



การออกแบบเครื่องทดสอบการโก่งของคานยึดปลายแน่นสองข้างภายใต้แรงกระจาย
สม่ำเสมอ

Design of the Deflection Testing Machine for Fixed Ended Beam under
Uniformly Distributed Load

พลรัชต์ บุญมี
วรวิทย์ วรรณาวิน
ประกอบ ชาติภักต์

งานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนจากงบประมาณ ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. ๒๕๕๕
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร



การออกแบบเครื่องทดสอบการโก่งของคานยึดปลายแน่นสองข้างภายใต้แรงกระจาย
สม่ำเสมอ

Design of the Deflection Testing Machine for Fixed Ended Beam under
Uniformly Distributed Load

พลรัชต์ บุญมี
วรวิทย์ วรนาวิน
ประกอบ ชาติภักต์

งานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนจากงบประมาณ ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. ๒๕๕๕
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

ชื่อ : นายพลรัชต์ บุญมี
 ผู้ช่วยศาสตราจารย์วรวิทย์ วรรณวิน
 นายประกอบ ชาตฤกษ์

สาขาวิชา : วิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

ชื่องานวิจัย: การออกแบบเครื่องทดสอบการโก่งของคานยึดปลายแน่นสองข้างภายใต้แรง
 กระจายสม่ำเสมอ

ปี : 2555

บทคัดย่อ

งานศึกษานี้เป็นการออกแบบเครื่องทดสอบการโก่งของคานแบบยึดแน่นสองข้างภายใต้การกระจายสม่ำเสมอ โปรแกรม SolidWorks คือเครื่องมือที่ใช้ในการออกแบบและโปรแกรม CosmosWorks เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์ความแข็งแรงของโครงสร้าง ระยะโก่งและความเครียดจากการทดสอบ ได้ถูกนำไปเปรียบเทียบกับผลลัพธ์ที่คำนวณด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ตามหลักการฟังก์ชันความเค้น ซึ่งมีเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนไม่เกิน 10% ดังนั้นเครื่องทดสอบนี้จึงเป็นต้นแบบที่สามารถนำไปใช้ในการผลิตเพื่อเป็นสื่อการศึกษาและสามารถนำไปใช้ในวิชาการประลองทางวิศวกรรมเครื่องกลได้

คำสำคัญ: การทดสอบการโก่ง, ฟังก์ชันความเค้น, คานยึดปลายแน่นสองข้าง

Name : Mr.Polrut Boonmee
Asst.Prof.Vorawit Voranavin
Mr.Prakorb Chartpuk
Major Field : Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering,
Rajamangala University of Technology Phra Nakhon
Research Title : Design of the Deflection Testing Machine for Fixed Ended Beam
under Uniformly Distributed Load
Year : 2012

Abstract

This research is designing and construction an apparatus of deflection of fixed end beam under uniformly distribution load. SolidWorks program is used for structure designing and CosmosWorks program is used for strength of structure analysis. Deflection and strain of beam were compared with the result of mathematical model according to function stress principal. Error of mathematical model result does not exceed 10%. Therefore, this apparatus can be used as prototype and produced for education purpose.

Keywords: Deflection testing, Stress function, Fixed-end beam

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร ที่ได้ให้การสนับสนุนทุนวิจัย และขอขอบคุณสาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์สถานที่ และเครื่องมือประกอบการทดลองและศึกษา ประโยชน์ใดๆ ที่จะเกิดจากสิ่งประดิษฐ์นี้ ผู้สร้างสิ่งประดิษฐ์ขอยกให้เป็นคุณงามความดีแด่องค์กรตั้งได้กล่าวข้างต้น

พลรัชต์ บุญมี
วรวิทย์ วรรณวิน
ประกอบ ชาติภักต์



สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ค
กิตติกรรมประกาศ	ง
สารบัญตาราง	ช
สารบัญรูป	ซ
บทที่	
1. บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา	2
1.3 ประโยชน์ที่ได้รับจากการศึกษา	2
1.4 ขอบเขตของการศึกษา	2
2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	3
2.1 ทฤษฎีระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์	3
2.2 หลักการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป	8
2.3 การเลือกใช้อุปกรณ์ เครื่องมือและวัสดุสำหรับการสร้างเครื่องทดสอบ	9
2.4 คานแบบปลายยึดแน่นทั้งสองข้างและรับภาระกระจายสม่ำเสมอ	11
2.5 สรุปสาระสำคัญจากเอกสารที่เกี่ยวข้อง	15
3. วิธีดำเนินการศึกษา	17
3.1 วิธีดำเนินการศึกษา	17
3.2 การออกแบบและวิเคราะห์ความแข็งแรงเครื่องทดสอบ	17
3.3 การสร้างและการทดสอบ	21
3.4 การหาระยะการโก่งและความเครียดของคานด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์	24
3.5 การคำนวณหาการโก่งของคาน ความเค้น และความเครียดด้วยหลักการฟังก์ชันความเค้น	26
4. ผลการทดลองและการวิเคราะห์ข้อมูล	33
4.1 ผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์	33
4.2 ผลการคำนวณด้วยสมการคณิตศาสตร์ตามหลักการฟังก์ชันความเค้น	37
4.3 ผลการทดลอง	39
4.4 การวิเคราะห์และการเปรียบเทียบผลทั้งสามวิธี	41
5. สรุปผลและข้อเสนอแนะ	44
5.1 สรุปผลการศึกษา	44
5.2 ข้อเสนอแนะ	44

สารบัญ (ต่อ)

บรรณานุกรม	หน้า
ภาคผนวก ก	45
ภาคผนวก ข	46
ประวัติผู้วิจัย	54
	67



สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3-1 สมบัติวัสดุที่ใช้ในการวิเคราะห์และทดลอง	25
3-2 ความเค้นและความเครียดในแนวแกน x ที่ระยะต่างๆ	27
3-3 ระยะขจัดในแนวแกน x และ y ที่ด้านล่างของผิวคาน (y =+5mm) ณ ตำแหน่งต่างๆ	28
3-4 ความเค้นและความเครียดในแนวแกน x ที่ระยะต่างๆ	29
3-5 ระยะขจัดในแนวแกน x และ y ที่ด้านล่างของผิวคาน (y =+5mm) ณ ตำแหน่งต่างๆ	30
3-6 ความเค้นและความเครียดในแนวแกน x ที่ระยะต่างๆ	31
3-7 ระยะขจัดในแนวแกน x และ y ที่ด้านล่างของผิวคาน (y =+5mm) ณ ตำแหน่งต่างๆ	32
4-1 ระยะโก่งเทียบกับการเปลี่ยนแปลงขนาดเอลิเมนต์ (คานอลูมิเนียม)	33
4-2 ความเค้น,ความเครียดและระยะโก่งที่ระยะต่างๆสำหรับคานเหล็ก AISI1020	35
4-3 ความเค้น,ความเครียดและระยะโก่งที่ระยะต่างๆ สำหรับคานทองเหลือง	35
4-4 ความเค้น,ความเครียดและระยะโก่งที่ระยะต่างๆสำหรับคานอลูมิเนียม 6061Alloy	35
4-5 ความเค้น,ความเครียดและระยะโก่งที่ระยะต่างๆสำหรับคานเหล็ก AISI1020	37
4-6 ความเค้น,ความเครียดและระยะโก่งที่ระยะต่างๆ สำหรับคานทองเหลือง	37
4-7 ความเค้น,ความเครียดและระยะโก่งที่ระยะต่างๆสำหรับคานอลูมิเนียม 6061Alloy	38
4-8 ความเค้น,ความเครียดและระยะโก่งที่ระยะต่างๆ	39
4-9 เพอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน	43



สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1-1 เครื่องทดสอบการโก่งสำหรับคานแบบธรรมดา (Simply supported beam)	1
2-1 การแบ่งแบบจำลองออกเป็นเอลิเมนต์เล็กๆ โดยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์	3
2-2 รูปร่างของเอลิเมนต์ชนิด Tetrahedral	8
2-3 กระบวนการวิเคราะห์ทางไฟไนต์เอลิเมนต์ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์	9
2-4 หน้าตัดท่อนอะลูมิเนียมโปรไฟล์และการประยุกต์ใช้งาน	14
2-5 Strain gages และ Dial gage	10
2-6 Data Logger MX100	11
2-7 ตัวแปรประกอบเงื่อนไขขอบ	12
3-1 ขั้นตอนการดำเนินงานศึกษา	18
3-2 หน้าตัดอลูมิเนียมโปรไฟล์ แผ่นปิดหน้าตัดและสลักยึดที่นำมาใช้	18
3-3 โครงสร้างส่วนฐานและส่วนบนที่ออกแบบด้วยโปรแกรม SolidWorks	19
3-4 รูปร่างคาน	19
3-5 รูปร่างของประกบจับยึดปลายคาน	20
3-6 การแอนตัวที่เกิดขึ้นพร้อมๆกันของโครงสร้าง ประกบและคาน	20
3-7 โครงสร้างส่วนบนและส่วนฐาน	22
3-8 ฐานยึดปลายคานและการกัดขึ้นงานคานด้วยเครื่องกัด CNC	22
3-9 คานที่สร้างขึ้นด้วยเครื่องกัด CNC Milling	22
3-10 ตำแหน่งที่ติดตั้ง Strain gages และไดอัลเกจ	23
3-11 Strain gages ชนิด KFG-5-120-C1-11L3M2R	23
3-12 Data Logger MX100 และการติดตั้งเครื่องมือทดสอบ	24
3-13 กำหนดเงื่อนไขขอบ ภาระ และการแบ่งเอลิเมนต์	25
3-14 ตัวแปรประกอบเงื่อนไขขอบ	26
4-1 การเปลี่ยนแปลงระยะโก่งเทียบกับจำนวนเอลิเมนต์	34
4-2 การกำหนดจุดเริ่มต้นของพิกัด ($x=y=0$) และทิศทางการกำหนดตำแหน่งต่างๆบนคาน	34
4-3 ความเค้นและระยะโก่งที่ระยะต่างๆสำหรับคานเหล็ก AISI1020	36
4-4 ความเค้นและระยะโก่งที่ระยะต่างๆสำหรับคานทองเหลือง	36
4-5 ความเค้นและระยะโก่งที่ระยะต่างๆสำหรับคานอลูมิเนียม 6061Alloy	36
4-6 ความเค้นและระยะโก่งที่ระยะต่างๆสำหรับคานเหล็ก AISI1020	38
4-7 ความเค้นและระยะโก่งที่ระยะต่างๆสำหรับคานทองเหลือง	38
4-8 ความเค้นและระยะโก่งที่ระยะต่างๆสำหรับคานอลูมิเนียม 6061Alloy	39
4-9 ความเครียดและระยะโก่งที่ระยะต่างๆสำหรับคานเหล็ก AISI1020	40
4-10 ความเครียดและระยะโก่งที่ระยะต่างๆสำหรับคานทองเหลือง	40

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4-11 ความเครียดและระยะโค้งที่ระยะต่างๆสำหรับคานอลูมิเนียม 6061Alloy	40
4-12 การเปรียบเทียบความเครียดสำหรับคานเหล็ก SteelAISI1020	41
4-13 การเปรียบเทียบระยะโค้งสำหรับคานเหล็ก SteelAISI1020	41
4-14 การเปรียบเทียบความเครียดสำหรับคานทองเหลือง (Brass)	42
4-15 การเปรียบเทียบระยะโค้งสำหรับคานทองเหลือง (Brass)	42
4-16 การเปรียบเทียบความเครียดสำหรับคานอลูมิเนียม 6061Alloy	42
4-17 การเปรียบเทียบระยะโค้งสำหรับคานอลูมิเนียม 6061Alloy	43

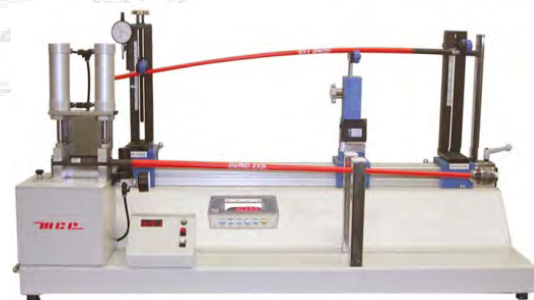
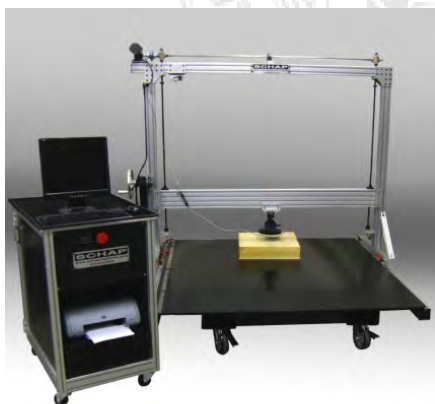


บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

การเรียนการสอนในสาขาวิศวกรรมเครื่องกล วิชาวิชากลศาสตร์ของแข็งเป็นวิชาที่มีความสำคัญมากวิชาหนึ่ง ผู้สอนต้องอธิบายหลักการที่มาของสมการและการประยุกต์ใช้งาน ผู้เรียนจำเป็นต้องมองและนิยามในลักษณะทางกายภาพว่าแรงต่างๆที่กระทำกับวัตถุมีรูปแบบอย่างไรส่งผลให้วัตถุเกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างไรทางกายภาพ ซึ่งในบางครั้งก็ยากที่จะทำให้เกิดความเข้าใจในเวลาอันรวดเร็ว และต่อมานักศึกษาต้องเรียนวิชาการประลองทางวิศวกรรมเครื่องกลและเป็นวิชาที่จะนำทฤษฎีต่างๆที่เรียนมาในทุกๆวิชามาทำการทดสอบพิสูจน์ ว่าทฤษฎีและสมการต่างๆที่ได้ศึกษามานั้นมีความถูกต้องอย่างไร ทำให้นักศึกษาเกิดความเข้าใจทฤษฎีมากยิ่งขึ้น เมื่อมองกลับไปเครื่องมือที่ใช้ในการทดลองในวิชาการประลองทางวิศวกรรมเครื่องกล พบว่ามีเครื่องมือและอุปกรณ์ที่จะอธิบายทฤษฎีในแต่ละวิชามีอยู่มากมายแต่จะมีอยู่การทดลองหนึ่งคือการพิสูจน์การโก่งของคานและความเค้นและความเครียดที่เกิดขึ้นในคานแบบยึดแน่นสองข้างที่อยู่ภายใต้แรงกระจายสม่ำเสมอที่ไม่มีจำหน่ายในท้องตลาด ผู้วิจัยมีแนวความคิดที่จะทำการสร้างเครื่องทดสอบดังกล่าวขึ้นมาเพื่อพิสูจน์ทฤษฎีและสมการที่ได้มีการนำเสนอไว้ การออกแบบและสร้างเครื่องมือนี้ขึ้นมาไม่ได้นำมาใช้เพื่อการเรียนการสอนเท่านั้น แต่ยังสามารถนำมาจดสิทธิบัตรเป็นเครื่องมือทดลองใช้ในการเรียนการสอนระดับอุดมศึกษาได้อีกด้วย



รูปที่ 1-1 เครื่องทดสอบการโก่งสำหรับคานแบบธรรมดา (Simply supported beam)

1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

เพื่อออกแบบและสร้างเครื่องทดสอบความเครียดสำหรับคานแบบยึดแน่นสองข้างที่รับภาระแบบกระจายสม่ำเสมอ

1.3 ประโยชน์ที่ได้รับจากการศึกษา

1.3.1 สามารถนำเครื่องทดสอบที่สร้างขึ้นมาใช้ประกอบการเรียนการสอนในวิชาการทดลองทางวิศวกรรมเครื่องกลและวิชากลศาสตร์ของแข็ง

1.3.2 สามารถนำไปเผยแพร่ในวารสารตีพิมพ์

1.3.3 เป็นแนวทางในการวิเคราะห์ออกแบบเครื่องทดสอบคานแบบอื่นๆ

1.4 ขอบเขตของการศึกษา

1.4.1 คานที่ใช้ร่วมกับเครื่องทดสอบเป็นคานแบบยึดแน่นสองข้างและเป็นคานที่ทำมาจากเหล็ก อลูมิเนียมและทองเหลืองเท่านั้น

1.4.2 คานเป็นวัสดุ Isotropic Material และ Homogeneous

1.4.3 คานที่ใช้ในการทดสอบเป็นคานแบบยึดแน่นสองข้างเท่านั้น

1.4.4 การวิจัยเป็นการออกแบบด้วยซอฟต์แวร์ SolidWorks และสร้างเครื่องทดสอบ

1.4.5 การวิเคราะห์ความเค้นและความเครียดที่เกิดขึ้นอยู่ในช่วงยืดหยุ่นเชิงเส้น

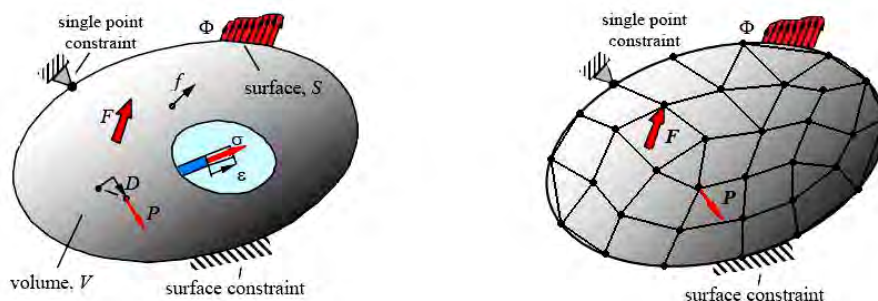
1.4.6 กำหนดภาระที่ใช้เป็นแรงกระจายสม่ำเสมอเท่านั้น

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ทฤษฎีระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

ทฤษฎีระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เป็นระเบียบวิธีเชิงตัวเลข มีแนวความคิดที่ว่าวัตถุที่มีรูปร่างซับซ้อนใดๆ จะสามารถแบ่งออกเป็นชิ้นเล็กๆ ได้ โดยแต่ละชิ้นเล็กๆ เหล่านั้นสามารถพิจารณาแยกกันอย่างอิสระและสามารถประกอบเข้ากันเป็นวัตถุรูปเดิมได้ ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เหมาะสำหรับปัญหาที่ยุ่งยากซับซ้อนซึ่งไม่สามารถหาผลเฉลยแม่นยำตรงได้จากสมการเชิงอนุพันธ์ โดยจะแก้ปัญหให้อยู่ในรูปฟังก์ชันพีชคณิตแล้วใช้คอมพิวเตอร์คำนวณหาผลลัพธ์ มีหลักการสำคัญคือ แบ่งแบบจำลองออกเป็นเอลิเมนต์เล็กๆ ให้มีความเหมาะสมกับรูปแบบของแบบจำลอง แต่ละเอลิเมนต์ต่อเชื่อมกันที่จุดต่อ (Node) ซึ่งเป็นตำแหน่งที่จะคำนวณตัวแปรไม่ทราบค่าโดยการสร้างฟังก์ชันการประมาณภายในเอลิเมนต์ให้มีความสอดคล้องกับสมการควบคุม ทำให้ได้สมการไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับเอลิเมนต์นั้นๆ เมื่อนำสมการไฟไนต์เอลิเมนต์มาประกอบเข้าด้วยกันจะได้สมการรวม (Global equation) จากนั้นแก้ปัญหด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลขเพื่อหาตัวแปรไม่ทราบค่าที่จุดต่อ ภายใต้สภาวะสมดุลของภาระภายนอกและเงื่อนไขขอบของแบบจำลอง



รูปที่ 2-1 การแบ่งแบบจำลองออกเป็นเอลิเมนต์เล็กๆ โดยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

พิจารณารูปที่ 2-1 เป็นวัตถุที่มีเนื้อต่อเนื่องใน 3 มิติ มีปริมาตรเท่ากับ v และมีพื้นผิวปิด s ล้อมรอบปริมาตร รับภาระกระทำแบบต่างๆ คือ ภาระกระทำเป็นจุด (p) ภาระแบบกระจายกระทำที่ผิว (ϕ) และแรงเนื่องจากน้ำหนักของวัตถุ (F) โดยมีเงื่อนไขขอบซึ่งขึ้นอยู่กับการจับยึดวัตถุคือการจับยึดแบบเป็นจุด การจับยึดแบบกระจายที่พื้นผิว เมื่อแบบจำลองถูกแบ่งออกเป็นเอลิเมนต์เล็กๆ ภาระแบบเป็นจุด ภาระแบบกระจาย แรงเนื่องจากน้ำหนักของวัตถุ การขจัดและเงื่อนไขขอบ จะถูกแปลงเป็นค่าลงในแต่ละจุดต่อ ในการสร้างสมการไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับปัญหา 3 มิติจะใช้หลักการของงานเสมือนเหมือนกับสมการไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับปัญหา 2 มิติ ต่างกันที่ใน 3 มิติจะมี 3 แกนคือ x, y, z ดังนั้นสนามการขจัดจะประกอบไปด้วย u, v, w โดยแต่ละจุดต่อจะมีการขจัด 3 ค่า

2.1.1 การสร้างสมการไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับการวิเคราะห์ของแข็ง 3 มิติ

การสร้างสมการไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับการวิเคราะห์ของแข็ง 3 มิติจะใช้หลักการของงานเสมือน เอลิเมนต์ที่พิจารณาจะเป็นเอลิเมนต์ที่มีสนามภายในเป็นสนามของการขจัด (Displacement based element) โดยมีความสัมพันธ์ของความเค้นและความเครียด คือ

$$\{\varepsilon\} = [D]\{u\} \quad (2.1)$$

$$\{\sigma\} = [E]\{\varepsilon\} \quad (2.2)$$

เมื่อ $\{u\}$ คือ เวกเตอร์ของสนามการขจัดภายในเอลิเมนต์ประกอบด้วย u, v, w

$\{D\}$ คือ Derivative operator matrix

$[E]$ คือ เมตริกซ์แสดงความสัมพันธ์ของความเค้นและความเครียดในสภาวะยืดหยุ่น

$\{\varepsilon\}$ คือ เวกเตอร์ของสนามความเครียดภายในเอลิเมนต์

$\{\sigma\}$ คือ เวกเตอร์ของความเค้นภายในเอลิเมนต์

ดังนั้นจากสมการ (2.1) และ (2.2) เมื่อทราบสนามการขจัดภายในเอลิเมนต์จะทำให้สามารถหาเวกเตอร์ของสนามความเครียดภายในเอลิเมนต์ได้ คือ

$$\{\varepsilon\} = \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ \gamma_{xy} \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{zx} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\partial}{\partial y} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\partial}{\partial z} \\ \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial x} & 0 \\ 0 & \frac{\partial}{\partial z} & \frac{\partial}{\partial y} \\ \frac{\partial}{\partial z} & 0 & \frac{\partial}{\partial x} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u \\ v \\ w \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \frac{\partial u}{\partial x} \\ \frac{\partial v}{\partial y} \\ \frac{\partial w}{\partial z} \\ \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \\ \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \\ \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \end{Bmatrix} \quad (2.3)$$

และเวกเตอร์ของความเค้นภายในเอลิเมนต์ คือ

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{xy} \\ \tau_{yz} \\ \tau_{zx} \end{Bmatrix} = \frac{E}{(1+V)(1-2V)} \begin{bmatrix} 1-V & V & V & 0 & 0 & 0 \\ V & 1-V & V & 0 & 0 & 0 \\ V & V & 1-V & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{(1-2V)}{2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{(1-2V)}{2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{(1-2V)}{2} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ \gamma_{xy} \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{zx} \end{Bmatrix} \quad (2.4)$$

โดยมีเมตริกซ์แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดในกรณีทั่วไปที่วัสดุมีคุณสมบัติเหมือนกันในทุกทิศทาง คือ

$$[E] = \frac{E}{(1+V)(1-2V)} \begin{bmatrix} 1-V & V & V & 0 & 0 & 0 \\ V & 1-V & V & 0 & 0 & 0 \\ V & V & 1-V & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{(1-2V)}{2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{(1-2V)}{2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{(1-2V)}{2} \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

สนามการขจัดภายในโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เป็นค่าสนามภายในเอลิเมนต์และเป็นค่าฟังก์ชันของการขจัดที่จุดต่อ คือ

$$\{u\} = [N]\{d\} \quad (2.6)$$

เมื่อ $[N]$ คือ ฟังก์ชันรูปร่าง (Shape function) ซึ่งจะขึ้นอยู่กับรูปร่างของเอลิเมนต์
 $\{d\}$ คือ ค่าการขจัดที่จุดต่อของเอลิเมนต์เป็นค่าเวกเตอร์ที่แยกมาจากเวกเตอร์ของการขจัดรวม $\{D\}$ ซึ่งเป็นผลลัพธ์ของการแก้สมการ

$$[K]\{D\} = \{F\} \quad (2.7)$$

$$\{D\} = [K]^{-1}\{F\} \quad (2.8)$$

เมื่อ $[K]$ คือ Global stiffness matrix เป็นเมตริกซ์รวมที่ประกอบจาก Stiffness matrix, $[k]$ ของทุกเอลิเมนต์

$\{F\}$ คือ Global force vector เป็นเวกเตอร์รวมที่ประกอบจาก Element force vector การสร้างสมการไฟไนต์เอลิเมนต์ก็คือการหาค่า $[k]$ และ $\{f\}$ ของเอลิเมนต์ที่มีรูปร่างใดๆ โดยที่สมการสมดุลในเอลิเมนต์คือ

$$[k]\{d\} = \{f\} \quad (2.9)$$

การสร้างสมการไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับการวิเคราะห์ของแข็ง 3 มิติจะใช้หลักการของงานเสมือน มีหลักการที่สำคัญคือ เมื่อโครงสร้างโดยทั่วไปถูกแรงกระทำจากภายนอกและโครงสร้างอยู่ในสภาพสมดุล แล้วสมมุติว่ามีการขจัดเสมือน (Virtual displacements) เกิดขึ้น จะมีงานเสมือน (Virtual work) เนื่องจากแรงภายนอกซึ่งจะมีค่าเท่ากับพลังงานความเครียดเสมือน (Virtual strain energy) เนื่องจากความเค้นในเนื้อวัสดุ จากหลักการนี้จะได้ความสัมพันธ์ คือ

$$\begin{aligned} \text{พลังงานความเครียดเสมือน} &= \text{งานเสมือนเนื่องจากแรงภายนอก} \\ \delta U_E &= \delta W_E \end{aligned} \quad (2.10)$$

เมื่อ U_E คือ พลังงานความเครียด

W_E คือ งานเนื่องจากแรงภายนอก

การหา δU_E จะเริ่มจากการแทนค่า $\{u\}$ จากสมการ (2.6) ลงในสมการ (2.1) จะได้ความเครียดภายในเอลิเมนต์เท่ากับ

$$\{\varepsilon\} = [\partial][N]\{d\} \quad (2.11)$$

$$\{\varepsilon\} = [B]\{d\} \quad (2.12)$$

เมื่อ $[B]$ คืออนุพันธ์ของ $[N]$ สมการ (2.12) แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างการขจัดและความเครียด ถ้าสมมุติว่ามีการขจัดเสมือน $\{\delta d\}$ จะได้ความเครียดเสมือนเท่ากับ $\{\delta \varepsilon\}$ จากพลังงานความเครียดซึ่งมีค่าเท่ากับพื้นที่ใต้กราฟของความเค้นและความเครียด ดังนั้นถ้ามีความเครียดเสมือน $\{\delta \varepsilon\}$ ภายใต้สภาวะความเค้น $\{\sigma\}$ จะได้พลังงานความเครียดเสมือนในเอลิเมนต์ที่มีปริมาตร V คือ

$$\delta U_E = \int_V \{\delta \varepsilon\}^T \{\sigma\} dV \quad (2.13)$$

แทนค่า $\{\delta \varepsilon\}^T$ ด้วย $\{\delta d\}^T [B]^T$ และแทนสมการ (2.12) ลงในสมการ (2.2) ได้ $\{\sigma\}$ เท่ากับ $[E][B]\{d\}$ ดังนั้นสมการ (2.13) จะได้ว่า

$$\delta U_E = \int_V \{\delta d\}^T [B]^T [E] [B] \{d\} dV \quad (2.14)$$

สำหรับ δW_E จะเท่ากับการขจัดเสมือนคูณด้วยเวกเตอร์ของแรงจากภายนอกที่กระทำที่จุดต่อของเอลิเมนต์

$$\delta W_E = \{\delta d\}^T \{f\} \quad (2.15)$$

แทนสมการ (2.14) และ (2.15) ลงในสมการสมดุลพลังงาน จะได้

$$\int_V \{\delta d\}^T [B]^T [E] [B] \{d\} dV = \{\delta d\}^T \{f\} \quad (2.16)$$

เทอม $\{\delta d\}$ เป็นการขจัดเสมือนที่จุดต่อ และ $\{d\}$ เป็นค่าการขจัดที่จุดต่อ ค่าทั้งสองไม่ขึ้นกับปริมาตรของเอลิเมนต์ ดังนั้น

$$[k]\{d\} = \{f\} \quad (2.17)$$

เมื่อ

$$[k] = \int_V [B]^T [E] [B] dV \quad (2.18)$$

สมการ (2.18) คือ Stiffness matrix ของเอลิเมนต์ มีขนาด 30×30 ซึ่งจะขึ้นอยู่กับอนุพันธ์ของ $[N]$ โดยที่ $[E]$ คือเมตริกซ์คุณสมบัติของวัสดุจะแสดงความสัมพันธ์ของความเค้นและความเครียดมีขนาด 6×6 ดังแสดงในสมการ (2.5) สำหรับเมตริกซ์ $[B]$ จะมีขนาด 6×30 หาจากอนุพันธ์ของฟังก์ชันรูปร่าง N_i ซึ่งเมื่อเลือกเอลิเมนต์ชนิด Ten nodes tetrahedral จะทำให้มีฟังก์ชันรูปร่าง 10 ฟังก์ชัน ในการหา N_i จะเริ่มจากการสมมุติสมการการขจัดด้วยสมการพหุนาม แต่

จะมีความยุ่งยากในการใช้สมการพหุนามที่มีตัวแปรบนพิกัดฉาก (x, y, z) ดังนั้นเพื่อความสะดวกจึงใช้พิกัดธรรมชาติ (ξ, η, ζ) มาช่วยในการหาสมการของเอลิเมนต์ ซึ่งมีสนามการขจัด คือ

$$u = a_1 + a_2\xi + a_3\eta + a_4\zeta + a_5\xi^2 + a_6\xi\eta + a_7\eta^2 + a_8\eta\zeta + a_9\zeta^2 + a_{10}\xi\zeta \quad (2.19)$$

$$v = a_{11} + a_{12}\xi + a_{13}\eta + a_{14}\zeta + a_{15}\xi^2 + a_{16}\xi\eta + a_{17}\eta^2 + a_{18}\eta\zeta + a_{19}\zeta^2 + a_{20}\xi\zeta \quad (2.20)$$

$$w = a_{21} + a_{22}\xi + a_{23}\eta + a_{24}\zeta + a_{25}\xi^2 + a_{26}\xi\eta + a_{27}\eta^2 + a_{28}\eta\zeta + a_{29}\zeta^2 + a_{30}\xi\zeta \quad (2.21)$$

สมการการขจัดภายในเอลิเมนต์ คือ

$$u = \sum_{i=1}^{10} N_i u_i \quad (2.22)$$

$$v = \sum_{i=1}^{10} N_i v_i \quad (2.23)$$

$$w = \sum_{i=1}^{10} N_i w_i \quad (2.24)$$

สมการความสัมพันธ์ของตำแหน่งภายในเอลิเมนต์ คือ

$$x = \sum_{i=1}^{10} N_i x_i \quad (2.25)$$

$$y = \sum_{i=1}^{10} N_i y_i \quad (2.26)$$

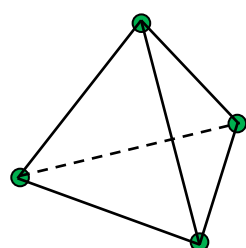
$$z = \sum_{i=1}^{10} N_i z_i \quad (2.27)$$

ดังนั้นสมการ (2.18) ในพิกัดฉาก (x, y, z) สามารถเปลี่ยนเป็นสมการในพิกัดธรรมชาติ (ξ, η, ζ) และใช้การอินทิเกรตโดยวิธี Gauss Quadrature จะได้ Element stiffness matrix คือ

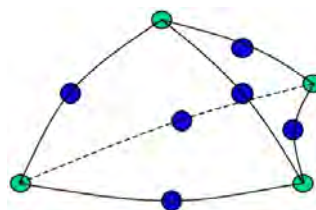
$$[k] = \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 [B]^T [E] [B] (\det[J]) d\xi d\eta d\zeta \quad (2.28)$$

2.1.2 เอลิเมนต์ 3 มิติ

ในการแบ่งโครงสร้างออกเป็นเอลิเมนต์เล็กๆนั้น ต้องเลือกชนิดของเอลิเมนต์ที่จะนำไปวิเคราะห์ให้เหมาะสม การเลือกชนิดของเอลิเมนต์จะคำนึงถึงคุณสมบัติของวัตถุหรือโครงสร้าง และจำนวนแกน (x, y, z) ที่ใช้บอกตำแหน่งของเอลิเมนต์ โดยเอลิเมนต์ 3 มิติที่ใช้ทั่วไปจะมีหลายชนิดดังแสดงในรูปที่ 2-2 เนื่องจากทวิรฟอร์มมีส่วนโค้งมากดังนั้นเอลิเมนต์ 3 มิติที่นำมาใช้ในการวิเคราะห์ครั้งนี้คือ Ten nodes tetrahedral (3D solid element) ซึ่งจะให้คำตอบที่ถูกต้องมากกว่าเอลิเมนต์ชนิด Four nodes tetrahedral ที่มีขอบข้างตรงแต่จะใช้เวลาในการคำนวณมากกว่า



4 Corner Nodes



10 Nodes (4 Corner nodes+6 midside nodes)

รูปที่ 2-2 รูปร่างของเอลิเมนต์ชนิด Tetrahedral

2.2 หลักการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป

ในการศึกษาที่ใช้โปรแกรมสำเร็จรูป SolidWorks ในการสร้างแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ 3 มิติ ที่มีขนาดมาตราส่วนเท่ากับของจริงเพื่อใช้ในการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูปชื่อ CosmosWorks โปรแกรมนี้มีขีดความสามารถนำมาใช้ในการวิเคราะห์โครงสร้าง ความแข็งแรงและการโก่งตัวของคานแบบยึดปลายแน่นสองข้างภายใต้ภาระกระจายสม่ำเสมอได้ ผลจากการวิเคราะห์จะนำไปใช้เปรียบเทียบกับผลการทดลองเพื่อยืนยันความถูกต้องของผลลัพธ์ต่างๆ เช่น ความเค้น ความเครียดและการโก่งของคานว่าให้ผลไปในทิศทางเดียวกันและมีค่าต่างกันหรือไม่ ในการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูปสามารถแบ่งการวิเคราะห์ออกเป็น 3 กระบวนการดังนี้

2.2.1 การ Pre-Processing เป็นการสร้างแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์และกำหนดข้อมูลทางกายภาพให้กับแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์เพื่อการประมวลผล ในกระบวนการนี้จัดว่าเป็นกระบวนการที่สำคัญที่สุดในการวิเคราะห์ด้วยคอมพิวเตอร์ ประกอบด้วยข้อมูลหลายส่วนคือ

2.2.1.1 การสร้างแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ 3 มิติ เลือกใช้โปรแกรม SolidWorks ที่มีขีดความสามารถในการออกแบบจำลองที่มีลักษณะเป็น Parasolid

2.2.1.2 การกำหนดประเภทและชนิดของวัสดุที่จะวิเคราะห์ ซึ่งจะกำหนดวัสดุเป็นวัสดุที่มีเนื้อเดียวกัน (Homogeneous) ในทุกๆ ตำแหน่งของเนื้อวัสดุและเป็นวัสดุยืดหยุ่นเชิงเส้นมีคุณสมบัติเหมือนกันในทุกทิศทาง (Linear elastic and isotropic material)

2.2.1.3 การกำหนดค่าคุณสมบัติของวัสดุ (Properties of material) ซึ่งเป็นค่าจำเพาะของวัสดุนั้นๆ ประกอบด้วยโมดูลัสความยืดหยุ่น อัตราส่วนปัวซอง โมดูลัสความแข็งแรงความหนาแน่นทางมวลความเค้นที่จุดคราก ความแข็งแรงทางแรงดึง ความแข็งแรงทางแรงอัด สัมประสิทธิ์การขยายตัวเชิงความร้อน ค่าการนำความร้อน และค่าความร้อนจำเพาะ ในการกำหนดค่าต่างๆ เหล่านี้เราจะกำหนดค่าตามลักษณะของปัญหาที่จะวิเคราะห์

2.2.1.4 การแบ่งแบบจำลอง (Mesh) โดยโปรแกรมจะสร้างเอลิเมนต์และกำหนดจุดต่อ (Node) พร้อมกับการกำหนดหมายเลขเอลิเมนต์และหมายเลขจุดต่อในการเลือกชนิดเอลิเมนต์นั้นๆ ว่ามีความสำคัญมากต้องเลือกชนิดเอลิเมนต์ให้เหมาะสมกับรูปร่างของแบบจำลอง คานในที่นี้เลือกใช้เอลิเมนต์ชนิด Ten nodes tetrahedral

2.2.1.5 การกำหนดเงื่อนไขขอบ ซึ่งขึ้นอยู่กับลักษณะการจับยึดทางกายภาพ

2.2.1.6 การกำหนดภาระที่กระทำกับแบบจำลองโดยมีหลายลักษณะเช่น แรงกระทำเป็นจุด แรงกระจายสม่ำเสมอ แรงกระจายไม่สม่ำเสมอและอื่นๆ

2.2.2 การ Solve-Processing

เป็นส่วนการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ซึ่งปกติแล้วเราไม่สามารถแก้ไขกระบวนการส่วนนี้ได้แต่สามารถกำหนดรูปแบบและการวิเคราะห์ให้มีความเหมาะสมกับปัญหานั้นๆ โดยสามารถแสดงลำดับการวิเคราะห์ออกเป็นขั้นตอนดังนี้

2.2.2.1 โปรแกรมทำการสร้าง Local stiffness matrix และสร้าง Element force vector ของแต่ละเอลิเมนต์

2.2.2.2 ประกอบ Local stiffness matrix และ Element force vector ของทุกเอลิเมนต์เข้าเป็น Global stiffness matrix และ Global force vector ตามลำดับ อาศัยหมายเลขตัวแปรที่จุดต่อเป็นตำแหน่งของการประกอบ

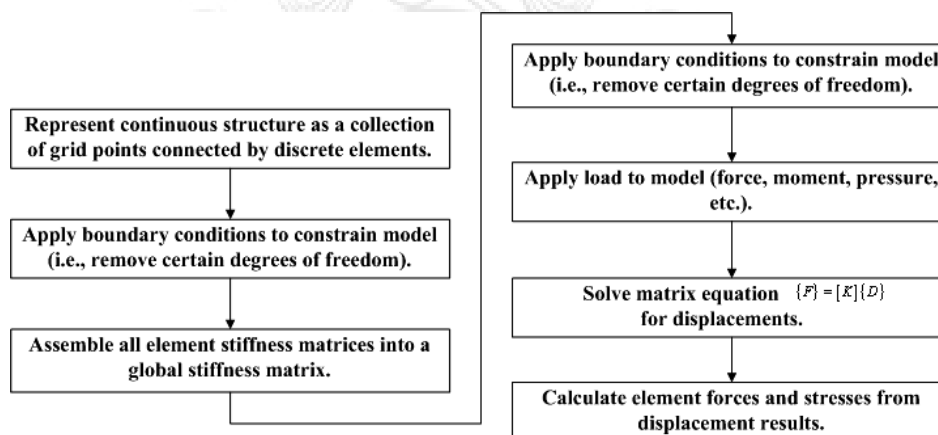
2.2.2.3 โปรแกรมจะตัดสมการที่ตรงกับเงื่อนไขขอบที่ค่าเท่ากับศูนย์ออก

2.2.2.4 แก้มการ $[K]\{D\} = \{F\}$ ได้ระยะการขจัด ความเค้นและความเครียด

2.2.3 การ Post-Processing

เป็นการแสดงผลการวิเคราะห์ที่ได้ออกมาในลักษณะของภาพกราฟิก โดยสามารถแสดงการเสียรูป (Deformation) ด้วยค่า (D) โดยตรงรวมถึงสามารถแสดงค่าความเค้นและความเครียดในเอลิเมนต์ต่างๆ โดยใช้สมการ (2.3) และ (2.4) ตามลำดับ

โดยรายละเอียดของการดำเนินการวิเคราะห์ที่กล่าวมาทั้งหมดสามารถแสดงเป็นแผนภาพดังรูปที่ 2-3

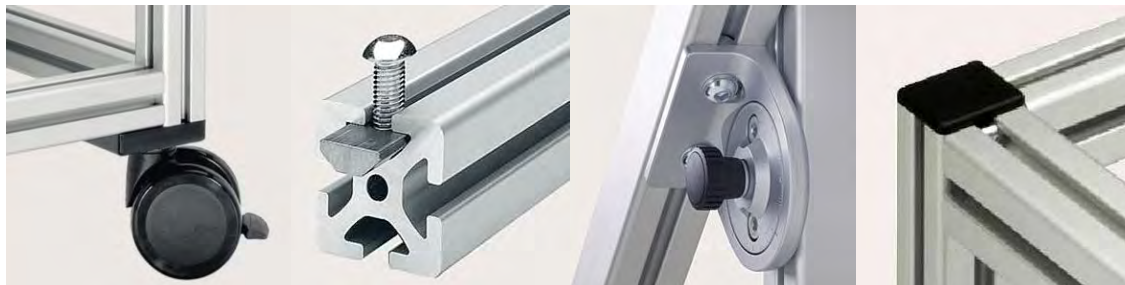


รูปที่ 2-3 กระบวนการวิเคราะห์ทางไฟไนต์เอลิเมนต์ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

2.3 การเลือกใช้อุปกรณ์ เครื่องมือและวัสดุสำหรับการสร้างเครื่องทดสอบ

ในการออกแบบโครงสร้างจะใช้อะลูมิเนียมโปรไฟล์ (Aluminum profile) สำหรับประกอบเป็นโครงสร้างเครื่องทดลอง เนื่องจากอะลูมิเนียมโปรไฟล์มีความสะดวกในการนำมาสร้างเครื่องทดสอบ สามารถตัดและประกอบได้รวดเร็ว การเชื่อมชิ้นส่วนเข้าด้วยกันก็สามารถทำได้ง่ายด้วยอุปกรณ์การเชื่อมและตะเข็บต่างๆ ไม่เป็นสนิม น้ำหนักเบาแต่สามารถรับแรงได้มาก สามารถติดตั้งได้สะดวก ดังรูปที่ 2-4 ส่วนของโครงสร้างแบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ

1. แผงติดตั้งอุปกรณ์มีความกว้าง 10 ซม. ยาว 115 ซม.และสูง 118 ซม.
2. ฐานติดตั้งชุดทดลองมีความกว้าง 68 ซม.ยาว 116 ซม.และสูง 12 ซม.



รูปที่ 2-4 หน้าตัดท่อนอะลูมิเนียมโปรไฟล์และการประยุกต์ใช้งาน

ในการออกแบบ ส่วนรองรับแรงที่ฐานรองรับน้ำหนักน้ำและแผงกั้นน้ำใช้โครงอะลูมิเนียมเป็นตัวรองรับแรง ซึ่งมีขนาดความกว้าง 68 เซนติเมตรความยาว 116 เซนติเมตร และความสูง 12 เซนติเมตร การออกแบบและสร้างคาน คานที่เลือกใช้ในการทดสอบจะมีอยู่ 3 ชนิดได้แก่ เหล็ก AISI1020, อะลูมิเนียม 6061 Alloy และทองเหลือง (Brass) ซึ่งคานต้องสร้างมาจากวัสดุที่มีคุณสมบัติเหมือนกันทุกทิศทุกทางสามารถนำมาวิเคราะห์ทิศทางใดก็ได้และวัสดุที่เป็นเนื้อเดียวกันมีคุณสมบัติเหมือนกัน กำหนดให้มีขนาดความกว้าง 2.54 เซนติเมตร ความยาว 106 เซนติเมตร ความหนา 0.8 เซนติเมตร ซึ่งในส่วนของคานนั้นในตอนแรกจะมีลักษณะหน้าตัดของคานเป็นรูปสี่เหลี่ยม จะนำคานไปยึดเข้ากับเครื่องกัด CNC แล้วทำการกัดปาดหน้าเรียบ โดยจะทำการกัดคานที่ละช่วง ทำทั้งหมดสามช่วง เนื่องจากระยะของปากกาจับยึดชิ้นงานมีความกว้างที่ไม่มากนัก

การเลือกใช้เกจวัดความเครียด (Strain gage) ในการเลือกใช้เกจวัดความเครียดจะต้องคำนึงถึงดังนี้

1. Strain gage ควรมีขนาดเหมาะสมกับโมเดล เพื่อให้ได้ค่าความเครียดที่ถูกต้อง
2. ค่า Gage factor ต้องเป็นค่าคงที่ที่ไม่แปรเปลี่ยนไปตามเวลาและอุณหภูมิ
3. Strain gage ต้องให้ค่าการตอบสนองที่เป็นเชิงเส้นกับความเครียดตลอดย่านของการวัดในการทดสอบเราจะเลือกใช้ยี่ห้อ KYOWAรุ่น KFG-5-120-C1-11-L3M2R ดังรูปที่ 2-5a



a. Strain gages



b. Dial gage

รูปที่ 2-5 Strain gages และ Dial gage

การเลือกใช้เกจวัดความโก่งของคาน (Dial gage) เป็นเครื่องมือที่ใช้วัดความโก่งของคาน เนื่องจากในการทดสอบต้องการทราบค่าที่มีความละเอียดมาก เราจึงเลือกใช้ Dial gage ที่สามารถวัดค่าความละเอียดได้ 0.01 มิลลิเมตรเป็นแบบอนาล็อก หรือแบบเข็ม ใช้ร่วมกับแท่นจับยึดไดอัลเกจ ที่ลักษณะฐานจะเป็นแม่เหล็กไฟฟ้าสเกล ด้านในวงเล็กแบ่งเป็นช่องละ 1 มิลลิเมตร สเกลด้านนอก จะแบ่งช่องละ 0.01 มิลลิเมตร เมื่อเข้มน้านอกหมุน 1 รอบ เข้มน้านในจะเคลื่อนไป 1 ช่อง ในการทดสอบจะใช้รุ่น TEC037 CT315 ยี่ห้อ TECLOCK ดังรูปที่ 2-5b

ในการทดสอบเครื่องที่สร้างขึ้นนี้ต้องทำการทดสอบค่าความเครียดที่เกิดขึ้น เครื่องมือที่ต้องใช้ในการอ่านค่าความเครียดที่เกิดขึ้น ผู้วิจัยได้เลือกใช้ Data Logger MX100 เนื่องจากมีความสามารถในการเก็บข้อมูลแบบ Real time และเก็บข้อมูลในรูปแบบไฟล์ข้อมูล

เครื่องวัดและบันทึกข้อมูล (Data logger) คือระบบอุปกรณ์ที่ใช้ในการจัดการและเก็บข้อมูล พื้นฐานของระบบประกอบไปด้วย Scanner หรือ Multiplexer digital-voltmeter และตัวบันทึกข้อมูล ซึ่งรับข้อมูลเข้าที่เป็นระบบอนาลอกจากตัวตรวจจับสัญญาณแล้วทำการเปลี่ยนข้อมูลเป็นระบบดิจิทัลและเก็บข้อมูลไว้ในหน่วยความจำเพื่อการนำไปใช้ต่อไป Data Logger จะรับค่าที่จะบันทึกจากตัวตรวจจับสัญญาณ และทำการแปลงสัญญาณ (Signal Convertor) ที่รับมาให้เป็นสัญญาณข้อมูลดิจิทัล หลังจากนั้น Data Logger จะนำข้อมูลดิจิทัลมาประมวลผล หรือนำข้อมูลมาเช็คเพื่อทำการส่งสัญญาณไปเตือนผู้ใช้งาน ข้อมูลมีค่ามากไปหรือน้อยไปได้แล้วจึงนำข้อมูลที่ได้ไปเก็บในอุปกรณ์เก็บข้อมูลของ Data logger หรือนำมาแสดงผลบนหน้าจอของ Data logger หรือนบนหน้าจอคอมพิวเตอร์

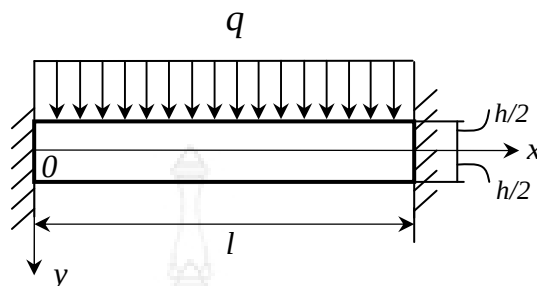


รูปที่ 2-6 Data Logger MX100

2.4 คานแบบปลายยึดแน่นทั้งสองข้างและรับภาระกระจายสม่ำเสมอ (Fixed -end beam subjected to uniform load)

คานยึดปลายแน่นสองข้างเป็นคานประเภทหาค่าไม่ได้ทางสถิตยศาสตร์ ซึ่งจำเป็นต้องใช้สมการเงื่อนไขขอบที่รองรับช่วยในการวิเคราะห์ร่วมกับสมการสมดุล อาจทำการวิเคราะห์ได้ด้วยวิธีต่างๆ เช่น Superposition Method ซึ่งเป็นวิธีที่สะดวกมากเมื่อใช้ร่วมกับตาราง Double Integration Method ซึ่งตัวแปรไม่ทราบค่าได้แก่ C_1 และ C_2 และ Redundant forces ต่างๆ Theory of Area Moment Method เป็นวิธีที่สะดวกอีกวิธีหนึ่ง โดยสมการช่วยวิเคราะห์ที่ได้จากความสัมพันธ์ระหว่าง

เส้นสัมผัสโค้งอีลาสติคกับเส้นโค้งอีลาสติค ซึ่งพิจารณาจากเงื่อนไขขอบที่รองรับต่างๆเมื่อได้ทำการออกแบบคานที่ถูกยึดปลายแน่นสองข้างแล้วจะทำการทดสอบเครื่องทดสอบอีกด้วยเพื่อปรับปรุงให้ได้ผลลัพธ์ที่ต้องการ



รูปที่ 2-7 ตัวแปรรูปประกอบเงื่อนไขขอบ

สมมุติฐานในการศึกษาคือการพิจารณาความเค้นในรูปแบบสองมิติเพื่อให้่ายและสะดวกต่อการวิเคราะห์ ดังนั้นการวิเคราะห์ความเค้นที่เกิดขึ้นหรือระยะขจัดจะเป็นการวิเคราะห์บนปัญหาความเค้นระนาบ (Plane stress) จากรายงานวิจัยของ DING Hao-jiang, HUANG De-jin และ WANG Hui-ming [1] ได้ศึกษาวิธีการแก้ปัญหาเชิงวิเคราะห์สำหรับคานยึดปลายแน่นสองข้างภายใต้การภาระสม่ำเสมอ และนำเสนอฟังก์ชันความเค้นไบฮาร์โมนิกเช่นเดียวกับที่นำเสนอโดย S.Timoshenko และ J.N.Goodier [2] โดยมีหลักการสร้างสมการความเค้นและระยะขจัดดังต่อไปนี้

2.4.1 สมการพื้นฐานในสถานะความเค้นระนาบ

เมื่อไม่พิจารณาน้ำหนักของวัตถุ องค์ประกอบของความเค้นในสองมิติสามารถเขียนให้อยู่ในรูปของฟังก์ชันความเค้นได้ดังนี้

$$\sigma_x = \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2}, \quad \sigma_y = \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2}, \quad \tau_{xy} = \frac{\partial^2 \phi}{\partial x \partial y} \quad (2.29)$$

ถ้า Stress Function (ϕ) ที่กำหนดขึ้นมีความเหมาะสมจะต้องทำให้สมการควบคุมเป็นจริงดังนี้

$$\frac{\partial^4 \phi}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4 \phi}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 \phi}{\partial y^4} = 0 \quad (2.30)$$

โดยที่ความสัมพันธ์ระหว่างระยะขจัดกับความเค้นคือ

$$\frac{\partial u}{\partial x} = \frac{\sigma_x}{E} - \nu \frac{\sigma_y}{E} \quad (2.31)$$

$$\frac{\partial v}{\partial y} = \frac{\sigma_y}{E} - \nu \frac{\sigma_x}{E} \quad (2.32)$$

$$\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} = \frac{2(1+\nu)}{E} \tau_{xy} \quad (2.33)$$

โดยที่ ν คืออัตราส่วนปัวซองและ E คือโมดูลัสความยืดหยุ่น

2.4.2 ความเค้นและระยะขจัด

พิจารณาคานในรูปที่ 2-8 มีหน้าตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยมรับภาระกระจายสม่ำเสมอ q , คานยาว l , ความหนาคาน h , ฟังก์ชันความเค้นสามารถสร้างจากสมการโพลิโนเมียลไบฮาร์โมนิก 7 เทอมดังนี้

$$\phi = a\left(\frac{1}{5}y^5 - x^2y^3\right) + bxy^3 + cy^3 + dy^2 + ex^2y + fxy + gx^2 \quad (2.34)$$

เมื่อ a, b, c, d, f และ g เป็นค่าคงที่ที่ไม่ทราบค่า แทนสมการ (2.34) ลงใน (2.29) จะได้

$$\sigma_x = 2a(2y^3 - 3x^2y) + 6bxy + 6cy + 2d \quad (2.35)$$

$$\sigma_x = -2ay^3 + 2ey + 2g \quad (2.36)$$

$$\tau_{xy} = 6axy^2 - 3by^2 - 2ex - f \quad (2.37)$$

แทนสมการ (2.35) ลงใน (2.31) และ (2.32) แล้วอินทิเกรตเทียบกับ x และ y ตามลำดับจะได้ระยะขจัดในแนวแกน x คือ u และระยะขจัดในแนวแกน y คือ v ดังนี้

$$u = \frac{1}{E} [2a(2+v)xy^3 - (2ax^3 - 3bx^2 - 6cx + 2vex)y + 2dx - 2vgy] + A(y) \quad (2.38)$$

$$v = \frac{1}{E} \left[-\frac{a}{2}(1+2v)y^4 + [3avx^2 - 3bv^2x - 3vc + e]y^2 - 2dvy + 2gy \right] + B(x) \quad (2.39)$$

เมื่อ $A(y)$ และ $B(x)$ เป็นค่าคงที่ที่เป็นฟังก์ชันขึ้นอยู่กัย x และ y ตามลำดับ แทนค่าสมการ (2.38), (2.39) และ (2.37) ลงในสมการ (2.31), (2.32) และ (2.33) จะได้

$$\begin{aligned} & \frac{1}{E} [3b(2+v)y^2 + 2(1+v)f] + A'(y) \\ & + \frac{1}{E} [-2ax^3 + 3bx^2 + 6cx + 2(2+v)ex] + B'(x) = 0 \end{aligned} \quad (2.40)$$

สมการ (2.40) สามารถเขียนใหม่ได้โดยกำหนดค่าคงที่ขึ้นมาหนึ่งตัวคือ ω ดังนี้

$$\frac{1}{E} [3b(2+v)y^2 + 2(1+v)f] + A'(y) = \omega \quad (2.41)$$

$$+ \frac{1}{E} [-2ax^3 + 3bx^2 + 6cx + 2(2+v)ex] + B'(x) = -\omega \quad (2.42)$$

ค่าคงที่ $A(y)$ และ $B(x)$ สามารถหาได้จากการอินทิเกรตสมการ (2.41) และ (2.42) และแทนค่า $A(y)$ และ $B(x)$ ลงในสมการ (2.38) และ (2.39) จะได้

$$\begin{aligned} u = & \frac{1}{E} [2a(2+v)xy^3 - (2ax^3 - 3bx^2 - 6cx + 2vex)y + 2dx - 2vgy] \\ & - \frac{1}{E} [b(2+v)y^3 + 2(1+v)fy] + \omega y + u_0 \end{aligned} \quad (2.43)$$

$$v = \frac{1}{E} \left[-\frac{a}{2}(1+2\nu)y^4 + [3avx^2 - 3bvx - 3vc + e]y^2 - 2dvy + 2gy \right] + \frac{1}{E} \left[\frac{1}{2}ax^4 - bx^3 - 3cx^2 - (2+\nu)ex^2 \right] - \omega x + v_0 \quad (2.44)$$

สมการ (2.35), (2.36), (2.37), (2.43) และ (2.44) มีตัวแปรที่เป็นค่าคงที่ที่ไม่ทราบค่า ในการแก้ปัญหานี้จำเป็นต้องใช้เงื่อนไขขอบ (Boundary conditions) เข้ามาช่วยแก้ปัญหา โดยพิจารณาจากสภาพความเป็นจริงของคานแบบยึดปลายแน่นสองข้าง Timoshenko และ Goodier (1970) ได้นำเสนอเงื่อนไขขอบ [1] ที่เหมาะสมสำหรับคานประเภทนี้ไว้ดังนี้

- (1) $y = h/2, \sigma_y = 0$
- (2) $y = -h/2, \sigma_y = -q$
- (3) $y = h/2, \sigma_{xy} = 0$
- (4) $y = h/2, \tau_{xy} = 0$
- (5) $x = 0, y = 0, u = 0$
- (6) $x = l, y = 0, u = 0$
- (7) $x = 0, y = 0, v = 0$
- (8) $x = l, y = 0, v = 0$
- (9) $x = l, y = 0, \frac{\partial v}{\partial x} = 0$
- (10) $x = 0, y = 0, \frac{\partial v}{\partial x} = 0$

แทนค่าสมการ (2.35), (2.36), (2.37), (2.43) และ (2.44) ด้วยเงื่อนไขขอบทั้ง 10 เงื่อนไข จะได้ค่าคงที่ต่างๆดังนี้

$$\begin{aligned} a &= q/h^3, \quad b = ql/h^3, \quad c = q/2h - ql^2/6h^3 - qv/4h, \\ d &= -qv/4, \quad e = 3q/4h, \quad f = -3ql/4h, \quad g = -q/4, \\ u_0 &= 0, \quad v_0 = 0, \quad \omega = 0, \end{aligned} \quad (2.45)$$

นำค่าคงที่ในสมการ (2.45) แทนกลับลงในสมการ (2.35), (2.36), (2.37), (2.43) และ (2.44) จะได้ความเค้นและระยะขจัดดังนี้
ความเค้นในแนวแกน x

$$\sigma_x = -\frac{q}{2J} \left(x^2 - lx + \frac{l^2}{6} \right) y + \frac{q}{24J} (8y^3 - 3(2+\nu)h^2y - \nu h^3) \quad (2.46)$$

ความเค้นในแนวแกน y

$$\sigma_y = -\frac{q}{24J} (4y^3 - 3h^2y + h^3) \quad (2.47)$$

ความเค้นเฉือน

$$\tau_{xy} = \frac{q}{4I}(1-2x)\left(\frac{h^2}{4} - y^2\right) \quad (2.48)$$

ระยะขจัดในแนวแกน x

$$u = -\frac{qxy}{12EI}(1-x)(1-2x) + \frac{q(1-2x)y}{24EI}[3(1+\nu)h^2 - 2(2+\nu)y^2] \quad (2.49)$$

ระยะขจัดในแนวแกน y

$$v = \frac{q}{24EI}(1-x)^2 x^2 + \frac{q}{48EI}\{-2(1+2\nu)y^4\} + \left[(6x^2 - 6lx + l^2)2\nu + 3h^2(\nu+1)^2\right]y^2 + \{24I(\nu^2-1)y\} \quad (2.50)$$

$$\text{เมื่อ } J = h^3/12 \quad (2.51)$$

2.5 สรุปสาระสำคัญจากเอกสารที่เกี่ยวข้อง

Ding Hao-jiang, Huang De-jin และ Wang Hui-ming (2005) นำเสนอวิธีการแก้ปัญหาเชิงวิเคราะห์สำหรับคานแบบยึดปลายแน่นสองข้างภายใต้การภาระกระจายสม่ำเสมอ ฟังก์ชันความเค้นไบฮาร์โมนิกได้ถูกสร้างขึ้นในการศึกษานี้ ความเค้นตามวิธีการ Ariy function ถูกนำมาใช้เพื่อให้ได้ชุดของคำตอบ โดยใช้เงื่อนไขขอบเขตเช่นเดียวกับที่นำเสนอโดย Timoshenko และ Goodier (1970) คำตอบสมการสำหรับคานปลายยื่นและมีจุดรองรับที่ปลายคาน (Propped beam) ได้ถูกนำเสนอ นี่คือการตอบทั้งหมดของการวิเคราะห์บนระนาบความเค้นสำหรับคานหน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่มีสมบัติเหมือนกันในทุกทิศทางภายใต้การภาระกระจายสม่ำเสมอ

ธวัชชัย ศิริโคจรสมบัติ (2547) นำเสนอวิธีการควบคุมการโก่งตัวของโครงสร้างคานโดยใช้วัสดุเพียโซอิเล็กทริก โครงสร้างคานที่พิจารณาประกอบด้วยชั้นของโครงสร้างหลัก และชั้นของวัสดุเพียโซอิเล็กทริก ยึดติดกันอย่างสมบูรณ์ในรูปแบบของคานประกอบเป็นชั้นๆ โดยมีสภาพขอบสองลักษณะคือ แบบคานยื่นและคานจุดรองรับธรรมดา การควบคุมการโก่งตัวของคานให้มีรูปร่างเป็นไปตามต้องการ อาศัยการให้ศักย์ไฟฟ้าแบบคงที่เป็นช่วงๆ ตลอดความยาวคานกับชั้นวัสดุเพียโซอิเล็กทริก จากการแบ่งจำนวนช่วงของวัสดุเพียโซอิเล็กทริกตลอดความยาวคานที่เพิ่มขึ้น จะช่วยให้สามารถควบคุมการโก่งตัวของโครงสร้างคาน ให้ใกล้เคียงกับการโก่งตัวที่ต้องการได้มากขึ้น จากการศึกษาพบว่าในกรณีที่ต้องการค่าการโก่งตัวแบบยกกำลังสอง ศักย์ไฟฟ้าเหมาะสมที่ใช้มีค่าคงที่ตลอดความยาวของคาน

ณรงค์เดช เกตุแก้ว, อนุกุล มาลา และอุทัย ปัญญา (2543) นำเสนอเครื่องทดลองการโก่งของคานที่ไม่สมมาตร ที่สามารถหาค่าการโก่งของคานโลหะประเภทหาค่าได้ทางสถิติศาสตร์ ใช้ทดลองคานแบบยื่นวางตามแนวตั้งและที่ปลายคานด้านอิสระภายใต้แรงกระทำเป็นจุด ซึ่งคานที่ใช้ทดลองเป็นคานเหล็กหน้าตัดรูปตัวแอล ขีดความสามารถของคานที่ใช้ทดลองได้ไม่เกิน 2000 กรัม

ตัวเครื่องทดลองประกอบด้วย 2 ส่วนหลัก คือส่วนโครงสร้างและส่วนที่เป็นเครื่องมือวัดเพื่อใช้ทดลอง และวัดระยะการโก่งของคานแล้วนำไปเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการคำนวณตามทฤษฎี

ปัญญา คำออน และปิยพล ตติปาณิเทพ (2552) นำเสนอการวิเคราะห์พฤติกรรมการเคลื่อนตัวและการโก่งตัวของโครงสร้างโดยใช้การวิเคราะห์ภาพถ่าย แสดงการวิเคราะห์ผลของการเคลื่อนตัวและการโก่งตัวของโครงสร้างโดยนำตัวอย่างของคานคอนกรีตเสริมเหล็กมาทำการทดลองโดยการวิเคราะห์ด้วยภาพถ่ายจากการใช้กล้องวงจรปิดอินฟราเรด (Infrared CCTV) ผลการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมการวิเคราะห์ภาพถ่ายจะได้ข้อมูลที่เป็นพิกัด และเมื่อนำมาวิเคราะห์จากเวลาเริ่มต้นถึงเวลาในขณะใดๆที่ใส่แรงกระทำ จะสามารถหาการโก่งตัวของโครงสร้าง จากการเปรียบเทียบการวัดด้วยเครื่องมือที่เป็นมาตรฐานมีความคลาดเคลื่อน $\pm 10\%$ ซึ่งยอมรับได้



บทที่ 3

วิธีดำเนินการศึกษา

ในบทนี้ได้กล่าวถึงการดำเนินงานเพื่อให้บรรลุวัตถุประสงค์ โดยได้กำหนดวิธีการดำเนินการศึกษาให้สอดคล้องกับวัตถุประสงค์ที่ได้นำเสนอไว้ในบทที่ 1 มีรายละเอียดของแต่ละขั้นตอนดังต่อไปนี้

3.1 วิธีดำเนินการศึกษา

3.1.1 ศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์คานแบบยึดแน่นสองข้างที่อยู่ภายใต้แรงกระจายสม่ำเสมอ

3.1.2 ออกแบบโครงสร้างและคานแบบยึดแน่นสองข้างด้วยโปรแกรม SolidWorks

3.1.3 วิเคราะห์ความแข็งแรงของโครงสร้างที่ออกแบบด้วย CosmosWorks ต้องสามารถรับน้ำหนักและไม่ทำให้จุดยึดเคลื่อนที่เมื่อคานรับน้ำหนักกระจายสม่ำเสมอ

3.1.4 วิเคราะห์หาค่าความเค้นและระยะโง่งที่เกิดขึ้นในโครงสร้างและในคาน

3.1.5 ปรับปรุงแบบโครงสร้างและคานที่ออกแบบให้เหมาะสม

3.1.6 สร้างเครื่องทดสอบตามแบบที่ได้ออกแบบไว้ข้างต้น

3.1.7 ทดสอบความสามารถในการทำงานของเครื่องทดสอบที่สร้างขึ้นโดยเก็บข้อมูลผลการทดลองด้วย Data Logger MX100 อ่านค่าความเครียดที่ได้จากการทดลองและเปรียบเทียบผลกับสมการการโง่งและค่าความเครียดที่วิเคราะห์ด้วยโปรแกรม CosmosWorks

3.1.8 ปรับปรุงเครื่องอีกครั้งหากเกิดความผิดพลาดเกิน 10 % ของผลการทดสอบข้างต้น โดยต้องยึดสมการการโง่งเป็นหลัก

3.1.9 ออกแบบใบงานทดสอบประจำเครื่องทดสอบ

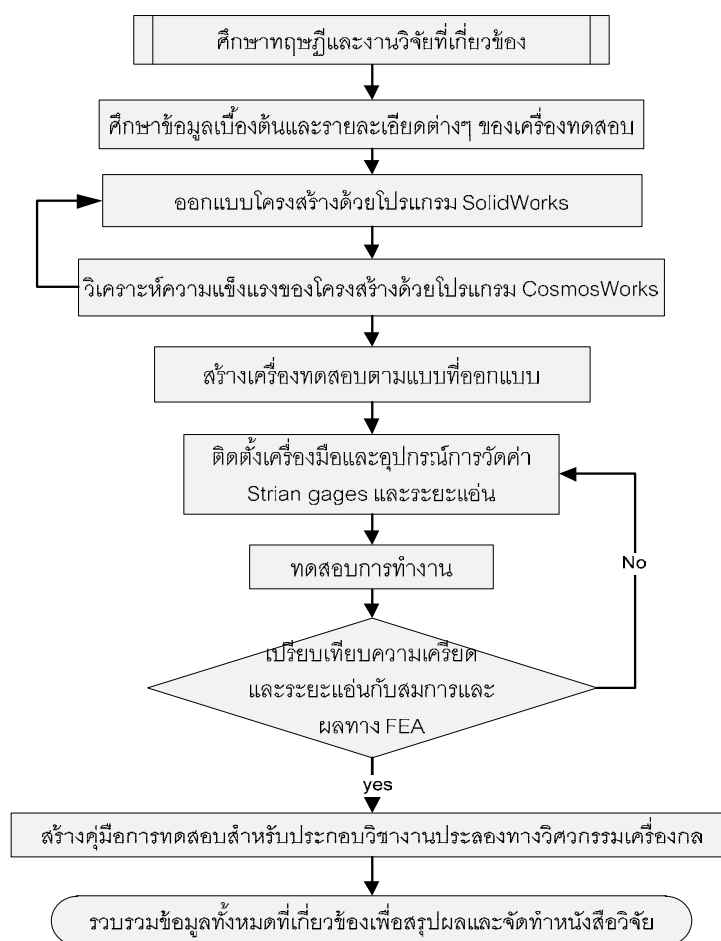
3.1.10 รวบรวมข้อมูลทั้งหมดที่เกี่ยวข้องเพื่อสรุปผล

3.1.11 รวบรวมข้อมูลทั้งหมดเขียนเล่มวิจัยและตีพิมพ์เผยแพร่ผลงาน

3.2 การออกแบบและวิเคราะห์ความแข็งแรงเครื่องทดสอบ

3.2.1 การออกแบบเครื่องทดสอบ แบ่งออกเป็น 3 ส่วนประกอบด้วย การออกแบบส่วนฐานคือฐานรองรับน้ำหนัก การออกแบบส่วนบนคือโครงสร้างสำหรับใส่ภาระ และการออกแบบคานพร้อม กับจุดยึด มีรายละเอียดดังนี้

3.2.1.1 การออกแบบโครงสร้างส่วนฐาน อลูมิเนียมโปรไฟล์ได้ถูกนำมาใช้ในการออกแบบซึ่งต้องพิจารณาตั้งแต่ขนาดความยาว หน้าตัดที่เหมาะสมสำหรับเครื่องทดสอบ ลักษณะของอลูมิเนียมโปรไฟล์ที่ถูกนำมาใช้แสดงดังรูปที่ 3-2 ที่มีขนาดหน้าตัดกว้าง 40 มม.และสูง 40 มม. ดังนั้นขนาดโครงสร้างส่วนฐานของเครื่องทดสอบคือกว้าง 68 ซม. ยาว 116 ซม.และสูง 12 ซม.โครงสร้างที่ออกแบบมีภาพฉายด้านต่างๆดังแสดงในรูปที่ 3-3

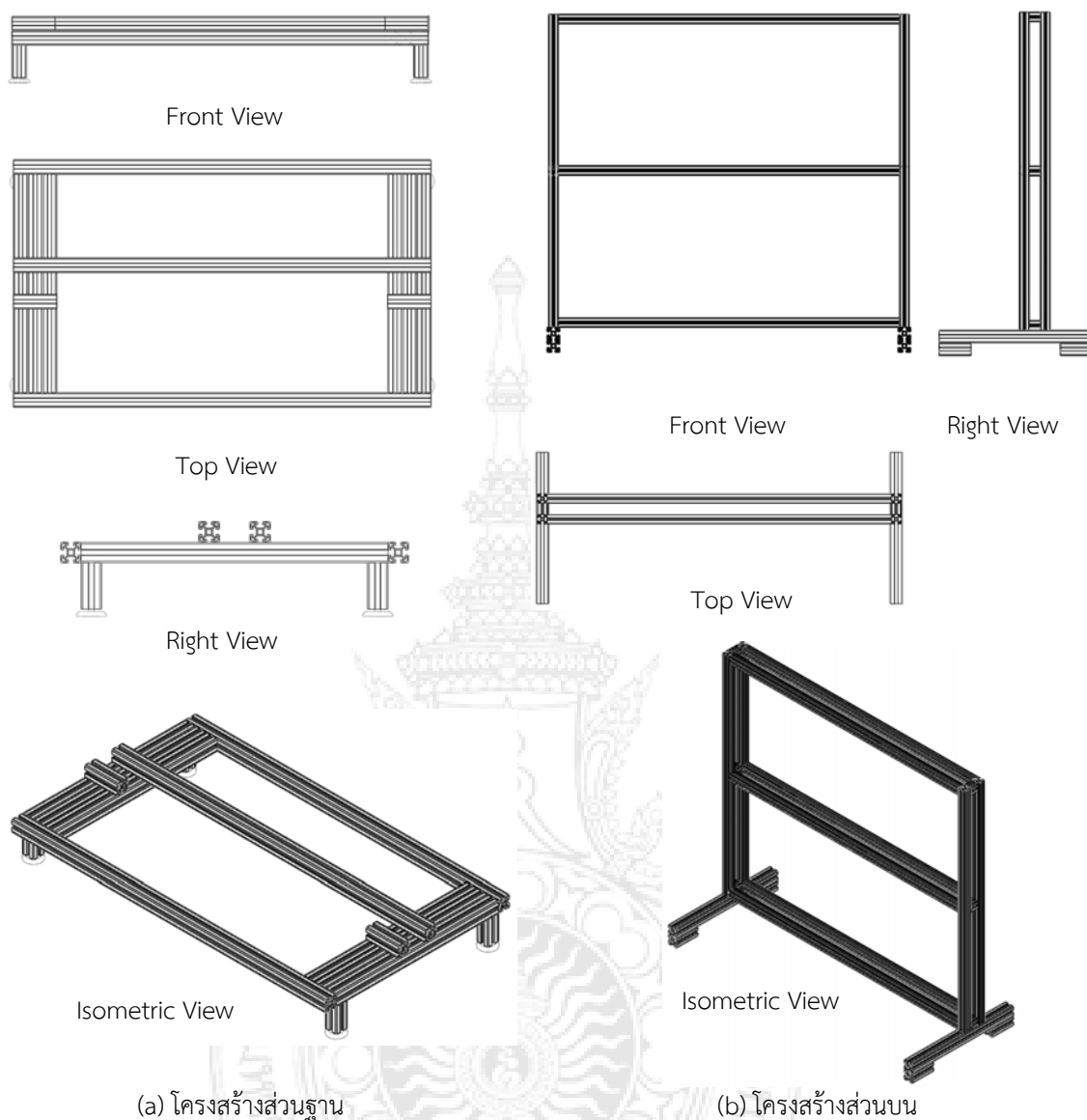


รูปที่ 3-1 ขั้นตอนการดำเนินงานศึกษา



รูปที่ 3-2 หน้าตัดอลูมิเนียมโปรไฟล์ แผ่นปิดหน้าตัดและสลักยึดที่นำมาใช้

3.2.1.2 การออกแบบโครงสร้างส่วนบน อลูมิเนียมโปรไฟล์ที่ถูกนำมาใช้มีหน้าตัดแบบเดียวกับที่ใช้ทำโครงสร้างส่วนฐานดังรูปที่ 3-2 ที่มีขนาดหน้าตัดกว้าง 30 มม.และสูง 30 มม. ขนาดโครงสร้างส่วนบนคือกว้าง 10 ซม. ยาว 115 ซม.และสูง 118 ซม. โครงสร้างส่วนบนนี้เมื่อวางอยู่บนโครงสร้างส่วนฐานโดยมีคานคั่นอยู่ระหว่างกลาง โครงสร้างส่วนบนนี้สามารถเคลื่อนถอยออกด้านหลังได้เพื่อการถอดประกอบคานและติดตั้งเครื่องมือทดสอบโครงสร้างส่วนบนที่ออกแบบมีภาพฉายด้านต่างๆดังแสดงในรูปที่ 3-3 และมีรายละเอียดของขนาดต่างๆอย่างชัดเจนในภาคผนวกท้ายเล่ม

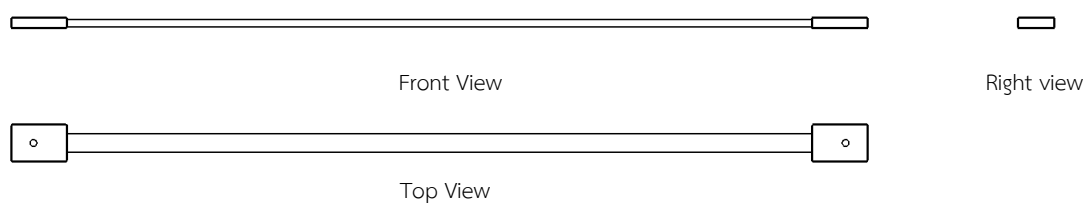


(a) โครงสร้างส่วนฐาน

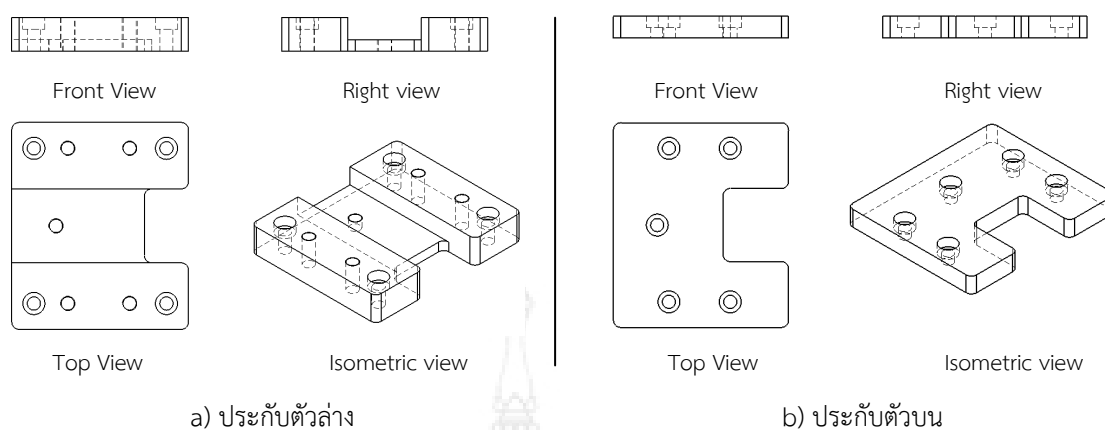
(b) โครงสร้างส่วนบน

รูปที่ 3-3 โครงสร้างส่วนฐานและส่วนบนที่ออกแบบด้วยโปรแกรม SolidWorks

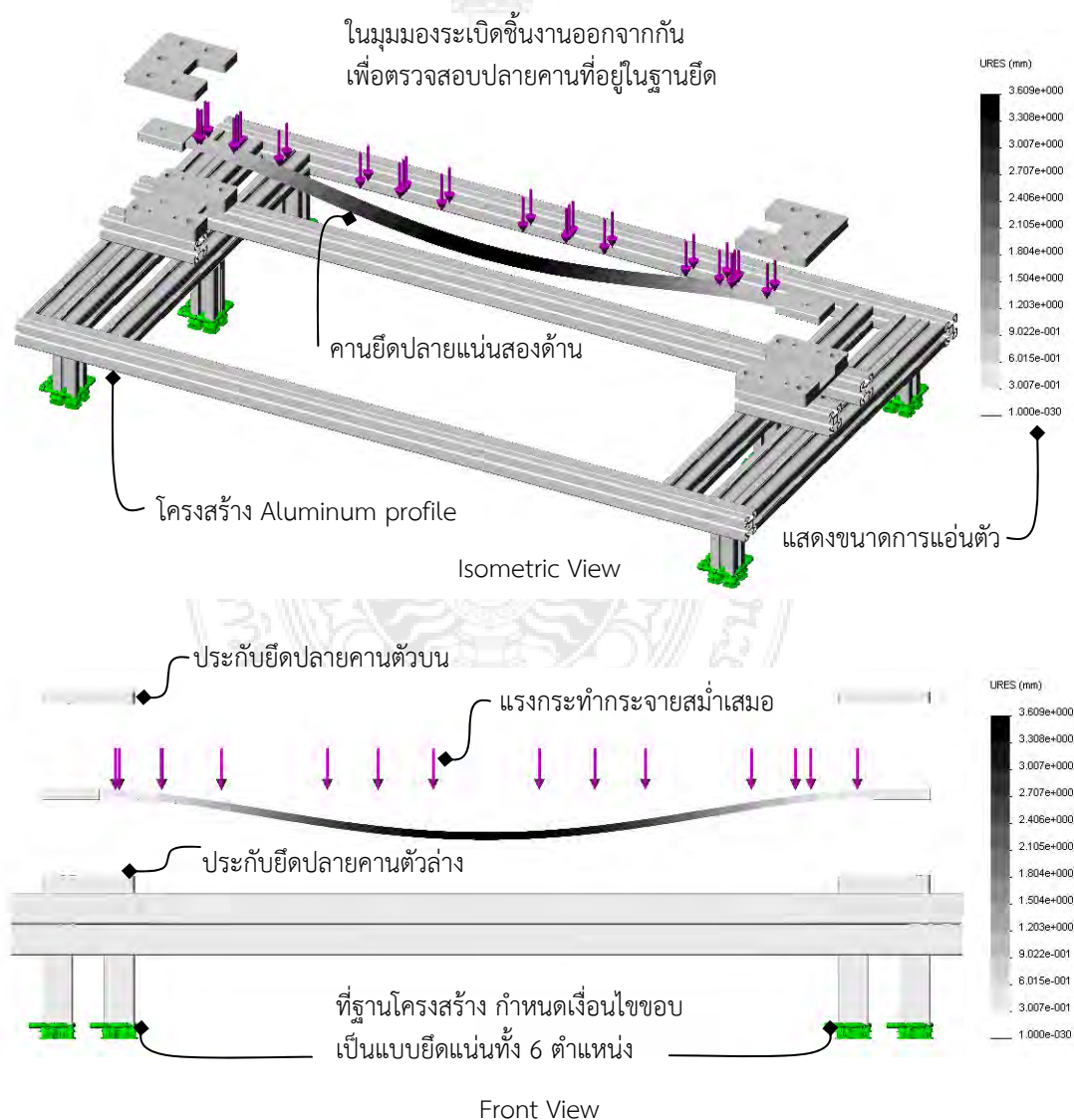
3.2.1.3 การออกแบบคานและอุปกรณ์จับยึดปลายคาน คานที่ใช้ในการทดสอบ มี 3 ชนิดแบ่งตามชนิดของวัสดุประกอบด้วย คานเหล็กเกรด AISI1020, คานอลูมิเนียมเกรด 6061 alloy และคานทองเหลือง ที่มีความยาว 1 ม. คานมีหน้าตัดกว้าง 25.4 มม. และหนา 10 มม.



รูปที่ 3-4 รูปร่างคาน



รูปที่ 3-5 รูปร่างของประกับจับยึดปลายคาน



รูปที่ 3-6 การแอ่นตัวที่เกิดขึ้นพร้อมๆกันของโครงสร้าง ประกับและคาน

3.2.2 การวิเคราะห์การแอ่นตัวของเครื่องทดสอบด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

ในการออกแบบเครื่องทดสอบการโก่งตัวสำหรับคานชนิดยึดปลายแน่นสองข้างนั้น จุดยึดที่ปลายคานสองด้านต้องได้รับการออกแบบที่ดี ประกับยึดปลายคานต้องมีความแข็งแรง ต้องไม่สามารถเคลื่อนตัวหรือขยับได้ และต้องสามารถถอดหรือประกอบเพื่อเปลี่ยนชนิดของคานได้ง่าย ดังนั้น ภายหลังการออกแบบโครงสร้างทั้งหมดแล้ว ต้องทำการวิเคราะห์การแอ่นตัวของคานที่ประกอบอยู่บนโครงสร้างภายใต้ภาระกระทำสูงสุดคือ 25 kg ต่อพื้นที่บนคานทั้งหมด วิธีที่ใช้ในการวิเคราะห์คือ ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ด้วยโปรแกรม CosmosWorks ผลที่ได้จากการวิเคราะห์คือการแอ่นตัวของคานและการแอ่นตัวของโครงสร้างที่เกิดขึ้นพร้อมๆกัน หากโครงสร้างและประกับยึดปลายคานเกิดการแอ่นตัวหรือขยับได้จะต้องทำการออกแบบใหม่ทั้งหมด ในรูปที่ 3-6 คือการแอ่นตัวของโครงสร้างและคาน จากรูปแสดงให้เห็นว่าโครงสร้างและประกับที่ได้ออกแบบสามารถรองรับและต้านทานต่อการแอ่นตัวที่จะเกิดขึ้นเนื่องจากภาระที่กระทำดังกล่าว ตัวคานเท่านั้นที่เกิดการแอ่นและแอ่นตัวมากที่สุดที่ตำแหน่งกลางคาน

3.3 การสร้างและการทดสอบ

3.3.1 การสร้างเครื่องทดสอบ ประกอบด้วย 4 ส่วนคือ การสร้างโครงสร้างส่วนฐาน, การสร้างโครงสร้างส่วนบน, การสร้างคานพร้อมกับประกับยึดและการติดตั้งเครื่องมือวัด มีขั้นตอนโดยรวมดังนี้

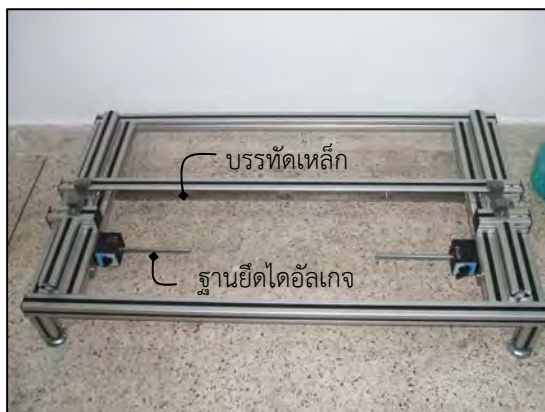
3.3.1.1 สร้างโครงสร้างส่วนฐาน โดยตัดอลูมิเนียมโปรไฟล์ด้วยเครื่องตัดพิเศษ เจาะรูตามแบบที่ได้ออกแบบมาและทำการยึดเข้าด้วยกันด้วยสลักยึดพิเศษและสลักเกลียว อลูมิเนียมโปรไฟล์ที่ประกอบเข้าด้วยกันจะมีความแข็งแรงสูง ดังรูปที่ 3-7a

3.3.1.2 สร้างโครงสร้างส่วนบน โดยตัดอลูมิเนียมโปรไฟล์ตามแบบและยึดเข้าด้วยกันด้วยสลักยึดพิเศษและสลักเกลียว ดังรูปที่ 3-7b และประกอบกล่องบรรจุน้ำเพื่อใช้เป็นภาชนะเก็บน้ำสำหรับภาระกระจายสม่ำเสมอ

3.3.1.3 การสร้างคานด้วยเครื่อง CNC Milling นั้นจะต้องให้ความสำคัญเป็นอย่างมาก เนื่องจากคานมีความบางและยาว ในการกัดคานต้องรองรับด้วยปากกาจับงาน 3 ตำแหน่งที่หัวคาน กลางคานและปลายคาน อีกทั้งยังต้องรองรับอีก 2 ตำแหน่งด้วยฐานหนุน เพื่อให้ได้คานที่มีความหนา คงที่ตลอดความยาวคาน ดังรูปที่ 3-8 และรูปที่ 3-9 คานทั้งสามชนิดที่ผ่านการกัดด้วยเครื่อง CNC Milling ยังต้องทำการขัดตกแต่งผิวอีกครั้งและต้องทำการเจาะรูที่ปลายคานทั้งสองด้านเพื่อให้สามารถล็อกเข้ากับประกับได้

3.3.1.4 กำหนดจุดที่จะติดตั้งรวมทั้งสิ้น 5 จุด ได้แก่ที่จุดกึ่งกลางของคาน (500 มม.) ด้านล่างผิวคานหนึ่งจุด และตำแหน่งที่วัดจากปลายคานไปตามความยาว (ดังรูปที่ 4-2) อีกสี่จุดคือที่ระยะ 100 มม., 200 มม., 300 มม. และ 400 มม. ใช้กระดาษทรายสำหรับขัดโลหะเบอร์ 400 ขัดพื้นที่ที่จะติดตั้ง Strain gages ทั้ง 5 จุดและเช็ดทำความสะอาดอีกครั้ง

3.3.1.5 ติดตั้ง Strain gages ที่ด้านล่างของคานด้วยกาวสำหรับติด Strain gages ดังรูปที่ 3-10 โดย Strain gages ที่เลือกใช้นี้เป็นชนิด KFG-5-120-C1-11L3M2R ดังรูปที่ 3-11 มี Gages length เท่ากับ 5 มิลลิเมตร เมื่อติดตั้งแล้วให้ทำการวัดค่าความต้านทานของ Strain gages ทุกตัวซึ่ง Gages resistance ที่อุณหภูมิบรรยากาศเป็น 24 °C , 50 %RH จะต้องอ่านค่าได้ในช่วง 120.0–120.8 Ω



a) โครงสร้างส่วนฐาน



b) โครงสร้างส่วนบน

รูปที่ 3-7 โครงสร้างส่วนบนและส่วนฐาน



a) ประกบยึดปลายคาน

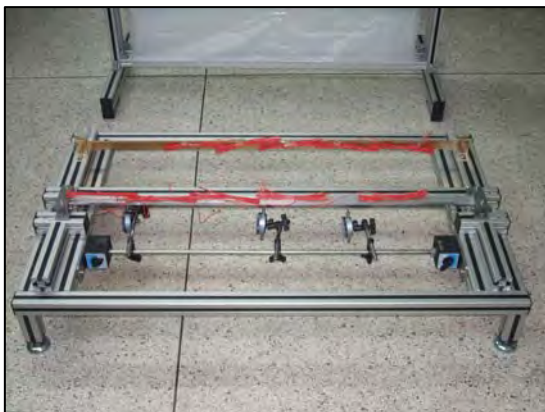


b) การติดตั้งคานลงบนเครื่อง CNC Milling

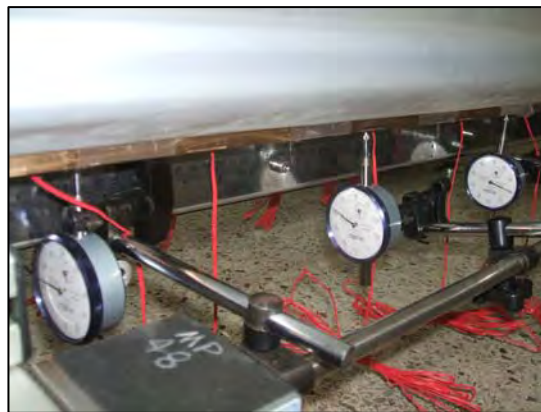
รูปที่ 3-8 ฐานยึดปลายคานและการกัดชิ้นงานคานด้วยเครื่องกัด CNC



รูปที่ 3-9 คานที่สร้างขึ้นด้วยเครื่องกัด CNC Milling



a) Strain gages ถูกติดตั้งลงบนคาน



b) การติดตั้ง Dial gages ได้คาน

รูปที่ 3-10 ตำแหน่งที่ติดตั้ง Strain gages และไดอัลเกจ



a) Strain gages



b) การวัดค่าความต้านทาน Strain gages

รูปที่ 3-11 Strain gages ชนิด KFG-5-120-C1-11L3M2R

3.3.1.5 ติดตั้ง Dial gages จำนวน 5 ตัว ลงบนฐานยึด ณ ตำแหน่งซึ่งได้ติดตั้ง Strain gages ลงไปแล้ว และติดตั้งบรรทัดเหล็กดังรูปที่ 3-10b

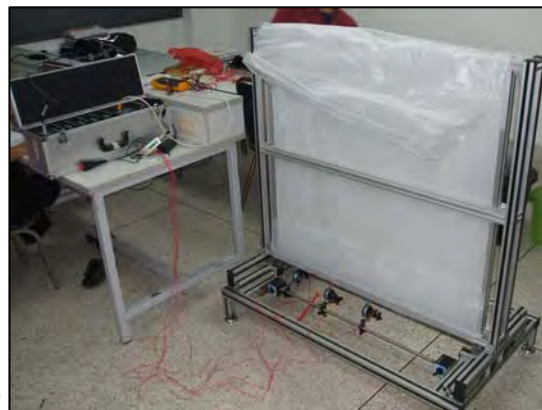
3.3.2 การทดสอบและการทดลอง ในการทดสอบการทำงานของเครื่องทดสอบมีวัตถุประสงค์เพื่อหาค่าความเครียดและระยะโก่งที่เกิดขึ้นในคานและนำผลไปเปรียบเทียบกับค่าการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์และผลการตามหลักการฟังก์ชันความเค้น ผลการเปรียบเทียบต้องมีความแตกต่างไม่เกิน 10% จึงสามารถสรุปได้ว่าเครื่องทดสอบที่ได้ออกแบบและสร้างมามีความสามารถในการทดสอบและสามารถนำไปใช้ในวิชาประลองทางวิศวกรรมเครื่องกลได้ โดยมีขั้นตอนการทดสอบต่างๆ ดังนี้

3.3.2.1 เริ่มต้นการทดลองต้องติดตั้งคานให้มั่นคงไม่หลวมหรือคลอนตัวได้ ตัวคานต้องไม่มีภาระภายนอกมากระทำ ได้คานได้ติดตั้ง Dial gages แล้ว ทำการตั้งค่าเริ่มต้นของ Dial gages ให้เป็นศูนย์ทุกตัว

3.3.2.2 นำปลายสายของ Strain gages ติดตั้งเข้ากับเครื่อง Data Logger MX100 ดังรูปที่ 3-12 กับ และควบคุมอุณหภูมิบรรยากาศให้อยู่ที่ 24°C , 50 % RH ปรับตั้งค่าความเครียดให้เป็นศูนย์



a. Data Logger MX100



b) การต่อ Strain gages เข้ากับ Data logger MX100

รูปที่ 3-12 Data Logger MX100 และการติดตั้งเครื่องมือทดสอบ

3.3.2.3 ขณะนี้คานได้อยู่ในสภาวะพร้อมทดสอบที่มีค่าความเครียดและการโก่งตัวเป็นศูนย์ นำน้ำเติมลงในถังบรรจุน้ำที่อยู่ในกล่องพลาสติกจำนวน 20 ลิตร ถังจะเคลื่อนตัวลงไปกับคานตลอดความยาวและคานจะเริ่มโก่งตามปริมาตรน้ำที่เพิ่มขึ้น Data Logger จะเก็บข้อมูลความเครียดที่เกิดขึ้นและแสดงผลที่คอมพิวเตอร์ ส่วนระยะการโก่งสามารถดูได้โดยตรงจาก Dial gages

3.3.2.4 นำค่าที่ได้ทั้งหมดไปเปรียบเทียบกับผลจากการคำนวณด้วยด้วยสมการทางคณิตศาสตร์และระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ซึ่งได้นำเสนอผลลัพธ์และการเปรียบเทียบทั้งหมดในบทที่ 4

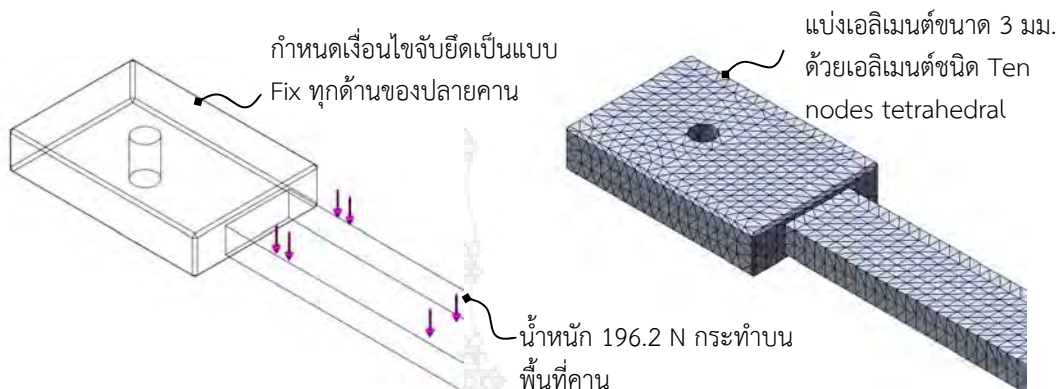
3.4 การหาระยะการโก่งของคานด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

สร้างแบบจำลองของคานเพื่อใช้วิเคราะห์ทางด้านระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยใช้โปรแกรม SolidWorks การวิเคราะห์ทางด้านระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ได้เลือกใช้ CosmosWorks ซึ่งการดำเนินงานในส่วนนี้มีรายละเอียดดังนี้

3.4.1 นำแบบจำลองสามมิติที่สร้างขึ้นด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป SolidWorks ดังรูปที่ 3-13 มากำหนดคุณสมบัติของวัสดุ วัสดุที่ใช้ในการทดสอบเป็นอลูมิเนียมเกรด 6061 alloy กำหนดวัสดุเป็นชนิดยืดหยุ่นเชิงเส้นและมีคุณสมบัติทางกลเหมือนกันในทุกทิศทุกทาง โดยค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นมีค่าเท่ากับ 69 GPa อัตราส่วนปัวซองเท่ากับ 0.33 ความแข็งแรงทางแรงดึงเท่ากับ 124.084 MPa ความเค้นที่จุดครากเท่ากับ 55.1485 MPa และความหนาแน่นทางมวลเท่ากับ $2,700 \text{ kg/m}^3$

3.4.2 การกำหนดเงื่อนไขขอบเขต เป็นการกำหนดเงื่อนไขของการวิเคราะห์ให้เป็นไปตามลักษณะทางกายภาพของแบบจำลองการทดสอบและเพื่อให้แบบจำลองเป็นไปตามสภาพความเป็นจริงที่เกิดขึ้น ดังนั้นเงื่อนไขขอบเขตที่กำหนดคือ ปลายคานเป็นแบบยึดแน่นได้ผลดังรูปที่ 3-13

3.4.3 การกำหนดภาระของแบบจำลองจะต้องกำหนดภาระให้สอดคล้องกับการทดลองและสภาพความเป็นจริง ปริมาณน้ำที่ใช้ในการทดสอบคือ 20 ลิตร คิดเป็นน้ำหนัก 196.2 N กระทำบนพื้นที่คานตลอดความยาวคานดังรูปที่ 3-13



รูปที่ 3-13 กำหนดเงื่อนไขขอบ ภาระ และการแบ่งเอลิเมนต์

ตารางที่ 3-1 สมบัติวัสดุที่ใช้ในการวิเคราะห์และทดลอง

Material Type	Tensile Strength (MPa)	Poisson's Ratio	Yield Stress (MPa)	Mass Density (kg/m ³)	Elastic Modulus (GPa)
Steel AISI1020	420.507	0.29	351.571	7,900	200
Brass	478.507	0.33	239.689	8,500	100
Aluminum 6061 alloy	124.084	0.33	55.1485	2,700	69

3.4.4 การแบ่งเอลิเมนต์ของแบบจำลอง เป็นการแบ่งแบบจำลองออกเป็นเอลิเมนต์เล็กๆ ดังรูปที่ 3-13 และแบบจำลองที่สร้างขึ้นเป็นแบบจำลอง 3 มิติ ดังนั้นชนิดของเอลิเมนต์ที่เลือกใช้คือ Ten nodes tetrahedral (3D Solid element) กำหนดขนาดของเอลิเมนต์เท่ากับ 3 มิลลิเมตร ส่งผลให้จำนวนเอลิเมนต์ที่วิเคราะห์ในกรณีนี้เท่ากับ 87,314 เอลิเมนต์ และมีจำนวนจุดต่อเท่ากับ 137,080 จุดต่อ

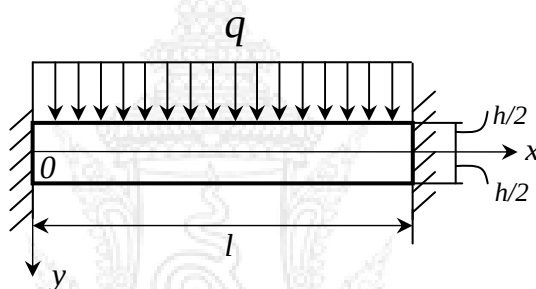
3.4.5 คอมพิวเตอร์จะทำการวิเคราะห์และประมวลผล ผลลัพธ์ที่ได้คือค่าความเค้น ความเครียด และระยะแอ่นตัว ซึ่งได้นำไปเปรียบเทียบกับผลลัพธ์จากการทดลองและนำเสนอในบทที่ 4

3.4.6 จากขั้นตอนแรกให้เปลี่ยนชนิดของวัสดุเป็น Steel1020 ที่มีค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นมีค่าเท่ากับ 200 GPa อัตราส่วนปัวซองเท่ากับ 0.29 ความแข็งแรงทางแรงดึงเท่ากับ 420.507 MPa ความเค้นที่จุดครากเท่ากับ 351.571 MPa และความหนาแน่นทางมวลเท่ากับ 7,900 kg/m³ และทำการวิเคราะห์ใหม่

3.4.7 จากขั้นตอนแรกให้เปลี่ยนชนิดของวัสดุเป็นทองเหลือง ที่มีค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นมีค่าเท่ากับ 100 GPa อัตราส่วนปัวซองเท่ากับ 0.33 ความแข็งแรงทางแรงดึงเท่ากับ 478.413 MPa ความเค้นที่จุดครากเท่ากับ 239.689 MPa และความหนาแน่นทางมวลเท่ากับ 8,500 kg/m³ และทำการวิเคราะห์ใหม่

3.5 การคำนวณหาการโก่งของคาน ความเค้น และความเครียดด้วยหลักการฟังก์ชันความเค้น

คานแบบยึดปลายแน่นสองข้างเป็นคานที่หาค่าไม่ได้ทางสถิตศาสตร์ เนื่องจากมีตัวแปรที่ไม่ทราบค่ามากกว่าสมการตามหลักสถิตศาสตร์ ดังนั้นหากต้องการหาค่าความเค้น ความเครียดหรือระยะโก่งของคานประเภทนี้จำเป็นต้องเริ่มต้นหาแรงปฏิกิริยาที่ปลายคานทั้งสองด้านก่อนที่มีตัวแปรไม่ทราบค่าคือ แรงในแนวตั้ง 2 ค่า โมเมนต์รอบปลายคาน 2 ค่า ในการออกแบบและสร้างเครื่องทดสอบนี้ ผู้เขียนมีวัตถุประสงค์ที่จะใช้เป็นต้นแบบเครื่องทดสอบการโก่งในวิชาการประลองทางวิศวกรรมเครื่องกล โดยนำผลการทดลองมาเปรียบเทียบกับผลการคำนวณด้วยสมการทางคณิตศาสตร์ ในการคำนวณทางทฤษฎีด้วยสมการทางคณิตศาสตร์นี้ผู้เขียนเลือกใช้หลักการฟังก์ชันความเค้น (Stress function principle) เพื่อให้นักศึกษาได้ทราบและเข้าใจหลักการที่นอกเหนือจากที่เรียนมาในเบื้องต้น โดยยกตัวอย่างการคำนวณและอธิบายวิธีการวิเคราะห์ที่ได้ดังนี้



รูปที่ 3-14 ตัวแปรประกอบเงื่อนไขขอบ

3.5.1 คานเหล็ก Steel AISI1020

คานมีขนาดหน้าตัดกว้าง (b) = 0.0254 m, หนา (h) = 0.01 m, ยาว (l) = 1 m จากสมการ (2.51)

$$J = \frac{1}{12} h^3 = \frac{1}{12} (0.01^3) = 8.333 \times 10^{-8}$$

3.5.1.1 ตัวอย่างการคำนวณหาความเค้นที่ระยะกึ่งกลางคาน ($x=0.5\text{m}$) ที่ผิวด้านล่างคาน ($h=0.005\text{m}$)

จากตารางที่ 3-1 สำหรับวัสดุ AISI1020 มีค่า $E = 200 \text{ GPa}$, $\nu = 0.29$, $y = 0.005 \text{ m}$, $l = 1 \text{ m}$, $h = 0.01 \text{ m}$ และ $x = 0.5 \text{ m}$ ปริมาณน้ำที่ใช้ในการทดสอบคือ 20 ลิตร คิดเป็นน้ำหนักต่อพื้นที่บนคาน (q) เท่ากับ $7,724.4 \text{ N/m}^2$ จากสมการ (2.46)

$$\sigma_x = -\frac{q}{2J} \left(x^2 - lx + \frac{l^2}{6} \right) y + \frac{q}{24J} \{ 8y^3 - 3(2+\nu)h^2y - \nu h^3 \}$$

แทนค่า

$$\sigma_x = \left[\left(\frac{-7,724.4}{2 \times 8.333 \times 10^{-8}} \right) \left((0.5^2) - (1 \times 0.5) + \frac{1^2}{6} \right) \times 0.005 \right]$$

$$= + \left[\left(\frac{7,724.4}{24 \times 8.333 \times 10^{-8}} \right) \times (8(0.005^3) - 3(2 + 0.29)) \times 0.005(0.01^2) - 0.29(0.01^3) \right]$$

$$\sigma_x = 1.93005 \times 10^7 \text{ N/m}^2$$

3.5.1.2 ตัวอย่างการคำนวณหาความเค้นที่ระยะกึ่งกลางคาน ($x=0.5\text{m}$) ที่ผิวด้านล่างคาน ($h=0.005\text{m}$)

จากสมการ (2.47)
$$\sigma_y = -\frac{q}{24J}(4y^3 - 3h^2y + h^3)$$

แทนค่า

$$\sigma_y = -\frac{7,724.4}{24(8.333 \times 10^{-8})}(4(0.05)^3 - 3(0.1^2)(0.05) + 0.01^3)$$

$$\sigma_y = 0 \text{ N/m}^2$$

3.5.1.3 ตัวอย่างการคำนวณหาความเครียดที่ระยะกึ่งกลางคานที่ผิวด้านล่างคาน ($x=0.5 \text{ m}$)

จากสมการ (2.2)
$$\varepsilon_x = \frac{\sigma_x}{E}$$

แทนค่า

$$\varepsilon_x = \frac{19.3005 \text{ MPa}}{200 \times 10^3 \text{ MPa}} = 0.0000965$$

จากสมการ (2.2)
$$\varepsilon_y = \frac{\sigma_y}{E}$$

แทนค่า

$$\varepsilon_y = \frac{0 \text{ MPa}}{200 \times 10^3 \text{ MPa}} = 0$$

ตารางที่ 3-2 ความเค้นและความเครียดในแนวแกน x ที่ระยะต่างๆ

ระยะ, x (mm)	100	200	300	400	500
Stress, σ_x (MPa)	-17.776	-1.555	10.031	16.983	19.3005
Stress, σ_y (MPa)	0	0	0	0	0
Strain, ε_x	-0.00008888	-0.00000777	0.00005015	0.0000849	0.0000965
Strain, ε_y	0	0	0	0	0

3.5.1.4 ตัวอย่างการคำนวณหาระยะโก่งของคานที่กึ่งกลางคาน ($x=0.5\text{m}$) ที่ผิวด้านล่างคาน ($h=0.005\text{m}$)

การคำนวณหาค่าระยะกระจัดในแนวแกน y จากสมการ (2.49)

$$u = \frac{qxy}{12EJ}(l-x)(l-2x) + \frac{q(l-2x)y}{24EJ}[3(l+\nu)h^2 - 2(2+\nu)y^2]$$

แทนค่า
$$u = \frac{(7,724.4)(0.5)(0.005)}{12 \times (200 \times 10^9)(8.333 \times 10^{-8})} (1 - 0.5)(1 - 2(0.05) +$$

$$\frac{(7,724.4)(1 - 2(0.5))(0.005)}{24 \times (200 \times 10^9)(8.333 \times 10^{-8})} [3(1 + 0.29)(0.01^2) - 2(2 + 0.29)(0.005^2)]$$

$$u = 0 \text{ m}$$

การคำนวณหาค่าระยะกระจัดในแนวแกน y จากสมการ (2.50)

$$v = \frac{q}{24EJ} (l - x)^2 x^2 + \frac{q}{48EJ} \left\{ -2(1 + 2\nu)y^4 + \right.$$

$$\left. \left[(6x^2 - 6lx + l^2)2\nu + 3h^2(\nu + 1)^2 \right] y^2 + 24J(\nu^2 - 1)y \right\}$$

แทนค่า

$$v = \frac{7,724.4 \times (1 - 0.5)^2 (0.5^2)}{24 \times 200 \times 10^9 \times 8.333 \times 10^{-8}} + \frac{7,724.4}{48 \times 200 \times 10^9 \times 8.333 \times 10^{-8}} \left\{ -2(1 + 2(0.29))(0.005)^4 + \right.$$

$$\left. \left[\{6(0.5)^2 - 6(1)(0.5) + (1^2)\} 2(0.29) + 3(0.005^2)(0.29 + 1)^2 \right] (0.005)^2 + \right.$$

$$\left. 24(8.333 \times 10^{-8})(0.29^2 - 1)(0.005) \right\}$$

$$v = 0.00120687 \text{ m}$$

ตารางที่ 3-3 ระยะขจัดในแนวแกน x และ y ที่ด้านล่างของผิวคาน ($y = +5\text{mm}$) ณ ตำแหน่งต่างๆ

ระยะ, x (mm)	100	200	300	400	500
Displacement in x , u (mm)	0.013925	0.01855	0.01623	0.00000927	0
Displacement in y , v (mm)	0.1564	0.4943	0.851	1.112	1.206

3.5.2 คานทองเหลือง Brass

3.5.2.1 ตัวอย่างการคำนวณหาความเค้นที่ระยะกึ่งกลางคาน ($x=0.5\text{m}$) ที่ผิวด้านล่างคาน ($h=0.005\text{m}$)

จากตารางที่ 3-1 สำหรับวัสดุ Brass มีค่า $E = 100 \text{ GPa}$, $\nu = 0.33$, $y = 0.005 \text{ m}$, $l = 1 \text{ m}$, $h = 0.01 \text{ m}$ และ $x = 0.5 \text{ m}$ ปริมาณน้ำที่ใช้ในการทดสอบคือ 20 ลิตร คิดเป็นน้ำหนักต่อพื้นที่บนคาน (q) เท่ากับ $7,724.4 \text{ N/m}^2$ จากสมการ (2.46)

$$\sigma_x = -\frac{q}{2J} \left(x^2 - lx + \frac{l^2}{6} \right) y + \frac{q}{24J} \{ 8y^3 - 3(2 + \nu)h^2 y - \nu h^3 \}$$

แทนค่า

$$\begin{aligned}\sigma_x &= \left[\left(\frac{-7,724.4}{2 \times 8.333 \times 10^{-8}} \right) \left((0.5^2) - (1 \times 0.5) + \frac{1^2}{6} \right) \times 0.005 \right] \\ &= + \left[\left(\frac{7,724.4}{24 \times 8.333 \times 10^{-8}} \right) \times (8(0.005^3) - 3(2 + 0.33)) \times 0.005(0.01^2) - 0.33(0.01^3) \right]\end{aligned}$$

$$\sigma_x = 1.93005 \times 10^7 \text{ N/m}^2$$

3.5.2.2 ตัวอย่างการคำนวณหาความเค้นที่ระยะกึ่งกลางคาน ($x=0.5\text{m}$) ที่ผิวด้านล่างคาน ($h=0.005\text{m}$)

จากสมการ (2.47)
$$\sigma_y = -\frac{q}{24J}(4y^3 - 3h^2y + h^3)$$

แทนค่า

$$\begin{aligned}\sigma_y &= -\frac{7,724.4}{24(8.333 \times 10^{-8})}(4(0.05)^3 - 3(0.1^2)(0.05) + 0.01^3) \\ \sigma_y &= 0 \text{ N/m}^2\end{aligned}$$

3.5.2.3 ตัวอย่างการคำนวณหาความเครียดที่ระยะกึ่งกลางคานที่ผิวด้านล่างคาน ($x=0.5 \text{ m}$)

จากสมการ (2.2)
$$\epsilon_x = \frac{\sigma_x}{E}$$

แทนค่า

$$\epsilon_x = \frac{19.3005 \text{ MPa}}{100 \times 10^3 \text{ MPa}} = 0.0000965$$

จากสมการ (2.2)
$$\epsilon_y = \frac{\sigma_y}{E}$$

แทนค่า

$$\epsilon_y = \frac{0 \text{ MPa}}{100 \times 10^3 \text{ MPa}} = 0$$

ตารางที่ 3-4 ความเค้นและความเครียดในแนวแกน x ที่ระยะต่างๆ

ระยะ, x (mm)	100	200	300	400	500
Stress, σ_x (MPa)	-17.777	-1.555	10.031	16.982	19.3005
Stress, σ_y (MPa)	0	0	0	0	0
Strain, ϵ_x	-0.0001777	-0.0001555	0.0001003	0.0001698	0.0001930
Strain, ϵ_y	0	0	0	0	0

3.5.2.4 ตัวอย่างการคำนวณหาระยะโก่งของคานที่กึ่งกลางคาน ($x=0.5\text{m}$) ที่ผิวด้านล่างคาน ($h=0.005\text{m}$)

การคำนวณหาค่าระยะกระจัดในแนวแกน y จากสมการ (2.49)

$$u = \frac{qxy}{12EJ}(l-x)(l-2x) + \frac{q(l-2x)y}{24EJ} [3(l+\nu)h^2 - 2(2+\nu)y^2]$$

แทนค่า

$$u = \frac{(7,724.4)(0.5)(0.005)}{12 \times (100 \times 10^9)(8.333 \times 10^{-8})} (1-0.5)(1-2(0.05)) +$$

$$\frac{(7,724.4)(1-2(0.5))(0.005)}{24 \times (100 \times 10^9)(8.333 \times 10^{-8})} [3(1+0.33)(0.01^2) - 2(2+0.33)(0.005^2)]$$

$$u = 0 \text{ m}$$

การคำนวณหาค่าระยะกระจัดในแนวแกน y จากสมการ (2.50)

$$v = \frac{q}{24EJ}(l-x)^2 x^2 + \frac{q}{48EJ} \{-2(1+2\nu)y^4 +$$

$$[(6x^2 - 6lx + l^2)2\nu + 3h^2(\nu+1)^2]y^2 + 24J(\nu^2 - 1)y\}$$

แทนค่า

$$v = \frac{7,724.4 \times (1-0.5)^2 (0.5^2)}{24 \times 100 \times 10^9 \times 8.333 \times 10^{-8}} + \frac{7,724.4}{48 \times 100 \times 10^9 \times 8.333 \times 10^{-8}} \{-2(1+2(0.33))(0.005)^4 +$$

$$[\{6(0.5)^2 - 6(1)(0.5) + (1^2)\}2(0.33) + 3(0.005^2)(0.33+1)^2](0.005)^2 +$$

$$24(8.333 \times 10^{-8})(0.33^2 - 1)(0.005)\}$$

$$v = 0.00241372 \text{ m}$$

ตารางที่ 3-5 ระยะขจัดในแนวแกน x และ y ที่ด้านล่างของผิวคาน ($y = +5\text{mm}$) ณ ตำแหน่งต่างๆ

ระยะ, x (mm)	100	200	300	400	500
Displacement in x , u (mm)	0.0000278	0.0000371	0.0000324	0.00001854	0
Displacement in y , v (mm)	0.3129	0.9887	1.703	2.224	2.413

3.5.3 คานอลูมิเนียม Aluminum 6061 Alloy

3.5.3.1 ตัวอย่างการคำนวณหาความเค้นที่ระยะกึ่งกลางคาน ($x=0.5\text{m}$) ที่ผิวด้านล่างคาน ($h=0.005\text{m}$)

จากตารางที่ 3-1 สำหรับวัสดุ Aluminum 6061 Alloy มีค่า $E = 69 \text{ GPa}$, $\nu = 0.33$, $y = 0.005 \text{ m}$, $l = 1 \text{ m}$, $h = 0.01 \text{ m}$ และ $x = 0.5 \text{ m}$ ปริมาณน้ำที่ใช้ในการทดสอบคือ 20 ลิตร คิดเป็นน้ำหนักต่อพื้นที่บนคาน (q) เท่ากับ $7,724.4 \text{ N/m}^2$ จากสมการ (2.46)

$$\sigma_x = -\frac{q}{2J} \left(x^2 - lx + \frac{l^2}{6} \right) y + \frac{q}{24J} \{ 8y^3 - 3(2+\nu)h^2y - \nu h^3 \}$$

แทนค่า

$$\begin{aligned} \sigma_x &= \left[\left(\frac{-7,724.4}{2 \times 8.333 \times 10^{-8}} \right) \left((0.5^2) - (1 \times 0.5) + \frac{1^2}{6} \right) \times 0.005 \right] \\ &= + \left[\left(\frac{7,724.4}{24 \times 8.333 \times 10^{-8}} \right) \times (8(0.005^3) - 3(2 + 0.33) \times 0.005(0.01^2) - 0.33(0.01^3)) \right] \end{aligned}$$

$$\sigma_x = 1.93005 \times 10^7 \text{ N/m}^2$$

3.5.3.2 ตัวอย่างการคำนวณหาความเค้นที่ระยะกึ่งกลางคาน ($x=0.5\text{m}$) ที่ผิวด้านล่างคาน ($h=0.005\text{m}$)

จากสมการ (2.47) $\sigma_y = -\frac{q}{24J} (4y^3 - 3h^2y + h^3)$

แทนค่า

$$\begin{aligned} \sigma_y &= -\frac{7,724.4}{24(8.333 \times 10^{-8})} (4(0.05)^3 - 3(0.1^2)(0.05) + 0.01^3) \\ \sigma_y &= 0 \text{ N/m}^2 \end{aligned}$$

3.5.3.3 ตัวอย่างการคำนวณหาความเครียดที่ระยะกึ่งกลางคานที่ผิวด้านล่างคาน ($x=0.5 \text{ m}$)

จากสมการ (2.2) $\epsilon_x = \frac{\sigma_x}{E}$

แทนค่า

$$\epsilon_x = \frac{19.3005 \text{ MPa}}{69 \times 10^3 \text{ MPa}} = 0.00027971$$

จากสมการ (2.2) $\epsilon_y = \frac{\sigma_y}{E}$

แทนค่า

$$\epsilon_y = \frac{0 \text{ MPa}}{69 \times 10^3 \text{ MPa}} = 0$$

ตารางที่ 3-6 ความเค้นและความเครียดในแนวแกน x ที่ระยะต่างๆ

ระยะ, x (mm)	100	200	300	400	500
Stress, σ_x (MPa)	-17.777	-1.555	10.031	16.982	19.3005
Stress, σ_y (MPa)	0	0	0	0	0
Strain, ϵ_x	-0.0002576	-0.00002254	0.0001453	0.00024612	0.00027971
Strain, ϵ_y	0	0	0	0	0

3.5.3.4 ตัวอย่างการคำนวณหาระยะโก่งของคานที่กึ่งกลางคาน ($x=0.5m$) ที่ผิวด้านล่างคาน ($h=0.005m$)

การคำนวณหาค่าระยะกระจัดในแนวแกน y จากสมการ (2.49)

$$u = \frac{qxy}{12EJ}(l-x)(l-2x) + \frac{q(l-2x)y}{24EJ}[3(l+\nu)h^2 - 2(2+\nu)y^2]$$

แทนค่า

$$u = \frac{(7,724.4)(0.5)(0.005)}{12 \times (69 \times 10^9)(8.333 \times 10^{-8})}(1-0.5)(1-2(0.05) +$$

$$\frac{(7,724.4)(1-2(0.5))(0.005)}{24 \times (69 \times 10^9)(8.333 \times 10^{-8})}[3(1+0.33)(0.01^2) - 2(2+0.33)(0.005^2)]$$

$$u = 0 \text{ m}$$

การคำนวณหาค่าระยะกระจัดในแนวแกน y จากสมการ (2.50)

$$v = \frac{q}{24EJ}(l-x)^2 x^2 + \frac{q}{48EJ}\{-2(1+2\nu)y^4 +$$

$$[(6x^2 - 6lx + l^2)2\nu + 3h^2(\nu+1)^2]y^2 + 24J(\nu^2 - 1)y\}$$

แทนค่า

$$v = \frac{7,724.4 \times (1-0.5)^2 (0.5^2)}{24 \times 69 \times 10^9 \times 8.333 \times 10^{-8}} + \frac{7,724.4}{48 \times 69 \times 10^9 \times 8.333 \times 10^{-8}}\{-2(1+2(0.33))(0.005)^4 +$$

$$[\{6(0.5)^2 - 6(1)(0.5) + (1^2)\}2(0.33) + 3(0.005^2)(0.33+1)^2](0.005)^2 +$$

$$24(8.333 \times 10^{-8})(0.33^2 - 1)(0.005)\}$$

$$v = 0.0034981 \text{ m}$$

ตารางที่ 3-7 ระยะขจัดในแนวแกน x และ y ที่ด้านล่างของผิวคาน ($y = +5mm$) ณ ตำแหน่งต่างๆ

ระยะ, x (mm)	100	200	300	400	500
Displacement in x , u (mm)	0.00004036	0.00005378	0.00004704	0.0000268	0
Displacement in y , v (mm)	0.4536	1.432	2.468	3.224	3.498

บทที่ 4

ผลการทดลองและการวิเคราะห์ข้อมูล

จากบทที่ 3 ได้อธิบายการดำเนินงานต่างๆ ทั้งในส่วนของการสร้างเครื่องทดสอบ การทดสอบ และในส่วนของการวิเคราะห์ด้วยคอมพิวเตอร์ ในบทนี้จะนำเสนอผลการศึกษาที่ผ่านมาและวิเคราะห์ข้อมูลทั้งหมดตามหัวข้อต่างๆ ดังนี้

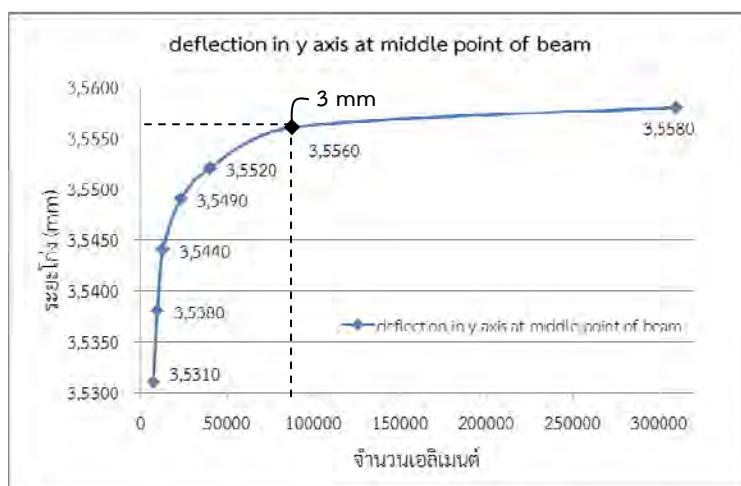
- 4.1 ผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์
- 4.2 ผลการคำนวณด้วยสมการคณิตศาสตร์ตามหลักการฟังก์ชันความเค้นผลและการวิเคราะห์
- 4.3 ผลการทดลอง
- 4.4 การวิเคราะห์และการเปรียบเทียบผลทั้งสามวิธี

4.1 ผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

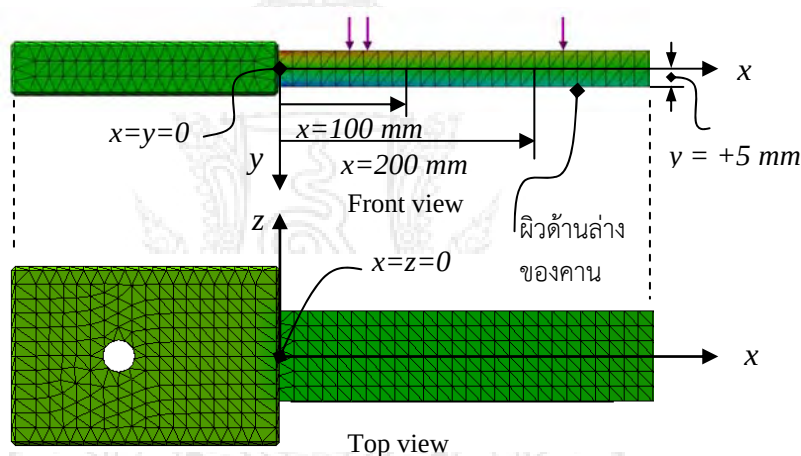
จากการออกแบบคานแบบยึดปลายแน่นสองข้างและสร้างแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ (3D-CAD Model) ขึ้นมา แบบจำลองได้ถูกนำเข้าสู่กระบวนการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ภายใต้การวิเคราะห์แบบสถิตศาสตร์ (Static Analysis) คานรองรับภาระกระจายสม่ำเสมอ $7,724.4 \text{ N/m}^2$ และปลายคานถูกยึดแน่นทั้งสองข้าง รูปแบบในการวิเคราะห์นี้ใช้วิเคราะห์กับคานสามชนิดคือ คานเหล็ก AISI1020, คานทองเหลือง Brass และคานอลูมิเนียม Aluminum 6061Alloy ด้วยสมบัติของวัสดุที่แสดงในตารางที่ 3-1 การวิเคราะห์จำเป็นต้องกำหนดขนาดเอลิเมนต์ให้เหมาะสม ในตารางที่ 4-1 และรูปที่ 4-1 แสดงการเปลี่ยนแปลงขนาดเอลิเมนต์และจำนวนเอลิเมนต์ที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงระยะโก่ง ในที่นี้เลือกแสดงระยะโก่งสูงสุดที่กลางคานในทิศทางตามแนวแกน y พบว่าที่ขนาดเอลิเมนต์เท่ากับ 3 มม. ด้วยจำนวนเอลิเมนต์ 87,314 คือขนาดเอลิเมนต์ที่เหมาะสมสำหรับการวิเคราะห์ เพราะที่ตำแหน่งนี้เส้นกราฟในรูปที่ 4-1 มีการเปลี่ยนแปลงระยะโก่งและความชันของเส้นกราฟลดลง นั่นคือถึงแม้ว่าขนาดเอลิเมนต์ลดลงกว่า 3 มม. ก็ไม่ส่งผลที่มีนัยสำคัญต่อระยะโก่ง

ตารางที่ 4-1 ระยะโก่งเทียบกับการเปลี่ยนแปลงขนาดเอลิเมนต์ (คานอลูมิเนียม)

No.	ขนาดเอลิเมนต์ (มม.)	จำนวนเอลิเมนต์	ระยะโก่งในแนวแกน y ที่กึ่งกลางคาน (มม.)
1	8	7,419	3.531
2	7	9,987	3.538
3	6	13,108	3.544
4	5	23,408	3.549
5	4	40,288	3.552
6	3	87,314	3.556
7	2	310,153	3.558



รูปที่ 4-1 การเปลี่ยนแปลงระยะโก่งเทียบกับจำนวนเอลิเมนต์



รูปที่ 4-2 การกำหนดจุดเริ่มต้นของพิกัด ($x=y=0$) และทิศทางการกำหนดตำแหน่งต่างๆบนคาน

ในรูปที่ 4-2 แสดงการกำหนดจุดเริ่มต้น ($x=y=0$) เพื่อใช้เป็นจุดเริ่มต้นในการกำหนดตำแหน่งบนคานและใช้อ้างอิงการนำเสนอผลการวิเคราะห์ที่ตำแหน่งต่าง ๆ นั้น เนื่องจากคานมีความสมมาตร ดังนั้นการนำเสนอผลการวิเคราะห์จะนำเสนอเพียงครึ่งเดียวของระยะความยาวคานคือที่ระยะ 0-500 มม. เท่านั้น อีกทั้งผลลัพธ์ทุกค่าที่นำเสนอจะเป็นผลลัพธ์ที่อยู่ผิวด้านล่างของคาน ($y=+5$ mm) เมื่อทำการวิเคราะห์คานเหล็ก Steel1020 แล้วในขั้นตอนการแสดงผลลัพธ์นั้น ต้องทำการกำหนดลักษณะหรือชนิดของผลลัพธ์ก่อนเช่น หากต้องการแสดงผลของระยะโก่งที่เกิดขึ้นในแนวแกน y จำเป็นต้องเปลี่ยนวิธีการแสดงผลในโปรแกรม ซึ่งในโปรแกรม CosmosWorks ในส่วน Displacement ต้องเลือกการแสดงผลแบบ UY: Y Displacement ถ้าต้องการแสดงผลความเค้น ต้องทำการแสดงผลแบบ SX: X Normal Stress และถ้าต้องการแสดงผลความเครียดจะต้องทำการแสดงผลแบบ EPSX: X Normal Strain ซึ่งรูปแบบการแสดงผลเหล่านี้ได้ถูกนำมาใช้กับคานทั้งสามชนิด และผลลัพธ์ที่นำเสนอทั้งหมดเป็นผลลัพธ์ที่โหนด (Node Values) ของเอลิเมนต์ ผลจากการวิเคราะห์ต่างๆแสดงดังตารางที่ 4-2 ถึง 4-4

ตารางที่ 4-2 ความเค้น,ความเครียดและระยะโก่งที่ระยะต่างๆสำหรับคานเหล็ก AISI1020

ระยะ, x (mm)	50	100	150	200	250
Stress, σ_x (MPa)	-27.577	-17.548	-8.963	-1.297	4.988
Strain, ϵ_x	-0.000137	-0.0000877	-0.0000448	-0.00000650	0.0000249
Deflection in y direction (mm)	0.0470	0.1653	0.3241	0.5106	0.6952

ระยะ, x (mm)	300	350	400	450	500
Stress, σ_x (MPa)	10.289	14.281	17.140	18.909	19.475
Strain, ϵ_x	0.0000507	0.0000714	0.0000857	0.0000945	0.0000973
Deflection in y direction (mm)	0.8678	1.020	1.132	1.205	1.228

ตารางที่ 4-3 ความเค้น,ความเครียดและระยะโก่งที่ระยะต่างๆ สำหรับคานทองเหลือง

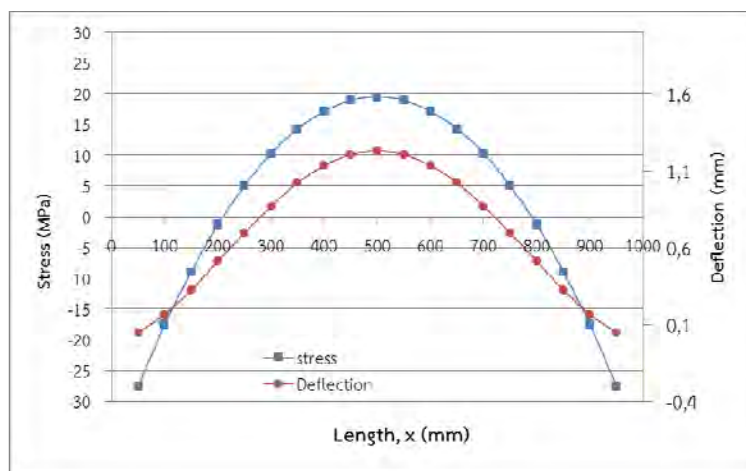
ระยะ, x (mm)	50	100	150	200	250
Stress, σ_x (MPa)	-27.587	-17.562	-8.978	-1.312	4.973
Strain, ϵ_x	-0.0002759	-0.0001756	-0.00008984	-0.00001316	0.00004971
Deflection in y direction (mm)	0.0934	0.3294	0.6464	1.019	1.388

ระยะ, x (mm)	300	350	400	450	500
Stress, σ_x (MPa)	10.137	14.268	17.127	18.895	19.460
Strain, ϵ_x	0.0001013	0.0001426	0.0001712	0.0001889	0.0001946
Deflection in y direction (mm)	1.733	2.037	2.261	2.406	2.453

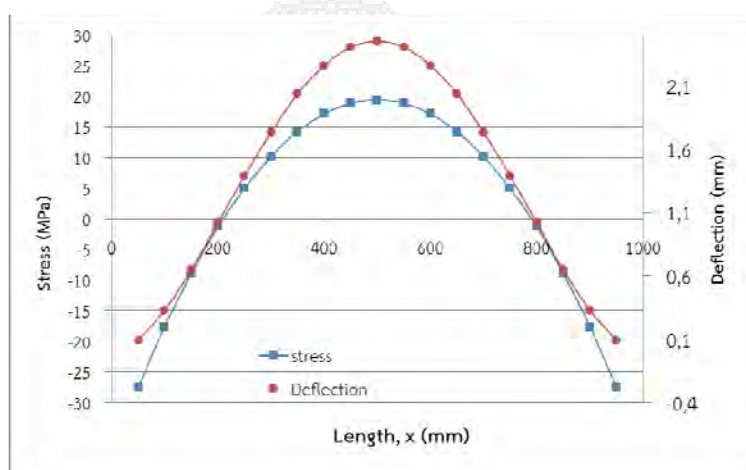
ตารางที่ 4-4 ความเค้น,ความเครียดและระยะโก่งที่ระยะต่างๆสำหรับคานอลูมิเนียม 6061Alloy

ระยะ, x (mm)	50	100	150	200	250
Stress, σ_x (MPa)	-27.587	-17.562	-8.978	-1.312	4.973
Strain, ϵ_x	-0.0003999	-0.0002545	-0.0001302	-0.00001907	0.00007205
Deflection in y direction (mm)	0.1355	0.4775	0.9368	1.477	2.011

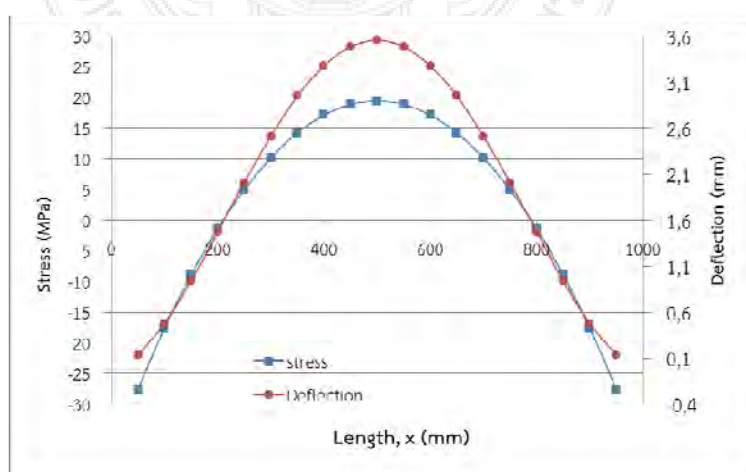
ระยะ, x (mm)	300	350	400	450	500
Stress, σ_x (MPa)	10.137	14.268	17.127	18.895	19.460
Strain, ϵ_x	0.0001469	0.0002067	0.0002482	0.0002738	0.0002820
Deflection in y direction (mm)	2.511	2.952	3.277	3.487	3.556



รูปที่ 4-3 ความเค้นและระยะโก่งที่ระยะต่างๆสำหรับคานเหล็ก AISI1020



รูปที่ 4-4 ความเค้นและระยะโก่งที่ระยะต่างๆ สำหรับคานทองเหลือง



รูปที่ 4-5 ความเค้นและระยะโก่งที่ระยะต่างๆสำหรับคานอลูมิเนียม 6061Alloy

4.2 ผลการคำนวณด้วยสมการคณิตศาสตร์ตามหลักการฟังก์ชันความเค้น

จากสมการฟังก์ชันของความเค้นที่นำเสนอโดย DING Hao-jiang, HUANG De-jin และ WANG Hui-ming [1] ได้ถูกนำมาใช้ในการศึกษาครั้งนี้เพื่อใช้เปรียบเทียบผลลัพธ์จากการทดลองด้วยเครื่องทดสอบการโก่งที่ออกแบบและนำเสนอตัวอย่างการคำนวณในบทที่ 3 จากผลการคำนวณได้ถูกนำมาแสดงอีกครั้งให้ชัดเจนขึ้นโดยเพิ่มเติมตำแหน่งการคำนวณดังแสดงในตารางที่ 4-5 ถึง 4-7 และนำเสนอในรูปแบบกราฟดังรูปที่ 4-6 ถึง 4-8 ผลการคำนวณมีความสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์คือน้อยกว่า 0.001% นั่นคือมีสองรูปแบบการวิเคราะห์ที่ใช้เป็นค่าอ้างอิงเพื่อตรวจสอบผลการทดลอง

ตารางที่ 4-5 ความเค้น,ความเครียดและระยะโก่งที่ระยะต่างๆสำหรับคานเหล็ก AISI1020

ระยะ, x (mm)	50	100	150	200	250
Stress, σ_x (MPa)	-27.625	-17.776	-9.086	-1.555	4.817
Strain, ϵ_x	-0.000138	-0.0000888	-0.0000454	-0.00000777	0.0000241
Deflection in y direction (mm)	0.0436	0.1564	0.3139	0.4943	0.6788

ระยะ, x (mm)	300	350	400	450	500
Stress, σ_x (MPa)	10.031	14.086	16.983	18.721	19.300
Strain, ϵ_x	0.0000502	0.0000704	0.0000849	0.0000936	0.0000965
Deflection in y direction (mm)	0.851	0.9994	1.112	1.182	1.206

ตารางที่ 4-6 ความเค้น,ความเครียดและระยะโก่งที่ระยะต่างๆ สำหรับคานทองเหลือง

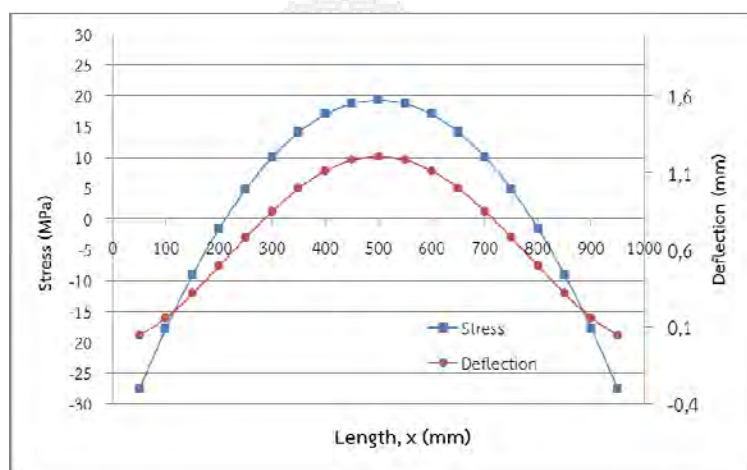
ระยะ, x (mm)	50	100	150	200	250
Stress, σ_x (MPa)	-27.625	-17.777	-9.087	-1.555	4.816
Strain, ϵ_x	-0.0002762	-0.0001777	-0.0000908	-0.0000155	0.00004816
Deflection in y direction (mm)	0.0873	0.3129	0.6279	0.9887	1.357

ระยะ, x (mm)	300	350	400	450	500
Stress, σ_x (MPa)	10.031	14.086	16.982	18.721	19.300
Strain, ϵ_x	0.000100	0.0001408	0.000169	0.0001872	0.0001930
Deflection in y direction (mm)	1.703	1.998	2.224	2.365	2.413

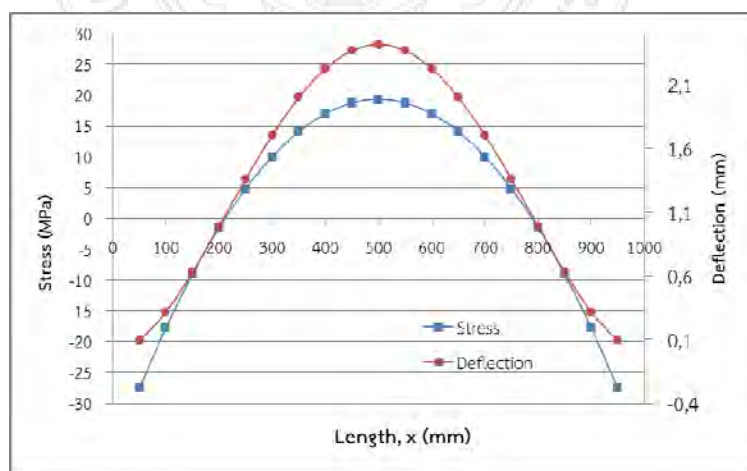
ตารางที่ 4-7 ความเค้น,ความเครียดและระยะโก่งที่ระยะต่างๆสำหรับคานอลูมิเนียม 6061Alloy

ระยะ, x (mm)	50	100	150	200	250
Stress, σ_x (MPa)	-27.625	-17.777	-9.087	-1.555	4.816
Strain, ϵ_x	-0.000400	-0.0002576	-0.00001316	-0.0000225	0.0000698
Deflection in y direction (mm)	0.1266	0.4536	0.9100	1.432	1.967

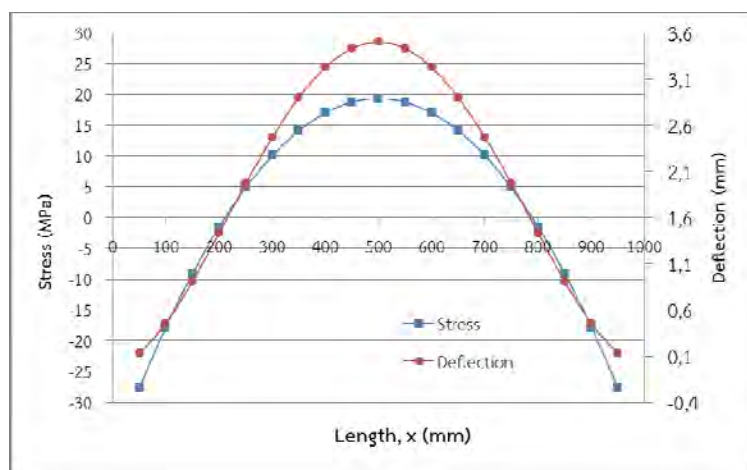
ระยะ, x (mm)	300	350	400	450	500
Stress, σ_x (MPa)	10.031	14.086	16.982	18.721	19.300
Strain, ϵ_x	0.0001453	0.0002041	0.0002461	0.0002713	0.0002797
Deflection in y direction (mm)	2.468	2.896	3.224	3.428	3.498



รูปที่ 4-6 ความเค้นและระยะโก่งที่ระยะต่างๆสำหรับคานเหล็ก AISI1020



รูปที่ 4-7 ความเค้นและระยะโก่งที่ระยะต่างๆ สำหรับคานทองเหลือง



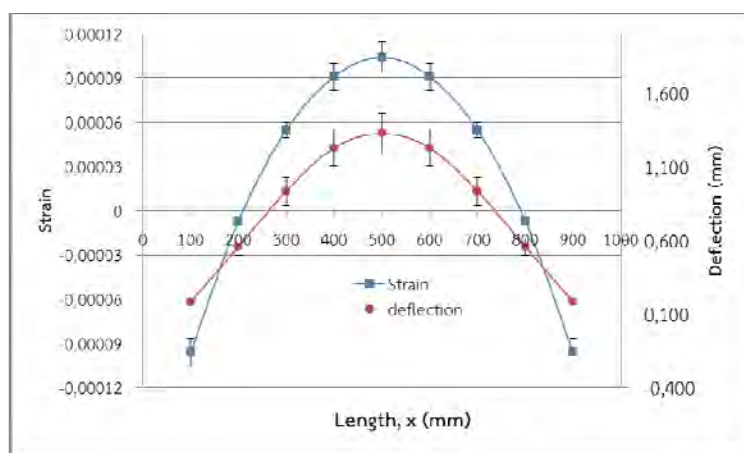
รูปที่ 4-8 ความเค้นและระยะโก่งที่ระยะต่างๆสำหรับคานอลูมิเนียม 6061Alloy

4.3 ผลการทดลอง

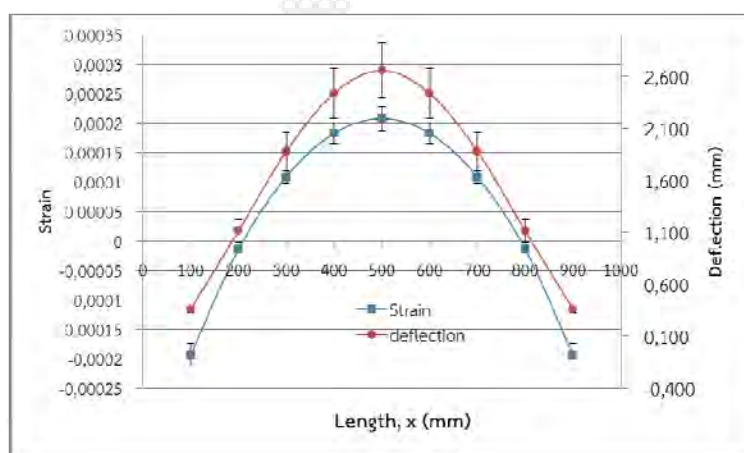
จากการออกแบบและสร้างเครื่องทดสอบดังที่นำเสนอในบทก่อนๆ เครื่องทดสอบได้ถูกนำมาใช้ในการทดสอบดังรายละเอียดการทดสอบในหัวข้อ 3.3.2 ตำแหน่งในทิศทางตามแกน x หรือตามความยาวคานได้ถูกกำหนดเพียง 5 ตำแหน่งคือ 100 มม., 200 มม., 300 มม., 400 มม. และ 500 มม. ผลลัพธ์ที่ได้จากการทดลองโดยตรงคือความเครียดและระยะโก่ง สำหรับความเค้น สามารถคำนวณได้โดยใช้ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดดังสมการ (2.2) ผลการทดลองที่ตำแหน่งต่างๆ ได้แสดงดังตารางที่ 4-8 ถึง 4-10 และแสดงในรูปแบบกราฟดังรูปที่ 4-9 ถึง 4-11

ตารางที่ 4-8 ความเค้น, ความเครียดและระยะโก่งที่ระยะต่างๆ

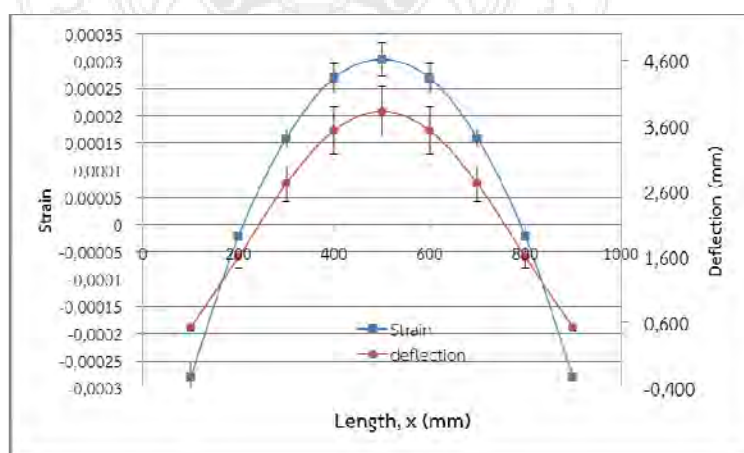
ระยะ, x (mm)	100	200	300	400	500
คานเหล็ก Steel AISI1020					
Stress, σ_x (MPa)	-19.206	-1.4144	10.930	18.168	20.802
Strain, ϵ_x	-0.00009603	-0.00000707	0.0000546	0.0000908	0.0001040
Deflection in y direction (mm)	0.182	0.544	0.931	1.225	1.323
คานทองเหลือง Brass					
Stress, σ_x (MPa)	-19.280	-1.412	10.859	18.249	21.744
Strain, ϵ_x	-0.0001928	-0.00001412	0.0001086	0.0001824	0.0002074
Deflection in y direction (mm)	0.362	1.112	1.879	2.432	2.657
คานอลูมิเนียม 6061Alloy					
Stress, σ_x (MPa)	-19.281	-1.431	10.967	18.598	20.936
Strain, ϵ_x	-0.0002794	-0.0000207	0.0001589	0.0002695	0.0003034
Deflection in y direction (mm)	0.521	1.601	2.719	3.529	3.823



รูปที่ 4-9 ความเครียดและระยะโก่งที่ระยะต่างๆสำหรับคานเหล็ก AISI1020



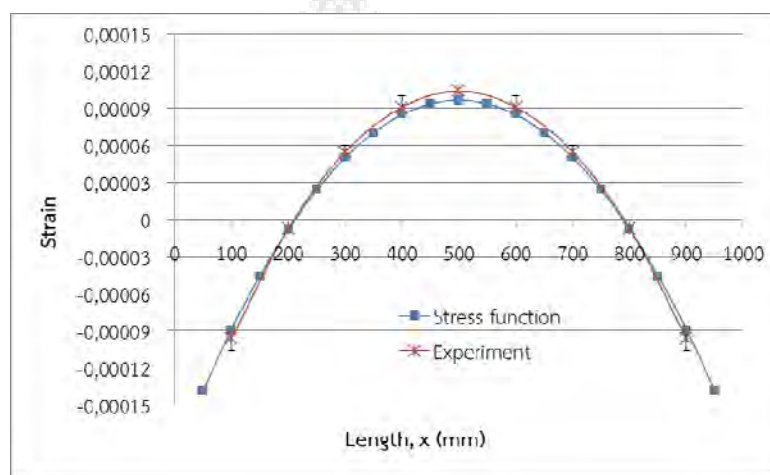
รูปที่ 4-10 ความเครียดและระยะโก่งที่ระยะต่างๆ สำหรับคานทองเหลือง



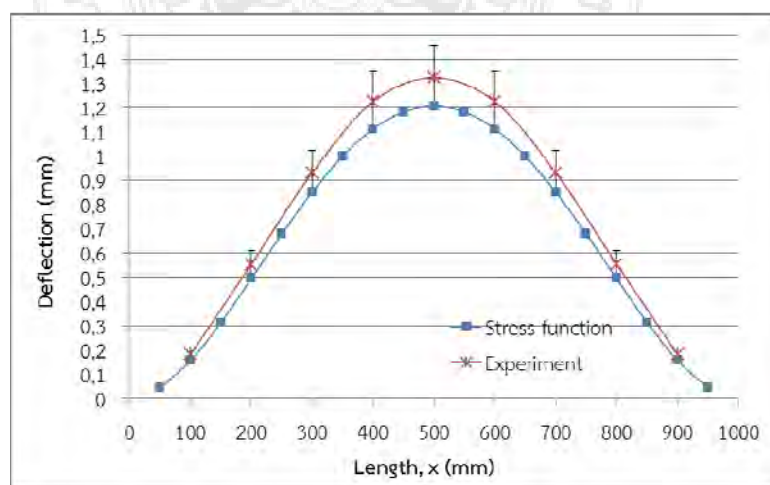
รูปที่ 4-11 ความเครียดและระยะโก่งที่ระยะต่างๆสำหรับคานอลูมิเนียม 6061Alloy

4.4 การวิเคราะห์และการเปรียบเทียบผลทั้งสามวิธี

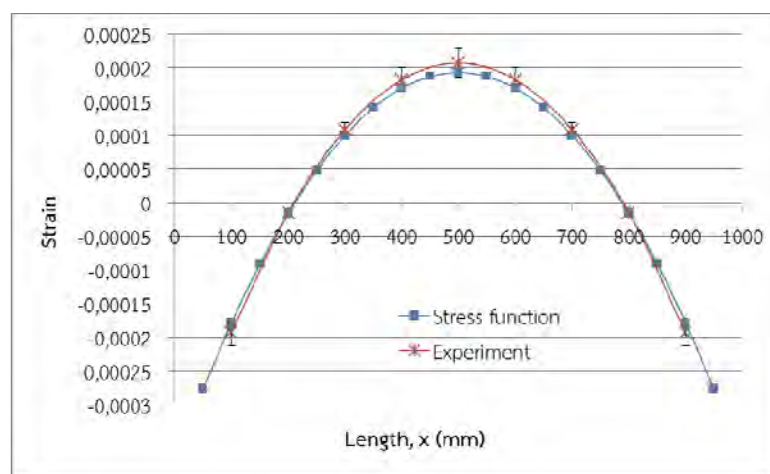
ผลลัพธ์จากการคำนวณด้วยสมการทางคณิตศาสตร์และผลลัพธ์จากการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์มีความสอดคล้องกันดังแสดงในข้างต้น ความแตกต่างของผลลัพธ์ทั้งสองวิธีมีค่าต่างกันไม่เกิน 0.001% ดังนั้นในการเปรียบเทียบกับผลการทดลองจึงใช้ผลลัพธ์จากการวิเคราะห์ด้วยสมการทางคณิตศาสตร์ตามหลักการฟังก์ชันความเค้นเป็นสิ่งเปรียบเทียบเท่านั้น ความเครียดและระยะโก่งของคานทั้งสามชนิดได้ถูกนำมาเปรียบเทียบดังแสดงในรูปที่ 4-9 ถึง 4-11 และเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนแสดงในตารางที่ 4-9 จากเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนมีความแตกต่างไม่เกิน 10% แสดงให้เห็นว่าเครื่องทดสอบการโก่งสำหรับคานแบบยึดแน่นสองข้างภายใต้น้ำหนักกระจายสม่ำเสมอสามารถใช้ประกอบการเรียนการสอนในวิชาการประลองทางวิศวกรรมเครื่องกลได้



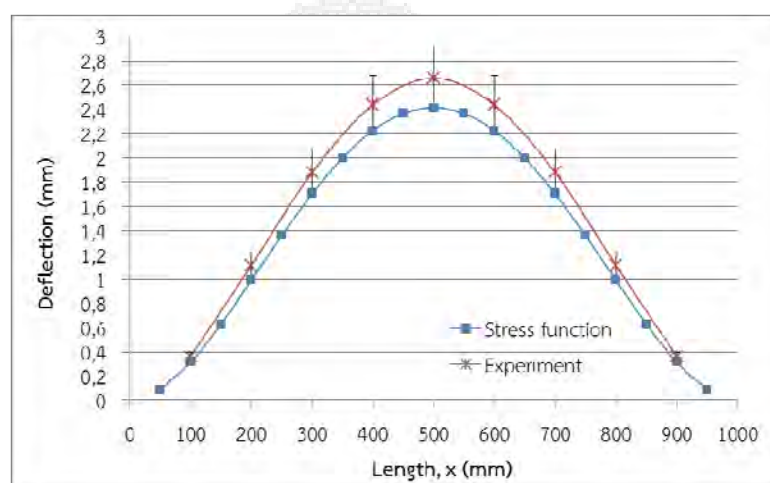
รูปที่ 4-12 การเปรียบเทียบความเครียดสำหรับคานเหล็ก Steel AISI 1020



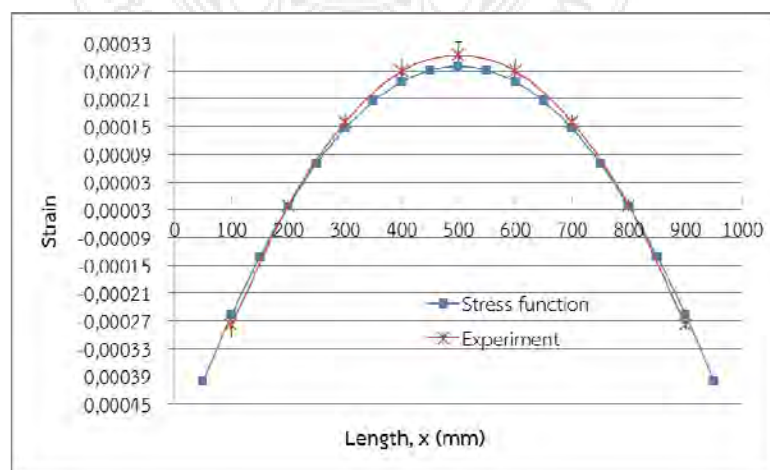
รูปที่ 4-13 การเปรียบเทียบระยะโก่งสำหรับคานเหล็ก Steel AISI 1020



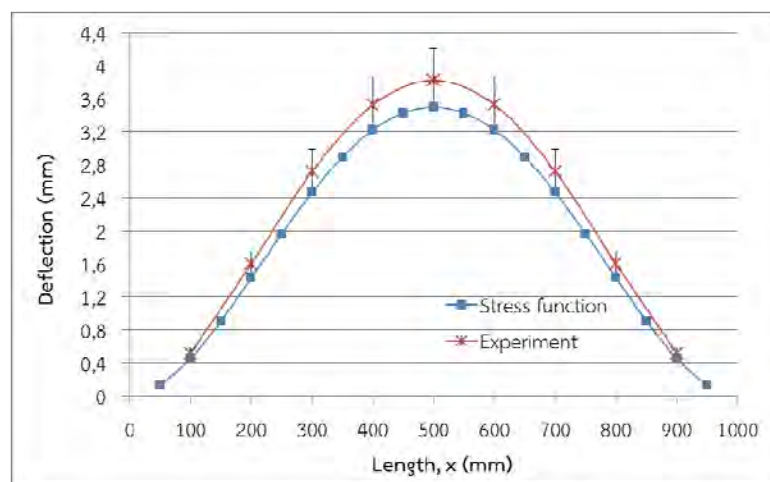
รูปที่ 4-14 การเปรียบเทียบความเครียดสำหรับคานทองเหลือง (Brass)



รูปที่ 4-15 การเปรียบเทียบระยะโก่งสำหรับคานทองเหลือง (Brass)



รูปที่ 4-16 การเปรียบเทียบความเครียดสำหรับคานอลูมิเนียม 6061Alloy



รูปที่ 4-17 การเปรียบเทียบระยะโค้งสำหรับคานอลูมิเนียม 6061Alloy

ตารางที่ 4-9 เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน

ระยะ, x (mm)	100	200	300	400	500
คานเหล็ก SteelAISI1020					
% Error of Strain	9.5	8.8	7.8	6	6.9
% Error of Deflection	10	8.5	7.3	8.2	7.7
คานทองเหลือง Brass					
% Error of Strain	9.8	7.8	7.2	6.6	6.6
% Error of Deflection	9.8	9.1	8.4	7.7	8.3
คานอลูมิเนียม 6061Alloy					
% Error of Strain	9.8	8.8	8.2	8.6	7.6
% Error of Deflection	9.2	8.4	8.3	7.7	7.5

บทที่ 5

สรุปผลและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการศึกษา

งานศึกษานี้เป็นการออกแบบเครื่องทดสอบการโก่งของคานแบบยึดแน่นสองข้างภายใต้ภาระกระจายสม่ำเสมอ การออกแบบนี้ใช้เป็นต้นแบบของเครื่องทดสอบการโก่งในวิชาการประลองทางวิศวกรรมเครื่องกล โปรแกรม SolidWorks คือเครื่องมือที่ใช้ในการออกแบบและโปรแกรม CosmosWorks คือเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์ความแข็งแรงของโครงสร้าง หลังจากที่ได้เครื่องทดสอบได้ถูกสร้างตามแบบที่ออกแบบแล้ว ต้องทำการทดสอบความสามารถในการทำงานของเครื่องทดสอบ ผลลัพธ์จากการทดสอบประกอบด้วยระยะโก่งของคานซึ่งอ่านค่าได้จาก Dial gauges และความเครียดที่วัดค่าได้จาก Strain gauges ณ ตำแหน่งที่วัดจากปลายคานเป็นระยะ 100 มม., 200 มม., 300 มม., 400 มม. และ 500 มม. ผลลัพธ์จากการทดสอบได้ถูกนำไปเปรียบเทียบกับผลลัพธ์ที่วิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์และแบบจำลองสมการทางคณิตศาสตร์ (Mathematical Model) ตามหลักการฟังก์ชันความเค้น (Stress Function) ในเบื้องต้นได้เปรียบเทียบกับผลลัพธ์จากการคำนวณด้วยแบบจำลองสมการทางคณิตศาสตร์และผลลัพธ์จากการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แสดงให้เห็นว่ามีความสอดคล้องกัน ความแตกต่างของผลลัพธ์ทั้งสองวิธีมีค่าต่างกันไม่เกิน 0.001% ดังนั้นในการเปรียบเทียบกับผลการทดลองจึงใช้ผลลัพธ์จากการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองสมการทางคณิตศาสตร์ตามหลักการฟังก์ชันความเค้นเป็นสิ่งที่เปรียบเทียบเท่านั้น โดยมีเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนไม่เกิน 10% ทั้งระยะโก่งและความเครียด ดังนั้นเครื่องทดสอบนี้จึงเป็นต้นแบบที่สามารถนำไปใช้ในการผลิตเพื่อเป็นสื่อการศึกษาและสามารถนำไปใช้ในวิชาการประลองทางวิศวกรรมเครื่องกลได้จริง

5.2 ข้อเสนอแนะ

เครื่องทดสอบที่ออกแบบมานี้สามารถเปลี่ยนไปเป็นการทดสอบคานแบบปลายยื่นที่มีจุดรองรับที่ปลายคานได้ (Propped beam) โดยไม่ต้องทำการยึดปลายคานด้านใดด้านหนึ่ง ปล่อยให้เป็นอิสระด้วยการถอดประกับตัวบนออก อีกทั้งยังสามารถเปลี่ยนชนิดของภาระที่เป็นแรงกระจายสม่ำเสมอเป็นภาระกระทำเป็นจุดด้วยก้อนน้ำหนัก

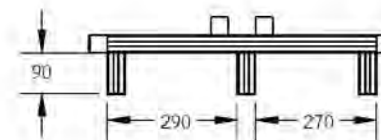
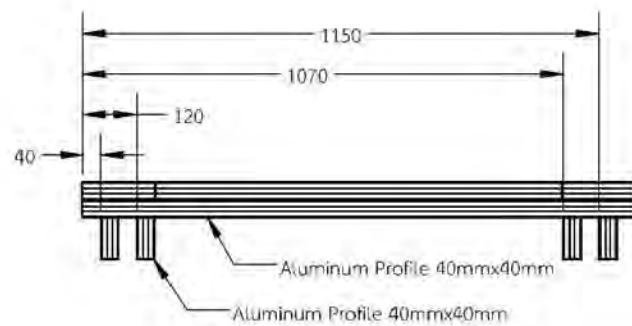
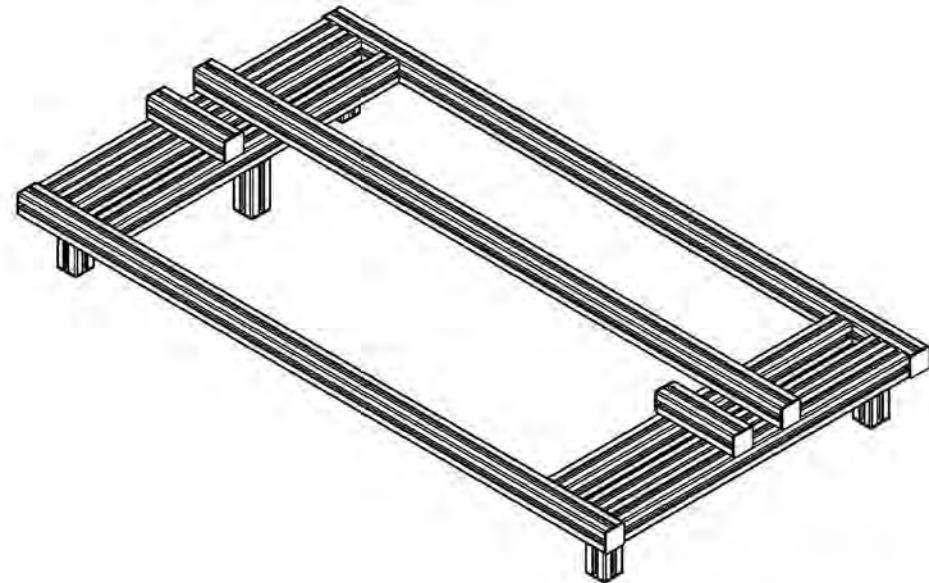
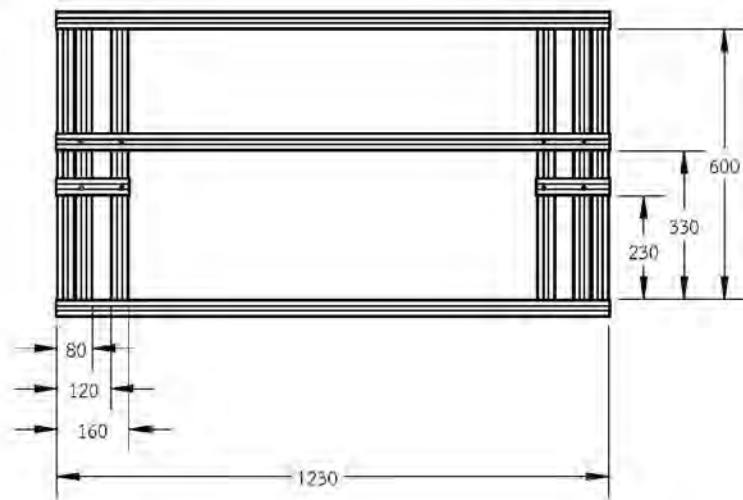
บรรณานุกรม

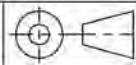
1. DING Hao-jiang, HUANG De-jin, WANG Hui-ming, Analytical solution for fixed-end beam subjected to uniform load. Journal of Zhejiang University SCIENCE A. ISSN 1673-565X(Print), 1862-1775(Online), Monthly 2005 Vol.6 No.8 P.779~783.
2. S.Timoshenko and J.N.Goodier. Theory of Elasticity. 1970.
3. ธวัชชัย ศิริโคจรสมบัติ, การควบคุมการโก่งตัวของคานโดยใช้วัสดุเฟียโซอิเล็กทริก. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.ISBN: 9741762585. Issued: 2006-01-20. 2547.
4. ณรงค์เดช เกตุแก้ว, อนุกุล มาลา และอุทัย ปัญญา. เครื่องทดลองการโก่งของคานที่ไม่สมมาตร. ปริญญานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา. 2543.

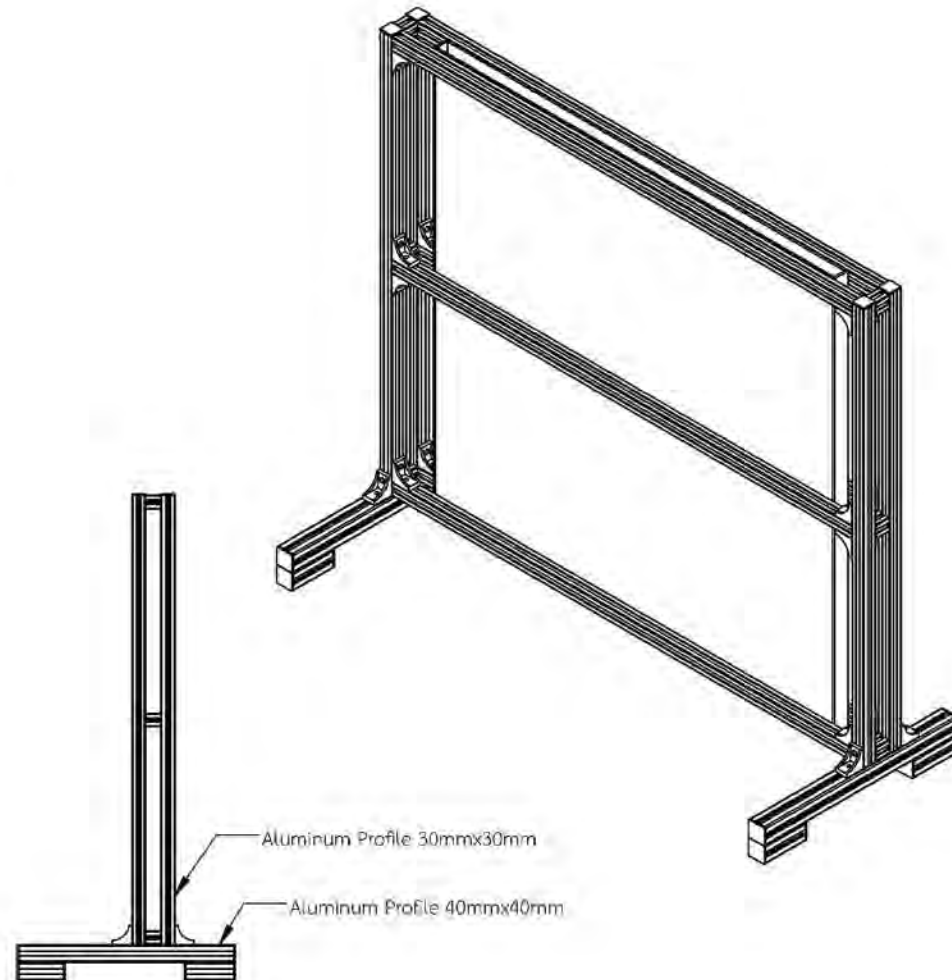
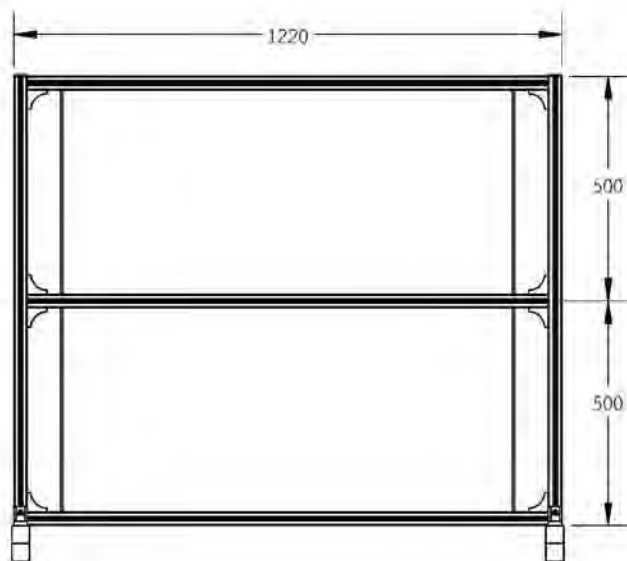
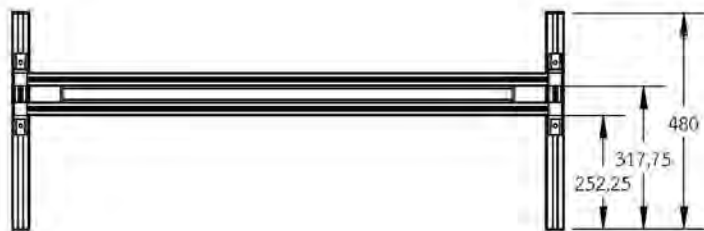


ภาคผนวก ก
แบบของชิ้นส่วนที่เกี่ยวข้อง

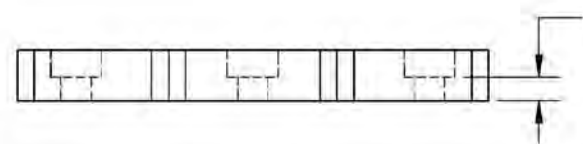
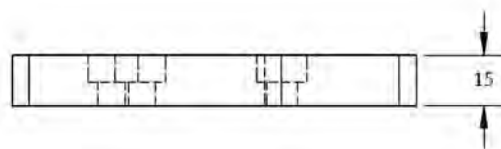
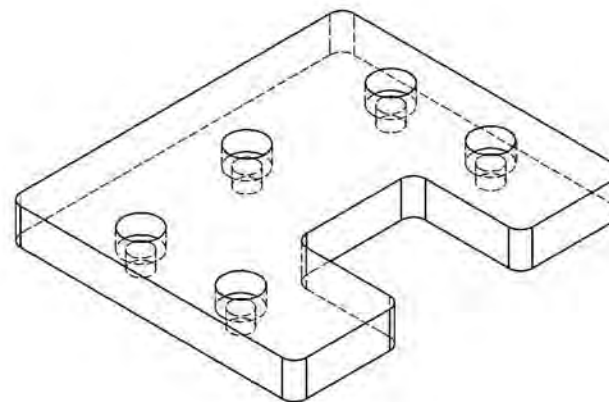
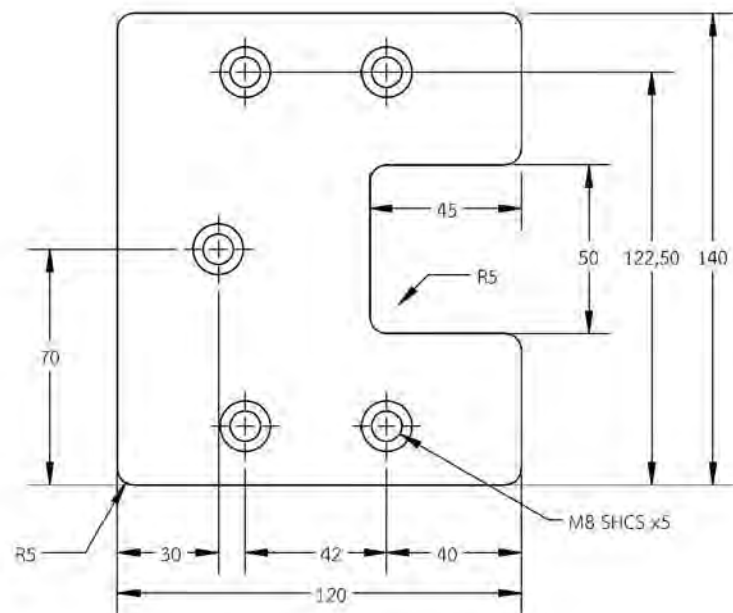




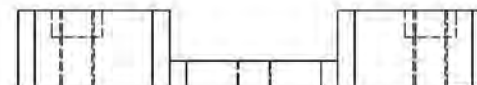
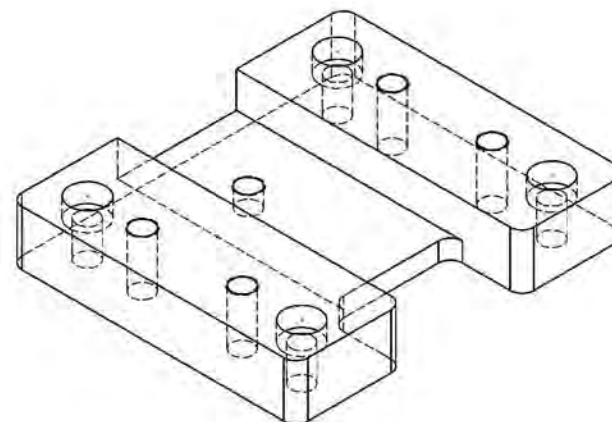
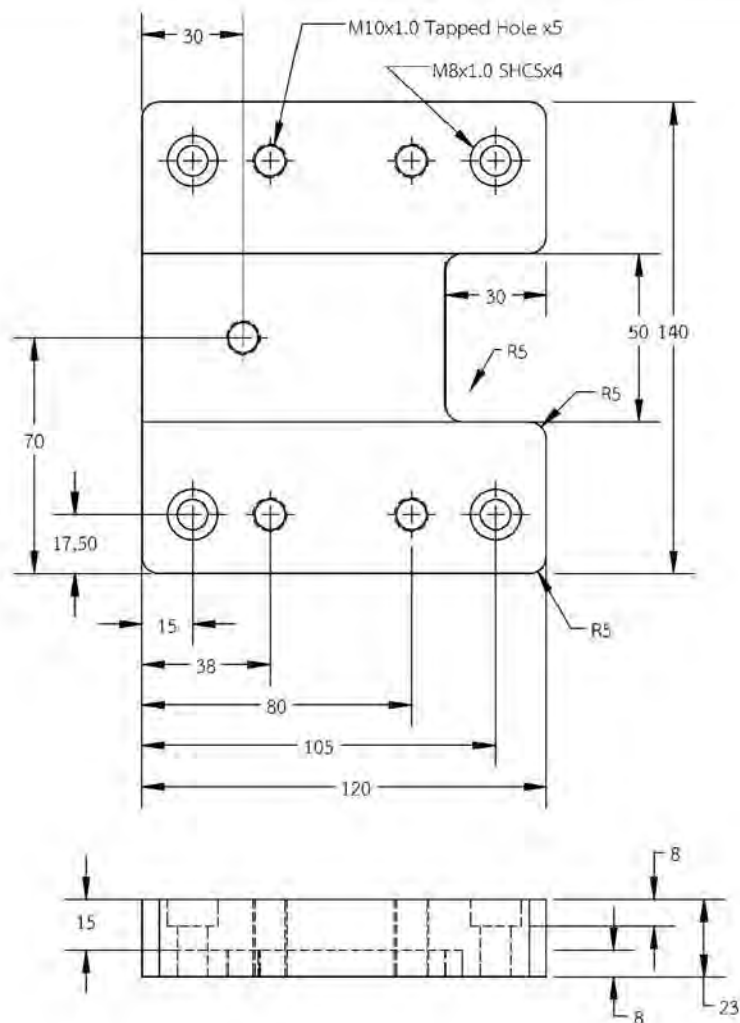
DRAW BY	Prakorb Chartpak	05 Dec 2012	Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering RAJAMANGALA UNIVERSITY OF TECHNOLOGY PHRA-NAKHON	
DESIGN BY	Vorawit Voranawin	10 Nov 2012		
APPROVED BY	Polrat Boonmee	15 Dec 2012	Title:	Assembly: BENDING MACHINE
DIMENSION: mm	Name	Date	UPPER STRUCTURE	TEST FOR: FIXED-END BEAM
				
			Scale: 1:15	
			Sheet: 1 of 7	



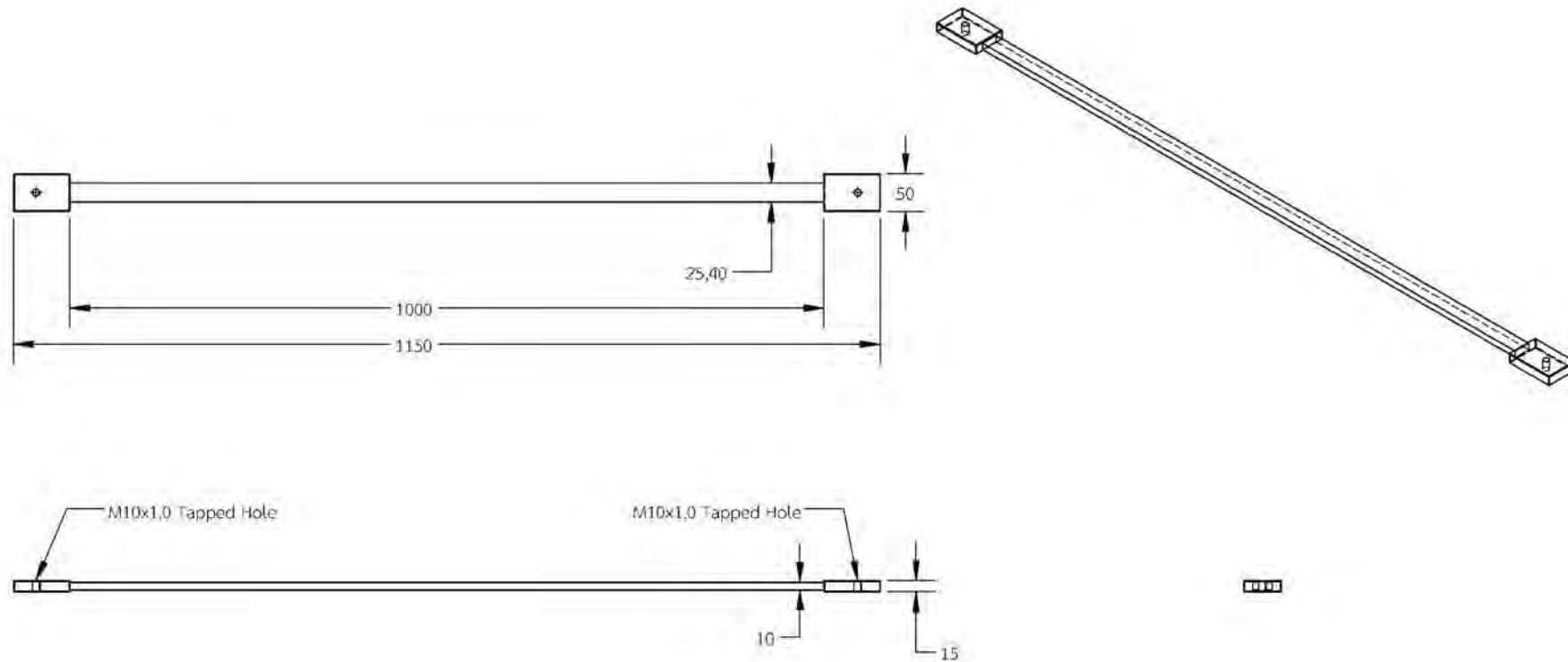
DRAW BY	Prakorb Chartpuk	05 Dec 2012	Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering RAJAMANGALA UNIVERSITY OF TECHNOLOGY PHRA-NAKHON			
DESIGN BY	Vorawit Voranawin	10 Nov 2012				
APPROVED BY	Polrat Boonmee	15 Dec 2012	Title: UPPER STRUCTURE	Assembly: BENDING MACHINE TEST FOR FIXED-END BEAM		Scale: 1:15 Sheet: 2 of 7
DIMENSION: mm	Name	Date				

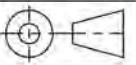


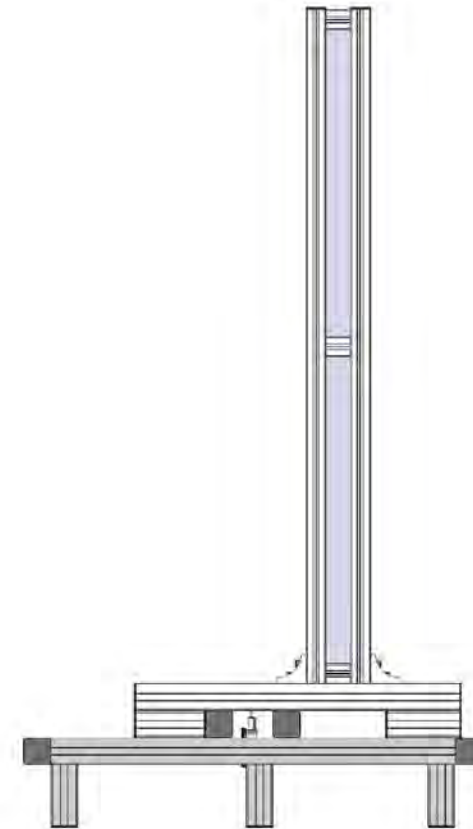
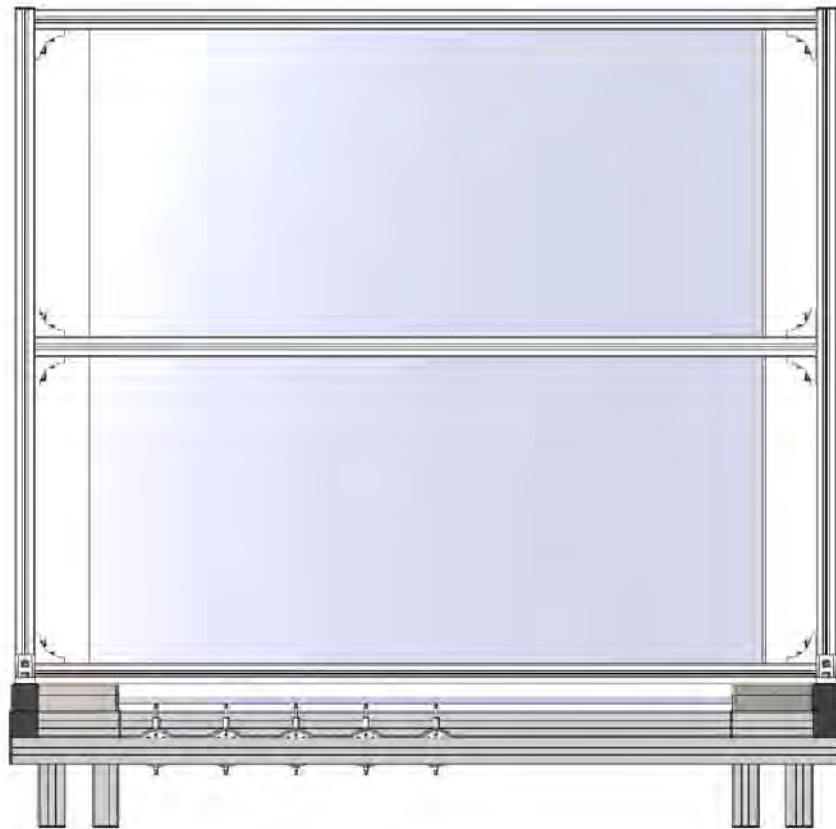
DRAW BY	Prakorb Chartpuk	05 Dec 2012	Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering RAJAMANGALA UNIVERSITY OF TECHNOLOGY PHRA-NAKHON			
DESIGN BY	Vorawit Voranawin	10 Nov 2012				
APPROVED BY	Polrat Boonmee	15 Dec 2012	Title: Upper Holder	Assembly: BENDING MACHINE TEST FOR FIXED-END BEAM		Scale: 1:2
DIMENSION: mm	Name	Date				Sheet: 3 of 7



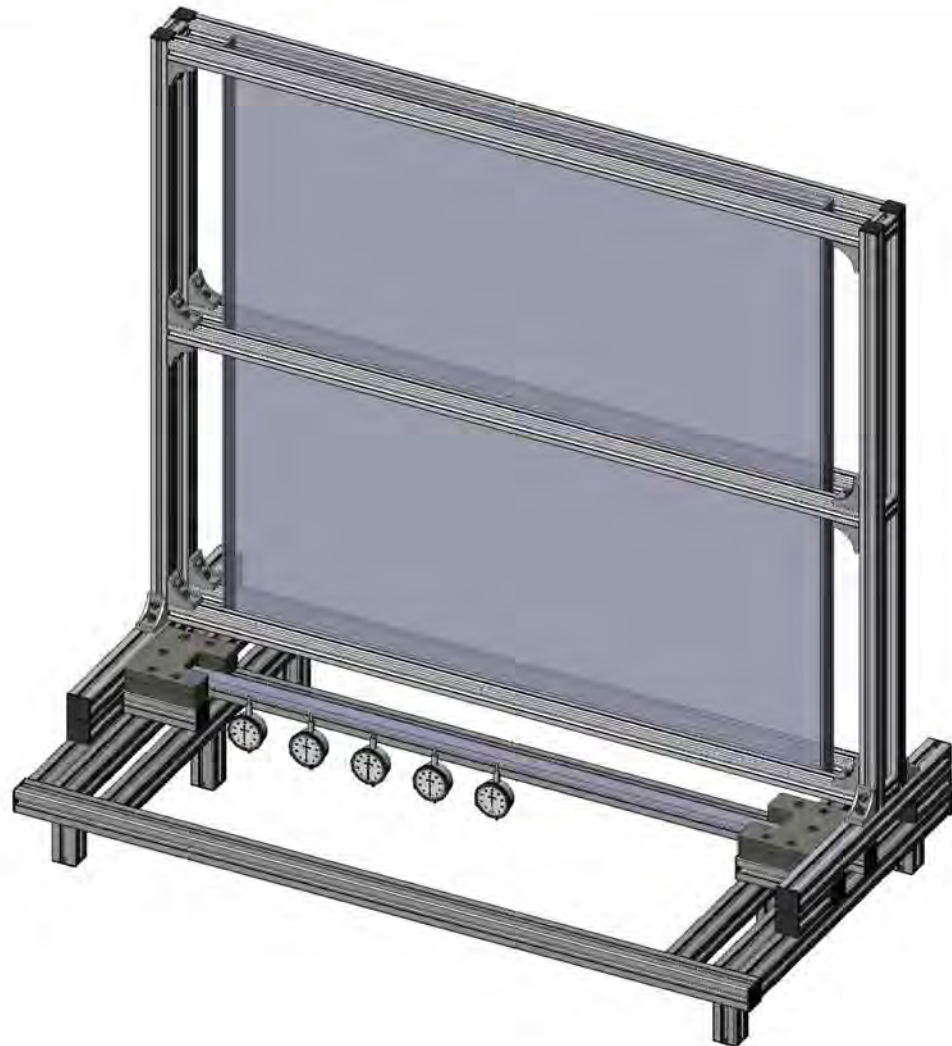
DRAW BY	Prakorb Chartpuk	05 Dec 2012	Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering RAJAMANGALA UNIVERSITY OF TECHNOLOGY PHRA-NAKHON			
DESIGN BY	Vorawit Voranawin	10 Nov 2012				
APPROVED BY	Polrat Boonmee	15 Dec 2012	Title: Lower Holder	Assembly: BENDING MACHINE TEST FOR FIXED-END BEAM		Scale: 1:2
DIMENSION: mm	Name	Date				Sheet: 4 of 7

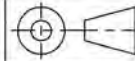


DRAW BY	Prakorb Chartpuk	05 Dec 2012	Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering RAJAMANGALA UNIVERSITY OF TECHNOLOGY PHRA-NAKHON			
DESIGN BY	Vorawit Voranawin	10 Nov 2012				
APPROVED BY	Polrat Boonmee	15 Dec 2012	Title: Fixed-End Beam	Assembly: BENDING MACHINE TEST FOR FIXED-END BEAM		Scale: 1:8 Sheet: 5 of 7
DIMENSION: mm	Name	Date				



DRAW BY	Prakorb Chartpuk	05 Dec 2012	Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering RAJAMANGALA UNIVERSITY OF TECHNOLOGY PHRA-NAKHON		
DESIGN BY	Vorawit Voranawin	10 Nov 2012			
APPROVED BY	Polrat Boonmee	15 Dec 2012	Title: BENDING MACHINE TEST FOR FIXED-END BEAM	Assembly: BENDING MACHINE TEST FOR FIXED-END BEAM	Scale: 1:10
DIMENSION: mm	Name	Date			Sheet: 6 of 7



DRAW BY	Prakorb Chartpuk	05 Dec 2012	Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering RAJAMANGALA UNIVERSITY OF TECHNOLOGY PHRA-NAKHON			
DESIGN BY	Vorawit Voranawin	10 Nov 2012				
APPROVED BY	Polrat Boonmee	15 Dec 2012	Title: BENDING MACHINE TEST FOR FIXED-END BEAM	Assembly: BENDING MACHINE TEST FOR FIXED-END BEAM		Scale: 1:10
DIMENSION: mm	Name	Date				Sheet: 7 of 7

ภาคผนวก ข
ใบปฏิบัติการทดลอง



วิชาการประลองทางวิศวกรรมเครื่องกล

การทดลองเรื่อง การวิเคราะห์การกระจายความเค้นและระยะโก่งของคานชนิดยึดปลายแน่นสองข้างด้วยหลักการฟังก์ชันความเค้น

(Analysis of stress distribution and deflection on fixed-end beam with principle of stress function)

1. วัตถุประสงค์

- 1.1 เพื่อศึกษาพฤติกรรมการโก่งของคานชนิดยึดปลายแน่นสองข้างภายใต้การกระจายสม่ำเสมอ
- 1.2 เพื่อศึกษาความเค้นและความเครียดของคานชนิดยึดปลายแน่นสองข้าง
- 1.3 เพื่อเปรียบเทียบความเค้น ความเครียดและระยะโก่งที่เกิดขึ้นในคานชนิดยึดปลายแน่นสองข้างที่ได้จากการทดลองกับการวิเคราะห์ด้วยฟังก์ชันความเค้น

2. บทนำ

คานเป็นส่วนหนึ่งของโครงสร้างที่ทำหน้าที่รับโมเมนต์ดัดและแรงเฉือนซึ่งเกิดจากแรงภายนอกที่กระทำหรือน้ำหนักบรรทุกบนคานนั้น เมื่อคานได้รับน้ำหนักหรือแรงภายนอกมากระทำคานก็จะเกิดการโก่งงอทำให้คานไม่อยู่ในแนวตรง ฉะนั้นในการคำนวณและการออกแบบคานหรือชิ้นส่วนของเครื่องจักรกลต่างๆ ซึ่งมีลักษณะเช่นเดียวกับคานที่รับน้ำหนัก วิศวกรต้องคำนึงถึงการโก่งของคานด้วย นอกเหนือไปจากความเค้นดัดและความเค้นเฉือนที่เกิดขึ้นในคานตามปกติ มิฉะนั้นแล้วคานหรือชิ้นส่วนของเครื่องจักรกลเหล่านั้น อาจจะไม่ทำงานได้ดีตามที่ต้องการหรืออาจทำให้เกิดการเสียหายก่อนกำหนดได้จึงมีความจำเป็นที่ผู้ออกแบบ หรือวิศวกรนั้นจะต้องคิดค่าของความโก่งของคานด้วยการคำนวณหาค่าการโก่งของคานและความเค้นที่เกิดขึ้นจะใช้วิธีของหลักการฟังก์ชันความเค้น

3. ทฤษฎี

3.1 นิยาม

คาน (Beam) หมายถึง ส่วนต่างๆของโครงสร้างที่ถูกกระทำด้วยแรงหรือน้ำหนักบรรทุกทุกตามขวางที่มีทิศทางตั้งฉากกับแกนของท่อนวัสดุหรือโมเมนต์ของแรงคู่ควบที่อยู่ในระนาบเดียวกัน

ความเครียด (Strain) วัสดุเมื่อน้ำหนักมากระทำทำนอกจากกระทำให้วัสดุนั้นมีความเค้นเกิดขึ้นแล้ววัสดุนั้นยังเกิดการเปลี่ยนรูปไปตามชนิดของน้ำหนักนั้นๆด้วย ซึ่งอัตราส่วนระหว่างการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของชิ้นส่วนวัสดุต่อความยาวของชิ้นส่วนนี้เรียกว่าความเครียด

ความเค้น (Stress) หมายถึง แรงต้านทานภายในเนื้อวัสดุต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ของโครงสร้างเมื่อน้ำหนักจากภายนอกมากระทำเพื่อให้โครงสร้างนั้นอยู่ในสมดุล ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่าความเค้นคืออัตราส่วนระหว่างน้ำหนักที่กระทำหรือแรงต้านภายในกับพื้นที่หน้าตัด

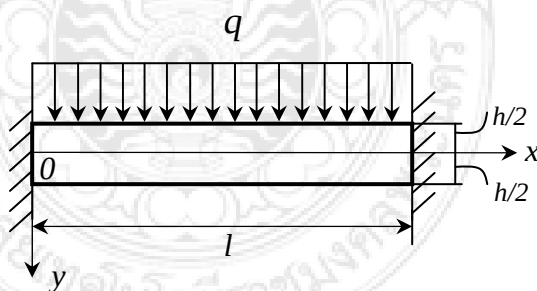
ระยะโก่ง (Deflection) ระยะโก่งหรือแอ่นของคานที่จุดใด หมายถึงระยะในแนวตั้งที่จุดนั้นบนเส้นโค้งอีลาสติกที่เคลื่อนที่ไปจากตำแหน่งเดิม ณ จุดใดๆ เรียกเป็นระยะโก่งตัว ณ จุดนั้น

3.2 ข้อสมมติฐานในการคำนวณหาระยะแอ่นของคาน

- 1) คานจะต้องมีลักษณะตรงในขณะที่ยังไม่ได้รับน้ำหนักและจะต้องมีพื้นที่หน้าตัดสม่ำเสมอตลอดทั้งคาน
- 2) น้ำหนักหรือแรงที่กระทำจะต้องกระทำผ่านระนาบสมมาตรของคาน
- 3) คานจะต้องเป็นวัสดุเนื้อเดียวกันตลอด
- 4) น้ำหนักที่กระทำบนคานต้องไม่เกินกว่าค่าขีดจำกัดยืดหยุ่นของวัสดุของคานที่จะรับได้
- 5) ค่าของโมดูลัสยืดหยุ่นทางด้านรับแรงดึงและรับแรงอัดจะต้องเท่ากัน
- 6) การโก่งตัวจะต้องน้อยมากเมื่อเทียบกับความยาวคาน
- 7) ระนาบตัดขวางของคานก่อนถูกกระทำโดยน้ำหนักบรรทุกจะต้องยังคงเป็นระนาบอยู่อย่างเดิมหลังจากถูกกระทำโดยน้ำหนักบรรทุก

3.3 คานแบบปลายยึดแน่นทั้งสองข้างและรับภาระกระจายสม่ำเสมอ (Fixed-end beam subjected to uniform load)

คานยึดปลายแน่นสองข้างเป็นคานประเภทหาค่าไม่ได้ทางสถิตยศาสตร์ ซึ่งจำเป็นต้องใช้สมการเงื่อนไขขอบที่รองรับช่วยในการวิเคราะห์ร่วมกับสมการสมดุล อาจทำการวิเคราะห์ได้ด้วยวิธีต่างๆ เช่น Superposition Method ซึ่งเป็นวิธีที่สะดวกมากเมื่อใช้ร่วมกับตาราง Double Integration Method ซึ่งตัวแปรไม่ทราบค่าได้แก่ C_1 และ C_2 และ Redundant forces ต่างๆ Theory of Area Moment Method เป็นวิธีที่สะดวกอีกวิธีหนึ่ง โดยสมการช่วยวิเคราะห์ได้จากความสัมพันธ์ระหว่างเส้นสัมผัสโค้งอีลาสติกกับเส้นโค้งอีลาสติก ซึ่งพิจารณาจากเงื่อนไขขอบที่รองรับต่างๆ เมื่อได้ทำการออกแบบคานที่ถูกยึดปลายแน่นสองข้างแล้วจะทำการทดสอบเครื่องทดสอบอีกด้วยเพื่อปรับปรุงให้ได้ผลลัพธ์ที่ต้องการ



รูปที่ 1 ตัวแปรประกอบเงื่อนไขขอบ

สมมติฐานในการศึกษานี้คือการพิจารณาความเค้นในรูปแบบสองมิติเพื่อให้่ายและสะดวกต่อการวิเคราะห์ ดังนั้นการวิเคราะห์ความเค้นที่เกิดขึ้นหรือระยะขจัดจะเป็นการวิเคราะห์บนปัญหาความเค้นระนาบ (Plane stress) จากรายงานวิจัยของ DING Hao-jiang, HUANG De-jin และ WANG Hui-ming [1] ได้ศึกษาวิธีการแก้ปัญหาเชิงวิเคราะห์สำหรับคานยึดปลายแน่นสองข้างภายใต้การภาระสม่ำเสมอ และนำเสนอฟังก์ชันความเค้นไบฮาร์โมนิกเช่นเดียวกับที่นำเสนอโดย S.Timoshenko และ J.N.Goodier [2] โดยมีหลักการสร้างสมการความเค้นและระยะขจัดดังต่อไปนี้

3.3.1 สมการพื้นฐานในสถานะความเค้นระนาบ

เมื่อไม่พิจารณาน้ำหนักของวัตถุ องค์ประกอบของความเค้นในสองมิติสามารถเขียนให้อยู่ในรูปของฟังก์ชันความเค้นได้ดังนี้

$$\sigma_x = \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2}, \quad \sigma_y = \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2}, \quad \tau_{xy} = \frac{\partial^2 \phi}{\partial x \partial y} \quad (1)$$

ถ้า Stress Function (ϕ) ที่กำหนดขึ้นมีความเหมาะสมจะต้องทำให้สมการควบคุมเป็นจริงดังนี้

$$\frac{\partial^4 \phi}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4 \phi}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 \phi}{\partial y^4} = 0 \quad (2)$$

โดยที่ความสัมพันธ์ระหว่างระยะขจัดกับความเค้นคือ

$$\frac{\partial u}{\partial x} = \frac{\sigma_x}{E} - \nu \frac{\sigma_y}{E} \quad (3)$$

$$\frac{\partial v}{\partial y} = \frac{\sigma_y}{E} - \nu \frac{\sigma_x}{E} \quad (4)$$

$$\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} = \frac{2(1+\nu)}{E} \tau_{xy} \quad (5)$$

โดยที่ ν คืออัตราส่วนปัวซองและ E คือโมดูลัสความยืดหยุ่น

3.3.2 ความเค้นและระยะขจัด

พิจารณาคานในรูปที่ 1 มีหน้าตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยมรับภาระกระจายสม่ำเสมอ q , คานยาว l , ความหนาคาน h , ฟังก์ชันความเค้นสามารถสร้างจากสมการโพลิโนเมียลไบฮาร์โมนิก 7 เทอมดังนี้

$$\phi = a \left(\frac{1}{5} y^5 - x^2 y^3 \right) + bxy^3 + cy^3 + dy^2 + ex^2 y + fxy + gx^2 \quad (6)$$

เมื่อ a, b, c, d, f และ g เป็นค่าคงที่ที่ไม่ทราบค่า แทนสมการ (6) ลงใน (1) จะได้

$$\sigma_x = 2a(2y^3 - 3x^2 y) + 6bxy + 6cy + 2d \quad (7)$$

$$\sigma_y = -2ay^3 + 2ey + 2g \quad (8)$$

$$\tau_{xy} = 6axy^2 - 3by^2 - 2ex - f \quad (9)$$

แทนสมการ (7) ลงใน (3) และ (4) แล้วอินทิเกรตเทียบกับ x และ y ตามลำดับจะได้ระยะขจัดในแนวแกน x คือ u และระยะขจัดในแนวแกน y คือ v ดังนี้

$$u = \frac{1}{E} [2a(2+\nu)xy^3 - (2ax^3 - 3bx^2 - 6cx + 2vex)y + 2dx - 2v gx] + A(y) \quad (10)$$

$$v = \frac{1}{E} \left[-\frac{a}{2}(1+2\nu)y^4 + [3avx^2 - 3bv x - 3vc + e]y^2 - 2dv y + 2gy \right] + B(x) \quad (11)$$

เมื่อ $A(y)$ และ $B(x)$ เป็นค่าคงที่ที่เป็นฟังก์ชันขึ้นอยู่ด้วย x และ y ตามลำดับ แทนค่าสมการ (9), (10) และ (11) ลงในสมการ (3), (4) และ (5) จะได้

$$\begin{aligned} & \frac{1}{E} [3b(2+\nu)y^2 + 2(1+\nu)f] + A'(y) \\ & + \frac{1}{E} [-2ax^3 + 3bx^2 + 6cx + 2(2+\nu)ex] + B'(x) = 0 \end{aligned} \quad (12)$$

สมการ (12) สามารถเขียนใหม่ได้โดยกำหนดค่าคงที่ขึ้นมาหนึ่งตัวคือ ω ดังนี้

$$\frac{1}{E} [3b(2+\nu)y^2 + 2(1+\nu)f] + A'(y) = \omega \quad (13)$$

$$+ \frac{1}{E} [-2ax^3 + 3bx^2 + 6cx + 2(2+\nu)ex] + B'(x) = -\omega \quad (14)$$

ค่าคงที่ $A(y)$ และ $B(x)$ สามารถหาได้จากการอินทิเกรตสมการ (13) และ (14) และแทนค่า $A(y)$ และ $B(x)$ ลงในสมการ (10) และ (11) จะได้

$$\begin{aligned} u = & \frac{1}{E} [2a(2+\nu)xy^3 - (2ax^3 - 3bx^2 - 6cx + 2\nu ex)y + 2dx - 2\nu gx] \\ & - \frac{1}{E} [b(2+\nu)y^3 + 2(1+\nu)fy] + \omega y + u_0 \end{aligned} \quad (15)$$

$$\begin{aligned} v = & \frac{1}{E} \left[-\frac{a}{2}(1+2\nu)y^4 + [3avx^2 - 3bv x - 3\nu c + e]y^2 - 2d\nu y + 2gy \right] \\ & + \frac{1}{E} \left[\frac{1}{2}ax^4 - bx^3 - 3cx^2 - (2+\nu)ex^2 \right] - \omega x + v_0 \end{aligned} \quad (16)$$

สมการ (7), (8), (9), (15) และ (16) มีตัวแปรที่เป็นค่าคงที่ที่ไม่ทราบค่า ในการแก้ปัญหานี้ จำเป็นต้องใช้เงื่อนไขขอบ (Boundary conditions) เข้ามาช่วยแก้ปัญหา โดยพิจารณาจากสภาพความเป็นจริงของคานแบบยึดปลายแน่นสองข้าง S.Timoshenko และ J.N.Goodier (1970) ได้นำเสนอเงื่อนไขขอบ [1] ที่เหมาะสมสำหรับคานประเภทนี้ไว้ดังนี้

- (1) $y = h/2, \sigma_y = 0$
- (2) $y = -h/2, \sigma_y = -q$
- (3) $y = h/2, \sigma_{xy} = 0$
- (4) $y = h/2, \tau_{xy} = 0$
- (5) $x = 0, y = 0, u = 0$
- (6) $x = l, y = 0, u = 0$
- (7) $x = 0, y = 0, v = 0$
- (8) $x = l, y = 0, v = 0$

$$(9) \quad x = l, y = 0, \frac{\partial v}{\partial x} = 0$$

$$(10) \quad x = 0, y = 0, \frac{\partial v}{\partial x} = 0$$

แทนค่าสมการ (7), (8), (9), (15) และ (16) ด้วยเงื่อนไขขอบทั้ง 10 เงื่อนไข จะได้ค่าคงที่ต่างๆ ดังนี้

$$\begin{aligned} a &= q/h^3, \quad b = ql/h^3, \quad c = q/2h - ql^2/6h^3 - qv/4h, \\ d &= -qv/4, \quad e = 3q/4h, \quad f = -3ql/4h, \quad g = -q/4, \\ u_0 &= 0, \quad v_0 = 0, \quad \omega = 0, \end{aligned} \quad (17)$$

นำค่าคงที่ในสมการ (17) แทนกลับลงในสมการ (7), (8), (9), (15) และ (16) จะได้ความเค้นและระยะขจัดดังนี้

ความเค้นในแนวแกน x

$$\sigma_x = -\frac{q}{2J} \left(x^2 - lx + \frac{l^2}{6} \right) y + \frac{q}{24J} (8y^3 - 3(2+v)h^2y - vh^3) \quad (19)$$

ความเค้นในแนวแกน y

$$\sigma_y = -\frac{q}{24J} (4y^3 - 3h^2y + h^3) \quad (20)$$

ความเค้นเฉือน

$$\tau_{xy} = \frac{q}{4I} (l - 2x) \left(\frac{h^2}{4} - y^2 \right) \quad (21)$$

ระยะขจัดในแนวแกน x

$$u = -\frac{qxy}{12EI} (l - x)(l - 2x) + \frac{q(l - 2x)y}{24EI} [3(l + v)h^2 - 2(2 + v)y^2] \quad (22)$$

ระยะขจัดในแนวแกน y

$$\begin{aligned} v = \frac{q}{24EI} (1 - x)^2 x^2 + \frac{q}{48EI} \{ -2(l + 2v)y^4 \} + \\ [(6x^2 - 6lx + l^2) 2v + 3h^2(v + 1)] y^2 + \{ 24I(v^2 - 1)y \} \end{aligned} \quad (23)$$

$$\text{เมื่อ } J = h^3/12 \quad (24)$$

3.3.3 ตัวอย่างการคำนวณสำหรับคาน Steel AISI1020

คานมีขนาดหน้าตัดกว้าง (b) = 0.0254 m, หนา (h) = 0.01 m, ยาว (l) = 1 m จากสมการ (24)

$$J = \frac{1}{12} h^3 = \frac{1}{12} (0.01^3) = 8.333 \times 10^{-8}$$

ตารางที่ 1 สมบัติวัสดุที่ใช้ในการวิเคราะห์และทดลอง

Material Type	Tensile Strength (MPa)	Poisson's Ratio	Yield Stress (MPa)	Mass Density (kg/m ³)	Elastic Modulus (GPa)
Steel AISI1020	420.507	0.29	351.571	7,900	200
Brass	478.507	0.33	239.689	8,500	100
Aluminum 6061 alloy	124.084	0.33	55.1485	2,700	69

3.3.3.1 ตัวอย่างการคำนวณหาความเค้นที่ระยะกึ่งกลางคาน ($x=0.5m$) ที่ผิวด้านล่างคาน ($h=0.005m$)

จากตารางที่ 1 สำหรับวัสดุ AISI1020 มีค่า $E= 200$ GPa, $\nu = 0.29$, $y = 0.005$ m, $l = 1$ m, $h = 0.01$ m และ $x = 0.5$ m ปริมาณน้ำที่ใช้ในการทดสอบคือ 20 ลิตร คิดเป็นน้ำหนักต่อพื้นที่บนคาน (q) เท่ากับ $7,724.4$ N/m² จากสมการ (19)

$$\sigma_x = -\frac{q}{2J}\left(x^2 - lx + \frac{l^2}{6}\right)y + \frac{q}{24J}\{8y^3 - 3(2+\nu)h^2y - \nu h^3\}$$

แทนค่า

$$\begin{aligned}\sigma_x &= \left[\left(\frac{-7,724.4}{2 \times 8.333 \times 10^{-8}}\right)\left((0.5^2) - (1 \times 0.5) + \frac{1^2}{6}\right) \times 0.005\right] \\ &= + \left[\left(\frac{7,724.4}{24 \times 8.333 \times 10^{-8}}\right) \times (8(0.005^3) - 3(2 + 0.29) \times 0.005(0.01^2) - 0.29(0.01^3))\right]\end{aligned}$$

$$\sigma_x = 1.93005 \times 10^7 \text{ N/m}^2$$

3.3.3.2 ตัวอย่างการคำนวณหาความเค้นที่ระยะกึ่งกลางคาน ($x=0.5m$) ที่ผิวด้านล่างคาน ($h=0.005m$)

จากสมการ (20)
$$\sigma_y = -\frac{q}{24J}(4y^3 - 3h^2y + h^3)$$

แทนค่า

$$\sigma_y = -\frac{7,724.4}{24(8.333 \times 10^{-8})}(4(0.05)^3 - 3(0.1^2)(0.05) + 0.01^3)$$

$$\sigma_y = 0 \text{ N/m}^2$$

3.3.3.3 ตัวอย่างการคำนวณหาความเครียดที่ระยะกึ่งกลางคานที่ผิวด้านล่างคาน ($x=0.5$ m)

จากสมการ
$$\epsilon_x = \frac{\sigma_x}{E}$$

แทนค่า
$$\epsilon_x = \frac{19.3005 \text{ MPa}}{200 \times 10^3 \text{ MPa}} = 0.0000965$$

จากสมการ $\varepsilon_y = \frac{\sigma_y}{E}$

แทนค่า $\varepsilon_y = \frac{0 \text{ MPa}}{200 \times 10^3 \text{ MPa}} = 0$

ตารางที่ 2 ความเค้นและความเครียดในแนวแกน x ที่ระยะต่างๆ

ระยะ, x (mm)	100	200	300	400	500
Stress, σ_x (MPa)	-17.776	-1.555	10.031	16.983	19.3005
Stress, σ_y (MPa)	0	0	0	0	0
Strain, ε_x	-0.00008888	-0.00000777	0.00005015	0.0000849	0.0000965
Strain, ε_y	0	0	0	0	0

3.3.3.4 ตัวอย่างการคำนวณหาระยะโก่งของคานที่กึ่งกลางคาน ($x=0.5\text{m}$) ที่ผิวด้านล่างคาน ($h=0.005\text{m}$)

การคำนวณหาค่าระยะกระจัดในแนวแกน y จากสมการ (22)

$$u = \frac{qxy}{12EJ}(l-x)(l-2x) + \frac{q(l-2x)y}{24EJ} [3(l+\nu)h^2 - 2(2+\nu)y^2]$$

แทนค่า

$$u = \frac{(7,724.4)(0.5)(0.005)}{12 \times (200 \times 10^9)(8.333 \times 10^{-8})} (1-0.5)(1-2(0.05) +$$

$$\frac{(7,724.4)(1-2(0.5))(0.005)}{24 \times (200 \times 10^9)(8.333 \times 10^{-8})} [3(1+0.29)(0.01^2) - 2(2+0.29)(0.005^2)]$$

$$u = 0 \text{ m}$$

การคำนวณหาค่าระยะกระจัดในแนวแกน y จากสมการ (23)

$$v = \frac{q}{24EJ}(l-x)^2 x^2 + \frac{q}{48EJ} \left\{ -2(1+2\nu)y^4 + \right.$$

$$\left. [(6x^2 - 6lx + l^2)2\nu + 3h^2(\nu+1)^2] y^2 + 24J(\nu^2 - 1)y \right\}$$

แทนค่า

$$v = \frac{7,724.4 \times (1-0.5)^2 (0.5^2)}{24 \times 200 \times 10^9 \times 8.333 \times 10^{-8}} + \frac{7,724.4}{48 \times 200 \times 10^9 \times 8.333 \times 10^{-8}} \left\{ -2(1+2(0.29))(0.005)^4 + \right.$$

$$\left. [\{6(0.5)^2 - 6(1)(0.5) + (1^2)\} 2(0.29) + 3(0.005^2)(0.29+1)^2] (0.005)^2 + \right.$$

$$24(8.333 \times 10^{-8})(0.29^2 - 1)(0.005)\}$$

$$v = 0.00120687 \text{ m}$$

ตารางที่ 3 ระยะขจัดในแนวแกน x และ y ที่ด้านล่างของผิวคาน (y = +5mm) ณ ตำแหน่งต่างๆ

ระยะ, x (mm)	100	200	300	400	500
Displacement in x, u (mm)	0.013925	0.01855	0.01623	0.00000927	0
Displacement in y, v (mm)	0.1564	0.4943	0.851	1.112	1.206

3.4 เอกสารอ้างอิง

1. DING Hao-jiang, HUANG De-jin, WANG Hui-ming, Analytical solution for fixed-end beam subjected to uniform load. Journal of Zhejiang University SCIENCE A. ISSN 1673-565X(Print), 1862-1775(Online), Monthly 2005 Vol.6 No.8 P.779~783.
2. S.Timoshenko and J.N.Goodier. Theory of Elasticity. 1970.
3. จำรูญ ตันติพิศาลกุล, กลศาสตร์ของแข็ง, กรุงเทพมหานคร : ศูนย์ส่งเสริมกรุงเทพมหานคร, 2531
4. สุรเชษฐ์ รุ่งวัฒนพงษ์, กลศาสตร์ของแข็ง, กรุงเทพมหานคร : บริษัท ซีเอ็ดดูเคชั่น 2531
5. อภิวัฒน์ พลชัย, กลศาสตร์ของแข็งระดับสูง, ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ พ.ศ. 2531

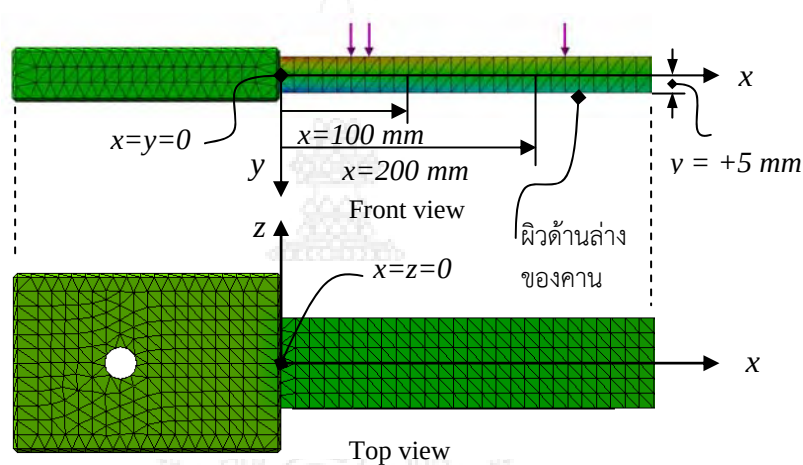
3.5 เครื่องมือและอุปกรณ์การทดลอง

- | | |
|---|--------|
| 1. ชุดทดลองการแอ่นของคาน (Deflection of beam apparatus) | 1 ชุด |
| 2. ไดอัลเกจ (Dial gauge) | 5 ตัว |
| 3. น้ำ หรือภาระ (Load) ขนาด 25.4 kg | 3 ถัง |
| 4. คานสำหรับทดลอง 3 ชนิด ยาว | 1 เมตร |
| 5. เกจวัดความเครียด (Strain gage) | 5 ตัว |

3.6 วิธีการทดลอง

1. ติดตั้งเครื่องตามรูปแบบที่กำหนดในแต่ละการทดลอง จุติรองรับคานจะต้องยึดให้แน่น
2. ต่อสาย (Strain gage) เข้าเครื่องอ่าน DAQ
3. เปิดเครื่อง DAQ Master Mx100 และคอมพิวเตอร์
4. ติดตั้งชุดไดอัลเกจ (Dial gages) จำนวน 5 ตัว ที่ระยะ 100 มม., 200 มม., 300 มม., 400 มม. และ 500 มม. ตามรูปที่ 2
5. ปรับให้ค่าความเครียดให้เป็นศูนย์ และปรับค่าระยะโก่งที่ Dial gage ให้เป็นศูนย์ (Set zero) ทุกตัวและทุกครั้งที่ทำการทดลอง

6. บรรจุน้ำใส่ถุงพลาสติกจำนวน 25.4 kg แล้วใส่ลงไปในแผงกัน ตอนนี้น้ำหนักน้ำจะกดลงบนคานแบบกระจายสม่ำเสมอ
7. บันทึกค่าที่อ่านได้จากไดอัลเกจ (Dial gage) ทั้ง 5 ตัว
8. บันทึกค่าที่อ่านได้จากเกจวัดความเครียด (Strain gages) จากเครื่อง DAQ MASTER MX100 ทั้ง 5 ตัว
9. ทดลองคานตามชนิดของโลหะจนครบ 3 ชนิด ที่กำหนดไว้ในกาทดลอง
10. เมื่อการทดลองเสร็จสิ้น ให้ทำความสะอาดเครื่องมือทดลอง และชิ้นงานทดลอง



รูปที่ 2 ตำแหน่งที่ติดตั้งเกจวัดความเครียด (Strain gage)

3.7 ผลการทดลองและการคำนวณ

ตารางที่ 1 ผลการทดลองที่น้ำหนักน้ำเท่ากับ 20 kg

วัสดุ	หมายเลข Strain gages	ตำแหน่งใน ทิศทางแกน x (mm)	ความเครียด ϵ_x	ความเค้น σ_x (MPa)	ระยะโก่ง ทิศทางแกน y (mm)
อะลูมิเนียม E = 69 GPa	1	100			
	2	200			
	3	300			
	4	400			
	5	500			
ทองเหลือง E = 100 GPa	1	100			
	2	200			
	3	300			
	4	400			
	5	500			
เหล็ก E = 200 GPa	1	100			
	2	200			
	3	300			
	4	400			
	5	500			

ตารางที่ 2 ผลการวิเคราะห์ด้วยสมการทางคณิตศาสตร์ที่น้ำหนักน้ำเท่ากับ 20 kg

วัสดุ	หมายเลข Strain gages	ตำแหน่งใน ทิศทางแกน x (mm)	ความเครียด ϵ_{xx}	ความเค้น σ_{xx} (MPa)	ระยะโก่ง (mm)
อะลูมิเนียม E = 69 GPa	1	100			
	2	200			
	3	300			
	4	400			
	5	500			
ทองเหลือง E = 100 GPa	1	100			
	2	200			
	3	300			
	4	400			
	5	500			

เหล็ก E = 200 GPa	1	100			
	2	200			
	3	300			
	4	400			
	5	500			

ผลการเปรียบเทียบความเค้นจาก 2 วิธี

ตารางที่ 3 เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนจากการเปรียบเทียบความเค้นจาก 2 วิธี

วัสดุ	หมายเลข Strain gages	ตำแหน่ง ทิศทางแกน x (mm)	ความเค้น (MPa)		เปอร์เซ็นต์ ความคลาด เคลื่อน
			การทดสอบด้วย เครื่องทดสอบ	การคำนวณจาก ฟังก์ชันความเค้น	
อะลูมิเนียม	1	100			
	2	200			
	3	300			
	4	400			
	5	500			
ทองเหลือง	1	100			
	2	200			
	3	300			
	4	400			
	5	500			
เหล็ก	1	100			
	2	200			
	3	300			
	4	400			
	5	500			

ผลการเปรียบเทียบการโก่งตัวของคาน

ตารางที่ 4 เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนจากการเปรียบเทียบระยะโก่ง

วัสดุ	หมายเลข Dial gage	ตำแหน่ง ทิศทางแกน x (mm)	ระยะโก่งตัวของคานในแนวแกน y (v , mm)		% Error
			การทดสอบด้วย เครื่องทดสอบ	การคำนวณด้วยฟังก์ชันความ เค้น	
อะลูมิเนียม	1	100			
	2	200			
	3	300			
	4	400			
	5	500			

ทองเหลือง	1	100			
	2	200			
	3	300			
	4	400			
	5	500			
เหล็ก	1	100			
	2	200			
	3	300			
	4	400			
	5	500			

คำสั่ง

จงเขียนกราฟเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างการทดลองกับสมการทางคณิตศาสตร์ดังต่อไปนี้

1. การเปรียบเทียบความเครียดและระยะโก่งสำหรับคานเหล็ก SteelAISI1020
2. การเปรียบเทียบความเครียดและระยะโก่งสำหรับคานทองเหลือง (Brass)
3. การเปรียบเทียบความเครียดและระยะโก่งสำหรับคานอลูมิเนียม 6061Alloy

คำถาม

1. ถ้าท่านเป็นผู้ออกแบบคานที่ใช้ในการรับแรง ท่านต้องคำนึงถึงอะไรบ้างจึงให้เหตุผลพร้อมยกตัวอย่างประกอบ?
2. เพราะเหตุใดคานหน้าตัดรูปตัวไอ (I beam) จึงนิยมนำมาใช้ในการงานโครงสร้างทางวิศวกรรมจงอธิบายอย่างละเอียด?
3. จงให้ความหมายของ “คานประเภทหาค่าได้ทางสถิติศาสตร์ และคานประเภทหาค่าไม่ได้ทางสถิติศาสตร์” มาอย่างละเอียด?
4. ความเค้น ณ ตำแหน่งใดที่เกิดความเค้นมากที่สุด เพราะเหตุใด?

ประวัติผู้วิจัย



หัวหน้าโครงการวิจัย

- ชื่อ - นามสกุล (ภาษาไทย) นายพลรัตน์ บุญมี
(ภาษาอังกฤษ) Mr.Polrut Boonmee
- เลขหมายบัตรประจำตัวประชาชน 3 1605 00360 48 4
- ตำแหน่งปัจจุบัน ตำแหน่งวิชาการ อาจารย์
- หน่วยงานและสถานที่ติดต่อได้สะดวก พร้อมหมายเลขโทรศัพท์ โทรศัพท์มือถือ โทรสาร และ e-mail

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร คณะวิศวกรรมศาสตร์
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล
1381 ถ.พิบูลสงคราม เขตบางซื่อ กทม.10800
โทรศัพท์ 02-9132424 ต่อ 138 โทรสาร 02-9132424 ต่อ 138
E-mail: me_boon@hotmail.com

5. ประวัติการศึกษา

ระดับปริญญา	อักษรย่อปริญญา	วิชาเอก	สถานศึกษา	ปีที่สำเร็จ	ประเทศ
ปริญญาโท	วศ.ม.	วิศวกรรมเครื่องกล	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่	2551	ไทย
ปริญญาตรี	วศ.บ.	วิศวกรรมเครื่องกล	สถาบันเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี	2544	ไทย

6. สาขาวิชาการที่มีความชำนาญพิเศษ (แตกต่างจากวุฒิการศึกษา) ระบุสาขาวิชาการ

- ความร้อนประยุกต์ (Applied Thermal System)
- เทคโนโลยีและการจัดการด้านพลังงาน (Energy Technology and Management)
- การวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์ (Economic Analysis)

7. ประสบการณ์ที่เกี่ยวข้องกับการบริหารงานวิจัย ทั้งภายในและภายนอกประเทศ

7.1 หัวหน้าโครงการวิจัย:

- เครื่องคัดแยกขนาดเมล็ดสารกาแฟโรบัสต้า

7.2 งานวิจัยที่ทำเสร็จแล้ว:

- บทความวิจัยเรื่อง จลนพลศาสตร์การอบแห้งเนื้อสับปะรดแว่น, ตีพิมพ์ 2551, การประชุมวิชาการสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 9, ทุน งบประมาณ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
- งานวิจัยเครื่องคัดแยกเมล็ดสารกาแฟโรบัสต้า สนับสนุนโดยงบประมาณแผ่นดินประจำปี 2553

- บทความวิจัยเรื่อง The Specific Energy Consumption of Robusta Coffee Bean Separating ตีพิมพ์ 2553, การประชุมวิชาการนานาชาติ ครั้งที่ 2 : Green Technology and Productivity ทุนงบประมาณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

7.3 งานวิจัยที่กำลังทำ:

- ไม่ได้ขอรับงบประมาณ

นักวิจัยร่วมที่ 1

- ชื่อ - นามสกุล (ภาษาไทย) ผู้ช่วยศาสตราจารย์วรวิทย์ วรนาวิน
(ภาษาอังกฤษ) Asst.Prof.Vorawit Voranawin
- เลขหมายบัตรประจำตัวประชาชน 3 1002 02319 320
- ตำแหน่งปัจจุบัน ตำแหน่งวิชาการ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ระดับ 8
- หน่วยงานและสถานที่ติดต่อได้สะดวก พร้อมหมายเลขโทรศัพท์ โทรศัพท์มือถือ โทรสาร และ e-mail

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร คณะวิศวกรรมศาสตร์
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล
1381 ถ.พิบูลสงคราม เขตบางซื่อ กทม.10800
โทรศัพท์ 02-9132424 ต่อ 138 โทรสาร 02-9132424 ต่อ 138
E-mail: vorawit_nbk@hotmail.com

5. ประวัติการศึกษา

ระดับปริญญา	อักษรย่อปริญญา	วิชาเอก	สถานศึกษา	ปีที่สำเร็จ	ประเทศ
ปริญญาโท	วศ.ม.	วิศวกรรมการจัดการ อุตสาหกรรม	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระ เกล้าพระนครเหนือ	2551	ไทย
ปริญญาตรี	คอ.บ.	วิศวกรรมเครื่องกล	สถาบันเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี	2540	ไทย

- สาขาวิชาการที่มีความชำนาญพิเศษ (แตกต่างจากวุฒิการศึกษา) ระบุสาขาวิชาการ
 - ความปลอดภัยในงานอุตสาหกรรม (Industrial Safety)
 - เครื่องจักรการเกษตร (Agricultural Machinery)
 - การวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์ (Economic Analysis)
 - การอนุรักษ์พลังงานในโรงงานอุตสาหกรรมขนาดใหญ่ (Industrial Energy Conservation)
- ประสบการณ์ที่เกี่ยวข้องกับการบริหารงานวิจัยทั้งภายในและภายนอกประเทศ โดยระบุสถานภาพในการทำวิจัยว่าเป็นผู้อำนวยการงานวิจัย หัวหน้าโครงการวิจัยหรือผู้ร่วมวิจัยในแต่ละข้อเสนอการวิจัย
 - หัวหน้าโครงการวิจัย : ชื่อโครงการวิจัย
 - งานวิจัยที่ทำเสร็จแล้ว : (ชื่อผลงานวิจัย ปีที่พิมพ์ การเผยแพร่ และแหล่งทุนย้อนหลังไม่เกิน 5 ปี)
 - บทความวิจัยเรื่อง เครื่องกวนน้ำมะขามเปียก ตีพิมพ์ 2549, การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 20 ทุนงบประมาณ มหาวิทยาลัย เทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

- เครื่องกวนน้ำมะขามเปียก, สารราชมงคลพระนครเหนือ ปีที่ 2 ฉบับที่ 5 เดือนกันยายน ถึง ตุลาคม 2549

- การวิเคราะห์ความเข้มของความเค็มที่เกิดขึ้นในหัวรีฟอร์มด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โครงการวิจัย-เงินงบประมาณ พ.ศ 2552 ได้รับการสนับสนุนจาก สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ และบริษัทไทยซัมมิต พีเคเค บางนา จำกัด เป็นระยะเวลา 12 เดือน ตั้งแต่ 1 ตุลาคม 2551 ถึง 31 กันยายน 2552

- การวิเคราะห์ความล้าและออกแบบหัวรีฟอร์มโดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โครงการวิจัย-เงินงบประมาณ พ.ศ 2552 ได้รับการสนับสนุนจาก สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ และบริษัทไทยซัมมิต พีเคเค บางนา จำกัด เป็นระยะเวลา 12 เดือน ตั้งแต่ 1 ตุลาคม 2551 ถึง 31 กันยายน 2552

7.3 งานวิจัยที่กำลังทำ : ชื่อข้อเสนอการวิจัย แหล่งทุน และสถานภาพในการทำวิจัยว่า ได้ทำการวิจัยลุล่วงแล้วประมาณร้อยละเท่าใด

- ไม่มี



นักวิจัยร่วมที่ 2

- ชื่อ - นามสกุล (ภาษาไทย) นายประกอบ ชาตฤกษ์
(ภาษาอังกฤษ) Mr.Prakorb Chartpuk
- เลขหมายบัตรประจำตัวประชาชน 5 7607 00004 534
- ตำแหน่งปัจจุบัน ตำแหน่งวิชาการ อาจารย์
- หน่วยงานและสถานที่ติดต่อได้สะดวก พร้อมหมายเลขโทรศัพท์ โทรศัพท์มือถือ โทรสาร และ e-mail

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร คณะวิศวกรรมศาสตร์
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล
1381 ถ.พิบูลสงคราม เขตบางซื่อ กทม.10800
โทรศัพท์ 02-9132424 ต่อ 138 โทรสาร 02-9132424 ต่อ 138
E-mail: prakorb.c@rmutp.ac.th

5. ประวัติการศึกษาการฝึกอบรม

5.1 การศึกษา

ระดับ ปริญญา	อักษรย่อ ปริญญา	วิชาเอก	สถานศึกษา	ปีที่ สำเร็จ	ประเทศ
ปริญญา โท	วศ.ม.	วิศวกรรมเครื่องกล	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่	2549	ไทย
ปริญญา ตรี	วศ.บ.	วิศวกรรมเครื่องกล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี	2543	ไทย

5.2 การอบรม

- การฝึกอบรม THE ADVANCED MECHATRONICS TRAINING COURSE ที่ Festo (Thailand) CO., LTD (พ.ศ. 2546)
- การฝึกอบรม FLUID POWERS TECHNOLOGY AND MAINTENANCE IN INDUSTRIAL AUTOMATION ที่ Technical Training Center Rajamangala University of Technology Thanyaburi and Festo CO.,LTD. (พ.ศ. 2549)
- การฝึกอบรม Training in Control and Drive Engineering ที่ Festo Didactic GmbH & CO.KG Germany (พ.ศ. 2550)
- การฝึกอบรม LabVIEW Basic I, II and Intermediate I,II ที่ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี โดย Trinerger Instrument Co.,Ltd. And National Instruments (Thailand) Co.,Ltd. (พ.ศ. 2551)
- ผู้ช่วยที่ปรึกษาโครงการอนุรักษ์พลังงานในโรงงานให้คำปรึกษาด้านการอนุรักษ์พลังงาน ตรวจวัดและวิเคราะห์การใช้พลังงาน บำรุงรักษาปรับปรุงระบบปรับอากาศเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพ

6. สาขาวิชาการที่มีความชำนาญพิเศษ (แตกต่างจากวุฒิการศึกษา) ระบุสาขาวิชาการ

- การวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Analysis)

- การสั่นสะเทือนเชิงกล (Vibration Mechanics)
- การออกแบบโมลและตาย (Mold and die design)
- กลศาสตร์การแตกหัก (Fracture Mechanics)
- วัสดุเชิงประกอบ (Composite materials)
- ไฮดรอลิกส์และนิวแมติกส์ (Hydraulic and Pneumatic)
- คอมพิวเตอร์ช่วยงานวิศวกรรมและการออกแบบ (Computer aided design and engineering)
- การควบคุมอัตโนมัติ (Automatic Control)
- ไบโอดีเซลชุมชน (Bio-diesel in Community)
- การอนุรักษ์พลังงานในโรงงานอุตสาหกรรมขนาดใหญ่ (Industrial Energy Conservation)
- การอนุรักษ์พลังงานในโรงงานอุตสาหกรรมขนาดกลางและเล็ก (SME Energy Conservation)

7. ประสบการณ์ที่เกี่ยวข้องกับการบริหารงานวิจัยทั้งภายในและภายนอกประเทศ โดยระบุสถานภาพในการทำวิจัยว่าเป็นผู้อำนวยการงานวิจัย หัวหน้าโครงการวิจัยหรือผู้ร่วมวิจัยในแต่ละข้อเสนอการวิจัย

7.1 หัวหน้าโครงการวิจัย : ชื่อโครงการวิจัย

- การวิเคราะห์ความเข้มของความเค้นที่เกิดขึ้นในหัวรีฟอร์มด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โครงการวิจัย-เงินงบประมาณ พ.ศ 2552 ได้รับการสนับสนุนจาก สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ และบริษัทไทยซัมมิต พีเคเค บางนา จำกัด เป็นระยะเวลา 12 เดือน ตั้งแต่ 1 ตุลาคม 2551 ถึง 31 กันยายน 2552

- การวิเคราะห์ความล้าและออกแบบหัวรีฟอร์มโดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โครงการวิจัย-เงินงบประมาณ พ.ศ 2552 ได้รับการสนับสนุนจาก สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ และบริษัทไทยซัมมิต พีเคเค บางนา จำกัด เป็นระยะเวลา 12 เดือน ตั้งแต่ 1 ตุลาคม 2551 ถึง 31 กันยายน 2552

7.2 งานวิจัยที่ทำเสร็จแล้ว : (ชื่อผลงานวิจัย ปีที่พิมพ์ การเผยแพร่ และแหล่งทุนย้อนหลังไม่เกิน 5 ปี)

- Thongchai Fongsamootr and Prakorb Chartpuk (2006). Analysis of Vehicle-Induced Gusts Effect on Stress Distribution and Natural Frequency of Traffic Sign Post Using Finite Element Method. Conference of Mechanical Engineering Network of Thailand. 20th 18-20 October 2006 at Mandarin Golden Valley Resort Khao Yai Hotel. Organize by Suranaree University of Technology, Thailand.

- Thongchai Fongsamootr and Prakorb Chartpuk (2006). Analyses of Stress Distribution in Overhanging Traffic Sign Pole Using Finite Element Method. KKU Engineering Journal. ISSN 0125-8273. Published on behalf of Faculty of Engineering, KHONKAEN University, THAILAND. Volume33, Number6, November-December, 2006.

- การวิเคราะห์ความเข้มของความเค้นที่เกิดขึ้นในหัวรีฟอร์มด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โครงการวิจัย-เงินงบประมาณ พ.ศ 2552 ได้รับการสนับสนุนจาก สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ และบริษัทไทยซัมมิต พีเคเค บางนา จำกัด ระยะเวลา 12 เดือน ตั้งแต่ 1 ตุลาคม 2551 ถึง 31 กันยายน 2552

- การวิเคราะห์ความล้าและออกแบบหัวรีฟอร์มโดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โครงการวิจัย-เงินงบประมาณ พ.ศ 2552 ได้รับการสนับสนุนจาก สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ และบริษัทไทยซัมมิต พีเคเค บางนา จำกัด เป็นระยะเวลา 12 เดือน ตั้งแต่ 1 ตุลาคม 2551 ถึง 31 กันยายน 2552

- Khasanov O.L., Dvilis E.S. and P.Chartpuk, Modelling and analysis of efficiency densification process of nanopowder materials in the collector mould of spiral type, National Research Tomsk Polytechnic University, Russia, 23-26 May 2011.

7.3 วิจัยวิจัยที่กำลังทำ:

- ไม่มี

