

การออกแบบอย่างเหมาะสมของรถวางสะพาน

OPTIMIZED DESIGN OF VEHICLE LAUNCHED BRIDGE



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2559

การออกแบบอย่างเหมาะสมของรถวางสะพาน

OPTIMIZED DESIGN OF VEHICLE LAUNCHED BRIDGE



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2559

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# OPTIMIZED DESIGN OF VEHICLE LAUNCHED BRIDGE



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT  
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF  
BACHELOR OF ENGINEERING IN MECHANICAL ENGINEERING  
FACULTY OF ENGINEERING  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG  
2016

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาานิพนธ์ปีการศึกษา 2559

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การออกแบบอย่างเหมาะสมของรถทอดสะพาน

OPTIMIZED DESIGN OF VEHICLE LAUNCHED BRIDGE

ผู้จัดทำ

- |                 |           |              |          |
|-----------------|-----------|--------------|----------|
| 1. นายธีรภัทร   | พัฒน์แก้ว | รหัสประจำตัว | 56010619 |
| 2. นายปิยวัฒน์  | อาหารกิจ  | รหัสประจำตัว | 56011483 |
| 3. นายวุฒิมพงษ์ | ต้นฟู     | รหัสประจำตัว | 56011168 |

ณัฐวุฒิ เตไปวา

อาจารย์ที่ปรึกษา

( ผศ.ดร.ณัฐวุฒิ เตไปวา )

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## การออกแบบอย่างเหมาะสมของรถวางสะพาน

นายธีรภัทร	พัฒนแก้ว	56010619
นายปิยวัฒน์	อาหารกิจ	56011483
นายวุฒิพงษ์	ต้นฟู	56011168
ผศ.ดร.ณัฐวุฒิ	เตไปวา	อาจารย์ที่ปรึกษา ปีการศึกษา 2559

## บทคัดย่อ

เนื่องจากประเทศไทยมีการเกิดอุทกภัยบ่อยครั้ง ทำให้บางครั้งการเข้าถึงบางพื้นที่ประสบภัยเป็นไปได้ยาก เพราะถนนและสะพานได้รับความเสียหายจากกระแสน้ำจึงไม่สามารถเข้าถึงพื้นที่ประสบอุทกภัยได้ ฉะนั้นทางกรมทหารช่างที่ 21 จึงได้ดำเนินการออกแบบรถวางสะพานขึ้น เพื่ออำนวยความสะดวกในการเข้าถึงพื้นที่ประสบอุทกภัย ลักษณะของรถวางสะพานนั้นก็คือรถบรรทุกที่ติดตั้งเครื่องวางสะพานและโครงสร้างสะพาน โครงงานนี้มุ่งเน้นในการนำวิธีการหาโทโพลยีที่เหมาะสมมาประยุกต์ใช้ในลดน้ำหนักของชิ้นส่วนในโครงสร้างสะพานที่ติดตั้งอยู่บนรถวางสะพานเพื่อลดภาระกรรมของต้นกำลังที่ใช้ขับเคลื่อนเครื่องวางสะพาน โดยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ใช้ในการวิเคราะห์เพื่อหาแนวโน้มของความแข็งแรงที่เกิดขึ้นบริเวณโครงสร้างสะพาน และใช้ในการหาโทโพลยีที่เหมาะสม เพื่อหารูปร่างเหมาะสมที่สุดสำหรับการลดน้ำหนักของชิ้นส่วนในโครงสร้างของสะพาน จากนั้นใช้โปรแกรมสำเร็จรูป ADAMS/View ทำการจำลองพลศาสตร์การเคลื่อนที่ของเครื่องวางสะพานเพื่อศึกษากำลังที่ลดลงในการใช้วางสะพานเมื่อน้ำหนักของโครงสร้างสะพานลดลง ผลที่ได้จากการออกแบบนี้แสดงให้เห็นถึงประโยชน์ของการใช้เทคโนโลยีการหาโทโพลยีที่เหมาะสมเข้ามาช่วยในการออกแบบซึ่งทำให้น้ำหนักของโครงสร้างสะพานลดลงจาก 5960.6 กิโลกรัม เป็น 5628.8 กิโลกรัม อีกทั้งยังส่งผลให้ภาระของเครื่องวางสะพานลดลงจากเดิมอีกด้วย อย่างไรก็ตามการนำเสนอนี้เป็นเพียงกระบวนการที่ผู้ออกแบบรู้เพียงแนวคิดในการใช้งานของรถวางสะพานเท่านั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## OPTIMIZED DESIGN OF VEHICLE LAUNCHED BRIDGE

Teerapat	Patkaew	56010619
Piyawat	Artornkij	56011483
Wutthiphong	Tunfu	56011168
Asst.Prof. Dr.Nuttawoot Depaiwa Advisor		
Year 2016		

## ABSTRACT

Recently years ago, flood often occur in Thailand. This situation is the cause of difficult rescue in flood areas because roads and bridges were destroyed by tides. Therefore, optimized vehicle launched bridge was designed by 21 engineering regiment for convenience and easy to access to flood areas. The vehicle launched bridge likes a truck equipped with placed machine of bridge. This work emphasized of Optimized Design by using Finite Element method and Topology Optimization method to improve the performance of the vehicle launched bridge. Finite Element method was used for analysis the trend of strength occurred in bridge structure and Topology Optimization method was used for optimization of bridge structure. In addition, the analyzable simulation of mechanical movement of the launch bridge to find power in placing bridge and to compare the cost of this improvement by using ADAMS program. The result of optimized design revealed that the advantage of using the appropriate topology optimization technology can help in the design, which reduces the weight of bridge structure from 5960.6 kg to 5628.8 kg. It also reduced the load on the bridge. However, this work is just a process that author know only the concept of using the vehicle launched bridge

## กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงได้ด้วยดี ก็เพราะด้วยความเอาใจใส่ แนะนำ และช่วยเหลือในด้านต่าง ๆ เสมอมาจาก ผศ.ดร.ณัฐวุฒิ เตไปวา อาจารย์ที่ปรึกษา ซึ่งต้องขอขอบพระคุณเป็นอย่างยิ่ง ขอขอบคุณอาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลทุกท่านที่ได้ให้ความรู้เพิ่มเติมและได้ให้ความช่วยเหลือด้านต่างๆ ในการทำโครงการนี้ จนสามารถบรรลุปัญหาต่างๆ ไปได้ด้วยดี

ขอขอบคุณ ร้อยโท เศกสิทธิ์ โพธิสิทธิ์ กรมทหารช่างที่ 21 ราชบุรีที่อนุเคราะห์แบบดรออิ้งของรถวางสะพาน

และต้องขอขอบพระคุณบุคคลสำคัญที่สุดที่ทำให้ข้าพเจ้ามีวันนี้ ก็คือ บิดา มารดา อันเป็นที่เคารพรักยิ่ง ซึ่งได้เลี้ยงดูผู้เขียนมาเป็นอย่างดี พร้อมทั้งให้โอกาสในการศึกษาอย่างเต็มที่ และยังให้กำลังใจ เอาใจใส่เสมอมา ในทุก ๆ ด้านอันหาที่เปรียบมิได้ ข้าพเจ้าขอระลึกในพระคุณอันสุดประมาณ และขอกราบขอบพระคุณมา ณ ที่นี้

นายธีรภัทร พัฒน์แก้ว  
นายปิยวัฒน์ อาทรกิจ  
นายวุฒิพงษ์ ตันฟู

## สารบัญ

บทคัดย่อภาษาไทย .....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	IV
สารบัญรูป .....	IV
บทที่ 1 บทนำ .....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา .....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา .....	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่ได้รับจากโครงการ .....	2
1.5 ขั้นตอนการศึกษา .....	3
บทที่ 2 งานวิจัยและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง .....	4
2.1 บทนำ .....	4
2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....	4
2.3 ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์.....	5
2.4 ทฤษฎีความเสียหายสำหรับวัสดุเหนียว.....	11
2.5 การหาค่าที่เหมาะสมที่สุด.....	18
2.6 การโค้งงอของคาน.....	20
2.7 ค่าที่มากที่สุดของแนวเส้นแรงอิทธิพลที่เกิดจากแรงกระทำแบบจุดของรถบรรทุกจร .....	22
2.8 พลศาสตร์การเคลื่อนที่ของมัลติบอดีใน 2 มิติ.....	25
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย .....	28
3.1 บทนำ .....	28
3.2 แบบจำลอง 3 มิติ ของโครงสร้างสะพาน .....	29
3.3 การออกแบบชิ้นส่วนด้วยการหาโทโปโลยีที่เหมาะสม .....	29
3.4 การวิเคราะห์ความแข็งแรงของโครงสร้างสะพาน.....	31
3.4.1 การทดสอบโปรแกรม .....	32
3.4.2 การเงื่อนไขในการวิเคราะห์ความแข็งแรง .....	33

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

3.4.2.1 ค่าคุณสมบัติเชิงกลของแบบจำลองโครงสร้างสะพาน .....	33
3.4.2.2 รูปแบบของภาระกรรม .....	34
3.5 การจำลองพลศาสตร์การเคลื่อนที่ .....	35
บทที่ 4 ผลการออกแบบและการวิเคราะห์ข้อมูล .....	37
4.1 บทนำ .....	37
4.2 ผลการทดสอบโปรแกรม .....	37
4.2.1 ผลการวิเคราะห์กรณีการทดสอบอย่างง่าย .....	37
4.2.2 การเปรียบเทียบผลเฉลยกรณีการทดสอบอย่างง่าย .....	42
4.3 ผลการออกแบบด้วยการหาโทโพลยีที่เหมาะสม .....	43
4.4 ผลการวิเคราะห์ความแข็งแรง .....	44
4.5 ผลการวิเคราะห์พลศาสตร์การเคลื่อนที่ .....	46
บทที่ 5 บทสรุป .....	47
5.1 สรุปผลการทดลอง .....	47
5.2 ข้อเสนอแนะ .....	47
เอกสารอ้างอิง .....	48
ภาคผนวก ก .....	49

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง

ตารางที่ 3.1 ตารางแสดงค่าคุณสมบัติเชิงกลของแบบจำลองโครงสร้างสะพาน .....	34
ตารางที่ 4-1 แสดงการเปรียบเทียบผลเฉลยที่ได้จากวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ กับการคำนวณจากทฤษฎี .....	42
ตารางที่ 4-2 ตารางเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์แบบสถิต ระหว่างสะพานแบบดั้งเดิมกับสะพานแบบใหม่ .....	46
ตารางที่ 4.3 ตารางแสดงการเปรียบเทียบการใช้กำลังในแต่ละ motion .....	48



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป

รูปที่ 1.1	รถวางสะพาน (Vehicle Launched Bridge) .....	1
รูปที่ 2.1	การเสียรูป (deformation).....	4
รูปที่ 2.2	ความสมดุลตามตำแหน่งใดๆ ในของแข็ง 3 มิติ .....	8
รูปที่ 2.3	ความเสียหายของวัสดุตามทฤษฎีของเทรסקา .....	13
รูปที่ 2.4	สถานะของความเครียด.....	14
รูปที่ 2.5	ความเสียหายของวัสดุตามทฤษฎีของวอนมิสเซส .....	16
รูปที่ 2.6	การเปรียบเทียบทฤษฎีความเสียหายกับการทดลอง .....	17
รูปที่ 2.7	การหาโทโปโลยีที่เหมาะสมที่สุด.....	19
รูปที่ 2.8	อธิบายการโก่งตัวของคาน .....	20
รูปที่ 2.9	คานที่มีหน้าตัดคงที่และรับแรงสม่ำเสมอ .....	21
รูปที่ 2.10	คานที่มีหน้าตัดคงที่และรับแรงที่จุดกึ่งกลาง.....	22
รูปที่ 2.11	การหาผลตอบสนองของคานยื่นที่รับกลุ่มน้ำหนักบรรทุก .....	23
รูปที่ 2.12	การหาผลตอบสนองของคานช่วงเดียวธรรมดาที่รับกลุ่มน้ำหนักบรรทุก .....	24
รูปที่ 3.1	แผนภาพแสดงขั้นตอนการดำเนินงาน .....	28
รูปที่ 3.2	ชิ้นส่วนต่างๆของสะพาน .....	29
รูปที่ 3.3	คานหลักของโครงสร้างสะพาน .....	30
รูปที่ 3.4	คานยื่นที่ใช้พิจารณา .....	30
รูปที่ 3.5	แสดงโดเมนในการออกแบบ .....	31
รูปที่ 3.6	คานช่วงเดียวธรรมดาหน้าตัดรูปสี่เหลี่ยมรับแรงแบบกระจายตลอดความยาว .....	32
รูปที่ 3.7	คานช่วงเดียวธรรมดาหน้าตัดรูปสี่เหลี่ยมรับแรงแบบจุดที่กึ่งกลาง .....	32
รูปที่ 3.8	คานช่วงเดียวธรรมดาหน้าตัดรูปตัวไอรับแรงแบบกระจายตลอดความยาว .....	33
รูปที่ 3.9	คานช่วงเดียวธรรมดาหน้าตัดรูปตัวไอรับแรงแบบจุดที่กึ่งกลาง .....	33
รูปที่ 3.10	แบบจำลองรถบรรทุกทดสอบ .....	34
รูปที่ 3.11	ตำแหน่งของภาระกรรม .....	35
รูปที่ 3.12	การกำหนดการเคลื่อนที่ของการเก็บสะพาน .....	36
รูปที่ 4.1	ผลเฉลยคานช่วงเดียวธรรมดาหน้าตัดรูปสี่เหลี่ยม รับแรงแบบกระจายตลอดความยาวที่คำนวณด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ .....	39

## สารบัญญรูป(ต่อ)

รูปที่ 4.2 ผลเฉลยคานช่วงเดียวธรรมดาหน้าตัดรูปสี่เหลี่ยม รับแรงแบบจุดที่กึ่งกลางที่คำนวณด้วยวิธีไฟไนท์เอลิเมนต์ .....	40
รูปที่ 4.3 ผลเฉลยคานช่วงเดียวธรรมดาหน้าตัดรูปตัวไอรับ แรงแบบกระจายตลอดความยาวที่คำนวณด้วยวิธีไฟไนท์เอลิเมนต์ .....	41
รูปที่ 4.4 ผลเฉลยคานช่วงเดียวธรรมดาหน้าตัดรูปตัวไอรับแรงแบบจุดที่กึ่งกลาง ที่คำนวณด้วยวิธีไฟไนท์เอลิเมนต์ .....	42
รูปที่ 4.5 คานยื่นที่ใช้ในการคำนวณเพื่อหาโทปโลยีที่เหมาะสม .....	44
รูปที่ 4.6 ผลเฉลยโทปโลยีที่เหมาะสม .....	44
รูปที่ 4.7 การตกแต่งผิวของโทปโลยีที่เหมาะสม .....	45
รูปที่ 4.8 ผลเฉลยโทปโลยีที่ผ่านการตกแต่งผิวแล้ว .....	45
รูปที่ 4.9 แบบจำลองสถานการณ์ในการรับภาระกรรมของโครงสร้างสะพาน .....	46
รูปที่ 4.10 ค่าความเค้นวอนมีสที่เกิดขึ้นในโครงสร้าง .....	46
รูปที่ 4.11 การกำหนดการเคลื่อนที่ของการเก็บสะพาน .....	
รูปที่ 4.12 กราฟแสดงการเปรียบเทียบกำลังที่ใช้ในเครื่องวาง ระหว่างสะพานดั้งเดิมกับสะพานแบบใหม่ .....	48

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

หลายปีที่ผ่านมาประเทศไทยเกิด อุทกภัยมาโดยตลอด และเป็นอุทกภัยครั้งใหญ่ด้วยกัน ทั้งนี้ อุทกภัยนี้ส่งผลให้เกิดความเสียหายอย่างหนักทั้งทางภาคการเกษตร อุตสาหกรรม เศรษฐกิจ สังคม ถนนและสะพาน ทำให้การคมนาคมถูกตัดขาด จากข้อมูลทางสถิติในปี 2554 มีพื้นที่ประสบ อุทกภัยและมีการประกาศเป็นพื้นที่ภัยพิบัติกรณีฉุกเฉินในช่วงเดือนกรกฎาคมจนถึงพฤศจิกายน รวมทั้งสิ้น 65 จังหวัด มีถนนได้รับความเสียหายทั้งหมด 13,961 สาย ส่งผลให้การเข้าถึงพื้นที่ประสบ อุทกภัยเป็นไปได้ยาก อีกทั้งยังทำให้ผู้ประสบภัยได้รับความช่วยเหลือล่าช้าอีกด้วย

ดังนั้นกรมทหารช่างที่ 21 แผนกกระบวนงานซ่อมบำรุงยุทโธปกรณ์ ค่ายภาณุรังษี อำเภอเมือง จังหวัดราชบุรี จึงได้มีการสร้างรถวางสะพานขึ้น โดยรถวางสะพานนี้จะมีลักษณะเป็นรถบรรทุกติดตั้ง สะพานและระบบไฮดรอลิกเพื่อวางสะพาน (เครื่องวางสะพาน) ดังรูปที่ 1.1 แสดงต้นแบบของรถวาง สะพานที่ถูกสร้างขึ้น โดยการออกแบบนั้นเป็นการออกแบบเพื่อเป็นต้นแบบและยังไม่ได้ผ่าน กระบวนการออกแบบทางด้านวิศวกรรมที่เหมาะสมจึงมีต้นทุนในการผลิตสูง ดังนั้นเพื่อลดต้นทุนใน การผลิต จำเป็นต้องนำกระบวนการทางด้านวิศวกรรมและเทคโนโลยีมาใช้ในการออกแบบ จึงเป็นที่มา ของงานวิจัยนี้



รูปที่ 1.1 รถวางสะพาน (Vehicle Launched Bridge)

ในงานปริญญาโทเล่มนี้ ได้นำเสนอการการใช้คอมพิวเตอร์ช่วยในการออกแบบ (CAD) และ การใช้คอมพิวเตอร์ช่วยในงานวิศวกรรม (CAE) มาประยุกต์ใช้ในงานด้านวิศวกรรมคือ การลด น้ำหนัก ด้วยวิธีการหาโทปอโลยีที่เหมาะสม (Topology Optimization) สำหรับโครงสร้างของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สะพานที่จะถูกออกแบบใหม่นั้น จะต้องสามารถใช้ได้อย่างปลอดภัยภายใต้เงื่อนไขที่กำหนด จากนั้น จะทำการจำลองการวิเคราะห์ระบบกลไกการเคลื่อนที่ของเครื่องวางสะพานในการหากำลังที่ใช้วาง สะพาน เพื่อศึกษาหาแนวทางในการลดต้นทุนการผลิตของรถวางสะพาน

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

- 1.2.1 เพื่อหาโครงสร้างสะพานของรถวางสะพานที่มีน้ำหนักน้อย
- 1.2.2 เพื่อวิเคราะห์ความแข็งแรงของโครงสร้างสะพานของรถวางสะพาน
- 1.2.3 เพื่อหากำลังที่ใช้ในการวางสะพาน
- 1.2.4 เพื่อนำเสนอแนวทางในการลดต้นทุนของการผลิต

## 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

- 1.3.1 ดำเนินการวิจัยโดยใช้ข้อมูล และวัสดุ ของกรมทหารช่างที่ 21 (ราชบุรี)
- 1.3.2 ศึกษาสะพานที่มีขนาดกว้าง 2.1 เมตร ยาว 12 เมตร
- 1.3.3 พิจารณารอยเชื่อมเป็นการเชื่อมต่อแบบสมบูร์ณ กำหนดเป็นแบบยึดติดกันแน่น
- 1.3.4 การปรับปรุงจะไม่มี การปรับเปลี่ยน แบบและตำแหน่งของจุดยึดของสะพานกับรถบรรทุก
- 1.3.5 ไม่พิจารณาความเค้นที่มีผลกระทบต่อตำแหน่งของจุดยึดของสะพานกับรถบรรทุก
- 1.3.6 เมื่อออกแบบตัวสะพานออกมาใหม่ต้องมีความกว้างไม่เกินและรับน้ำหนักได้ 25 ตัน
- 1.3.7 การวิเคราะห์ความแข็งแรงเป็นการวิเคราะห์เชิงสถิตยศาสตร์
- 1.3.8 ใช้โปรแกรม ANSYS Workbench 18.0 ในการวิเคราะห์ทางไฟไนท์เอลิเมนต์
- 1.3.9 ใช้โปรแกรมอดัมส์ (ADAMS) จำลองการวิเคราะห์ระบบกลไกซึ่งมีการเคลื่อนที่ของเครื่องวาง สะพานโดยไม่มี การปรับเปลี่ยนขนาดของเครื่องวางสะพาน และเป็นแบบพลศาสตร์

## 1.4 ประโยชน์ที่ได้รับจากโครงการ

- 1.4.1 สามารถลดภาระของต้นกำลังของเครื่องวางสะพานได้
- 1.4.2 สามารถลดน้ำหนักของโครงสร้างสะพานได้โดยมีความปลอดภัยในการใช้งาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 1.5 วิธีการดำเนินการ

- 1.5.1 ศึกษาปริทัศน์วรรณกรรมและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง
- 1.5.2 ศึกษาโครงสร้างรถวางสะพานของกรมทหารช่างที่ 21 (ราชบุรี)
- 1.5.3 เขียนแบบชิ้นส่วนรถวางสะพานโดยใช้โปรแกรม CATIA V5R20
- 1.5.4 ศึกษาการวิเคราะห์ความแข็งแรงของโครงสร้างด้วยโปรแกรม ANSYS 18.0
- 1.5.5 ศึกษาการใช้งานวิธีการโทโปโลยีที่เหมาะสมโดยด้วยโปรแกรม ANSYS 18.0
- 1.5.6 ออกแบบใหม่ตามวิธีโทโปโลยีที่เหมาะสม
- 1.5.7 วิเคราะห์ความแข็งแรงโครงสร้างของสะพานโดยโปรแกรม ANSYS 18.0
- 1.5.8 สร้างแบบจำลองการเคลื่อนที่ของเครื่องวางสะพานโดยใช้โปรแกรม ADAMS/View
- 1.5.9 สรุปผลและเสนอแนะ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

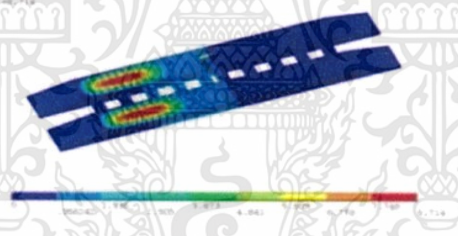
# ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 บทนำ

ในการออกแบบรูปร่างของชิ้นส่วนในโครงสร้างของสะพานนั้นจำเป็นต้องมีความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับการหาโพลีโพลีที่เหมาะสมที่สุดซึ่งเป็นกระบวนการการหารูปร่างที่เหมาะสมที่ประยุกต์เอาระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์มาใช้ในการหาผลเฉลย และทฤษฎีความเค้นในวัสดุที่นำมาใช้ในการวิเคราะห์ความแข็งแรงของโครงสร้างสะพาน ดังจะกล่าวในบทนี้

### 2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

D.V. Srividya , B. Raju, D. Kondayya [1] ได้ตีพิมพ์บทความเกี่ยวใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยคำนวณบอกถึงความแข็งแรง ณ จุดครากและความเค้น สูงสุดรวมไปถึงการโค้งตัวสูงสุดของโครงสร้างสะพาน ในรณวงสะพานของแบบรถถัง M70A



รูปที่ 2.1 การเสียรูป (deformation)

Hornbeck, B. Connor, R. Kluck [2] ได้ตีพิมพ์บทความเกี่ยวข้องกับสามส่วน คือ การออกแบบ รหัสการทดสอบสะพานทางทหาร และอุปกรณ์ส่งข้าม บทความนี้จะครอบคลุม ภาระที่ได้รับ การออกแบบ และการทดสอบ จะนำไปใช้ในการพัฒนาทางทหาร เช่นสะพานช่วงเดียว ท่าเทียบเรือ สะพานหนุนลอย แพ อุปกรณ์ทางยกระดับ โดยรหัสจะทำให้ผู้ใช้สามารถกำหนดอุปกรณ์ชนิดต่างๆ ให้มีประสิทธิภาพ และพิจารณาจากมาตรฐานของอุปกรณ์ที่ต่ำที่สุดที่ยอมรับ สะพานและอุปกรณ์ส่งข้าม จะถูกออกแบบให้ตรงตามความต้องการของผู้ใช้ ภายใต้ภาระ ลักษณะเฉพาะการออกแบบ และการทดสอบ ผู้ใช้สามารถเลือกรหัสวัสดุที่จะทำได้ตามคำแนะนำ และสุดท้ายยังต้องมีการทดสอบผลจากการเลือกใช้อุปกรณ์ต่างๆ ว่าผ่านเกณฑ์หรือไม่ ส่งผลให้สามารถผลิตอุปกรณ์ได้อย่างรวดเร็ว ตรงตามความต้องการของผู้ใช้ และมีมาตรฐาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Mike Laviolette [3] ได้ตีพิมพ์บทความเกี่ยวข้องกับการก่อสร้างสะพาน โดยใช้ตัวยึดทอดวางสะพานที่มีความลึกมาก ๆ เช่น หุบเขา ข้ามลำน้ำที่มีความชันมาก หรือบริเวณที่ต้องการรักษาสภาพแวดล้อมเดิมเอาไว้ วิธีการยึดทอด(ILM) ของการวางสร้างสะพาน มีข้อดีกว่าการวางสะพานปกติ ตลอดจนช่วยลดการรบกวนสภาพแวดล้อม เป็นการประกอบชุดสะพานแต่ละวางทอดยาวในบริเวณพื้นที่ที่มีอยู่อย่างจำกัด และช่วยเพิ่มความปลอดภัยให้กับผู้ปฏิบัติงาน วิธีการวางสะพานแบบ ILM เป็นลักษณะประกอบสะพานแต่ละช่วงออกไป ในแต่ละช่วงที่ข้ามสิ่งกีดขวาง ก็จะมีตัวยึดทอดวางสะพานเคลื่อนตัว นำไปก่อน และต่อจากนั้นก็เคลื่อนตัวสะพานออกไปเป็นช่วงๆ ทำอย่างนี้ต่อเนื่องกันจนถึงช่วงสะพานท้ายสุด วัตถุประสงค์โดยรวมของรายงานฉบับนี้ เป็นการรวบรวมข้อมูลเกี่ยวกับการวางสะพานแบบ ILM ให้ทราบถึงการใช้งาน ข้อจำกัด และประโยชน์ที่ได้รับ

Dnyaneshwar J. Sushir, Prashant N. Ulhe [4] ได้ตีพิมพ์บทความเกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์ความเสียหายสลักข้อพับของสะพานทางยุทธวิธีขนาดหนัก โดยนำสลักข้อพับ มาปรับแก้การออกแบบ เพื่อให้ตัวสะพานสามารถ รับน้ำหนักได้เพิ่มมากขึ้น โดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ช่วยวิเคราะห์

Jeong-Hoon Choi [5] ได้ตีพิมพ์บทความเกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์การแตกหักและประมาณอายุการใช้งานที่เหลืออยู่ของส่วนประกอบย่อยยานเกราะวางสะพาน โดยผลการทดลองแสดงกลศาสตร์การแตกหักและการปล่อยคลื่นเสียง ข้อมูลทั้งสองจะช่วยให้เราเข้าใจการเติบโตของรอยร้าวที่เกิดจากการความล้า ของชิ้นส่วนวิกฤต กลศาสตร์การแตกหักยืดหยุ่นเชิงเส้น (LEFM) ถูกนำไปประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ เพื่อให้ทราบค่าตัวประกอบของความเค้น ผลจากการทดลองและวิธีเชิงตัวเลข ความยาวรอยร้าววิกฤต และอายุการใช้งานที่เหลืออยู่ของชิ้นส่วนวิกฤต คาดว่าข้อมูลทั้งสอง จะช่วยประเมินความเสียหายที่จะเกิดกับยานเกราะวางสะพานได้

อดุลยศักดิ์ บุญพันธ์ [6] งานวิจัยนี้นำเสนอการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีการหาค่าเหมาะสมสุด และระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อออกแบบชิ้นส่วนยานยนต์ ซึ่งเป็นการหาค่าความอ่อนตัวต่ำสุด โครงสร้าง เพื่อหาค่าความแข็งเชิงพลวัตสูงสุดของโครงสร้าง และการออกแบบละเอียดของโครงสร้าง เป็นการออกแบบ 3 ระดับ ผลการออกแบบแสดงให้เห็นว่าการออกแบบหาค่าเหมาะสมสุด 3 ระดับนี้ เป็นกระบวนการออกแบบที่มีทั้งประสิทธิภาพและประสิทธิผล

## 2.3 ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

ระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ เป็นวิธีการเชิงตัวเลขเพื่อหาค่าผลเฉลยโดยประมาณของตัวแปรที่ไม่รู้ค่า โดยการแบ่งลักษณะรูปร่างของปัญหาออกเป็นชิ้นส่วนย่อยที่เรียกว่า เอลิเมนต์ และในแต่ละชิ้นส่วนย่อยจะเชื่อมกันที่จุดต่อ ซึ่งเป็นตำแหน่งที่เราต้องการหาค่าผลเฉลยโดยประมาณ วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เป็นวิธีเชิงตัวเลขที่ใช้สำหรับแก้ปัญหาเชิงอนุพันธ์ และกำลังเป็นที่นิยมอย่างกว้างขวางในการแก้ปัญหาทางวิศวกรรม ซึ่งสามารถใช้วิเคราะห์ปัญหาทางด้านกลศาสตร์ของแข็งและโครงสร้าง

ที่ซับซ้อนและประกอบด้วยส่วนว่า ส่วนโค้งต่างๆ รวมไปถึงพื้นที่หน้าตัดไม่สม่ำเสมอ ซึ่งมีผลให้ไม่สามารถจะหาผลเฉลยแม่นยำตรงจากสมการอนุพันธ์ได้ ดังนั้นจึงได้มีการประยุกต์ใช้ระเบียบวิธีไฟไนท์อิลลิเมนต์เข้ามาแก้ปัญหาด้วยการประมาณค่าผลเฉลย โดยการแก้สมการเชิงพีชคณิตแทนการแก้สมการเชิงอนุพันธ์ ระเบียบวิธีไฟไนท์อิลลิเมนต์จึงถูกนำมาใช้ในการศึกษาปัญหาทางด้านกลศาสตร์ของแข็ง เนื่องจากเป็นวิธีที่ประหยัดค่าใช้จ่ายในการทดสอบและให้ผลคำตอบที่เป็นที่ยอมรับโดยทั่วไป ซึ่งในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานในการวิเคราะห์ปัญหาทางสถิตศาสตร์ที่เกี่ยวข้องกับโครงการนี้

ขั้นตอนของระเบียบวิธีทางไฟไนท์อิลลิเมนต์สามารถแบ่งเป็นขั้นตอน 3 ขั้นตอน เริ่มต้นจากกระบวนการขั้นต้น (Pre-processor) คือการแบ่งรูปทรงหรือโครงสร้างของปัญหาออกเป็นอิลลิเมนต์ย่อยๆ จะต้องคำนึงถึงโครงสร้างเดิมให้มากที่สุด แล้วจึงกำหนดสมบัติวัสดุให้กับอิลลิเมนต์ โดยอาศัยความสัมพันธ์ระหว่างการกระจัดกับความเครียด และความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดกับความเค้น จากนั้นจะเป็นการวิเคราะห์ (Analysis) จะใช้ฟังก์ชันการประมาณภายในอิลลิเมนต์ให้สอดคล้องกับจำนวนจุดต่อของอิลลิเมนต์ หรือสอดคล้องกับระดับความอิสระของอิลลิเมนต์และสร้างสมการไฟไนท์อิลลิเมนต์สำหรับแต่ละอิลลิเมนต์จากระบบสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยที่สอดคล้องกับปัญหานั้น แล้วจึงรวมสมการจากแต่ละอิลลิเมนต์นี้เข้าด้วยกันก่อให้เกิดระบบสมการรวมขนาดใหญ่ของระบบซึ่งอธิบายสถานะโดยรวมของปัญหา จากนั้นจึงประยุกต์เงื่อนไขขอบเขตของปัญหาที่กำหนดให้ก่อนแก้ระบบสมการขนาดใหญ่นี้ เพื่อหาผลเฉลยโดยประมาณตามจุดต่อต่างๆ ทุกทั้งโดเมนของปัญหาต่อไป ขั้นตอนสุดท้ายคือ กระบวนการขั้นท้าย (Post-processor) เนื่องจากผลเฉลยโดยประมาณล้วนอยู่ในรูปแบบของตัวเลขในแต่ละจุดต่อ เพื่อให้เกิดความเข้าใจได้ง่าย สามารถแสดงได้ในหลายรูปแบบ เช่น การแสดงด้วยชั้นสีต่างๆ ผลคำตอบที่ได้สามารถอธิบายถึงปัญหาที่มีรูปร่างที่ซับซ้อนและยากต่อการทดลอง

### ฟังก์ชันการประมาณภายในอิลลิเมนต์

การวิเคราะห์โครงสร้างด้วยวิธีไฟไนท์อิลลิเมนต์นั้นจะต้องแบ่งโครงสร้างออกเป็นอิลลิเมนต์ย่อย และจะต้องสมมติฟังก์ชันการกระจัดโดยการประมาณของแต่ละอิลลิเมนต์ ที่จะประกอบเข้าด้วยกันเป็นโครงสร้างรวมการกระจัดโดยประมาณที่สมมติขึ้น ฟังก์ชันการกระจัดที่นิยมใช้กันทั่วไป จะเป็นฟังก์ชันพอลิโนเมียลในกรณีของปัญหาสามมิติ

$$\begin{aligned} u(x, y, z) &= a_1 + a_2x + a_3y + a_4z + a_5zx + \dots + a_mx^n \\ v(x, y, z) &= a_{m+1} + a_{m+2}x + a_{m+3}y + a_{m+4}z + a_{m+5}zx + \dots + a_{2m}z^n \\ w(x, y, z) &= a_{2m+1} + a_{2m+2}x + a_{2m+3}y + a_{2m+4}z + a_{2m+5}zx + \dots + a_{3m}z^n \end{aligned} \quad (2-1)$$

ซึ่ง  $u, v$  และ  $w$  คือส่วนประกอบของการกระจัดทิศทางในทิศทาง  $x, y, z$  ตามลำดับ และ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$m = \sum_{i=1}^{n+1} i(n+2-i) \quad (2-2)$$

พอลิโนเมียลที่มีหลายเทอมหรือกำลังสูงๆ จะให้การกระจัดที่สมมติขึ้นมีค่าใกล้เคียงกับผลเฉลยแม่นยำมากยิ่งขึ้น แต่การแก้สมการค่อนข้างทำได้ยาก อย่างไรก็ตามการที่จะเลือกใช้ฟังก์ชันพอลิโนเมียลกำลังเท่าไรนั้น จะขึ้นอยู่กับลักษณะของปัญหาและความละเอียดของผลเฉลยที่ต้องการ เช่น ในกรณีของปัญหามิติเดียว ฟังก์ชันพอลิโนเมียลกำลังสองสามเทอมจะให้ผลเฉลยดีกว่าฟังก์ชันพอลิโนเมียลเทอมเดียวและสองเทอม

ฟังก์ชันการกระจัดของอีลลิเมนต์เชิงซ้อน จะประกอบด้วยพอลิโนเมียลที่มีเทอมค่าคงตัว เทอมเชิงเส้น เทอมกำลังสาม กำลังสาม และเทอมที่มีกำลังสูงกว่านั้นเท่าที่จำเป็น รูปร่างของอีลลิเมนต์กรณีของปัญหามิติเดียว อีลลิเมนต์เชิงซ้อนจะประกอบด้วย 2 จุดต่อภายนอกและจุดต่อ ภายในอย่างน้อย 1 จุดต่อ ฟังก์ชันเชิงซ้อนของปัญหา 3 มิติ จะมีรูปร่างแบบสามเหลี่ยมทรงสี่หน้าที่ประกอบด้วย 10 จุดต่อ จากสมการที่ 2-1 ฟังก์ชันพอลิโนเมียลสำหรับอีลลิเมนต์สามเหลี่ยมทรงสี่หน้าเชิงซ้อนกำลังสองคือ

$$\begin{aligned} u(x, y, z) &= a_1 + a_2x + a_3y + a_4z + a_5xy + a_6yz + a_7xz + a_8x^2 + a_9y^2 + a_{10}z^2 \\ v(x, y, z) &= a_{11} + a_{12}x + a_{13}y + a_{14}z + a_{15}xy + a_{16}yz + a_{17}xz + a_{18}x^2 + a_{19}y^2 + a_{20}z^2 \end{aligned} \quad (2-3)$$

$$w(x, y, z) = a_{21} + a_{22}x + a_{23}y + a_{24}z + a_{25}xy + a_{26}yz + a_{27}xz + a_{28}x^2 + a_{29}y^2 + a_{30}z^2$$

### สมการเชิงอนุพันธ์

ความสมดุลของของแข็งที่มีการยึดหยุ่นได้ในสามมิติดังแสดงในรูปที่ 2.2 สามารถเขียนให้อยู่ในรูปของสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} + F_x &= 0 \\ \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} + F_y &= 0 \\ \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} + F_z &= 0 \end{aligned} \quad (2-4)$$

โดย  $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$  แทนความเค้นในแนวแกน  $x, y, z$  ตามลำดับ และ  $\tau_{xy}, \tau_{yx}, \tau_{xy}$  แทนความเค้นเฉือน  $F_x, F_y, F_z$  แทนแรงวัตถุ (Body force) ในแนวแกน  $x, y, z$  ตามลำดับตลอดผิวรอบนอกของของแข็งดังแสดงในรูปที่ 2.2 อาจประกอบด้วยเงื่อนไขขอบเขตหลายๆ ชนิด อาทิเช่น การกำหนดเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระยะเคลื่อนตัวบนผิวบางส่วนในขณะที่ผิวส่วนอื่นๆ อาจมีการกำหนดเงื่อนไขของความเค้นที่ผิว (Surface traction) ในรูปแบบทั่วไปคือ

$$\vec{T} = T_x \hat{i} + T_y \hat{j} + T_z \hat{k} \quad (2-5)$$

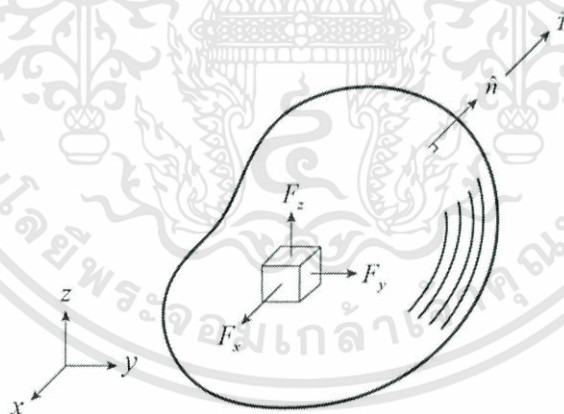
โดย  $T_x, T_y, T_z$  แทนความเค้นที่ผิวในทิศทาง  $x, y, z$  ตามลำดับซึ่งสามารถเขียนให้อยู่ในรูปแบบของความเค้นย่อยต่างๆ ได้ดังนี้

$$\begin{Bmatrix} T_x \\ T_y \\ T_z \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{xy} & \sigma_y & \tau_{yz} \\ \tau_{xz} & \tau_{yz} & \sigma_z \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} n_x \\ n_y \\ n_z \end{Bmatrix} \quad (2-6)$$

โดย  $n_x, n_y, n_z$  เป็นทิศทางโคไซน์ (Direction cosines) ของเวกเตอร์

$$\hat{n} = n_x \hat{i} + n_y \hat{j} + n_z \hat{k} \quad (2-7)$$

ซึ่งเป็นเวกเตอร์ที่ตั้งฉากกับผิว ณ จุดที่กำลังพิจารณาอยู่นั้น



รูปที่ 2.2 ความสมดุลตามตำแหน่งใดๆ ในของแข็ง 3 มิติ [7]

นอกจากเงื่อนไขของเขตที่ผิวเหล่านี้แล้ว ของแข็งในสามมิติในรูป 2.2 อาจมีความเครียดขั้นต้น (Prestrain) ที่เกิดขึ้นอยู่ก่อน ทำให้ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด โดยทั่วไปคือ

$$\{\sigma\} = [C]\{\varepsilon - \varepsilon_0\} \quad (2-8)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดย

$$\{\sigma\}^T = [\sigma_x \quad \sigma_y \quad \sigma_z \quad \tau_{xy} \quad \tau_{yz} \quad \tau_{xz}] \quad (2-9)$$

$$\{\varepsilon\}^T = [\varepsilon_x \quad \varepsilon_y \quad \varepsilon_z \quad \gamma_{xy} \quad \gamma_{yz} \quad \gamma_{xz}] \quad (2-10)$$

$$[C] = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} 1-\nu & \nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & 1-\nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & \nu & 1-\nu & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & (1-2\nu)/2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & (1-2\nu)/2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & (1-2\nu)/2 \end{bmatrix} \quad (2-11)$$

เมทริกซ์  $[C]$  เรียกว่าเมทริกซ์แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียด และ  $\{\varepsilon_0\}$  แทนเวกเตอร์ของความเครียดเริ่มต้นซึ่งอาจเกิดมาจากหลายสาเหตุ เช่น อาจเกิดจากอุณหภูมิหรือจากกรณีที่โครงสร้างนั้นมีความเครียดอยู่ก่อนแล้ว และอาจอยู่ในภาวะสมดุลก่อนที่จะมีแรงภายนอกมากระทำ ในโครงงานนี้จะทำการวิเคราะห์โดยไม่พิจารณาความเครียดเริ่มต้นที่เกิดกับโครงสร้างสะพาน โดยจะพิจารณาโครงสร้างสะพานสมดุลก่อนที่จะมีแรงภายนอกมากระทำ

### สมการไฟไนท์เอลิเมนต์

สมการไฟไนท์เอลิเมนต์อยู่ในรูปแบบของสมการที่ประกอบด้วยค่าการเคลื่อนตัวซึ่งไม่รู้ค่าที่จุดต่อ นั่นคือ เราจะสมมติการกระจัดการเคลื่อนตัวของบิลลิเมนต์เป็นฟังก์ชันการกระจัดเชิงซ้อนในสามทิศทางและค่าการเคลื่อนตัว ณ ตำแหน่งจุดต่อทั้งสิบจุดดังแสดงในสมการ 2-12 ได้ดังนี้

$$\begin{aligned} u(x, y, z) &= [N(x, y, z)]\{u\} \\ v(x, y, z) &= [N(x, y, z)]\{v\} \\ w(x, y, z) &= [N(x, y, z)]\{w\} \end{aligned} \quad (2-12)$$

หรือเขียนรวมกันในลักษณะการกระจายของผลเฉลยโดยประมาณให้อยู่ในรูปของค่าที่จุดต่อของบิลลิเมนต์ทรงสี่หน้า 10 จุดต่อได้ว่า

$$\{\bar{\delta}\} = [N_i(x, y, z)]\{\delta\} \quad (2-13)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ  $N_i, i=1, \dots, 10$  คือฟังก์ชันการประมาณภายในโดย  $[\delta] = [u \ v \ w]$

$$[\delta] = [u_1 \ v_1 \ w_1 \ u_2 \ v_2 \ w_2 \ \dots \ u_{10} \ v_{10} \ w_{10}] \quad (2-14)$$

เวกเตอร์ของความเครียดดังแสดงในสมการที่ 2.10 สามารถเขียนให้อยู่ในรูปของค่าการเคลื่อนตัวได้คือ

$$\{\varepsilon\} = \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ \gamma_{xy} \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{xz} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \frac{\partial u}{\partial x} \\ \frac{\partial v}{\partial y} \\ \frac{\partial w}{\partial z} \\ \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \\ \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \\ \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \end{Bmatrix} = [B(x, y, z)] \{\delta\} \quad (2-15)$$

โดย  $[B(x, y, z)] \{\delta\}$  แทนเมทริกซ์ความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดและการเคลื่อนตัวหากแทนสมการ 2-13 และ 2-15 ลงในสมการของพลังงานรวม จะได้

$$J = \frac{1}{2} \int_V [\delta] [B]^T [C] [B] \{\delta\} dV - \int_V [\delta] [B]^T [C] \{\varepsilon_0\} dV + \frac{1}{2} \int_V \{\varepsilon_0\} [C] \{\varepsilon_0\} dV - \int_V [\delta] [N]^T dV - \int_S [\delta] [N]^T \{T\} dS \quad (2-16)$$

หรือเขียนย่อได้ว่า

$$J = \frac{1}{2} [\delta] [K] \{\delta\} - [\delta] \{F_0\} + \frac{1}{2} \int_V \{\varepsilon_0\} [C] \{\varepsilon_0\} dV - [\delta] \{F_B\} - [\delta] \{F_T\} \quad (2-17)$$

โดย

$$[K] = \int_V [B]^T [C] [B] dV \quad (2-18)$$

$$\{F_0\} = \int_V [B]^T [C] \{\varepsilon_0\} dV \quad (2-19)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\{F_B\} = \int_V [N]^T [F] \{\varepsilon_0\} dV \quad (2-20)$$

$$\{F_I\} = \int_S [N]^T \{T\} ds \quad (2-21)$$

ในที่นี้เมทริกซ์  $[K]$  คืออิลลิเมนต์สทิพเนสเมทริกซ์  $\{F_0\}, \{F_B\}, \{F_I\}$  คือโหนดเวกเตอร์ เนื่องจากความเค้นต้น แรงของวัตถุ และแรงที่ผิวตามลำดับ จากสมการที่ 2-17 สามารถสร้างสมการ ไฟไนท์อิลลิเมนต์จากการหาค่าต่ำสุดของพลังงานศักย์รวมดังสมการ 2-18 ซึ่งจะก่อให้เกิดสมการ ไฟไนท์อิลลิเมนต์รวม ค่าอนุพันธ์ที่เกิดจากพจน์ของที่เกี่ยวข้องกับความเครียดขั้นต้น  $\varepsilon_0$  ของสมการ 2-18 มีค่าเท่ากับศูนย์เนื่องจากพจน์ดังกล่าวไม่เป็นฟังก์ชันของค่าเคลื่อนตัว สามารถเขียนให้อยู่ในรูปของสมการเมทริกซ์ ดังนี้

$$[K] \{\delta\} = \{F_0\} + \{F_B\} + \{F_I\} \quad (2-22)$$

หลังจากประกอบสมการไฟไนท์อิลลิเมนต์จากทุกๆ อิลลิเมนต์ขึ้นเป็นระบบสมการรวมของโครงสร้างสามมิตินั้น แล้วทำการกำหนดเงื่อนไขขอบเขตและแก้ระบบสมการรวม เพื่อหาผลลัพธ์ของค่าเคลื่อนตัวที่ทุกๆ จุดต่อได้แล้ว สามารถหาค่าความเค้นในทิศทางต่างๆ ได้ต่อไป

## 2.4 ทฤษฎีความเสียหายสำหรับวัสดุเหนียว

การประเมินผลที่ได้จากการวิเคราะห์หรือการตีความผลลัพธ์ที่ได้เพื่อการวิเคราะห์ผลจากการจำลองโครงสร้างสะพานนั้นมีส่วนที่เสียหายบริเวณใดของโครงสร้าง จำเป็นต้องทราบถึงทฤษฎีความเสียหายของวัสดุเพื่อนำมาตีความวิเคราะห์ความเสียหายของโครงสร้างสะพาน จึงได้มีการตั้งสมมติฐานโดยการพิจารณาโครงสร้างของวัสดุ และมีการจำแนกวัสดุตามพฤติกรรม ความยืดหยุ่นของวัสดุออกเป็นวัสดุเหนียวและวัสดุเปราะ

วัสดุจะมีความยืดหยุ่นก็ต่อเมื่อวัสดุนั้นมีการกลับคืนรูปทรง หรือมีความยาวเท่ากับความยาวเริ่มต้น เมื่อแรงที่กระทำต่อวัสดุถูกปลดออกไปแล้ว พฤติกรรมความยืดหยุ่นนี้จะ เกิดขึ้นในขณะที่ความเค้นยังเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเครียด หรือพูดได้ว่าวัสดุจะมี ความยืดหยุ่นเชิงเส้น (Linear Elastic) ถ้าความเค้นมีมากเกินขีดจำกัดของสัดส่วน (Proportional Limit) วัสดุจะยังมีการตอบสนองต่อความยืดหยุ่น แต่จะก่อให้เกิดการเพิ่มขึ้นของความเครียดอย่างต่อเนื่อง เมื่อเพิ่มความเค้นอย่างต่อเนื่องจนกระทั่งถึงขีดจำกัดของความยืดหยุ่น (Elastic Limit) ซึ่งเป็นจุดสุดท้ายที่เมื่อนำแรงภายนอกออกแล้ววัสดุจะกลับมามีขนาดเท่าเดิม

การเพิ่มความเค้นขึ้นอีกเพียงเล็กน้อย จะทำให้ขีดจำกัดของความยืดหยุ่นมีค่าต่ำลง และส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างอย่างถาวร พฤติกรรมนี้เรียกว่า การคราก (Yielding) ความเค้นที่ก่อให้เกิดการครากเรียกว่า ความเค้นคราก หรือจุดคราก (Yield Stress or Yield Point) -  $\sigma_y$  เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความเค้น ณ จุดนี้ถือเป็นหลักในการออกแบบโดยทั่วไป ซึ่งการเปลี่ยนแปลงรูปร่างที่เกิดขึ้นนี้เรียกว่า การเปลี่ยนแปลงรูปร่างอย่างถาวร หรือการเปลี่ยนแปลงรูปร่างแบบพลาสติก (Plastic Deformation) สำหรับวัสดุที่ไม่มีจุดคราก เช่น เหล็กหล่อ ซึ่งถือว่าเป็นวัสดุเปราะ ก็อาจใช้ความต้านแรงดึง (Ultimate Stress) -  $\sigma_u$  เป็นหลักในการออกแบบวัสดุใดๆ ที่ถูกแรงกระทำแล้วเกิดความเครียดที่มีค่ามากๆ ก่อนที่จะเกิดการแตกหัก เรียกว่า วัสดุเหนียว เช่น เหล็กเหนียว โดยทั่วไปวิศวกรจะเลือกวัสดุเหนียวในการออกแบบ เนื่องจากวัสดุสามารถดูดซับพลังงานหรือแรงที่เกิดขึ้นอย่างฉับพลันได้ และถ้าวัสดุถูกกระทำด้วยแรงมากเกินไป จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างไปอย่างมากก่อนที่จะเกิดการแตกหัก

### ทฤษฎีความเค้นเฉือนสูงสุด

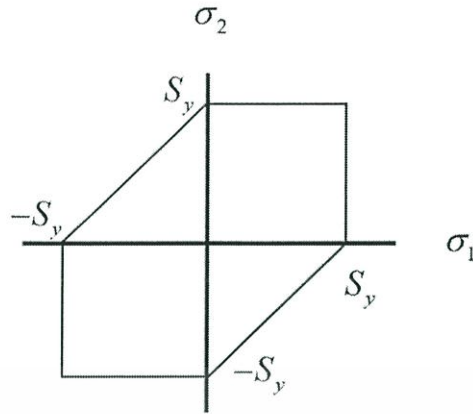
ทฤษฎีความเค้นเฉือนสูงสุด นี้กำหนดให้ใช้เกณฑ์การพิจารณาการครากของวัสดุเหนียวซึ่งมีสาเหตุมาจากการเกิดระนาบสลิป (Slip plane) ภายใต้การดึงทดสอบชิ้นงานที่ทำมาจากวัสดุชนิดเดียวกัน ทฤษฎีนี้กล่าวว่า ความเสียหายอันเกิดจากการครากจะเริ่มขึ้นเมื่อความเค้นเฉือน สูงสุดภายในเนื้อวัสดุภายใต้การกระทำทั่วไปนั้น เท่ากับความเค้นเฉือนสูงสุดซึ่งเกิดขึ้นบนระนาบสลิปของชิ้นทดสอบที่ทำจากวัสดุชนิดเดียวกันภายใต้การดึงทดสอบจนถึงจุดครากของวัสดุดังกล่าว สำหรับการทดสอบแรงดึงความเค้นเฉือนสูงสุดจะเกิดขึ้นบนระนาบที่ทำมุม 45 องศา กับ ระนาบของการดึงความเค้นเฉือนสูงสุดที่จุดครากจะมีค่า  $\tau_{\max} = S_y/2$  สำหรับสภาวะความเค้น ใน 3 มิติ ความเค้นเฉือนสูงสุดจะมีค่าเท่ากับ  $\tau_{\max} = (\sigma_{\max} - \sigma_{\min})/2$  ดังนั้น สำหรับสภาวะความเค้นโดยทั่วไปจะได้

$$\tau_{\max} = \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{2} \geq \frac{S_y}{2} \quad (2-23)$$

สมการนี้บอกให้ทราบว่าความต้านทานแรงครากในการเฉือนมีค่าดังนี้

$$\tau_{\max} = 0.5S_y \quad (2-24)$$

สำหรับสภาวะของความเค้นของวัสดุหนึ่งๆ สามารถวิเคราะห์โดยกำหนดให้ ความเค้นหลักในระนาบใดระนาบหนึ่งมีค่าเท่ากับศูนย์ เมื่อพล็อตลงบนกราฟดังแสดงในรูปที่ 2.3 ตามทฤษฎีความเค้นเฉือนสูงสุดจะกำหนดบริเวณที่ไม่ได้รับความเสียหายไว้ภายในบริเวณพื้นที่รูปหกเหลี่ยมของเทรסקา (Henri Edouard Tresca) ถ้าออกแบบให้สภาวะของความเค้นอยู่ในบริเวณพื้นที่รูปหกเหลี่ยมดังกล่าว ชิ้นส่วนนั้นจะไม่ได้ได้รับความเสียหายเนื่องจากการคราก



รูปที่ 2.3 ความเสียหายของวัสดุตามทฤษฎีของเทรסקา [7]

พิจารณาความเป็นไปได้ในกรณีของการเกิดความเค้นหลักดังต่อไปนี้

กรณีที่ 1 ถ้า  $\sigma_1 > \sigma_2 > 0$  และ  $\sigma_3 = 0$  (ในที่นี้  $\sigma_{\max} = \sigma_1$  และ  $\sigma_{\min} = \sigma_3$ ) ความเสียหายจะเกิดขึ้นกับวัสดุเมื่อ  $\sigma_1 - 0 = \sigma_1 = S_y$

กรณีที่ 2 ถ้า  $\sigma_1 > 0 > \sigma_2$  ความเสียหายจะเกิดขึ้นกับวัสดุเมื่อ  $\sigma_1 - \sigma_2 = S_y$

กรณีที่ 3 ถ้า  $\sigma_2 < \sigma_1 < 0$  ความเสียหายจะเกิดขึ้นกับวัสดุเมื่อ  $\sigma_2 = S_y$

จะเห็นได้ว่าการพิจารณาความเสียหายนั้นจะตั้งอยู่บนพื้นฐานการทำนายตามทฤษฎีความเค้นเฉือนสูงสุด การสร้างเส้นขอบเขตบนพื้นที่รูปหกเหลี่ยมของเทรסקาจะพิจารณาจากการเกิดความเค้นหลักทั้ง 3 กรณีข้างต้นนั่นเอง ส่วนกรณีที่วัสดุอยู่ภายใต้สภาวะของความเค้นเฉือนอย่างเดียว เช่น เพลที่รับทอร์คอย่างเดียว ความเค้นเฉือนสูงสุดตามทฤษฎีความเค้นเฉือนสูงสุดพิจารณาจาก

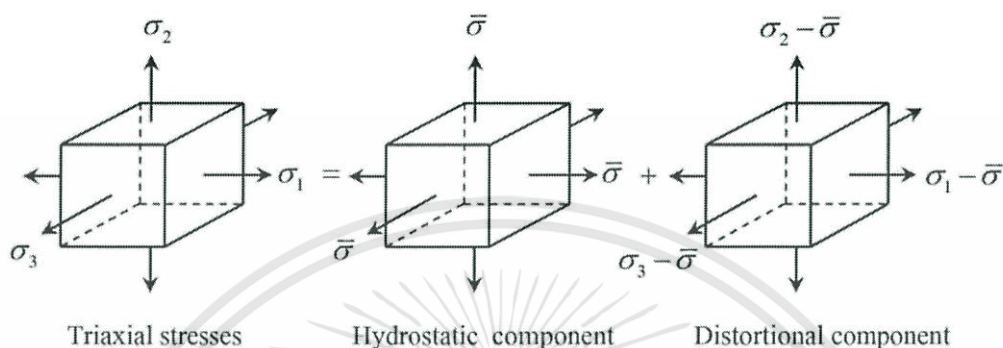
$$\tau_{\max} = \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} = \frac{1}{2} \left[ \frac{\sigma_y}{2} - \left( \frac{-\sigma_y}{2} \right) \right] = \frac{S_y}{2} \quad (2-25)$$

### ทฤษฎีพลังงานของการเปลี่ยนรูปสูงสุด

ทฤษฎีพลังงานของการเปลี่ยนรูปสูงสุดใช้เกณฑ์พิจารณาความเสียหายของวัสดุบนพื้นฐานของพลังงานของการเปลี่ยนรูป (Distortion energy) ก็คือการพิจารณาจากพลังงานอันเป็นผลมาจากการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของวัสดุนั้นเกณฑ์กำหนดความเสียหายนี้เป็นที่รู้จักกันดีและมีชื่อเรียกว่าทฤษฎีวอนมิสเสส เรียกชื่อตามของนักคณิตศาสตร์ประยุกต์ชื่อ Richard Von Mises ทฤษฎีนี้อาศัยผลจากการทดสอบวัสดุภายใต้ความเค้นที่กระทำต่อวัสดุทุกทิศทาง ความเค้นครากที่ได้จะมีค่ามากกว่าความเค้นครากที่ได้จากการดึงทดสอบอย่างง่ายในทฤษฎีความเค้นเฉือนสูงสุด โดยพลังงานของการเปลี่ยนรูปของวัสดุนี้จะคำนึงถึงการเปลี่ยนรูปเชิงเส้นและเชิงมุมไปพร้อมๆ กัน พลังงานที่เกิดจากการเปลี่ยนรูปของวัสดุเหนียว โดยทฤษฎีนี้กล่าวว่า วัสดุจะเริ่มครากเมื่อพลังงานของการเปลี่ยน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปต่อหน่วยปริมาตรของชิ้นงานที่อยู่ภายใต้ความเค้นรวมมีค่า มากกว่าหรือเท่ากับพลังงานของการเปลี่ยนรูปเนื่องจากการครากที่เกิดขึ้นในการทดสอบด้วยการดึงอย่างง่าย ในการพัฒนาสมการสำหรับทฤษฎีนี้ ให้พิจารณาพลังงานของการเปลี่ยนรูปในชิ้นส่วน รูปทรงสี่เหลี่ยมลูกบาศก์เล็กๆ ที่อยู่ภายใต้ความเค้นใน 3 มิติ  $\sigma_1$  ,  $\sigma_2$  และ  $\sigma_3$



รูปที่ 2.4 สถานะของความเครียด [7]

ดังนั้นชิ้นส่วน Hydrostatic เทอมนี้เกิดความเค้นที่เท่ากันทุกทิศทางทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงปริมาตรโดยการขยายตัวแต่ไม่มีการบิดเบือนรูปร่างเชิงมุมไปจากเดิม จึงไม่ทำให้เกิดการคราก และชิ้นส่วน Distortional ส่วนนี้ไม่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงปริมาตรแต่ทำให้เกิดการเปลี่ยนรูปเนื่องจากความเค้นเฉือนและเกิดการคราก พลังงานความเครียดต่อหน่วยปริมาตรภายใต้ความเค้นใน 3 มิติ

$$u = \frac{1}{2}(\sigma_1 \varepsilon_1 + \sigma_2 \varepsilon_2 + \sigma_3 \varepsilon_3) \quad (2-26)$$

จากความสัมพันธ์ของความเค้น ความเครียด และอัตราส่วนปัวซอง

$$\begin{aligned} \varepsilon_x &= \frac{\sigma_x}{E} - \nu \frac{\sigma_y}{E} - \nu \frac{\sigma_z}{E} \\ \varepsilon_y &= -\nu \frac{\sigma_x}{E} + \frac{\sigma_y}{E} - \nu \frac{\sigma_z}{E} \\ \varepsilon_z &= -\nu \frac{\sigma_x}{E} - \nu \frac{\sigma_y}{E} + \frac{\sigma_z}{E} \end{aligned} \quad (2-27)$$

เมื่อแทนสมการ Total elastic energy ในสมการพลังงานความเครียด และจัดรูปใหม่จะได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$u = \frac{1}{2E}[\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 - 2\nu(\sigma_1\sigma_2 + \sigma_2\sigma_3 + \sigma_3\sigma_1)] \quad (2-28)$$

พลังงานความเครียดที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงปริมาตร  $u_v$  ส่วน Hydrostatic จะถือว่า  $\bar{\sigma}$  เป็นองค์ประกอบของ  $\sigma_1, \sigma_2$  และ  $\sigma_3$  องค์ประกอบนี้ก็จะสามารถนำไปลบออกจากเทอมของพลังงานรวม ซึ่งจะต้ององค์ประกอบที่อยู่ภายใต้การเปลี่ยนรูปร่างเชิงมุมโดยที่ปริมาตรไม่มีการเปลี่ยนแปลง  $\bar{\sigma} = (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)/3$  สามารถแทน  $\bar{\sigma}$  สำหรับ  $\sigma_1, \sigma_2$  และ  $\sigma_3$  ในสมการที่ (2-28) ซึ่งจะได้

$$u_v = \frac{3\bar{\sigma}^2}{2E}(1-2\nu) = \frac{1-2\nu}{6E}(\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 - 2\sigma_1\sigma_2 + 2\sigma_2\sigma_3 + 2\sigma_3\sigma_1) \quad (2-29)$$

ดังนั้นสามารถหาพลังงานของการเปลี่ยนรูปได้จากการนำสมการ 2-29 ไปลบออกจากสมการ 2-28 จะได้

$$u_d = u - u_v = \frac{1+\nu}{3E}[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2] \quad (2-30)$$

พลังงานการเปลี่ยนรูปมีค่าเท่ากับศูนย์เมื่อ  $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$  สำหรับการทดสอบแรงดึงอย่างง่ายที่จุดคราก  $\sigma_1 = S_y$  และ  $\sigma_2 = \sigma_3 = 0$  ดังนั้นพลังงานของการเปลี่ยนรูปจะมีค่า เท่ากับ

$$u_d = \frac{1+\nu}{3E} S_y^2 \quad (2-31)$$

ดังนั้นสำหรับสภาวะความเค้นในสมการที่ 2-30 จะทำให้สามารถทำนายจุดครากของชิ้นงานได้ถ้าสมการที่ 2-30 มีค่ามากกว่าหรือเท่ากับสมการที่ 2-31 ซึ่งจะได้

$$\left[ \frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}{2} \right]^{1/2} \geq S_y \quad (2-32)$$

ในการทดสอบแรงดึงอย่างง่าย จะเกิดความเค้นครากของชิ้นงานจะเกิดขึ้นเมื่อ  $\sigma \geq S_y$  ดังนั้นเทอมทางซ้ายของสมการ 2-32 จะเป็นค่าความเค้นที่มีผลต่อพลังงานของการเปลี่ยนรูป (Effective Stress) ซึ่งนิยมเรียกว่า “Von Mises Stress” ตามชื่อของนักคิดค้นทฤษฎีนี้ โดยใช้สัญลักษณ์  $\sigma_{VM}$  และสามารถเขียนสมการที่ 2-34 ได้เป็น

$$\sigma_{VM} \geq S_y \quad (2-33)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

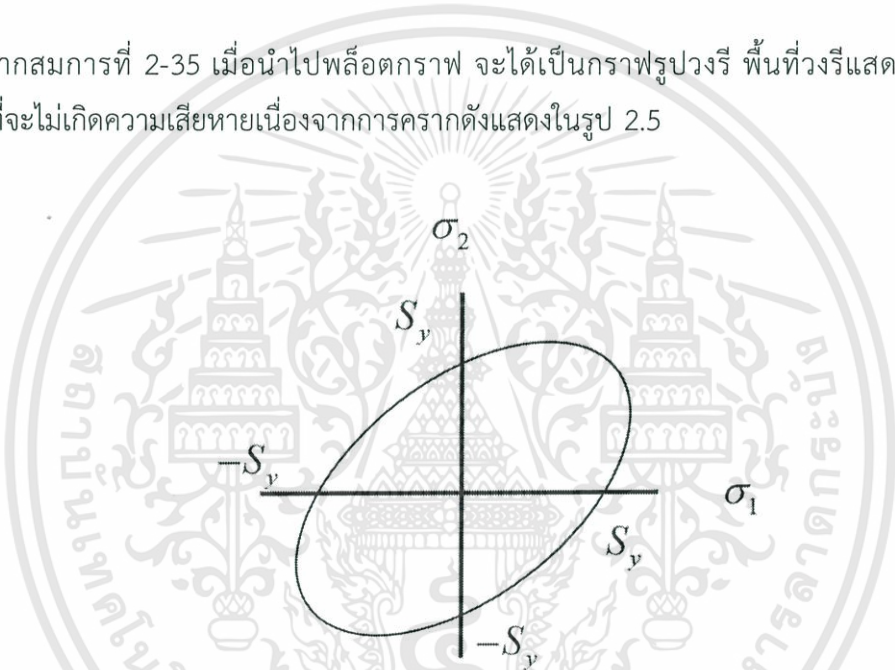
$$\text{เมื่อ } \sigma_{VM} = \left[ \frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}{2} \right]^{1/2}$$

(2-34)

สำหรับความเค้นในระนาบ ความเค้นหลักซึ่งมีค่าไม่เท่ากับศูนย์ ดังนั้น

$$\sigma_{VM} = (\sigma_1^2 + \sigma_1\sigma_2 + \sigma_2^2)^{1/2} \quad (2-35)$$

จากสมการที่ 2-35 เมื่อนำไปพล็อตกราฟ จะได้เป็นกราฟรูปวงรี พื้นที่วงรีแสดงถึงย่านปลอดภัยที่จะไม่เกิดความเสียหายเนื่องจากการครากดังแสดงในรูป 2.5



รูปที่ 2.5 ความเสียหายของวัสดุตามทฤษฎีของวอนมิสเสส[8]

การใช้ข้อค้ประกอบของความเค้นใน 3 มิติ  $x, y, z$  จะสามารถเขียน Von Mises Stress ได้ดังนี้

$$\sigma_{VM} = \frac{1}{\sqrt{2}} \left[ (\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 + 6(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2) \right]^{1/2} \quad (2-36)$$

กรณีชิ้นส่วนโครงสร้างที่รับความเค้นเฉือนกระทำอย่างเดียวกวกลมของมอร์ พบว่า  $\tau = \tau_{\max}$ ,  $\sigma_1 = \tau_{\max}$  และ  $\sigma_2 = -\tau_{\max}$  ความเค้นของวอนมิสเสสคำนวณได้จาก

$$\sigma_{VM} = \sqrt{3\tau_{\max}^2} = \sqrt{3}\tau_{\max} \quad (2-37)$$

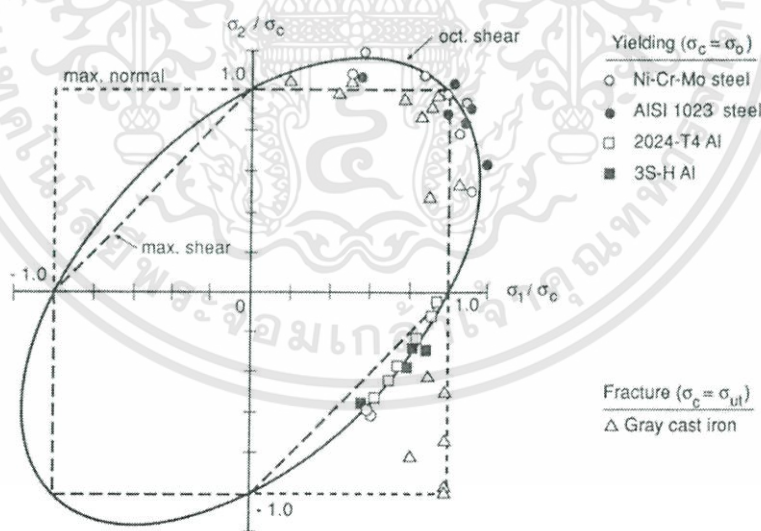
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความเสียหายอันเกิดจากการครากจะเกิดเมื่อ

$$\sigma_{VM} = \sqrt{3}\tau_{\max} = S_y \quad \text{หรือ} \quad \tau_{\max} = 0.577S_y \quad (2-38)$$

### บทสรุปความเสียหายสำหรับวัสดุเหนียว

จากการศึกษาทฤษฎีความเสียหายสำหรับวัสดุที่มีพฤติกรรมความยืดหยุ่นเป็นวัสดุเหนียว ทำให้วิศวกรผู้ออกแบบสามารถเลือกใช้ทฤษฎีต่างๆ ตามความเหมาะสมเพื่อประเมินความเสียหาย และความเสียหายในบางจุดที่แสดงในรูปที่ 2.6 จะช่วยให้วิศวกรผู้ออกแบบตัดสินใจได้อย่างถูกต้อง จากรูปแสดงให้เห็นว่าทั้งทฤษฎีความเค้นเฉือนสูงสุดและทฤษฎีพลังงานของการเปลี่ยนรูปเป็นทฤษฎีที่สามารถยอมรับได้ในการออกแบบและวิเคราะห์ความเสียหายที่จะเกิดในชิ้นงานที่มีพฤติกรรมความยืดหยุ่นเป็นวัสดุเหนียว นอกจากนั้นทฤษฎีพลังงานของการเปลี่ยนรูปยังสามารถทำนายผลการครากของชิ้นงานได้ดีในทุกสภาวะความเค้น จึงมีขอบเขตสูงกว่าการใช้ทฤษฎีความเค้นเฉือนสูงสุด ซึ่งจะให้ผลการออกแบบที่น่าเชื่อถือมากกว่าสำหรับวัสดุเหนียวที่มีความต้านแรงดึงคราก  $S_{yc}$  แตกต่างจากความต้านแรงกดคราก  $S_{yc}$  ที่มีทฤษฎีของมอร์ริสในรูปแบบต่างๆ ให้เลือกใช้ อย่างไรก็ตามทฤษฎีนี้ จะต้องการผลการทดสอบชิ้นงานอย่างง่าย 3 ประการ คือ การทดสอบแรงดึง การทดสอบแรงกด และการทดสอบแรงเฉือน เพื่อนำมากำหนด เส้นขอบเขตของความเสียหาย



รูปที่ 2.6 การเปรียบเทียบทฤษฎีความเสียหายกับการทดลอง [9]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปจะพบว่าผลการทดสอบวัสดุมีค่าที่สอดคล้องกับเทียบกับทฤษฎี ความเสียหาย และสำหรับโลหะประเภทเหล็กเหนียวซึ่งเป็นวัสดุเหนียว ทฤษฎีพลังงานของการเปลี่ยนรูป (ทฤษฎีวอนมิสเซล) จะให้ค่าที่เหมาะสมและใกล้เคียงกับความเป็นจริงในขณะที่ ทฤษฎีความเค้นเฉือนสูงสุด (ทฤษฎีของเทรסקา) จะให้ค่าเป็นเชิงอนุรักษ์มากกว่าคือกำหนดการครากไว้ต่ำกว่า

## 2.5 การหาค่าเหมาะสมที่สุด

สำหรับในการปัญหาการหาค่าเหมาะสมสุด (Optimization) ในที่นี้คือการหาค่าต่ำสุด (Minimization) ซึ่งปัญหาต่างๆ ไปสามารถเขียนได้ดังนี้

$$\min_x f(x) \quad (2-39)$$

Subject to

$$g_i(x) \leq 0$$

$$h_j(x) = 0$$

$$x' \leq x \leq x''$$

เมื่อ

$x$  คือตัวแปรออกแบบ

$f(x)$  คือฟังก์ชันเป้าหมาย (Objective function)

$g_i(x)$  คือเงื่อนไขบังคับแบบอสมการ

$h_j(x)$  คือเงื่อนไขบังคับแบบสมการ

$x'$  คือ ขอบเขตล่างของการออกแบบ

และ

$x''$  คือ ขอบเขตบนของการออกแบบ

สำหรับการหาโพลีโอยที่เหมาะสมที่สุดของโครงสร้าง พิจารณาจากรูปที่ 2.7 ซึ่งเป็นโดเมนการออกแบบเริ่มต้นของโครงสร้างที่มีเงื่อนไขเพิ่มเติม คือต้องการให้โครงสร้างรับภาระและมีจุดรองรับตามต้องการในโดเมนการออกแบบอาจมีช่องว่างหรือพื้นที่ที่ไม่อนุญาตให้เกิดการเปลี่ยนแปลง ดังรูป ปัญหาการออกแบบทางโพลีโอยคือโครงสร้างควรมีรูปร่างเป็นอย่างไรภายใต้โดเมนการออกแบบที่กำหนดให้เพื่อให้ได้ค่าฟังก์ชันเป้าหมายเหมาะสมที่สุดและสอดคล้องกับเงื่อนไขบังคับเนื่องจากเป็นปัญหาการออกแบบที่ประยุกต์ใช้ในวงเริ่มต้นของกระบวนการออกแบบ ค่าเงื่อนไขบังคับในการออกแบบ (หรือเกณฑ์การออกแบบ) เช่น ความเค้นหรือการล้าสามารถตัดออกได้ ปัญหาการหาโพลีโอยที่เหมาะสมที่สุดของโครงสร้างที่นิยมใช้กันคือ

$$\min_{\rho} F(\rho) \quad (2-40)$$

Subject to

$$m(\rho) = r \cdot m_0$$

$$0 < \rho_{\min} \leq \rho \leq \rho_{\max}$$

เมื่อ  $\rho$  คือ ตัวแปรออกแบบทางโทโปโลยีซึ่งเป็นค่าพารามิเตอร์ที่ บ่งบอกถึงค่า  
โครงสร้างเบื้องต้นของโครงสร้าง

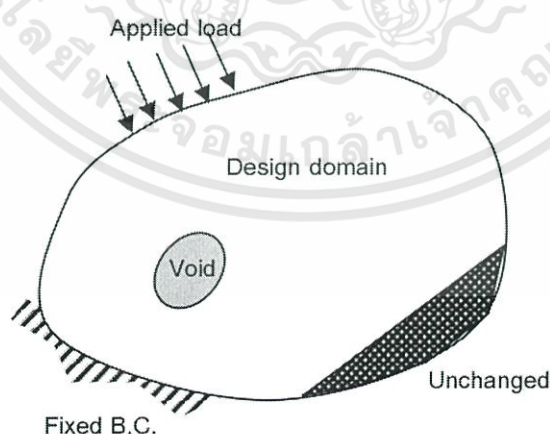
$\rho_{\max}$  และ  $\rho_{\min}$  คือ ขอบเขตล่างและบนของตัวแปรออกแบบตามลำดับ

$m$  คือ มวลของโครงสร้างที่  $\rho$  ใดๆ

$m_0$  คือ มวลทั้งหมดของโครงสร้างเริ่มต้น

$r$  คือ อัตราส่วนการลดน้ำหนักของโครงสร้างเทียบกับน้ำหนัก

การออกแบบอาจกล่าวได้ว่าการหาโทโปโลยีที่เหมาะสมที่สุดคือศิลปะการประยุกต์ใช้เนื้อวัสดุที่มีจำกัดเพื่อบรรลุเป้าหมายเหมาะสมที่สุด โดยการประยุกต์ใช้วิธีไฟไนท์เอเลเมนต์เมื่อโดเมนการออกแบบถูกแบ่งออกเป็นอีลีเมนต์เล็กๆ ตัวแปรออกแบบคือความหนาแน่นของอีลีเมนต์เหล่านั้น นั่นหมายความว่าเมื่อได้รับผลเฉลยที่เหมาะสมแล้วอีลีเมนต์ที่มีความหนาแน่นใกล้เคียงขอบเขตล่างของตัวแปรออกแบบจะเกิดเป็นช่องว่างบนโครงสร้างส่วนอีลีเมนต์ที่มีความหนาแน่นใกล้เคียงกับขอบเขตบนของตัวแปรออกแบบจะเกิดเป็นเนื้อวัสดุบนวิวิหาคาเหมาะสมที่สุดที่นิยมใช้คือวิธีเกณฑ์ความเหมาะสมที่สุด (Optimality Criteria Method, OCM)



รูปที่ 2.7 การหาโทโปโลยีที่เหมาะสมที่สุด[6]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การออกแบบโทโพโลยีของโครงสร้างที่นิยมคือการหาค่าความแข็งเชิงสถิตของโครงสร้างสูงสุด (Static stiffness maximization) ซึ่งสามารถปรับเปลี่ยนให้เป็นการหาค่าความอ่อนตัวของโครงสร้างต่ำสุด (Structural compliance minimization) ฟังก์ชันเป้าหมายสามารถแสดงได้ดังนี้

$$c(\rho) = U^T K U = \sum_{e=1}^N \rho_e u_e^T K_e u_e \quad (2-41)$$

เมื่อ  $U$  คือ เวกเตอร์การกระจัดของโครงสร้าง

$K$  คือ เมตริกขสททิพเนสของโครงสร้าง

$u_e$  คือ เวกเตอร์การกระจัดของจุดต่อ (nodes) ของอีเลเมนต์ที่  $e$

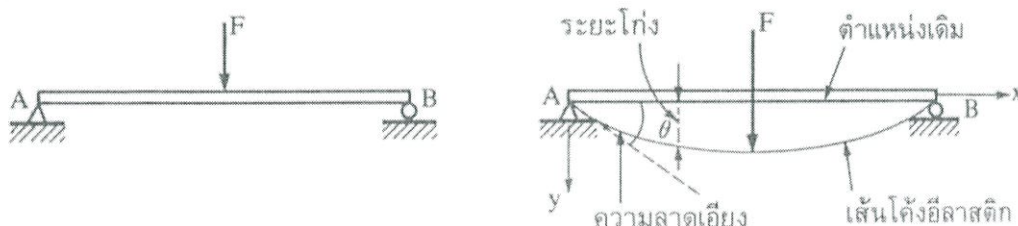
$K_e$  คือ เมตริกขสททิพเนสของอีเลเมนต์ที่  $e$

## 2.6 การโก่งของคาน

คานเป็นส่วนหนึ่งของโครงสร้างที่ทำหน้าที่รับโมเมนต์ดัดและแรงเฉือน ซึ่งเกิดจากแรงภายนอกที่กระทำหรือน้ำหนักบรรทุกทุกบนคานนั้น เมื่อคานได้รับน้ำหนัก หรือแรงภายนอกกระทำ คานก็จะเกิดการแอ่นลงหรือโก่งงอทำให้คานไม่อยู่ในแนวตรงเหมือนตอนแรกที่ยังไม่ได้รับน้ำหนัก ฉะนั้นในการคำนวณและออกแบบคานที่รับน้ำหนักจะต้องคำนึงถึงการโก่งของคานด้วย นอกเหนือไปจากความเค้นดัด และความเค้นเฉือนที่เกิดขึ้นในคานตามปกติ

เส้นโค้งอีลาสติก (Elastic curve) เป็นเส้นที่อยู่บนแนวแกนสะเทินของคาน ซึ่งแสดงลักษณะการโก่งของคานเมื่อมีแรงภายนอกหรือน้ำหนักบรรทุกกระทำอยู่บนคาน ในขณะที่คานยังไม่มีแรงภายนอกหรือน้ำหนักมากระทำบนคาน เส้นโค้ง อีลาสติกนี้เป็นเส้นตรง และอยู่ในแนวเดียวกันกับแนวของแกนสะเทิน และเมื่อคานรับแรงภายนอกหรือน้ำหนักบรรทุกทุกขึ้น เส้นโค้ง อีลาสติกนี้ก็จะแอ่นหรือโก่งไปจากตำแหน่งเดิม ลักษณะของการโก่งของคานนี้ขึ้นอยู่กับค่าของโมเมนต์ดัดที่เกิดขึ้นในคานนั้น

ระยะโก่ง (Deflection) หรือการแอ่นของคานจุดใดๆ หมายถึงระยะในแนวตั้งที่จุดนั้นบนเส้นโค้งอีลาสติกที่เคลื่อนที่ไปจากตำแหน่งเดิม



รูปที่ 2.8 อธิบายการโก่งตัวของคาน [10]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าโมเมนต์ดัดและความโค้งของระนาบสะเทินจะแปรผันกับสะเทินจะผันแปรจากหน้าตัดหนึ่งไปยังหน้าตัดหนึ่ง จะได้ว่า

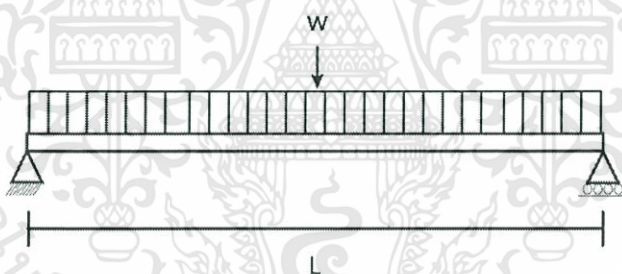
$$\frac{1}{\rho} = \frac{M(x)}{EI} \quad (2.42)$$

ค่า  $EI$  คือความแข็งเชิงดัด (Flexural Rigidity) ดังนั้นการหาระยะโค้งสูงสุดสามารถหาได้จาก

$$\frac{d^2y}{dx^2} = \frac{M(x)}{EI} \quad (2.43)$$

ในการหาผลเฉลยการโค้งของคานานั้นมีหลายวิธี แต่ในหัวข้อนี้จะยกตัวอย่างการโค้งของคานอย่างง่ายที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์ทดสอบโปรแกรม ซึ่งมีการพิสูจน์สมการมาเรียบร้อยแล้วสามารถศึกษาเพิ่มเติมได้ที่ [8]

### 1. คานที่มีหน้าตัดคงที่และรับแรงสม่ำเสมอ



รูปที่ 2.9 คานที่มีหน้าตัดคงที่และรับแรงสม่ำเสมอ [8]

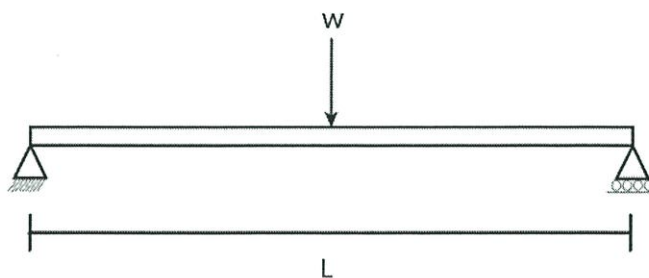
มีค่าโมเมนต์ดัดสูงที่สุดที่กึ่งกลางของคาน และมีระยะโค้งสูงสุด ดังสมการที่ 2.44 และ 2.45 ตามลำดับ

$$M_{\max} = \frac{1}{8} wL^2 \quad (2.44)$$

$$|y|_{\max} = \frac{5wL^4}{384EI} \quad (2.45)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2. คานที่มีหน้าตัดคงที่และรับน้ำหนักที่จุดกึ่งกลาง



รูปที่ 2.10 คานที่มีหน้าตัดคงที่และรับแรงที่จุดกึ่งกลาง [8]

มีค่าโมเมนต์ดัดสูงสุดที่กึ่งกลางของคาน และมีระยะโก่งสูงสุด ดังสมการที่ 2.46 และ 2.47 ตามลำดับ

$$M_{\max} = \frac{wL}{4} \quad (2.46)$$

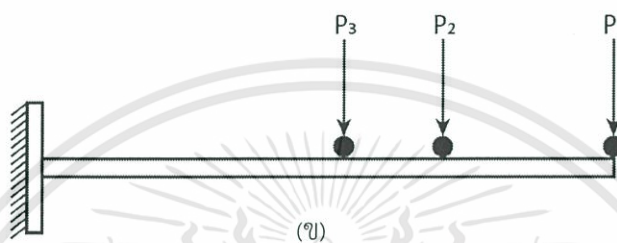
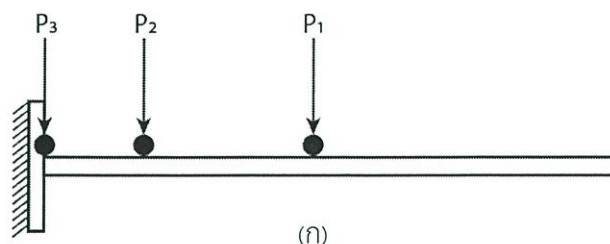
$$|y|_{\max} = \frac{PL^4}{48EI} \quad (2.47)$$

### 2.7 ค่าที่มากที่สุดของแนวเส้นแรงอิทธิพลที่เกิดจากแรงกระทำแบบชุดของรถบรรทุกจร

การวิเคราะห์ความแข็งแรงที่เกิดขึ้นในงานวิจัยนี้เป็นการวิเคราะห์แบบสถิตศาสตร์ แต่ในความเป็นจริงนั้นรถบรรทุกจะเคลื่อนที่ผ่านสะพาน ดังนั้นจำเป็นต้องต้องทราบว่าผลตอบสนองของโครงสร้างสูงสุดเกิดขึ้นที่ใดและต้องวางภาระกรรมอย่างไร ซึ่งสามารถทำได้โดยการประยุกต์ใช้แนวแรงอิทธิพลเข้ามาช่วยพิจารณา

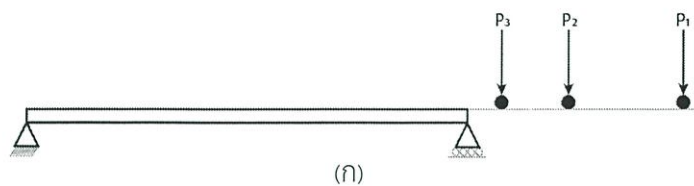
พิจารณาคานยื่น (Cantilever Beam) ใช้น้ำหนักบรรทุกทุกรูปที่ 2.11 จะสังเกตว่าหากวางน้ำหนักบรรทุกห่างจากฐานรองรับจากฐานรองรับยึดแน่นมากเท่าใด โมเมนต์ดัดที่ฐานรองรับแบบยึดแน่นจะมากขึ้นตามและมีค่าสูงสุดเมื่อน้ำหนักบรรทุกอยู่ที่ปลายของคานยื่นดังรูป 2.11(ข) และจะทำให้เกิดค่าโมเมนต์ดัดสูงสุดที่แท้จริงด้วย

และเมื่อพิจารณาคานช่วงเดียวธรรมดา (Simply Supported Beam) ใช้น้ำหนักบรรทุกทุกรูปที่ 2.12 จะสังเกตว่าหากวางน้ำหนักบรรทุกใกล้ฐานรองรับมากเท่าใด จะทำให้เกิดค่าแรงเฉือนมากขึ้นเท่านั้น ถ้าวางน้ำหนักบรรทุกใกล้ฐานรองรับมากที่สุดใกล้ฐานรองรับ จะทำให้เกิดค่าแรงเฉือนสูงสุดซึ่งเป็นค่าแรงเฉือนที่แท้จริงด้วย จะเห็นได้ว่าสามารถวางน้ำหนักบรรทุกใกล้ฐานใดก็ได้

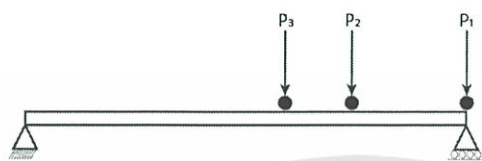


รูปที่ 2.11 การหาผลตอบสนองของคานายื่นที่รับกลุ่มน้ำหนักบรรทุก [10]

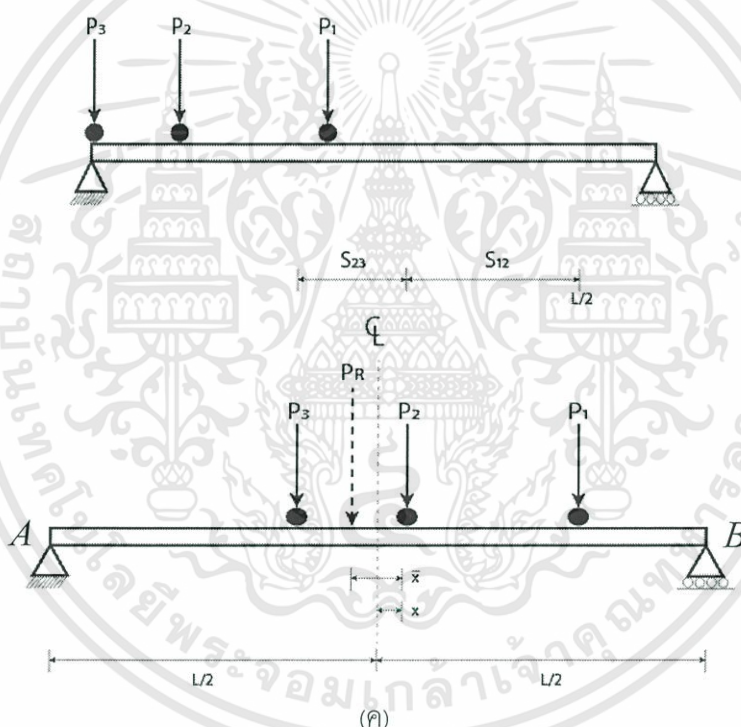
อย่างไรก็ตามการหาค่าของโมเมนต์ดัดสูงสุดที่แท้จริงของคานช่วงเดียวธรรมดาที่รับกลุ่มน้ำหนักบรรทุกแบบจุดไม่สามารถพิจารณาได้ง่ายเหมือนอย่างแรงเฉือน สำหรับการหาตำแหน่งที่เกิดโมเมนต์ดัดสูงสุดและรูปแบบการวางน้ำหนักบรรทุกจากการพิจารณารูปที่ 2.12(ค) แสดงคานช่วงเดียวธรรมดารับกลุ่มน้ำหนักบรรทุก  $P_1$ ,  $P_2$  และ  $P_3$  เนื่องจากคานรับน้ำหนักกระทำแบบจุด แผนภาพของแรงเฉือน จำเป็นเส้นตรงเท่านั้นและค่าโมเมนต์ดัดสูงสุดที่แท้จริงจะเกิดที่ตำแหน่งของน้ำหนักบรรทุก (เพลาล้อ) อันใดอันหนึ่ง ในที่นี้สมมติว่าค่าโมเมนต์ดัดสูงสุดที่แท้จริงเกิดที่ตำแหน่งน้ำหนักบรรทุกล้อที่เพลลาที่ 2 กำหนดให้แรงลัพธ์ของทั้งสามมีค่าเท่ากับ  $P_R$  ( $P_R = P_1 + P_2 + P_3$ ) โดยแรงลัพธ์  $P_R$  อยู่ห่างจากน้ำหนักบรรทุกเพลลาที่ 2 เท่ากับ  $\bar{x}$  และ  $P_2$  อยู่ห่างจากแนวกึ่งกลางคานเท่ากับ  $x$  ดังนั้น  $P_R$  จะอยู่ห่างจากแนวกึ่งกลางคานเท่ากับ  $\bar{x} - x$



(ก)



(ข)



(ค)

รูปที่ 2.12 การหาผลตอบสนองของคานช่วงเดียวธรรมดาที่รับกลุ่มน้ำหนักบรรทุก [9]

พิจารณาโดยใช้สมการสมดุลเพื่อหาแรงปฏิกิริยาที่จุด A

$$\sum M_B = 0 ; \text{ ทวนเข็มนาฬิกา (+)}$$

$$-R_{Ay}(L) + P_R \left( \frac{L}{2} + x \right) + P_3 s_{23} = 0$$

$$R_{Ay} = P_R \left( \frac{1}{2} + \frac{\bar{x}}{L} + \frac{x}{L} \right)$$

(2-48)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจากสมมติไว้ว่าค่าโมเมนต์ดัดสูงสุดที่แท้จริงเกิดที่ตำแหน่งน้ำหนักรบรรทุกที่ 2 ดังนั้นจึงต้องหาค่าโมเมนต์ดัดที่จุดนี้โดยพิจารณา FBD ด้านซ้าย

$$\sum M_2 = 0 ; \text{ ทวนเข็มนาฬิกา (+)}$$

$$M_2 - R_{Ay} \left( \frac{L}{2} + x \right) + P_3 s_{23} = 0$$

$$M_2 = P_R \left( \frac{1}{2} + \frac{\bar{x}}{L} + \frac{\bar{x}}{L} \right) \left( \frac{L}{2} \right) - P_3 s_{23}$$

$$= P_R \left( \frac{L}{4} + \frac{\bar{x}}{2} + \frac{x\bar{x}}{L} - \frac{x^2}{L} \right) - P_3 s_{23} \quad (2-49)$$

เพื่อต้องการทราบค่าโมเมนต์ดัดสูงสุดที่แท้จริงเกิดขึ้นที่ตำแหน่งใด จะต้องหาอนุพันธ์ของฟังก์ชัน  $M_2$  เทียบกับตัวแปร  $x$  แล้วให้เท่ากับศูนย์จะได้ค่าของระยะ  $x$  ตามต้องการ

$$\frac{dM_2}{dx} = P_R \left( \frac{\bar{x}}{L} + \frac{2x}{L} \right) = 0 \quad (2-50)$$

$$\text{ดังนั้น } x = \frac{\bar{x}}{2} \quad (2-51)$$

สรุปได้ว่าคานช่วงเดียวธรรมดาที่รับกลุ่มน้ำหนักบรรทุก ค่าโมเมนต์ดัดสูงสุดที่แท้จริงเกิดขึ้นเมื่อครึ่งหนึ่งของระยะระหว่างน้ำหนักบรรทุกที่พิจารณากับแนวของแรงลัพธ์ของกลุ่มน้ำหนักบรรทุกทั้งหมดที่อยู่บนคานอยู่ตรงกับแนวกึ่งกลางพอดี จะสังเกตเห็นว่าแรงลัพธ์ของกลุ่มน้ำหนักบรรทุกจะอยู่ระหว่างน้ำหนักบรรทุก 2 จุด ดังนั้นต้องพิจารณาระยะระหว่างล้อยที่พิจารณากับแนวของแรงลัพธ์ 2 ครั้ง แล้วตรวจสอบว่าค่าที่ได้จากกรณีใดให้ค่าสูงสุด แต่โดยทั่วไปค่าโมเมนต์ดัดสูงสุดที่แท้จริงมักจะเกิดขึ้นที่ใกล้กับน้ำหนักบรรทุกที่ใกล้แนวแรงลัพธ์มากที่สุด

## 2.8 พลศาสตร์การเคลื่อนที่ของมวลติดต่อกัน 2 มิติ

ระบบกลไก เครื่องจักรกล หุ่นยนต์ หรือ รถยนต์ จะประกอบด้วยชิ้นส่วนต่างๆหลายชิ้นมาต่อเข้าด้วยกันเป็นระบบมวลติดต่อกันโดยมีข้อต่อและแรงกระทำที่แตกต่างกันด้วย บ่อยครั้งที่ข้อต่อจะเป็นตัวควบคุมทิศทางการเคลื่อนที่และการเคลื่อนที่ของส่วนประกอบนั้นๆ การใช้ข้อต่อและแรงกระทำในระบบมวลติดต่อกันจะถูกออกแบบในระบบที่ธรรมดาหรือการออกแบบให้ใช้ในระบบที่ค่อนข้างซับซ้อนขึ้นอยู่กับการออกแบบชนิดของข้อต่อด้วยออกแบบระบบเพื่อให้เกิดความเข้าใจในระบบมวลติดต่อกันจึงจำเป็นต้องเรียนรู้การเคลื่อนที่ของส่วนประกอบต่างๆในระบบ ข้อต่อทางกล (Mechanical

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Joint) โดยทั่วไปจะออกแบบให้ใช้ในลักษณะเฉพาะ ในแต่ละแบบก็จะออกแบบให้มีลักษณะโครงสร้างแตกต่างกันไปตามวัตถุประสงค์ชิ้นส่วนในระบบกลไกไม่สามารถเคลื่อนที่ได้อิสระเพราะว่าชิ้นส่วนนั้นมีการเชื่อมต่อของข้อต่อ ข้อต่อทางกลจะถูกนำมาใช้เพื่อให้การเคลื่อนที่มีทิศทางที่แน่นอน ข้อต่อจะลดจำนวนความอิสระในการเคลื่อนที่ในระบบซึ่งจะทำให้ไม่สามารถเคลื่อนที่ได้บางทิศทาง

### 2.8.1 สมการการเชื่อมต่อ

ระบบกลไกจะประกอบไปด้วยวัตถุที่มาเชื่อมต่อกันด้วยข้อต่อ จุดประสงค์ของข้อต่อคือ ส่งถ่ายการเคลื่อนที่จากวัตถุหนึ่งตามความสัมพันธ์ของข้อต่อ ซึ่งสามารถแสดงเป็นสมการของข้อต่อในแต่ละแบบได้ โดยข้อต่อในแต่ละแบบจะบอกได้ถึงความอิสระในการเคลื่อนที่ (Degree of Freedom หรือ DOF) ได้

### 2.8.2 สมการการเชื่อมต่อ 2 มิติ

ความสัมพันธ์ของข้อต่อสามารถแสดงได้ทางสมการคณิตศาสตร์ รูปแบบสมการจะขึ้นอยู่กับพารามิเตอร์และความสัมพันธ์ซึ่งจะใช้ในการอธิบายการเคลื่อนที่ของระบบ แสดงการเคลื่อนที่ของวัตถุ  $i$  และ  $j$  ใน 2 มิติ ซึ่งต่อกันโดยข้อต่อแบบหมุน (Revolute joint) จุดต่อคือ จุด  $p$  โดยถ้าอ้างอิงวัตถุ  $i$  จะแสดงจุด  $p$  ได้เป็น  $p^i$  และถ้าอ้างอิง วัตถุ  $j$  จะแสดงได้เป็น  $p^j$  ซึ่งก็คือจุดเดียวกัน ดังนั้น สามารถแสดงสมการได้เป็น

$$\vec{r}_p^i = \vec{r}_p^j \quad (2.52)$$

เมื่อ  $\vec{r}_p^i$  คือ เวกเตอร์แสดงตำแหน่งอ้างอิงของจุด  $p^i$  และ  $\vec{r}_p^j$  คือ เวกเตอร์แสดงตำแหน่งอ้างอิงของจุด  $p^j$  จากความสัมพันธ์ของสมการที่ 2.52 จะทำให้ความสัมพันธ์แบบการเคลื่อนของวัตถุ 2 ชิ้นนี้ถูกกำจัดออกไปซึ่งจะเหลือเพียงความสัมพันธ์แบบหมุนเท่านั้นดังนั้นการวิเคราะห์ข้อต่อแบบหมุนใน 2 มิติจะเหลือความเป็นอิสระในการเคลื่อนที่เพียงแค่ 1 เท่านั้น อีกตัวอย่างของข้อต่อแบบ 2 มิติคือข้อต่อแบบเลื่อน (Translation joint หรือ Prismatic joint) ในกรณีนี้ข้อต่อจะมีเพียงความสัมพันธ์ของวัตถุ  $i$  และ  $j$  ในแบบการเคลื่อนตามแนวแกน ซึ่งจะมี 2 สมการแสดงความสัมพันธ์ของวัตถุ 2 ชิ้นคือ วัตถุ 2 ชิ้นจะไม่มีความสัมพันธ์แบบหมุนระหว่างกันและกันและไม่มีความสัมพันธ์ของการเลื่อนระหว่าง 2 วัตถุในแนวตั้งฉากกันจาก 2 เงื่อนไขดังกล่าวสามารถแสดงสมการได้ดังต่อไปนี้

$$\theta^i - \theta^j = c \quad (2.53)$$

$$\vec{h}^{i^T} \vec{r}_p^{ij} = 0 \quad (2.54)$$

เมื่อ  $\theta^i$  และ  $\theta^j$  คือการหมุนของวัตถุ  $i$  และ  $j$  ตามลำดับ  $c$  คือ ค่าคงที่  $\vec{r}_p^{ij}$  คือเวกเตอร์เชื่อมต่อบนแนวแกน ระหว่าง จุด  $p^i$  และ  $p^j$  บนวัตถุ  $i$  และ  $j$  ตามลำดับ และ  $\vec{h}^i$  คือ เวกเตอร์บนวัตถุที่ตั้งฉากกับแนวแกนของข้อต่อ



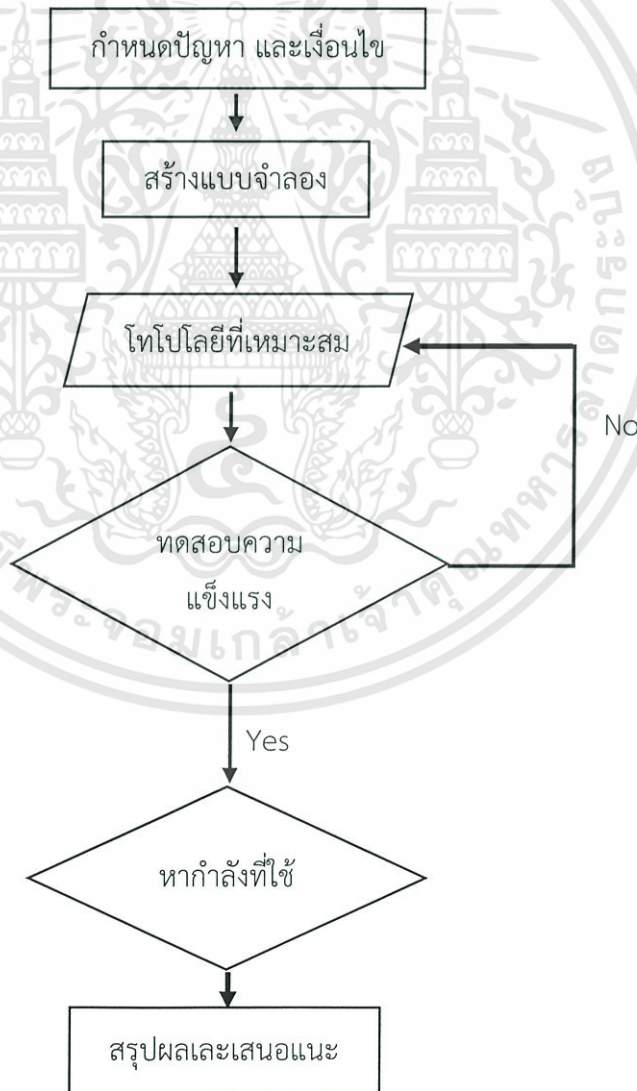
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 3

## วิธีดำเนินการวิจัย

### 3.1 บทนำ

งานวิจัยนี้เป็นการวิเคราะห์โครงสร้างสะพานของรถวางสะพาน เพื่อหาแนวทางในการลดขนาดของมวลซึ่งจะส่งผลกับการใช้กำลังงานของเครื่องวางสะพาน โดยมุ่งเน้นไปที่การศึกษาการออกแบบเชิงโทโปโลยีที่เหมาะสมของคานหลักในโครงสร้าง ขั้นตอนการดำเนินงานประกอบไปด้วยการสร้างแบบจำลอง 3 มิติ ขอโครงสร้างสะพาน กระบวนการออกแบบชิ้นส่วนด้วยการหาโทโปโลยีที่เหมาะสม การวิเคราะห์ความแข็งแรงของโครงสร้าง และการจำลองการเคลื่อนที่ของการเก็บสะพาน ซึ่งขั้นตอนทั้งหมดของงานวิจัยนี้แสดงดังรูปที่ 3.1

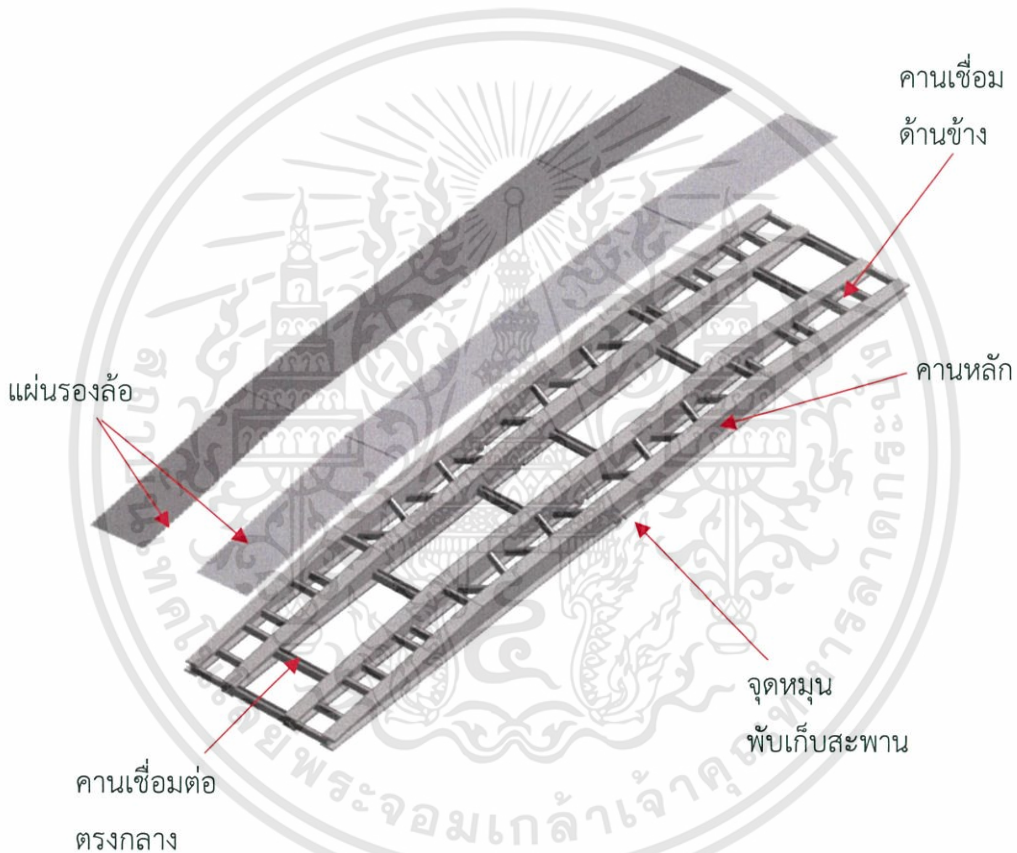


รูปที่ 3.1 แผนภาพแสดงขั้นตอนการดำเนินงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2 แบบจำลอง 3 มิติ ของโครงสร้างสะพาน

การสร้างแบบจำลอง 3 มิติ ของโครงสร้างสะพานเป็นสิ่งแรกที่ได้ดำเนินการ เนื่องจากแบบจำลองดังกล่าวจะถูกนำไปวิเคราะห์ในขั้นตอนถัดไป คือ กระบวนการออกแบบชิ้นส่วนด้วยการหาโทโพโลยีที่เหมาะสม การวิเคราะห์ความแข็งแรงของโครงสร้าง และการจำลองการเคลื่อนที่ของการเก็บสะพาน ซึ่งโครงสร้างที่วางนี้ถูกขึ้นรูปตามขนาดจริงที่ได้รับมาจากกรมทหารช่างที่ 21 ราชนาวิกโยธิน ซึ่งโครงสร้างที่วางนี้ถูกขึ้นรูปตามขนาดจริงที่ได้รับมาจากกรมทหารช่างที่ 21 ราชนาวิกโยธิน ดังแสดงในรูปที่ 3.2 ที่แสดงการระบุชื่อเรียกของแต่ละองค์ประกอบของโครงสร้างสะพาน ประกอบด้วยองค์ประกอบหลัก 5 ส่วนได้แก่ คานหลัก คานเชื่อมต่อด้านข้าง คานเชื่อมต่อตรงกลาง จุดหมุนพับเก็บสะพาน และแผ่นรองล้อ

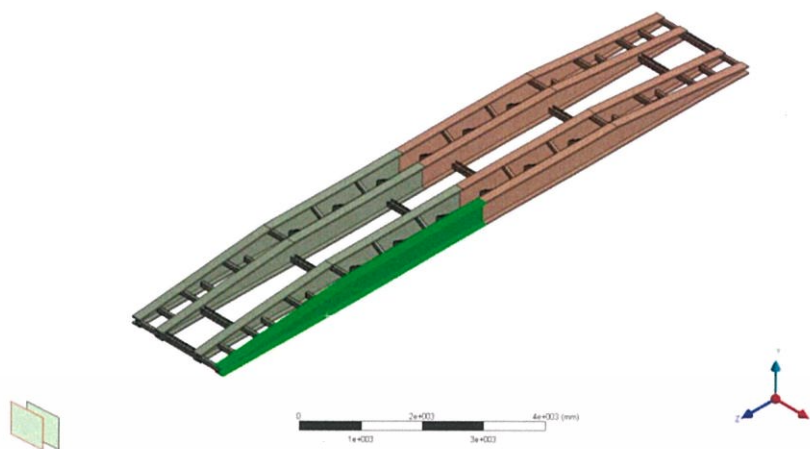


รูปที่ 3.2 ชิ้นส่วนต่างๆของสะพาน

### 3.3 กระบวนการออกแบบชิ้นส่วนด้วยการหาโทโพโลยีที่เหมาะสม

ในปริญญานิพนธ์นี้ได้นำชิ้นงานตัวอย่างของชิ้นส่วนสะพานมาเป็นแบบสาริตกระบวนการออกแบบด้วยการหาโทโพโลยีที่เหมาะสม นั่นคือคานหลักของโครงสร้างสะพาน โดยหน้าที่ของชิ้นส่วนนี้คือการรับภาระกรรมหลักจากน้ำหนักบรรทุกทุกที่กระทำต่อโครงสร้างสะพาน ดังรูปที่ 3.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.3 คานหลักของโครงสร้างสะพาน (สี่เหลี่ยมอ่อน)

สมมติให้ชิ้นนี้ส่วนนี้ได้รับภาระกรรมจากน้ำหนักของรถบรรทุกที่ใช้ทดสอบความแข็งแรง สะพานโดยรถบรรทุกทดสอบนั้นมีน้ำหนักรวม 25 ตัน การออกแบบชิ้นส่วนนี้ในทางปฏิบัติต้องคำนึงถึงเกณฑ์การออกแบบหลายอย่าง เช่น เงื่อนไขเชิงสถิติชิ้นส่วนไม่เกิดการเสียหายจากแรงสถิติที่กระทำ เงื่อนไขทางพลวัตโครงสร้างต้องไม่เกิดการกระชากทำงาน อายุการล้าจะต้องสูงพอ เป็นต้น สำหรับการออกแบบนี้ผู้ออกแบบได้ศึกษาเพียงเงื่อนไขเชิงสถิติเท่านั้น และได้จะสมมติว่ายังไม่รู้มาก่อนว่า ชิ้นส่วนนั้นควรจะปรับปรุงรูปร่างอย่างไรให้เหมาะสมกับแรงสถิติที่กระทำ ดังนั้นจึงเริ่มต้นด้วยการหาโทโปโลยีที่เหมาะสมสุด (หรือ เรียกว่าเค้าโครงเบื้องต้น) การหาโทโปโลยีหรือโครงสร้างของชิ้นส่วนในรูปที่ 3.4 ซึ่งในที่นี้พิจารณาให้เป็นคานยื่น (Cantilever Beam) ที่รับน้ำหนักตรงปลายคานแสดงดังรูป (การตั้งเงื่อนไขในลักษณะนี้เพื่อสะดวกในการประยุกต์แรงกระทำบนโครงสร้าง)

**B: Static Structural**  
 Force  
 Time: 1. s  
 31/5/2560 1:29

Force: 30656 N  
 Components: 0,-30656,0. N



รูปที่ 3.4 คานยื่นที่ใช้พิจารณา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับเงื่อนไขการออกแบบ กำหนดให้ฟังก์ชันเป้าหมายคือ “ผลรวมของค่าความอ่อนตัว” (Compliance) จากกรณีของแรงกระทำ และเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการเปลี่ยนสำหรับบริเวณที่เป็นจุดต่อและจุดรองรับ ผู้ออกแบบได้กำหนดพื้นที่ยกเว้น (Exclusion region) ดังแสดงในรูปที่ 3.5 (พื้นที่สีแดง) ซึ่งมีตัวแปรออกแบบคือค่าความหนาแน่นเสมือน (Pseudo-density) และการเปลี่ยนแปลงค่าของตัวแปรออกแบบส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงค่าโมดูลัสของยังในอีเลเมนต์นั้นๆ นอกจากนี้ยังกำหนดได้กำหนดเปอร์เซ็นต์การรักษามวลไว้ที่ 60 %

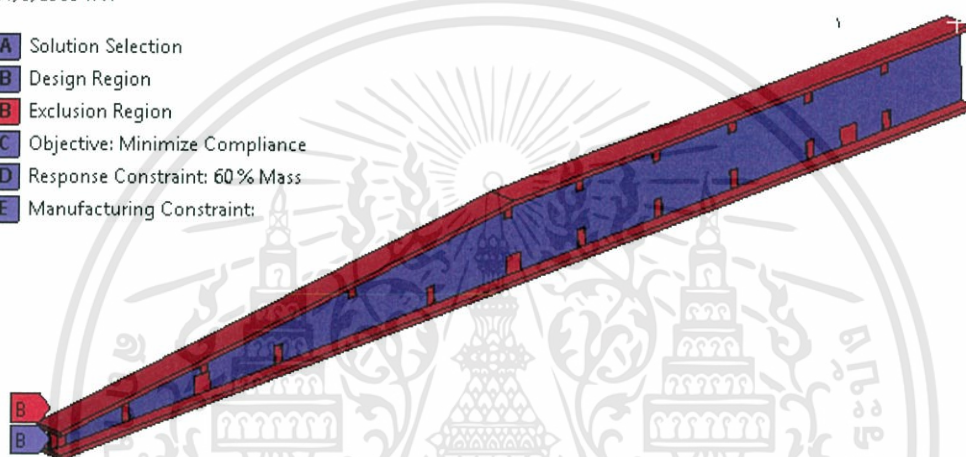
#### C: Topology Optimization

Topology Optimization

Iteration Number: N/A

31/5/2560 1:41

- A Solution Selection
- B Design Region
- B Exclusion Region
- C Objective: Minimize Compliance
- D Response Constraint: 60% Mass
- E Manufacturing Constraint:



รูปที่ 3.5 แสดงโดเมนในการออกแบบ

### 3.4 การวิเคราะห์ความแข็งแรงของโครงสร้าง

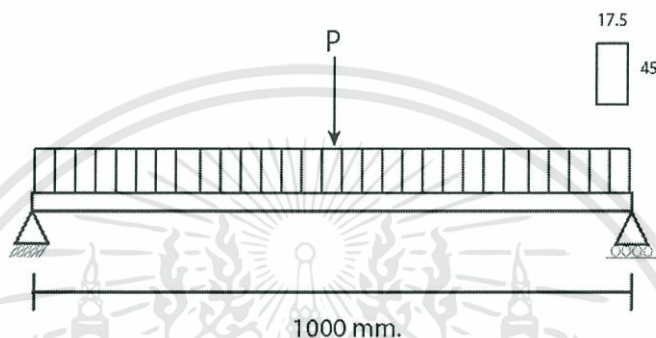
การวิเคราะห์ความแข็งแรงของโครงสร้างสะพาน จะประยุกต์ใช้ทฤษฎีวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เข้ามาช่วยในการหาผลเฉลยเนื่องโครงสร้างนั้นมีความซับซ้อนซึ่งเป็นอุปสรรคในการหาผลเฉลยด้วยวิธีแมนตรง จะทำการโดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป ANSYS 18.0 มาใช้ในการวิเคราะห์ความแข็งแรงของโครงสร้างสะพาน ซึ่งจะวัดจากค่าความเค้นวอนมิสเซสสูงสุดที่เกิดขึ้นภายใต้แรงกระทำ เนื่องจากการใช้แบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ในการวิเคราะห์จะให้ผลเฉลยออกมาเป็นเชิงตัวเลขและสามารถตีความหมายของค่านั้นๆ ออกมาเป็นสิ่งที่อยากทราบเพื่อวิเคราะห์ความเสียหายของโครงสร้างหรือค่าอื่นตามที่ต้องการ แต่อย่างไรก็ตามในการวิเคราะห์ทางไฟไนต์เอลิเมนต์จำเป็นต้องมีค่านวนด้วยทฤษฎี (วิธีแมนตรง) ควบคู่ไปด้วย เพื่อทดสอบความถูกต้องของโปรแกรมแล้วจึงทำการกำหนดเงื่อนไขในการวิเคราะห์โครงสร้างของสะพานต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.4.1 การทดสอบโปรแกรม

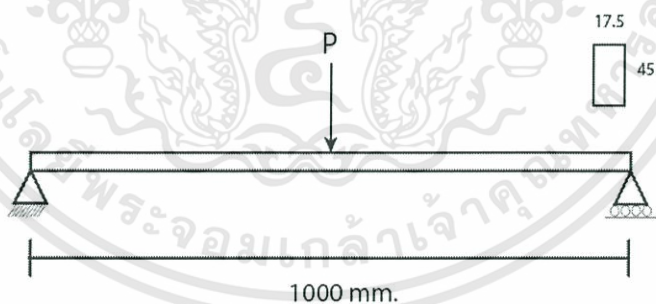
ในหัวข้อนี้จะกล่าวการทดสอบโปรแกรมเพื่อเปรียบเทียบผลผลเฉลยจากการวิเคราะห์ทางไฟไนต์เอลิเมนต์กับผลการคำนวณด้วยทฤษฎี (วิธีแม่นยำ) โดยมีการสมมติกรณีอย่างง่ายเพื่อการทดสอบความถูกต้องของโปรแกรมเป็น 3 กรณี ดังนี้

กรณีที่ 1 เป็นคานช่วงเดียวธรรมดาหน้าตัดรูปสี่เหลี่ยมขนาด  $17.5 \times 45$  มิลลิเมตร ยาว 1000 มิลลิเมตร รับแรงแบบกระจายตลอดความยาวขนาดรวมเท่ากับ 5000 นิวตัน ตามรูปที่ 3.6



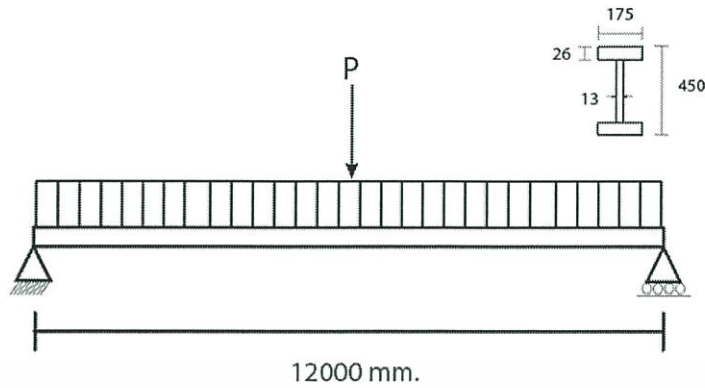
รูปที่ 3.6 คานช่วงเดียวธรรมดาหน้าตัดรูปสี่เหลี่ยมรับแรงแบบกระจายตลอดความยาว

กรณีที่ 2 เป็นคานช่วงเดียวธรรมดาหน้าตัดรูปสี่เหลี่ยมขนาด  $17.5 \times 45$  มิลลิเมตร ยาว 1000 มิลลิเมตร รับแรงแบบจุดขนาด 5000 นิวตัน ที่กึ่งกลางของคาน ตามรูปที่ 3.7



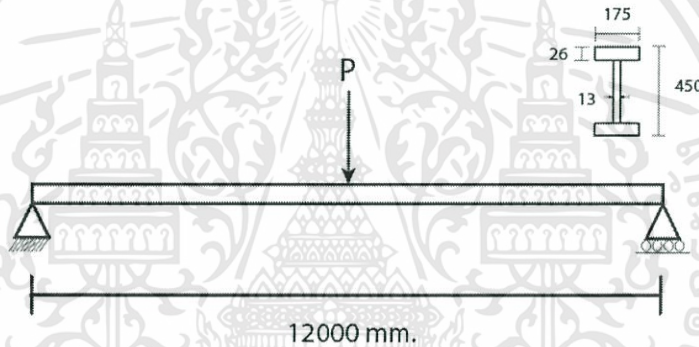
รูปที่ 3.7 คานช่วงเดียวธรรมดาหน้าตัดรูปสี่เหลี่ยมรับแรงแบบจุดที่กึ่งกลาง

กรณีที่ 3 เป็นคานช่วงเดียวธรรมดาหน้าตัดรูปตัวไอ  $175 \times 450$  มิลลิเมตร ยาว 12000 มิลลิเมตร รับแรงแบบกระจายตลอดความยาวขนาดรวมเท่ากับ 61312.5 นิวตัน ตามรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 คานช่วงเดียวธรรมดาหน้าตัดรูปตัวไอรับแรงแบบกระจายตลอดความยาว

กรณีที่ 4 เป็นคานช่วงเดียวธรรมดาหน้าตัดรูปตัวไอ 175×450 มิลลิเมตร ยาว 12000 มิลลิเมตร รับแรงแบบจุดขนาด 61312.5 นิวตัน ที่กึ่งกลางของคาน ตามรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 คานช่วงเดียวธรรมดาหน้าตัดรูปตัวไอรับแรงแบบจุดที่กึ่งกลาง

### 3.4.2 การกำหนดเงื่อนไขในการวิเคราะห์โครงสร้างของสะพาน

สำหรับเงื่อนไขในการวิเคราะห์นั้นจำเป็นอย่างยิ่งในการวิเคราะห์ความแข็งแรงของโครงสร้าง สะพานเนื่องจากส่งผลต่อความเสมือนจริงของการจำลองสถานการณ์ของการรับภาระกรรม ซึ่งประกอบด้วยข้อมูลหลักๆ ที่จำเป็นต้องทราบดังนี้

#### 3.4.2.1 ค่าคุณสมบัติเชิงกลของแบบจำลองโครงสร้างสะพาน

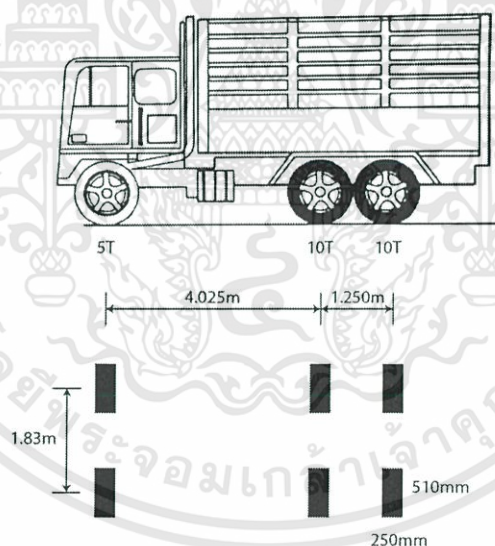
สำหรับวัสดุที่นำมาใช้ในงานวิจัยนี้ จะกำหนดตามข้อมูลของกรมทหารช่างที่ 21 (ราชบุรี) ได้ใช้สร้างสะพานตัวต้นแบบแรกขึ้น ซึ่งเป็นเหล็กโครงสร้างที่หาได้ทั่วไปตามท้องตลาดและเป็นไปตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (มอก.) และจะมีคุณสมบัติทางกลดังนี้

ค่าคุณสมบัติเชิงกล	
ความหนาแน่น ( $\text{kg/m}^3$ )	7850
ความเค้นวิกฤติ (MPa)	250
โมดูลัสความยืดหยุ่น (GPa)	200
อัตราส่วนพัวซอง	0.3

ตารางที่ 3.1 ตารางแสดงค่าคุณสมบัติเชิงกลของแบบจำลองโครงสร้างสะพาน

### 3.4.2.2 รูปแบบของภาระกรรม

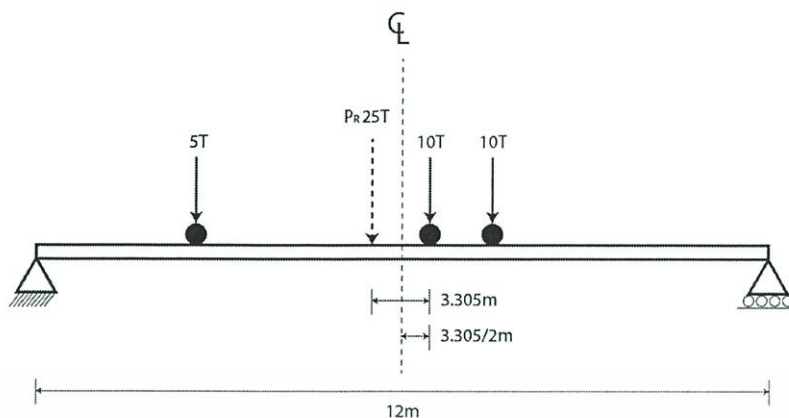
รูปแบบของภาระกรรมที่กระทำของโครงสร้างสะพานนั้น ได้ประยุกต์มาจาก รูปแบบของรถทดสอบที่ใช้สำหรับการทดสอบช่วงสะพานของมาตรฐาน AASHTO และ ประกาศกรมทางหลวงฯ โดยเป็นจำลองภาระกรรมของรถบรรทุกสิบล้อ (3 เพลา 6 ล้อ ยาง 10 เส้น) ที่มีน้ำหนัก รวม 25 ตัน ดังแสดงในรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 แบบจำลองรถบรรทุกทดสอบ[11]

เมื่อทราบรูปแบบของภาระกรรมแล้วได้ทำการวิเคราะห์หาตำแหน่งของภาระกรรม ที่ทำให้ โครงสร้างได้รับโมเมนต์ดัดสูงสุดที่สุด โดยพิจารณาสะพานเป็นคานช่วงเดียวธรรมดาที่มีฐานรองรับ ด้านหนึ่งเป็นฐานรองรับแบบยึดแน่น และอีกด้านเป็นฐานรองรับแบบล้อเลื่อน จากนั้นได้ประยุกต์ใช้ ทฤษฎีในหัวข้อที่ 2.2.3 ซึ่งจะได้ตำแหน่งของภาระกรรมที่ทำให้สะพานเกิดโมเมนต์ดัดสูงสุดที่แท้จริง แสดงดังรูปที่ 3.11

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



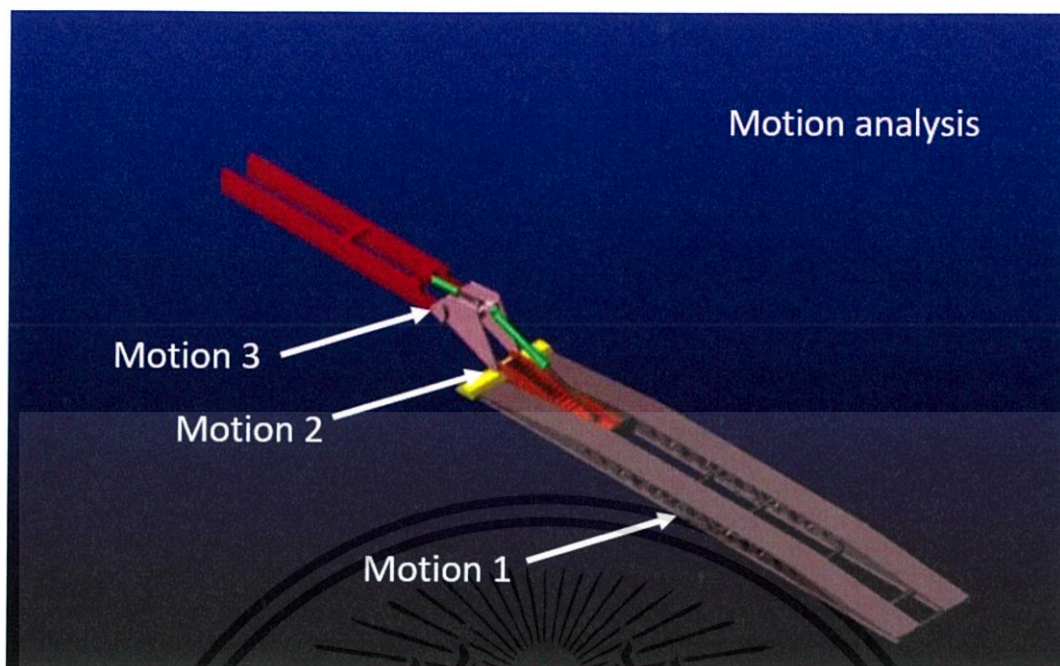
รูปที่ 3.11 ตำแหน่งของภาระกรรม

### 3.5 การจำลองการเคลื่อนที่ของการเก็บสะพาน

การจำลองการเคลื่อนที่นี้เป็นการวิเคราะห์แบบพลศาสตร์ใน 2 มิติ เนื่องจากสมมติให้การวางและเก็บสะพานใช้พลังงานที่เท่ากันตามกฎอนุรักษ์พลังงาน จึงกำหนดให้การเคลื่อนที่เป็นกระบวนการเก็บเพื่อความสะดวกในการจัดเตรียมการวิเคราะห์แบบพลศาสตร์ดังกล่าว ซึ่งจะประยุกต์ใช้โปรแกรมสำเร็จรูป ADAMS/View ในการจำลองการเคลื่อนที่และวิเคราะห์หากำลังที่ใช้ไปในกระบวนการการเก็บสะพาน เพื่อพิสูจน์สมมติฐานการออกแบบที่ว่า การลดน้ำหนักของโครงสร้างจะส่งผลให้การใช้กำลังในกระบวนการการวาง/เก็บสะพานมีค่าลดลง

#### ขั้นตอนในการจำลองการเคลื่อนที่ของการเก็บสะพาน

1. เตรียมแบบจำลองของโครงสร้างสะพานมาประกอบเข้ากับแบบจำลองของเครื่องวางสะพานและแบบจำลองของตัวรถเป็นไฟล์ STEP (นามสกุลไฟล์ .stp)
2. นำไฟล์ที่ได้จากหัวข้อที่ 1. เข้าไปในโปรแกรม ADAMS/View เพื่อจัดเตรียมแบบจำลองที่จะใช้ในการวิเคราะห์
3. ใส่ความสัมพันธ์ระหว่างส่วนประกอบทั้งหมด เพื่อกำหนดให้การเก็บสะพานสามารถเคลื่อนที่ได้เสมือนจริง
4. กำหนดการเคลื่อนที่ของการเก็บสะพาน โดยเริ่มจากการกำหนดการเคลื่อนที่ของจุดหมุนทั้ง 3 ที่แสดงในรูปที่ 3.3 ซึ่งประกอบด้วย Motion 1 , Motion 2 และ Motion 3



รูปที่ 3.12 การกำหนดการเคลื่อนที่ของการเก็บสะพาน

5. สมมติการเคลื่อนที่ของการเก็บสะพานเป็นการเคลื่อนที่ที่ใช้เวลาในการเคลื่อนที่ทั้งหมด 7 วินาที ซึ่งจะกำหนดรูปแบบของการเคลื่อนที่แต่ละ Motion เป็นฟังก์ชันที่มีความสัมพันธ์ดังนี้
- Motion 1 เป็นการหมุนเพื่อพับเก็บโครงสร้างสะพานเข้าหากันหมุนด้วยมุม 180 องศา ใช้เวลา 4 วินาที ซึ่งเริ่มการเคลื่อนที่เมื่อการเก็บสะพานเริ่มกระบวนการ (วินาทีที่ 0)
  - Motion 2 เป็นการหมุนเพื่อยกสะพานขึ้นในแนวตั้งหมุนด้วยมุม 105 องศา ใช้เวลา 5 วินาที ซึ่งเริ่มการเคลื่อนที่เมื่อการเก็บสะพานเริ่มกระบวนการ (วินาทีที่ 0)
  - Motion 3 เป็นการหมุนเพื่อเก็บโครงสร้างสะพานไว้บนท้ายรถวางสะพานหมุนด้วยมุม 65 องศา ใช้เวลา 2 วินาที ซึ่งเริ่มการเคลื่อนที่เมื่อการเก็บสะพานเริ่มกระบวนการไปแล้ว 5 วินาที (วินาทีที่ 5)
6. พล็อตการใช้กำลังในการหมุนแต่ละ Motion เทียบกับเวลา

## บทที่ 4

# ผลการออกแบบและการอภิปรายผล

### 4.1 บทนำ

บทนี้จะเป็นการนำเสนอผลการวิจัยที่ได้ดำเนินการตามบทที่ 3 ซึ่งงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาแนวทางการออกแบบโดยวิธีการหาโพลีโพลีที่เหมาะสม และการวิเคราะห์ความแข็งแรงของโครงสร้างสะพานด้วยระเบียบวิธีไฟไนท์เอลิเมนต์ ผลเฉลยที่ได้จากการหาโพลีโพลีที่เหมาะสมนั้นจะเป็นลักษณะเป็นแบบจำลองที่ประกอบไปด้วยเอลิเมนต์ที่ถูกเก็บรักษาไว้ตามเงื่อนไขที่กำหนด ผลเฉลยนี้จะถูกนำไปปรับปรุงผิวและประกอบเป็นโครงสร้างสะพานแบบใหม่ และจะถูกนำไปสามารถวิเคราะห์ความแข็งแรงและการเคลื่อนไหว ซึ่งจะแสดงในรายละเอียดต่างๆ ดังต่อไปนี้

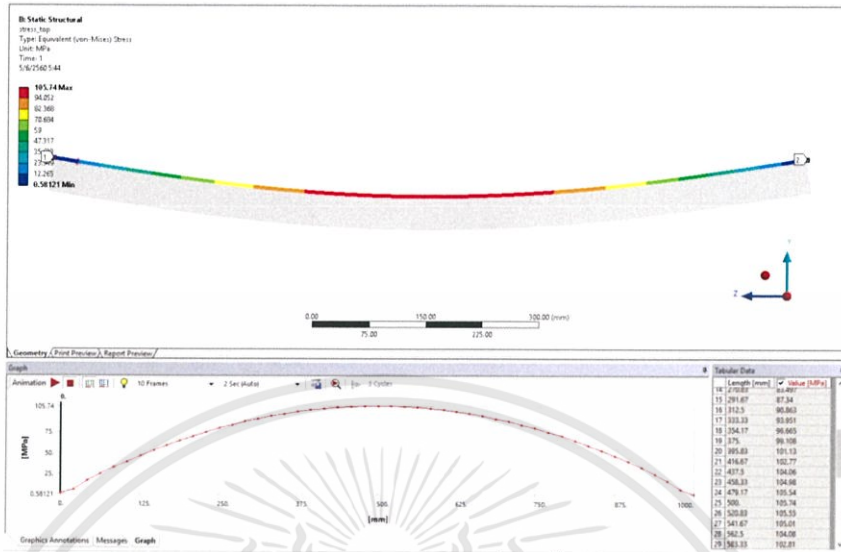
### 4.2 ผลการทดสอบโปรแกรม

จากการออกแบบกรณีการทดสอบอย่างง่ายเพื่อที่จะทำการทดสอบและจำลองจากที่ได้กล่าวมาใน บทที่ 3 เมื่อนำค่าที่ได้ทำการคำนวณด้วยทฤษฎี(วิธีแม่นยำ) มาทำการวิเคราะห์ผลเปรียบเทียบกับระหว่างการคำนวณด้วยทฤษฎีและ การวิเคราะห์ด้วยวิธีทางไฟไนท์เอลิเมนต์เพื่อตรวจสอบแบบจำลองทางไฟไนท์เอลิเมนต์ที่สร้างขึ้นผลที่ได้มีความสอดคล้องกับการทดลองกันเพียงใด ซึ่งผลที่นำมาเปรียบเทียบจะถูกนำเสนอในหัวข้อนี้

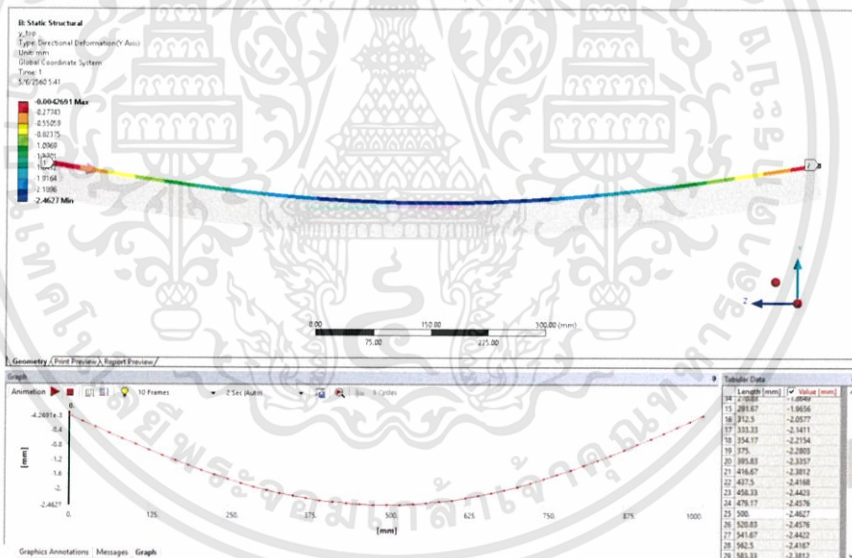
#### 4.2.1 ผลการวิเคราะห์กรณีการทดสอบอย่างง่าย

ผลลัพธ์ที่ได้จากการวิเคราะห์ทางไฟไนท์เอลิเมนต์จะได้ค่าเชิงตัวเลขเป็นค่าของการเคลื่อนตัวของแต่ละจุดต่อ ผลการวิเคราะห์แบบจำลองอย่างง่ายด้วยระเบียบวิธีไฟไนท์เอลิเมนต์ เมื่อนำมาพิจารณาหาความเค้นวอนมิสเสส ความเค้นที่เกิดขึ้นที่ทำให้เกิดการโก่งตัวต่อคานในกรณีต่างๆ ดังแสดงต่อไปนี้

กรณีที่ 1 คานช่วงเดียวธรรมดาหน้าตัดรูปสี่เหลี่ยมรับแรงแบบกระจายตลอดความยาว



(ก) แสดงความเค้นที่เกิดขึ้น



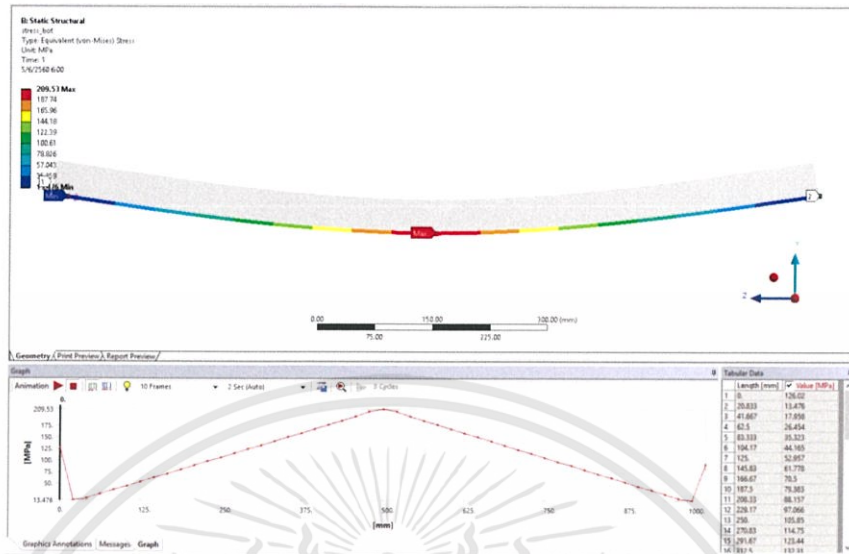
(ข) แสดงระยะโก่งตัวที่เกิดขึ้น

รูปที่ 4.1 ผลเฉลยคานช่วงเดียวธรรมดาหน้าตัดรูปสี่เหลี่ยมรับแรงแบบกระจายตลอดความยาวที่คำนวณด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

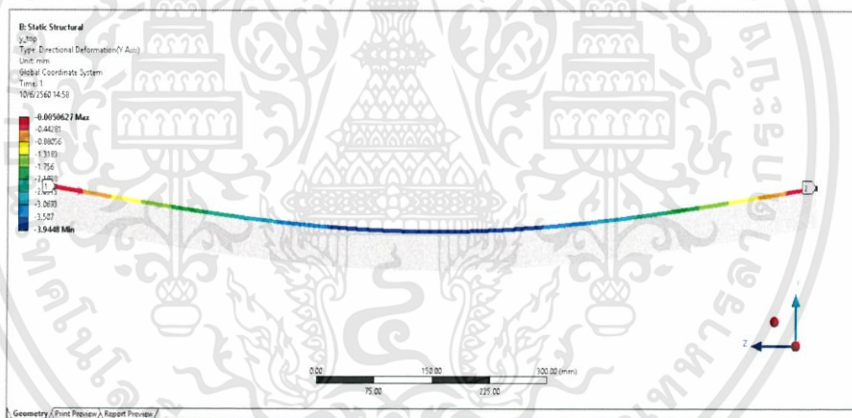
จากรูปที่ 4.1 ความเค้นอนมิสเชสเกิดขึ้นสูงสุดมีค่าเป็น 105.8 MPa เกิดขึ้นที่กึ่งกลางของคาน และระยะโก่งตัวในแนวตั้งก็เกิดขึ้นที่กึ่งกลางของคานเช่นกันซึ่งมีค่า 2.46 มิลลิเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## กรณีที่ 2 คานช่วงเดียวธรรมดาหน้าตัดรูปสี่เหลี่ยมรับแรงแบบจุดที่กึ่งกลาง



(ก) แสดงความเค้นที่เกิดขึ้น



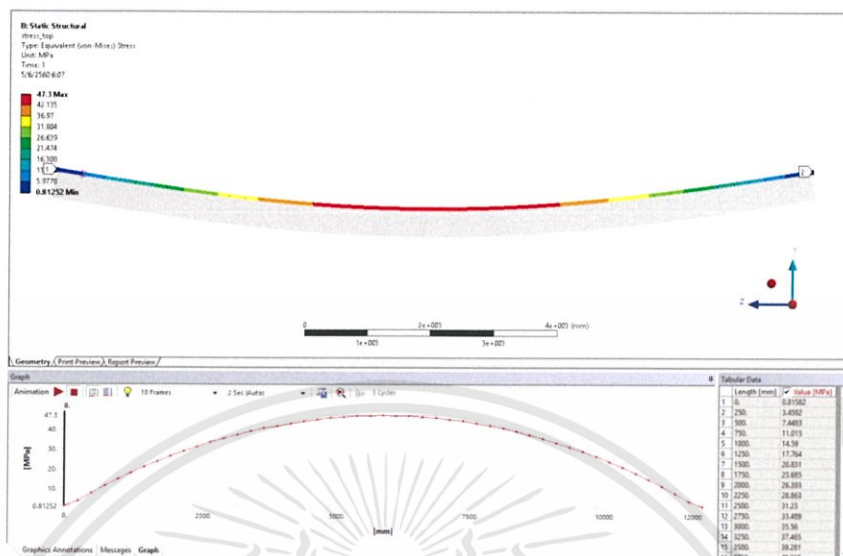
(ข) แสดงระยะโก่งตัวที่เกิดขึ้น

รูปที่ 4.2 ผลเฉลยคานช่วงเดียวธรรมดาหน้าตัดรูปสี่เหลี่ยมรับแรงแบบจุดที่กึ่งกลางที่คำนวณด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

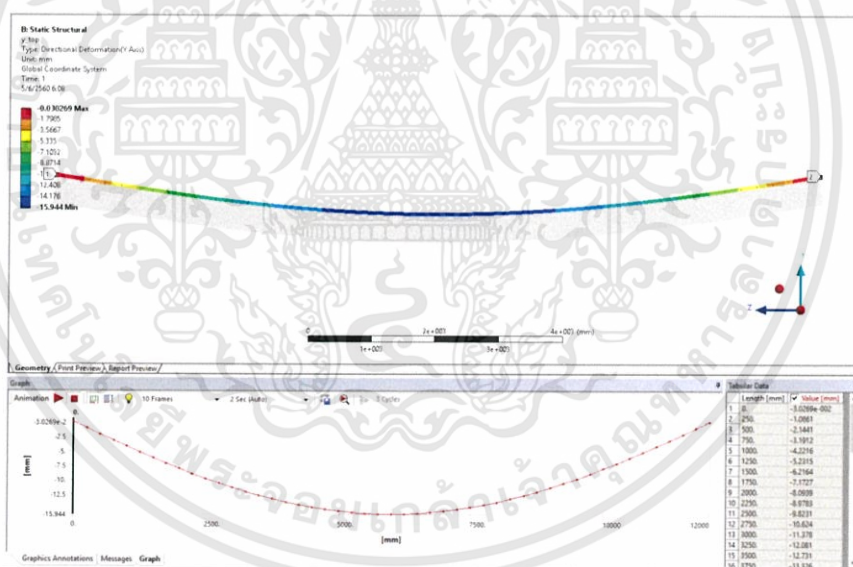
จากรูปที่ 4.2 ความเค้นอนมิสเสสเกิดขึ้นสูงสุดมีค่าเป็น 209.6 MPa เกิดขึ้นที่กึ่งกลางของคาน และระยะโก่งตัวในแนวตั้งก็เกิดขึ้นที่กึ่งกลางของคานเช่นกันซึ่งมีค่า 3.95 มิลลิเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### กรณีที่ 3 คานช่วงเดียวธรรมดาหน้าตัดรูปตัวไอรับแรงแบบกระจายตลอดความยาว



(ก) แสดงความเค้นที่เกิดขึ้น



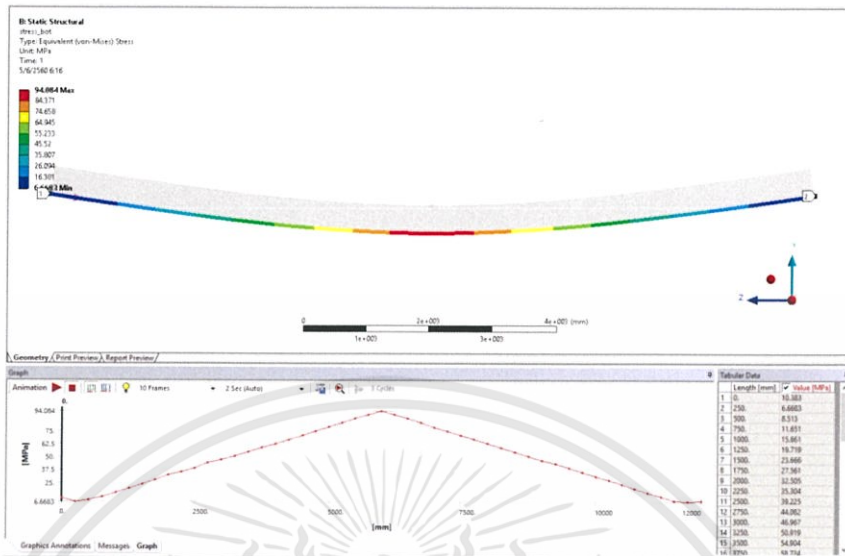
(ข) แสดงระยะโก่งตัวที่เกิดขึ้น

### รูปที่ 4.3 ผลเฉลยคานช่วงเดียวธรรมดาหน้าตัดรูปตัวไอรับแรงแบบกระจายตลอดความยาว ที่คำนวณด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

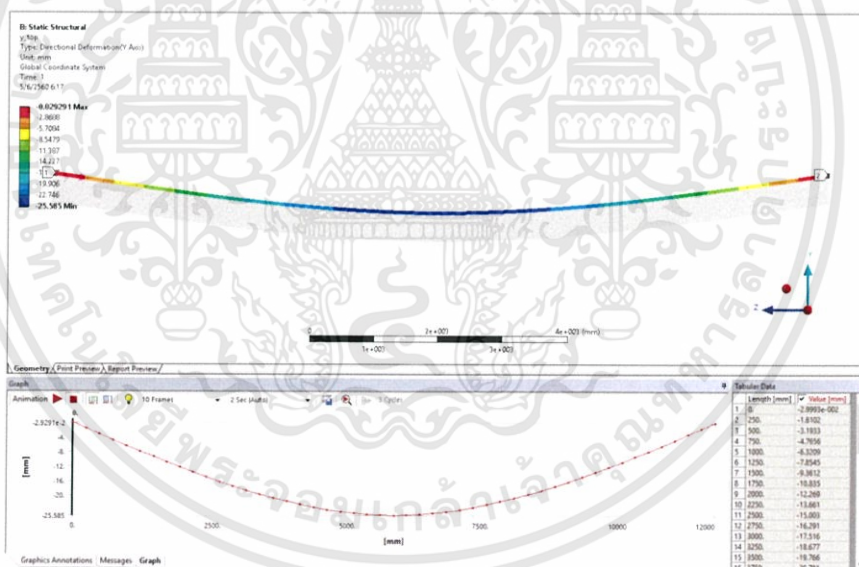
จากรูปที่ 4.3 ความเค้นวอนมิสเสสเกิดขึ้นสูงสุดมีค่าเป็น 47.3 MPa เกิดขึ้นที่กึ่งกลางของคาน และระยะโก่งตัวในแนวตั้งก็เกิดขึ้นที่กึ่งกลางของคานเช่นกันซึ่งมีค่า 15.95 มิลลิเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## กรณีศึกษาที่ 4 คานช่วงเดียวธรรมดาหน้าตัดรูปตัวไอรับแรงแบบจุดที่กึ่งกลาง



(ก) แสดงความเค้นที่เกิดขึ้น



(ข) แสดงระยะโก่งตัวที่เกิดขึ้น

### รูปที่ 4.4 ผลเฉลยคานช่วงเดียวธรรมดาหน้าตัดรูปตัวไอรับแรงแบบจุดที่กึ่งกลาง ที่คำนวณด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

จากรูปที่ 4.4 ความเค้นวอนมิสเสสเกิดขึ้นสูงสุดมีค่าเป็น 94.1 MPa เกิดขึ้นที่กึ่งกลางของคาน และระยะโก่งตัวในแนวตั้งก็เกิดขึ้นที่กึ่งกลางของคานเช่นกันซึ่งมีค่า 25.58 มิลลิเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.2.2 การเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์กรณีการทดสอบอย่างง่าย

การตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรมโดยผลจากการวิเคราะห์กรณีการทดสอบอย่างง่าย ด้วยระเบียบวิธีไฟไนท์เอลิเมนต์จะถูกนำไปเปรียบเทียบกับผลการคำนวณจากทฤษฎีที่ได้กล่าวมาในบทที่ 3 ได้เปรียบเทียบในส่วนของตำแหน่งที่เกิดระยะโก่งสูงสุด และตำแหน่งนี้จะมีค่าความเค้นวอนมิสเซสสูงที่สุดด้วย ซึ่งสอดคล้องกับผลจากการคำนวณด้วยทฤษฎี โดยในทุกกรณีของการทดสอบ ตำแหน่งของการเกิดระยะโก่งสูงสุดและค่าความเค้นวอนมิสเซสสูงที่สุดจะเกิดที่ตำแหน่งเดียวกันทั้ง 2 วิธี และตารางที่ 4-1 แสดงค่าความเค้นวอนมิสเซสสูงที่สุด (ก) และระยะโก่งสูงสุด (ข) ที่คำนวณได้จากทั้ง 2 วิธี

กรณีการทดสอบ	วิธีไฟไนท์เอลิเมนต์ (MPa)	การคำนวณจากทฤษฎี (MPa)	Error (%)
กรณีที่ 1	105.8	105.8	0.00
กรณีที่ 2	209.6	211.6	0.94
กรณีที่ 3	47.3	43.4	8.24
กรณีที่ 4	94.1	86.7	7.86

(ก) แสดงค่าความเค้นวอนมิสเซสสูงที่สุด

กรณีการทดสอบ	วิธีไฟไนท์เอลิเมนต์ (mm.)	การคำนวณจากทฤษฎี (mm)	Error (%)
กรณีที่ 1	2.46	2.45	0.40
กรณีที่ 2	3.95	3.92	0.76
กรณีที่ 3	15.95	14.51	9.03
กรณีที่ 4	25.58	23.25	9.11

(ข) แสดงระยะโก่งสูงสุด

ตารางที่ 4-1 แสดงการเปรียบเทียบผลเฉลยที่ได้จากวิธีไฟไนท์เอลิเมนต์กับการคำนวณจากทฤษฎี

จากตาราง 4-1 เมื่อเปรียบเทียบผลเฉลยดังกล่าว พบว่าวิธีไฟไนท์เอลิเมนต์ มีค่าความคลาดเคลื่อนต่อการคำนวณไม่เกิน (Error) 10.0 % ซึ่งเป็นที่ยอมรับได้ เนื่องจากการคำนวณด้วยวิธีไฟไนท์เอลิเมนต์นั้นให้ค่าของผลเฉลยในเชิงอนุรักษ์มากกว่า แสดงให้เห็นถึงความน่าเชื่อถือของโปรแกรมและผลการเปรียบเทียบมีความสอดคล้องใกล้เคียงกัน สรุปได้ว่าแบบจำลองทางไฟไนท์เอลิเมนต์สามารถใช้อธิบายพฤติกรรมและแนวโน้มการเสียรูปของชิ้นงานได้ ซึ่งมีค่าความถูกต้องที่เป็นที่ยอมรับได้

### 4.3 ผลการออกแบบด้วยการหาโทโปโลยีที่เหมาะสม

สำหรับการออกแบบนั้นจะสมมติว่าผู้ออกแบบยังไม่รู้มาก่อนว่ารูปร่างของคานหลักสำหรับโครงสร้างเป็นอย่างไรที่จะทำให้น้ำหนักมีค่าน้อย จึงเริ่มต้นจากหาโทโปโลยีที่เหมาะสมที่สุดของคานหลักโดยใช้โปรแกรม ANSYS 18.0 ซึ่งในการออกแบบได้คำนึงถึงความเสียหายของชิ้นส่วนภายใต้แรงกระทำสถิตย์เพียงอย่างเดียวเท่านั้น และเนื่องจากโครงสร้างสะพานมีรูปร่างที่สมมาตรกัน ผู้ออกแบบจึงได้กำหนดขอบเขตของการพิจารณาชิ้นส่วนเหลือ 1 ใน 4 ส่วน โดยเป็นคานรูปตัวไอตัดแปลงดังรูปที่ 4.5 เพื่อความสะดวกและประหยัดเวลาในการคำนวณ



รูปที่ 4.5 คานยื่นที่ใช้ในการคำนวณเพื่อหาโทโปโลยีที่เหมาะสม

เมื่อทำการกำหนดเงื่อนไขในการคำนวณตามที่กล่าวในหัวข้อ 3.3 เรียบร้อยแล้วจะได้ผลเฉลยโทโปโลยีที่เหมาะสมของชิ้นงานดังรูปที่ 4.6



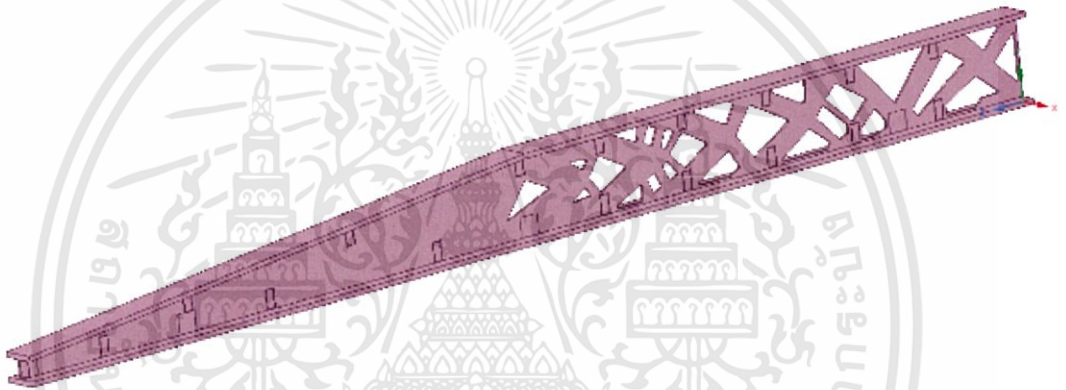
รูปที่ 4.6 ผลเฉลยโทโปโลยีที่เหมาะสม

เนื่องจากรูปทรงที่ได้นั้นจะมีความละเอียดต่ำ จึงจำเป็นต้องมีการตกแต่งผิวของชิ้นส่วนซึ่งทำโดยการนำโดเมนมาวางซ้อนทับกันดังรูปที่ 4.7 จากนั้นทำการวาดเส้นเพื่อร่างและขึ้นรูปใหม่ สีม่วงคือเนื้อวัสดุที่เก็บไว้และสีส้มคือส่วนที่ต้องการตัดออก อีกทั้งยังสมมติให้มีมุม fillet = 10 mm โดยกระบวนการดังกล่าวใช้โปรแกรมประเภท CAD (ในที่นี้ใช้โปรแกรม SpaceClaim : ANSYS 18.0) ในการดำเนินการในเชิงวิศวกรรมย่อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.7 การตกแต่งผิวของโทโพลยีที่เหมาะสม



รูปที่ 4.8 ผลเฉลยโทโพลยีที่ผ่านการตกแต่งผิวแล้ว

#### 4.4 ผลการวิเคราะห์ความแข็งแรง

เมื่อได้ชิ้นส่วนของคานหลักที่ได้รับการคำนวณหาโทโพลยีที่เหมาะสมดังแสดงในหัวข้อที่ 4.2 เรียบร้อยแล้วในหัวข้อนี้ผู้ออกแบบ ได้นำผลลัพธ์ที่ได้ดังกล่าวมาประกอบกับชิ้นส่วนอื่นเป็นโครงสร้างแบบใหม่ จากนั้นได้ทำการวิเคราะห์ความแข็งแรงของโครงสร้างสะพาน ทั้งแบบใหม่และแบบดั้งเดิมโดยกำหนดเงื่อนไขขอบเขตของการรับภาระกรรมเช่นเดียวกัน ดังแสดงในรูปที่ 4.8 เป็นการสร้างแบบจำลองสถานการณ์ในการรับภาระกรรมของโครงสร้างสะพาน โดยใส่แรงกดลงไปทีวัตถุแข็งแรงที่ทำหน้าที่แทนล้อรถบรรทุกที่เป็นภาระกรรมแบบสถิตของโครงสร้างสะพาน และได้กำหนดฐานรองรับแบบคานช่วงเดียวธรรมดา และไม่พิจารณาความเสียหายของแผ่นรองล้อ

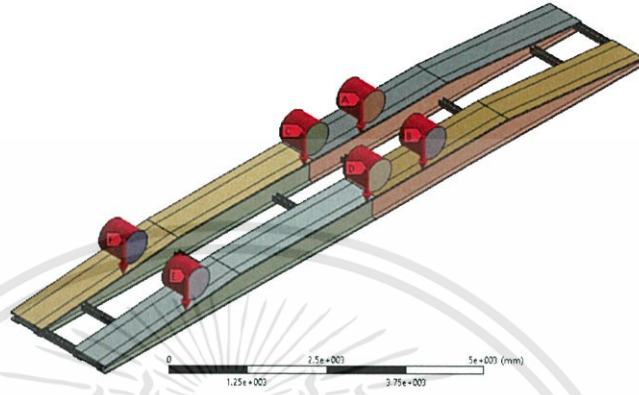
ในการวิเคราะห์ความแข็งแรงนี้มุ่งเน้นในการพิจารณาความแข็งแรงของโครงสร้างแบบใหม่ว่าจะสามารถรับภาระกรรมได้อย่างปลอดภัยหรือไม่ หากไม่สามารถรับภาระกรรมได้อย่างปลอดภัยจำเป็นต้องย้อนกลับไปที่กระบวนการการหาโทโพลยีอีกครั้ง จนกว่าผลลัพธ์ที่ได้รูปร่างของชิ้นส่วนที่ทำให้โครงสร้างสะพานรับภาระกรรมได้อย่างปลอดภัย ในที่นี้เป็นผลเฉลยของโครงสร้างสะพานแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สุดท้าย ซึ่งมีค่าความเค้นวอนมิตสูงสุดไนโครงสร้างแบบใหม่เท่ากับ 127.0 MPa และแบบเดิมเท่ากับ 86.3 MPa ดังแสดงในรูปที่ 4.9 ซึ่งแสดงผลลัพธ์ที่ได้เป็นแถบสีแทนปริมาณความเค้นวอนมิตเซสที่เกิดขึ้นไนโครงสร้าง

B: Static Structural  
Static Structural  
Time: 1, s  
5/6/2560 7:53

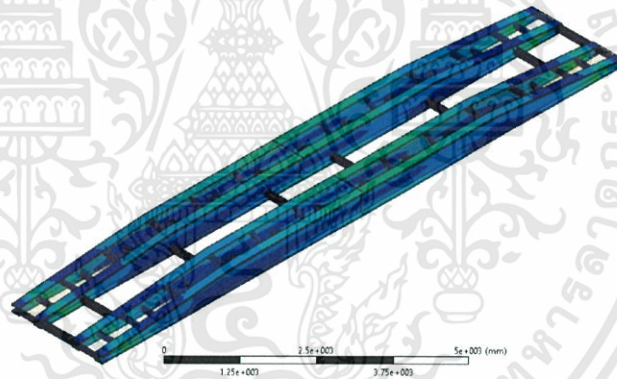
1 Remote Force: 42050 N  
2 Remote Force 2: 42050 N  
3 Remote Force 3: 42050 N  
4 Remote Force 4: 42050 N  
5 Remote Force 5: 24525 N  
6 Remote Force 6: 24525 N



รูปที่ 4.9 แบบจำลองสถานการณ์ในการรับภาระกรรมของโครงสร้างสะพาน

B: Static Structural  
Equivalent Stress: 4  
Type: Equivalent (von-Mises) Stress  
Unit: MPa  
Time: 1  
5/6/2560 7:58

86.315 Max  
76.725  
67.135  
57.545  
47.955  
38.365  
28.776  
19.186  
9.5962  
0.0064021 Min



(ก) ความเค้นวอนมิตไนโครงสร้างแบบดั้งเดิม

B: Static Structural  
Equivalent Stress: 2  
Type: Equivalent (von-Mises) Stress  
Unit: MPa  
Time: 1  
5/6/2560 8:03

126.97 Max  
112.86  
98.753  
84.646  
70.539  
56.432  
42.325  
28.219  
14.112  
0.0049375 Min



(ข) ความเค้นวอนมิตไนโครงสร้างแบบใหม่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### รูปที่ 4.10 ค่าความเค้นวอนมีสที่เกิดขึ้นในโครงสร้าง

ในทางวิศวกรรมนั้นมักจะออกแบบโครงสร้างให้อยู่ในช่วงการเสีรูปร่างแบบอีลาสติกเพื่อความปลอดภัยในการใช้งาน ซึ่งโครงสร้างของสะพานแบบใหม่นี้ยอมรับได้ เนื่องจากค่าความเค้นวอนมีสมิมีค่าไม่เกินค่า Yield strength และมี Safety factor เท่ากับ 1.969 แสดงให้เห็นว่าโครงสร้างของสะพานแบบใหม่นี้สามารถรับน้ำหนักได้อย่างปลอดภัยภายใต้การกระทำแบบสถิตย์ตามสมมติฐาน

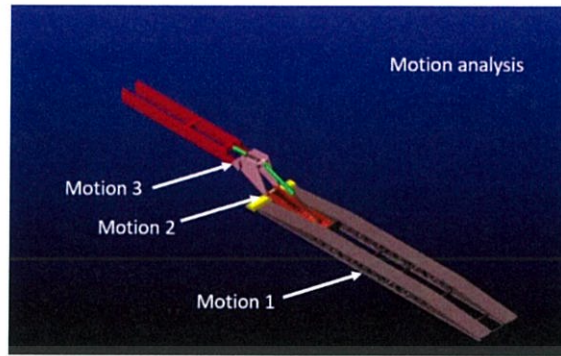
คุณสมบัติเชิงกล	สะพานแบบดั้งเดิม	สะพานแบบใหม่
มวล (kg)	5960.6	5628.8
ปริมาตร (m <sup>3</sup> )	0.7583	0.7161
วอนมีเซสสูงสุด(MPa)	86.3	127.0
ระยะโก่งตัวสูงสุด(mm.)	6.67	7.28
ค่าความปลอดภัย	2.90	1.97

ตารางที่ 4-2 ตารางเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์แบบสถิตย์  
ระหว่างสะพานแบบดั้งเดิมกับสะพานแบบใหม่

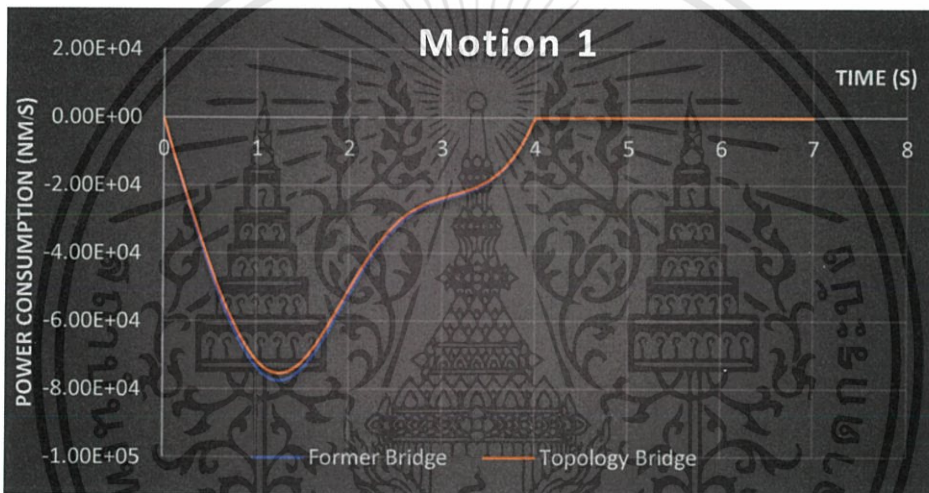
จากผลการวิเคราะห์สรุปได้ว่าชิ้นส่วนทั้งสองมีความปลอดภัยในการใช้งาน และโครงสร้างสะพานแบบดั้งเดิมจะมีความแข็งแรงที่สูงกว่า อย่างไรก็ตามถ้าพิจารณาน้ำหนักของโครงสร้างพบว่าโครงสร้างสะพานที่ผ่านการโทโพลยีมีน้ำหนักที่น้อยกว่า ซึ่งถือว่าได้เปรียบในเชิงของการประหยัดเนื้อวัสดุ แต่อาจจะมีข้อจำกัดในกระบวนการผลิต

#### 4.5 ผลการวิเคราะห์การเคลื่อนที่ของการเก็บสะพาน

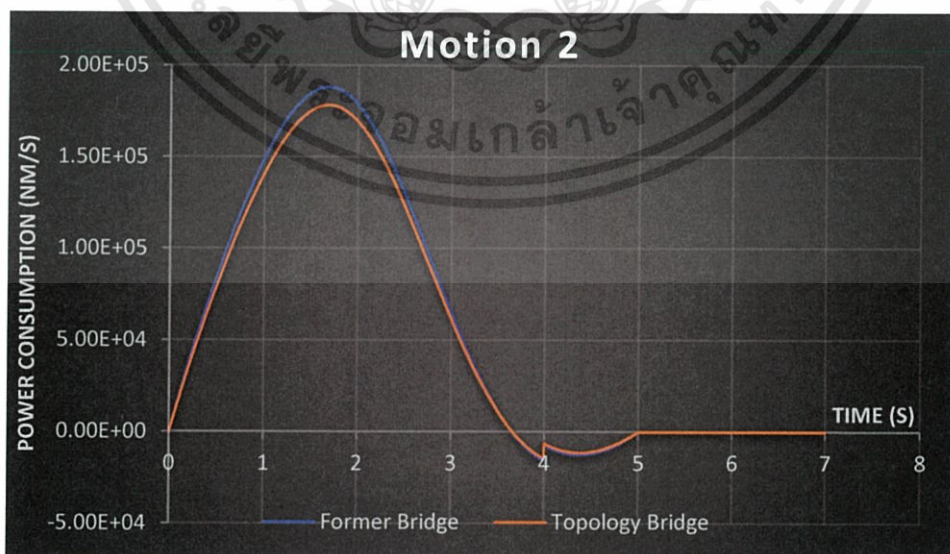
การวิเคราะห์นี้เป็นเป็นการวิเคราะห์เพื่อเปรียบเทียบการสิ้นเปลืองกำลังในการวางสะพาน ซึ่งได้เป็นการจำลองการเคลื่อนไหวแบบพลศาสตร์มัลติบอดีด้วยโปรแกรม ADAMS/View เนื่องจากสมมติให้การวางและเก็บสะพานใช้พลังงานที่เท่ากันตามกฎอนุรักษ์พลังงาน จึงกำหนดให้การเคลื่อนที่เป็นกระบวนการเก็บเพื่อความสะดวกในการจัดเตรียมการวิเคราะห์แบบพลศาสตร์ โดยวัดการสิ้นเปลืองกำลังในการวางสะพานจากกำลังที่ใช้ขับ Motion ต่างๆ ให้เคลื่อนที่ และได้ผลการวิเคราะห์ของโครงสร้างทั้งสองแบบเทียบกันดังนี้



รูปที่ 4.11 การกำหนดการเคลื่อนที่ของการเก็บสะพาน

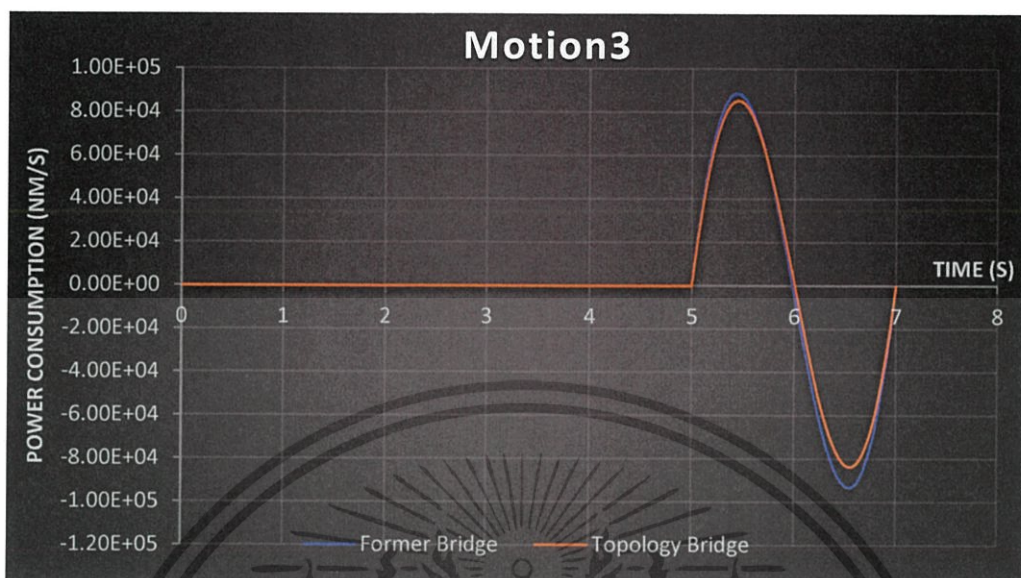


(ก)



(ข)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.12 กราฟแสดงการเปรียบเทียบกำลังที่ใช้ในเครื่องวางระหว่างสะพานดั้งเดิมกับสะพานแบบใหม่

จากกราฟทั้งสามพบว่า พลังงานที่สิ้นเปลืองในการวางสะพานของโครงสร้างสะพานที่ผ่านการโทโปโลยีจะมีค่าน้อยกว่าซึ่งสอดคล้องกับความเป็นไปได้กับสมมติฐานที่ว่า การลดน้ำหนักของชิ้นส่วนจะทำให้ภาระของเครื่องวางสะพานลดลงแสดงได้ดังนี้

พลังงานในแต่ละ motion	สะพานเดิม	สะพานใหม่	ลดลง
Motion 1 (kw)	77.4	75.2	2.2
Motion 2 (kw)	188	178	10
Motion 3 (kw)	92.5	83.5	9

ตารางที่ 4.3 ตารางแสดงการเปรียบเทียบการใช้กำลังในแต่ละ motion

จากตารางที่ 4.3 การใช้กำลังในแต่ละ motion แสดงให้เห็นว่าสะพานใหม่ที่ผ่านการปรับปรุงโดยการออกแบบที่เหมาะสมแล้ว ใช้พลังงานในการ ยก เปิด ปิด สะพานของรถวางสะพานลดลง เนื่องจากน้ำหนักของตัวสะพานลดลง และลดพลังที่ใช้ไปได้ประมาณ 21 kw

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

# ผลการออกแบบและการอภิปรายผล

### 5.1 สรุปผลการออกแบบ

จากการศึกษาแนวทางการออกแบบโครงสร้างสะพานเพื่อการลดน้ำหนักของโครงสร้างสะพาน โดยผู้ออกแบบรู้เฉพาะหลักการทำงานของชิ้นส่วนแต่ไม่รู้ว่ารูปร่างของชิ้นส่วนที่เหมาะสมเป็นอย่างไร ภายใต้การวิเคราะห์แบบสถิตศาสตร์ สามารถสรุปผลการออกแบบและการวิเคราะห์ที่ได้ดังนี้

5.1.1 จากการทดสอบโปรแกรมพบว่าพบว่าวิธีไฟไนท์เอลิเมนต์ ผลเฉลยที่ได้มีค่าความคลาดเคลื่อนต่อการคำนวณด้วยทฤษฎีมีค่าไม่เกิน (Error) 10.0 % ซึ่งเป็นที่ยอมรับได้ เนื่องจากการคำนวณด้วยวิธีไฟไนท์เอลิเมนต์นั้นให้ค่าของผลเฉลยในเชิงอนุรักษ์มากกว่า แสดงให้เห็นถึงความน่าเชื่อถือของโปรแกรมและผลการเปรียบเทียบมีความสอดคล้องใกล้เคียงกัน สรุปได้ว่าแบบจำลองทางไฟไนท์เอลิเมนต์สามารถใช้อธิบายพฤติกรรมและแนวโน้มการเสียรูปของชิ้นงานได้ ซึ่งมีค่าความถูกต้องที่เป็นที่ยอมรับได้

5.1.2 จากการออกแบบด้วยการหาโทโพลยีที่เหมาะสม พบว่าการออกแบบนี้มีประโยชน์อย่างยิ่งซึ่งสามารถลดน้ำหนักของโครงสร้างได้มากกว่า 300 กก. และยังประหยัดเวลาค่าใช้จ่ายในการออกแบบอีกด้วยเนื่องจากกระบวนการทั้งหมดสามารถทำได้ด้วยการประยุกต์ใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อช่วยในการออกแบบไม่ต้องเสียเวลาและค่าใช้จ่ายในการขึ้นรูปชิ้นงานเพื่อทดสอบ อีกทั้งการลดน้ำหนักนี้ยังส่งผลให้ภาระของเครื่องวางสะพานลดลงจากเดิมอีกด้วย

5.1.3 จากผลการวิเคราะห์ความแข็งแรงนั้นสรุปได้ว่าโครงสร้างที่ได้รับการออกแบบใหม่นี้มีความปลอดภัยในการใช้งาน แต่โครงสร้างสะพานแบบดั้งเดิมจะมีความแข็งแรงที่สูงกว่า อย่างไรก็ตามถ้าพิจารณาน้ำหนักของโครงสร้างพบว่าโครงสร้างสะพานที่ผ่านการโทโพลยีจะมีน้ำหนักที่น้อยกว่า ซึ่งถือว่าได้เปรียบในเชิงของการประหยัดเนื้อวัสดุ แต่อาจจะมีข้อจำกัดในกระบวนการผลิต

5.1.4 จากการวิเคราะห์พลศาสตร์การเคลื่อนที่ของการวางสะพานนั้น ทำให้ผู้ออกแบบทราบถึงกำลังที่ใช้ในการขับเคลื่อนเครื่องวางสะพาน ซึ่งข้อมูลที่ได้นี้อาจจะช่วยประกอบในการพิจารณาความคุ้มค่าในการออกแบบ

### 5.2 ข้อเสนอแนะ

ควรมีการใช้จำนวนเอลิเมนต์ให้มากที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้เพื่อให้ได้โทโพลยีที่มีรายละเอียดสูงและถูกต้อง และ ควรมีการวิเคราะห์เพิ่มเติมเกี่ยวกับ ความล้มและการสั่นอิสระ ของชิ้นงาน เนื่องจากงานวิจัยนี้ได้วิเคราะห์เพียงเชิงสถิตเท่านั้น

## เอกสารอ้างอิง

- [1] D.V.Srividya<sup>1</sup>, B.Raju<sup>2</sup> and D.Kondayya. Design optimization of armored vehicle launched bridge for structural loads, International Journal of Mechanical Engineering ,Inc. 2005
- [2] Hornbeck, B., Connor, R., Kluck, J., 2005, .Trilateral Design and Test Code for Military Bridging and Gap-Crossing Equipment, Inc. 2005
- [3] Mike Laviolette. Bridge Construction Practices Using Incremental Launching. HNTB Corp, Inc. 2007
- [4] Dnyaneshwar J.S., Prashant N.U. Failure Analysis of Centre Pin Joint Used In Heavy Assault Bridge. *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering*, Inc. 2013
- [5] Jeong-Hoon Choi. The Fracture Analysis and Remaining Life Estimation of the AVLB Sub-Components. West Virginia University, Inc. 2000
- [6] อุดลยศักดิ์ บุญพันธ์. การออกแบบหลายระดับของชิ้นส่วนยานยนต์. การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 19. 2548
- [7] ปกรณ์ บุราคร การวิเคราะห์ความแข็งแรงและปรับปรุงโครงสร้างที่นั่งสำหรับรถโดยสารขนาดใหญ่ด้วยระเบียบวิธีไฟไนท์อีลิเมนต์. 2556
- [8] รุ่งสุรีย์ ใจเขื่อนแก้ว. 2545. กลศาสตร์ของวัสดุ. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์ท็อป/แมคกรอ-ฮิล
- [9] N.E. Dowling. 1993. Mechanical Behavior of Materials. Prentice-Hall.
- [10] สุนิติ สุภาพ. 2558. หลักการพื้นฐานการวิเคราะห์โครงสร้าง. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพฯ : เอ็ม แอนด์ เอ็ม เลเซอร์พริ้นต์
- [11] ประกาศผู้อำนวยการทางหลวงพิเศษ 22 ธันวาคม 2548 และ AASHTO.2012



ภาคผนวก ก

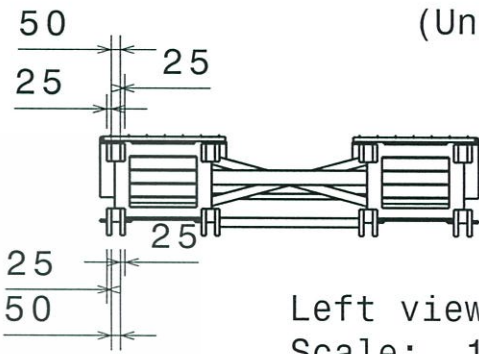
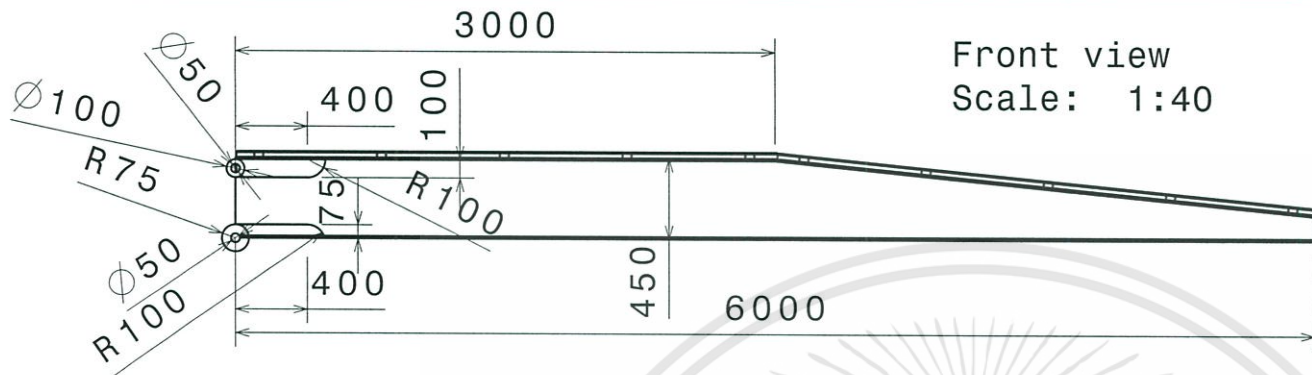
แบบตรออิงสะพานจาก กรมทหารช่างที่ 21 ราชบุรี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



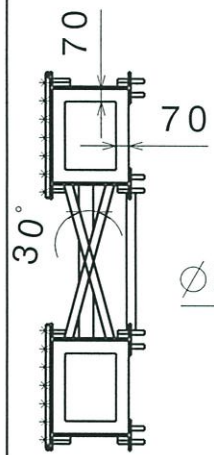
(Unit mm.)

Front view  
Scale: 1:40

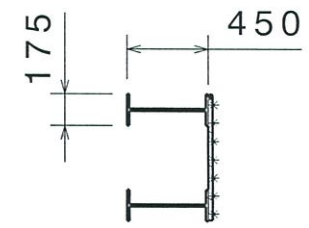
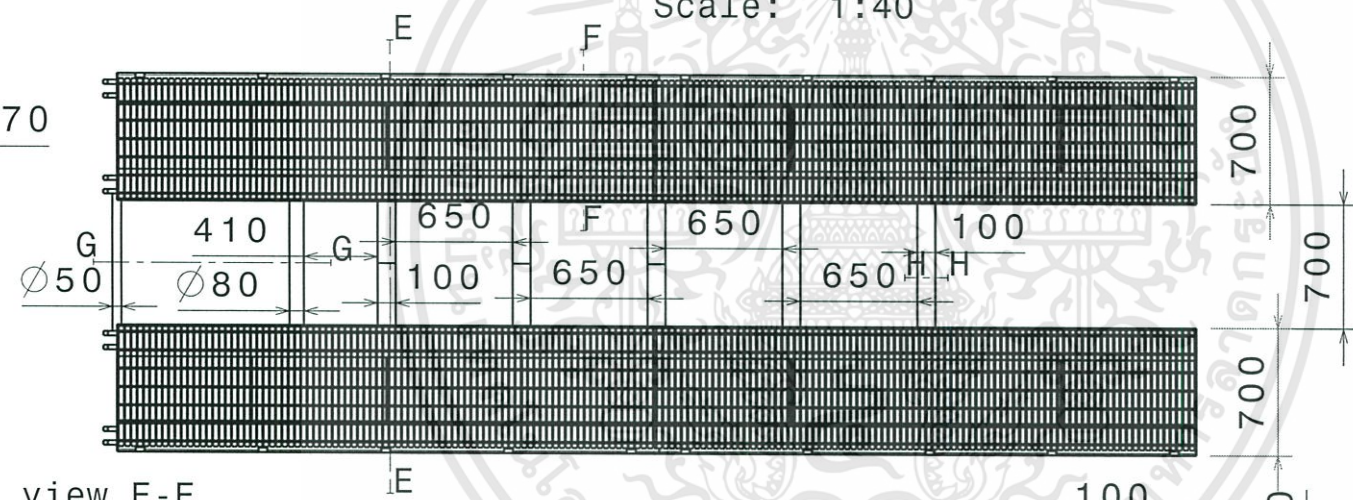


Left view  
Scale: 1:40

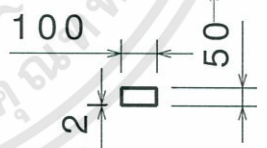
Top view  
Scale: 1:40



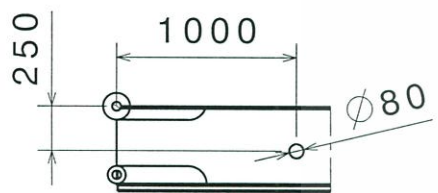
Section view E-E  
Scale: 1:40



Section cut F-F  
Scale: 1:40



Section cut H-H  
Scale: 1:20

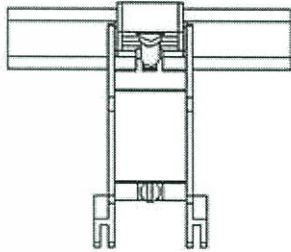
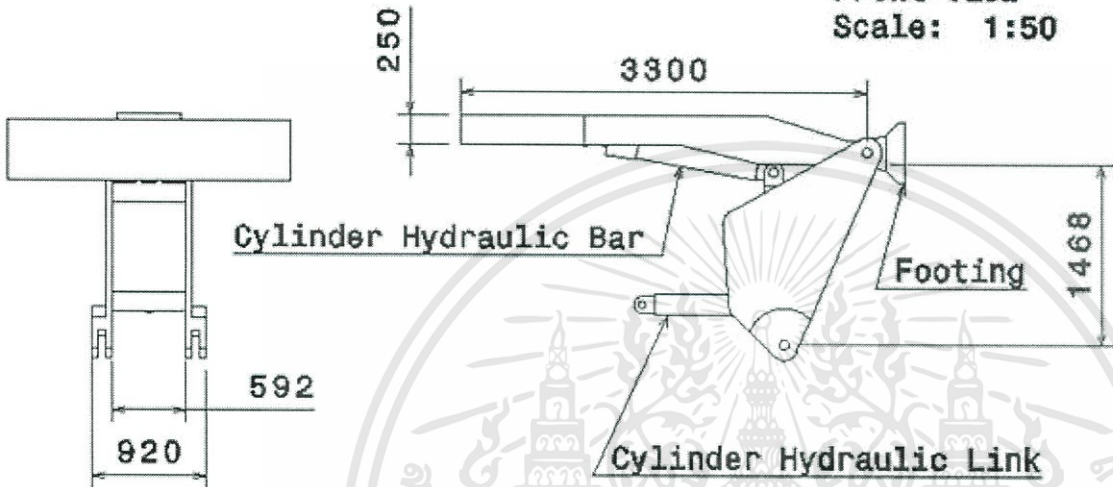


Section view G-G  
Scale: 1:40

**Bridge B**

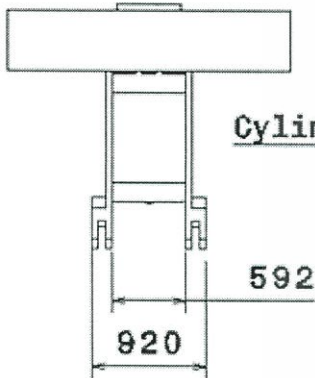
(Unit mm.)

Front view  
Scale: 1:50

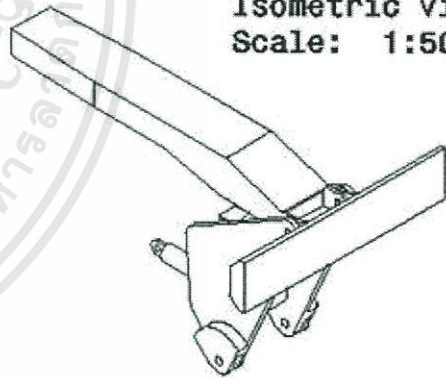
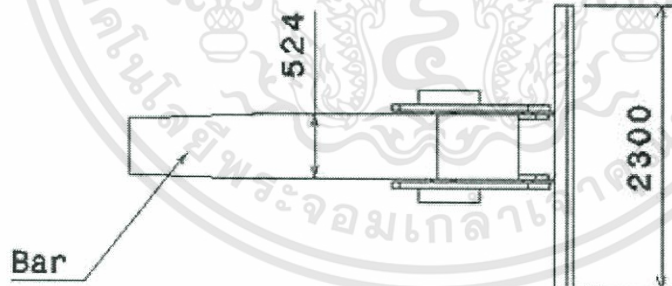


Left view  
Scale: 1:50

Right view  
Scale: 1:50



Top view  
Scale: 1:50



Isometric view  
Scale: 1:50

ชุดวางสะพานทหารช่าง  
**Building Bridge**