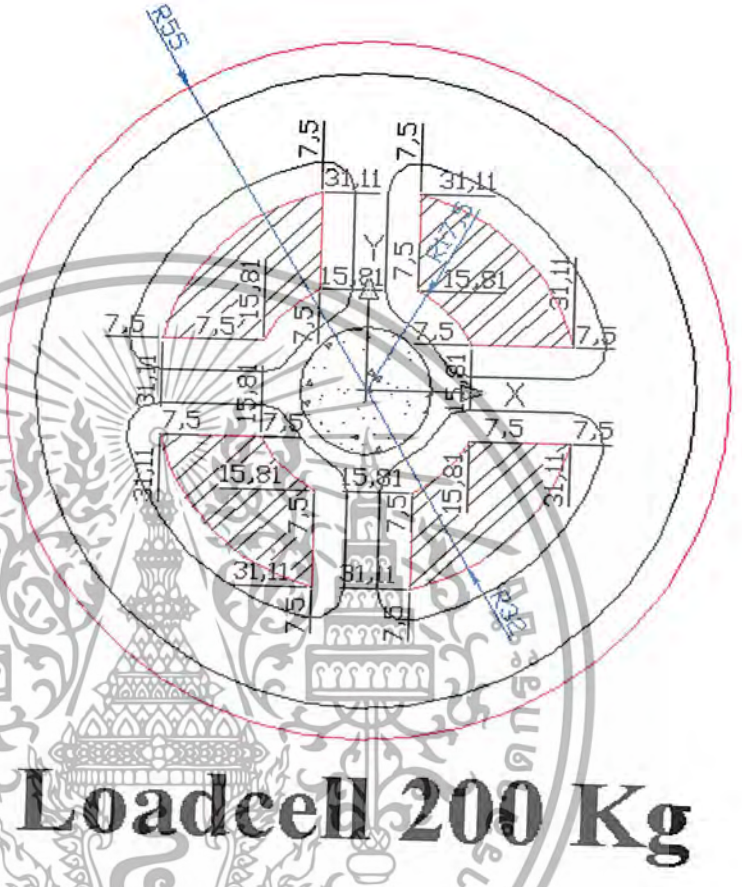
ภาคผนวก ข.
วงจรแหล่งจ่าย



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ค.
รายละเอียดโปรแกรมเครื่องกัด CNC

โปรแกรมกัดโหลดเซลล์ขนาด 200 kg




```
O0098 ;
N1 ;
G17 G21 G40 G49 G80 G90 ;
G92 X0 Y0 Z0 ;
G00 Z-100. S1000 M03;
G01 G43 Z-150. M08 F800 ;
G01 X0 Y0 Z-280. ;
G01 X0 Y50. Z-280. ;
G01 Z-295. ;
G03 X0 Y-50. R50. ;
G03 X0 Y50. R50. ;
G03 X0 Y40. R40. ;
G03 X0 Y-40. R40. ;
G03 X0 Y30. R30. ;
G03 X0 Y-30. R30. ;
G03 X0 Y20. R20. ;
G03 X0 Y-20. R20. ;
G03 X0 Y15. R15. ;
G03 X0 Y-15. R15.;
G01 Z-280. ;
G01 X15.81 Y7.5 ;
G01 Z-310. ;
G01 X31.11 Y7.5 ;
G03 X7.5 Y31.11 R32. ;
G01 X7.5 Y15.81 ;
G02 X15.81 Y7.5 R17.5 ;
G01 Z-280 ;
G01 X-15.81 Y7.5 ;
G01 Z-310 ;
G02 X-7.5 Y15.81 R17.5 ;
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

G02 X-7.5 Y15.81 R17.5 ;

G01 X-7.5 Y31.11 ;

G03 X-31.11 Y7.5 R32. ;

G01 X-15.81 Y7.5 ;

G01 Z-280 ;

G01 X-15.81 Y-7.5 ;

G01 Z-310 ;

G01 X-31.11 Y-7.5 ;

G03 X-7.5 Y-31.11 R32. ;

G01 X-7.5 Y-15.81 ;

G02 X-15.81 Y-7.5 R17.5 ;

G01 Z-280 ;

G01 X7.5 Y-15.81 ;

G01 Z-310 ;

G03 X15.81 Y-7.5 R17.5 ;

G01 X31.11 Y-7.5 ;

G02 X7.5 Y-31.11 R32. ;

G01 X7.5 Y-15.81 ;

G01 Z-280 ;

G01 X0 Y55. ;

G01 Z-310 ;

G01 X0 Y-55. R55. ;

G01 X0 Y55. R55. ;

G01 Z-280

G28 G49 G40 Z-250 ;

M05 M02 ;

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โปรแกรมกัดโหลดเซลล์ขนาด 50 kg

O0099 ;

N1 ;

G17 G21 G40 G49 G80 G90 ;

G92 X0 Y0 Z0 ;

G00 Z-100. S1000 M03;

G01 G43 Z-150. M08 F800 ;

G01 X0 Y0 Z-280.

G01 X0 Y50. Z-280. ;

G01 Z-295. ;

G03 X0 Y-50. R50. ;

G03 X0 Y50. R50. ;

G03 X0 Y40. R40. ;

G03 X0 Y-40. R40. ;

G03 X0 Y30. R30. ;

G03 X0 Y-30. R30. ;

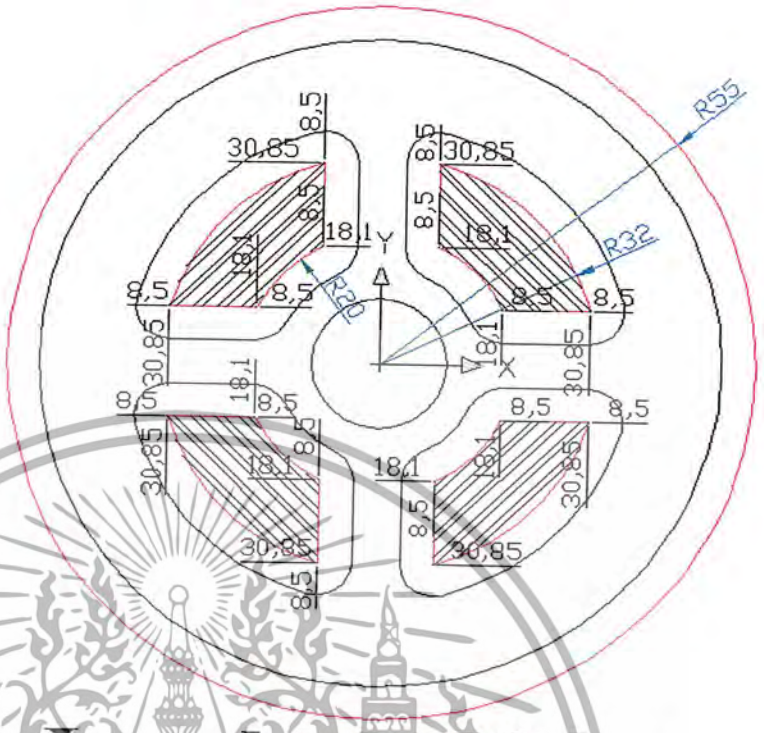
G03 X0 Y20. R20. ;

G03 X0 Y-20. R20. ;

G03 X0 Y15. R15. ;

G03 X0 Y-15. R15. ;

G01 Z-280. ;



Loadcell 50 kg

G01 X18.1 Y8.5 ;

G01 Z-310. ;

G01 X30.85 Y8.5 ;

G03 X8.5 Y30.85 R32. ;

G01 X8.5 Y18.1 ;

G02 X18.1 Y8.5 R20. ;

G01 Z-280 ;

G01 X-18.1 Y8.5 ;

G01 Z-310 ;

G02 X-8.5 Y18.1 R20. ;

G01 X-8.5 Y30.85 ;

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
G01 X-8.5 Y30.85 ;
G03 X-30.85 Y8.5 R32. ;
G01 X-18.1 Y8.5 ;
G01 Z-280 ;
G01 X-18.1 Y-8.5 ;
G01 Z-310 ;
G01 X-30.85 Y-8.5 ;
G03 X-8.5 Y-30.85 R32. ;
G01 X-18.1 Y-8.5 ;
G02 X-18.1 Y-8.5 R20. ;
G01 Z-280 ;
G01 X8.5 Y-18.1;
G01 Z-310 ;
G03 X18.1 Y-8.5 R20. ;
G01 X30.85 Y-8.5 ;
G02 X8.5 Y-30.85 R32. ;
G01 X8.5 Y-18.1 ;
G01 Z-280 ;
G01 X0 Y55. ;
G01 Z-310 ;
G01 X0 Y-55. R55. ;
G01 X0 Y55. R55. ;
G01 Z-280 ;
G28 G49 G40 Z-250 ;
M05 M02 ;
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ง.
รายละเอียดโปรแกรมเครื่องชั่ง

โปรแกรมที่ใช้กับเครื่องชั่งน้ำหนัก

```
#include <16F877A.h> //Standard Header file for the pic16F877 device
#define TxD       PIN_C6     //define Transmitted Data
#define CLOCK_SP  20000000   //Clock Speed(Hz)
// Device Specification
#fuses HS                    //Oscillator mode HS
#fuses NOLVP, NOWDT          //No low voltage Program,nowatchdog timer
#fuses NOPROTECT             // Code no protecion

#device ADC=10               // 10 Bit     (1111111111=1,023)

#use delay (clock=Clock_sp)  // use buit-in function: delay_ms()& delay_us()
#use rs232(baud=9600, xmit=TxD)   // Use serial I/O port (RS232)
#use Fast_io(A)              // programing of the direction register.


/*****************************************************************************
*  Constants
*****************************************************************************/
#define Vbe  0.004887585532746823069403714560049 // Vref/1023 (5/1023)

/*****************************************************************************
  * Function:    main
  * Description: This is the main eatry for the program.
  * Parameters:  nothing
  * Returned:    nothing
*****************************************************************************/
void main (void) {
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
 int16 value[i],i;
 float volt[i],w,w1,w2,w3,wt,x[i],y[i];
 setup_port_a(ALL_ANALOG);     // A0 A1 A2 A3 A5 E0 E1 E2 Ref=Vdd
 setup_adc(ADC_CLOCK_INTERNAL); // Clock Rc
 for(i=0;i<4;i++){
 set_adc_channel(i);        // Read Analog input RA0(channel=0,1,2,3)
 delay_ms(20);
 value[i] = Read_ADC();
 volt[i] = Vbe* (float) value[i];
 x[i] = volt[i];
 }
 do{
 for(i=0;i<4;i++){
 set_adc_channel(i);        // Read Analog input RA0(channel=0,1,2,3)
 delay_ms(20);
 value[i] = Read_ADC();
 volt[i] = Vbe* (float) value[i];
 y[i]= volt[i] – x[i];
 }
 w1 = 175*y[0]-96;
 w2 =  155*y[1]-86;
 w3 = 125 * y[2]-47;
 w4 = 178*y[3]-58 ;
 wt = w1+w2+w3+w4;
 printf("W = %3.1f kg ",wt);
 delay_ms(500);
 }while (True);
}
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรรณานุกรม

[1] สมนึก บุญพาไสว,การวัดและเครื่องมือวัด.สำนักพิมพ์ท้อป จำกัด.

[2] ประจิน พลังสันติสุข,การเรียนรู้และใช้งานไมโครคอนโทรลเลอร์.
สำนักพิมพ์อินโนเวตีฟ เอ็กเพอริเมนต์จำกัด.

[3] รองศาสตราจารย์ มัณฑนา ปราการสมุทร,การเขียนชุดคำสั่งภาษาซี,สำนักพิมพ์ไฮเทคพริ้นติ้ง.

[4] ศ.ดร.วิริทธิ์ อึ้งภากรณ์,การออกแบบเครื่องจักรกล,สำนักพิมพ์ซีเอ็ดยูเคชั่นจำกัด.

[5] Joseph E. Shigley,Mechanical Engineering Design,Mc Graw Hill.

[6] R.C HIBBELLER,Mechanic of Materials,Pearson.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้