

การศึกษาและวิจัยสัปดาห์ที่ทดแทนสัปดาห์อะลูมิเนียมที่ชำรุดของสะพานทหาร เอ็ม จี บี



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมและเทคโนโลยีการป้องกันประเทศ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2565

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Study and Research of the Iron Pin to Replace the M.G.B. (Medium Girder Bridge)  
Military Bridge Aluminum Pin



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Master of Engineering in Defense Engineering and Technology

FACULTY OF ENGINEERING

Chulalongkorn University

Academic Year 2022

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การศึกษาและวิจัยสัณเฑาะพดแทนสลักอะลูมิเนียมที่ชำรุด ของสะพานทหาร เอ็ม จี ปี
โดย	ร.ท.หญิงธัญลักษณ์ เอื้อสกุล
สาขาวิชา	วิศวกรรมและเทคโนโลยีการป้องกันประเทศ
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	รองศาสตราจารย์ ดร.วิฑิต ปานสุข
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐพร นุตยะสกุล

---

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง  
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์  
(ศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ เตชวรสินสกุล)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปัญญาวัชร วังยาว)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก  
(รองศาสตราจารย์ ดร.วิฑิต ปานสุข)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐพร นุตยะสกุล)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย  
(ดร.ปัญญาวัชร จิรติลิก)

ัญญลักษณ์ เอี่ยมสกุล : การศึกษาและวิจัยสลักเหล็กทดแทนสลักอะลูมิเนียมที่ชำรุดของสะพานทหาร เอ็ม จี บี. ( Study and Research of the Iron Pin to Replace the M.G.B. (Medium Girder Bridge) Military Bridge Aluminum Pin) อ.ที่ปรึกษาหลัก : รศ. ดร.วิฑิต ปานสุข, อ.ที่ปรึกษาร่วม : ผศ. ดร.ณัฐพร นุตยยะสกุล

ในทางทหารสะพานเป็นยุทธโปกรณ์ที่มีความสำคัญสำหรับการส่งกำลังทหารเข้าไปในพื้นที่สู้รบในยามสงคราม อีกทั้งยังมีประโยชน์ในการใช้งานด้านงานเร่งด่วนฉุกเฉิน รวมทั้งงานบุกเบิกในการสร้างถนนหรือการใช้นิยามเกิดภัยพิบัติทางธรรมชาติ ได้แก่ น้ำท่วม ซึ่งเป็นเหตุทำให้ทางถูกตัดขาด ทหารช่างจึงใช้สะพานทหารในการเข้าไปแก้ปัญหามหาความเดือดร้อนแก่ผู้ประสบภัย ในปัจจุบันสะพานทหาร เอ็ม จี บี เกิดการชำรุดในบริเวณข้อต่อของสลักสะพานจึงทำให้ไม่สามารถใช้งานได้ รวมทั้งวัสดุที่ใช้ทำสลักสะพานนั้นเป็นวัสดุที่ไม่มีการผลิตเนื่องจากเป็นความลับทางการทหารของประเทศที่ผลิต การวิจัยครั้งนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาพฤติกรรมการรับแรงเฉือนและโมเมนต์ดัดของสะพานทหาร เอ็ม จี บี และสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ นำผลที่ได้เปรียบเทียบกับวิเคราะห์กับแรงเฉือนโมเมนต์ที่ได้ศึกษาเพื่อหาวัสดุเหล็กทดแทนวัสดุอะลูมิเนียมที่ชำรุด โดยจากการทดสอบความแข็งแรงของวัสดุเหล็ก S45C พบว่ามีความแข็งแรงและสามารถใช้ทดแทนวัสดุอะลูมิเนียมที่ชำรุดในปัจจุบันได้



สาขาวิชา	วิศวกรรมและเทคโนโลยีการป้องกันประเทศ	ลายมือชื่อนิสิต .....
ปีการศึกษา	2565	ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก .....
		ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาร่วม .....

# # 6370431821 : MAJOR DEFENSE ENGINEERING AND TECHNOLOGY

KEYWORD: Iron Pin, Medium Girder Bridge Military, Shear force, Bending Moment

Thunyaluck Aiesakul : Study and Research of the Iron Pin to Replace the M.G.B. (Medium Girder Bridge) Military Bridge Aluminum Pin. Advisor: Assoc. Prof. WITHIT PANSUK, Ph.D. Co-advisor: Asst. Prof. Nuthaporn Nuttayasakul, Ph.D.

In the military, a bridge is important equipment for sending troops into combat areas during wartime. It is also useful in emergency applications. Including pioneering work in road construction or use in times of natural disasters, such as floods, which cause the way to be cut off. Engineers therefore use the military bridge to solve problems and alleviate the suffering of the victims. At present, the MGB Military Bridge is damaged in the joints of the bridge bolts, thus making it unusable. Including the material used to make the bridge is not manufactured because it is a military secret of the country of production. The purpose of this research was to study the shear behavior and bending moment of the MGB Military Bridge and to construct a finite element model. The results were compared and analyzed with the studied shear moment to find a replacement for the damaged aluminum material. By testing the strength of S45C steel material, it is found that it is strong and can be used to replace the damaged aluminum material.

Field of Study: Defense Engineering and  
Technology

Student's Signature .....

Academic Year: 2022

Advisor's Signature .....

Co-advisor's Signature .....

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงได้ ผู้วิจัยรู้สึกทราบบ้างและขอขอบคุณคณะกรรมการพิจารณา วิทยานิพนธ์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ทุกท่านสำหรับการอนุมัติเห็นชอบ วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ขอขอบคุณคณะกรรมการกองทุนพัฒนา โรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้าฯ สำหรับ เงินทุนทำวิทยานิพนธ์ ขอขอบคุณ รศ.ดร.วิฑิต ปานสุข และ ผศ.พ.อ.ดร.ณัฐพร นุตยะสกุล สำหรับ คำแนะนำและคำปรึกษาในการทำวิทยานิพนธ์ ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ ช.ร้อย 18 กองร้อยทหารช่างสะพาน ผสม ค่ายภาณุรังษีส่วนที่ 2 จังหวัดราชบุรี สำหรับข้อมูลต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยและขอขอบคุณ บุคคลรอบข้างที่ช่วยเป็นกำลังใจในการศึกษาในครั้งนี้

ธัญญลักษณ์ เอี่ยมสกุล



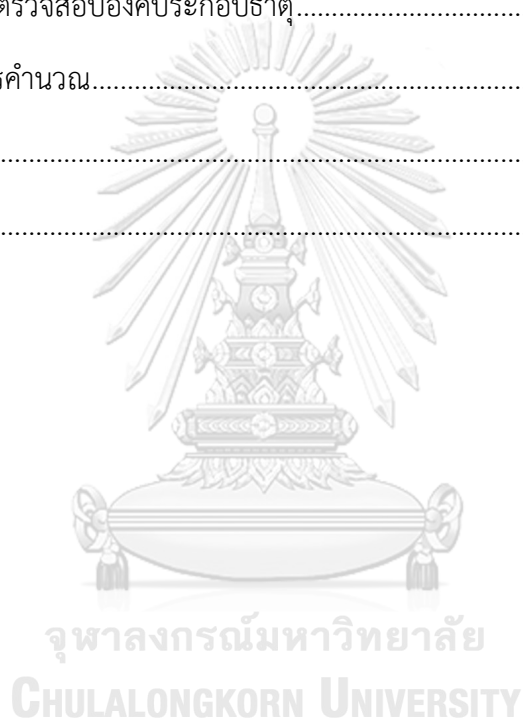
## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ค
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ .....	ง
กิตติกรรมประกาศ .....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ณ
สารบัญรูปภาพ.....	ญ
บทที่ 1 บทนำ .....	14
1.1 ที่มาและความสำคัญ.....	14
1.2 วัตถุประสงค์ .....	17
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	17
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	17
บทที่ 2 ทบทวนวรรณกรรม .....	18
2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	18
2.2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	27
2.2.1 ข้อมูลสะพานทหารเอ็ม จี ปี .....	27
2.2.2 ชิ้นส่วนหลักของสะพานทหาร เอ็ม จี ปี.....	32
2.2.3 ข้อมูลโลหะกลุ่มเหล็ก .....	33
2.2.4 ความเค้นและความเครียดทางวิศวกรรม .....	37
2.2.5 การทดสอบแรงดึง .....	40
2.2.6 พฤติกรรมของความเค้น-ความเครียด .....	42
2.2.7 คุณสมบัติความต้านทานแรงดึง.....	43

2.2.8	เส้นอิทธิพล.....	45
2.2.8.1	การเขียนเส้นอิทธิพลโดยใช้หลักการของ Müller-Breslau.....	46
2.2.9	การประยุกต์ใช้เส้นอิทธิพลสำหรับโครงสร้างที่รับน้ำหนักบรรทุกเคลื่อนที่ .....	54
2.2.10	แรงเฉือนและโมเมนต์ดัด .....	57
2.2.10.1	พฤติกรรมการรับแรงของคานาดีเทอร์มิเนท.....	58
2.2.11	ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์.....	61
2.2.12	โปรแกรม ATENA .....	64
บทที่ 3	ระเบียบวิธีวิจัย .....	67
3.1	การศึกษาข้อมูล .....	67
3.2	การตรวจสอบวัสดุของตัวสลักสะพานทหาร เอ็ม จี บี ที่ชำรุด.....	67
3.3	การวิเคราะห์หาตำแหน่งจุดที่รับแรงสูงสุดโดยใช้หลักการเส้นอิทธิพล .....	68
3.4	การวิเคราะห์หาแรงเฉือนและโมเมนต์ดัด.....	68
3.5	การสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของตัวสลักสะพาน.....	68
3.6	การทดสอบวัสดุทดแทน.....	68
บทที่ 4	ผลการทดสอบ .....	71
4.1	ผลการตรวจสอบองค์ประกอบธาตุของชิ้นส่วนสลักสะพานทหาร เอ็ม จี บี ที่ชำรุด.....	71
4.2	ผลค่านอนน้ำหนักบรรทุกชนิดแผ่สม่ำเสมอของสะพานทหาร เอ็ม จี บี แบบช่วงเดียวชั้นเดียว.....	72
4.3	ผลจากการวิเคราะห์ตำแหน่งที่รับแรงเฉือนและโมเมนต์ดัดสูงสุดโดยใช้เส้นอิทธิพล .....	73
4.3.1	วิเคราะห์หาจุดที่รับแรงเฉือนสูงสุดและค่าของแรงเฉือนที่เกิดขึ้นบนสะพาน.....	73
4.3.2	วิเคราะห์หาจุดที่รับโมเมนต์ดัดสูงสุดและค่าของโมเมนต์ดัดที่เกิดขึ้นบนสะพาน.....	74
4.4	ผลจากการวิเคราะห์หาแรงเฉือนและโมเมนต์ดัดที่เกิดขึ้นกับตัวสลักของสะพานทหาร เอ็ม จี บี .....	74
4.4.1	คำนวณหาค่าความเค้นเฉือนของตัวสลักสะพาน .....	74
4.4.2	คำนวณหาค่าโมเมนต์ดัดของตัวสลักสะพานทหาร เอ็ม จี บี .....	75
4.5	ผลจากการวิเคราะห์การรับแรงของตัวสลักสะพานด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ .....	76



4.6.2 ทำการ Mesh และวิเคราะห์ตัวสลักสะพานโดยใช้วิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์.....	77
4.6 ผลจากการทดสอบวัสดุทดสอบโดยการใช้เครื่องทดสอบบอเนกประสงค์ .....	77
บทที่ 5 สรุปผลการทดสอบและข้อเสนอแนะ.....	81
5.1 สรุปผลการทดสอบ .....	81
5.2 ข้อเสนอแนะ .....	81
ภาคผนวก .....	82
ภาคผนวก ก ผลการตรวจสอบองค์ประกอบธาตุ.....	83
ภาคผนวก ข รายการคำนวณ.....	84
บรรณานุกรม.....	91
ประวัติผู้เขียน.....	94



## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1 แสดงรายละเอียดการประกอบสร้างของสะพานแบบโครงชั้นเดียว .....	30
ตารางที่ 2 แสดงรายละเอียดการประกอบสร้างของสะพาน เอ็ม จี บี แบบโครงสองชั้น.....	31
ตารางที่ 3 คุณสมบัติของ SCM440, S45C, SS400 และ S20C.....	36
ตารางที่ 4 มอดูลัสความยืดหยุ่น มอดูลัสเฉือน และอัตราส่วนปัวซองของ โลหะบางชนิดที่ อุณหภูมิห้อง .....	42
ตารางที่ 5 ผลการทดสอบวัสดุ S45C.....	79
ตารางที่ 6 แสดงแรงปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในตำแหน่งต่างๆบนสะพานทหาร เอ็ม จี บี.....	86

## สารบัญรูปภาพ

	หน้า
รูปที่ 1 สะพานทหาร เอ็ม จี บี แบบโครงสร้างสองชั้นขณะใช้งาน .....	15
รูปที่ 2 ชิ้นส่วนโครงสร้างบนสะพาน เอ็ม จี บี .....	16
รูปที่ 3 สลักสะพาน เอ็ม จี บี ที่ชำรุด .....	16
รูปที่ 4 ลักษณะหน้าตัดและการเสริมเหล็กของคานคองกรีตเสริมเหล็ก .....	19
รูปที่ 5 แสดงลักษณะหน้าตัดและการเสริมเหล็กของคานคองกรีตอัดแรง .....	20
รูปที่ 6 เปรียบเทียบการวิเคราะห์โดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์กับผลทดสอบของคานคองกรีตเสริมเหล็ก .....	20
รูปที่ 7 รูปแบบการแตกร้าวในการวิเคราะห์โดยไฟไนต์เอลิเมนต์เทียบกับการแตกร้าวในคานทดสอบจริง ..	21
รูปที่ 8 ผลการเปรียบเทียบการวิเคราะห์โดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์กับผลการทดสอบของคานคองกรีตอัดแรง ...	21
รูปที่ 9 การโหลดชิ้นงาน .....	22
รูปที่ 10 ก่อนการทดสอบการดึงโดยเครื่องอเนกประสงค์ .....	22
รูปที่ 11 แสดงการจำลองโมเดลและการ mesh โดยใช้โปรแกรม ABAQUS .....	23
รูปที่ 12 แสดงการเสียรูปของหมุดย้ำ .....	23
รูปที่ 13 แสดงผลการเปรียบเทียบการวิเคราะห์โดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์กับผลการทดสอบชิ้นงานจริง .....	24
รูปที่ 14 กราฟเปรียบเทียบผลของแบบจำลองกับผลการทดสอบ .....	25
รูปที่ 15 เปรียบเทียบผลการทดสอบจริงกับการใช้โปรแกรม ATENA .....	25
รูปที่ 16 ตำแหน่งรับแรงกระทำบนชิ้นงานทดสอบการจับยึด .....	26
รูปที่ 17 ชิ้นงานทดสอบ (ก) ตำแหน่งติดตั้งสตรนเกจ (ข) รอยแตกที่เกิดจากการทดสอบความล้า ....	26
รูปที่ 18 อายุความล้าของวัสดุ S45C .....	27
รูปที่ 19 แสดงการเคลื่อนย้ายสะพานทหาร เอ็ม จี บี .....	28
รูปที่ 20 การยกประกอบสะพานทหาร เอ็ม จี บี แบบโครงสร้างชั้นเดียว .....	29
รูปที่ 21 สะพานทหาร เอ็ม จี บี แบบโครงสร้างสองชั้นรับน้ำหนักได้สูงสุด 60 ตันยาว 200 เมตร .....	29

รูปที่ 22	สะพานทหาร เอ็ม จี บี แบบโครงชั้นเดียว.....	30
รูปที่ 23	สะพานทหาร เอ็ม จี บี แบบโครงสองชั้น .....	31
รูปที่ 24	สะพานทหาร เอ็ม จี บี แบบโครงสองชั้นเสริมความแข็งแรง .....	32
รูปที่ 25	ชิ้นส่วนโครงบนของสะพาน.....	32
รูปที่ 26	ชิ้นส่วนแผงพื้นของสะพาน.....	33
รูปที่ 27	ผลของแรงดึงที่ทำให้เกิดการยืดตัวและความเครียดเชิงเส้นที่เป็นบวก .....	37
รูปที่ 28	ผลของแรงอัดที่ทำให้เกิดการหดตัวและความเครียดเชิงเส้นที่เป็นลบ.....	38
รูปที่ 29	แสดงความเครียดเฉือน $\gamma$ โดยที่ $\gamma = \tan \theta$ .....	38
รูปที่ 30	แสดงการแปรรูปแบบบิด (มุมบิด $\phi$ ) ซึ่งเกิดทอร์ค .....	38
รูปที่ 31	ชิ้นงานทดสอบแรงดึงมาตรฐานแบบที่มีหน้าตัดเป็นวงกลม .....	40
รูปที่ 32	มาตรฐาน ASTM Standard E 8 และ E 8M ที่ใช้ในการดึงทดสอบวัสดุเหล็ก .....	41
รูปที่ 33	เครื่องมืออุปกรณ์ที่ใช้ทดสอบความเค้น – ความเครียดในรูปแบบของแรงดึง .....	41
รูปที่ 34	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างมอดุลัสความยืดหยุ่นกับอุณหภูมิ .....	43
รูปที่ 35	ความเค้นจุดคราก.....	44
รูปที่ 36	ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดทางวิศวกรรมจนถึงจุดแตกหัก .....	45
รูปที่ 37	เส้นอิทธิพลของแรงปฏิกิริยาของคานช่วงเดียวธรรมดา .....	46
รูปที่ 38	เส้นอิทธิพลสำหรับแรงปฏิกิริยาในแนวตั้งของคานช่วงเดียว.....	47
รูปที่ 39	เส้นอิทธิพลสำหรับแรงเฉือนของคานช่วงเดียว .....	50
รูปที่ 40	เส้นอิทธิพลสำหรับโมเมนต์ดัดของคานช่วงเดียว .....	52
รูปที่ 41	การหาผลตอบสนองของโครงสร้างที่รับน้ำหนักบรรทุกเคลื่อนที่แบบจุด .....	55
รูปที่ 42	การหาผลตอบสนองของโครงสร้างที่รับน้ำหนักบรรทุกเคลื่อนที่แบบแผ่สม่ำเสมอ.....	56
รูปที่ 43	แสดงพฤติกรรมการรับแรงของคาน .....	58
รูปที่ 44	แสดงการพิจารณาแรงที่เกิดขึ้นบนคานช่วงเดียวธรรมดา.....	58
รูปที่ 45	แสดงเครื่องหมายและสัญลักษณ์แทนแรงในแนวแกนซึ่งมีทั้งแรงอัดและแรงดึง.....	59

รูปที่ 46	แสดงเครื่องหมายและสัญลักษณ์แทนแรงเฉือน.....	60
รูปที่ 47	แสดงเครื่องหมายและสัญลักษณ์แทนโมเมนต์ดัด.....	60
รูปที่ 48	การใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อคำนวณการยุบตัวของโครงสร้างรถยนต์ขณะเกิดการชน ..	61
รูปที่ 49	แสดงการแบ่งขอบเขตของปัญหาให้เป็นเอลิเมนต์ย่อย ๆ .....	62
รูปที่ 50	เอลิเมนต์สามเหลี่ยมสามจุดต่อ .....	63
รูปที่ 51	โครงสร้างทรงสี่หน้า (Tetrahedral element) .....	65
รูปที่ 52	โครงสร้างทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้า (Brick Element) .....	65
รูปที่ 53	โครงสร้างรูปทรงแบบลิ้ม (Wedge element).....	66
รูปที่ 54	เศษชิ้นส่วนของสลักสะพานทหาร เอ็ม จี บี ที่ชำรุด.....	67
รูปที่ 55	การยึดจับวัสดุทดสอบ S45C ด้วยเครื่องทดสอบอเนกประสงค์.....	69
รูปที่ 56	สะพานช่วงเดียวชั้นเดียว รับน้ำหนักไม่เกิน 60 ตัน รับน้ำหนักรถถัง T-84 OPLOT-M....	72
รูปที่ 57	แสดงค่าแรงเฉือนที่มีค่ามากที่สุดที่เกิดขึ้นบริเวณตำแหน่ง $X_1$ .....	73
รูปที่ 58	แสดงค่าโมเมนต์ดัดที่มีค่ามากที่สุดที่เกิดขึ้นบริเวณตำแหน่ง $X_2$ .....	74
รูปที่ 59	ขนาดสลักสะพานในชิ้นส่วนโครงบนสะพาน .....	75
รูปที่ 60	คำนวณหาพื้นที่สลักสะพานที่ชำรุดโดยใช้โปรแกรม AutoCAD 2020 .....	75
รูปที่ 61	แสดงการกำหนดค่าพารามิเตอร์ Young's Modulus และค่า Poisson's Ratio .....	76
รูปที่ 62	แสดงการวิเคราะห์ด้วยวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์โดยใช้โปรแกรม ATENA.....	77
รูปที่ 63	การทดสอบการดึงวัสดุชิ้นงานที่ 1 .....	78
รูปที่ 64	การทดสอบการดึงวัสดุชิ้นงานที่ 2 .....	78
รูปที่ 65	การทดสอบการดึงวัสดุชิ้นงานที่ 3 .....	78
รูปที่ 66	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียดของวัสดุทดสอบทั้ง 3 ชิ้นงาน .....	79
รูปที่ 67	ผลการวิเคราะห์หาค่าประกอบธาตุทางเคมีของชิ้นส่วนสลักสะพาน.....	83
รูปที่ 68	Free body diagram ของสะพานทหาร เอ็ม จี บี แบบสะพานช่วงเดียวชั้นเดียว.....	85
รูปที่ 69	แสดงตำแหน่งที่เกิดแรงเฉือนสูงสุดคือบริเวณจุด B .....	86

รูปที่ 70 แสดงตำแหน่งที่เกิดโมเมนต์ดัดที่สูงสุดคือบริเวณจุด C.....	87
รูปที่ 71 คำนวณแรงเฉือนที่เกิดขึ้นบนสะพานทหาร เอ็ม จี บี โดยใช้การวิเคราะห์โดยเส้นอิทธิพล .	87
รูปที่ 72 แสดงค่าโมเมนต์ดัดที่เกิดจากการคำนวณ.....	89



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ที่มาและความสำคัญ

สะพาน คือ สิ่งที่สร้างหรือทำขึ้นสำหรับข้ามแม่น้ำลำคลอง เป็นต้น สิ่งที่สร้างหรือทำขึ้นลงในน้ำสำหรับขึ้นลง [1] สะพานเป็นสิ่งก่อสร้างที่ช่วยร่นระยะทางและลดเวลาในการเดินทางได้เป็นอย่างมาก สะพานสามารถถูกสร้างขึ้นจากต้นไม้หรือก้อนหิน ที่สามารถหาได้ง่ายจากธรรมชาติ ด้วยการนำต้นไม้มาวางพาดเป็นทางเดินข้ามระหว่างสองฝั่ง หรือการนำก้อนหินมาวางเรียงกันให้เป็นทางเดิน เป็นต้น

การออกแบบสะพานและความสูงของสะพาน จะขึ้นอยู่กับสิ่งกีดขวางด้านล่าง รวมถึงการจราจรด้านล่าง เช่น รถ เรือ สามารถผ่านได้ การก่อสร้างสะพานมีจุดประสงค์เพื่อให้การสัญจรมีการต่อเนื่องระหว่างทางที่มีการสร้างไว้แล้ว ซึ่งถ้ามองย้อนกลับไปในอดีต อาจกล่าวได้ว่าจะสะพานในยุคเริ่มแรกมักไม่มีความซับซ้อนในการสร้าง เมื่อเทียบกับยุคปัจจุบัน ในอดีต สังคมไทยได้พัฒนาการก่อสร้างสะพานข้ามแม่น้ำมาช้านานโดยปรากฏหลักฐานว่ามีมาตั้งแต่สมัยอยุธยา ส่วนใหญ่เป็นสะพานขนาดเล็กซึ่งพบบ่อยรากฐานและซากของสะพานอยู่พอสมควรตามเกาะเมืองอยุธยา อาทิ สะพานป่าถ่าน ซึ่งเป็นสะพานข้ามคลองเล็กๆ บริเวณหน้าวัดมหาธาตุและวัดราชบูรณะ สะพานชีกุล เป็นสะพานข้ามคลองเล็กๆ ในเมือง ทั้งยังพบสะพานอีกหลายแห่งที่ใช้เป็นทางสัญจรข้ามคลองท่อ ซึ่งคลองขุดขวางตัวเมืองอยุธยาเพื่อใช้เป็นทางสัญจรหลักในสมัยนั้น

ซึ่งในปัจจุบันได้มีการพัฒนาความรู้ทางด้านวิศวกรรมมาประยุกต์ใช้ โดยออกแบบให้สะพานมีความซับซ้อนและมีความทันสมัยมากขึ้น มีการออกแบบและสร้างสถาปัตยกรรมสะพานในยุโรปมาเป็นต้นแบบ อย่างเช่น สะพานปง อาเล็กซ็องดร์ ที่รวัว (Pont Alexandre III) กรุงปารีส ถูกนำมาเป็นต้นแบบของสะพานมโหฬารรังสรรค์ ซึ่งใช้ข้ามคลองผดุงกรุงเกษม นอกจากนี้ยังมีการออกแบบสะพานที่หลากหลายและสามารถรับน้ำหนักบรรทุกได้มากขึ้น มีเทคโนโลยีการสร้าง เช่น การพัฒนาทางด้านวัสดุศาสตร์ที่เข้ามาดำเนินการทำให้มีความปลอดภัยในการใช้งานและออกแบบการใช้งานให้ถูกประเภทยิ่งขึ้น

ในทางทหารนั้นสะพานเป็นยุทธโธปกรณ์ที่มีความสำคัญสำหรับการส่งกำลังทหารเข้าไปในพื้นที่สู้รบในยามสงคราม หน่วยทหารมีความต้องการสะพานที่สามารถสนับสนุนยานพาหนะของกองพล

ทหารราบให้มีความและสามารถขนส่งได้หลายรูปแบบ ทั้งยานพาหนะบรรทุก รวมถึงการขนส่งทางอากาศ เพื่อให้การดำเนินการทางยุทธวิธีเป็นไปตามแผนที่วางไว้ ดังนั้นทหารช่างจึงจำเป็นต้องมียุทธโปกรณ์ที่สามารถแก้ไขปัญหาดังกล่าวได้อย่างรวดเร็วและมีประสิทธิภาพ

สะพานทหารยังมีประโยชน์อื่นนอกเหนือจากใช้ฝึกทหาร งานเร่งด่วนฉุกเฉิน รวมทั้งงานบุกเบิกในการสร้างถนน หรือการใช้ในยามสงครามรวมทั้งในกรณีที่เกิดภัยพิบัติทางธรรมชาติ ได้แก่ น้ำท่วม ซึ่งเป็นเหตุทำให้ทางถูกตัดขาด ทหารช่างจะใช้สะพานทหารในการเข้าไปแก้ปัญหาบรรเทาความเดือดร้อนแก่ผู้ประสบภัยได้ ซึ่งถือเป็นงานบรรเทาสาธารณภัย

สะพานทหารเอ็ม จี บี (M.G.B. Medium Girder Bridge) เป็นสะพานที่ได้ออกแบบโดยประเทศอังกฤษ ซึ่งได้พัฒนามาจากสะพานเบเลียร์ M2 ซึ่งเริ่มใช้ในกองทัพประเทศอังกฤษเมื่อ พ.ศ. 2514 ซึ่งปัจจุบันมีใช้มากกว่า 20 ประเทศ ทั้งสหรัฐอเมริกา ออสเตรเลีย ไทย ฯลฯ เป็นต้น เป็นสะพานโครงแผงขนาดกลางที่มีน้ำหนักเบาสร้างด้วยกำลังคน ทำได้ทั้งในพื้นที่ส่วนหน้าและส่วนหลัง ขึ้นส่วนของสะพานทำด้วยโลหะผสม 3 อย่าง คือ สังกะสี แมกนีเซียมอัลลอยด์ และอะลูมิเนียม ขึ้นส่วนที่หนักที่สุดหนักไม่เกิน 200 กิโลกรัม สามารถใช้กำลังพลยกเพียง 2 ถึง 6 นาย ใช้น้ำหนักได้ตั้งแต่ 17 ตันถึง 60 ตัน [2]



รูปที่ 1 สะพานทหาร เอ็ม จี บี แบบโครงสองชั้นขณะใช้งาน [2]



ปัจจุบันสะพานทหาร เอ็ม จี บี เกิดการชำรุดในบริเวณข้อต่อของสลักสะพาน จึงทำให้ไม่สามารถใช้งานได้ รวมทั้งวัสดุที่ใช้ทำสะพานนั้นเป็นวัสดุที่ไม่มีการผลิตเนื่องจากเป็นความลับทางการทหารของประเทศที่ผลิต โดยกรมการทหารช่างได้ทำการซ่อมสลักสะพานโดยใช้วัสดุอะลูมิเนียมที่มีเกรดใกล้เคียงกับวัสดุอะลูมิเนียมที่ชำรุดในปัจจุบัน แต่เมื่อนำกลับมาใช้งานพบว่าเกิดการชำรุดที่ตัวสลักสะพานเช่นเดิม ผู้วิจัยจึงเล็งเห็นความสำคัญของปัญหาที่ได้กล่าวไปข้างต้นจึงได้ทำวิจัยเพื่อศึกษาพฤติกรรมการรับแรงเฉือนและโมเมนต์ของสะพานทหาร เอ็ม จี บี และสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์และทำการทดสอบวัสดุเหล็กเพื่อทดแทนวัสดุที่ชำรุดในปัจจุบัน



รูปที่ 2 ชิ้นส่วนโครงบนสะพาน เอ็ม จี บี



รูปที่ 3 สลักสะพาน เอ็ม จี บี ที่ชำรุด

## 1.2 วัตถุประสงค์

- 1) เพื่อศึกษาพฤติกรรมการรับแรงเฉือนและโมเมนต์ของสะพานทหาร เอ็ม จี บี
- 2) เพื่อสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ ของสลักสะพานทหาร เอ็ม จี บี นำผลที่ได้เปรียบเทียบและวิเคราะห์กับแรงเฉือนโมเมนต์ที่ได้ศึกษา เพื่อหาวัสดุทดแทน

## 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

วิเคราะห์ความเหมาะสมของวัสดุทดแทนของสลักสะพานทหาร เอ็ม จี บี

## 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) สามารถใช้เป็นแนวทางในการหาวัสดุทดแทนสลักที่ชำรุดของสะพานทหาร เอ็ม จี บี
- 2) ขยายองค์ความรู้ด้านการใช้วัสดุทดแทนได้มากขึ้น



## บทที่ 2

### ทบทวนวรรณกรรม

#### 2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

อรรถพล อติชาติ [3] ศึกษาพฤติกรรมของรอยต่อในระบบคานและเสาของอาคารที่ก่อสร้างด้วยระบบขึ้นส่วนสำเร็จรูป การศึกษาพฤติกรรมสามารถทำได้โดยการทดสอบในห้องปฏิบัติการแต่การหล่อแบบเพื่อทำการทดสอบนั้นยังคงต้องใช้เวลาและค่าใช้จ่าย โดยผู้ทำการวิจัยได้ใช้วิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์เข้ามาศึกษาพฤติกรรมของรอยต่อระหว่างคาน-เสา 3 รูปแบบ โดยแบ่งเป็นรอยต่อคาน-เสา ที่หล่อเป็นเนื้อเดียวกัน และรอยต่อคาน-เสา สำเร็จรูป จากผลการวิเคราะห์ด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์พบว่าความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับการเคลื่อนที่ของรอยต่อที่หล่อเป็นเนื้อเดียวกันและรอยต่อของขึ้นส่วนสำเร็จรูประหว่างคาน-เสา ที่ได้มีความใกล้เคียงกันกับผลการทดสอบ

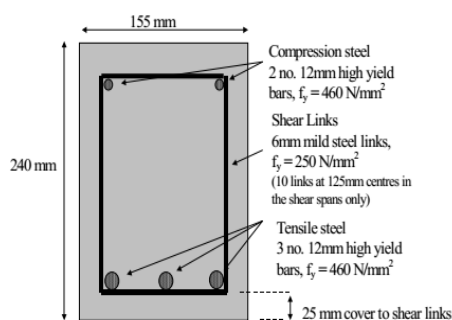
ธนกร งามจริงจิต และคณะ[4] ศึกษาปัญหาและความเป็นไปได้ในการออกแบบปรับปรุงสะพานเพื่อยุทธวิธีข้ามลำน้ำของทหารช่างโดยการวิเคราะห์และออกแบบโครงสร้างสะพานที่มีอยู่เป็นการศึกษาการออกแบบอุปกรณ์และวิธีการปรับปรุงสะพานทหารเอ็ม 4 และสะพานทหาร เอ็ม จี บี ซึ่งทั้งสองเป็นสะพานที่ใช้งานอยู่ในกองทัพ ผู้วิจัยได้ออกแบบอุปกรณ์สำหรับเชื่อมต่อตงอะลูมิเนียมของสะพานเอ็ม 4 ให้สามารถใช้งานกับเรือทุ่นโลหะผสมของสะพาน เอ็ม จี บี ให้สามารถรับน้ำหนักบรรทุกได้สูงสุด 60 ตัน โดยนำค่าโมเมนต์ดัดและแรงเฉือนสูงสุดไปออกแบบและทำการทดสอบอุปกรณ์ที่ออกแบบ

โชคชัย ส่งเจริญทรัพย์ [5] ศึกษาการนำวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ มาใช้วิเคราะห์ค่าความเค้นของวัตถุ ซึ่งได้รับความนิยมในทางวิศวกรรมศาสตร์เนื่องจากวิธีนี้ให้ผลลัพธ์ ที่ใกล้เคียงความเป็นจริงและลดปัญหาเกี่ยวกับความล่าช้าในการหาผลลัพธ์ การนำวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์มาจำลองการเปลี่ยนรูปรวมไปถึงการแตกของวัตถุเปราะทรงตัน โดยวิเคราะห์แบบไฟไนต์เอลิเมนต์ภายใต้เงื่อนไขและขอบเขตที่กำหนดเมื่อมีแรงกระทำภายนอกที่พื้นผิววัตถุ และการออกแบบวิธีการแตกเอลิเมนต์ย่อยภายในวัตถุและทำการทดลองกับวัตถุที่มีลักษณะเป็นแผ่นสี่เหลี่ยม

พจนันต์ หนูบรรจง [6] ในการวิเคราะห์คานคอนกรีตอัดแรงโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยอาศัยแบบจำลอง 3 มิติ ในการวิเคราะห์ผลพบว่าแบบจำลองสามารถแสดงพฤติกรรมภายใต้น้ำหนักบรรทุก

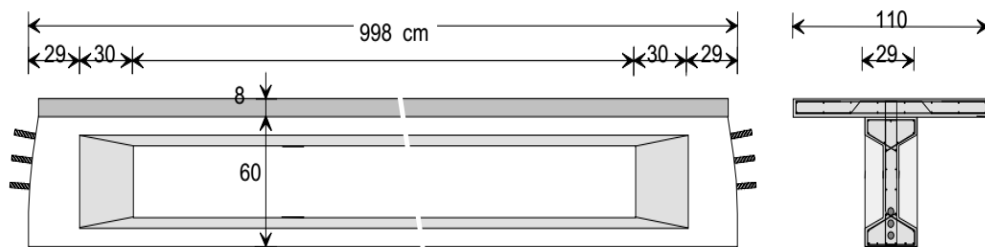
แบบสลิตได้สอดคล้องกับผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการ โดยที่แบบจำลองสามารถใช้เป็นตัวอย่งศึกษาแทนคานทดสอบจริงซึ่งจะให้ผลที่มีความแตกต่างจากผลการทดสอบประมาณ 5.5 % สำหรับการทำนายพฤติกรรมในช่วงเชิงเส้น (Elastic Range) และพฤติกรรมในช่วงไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear Range) แบบจำลองยังมีแนวโน้มของผลการวิเคราะห์ที่สอดคล้องกับคานทดสอบจริง โดยแบบจำลองสามารถประเมินค่าการรับน้ำหนักบรรทุกสูงสุดของคานคอนกรีตอัดแรงที่มีค่าความแตกต่างประมาณ 16.6% เมื่อเทียบกับน้ำหนักบรรทุกสูงสุดที่ได้จากการทดสอบ เมื่อได้นำผลที่ได้จากการวิเคราะห์โดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์มาเทียบเคียงกับผลการทดสอบ สังเกตได้ว่าการวิเคราะห์คานคอนกรีตอัดแรงจะให้ผลเชิงอนุรักษ์ (Conservative) กล่าวคือจะให้ม้ค่าน้ำหนักบรรทุกสูงสุดต่ำกว่าค่าที่ได้จากการทดสอบ

F.Panning [7] ได้ทำการสร้างแบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์โดยใช้โปรแกรมการวิเคราะห์ ANSYS ซึ่งเป็นการวิเคราะห์ถึงพฤติกรรมแบบไม่เป็นเชิงเส้นในการรับน้ำหนักบรรทุกของ คานคอนกรีตเสริมเหล็กและคานคอนกรีตอัดแรงโดยได้สร้างแบบจำลองสามมิติของคาน ตัวอย่างที่ได้ถูกทดสอบในห้องปฏิบัติการ การสร้างแบบจำลองได้พิจารณาถึงความสัมพันธ์ ระหว่างความเค้นและความเครียด และคุณสมบัติของวัสดุแบบไม่เป็นเชิงเส้นที่ได้จากการนำคอนกรีตรูปทรงกระบอกไปทดสอบในห้องปฏิบัติการ เพื่อให้ผลที่ได้จากการวิเคราะห์มีความใกล้เคียงกับคานทดสอบจริงในการสร้างแบบจำลองได้กำหนดการใช้เอลิเมนต์แทนคอนกรีตและเหล็กเสริม โดยเอลิเมนต์ของคอนกรีตจะมีคุณสมบัติแทนพฤติกรรมของคอนกรีตในช่วงไม่เป็นเชิงเส้น โดยที่เอลิเมนต์จะประกอบไปด้วยการแตกร้าวในส่วนที่รับแรงดึง การระเบิดออกในส่วนรับแรงอัด และได้มีการสร้างแบบจำลองของเหล็กเสริมเพื่อเพิ่มค่าสติเฟนส์ให้กับตัวคานในการสร้างแบบจำลองได้แบบการสร้างออกเป็น 2 ชุดโดยชุดที่หนึ่งเป็นแบบจำลองของคานคอนกรีตอัดแรงซึ่งมีขนาดหน้าตัด และการเสริมเหล็กแสดงได้ดังรูปที่ 2.1

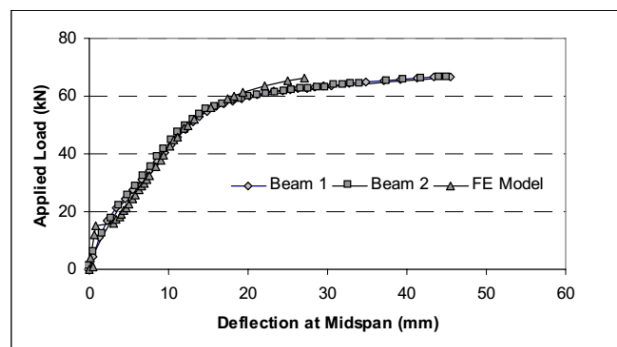


รูปที่ 4 ลักษณะหน้าตัดและการเสริมเหล็กของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก [7]

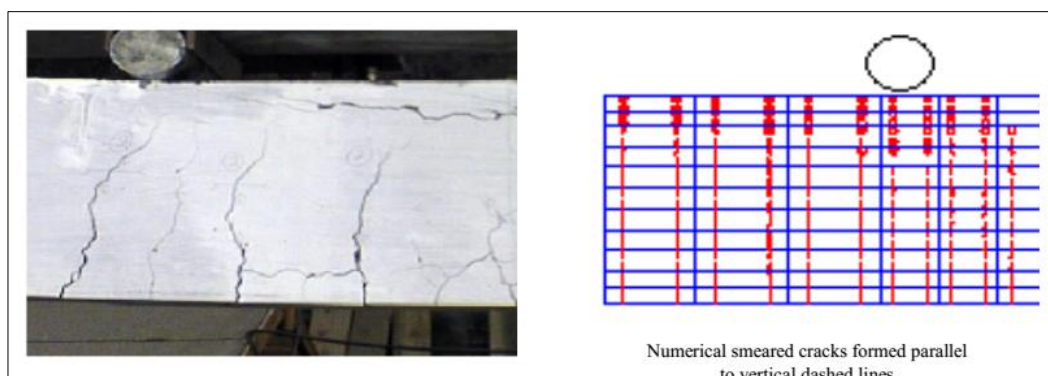
ชุดที่ 2 เป็นการสร้างแบบจำลองคานคอนกรีตอัดแรงที่มีขนาดความยาว 30 เมตร โดยสร้างแบบจำลองได้ทำการย่อสัดส่วนให้เหลือเพียง 9 เมตร ซึ่งมีขนาดและการเสริมเหล็กแสดงรูปที่ 5 คานตัวนี้จะเป็นคานคอนกรีตอัดแรงชนิดดิ่งลวดอัดแรงที่หลังคานได้ถูกเพิ่มน้ำหนักบรรทุกจนกระทั่งเกิดการวิบัติ การเพิ่มน้ำหนักบรรทุกโดยการแบ่งน้ำหนักบรรทุกออกเป็น 4 ช่วงจะช่วยให้การวิเคราะห์ปัญหาที่มีความง่ายขึ้น โดยได้ทำการเก็บบันทึกข้อมูลระหว่างค่าการโก่งตัวและค่าความเครียดที่ผิวนอกของคอนกรีต เพื่อใช้เปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการวิเคราะห์โดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ดังรูปที่ 6 ซึ่งในการวิเคราะห์ผลโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จะพบว่าคาน้ำหนักบรรทุกประลัยที่ได้จากผลการวิเคราะห์จะมีแนวโน้มที่ใกล้เคียงกับผลที่ได้จากการทดสอบโดยผลของการวิเคราะห์จะมีพฤติกรรมเป็นแบบเชิงเส้นจนกระทั่ง มีการแตกร้าวขึ้นครั้งแรก เนื่องจากการวิเคราะห์การเสียรูปแบบพลาสติก ในเหล็กเสริมรับแรงดึงทำให้เกิดการไม่ลู่เข้าของปัญหาจึงส่งผลให้ค่าการโก่งตัวที่กึ่งกลางมีค่าน้อยกว่าค่าการโก่งตัวที่ได้จากการทดสอบ ลักษณะของการแตกร้าวสามารถแสดงเปรียบเทียบระหว่างการวิเคราะห์กับการทดสอบโดยทางซ้ายมือเป็นการแตกร้าวในคานทดสอบ ทางขวามือเป็นการแตกร้าวจากการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ ดังรูปที่ 7



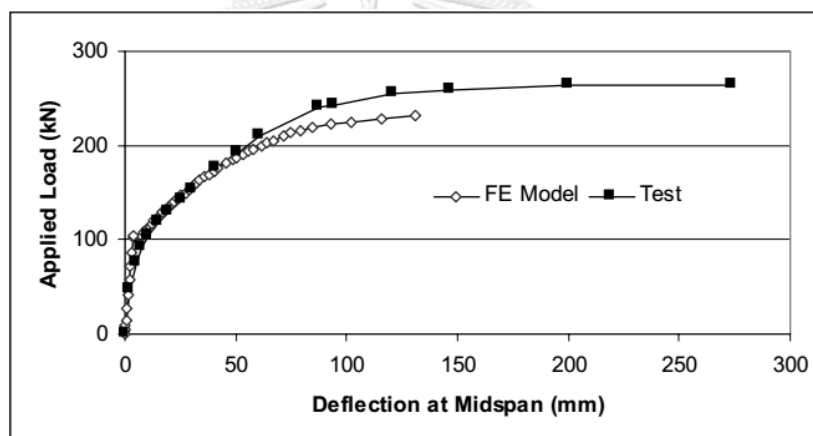
รูปที่ 5 แสดงลักษณะหน้าตัดและการเสริมเหล็กของคานคอนกรีตอัดแรง [7]



รูปที่ 6 เปรียบเทียบการวิเคราะห์โดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์กับผลทดสอบของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก [7]



รูปที่ 7 รูปแบบการแตกร้าวในการวิเคราะห์โดยไฟไนต์เอลิเมนต์เทียบกับการแตกร้าวในคานทดสอบจริง [7]

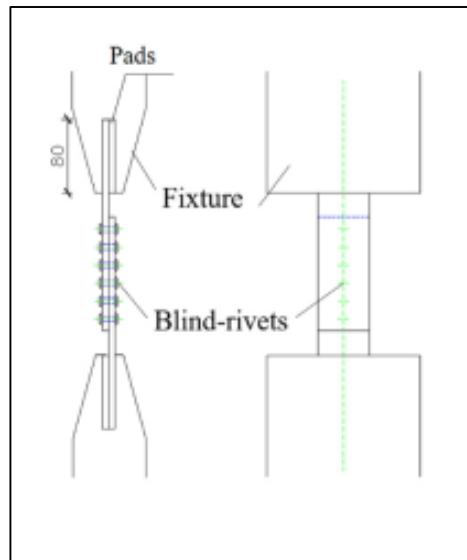


รูปที่ 8 ผลการเปรียบเทียบการวิเคราะห์โดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์กับผลการทดสอบของคานคอนกรีตอัดแรง [7]

รูปที่ 8 แสดงผลการเปรียบเทียบของคานคอนกรีตอัดแรงระหว่างค่าน้ำหนักบรรทุกกับค่าการโก่งตัวที่กึ่งกลางคานระหว่างการวิเคราะห์โดยไฟไนต์เอลิเมนต์กับผลการทดสอบโดยแบบจำลองที่ได้ทำการวิเคราะห์จะมีค่าความแกร่งต้านทานน้ำหนักบรรทุกน้อยกว่าคานทดสอบจริง ผลที่ได้จากการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ทั้งคานคอนกรีตเสริมเหล็กและคานคอนกรีตอัดแรงจะมีความถูกต้องขึ้นอยู่กับกำหนดค่าคุณสมบัติของวัสดุในช่วงเชิงเส้นและไม่เชิงเส้น

Jun Zhao, Yang Peng, Wang Su และ Jun Dong [8] ได้ศึกษาหมุดยึดเหล็กสแตนเลสที่ใช้ในการยึดเหล็กโครงสร้าง โดยทำการสร้างแบบจำลองโดยใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ในการวิเคราะห์เพื่อศึกษาตัวแปรสำคัญที่ส่งผลต่อกำลังการรับแรงเฉือนของการเชื่อมต่อแบบหมุดยึด โดยคำนึงถึงพื้นที่จำนวนกลุ่มของการเชื่อมต่อแบบหมุดยึดเปรียบเทียบกับทดสอบชิ้นงานในการรับแรงเฉือนใน

เครื่องทดสอบอเนกประสงค์ไฮดรอลิก WEW-300 โดยเครื่องทดสอบมีกำลังโหลดสูงสุด คือ 300 KN การทดสอบดำเนินการโดยการดึงควบคุมด้วยอัตราคงที่ 2-5 มม./นาที จนกว่าชิ้นงานทดสอบจะถูกทำลาย ดังรูปที่ 9 และรูปที่ 10

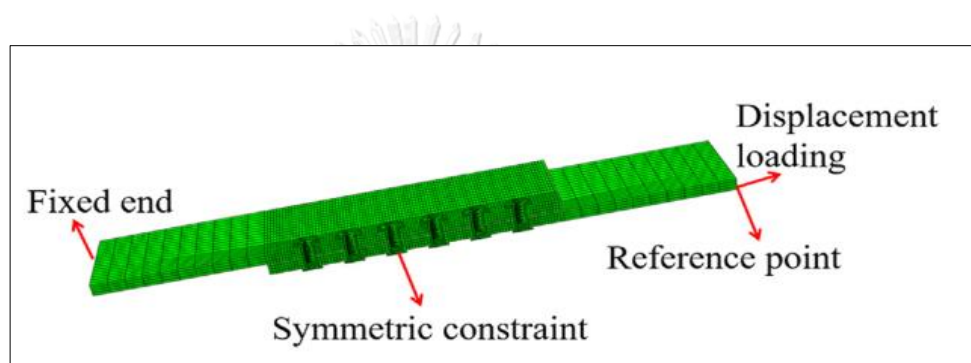


รูปที่ 9 การโหลดชิ้นงาน [8]

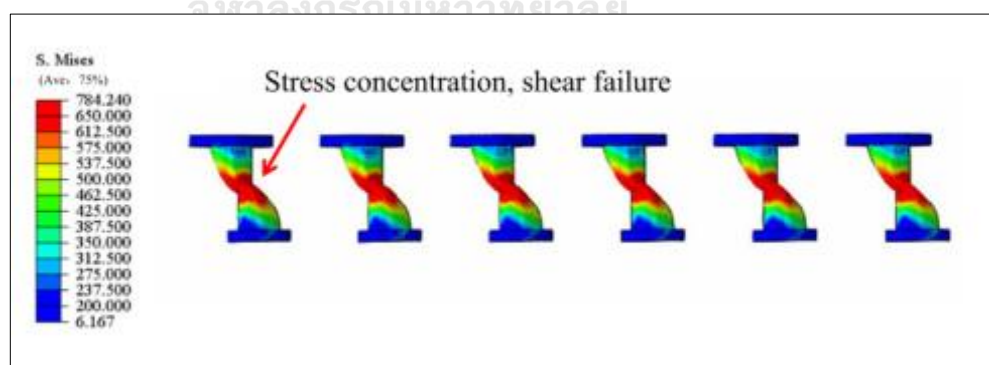


รูปที่ 10 ก่อนการทดสอบการดึงโดยเครื่องอเนกประสงค์ [8]

ทำแบบจำลองโมเดลการทดสอบโดยใช้โปรแกรม ABAQUS ดังรูปที่ 11 เพื่อทำการทดสอบแรงเฉือนของหมุดย้ำเหล็กสแตนเลส ซึ่งจากการจำลองโมเดลพบว่าความเค้นของหมุดย้ำแต่ละตัวมีความไม่สม่ำเสมอในช่วงเริ่มต้นของการเพิ่มแรงกระทำ หลังจากเข้าสู่ช่วงความเครียดแบบคืนรูป (Elastic Deformation) และความเครียดแบบคงรูป (Plastic Deformation) ความเค้นภายในจะถูกกระจายความเค้นที่เกิดขึ้นบริเวณหมุดย้ำจะค่อยๆ รวมกลุ่มเข้าหากัน จากจากนั้นการเสียรูปของหมุดย้ำจะเสียรูปเพิ่มขึ้นตามการแรงไหล

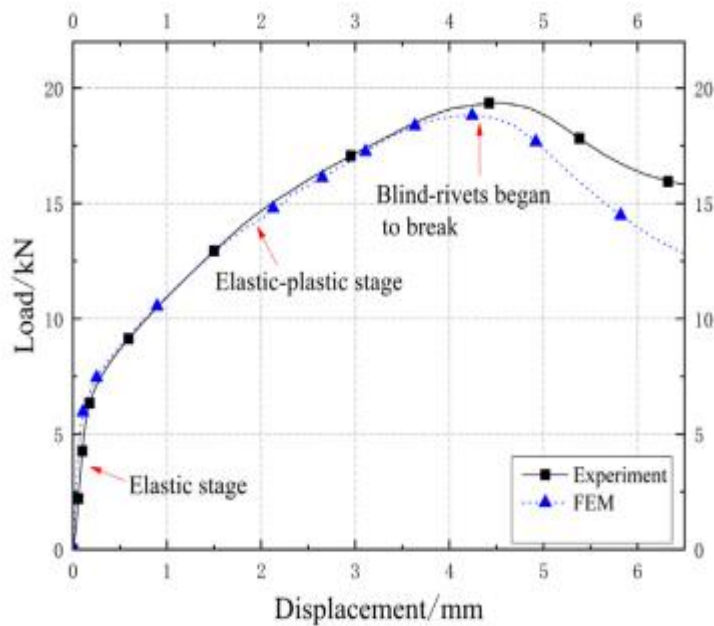


รูปที่ 11 แสดงการจำลองโมเดลและการ mesh โดยใช้โปรแกรม ABAQUS [8]



รูปที่ 12 แสดงการเสียรูปของหมุดย้ำ [8]



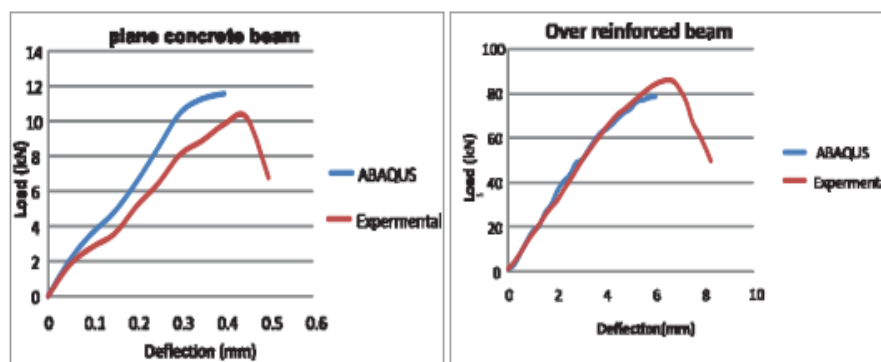


รูปที่ 13 แสดงผลการเปรียบเทียบการวิเคราะห์โดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์กับผลการทดสอบชิ้นงานจริง [8]

จากรูปที่ 13 แสดงการเปรียบเทียบของการทดสอบการรับแรงเฉือนของหมุดย้ำเหล็กสแตนเลส โดยใช้เครื่องทดสอบอเนกประสงค์และการวิเคราะห์โดยไฟไนต์เอลิเมนต์กับผลการทดสอบโดยแบบจำลองที่ได้ทำการวิเคราะห์มีความใกล้เคียงกับการผลการทดสอบจริง โดยสามารถสรุปได้ว่าพื้นที่ของหมุดย้ำและจำนวนหมุดย้ำเป็นตัวแปรสำคัญต่อความสามารถในการรับแรงเฉือน การเกิดช่วงพลาสติกหรือการเปลี่ยนรูปแบบถาวรนั้นจะเกิดขึ้นเร็วเนื่องจากวัสดุที่ใช้ทำหมุดย้ำทำจากสแตนเลสซึ่งมีขีดจำกัดความยืดหยุ่นต่ำและการกระจายความเค้นระหว่างหมุดย้ำมีความสม่ำเสมอ

I. Tejaswini [9] ทำการสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อวิเคราะห์พฤติกรรมของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก โดยทำการสอบเทียบกับผลการทดลอง ซึ่งใช้คานคอนกรีตหน้าตัดรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาดกว้าง 10 เซนติเมตร ลึก 20 เซนติเมตร และคานมีความยาว 1.2 เมตร การศึกษานี้สร้างแบบจำลอง 3 มิติด้วยโปรแกรม ABAQUS ที่มีขนาดเท่ากับของจริง ซึ่งในการสร้างแบบจำลองคานคอนกรีตเสริมเหล็กนั้นจะต้องจำลองคุณสมบัติของวัสดุต่างๆ เช่น คอนกรีต เหล็กเสริม เป็นต้น ในการกำหนดคุณสมบัติของวัสดุจะกำหนดคุณสมบัติในช่วงอิลาสติกและช่วงอนิลาสติก ในงานวิจัยนี้ได้ใช้ไฟไนต์เอลิเมนต์ (3D8) ในการจำลองวัสดุคอนกรีตซึ่งมี 8 โหนดโดยตัวแปรที่ใช้อธิบายการเสียรูปทั้งหมด 3 ตัวแปรและจำลองเหล็กเสริมใช้ไฟไนต์เอลิเมนต์แบบคาน 2 โหนด ซึ่งผลจากการวิเคราะห์ด้วย

ไฟไนต์เอลิเมนต์ ดังรูปที่ 14 นั้นให้ผลที่ได้มีความสอดคล้องกันกับผลการทดลองซึ่งแสดงให้เห็นว่าสามารถใช้ไฟไนต์เอลิเมนต์ในการวิเคราะห์คอนกรีตเสริมเหล็กได้



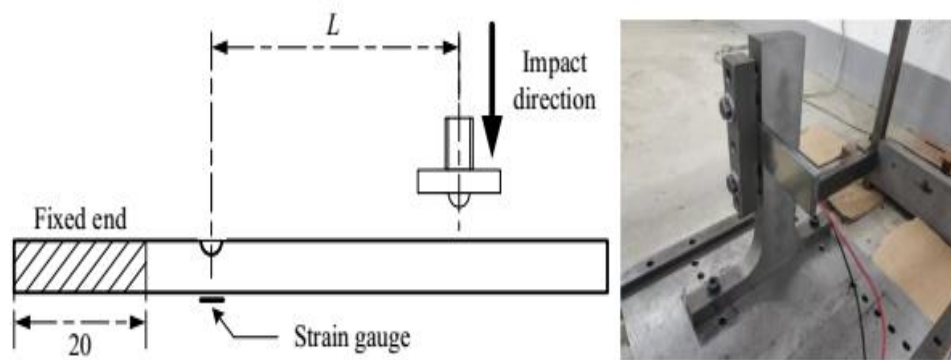
รูปที่ 14 กราฟเปรียบเทียบผลของแบบจำลองกับผลการทดสอบ [9]

Praveen Kannam และ Venkateswara Rao Sarella [10] ได้ศึกษาพฤติกรรมการรับแรงเฉือนของคอนกรีตเสริมเหล็กและทำการเปรียบเทียบผลการทดลองกับแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ที่สร้างโดยใช้โปรแกรม ATENA ซึ่งเป็นซอฟต์แวร์สำหรับการวิเคราะห์โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กแบบไม่เป็นเชิงเส้น โดยทำการทดลองกับคอนกรีตอัดแรงสองชนิด SCC30 และ SCC70 ทำชิ้นงานทดสอบและจำลองโมเดลให้โปรแกรม ATENA ทั้งหมด 16 ชิ้นงานทดสอบสำหรับทดสอบแรงเฉือน ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าเมื่อเพิ่มเส้นใยเหล็กทำให้มีความสามารถรับน้ำหนักและรับแรงเฉือนได้มากขึ้น ซึ่งผลการทดลองได้ทำการเปรียบเทียบกับค่าตัวเลขที่ได้จากการใช้ไฟไนต์เอลิเมนต์ของโปรแกรม ATENA พบว่าเปอร์เซ็นต์ข้อผิดพลาดน้อยกว่า 15%

Beam designation	load kN		Shear strength (N/mm <sup>2</sup> )		% error
	Experimental	Atena	Experimental	Atena	
	SCC 30, a/d = 3				
SCC30-NS	48.42	42.81	1.34	1.20	10.44
SFRSCC30-0	50.84	57.56	1.42	1.59	11.97
SCC30-270	62.3	57.33	1.73	1.59	5.09
SFRSCC30-270	93.45	95.66	2.59	2.65	2.31
SCC 70, a/d = 3					
SCC70-NS	68.14	66.0	1.89	1.83	3.17
SFRCC70-NS	71.32	77.15	1.98	2.14	8.08
SCC70-270	86.77	79.19	2.41	2.19	9.12
SFRSCC70-270	131.27	112.26	3.64	3.11	14.5

รูปที่ 15 เปรียบเทียบผลการทดสอบจริงกับการใช้โปรแกรม ATENA [10]

Daiyang Gao, Weixing Yao, Weidong Wen และ Jie Huang [11] ได้ศึกษาความล้าของชิ้นงานทดสอบที่มีรอยบากภายใต้การกระแทกซ้ำด้วยความเร็วต่ำของวัสดุ S45C โดยใช้เครื่องทดสอบแบบลูกตุ้มโดยจับยึดชิ้นงานทดสอบและตำแหน่งของการกระแทกของหมุดเจาะแสดงดังรูปที่ 16 ซึ่ง  $L$  คือ ระยะห่างระหว่างตำแหน่งกระแทกกับรอยบากและวัดการตอบสนองความเครียดบริเวณฝั่งตรงข้ามกับรอยบากของชิ้นงานทดสอบ โดยใช้สเตรนเกจวัดความเครียดในระหว่างกระบวนการทดสอบ โดยตำแหน่งของสเตรนเกจและรอยแตกที่เกิดจากแรงกระแทกซ้ำๆ ดังรูปที่ 17 (ก) และ 17 (ข) ตามลำดับ



รูปที่ 16 ตำแหน่งรับแรงกระแทกบนชิ้นงานทดสอบการจับยึด [11]

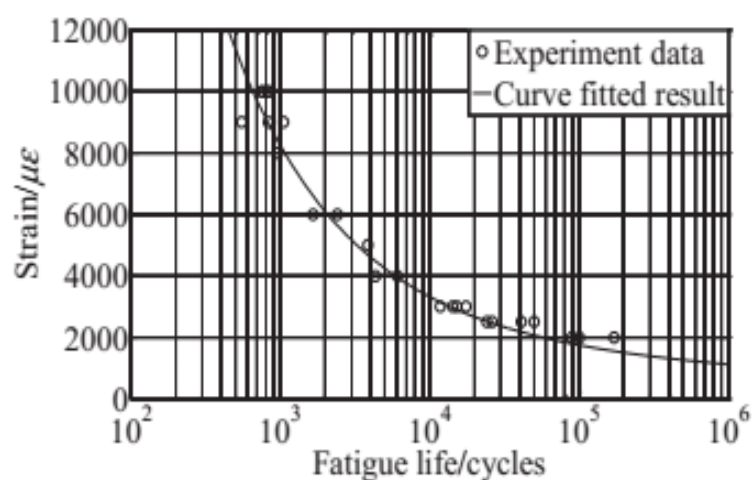


(ก)

(ข)

รูปที่ 17 ชิ้นงานทดสอบ (ก) ตำแหน่งติดตั้งสเตรนเกจ (ข) รอยแตกที่เกิดจากการทดสอบความล้า [11]

การทดสอบความล้าแบบควบคุมความเครียดของวัสดุ S45C เพื่อกำหนดลักษณะการเสียหายตามวัฏจักรและเส้นโค้งอายุความเครียด อัตราส่วนความเครียด  $R = -1$  และแอมพลิจูดของความเครียดเท่ากับ 0.2%, 0.25%, 0.3%, 0.4%, 0.5%, 0.6%, 0.8%, 0.9% และ 1%. ค่าพารามิเตอร์ของข้อมูล ความเครียด-ความล้าของวัสดุ S45C ดังรูปที่ 18



รูปที่ 18 อายุความล้าของวัสดุ S45C [11]

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## 2.2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง CHULALONGKORN UNIVERSITY

### 2.2.1 ข้อมูลสะพานทหารเอ็ม จี บี

สะพานทหาร เอ็ม จี บี ออกแบบโดยประเทศอังกฤษเพื่อใช้ในราชการทหารและการคมนาคม งานเร่งด่วนฉุกเฉิน งานบรรเทาสาธารณภัยและงานบุกเบิกในการสร้างถนน เริ่มใช้ในกองทัพประเทศอังกฤษ เมื่อ พ.ศ. 2514 ในปัจจุบันนี้มีประเทศต่างๆ ทั่วโลกมากกว่า 20 ประเทศได้ซื้อไปใช้ในราชการทหาร เช่น ประเทศกลุ่มนาโต้ (NATO) ได้แก่ สหรัฐอเมริกา แคนาดา เดนมาร์ก ฮอลแลนด์ และอิตาลี ในทวีปเอเชีย ได้แก่ ประเทศฟิลิปปินส์ สิงคโปร์ ปากีสถาน และไทย เป็นต้น ซึ่งในปัจจุบันสะพานทหาร เอ็ม จี บี ได้จัดเก็บอยู่ที่กรมการทหารช่าง ช.ร้อย 18 กองร้อยทหารช่างสะพานผสม ค่ายภานุรังษีส่วนที่ 2 อำเภอเมืองราชบุรี จังหวัดราชบุรี

คุณลักษณะสะพานทหาร เอ็ม จี บี เป็นสะพานที่มีขนาดเบาสามารถประกอบสร้างได้ด้วยกำลังคนและเครื่องมือสร้าง ซึ่งสามารถใช้กำลังคนเคลื่อนย้ายได้ด้วยความคล่องตัว ประกอบสร้างและถอดแยกออกจากกันได้อย่างสะดวก รวมทั้งสร้างประกอบได้หลายแบบ

ชิ้นส่วนต่างๆ ของสะพานทหาร เอ็ม จี บี ทำด้วยโลหะผสม 3 อย่าง สังกะสี แมกนีเซียมอัลลอยด์ และอะลูมิเนียม ทำให้น้ำหนักเบา ชิ้นส่วนที่หนักที่สุดหนักไม่เกิน 200 กิโลกรัม ชิ้นส่วนอื่นๆ สามารถใช้กำลังพลยกเพียง 2 ถึง 6 นาย สะพานทหาร เอ็ม จี บี เมื่อประกอบสร้างแล้วจะมีความกว้าง 4.01 เมตร การรับน้ำหนักของยานพาหนะขึ้นอยู่กับแบบของการสร้างและความยาวของสะพาน ซึ่งสามารถรับน้ำหนักได้ตั้งแต่ 16 ตัน ถึง 60 ตัน [12]

ข้อดีของสะพานทหาร เอ็ม จี บี สามารถประกอบได้หลากหลายแบบ มีความคล่องตัวและง่ายต่อการประกอบใช้งาน มีความรวดเร็วและประหยัดเวลา น้ำหนักเบา มีความแข็งแรงทนทาน ทำให้การประกอบใช้งานและการถอดหลังจากใช้งาน ไม่ต้องใช้รถปั้นจั่นหรือเครื่องมือทุ่นแรง ง่ายต่อการขนส่งเนื่องจากน้ำหนักเบา สามารถใช้รถยนต์ รถพ่วงหรือเครื่องบินในการเคลื่อนย้าย อีกทั้งยังสามารถขนสะพานที่ประกอบเสร็จแล้ว ไปวางยังพื้นที่ที่ต้องการใช้งาน และเมื่อประกอบใช้งานสามารถลดเวลาในการเตรียมพื้นที่ สามารถประกอบสร้างบนฝั่งหรือภูมิประเทศลาดเอียง ชรุขระหรือพื้นดินอ่อนได้ [12]



รูปที่ 19 แสดงการเคลื่อนย้ายสะพานทหาร เอ็ม จี บี [12]



รูปที่ 20 การยกประกอบสะพานทหาร เอ็ม จี บี แบบโครงชั้นเดียว [12]



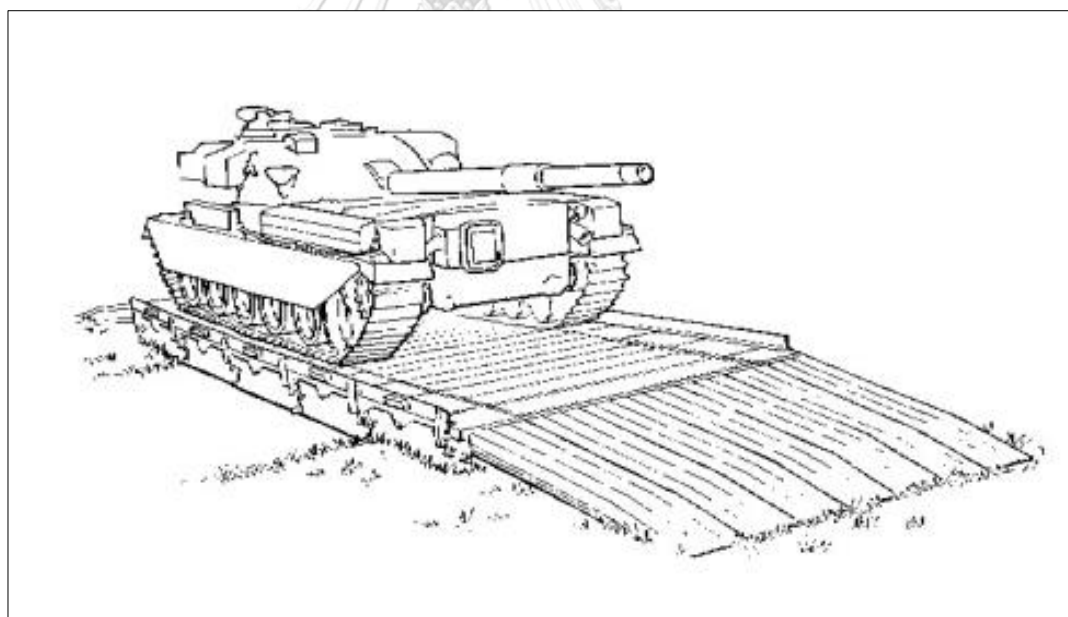
รูปที่ 21 สะพานทหาร เอ็ม จี บี แบบโครงสองชั้นรับน้ำหนักได้สูงสุด 60 ตันยาว 200 เมตร [12]

สะพานทหาร เอ็ม จี บี สามารถประกอบสร้างได้ 2 ลักษณะ ดังนี้

1) การประกอบสร้างสะพานทหารเอ็ม จี บี แบบโครงชั้นเดียว รายละเอียด ดังนี้

ตารางที่ 1 แสดงรายละเอียดการประกอบสร้างของสะพานแบบโครงชั้นเดียว [12]

สะพานทหาร เอ็ม จี บี แบบโครงชั้นเดียว	การรับ น้ำหนัก (ตัน)	ความยาว ของสะพาน (เมตร)	ความกว้าง ผิวจราจร (เมตร)	เวลาใน การสร้าง (นาที)	จำนวนคนใน การสร้าง (คน)
สะพานช่วงเดียวชั้นเดียว	60	7.9	4	20	8
	40	9.8	4	23	8
	16	11.6	4	30	10

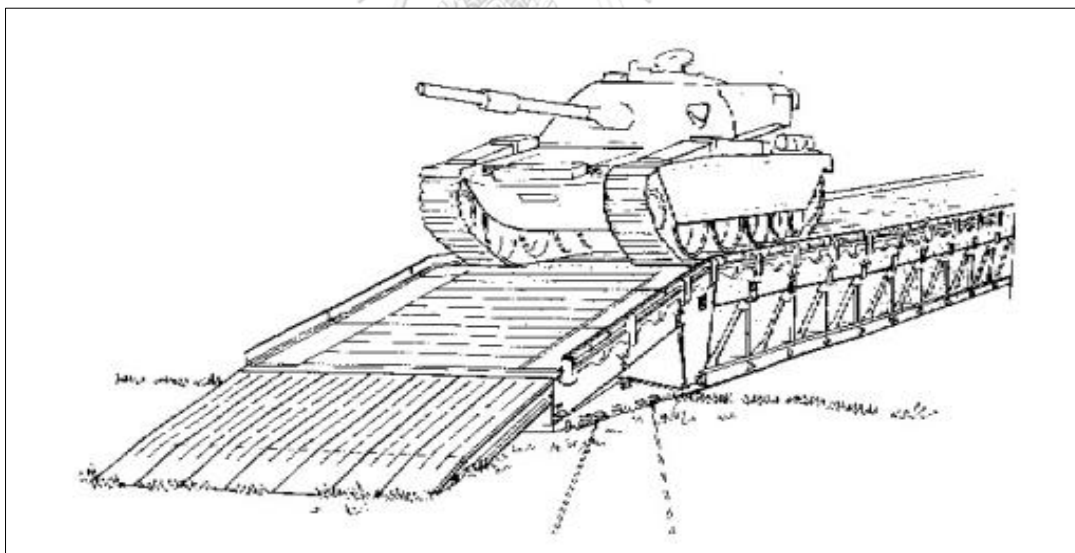


รูปที่ 22 สะพานทหาร เอ็ม จี บี แบบโครงชั้นเดียว [12]

2) การประกอบสร้างสะพานทหารเอ็ม จี บี แบบโครงสองชั้น รายละเอียด ดังนี้

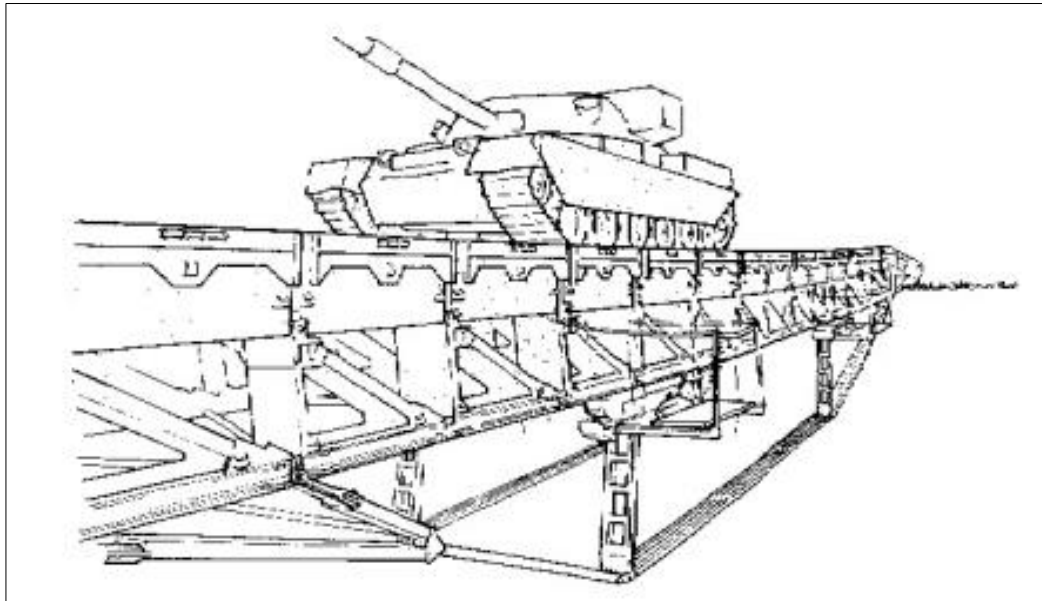
ตารางที่ 2 แสดงรายละเอียดการประกอบสร้างของสะพาน เอ็ม จี บี แบบโครงสองชั้น [12]

สะพานทหาร เอ็ม จี บี แบบโครงสองชั้น	การรับ น้ำหนัก (ตัน)	ความยาวของ สะพาน (เมตร)	ความกว้าง ผิวจราจร (เมตร)	เวลาใน การสร้าง (นาที)	จำนวนคน ในการสร้าง (คน)
สะพานช่วงเดียวสองชั้น	60	31.1	4	60	24
	40	38.6	4	65	28
	16	49.4	4	75	24
สะพานช่วงเดียว สองชั้น เสริมความแข็งแรง	60	49.4	4	100	31



รูปที่ 23 สะพานทหาร เอ็ม จี บี แบบโครงสองชั้น [12]



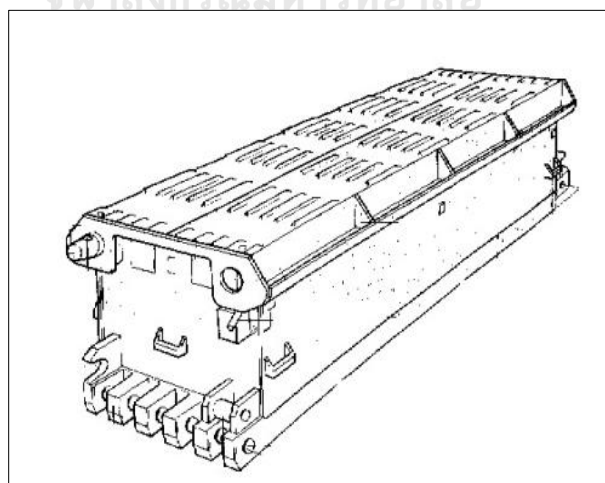


รูปที่ 24 สะพานทหาร เอ็ม จี บี แบบโครงสองชั้นเสริมความแข็งแรง [12]

### 2.2.2 ชั้นส่วนหลักของสะพานทหาร เอ็ม จี บี

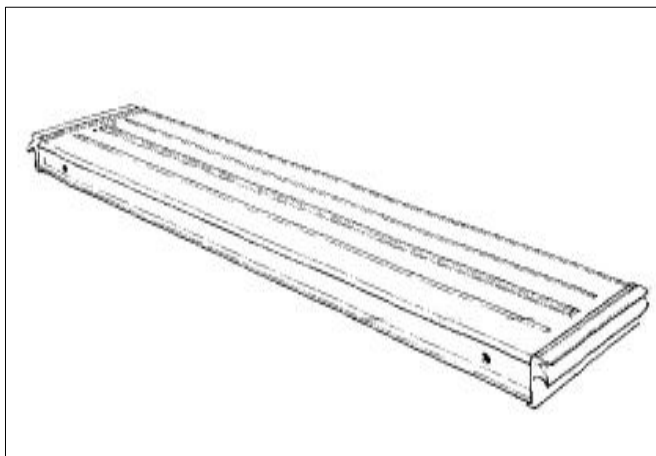
ประกอบด้วย 2 ชั้นส่วน ดังนี้

- 1) โครงบน (Top Panel) ขนาดความกว้าง 0.647 เมตร ความยาว 1.829 เมตร ความสูง 0.543 เมตร และน้ำหนัก 175 กิโลกรัม ดังรูปที่ 2.22



รูปที่ 25 ชั้นส่วนโครงบนของสะพาน [12]

2) แผงพื้น (Deck Unit) ขนาดความกว้าง 0.438 เมตร ความยาว 2.796 เมตร ความหนา 0.168 เมตร และน้ำหนัก 74 กิโลกรัม ดังรูปที่ 2.23



รูปที่ 26 ชิ้นส่วนแผงพื้นของสะพาน [12]

### 2.2.3 ข้อมูลโลหะกลุ่มเหล็ก

โลหะที่ถูกนำมาใช้ในงานวิศวกรรมจำแนกเป็นกลุ่มใหญ่ๆ ได้ 2 กลุ่มคือ โลหะกลุ่มเหล็กและโลหะนอกกลุ่มเหล็ก โลหะกลุ่มเหล็กยังจำแนกออกเป็นเหล็กกล้าและเหล็กหล่อ ซึ่งมีความแตกต่างกันตรงปริมาณของคาร์บอนในเนื้อเหล็ก โดยเหล็กกล้าจะมีปริมาณคาร์บอนที่ต่ำกว่าเหล็กหล่อ เหล็กกล้ายังจำแนกออกเป็นโลหะผสมต่ำและโลหะผสมสูง ซึ่งอาศัยปริมาณส่วนผสมทางเคมีของธาตุผสมเป็นตัวจำแนก โดยโลหะกลุ่มเหล็กจะมีปริมาณการใช้งานในอุตสาหกรรมโครงสร้างต่างๆ สูงมาก เหตุผลที่เป็นเช่นนี้ก็เพราะว่าสินแร่เหล็กที่พบอยู่บนพื้นโลกนั้นมีปริมาณมาก กระบวนการผลิตสามารถตอบสนองได้ในทางเศรษฐศาสตร์ ที่สำคัญเหล็กมีสมบัติทางกลและทางกายภาพที่ดี ซึ่งการเรียนนี้จะเน้นในกลุ่มเหล็กกล้าคาร์บอน [13]

โลหะกลุ่มเหล็ก โลหะกลุ่มนี้ซึ่งมีเหล็กเป็นองค์ประกอบเป็นส่วนใหญ่ ถูกผลิตใช้ในปริมาณมากกว่าโลหะชนิดอื่น โดยใช้งานเป็นวัสดุก่อสร้างทางวิศวกรรมที่สำคัญ สาเหตุที่มีการใช้งานโลหะกลุ่มเหล็กมากมีอยู่ 3 ประการ คือ (1) สารประกอบที่มีเหล็กมีอยู่เป็นจำนวนมากในเปลือกโลก (2) เหล็กและเหล็กกล้าสามารถผลิตได้ด้วย กรรมวิธี การถลุง การทำให้บริสุทธิ์ การผสมธาตุอื่น การขึ้นรูปมีราคาไม่แพงและ (3) โลหะกลุ่มเหล็กสามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้หลากหลายเนื่องจากสามารถ

ดัดแปลงให้มีสมบัติทางกลและสมบัติทางกายภาพได้กว้างขวาง ในส่วนนี้จะกล่าวถึงส่วนผสมทางเคมี โครงสร้างจุลภาคและคุณสมบัติต่าง ๆ ของเหล็กกล้าและเหล็กหล่อหลายชนิด [14]

เหล็กกล้า (Steels) คือ โลหะผสมเหล็กกับคาร์บอน ซึ่งอาจมีส่วนผสมของธาตุอื่น ๆ อีกพอประมาณ เหล็กกล้ามีหลายหลายชนิดซึ่งมีส่วนผสมทางเคมีและกรรมวิธีทางความร้อนต่างกัน สมบัติทางกลขึ้นอยู่กับปริมาณคาร์บอนโดยปกติมีปริมาณน้อยกว่า 1.0% โดยน้ำหนัก [14]

เหล็กกล้าคาร์บอนปริมาณต่ำ (Low Carbon Steel) เหล็กกล้าส่วนใหญ่ที่มีการผลิตใช้กันมากในปัจจุบันจัดอยู่ในประเภทเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ โดยปกติมีปริมาณคาร์บอนน้อยกว่า 0.25 % โดยน้ำหนักและไม่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนแต่เพิ่มความแข็งแรงโดยการรีดเย็น ซึ่งส่งผลให้เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำนี้ ค่อนข้างอ่อนและไม่ค่อยแข็งแรงแต่มีคุณสมบัติทางด้านความเหนียวและความแกร่งดีมาก จึงสามารถกลึงไสได้ เชื่อมได้และผลิตได้ในราคาค่อนข้างต่ำ รวมทั้งหาซื้อได้หลากหลายในท้องตลาดและเมื่อเทียบกับเหล็กกล้าชนิดอื่น ๆ โดยเหล็กกล้าชนิดนี้มักนำมาใช้ทำตัวรถยนต์ เหล็ก โครงสร้างอาคาร สะพาน โดย ส่วนผสมทางเคมีและสมบัติทางกลของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำชนิดนี้มีค่าความแข็งแรงจุดครากที่ 275 เมกะปาสกาล ค่าความต้านแรงดึงระหว่าง 415-550 เมกะปาสกาลและมีค่าความเหนียว 25%EL [14]

เหล็กกล้าผสมต่ำความแข็งแรงสูง (High-Strength Low Alloy, HSLA) ซึ่งอยู่ในหมวดของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำอีกกลุ่มหนึ่งโดยมีธาตุอื่นผสม คือ ทองแดง วาเนเดียม นิกเกิล และโมลิบดีนัม ความเข้มข้นรวมกันไม่เกิน 10% โดยน้ำหนัก ข้อดีคือมีความแข็งแรงสูงกว่าเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำแบบธรรมดา โดยส่วนใหญ่สามารถเพิ่มความแข็งแรงได้โดยกรรมวิธีทางความร้อนทำให้มีความแข็งแรงมากกว่า 480 เมกะปาสกาล นอกจากนี้ยังมีความเหนียวสูง สามารถขึ้นรูปและกลึงได้สำหรับการใช้งานในบรรยากาศปกติ เหล็กกล้าผสมต่ำความแข็งแรงสูงนี้มีความต้านทานการกัดกร่อนสูงกว่าเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำแบบธรรมดา จึงใช้งานได้หลายรูปแบบรวมทั้งงานที่ต้องการความแข็งแรงเป็นพิเศษ เช่น สะพาน หอสถาปนาศึกษา และภาชนะทนความดัน [14]

เหล็กกล้าคาร์บอนปานกลาง (Medium Carbon Steel) เหล็กกล้าคาร์บอนปานกลางประกอบไปด้วยส่วนผสมคาร์บอนระหว่างประมาณ 0.25 และ 0.60 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เหล็กกล้ากลุ่มนี้ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนและทำให้เย็นตัวลงอย่างรวดเร็วและเพิ่มขึ้นตอนการอบคืนตัว เพื่อปรับปรุงสมบัติทางกลและเพิ่มการผสมโครเมียม นิกเกิล และโมลิบดีนัม ซึ่งช่วยเพิ่มความสามารถในการอบชุบได้ จึงมีคุณสมบัติผสมผสานระหว่างความแข็งแรงกับความเหนียวหลากหลายแบบโดยเหล็ก

กลุ่มนี้ที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนแล้วมีความแข็งแรงสูงกว่าเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำแต่มีข้อเสีย คือ ความเหนียวและความแกร่งลดลงจึงนำมาใช้ทำล้อและรางรถไฟ เกียร์ เพลาส่งกำลังเครื่องยนต์และ ส่วนอื่นของเครื่องจักรกลและยังนิยมนำไปใช้งานในส่วนโครงสร้างที่ต้องการความแข็งแรง ความ ทนทานต่อการสึกกร่อน [14]

เหล็กกล้าคาร์บอนสูง (High Carbon Steel) โดยทั่วไปมีปริมาณคาร์บอนระหว่าง 0.60 และ 1.4 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีค่าความแข็งแรงสูงสุดและค่าความเหนียวต่ำสุดในกลุ่มเหล็กกล้า คาร์บอนและนิยมใช้งานหลังจากผ่านการชุบแข็งและอบคืนตัว โดยเฉพาะการใช้งานในสภาวะที่ ต้องการความต้านทานการสึกกร่อนและต้องการความคมเพื่อการตัดเฉือน เหล็กกล้าใช้ทำเครื่องมือ และแม่พิมพ์เป็นเหล็กกล้าผสมคาร์บอนสูงซึ่งประกอบด้วยส่วนผสม คือ โครเมียม วาเนเดียม ทังสเทน และโมลิบดีนัม ธาตุผสมเหล่านี้จะรวมตัวกับคาร์บอนกลายเป็น สารประกอบคาร์ไบด์ที่มีความแข็งแรงสูง มากและทนการสึกกร่อน เหล็กเหล่านี้ใช้ทำเครื่องมือตัดและแม่พิมพ์เพื่อขึ้นรูปวัสดุและลวดเหล็กที่ ต้องการความแข็งแรงสูง [14]

ประเภทของเหล็กที่นิยมใช้งานและหาซื้อได้ในท้องตลาดมี ดังนี้

1. เหล็กเพลาดำ คือ เหล็กที่ผลิตมาจากการรีดเหล็กอ่อน มีการควบคุมคุณภาพเรื่องความ กลมและมีผิวเรียบไม่มีรอยปริแตก นิยมใช้เป็นวัตถุดิบในงานอุตสาหกรรม ซึ่งเหล็กเพลาดำที่มีขาย และพบได้ทั่วไปตามท้องตลาดมี ดังนี้

1.1 เหล็กเพลาดำหัวฟ้า ผลิตมาจาก SCM440 มีความแข็งแรงสูงมาก มีความเหนียว ต้านทานการสึกหรอได้ดี มีความสามารถในการขึ้นรูปได้ดีและมีความต้านทานต่อการล้าได้ดี มี ความสามารถเข้ากระบวนการกลึงพอใช้ เป็นที่นิยมใช้ในการทำเพลาเครื่องจักร แกนกลางเครื่องอัด แรงของแม่แรงไฮดรอลิก ใช้ในการทำสกรูและนอตของอุตสาหกรรม

1.2. เหล็กเพลาดำหัวแดง ผลิตมาจาก S45C มีคุณสมบัติคือ สามารถชุบแข็งได้ สามารถ ขึ้นรูปได้แต่ไม่เหมาะใช้งานในการเชื่อม นิยมใช้ในงานชิ้นส่วนเครื่องจักรกล เพลา ล้อเฟืองและสลัก เกลียวมีความแข็งแรง มีความเหนียวสูง

2. เหล็กเพลาชาว คือ เหล็กที่ผลิตจากการนำเหล็กเพลาดำ ไปเข้ากระบวนการดิงเย็นอีก ครั้งหนึ่งซึ่งส่งผลทำให้คุณสมบัติเหล็กเปลี่ยนจากสีเทาดำเป็นสีเทาเงิน จึงเรียกว่าเหล็กเพลาชาวตาม ลักษณะของสีเหล็ก ซึ่งเหล็กเพลาชาวที่มีขายและพบได้ทั่วไปตามท้องตลาดมี ดังนี้

2.1 เหล็กเพลลาขาว SS400 โดยจะมีความแข็งแรงและมีเส้นผ่านศูนย์กลางที่แม่นยำ รวมทั้งมีพื้นผิวเรียบสม่ำเสมอมากกว่าเหล็กเพลลาดำ แต่มีข้อเสียกล่าวคือมีการยืดหยุ่นน้อยกว่าเหล็กเพลลาดำ

2.2 เหล็กเพลลาขาว S20C มีความแข็งแรงเช่นเดียวกับเหล็กเพลลาขาว SS400 แต่มีการควบคุมองค์ประกอบคาร์บอนได้ดีกว่าเหล็กเพลลาขาว SS400 มีข้อเสีย คือ มีการยืดหยุ่นน้อยกว่าเหล็กเพลลาดำ นิยมใช้งานที่เน้นความกลม นิยมนำไปขึ้นรูปกลึงทำชิ้นงาน น็อต สกรู ใช้เป็นชิ้นส่วนเครื่องจักร เพลารถ เพลาเครื่องจักร งานอุตสาหกรรมยานยนต์ เครื่องใช้ไฟฟ้า

ตารางที่ 3 คุณสมบัติของ SCM440, S45C, SS400 และ S20C

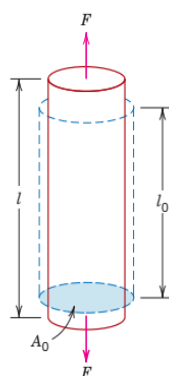
คุณสมบัติ	ชนิด / เกรด			
	SCM440	S45C	SS400	S20C
องค์ประกอบ (%)	C 0.38-0.43 Cr 0.9-1.2 Cu <= 0.3 Mo 0.15-0.30 Mn 0.6-0.85 Ni <= 0.25 P <= 0.030 Si 0.15 - 0.35 S <= 0.03	C 0.42 - 0.48 Cr <= 0.20 Cu <= 0.30 Fe 97.6 - 98.8 Mn 0.60 - 0.90 Ni <= 0.20 P <= 0.030 Si 0.15 - 0.35 S <= 0.035	C 0.27 Cu >= 0.20 Fe <= 98 Mn <=0.90 P <=0.040 Si <=0.040 S <=0.050	C 0.17 - 0.23 Cr <= 0.20 Cu <= 0.30 Fe 98.1 - 99.4 Mn 0.30 - 0.60 Ni <= 0.20 P <= 0.030 Si 0.15 - 0.35 S <= 0.035
ความต้านทานแรงดึง (MPa)	655	686	400	402
ความเค้นจุดคราก (MPa)	415	490	230	245
ค่าการยืดตัว	20 %	17 %	19 %	28 %

คุณสมบัติ	ชนิด / เกรด			
	SCM440	S45C	SS400	S20C
มอดูลัสของยัง (GPa)	200	205	206	186
อัตราส่วนปัวซอง	0.29	0.29	0.30	0.29
มอดูลัสของแรงเฉือน (GPa)	79	80	79	80
ราคากิโลกรัมละ	120-150	140-180	80-100	70-100

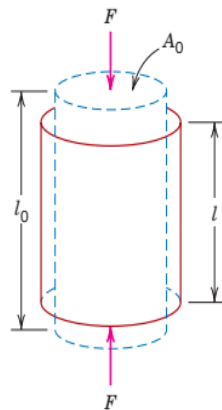
ข้อมูลจาก : <http://www.matweb.com>

#### 2.2.4 ความเค้นและความเครียดทางวิศวกรรม

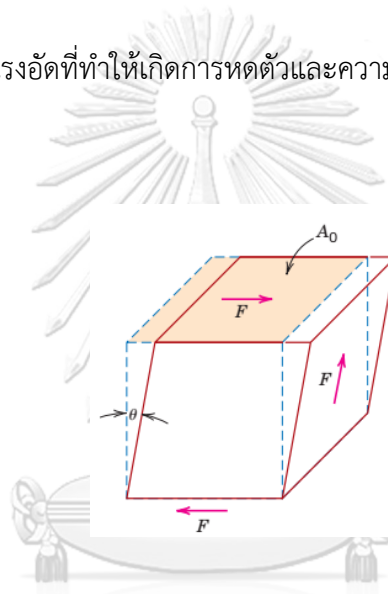
การศึกษาพฤติกรรมทางกลของวัสดุ ทำการทดสอบโดยเพิ่มโหลดกระทำต่อวัสดุอย่างช้าๆ แบบคงที่ และกระทำอย่างสม่ำเสมอบนหน้าตัดหรือพื้นผิวของวัสดุทดสอบนั้นๆ โดยทดสอบภายใต้อุณหภูมิห้อง โดยมี 3 รูปแบบแรงที่จะกระทำบนวัสดุได้ 3 รูปแบบ คือ แรงดึง แรงอัด และแรงเฉือนโดยในทางวิศวกรรมส่วนใหญ่ แรงกระทำที่พบบ่อยมักจะเป็นแรงบิดมากกว่าแรงเฉือนอย่างเดียว ซึ่งการศึกษานี้จะทำการทดสอบวัสดุโดยใช้วิธีการดึงชิ้นงานวัสดุทดสอบ



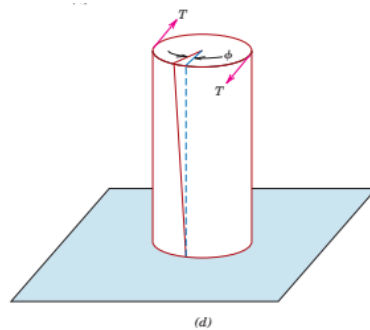
รูปที่ 27 ผลของแรงดึงที่ทำให้เกิดการยืดตัวและความเครียดเชิงเส้นที่เป็นบวก [14]



รูปที่ 28 ผลของแรงอัดที่ทำให้เกิดการหดตัวและความเครียดเชิงเส้นที่เป็นลบ [14]



รูปที่ 29 แสดงความเครียดเฉือน  $\gamma$  โดยที่  $\gamma = \tan \theta$  [14]



รูปที่ 30 แสดงการแปรรูปแบบบิด (มุมบิด  $\phi$ ) ซึ่งเกิดทอร์ค [14]

ผลลัพธ์จากการทดสอบแรงดึง คือ ความเปลี่ยนแปลงระหว่างแรงกระทำ (Load) กับระยะยืด (Elongation) โดยความเค้น (Stress) หมายถึง แรงต้านทานภายในเนื้อวัสดุที่มีต่อแรงภายนอกเพื่อไม่ให้เกิดการเปลี่ยนรูปไปจากเดิม โดยแรงกระทำจะถูกกระจายอย่างสม่ำเสมอตลอดพื้นที่หน้าตัด [13] ดังสมการที่ 2.1

$$\sigma = \frac{F}{A_0} \quad 2.1$$

โดย

$\sigma$	= แรงเค้น หน่วย นิวตันต่อตารางเมตร (N/m <sup>2</sup> )
$F$	= แรงการดึงในทางเดียวเฉลี่ย หน่วย นิวตัน (N)
$A_0$	= พื้นที่หน้าตัดเริ่มต้น หน่วย ตารางเมตร (mm <sup>2</sup> )

ความเครียด คือ การเปลี่ยนแปลงรูปร่างของวัสดุเมื่อมีแรงมากกระทำ โดยแบ่งเป็นออกเป็น 2 ประเภท ได้แก่ ความเครียดยืดหยุ่น (Elastic Strain) และความเครียดถาวร (Plastic Strain) ซึ่งความเครียดยืดหยุ่นเป็นการเปลี่ยนรูปในลักษณะที่ลดแรงกระทำแล้ววัสดุสามารถกลับสู่สภาพเดิมได้ ส่วนความเครียดแบบถาวรเป็นลักษณะที่เมื่อปล่อยแรงแล้ววัสดุไม่สามารถคืนกลับสภาพเดิมหรือขนาดเดิมได้ [14]

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

$$\varepsilon = \frac{l-l_0}{l_0} \quad 2.2$$

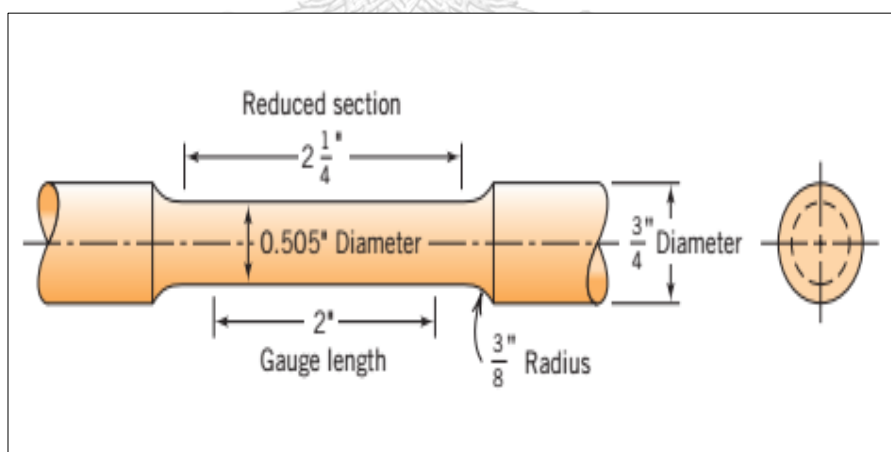
โดย

$\varepsilon$	= ความเครียดเชิงเส้น
$l_0$	= ความยาวเดิมก่อนถูกแรงกระทำ
$l$	= ความยาวเมื่อได้รับแรงกระทำ

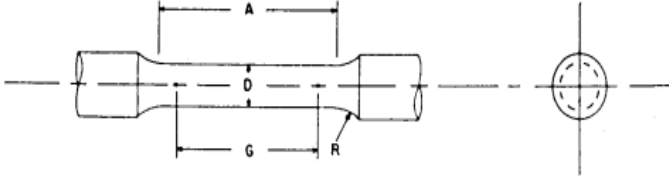


### 2.2.5 การทดสอบแรงดึง

วิธีการทดสอบความเค้น-ความเครียดของวัสดุ คือ การทดสอบแบบใช้แรงดึง ซึ่งสามารถหาค่าสมบัติทางกลหลายค่าที่สำคัญต่อการออกแบบทางกลได้ ในการทดสอบชิ้นงานทดสอบจะถูกดึงตามแนวยาวของชิ้นงาน โดยแรงดึงมีลักษณะเป็นแรงดึงตามแนวแกน เพียงแนวเดียว ดังแสดงในรูปที่ 2.25 แสดงชิ้นงานทดสอบมาตรฐาน โดยบริเวณส่วนกลางของชิ้นงานซึ่งมีพื้นที่หน้าตัดสม่ำเสมอจะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางตามมาตรฐานคือ 12.8 มิลลิเมตร (0.5 นิ้ว) ในขณะที่ความยาวของส่วนคอด (Reduced Section) ตรงกลางบริเวณชิ้นงานทดสอบ ต้องไม่น้อยกว่า 4 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลาง คือ 60 มิลลิเมตร ( $2\frac{1}{4}$  นิ้ว) ความยาวเกจ (Gauge Length) ตามมาตรฐานยาว 50 mm (2 นิ้ว) ใช้สำหรับคำนวณหาความเหนียว โดยชิ้นงานทดสอบแรงดึงนี้จะถูกจับยึดปลายทั้งสองข้างด้วยหัวจับภายในเครื่องทดสอบแสดงดังรูปที่ 2.25 เครื่องทดสอบแรงดึงจะค่อยๆ เพิ่มแรงดึงชิ้นงานด้วยความเร็วคงที่ พร้อมกับวัดขนาดของแรงที่กระทำด้วยโพลดเซลล์ และวัดขนาดการยืดตัวที่เกิดขึ้นด้วยอุปกรณ์ Extensometer ชิ้นงานทดสอบจะถูกแปรรูปถาวรและขาดจากกันในที่สุด



รูปที่ 31 ชิ้นงานทดสอบแรงดึงมาตรฐานแบบที่มีหน้าตัดเป็นวงกลม [14]



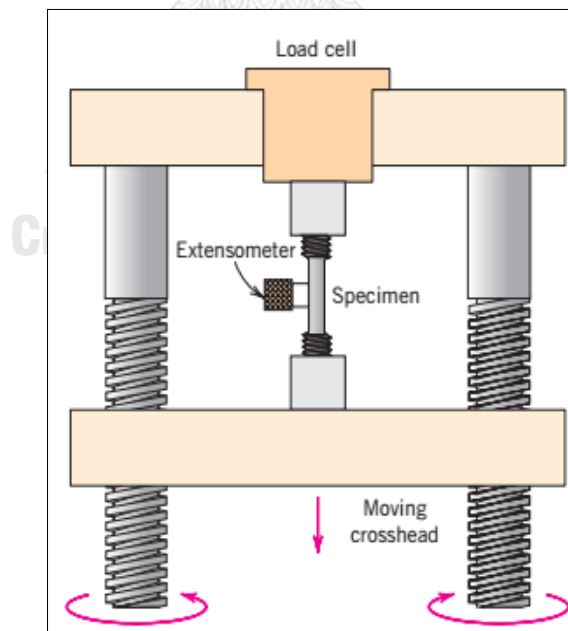
Dimensions, mm [in.]  
**For Test Specimens with Gauge Length Four times the Diameter [E8]**

	Standard Specimen		Small-Size Specimens Proportional to Standard		
	Specimen 1	Specimen 2	Specimen 3	Specimen 4	Specimen 5
<b>G</b> —Gauge length	50.0 ± 0.1 [2.000 ± 0.005]	36.0 ± 0.1 [1.400 ± 0.005]	24.0 ± 0.1 [1.000 ± 0.005]	16.0 ± 0.1 [0.640 ± 0.005]	10.0 ± 0.1 [0.450 ± 0.005]
<b>D</b> —Diameter (Note 1)	12.5 ± 0.2 [0.500 ± 0.010]	9.0 ± 0.1 [0.350 ± 0.007]	6.0 ± 0.1 [0.250 ± 0.005]	4.0 ± 0.1 [0.160 ± 0.003]	2.5 ± 0.1 [0.113 ± 0.002]
<b>R</b> —Radius of fillet, min	10 [0.375]	8 [0.25]	6 [0.188]	4 [0.156]	2 [0.094]
<b>A</b> —Length of reduced section, min (Note 2)	56 [2.25]	45 [1.75]	30 [1.25]	20 [0.75]	16 [0.625]

Dimensions, mm [in.]  
**For Test Specimens with Gauge Length Five times the Diameter [E8M]**

	Standard Specimen		Small-Size Specimens Proportional to Standard		
	Specimen 1	Specimen 2	Specimen 3	Specimen 4	Specimen 5
<b>G</b> —Gauge length	62.5 ± 0.1 [2.500 ± 0.005]	45.0 ± 0.1 [1.750 ± 0.005]	30.0 ± 0.1 [1.250 ± 0.005]	20.0 ± 0.1 [0.800 ± 0.005]	12.5 ± 0.1 [0.565 ± 0.005]
<b>D</b> —Diameter (Note 1)	12.5 ± 0.2 [0.500 ± 0.010]	9.0 ± 0.1 [0.350 ± 0.007]	6.0 ± 0.1 [0.250 ± 0.005]	4.0 ± 0.1 [0.160 ± 0.003]	2.5 ± 0.1 [0.113 ± 0.002]
<b>R</b> —Radius of fillet, min	10 [0.375]	8 [0.25]	6 [0.188]	4 [0.156]	2 [0.094]
<b>A</b> —Length of reduced section, min (Note 2)	75 [3.0]	54 [2.0]	36 [1.4]	24 [1.0]	20 [0.75]

รูปที่ 32 มาตรฐาน ASTM Standard E 8 และ E 8M ที่ใช้ในการดึงทดสอบวัสดุเหล็ก [15]



รูปที่ 33 เครื่องมืออุปกรณ์ที่ใช้ทดสอบความเค้น – ความเครียดในรูปแบบของแรงดึง [14]

### 2.2.6 พฤติกรรมของความเค้น-ความเครียด

ระดับการแปรรูปหรือเปลี่ยนรูปของโครงสร้างหนึ่ง ๆ จะมีค่ามากหรือน้อยขึ้นอยู่กับขนาดของแรงกระทำที่กระทำต่อระบบ โดยเมื่อโลหะส่วนใหญ่ซึ่งถูกกระทำด้วยแรงดึงซึ่งมีขนาดไม่สูงมาก ความเค้นและความเครียดที่เกิดขึ้นจะแปรผันตรงซึ่งกันและกันตามความสัมพันธ์ “กฎของฮุก (Hooke's law)” [14] ดังสมการที่ 2.3

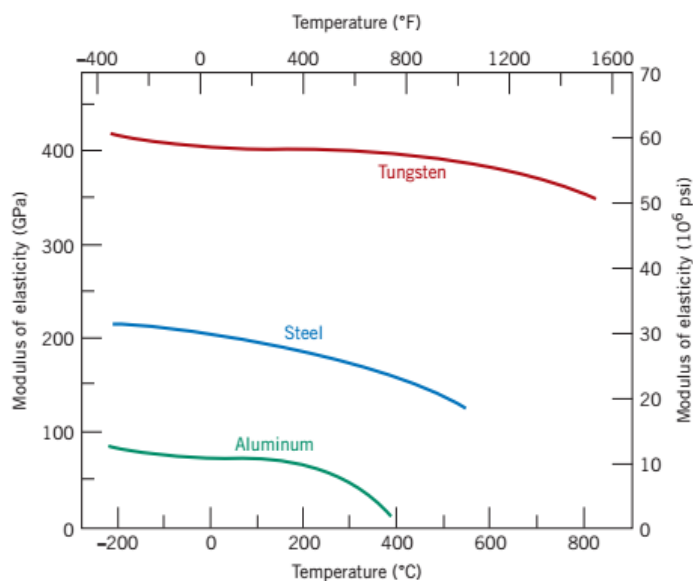
$$\sigma = E\varepsilon$$

2.3

ค่าคงที่ของการแปรผัน E (มีหน่วยเป็น จิกะปาสกาล) เรียกว่า โมดูลัสความยืดหยุ่น (Modulus of Elasticity) หรือโมดูลัสของยัง (Young's modulus) ซึ่งเป็นค่าบอกระดับความแข็งแรงของวัสดุ

ตารางที่ 4 โมดูลัสความยืดหยุ่น โมดูลัสของยัง และอัตราส่วนปัวซองของ โลหะบางชนิดที่ อุณหภูมิห้อง [14]

โลหะผสม	โมดูลัสความยืดหยุ่น		โมดูลัสของแรงเฉือน		อัตราส่วน ของปัวซอง
	GPa	10 <sup>6</sup> psi	GPa	10 <sup>6</sup> psi	
อะลูมิเนียม	69	10	25	3.6	0.33
ทองเหลือง	97	14	37	5.4	0.34
ทองแดง	110	16	46	6.7	0.34
แมกนีเซียม	45	6.5	17	2.5	0.29
นิกเกิล	207	30	76	11.0	0.31
เหล็ก	207	30	83	12.0	0.30
ไทเทเนียม	107	15.5	45	6.5	0.34
ทังสเตน	407	59	160	23.2	0.28



รูปที่ 34 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างมอดูลัสความยืดหยุ่นกับอุณหภูมิ  
ของทั้งสแตน เหล็กกล้า และอะลูมิเนียม [14]

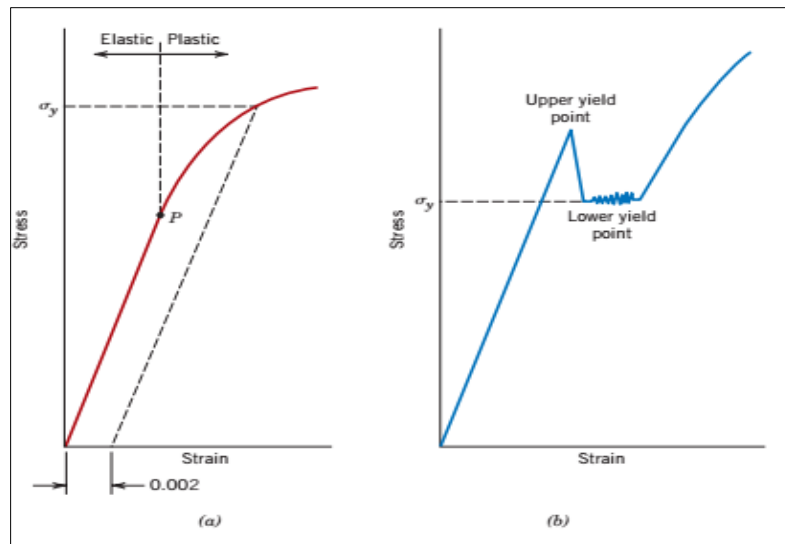
จากตารางที่ 4 และรูปที่ 34 พบว่าเหล็กมีค่ามอดูลัสความยืดหยุ่น ซึ่งเป็นค่าบอกระดับความแข็งแรงของวัสดุสูงกว่าอะลูมิเนียม ซึ่งสามารถสรุปได้ว่ามีความแข็งแรงในเรื่องของการใช้งานที่ทนทานกว่าวัสดุอะลูมิเนียม

### 2.2.7 คุณสมบัติความต้านทานแรงดึง

โครงสร้างรับแรงถูกออกแบบมาเพื่อให้มั่นใจว่าจะเกิดเพียงการแปรรูปแบบยืดหยุ่นเท่านั้นระหว่างที่ใช้งาน ดังนั้นวิศวกรต้องทราบถึงระดับของความเค้นที่จะเริ่มทำให้เกิดการแปรรูปถาวร หรือที่เรียกว่า การคราก (Yield) ซึ่งในโลหะมีพฤติกรรมการแปรรูปแบบยืดหยุ่นเป็นแบบถาวรอย่างค่อยเป็นค่อยไป ซึ่งจุดคราก คือ จุดที่กราฟความเค้น-ความเครียดเริ่มเบี่ยงเบนจากเส้นตรง ซึ่งเรียกจุดนี้ว่า ขีดจำกัดการแปรผันตรง (Proportional limit) แสดงด้วยจุด P จากรูปที่ 35 (a) จะแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น - ความเครียดในโลหะทั่วไป ค่าความเค้นที่จุดตัดระหว่างกราฟกับเส้นตรงที่ลากขึ้นนี้จะตัดกันในบริเวณที่เกิดการแปรรูปถาวรไปแล้ว เรียกว่า ความเค้นจุดคราก (Yield Strength) มีหน่วยเป็น เมกะปาสกาล [14]

ในกรณีทั่วไปแล้วการพิจารณาหาจุดดังกล่าวอาจทำได้ไม่แม่นยำ ดังนั้น จึงมีการใช้วิธีลากเส้นตรงขนานกับกราฟส่วนที่เป็นเส้นตรง โดยลากขึ้นไปจากจุดบนแกนอนที่มีค่าความเครียด

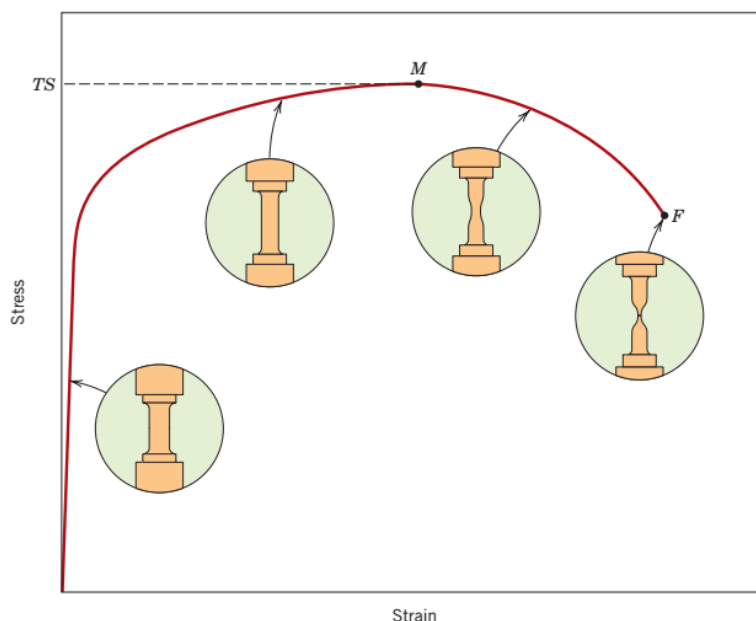
โดยทั่วไปใช้ 0.002 จะได้จุดตัดระหว่างกราฟกับเส้นตรงที่ลากขึ้นนี้ เรียกว่า ความเค้นจุดคราก (Yield strength) แสดงในรูปที่ 35 (a) [14]



รูปที่ 35 ความเค้นจุดคราก

- (a) แสดงขอบเขตของการแปรรูปแบบยืดหยุ่นและการแปรรูปแบบถาวร  
 (b) พฤติกรรมความเค้น ความเครียดของเหล็กกล้าและจุดคราก [14]

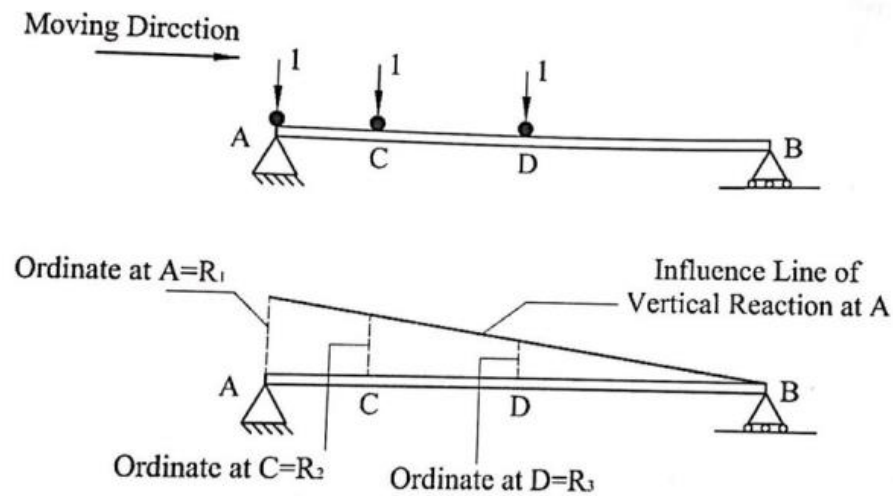
หลังเกิดการครากความเค้นที่ทำให้เกิดการแปรรูปถาวรต่อไปจะเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ จนถึงจุดสูงสุด เช่น จุด M ดังที่แสดงในรูปที่ 36 จากนั้นความเค้นจะลดลงจนถึงจุดที่ชิ้นงานขาดออกจากกัน (จุด F) โดยความต้านแรงดึง (Tensile Strength) มีหน่วยเป็น เมกะปาสกาล คือ ค่าความเค้นสูงสุดที่โครงสร้างหนึ่ง ๆ จะทนรับแรงได้ หากได้รับความเค้นเกิดต่อเนื่องไป ชิ้นส่วนนั้นจะแตกหักในที่สุด การแปรรูปที่เกิดขึ้นก่อนถึงจุดสูงสุดนี้จะเป็นการแปรรูปที่สม่ำเสมอตลอดความยาวของส่วนคอดของชิ้นทดสอบ แต่เมื่อถึงจุดความเค้นสูงสุดนี้จะเริ่มเกิดคอด (Neck) และการแปรรูปถาวรที่เกิดขึ้นต่อจากจุดนี้จะเกิดขึ้นในบริเวณคอดนี้เป็นหลัก ดังแสดงในรูปที่ 36 ปรากฏการณ์เช่นนี้เรียกว่า “ปรากฏการณ์คอด (Necking)” ท้ายที่สุดการแตกหักและขาดของชิ้นงานจะเกิดที่คอด ค่าความเค้นประลัย (Fracture Strength) คือ ความเค้นที่จุดแตกหัก [14]



รูปที่ 36 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดทางวิศวกรรมจนถึงจุดแตกหัก [14]

### 2.2.8 เส้นอิทธิพล

น้ำหนักบรรทุกที่กระทำกับโครงสร้างสามารถจำแนกได้เป็น 2 ประเภท คือ น้ำหนักบรรทุกคงที่ น้ำหนักบรรทุกจร โดยน้ำหนักบรรทุกคงที่คือน้ำหนักของตัวโครงสร้าง ส่วนน้ำหนักบรรทุกจรเป็นน้ำหนักที่กระทำกับโครงสร้างต่าง ๆ กล่าวได้ว่าเป็นน้ำหนักบรรทุกซึ่งไม่อยู่นิ่งกับที่ (เช่น ผู้อยู่อาศัย) หรือเป็นน้ำหนักเคลื่อนที่ (Moving load) เช่น ยวดยาน พาหนะซึ่งอาจกระทำกับโครงสร้างที่ตำแหน่งต่าง ๆ ชิ้นส่วนของโครงสร้างตลอดจนหน้าตัดแต่ละหน้าตัดจะได้รับอิทธิพลจากน้ำหนักบรรทุกต่าง ๆ กันเมื่อตำแหน่งที่น้ำหนักบรรทุกกระทำเปลี่ยนไปขนาดของชิ้นส่วนต้องถูกเลือกให้เพียงพอที่จะรับผลจากน้ำหนักบรรทุกกระทำในตำแหน่งที่เกิดปฏิกิริยาตอบสนอง เช่น โมเมนต์ แรงเฉือน แรงปฏิกิริยาฯ มากที่สุดที่หน้าตัดต่าง ๆ ในบางกรณีเราอาจรู้ตำแหน่งที่น้ำหนักบรรทุกควรกระทำซึ่งทำให้เกิดผลมากที่สุดที่หน้าตัดที่พิจารณาได้โดยง่าย โดยการตรวจสอบ (inspection) เท่านั้น แต่โดยทั่วไปแล้วเราไม่สามารถหาคำตอบได้โดยง่ายเช่นนั้น ในกรณีนี้จึงต้องทำการวิเคราะห์เพื่อหาเส้นอิทธิพล ซึ่งจะหาคำตอบที่ต้องการได้ [16]



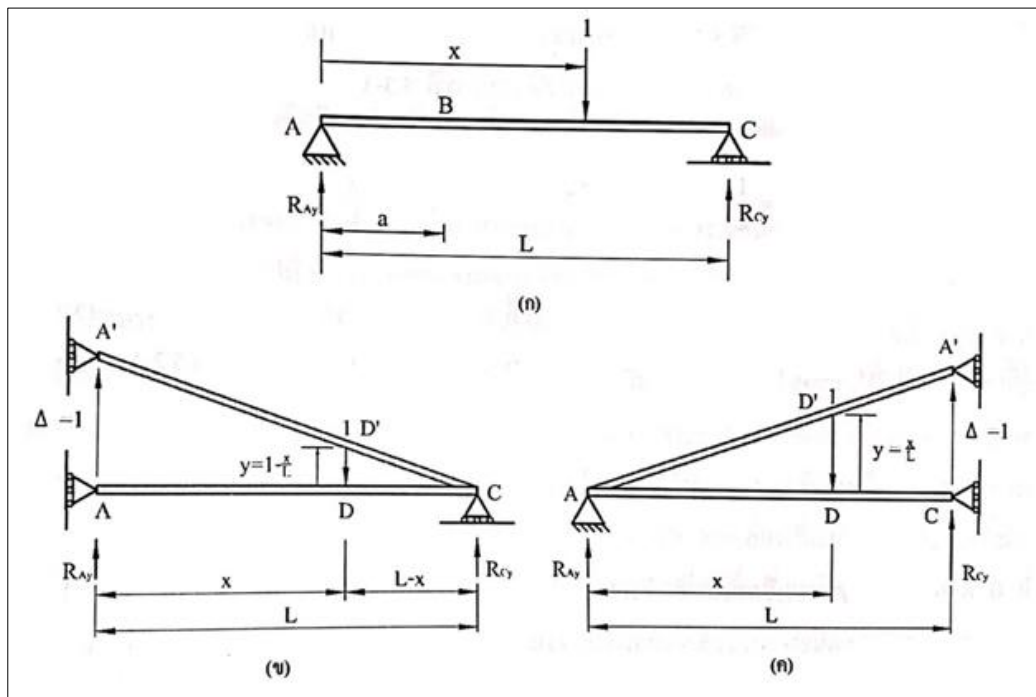
รูปที่ 37 เส้นอิทธิพลของแรงปฏิกิริยาของคานช่วงเดียวธรรมดา [17]

#### 2.2.8.1 การเขียนเส้นอิทธิพลโดยใช้หลักการของ Müller-Breslau

เส้นอิทธิพลสามารถเขียนได้โดยใช้หลักการของ Müller-Breslau ที่เสนอโดยศาสตราจารย์ชาว เยอรมัน Heinrich Müller-Breslau ในปี ค.ศ. 1886 หลักการนี้สรุปได้ว่า “เส้นอิทธิพลสำหรับฟังก์ชัน ผลตอบสนองของแรงหนึ่งๆ สามารถหาได้จากการเปลี่ยนรูปของโครงสร้างที่ไม่มีความต้านทานฟังก์ชัน ผลตอบสนองของแรงนั้นและค่าของฟังก์ชันผลตอบสนองของแรงดังกล่าวสามารถหาได้จากการให้การขจัด 1 หน่วย (Unit Displacement) ณ ตำแหน่งและทิศทางเดียวกับฟังก์ชันผลตอบสนองของแรงนั้น” โดยหลักการนี้สามารถใช้ได้สำหรับการเขียนเส้นอิทธิพลของแรงและโมเมนต์เท่านั้น (แรงปฏิกิริยา แรงเฉือน โมเมนต์ดัด หรือแรงตามแนวแกน) จะไม่สามารถใช้ได้กับเส้นอิทธิพลสำหรับการโก่งตัว อย่างไรก็ตามหลักการนี้สามารถประยุกต์ใช้ได้ไม่เฉพาะแต่คานเท่านั้น ยังสามารถประยุกต์ใช้ได้กับโครงข้อหมุนและโครงข้อแข็งและโครงสร้างสถิตินิติเทอร์มินท์ได้อีกด้วย [17]

การเขียนเส้นอิทธิพลสำหรับแรงปฏิกิริยาในแนวตั้งที่จุด A ตามหลักการของ Müller-Breslau ให้ลองพิจารณารูปที่ 38 (ก) แสดงคานช่วงเดียว ABC เริ่มจากให้ถอดการยึดรั้งของแรงปฏิกิริยาในแนวตั้งของฐานรองรับ A โดยการใส่ล้อเลื่อนในแนวตั้งเพื่อไม่ให้ความต้านทานฟังก์ชันของผลตอบสนองเนื่องจากแรงปฏิกิริยาในแนวตั้ง R เนื่องจากคาน ABC เป็นโครงสร้างสถิตินิติเทอร์มินท์ การถอดการยึดรั้งไป 1 ตัวจะส่งผลให้คานไม่มีเสถียรภาพทันที เมื่อทำให้จุด A เคลื่อนที่

ไป 1 หน่วย คาน ABC จึงเคลื่อนที่แบบวัตถุแข็งเกร็ง (Rigid Body Motion) ไม่มีการโก่งของคาน รูปร่างของคานหลังจากที่ทำให้จุด A เคลื่อนที่ไป 1 หน่วยแสดงดังรูปที่ 38 (ข) นั่นคือรูปร่างของเส้นอิทธิพลของแรงปฏิกิริยาในแนวตั้งที่จุด A [17]



รูปที่ 38 เส้นอิทธิพลสำหรับแรงปฏิกิริยาในแนวตั้งของคานช่วงเดียว [17]

ส่วนค่าการตอบสนองของฟังก์ชันหรือค่าอันดับหนึ่งสามารถหาได้โดยใช้หลักการของงานเสมือนของวัตถุแข็งเกร็งได้ โดยงานเสมือนที่เกิดจากแรงภายนอกจริงกับการเคลื่อนที่ภายนอกเสมือนต้องเท่ากับศูนย์ พิจารณารูปที่ 39 มีแรงภายนอกจริง 3 แรงคือ  $R_{Ay}$   $R_{Cy}$  และแรงกระทำหนึ่งหน่วย การเคลื่อนที่ภายในตามตำแหน่งที่แรงภายนอกนั้นกระทำคือ 1 หน่วย  $y$  หน่วย และ 0 หน่วย ตามลำดับ ดังนั้น งานเสมือนที่เกิดขึ้นมีค่าเท่ากับศูนย์จะเป็นไปตามสมการที่ 2.4 [17]

$$W_{ve} = R_{Ay}(1) + R_{Cy}(0) - (1)(y) = 0 \quad 2.4$$

ดังนั้น

$$R_{Ay} = y \quad 2.5$$



สมการที่ 2.5 อธิบายถึงจุดใดๆบนโครงสร้างการขจัด  $y$  ตามรูปที่ 39 เท่ากับแรงปฏิกิริยาในแนวดิ่งที่จุด A เนื่องจากแรงกระทำหนึ่งหน่วยกระทำที่จุดนั้น แต่แรงปฏิกิริยาในแนวดิ่งที่จุด A ที่ได้เป็นค่าตอบสนองของฟังก์ชันหรือออร์ดิเนต (Ordinate) อยู่แล้วเพราะเกิดจากแรงกระทำหนึ่งหน่วย ดังนั้น การขจัด  $y$  ที่จุดใดๆ บนโครงสร้าง คือ ค่าตอบสนองของฟังก์ชันหรือออร์ดิเนต (Ordinate) ของเส้นอิทธิพลสำหรับแรงปฏิกิริยาที่จุด A ซึ่งค่าของการขจัด  $y$  สามารถหาได้โดยการพิจารณารูปร่างทางเรขาคณิตของคานาที่เสียรูปแล้ว ลองพิจารณารูปที่ 39 (ข) จะเห็นว่าสามเหลี่ยม  $ACA'$  และสามเหลี่ยม  $DCD'$  คล้ายกัน จึงสามารถหาค่า  $y$  โดยใช้กฎของสามเหลี่ยมคล้ายได้ดังสมการที่ 2.6 [17]

$$\frac{y}{(L-x)} = \frac{1}{L} \quad \text{หรือ} \quad y = 1 - \frac{x}{L} \quad 2.6$$

นำค่า  $y$  ไปแทนค่าลงในสมการที่ 2.5 จะได้สมการของเส้นอิทธิพลสำหรับแรงปฏิกิริยาในแนวดิ่ง ( $R_{Ay}$ ) ดังสมการที่ 2.7

$$R_{Ay} = 1 - \frac{x}{L} \quad 2.7$$

ส่วนการเขียนเส้นอิทธิพลสำหรับแรงปฏิกิริยาในแนวดิ่งที่จุด C สามารถทำได้โดยหลักการเดียวกับการเขียนเส้นอิทธิพลสำหรับแรงปฏิกิริยาที่จุด A โดยพิจารณารูป 39 (ก) อีกครั้ง โดยถอดการยึดรั้งของแรงปฏิกิริยาในแนวดิ่งของฐานรองรับ C โดยการใส่ล้อเลื่อนในแนวดิ่งเพื่อไม่ให้มีความต้านทานฟังก์ชันของผลตอบสนองของแรงปฏิกิริยาในแนวดิ่ง  $R_{Cy}$  จากนั้นทำให้จุด C เคลื่อนที่ไป 1 หน่วย คานา ABC จึงเคลื่อนที่ไปตามรูปร่างดังรูปที่ 39 (ค) นั่นคือรูปร่างของเส้นอิทธิพลแรงปฏิกิริยาในแนวดิ่งที่จุด C ดังนั้นงานเสมือนภายนอกที่เกิดขึ้นมีค่าเท่ากับศูนย์จะเป็นไปตามสมการที่ 2.8 [17]

$$W_{ve} = R_{Ay}(0) + R_{Cy}(1) - (1)(y) = 0 \quad 2.8$$

ดังนั้น

$$R_{Cy} = y \quad 2.9$$

สมการที่ 2.9 กล่าวคือจุดใดๆ บนโครงสร้าง การขจัด  $y$  ตามรูปที่ 39 (ค) จะเท่ากับแรงปฏิกิริยาในแนวตั้งที่จุด C หรือค่าตอบสนองของฟังก์ชันหรือออร์ดิเนต (Ordinate) ของเส้นอิทธิพลสำหรับแรงปฏิกิริยาที่จุด C และลองพิจารณารูปที่ 39 (ค) จะเห็นว่าสามเหลี่ยม  $ADD'$  และสามเหลี่ยม  $ACC'$  คล้ายกัน สามารถหาค่า  $y$  โดยใช้กฎของสามเหลี่ยมคล้ายได้ [17]

$$\frac{y}{x} = \frac{1}{L} \quad \text{หรือ} \quad y = \frac{x}{L} \quad 2.10$$

หรือ

$$R_{Cy} = \frac{x}{L} \quad 2.11$$

หลักการของ Müller-Breslau สามารถนำมาใช้เพื่อการเขียนเส้นอิทธิพลสำหรับแรงเฉือนได้เช่นเดียวกัน พิจารณารูปที่ 39 (ก) แสดงคานช่วงเดียวสำหรับการเขียนเส้นอิทธิพลสำหรับแรงเฉือนที่จุด B เพื่อไม่ให้มีความต้านทานฟังก์ชันของผลตอบสนองเนื่องจากแรงเฉือน จึงต้องใส่ล้อเลื่อนในแนวตั้ง หรือใช้ระนาบตัดคานที่จุด B ออกจากกัน จะได้ชิ้นส่วนโครงสร้าง 2 ชิ้น โดยที่มีแรงภายใน ได้แก่ แรงเฉือน ( $V_B$ ) และโมเมนต์คัต ( $M_B$ ) ตามข้อตกลงทางเครื่องหมาย (Sign Convention) เพื่อต้านแรงภายนอกและทำให้โครงสร้างชิ้นส่วนทั้งสองมีความสมดุล จากนั้นจึงทำให้จุด B เคลื่อนที่ไป 1 หน่วยตามทิศทางของแรงเฉือน นั่นคือที่ปลาย B ของชิ้นส่วนโครงสร้าง AB จะเคลื่อนที่ลงเท่ากับ  $\Delta_1$  แต่ที่ปลาย B ของชิ้นส่วนโครงสร้าง BC จะเคลื่อนที่ขึ้นเท่ากับ  $\Delta_2$  โดยการเคลื่อนที่หนึ่งหน่วยสัมพัทธ์ที่จุด B นั้น มีค่าเท่ากับหนึ่ง ( $\Delta = \Delta_1 + \Delta_2$ ) แต่มีเงื่อนไขว่าการเคลื่อนที่ที่ปลาย B ของชิ้นส่วนทั้งสองจะต้องเกิดมุมหมุนที่ปลาย ( $\theta$ ) เท่ากัน นั่นคือชิ้นส่วนทั้งสองชิ้นจะวางตัวขนานกัน จะได้รูปร่างของเส้นอิทธิพลสำหรับแรงเฉือนที่จุด B ดังรูปที่ 39 (ข) และงานเสมือนภายนอกที่เกิดขึ้นมีค่าเท่ากับศูนย์ จะเป็นไปตาม สมการที่ 2.12 [17]

$$W_{ve} = V_B(\Delta_1) + V_B(\Delta_2) - M_B(\theta) + M_B(\theta) - R_{Ay}(0) + R_{Cy}(0) - (1)(y) = 0 \quad 2.12$$

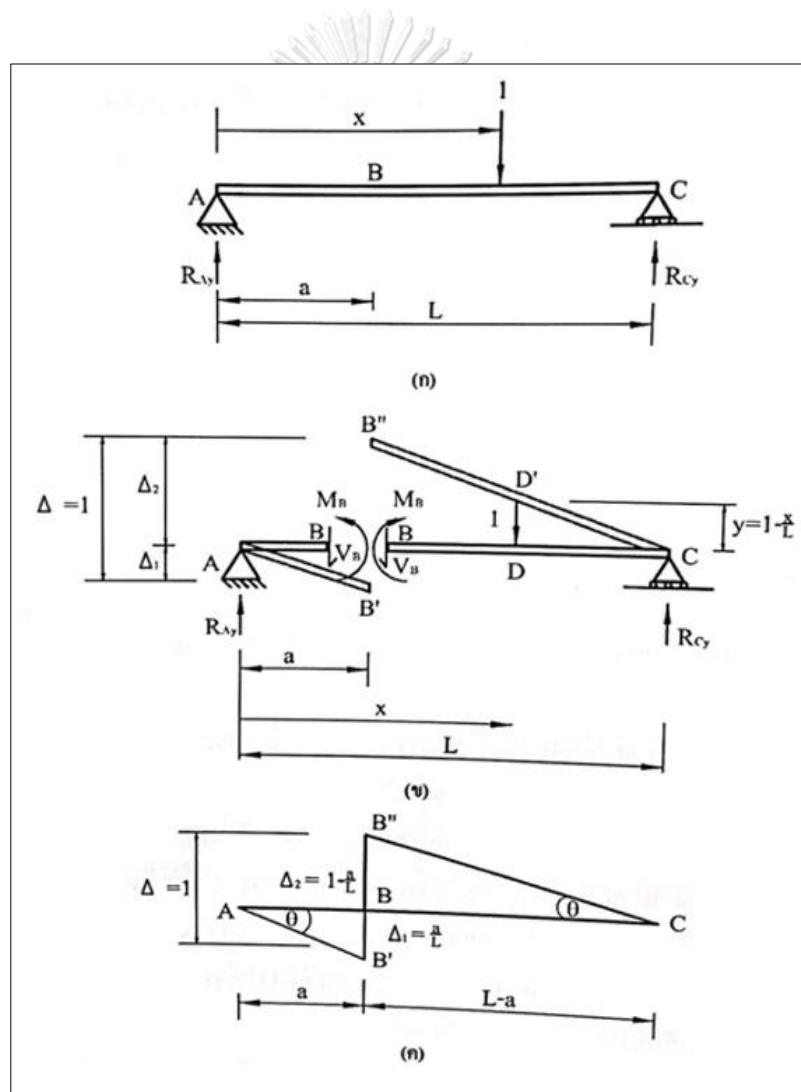
ดังนั้น

$$V_B(\Delta_1 + \Delta_2) = y$$

$$V_B(\Delta) = V_B(1) = y$$

$$V_B = y$$

2.13



รูปที่ 39 เส้นอิทธิพลสำหรับแรงเฉือนของคานช่วงเดียว [17]

สมการที่ 2.13 หมายความว่าที่จุดใดๆ บนโครงสร้าง การขจัด  $y$  ตามรูปที่ 39 (ค) จะเท่ากับ แรงเฉือนที่จุด B หรือ ค่าตอบสนองของฟังก์ชันหรือออร์ดิเนต (Ordinate) ของเส้นอิทธิพลสำหรับ แรงเฉือนที่จุด B และลองพิจารณารูปที่ 39 (ค) จะเห็นว่าสามเหลี่ยม  $AB'B$  และสามเหลี่ยม  $BCB''$  คล้ายกัน สามารถหา  $\Delta_1$  และ  $\Delta_2$  โดยใช้กฎของสามเหลี่ยมคล้ายได้

$$\frac{\Delta_1}{a} = \frac{\Delta_2}{(L-a)} \quad 2.14$$

แต่เนื่องจากการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ที่จุด B มีค่าเท่ากับ 1 ดังนั้น

$$\Delta = \Delta_1 + \Delta_2 = 1 \quad 2.15$$

แก้สมการที่ 2.14 และ 2.15 พร้อมกันจะได้

$$\Delta_1 = \frac{a}{L} \quad \text{และ} \quad \Delta_2 = 1 - \frac{a}{L} \quad 2.16$$

หลักการเขียนเส้นอิทธิพลสำหรับโมเมนต์ดัดโดยใช้หลักการของ Müller-Breslau มีวิธีการ คล้ายกับการเขียนเส้นอิทธิพลสำหรับแรงปฏิกิริยาหรือแรงเฉือน พิจารณารูปที่ 40 (ก) แสดงคานช่วง เดียวสำหรับการเขียนเส้นอิทธิพลสำหรับโมเมนต์ดัดที่จุด B การทำให้ไม่มีความต้านทานฟังก์ชันของ ผลตอบสนองเนื่องจากโมเมนต์ดัดจะต้องใส่จุดยึดหมุนภายใน (Internal Hinge) เพื่อให้จุด B สามารถหมุนได้อย่างอิสระ โครงสร้างนี้จะสมดุลได้ด้วยการใส่โมเมนต์เข้าไปที่จุด B ตามข้อตกลงทาง เครื่องหมาย (Sign Convention) โดยทำให้จุด B หมุนไป 1 หน่วย นั่นคือชิ้นส่วนโครงสร้าง AB จะ หมุนทวนเข็มนาฬิกาด้วยมุมหมุนขนาด  $\theta_1$  แต่โครงสร้าง BC จะหมุนตามเข็มนาฬิกาด้วยมุมหมุน ขนาด  $\theta_2$  โดยการเปลี่ยนแปลงมุมที่จุด B นั้นมีค่าเท่ากับหนึ่ง ( $\theta = \theta_1 + \theta_2 = 1$ ) จะได้รูปร่างของเส้น อิทธิพลสำหรับโมเมนต์ดัดที่จุด B ดังรูปที่ 39 (ข) และงานเสมือนภายนอกที่เกิดขึ้นมีค่าเท่ากับศูนย์จะ เป็นไปตามสมการที่ 2.17

$$W_{ve} = M_B(\theta_1) + M_B(\theta_2) + R_{Ay}(0) + R_{Cy}(0) - (1)(y) = 0 \quad 2.17$$

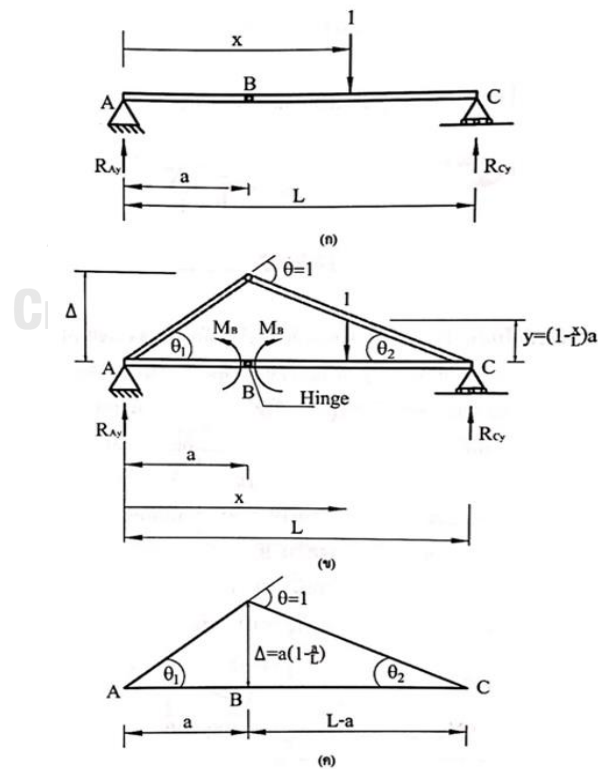
ดังนั้น

$$M_B(\theta_1 + \theta_2) = y$$

$$M_B(\theta) = M_B(1) = y$$

$$M_B = y \quad 2.18$$

สมการที่ 2.18 อธิบายถึงจุดใดๆ บนโครงสร้าง การขจัด  $y$  ตามรูปที่ 40 (ค) จะเท่ากับโมเมนต์ตัดที่จุด B หรือ ค่าตอบสนองของฟังก์ชันหรือออร์ดิเนต (Ordinate) ของเส้นอิทธิพลสำหรับโมเมนต์ตัดที่จุด B [17]



รูปที่ 40 เส้นอิทธิพลสำหรับโมเมนต์ตัดของคานช่วงเดียว [17]

พิจารณารูปที่ 40 (ค) จะเห็นว่าสามเหลี่ยม AB'B และสามเหลี่ยม BCB'' มีด้าน BB' ร่วมกัน  
อยู่หนึ่งด้าน ดังนั้น

$$\Delta = a\theta_1 = (L - a)\theta_2 \quad 2.19$$

แต่เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงมุมที่จุด B มีค่าเท่ากับ 1 ดังนั้น

$$\theta = \theta_1 + \theta_2 = 1 \quad 2.20$$

แก้สมการที่ 2.19 และ 2.20

$$\Delta = (L - a) \frac{a}{L} = a \left(1 - \frac{a}{L}\right) \quad 2.21$$

ค่า  $\Delta$  ที่ได้จากสมการที่ 2.21 เป็นค่า  $y$  ที่จุด B นั้นหมายถึงค่าออร์ดิเนตหรือค่า ตอบสนองของ  
ฟังก์ชันของโมเมนต์ดัดที่จุด B แสดงว่าเมื่อน้ำหนักบรรทุกทุกจรรยาหนึ่งหน่วยเคลื่อนที่มายังจุด B จะทำให้  
โมเมนต์ดัดที่จุด B มีค่ามากที่สุดเท่ากับ  $a/[1 - (a/L)]$

ที่กล่าวมาทั้งหมดจะเห็นว่ารูปร่างของเส้นอิทธิพลจะเป็นส่วนของเส้นตรงต่อกัน ทั้งนี้เพราะ  
โครงสร้างที่พิจารณานั้นเป็นโครงสร้างดีเทอร์มิเนท การถอดจุดยึดตั้งที่ฐานรองรับเพียง 1 ตัวจะทำให้  
โครงสร้างเกิดความไม่สมดุลหรือไม่เสถียรภาพทันที จะไม่มีแรงภายในเกิดขึ้นในชิ้นส่วนโครงสร้าง  
เมื่อ รั้น้ำหนักบรรทุกทุกจรรยาหนึ่งหน่วย ดังนั้นการเปลี่ยนรูปหรือการเสียรูปของโครงสร้างจะเป็นเส้นตรง  
เหมือนกับการเคลื่อนที่ของวัตถุแข็งเกร็ง (Rigid Body Motion) แต่ถ้าพิจารณาโครงสร้างอินเทอร์  
มิเนท การถอดจุดยึดตั้งที่ฐานรองรับเพียง 1 ตัว โครงสร้างก็ยังคงอยู่ในสภาวะสมดุล ดังนั้นโครงสร้าง  
ที่รับ น้ำหนักบรรทุกทุกจรรยาหนึ่งหน่วยก็ทำให้เกิดแรงภายในโครงสร้าง การเปลี่ยนรูปหรือการเสียรูปของ  
โครงสร้าง จะเป็นเส้นโค้ง เนื่องจากแรงภายในโครงสร้างทำให้เกิดการโก่งตัว [17]

การเขียนเส้นอิทธิพลของโครงสร้างในทางปฏิบัติมักจะใช้หลักการของ Müller-Breslau เพื่อหา  
รูปร่างของเส้นอิทธิพล การเขียนเส้นอิทธิพลโดยไม่มีการเขียนค่าตอบสนองของฟังก์ชันหรือค่าออร์  
ดิเนต เพียงแต่เขียนเพื่อให้รู้รูปร่างโดยคร่าวๆ เท่านั้นเรียกว่า เส้นอิทธิพลเชิงคุณภาพ (Qualitative

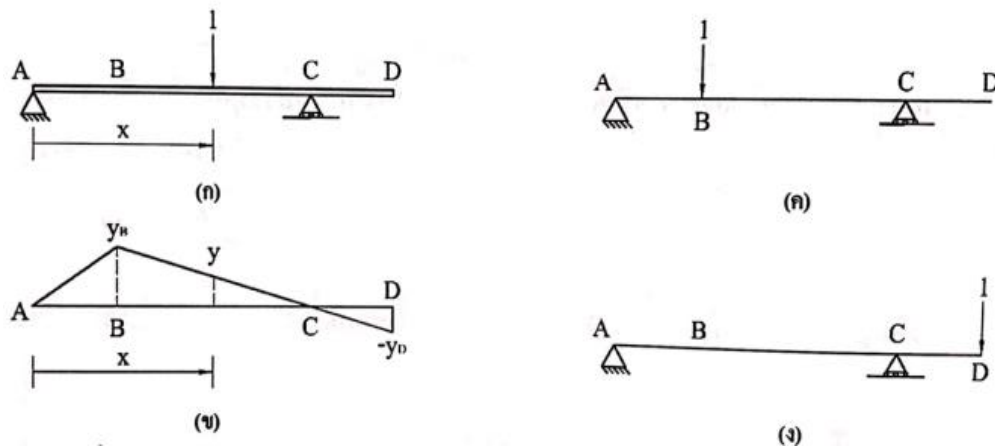
Influence Line) แต่ในทางกลับกันถ้าเป็นการเขียนเส้นอิทธิพลที่มีค่าตอบสนองของฟังก์ชันหรือค่าออร์ดิเนตด้วย ซึ่งเรียกว่า เส้นอิทธิพลเชิงปริมาณ (Quantitative Influence Line) ถึงแม้ว่าการใช้หลักการของ Müller-Breslau นอกจากจะทราบถึงรูปร่างและปริมาณออร์ดิเนตของเส้นอิทธิพล แต่ในทางปฏิบัติมักจะใช้หลักการของ Müller-Breslau เพื่อหารูปร่างเท่านั้น ส่วนปริมาณมักจะหาด้วยวิธีสมดุล (Equilibrium Method) มากกว่า [17]

### 2.2.9 การประยุกต์ใช้เส้นอิทธิพลสำหรับโครงสร้างที่รับน้ำหนักบรรทุกเคลื่อนที่

แบ่งออกเป็น 2 ประเภท ได้แก่ การหาผลตอบสนองของโครงสร้างที่รับน้ำหนักบรรทุกเคลื่อนที่แบบจุดและการหาผลตอบสนองของโครงสร้างที่รับน้ำหนักบรรทุกเคลื่อนที่แบบแผ่สม่ำเสมอ

1) การหาผลตอบสนองของโครงสร้างที่รับน้ำหนักบรรทุกเคลื่อนที่แบบจุด เมื่อเขียนเส้นอิทธิพลได้แล้วเราสามารถนำเส้นอิทธิพลนั้นมาประยุกต์เพื่อหาค่าของฟังก์ชันของผลตอบสนองที่ต้องการ เนื่องจากน้ำหนักบรรทุกที่กระทำกับโครงสร้างสามารถนำไปหาค่าของฟังก์ชันของผลตอบสนองสูงสุดที่เกิดขึ้นเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกจรเคลื่อนที่ได้ โดยเส้นอิทธิพลเป็นเส้นที่แสดงฟังก์ชันของผลตอบสนองของโครงสร้างเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกเคลื่อนที่หนึ่งหน่วยที่เคลื่อนที่ไปบนโครงสร้าง ดังนั้น ค่าของผลตอบสนองของโครงสร้างเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกกระทำแบบจุดขนาดเท่ากับ  $P$  จะเท่ากับค่าออร์ดิเนตของฟังก์ชันผลตอบสนองของโครงสร้างบนเส้นอิทธิพลคูณกับขนาดของน้ำหนักกระทำแบบจุดนั้น เมื่อทราบค่าออร์ดิเนตสูงสุดหรือต่ำสุดของฟังก์ชันบนเส้นอิทธิพลสามารถหาผลตอบสนองของโครงสร้างเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกเคลื่อนที่แบบจุดกระทำได้ โดยการวางน้ำหนักนั้นลงบนตำแหน่งที่มีค่าออร์ดิเนตสูงสุดหรือต่ำสุด จะได้ค่าผลตอบสนองของโครงสร้างสูงสุดหรือต่ำสุดตามลำดับ

พิจารณารูปที่ 41 (ก) คาน ABCD รับน้ำหนักกระทำแบบจุด  $P$  ห่างจากฐานรองรับ  $A$  เป็นระยะ  $x$  หากเขียนเส้นอิทธิพลสำหรับโมเมนต์ดัดที่จุด  $B$  จะได้ดังรูปที่ 39 (ข) โดยมีค่าออร์ดิเนตที่ระยะ  $x$  เท่ากับ  $y$  ดังนั้นค่าของโมเมนต์ดัดที่จุด  $B$  เมื่อมีน้ำหนักแบบจุด  $P$  กระทำห่างจากฐานรองรับ  $A$  เป็นระยะ  $X$  จะเท่ากับ  $P_y$



รูปที่ 41 การหาผลตอบสนองของโครงสร้างที่รับน้ำหนักบรรทุกเคลื่อนที่แบบจุด [17]

เมื่อพิจารณาค่าอันดับหนึ่งของโมเมนต์ตัดบนเส้นอิทธิพลจะเห็นว่า มีค่าบวกสูงสุดที่ตำแหน่ง B เท่ากับ  $y_B$  ดังนั้น หากต้องการทราบว่าค่าของโมเมนต์ตัดที่จุด B มีค่าบวกสูงสุดเท่าใดทำได้โดยวางน้ำหนักบรรทุกกระทำแบบจุด P ที่จุด B ดังรูปที่ 41 (ค) จะได้ค่าโมเมนต์ตัดบวกสูงสุดมีค่าเท่ากับ  $Py_B$  ในทำนองเดียวกันจะเห็นว่าที่จุด D ค่าอันดับหนึ่งของโมเมนต์ตัดบนเส้นอิทธิพลมีค่าต่ำสุด (เป็นลบสูงสุด) ที่ ตำแหน่ง D เท่ากับ  $y_D$  ดังนั้นจึงต้องวางน้ำหนักบรรทุกกระทำแบบจุด P ที่จุด D ดังรูปที่ 41 (ง) เพื่อให้ได้ค่าโมเมนต์ตัดลบสูงสุดที่จุด B ซึ่งจะมีค่าเท่ากับ  $-Py_D$

2) การหาผลตอบสนองของโครงสร้างที่รับน้ำหนักบรรทุกเคลื่อนที่แบบแผ่สม่ำเสมอ  
 โครงสร้างรับน้ำหนักบรรทุกเคลื่อนที่แบบแผ่สม่ำเสมอ เราสามารถหาผลตอบสนองต่อโครงสร้างโดยใช้ประโยชน์จากเส้นอิทธิพลได้เช่นเดียวกัน ลองพิจารณาคาน ABCD ดังรูป 42 (ก) ซึ่งรับน้ำหนักบรรทุกแบบแผ่สม่ำเสมอช่วง E และ F ที่ห่างจากฐานรองรับ A เป็นระยะ a และ b ตามลำดับ หากพิจารณาส่วนเล็กๆ ของน้ำหนักบรรทุกกระทำแบบแผ่สม่ำเสมอ  $w_1 dx$  ซึ่งเท่ากับ  $dP$  ดังรูป ดังนั้นโมเมนต์ตัดที่จุด B เนื่องจากน้ำหนัก  $dP = w_1 dx$  คือ

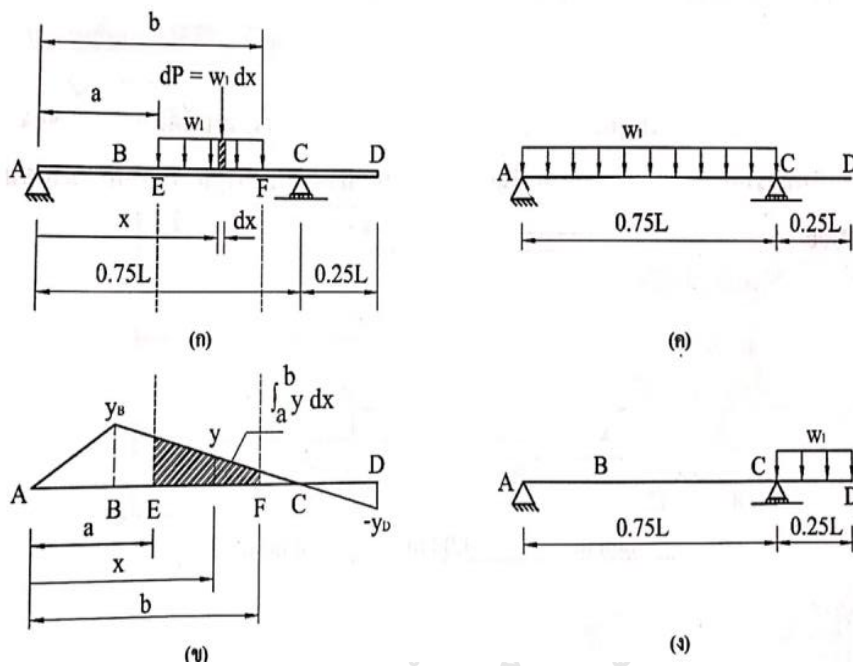
$$dM_B = dP y = (w_1 dx) y$$

2.22



โดยที่  $y$  คือค่าออร์คิเนทของโมเมนต์ดัดบนเส้นอิทธิพลที่ตำแหน่งน้ำหนัก  $dP$  กระทำดังรูปที่ 2.38 (ข) หากน้ำหนักบรรทุกทั้งหมดกระทำอยู่ในช่วง  $a$  และ  $b$  จุดเริ่มต้นอยู่ที่จุด  $A$  ค่าของโมเมนต์ดัดที่จุด  $B$  จะเท่ากับ

$$M_B = \int_a^b dM_B = \int_a^b (w_1 dx)y = w_1 \int_a^b y dx \quad 2.20$$



รูปที่ 42 การหาผลตอบสนองของโครงสร้างที่รับน้ำหนักบรรทุกเคลื่อนที่แบบแผ่นสม่ำเสมอ [17]

จะเห็นว่า  $\int_a^b y dx$  คือพื้นที่ใต้เส้นอิทธิพลในช่วงจาก  $a$  ถึง  $b$  ซึ่งก็คือช่วงที่น้ำหนักบรรทุกแบบแผ่นกระทำ โดยสรุปคือค่าของฟังก์ชันของผลตอบสนองของโครงสร้างที่รับน้ำหนักบรรทุกเคลื่อนที่แบบแผ่นสม่ำเสมอสามารถคำนวณได้จากผลคูณของขนาดน้ำหนักบรรทุกกระทำแบบแผ่นสม่ำเสมอกับพื้นที่ใต้เส้นอิทธิพลในช่วงตำแหน่งน้ำหนักบรรทุกแบบแผ่นสม่ำเสมอนั้นกระทำโดยพิจารณารูปที่ 42 (ข) พบว่าเส้นอิทธิพลช่วง  $AC$  เกิดโมเมนต์ดัดที่จุด  $B$  เป็นค่าบวกตลอดช่วง ดังนั้นถ้าต้องการหาค่าโมเมนต์ดัดที่จุด  $B$  เป็นบวกสูงสุดจึงต้องวางน้ำหนักบรรทุกเคลื่อนที่แบบแผ่นสม่ำเสมอกระทำอยู่ในช่วง  $AC$  ดังรูปที่ 42 (ค) ในกรณีนี้โมเมนต์ดัดที่จุด  $B$  มีค่าเท่ากับ

$M_B = w_1 \left(\frac{1}{2}\right) (0.75L)(y_B)$  และเส้นอิทธิพลในช่วง CD เกิดโมเมนต์ดัดที่จุด B มีค่าเป็นลบตลอด ดังนั้น ถ้าต้องการหาค่าโมเมนต์ดัดที่จุด B เป็นลบสูงสุดจะต้องวางน้ำหนักบรรทุกเคลื่อนที่แบบแผ่นสม่ำเสมอกระทำอยู่ในช่วง CD ดังรูปที่ 42 (ง) ในกรณีนี้โมเมนต์ดัดที่จุด B มีค่าเท่ากับ  $M_B = w_1 \left(\frac{1}{2}\right) (0.25L)(-y_D)$  [17]

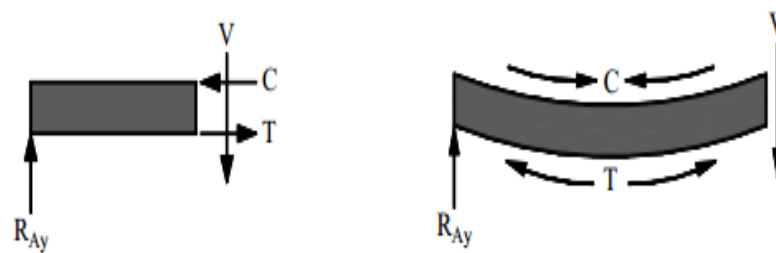
ดังนั้น ถ้าต้องการหาผลตอบสนองของโครงสร้างที่มากที่สุดหรือน้อยที่สุดของฟังก์ชันผลตอบสนองใดของแรงปฏิกิริยา แรงเฉือน และโมเมนต์ดัดให้สังเกตจากเส้นอิทธิพลของฟังก์ชันนั้นว่ามีค่าสูงสุด (เป็นบวก) หรือต่ำสุด (เป็นลบ) แล้ววางน้ำหนักบรรทุกเคลื่อนที่ที่ตำแหน่งเหล่านั้นให้มากที่สุดจะได้ผลตอบสนองของโครงสร้างที่มากที่สุดหรือน้อยที่สุดตามต้องการ [17]

#### 2.2.10 แรงเฉือนและโมเมนต์ดัด

ในส่วนนี้จะทำการพิจารณาส่วนต่างๆ ของโครงสร้างที่ถูกกระทำด้วยแรงหรือน้ำหนักบรรทุกตามขวาง (Transverse Loading) กล่าวคือ ท่อนวัสดุใดๆ ที่ถูกกระทำด้วยแรงตามขวางหรือแรงที่มีทิศทางตั้งฉากกับแนวแกนของท่อนวัสดุหรือโมเมนต์ของแรงคู่ควบ (Couple) ที่อยู่ในระนาบเดียวกัน เรียกว่า คาน (Beam) จากลักษณะของสะพานทหาร เอ็ม จี บี มีแรงกระทำด้วยแรงตามขวางและมีทิศทางตั้งฉากกับแนวแกนของตัวสะพาน เช่นเดียวกันกับแรงที่กระทำกับคาน จึงสามารถทำการวิเคราะห์แรงเฉือนและโมเมนต์ดัดในลักษณะ เช่นเดียวกันได้ โดยชนิดของคานอาจแบ่งได้เป็น 2 ประเภท ได้แก่ คานที่คำนวณหาตัวไม่รู้ค่าได้ในทางสถิตศาสตร์ (Statically Determinate Beams) และคานที่คำนวณหาตัวไม่รู้ค่าได้ในทางสถิตศาสตร์ (Statically Indeterminate Beams) และทั้งสองประเภทนี้ โดยแบ่งย่อยออกไปอีกตามลักษณะของจุดรองรับ (Support) ต่างๆ ในการวิเคราะห์ส่วนของสะพานทหาร เอ็ม จี บี นี้จะทำการวิเคราะห์แบบคานแบบดีเทอร์มิเนต (Statically Determinate Beams) ซึ่งได้แก่ คานช่วงเดียวธรรมดา คานประเภทนี้สามารถคำนวณหาค่าของแรงปฏิกิริยาที่ฐานรองรับได้ทันทีโดยพิจารณาหาได้จากสมการสมดุลสถิตเพียงอย่างเดียว [18]

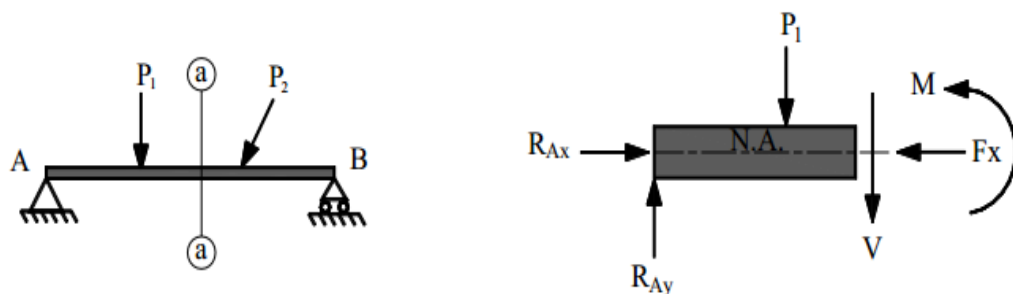
### 2.2.10.1 พฤติกรรมการรับแรงของคานตีเทอริเมนต์

พฤติกรรมการรับแรงของคานโดยทั่วไปจะรับแรงอัด (Compression : C) ในส่วนบนสุดของหน้าตัดภายในคานและจะรับแรงดึง (Tension : T) ในส่วนล่างสุดของหน้าตัดภายในคาน ดังรูปที่ 43 [18]



รูปที่ 43 แสดงพฤติกรรมการรับแรงของคาน [18]

เมื่อคานถูกแรงและโมเมนต์ดัดกระทำจากภายนอกจะเกิดแรงและโมเมนต์ดัดขึ้นภายในหน้าตัด ซึ่งเราสามารถคำนวณหาค่าแรงเหล่านั้นได้ด้วยการใช้สมการสมดุลและเมื่อตัดคานที่หน้าตัดใดๆ จะพบแรงที่เกิดขึ้น ดังรูปที่ 44 [18]



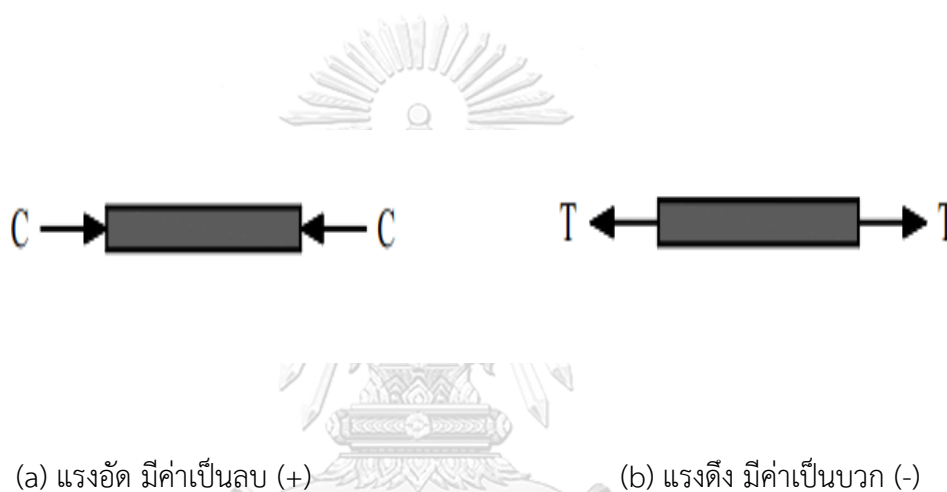
(a) คานช่วงเดียวธรรมดา

(b) เมื่อพิจารณา Section a-a

รูปที่ 44 แสดงการพิจารณาแรงที่เกิดขึ้นบนคานช่วงเดียวธรรมดา [18]

จากรูปที่ 44 (a) เมื่อพิจารณาหน้าบริเวณหน้าตัด a-a พบว่ามีแรงตามแนวแกน แรงเฉือน และโมเมนต์ดัดเกิดขึ้นดังรูปที่ 2.39 (b) โดยทั้ง 3 แรงที่เกิดขึ้นบริเวณหน้าตัด a-a สามารถอธิบายได้ ดังนี้

1) แรงตามแนวแกน ( $F_x$ ) เป็นแรงที่เกิดขึ้นตามแนวแกนสะเทิน (Neutral Axis) หรือแกนสะเทิน ซึ่งเป็นแกนที่มีค่าเป็นกลางซึ่งไม่มีผลต่อการรับน้ำหนัก โดยเครื่องหมายแทนแรงอัดจะใช้เครื่องหมายลบ (-) ส่วนแรงดึงจะใช้เครื่องหมายบวก (+) และสัญลักษณ์แทนแรงอัดจะใช้หัวลูกศรวิ่งเข้าหากัน และสัญลักษณ์แทนแรงดึงจะใช้หัวลูกศรวิ่งออกจากกัน ดังรูปที่ 45 [18]



รูปที่ 45 แสดงเครื่องหมายและสัญลักษณ์แทนแรงในแนวแกนซึ่งมีทั้งแรงอัดและแรงดึง [18]

2) แรงเฉือน (Shearing Force :  $V$ ) เป็นแรงที่ทำให้คานขาดออกจากกันในแนวตั้ง ซึ่งเป็นแรงที่มีผลมากต่อโครงสร้างอาคารและโครงสร้างสะพาน สำหรับแรงเฉือนมีทั้งค่าบวกและค่าลบโดยพิจารณาคานจากซ้ายไปขวา ซึ่งกำหนดให้แรงที่มีทิศทางขึ้นเป็นบวก (+) แรงที่มีทิศทางลงเป็นลบ (-) ถ้าตัดคานที่หน้าตัด ใดๆ แล้วมีแรงที่พยายามเฉือนให้ขึ้นส่วนของคานด้านซ้ายมีทิศทางขึ้นและคานด้านขวามีทิศทางลง แรงเฉือนบริเวณนั้นจะมีค่าเป็นบวกและในทางตรงข้ามถ้าแรงพยายามเฉือนให้ขึ้นส่วนของคานด้านซ้ายมีทิศทางลงและคานด้านขวามีทิศทางขึ้น แรงเฉือนก็จะมีค่าเป็นลบ ดังรูปที่ 46 [18]



(a) แรงเฉือนบวก (+)

(b) แรงเฉือนลบ (-)

รูปที่ 46 แสดงเครื่องหมายและสัญลักษณ์แทนแรงเฉือน [18]

3) โมเมนต์ดัด (Bending Moment:  $M$ ) เป็นผลที่เกิดขึ้นจากการที่คานถูกแรงเฉือนพยายามเฉือนให้คานขาดออกจากกันจนเกิดการโค้งงอของคาน ซึ่งมีผลต่อโครงสร้างของอาคารและโครงสร้างของสะพานมากเช่นกัน โดยทั่วไปจะกำหนดให้โมเมนต์ตามเข็มนาฬิกามีค่าเป็นบวกและโมเมนต์ทวนเข็มนาฬิกามีค่าเป็นลบ (-) หรือโมเมนต์ที่ดัดให้คานแอ่นลงด้านล่างมีค่าเป็นบวก (+) และโมเมนต์ที่ดัดให้คานโก่งขึ้นข้างบนมีค่าเป็นลบ (-) ดังแสดง ในรูปที่ 47 [18]



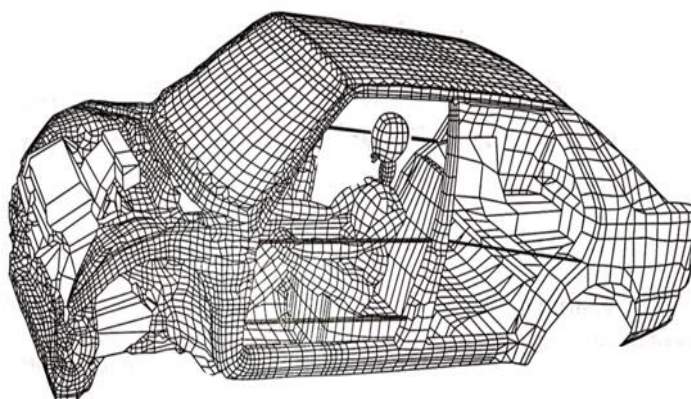
(a) แสดงโมเมนต์ดัดเป็นบวก

(b) แสดงโมเมนต์ดัดเป็นลบ

รูปที่ 47 แสดงเครื่องหมายและสัญลักษณ์แทนโมเมนต์ดัด [18]

### 2.2.11 ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

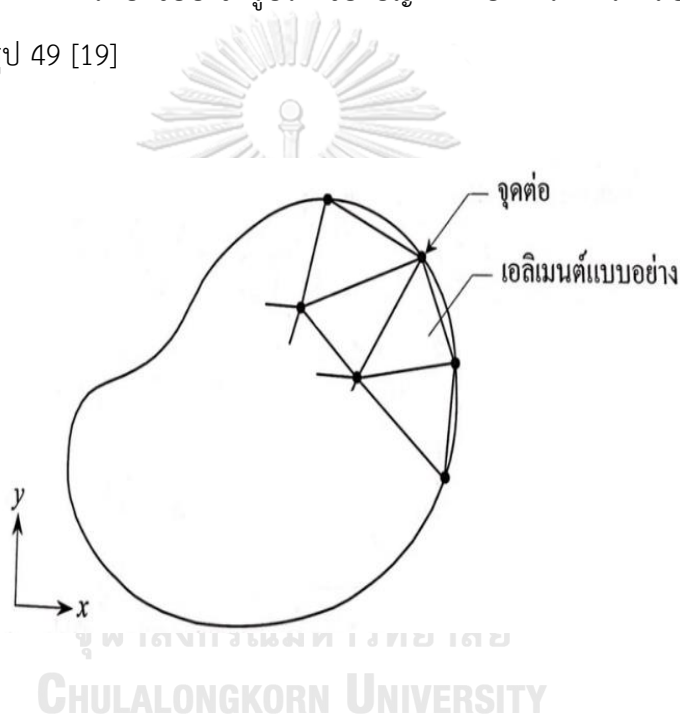
การศึกษาและการวิเคราะห์ปัญหาต่าง ๆ ทางด้านวิศวกรรมศาสตร์ วิทยาศาสตร์และคณิตศาสตร์ในปัจจุบัน ต้องมีความรู้ความเข้าใจด้านระเบียบวิธีเชิงตัวเลข (Numerical Method) ซึ่งทำให้สามารถวิเคราะห์ปัญหาที่มีความซับซ้อนในปัจจุบัน ยกตัวอย่าง เช่น การออกแบบรูปร่างภายนอกของลำตัวรถยนต์ อาจทำได้โดยใช้ระเบียบวิธีผลต่างสี่เหลี่ยม (Finite difference method) เพื่อคำนวณหาลักษณะสภาวะของอากาศที่ไหลผ่านลำตัวรถ ระเบียบวิธีดังกล่าวสามารถคำนวณเพื่อบ่งบอกความกดดันที่เกิดขึ้นตามตำแหน่งต่าง ๆ ของตัวรถ เพื่อว่าผู้ออกแบบสามารถเปลี่ยนแปลงรูปร่างลำตัวรถให้มีลักษณะที่สวยงามและในขณะเดียวกัน ทำให้แรงดันจากอากาศเกิดขึ้นน้อยที่สุด เพื่อการประหยัดน้ำมันการออกแบบเครื่องยนต์ของรถยนต์ก็เช่นกัน อาจใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method) ซึ่งสามารถทำการวิเคราะห์รูปแบบของเครื่องยนต์ที่มีรูปร่างลักษณะซับซ้อนได้อย่างมีประสิทธิภาพ เพื่อคำนวณหาการกระจายของอุณหภูมิตามตำแหน่งต่าง ๆ ตลอดจนการขยายตัวและความเค้นที่เกิดขึ้นเพื่อป้องกันความเสียหายขณะใช้งานทั้งการออกแบบลำตัวรถและเครื่องยนต์ของรถยนต์สามารถทำได้โดยตรงบนหน้าจอคอมพิวเตอร์ ผู้ออกแบบสามารถทำการคำนวณจนได้ผลลัพธ์ที่ก่อให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุดก่อนนำแบบที่ได้นั้นไปสร้างขึ้นเป็นต้นแบบของจริงเพื่อการทดสอบและการรับรองก่อนการผลิตต่อไป [19]



รูปที่ 48 การใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อคำนวณการยุบตัวของโครงสร้างรถยนต์ขณะเกิดการชน [19]

ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เป็นระเบียบวิธีเชิงตัวเลขเพื่อใช้คำนวณหาผลเฉลยโดยประมาณของปัญหาที่กำหนดมาให้เช่นกัน โดยการแบ่งรูปร่างขอบเขตของปัญหา ออกเป็นชิ้นส่วนย่อยที่เรียกว่า เอลิเมนต์ (Element) แล้วทำการสร้างสมการของแต่ละเอลิเมนต์ให้สอดคล้องกับสมการเชิงอนุพันธ์ของปัญหานั้น เอลิเมนต์ต่าง ๆ เหล่านี้เชื่อมต่อกันที่จุดต่อ (Node) ซึ่งเป็นตำแหน่งที่จะคำนวณหาค่าของตัวแปรตามที่ต้องการโดยขั้นตอนทั่วไปของระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ประกอบด้วยขั้นตอนหลัก 6 ขั้นตอน ดังต่อไปนี้

ขั้นตอนที่ 1 ทำการแบ่งขอบเขตรูปร่างของปัญหาที่ต้องการหาผลเฉลยออกเป็นเอลิเมนต์ย่อย ๆ ดังแสดงในรูป 49 [19]



รูปที่ 49 แสดงการแบ่งขอบเขตของปัญหาให้เป็นเอลิเมนต์ย่อย ๆ [19]

ขั้นตอนที่ 2 การเลือกฟังก์ชันการประมาณภายในเอลิเมนต์ (Element Interpolation Functions) ในระนาบสองมิติ เช่น เอลิเมนต์สามเหลี่ยม ซึ่งเอลิเมนต์ดังกล่าวประกอบด้วย 3 จุดต่อที่มีหมายเลข 1 2 และ 3 แสดงดังรูปที่ โดยที่จุดต่อที่กล่าวมานี้เป็นตำแหน่งของตัวไม่รู้ค่า (Nodal Unknowns) ซึ่งคือ  $\phi_1$ ,  $\phi_2$ , และ  $\phi_3$  ตัวไม่รู้ค่าที่จุดต่อเหล่านี้อาจแทนขนาดของการเสียรูปของตัวสลิคสะพานทหารช่าง เอ็ม จี บี ลักษณะการกระจายของตัวไม่รู้ค่าบนเอลิเมนต์นี้สามารถเขียนให้อยู่ในรูปแบบของฟังก์ชันการประมาณภายในและตัวไม่รู้ค่าที่จุดต่อได้ คือ [19]

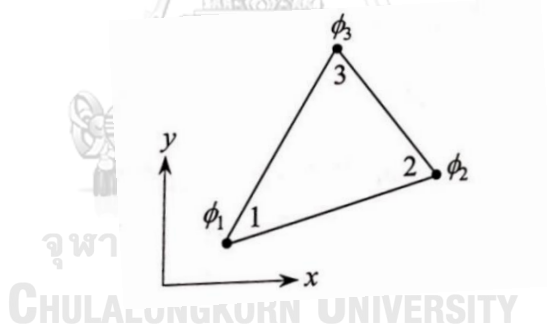
$$\phi(x,y) = N_1(x,y)\phi_1 + N_2(x,y)\phi_2 + N_3(x,y)\phi_3 \quad 2.19$$

โดย  $N_i(x,y) \quad i = 1, 2, 3$  คือ ฟังก์ชันการประมาณภายในเอลิเมนต์และสามารถเขียนให้อยู่ในรูปแบบของเมทริกซ์ได้ ดังนี้

$$\phi(x,y) = [N_1 \ N_2 \ N_3] \begin{bmatrix} \phi_1 \\ \phi_2 \\ \phi_3 \end{bmatrix} \quad 2.20$$

โดย  $[N]$  แทนเมทริกซ์แถวอน (Row matrix) ของฟังก์ชันการประมาณภายในเอลิเมนต์ [19]

$\{\phi\}$  แทนเมทริกซ์แถวตั้ง (Column matrix) ที่ประกอบด้วยตัวไม่รู้ค่าที่จุดต่อของเอลิเมนต์นั้น [19]



รูปที่ 50 เอลิเมนต์สามเหลี่ยมสามจุดต่อ [19]

ขั้นตอนที่ 3 การสร้างสมการของเอลิเมนต์ (Element Equations) ตัวอย่างเช่น สมการของเอลิเมนต์สามเหลี่ยมในรูป 50 จะอยู่ในรูปแบบ ดังนี้ [19]

$$\begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} & k_{13} \\ k_{21} & k_{22} & k_{23} \\ k_{31} & k_{32} & k_{33} \end{bmatrix}_e \begin{Bmatrix} \phi_1 \\ \phi_2 \\ \phi_3 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \end{Bmatrix} \quad 2.21$$



ซึ่งเขียนย่อได้เป็น

$$[K]_e \{\emptyset\}_e = \{F\}_e \quad 2.22$$

โดยขั้นตอนนี้เป็นขั้นตอนสำคัญของระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ซึ่งการสร้างสมการเอลิเมนต์ดังกล่าว จำเป็นต้องถูกสร้างขึ้นมาให้สอดคล้องกับสมการเชิงอนุพันธ์ของปัญหานั้น ๆ โดยสมการของเอลิเมนต์นี้สามารถคำนวณได้จากสมการเชิงอนุพันธ์ โดยการประยุกต์ระเบียบวิธีการถ่วงน้ำหนักเศษตกค้าง (Method of Weighted Residuals) ซึ่งถูกจัดได้ว่าเป็นระเบียบวิธีทั่วไปที่นิยมใช้ในการประยุกต์กับปัญหาต่าง ๆ ใน ปัจจุบัน [19]

ขั้นตอนที่ 4 นำสมการที่ได้ของแต่ละเอลิเมนต์มาประกอบกันทำให้เกิดสมการ ดังนี้ [19]

$$\Sigma(\text{element equation}) = [K]_{\text{sys}} \{\emptyset\}_{\text{sys}} = \{F\}_{\text{sys}} \quad 2.23$$

ขั้นตอนที่ 5 ทำการประยุกต์เงื่อนไขขอบเขต (Boundary Condition) ลงในระบบสมการที่ 2.23 และแก้สมการหา  $\{\emptyset\}_{\text{sys}}$  ซึ่งประกอบด้วยตัวไม่รู้ค่าที่จุดต่อ ซึ่งอาจเป็นค่าของการเคลื่อนตัวเนื่องจากการเสียรูปในของแข็ง หรืออาจเป็นค่าของอุณหภูมิสำหรับปัญหาการไหล เป็นต้น [19]

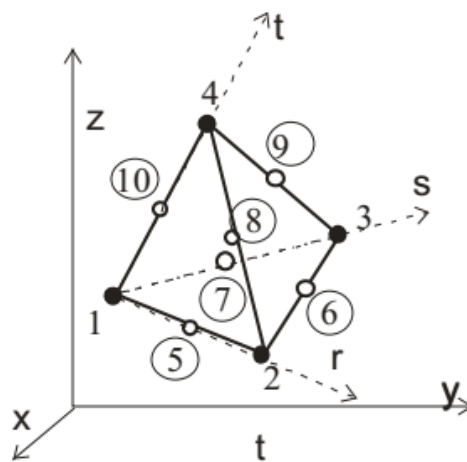
ขั้นตอนที่ 6 การคำนวณหาค่าที่ต่อเนื่องอื่น ๆ หลังจากคำนวณค่าที่จุดต่อจากขั้นตอนที่ 5 โดยนำมาคำนวณค่าความเครียดและความเค้นได้ หรือเมื่อรู้ค่าของอุณหภูมิที่จุดต่อต่าง ๆ ก็สามารถนำไปคำนวณหาปริมาณการถ่ายเทความร้อนได้ หรือเมื่อรู้ค่าความเร็วของของไหลก็สามารถนำไปคำนวณหาปริมาณอัตราการไหลทั้งหมดได้ [19]

#### 2.2.12 โปรแกรม ATENA

เป็นโปรแกรมที่ใช้ในการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ก่อตั้งโดยบริษัท Červenka Consulting ตั้งอยู่ในสาธารณรัฐเช็ก (Czech Republic) โดยโปรแกรม ATENA เป็นโปรแกรมการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์แบบไม่เป็นเชิงเส้นของโครงสร้าง โดยโปรแกรม ATENA สามารถจำลอง

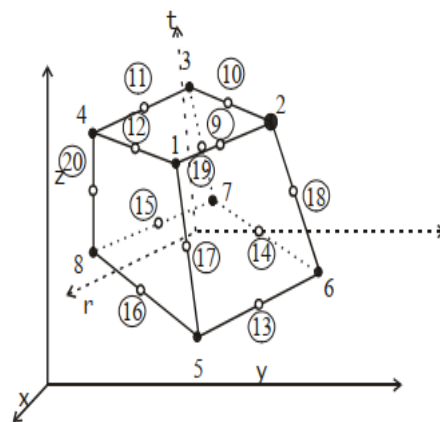
พฤติกรรมของโครงสร้าง รวมถึงลักษณะรูปแบบการเสียรูปของโครงสร้าง ซอฟต์แวร์นี้เป็นที่นิยมอย่างกว้างขวางในการทดลองและการวิเคราะห์โครงสร้างรวมถึงชิ้นส่วนต่างๆ และเป็นที่ยอมรับทั้งในยุโรปและเอเชีย ได้แก่ ญี่ปุ่น เกาหลี ตะวันออกกลาง และสหรัฐอเมริกา ซึ่งในโปรแกรม ATENA ประกอบด้วย 3D Solid Element 3 ชนิด ดังนี้ [20]

- 1) โครงสร้างทรงสี่หน้า (Tetrahedral element) ประกอบด้วย node ตั้งแต่ 4 ถึง 10 node [20]



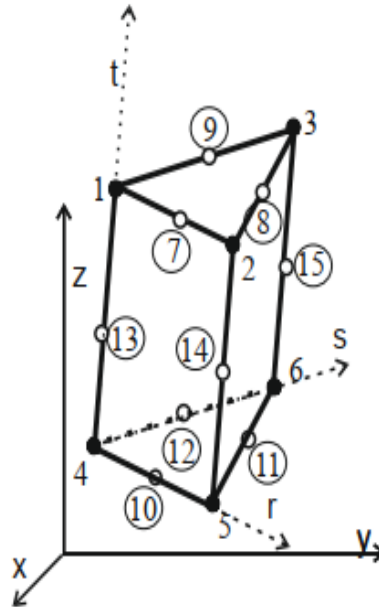
รูปที่ 51 โครงสร้างทรงสี่หน้า (Tetrahedral element) [20]

- 2) โครงสร้างทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้า (Brick Element) ประกอบด้วย node ตั้งแต่ 8 ถึง 20 node [20]



รูปที่ 52 โครงสร้างทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้า (Brick Element) [20]

3) โครงสร้างรูปทรงแบบลิ้ม (Wedge element) ประกอบด้วย node ตั้งแต่ 6 ถึง 15 ขึ้นไป [20]



รูปที่ 53 โครงสร้างรูปทรงแบบลิ้ม (Wedge element) [20]

หลังจากทำการวิเคราะห์พฤติกรรมของแบบจำลองจะทำให้ทราบผลของการรับแรงของแบบจำลองรวมถึงลักษณะการเสียรูปที่เกิดจากแรงในลักษณะต่างๆ

### บทที่ 3

#### ระเบียบวิธีวิจัย

#### 3.1 การศึกษาข้อมูล

ทำการศึกษารวบรวมข้อมูลขนาดของสะพานและสลักของสะพานทหาร เอ็ม จี บี ที่กรมการทหารช่าง ช.ร้อย 18 กองร้อยทหารช่างสะพานผสม ค่ายภาณุรังษีส่วนที่ 2 อำเภอเมืองราชบุรี จังหวัดราชบุรีและศึกษาข้อมูลเพิ่มเติมจากเว็บไซต์โรงเรียนทหารช่าง โดยได้ทำการวัดขนาดและตรวจสอบวัสดุที่ใช้ทำสลักสะพานทหาร เอ็ม จี บี ที่ชำรุดโดยนำไปวิเคราะห์หาองค์ประกอบธาตุ

#### 3.2 การตรวจสอบวัสดุของตัวสลักสะพานทหาร เอ็ม จี บี ที่ชำรุด

งานวิจัยนี้ได้นำตัวอย่างชิ้นส่วนของสลักสะพานทหาร เอ็ม จี บี ที่ชำรุดซึ่งแสดงดังรูปที่ 3.1 นำไปวิเคราะห์โดย บริษัท ควอลิตี้เทค จำกัด (มหาชน) อำเภอศรีราชา จังหวัดชลบุรี ซึ่งเป็นบริษัทที่ได้รับมาตรฐานสากลในการตรวจสอบและรับรองคุณภาพของวัสดุ ทำการทดสอบโดยใช้เครื่อง Optical Emission Spectrometer ซึ่งเป็นเครื่องวิเคราะห์ส่วนประกอบทางเคมี



รูปที่ 54 เศษชิ้นส่วนของสลักสะพานทหาร เอ็ม จี บี ที่ชำรุด

### 3.3 การวิเคราะห์หาตำแหน่งจุดที่รับแรงสูงสุดโดยใช้หลักการเส้นอิทธิพล

นำข้อมูลของสะพานทหาร เอ็ม จี บี ที่ประกอบใช้งานแบบสะพานช่วงเดียวชั้นเดียวที่สามารถรับน้ำหนักได้มากที่สุด โดยสามารถรับน้ำหนักได้ 60 ตัน มาทำการวิเคราะห์ ซึ่งโครงสร้างสะพานจะถูกกระทำโดยแรงที่เคลื่อนที่ได้ (Moving Load) ซึ่งส่งผลให้ค่าของแรงเฉือนและโมเมนต์ดัดภายในที่จุดใดจุดหนึ่งของคานเปลี่ยนแปลงไปตามตำแหน่งของน้ำหนักบรรทุกนั้นๆ ซึ่งการเปลี่ยนแปลงของแรงเฉือนและโมเมนต์ที่จุดดังกล่าวนั้นสามารถหาได้โดยการเขียนเส้นอิทธิพลหรืออินฟลูเอนซ์ไลน์ของแรงเฉือนและโมเมนต์ดัด

### 3.4 การวิเคราะห์หาแรงเฉือนและโมเมนต์ดัด

เมื่อทราบตำแหน่งแรงภายนอกที่กระทำบนชิ้นส่วนโครงสร้างของสะพานทหาร เอ็ม จี บี ที่มีค่ามากที่สุดแล้วจึงนำมาคำนวณวิเคราะห์หาแรงเฉือนและโมเมนต์ดัดที่เกิดขึ้น เพื่อหาวัสดุทดแทนที่สามารถรับแรงได้เหมาะสมกับการใช้งาน

### 3.5 การสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของตัวหลักสะพาน

การทำแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของตัวหลักสะพานทหาร เอ็ม จี บี เพื่อวิเคราะห์การรับแรงของตัวหลัก เปรียบเทียบวิเคราะห์กับแรงเฉือนและโมเมนต์ดัดที่กระทำ เพื่อหาวัสดุทดแทน

### 3.6 การทดสอบวัสดุทดแทน

ทำการทดสอบความเค้น-ความเครียดของวัสดุโดยใช้เครื่องเอกประสงค์ UTM ในการทดสอบ เพื่อหาค่าทางกลของวัสดุเหล็ก S45C ซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.5 นิ้ว จำนวน 3 เส้น แสดงดังรูปที่ 56 ทำการทดสอบโดยใช้มาตรฐาน American Testing and Materials Authority ASTM E8 / E8M ซึ่งสามารถหาค่าสมบัติทางกลของวัสดุ โดยชิ้นงานทดสอบจะถูกดึงตามแนวยาวของชิ้นงาน โดยมีลักษณะเป็นแรงดึงตามแนวแกนจนกระทั่งวัสดุทดสอบขาดออกจากกันแสดงดังรูปที่ 57



รูปที่ 3.2 วัสดุทดสอบ S45C จำนวน 3 เส้น



รูปที่ 55 การยึดจับวัสดุทดสอบ S45C ด้วยเครื่องทดสอบอเนกประสงค์  
พร้อมติดตั้งอุปกรณ์วัดความเครียด

วัสดุเหล็ก S45C ที่นำมาทดสอบเพื่อหาค่าสมบัติทางกล มีคุณสมบัติ<sup>1</sup> ดังนี้ มีค่ามอดูลัสของสภาพยืดหยุ่น (Elastic Modulus) 205 จิกะปาสกาล หรือ 20,500 เมกะปาสกาล, เปอร์เซ็นต์การยืดตัว (Elongation at Break) 17%, ความแข็งแรงต่อการล้าตัว (Fatigue Strength) 370 เมกะปาสกาล, อัตราส่วนปัวซอง (Poisson's Ratio) 0.29, ความเค้นแรงดึง (Tensile Strength : Ultimate) 686 เมกะปาสกาล ซึ่งเป็นความเค้นสูงสุดที่วัสดุจะทนได้ก่อนที่จะขาดหรือแตกออกจากกัน, ความเค้นจุดคราก (Tensile Strength : Yield) 490 เมกะปาสกาล เป็นความเค้นที่เป็นจุดแบ่งระหว่างพฤติกรรมการคืนรูปและพฤติกรรมการคงรูป ในกรณีของโลหะจะเป็นค่าความแข็งแรงสูงสุดที่สามารถใช้ประโยชน์ได้โดยไม่เกิดความเสียหาย



---

<sup>1</sup> ที่มา : <https://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=6b29957fc95e426d87dff64d67c59f6c&ckck=1>

## บทที่ 4

### ผลการทดสอบ

#### 4.1 ผลการตรวจสอบองค์ประกอบธาตุของชิ้นส่วนสลักสะพานทหาร เอ็ม จี บี ที่ชำรุด

ทำการทดสอบโดยใช้เครื่อง Optical Emission Spectrometer ซึ่งเป็นเครื่องวิเคราะห์ส่วนประกอบทางเคมี พบว่าสลักสะพานทหาร เอ็ม จี บี ที่ชำรุดมีองค์ประกอบทางเคมีแสดงในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 องค์ประกอบทางเคมีของสลักชิ้นส่วน สะพานทหาร เอ็ม จี บี ที่ชำรุด

องค์ประกอบธาตุทางเคมี	ชิ้นส่วนสลักสะพาน ทหาร เอ็ม จี บี ที่ชำรุด <sup>1</sup>	Aluminum 7204 <sup>2</sup>
อะลูมิเนียม (Al)	92.63%	90.45 - 94.8 %
ซิลิคอน (Si)	0.11%	<= 0.30 %
เหล็ก (Fe)	0.17%	<= 0.35 %
ทองแดง (Cu)	0.20%	<= 0.20 %
แมงกานีส (Mn)	0.24%	0.20 - 0.70 %
แมกนีเซียม (Mg)	1.89%	1.0 - 2.0 %
สังกะสี (Zn)	4.51%	4.0 - 5.0 %
โครเมียม (Cr)	<0.0010%	<= 0.30 %
ไทเทเนียม (Ti)	0.02%	<= 0.20 %
นิกเกิล (Ni)	0.003%	<= 0.05 %
โคบอลต์ (Co)	<0.0020%	<= 0.05 %
ดีบุก (Sn)	<0.0050%	<= 0.05 %
วาเนเดียม (V)	0.0037%	<= 0.10 %
โบรอน (B)	<0.0010%	<= 0.05 %
เซอร์โคเนียม (Zr)	0.20%	<= 0.25 %

<sup>1</sup>รูปที่ภาคผนวก ก

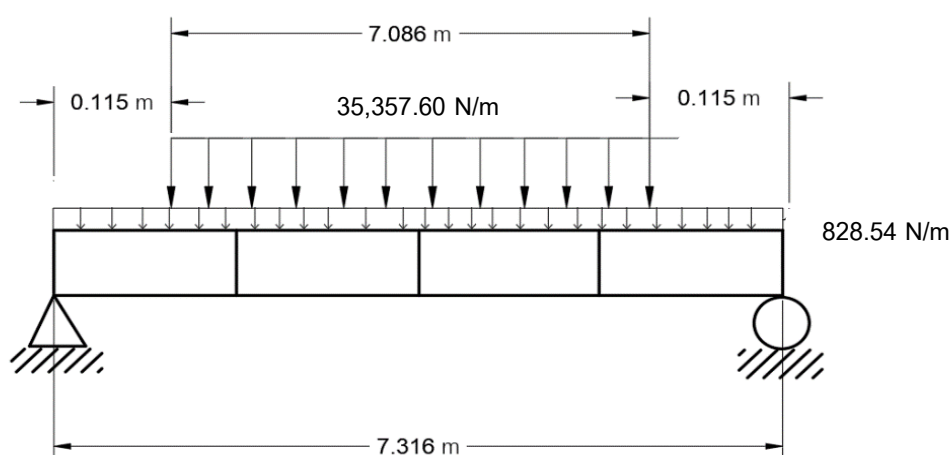
<sup>2</sup>ที่มา : <https://www.matweb.com/search/datasheet.aspx?matguid=4365242399b44833b9e8ac53c6376ce1&ckck=1>



จากตารางที่ 4 พบว่าสลักชั้นส่วนสะพานทหาร เอ็ม จี บี ที่ชำรุด มีองค์ประกอบของธาตุ อะลูมิเนียม (Al) 92.63 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งอยู่ในช่วง 90.5 ถึง 94.8 เปอร์เซ็นต์ มีธาตุสังกะสี (Zn) 4.51 ซึ่งอยู่ในช่วง 4.0 ถึง 5.0 และมีธาตุแมกนีเซียม (Mg) อยู่ในช่วง 1 ถึง 2 เปอร์เซ็นต์ จากองค์ประกอบทางเคมีพบว่าธาตุอีกหลายธาตุที่มีค่าใกล้เคียงกับอะลูมิเนียมชนิด 7204 จากองค์ประกอบทางเคมีดังกล่าว มีธาตุวาเนเดียมเพียงแค่ 0.0037 เปอร์เซ็นต์ โดยคุณสมบัติของวานาเดียม (V) สามารถปรับปรุงความแข็งแรงและความเหนียว ซึ่งมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับเหล็ก

#### 4.2. ผลคำนวณน้ำหนักบรรทุกทุกชนิดแผ่สม่ำเสมอของสะพานทหาร เอ็ม จี บี แบบช่วงเดียวชั้นเดียว

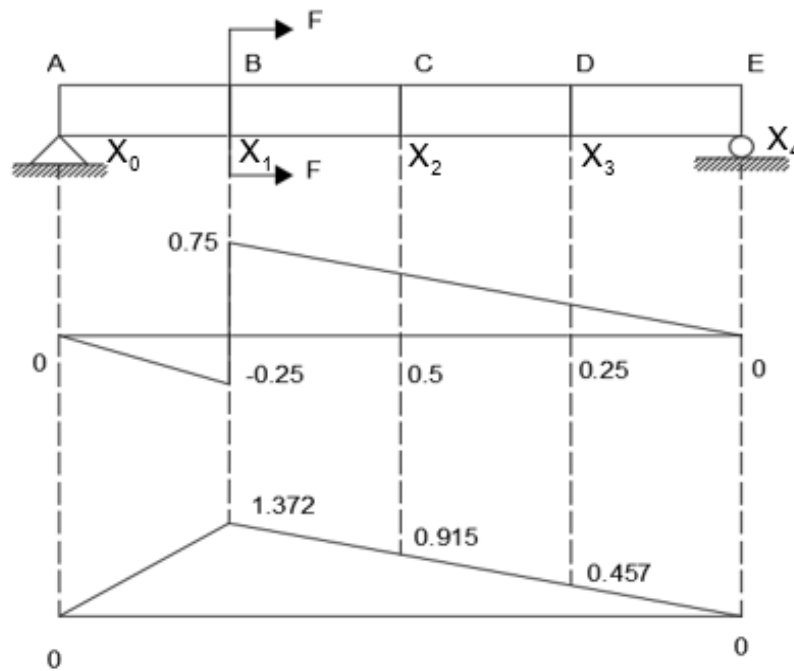
จากข้อมูลการใช้งานของสะพานทหาร เอ็ม จี บี พบว่าสะพานจะรับน้ำหนักได้มากที่สุดเมื่อประกอบสร้างเป็นสะพานช่วงเดียวชั้นเดียว โดยมีความยาวประมาณ 8 เมตร ใช้ชิ้นส่วนโครงบนสะพาน 4 ชิ้น มีความกว้างผิวจราจร 4 เมตรเนื่องจากการประกอบสร้างที่สามารถรับน้ำหนักได้มากที่สุด โดยสามารถรับน้ำหนักได้ 60 ตัน (60,000 กิโลกรัม) โดยใช้กับรถถังหลัก T-84 OPLOT-M ซึ่งเป็นรถถังขนาดใหญ่และมีน้ำหนัก 51,000 กิโลกรัม โดยคำนวณเป็นน้ำหนักบรรทุกทุกชนิดแผ่สม่ำเสมอได้เท่ากับ 35,357.60 นิวตัน-เมตร และน้ำหนักชิ้นส่วนแผงพื้นของสะพานทหาร เอ็ม จี บี คำนวณเป็นน้ำหนักบรรทุกทุกชนิดแผ่สม่ำเสมอได้เท่ากับ 828.54 นิวตัน-เมตร



รูปที่ 56 สะพานช่วงเดียวชั้นเดียว รับน้ำหนักไม่เกิน 60 ตัน รับน้ำหนักรถถัง T-84 OPLOT-M

### 4.3 ผลจากการวิเคราะห์ตำแหน่งที่รับแรงเฉือนและโมเมนต์ตัดสูงสุดโดยใช้เส้นอิทธิพล

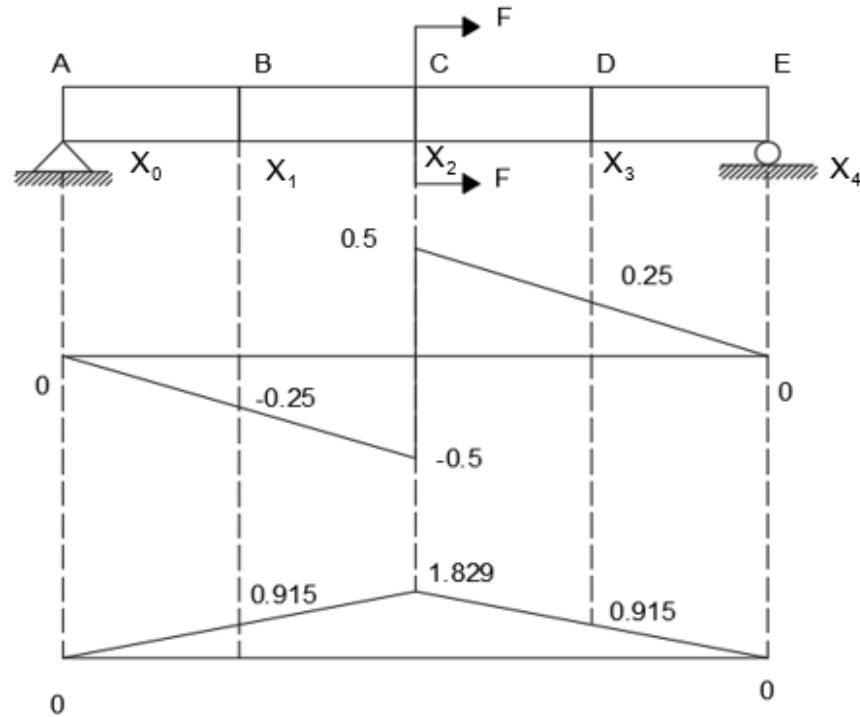
#### 4.3.1 วิเคราะห์หาจุดที่รับแรงเฉือนสูงสุดและค่าของแรงเฉือนที่เกิดขึ้นบนสะพาน



รูปที่ 57 แสดงค่าแรงเฉือนที่มีค่ามากที่สุดที่เกิดขึ้นบริเวณตำแหน่ง  $X_1$

คำนวณโดยใช้การวิเคราะห์หาเส้นอิทธิพลหาตำแหน่งแรงเฉือนสูงสุดของสะพานทหาร เอ็ม จี บี พบว่าบริเวณตำแหน่ง  $X_1$  ที่ระยะ 1.829 เมตร เป็นตำแหน่งที่สะพานเกิดแรงเฉือนสูงสุด จากนั้นคำนวณโดยการวางน้ำหนักบรรทุกทุกจรถที่มีการกระจายอย่างสม่ำเสมอ โดยวางในส่วนของแผนภาพเส้นอิทธิพลของแรงเฉือนที่มีค่าเป็นบวกหรือส่วน BE เพื่อทำการคำนวณหาแรงเฉือนที่เกิดขึ้นสูงสุด ซึ่งมีค่าเท่ากับ 74,457.51 นิวตัน แต่เนื่องจากชิ้นส่วนโครงบนสะพาน ประกอบไปด้วยชิ้นส่วนสลักสะพาน 2 ชิ้น ทำให้ค่าของแรงเฉือนที่เกิดบนบนสลักมีค่าเท่ากับ 37,228.76 นิวตัน

#### 4.3.2 วิเคราะห์หาจุดที่รับโมเมนต์ดัดสูงสุดและค่าของโมเมนต์ดัดที่เกิดขึ้นบนสะพาน



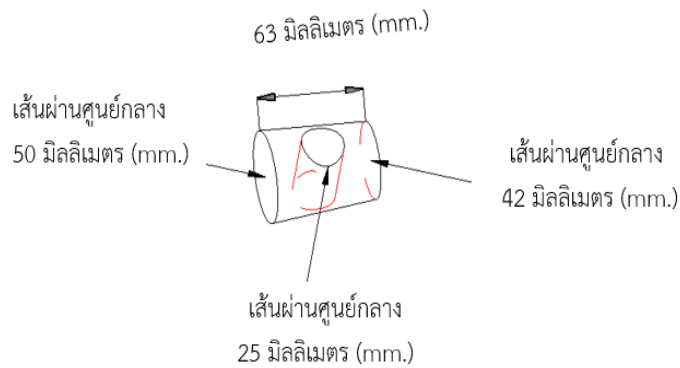
รูปที่ 58 แสดงค่าโมเมนต์ดัดที่มีค่ามากที่สุดที่เกิดขึ้นบริเวณตำแหน่ง  $X_2$

จากการคำนวณโดยใช้การวิเคราะห์หาเส้นอิทธิพลพบว่าตำแหน่งที่เกิดโมเมนต์ดัดที่มีค่ามากที่สุด คือ บริเวณตำแหน่ง  $X_2$  ที่ระยะ 3.658 เมตรจากจุด A ทำการคำนวณหาโมเมนต์ดัดที่เกิดขึ้นได้เท่ากับ 241,846.02 นิวตัน-เมตร พฤติกรรมคล้ายกับการรับแรงของคาน ซึ่งโดยทั่วไปจะรับแรงอัด (Compression : C) ในส่วนบนสุดและจะรับแรงดึง (Tension : T) ในส่วนล่าง ซึ่งส่วนบนของชิ้นส่วนโครงบนสะพานทหาร เอ็ม จี บี ประกอบไปด้วยสลักสะพาน 2 ชิ้นทำให้ค่าแรงอัดที่เกิดขึ้นกับสลักสะพานแต่ละตัวจึงมีค่าเท่ากับ 120,923.01 นิวตัน/เมตร

#### 4.4 ผลจากการวิเคราะห์หาแรงเฉือนและโมเมนต์ดัดที่เกิดขึ้นกับตัวสลักของสะพานทหาร เอ็ม จี บี

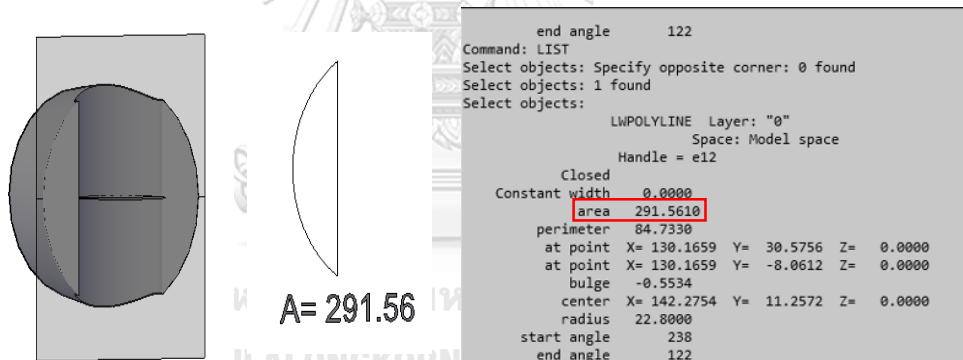
##### 4.4.1 คำนวณหาค่าความเค้นเฉือนของตัวสลักสะพาน

หาพื้นที่หน้าตัดของตัวสลักสะพานทหาร เอ็ม จี บี โดยใช้โปรแกรม AutoCAD ซึ่งขนาดของตัวสลักสะพานแสดง ดังรูปที่ 59



รูปที่ 59 ขนาดสลักสะพานในชิ้นส่วนโครงบนสะพาน

หาพื้นที่บริเวณดังกล่าว โดยใช้โปรแกรม AutoCAD 2020 สามารถหาค่าได้เท่ากับ  $291.56 \times 2 = 583.12$  ตารางมิลลิเมตร. ดังรูปที่ 60



รูปที่ 60 คำนวณหาพื้นที่สลักสะพานที่ชำรุดโดยใช้โปรแกรม AutoCAD 2020

ดังนั้น ความเค้นเฉือนของตัวสลักสะพานทหาร เอ็ม จี บี มีค่าเท่ากับ 63.843 เมกะปาสคาล

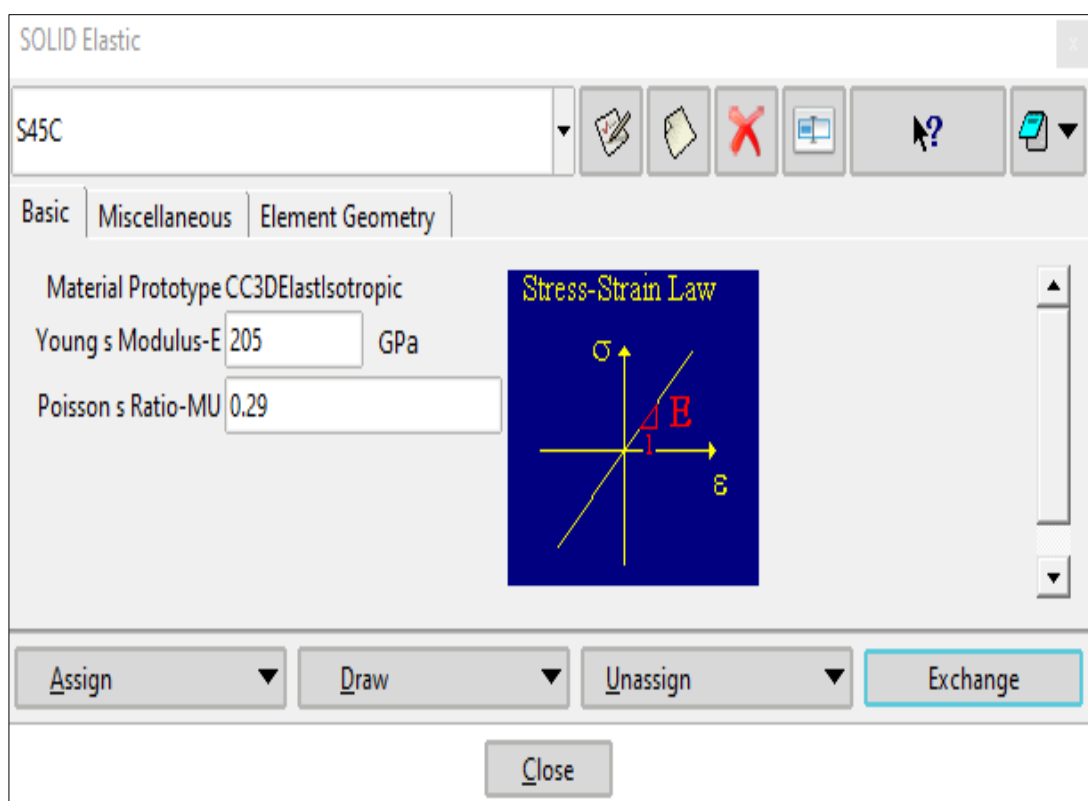
#### 4.4.2 คำนวณค่าโมเมนต์ดัดของตัวสลักสะพานทหาร เอ็ม จี บี

จากผลของการคำนวณการรับแรงของตัวสลักสะพานทหาร เอ็ม จี บี และค่าโมเมนต์สูงสุดที่เกิดเท่ากับ 120,923.01 นิวตัน/เมตร ซึ่งมีตำแหน่งอยู่บริเวณกึ่งกลางสะพาน จากนั้นนำไป

คำนวณหาค่าแรงอัดที่เกิดขึ้นในสลักของชิ้นส่วนโครงบนสะพานบริเวณส่วนบน จากการคำนวณพบว่าค่าโมเมนต์ที่กระทำแรงอัดมีค่าเท่ากับ 14 เมกะปาสคาล

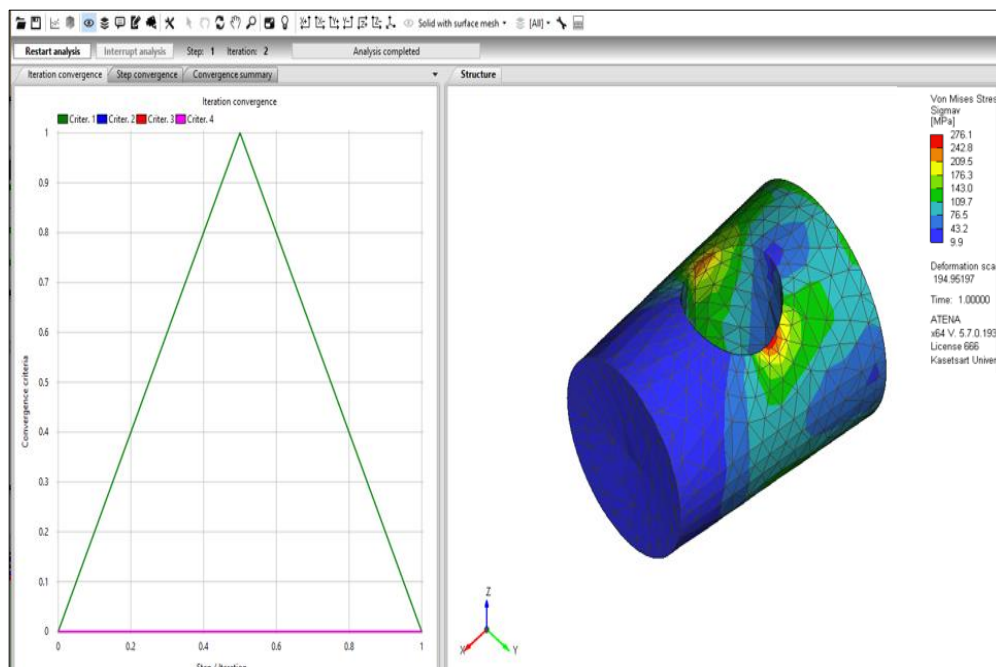
#### 4.5 ผลจากการวิเคราะห์การรับแรงของตัวสลักสะพานด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

กำหนดพารามิเตอร์ลงในโปรแกรม ATENA โดยมีรายละเอียดดังนี้ มอดูลัสของสภาพยืดหยุ่น (Elastic Modulus) 205 จิกะปาสคาล, อัตราส่วนปัวซอง (Poisson's Ratio) 0.29



รูปที่ 61 แสดงการกำหนดค่าพารามิเตอร์ Young's Modulus และค่า Poisson's Ratio ในโปรแกรม ATENA ให้กับวัสดุเหล็ก S45C

#### 4.6.2 ทำการ Mesh และวิเคราะห์ตัวสลักสะพานโดยใช้วิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์



รูปที่ 62 แสดงการวิเคราะห์ด้วยวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์โดยใช้โปรแกรม ATENA

ผลจากการวิเคราะห์โดยใช้โปรแกรม ATENA ด้วยวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์พบว่าเมื่อให้แรงกระทำกับตัวสลักสะพานทหาร เอ็ม จี บี โดยมีค่าแรงเฉือนเท่ากับ 63.843 เมกะปาสคาล และมีค่าโมเมนต์ที่เกิดจากแรงอัดเท่ากับ 14.01 เมกะปาสคาล พบว่ามีค่า Von Mises stress มีค่าเท่ากับ 276.1 เมกะปาสคาล

#### 4.6 ผลจากการทดสอบวัสดุทดสอบโดยการใช้เครื่องทดสอบอเนกประสงค์

ทำการทดสอบความเค้น ความเครียดของวัสดุโดยใช้เครื่องอเนกประสงค์ในการทดสอบเพื่อหาค่าทางกลของวัสดุโดยนำวัสดุเหล็ก S45C มาทำการทดสอบ 3 ชิ้นงานแสดงดังภาพที่ 63-65 โดยจากการทดสอบวัสดุ S45C พบว่าบริเวณที่วัสดุขาดออกจากกันจะเกิดขึ้นที่บริเวณด้านบนและมีระยะใกล้เคียงกันของตัวจับยึดวัสดุทั้ง 3 ชิ้นงานทดสอบ



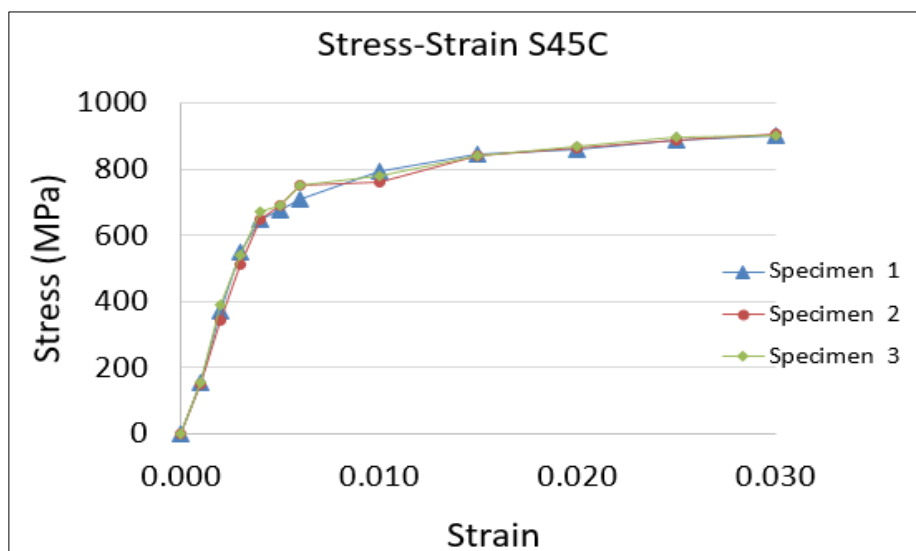
รูปที่ 63 การทดสอบการดึงวัสดุชิ้นงานที่ 1



รูปที่ 64 การทดสอบการดึงวัสดุชิ้นงานที่ 2



รูปที่ 65 การทดสอบการดึงวัสดุชิ้นงานที่ 3



รูปที่ 66 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียดของวัสดุทดสอบทั้ง 3 ชิ้นงาน

จากภาพที่ 4.11 ซึ่งแสดงผลความสัมพันธ์ระหว่าง ความเค้น-ความเครียดของวัสดุทดสอบทั้ง 3 ชิ้นงาน พบว่ามีค่าเฉลี่ยความเค้นจุดคราก (Yield Strength) และความต้านแรงดึง (Tensile Strength) ใกล้เคียงกันมากซึ่งเมื่อนำค่าทดสอบที่ได้มาหาค่าเฉลี่ยสามารถสรุปผลได้ดังนี้

ตารางที่ 5 ผลการทดสอบวัสดุ S45C

ชิ้นงาน	มอดุลัสของยัง (GPa)	อัตราส่วนของปัวซอง	ความเค้นจุดคราก (MPa)	ค่าความต้านแรงดึง (MPa)
1	205.16	0.29	530.38	917.56
2	203.13	0.29	537.45	915.63
3	206.76	0.29	539.47	920.45
ค่าเฉลี่ย	205.02	0.29	535.77	917.88



จากตารางสรุปผลการทดสอบวัสดุพบว่า มีค่าเฉลี่ยของมอดูลัสของความยืดหยุ่นเท่ากับ 205.02 จิกะปาสคาล ค่าเฉลี่ยอัตราส่วนปัวซอง 0.29 ค่าเฉลี่ยความเค้นจุดคราก 535.77 เมกะปาสคาล ซึ่งเป็นค่าที่บอกถึงความต้านทานต่อการแปรรูปถาวรของโลหะนั้น ๆ และค่าเฉลี่ยของความต้านแรงดึง 917.88 เมกะปาสคาล ซึ่งบอกถึงค่าความเค้นที่จุดสูงสุดเท่าที่โครงสร้างหนึ่ง ๆ จะสามารถทนรับได้ หากมีความเค้นเกิดขึ้นเท่ากับค่าความเค้นนี้และต่อเนื่องไป ชิ้นส่วนนั้นจะแตกหักในที่สุด



## บทที่ 5

### สรุปผลการทดสอบและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการทดสอบ

จากการศึกษาพบว่าสลักสะพานทหาร เอ็ม จี บี ผลิตจากวัสดุที่มีองค์ประกอบทางเคมีใกล้เคียงกับอะลูมิเนียมชนิด 7204 ซึ่งมีองค์ประกอบธาตุอะลูมิเนียม (Al) 92.63 เปอร์เซ็นต์ และมีธาตุสังกะสี (Zn) 4.51 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเป็นธาตุผสมหลัก

จากการวิเคราะห์หาค่าของแรงเฉือนและโมเมนต์ดัดสูงสุดที่เกิดขึ้นกับตัวสลักสะพานพบว่า มีค่าเท่ากับ 63.843 เมกะปาสคาลและ 14 เมกะปาสคาลตามลำดับ จากนั้นนำค่าแรงเฉือนและโมเมนต์ดัดที่เกิดขึ้นกับตัวสลักสะพานทหาร เอ็ม จี บี ไปวิเคราะห์โดยใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์พบว่า พบว่ามีค่า Von Mises stress เท่ากับ 276.1 เมกะปาสคาล ซึ่งมีค่าน้อยกว่าความเค้นจุดครากของเหล็ก S45C โดยผลการทดสอบการรับแรงดึง ซึ่งมีความเค้นจุดครากเท่ากับ 535.77 เมกะปาสคาล จึงทำให้สามารถสรุปได้ว่าวัสดุเหล็ก S45C ที่นำมาทดแทนวัสดุอะลูมิเนียม 7204 ได้โดยไม่เกิดการชำรุดเมื่อรับแรงเฉือนและโมเมนต์ที่เกิดจากแรงอัดที่เกิดขึ้นกับตัวสลักสะพานทหาร เอ็ม จี บี ขณะใช้งาน





ในการทดสอบความเค้น ความเครียดของวัสดุโดยใช้เครื่องอเนกประสงค์ในการทดสอบ เพื่อหาค่าทางกลของวัสดุโดยนำวัสดุเหล็ก S45C มาทำการทดสอบ 3 ชิ้นงานพบว่า มีค่าเฉลี่ยของค่าเฉลี่ยความเค้นจุดคราก 535.77 เมกะปาสคาลและค่าเฉลี่ยของความต้านแรงดึง 917.88 เมกะปาสคาล พบว่ามีความแข็งแรงเพียงพอที่สามารถใช้ทดแทนวัสดุอะลูมิเนียมที่ชำรุดในปัจจุบันได้อย่างปลอดภัย

#### 5.2 ข้อเสนอแนะ

จากการศึกษาข้อมูลของเหล็กชนิดต่างๆ ที่มีจำหน่ายตามท้องตลาด ได้แก่ SCM440 SS400 และ S20C ก็สามารถนำมาทดแทนวัสดุอะลูมิเนียมชนิด 7204 ได้เช่นเดียวกันแต่ในส่วนของความเหนียวและการทนต่อความล้าวัสดุ S45C มีความทนทานกว่าวัสดุเหล็กชนิดอื่นๆ ที่มีจำหน่ายตามท้องตลาด



**ภาคผนวก ก**  
**ผลการตรวจสอบองค์ประกอบธาตุ**

 <b>Qualitech</b> Qualitech Public Company Limited		Qualitech public company limited, LAB Division 83/50 Moo 10, Tambol Nong Kham, Amphur Sri Racha, Chonburi, 20230 Tel. 033-005-161 to 3													
<b>MECHANICAL AND METALLURGICAL LABORATORY</b>															
<b>CHEMICAL ANALYSIS TEST REPORT</b>		Report No. : 344-63-10 / MS001													
<b>(OPTICAL EMISSION SPECTROMETER)</b>		Page : 1 / 1													
		Test Date : 1 June 2020													
Customer	: Chulachomklao Royal Military Academy	Project Name	: N/A												
Address	: 99, Suwannasom Rd., Phrommani, Muang Nakhon Nayok District, Nakhon Nayok 26001	Welding Process	: N/A												
Test Product	: Chemical composition analysis	Welding Position	: N/A												
Material Specification	: N/A	Test Temperature	: N/A °C Humidity: N/A %												
Equipment	: SPECTROTEST TXC35	Dimension (mm)	: N/A												
Serial No.	: 18008663	Received Date	: 1 June 2020												
Preparation method	: ASTM E415-17	Machine Capacity	: 5 Base of Material												
Test method	: ASTM E415-17	Calibration Date	: 27 May 2020												
		Reference Code / Standard	: N/A												
No.	Sample No.	CHEMICAL COMPOSITION (%)													
		Al	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Cr	Ti	Ni	Co	Sn		
1	344-63-10 MS	*92.05	0.1245	0.2190	0.1600	*0.2175	*1.82	*4.67	*<0.0010	0.017	*0.0044	*<0.0020	*<0.0050		
		V	B	Zr											
		*<0.0020	*<0.0010	*0.1750											
Remark : The result of chemical composition similar to Aluminum 7204 (7N01)															
															
Test Restriction/Remark : * Test marked * in this report are not included in the TISI Accreditation Schedule for our laboratory.															
Total	1	Unit(s)											Attachment	1	Page(s)
Completed by	Reviewed by	Approved by		Client Representative					Owner Representative						
Company	Qualitech Public Company Limited	Qualitech Public Company Limited													
Signature															
Name	Mr. Kampol Manpuen	Mr. Purkiet Sukongkhitra													
Date	4 June 2020	4 June 2020													
Note 1. The above results are valid exclusively for tested samples as mentioned in this report. 2. Partial publicity of the result on testing is prohibited without the written permission from Qualitech plc. 3. This report shall not be reproduced in whole or part without the written approval from Qualitech plc.															
FM-MS-01												06/01-11/19			

รูปที่ 67 ผลการวิเคราะห์ทางองค์ประกอบธาตุทางเคมีของชิ้นส่วนสลักสะพาน

## ภาคผนวก ข

### รายการคำนวณ

#### 1. คำนวณน้ำหนักบรรทุกทุกชนิดแผ่สม่ำเสมอของสะพานทหาร เอ็ม จี บี แบบช่วงเดียวชั้นเดียว

##### 1.1 คำนวณน้ำหนักบรรทุกทุกชนิดแผ่สม่ำเสมอของรถถังหลัก T-84 OPLOT-M

วิเคราะห์การใช้งานสะพานทหาร เอ็ม จี บี แบบสะพานช่วงเดียวชั้นเดียว เนื่องจากเป็นการประกอบสร้างที่สามารถรับน้ำหนักที่มากที่สุด โดยสามารถรับน้ำหนักได้ 60 ตัน (60,000 กิโลกรัม) โดยใช้กับรถถังหลัก T-84 OPLOT-M ซึ่งเป็นรถถังขนาดใหญ่และมีน้ำหนักมากที่สุด มีรายละเอียด ดังนี้

น้ำหนักพร้อมรบ	51,000	กิโลกรัม
ความกว้าง	3.775	เมตร
ความยาว	7.075	เมตร
ความสูง	2.215	เมตร

คำนวณน้ำหนักของรถถังครึ่งคัน คิดแค่ฝั่งเดียวของตัวสะพาน

$$= 51,000 / 2 = 25,500 \text{ กิโลกรัม}$$

$$= 25,500 \times 9.81 = 250,155 \text{ นิวตัน}$$

คำนวณเป็นน้ำหนักบรรทุกทุกชนิดแผ่สม่ำเสมอ

$$= 250,155 / 7.075 = 35,357.60 \text{ นิวตัน-เมตร}$$

##### 1.2 คำนวณน้ำหนักบรรทุกทุกชนิดแผ่สม่ำเสมอของชิ้นส่วนแผงพื้น สะพานทหาร เอ็ม จี บี

แผงพื้นความกว้างแผ่นละ	0.438	เมตร
สะพานยาว	7.316	เมตร
ใช้แผ่นพื้นทั้งหมด	$7.316 / 0.438$	= 16.7 แผ่น
น้ำหนักแผงพื้น	74	กิโลกรัม

น้ำหนักแผงพื้นบนสะพานทหาร เอ็ม จี บี มีค่าเท่ากับ

$$= 16.7 \times 74 = 1,235.8 \text{ กิโลกรัม}$$

คำนวณน้ำหนักของของแฉงพื้นแค่ฝั่งเดียวของตัวสะพาน

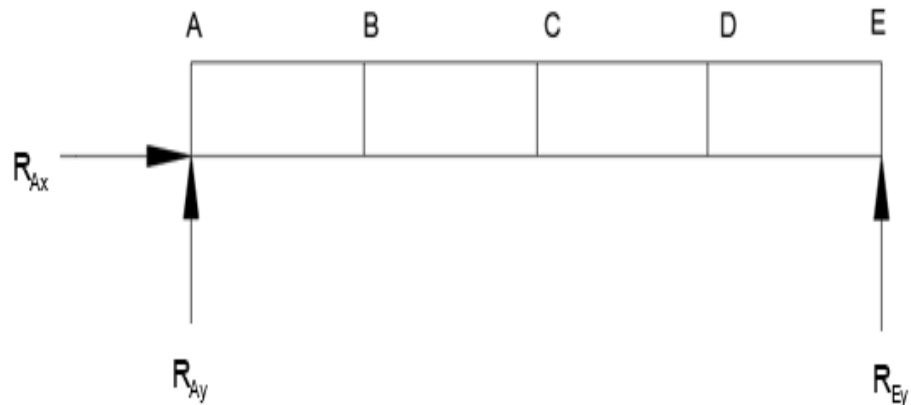
$$= 1,235.8 / 2 = 617.9 \text{ กิโลกรัม}$$

คำนวณเป็นน้ำหนักบรรทุกทุกชนิดแผ่สม่ำเสมอของชั้นส่วนแฉงพื้นสะพาน ทหาร เอ็ม จี บี

$$= 6,061.60 / 7.316 = 828.54 \text{ นิวตัน-เมตร}$$

2. วิเคราะห์ตำแหน่งที่รับแรงเฉือนและโมเมนต์คัตสูงสุดโดยใช้วิธีเส้นอินฟลูเอนซ์ไลน์ สะพานทหาร เอ็ม จี บี ที่สะพานช่วงเดียวชั้นเดียว รับน้ำหนักไม่เกิน 60 ตัน

2.1 คำนวณหาแรงปฏิกิริยาที่  $R_A$  และแรงปฏิกิริยาที่  $R_B$

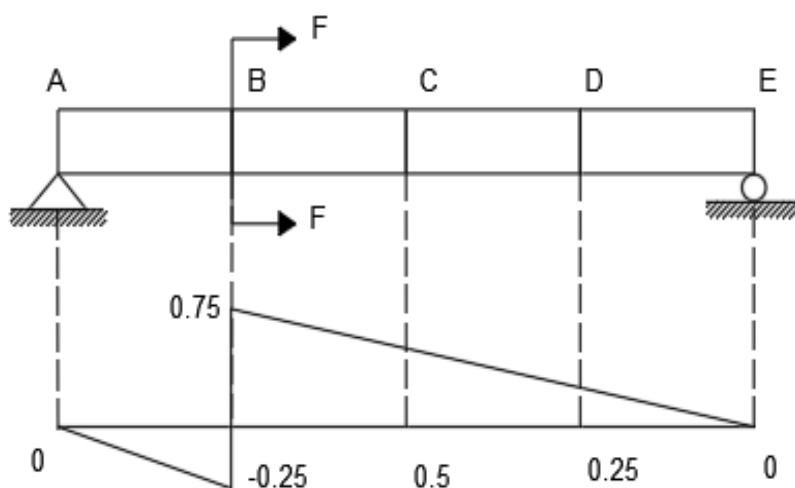


รูปที่ 68 Free body diagram ของสะพานทหาร เอ็ม จี บี แบบสะพานช่วงเดียวชั้นเดียว  
รับน้ำหนักไม่เกิน 60 ตัน

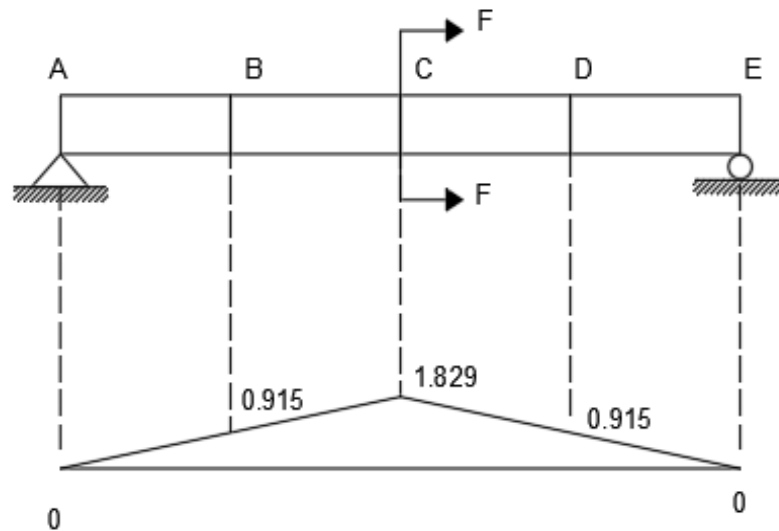
ตารางที่ 6 แสดงแรงปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในตำแหน่งต่างๆบนสะพานทหาร เอ็ม จี บี

ตำแหน่ง	ระยะจากจุด A	แรงปฏิกิริยาที่ $R_{Ay}$	แรงปฏิกิริยาที่ $R_{Ey}$
		$x/(-7.316)+1$	$x/7.316$
$X_0$	0	1	0
$X_1$	1.829	0.75	0.25
$X_2$	3.658	0.5	0.5
$X_3$	5.487	0.25	0.75
$X_4$	7.316	0	1

จากตารางที่ 6 ทำการคำนวณโดยวางแรงขนาด 1 หน่วยแต่ละจุดบนโครงสร้างสะพานทหาร เอ็ม จี บี แบบสะพานช่วงเดียวชั้นเดียว จะทำให้ได้ค่าแรงปฏิกิริยาที่  $R_{Ay}$  และ แรงปฏิกิริยาที่  $R_{Ey}$  ที่เปลี่ยนแปลงไปและจากการวิเคราะห์หาจุดที่รับแรงเฉือนและโมเมนต์ดัดที่เกิดขึ้นสูงสุดบนสะพานทหาร เอ็ม จี บี ดังรูปที่ 69 และ 70 ตามลำดับ

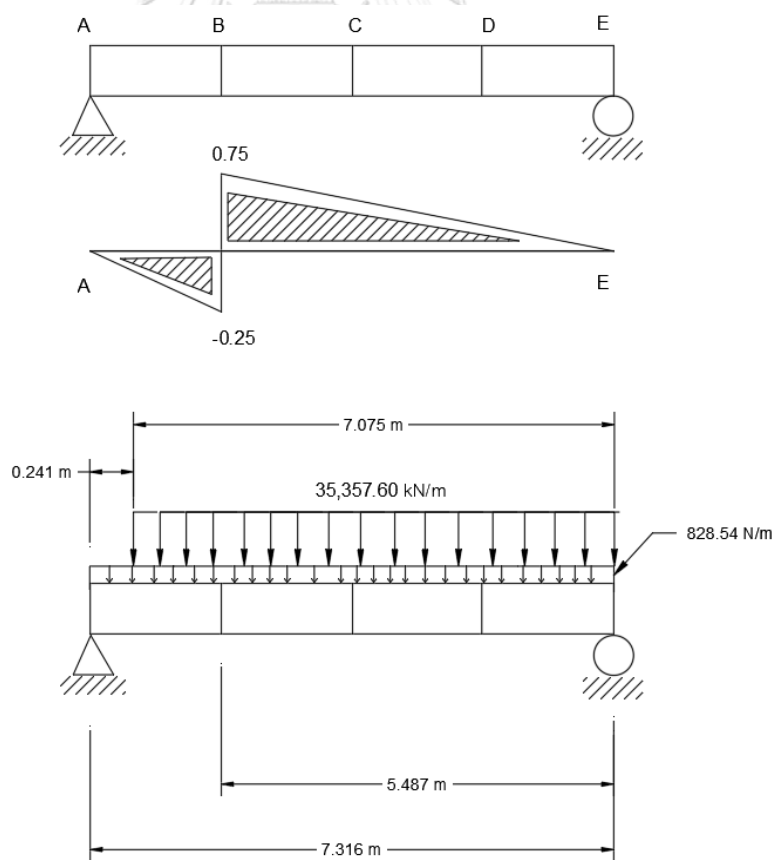


รูปที่ 69 แสดงตำแหน่งที่เกิดแรงเฉือนสูงสุดคือบริเวณจุด B



รูปที่ 70 แสดงตำแหน่งที่เกิดโมเมนต์ดัดที่สูงที่สุดคือบริเวณจุด C

3. วิเคราะห์หาค่าแรงเฉือนและโมเมนต์ดัดที่เกิดบนตัวสลักสะพานทหาร เอ็ม จี บี



รูปที่ 71 คำนวณแรงเฉือนที่เกิดขึ้นบนสะพานทหาร เอ็ม จี บี โดยใช้การวิเคราะห์โดยเส้นอิทธิพล



### 3.1 คำนวณหาค่าแรงเฉือนที่สูงสุดบนสะพานทหาร เอ็ม จี บี โดยการหาพื้นที่ใต้กราฟ

$$\begin{aligned} V_{B(\text{Max})} &= 0.5 \times 5.487 \times (35,357.60 + 828.54) \times 0.75 \\ &= 74,457.51 \text{ นิวตัน} \end{aligned}$$

เนื่องจากส่วนโครงบนสะพานประกอบด้วยตัวสลัก 2 ชิ้น

$$\begin{aligned} &= 74,457.51 / 2 \\ &= 37,228.76 \text{ นิวตัน} \end{aligned}$$

### 3.2 คำนวณหาค่าความเค้นเฉือนที่เกิดกับตัวสลักสะพาน



$$\sigma = \frac{F}{A}$$

$$\text{แรงเฉือนที่กระทำ} = 37,228.76 \text{ นิวตัน}$$

$$\text{พื้นที่หน้าตัดสลักสะพานที่ชำรุด} = 583.122 \text{ ตารางมิลลิเมตร}$$

$$\text{ดังนั้น จะได้ค่าความเค้นเฉือน } \sigma = 63.843 \text{ เมกะปาสคาล}$$

### 3.3 การคำนวณหาโมเมนต์ดัดสูงสุดบนสะพานทหาร เอ็ม จี บี

วิเคราะห์หาแรงปฏิกิริยา

$$\begin{aligned} \Sigma M_E = 0 ; R_{Ay}(7.316) &= (7.075 \times 35357.60 \times 3.658) + (828.54 \times 7.316 \times 3.658) \\ &= 128,108.31 \text{ นิวตัน} \end{aligned}$$

$$\Sigma F_y = 0 ; \uparrow +R_{Ay} + R_{Ey} = (7.075 \times 35357.60) + (828.54 \times 7.316)$$

$$128,108.31 + R_{Ey} = 250,155.02 + 6,061.60$$

$$R_{Ey} = 128,108.31 \text{ นิวตัน}$$

วิเคราะห์หาค่าโมเมนต์ที่ระยะ  $x = 0$  เมตร

$$M_{(x=0)} = 0 \text{ นิวตัน-เมตร}$$

วิเคราะห์หาค่าโมเมนต์ที่ระยะ  $x_1 = 1.829$  เมตร

$$\begin{aligned} M_{(x=1.829)} &= (128,108.31 \times 1.829) - [(35,357.60 \times (1.829 - 0.1205)^2)/2] - \\ &\quad [828.54 \times (1.829)^2/2] \\ &= 181,320.34 \text{ นิวตัน-เมตร} \end{aligned}$$

วิเคราะห์หาค่าโมเมนต์ที่ระยะ  $x_2 = 3.658$  เมตร

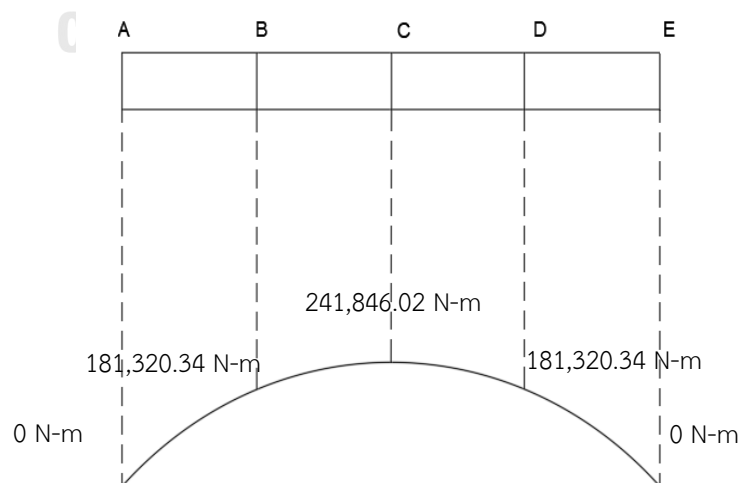
$$\begin{aligned} M_{(x=3.658)} &= (128,108.31 \times 3.658) - [(35,357.60 \times (3.658 - 0.1205)^2)/2] - \\ &\quad [828.54 \times (3.658)^2/2] \\ &= 241,846.02 \text{ นิวตัน-เมตร} \end{aligned}$$

วิเคราะห์หาค่าโมเมนต์ที่ระยะ  $x_3 = 5.487$  เมตร

$$\begin{aligned} M_{(x=5.487)} &= (128,108.31 \times 5.487) - [(35,357.60 \times (5.487 - 0.1205)^2)/2] - \\ &\quad [828.54 \times (5.487)^2/2] \\ &= 181,320.34 \text{ นิวตัน-เมตร} \end{aligned}$$

วิเคราะห์หาค่าโมเมนต์ที่ระยะ  $x_0 = 7.316$  เมตร

$$M_{(x=7.316)} = 0 \text{ นิวตัน-เมตร}$$



รูปที่ 72 แสดงค่าโมเมนต์ดัดที่เกิดจากการคำนวณ

เนื่องจากส่วนโครงบนสะพานประกอบด้วยตัวสลัก 2 ชิ้น

$$= 241,846.02 / 2$$

$$= 120,923.01 \text{ นิวตัน - เมตร}$$

3.4 การคำนวณหาโมเมนต์ดัดสูงสุดบนสะพานทหาร เอ็ม จี บี

ความเค้นดัดสูงสุด  $\sigma_{max} = \frac{M_c}{I}$

$\sigma_{max}$  ความเค้นดัดสูงสุด นิวตัน-เมตร<sup>2</sup>

$M_c$  โมเมนต์ดัด นิวตัน-เมตร

$I$  โมเมนต์ความเฉื่อย เมตร<sup>4</sup>

หาค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของรูปเลขาคณิตหน้าตัดสี่เหลี่ยม

$$I_x = \frac{bh^3}{12}$$

ความเค้นดัดที่เกิดขึ้นบริเวณหน้าตัดมีค่าเท่ากับ

$$\sigma = \frac{12M_c}{bh^3}$$

$M_c$  โมเมนต์ดัด มีค่าเท่ากับ 120,923.01 นิวตัน-เมตร

$b$  ความกว้างของพื้นที่หน้าตัดโครงบนสะพานมีค่าเท่ากับ 0.647 เมตร

$h$  ความสูงของพื้นที่หน้าตัดโครงบนสะพาน มีค่าเท่ากับ 0.543 เมตร

$$= \frac{12(120,923.01)}{0.647 \times (0.543)^3}$$

$$= 14 \text{ เมกะปาสคาล}$$

## บรรณานุกรม

### ภาษาไทย

- [1] ราชบัณฑิตยสถาน, "พจนานุกรม ฉบับราชบัณฑิตยสถาน พ.ศ. 2554 เฉลิมพระเกียรติพระบาทสมเด็จพระเจ้าอยู่หัวเนื่องในโอกาสพระราชพิธีมหามงคลเฉลิมพระชนมพรรษา 7 รอบ 5 ธันวาคม 2554," ed: กรุงเทพฯ ราชบัณฑิตยสถาน, 2556.
- [2] สถาพร สีมามูร์รักษ์, สะพานทหารช่างกับการบรรเทาสาธารณภัย. กรมการทหารช่าง, 2556.
- [3] อรรถพล อติชาติ, "การศึกษาพฤติกรรมรอยต่อชิ้นส่วนโครงสร้างคานเสาสำเร็จรูปภายใต้แรงสถิตโดยวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์," วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, ภาควิชาวิศวกรรมโยธา, มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์, 2560.
- [4] ธนกร งามจุงจิต, ทวีชัย ชูเชิด, พิชเชนทร์ พรประสิทธิ์, และ ธนิต พุ่มดิษ, "ปัญหาและความเป็นไปได้ในการออกแบบปรับปรุงสะพานเพื่อข้ามลำน้ำของทหารช่างในประเทศโดยการวิเคราะห์และออกแบบโครงสร้างสะพานที่มีอยู่," วิทยานิพนธ์ปริญญาตรี, วิศวกรรมโยธา, โรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า, 2550.
- [5] โชคชัย ส่งเจริญทรัพย์, "การจำลองการเปลี่ยนรูปของวัตถุแบบเปราะทรงตัน," วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์, 2545.
- [6] พงษ์ศักดิ์ หนูบรรจง, "การวิเคราะห์พฤติกรรมแบบไม่เชิงเส้นของสะพานประเภทแผ่นพื้นวางบนคานคอนกรีตอัดแรงภายใต้น้ำหนักบรรทุกทุกประลัยโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์," วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์, 2548.
- [12] กรมการทหารช่าง, สะพานเครื่องหนูน้มน. โรงพิมพ์โรงเรียนทหารช่าง, 2546.
- [13] ณรงค์ศักดิ์ ธรรมโชติ, วัสดุวิศวกรรม *Engineering Material*. บริษัท ซีเอ็ดดูเคชั่น จำกัด (มหาชน), 2558.
- [16] ปณิธาน ลักคุณะประสิทธิ์, การวิเคราะห์โครงสร้าง. วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์, 2525.
- [17] สุนิต สุภาพ, หลักพื้นฐานการวิเคราะห์โครงสร้าง *Fundamental of Structural Analysis*. เอ็ม แอนด์ เอ็ม เลเซอร์พริ้นต์, 2558.
- [18] วินิต ช่อวิเชียร, กำลังวัสดุ (*Strength of Material*) กลศาสตร์วัสดุ (*Mechanics of Material*). จัดพิมพ์และจำหน่ายโดย ดร.วินิต ช่อวิเชียร, 2548.
- [19] ปราโมทย์ เตชะอำไพ, ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขในงานวิศวกรรม *Numerical Methods in Engineering*. สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2551.

## ภาษาอังกฤษ

- [7] P. Fanning, "Nonlinear Models of Reinforced and Post-tensioned Concrete Beams," *Electronic Journal of Structural Engineering*, pp. 113-115, 2001.
- [8] Jun Zhao, W. S. Yang Peng, and Jun Dong, "Finite element analysis of the shear capacity of stainless-steel blind-rivet connections," *Journal of Constructional Steel Research*, pp. 3-7, 2021.
- [9] T. Tejaswini, "Analysis of RCC Beams using ABAQUS," *International Journal of Innovation in Engineering and Technology (IJET)*, pp. 251-254, 2015.
- [10] Praveen Kannam and Venkateswara Rao Sarella, "A study on validation of shear behavior of steel fibrous SCC based on numerical modelling (ATENA)," *Journal of Building Engineering*, pp. 69-79, 2018.
- [11] Daiyang Gao, Weixing Yao, Weidong Wen, and J. Huang, "Critical distance model for the fatigue life analysis under low-velocity impacts of notched specimens," *International Journal of Fatigue*, vol. 146, 2021.
- [14] William D. Callister, Jr, and David G. Rethwisch, *Material Science and Engineering An Introduction*. Department of Metallurgical Engineering The University of Utah, pp. 131-145.
- [15] *Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Material*, A. A. S. H. a. T. O. Standard.
- [20] Vladimír Červenka, Libor Jendele, and J. Červenka, *ATENA Program Documentation Part 1 Theory*. Červenka Consulting s.r.o, 2020.



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
**CHULALONGKORN UNIVERSITY**

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	ร้อยโทหญิง ธัญลักษณ์ เอี่ยมสกุล
วัน เดือน ปี เกิด	7 พฤษภาคม 2537
สถานที่เกิด	ราชบุรี
วุฒิการศึกษา	ปริญญาตรี
ที่อยู่ปัจจุบัน	65/114 ถ.คทธาร ต.หน้าเมือง อ.เมืองราชบุรี จ.ราชบุรี 70000



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY