

การศึกษาการผลิตงอะลูมิเนียมของสะพานทหารเอ็ม 4 โดยใช้วัสดุภายในประเทศ



บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)  
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR)  
are the thesis authors' files submitted through the University Graduate School.

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมและเทคโนโลยีการป้องกันประเทศ  
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
ปีการศึกษา 2559  
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A STUDY OF THE FABRICATION OF M4 MILITARY BRIDGE ALUMINIUM FLOOR JOISTS  
USING DOMESTIC MATERIALS

Sub Lieutenant Chalit Santitararag



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

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2016

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การศึกษาการผลิตตองอะลูมิเนียมของสะพานทหารเอ็ม 4 โดยใช้วัสดุภายในประเทศ
โดย	ร้อยตรีชลิต สันติธรรารักษ์
สาขาวิชา	วิศวกรรมและเทคโนโลยีการป้องกันประเทศ
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	รองศาสตราจารย์ ดร. อัครวัชร เล่นวารี่
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ พันเอก ดร. ณ์ฐพร นุตยะสกุล

---

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน  
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

.....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์  
(รองศาสตราจารย์ ดร. สุพจน์ เตชวรสินสกุล)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร. วิฑิต ปานสุข)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก  
(รองศาสตราจารย์ ดร. อัครวัชร เล่นวารี่)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ พันเอก ดร. ณ์ฐพร นุตยะสกุล)

.....กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ปัญญวัชร์ วังยาว)

.....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. พีรวัฒน์ ปลาเงิน)

ชลิต สันติธรรักษ์ : การศึกษาการผลิตงอะลูมิเนียมของสะพานทหารเอ็ม 4 โดยใช้วัสดุภายในประเทศ (A STUDY OF THE FABRICATION OF M4 MILITARY BRIDGE ALUMINIUM FLOOR JOISTS USING DOMESTIC MATERIALS) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รศ. ดร. อัครวัชร เล่นาวารี, อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม: ผศ. พ.อ. ดร. ณัฐพร นุตยะสกุล, 139 หน้า.

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้เพื่อศึกษาการผลิตงอะลูมิเนียมของสะพานทหารเอ็ม 4 โดยใช้วัสดุภายในประเทศ การศึกษาประกอบด้วยการสำรวจข้อมูลอะลูมิเนียมที่มีจำหน่ายในประเทศไทย ทำการทดสอบความสามารถในการขึ้นรูปอะลูมิเนียมชนิดต่างๆ โดยวิธีการขึ้นรูปเย็นและการเชื่อม ซึ่งพบว่าวิธีการขึ้นรูปตงสามารถทำได้ทั้งวิธีการขึ้นรูปเย็นและการยึดด้วยสลักเกลียว ส่วนวิธีการเชื่อมนั้นไม่เหมาะในการขึ้นรูป ดังนั้นจึงขึ้นรูปหน้าตัดประกอบด้วยวิธีการยึดด้วยสลักเกลียว โดยอ้างอิงวิธีการออกแบบโครงสร้างอะลูมิเนียมตามมาตรฐานอังกฤษ BS.8118 ผลการทดสอบพบว่าตงอะลูมิเนียมสามารถรับน้ำหนักบรรทุกได้ตามที่ออกแบบ โดยมีค่าตัวคูณความปลอดภัยของกำลังโมเมนต์ดัดและแรงเฉือนเท่ากับ 2.1 และ 2.7 ตามลำดับ เมื่อพิจารณาภาวะสุดขีดบริการที่กำลังโมเมนต์ดัดใช้งานมีการโก่งตัวในการทดสอบไม่เกินการโก่งตัวที่ยอมให้ ดังนั้นจึงสามารถนำตงอะลูมิเนียมที่ออกแบบนี้ไปใช้งานทดแทนตงสะพานทหารเอ็ม 4 ที่เสียหายได้



สาขาวิชา วิศวกรรมและเทคโนโลยีการป้องกัน ลายมือชื่อนิสิต .....

ประเทศ ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก .....

ปีการศึกษา 2559 ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาร่วม .....

# # 5770580121 : MAJOR DEFENSE ENGINEERING AND TECHNOLOGY

KEYWORDS: FABRICATION / FLOOR JOIST / ALUMINIUM ALLOY / MILITARY BRIDGE / M4

CHALIT SANTITARARAG: A STUDY OF THE FABRICATION OF M4 MILITARY BRIDGE ALUMINIUM FLOOR JOISTS USING DOMESTIC MATERIALS. ADVISOR: ASSOC. PROF. AKHRAWAT LENWARI, Ph.D., CO-ADVISOR: ASST. PROF. COL. NUTHAPORN NUTTAYASAKUL, Ph.D., 139 pp.

The objective of this research is to study a fabrication of aluminum floor joists of M4 military bridge using domestic materials. The study includes the survey of aluminum alloy data available in Thailand. Different types of domestic aluminum alloys were tested for the ability to form to shape and weldability. The result shows that cold forming and screwing method capable to built up the M4 military bridge floor joists but welding method were not suitable. Therefore, the built-up shape connected with screws was chosen to fabricate M4 military bridge floor joist. The fabricated floor joist was designed according to British Standard (BS.8118 - structural use of aluminium). The test results showed that the aluminium floor joist can resist the design load. The safety factors of moment and shear capacities are 2.1 and 2.7, respectively. Considering the serviceability limit state at working moment, the experimental deflection was not more than the allowable deflection. Therefore the designed aluminium floor joist can be used to replace the damaged M4 military bridge aluminium floor joists.

Field of Study: Defense Engineering and Technology      Student's Signature .....

Advisor's Signature .....

Academic Year: 2016

Co-Advisor's Signature .....

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงได้ ผู้วิจัยรู้สึกทราบบ้างซึ่งและต้องขอขอบคุณคณะกรรมการพิจารณาวิทยานิพนธ์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยทุกท่านสำหรับการอนุมัติเห็นชอบวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ขอขอบคุณคณะกรรมการกองทุนพัฒนา โรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้าฯ สำหรับเงินทุนทำวิทยานิพนธ์ ขอขอบคุณ ผศ.พ.อ.ดร.ชวัน จันทวาลย์ ผู้อำนวยการกองวิชาวิศวกรรมโยธา ส่วนการศึกษา รร.จปร. ที่สนับสนุนส่งเสริมและมอบโอกาสในการศึกษาต่อปริญญาโท หลักสูตรวิศวกรรมป้องกันประเทศ ขอขอบคุณ รศ.ดร.อัศววิชัย เล่นวารี และ ผศ.พ.อ.ดร.ณัฐพร นุตยะสกุล สำหรับคำแนะนำปรึกษาในการทำวิทยานิพนธ์ ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่โรงเรียนทหารช่างทุกท่าน สำหรับข้อมูลต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการ กองวิชาวิศวกรรมโยธา ส่วนการศึกษา โรงเรียนนายร้อยพระจุลเกล้าฯ ทุกท่าน สำหรับการช่วยเหลืองานด้านต่างๆ และขอบคุณบุคคลรอบข้างที่ช่วยเป็นกำลังใจในการศึกษาในครั้งนี้

ร.ต.ชลิต สันติธรรารักษ์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญภาพ.....	ฎ
บทที่ 1 บทนำ .....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	4
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	4
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
บทที่ 2 ทบทวนวรรณกรรม.....	5
2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	13
2.2.1 ข้อมูลสะพานเอ็ม 4 .....	13
2.2.2 ข้อมูลอะลูมิเนียมอัลลอยส์.....	16
2.2.3 การออกแบบโครงสร้างอะลูมิเนียม.....	18
2.2.3.1 การออกแบบวิธีภาวะสุดขีด (limit state design).....	18
2.2.3.1.1 ภาวณ้ำหนักสุดขีด (ultimate limit state).....	19
2.2.3.1.2 ภาวะสุดขีดบริการ (serviceability limit state) .....	20
2.2.3.2 การออกแบบโดยใช้ทฤษฎีอีลาสติค.....	20
2.2.3.3 การคำนวณหาค่าหน่วยแรงสำหรับออกแบบ.....	21

2.2.3.4	ชิ้นส่วนแผ่นรับแรงอัด (plate element in compression) .....	22
2.2.3.5	การทำโมเมนต์ตัดของรูปตัดตงอะลูมิเนียม .....	23
2.2.3.6	การตรวจสอบการวิบัติของเอว .....	24
2.2.3.6.1	การโก่งเดาะของเอวทางข้าง (sidesway web buckling).....	24
2.2.3.6.2	การครากเฉพาะที่ของเอว (web local yielding).....	24
2.2.3.6.3	การโก่งของเอว (web crippling) .....	25
2.2.3.7	แรงเฉือนแนวนอน.....	26
บทที่ 3	ระเบียบวิธีวิจัย.....	27
3.1	การศึกษาข้อมูล .....	27
3.2	การเก็บตัวอย่างและการตรวจสอบวัสดุที่ใช้ทำสะพานเอ็ม 4.....	27
3.3	การทดสอบวัสดุอะลูมิเนียม .....	28
3.3.1	การพับขึ้นรูปด้วยเครื่องพับ .....	28
3.3.2	การเชื่อมด้วยไฟฟ้า.....	29
3.3.3	การทดสอบสลักเกลียว .....	30
3.4	การวิเคราะห์โครงสร้างและการออกแบบ.....	31
3.5	การขึ้นรูปตัวอย่างทดสอบ.....	31
3.6	การติดตั้งตัวอย่างและเครื่องมือทดสอบ .....	32
บทที่ 4	ผลการทดสอบ.....	35
4.1	ผลการตรวจสอบองค์ประกอบธาตุของชิ้นส่วนตงสะพานทหารเอ็ม 4 .....	35
4.2	ผลการทดสอบการพับแผ่นอะลูมิเนียมด้วยเครื่องพับแผ่นโลหะ.....	36
4.3	ผลการทดสอบกำลังของรอยเชื่อมอะลูมิเนียม.....	38
4.4	ผลทดสอบกำลังรับแรงดึงของสลักเกลียวเหล็กชุบดำ เกรด 12.9 ขนาด M5.....	39
4.5	ผลทดสอบกำลังรับแรงเฉือนของสลักเกลียวเหล็กชุบดำ เกรด 12.9 ขนาด M5.....	40



4.6 ผลทดสอบกำลังรับแรงดึงของชิ้นส่วนตงสะพานทหารเอ็ม 4 และอะลูมิเนียม 7075-T651..	41
4.7 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างด้วยโปรแกรม SAP2000 [16].....	43
4.8 ผลการทดสอบตงตัวอย่าง .....	49
4.8.1 การทดสอบโมเมนต์ดัด .....	49
4.8.2 ค่าการโก่งตัว .....	50
4.8.3 การทดสอบกำลังรับแรงเฉือน.....	52
บทที่ 5 สรุปผลการทดสอบและข้อเสนอแนะ .....	54
5.1 สรุปผลการทดสอบ .....	54
5.2 ข้อเสนอแนะ .....	55
รายการอ้างอิง.....	56
ภาคผนวก.....	58
ภาคผนวก ก ผลการตรวจสอบองค์ประกอบธาตุ.....	59
ภาคผนวก ข ผลการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม SAP2000.....	60
ภาคผนวก ค รายการคำนวณ .....	124
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ .....	139

## สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2.1 การวัดขีดของการต่อทาบ .....	12
ตารางที่ 2.2 ขีดความสามารถในการสร้างเป็นสะพานเครื่องหนูนมัน สะพานเอ็ม 4 .....	16
ตารางที่ 2.3 ขีดความสามารถสะพานเครื่องหนูนลอย .....	16
ตารางที่ 2.4 ขีดความสามารถของแพเอ็ม 4 .....	16
ตารางที่ 2.5 คุณสมบัติของอะลูมิเนียม AL2024, AL5083, AL6061 และ AL7075 .....	17
ตารางที่ 2.6 การคำนวณหน่วยแรงของวัสดุ .....	21
ตารางที่ 2.7 การคำนวณหน่วยแรงของสลักเกลียวเหล็ก .....	22
ตารางที่ 2.8 การจำแนกประเภทชิ้นส่วนภายใต้แรงอัดแบบแผ่ (uniform compression) .....	23
ตารางที่ 2.9 ค่าตัวแปรจากกราฟการวิบัติกรณีต่างๆ.....	26
ตารางที่ 4.1 ตารางเปรียบเทียบขององค์ประกอบธาตุของชิ้นส่วนตงสะพานทหารเอ็ม 4 และ อะลูมิเนียม 2024-T3.....	35
ตารางที่ 4.2 ผลการทดสอบการพัดด้วยเครื่องพัดโลหะ .....	36
ตารางที่ 4.3 ผลทดสอบแรงดึงวัดขีดของอะลูมิเนียม 6061 - T651 เชื่อมด้วยลวดเชื่อม ER4043 ...	38
ตารางที่ 4.4 ผลทดสอบแรงดึงวัดขีดของอะลูมิเนียม 6061 - T651 เชื่อมด้วยลวดเชื่อม ER5356 ...	38
ตารางที่ 4.5 ผลทดสอบกำลังรับแรงดึงของสลักเกลียวเหล็กชุบดำ เกรด 12.9 ขนาด M5 .....	39
ตารางที่ 4.6 ผลทดสอบกำลังรับแรงเฉือนของสลักเกลียวเหล็กชุบดำ เกรด 12.9 ขนาด M5 .....	40
ตารางที่ 4.7 ผลทดสอบกำลังรับแรงดึงของชิ้นส่วนตงสะพานทหารเอ็ม 4 .....	41
ตารางที่ 4.8 ผลทดสอบกำลังรับแรงดึงของอะลูมิเนียม 7075-T651.....	42
ตารางที่ 4.9 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างสะพานทหารเอ็ม 4 โดยรูปตัดที่ออกแบบและใช้น้ำหนัก บรรทุกตามพิกัดที่ระบุ .....	43
ตารางที่ 4.10 ตารางเปรียบเทียบค่าการโก่งตัวจากการทดสอบกับค่าที่คำนวณ .....	50

ตารางที่ ค.1 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างสะพานทหารเอ็ม 4.....	124
ตารางที่ ค.2 คำนวณค่าโมเมนต์อินเนอร์เซีย.....	127
ตารางที่ ค.3 คำนวณค่าโมเมนต์ต้านทานของหน้าตัดชนิดอัดแน่น .....	128



## สารบัญภาพ

หน้า

รูปที่ 1.1	สะพานเอ็ม 4 สร้างเป็นสะพานเครื่องหนุนมัน	2
รูปที่ 1.2	ส่วนประกอบสะพานเอ็ม 4	2
รูปที่ 1.3	ตงสะพานเอ็ม 4 ที่ค่ายภาณุรังษี จังหวัดราชบุรี	3
รูปที่ 1.4	ตงสะพานเอ็ม 4 ที่ชำรุด	3
รูปที่ 2.1	แสดงรูปตัดของคานอะลูมิเนียมระดับเบิลทีและคานอะลูมิเนียมรูปพรรณ	6
รูปที่ 2.2	แสดงลักษณะการเชื่อมแบบกากบาท (cruciform)	6
รูปที่ 2.3	แสดงรูปตัดขวางของรอยเชื่อม และความสัมพันธ์ของความแข็ง (hardness) กับระยะจากจุดกึ่งกลางรอยเชื่อม	7
รูปที่ 2.4	แสดงรูปด้านและรูปตัดของคานที่ใช้ทดสอบ	8
รูปที่ 2.5	ปัญหาที่เกิดขึ้นเมื่อใช้สลักเกลียว (bolts) กรณีต่างๆ	9
รูปที่ 2.6	แสดงการต่อทาบแบบ ก) แบบเกยทับ (single-lap) ข) แบบปลายต่อปลายเกยทับกัน (double lap joint)	11
รูปที่ 2.7	การต่อสลักเกลียว ก) สลักเกลียวเดี่ยว ข) กรณีใช้สลักเกลียวคู่	11
รูปที่ 2.8	การวิบัติของรอยต่อตัวที (T-stub) แบบใช้สลักเกลียวเหล็กเกรด 10.9	13
รูปที่ 2.9	การวิบัติของรอยต่อตัวที (T-stub) แบบใช้สลักเกลียวอะลูมิเนียม AA7075 และสลักเกลียวเหล็กเกรด 4.8	13
รูปที่ 2.10	สะพานเครื่องหนุนมันเอ็ม 4	14
รูปที่ 2.11	สะพานเครื่องหนุนลอยเอ็ม 4 เรือหุ่นโลหะผสม	15
รูปที่ 2.12	แพเอ็ม 4	15
รูปที่ 2.13	หลักภาวะนั้น้ำหนักสุดขีด (ultimate limit state)	19
รูปที่ 2.14	วิธีหน่วยแรงจำกัด (limiting stresses)	21

รูปที่ 2.15 แสดงลักษณะชิ้นส่วนปลายยึด (stiffened elements) และชิ้นส่วนปลายยื่น (unstiffened elements) .....	22
รูปที่ 2.16 การครากเฉพาะที่ของเอว.....	24
รูปที่ 3.1 ก) รูปหน้าตัดตงสะพานเอ็ม 4 ที่ชำรุด ข) ภาพจำลองรูปหน้าตัดตงสะพานเอ็ม 4.....	27
รูปที่ 3.2 เศษชิ้นส่วนของตงสะพานที่ชำรุด.....	28
รูปที่ 3.3 เครื่องพับโลหะ.....	28
รูปที่ 3.4 การเชื่อมแบบตัวยูสองหน้า.....	29
รูปที่ 3.5 เครื่องทดสอบอเนกประสงค์ (UTM).....	29
รูปที่ 3.6 การทดสอบกำลังรับแรงดึง.....	30
รูปที่ 3.7 การทดสอบกำลังรับแรงเฉือน.....	30
รูปที่ 3.8 รูปยานยนต์ล้อที่ใช้สำหรับเคลื่อนย้ายรถถัง.....	31
รูปที่ 3.9 การติดตั้งจตุรรองรับ, คานถ่ายแรง, โหลดเซลล์ และแผ่นรับแรงกด.....	32
รูปที่ 3.10 แสดงระยะ ตำแหน่ง ของน้ำหนักบรรทุก สำหรับการทดสอบโมเมนต์ดัด.....	32
รูปที่ 3.11 แสดงระยะ ตำแหน่ง ของน้ำหนักบรรทุก สำหรับการทดสอบแรงเฉือน.....	32
รูปที่ 3.12 การติดตั้งอุปกรณ์วัดความเครียดหรือสเตรนเกจ (strain gauge).....	33
รูปที่ 3.13 การติดโหลดเซลล์และแอลวีดีที.....	33
รูปที่ 3.14 อุปกรณ์บันทึกค่าและแปลผลข้อมูล (data logger) ยี่ห้อ Kyowa รุ่น EDX-400A-4H... ..	34
รูปที่ 4.1 ผลการพับอะลูมิเนียม 5083-H112 หน้า 6.35 มม. มุมพับ 90 องศา.....	36
รูปที่ 4.2 ผลการพับอะลูมิเนียม 6061-T651 หน้า 6.35 มม. มุมพับ 90 องศา.....	37
รูปที่ 4.3 ผลการพับอะลูมิเนียม 7075-T651 หน้า 6.35 มม. มุมพับ 90 องศา.....	37
รูปที่ 4.4 ผลทดสอบการดึงอะลูมิเนียม 6061-T651 ที่เชื่อมด้วยลวดเชื่อม ER4043a หมายเลข 1-3 และเชื่อมด้วยลวดเชื่อม ER 5356 หมายเลข 4-6 .....	39
รูปที่ 4.5 ผลการทดสอบค่าหน่วยแรงดึงวิบัติของสลักเกลียวเหล็กชุบดำ เกรด 12.9 ขนาด M5.....	40

รูปที่ 4.6	ผลทดสอบกำลังรับแรงเฉือน สลักเกลียวเหล็ก ชูบดำ เกรด 12.9 ขนาด M5 .....	41
รูปที่ 4.7	ผลทดสอบกำลังรับแรงดึง หมายเลข 1-3 ชั้นส่วนตงสะพานทหารเอ็ม 4, หมายเลข 4-6 อะลูมิเนียม 7075-T651 .....	42
รูปที่ 4.8	ก) รูปฝั่ง, ข) รูปด้าน, ค) รูปหน้าตัด 1-1 .....	44
รูปที่ 4.9	รูปตัดขวาง ก) รูปตัด 2-2, ข) รูปตัด 3-3.....	45
รูปที่ 4.10	รูปรายละเอียด 1 .....	46
รูปที่ 4.11	รูปรายละเอียด 2 .....	47
รูปที่ 4.12	รูป 3 มิติ ตงอะลูมิเนียม .....	48
รูปที่ 4.13	การวิบัติของตงทดสอบ .....	49
รูปที่ 4.14	การวิบัติของตงทดสอบที่จุดต่อสลักเกลียว .....	50
รูปที่ 4.15	กราฟแสดงความสัมพันธ์ค่าการโก่งกับกับน้ำหนักบรรทุก เปรียบเทียบระหว่างค่าจาก การคำนวณกับค่าจากการทดสอบ .....	51
รูปที่ 4.16	การวิบัติของตงเนื่องจากแรงเฉือน.....	52
รูปที่ 4.17	การโก่งตัวหลังจากการกดน้ำหนัก 10 ตัน ก่อนทดสอบจริง.....	53
รูปที่ ก.1	ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุชั้นส่วนตงสะพานทหารเอ็ม 4 .....	59
รูปที่ ข.1	แรงกระทำแบบแผ่ต่อสะพานเครื่องหนุนมันแบบที่ 1 กรณี 1 .....	60
รูปที่ ข.2	แรงปฏิกิริยา สะพานเครื่องหนุนมันแบบที่ 1 กรณี 1 .....	61
รูปที่ ข.3	แรงเฉือน สะพานเครื่องหนุนมันแบบที่ 1 กรณี 1 .....	62
รูปที่ ข.4	โมเมนต์ดัด สะพานเครื่องหนุนมันแบบที่ 1 กรณี 1.....	63
รูปที่ ข.5	แรงกระทำแบบแผ่ต่อสะพานเครื่องหนุนมันแบบที่ 1 กรณี 2 .....	64
รูปที่ ข.6	แรงปฏิกิริยา สะพานเครื่องหนุนมันแบบที่ 1 กรณี 2 .....	65
รูปที่ ข.7	แรงเฉือน สะพานเครื่องหนุนมันแบบที่ 1 กรณี 2 .....	66
รูปที่ ข.8	โมเมนต์ดัด สะพานเครื่องหนุนมันแบบที่ 1 กรณี 2.....	67



รูปที่ ข.32 โมเมนต์ดัด สะพานเครื่องหมุนมันแบบที่ 4 กรณี 2.....	91
รูปที่ ข.33 แรงกระทำแบบแผ่ต่อสะพานเครื่องหมุนมันแบบที่ 5 กรณี 1.....	92
รูปที่ ข.34 แรงปฏิกิริยา สะพานเครื่องหมุนมันแบบที่ 5 กรณี 1 .....	93
รูปที่ ข.35 แรงเฉือน สะพานเครื่องหมุนมันแบบที่ 5 กรณี 1.....	94
รูปที่ ข.36 โมเมนต์ดัด สะพานเครื่องหมุนมันแบบที่ 5 กรณี 1.....	95
รูปที่ ข.37 แรงกระทำแบบแผ่ต่อสะพานเครื่องหมุนมันแบบที่ 5 กรณี 2.....	96
รูปที่ ข.38 แรงปฏิกิริยา สะพานเครื่องหมุนมันแบบที่ 5 กรณี 2 .....	97
รูปที่ ข.39 แรงเฉือน สะพานเครื่องหมุนมันแบบที่ 5 กรณี 2.....	98
รูปที่ ข.40 โมเมนต์ดัด สะพานเครื่องหมุนมันแบบที่ 5 กรณี 2.....	99
รูปที่ ข.41 แรงกระทำแบบแผ่ต่อสะพานเครื่องหมุนมันแบบที่ 6 กรณี 1.....	100
รูปที่ ข.42 แรงปฏิกิริยา สะพานเครื่องหมุนมันแบบที่ 6 กรณี 1 .....	101
รูปที่ ข.43 แรงเฉือน สะพานเครื่องหมุนมันแบบที่ 6 กรณี 1.....	102
รูปที่ ข.44 โมเมนต์ดัด สะพานเครื่องหมุนมันแบบที่ 6 กรณี 1.....	103
รูปที่ ข.45 แรงกระทำแบบแผ่ต่อสะพานเครื่องหมุนมันแบบที่ 6 กรณี 2.....	104
รูปที่ ข.46 แรงปฏิกิริยา สะพานเครื่องหมุนมันแบบที่ 6 กรณี 2 .....	105
รูปที่ ข.47 แรงเฉือน สะพานเครื่องหมุนมันแบบที่ 6 กรณี 2.....	106
รูปที่ ข.48 ผลการวิเคราะห์โมเมนต์ดัด สะพานเครื่องหมุนมันแบบที่ 6 กรณี 2.....	107
รูปที่ ข.49 แรงกระทำแบบแผ่ต่อสะพานเครื่องหมุนมันแบบที่ 7 กรณี 1.....	108
รูปที่ ข.50 แรงปฏิกิริยา สะพานเครื่องหมุนมันแบบที่ 7 กรณี 1 .....	109
รูปที่ ข.51 แรงเฉือน สะพานเครื่องหมุนมันแบบที่ 7 กรณี 1.....	110
รูปที่ ข.52 โมเมนต์ดัด สะพานเครื่องหมุนมันแบบที่ 7 กรณี 1.....	111
รูปที่ ข.53 แรงกระทำแบบแผ่ต่อสะพานเครื่องหมุนมันแบบที่ 7 กรณี 2.....	112
รูปที่ ข.54 แรงปฏิกิริยา สะพานเครื่องหมุนมันแบบที่ 7 กรณี 2 .....	113



รูปที่ ข.55 แรงเฉือน สะพานเครื่องหมุนมันแบบที่ 7 กรณี 2.....	114
รูปที่ ข.56 โมเมนต์ดัด สะพานเครื่องหมุนมันแบบที่ 7 กรณี 2.....	115
รูปที่ ข.57 แรงกระทำแบบแผ่ต่อสะพานเครื่องหมุนลอย กรณีที่ 1.....	116
รูปที่ ข.58 แรงปฏิกิริยา สะพานเครื่องหมุนลอย กรณี 1.....	117
รูปที่ ข.59 แรงเฉือน สะพานเครื่องหมุนลอย กรณี 1.....	118
รูปที่ ข.60 โมเมนต์ดัด สะพานเครื่องหมุนลอย กรณี 1.....	119
รูปที่ ข.61 แรงกระทำแบบแผ่ต่อสะพานเครื่องหมุนลอย กรณี 2.....	120
รูปที่ ข.62 แรงปฏิกิริยา สะพานเครื่องหมุนลอย กรณี 2.....	121
รูปที่ ข.63 แรงเฉือน สะพานเครื่องหมุนลอย กรณี 2.....	122
รูปที่ ข.64 โมเมนต์ดัด สะพานเครื่องหมุนลอย กรณี 2.....	123
รูปที่ ค.1 หน้าตัดตงออกแบบ.....	126
รูปที่ ค.2 แผ่นต่อตงที่ปีกและเอว.....	131
รูปที่ ค.3 กำลังรับแรงดึงของแผ่นต่อที่ปีก.....	133
รูปที่ ค.4 จำนวนสลักเกลียวบนแผ่นต่อ.....	134
รูปที่ ค.5 การเชื่อมอกที่ปีก.....	134
รูปที่ ค.6 การเชื่อมอกที่แผ่นต่อ.....	135
รูปที่ ค.7 รูปตัดแสดงจุดเชื่อมต่อสลักเกลียว.....	137

## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ที่มาและความสำคัญ

การข้ามสิ่งกีดขวางไม่ว่าจะเป็นแม่น้ำ ลำธาร หุบเหว นั้นจำเป็นต้องมีสิ่งก่อสร้างที่ช่วยอำนวยความสะดวกในการข้ามอุปสรรคดังกล่าว ซึ่งเป็นที่รู้จักกันนั้นคือสะพาน สะพานเป็นสิ่งก่อสร้างที่ช่วยร่นระยะทางและลดเวลาในการเดินทางได้เป็นอย่างมาก สะพานสามารถถูกสร้างขึ้นจากต้นไม้หรือก้อนหิน ที่สามารถหาได้ง่ายจากธรรมชาติ ด้วยการการนำต้นไม้มาวางพาดเป็นทางเดินข้ามระหว่างสองฝั่ง หรือการนำก้อนหินมาวางเรียงกันให้เป็นทางเดิน เป็นต้น ซึ่งสะพานในยุคเริ่มแรกมักไม่มีความซับซ้อนอะไรมากนัก และเริ่มมีการนำความรู้ทางด้านวิศวกรรมมาประยุกต์ใช้ โดยออกแบบให้สะพานมีความซับซ้อนมากขึ้น สามารถสร้างเป็นสะพานที่มีหลากหลายรูปแบบ มีขนาดใหญ่โต สามารถรับน้ำหนักบรรทุกทุกได้มาก และมีความสวยงามตามรูปแบบสถาปัตยกรรมหรือวัฒนธรรมของแต่ละประเทศแตกต่างกันออกไป การพัฒนาทางด้านวัสดุศาสตร์ก็ช่วยทำให้สะพานมีความแข็งแรงและประหยัดมากยิ่งขึ้น

ในทางทหารนั้น สะพานถึงเป็นยุทธโธปกรณ์ที่มีความสำคัญเป็นอย่างยิ่ง สำหรับการส่งกำลังทหารเข้าไปในพื้นที่สู้รบ ซึ่งมักต้องเจออุปสรรคกีดขวางเส้นทาง ซึ่งทหารช่างจะเป็นหน่วยที่ต้องเข้าไปแก้ไขปัญหาอุปสรรคเพื่อให้การดำเนินการทางยุทธวิธีเป็นไปตามแผนที่วางไว้ ดังนั้นทหารช่างจึงจำเป็นต้องมียุทธโธปกรณ์ที่สามารถแก้ไขปัญหาดังกล่าวได้อย่างรวดเร็วและมีประสิทธิภาพ ซึ่งทางกองทัพก็ได้จัดซื้อ นำเข้าสะพานทหารมาจากหลายประเทศ ด้วยความจำเป็น ซึ่งต้องใช้งบประมาณเป็นจำนวนมาก

สะพานทหารยังมีประโยชน์อื่นนอกเหนือจากใช้ฝึกทหาร หรือการใช้ในยามสงคราม ในกรณีที่เกิดภัยพิบัติทางธรรมชาติ ได้แก่ น้ำท่วม ซึ่งเป็นเหตุทำให้ทางถูกตัดขาด ทหารช่างจะใช้สะพานทหารในการเข้าไปแก้ปัญหาบรรเทาความเดือดร้อนแก่ผู้ประสบภัยได้ ซึ่งถือเป็นงานบรรเทาสาธารณภัย [1]

สะพานเครื่องหน้มน้ำมัน 4 ดังรูปที่ 1.1 และรูปที่ 1.2 เป็นหนึ่งในหลาย ๆ สะพานของสะพานทหารที่มีใ้ช้ของกองทัพ เป็นสะพานที่มีความคล่องตัว สามารถประกอบได้โดยใช้คนเพียงไม่กี่คน สามารถขนย้ายได้ง่ายทั้งทางบก ทางน้ำและทางอากาศ เนื่องจากชิ้นส่วนทำจากวัสดุอะลูมิเนียมอัลลอยส์ (alloys) มีน้ำหนักเบากว่าเหล็กประมาณหนึ่งในสามของน้ำหนักของเหล็ก [2]



รูปที่ 1.1 สะพานเอ็ม 4 สร้างเป็นสะพานเครื่องหน้มน้ำมัน [3]



รูปที่ 1.2 ส่วนประกอบสะพานเอ็ม 4 [3]

ปัจจุบันสะพานเครื่องหนุมน้ำมันเอ็ม 4 ผ่านการใช้งานมาอย่างยาวนานจึงทำให้ชิ้นส่วนตงสะพานที่ใช้อยู่ดังรูปที่ 1.3 บางชิ้นส่วนชำรุดเสียหายดังรูปที่ 1.4 ไม่เหมาะที่จะนำมาใช้งาน หากไม่แก้ไขซ่อมแซมก็อาจก่อให้เกิดอุบัติเหตุขณะปฏิบัติหน้าที่ได้ และการสั่งซื้อจากต่างประเทศนั้นก็ต้องผ่านกระบวนการดำเนินงานหลายขั้นตอน ต้องใช้งบประมาณเป็นจำนวนมากและใช้เวลาในการดำเนินงานนาน ไม่ทันต่อความต้องการ ดังนั้นการผลิตชิ้นส่วนสะพานเพื่อใช้ทดแทนจะช่วยแก้ปัญหาดังกล่าวได้ อีกทั้งยังเป็นการสร้างองค์ความรู้ด้านการผลิตชิ้นส่วนจากวัสดุอะลูมิเนียมอัลลอยส์ให้แก่องค์ทัพและเป็นประโยชน์ต่อวงการอุตสาหกรรมอะลูมิเนียมของไทยต่อไปในอนาคต



รูปที่ 1.3 ตงสะพานเอ็ม 4 ที่ค่ายภาณุรังษี จังหวัดราชบุรี



รูปที่ 1.4 ตงสะพานเอ็ม 4 ที่ชำรุด

## 1.2 วัตถุประสงค์

- 1) ศึกษาการผลิตตงอะลูมิเนียม เพื่อสร้างตงอะลูมิเนียมของสะพานเอ็ม 4 โดยใช้วัสดุที่มีในประเทศ
- 2) ศึกษาและทดสอบความสามารถในการรับน้ำหนักของตงอะลูมิเนียมเปรียบเทียบกับค่าจากการคำนวณกับน้ำหนักบรรทุกทุกจริง

## 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

- 1) วิเคราะห์โครงสร้างสะพานเอ็ม 4 ที่ประกอบเป็นสะพานเครื่องหนุ่นและสะพานเครื่องหนุ่นลอย
- 2) ออกแบบชิ้นส่วนเฉพาะตงยาว ความยาว 4.57 ม. โดยวิธีภาวะสุดขีด (limit state design) โดยตรวจสอบเฉพาะภาวะสุดขีดกำลังสถิต (limit state of static strength) และภาวะสุดขีดบริการ (serviceability limit state)
- 3) ใช้อะลูมิเนียมที่ผ่านการขึ้นรูป (wrought aluminium alloys)<sup>1</sup> ที่จำหน่ายในประเทศ

## 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) กองทัพสามารถผลิตตงสะพานเอ็ม 4 ใหม่เพื่อทดแทนตงที่ชำรุด ช่วยลดการนำเข้าสิ่งซื้อชิ้นส่วนจากต่างประเทศ
- 2) ส่งเสริมการออกแบบโครงสร้างด้วยวิธีภาวะสุดขีดภายในประเทศให้เป็นที่รู้จักกันมากขึ้น
- 3) ขยายองค์ความรู้ด้านการออกแบบโครงสร้างอะลูมิเนียมของประเทศไทยต่อไป
- 4) ทราบถึงขีดจำกัดของวัสดุอะลูมิเนียมอัลลอยส์ที่นำมาใช้งานในด้านการออกแบบเกี่ยวกับสะพานทหาร

---

<sup>1</sup> อะลูมิเนียมที่ผ่านการขึ้นรูป (wrought aluminium alloys) คือ อะลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการหล่อ การรีดร้อน การรีดเย็น และการบ่มด้วยความร้อน หรือผ่านกระบวนการอย่างใดอย่างหนึ่งจากโรงงาน

## บทที่ 2

### ทบทวนวรรณกรรม

#### 2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ธนกร งามจริงจิต และคณะ [4] ศึกษาปัญหาและความเป็นไปได้ในการออกแบบปรับปรุงสะพานเพื่อยุทธวิธีข้ามลำน้ำของทหารช่างโดยการวิเคราะห์และออกแบบโครงสร้างสะพานที่มีอยู่เป็นการศึกษาการออกแบบอุปกรณ์และวิธีการปรับปรุงสะพานเอ็ม 4 และสะพานเอ็มจีบี ซึ่งทั้งสองเป็นสะพานที่ใช้งานอยู่ในกองทัพ ผู้วิจัยได้ออกแบบอุปกรณ์สำหรับเชื่อมต่อตงอะลูมิเนียมของสะพานเอ็ม 4 ให้สามารถใช้งานกับเรือทุ่นโลหะผสมของสะพานเอ็มจีบี ให้สามารถรับน้ำหนักบรรทุกได้สูงสุด 70 ตัน โดยนำค่าโมเมนต์ดัดและแรงเฉือนสูงสุดไปออกแบบและทำการทดสอบอุปกรณ์ที่ออกแบบ

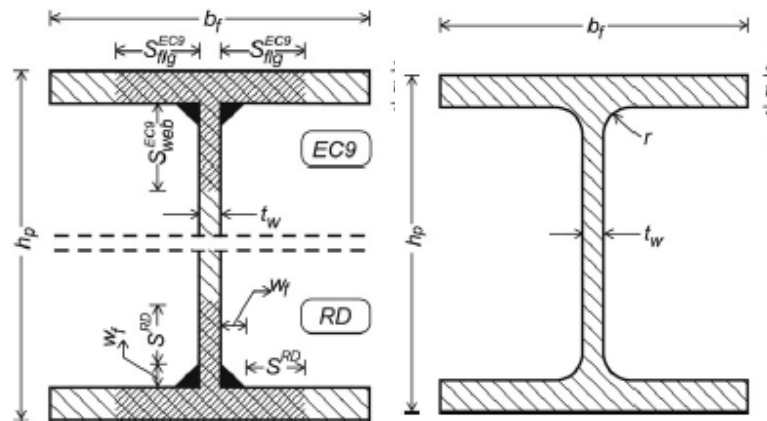
E.K. Koltakis และ F.G. Preftitsi [5] ศึกษาพฤติกรรมแบบพลาสติก<sup>2</sup>ของรอยเชื่อมคานดับเบิลที (double T-beam) ด้วยวิธีเชิงตัวเลข<sup>3</sup>เป็นการศึกษาพฤติกรรมของคานดับเบิลทีเปรียบเทียบกับคานรูปพรรณหน้าตัดตัวเอช ดังรูปที่ 2.1 เพื่อต้องการทราบผลที่เกิดขึ้นในบริเวณ HAZ (heat-affected zone)<sup>4</sup> จากแรงเฉือนโดยใช้วัสดุ 3 ชนิด คือ อะลูมิเนียม 6063-T6, อะลูมิเนียม 6005a-T6 และอะลูมิเนียม 7020-T6 และวิเคราะห์โครงสร้างโดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์<sup>5</sup> พบว่าการวิบัติที่บริเวณรอยเชื่อมเกิดจากแรงเฉือนเป็นปัจจัยหลัก และ HAZ เป็นปัจจัยที่ทำให้เกิดการวิบัติก่อนกำหนดจากแรงเฉือนสะสมที่เกิดขึ้น ตามแนวรอยต่อของแผ่นปีกและแผ่นเอวส่วนล่าง และคานดับเบิลทีมีกำลังต้านทานแรงดัดต่ำกว่าคานรูปพรรณ

<sup>2</sup>พฤติกรรมแบบพลาสติก คือ ลักษณะการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นในช่วงที่เกินกว่าขีดจำกัดสัดส่วนของเส้นกราฟหน่วยแรงกับความเครียด

<sup>3</sup>วิธีเชิงตัวเลข คือ การวิเคราะห์ค่าโดยการคำนวณ

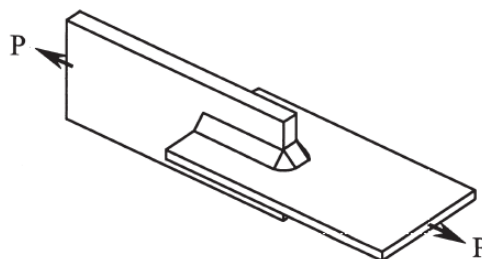
<sup>4</sup>HAZ (heat-affected zone) คือ พื้นที่ที่เกิดความร้อนจากการเชื่อมอยู่ติดกับรอยเชื่อม

<sup>5</sup>ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ คือ เทคนิควิเคราะห์เชิงตัวเลขสำหรับการหาค่าตอบโดยประมาณของสมการเชิงอนุพันธ์ย่อย

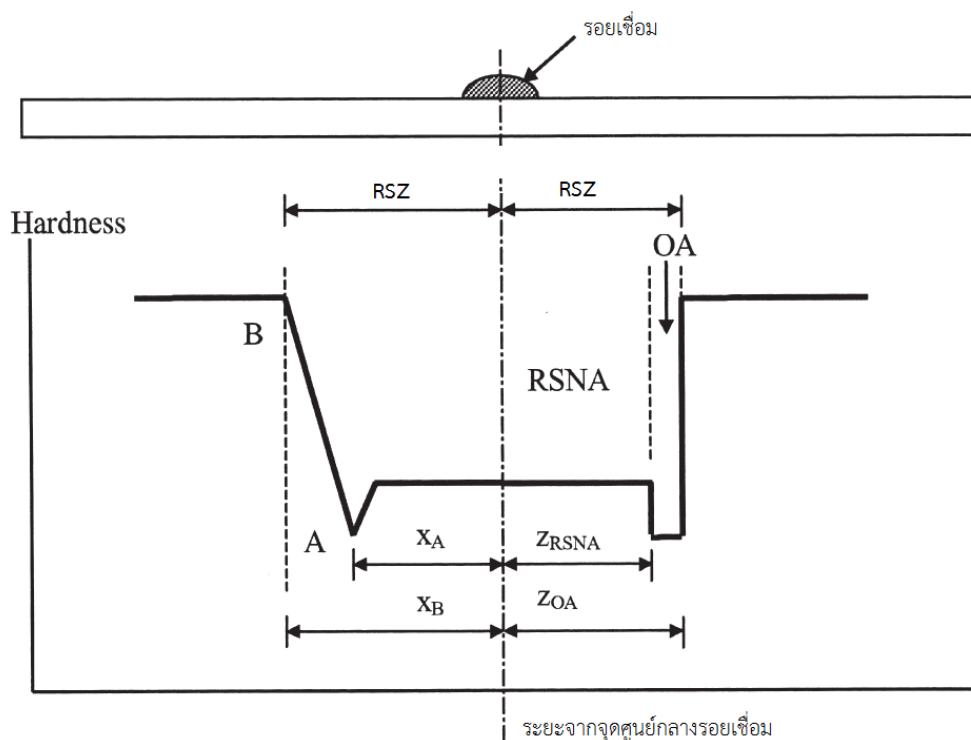


รูปที่ 2.1 แสดงรูปตัดของคานอะลูมิเนียมดับเบิลทีและคานอะลูมิเนียมรูปพรรณ [5]

T.K. Chan, R.F.D. Porter Goff. [6] ศึกษาและทดสอบกำลังรับแรงของรอยเชื่อมบริเวณ HAZ (heat-affected zone) ที่เชื่อมแบบกากบาท (cruciform) ดังรูปที่ 2.2 พบว่าค่าที่ได้จากการทดสอบ มีค่าน้อยกว่าค่าที่คำนวณไว้โดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ และลักษณะของรอยเชื่อมแบบต่าง ๆ ได้แก่ รอยเชื่อมรูปสี่เหลี่ยม รอยเชื่อมรูปสามเหลี่ยม และรอยเชื่อมรูปพาราโบลา ไม่มีผลต่อการรับแรงแต่อย่างใด แต่จุดเริ่มรอยเชื่อมและทิศทางการเชื่อมมีผลต่อความแข็งแรง ซึ่งอาจเกี่ยวกับการกระจายความร้อนขณะเชื่อม การวิบัติของรอยเชื่อมแบบกางแขนเกิดที่รอบ ๆ รอยเชื่อมในบริเวณพื้นที่ RSZ (reduced-strength zone) ดังรูปที่ 2.3 ที่บริเวณพื้นที่ OA (over-aged) จากรูปที่ 2.3 จะเกิดความเครียดสูงและเป็นจุดที่อ่อนแอที่ทำให้เกิดการวิบัติ โดยแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์แสดงให้เห็นว่าที่บริเวณนี้จะสามารถรับกำลังได้เพียง 12% ของแรงบรรทุกจริง ส่วนการวิบัติในรูปแบบอื่น ๆ เกิดจากการเชื่อมที่ไม่ดี เกิดโพรงอากาศภายในรอยเชื่อมขณะเชื่อม หรือการเชื่อมทะลุ ทำให้กำลังรับแรงลดลงอย่างมาก และการเชื่อมแบบต่อชน (butt weld) จะเกิดการสูญเสียกำลังมากกว่าเชื่อมแบบพอก (fillet weld) ดังนั้นในการเชื่อมควรกำหนดทิศทางที่ทำให้เกิดผลของ HAZ ให้น้อยที่สุด



รูปที่ 2.2 แสดงลักษณะการเชื่อมแบบกากบาท (cruciform) [6]



รูปที่ 2.3 แสดงรูปตัดขวางของรอยเชื่อม และความสัมพันธ์ของความแข็ง (hardness) กับระยะจากจุดกึ่งกลางรอยเชื่อม [6]

Md Faseulla Khan, Gaurav Sharma และ D. K. Dwivedi [7] ศึกษาผลของผิวของวัสดุ เวลาที่ใช้ในการบ่ม (aging)<sup>6</sup> กระแสไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้า เวลาในขณะที่เชื่อม ที่มีผลต่อการเชื่อมต่อบบ เวลด์บอนด์ (weld-bond) ของแผ่นอะลูมิเนียม 6061-T651 ความหนา 2 มม. ซึ่งเวลด์บอนด์เป็นการเชื่อมที่ร่วมกับการประสานด้วยแรงยึดเหนี่ยวจากวัสดุอีพ็อกซี่<sup>7</sup> แล้วทำการเชื่อมแบบสปอตต์ (spot weld)<sup>8</sup> โดยให้ทั้ง 2 แผ่นเหลื่อมกัน (over lap) ผลการทดสอบชี้ให้เห็นว่าการบ่มในช่วง 40 ถึง 60 นาทีแรกจะช่วยเพิ่มความแข็งแรงของวัสดุ ความขรุขระของผิวหน้าจะเพิ่มแรงยึดเหนี่ยวให้แก่วัสดุโดยขัดผิวด้วยกระดาษทรายเบอร์ 220 นอกจากนี้จำนวนรอบในการเชื่อม<sup>9</sup> กระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นมีผลทำให้กำลังรับแรงเพิ่มขึ้น รอยเชื่อมที่เชื่อมแบบเวลด์บอนด์จะมีความแข็ง

<sup>6</sup> การบ่ม (aging) คือ กรรมวิธีที่ให้พลังงานที่เหมาะสมเพื่อทำให้เกิดภาวะของการเริ่มเกิดเป็นเฟสใหม่พอดี

<sup>7</sup> วัสดุอีพ็อกซี่ คือ วัสดุเชื่อมประสานมีคุณสมบัติในการยึดเกาะสูงและทนต่อแรงดึงมาก

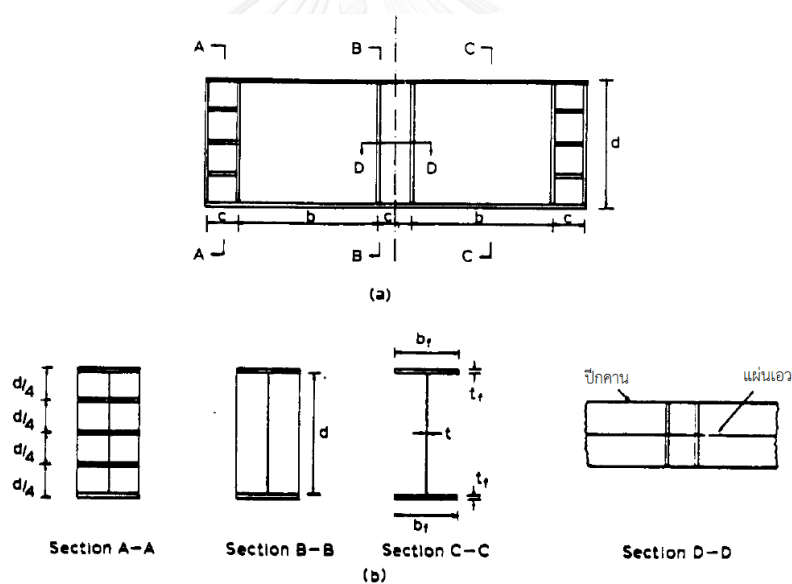
<sup>8</sup> การเชื่อมแบบสปอตต์ (spot weld) เป็นลักษณะการเชื่อมแบบหนึ่งที่ใช้กระแสไฟฟ้า อาร์กระหว่าง 2 จุด บนและล่างของวัสดุ 2 แผ่น เชื่อมเป็นจุดเว้นระยะ

<sup>9</sup> จำนวนรอบการเชื่อม คือ จำนวนครั้งในการเดินรอยเชื่อมซ้ำรอยเดิมจนเต็มรอยเชื่อม



มากกว่าการเชื่อมเพียงอย่างเดียว และการควบคุม กระแสไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้า เวลาขณะเชื่อม การทำให้ผิวสัมผัสขรุขระ การเพิ่มแรงยึดเหนี่ยวด้วยวัสดุอีพ็อกซี่ จะช่วยให้รอยเชื่อมมีกำลังรับแรงมากขึ้น

C.A. Burt, H.R. Evans และ O. Vilnay [8] ศึกษาพฤติกรรมการวิบัติของรอยเชื่อมคานอะลูมิเนียมประกอบขนาดใหญ่ (plate girder)<sup>10</sup> ทำการทดสอบรอยเชื่อมคานอะลูมิเนียม 7020 ทั้งหมด 11 ตัวอย่าง มีรูปตัดและรูปด้านดังรูปที่ 2.4 พบว่ารอยแตกที่เกิดขึ้นบริเวณ HAZ (heat-affected zone) เกิดจากแรงเฉือนที่ทำให้เกิดแรงดึงทแยงในแผ่นเอว (web) เป็นผลให้คานเกิดการเซทางข้าง ระยะห่างของแผ่นเสริมกำลัง (stiffener) มีผลต่อความสามารถในการรับแรงเฉือน การเพิ่มความหนาแผ่นปีกคาน (flange) จะช่วยให้คานแข็งแรงมากขึ้น ทฤษฎีที่ใช้ในคานเหล็กสามารถประมาณความสามารถในการรับแรงเฉือนของอะลูมิเนียม 7020 ได้ และสรุปว่าทฤษฎีวิเคราะห์โครงสร้างที่มีการปรับปรุงสมการ จะใช้ทำนายพฤติกรรมการวิบัติของคานอะลูมิเนียมผสมได้

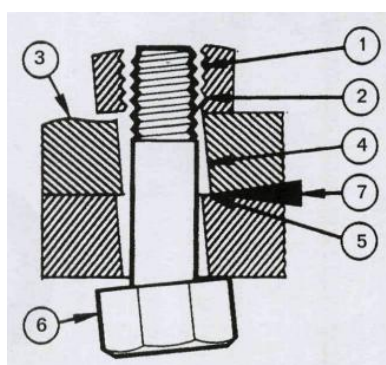


รูปที่ 2.4 แสดงรูปด้านและรูปตัดของคานที่ใช้ทดสอบ [8]

Milosh D. Milenkovich [9] ศึกษาสาเหตุที่ทำให้สลักเกลียว (bolts) วิบัติ ผลการศึกษาพบว่า สิ่งที่ต้องพิจารณาต่อการวิบัติของสลักเกลียวคือ น้ำหนักที่สลักเกลียวแบกรับ การเลือกเกรดชนิดของ

<sup>10</sup> คานประกอบขนาดใหญ่ (plate girder) คือ ส่วนของโครงสร้างที่รับแรงดัดและแรงเฉือนประกอบด้วยแผ่นวัสดุขนาดต่างๆอย่างน้อย 3 แผ่น ได้แก่ แผ่นเอวและแผ่นปีกคาน (วินิต ช่อวิเชียร. การออกแบบโครงสร้างเหล็ก. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ. 2539)

สลักเกลียว คุณภาพจากแหล่งผลิต ลักษณะเกลียวของสลักเกลียว ความยาว ผิวหน้าสัมผัส และแรงกด (clamping force)<sup>11</sup> บนรอยต่อสลักเกลียว ซึ่งสลักเกลียวแต่ละชนิดต้องการแรงขัน (torque)<sup>12</sup> ที่ต่างกัน และไม่ควรออกแรงขันเกินกว่าค่าที่แนะนำ แรงกดมีความสัมพันธ์กับแรงขัน การกระจายตำแหน่งของสลักเกลียวมีผลต่อการรับแรงของรอยต่อ และได้สรุปปัญหาที่เกิดขึ้นในการต่อด้วยสลักเกลียว ดังนี้



รูปที่ 2.5 ปัญหาที่เกิดขึ้นเมื่อใช้สลักเกลียว (bolts) กรณีต่างๆ [9]

- 1) แรงที่กระทำไม่กระจายตลอดเกลียว รูปที่ 2.5 (1)
- 2) เกลียวของแป้นเกลียว (nut) แรงส่งผ่านไม่ตั้งฉากกับผิวสัมผัส รูปที่ 2.5 (2)
- 3) ผิวที่ไม่เรียบมีผลต่อการเอียงศูนย์ของแรงในแนวแกนของสลักเกลียว รูปที่ 2.5 (3)
- 4) รูเจาะไม่อยู่ในแนวขนานกับสลักเกลียว รูปที่ 2.5 (4)
- 5) ปัญหารูเจาะที่ไม่ตรงกัน รูปที่ 2.5 (5)
- 6) แรงกดแบกทาน (bearing)<sup>13</sup> บนส่วนหัวของสลักเกลียว ไม่ตั้งฉากกับผิวสัมผัส รูปที่ 2.5 (6)
- 7) เกิดโมเมนต์ที่ตัวสลักเกลียว ที่ขอบรูเจาะสัมผัสกับสลักเกลียว รูปที่ 2.5 (7)

ดังนั้นเพื่อลดปัญหาที่อาจจะเกิดขึ้นในการปฏิบัติจำเป็นต้องมีการวัดอย่างละเอียดเท่าที่เป็นไปได้ เพื่อให้เกิดความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุด

<sup>11</sup> แรงกด (clamping force)<sup>11</sup> คือแรงที่สลักเกลียวบีบอัดบนวัสดุ ซึ่งเกิดจากการขันเกลียว

<sup>12</sup> แรงขัน (torque) คือแรงที่ใช้หมุนสลักเกลียวให้ยึดกับวัสดุ

<sup>13</sup> แรงกดแบกทาน (bearing) คือ แรงกดอัดซึ่งเกิดขึ้นบนผิววัสดุที่สัมผัสกัน

Richard T. Barrett [10] เสนอแนวทางทั่วไปในการออกแบบและเลือกใช้สลักเกลียว (bolts) ซึ่งปกติ สลักเกลียว มักถูกออกแบบให้สามารถรับแรงดึงหรือแรงเฉือนหรือทั้ง 2 อย่างรวมกัน ถ้าลักษณะของแรงเป็นแรงดึง สลักเกลียวและแป้นเกลียว (nuts) จะต้องมีความแข็งแรงสูง เพื่อไม่ให้เกิดการคราก<sup>14</sup> (yield) เมื่อรับแรงบิด (torque) และแรงดึง หากลักษณะของแรงเป็นแรงเฉือน เกลียวจะต้องมีความแข็งแรงและความยาวมากพอ ความหนาของแผ่นวัสดุจะมีผลต่อการกระจายแรงกด (bearing) ซึ่งอาจทำให้สลักเกลียวขาดก่อน ดังนั้นควรพิจารณาการเลือกดังนี้

- 1) สลักเกลียวไม่ควรมีเกลียวในช่วงที่รับแรงกดและส่วนที่เป็นแหวน (washer)
- 2) การกำหนดระยะห่างระหว่างสลักเกลียวโดยปกติควรเป็น 4 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางสลักเกลียวแต่สามารถเพิ่มระยะห่างได้สำหรับการรับแรงดึง ระยะห่างขอควรเป็น 2 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางสลักเกลียว
- 3) ความยาวของสลักเกลียวมีผลต่อค่าการยืดตัว (elongation)<sup>15</sup> สลักเกลียวที่สั้นค่าการยืดตัวจะมีค่าน้อยซึ่งไม่เป็นผลดี สลักเกลียวควรมีค่าการยืดตัวประมาณ 10 เปอร์เซ็นต์ เพื่อให้เกิดแรงดึงตามแนวแกนเป็นแบบแผ่ (uniform) ช่วยป้องกันการวิบัติของสลักเกลียวจากแรงดึงที่เพิ่มขึ้น
- 4) แป้นเกลียวควรมีความแข็งแรงน้อยกว่าสลักเกลียว ซึ่งจะทำให้เกิดการวิบัติที่เกลียวของแป้นเกลียว
- 5) เคาะเตอร์ซิงค์ (countersink)<sup>16</sup> ควรให้ขนาดที่พอดีกัน
- 6) ไม่ควรใช้สลักเกลียวที่ใช้หน่วยนี้กับระบบเมตริกทดแทนกัน

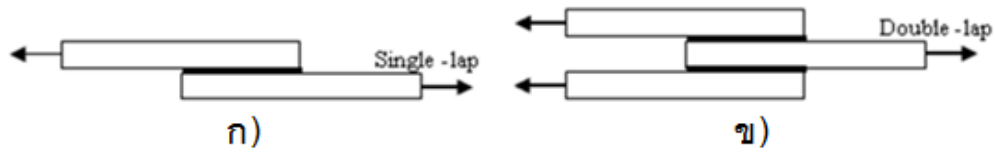
ดังนั้นอันดับแรกก่อนการเลือกใช้ควรทราบ ลักษณะ ขนาด ความยาว ระยะเกลียว (thread) การชุบ (coating) การทนการกัดกร่อน (corrosion) ความเหนียว (ductility) ความล้า (fatigue) กำลังวัสดุ (strength) ที่ต้องการเพื่อลดตัวเลือกให้เหลือน้อยลง

Khosro Fallahnezhad, Andrew Steele และ Reza H. Oskouei [11] ได้วิเคราะห์ลักษณะการวิบัติของการต่อทาบอะลูมิเนียม 2024-T3 แบบปลายต่อปลายเกยทับกัน (double-lap joint) ดังรูปที่ 2.6 โดยใช้สลักเกลียว กรณีใช้สลักเกลียวเดี่ยวและกรณีใช้สลักเกลียวคู่ ดังรูปที่ 2.7

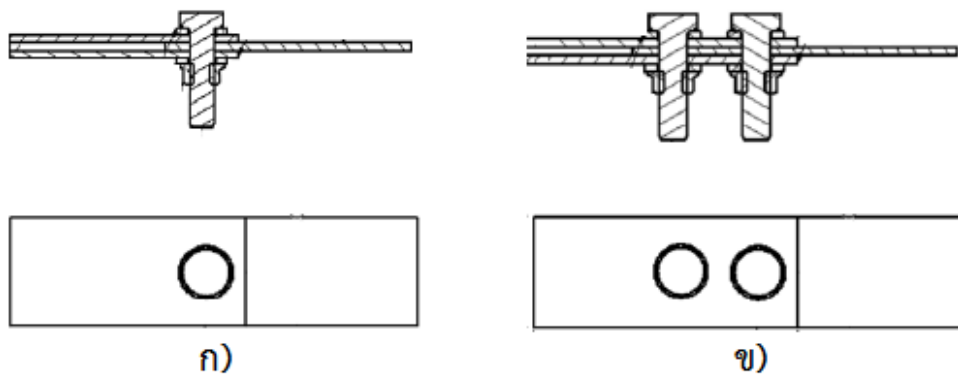
<sup>14</sup> การคราก (yield) คือ การเริ่มยืดตัวของวัสดุ

<sup>15</sup> elongation คือ ค่าการยืดตัว

<sup>16</sup> เคาะเตอร์ซิงค์ (countersink) คือรูเจาะที่คว้านปากรูให้ใหญ่ขึ้นเพื่อให้หัวของสลักเกลียวสามารถจมลงไปวัสดุ



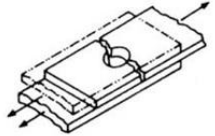
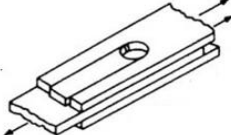
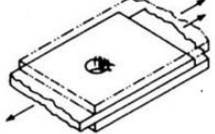
รูปที่ 2.6 แสดงการต่อทาบแบบ ก) แบบเกยทับ (single-lap)  
ข) แบบปลายต่อปลายเกยทับกัน (double lap joint) [11]



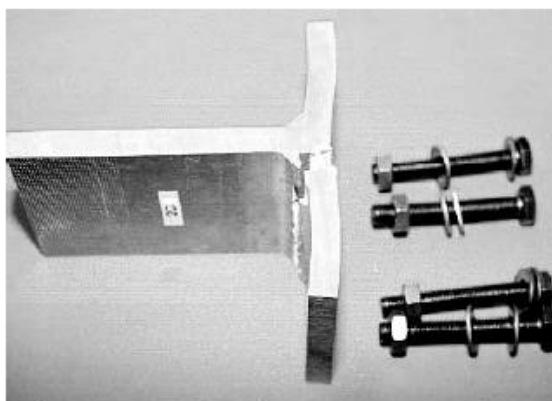
รูปที่ 2.7 การต่อสลักเกลียว ก) สลักเกลียวเดี่ยว ข) กรณีใช้สลักเกลียวคู่ [11]

การศึกษานี้เป็นการศึกษาพฤติกรรมการวิบัติของการต่อทาบอะลูมิเนียม 2024-T3 แบบปลายต่อปลายเกยทับกัน (double-lap) โดยใช้สลักเกลียวเดี่ยวและใช้สลักเกลียวคู่ ใช้โปรแกรมอาบาคัส (ABAQUS) สำหรับวิเคราะห์โครงสร้าง สร้างแบบจำลอง 3 มิติไฟไนต์เอลิเมนต์ ซึ่งผลที่ได้เชิงตัวเลขและค่าจากการทดสอบมีค่าใกล้เคียงกัน การต่อทาบโดยใช้สลักเกลียวคู่จะรับน้ำหนักบรรทุกได้มากกว่าการใช้สลักเกลียวเดี่ยว 40 - 49% และการเปลี่ยนแปลงระยะจากขอบ (edge distance) แทบจะไม่มีผลต่อพฤติกรรมจากแรงดึงเลย แต่การเพิ่มความกว้างของแผ่นวัสดุจาก 25.4 มม.ไปเป็น 30 มม. กำลังต้านทานเพิ่มขึ้น 28 % และจะเปลี่ยนลักษณะการวิบัติจากแรงดึง (net-tension) ไปเป็นการวิบัติจากแรงแบกทาน (bearing) ส่วนกรณีสลักเกลียวเดี่ยว การเพิ่มความกว้างของแผ่นต่อทาบไม่ช่วยให้การกำลังต้านทานแรงดึงเพิ่มขึ้น แต่การเพิ่มระยะจากขอบ (edge distance) จะเพิ่มกำลังต้านทานมากขึ้นและเปลี่ยนลักษณะการวิบัติจากแรงฉีก (shear-out) ไปเป็นการวิบัติจากแรงแบกทาน

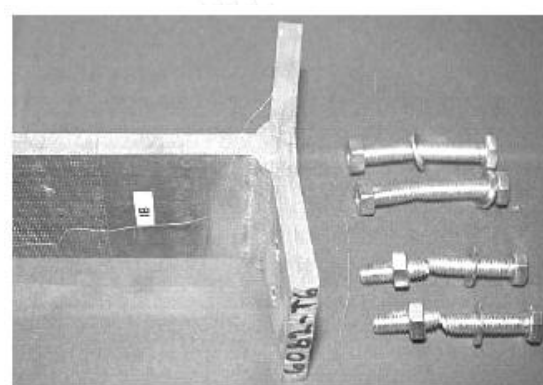
ตารางที่ 2.1 การวิบัติของการต่อทาบ [11]

ลักษณะการวิบัติ	
การวิบัติแรงดึง (net-tension failure)	
การวิบัติจากแรงเฉือน (shear-out failure)	
การวิบัติจากแรงแบกทาน (bearing failure)	

G. D. Matteis และ F. M. Mazzolani [12] ศึกษาพฤติกรรมของรอยต่อตัวที (T-stub) จากการทดสอบรอยต่อสลักเกลียวแบบต่าง ๆ 26 ตัวอย่างที่ใช้วัสดุสำหรับแผ่นปีก (flange) และแผ่นเอว (web) ต่างกัน มีขนาดความกว้าง ความหนาต่างกัน และใช้สลักเกลียวต่างชนิดกัน ทำการทดสอบโดยการดึงจนกระทั่งวิบัติ พบว่าตัวอย่างที่ใช้สลักเกลียวเหล็กเกรด 10.9 มีค่ากำลังประลัย (ultimate strength) สูงสุด และเกิดการวิบัติที่รอยเชื่อมของแผ่นปีกกับแผ่นเอวดังรูปที่ 2.8 สำหรับตัวอย่างที่ใช้สลักเกลียวอะลูมิเนียม AA7075 และสลักเกลียวเหล็กเกรด 4.8 ซึ่งมีกำลังต้านแรงดึงใกล้เคียงกัน เกิดวิบัติที่สลักเกลียวและตัวอย่างทดสอบมีการเสียรูปแบบพลาสติก (plastic deformation) ที่รอยต่อแผ่นปีกและแผ่นเอว ดังรูปที่ 2.9 การเปรียบเทียบระหว่างแรงกระทำแบบครั้งเดียว (monotonic test) กับแรงกระทำซ้ำๆ (cyclic test) แสดงให้เห็นว่าชนิดของน้ำหนักบรรทุกไม่มีผลต่อลักษณะของการวิบัติ ความเสียหายจากความล้าของแรงกระทำที่จำนวนรอบต่ำและแรงกระทำแบบครั้งเดียวถูกจำกัดจากการวิบัติที่สลักเกลียว ซึ่งเป็นการวิบัติที่ไม่มีความเหนียว (ductile failure)



รูปที่ 2.8 การวิบัติของรอยต่อตัวที (T-stub) แบบใช้สลักเกลียวเหล็กเกรด 10.9 [12]



รูปที่ 2.9 การวิบัติของรอยต่อตัวที (T-stub) แบบใช้สลักเกลียวอะลูมิเนียม AA7075 และสลักเกลียวเหล็กเกรด 4.8 [12]

## 2.2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

### 2.2.1 ข้อมูลสะพานเอ็ม 4

สะพานเอ็ม 4 เป็นสะพานทหารที่ทำจากอะลูมิเนียมอัลลอยส์สำหรับข้ามลำน้ำแคบ ๆ ช่วยให้นานพหุขนาดหนักข้ามได้อย่างรวดเร็ว สามารถประกอบโดยมีความยาวตั้งแต่ 4.57 เมตรถึง 13.72 เมตร กรณีที่ประกอบสร้างมีความยาวเกิน 13.72 เมตร ก็สามารถทำได้แต่ต้องวางต่อม่อเป็นระยะ การประกอบสร้างจะใช้ตงยาว ตงสั้น และตงปลายเรียว มาวางสลับกับไปมาจนได้ระยะตามต้องการ ดังรูปที่ 2.10 [13]



รูปที่ 2.10 สะพานเครื่องหนุน้ำมันเอ็ม 4 [13]

สะพานเครื่องหนุน้ำมันเอ็ม 4 สามารถประกอบสร้างได้ 7 แบบดังนี้ [13]

- 1) ระยะ 4.57 เมตร (15 ฟุต)
- 2) ระยะ 6.60 เมตร (21 ฟุต 8 นิ้ว)
- 3) ระยะ 7.11 เมตร (23 ฟุต 4 นิ้ว)
- 4) ระยะ 9.14 เมตร (30 ฟุต)
- 5) ระยะ 11.18 เมตร (36 ฟุต 8 นิ้ว)
- 6) ระยะ 11.68 เมตร (38 ฟุต 4 นิ้ว)
- 7) ระยะ 13.72 เมตร (45 ฟุต)

สะพานเอ็ม 4 สามารถประกอบสร้างเป็นสะพานเครื่องหนุนลอยได้ โดยการถ่ายน้ำหนักลงบนกาบเรือทุ่น สามารถประกอบได้ยาวถึง 47 เมตร ดังรูปที่ 2.11 นอกจากความสามารถในการประกอบเป็นสะพาน สะพานเอ็ม 4 ยังสามารถประกอบเป็นแพในการข้ามลำน้ำที่มีความกว้างมาก ดังรูปที่ 2.12 [13]



รูปที่ 2.11 สะพานเครื่องหนุนลอยเอ็ม 4 เรือทูนโลหะผสม [13]



รูปที่ 2.12 แพเอ็ม 4 [13]



ตารางที่ 2.2 ขีดความสามารถในการสร้างเป็นสะพานเครื่องหนุมนั้น สะพานเอ็ม 4 [13]

ความยาวช่วงสะพาน (เมตร)	ความยาวช่วงสะพาน (ฟุต)	ความกว้างจรจร (เมตร)	ชั้นการรับน้ำหนัก (ตัน)
4.57	15	3.9 (18 ตง)	125W / 100T
6.60	21 ฟุต 8 นิ้ว	3.9 (18 ตง)	125W / 100T
7.11	23 ฟุต 4 นิ้ว	3.9 (18 ตง)	85W / 65T
9.14	30	3.9 (18 ตง)	45W / 35T
11.18	36 ฟุต 8 นิ้ว	3.9 (18 ตง)	24W / 25T
11.68	38 ฟุต 4 นิ้ว	3.9 (18 ตง)	24W / 25T
13.72	45	3.9 (18 ตง)	24W / 25T

หมายเหตุ W = ยานยนต์ล้อยาง T = ยานยนต์ล้อสายพาน

ตารางที่ 2.3 ขีดความสามารถสะพานเครื่องหนุมนลอย [13]

ความยาว (เมตร)	ความกว้างจรจร (เมตร)	ชั้นการรับน้ำหนัก (ตัน)	หมายเหตุ
47	3.9 (18 ตง)	60T	ใช้เรือทุ่น 24 ลำ

ตารางที่ 2.4 ขีดความสามารถของแพเอ็ม 4 [13]

ความยาว (เมตร)	ชั้นการรับน้ำหนัก (ตัน)	หมายเหตุ
28.8	55W / 50T	ใช้เรือทุ่น 14 ลำ

### 2.2.2 ข้อมูลอะลูมิเนียมอัลลอยส์

จากข้อมูลของไทยและต่างประเทศ อะลูมิเนียมเป็นธาตุโลหะที่อาจถูกนำไปใช้แทนที่เหล็ก เนื่องจากมีคุณสมบัติที่มีลักษณะมันวาว ไม่เกิดสนิม และมีน้ำหนักเบากว่าเหล็กประมาณ 3 เท่า อะลูมิเนียมอัลลอยส์แบ่งเป็น 2 กลุ่ม คือ กลุ่มอะลูมิเนียมหล่อ (cast alloys) และกลุ่มอะลูมิเนียมที่ผ่านการขึ้นรูป (wrought alloys) [14] ซึ่งการศึกษานี้จะเน้นในกลุ่มอะลูมิเนียมที่ผ่านการขึ้นรูป

กลุ่มอะลูมิเนียมที่ผ่านการขึ้นรูป เป็นอะลูมิเนียมอัลลอยส์ที่มีความหลากหลายทั้งขนาด รูปร่าง และคุณสมบัติที่แตกต่างกันตามความต้องการของผู้นำไปใช้งาน โดยผ่านกระบวนการผลิตที่ได้มาตรฐานตามเกรดชนิดของอะลูมิเนียมแต่ละชนิด ซึ่งพบว่าอะลูมิเนียมที่ใช้สำหรับงานโครงสร้างมีอยู่หลายชนิด ได้แก่ เกรด 2xxx, 5xxx, 6xxx, 7xxx เป็นต้น ซึ่งแต่ละเกรดก็มีคุณสมบัติที่แตกต่างกัน เนื่องจากมีองค์ประกอบธาตุ ส่วนผสม และผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่แตกต่างกัน [14]

อะลูมิเนียม 2xxx เป็นอะลูมิเนียมอัลลอยด์ที่มีทองแดงเป็นธาตุผสมประมาณ 2.5 - 5.5 % โดยที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมมี 3 ชนิดคือ เกรด 2014, 2017 และ 2024 เป็นอะลูมิเนียมอัลลอยด์ที่มีกำลังรับแรงสูง มักนำไปผลิตเป็นหมุดย้ำ โครงสร้างเครื่องบิน และกระทะล้อรถถัง เป็นต้น [14]

อะลูมิเนียม 5xxx เป็นอะลูมิเนียมอัลลอยด์ที่มีแมกนีเซียมเป็นธาตุผสมหลัก มีความแข็งแรงสูงปานกลาง ทนต่อการกัดกร่อนภายใต้บรรยากาศทั่วไปได้ดีมาก และมีความสามารถในการเชื่อมได้ดี ใช้สำหรับทำผลิตภัณฑ์ตกแต่งอาคาร ท่อแก๊สและน้ำมัน ทำเรือดำน้ำและโครงสร้างที่ต้องผ่านการเชื่อม [14]

อะลูมิเนียม 6xxx เป็นอะลูมิเนียมอัลลอยด์ที่มีแมกนีเซียมและซิลิกอนเป็นธาตุผสมหลัก มีความแข็งแรงสูง และทนต่อการกัดกร่อนได้ดี ใช้สำหรับงานโครงสร้างทั่วไปและงานสถาปัตยกรรม [14]

อะลูมิเนียม 7xxx เป็นอะลูมิเนียมอัลลอยด์ที่มีสังกะสีเป็นธาตุผสมหลัก เป็นอะลูมิเนียมอัลลอยด์ที่มีความแข็งแรงสูงมาก มีกำลังใกล้เคียงเหล็กกล้าประสมกำลังสูง นิยมนำไปใช้ทำชิ้นส่วนเครื่องบินและชิ้นส่วนสะพานทหาร เป็นต้น [14]

ตารางที่ 2.5 คุณสมบัติของอะลูมิเนียม AL2024, AL5083, AL6061 และ AL7075

คุณสมบัติ	ชนิด / เกรด			
	AL2024	AL5083	AL6061	AL7075
กรรมวิธีทางความร้อน	T3	H112	T651	T651
องค์ประกอบ (%)	AL 90.7-94.7 Cu 3.8-4.9 Mg 1.2-1.8 Si <0.5 Mn 0.3-0.9 Fe <0.5 Zn <0.25 Cr <0.1 ธาตุอื่น <0.05	AL 92.4-95.6 Mg 4.0-4.9 Cu <0.1 Si <0.4 Mn 0.4-1.0 Fe <0.4 Zn <0.25 Cr <0.25 ธาตุอื่น <0.05	AL 95.8-98.6 Mg 0.8-1.2 Si 0.4-0.8 Cu 0.15-0.4 Mn <0.15 Fe <0.7 Zn <0.25 Cr <0.35 ธาตุอื่น <0.05	AL 87.1-91.4 Zn 5.1-6.1 Mg 2.1-2.9 Cu 1.2-2.0 Mn <0.3 Fe <0.5 Si <0.4 Cr <0.28 ธาตุอื่น <0.05
ถ.พ.	2.78	2.66	2.7	3.1
หน่วยแรงดึงวิบัติ (เมกะปาสคาล)	483	300	310	572

ตารางที่ 2.5 (ต่อ) คุณสมบัติของอะลูมิเนียม AL2024, AL5083, AL6061 และ AL7075

คุณสมบัติ	ชนิด / เกรด			
	AL2024	AL5083	AL6061	AL7075
หน่วยแรงดึงคราก (เมกกะปาสคาล)	345	190	276	503
หน่วยแรงเฉือน (เมกกะปาสคาล)	283	180	207	331
Fatigue Strength (เมกกะปาสคาล)	138	-	96.5	159
โมดูลัสฮีสติสติก (เมกกะปาสคาล)	73.1	70.3	68.9	71.7
ระยะยืดตัว (elongation) (%)	18	16	12-17	11
ราคาโดยประมาณ (บาท / กิโลกรัม)	700-800	350-380	350-380	380-400

ข้อมูลจาก : <http://www.matweb.com/>

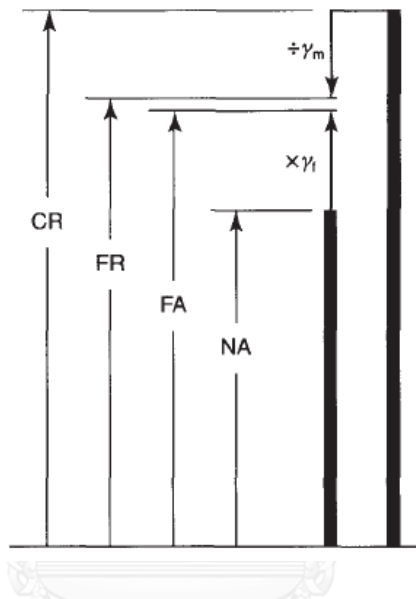
## 2.2.3 การออกแบบโครงสร้างอะลูมิเนียม

### 2.2.3.1 การออกแบบวิธีภาวะสุดขีด (limit state design)

การออกแบบวิธีภาวะสุดขีด เป็นวิธีที่นิยมใช้กันในหลายประเทศในแถบยุโรป ซึ่งใช้มาตรฐาน BS.8118 ในการออกแบบ โดยพิจารณาความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุก โดยการตรวจสอบภาวณ้ำหนักสุดขีด (ultimate limit state) เพื่อให้แน่ใจว่าโครงสร้างมีกำลังเพียงพอในการรับน้ำหนัก และการตรวจสอบภาวะสุดขีดบริการ (serviceability limit state) เพื่อให้ใช้งานได้ ในสภาพที่เหมาะสม โดยตรวจสอบค่าการโก่งตัว (deflection) ขององค์อาคารให้ไม่เกินค่าที่กำหนด

### 2.2.3.1.1 ภาวณ้ำหนักสุดขีด (ultimate limit state)

ภาวณ้ำหนักสุดขีด เป็นการตรวจสอบความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุก โดยเพิ่มค่าน้ำหนักบรรทุกที่กระทำโดยคูณด้วยส่วนปลอดภัย (load factor) และลดกำลังต้านทานขององค์อาคารโดยหารด้วยส่วนปลอดภัยแห่งเนื้อวัสดุ (material factor) ซึ่งแรงสูงสุดที่ใช้ในการคำนวณต้องมีค่ามากกว่าน้ำหนักออกแบบ ดังรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 หลักภาวณ้ำหนักสุดขีด (ultimate limit state) [14]

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALON

$$FR \geq FA \quad 2.1$$

$$FR = CR / \gamma_m \quad 2.2$$

$$FA = NA \times \gamma_f \quad 2.3$$

โดยที่

FR (factor resistance)	คือ แรงสูงสุดที่ใช้ในการคำนวณ
FA (factor loading)	คือ น้ำหนักออกแบบ
CR (calculated resistance)	คือ แรงประลัยของวัสดุในโครงสร้าง
NA (nominal loading)	คือ น้ำหนักมีจริงบนโครงสร้าง
$\gamma_m$ (material factor)	คือ ส่วนปลอดภัยแห่งเนื้อวัสดุ

$\gamma_f$  (load factor) คือ ส่วนปลอดภัย

#### 2.2.3.1.2 ภาวะสุดขีดบริการ (serviceability limit state)

การตรวจสอบภาวะสุดขีดบริการ ก็เพื่อให้แน่ใจว่าองค์อาคารที่วิเคราะห์มีค่าสติฟเนส (stiffness) เพียงพอ ซึ่งการเปลี่ยนแปลงรูปร่างเมื่อถูกแรงกระทำแบ่งเป็น 2 ช่วงคือ ช่วงอีลาสติกและช่วงพลาสติก สำหรับการตรวจสอบภาวะสุดขีดบริการ จะดูการเปลี่ยนแปลงรูปร่างในช่วงอีลาสติก โดยค่าการโก่งตัวที่คำนวณต้องมีค่าน้อยกว่าค่าการโก่งตัวที่ยอมให้ [14]

$$\Delta_E \leq \Delta_L \quad 2.4$$

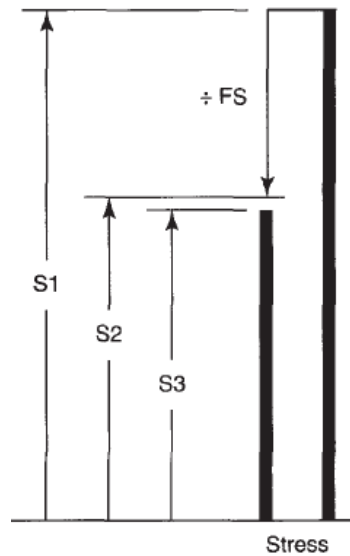
โดย  $\Delta_E$  คือ ค่าการโก่งตัวที่คำนวณ

$\Delta_L$  คือ ค่าการโก่งตัวที่ยอมให้

#### 2.2.3.2 การออกแบบโดยใช้ทฤษฎีอีลาสติก

การออกแบบโดยใช้ทฤษฎีอีลาสติกนั้นมีวิธีการและขั้นตอนดังนี้

- ก. หาหน่วยแรงสูงสุดที่อาจยอมให้เกิดขึ้นในโครงสร้าง (allowable stress:  $S_2$ ) โดยหารหน่วยแรงประลัย (ultimate stress:  $S_1$ ) ด้วยตัวคูณความปลอดภัย (factor of safety: FS) [15]
- ข. บรรทุกน้ำหนักตามข้อกำหนด (working load) บนโครงสร้างโดยคำนึงว่าหน่วยแรงและความเครียดที่เกิดขึ้นยังอยู่ในขอบเขตอีลาสติกอยู่ [15]
- ค. หาโมเมนต์และแรงต่างๆ ที่เกิดขึ้น ซึ่งเนื่องมาจากการบรรทุกน้ำหนัก [15]
- ง. ออกแบบชิ้นส่วนของโครงสร้างโดยมีหน่วยแรง (working stress:  $S_3$ ) ซึ่งเป็นผลเนื่องมาจากการบรรทุกน้ำหนัก ตามข้อ (ข) ไม่สูงไปกว่าหน่วยแรงที่อาจยอมให้เกิดขึ้นได้ (allowable stress:  $S_2$ ) ตามที่ให้อ้างอิงในข้อ (ก) [15]



รูปที่ 2.14 วิธีหน่วยแรงจำกัด (limiting stresses) [14]

S1 คือ หน่วยแรงประลัย (ultimate stress)

S2 คือ หน่วยแรงที่อาจยอมให้เกิดขึ้นได้ (allowable stress)

S3 คือ หน่วยแรงที่ทำการ (working stress)

### 2.2.3.3 การคำนวณหาค่าหน่วยแรงสำหรับออกแบบ

การกำหนดค่าหน่วยแรงสำหรับออกแบบของวัสดุและสลักเกลียว ใช้วิธีคำนวณดังในตารางที่ 2.6 และตารางที่ 2.7 ตามลำดับ เมื่อ  $f_u$  คือหน่วยแรงประลัยและ  $f_o$  คือหน่วยแรงที่คราก

ตารางที่ 2.6 การคำนวณหน่วยแรงของวัสดุ [14]

ชนิดของหน่วยแรง	$f_u \leq f_o$	$f_u > f_o$
หน่วยแรงตามแนวแกน	$p_a \approx 0.5 (f_o + f_u)$	$p_a \approx 0.5 (f_o + f_u)$
หน่วยแรงต้านทานโมเมนต์ของหน้าตัด	$p_o \approx f_o$	$p_o \approx 1.4f_o - 0.2f_u$
หน่วยแรงเฉือน	$p_v \approx 0.6 p_o$	
หน่วยแรงแบกทาน	$p_p \approx 1.1(f_o + f_u)$	

ตารางที่ 2.7 การคำนวณหน่วยแรงของสลักเกลียวเหล็ก [14]

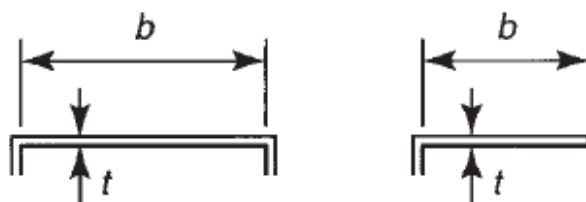
ชนิดหน่วยแรง	มาตรฐาน BS.8118	ค่าแนะนำ
หน่วยแรงเฉือน ( $p_v$ )	$0.595f_o$	$0.4f_u$
หน่วยแรงแบกทาน ( $p_p$ )	$2f_o$	
หน่วยแรงดึง ( $p_t$ )	$f_o$	$0.55f_u$

#### 2.2.3.4 ชิ้นส่วนแผ่นรับแรงอัด (plate element in compression)

สำหรับการออกแบบที่ต้องการความประหยัด ผู้ออกแบบจะใช้วัสดุที่บางซึ่งมักทำให้เกิดปัญหาการวิบัติเฉพาะที่ (local buckling) ในส่วนที่รับแรงอัด เพื่อป้องกันปัญหาดังกล่าว จึงจำเป็นต้องทราบลักษณะของหน้าตัดและกำหนดขนาดให้เหมาะสม

ชิ้นส่วนแผ่นรับแรงอัดแบ่งเป็น 2 แบบ

- 1) ชิ้นส่วนปลายยึด (stiffened elements)
- 2) ชิ้นส่วนปลายยื่น (unstiffened elements)



รูปที่ 2.15 แสดงลักษณะชิ้นส่วนปลายยึด (stiffened elements) และชิ้นส่วนปลายยื่น (unstiffened elements) [14]

$$\beta = b/t \quad 2.5$$

$$\epsilon = (250/p_o)^{1/2} \quad 2.6$$

โดยที่

$\beta$  คือ ตัวแปรความชะลูดของแผ่นชิ้นส่วน (slenderness parameter for plate element)

$b$  คือ ความกว้างจากขอบในถึงริมปลาย

- t คือ ความหนา  
 $\epsilon$  คือ ตัวคูณไม่มีมิติ (non-dimensionalized factor)  
 $p_o$  คือ หน่วยแรงต้านทานโมเมนต์ของหน้าตัด

สามารถจำแนกรูปตัดคานได้ดังนี้

- $\beta \leq \beta_f$  หน้าตัดอัดแน่น (compact section)  
 $\beta_f \leq \beta \leq \beta_s$  หน้าตัดไม่อัดแน่น (non-compact section)  
 $\beta > \beta_s$  หน้าตัดชิ้นส่วนชะลูด (slender element section)

ตารางที่ 2.8 การจำแนกประเภทชิ้นส่วนภายใต้แรงอัดแบบแผ่ (uniform compression) [14]

ชิ้นส่วนปลายยึด (stiffened elements)	ไม่มีการเชื่อม	มีการเชื่อม
$\beta_f$	18 $\epsilon$	15 $\epsilon$
$\beta_s$	22 $\epsilon$	18 $\epsilon$
ชิ้นส่วนปลายยื่น (unstiffened elements)	ไม่มีการเชื่อม	มีการเชื่อม
$\beta_f$	6 $\epsilon$	5 $\epsilon$
$\beta_s$	7 $\epsilon$	6 $\epsilon$

#### 2.2.3.5 การหาโมเมนต์ดัดของรูปตัดตงอะลูมิเนียม

กรณีรูปตัดออกแบบเป็นชนิดไม่อัดแน่น ค่าโมเมนต์ดัดสามารถหาค่าได้ดังนี้

$$M_c = (S \times p_o) + [(\beta_s - \beta) / (\beta_s - \beta_f)] \times (Z - S) \times p_o \quad 2.7$$

- โดยที่  $M_c$  คือโมเมนต์ดัดของรูปตัด  
 $S$  คือโมดูลัสหน้าตัด  
 $Z$  คือโมดูลัสพลาสติก  
 $p_o$  คือหน่วยแรงต้านทานโมเมนต์ของหน้าตัด



$\beta$  คือตัวแปรความชะลูด

### 2.2.3.6 การตรวจสอบการวิบัติของเอว

#### 2.2.3.6.1 การโก่งเดาะของเอวทางข้าง (sidesway web buckling)

การโก่งเดาะของเอวทางข้างเป็นการวิบัติของเอวเนื่องจากเอวมีความชะลูดมาก สามารถหาค่าได้จากสมการที่ 2.8

$$V_c = dtp_{v1} \quad 2.8$$

$$p_{v1} = [4.9E]/[(d/t)^2] \quad 2.9$$

โดยที่  $V_c$  คือกำลังต้านทานแรงเฉือนการโก่งเดาะ

$d$  คือความลึกของเอวที่อยู่ระหว่างปีก

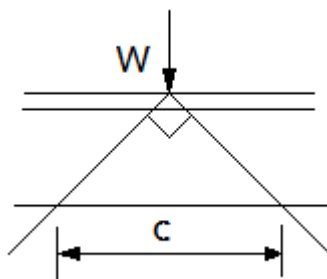
$p_{v1}$  คือหน่วยแรงที่ใช้ออกแบบ

$E$  คืออีลาสติคโมดูลัส

$t$  คือความหนาของเอว

#### 2.2.3.6.2 การครากเฉพาที่ของเอว (web local yielding)

การครากเฉพาที่ของเอว เป็นการวิบัติที่เอวจากแรงกระทำแบบจุด เนื่องจากแผ่นเอวมีความหนาไม่เพียงพอ สามารถหาค่าได้จากสมการที่ 2.10



รูปที่ 2.16 การครากเฉพาที่ของเอว

$$W_c = ct_w p_a \quad 2.10$$

โดยที่	$W_c$	คือกำลังต้านทานแรงกระทำแบบจุด
	$c$	คือความกว้างของพื้นที่จุดที่พิจารณา ดังรูปที่ 2.16
	$t_w$	คือความหนาของเอวจุดที่พิจารณา
	$p_a$	คือหน่วยแรงต้านทานตามแนวแกน

### 2.2.3.6.3 การโก่งของเอว (web crippling)

การโก่งของเอว เป็นการโก่งเดาะของเอวเนื่องจากความหนาไม่เพียงพอซึ่งกำลังต้านทาน ( $W_c$ ) สามารถหาค่าได้ดังสมการที่ 2.11

$$W_c = c_0 t p_b \quad 2.11$$

$$p_b = [p_1 ((1 - (1 - \alpha^2)^{1/2}) / \alpha x)] \quad 2.12$$

$$p_1 = (A_e / A) p_0 \quad 2.13$$

$$\alpha = [2x] / [x^2 + cx + 1 - c(\lambda_1 / \lambda_0)] \quad 2.14$$

$$x = \lambda / \lambda_0 \quad 2.15$$

$$\lambda_0 = p(E/p_1)^{1/2} \quad 2.16$$

$$\gamma = \phi(d/t) \quad 2.17$$

โดยที่	$W_c$	คือกำลังต้านทานแรงกระทำแบบจุด
	$c_0$	คือค่า $c$ ที่แกนสะเทิน
	$t$	คือความหนา
	$p_b$	คือหน่วยแรงต้านทานของชิ้นส่วนทั้งหมด
	$p_0$	คือหน่วยแรงต้านทานโมเมนต์ของหน้าตัด
	$A_e$	คือพื้นที่ประสิทธิผล (effective section area)
	$A$	คือพื้นที่ทั้งหมดของหน้าตัด (gross section area)
	$c$	คือค่าอิมเพอร์เฟกชันแฟคเตอร์ (Imperfection factor)
	$\lambda_1 / \lambda_0$	คือค่าพลาตูเรโซ (plateau ratio)

- E คืออีลาสติคโมดูลัส
- $\lambda$  คือตัวแปรความขะลุด (ในกรณีของคานจะใช้  $g$ )
- $\gamma$  คือตัวแปรความขะลุดกรณีตรวจสอบเอว
- $\phi$  คือค่าสัมประสิทธิ์ตัวแปรความขะลุดกรณีตรวจสอบเอว มีค่า 2.5-3.5
- d คือความลึกของเอวที่อยู่ระหว่างปีก

ตารางที่ 2.9 ค่าตัวแปรจากกราฟการวิบัติกรณีต่างๆ

ลักษณะการวิบัติ		พลาตูโรโซ $\lambda_1/\lambda_0$	อิมเพอเฟคชั่นแฟคเตอร์ c
การโก่งเดาะด้านข้างจากการบิด	LT	0.6	0.1
การโก่งเดาะของเสา	C1	0.2	0.2
	C2	0.2	0.45
	C3	0.2	0.80
การโก่งเดาะเนื่องจากการบิด	T1	0.4	0.35
	T2	0.6	0.20

- เมื่อ C1 คือการโก่งเดาะของเสากรณีหน้าตัดสมมาตรที่ไม่มีการเชื่อม
- C2 คือการโก่งเดาะของเสากรณีหน้าตัดสมมาตรที่มีการเชื่อม  
และกรณีหน้าตัดไม่สมมาตรที่ไม่มีการเชื่อม
- C3 คือการโก่งเดาะของเสากรณีหน้าตัดไม่สมมาตรที่มีการเชื่อม

### 2.2.3.7 แรงเฉือนแนวนอน

การหาค่าแรงเฉือนในแนวนอนต่อหน่วยค้ำวณหาได้ตามสมการที่ 2.18

$$q = VQ/I \quad 2.18$$

- โดยที่ q คือแรงเฉือนในแนวนอนหน่วย
- V คือแรงเฉือนในแนวตั้งฉาก
- Q คือโมเมนต์ลำดับที่หนึ่งของพื้นที่
- I โมเมนต์อินเนอร์เซีย

### บทที่ 3 ระเบียบวิธีวิจัย

#### 3.1 การศึกษาข้อมูล

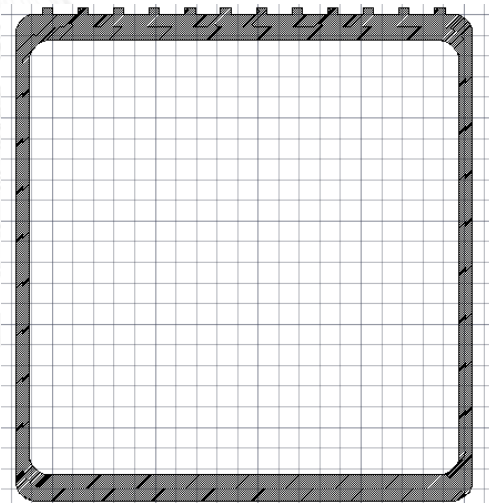
ในการศึกษาข้อมูลจะใช้ข้อมูลจากเว็บไซต์และจากโรงเรียนทหารช่าง กรมการทหารช่าง กองทัพบก เพื่อนำแบบสะพานเอ็ม 4 มาสร้างเป็นตัวอย่างเพื่อทำการทดสอบ และตรวจสอบวัสดุที่ใช้ทำตงสะพานเอ็ม 4 โดยนำเศษชิ้นส่วนของตงที่ชำรุด ไปวิเคราะห์หาองค์ประกอบธาตุ

#### 3.2 การเก็บตัวอย่างและการตรวจสอบวัสดุที่ใช้ทำสะพานเอ็ม 4

งานวิจัยนี้ได้นำตัวอย่างตงสะพานเอ็ม 4 ที่ชำรุดมาตัดตามขวางเพื่อดูลักษณะรูปหน้าตัด ดังรูปที่ 3.1 และนำเศษชิ้นส่วนตงที่ชำรุด ดังรูปที่ 3.2 ไปตรวจสอบหาองค์ประกอบธาตุ ที่สถาบันเทคโนโลยีนิวเคลียร์แห่งชาติ (องค์การมหาชน) อำเภอบางกรวย จังหวัดนครนายก



ก)



ข)

รูปที่ 3.1 ก) รูปหน้าตัดตงสะพานเอ็ม 4 ที่ชำรุด ข) ภาพจำลองรูปหน้าตัดตงสะพานเอ็ม 4



รูปที่ 3.2 เศษชิ้นส่วนของตงสะพานที่ชำรุด

### 3.3 การทดสอบวัสดุอะลูมิเนียม

เพื่อต้องการทราบความสามารถในการขึ้นรูปอะลูมิเนียมแต่ละชนิด ด้วยวิธีการที่แตกต่างกัน ได้แก่ การพับขึ้นรูป การเชื่อมด้วยไฟฟ้า

#### 3.3.1 การพับขึ้นรูปด้วยเครื่องพับ

รูปที่ 3.2 คือเครื่องพับโลหะขนาดใหญ่ ซึ่งจะใช้ในการทดสอบการพับขึ้นรูปของอะลูมิเนียม AL5083-H112, AL6061-T651 และ AL7075-T6 โดยใช้วัสดุที่มีความหนา 6.35 มม. ให้มีค่ามุมพับ 90 องศา และรัศมีความโค้ง (วัดจากขอบด้านในของแผ่นวัสดุ) 10 มม.

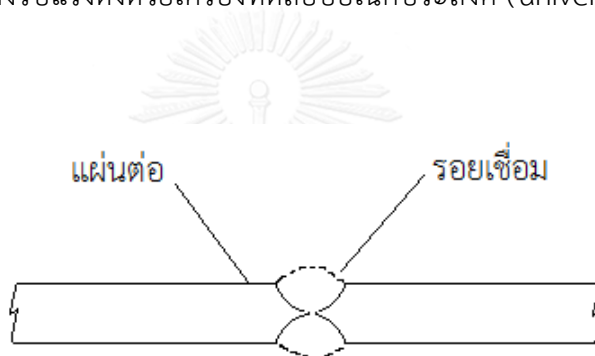


รูปที่ 3.3 เครื่องพับโลหะ

### 3.3.2 การเชื่อมด้วยไฟฟ้า

การทดสอบกำลังวัสดุของรอยเชื่อมจากการเชื่อมด้วยไฟฟ้าด้วยลวดเชื่อม 2 ชนิดที่ต่างกัน คือ ER4043a และ ER5356 เพื่อต้องการเปรียบเทียบค่ากำลังวัสดุทดสอบกับค่าที่ระบุ และใช้พิจารณาเลือกใช้ลวดเชื่อมต่อไป

การทดสอบกำลังรับแรงของรอยเชื่อม จะใช้อะลูมิเนียม AL6061-T651 ความหนา 6.35 มม. ขนาดกว้าง 100 มม. ยาว 200 มม. เชื่อมแบบต่อชน โดยบากร่องเป็นรูปตัวยู ดังรูปที่ 3.3 เมื่อเชื่อมชิ้นงานเรียบร้อยแล้ว ให้ตัดชิ้นงานออกเป็นชิ้น ขนาดความกว้าง 20 มม. ชัดแต่งผิวให้เรียบ แล้วนำไปทดสอบกำลังรับแรงดึงด้วยเครื่องทดสอบอเนกประสงค์ (universal testing machine: UTM) ดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 การเชื่อมแบบตัวยูสองหน้า



รูปที่ 3.5 เครื่องทดสอบอเนกประสงค์ (UTM)

### 3.3.3 การทดสอบสลักเกลียว

การหาค่ากำลังรับแรงดึงและกำลังรับแรงเฉือนของสลักเกลียวเหล็กชุบดำ เกรด 12.9 ขนาด M5 ทำโดยสุ่มตัวอย่างและทดสอบกำลังรับแรงดึงและกำลังรับแรงเฉือนด้วยเครื่องทดสอบอเนกประสงค์ UTM ดังรูปที่ 3.5 และ 3.6 ตามลำดับ



รูปที่ 3.6 การทดสอบกำลังรับแรงดึง



รูปที่ 3.7 การทดสอบกำลังรับแรงเฉือน

### 3.4 การวิเคราะห์โครงสร้างและการออกแบบ

เนื่องจากสะพานทหารเอ็ม 4 สามารถรับน้ำหนักบรรทุกทุกแบบยานยนต์ล้อยางและยานยนต์ล้อสายพาน ในกรณียานยนต์ล้อยางที่มีความยาว 16.3 ม. ดังรูปที่ 3.7 มีความยาวของรถเกินกว่าช่วงของสะพานเครื่องหนุนมัน ซึ่งแบบที่ 7 มีความยาวมากที่สุด 13.7 ม. ดังนั้นจึงทำการวิเคราะห์เฉพาะกรณียานยนต์ล้อสายพาน



รูปที่ 3.8 รูปยานยนต์ล้อยางที่ใช้สำหรับเคลื่อนย้ายรถถัง

การวิเคราะห์โครงสร้างโดยใช้โปรแกรม ZAP2000 วิเคราะห์โครงสร้างหาค่าโมเมนต์ดัด แรงเฉือน และการโก่งตัวสูงสุด ที่เกิดขึ้นจากการวางน้ำหนักบรรทุกที่ทำให้ได้ค่าสูงสุดในทุกแบบของสะพานและการวิเคราะห์หาแรงกระทำสำหรับการออกแบบ

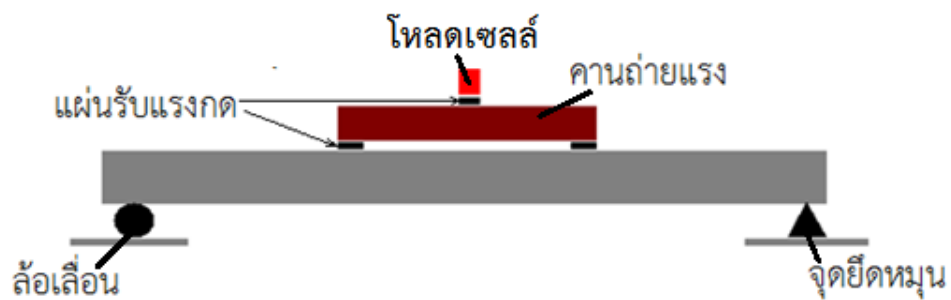
### 3.5 การขึ้นรูปตัวอย่างทดสอบ

เมื่อออกแบบเรียบร้อยแล้วจะทำการขึ้นรูปตัวอย่างตามแบบ เนื่องจากวัสดุอะลูมิเนียมอัลลอยส์ที่จะนำมาขึ้นรูปตัวอย่างมีลักษณะเป็นแผ่นมีความยาวจำกัดมีความกว้าง 1.20 ม. และความยาว 2.40 ม. โดยร้านที่จำหน่ายจะตัดแผ่นอะลูมิเนียมตามด้านกว้าง ทำให้แผ่นอะลูมิเนียมที่จะนำมาใช้มีความยาวมากที่สุด 1.20 ม. จึงจำเป็นต้องต่อแผ่นเพื่อให้ได้ความยาวตามต้องการ

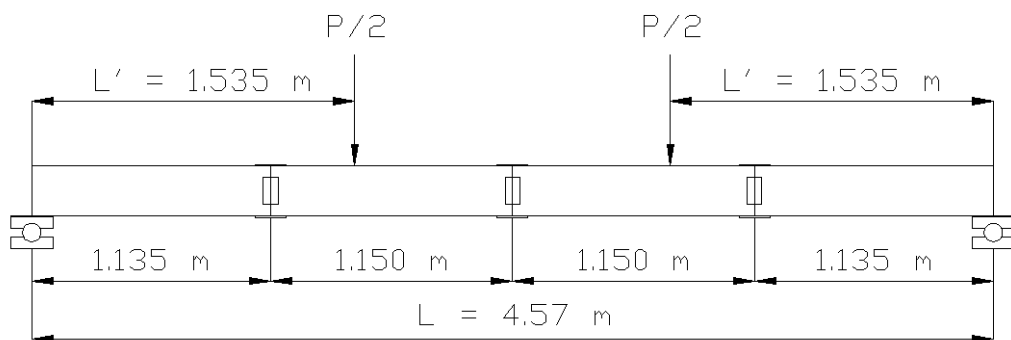


### 3.6 การติดตั้งตัวอย่างและเครื่องมือทดสอบ

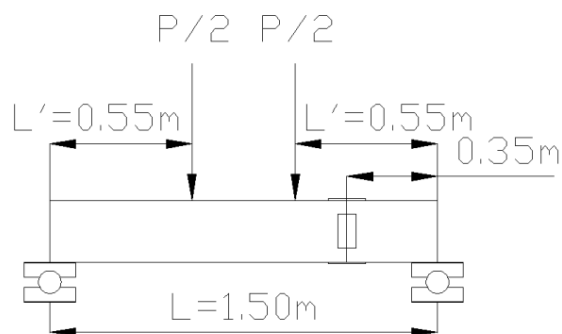
ทำการติดตั้งคานและอุปกรณ์ดังรูปที่ 3.8 โดยมีระยะ ตำแหน่งของน้ำหนักบรรทุก ดังรูปที่ 3.9 และรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.9 การติดตั้งจุดรองรับ, คานถ่ายแรง, โหลดเซลล์ และแผ่นรับแรงกด



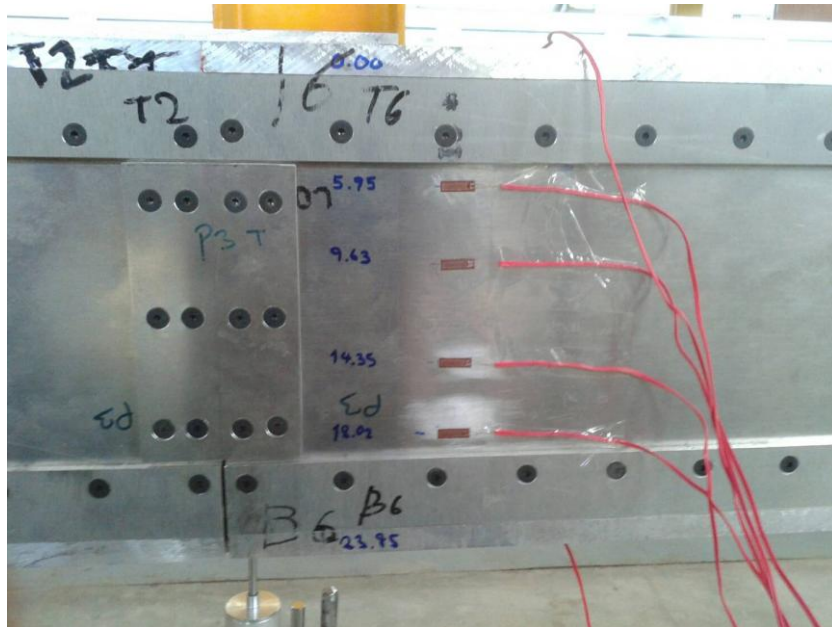
รูปที่ 3.10 แสดงระยะ ตำแหน่ง ของน้ำหนักบรรทุก สำหรับการทดสอบโมเมนต์ดัด



รูปที่ 3.11 แสดงระยะ ตำแหน่ง ของน้ำหนักบรรทุก สำหรับการทดสอบแรงเฉือน

ติดอุปกรณ์วัดค่าความเครียดหรือสเตรนเกจ (strain gauge) เพื่อวัดค่าความเครียดของวัสดุที่แผ่นปีกและแผ่นเอว บริเวณกึ่งกลางคาน ดังรูปที่ 3.11 ติดตั้งโหลดเซลล์ขนาด 300 กิโลนิวตัน และ

ติดตั้งแอลวีดีทีไว้บนคานถ่ายแรงเพื่อวัดค่าน้ำหนักบรรทุกทุกและค่าการโก่งตัว ดังรูปที่ 3.12 บันทึกค่าและแปลผลด้วยเครื่อง (data logger) ดังรูปที่ 3.13



รูปที่ 3.12 การติดอุปกรณ์วัดความเครียดหรือสเตรนเกจ (strain gauge)



รูปที่ 3.13 การติดโหลดเซลล์และแอลวีดีที



รูปที่ 3.14 อุปกรณ์บันทึกค่าและแปลผลข้อมูล (data logger) ยี่ห้อ Kyowa รุ่น EDX-400A-4H

**บทที่ 4**  
**ผลการทดสอบ**

**4.1 ผลการตรวจสอบองค์ประกอบธาตุของชิ้นส่วนตงสะพานทหารเอ็ม 4**

ตารางที่ 4.1 ตารางเปรียบเทียบองค์ประกอบธาตุของชิ้นส่วนตงสะพานทหารเอ็ม 4 และ อะลูมิเนียม 2024-T3

องค์ประกอบธาตุ	ชิ้นส่วนตงสะพานทหารเอ็ม 4 <sup>1</sup>	อะลูมิเนียม 2024-T3 <sup>2</sup>
อะลูมิเนียม	92.16 %	90.7-94.7 %
ทองแดง	4.45 %	3.8-4.9 %
แมกนีเซียม	1.78 %	1.2-1.8 %
แมงกานีส	0.58 %	0.3-0.9 %
ซิลิกอน	0.76 %	น้อยกว่า 0.05 %
เหล็ก	0.31 %	น้อยกว่า 0.5 %
สังกะสี	0.04 %	น้อยกว่า 0.25 %
โครเมียม	0.03 %	น้อยกว่า 0.1 %
ธาตุอื่นๆ ได้แก่ แบริียม โปรแตสเซียม แกลเลียม	0.21%	น้อยกว่า 0.05%

จากข้อมูลองค์ประกอบธาตุของชิ้นส่วนตงสะพานทหารเอ็ม 4 เมื่อเปรียบเทียบกับข้อมูล องค์ประกอบธาตุของอะลูมิเนียม 2024-T3 พบว่ามีธาตุอะลูมิเนียม 92.16 % มีค่าอยู่ระหว่าง 90.7-94.7 % ทองแดง 4.45 % มีค่าอยู่ระหว่าง 3.8-4.9 % แมกนีเซียม 1.78 % มีค่าอยู่ระหว่าง 1.2-1.8 % แมงกานีส 0.58 % มีค่าอยู่ระหว่าง 0.3-0.9 % ซิลิกอน 0.76 % มีค่ามากกว่า 0.05 % เหล็ก 0.31 % มีค่าน้อยกว่า 0.5 % สังกะสี 0.04 % มีค่าน้อยกว่า 0.25 % โครเมียม 0.03 %

<sup>1</sup> รูปที่ภาคผนวก ก 1

<sup>2</sup> ที่มา: <http://asm.matweb.com/search/SpecificMaterial.asp?bassnum=MA2024t3>

มีค่าน้อยกว่า 0.1 % ธาตุแบเรียม โพรแตสเซียม และแคลเซียม จัดเป็นธาตุอื่นๆ รวมกัน 0.21 %  
มีค่ามากกว่า 0.05 %

#### 4.2 ผลการทดสอบการพับแผ่นอะลูมิเนียมด้วยเครื่องพับแผ่นโลหะ

ตารางที่ 4.2 ผลการทดสอบการพับด้วยเครื่องพับโลหะ

ชนิดของแผ่นวัสดุทดสอบ	ผลการทดสอบ
อะลูมิเนียม 5083 - H112 ทหนา 6.35 มม.	พับได้
อะลูมิเนียม 6061-T651 ทหนา 6.35 มม.	มีรอยแตกร้าวตลอดแนวพับ
อะลูมิเนียม 7075-T6 ทหนา 6.35 มม.	แตกหัก

ผลทดสอบแผ่นอะลูมิเนียม 5083-H112 สามารถพับได้โดยไม่มีรอยแตก ดังรูปที่ 4.1 การพับ  
อะลูมิเนียม 6061-T651 เกิดรอยแตกยาวตลอดแนวพับที่ส่วนโค้งด้านนอก ดังรูปที่ 4.2 ส่วนการพับ  
อะลูมิเนียม 7075-T6 ไม่สามารถพับได้เกิดการแตกหักขณะพับ ดังรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.1 ผลการพับอะลูมิเนียม 5083-H112 ทหนา 6.35 มม. มุมพับ 90 องศา รัศมีมุมพับ 10 มม.



รูปที่ 4.2 ผลการพับอะลูมิเนียม 6061-T651 หนา 6.35 มม. มุมพับ 90 องศา รัศมีมุมพับ 10 มม.



รูปที่ 4.3 ผลการพับอะลูมิเนียม 7075-T651 หนา 6.35 มม. มุมพับ 90 องศา รัศมีมุมพับ 10 มม.

### 4.3 ผลการทดสอบกำลังของรอยเชื่อมอะลูมิเนียม

ตารางที่ 4.3 ผลทดสอบแรงดึงวิบัติของอะลูมิเนียม 6061 - T651 เชื่อมด้วยลวดเชื่อม ER4043

หมายเลขตัวอย่าง ทดสอบ	แรงดึง (กิโลนิวตัน)	พื้นที่หน้าตัด (ตร.มม.)	หน่วยแรงเฉือนวิบัติ (เมกกะปาสคาล)
1	17.0	134.0	127.2
2	15.0	131.3	114.5
3	12.7	150.5	84.2
เฉลี่ย			108.6

ตารางที่ 4.4 ผลทดสอบแรงดึงวิบัติของอะลูมิเนียม 6061 - T651 เชื่อมด้วยลวดเชื่อม ER5356

หมายเลขตัวอย่าง ทดสอบ	แรงดึง (กิโลนิวตัน)	พื้นที่หน้าตัด (ตร.มม.)	หน่วยแรงเฉือนวิบัติ (เมกกะปาสคาล)
4	20.3	131.9	154.1
5	20.2	132.0	153.3
6	21.3	128.0	166.6
เฉลี่ย			158.0

ผลทดสอบกำลังรับแรงดึง อะลูมิเนียม 6061-T651 ที่เชื่อมด้วยลวดเชื่อม ER4043a มีกำลังต้านทานแรงดึงแตกต่างกันโดยเฉพาะ ตัวอย่างที่ 3 มีค่าน้อยที่สุด 84.2 เมกกะปาสคาล ซึ่งเกิดจากความไม่สมบูรณ์ของรอยเชื่อมเนื่องจากหลายปัจจัย อาจเกิดการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันขณะเชื่อมเนื่องจากก๊าซอาร์กอนที่ไม่บริสุทธิ์ 100% คราบออกไซด์ที่เกิดขจัดออกไม่หมดบนผิวชิ้นงาน และความสามารถและประสิทธิภาพของช่างเชื่อม โดยมีค่ากำลังแรงดึงวิบัติเฉลี่ย 108.6 เมกกะปาสคาล เมื่อเปรียบเทียบกับหน่วยแรงที่ระบุของลวดเชื่อม ER4043a ซึ่งมีค่า 200 เมกกะปาสคาล พบว่ามีกำลังรับแรงดึงเพียง 54.3% ส่วนตัวอย่างทดสอบที่เชื่อมด้วยลวดเชื่อม ER5356 มีค่ากำลังแรงดึงวิบัติเฉลี่ย 158.0 เมกกะปาสคาล เมื่อเปรียบเทียบกับหน่วยแรงที่ระบุของลวดเชื่อม ER5356 ซึ่งมีค่า 268 เมกกะปาสคาล พบว่ามีกำลังรับแรงดึงเพียง 59.0% และตัวอย่างทดสอบทั้งหมดเกิดการวิบัติที่บริเวณกึ่งกลางรอยเชื่อมดังรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 ผลทดสอบการดึงอะลูมิเนียม 6061-T651 ที่เชื่อมด้วยลวดเชื่อม ER4043a หมายเลข 1-3 และเชื่อมด้วยลวดเชื่อม ER 5356 หมายเลข 4-6

#### 4.4 ผลทดสอบกำลังรับแรงดึงของสลักเกลียวเหล็กชุบดำ เกรด 12.9 ขนาด M5

ตารางที่ 4.5 ผลทดสอบกำลังรับแรงดึงของสลักเกลียวเหล็กชุบดำ เกรด 12.9 ขนาด M5

หมายเลขตัวอย่างทดสอบ	แรงดึง (กิโลนิวตัน)	พื้นที่หน้าตัด (ตร.มม.)	หน่วยแรงเฉือนวิบัติ (เมกกะปาสคาล)
1	17.6	14.2	1239.5
2	17.8	14.2	1252.3
3	17.9	14.2	1258.8
เฉลี่ย			1250.2

ผลการทดสอบสลักเกลียวเหล็กชุบดำ เกรด 12.9 ขนาด M5 ขาดออกจากกันดังรูปที่ 4.5 ด้วยหน่วยแรงดึงวิบัติเฉลี่ย 1250.2 เมกกะปาสคาล





รูปที่ 4.5 ผลการทดสอบค่าหน่วยแรงดึงวิบัติของสลักเกลียวเหล็กชุบดำ เกรด 12.9 ขนาด M5

#### 4.5 ผลทดสอบกำลังรับแรงเฉือนของสลักเกลียวเหล็กชุบดำ เกรด 12.9 ขนาด M5

ตารางที่ 4.6 ผลทดสอบกำลังรับแรงเฉือนของสลักเกลียวเหล็กชุบดำ เกรด 12.9 ขนาด M5

หมายเลขตัวอย่าง ทดสอบ	แรงดึง (กิโลนิวตัน)	พื้นที่หน้าตัด (ตร.มม.)	หน่วยแรงเฉือนวิบัติ (เมกะปาสคาล)
1	16.0	28.4	563
2	16.2	28.4	570
3	16.5	28.4	581
เฉลี่ย			571

ผลการดึงแผ่นตัวอย่างทดสอบ พบว่าตัวอย่างขาดออกจากกันโดยเกิดการวิบัติที่สลักเกลียวเหล็กชุบดำ เกรด 12.9 ขนาด M5 ในลักษณะแรงเฉือนคู่ ดังรูปที่ 4.6 ด้วยหน่วยแรงเฉือนวิบัติเฉลี่ย 571 เมกะปาสคาล



รูปที่ 4.6 ผลทดสอบกำลังรับแรงเฉือน สลักเกลียวเหล็ก ชุบดำ เกรด 12.9 ขนาด M5

#### 4.6 ผลทดสอบกำลังรับแรงดึงของชิ้นส่วนตงสะพานทหารเอ็ม 4 และอะลูมิเนียม 7075-T651

ตารางที่ 4.7 ผลทดสอบกำลังรับแรงดึงของชิ้นส่วนตงสะพานทหารเอ็ม 4

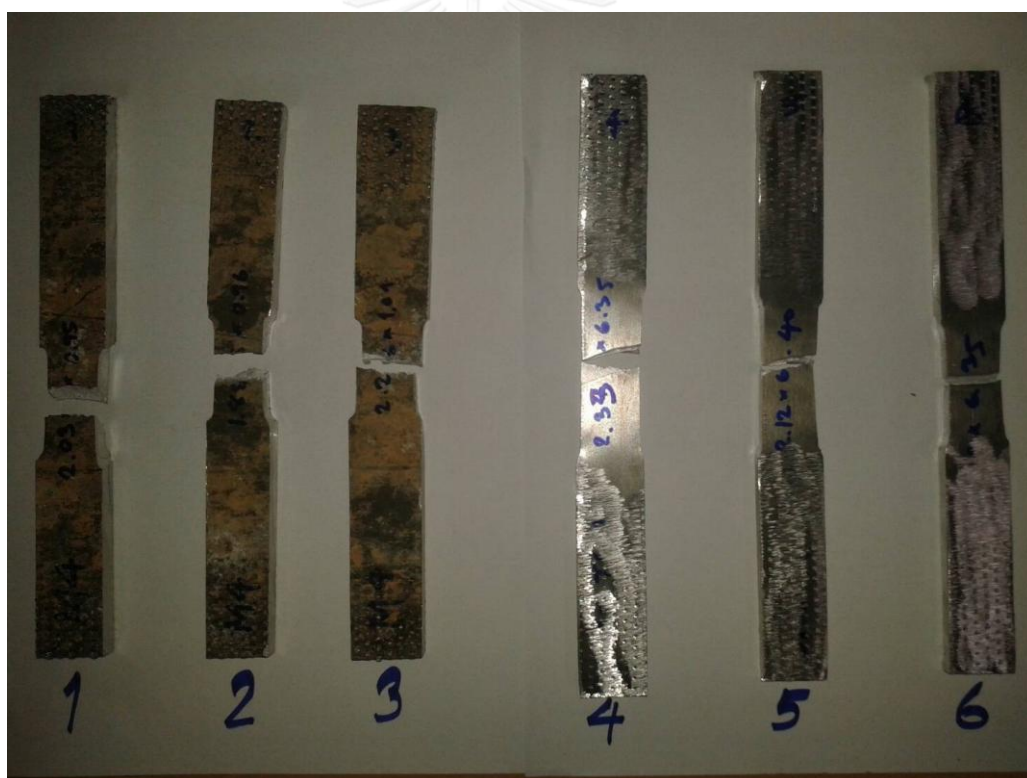
หมายเลขตัวอย่าง ทดสอบ	แรงดึง (กิโลนิวตัน)	พื้นที่หน้าตัด (ตร.มม.)	หน่วยแรงเฉือนวิบัติ (เมกกะปาสคาล)
1	99.8	222.9	447.7
2	84.3	179.3	470.1
3	103.8	226.3	458.6
เฉลี่ย			458.8

ผลทดสอบกำลังรับแรงดึงของชิ้นส่วนตงสะพานทหารเอ็ม 4 ตัวอย่างหมายเลข 1-3 ขาดออกจากกันดังรูปที่ 4.7 มีค่าหน่วยแรงดึงวิบัติเฉลี่ย 459 เมกกะปาสคาล

ตารางที่ 4.8 ผลทดสอบกำลังรับแรงดึงของอะลูมิเนียม 7075-T651

หมายเลขตัวอย่าง ทดสอบ	แรงดึง (กิโลนิวตัน)	พื้นที่หน้าตัด (ตร.มม.)	หน่วยแรงเฉือนวิบัติ (เมกะปาสคาล)
4	84.0	148.0	567.5
5	76.1	135.8	560.5
6	75.7	134.6	562.2
เฉลี่ย			563.4

ผลทดสอบกำลังรับแรงดึงของอะลูมิเนียม 7075-T651 ตัวอย่างหมายเลข 4-6 ขาดออกจากกัน ดังรูปที่ 4.7 มีค่าหน่วยแรงดึงวิบัติเฉลี่ย 563.4 เมกะปาสคาล



รูปที่ 4.7 ผลทดสอบกำลังรับแรงดึง หมายเลข 1-3 ชิ้นส่วนตงสะพานทหารเอ็ม 4, หมายเลข 4-6 อะลูมิเนียม 7075-T651

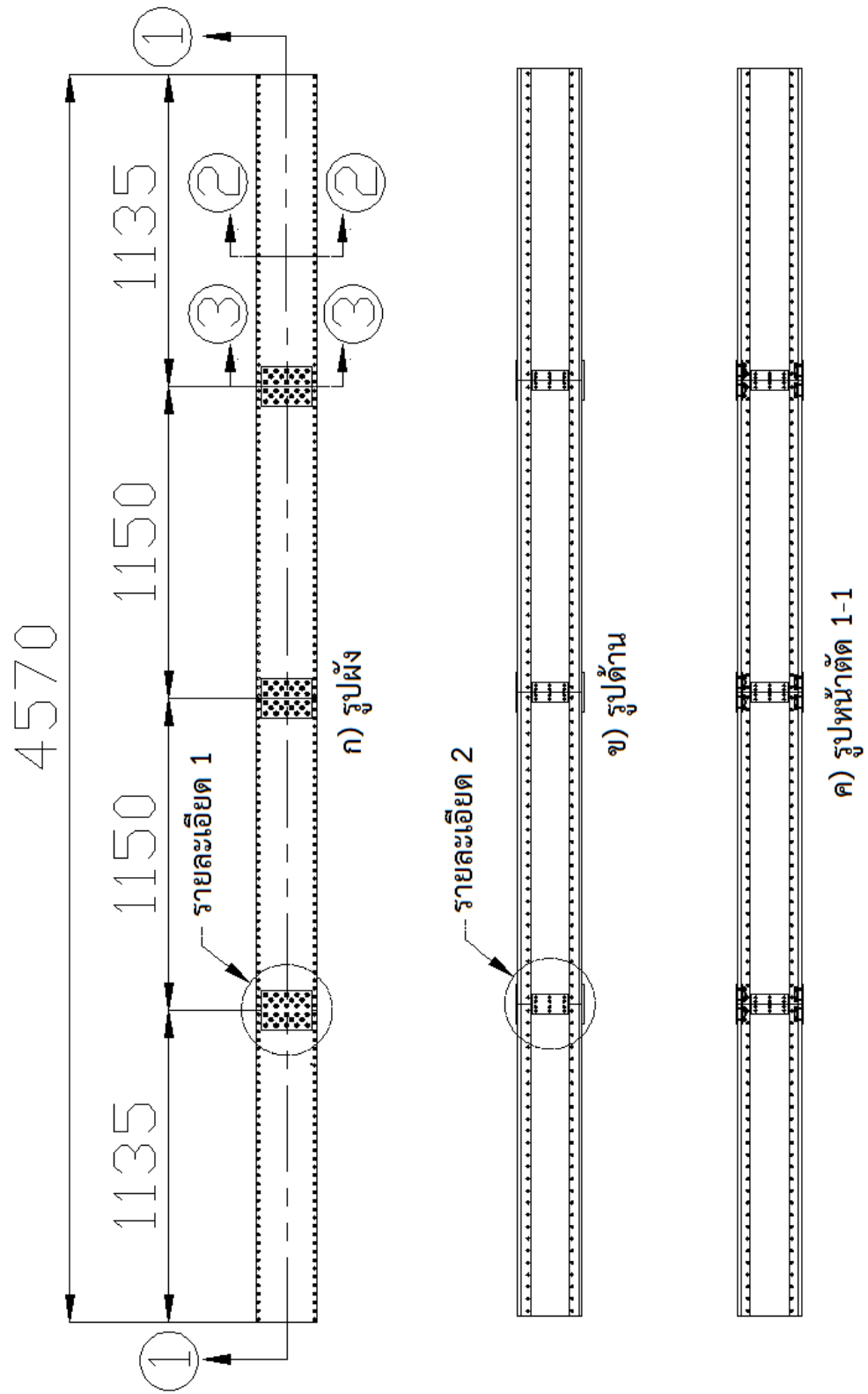
#### 4.7 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างด้วยโปรแกรม SAP2000 [16]

ตารางที่ 4.9 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างสะพานทหารเอ็ม 4 โดยรูปตัดที่ออกแบบและใช้น้ำหนักบรรทุกตามพิภคที่ระบุ<sup>3</sup>

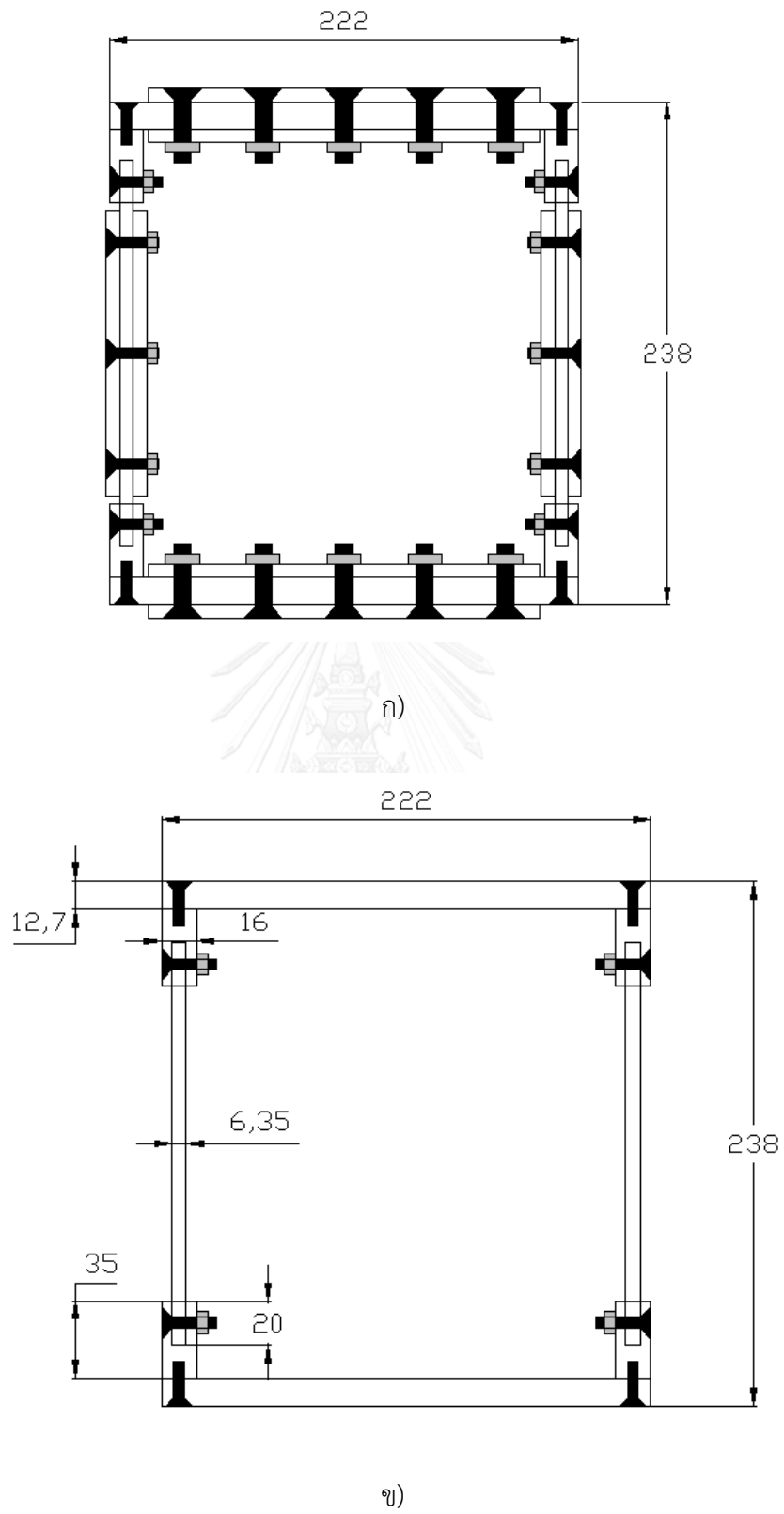
แบบสะพาน	ความยาว (เมตร)	น้ำหนักบรรทุก (ตัน)	แรงเฉือน สูงสุด (ตัน)	โมเมนต์ดัดสูงสุด (ตัน-เมตร)	ระยะโก่ง ตัวสูงสุด (มม.)
เครื่องหนูนมัน					
แบบที่ 1	4.57	100	7.8	4.1	12
แบบที่ 2	6.60	100	8.6	6.7	40
แบบที่ 3	7.11	65	5.9	4.4	33
แบบที่ 4	9.14	35	3.3	3.4	41
แบบที่ 5	11.18	25	2.5	3.3	58
แบบที่ 6	11.68	25	2.6	3.6	68
แบบที่ 7	13.72	25	2.7	4.4	118
เครื่องหนูนลอย	47	60	4.7	-0.8	<0
แพ	28.8	50	3.9	-0.7	<0

จากตารางที่ 4.10 สะพานเครื่องหนูนมันแบบที่ 2 ความยาว 6.60 เมตร รับน้ำหนักบรรทุก 100 ตัน เกิดค่าแรงเฉือนสูงสุด 8.6 ตัน โมเมนต์ดัดสูงสุด 6.7 ตัน-เมตร ส่วนสะพานเครื่องหนูนมันแบบที่ 7 ความยาว 13.72 เมตร มีระยะโก่งตัวสูงสุด 118 มิลลิเมตร โดยทุกแบบของสะพานมีระยะโก่งตัวไม่เกินระยะโก่งตัวที่ยอมให้ L/100 ตามมาตรฐาน BS8118 part1

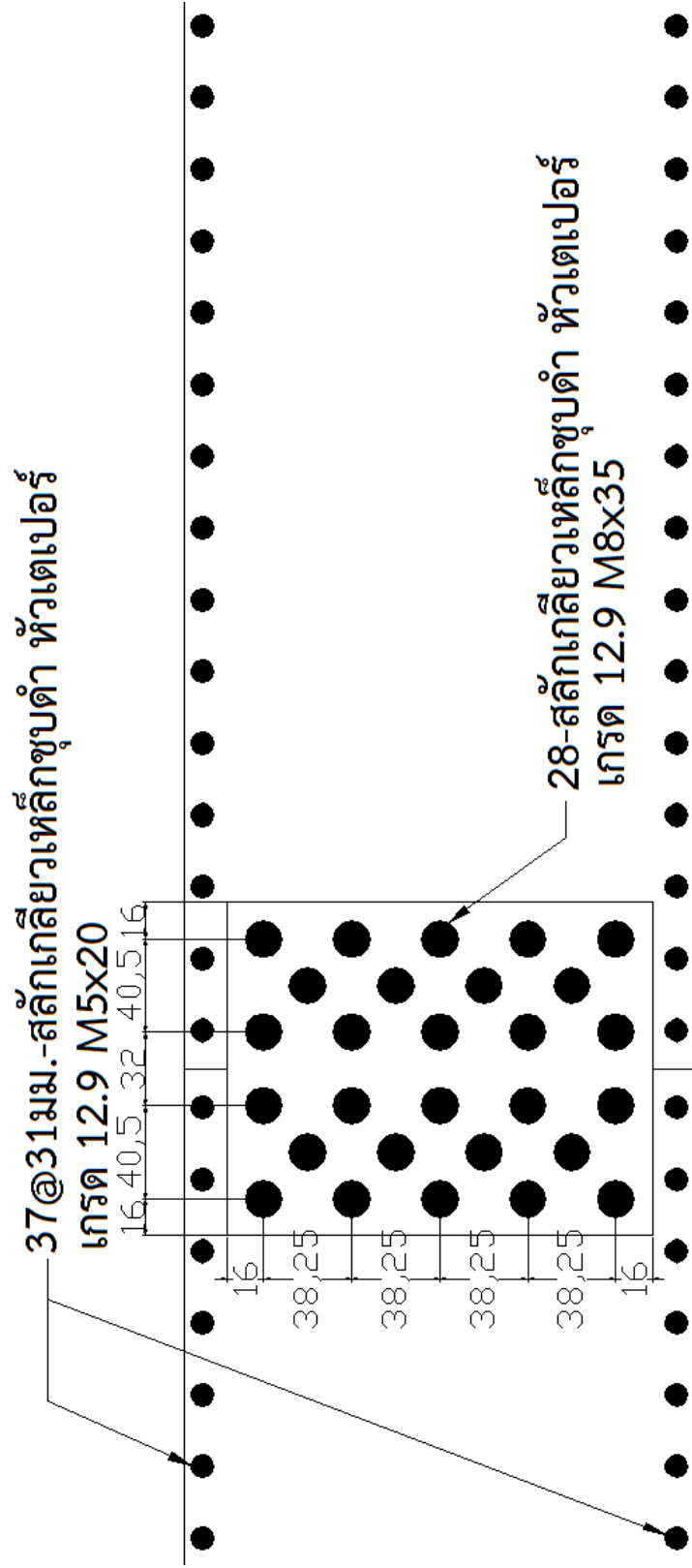
<sup>3</sup> ภาคผนวก ค



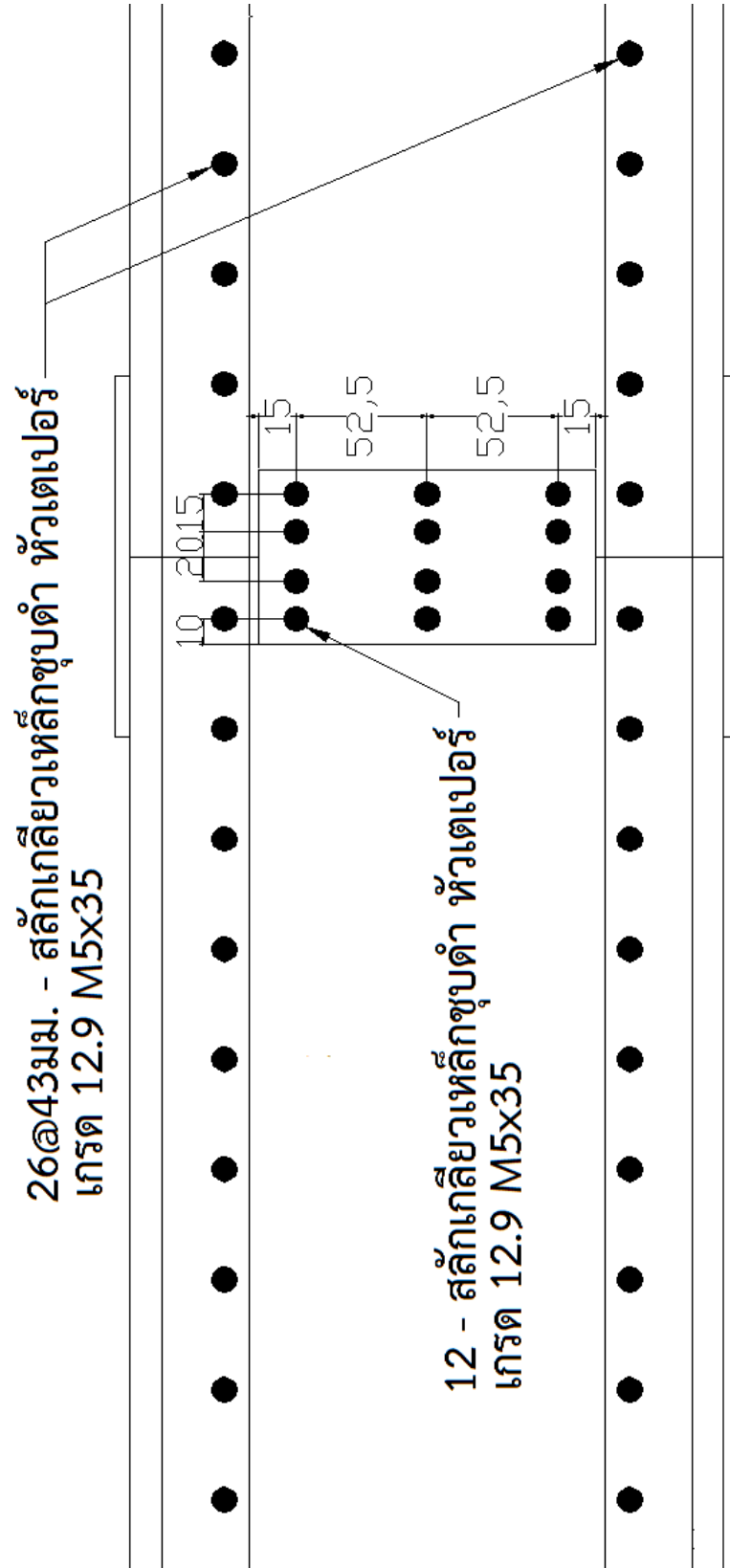
รูปที่ 4.8 ก) รูปผัง , ข) รูปด้าน, ค) รูปหน้าตัด 1-1



รูปที่ 4.9 รูปตัดขวาง ก) รูปตัด 2-2, ข) รูปตัด 3-3

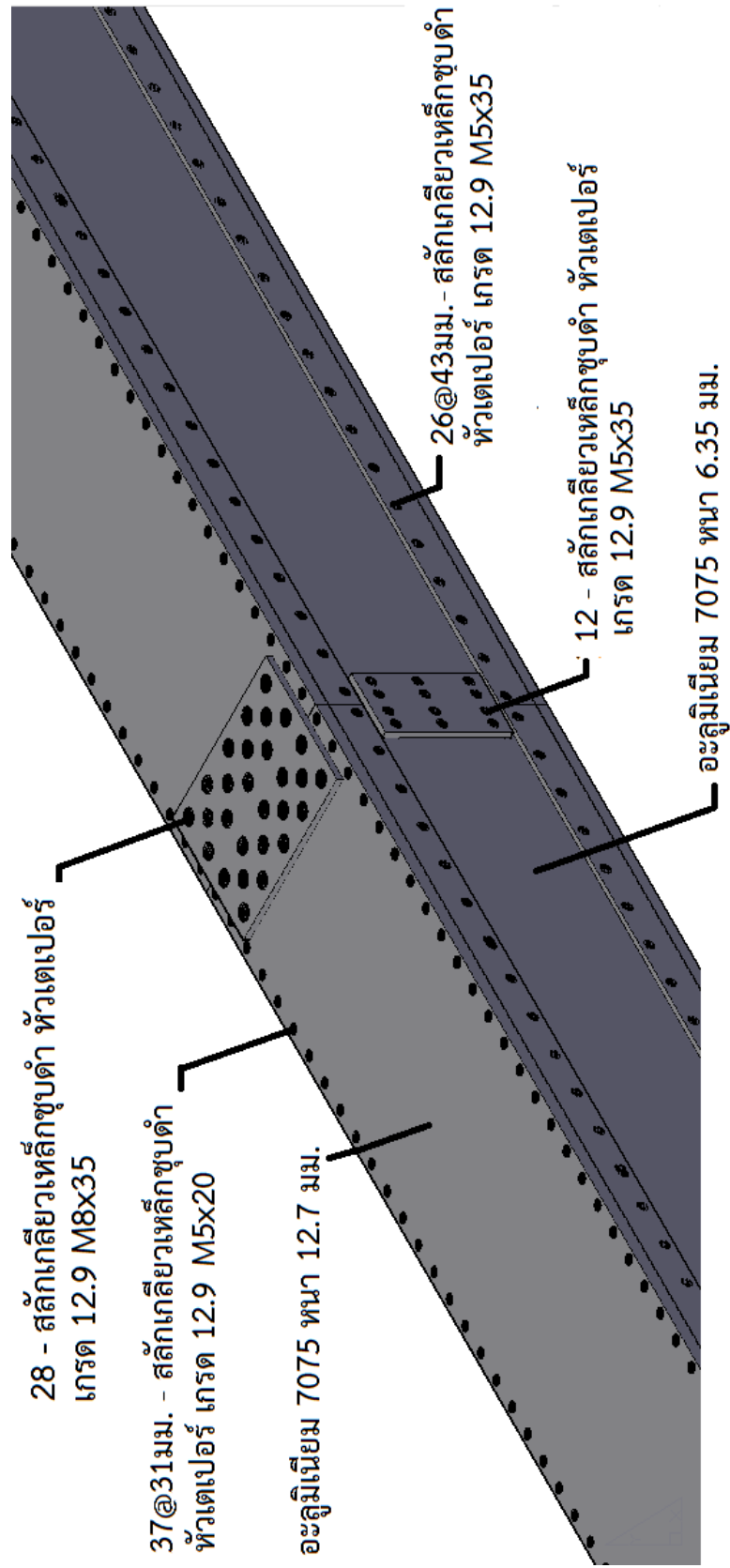


รูปที่ 4.10 รูปรายละเอียด 1



รูปที่ 4.11 รูปรายละเอียด 2





รูปที่ 4.12 รูป 3 มิติ ตงอะลูมิเนียม

## 4.8 ผลการทดสอบตัวอย่าง

### 4.8.1 การทดสอบโมเมนต์ดัด

ตงมีการโก่งตัวเพิ่มตามน้ำหนักบรรทุกทุกที่เพิ่มขึ้น ค่าการโก่งตัวมีค่าสูงสุดที่กึ่งกลางตง เมื่อตงรับน้ำหนักจนใกล้วิบัติ สลักเกลียวที่ยึดอยู่เริ่มขาดที่ละตัวซึ่งสามารถได้ยินจากเสียงที่ดังขึ้น สลักเกลียวเริ่มขาดเพิ่มขึ้นจนกระทั่งตงไม่สามารถรับน้ำหนักบรรทุกต่อไปได้และเกิดการวิบัติขึ้น ดังภาพที่ 4.13 โดยหักที่กึ่งกลางตรงจุดต่อจากการขาดของสลักเกลียวในส่วนรับแรงดิ่ง ดังภาพที่ 4.14 ด้วยน้ำหนักบรรทุกสูงสุด 18.3 ตัน คิดเป็นโมเมนต์ดัด 14.0 ตัน-เมตร มีค่าน้อยกว่าค่าที่คำนวณไว้ 0.7% และคิดเป็นตัวคูณความปลอดภัย 2.1



รูปที่ 4.13 การวิบัติของตงทดสอบ



รูปที่ 4.14 การวิบัติของตงทดสอบที่จุดต่อสลักเกลียว

#### 4.8.2 ค่าการโก่งตัว

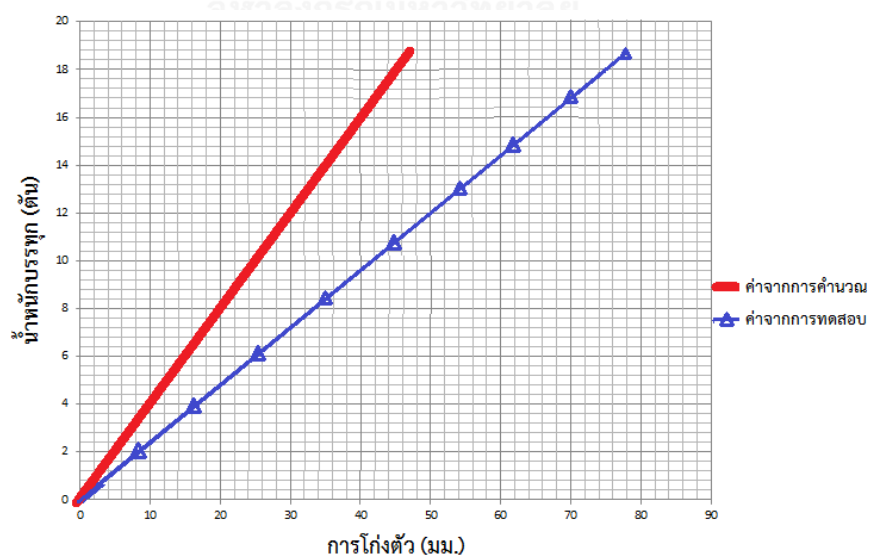
ค่าการโก่งตัวมีค่าแตกต่างกันและมีค่าเกินกว่าที่คำนวณไว้ดังแสดงในตารางที่ 4.10 โดยมีการเปลี่ยนแปลงในลักษณะเชิงเส้นดังแสดงในรูปที่ 4.15 เนื่องจากหลายปัจจัยดังนี้ ขนาดของแผ่นประกบมีความหนาน้อยซึ่งมีผลต่อโมเมนต์อินเนอร์เซียที่จุดต่อ จุดต่อแผ่นประกบอยู่ในแนวเดียวกันทำให้ความแข็งแรงลดลง

ตารางที่ 4.10 ตารางเปรียบเทียบค่าการโก่งตัวจากการทดสอบกับค่าที่คำนวณ

น้ำหนักกระทำ (ตัน)	ค่าการโก่งตัวจากการทดสอบ (มม.)	ค่าการโก่งตัวจากการคำนวณ (มม.)
1	6	3
2	11	5
3	16	8
4	20	10
5	26	13

ตารางที่ 4.10 (ต่อ) ตารางเปรียบเทียบค่าการโค้งตัวจากการทดสอบกับค่าที่คำนวณ

น้ำหนักกระทำ (ตัน)	ค่าการโค้งตัวจากการทดสอบ (มม.)	ค่าการโค้งตัวจากการคำนวณ (มม.)
6	29	15
7	32	18
8	36	20
9	40	23
10	44	25
11	48	28
12	52	30
13	56	33
14	61	35
15	65	38
16	71	40
17	73	43
18	77	45



รูปที่ 4.15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ค่าการโค้งกับน้ำหนักบรรทุก  
เปรียบเทียบระหว่างค่าจากการคำนวณกับค่าจากการทดสอบ

#### 4.8.3 การทดสอบกำลังรับแรงเฉือน

ตงมีการโก่งตัวตามแรงกดที่เพิ่มขึ้น จนกระทั่งวิบัติที่น้ำหนักบรรทุกสูงสุด 37.8 ตัน เป็นการวิบัติเนื่องจากแรงเฉือน 18.6 ตัน ต่ำกว่าที่คำนวณไว้ 19.8 ตัน อยู่ 7.6 % และคิดเป็นค่าตัวคูณความปลอดภัย 2.7 ผลการทดสอบแสดงดังรูปที่ 4.16



รูปที่ 4.16 การวิบัติของตงเนื่องจากแรงเฉือน

ก่อนการทดสอบจริงได้ทำการกดน้ำหนักบรรทุกทุก 10 ตัน ผลทดสอบพบว่าตงมีการโก่งตัว 1.4 ซม.และไม่คืนตัว แสดงดังรูปที่ 4.17 เนื่องจากการเลื่อนตัวเข้าและออกที่จุดต่อทั้ง 3 จุด ของปีก ด้านบนและด้านล่าง จากรูเจาะที่มีขนาดใหญ่กว่าสลักเกลียวซึ่งเป็นสาเหตุของการแอนตัวดังกล่าว



รูปที่ 4.17 การโค้งตัวหลังจากการกดน้ำหนัก 10 ตัน ก่อนทดสอบจริง



## บทที่ 5

### สรุปผลการทดสอบและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการทดสอบ

จากการศึกษาพบว่าตงสะพานทหารเอ็ม 4 ผลิตจากอะลูมิเนียมอัลลอยส์กลุ่ม 2xxx ซึ่งมีองค์ประกอบธาตุอะลูมิเนียม 92.16% และทองแดงซึ่งเป็นธาตุผสมหลัก 4.45 % มีค่าหน่วยแรงดึง วิบัติเฉื่อย 459 เมกกะปาสกาล

ในการทดสอบวัสดุอะลูมิเนียมทั้ง 3 ชนิด คือ AL5083-H112, AL6061T651 และ AL7075-T651 ด้วยการพับขึ้นรูป ความหนาตัวอย่าง 6.35 มม. มุมพับ 90 องศา รัศมีการพับ 10 มม. พบว่ามีเพียง AL5083-H112 ชนิดเดียวที่สามารถนำมาพับขึ้นรูปได้แต่ด้วยข้อจำกัดของแผ่นอะลูมิเนียมที่นำมาใช้มีความยาว 1.20 ม. ดังนั้นการพับขึ้นรูปจึงไม่เหมาะสมที่จะเลือกใช้เป็นวิธีขึ้นรูป ในการเชื่อมด้วยไฟฟ้ารอยเชื่อมมีกำลังรับแรงดึงไม่เพียงพอ ดังนั้นวิธีการขึ้นรูปการเชื่อมจึงไม่เหมาะสม สุดท้ายวิธีการยึดด้วยสลักเกลียวจึงเป็นวิธีที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการขึ้นรูปตงอะลูมิเนียม ใช้อะลูมิเนียม AL7075-T651 เป็นวัสดุเนื่องจากเป็นอะลูมิเนียมชนิดที่มีกำลังรับแรงดึงและความแข็งแรงมากที่สุด

ในการวิเคราะห์โครงสร้างสะพานทหารเอ็ม 4 ที่ประกอบเป็นสะพานเครื่องหนุนมัน สะพานเครื่องหนุนลอย และแพ ทั้งหมด 9 แบบ พบว่ายานยนต์ล้อยางมีความยาวตัวรถรวมเกินกว่าความยาวสะพานจึงไม่ได้นำมาวิเคราะห์ กรณียานยนต์ล้อสายพานสามารถวิเคราะห์ได้ค่าแรงตัดสูงสุด 6.7 ตัน-เมตร ค่าแรงเฉือนสูงสุด 8.6 ตัน จากกรณีสะพานเครื่องหนุนมันแบบที่ 2 รับน้ำหนักบรรทุก 100 ตัน ความยาวสะพาน 6.60 ม.

ในการทดสอบตงตัวอย่าง การทดสอบแรงตัดพบว่าตงตัวอย่างมีกำลังต้านแรงตัดสูงสุด 14.0 ตัน-เมตร เกิดการวิบัติที่จุดตอกลงกลางตง จากการวิบัติของสลักเกลียวเนื่องจากแรงเฉือนคู่ที่ยึดบริเวณแผ่นปีกตงตงและที่แผ่นเอว โดยคิดเป็นค่าตัวคูณความปลอดภัย 2.1 ซึ่งมีค่าเพียงพอต่อการรับแรงตัด ในการทดสอบแรงเฉือนตงมีกำลังต้านทานแรงเฉือนสูงสุด 18.3 ตัน โดยเกิดการวิบัติที่จุดตอกลง จากการวิบัติของสลักเกลียวเนื่องจากแรงเฉือนคู่ที่ยึดอยู่บริเวณแผ่นเอว โดยคิดเป็นค่าตัวคูณความปลอดภัย 2.7 ซึ่งมีค่าเพียงพอต่อการรับแรงเฉือน

ในการตรวจสอบภาวะสุดขีดบริการ พบว่าที่โมเมนต์ตัด 6.69 ตัน-เมตร ซึ่งเป็นค่าโมเมนต์ตัดใช้งาน รับน้ำหนักบรรทุก 8.71 ตัน มีค่าการโก่งตัวที่ 40 มม. มีค่าไม่เกิน 45.7 มม. ซึ่งเป็นค่าการโก่งตัวที่ยอมให้ของตงตัวอย่างยาว 4.57 ม. ดังนั้นจึงสรุปว่าตงตัวอย่างสามารถนำไปใช้ทดแทนตงสะพานทหารเอ็ม 4 ได้

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

สำหรับการปรับปรุงต่อไปในอนาคต เพื่อลดการโก่งตัวที่เกิดขึ้นควรให้ตำแหน่งของจุดต่อแผ่นปีกและจุดต่อแผ่นเอวไม่ให้อยู่ในแนวเดียวกัน เพิ่มความหนาของแผ่นประกบ และเปลี่ยนไปใช้ A16061-T651 แทนซึ่งจะช่วยให้ตงมีน้ำหนักลดลง





## รายการอ้างอิง

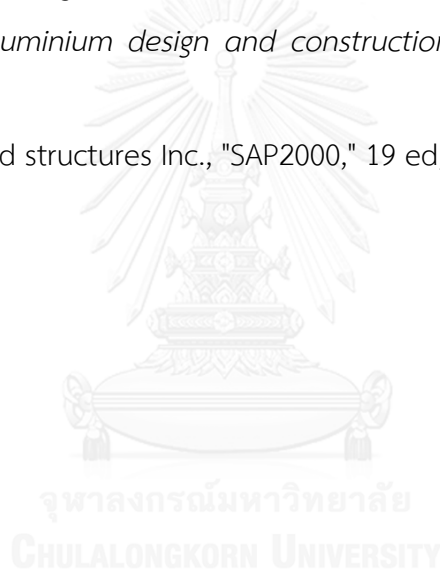
### ภาษาไทย

- [1] กองทัพบก กรมกิจการพลเรือนทหารบก, "หน้าที่เพื่อแผ่นดิน ", ed: สถานีกองทัพบกช่อง 5, 2553.
- [2] สถาพร สีมามุรร์รักษ์. (2556, 10 ม.ค. 2559). สะพานทหารช่างกับการบรรเทาสาธารณภัย Available: <http://km.engrdept.com/bridge/sp.pdf>
- [3] อนุรักษ์รัตน์ วงษ์ขุนไกล. (ม.ป.ป.). วิชาสะพานเครื่อง หลักสูตรนายสิบอาวุโส เหล่า ช. .
- [4] ธนกร งามจรงจิต, ทวีชัย ชูเชิด, สุธีร์ โชว์ทะเล, พิษณุพันธ์ พรประสิทธิ์, and ธนิต พุ่มดิษ, "ปัญหาและความเป็นไปได้ในการออกแบบปรับปรุงสะพานเพื่อข้ามลำน้ำของทหารช่างในประเทศไทยโดยการวิเคราะห์และออกแบบโครงสร้างสะพานที่มีอยู่," ม.ป.ท., 2550.
- [13] โรงเรียนทหารช่าง กรมการทหารช่าง, "สะพานเครื่องหมุนลอย หลักสูตรนายสิบอาวุโส," ส. หลักสูตรนายสิบอาวุโส, Ed., ed, 2551.
- [15] สิริลักษณ์ จันทรางศุ, การคำนวณออกแบบคอนกรีตเสริมเหล็กโดยวิธี “ภาวะสุดขีด”, 2 ed.: ม.ป.ท., 2534.

### ภาษาอังกฤษ

- [5] E. K. Koltzakis and F. G. Preftitsi, "Numerical investigation of the plastic behaviour of short welded aluminium double-T beams " *Engineering structures* vol. 30, pp. 2022-2031, 2008.
- [6] T.K.Chan and R. F. D. P. Goff, "Welded aluminium alloy connections: Test results and BS8118," *Thin-Walled Structures*, vol. 36, pp. 265-287, 2000.
- [7] M. F. Khan, G. Sharma, and D. K. Dwivedi, "Weld-bonding of 6061 aluminium alloy," *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 78, pp. 863-873, 2015.
- [8] C.A.Burt, H.R.Evans, and O.Vilnay, "Further experimental studies of the collapse of welded aluminium plate girders," *Thin-Walled Structures*, vol. 8, pp. 19-39, 1989.
- [9] M. D. Milenkovich, "Why Bolts Fail," *American Fastener Journal*, vol. 29, pp. 52-58, 2013.

- [10] R. T. Barrett, *Fastener design manual* Washington, D.C.: National Aeronautics and Space Administration, Office of Management, Scientific and Technical Information Division, 1990.
- [11] K. Fallahnezhad, A. Steele, and R. H. Oskouei, "Failure mode analysis of aluminium alloy 2024-T3 in double-lap bolted joints with single and double fasteners; A numerical and experimental study," *Materials*, vol. 8, pp. 3195-3209, 2015.
- [12] G. D. Matteis and F. M. Mazzolani, "Behaviour of Welded Aluminium T-Stub Connections: Experimental Analysis and Interpretative Models," presented at the Structures Congress 2006, St. Louis, Missouri, United States, 2006.
- [14] J. Dweight, *Aluminium design and construction*, 2 ed.: The Taylor & Francis group, 2002.
- [16] Computers and structures Inc., "SAP2000," 19 ed, 2008.






ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

**ภาคผนวก ก**  
**ผลการตรวจสอบองค์ประกอบธาตุ**



ศูนย์บริการเทคโนโลยีนิวเคลียร์  
สถาบันเทคโนโลยีนิวเคลียร์แห่งชาติ (องค์การมหาชน)  
Nuclear Technology Service Center  
Thailand Institute of Nuclear Technology (Public Organization)

เลขที่ 9/9 หมู่ที่ 7 ตำบลทรายมูล อำเภอองครักษ์ จังหวัดนครนายก 26120 โทรศัพท์ 037 392912 โทรสาร 037 392913  
9/9 Moo 7, Saimoon Sub-district, Ongkharak District, Nakhon Nayok 26120 Thailand  
Tel. 037 392912 Fax. 037 392913 www.tint.or.th

ที่ วท. 5905/924/2559 Attachment Page 1/1  
Issued Date : 27 January 2016


**ANALYSIS REPORT**

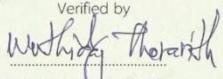
Client : คุณ ชลิต สันติธรรารักษ์  
Date received : 26 January 2016  
Objective : Qualitative composition  
Client Reference/Code No. : โลหะ B

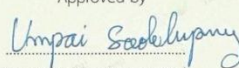
Request No. : 0273/2559  
Date analyzed : 27 January 2016  
Method : XRF Standardless

Element	Concentration (%)	Compound	Concentration (%)
Al	92.16	-	-
Cu	4.45	-	-
Mg	1.28	-	-
Si	0.76	-	-
Mn	0.58	-	-
Fe	0.31	-	-
Ba	0.14	-	-
K	0.05	-	-
Zn	0.04	-	-
Cr	0.03	-	-
Ga	0.02	-	-

\* Note- Light element as C, H, B, N, F can not be detected by XRF.  
The results are reported based on 100% normalization of elements.  
This report represented our findings basing upon the sample(s) and time as described above only.

Analyzed by  
  
(Mrs. Orapun Leelanupat)  
Senior Nuclear Scientist

Verified by  
  
(Mr. Wuthida Thorarith)  
Head of Nuclear Analytical Techniques

Approved by  
  
(Mr. Umpai Sookbumpeng)  
For Manager of Nuclear Technology Service Center

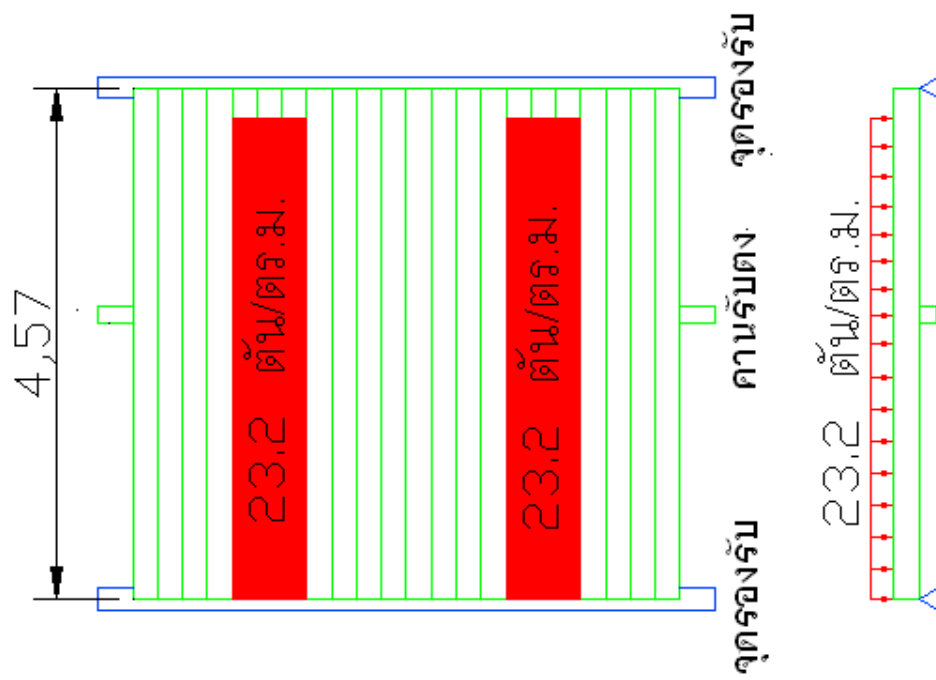
This report shall not be reproduced, except in full, without prior written permission of the institute.

FM-NSC-22

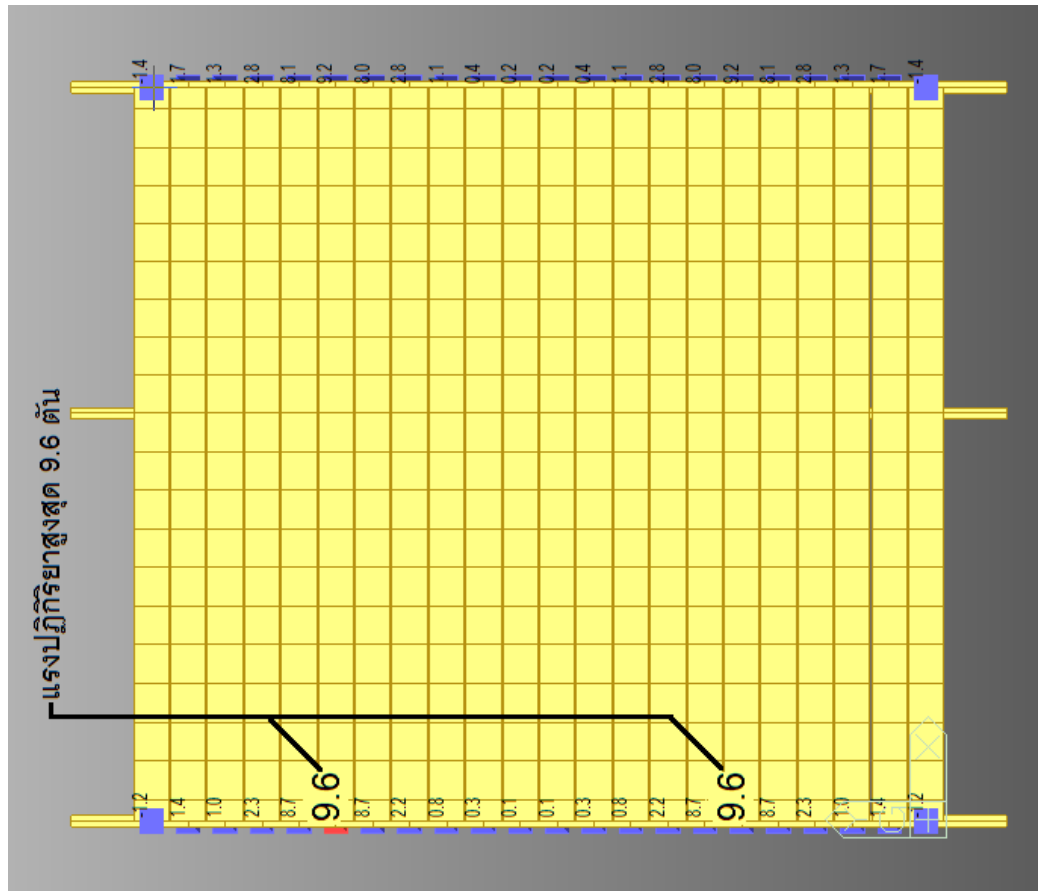
Rev. No. : 02 EFF. Date : 20/05/2015

รูปที่ 5.1 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุชิ้นส่วนตงสะพานทหารเอ็ม 4

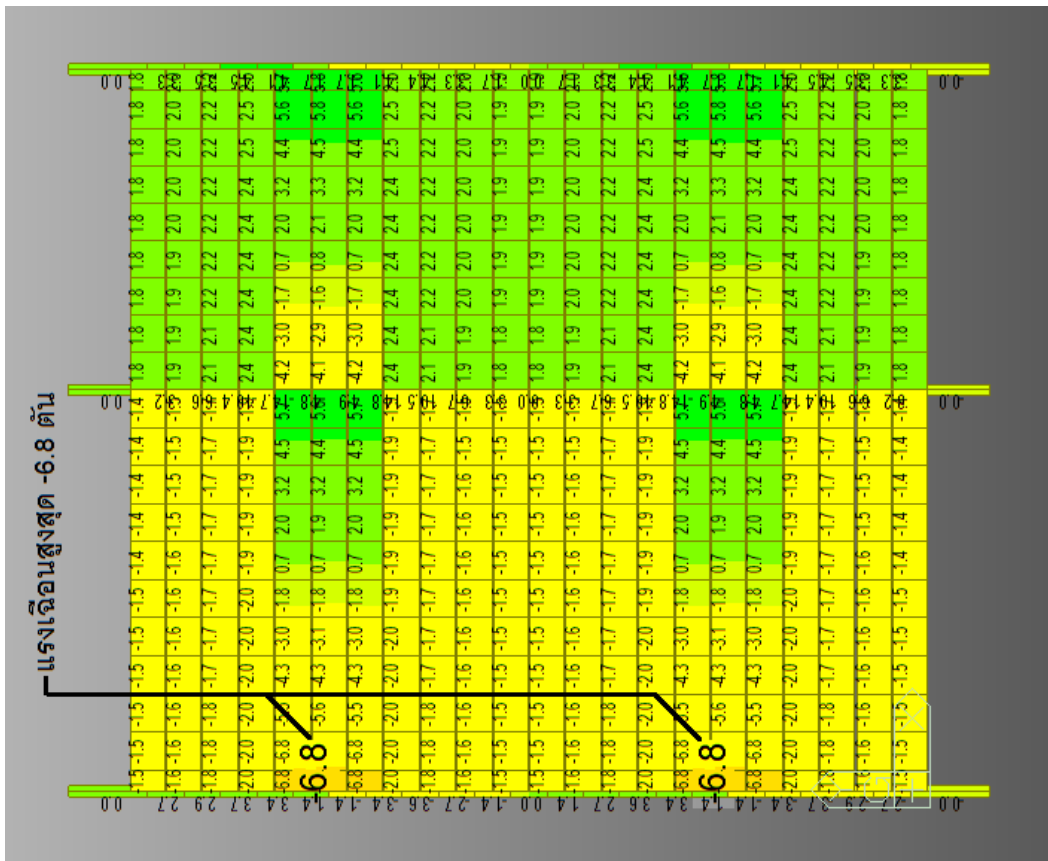
ภาคผนวก ข  
ผลการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม SAP2000



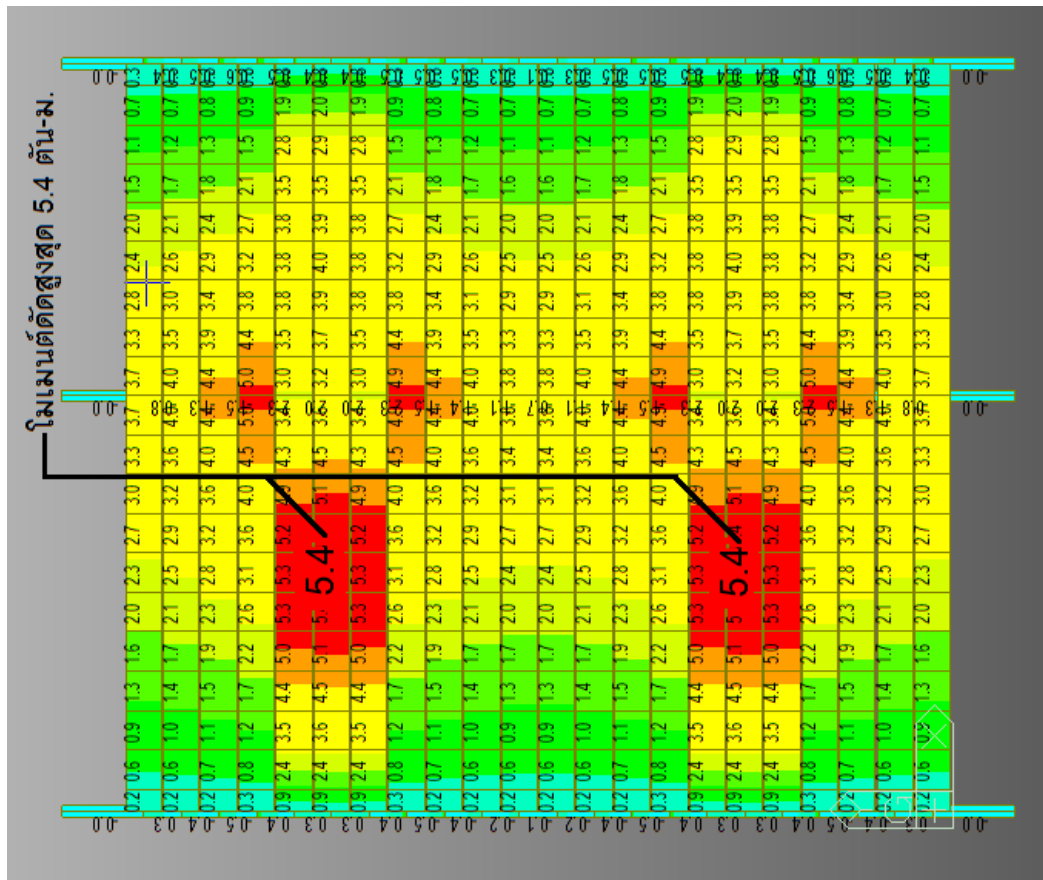
รูปที่ 5.2 แรงกระทำแบบแผ่ต่อสะพานเครื่องหมุนแบบที่ 1 กรณี 1



รูปที่ 5.3 แรงปฏิกิริยา สะพานเครื่องหนุมนแบบที่ 1 กรณี 1

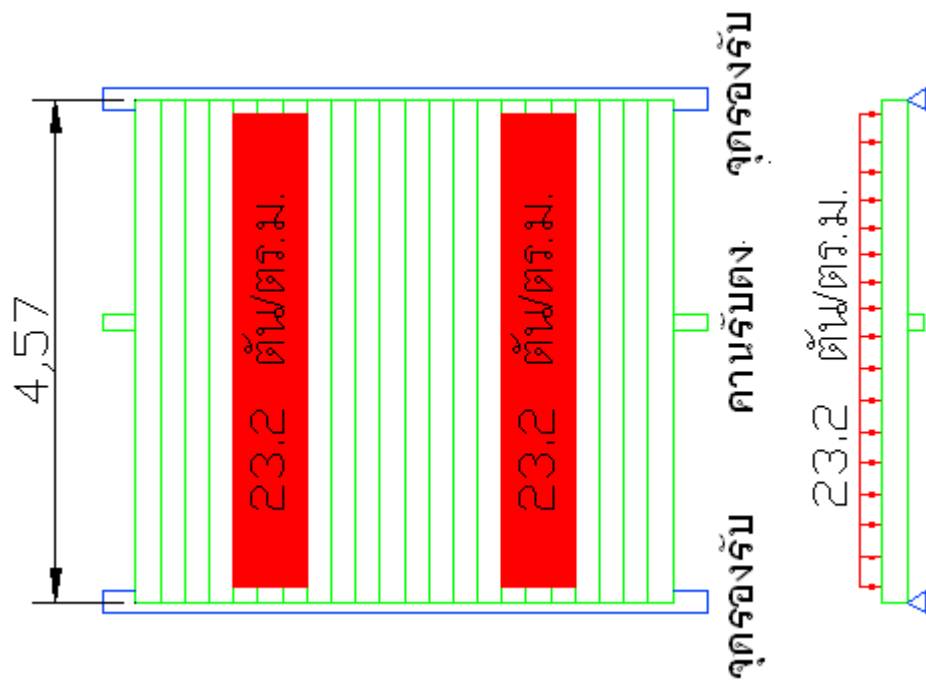


รูปที่ 5.4 แรงเฉือน สะพานเครื่องบินแบบที่ 1 กรณี 1

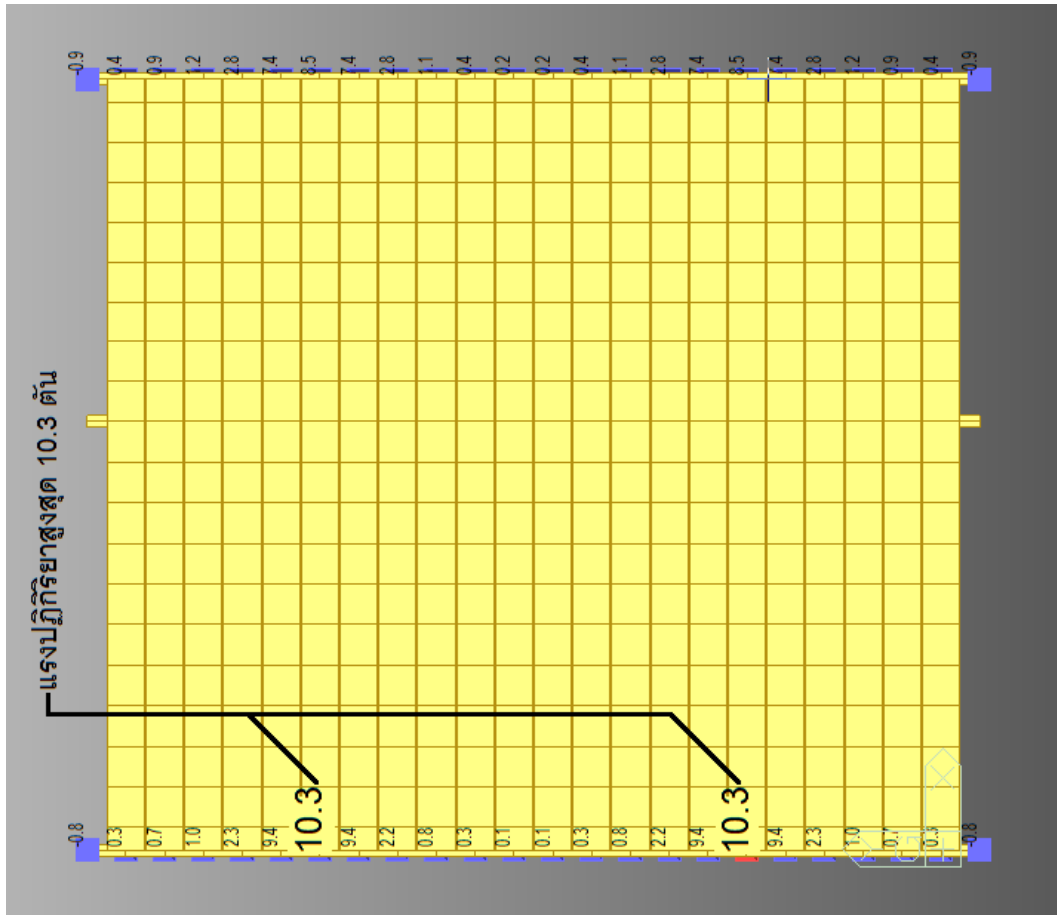


รูปที่ 5.5 โมเมนต์ตัด สะพานเครื่องหมุนมันแบบที่ 1 กรณี 1

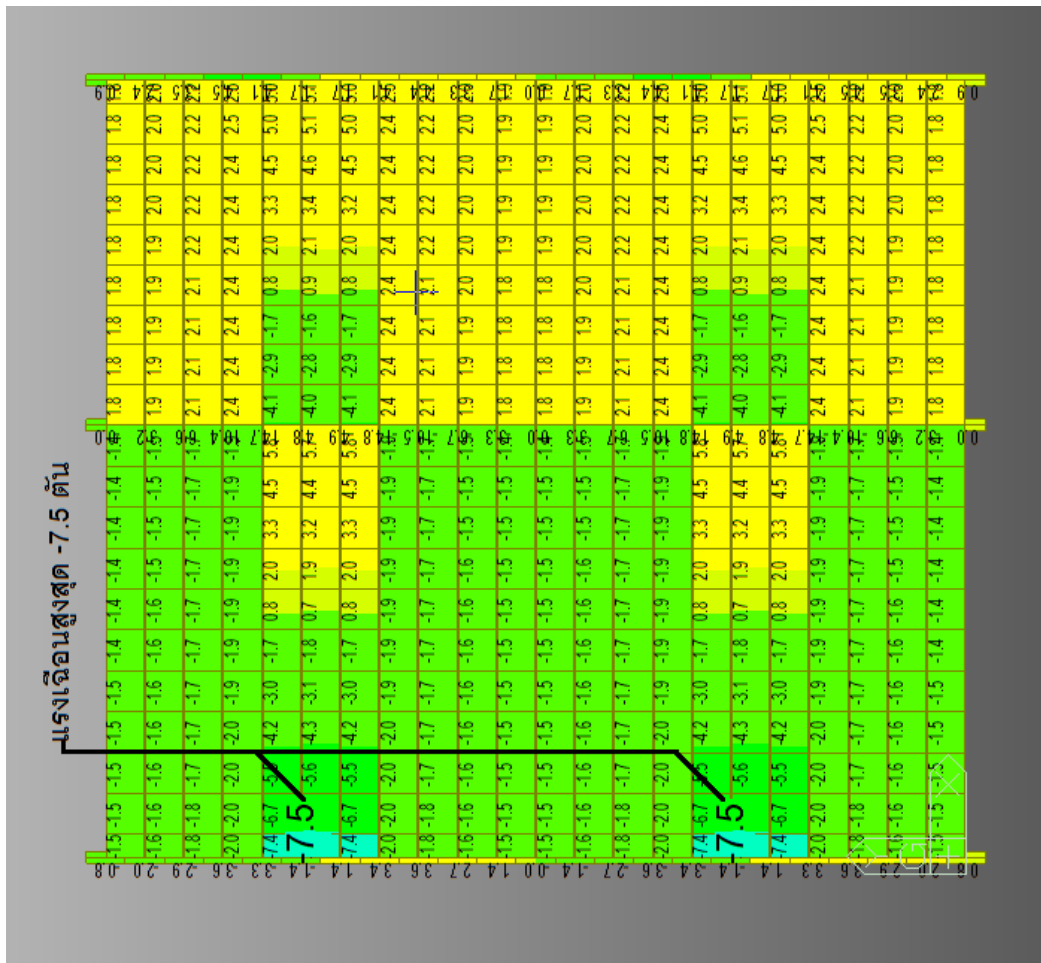




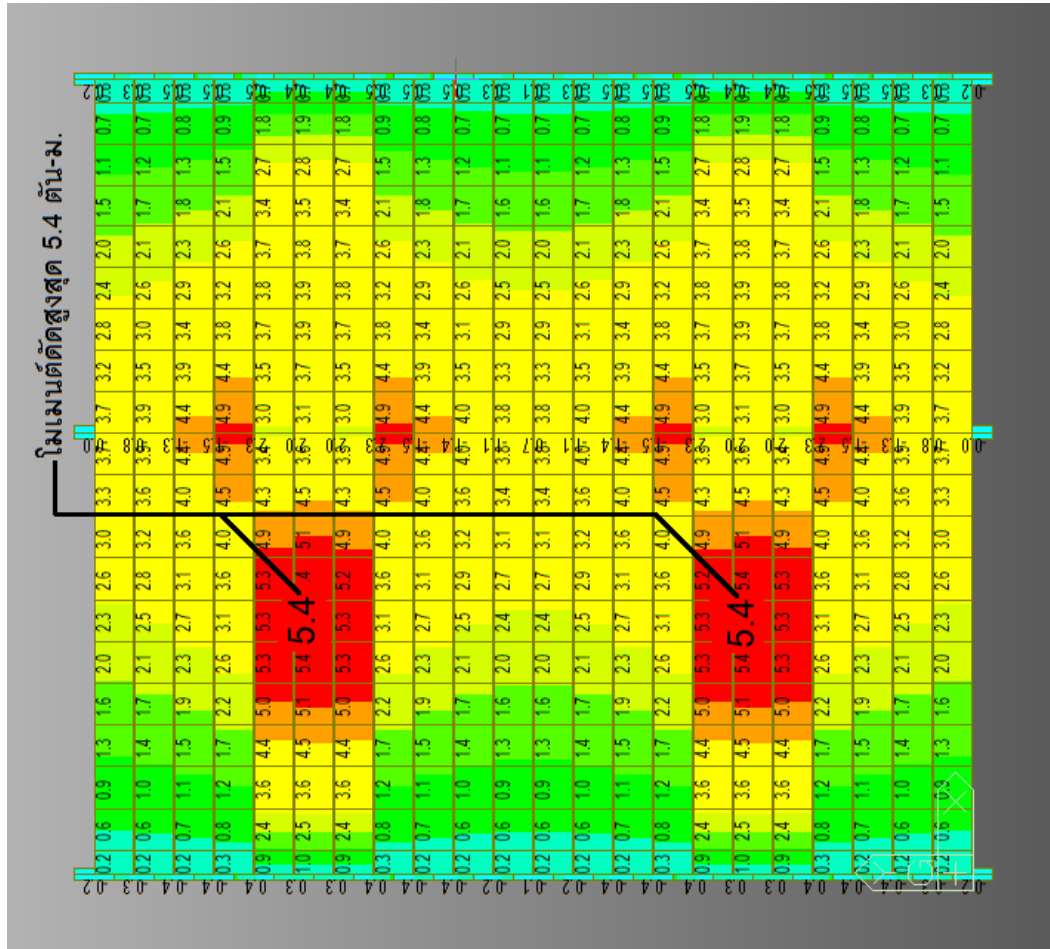
รูปที่ 5.6 แรงกระทำแบบแผ่ต่อสะพานเครื่องหมุนน้ำมันแบบที่ 1 กรณี 2



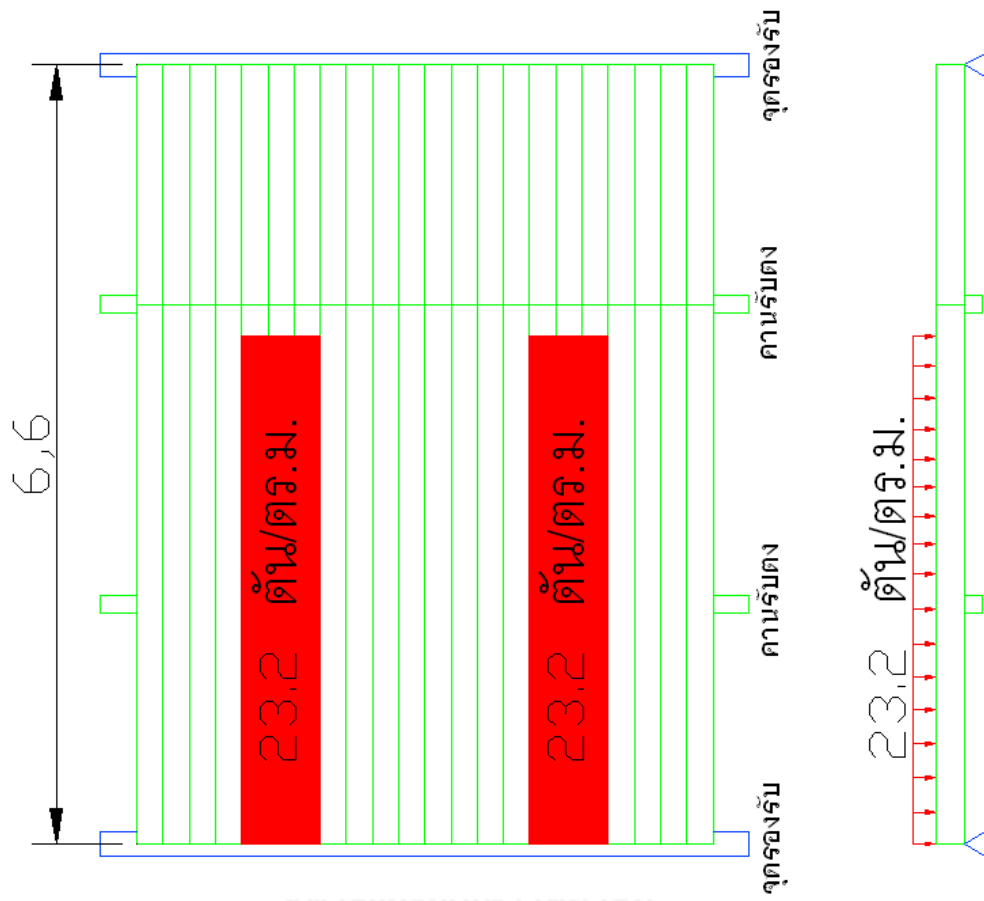
รูปที่ 5.7 แรงปฏิกิริยา สะพานเครื่องหมุนมันแบบที่ 1 กรณี 2



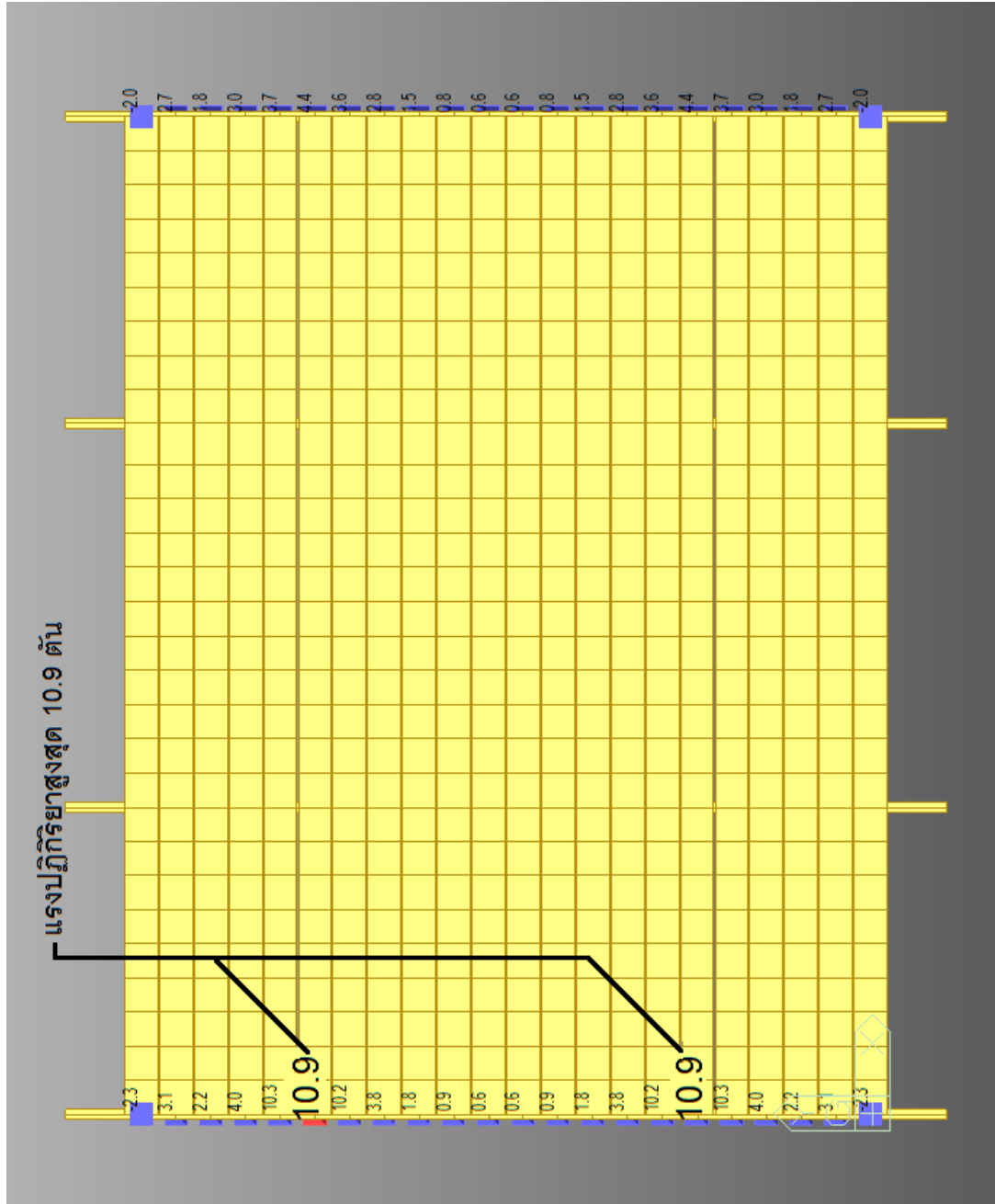
รูปที่ 5.8 แรงเฉือน สะพานเครื่องหมุนมันแบบที่ 1 กรณี 2



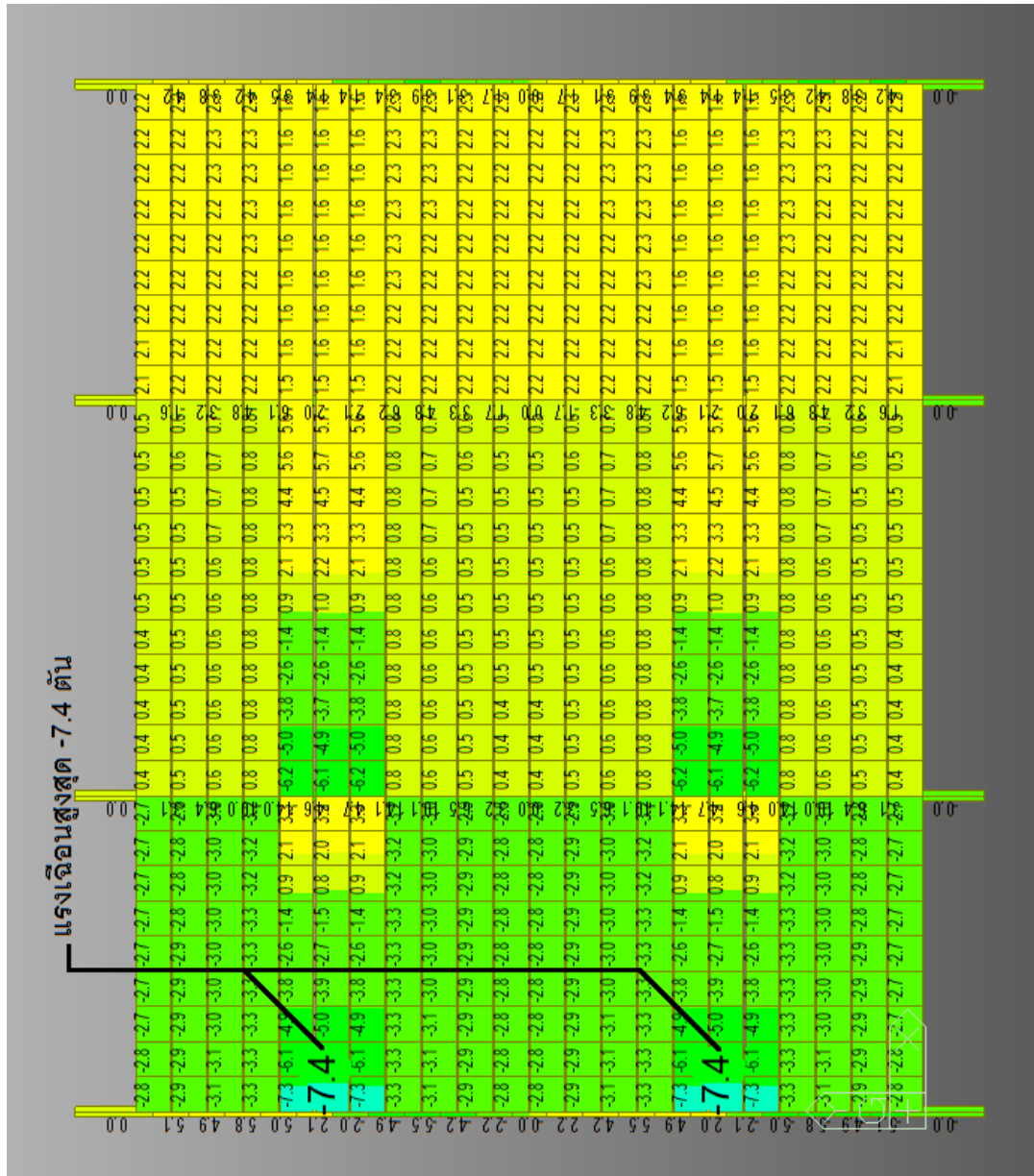
รูปที่ 5.9 โมเมนต์ตัด สะพานเครื่องหมุนน้ำมันแบบที่ 1 กรณี 2



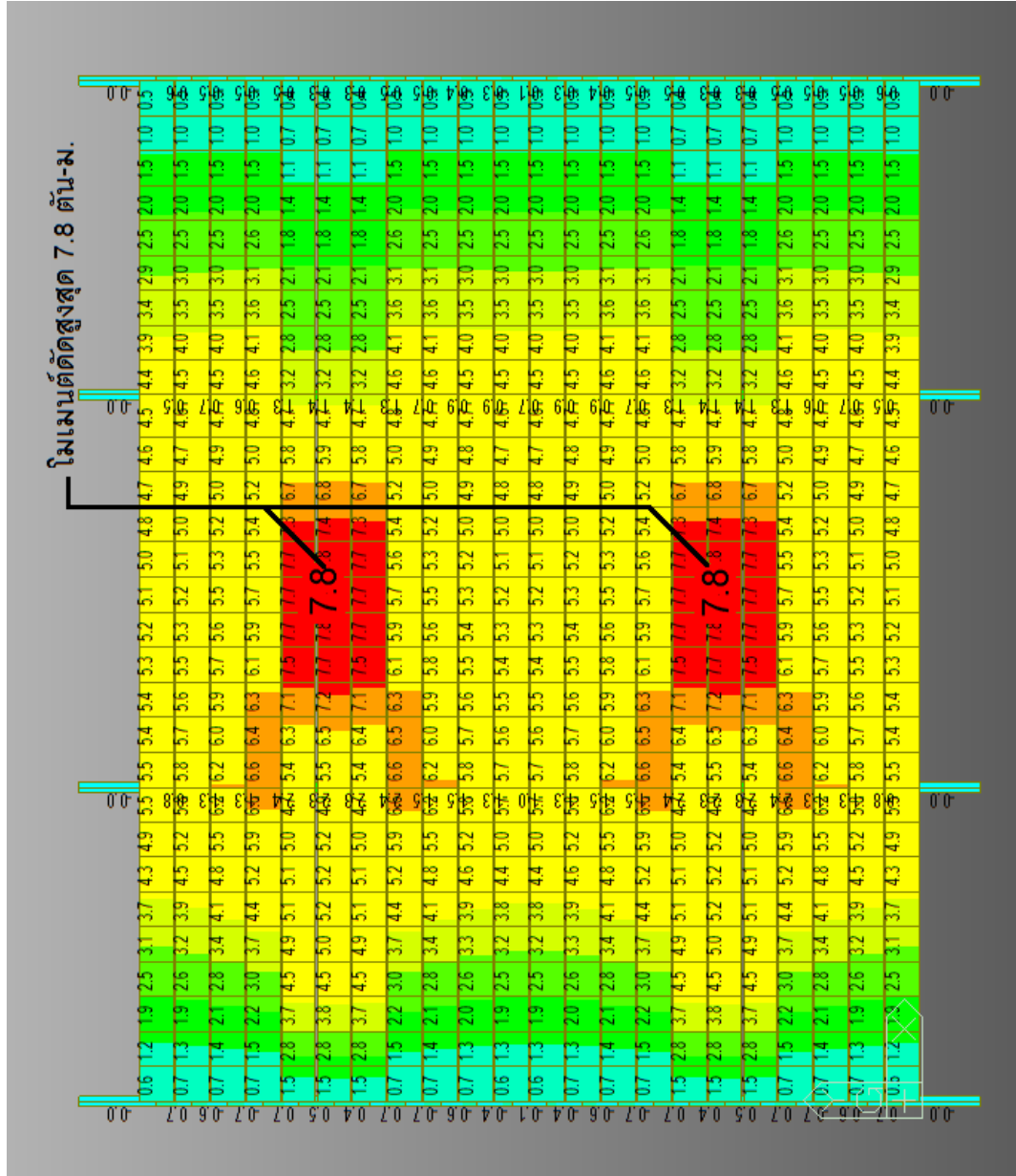
รูปที่ 5.10 แรงกระทำแบบแผ่ต่อสะพานเครื่องหนุนน้ำมันแบบที่ 2 กรณี 1



รูปที่ 5.11 แรงปฏิกิริยา สะพานเครื่องหมุนแบบที่ 2 กรณี 1

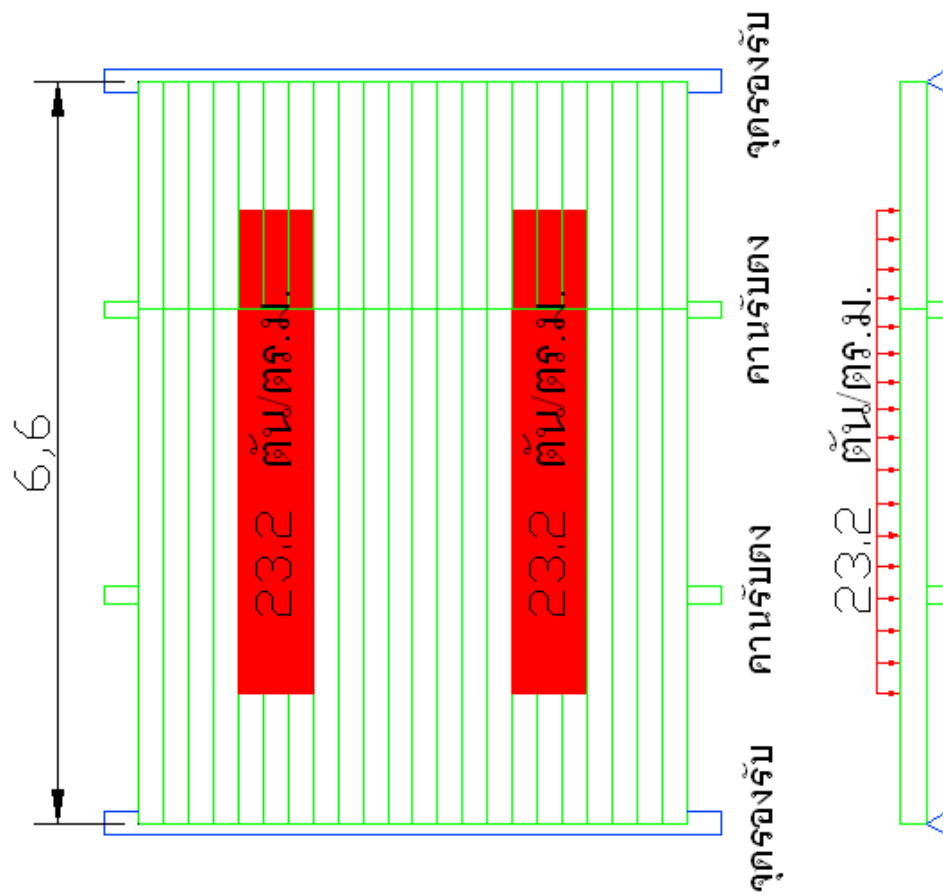


รูปที่ 5.12 แรงเฉือน สะพานเครื่องหมุนน้ำมันแบบที่ 2 กรณี 1

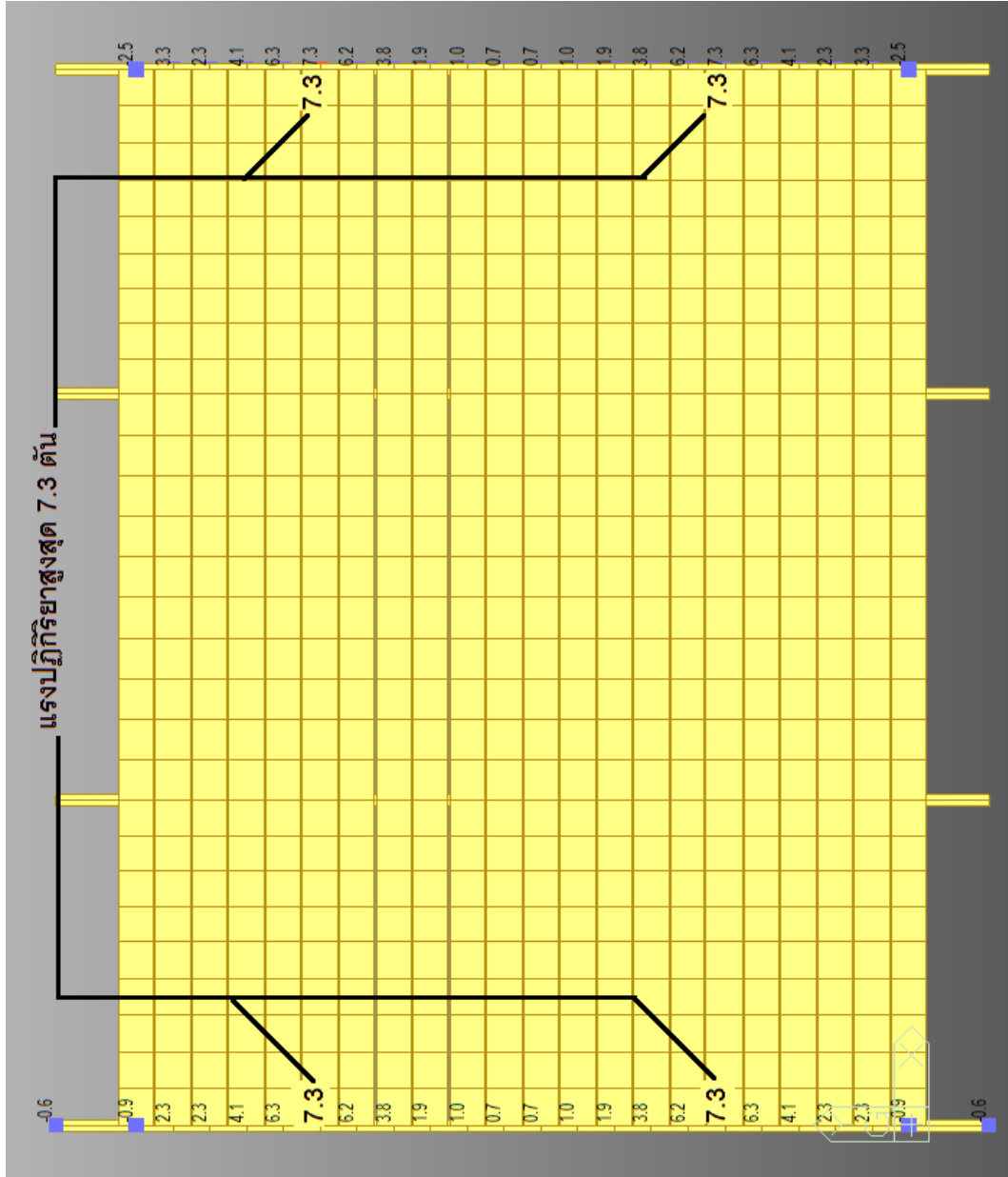


รูปที่ 5.13 โมเมนต์ตัด สะพานเครื่องหมุนมันแบบที่ 2 กรณี 1



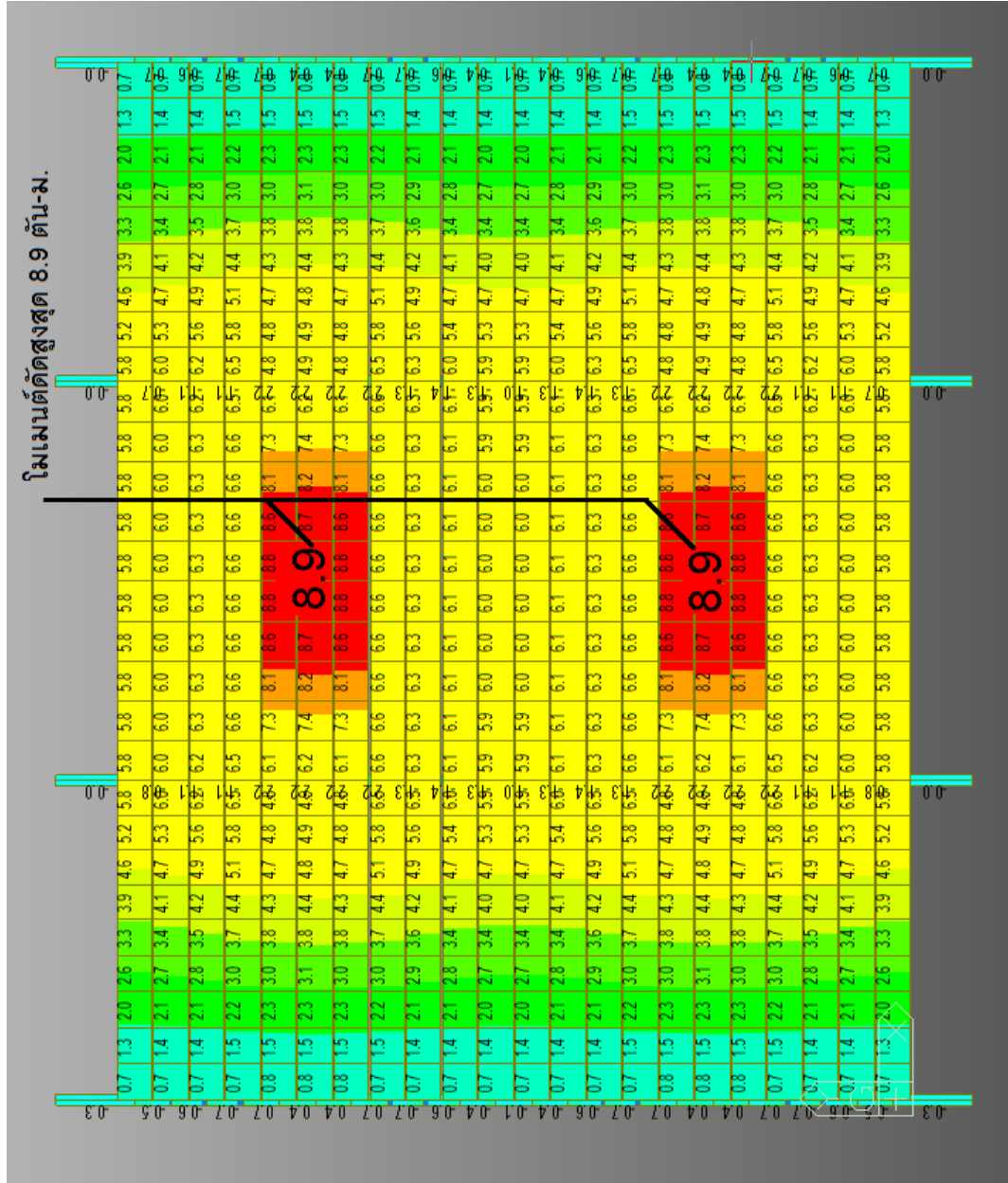


รูปที่ 5.14 แรงกระทำแบบแผ่ต่อสะพานเครื่องหนุนมันแบบที่ 2 กรณี 2

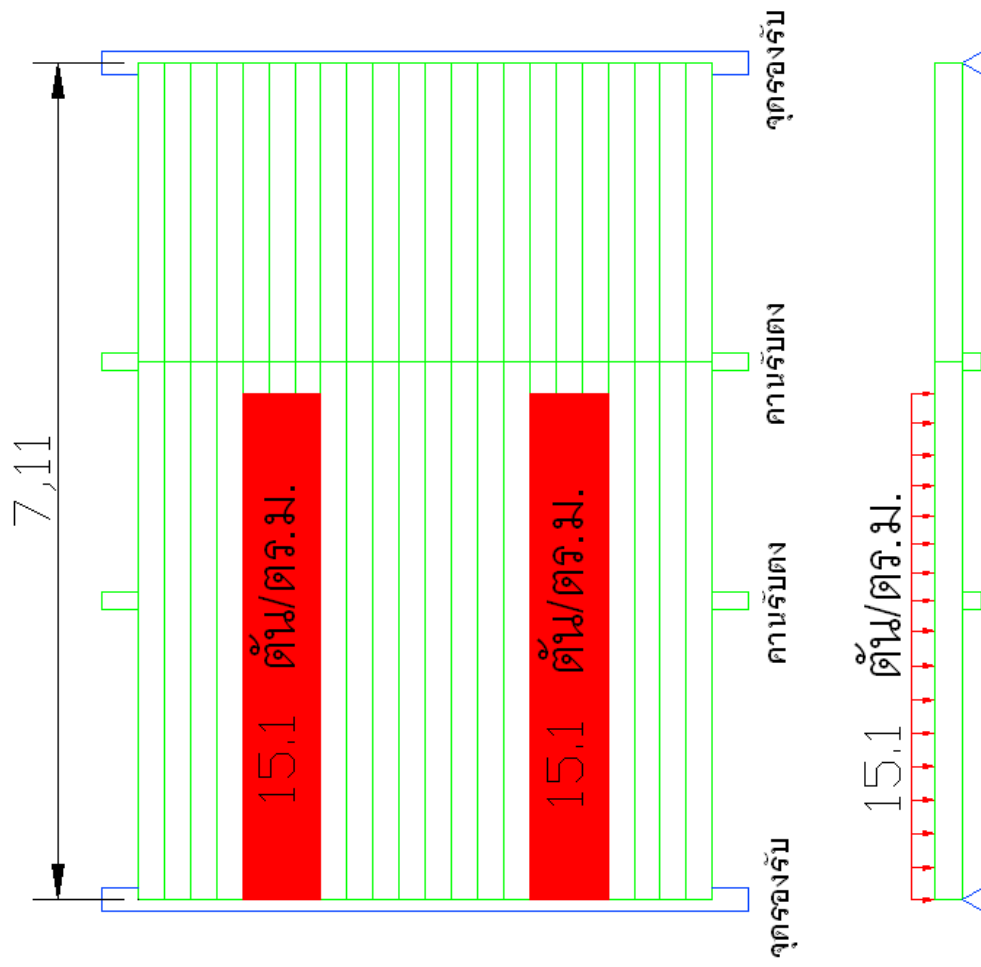


รูปที่ 5.15 แรงปฏิกิริยา สะพานเครืองหนุมนันแบบที่ 2 กรณี 2

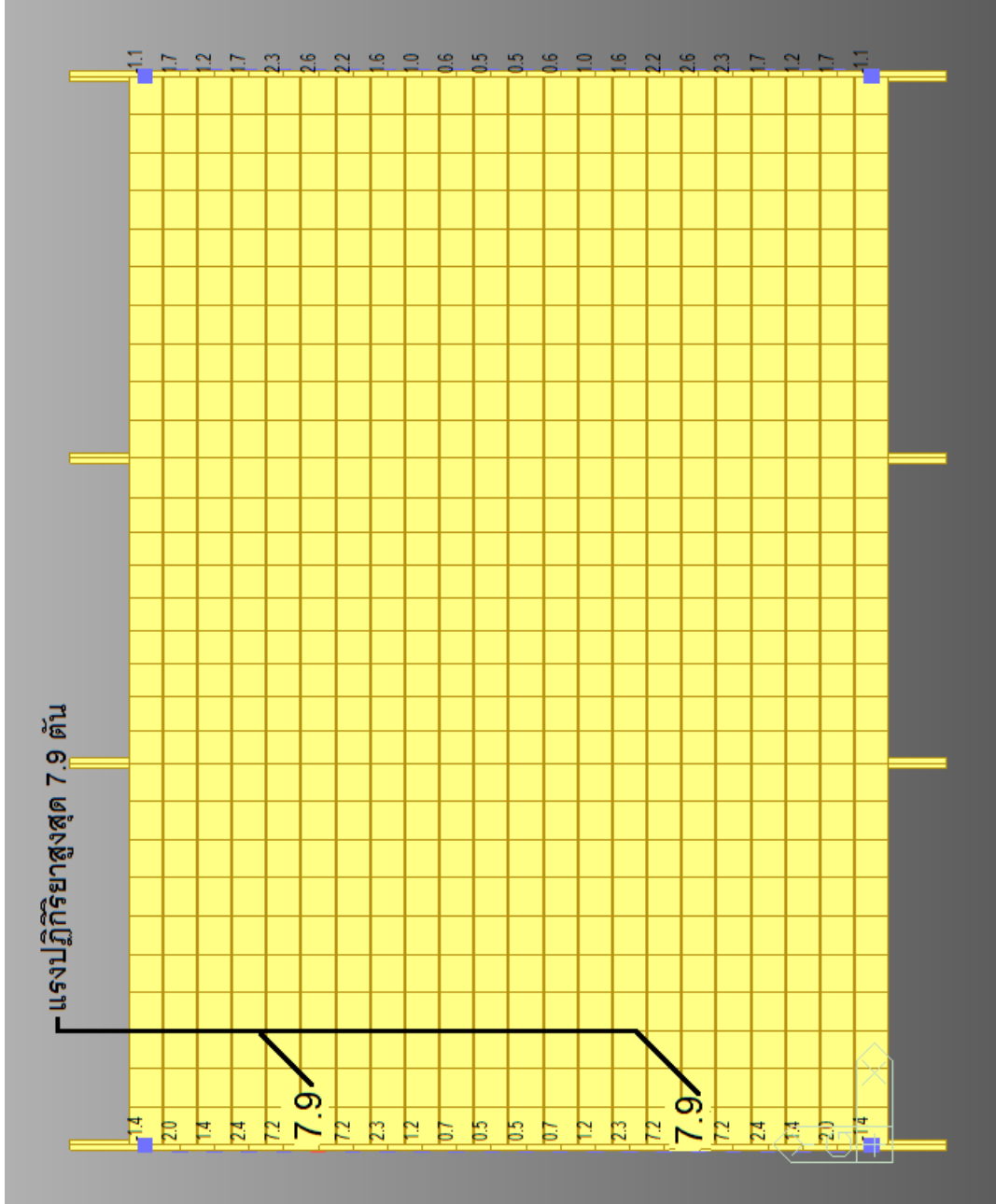




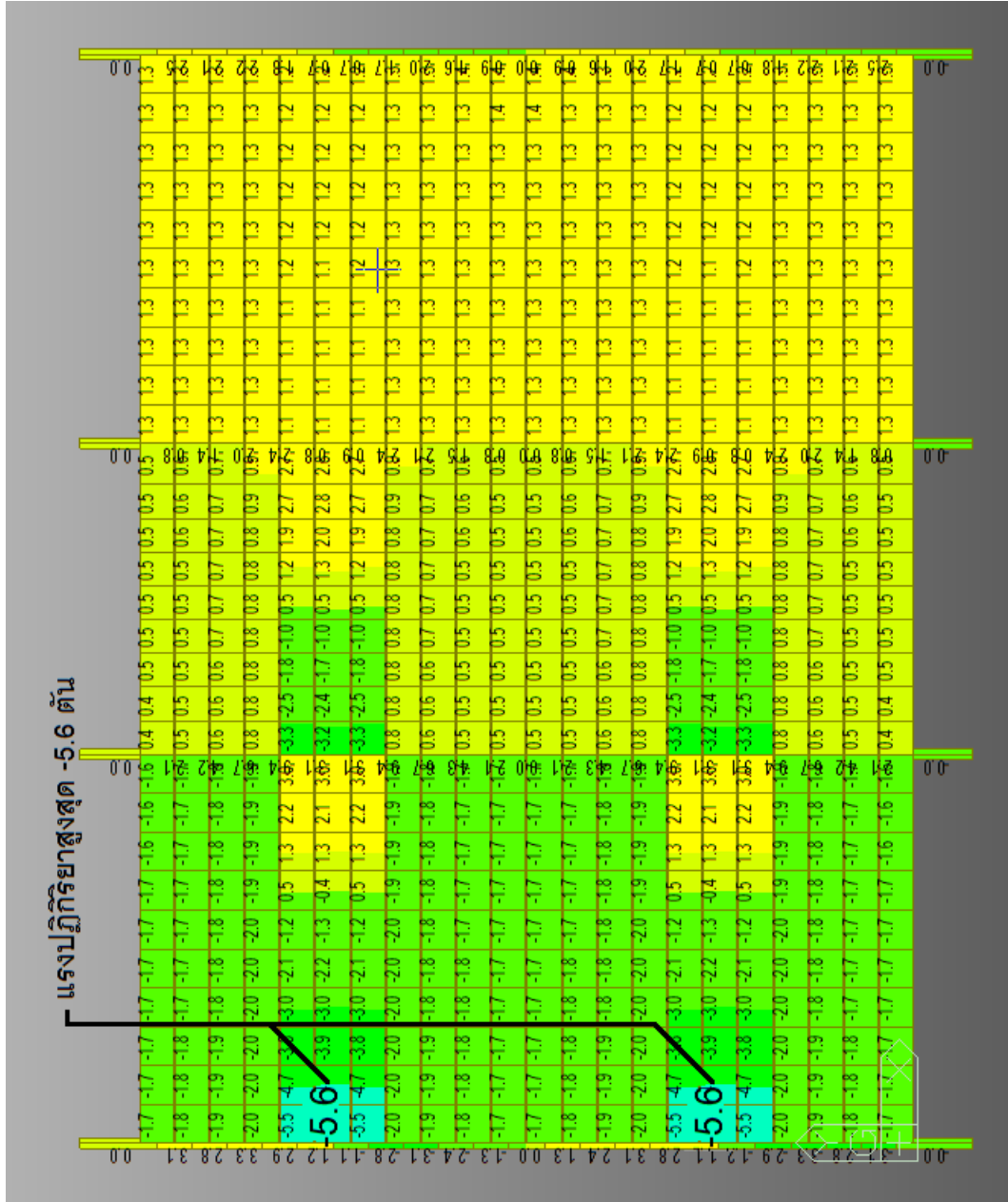
รูปที่ 5.17 โมเมนต์ดัด สะพานเครื่องหมุนมันแบบที่ 2 กรณี 2



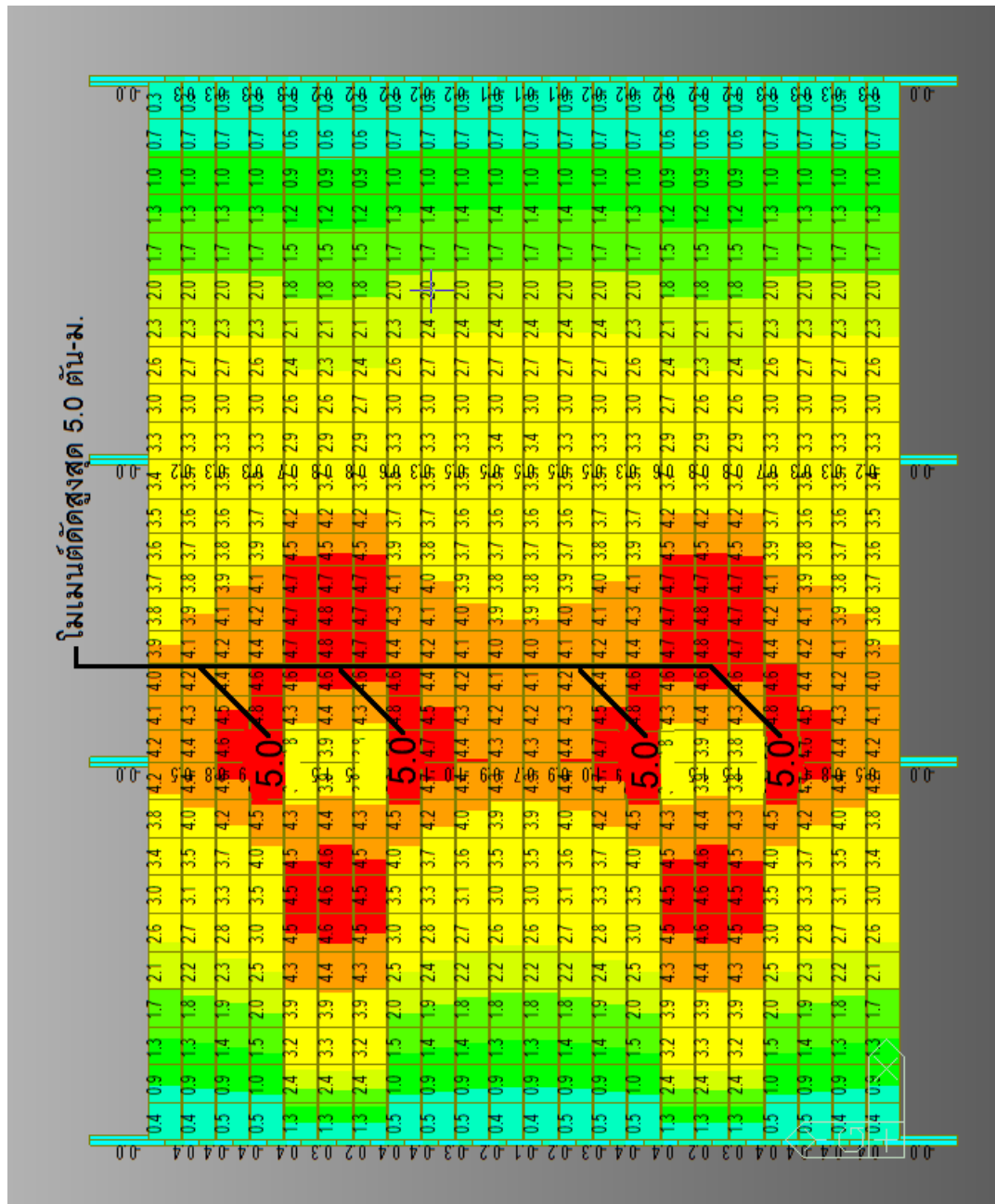
รูปที่ 5.18 แรงกระทำแบบแผ่ต่อสะพานเครื่องหนุนแบบที่ 3 กรณี 1



รูปที่ 5.19 แรงปฏิกิริยา สะพานเครื่องหมุนมันแบบที่ 3 กรณี 1

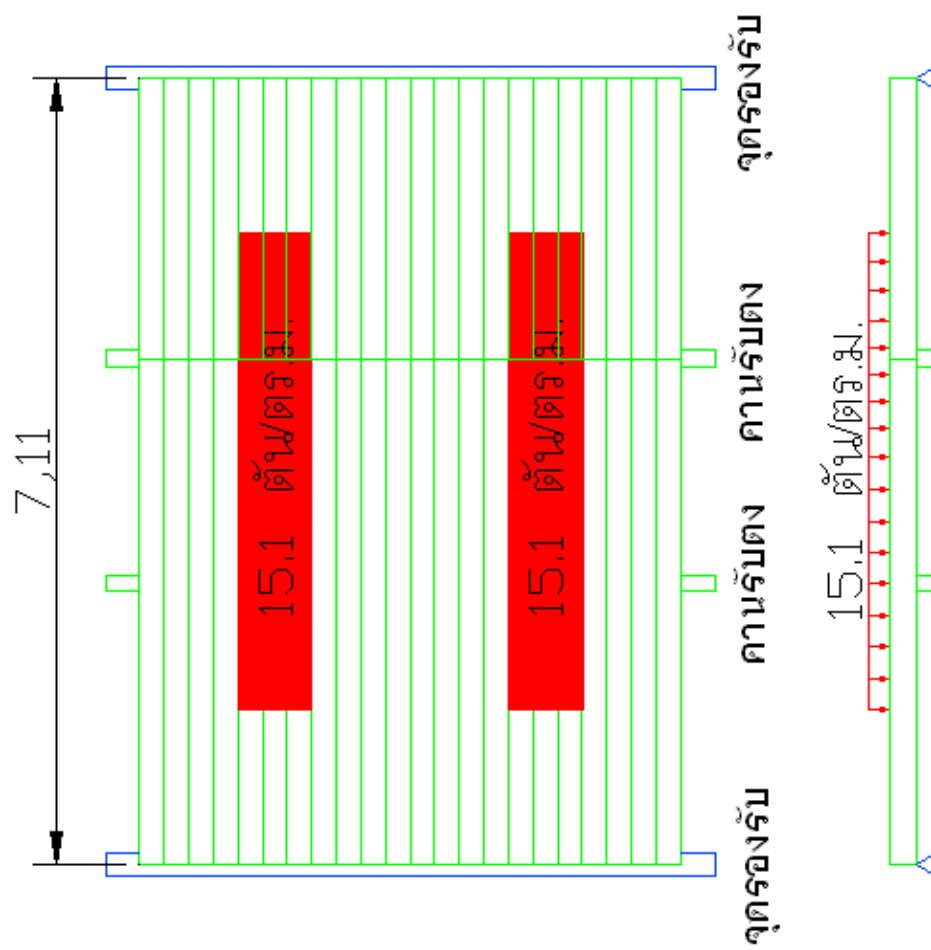


รูปที่ 5.20 แรงเฉือน สะพานเครื่องหมุนมันแบบที่ 3 กรณี 1

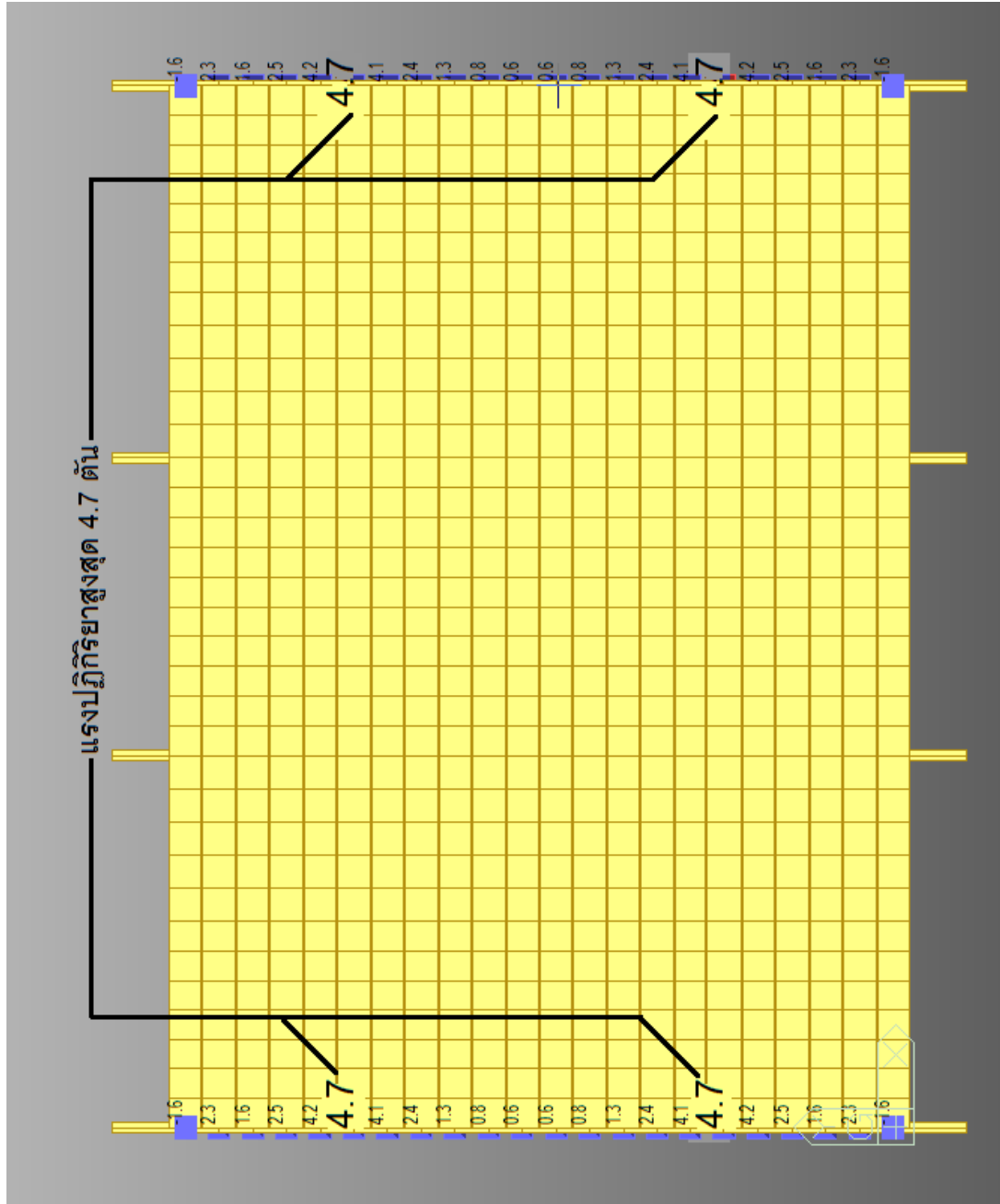


รูปที่ 5.21 โมเมนต์ตัด สะพานเครื่องบินแบบที่ 3 กรณี 1

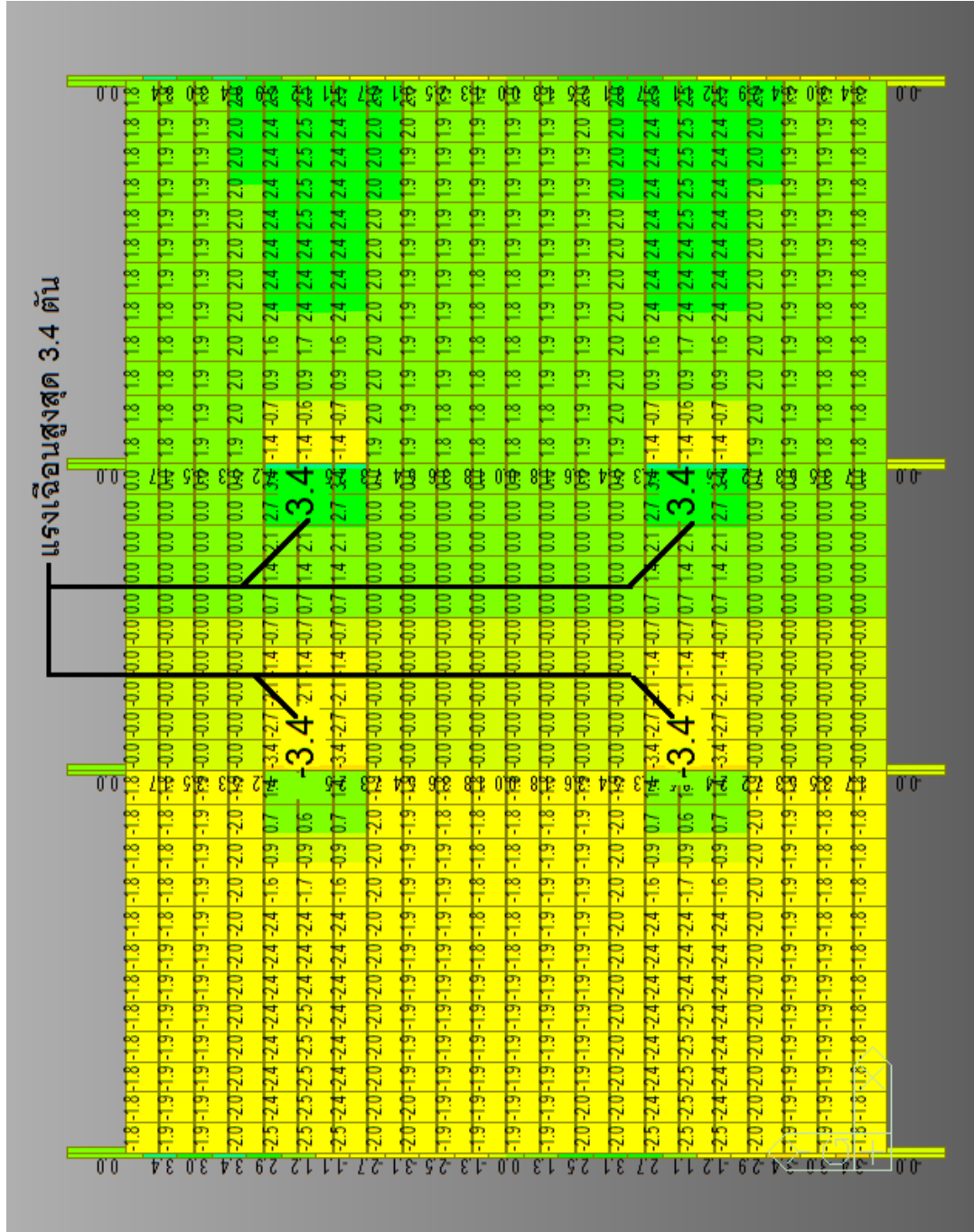




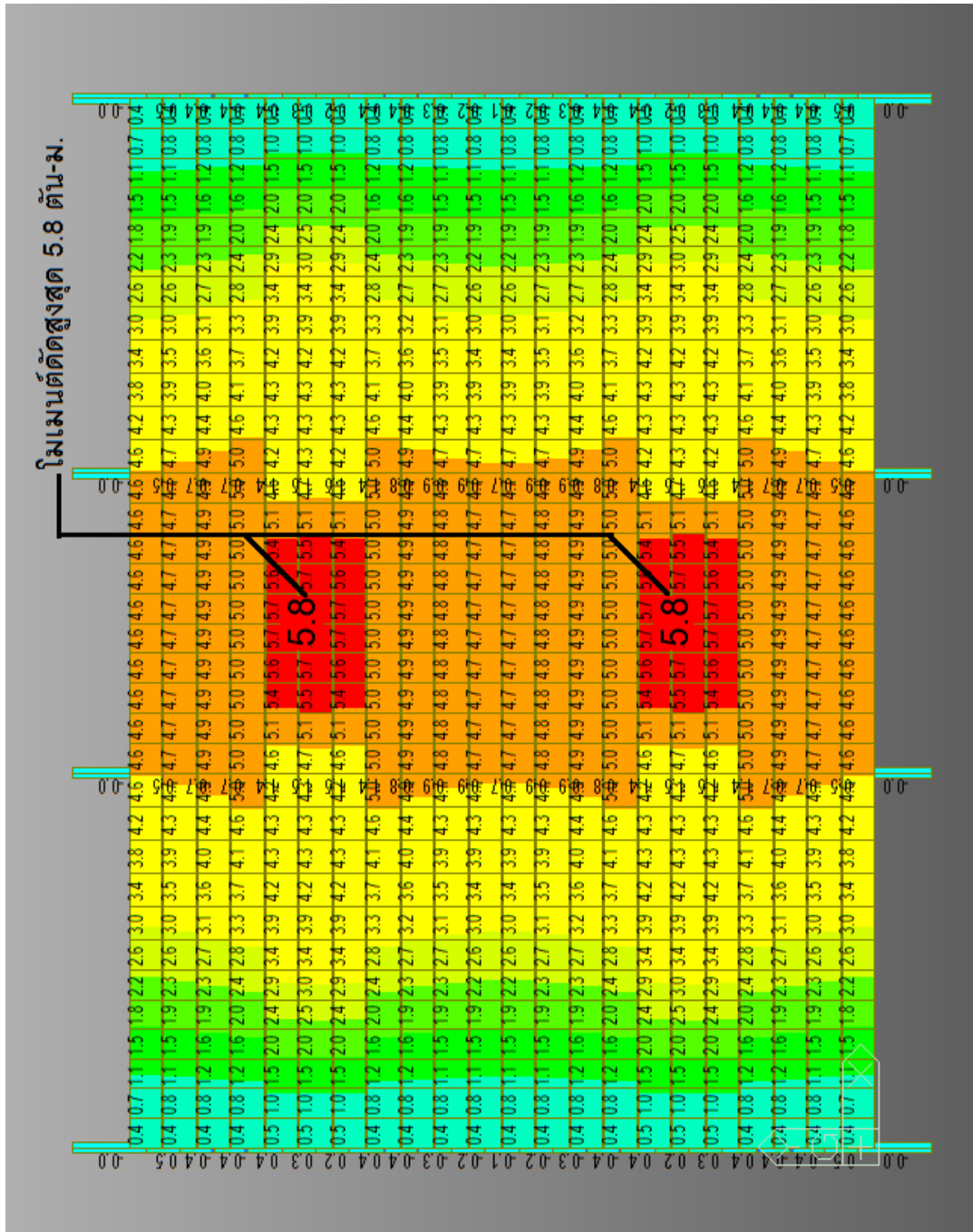
รูปที่ 5.22 แรงกระทำแบบแผ่ต่อสะพานเครื่องหมุนแบบที่ 3 กรณี 2



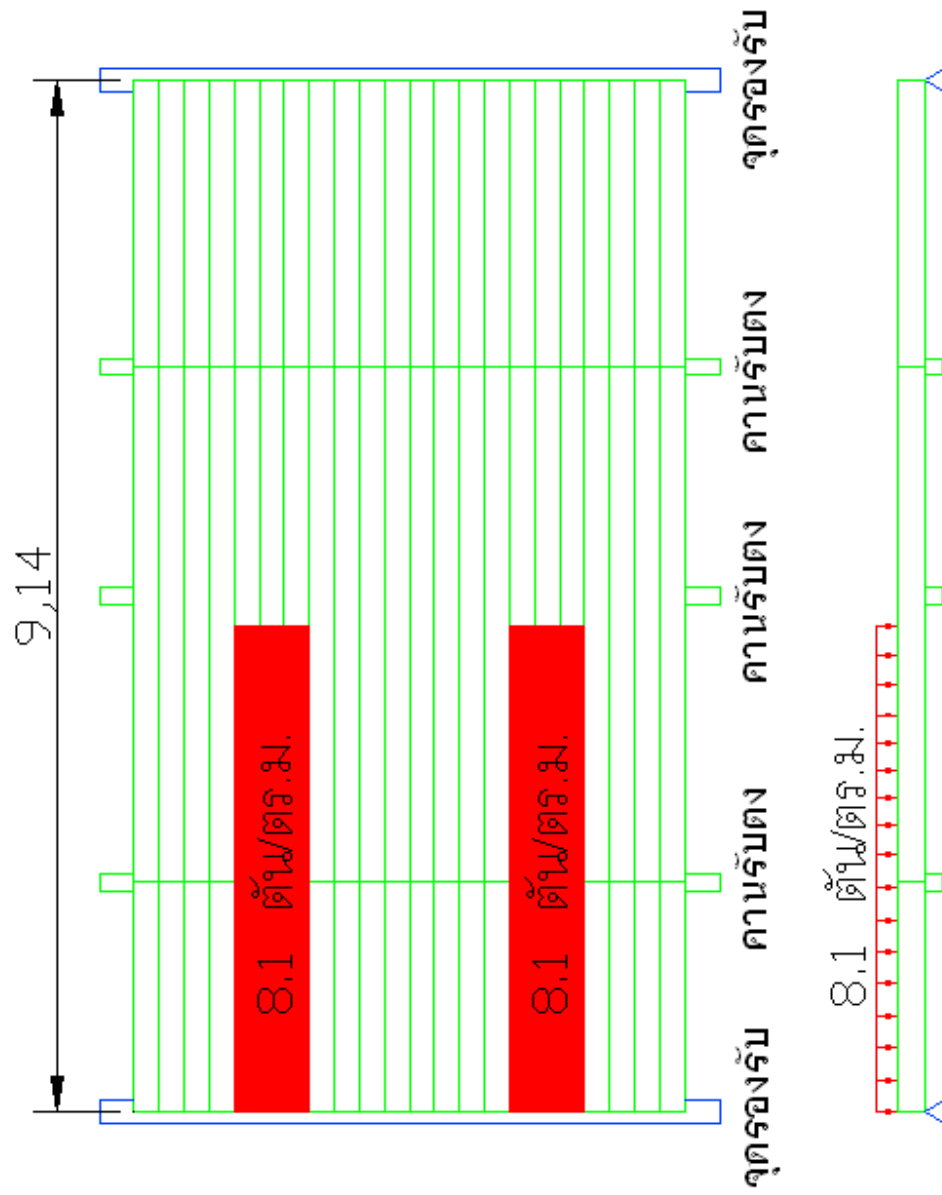
รูปที่ 5.23 แรงปฏิกิริยา สะพานเครื่องหมุนแบบที่ 3 กรณี 2



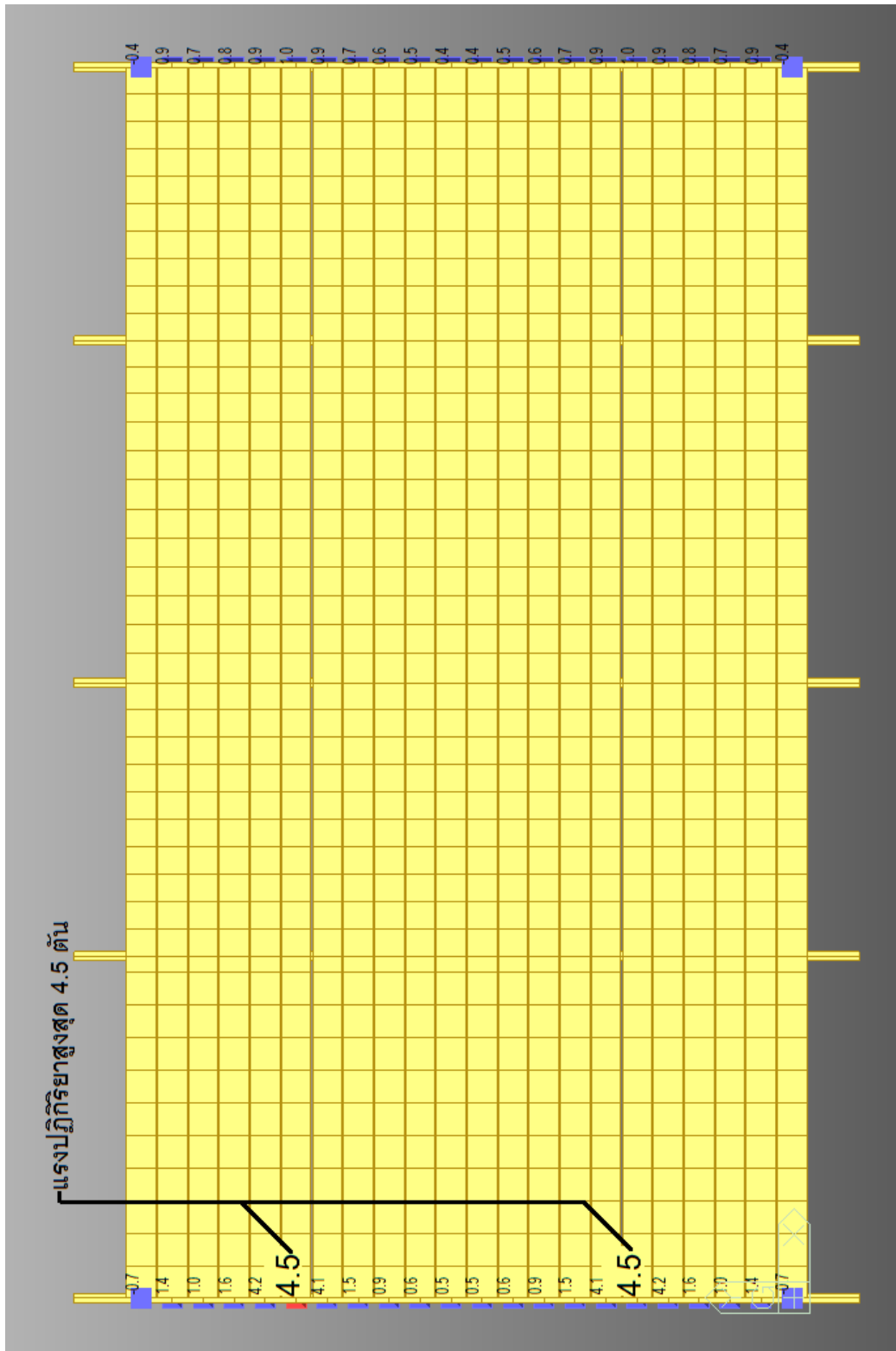
รูปที่ 5.24 แรงเฉือน สะพานเครื่องหมุนมันแบบที่ 3 กรณี 2



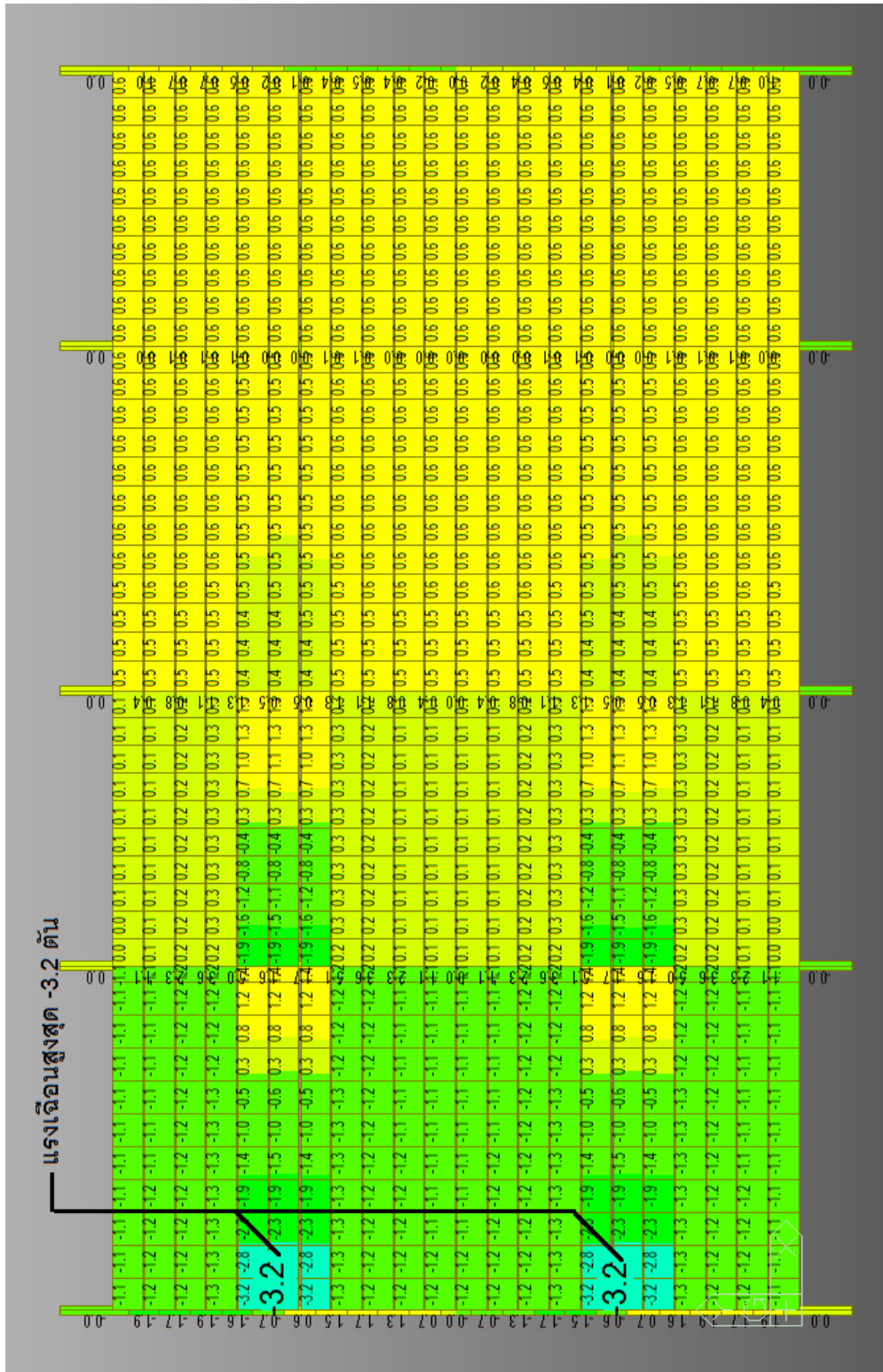
รูปที่ 5.25 โมเมนต์ตัด สะพานเครื่องหมุนมันแบบที่ 3 กรณี 2



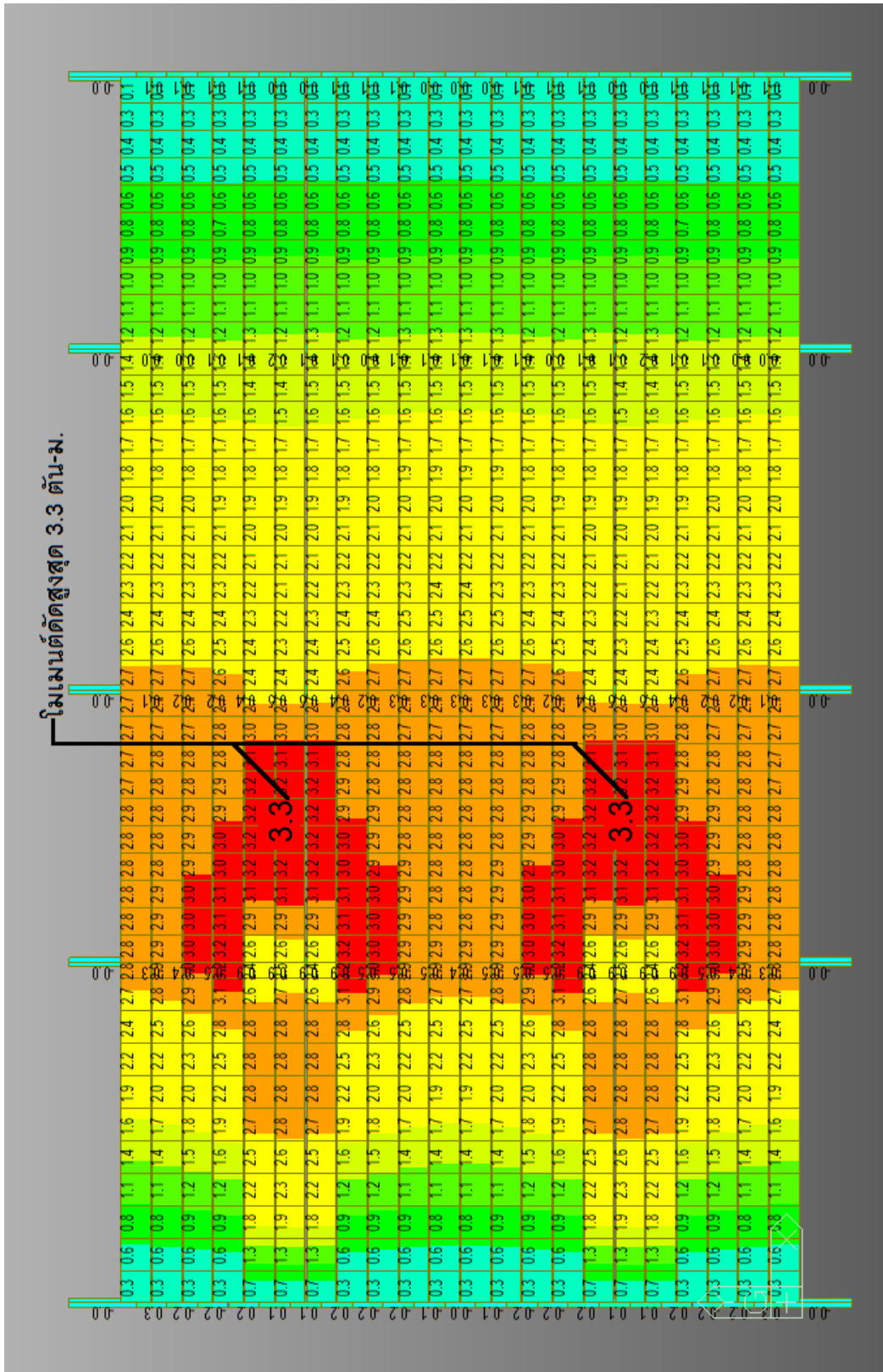
รูปที่ 5.26 แรงกระทำแบบแผ่ต่อสะพานเครื่องหมุนแบบที่ 4 กรณี 1



รูปที่ 5.27 แรงปฏิกิริยา สะพานเครืองหนุมน้ันแบบที่ 4 กรณี 1

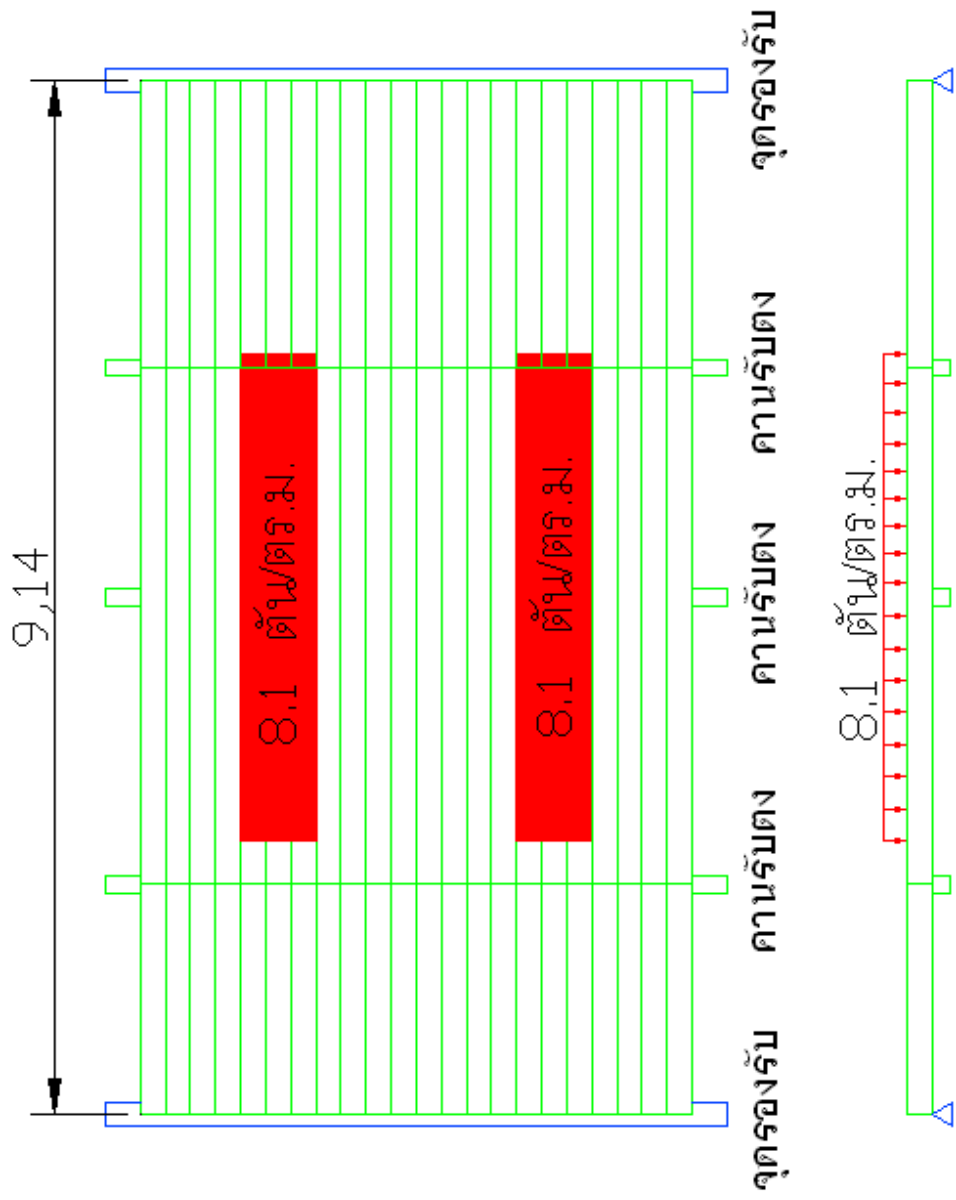


รูปที่ 5.28 แรงเฉือน สะพานเครื่องหมุนมันแบบที่ 4 กรณี 1

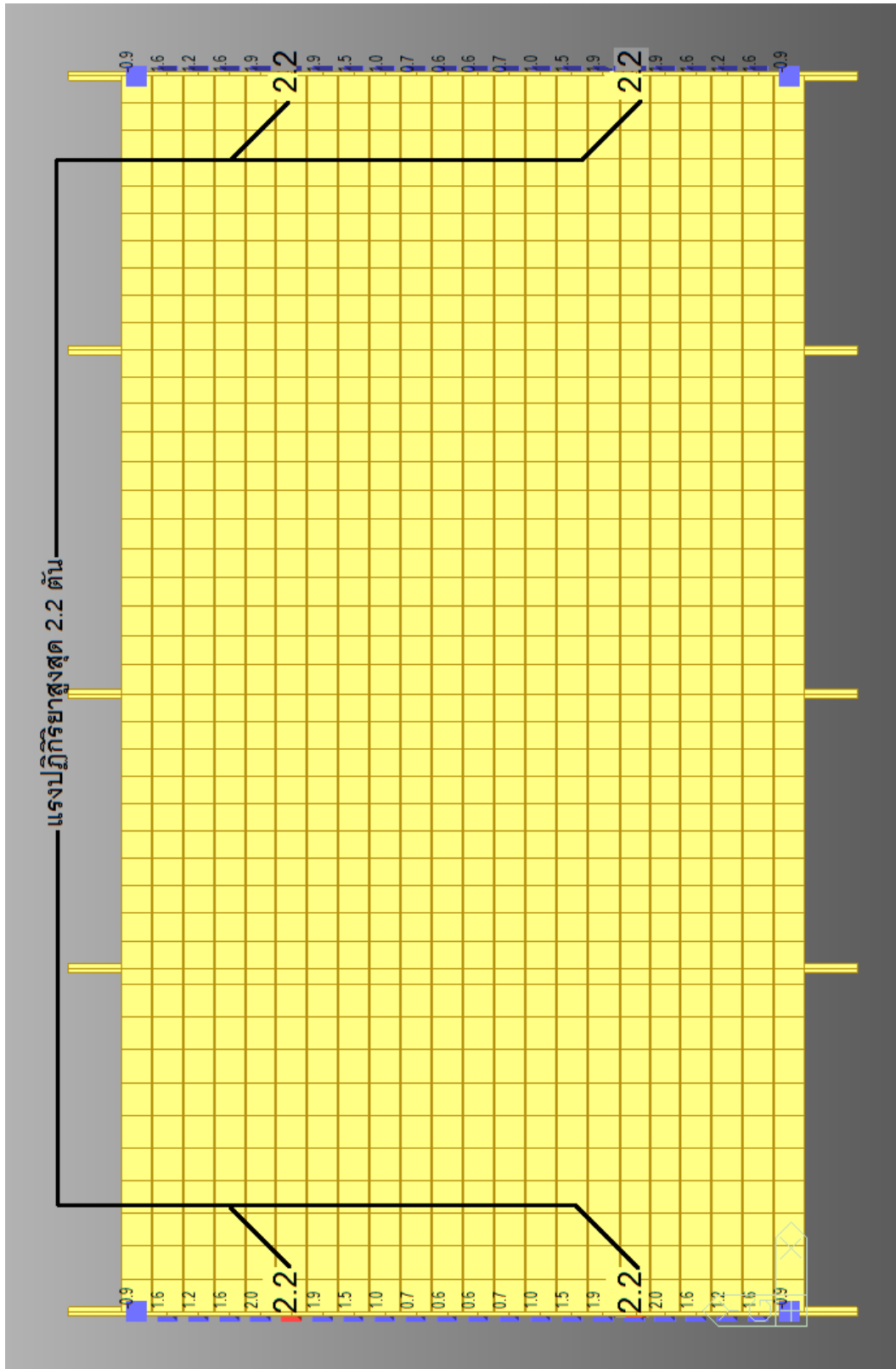


รูปที่ 5.29 โมเมนต์ตัด สะพานเครื่องหมุนมันแบบที่ 4 กรณี 1





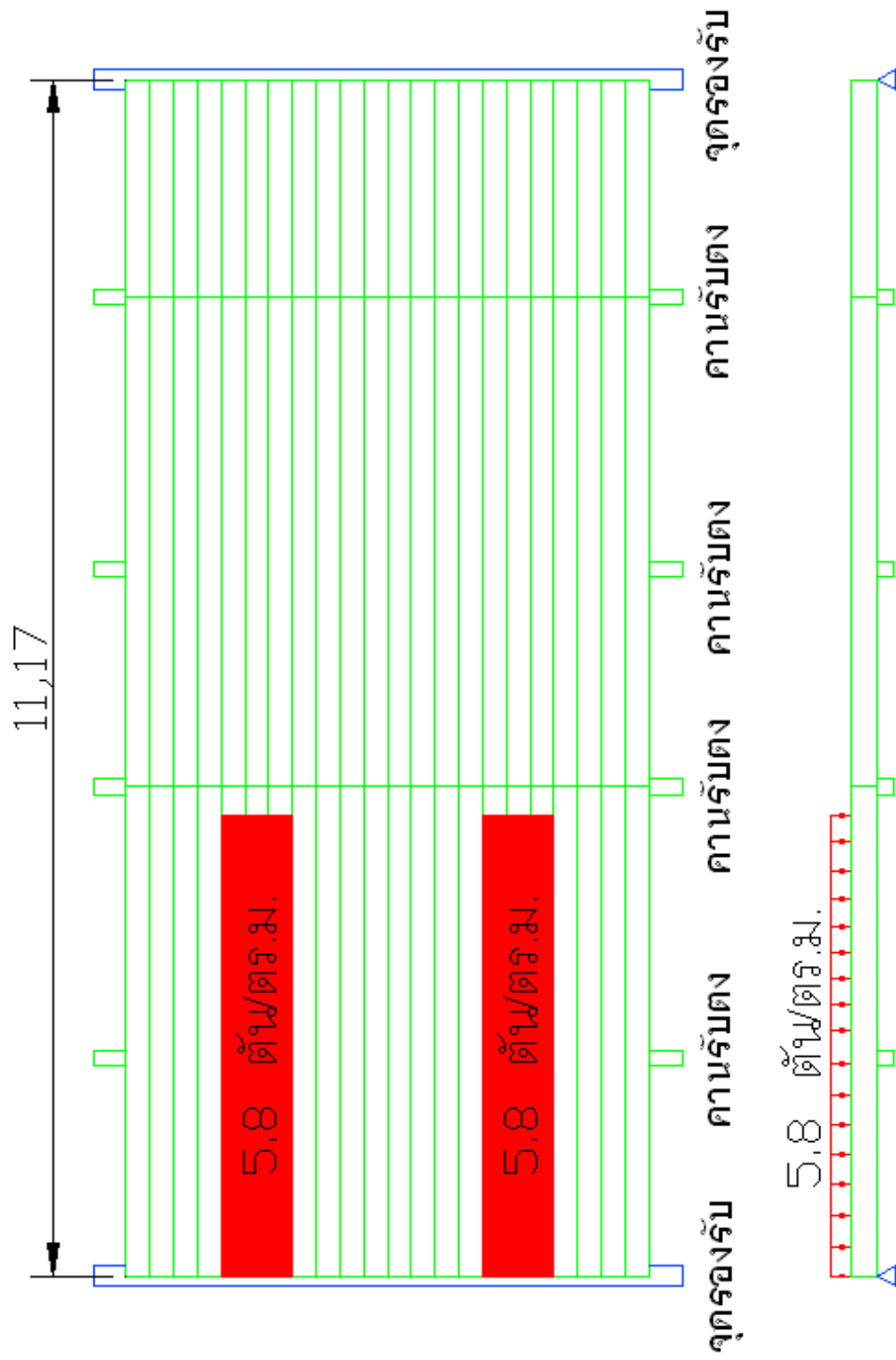
รูปที่ 5.30 แรงกระทำแบบแผ่ต่อสะพานเครื่องหมุนแบบที่ 4 กรณี 2



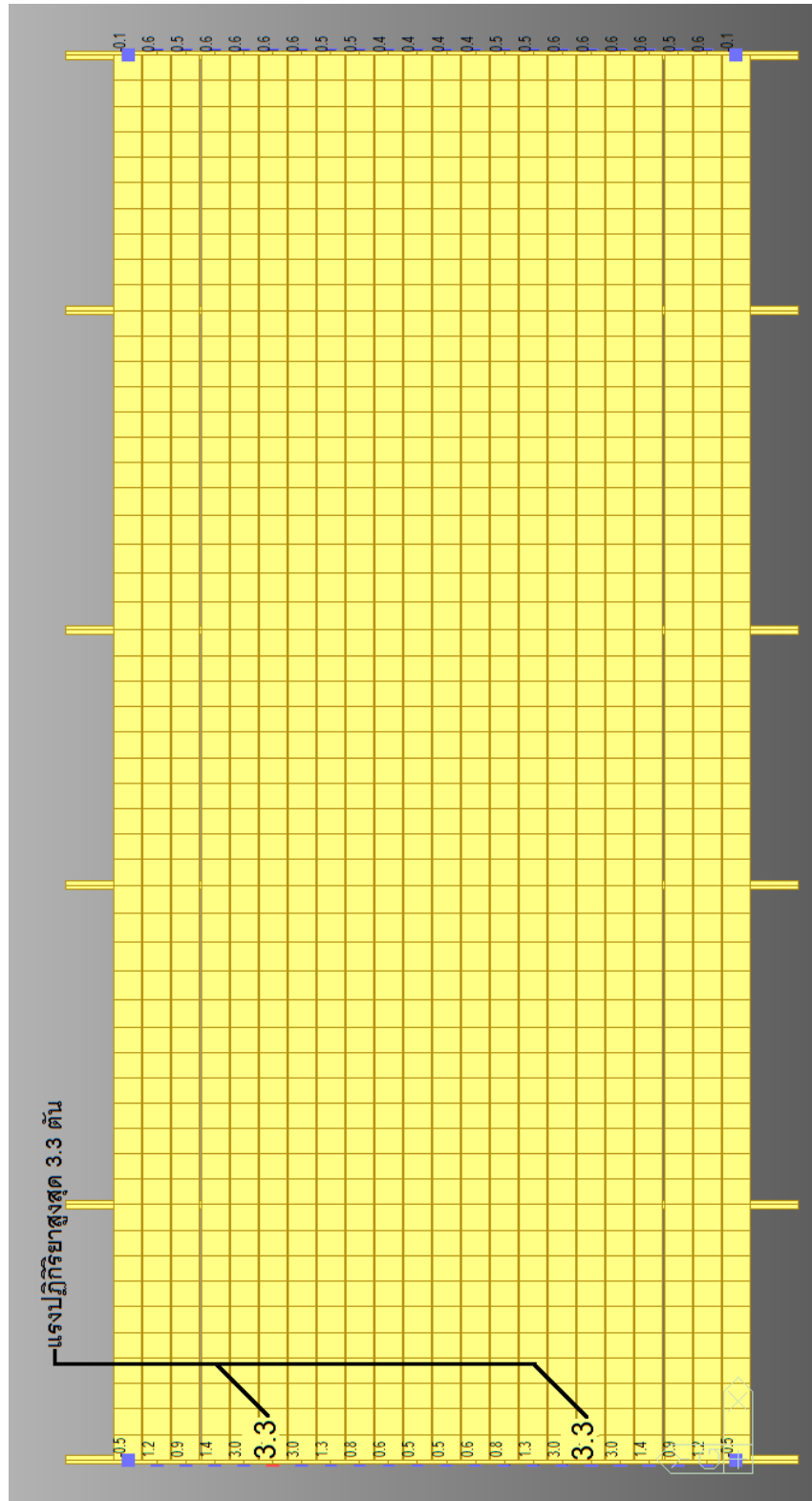
รูปที่ 5.31 แรงปฏิกิริยา สะพานเครื่องหมุนมันแบบที่ 4 กรณี 2



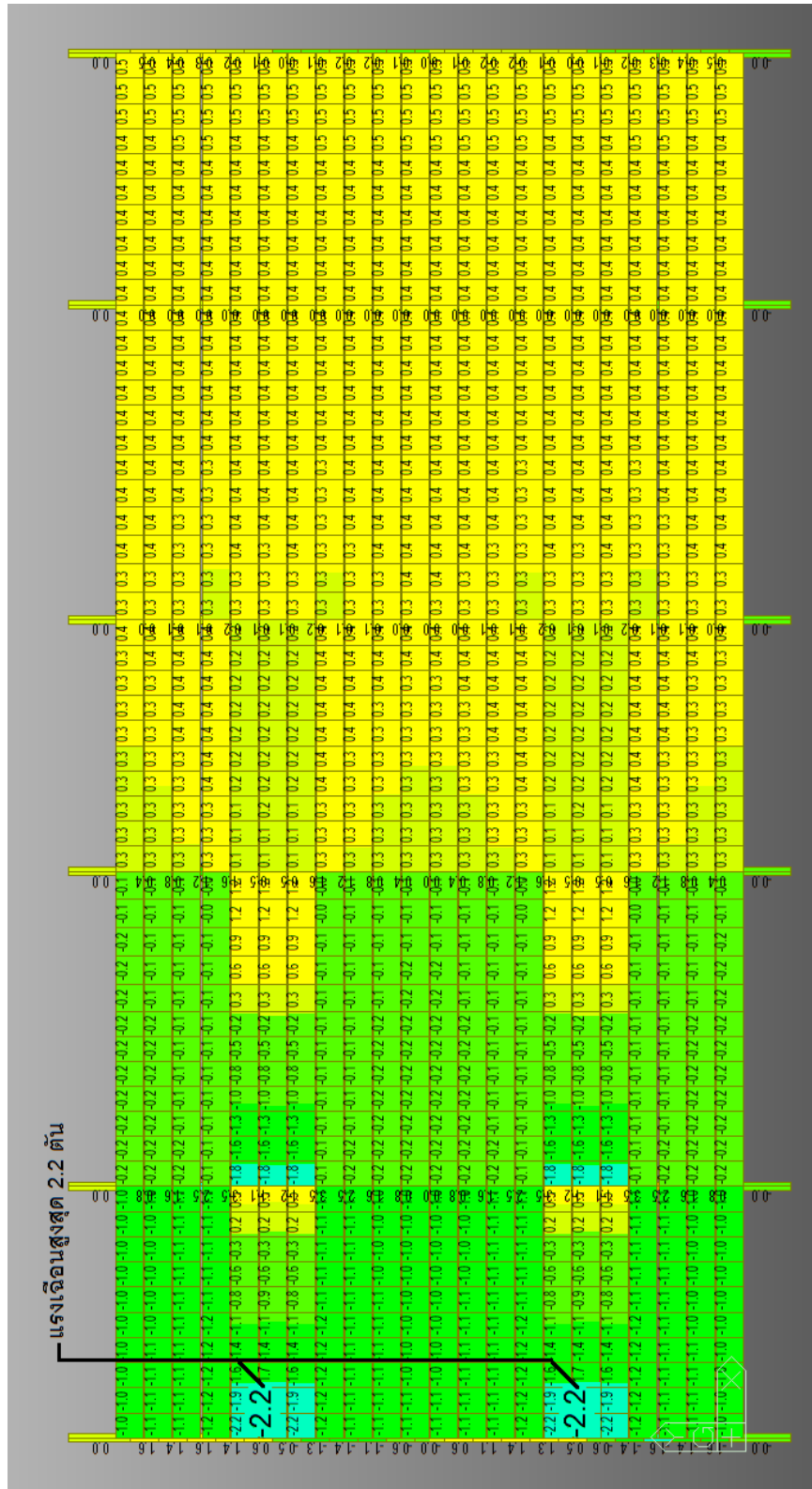




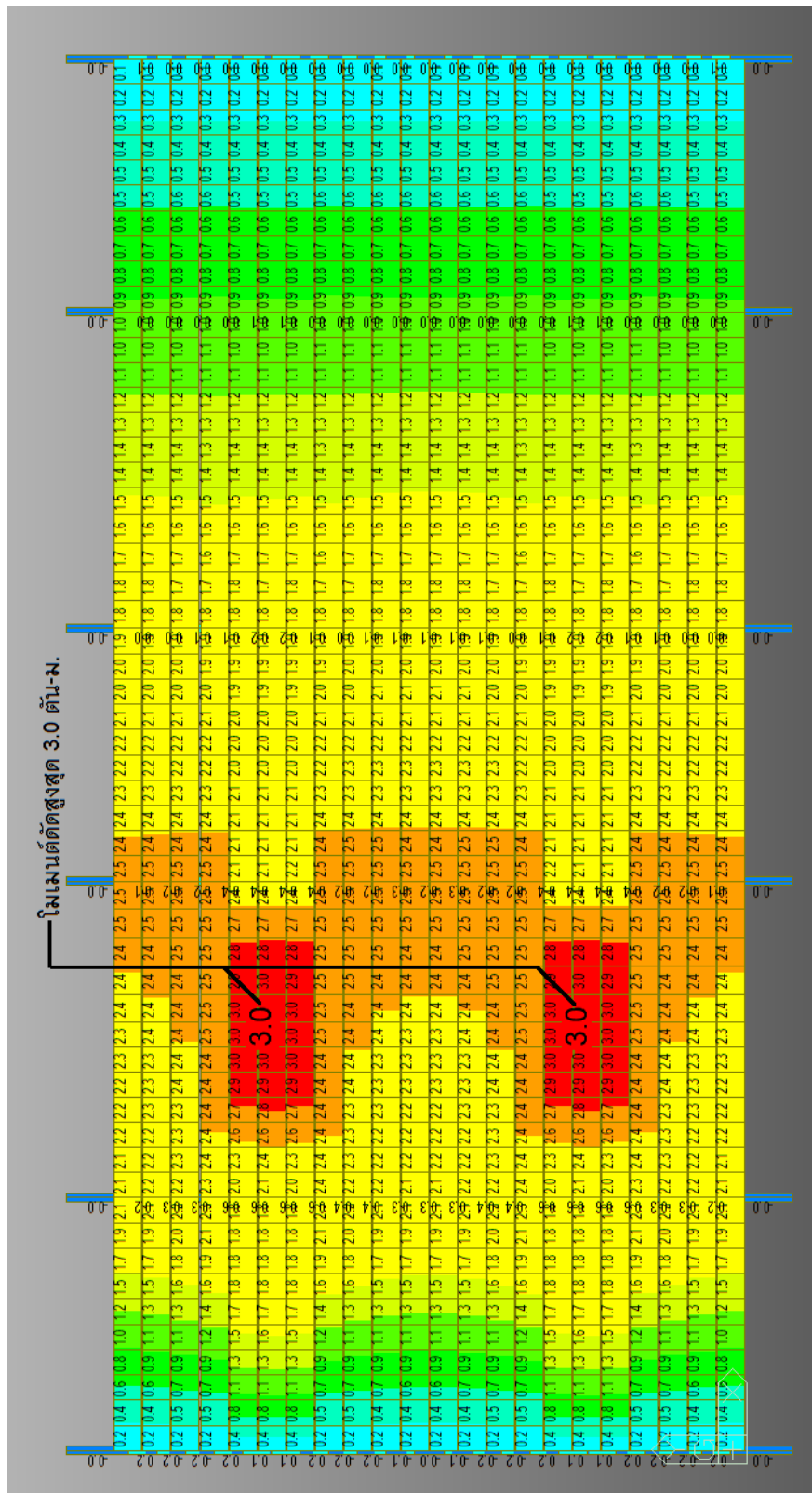
รูปที่ 5.34 แรงกระทำแบบแผ่ต่อสะพานเครื่องหมุนมันแบบที่ 5 กรณี 1



รูปที่ 5.35 แรงปฏิกิริยา สะพานเครื่องहनันแบบที่ 5 กรณี 1

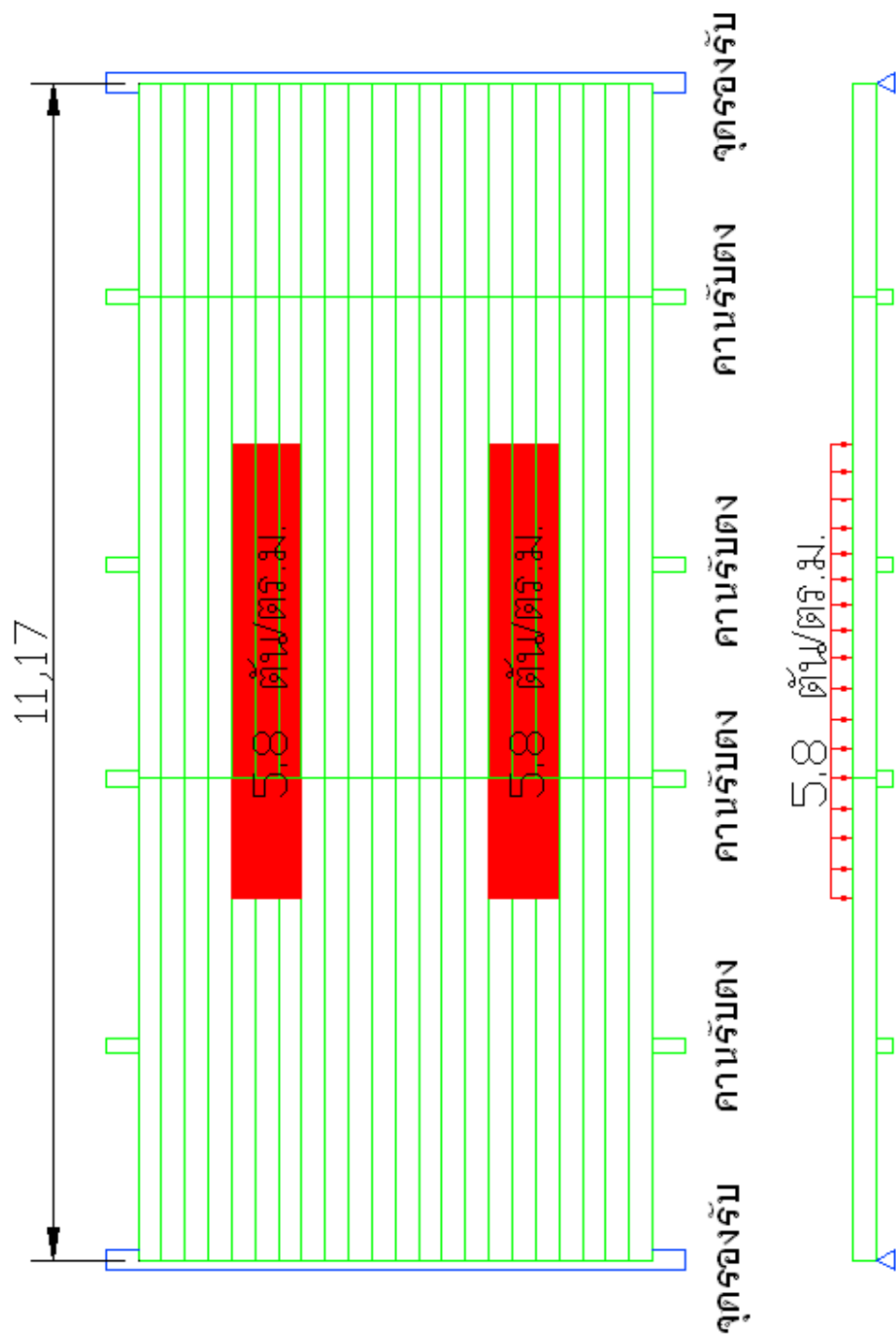


รูปที่ 5.36 แรงเฉือน สะพานเครื่องหมุนมันแบบที่ 5 กรณี 1

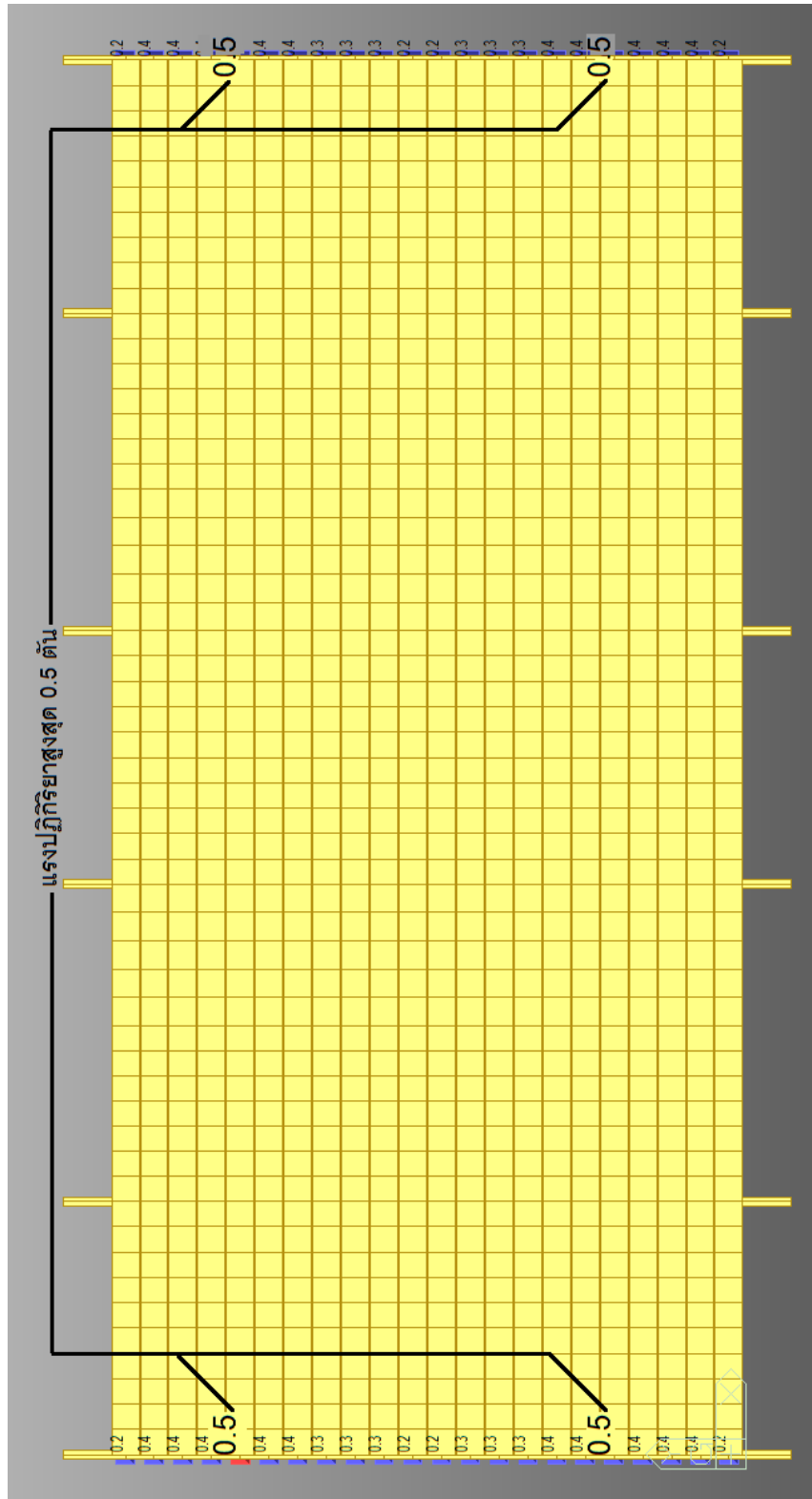


รูปที่ 5.37 โมเมนต์ตัด สะพานเครื่องหนุนแบบที่ 5 กรณี 1

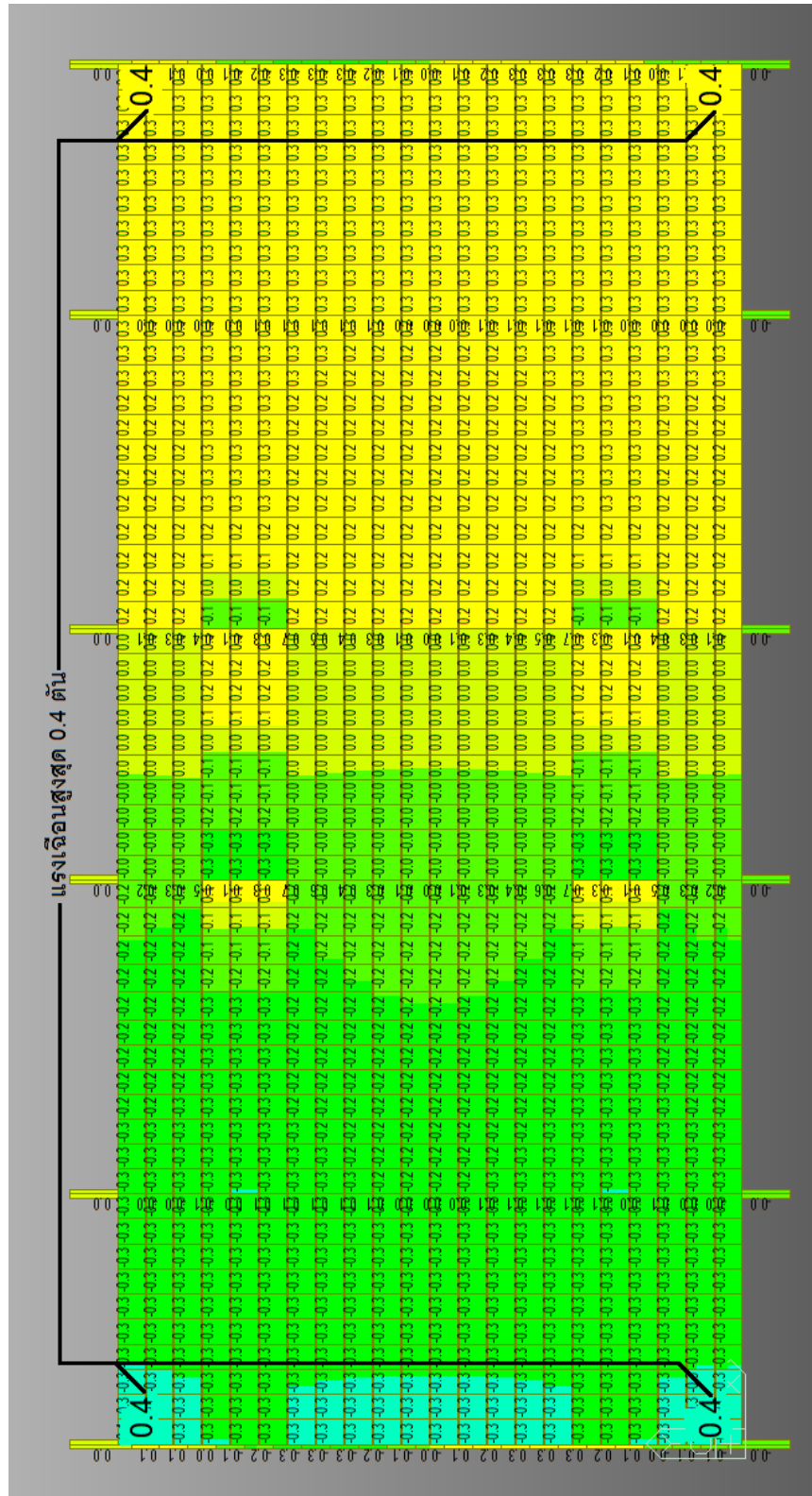




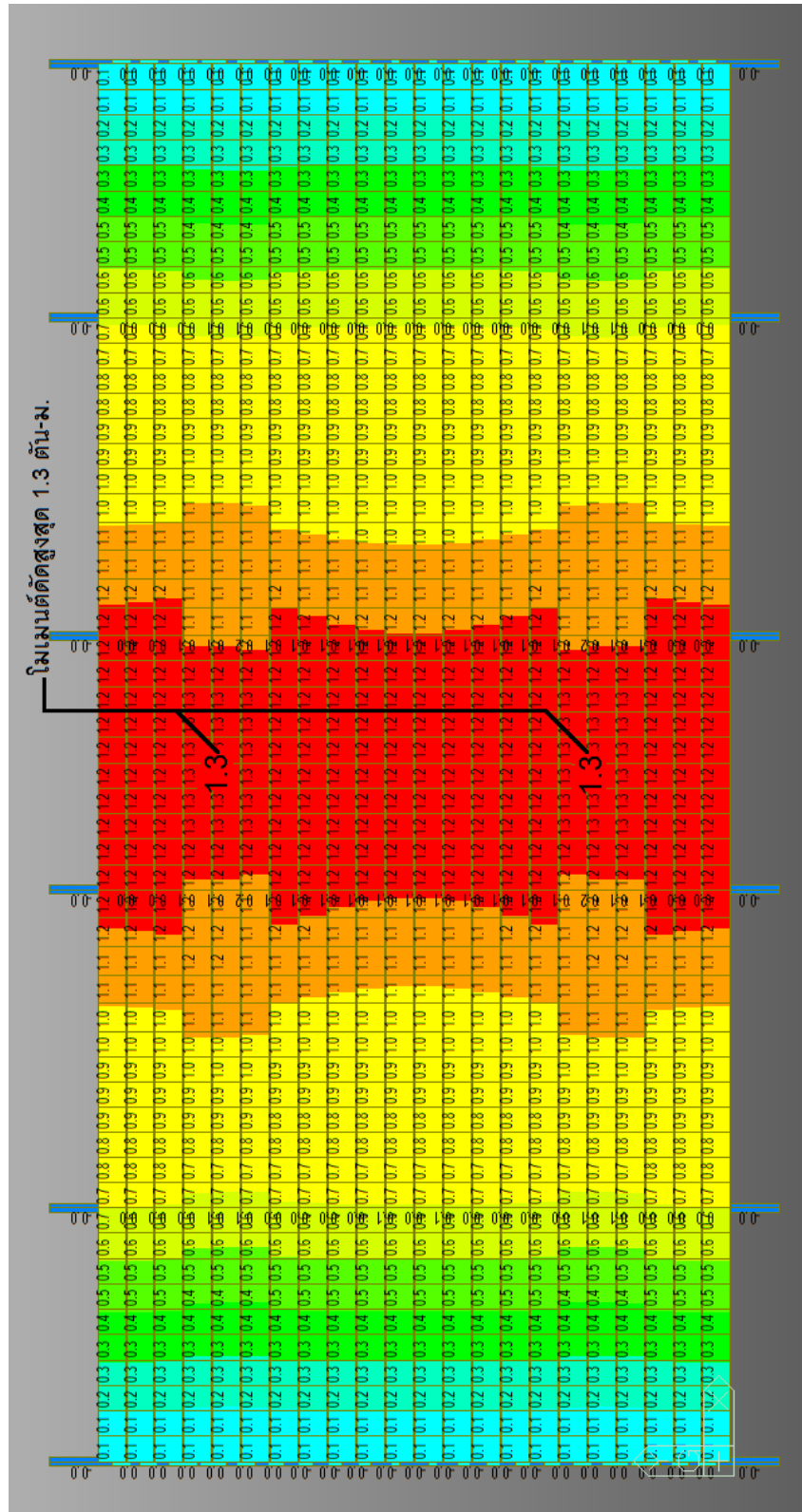
รูปที่ 5.38 แรงกระทำแบบแผ่ต่อสะพานเครื่องหมุนมันแบบที่ 5 กรณี 2



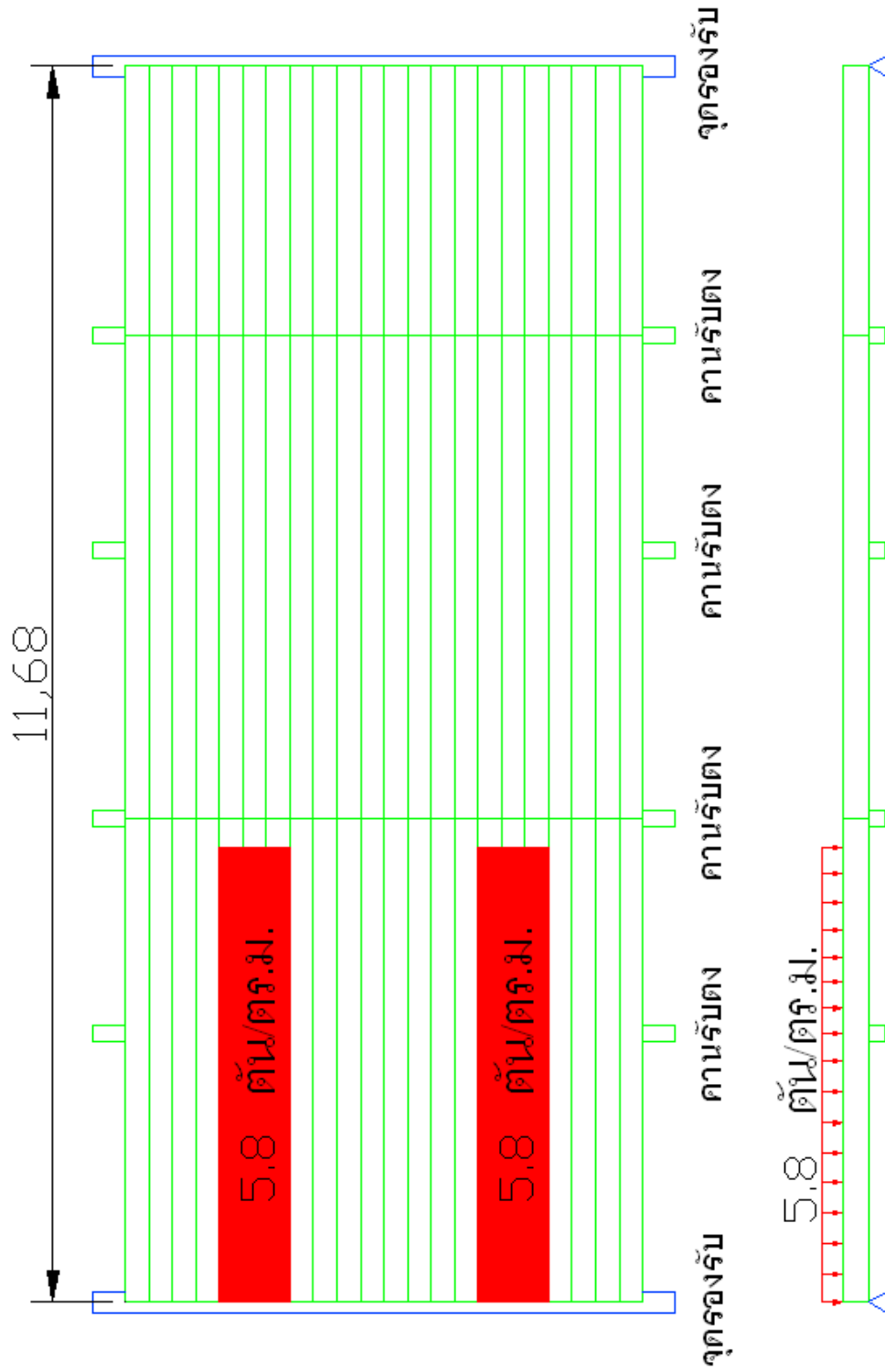
รูปที่ 5.39 แรงปฏิกิริยา สะพานเครื่องหนุมน้ำมันแบบที่ 5 กรณี 2



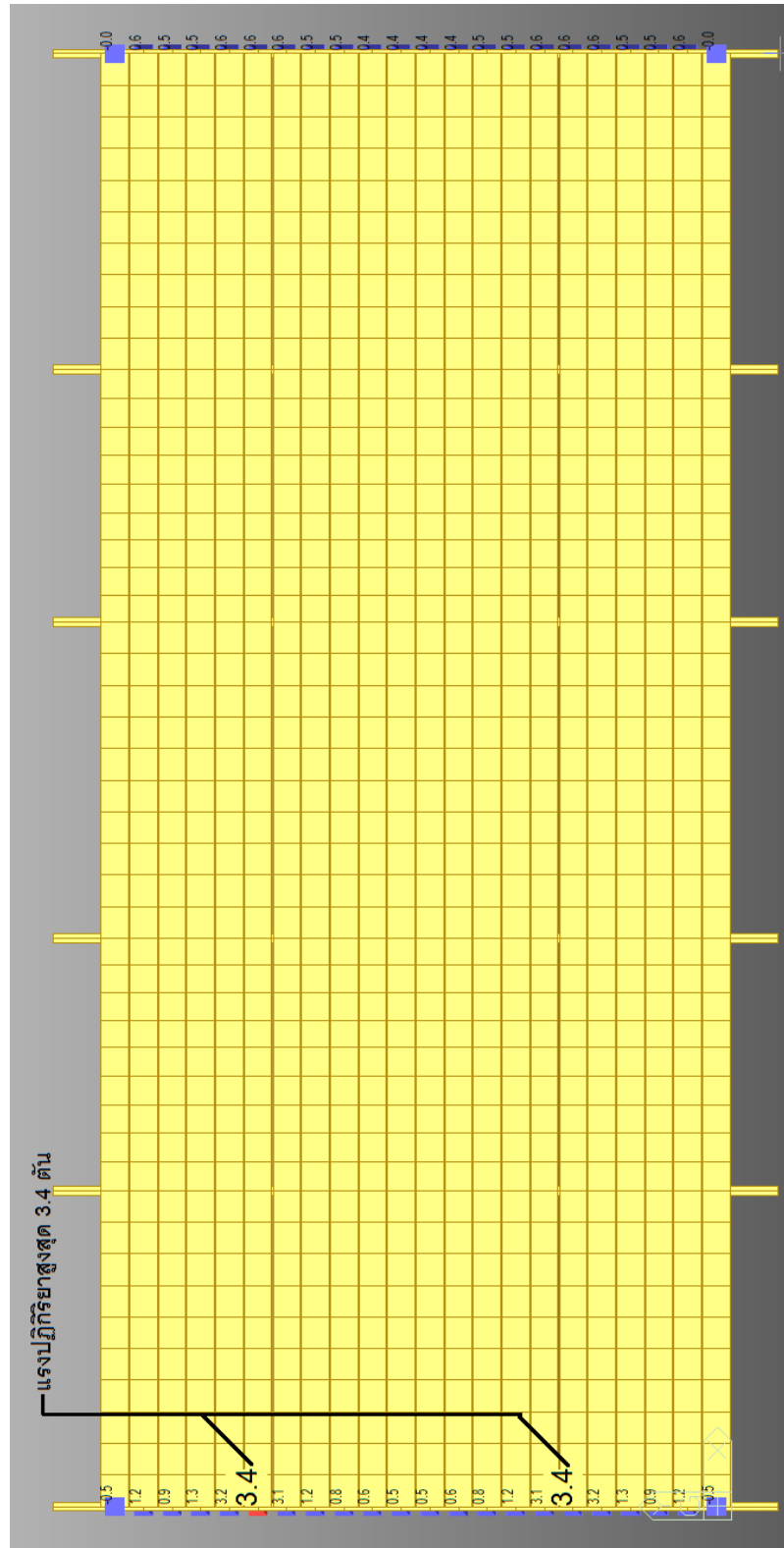
รูปที่ 5.40 แรงเหวี่ยง สะพานเครื่องหมุนแบบที่ 5 กรณิ 2



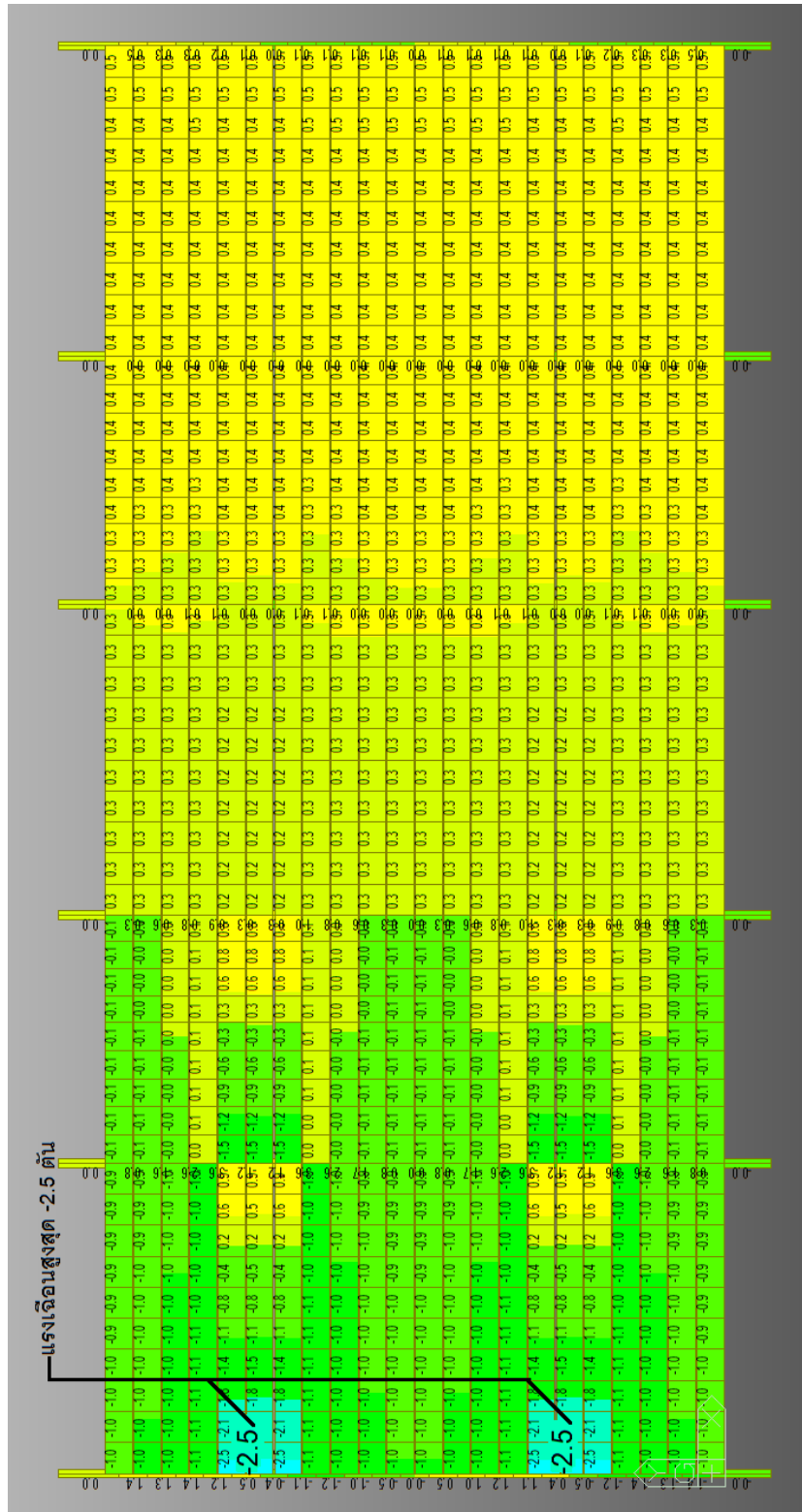
รูปที่ 5.41 โมเมนต์ตัด สะพานเครื่องหมุนมันแบบที่ 5 กรณี 2



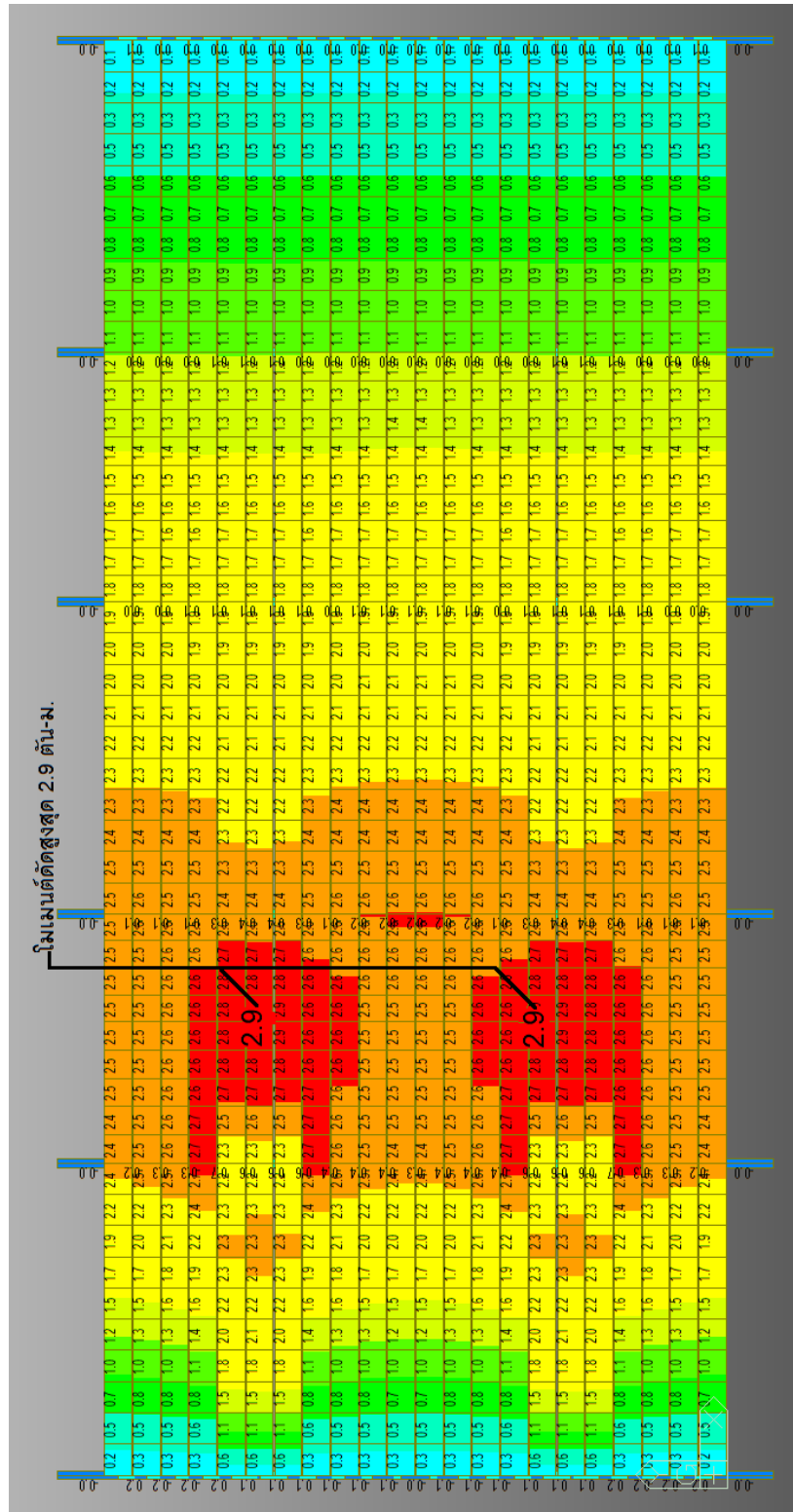
รูปที่ 5.42 แรงกระทำแบบแผ่ต่อสะพานเครื่องหมุนแบบที่ 6 กรณี 1



รูปที่ 5.43 แรงปฏิกิริยา สะพานเครื่องหมุนมันแบบที่ 6 กรณี 1

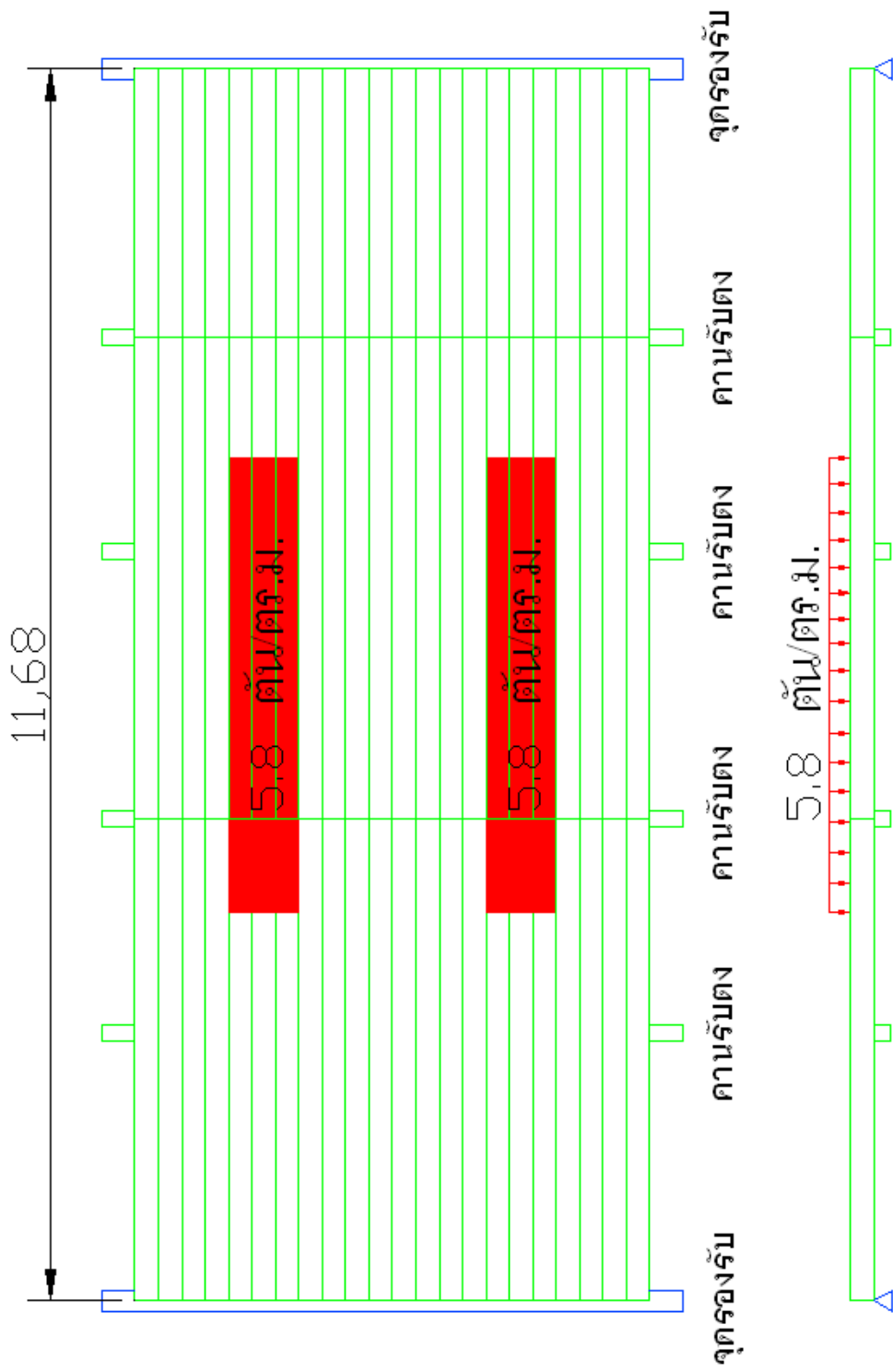


รูปที่ 5.44 แรงเฉือน สะพานเครื่องหนูน้มน้แบบที่ 6 กรณี 1

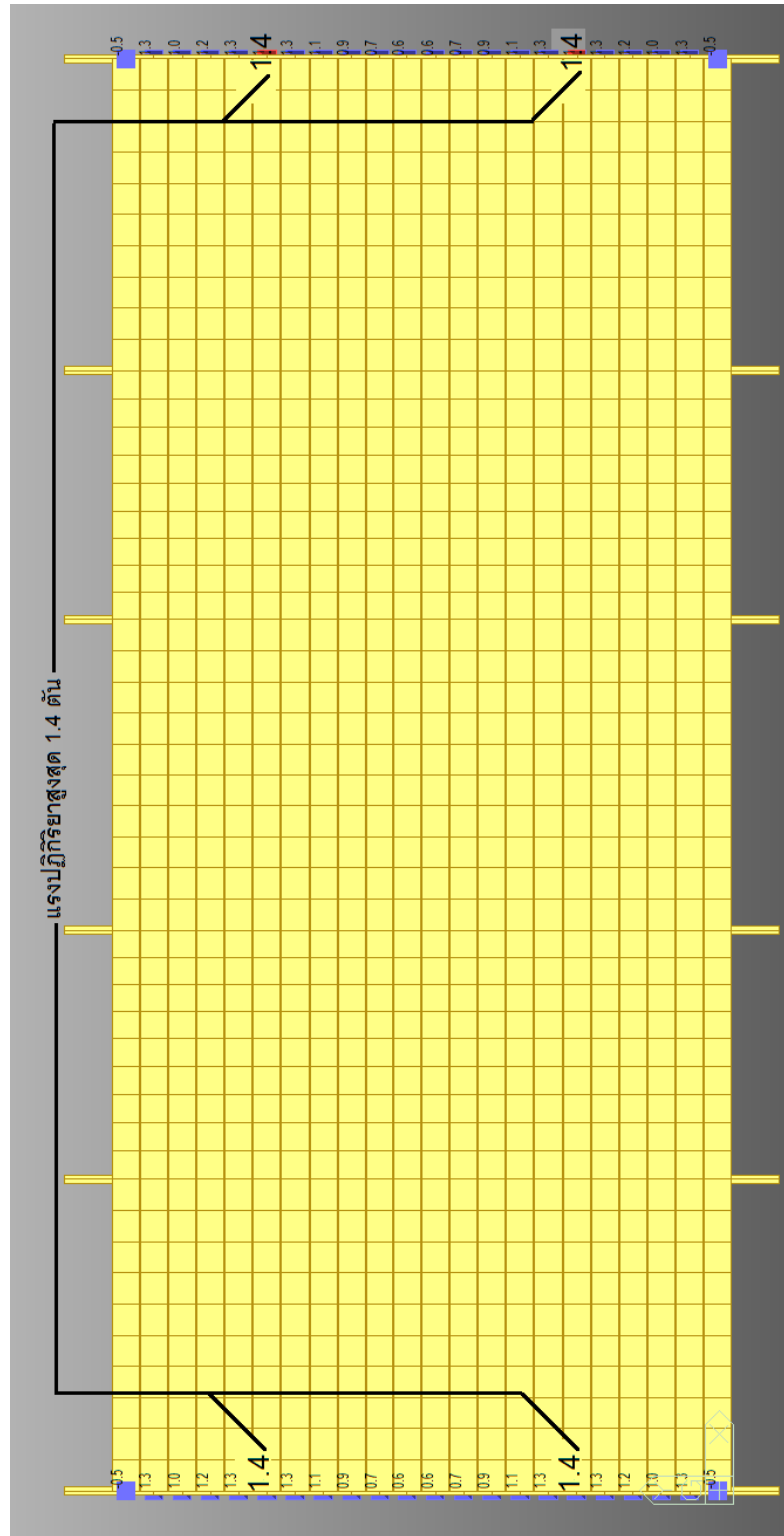


รูปที่ 5.45 โมเมนต์ตัด สะพานเครื่องบินแบบที่ 6 กรณี 1

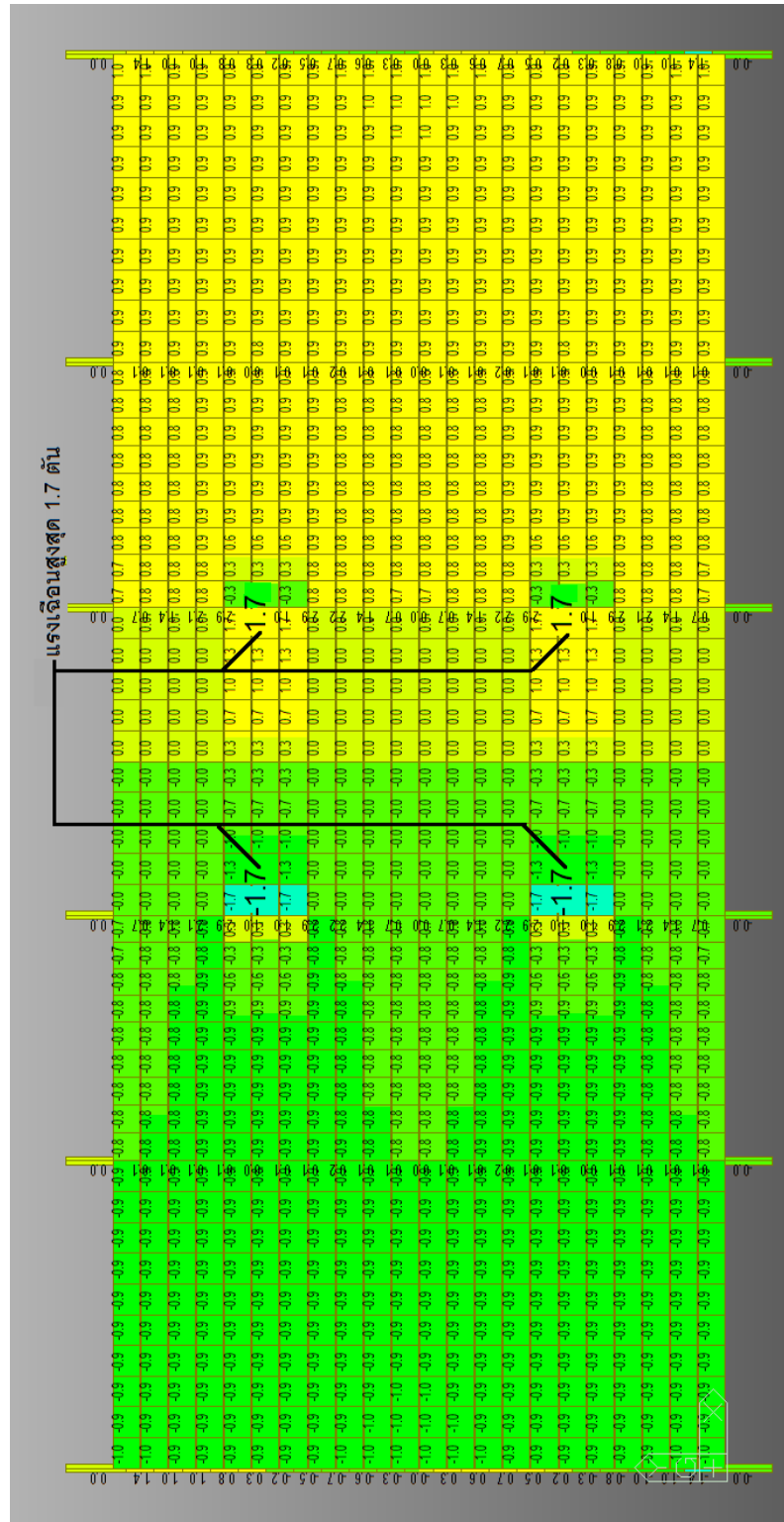




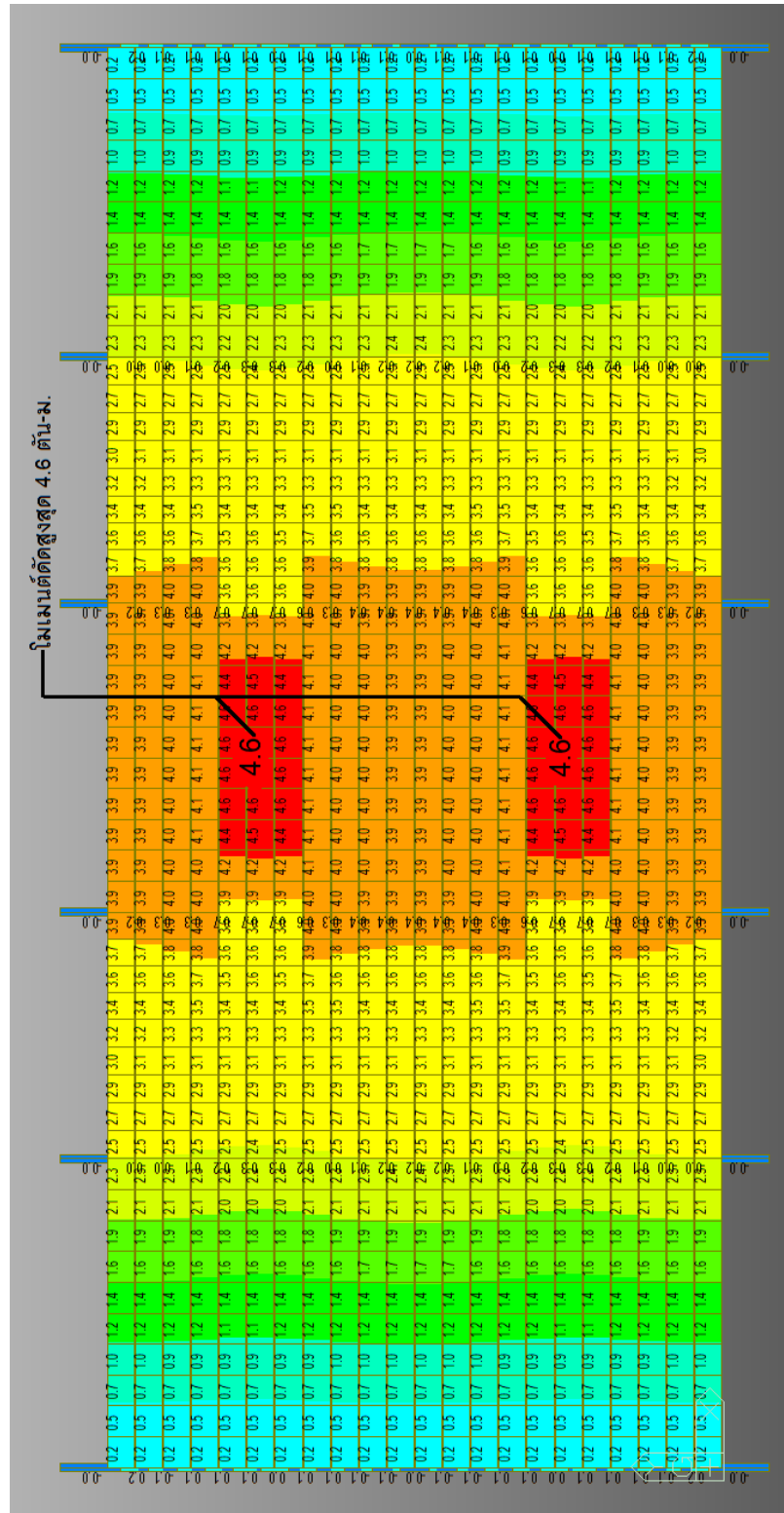
รูปที่ 5.46 แรงกระทำแบบแผ่ต่อสะพานเครื่องหมุนน้ำมันแบบที่ 6 กรณี 2



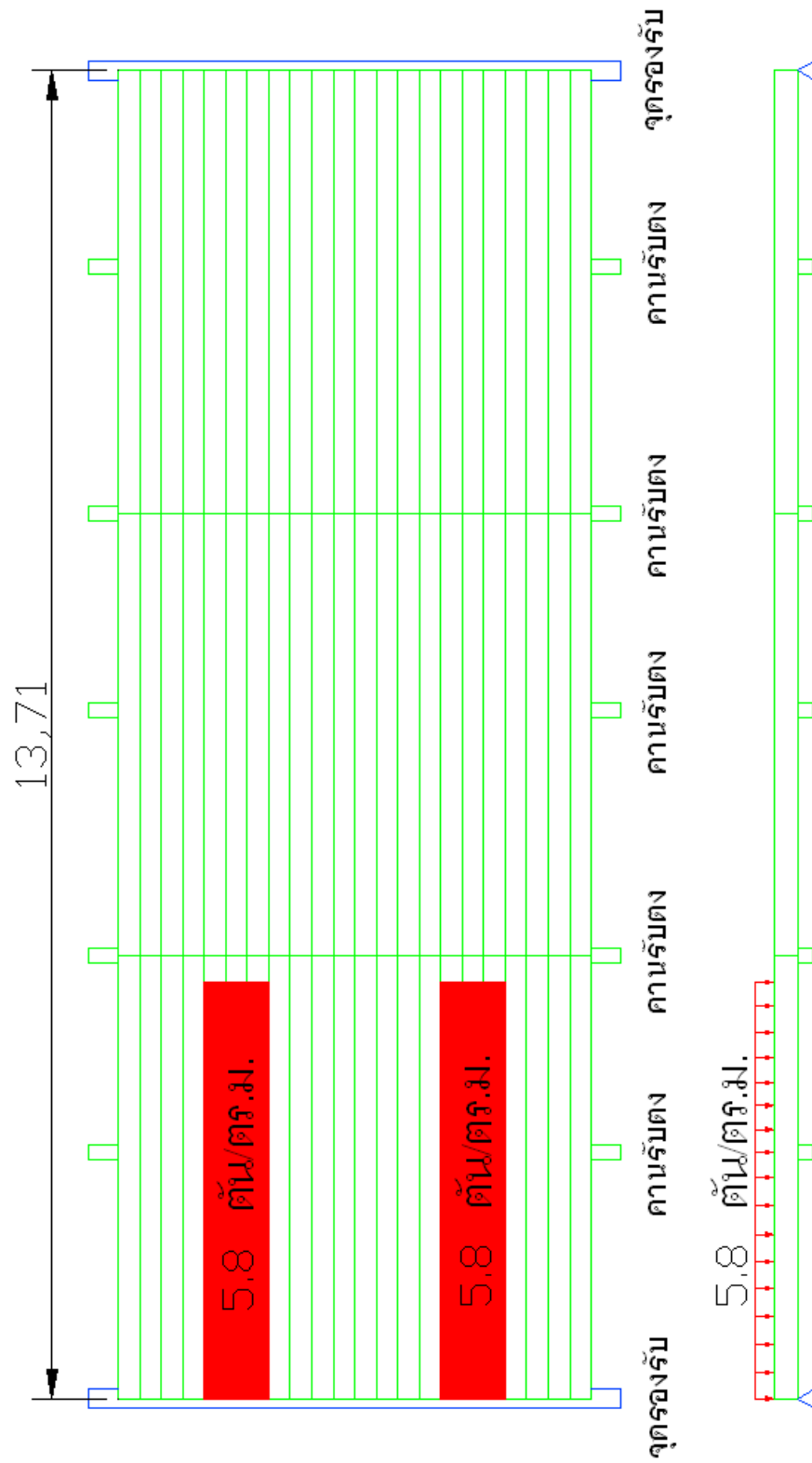
รูปที่ 5.47 แรงปฏิกิริยา สะพานเครื่องหมุนแบบที่ 6 กรณี 2



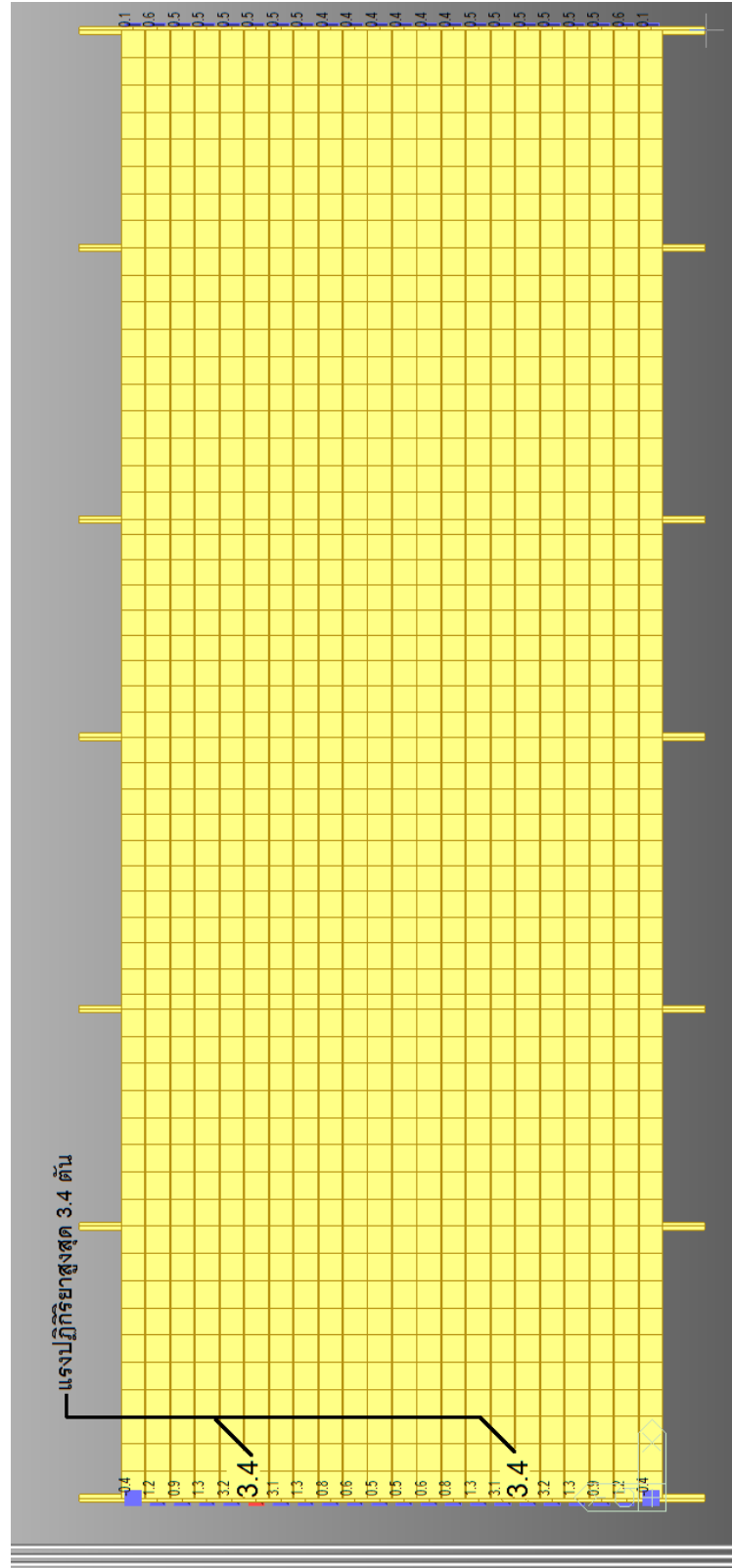
รูปที่ 5.48 แรงเดิน สะพานเครื่องหนุนมันแบบที่ 6 กรณี 2



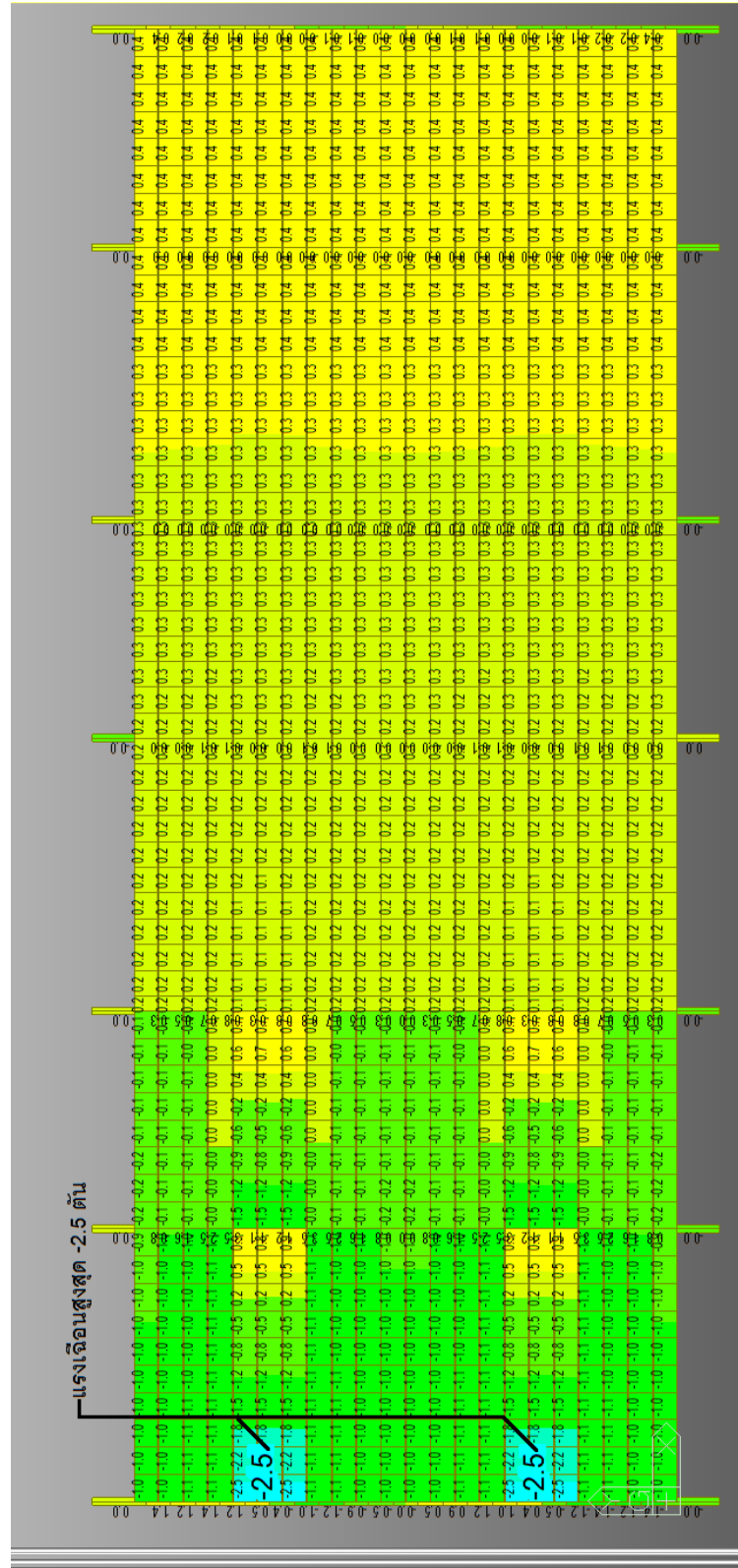
รูปที่ 5.49 ผลการวิเคราะห์โมเมนต์ตัด สะพานเครื่องบินแบบที่ 6 กรณี 2



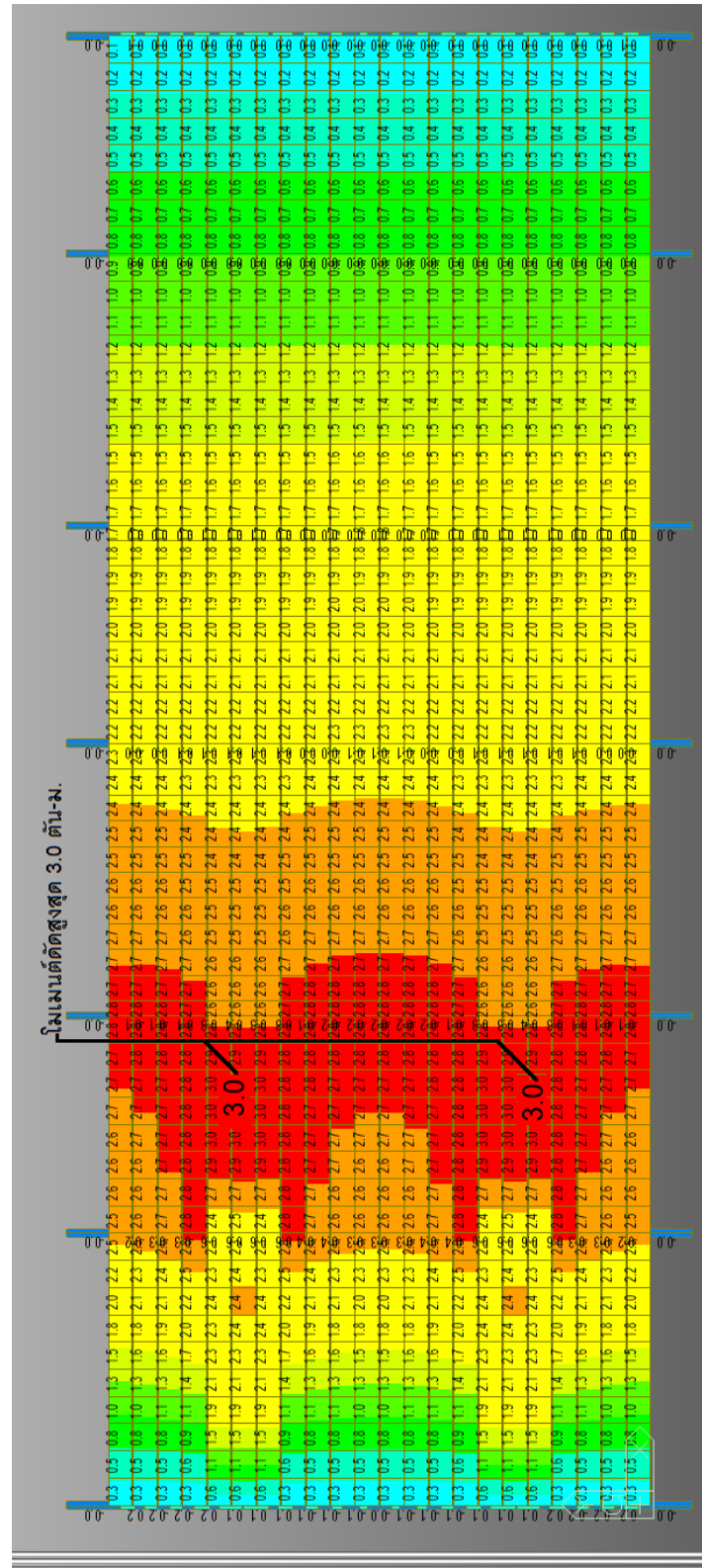
รูปที่ 5.50 แรงกระทำแบบแผ่ต่อสะพานเครื่องหมุนมันแบบที่ 7 กรณี 1



รูปที่ 5.51 แรงปฏิกิริยา สะพานเครื่องหนุมนั้นแบบที่ 7 กรณื 1

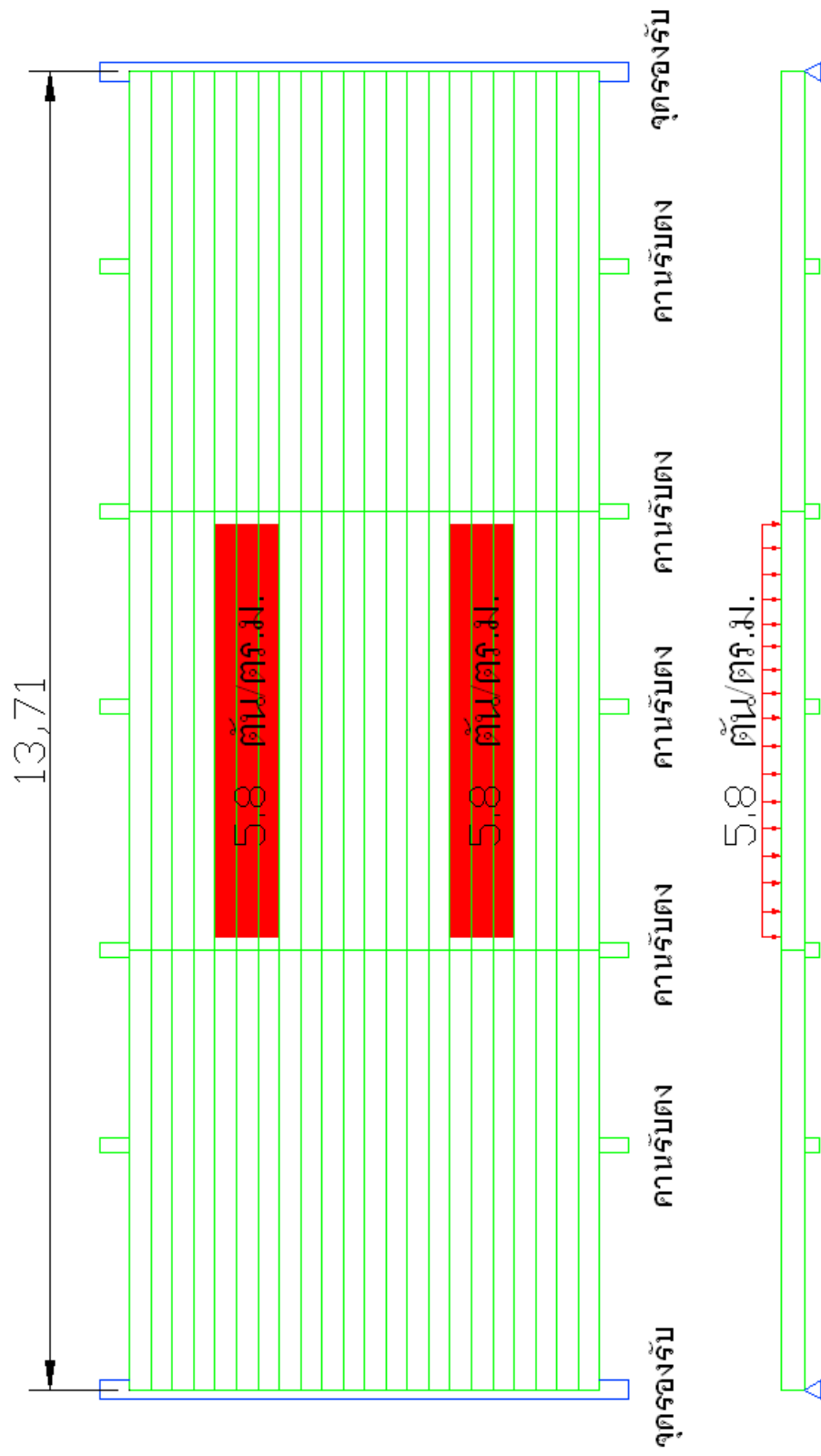


รูปที่ 5.52 แรงเฉือน สะพานเครื่องบินแบบที่ 7 กรณี 1

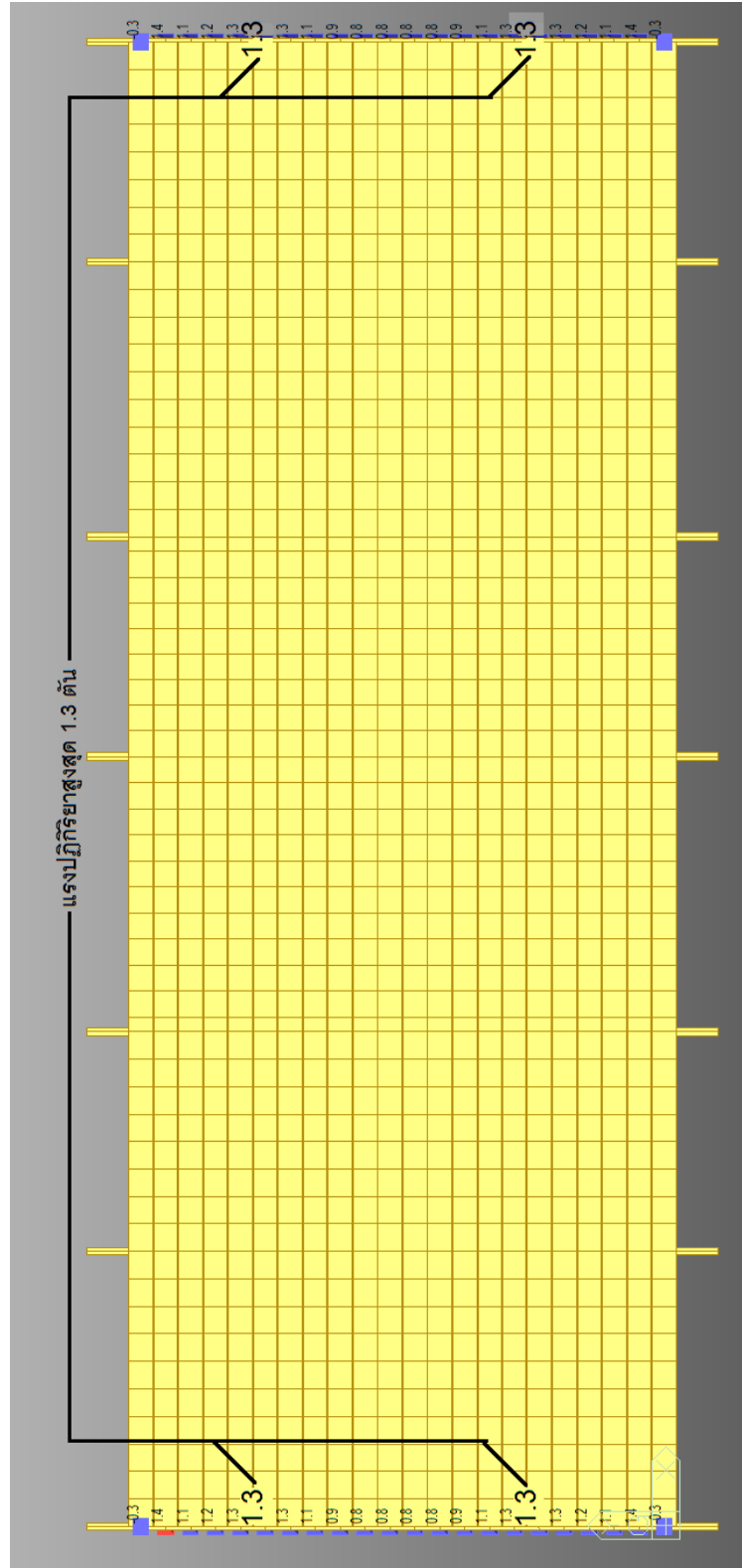


รูปที่ 5.53 โมเมนต์ตัด สะพานเครื่องหนูน้ำมันแบบที่ 7 กรณี 1

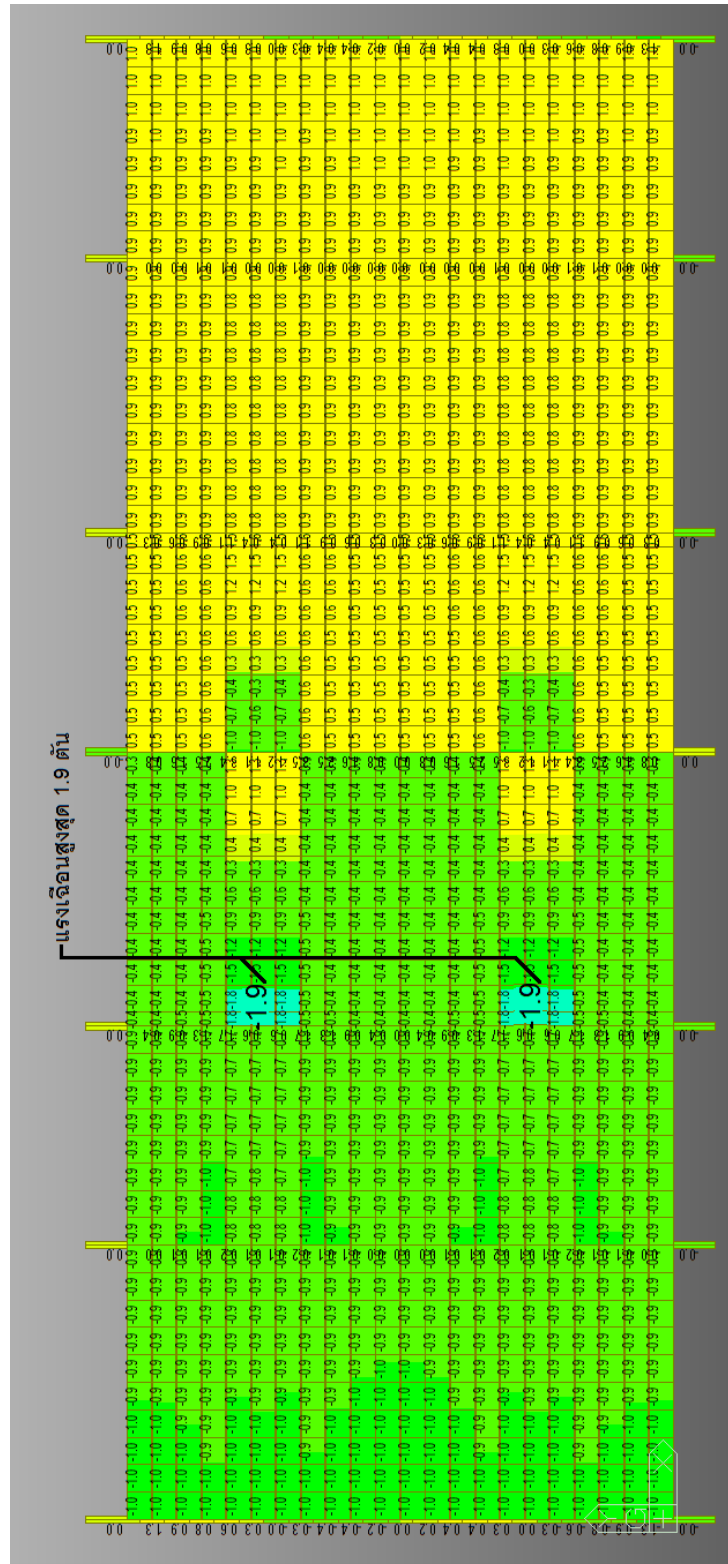




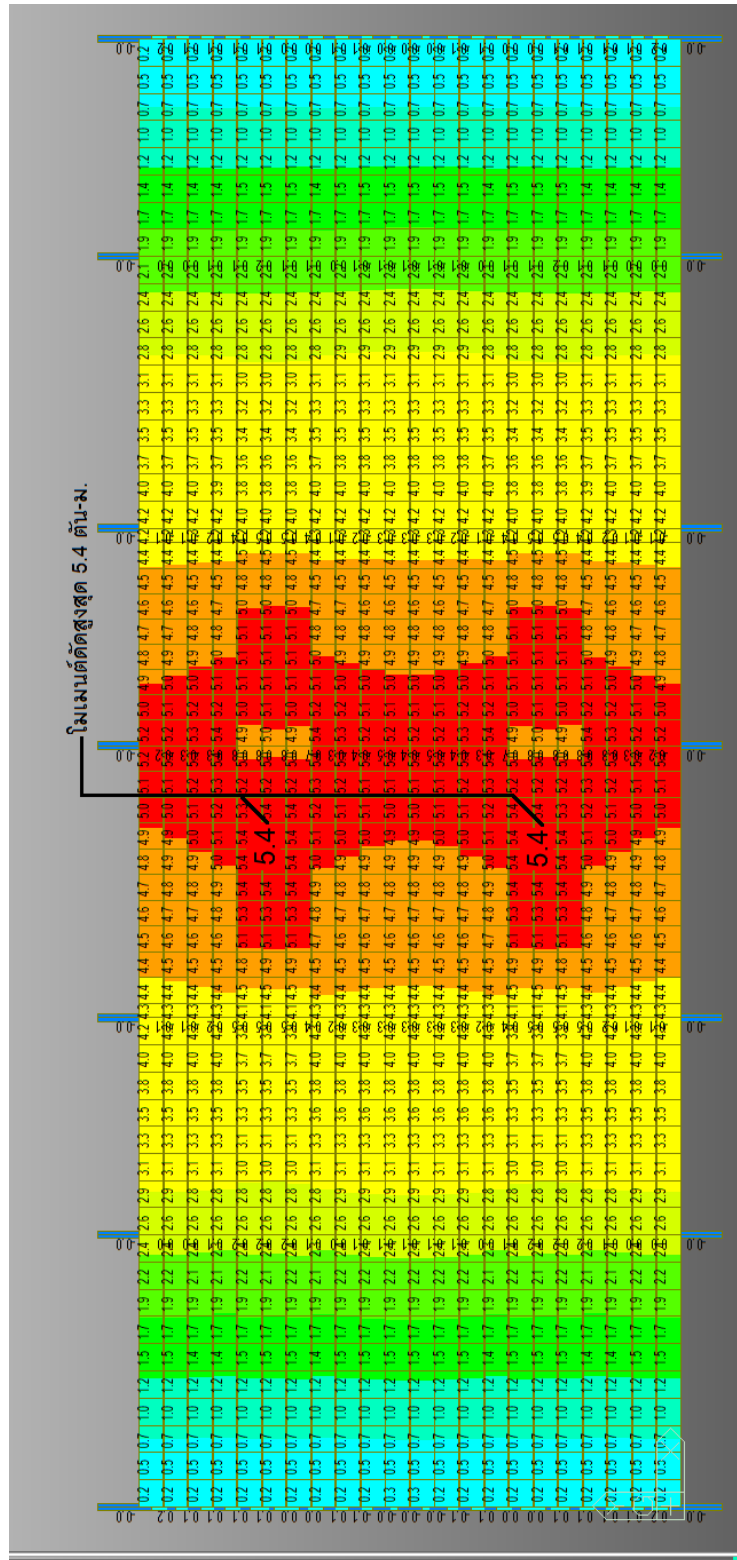
รูปที่ 5.54 แรงกระทำแบบแผ่ต่อสะพานเครื่องหมุนมันแบบที่ 7 กรณี 2



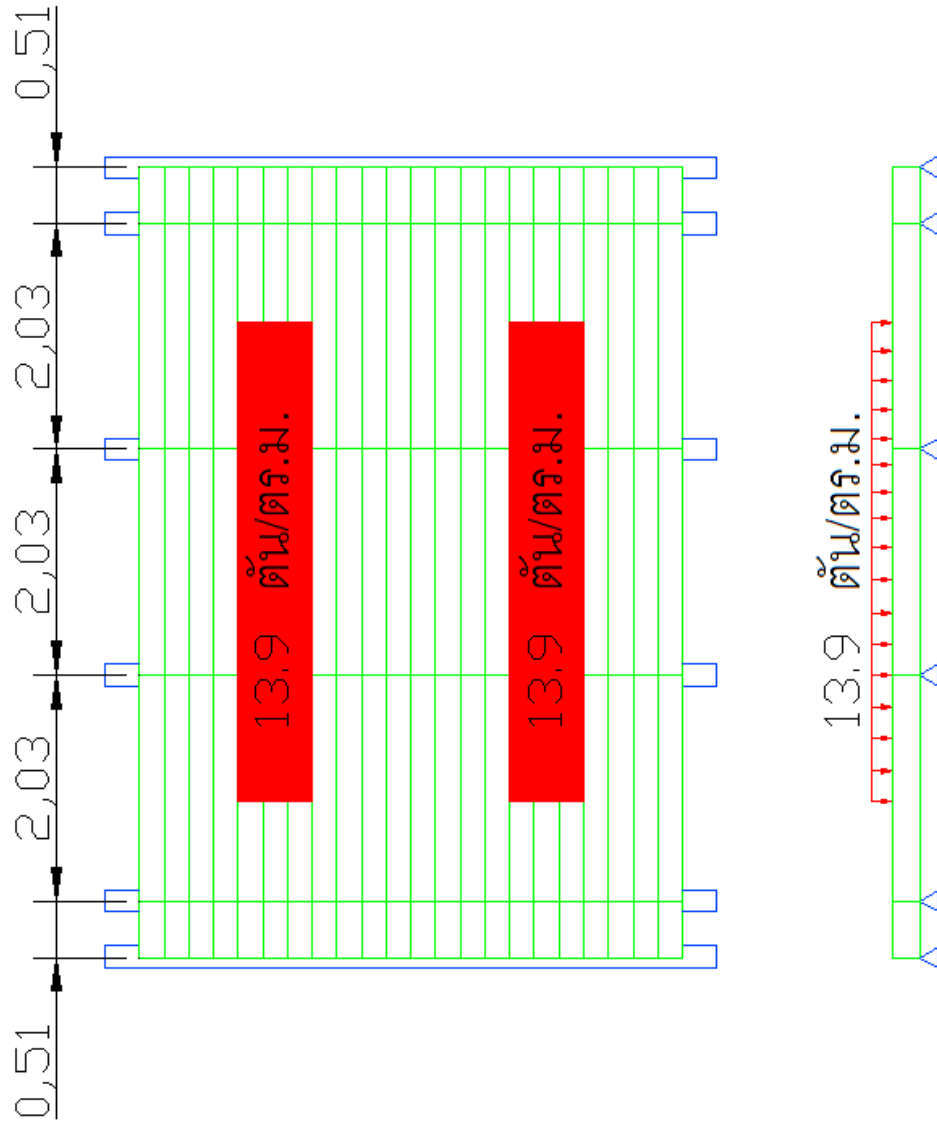
รูปที่ 5.55 แรงปฏิกิริยา สะพานเครื่องหมุนแบบที่ 7 กรณี 2



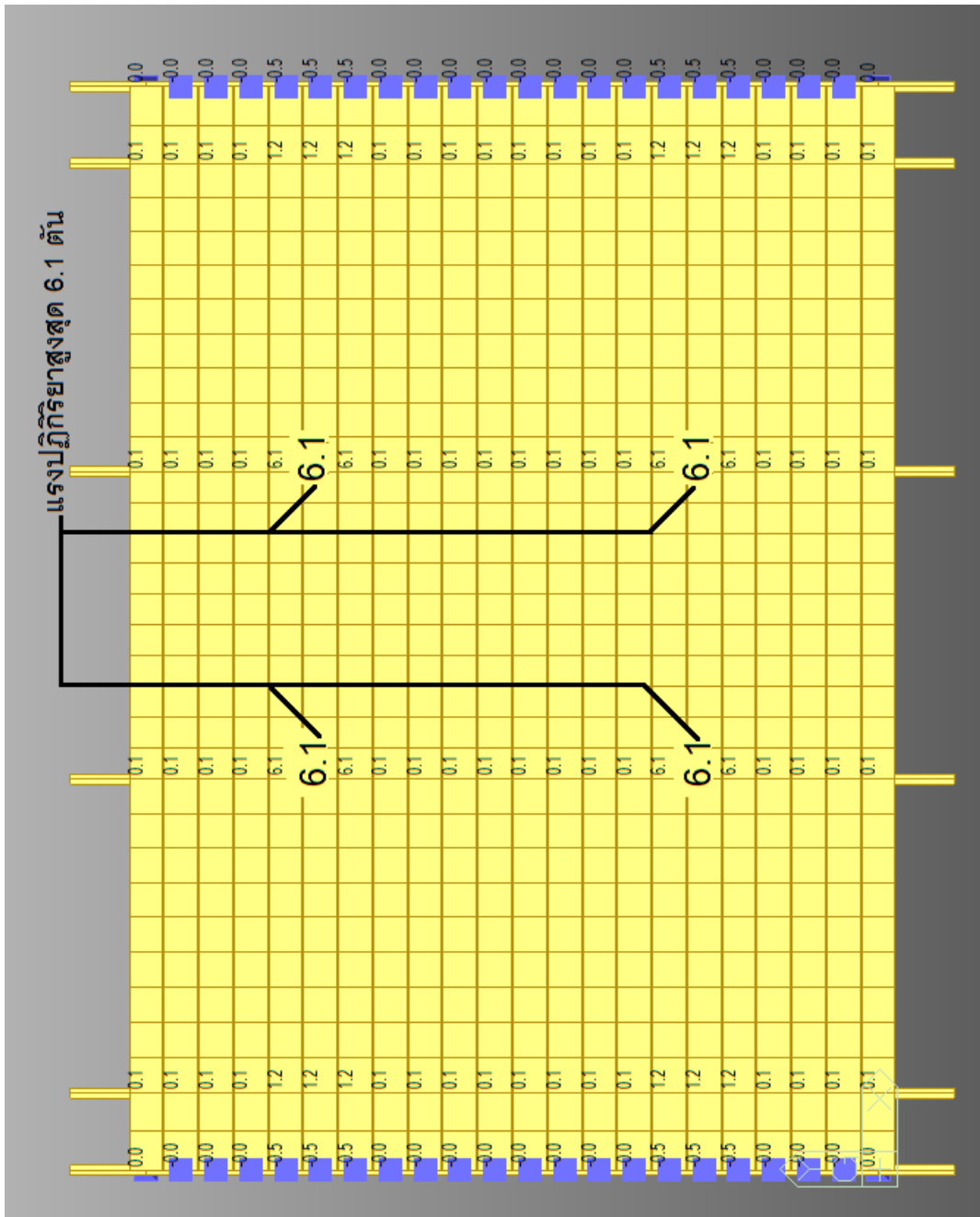
รูปที่ 5.56 แรงเฉือน สะพานเครื่องหมุนแบบที่ 7 กรณี 2



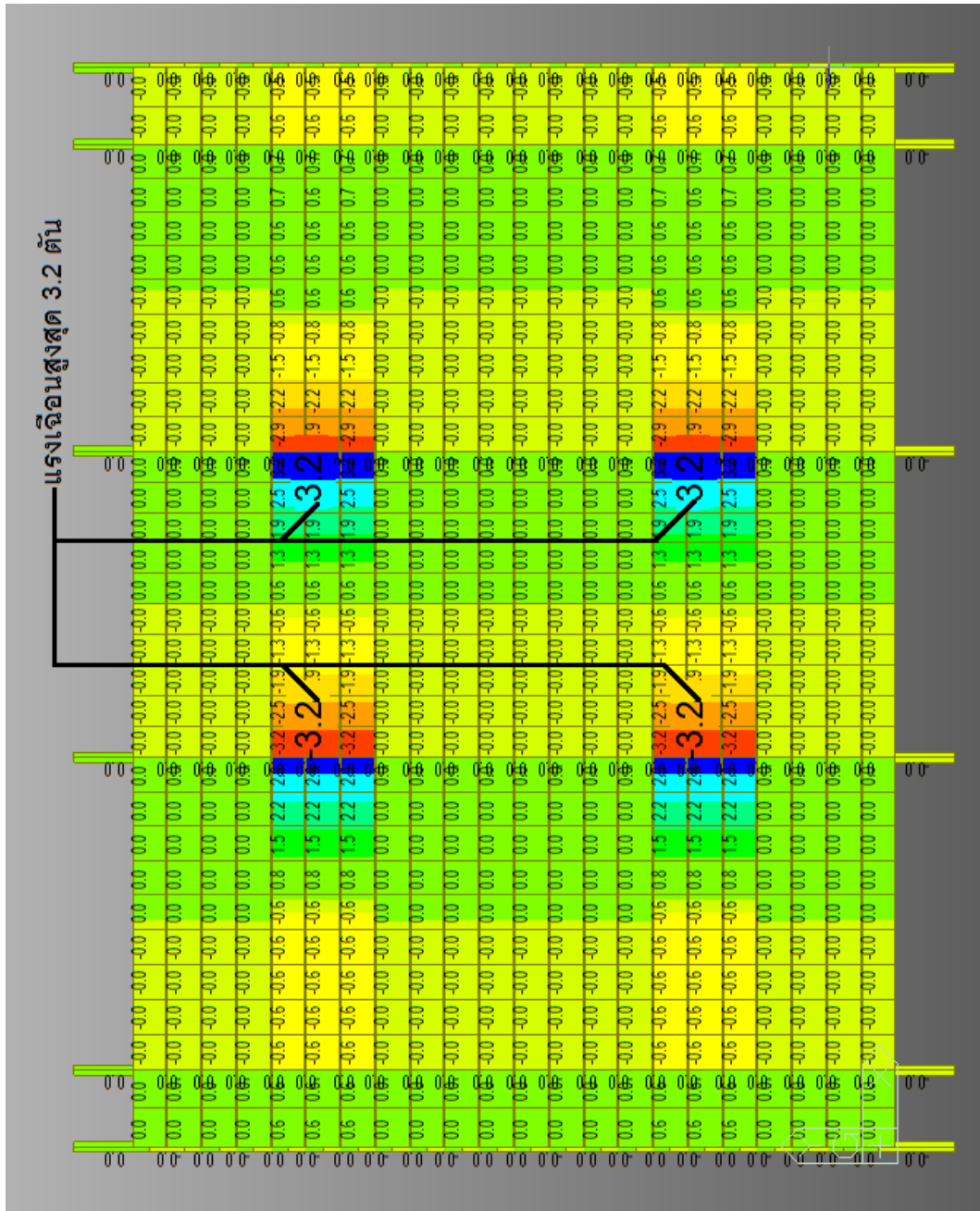
รูปที่ 5.57 โมเมนต์ตัด สะพานเครื่องหนุนมันแบบที่ 7 กรณี 2



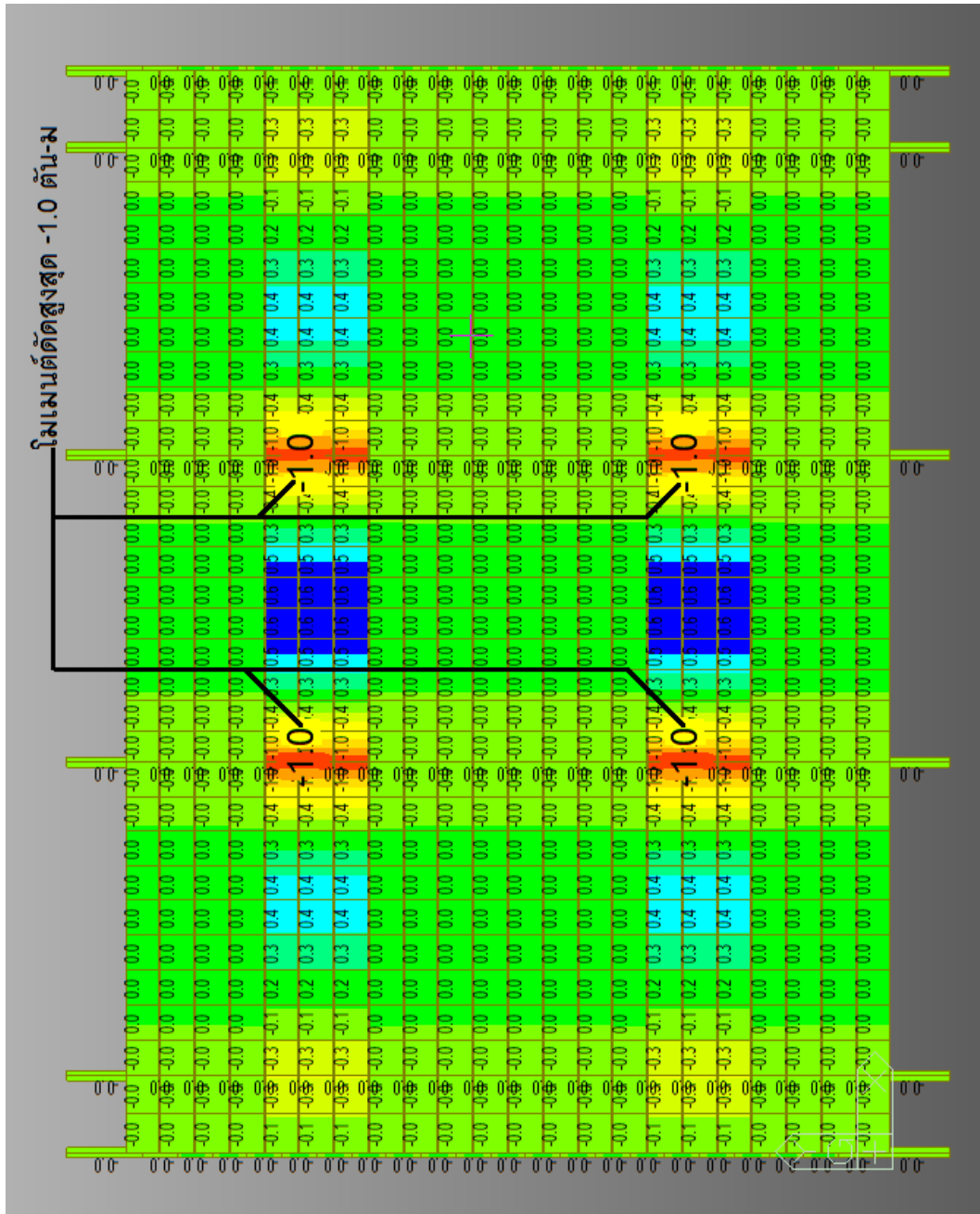
รูปที่ 5.58 แรงกระทำแบบแผ่ต่อสะพานเครื่องหมุนลอย กรณีที่ 1



รูปที่ 5.59 แรงปฏิกิริยา สะพานเครื่องหมุนลอย กรณี 1

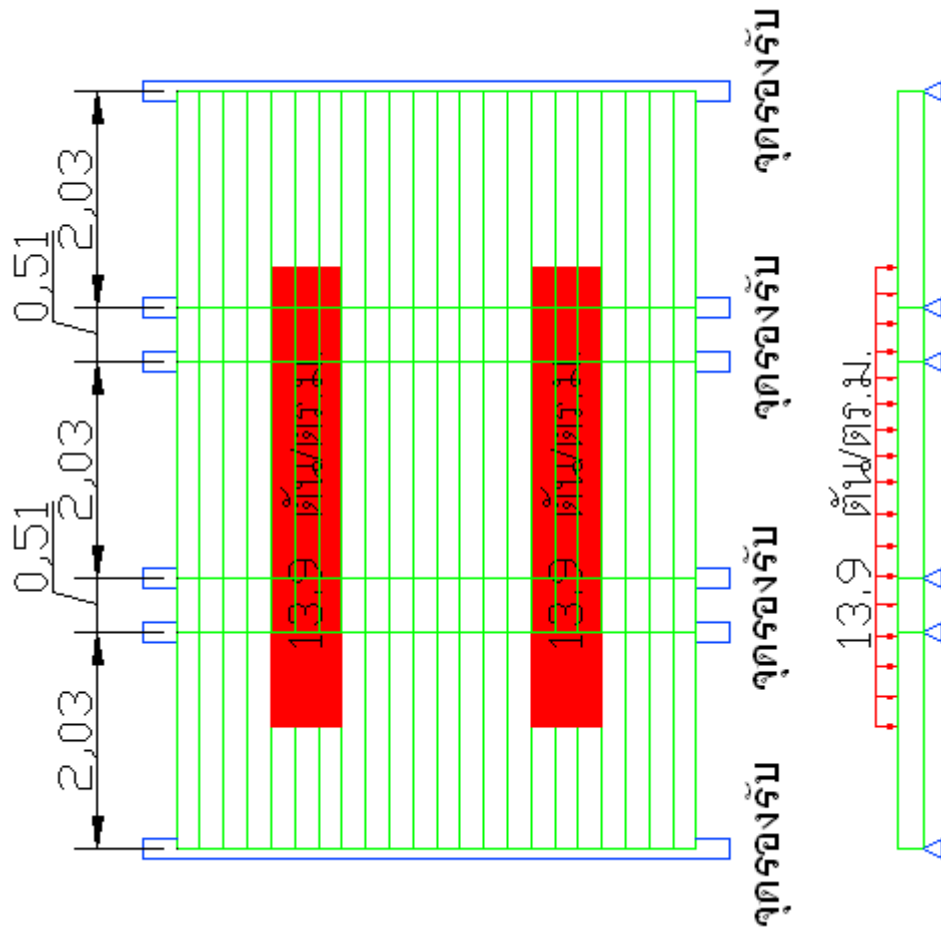


รูปที่ 5.60 แรงเฉือน สะพานเครื่องหมุนลอย กรณี 1

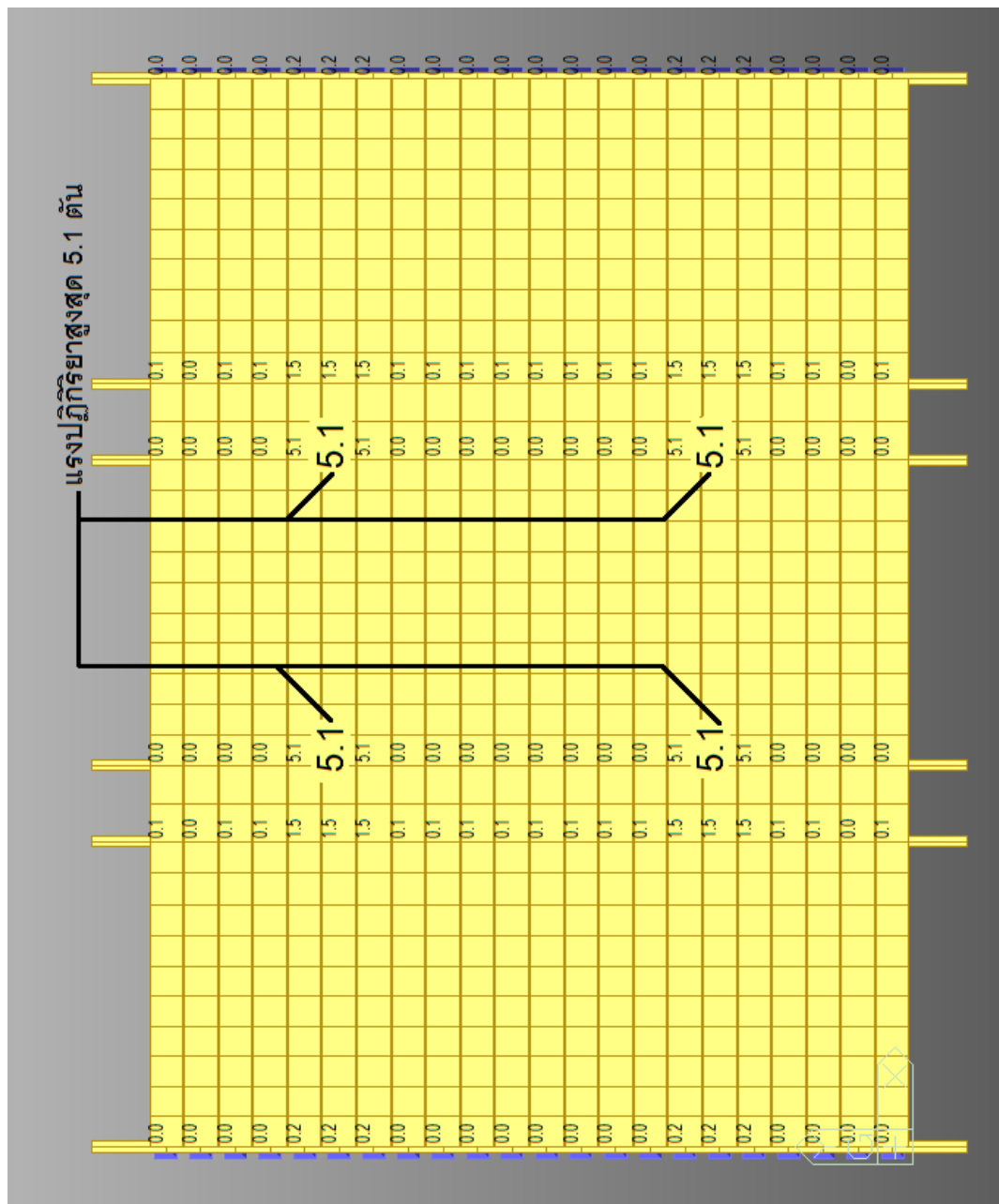


รูปที่ 5.61 โมเมนต์ตัด สะพานเครื่องหมุนลอย กรณี 1

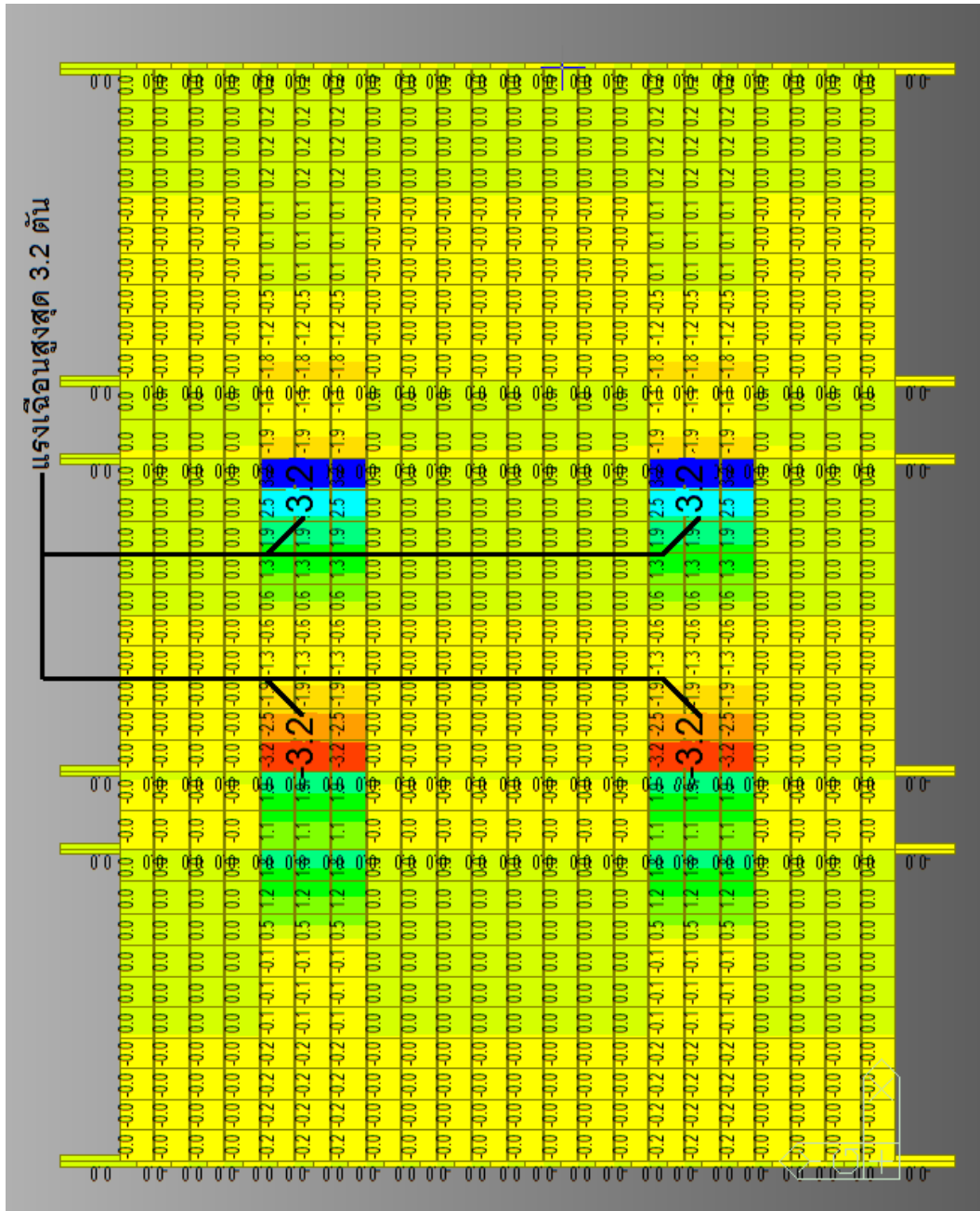




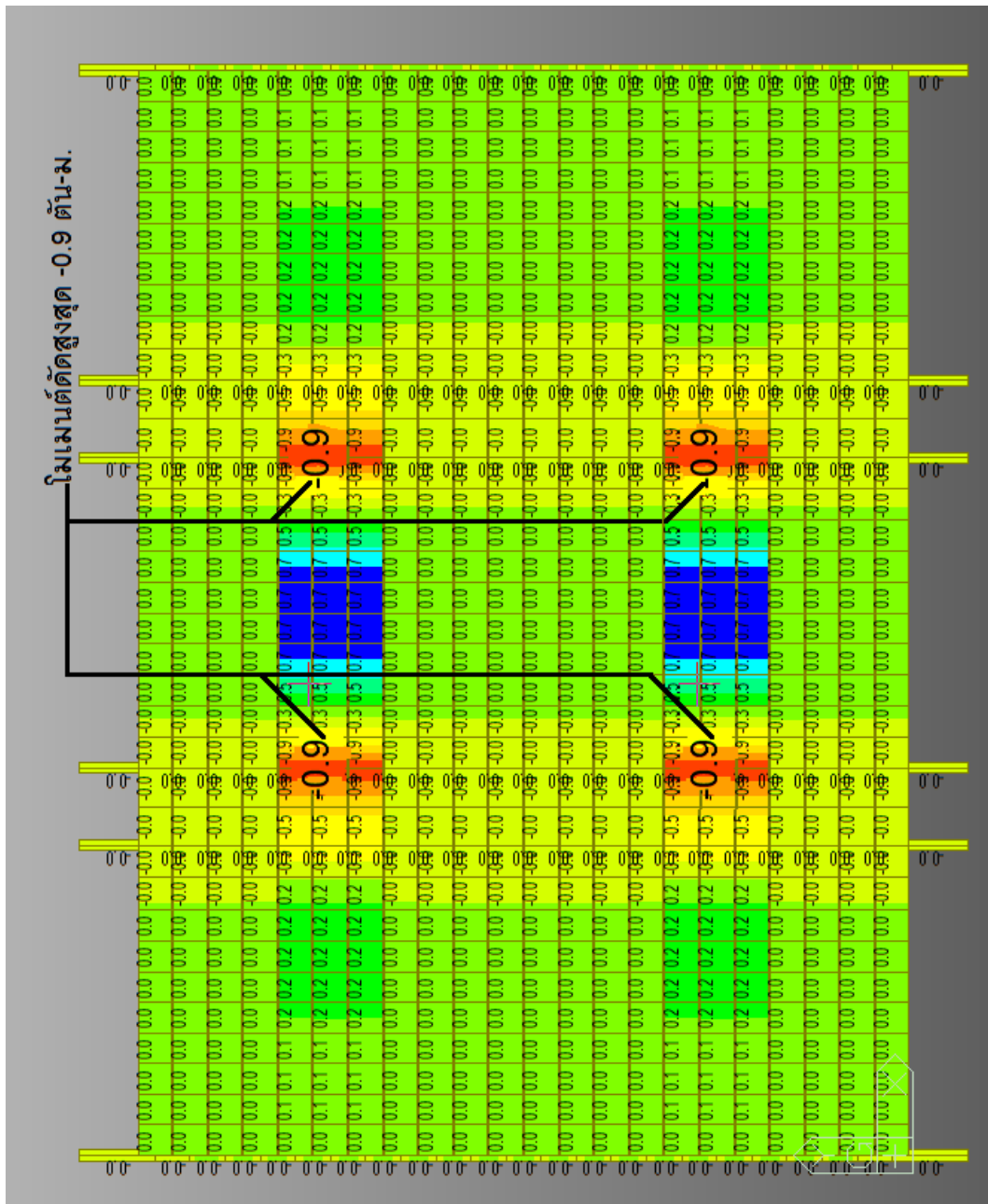
รูปที่ 5.62 แรงกระทำแบบแผ่ต่อสะพานเครื่องหมุนลอย กรณี 2



รูปที่ 5.63 แรงปฏิกิริยา สะพานเครื่องหมุนลอย กรณี 2



รูปที่ 5.64 แรงเฉือน สะพานเครื่องหมุนลอย กรณี 2



รูปที่ 5.65 โมเมนต์ดัด สะพานเครื่องหมุนลอย กรณี 2

**ภาคผนวก ค**  
**รายการคำนวณ**

1) น้ำหนักบรรทุก

น้ำหนักของรถที่วิ่งผ่านบนสะพานคิดเป็นแรงกระทำภายใต้แรงกระทำ ตามค่าแนะนำในการออกแบบ ได้กำหนดค่าส่วนปลอดภัย ดังนี้  $\gamma_{f1} = 1.33$  และ  $\gamma_{f2} = 1.0$  และจะได้  $\gamma = 1.33 \times 1.0 = 1.33$  พิกัดของน้ำหนักบรรทุก 100 ตัน เมื่อคูณด้วยค่าส่วนปลอดภัย 1.33 จะได้ น้ำหนักบรรทุกสำหรับออกแบบ 133 ตัน

2) ผลการวิเคราะห์โครงสร้างด้วยโปรแกรม SAP2000

ตารางที่ 5.1 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างสะพานทหารเอ็ม 4

แบบสะพาน	ความยาว (เมตร)	น้ำหนัก บรรทุก (ตัน)	แรงเฉือน สูงสุด (ตัน)	โมเมนต์ดัด สูงสุด (ตัน-เมตร)	ระยะโก่งตัวที่ ยอมให้ (มม.)
เครื่องหนูนม่น					
แบบที่ 1	4.57	133	10.3	5.4	46
แบบที่ 2	6.60	133	10.9	8.9	66
แบบที่ 3	7.11	86	7.9	5.8	71
แบบที่ 4	9.14	47	4.5	4.3	91
แบบที่ 5	11.18	33	3.3	4.2	112
แบบที่ 6	11.68	33	3.4	4.6	117
แบบที่ 7	13.72	33	3.4	5.4	137
เครื่องหนูลอย	47	80	6.1	-1	20
แพ	28.8	67	5.1	-0.8	20

จากการวิเคราะห์โครงสร้างด้วยโปรแกรม ZAP2000 ตามชนิดของสะพานและพิกัดน้ำหนักบรรทุกออกแบบได้ค่าแรงเฉือน โมเมนต์ดัด ค่าการโก่งตัวดังตารางที่ ค.1 โดยพบว่าสะพานเครื่อง

หนูนม้นแบบที่ 2 รับน้ำหนักบรรทุกออกแบบ 133 ตัน ความยาว 6.60 เมตร มีค่าแรงเฉือนสูงสุด 10.9 ตัน และโมเมนต์ค้ดสูงสุด 8.9 ตัน-เมตร

### 3) คุณสมบัติของวัสดุ

วัสดุที่ใช้ในการออกแบบคือ อะลูมิเนียม 7075-T651 ซึ่งมีคุณสมบัติตามตารางที่ 2.5

ความหนาแน่น	3.1	กรัม/ลบ.ซม.
หน่วยแรงประลัย ( $f_u$ )	572	เมกกะปาสคาล
หน่วยแรงที่จุดคราก ( $f_o$ )	503	เมกกะปาสคาล
โมดูลัสอีลาสติค (E)	71,700	เมกกะปาสคาล

### 4) หน่วยแรงของวัสดุ

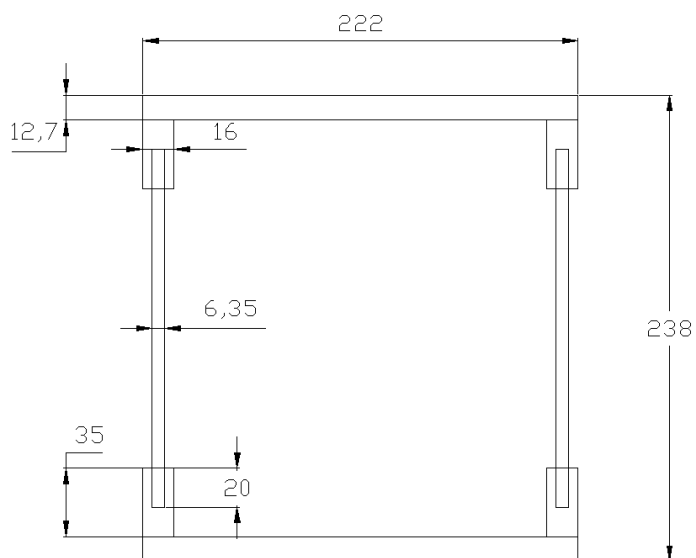
หน่วยแรงชนิดต่างๆ สามารถคำนวณได้ตามตารางที่ 2.6

หน่วยแรงตามแนวแกน ( $p_a$ )	538	เมกกะปาสคาล
หน่วยแรงต้านทานโมเมนต์ของหน้าตัด ( $p_o$ )	503	เมกกะปาสคาล
หน่วยแรงเฉือน ( $p_v$ )	301	เมกกะปาสคาล
หน่วยแรงแบกทาน ( $p_p$ )	1,183	เมกกะปาสคาล

การทดสอบกำลังของสลักเกลียวเหล็กชุบดำ เกรด 12.9 ขนาด M5 ได้ค่ากำลังรับแรงประลัยเฉลี่ย ( $f_u$ ) 1250 เมกกะปาสคาล และกำลังรับแรงเฉือนเฉลี่ย 571 เมกกะปาสคาล ซึ่งค่าหน่วยแรงสำหรับออกแบบคำนวณตามตารางที่ 2.7 ใช้ค่าแนะนำ มีค่า 0.4 เท่าของหน่วยแรงประลัย ( $0.4f_u$ ) ได้ค่าหน่วยแรงเฉือน 500 เมกกะปาสคาล

### 5) การออกแบบหน้าตัดตงอะลูมิเนียม

ขนาดของตงอะลูมิเนียมออกแบบใช้ขนาดเดียวกันกับตงสะพานทหารเอ็ม 4 ดังรูปที่ ค.1



รูปที่ 5.66 หน้าตัดตงออกแบบ

## 5.1) การตรวจสอบชนิดของรูปตัด

การจำแนกประเภทของหน้าตัดตงใช้วิธีกำหนดพารามิเตอร์ตัวคูณไม่มีมิติ ( $\epsilon$ ) ตัวแปรความชะลูดของแผ่นชิ้นส่วน ( $\beta$ ),  $\beta_f$ ,  $\beta_s$  โดยคำนวณได้จากสมการ 2.6 สมการ 2.7 และตามตารางที่ 2.8 ตามลำดับ

$$\epsilon = (250/503)^{1/2} = 0.70$$

$$\beta_f = 18 \times 0.70 = 12.69$$

$$\beta_s = 22 \times 0.70 = 15.51$$

## 5.2) ตรวจสอบแผ่นปีก

ลักษณะของแผ่นปีก ดังรูปที่ ค.1 มีลักษณะเป็นชิ้นส่วนปลายยึด ดังนั้น

$$\beta = 190/12.7 = 14.96$$

ค่าตัวแปรความชะลูดของแผ่นชิ้นส่วนมีค่าอยู่ระหว่าง 12.69 และ 15.51 ดังนั้นหน้าตัดจึงเป็นชนิดไม่อัดแน่น (non-compact section)

## 5.3) ตรวจสอบแผ่นเอว

ลักษณะของแผ่นเอว จะมีบริเวณที่รับแรงอัดและรับแรงดึง ในการออกแบบจะคิดเฉพาะ ส่วนที่รับแรงอัดซึ่งจะวัดจากแกนสะเทินขึ้นไป ดังนั้น

$$\beta = b/t = 71.3/6.35$$

$$= 11.23$$

ค่าตัวแปรความขรุขระของแผ่นเอวมีค่าน้อยกว่า 12.69 ดังนั้นหน้าตัดจึงเป็นชนิดอัดแน่น (compact section)

เมื่อพิจารณาทั้ง 2 ส่วน จึงสรุปว่าหน้าตัดที่ออกแบบนี้เป็นชนิดไม่อัดแน่น

## 6) โมเมนต์อินเนอร์เซีย

เนื่องจากหน้าตัดมีหลายชิ้นส่วนประกอบกัน การหาค่าโมเมนต์อินเนอร์เซียจะหาค่าในแต่ละส่วน แล้วนำมารวมกัน ดังตารางที่ ค.2

ตารางที่ 5.2 คำนวณค่าโมเมนต์อินเนอร์เซีย

	b (มม.)	h (มม.)	d (มม.)	Area (ตร.มม.)	$I_o$ (มม. <sup>4</sup> )	$Ad^2$ (มม. <sup>4</sup> )	I (มม. <sup>4</sup> )
1	222	12.7	112.65	2,819	37,895	35,778,249	35,816,145
2	16	35	88.8	560	57,167	4,415,846	4,473,013
3	16	35	88.8	560	57,167	4,415,846	4,473,013
4	6.35	71.30	35.65	453	191,806	575,417	767,222
5	6.35	71.30	35.65	453	191,806	575,417	767,222
6	6.35	71.30	35.65	453	191,806	575,417	767,222
7	6.35	71.30	35.65	453	191,806	575,417	767,222
8	16	35	88.8	560	57,167	4,415,846	4,473,013
9	16	35	88.8	560	57,167	4,415,846	4,473,013
10	222	12.7	112.65	2,819	37,895	35,778,249	35,816,145
				9,690			92,593,229



จากตารางที่ ค.2 ได้ค่าโมเมนต์อินเนอร์เซีย  $9.26 \times 10^6 \text{ มม.}^4$

### 7) การหาโมเมนต์ดัดของรูปตัดตงอะลูมิเนียม

เนื่องจากรูปตัดออกแบบเป็นชนิดไม่อัดแน่น ดังนั้นค่าโมเมนต์ดัดของรูปตัดสามารถคำนวณได้จากสมการ 2.7

#### 7.1) การหาค่าโมดูลัสพลาสติก ( Z )

การหาค่าโมดูลัสพลาสติกสามารถคำนวณได้โดยนำค่าโมเมนต์ดัดของรูปตัดชนิดอัดแน่น ( $M_c$ ) ดังตารางที่ ค.3 หารด้วยหน่วยแรงของหน้าตัดต่อโมเมนต์ ( $p_o$ )

ตารางที่ 5.3 คำนวณค่าโมเมนต์ต้านทานของหน้าตัดชนิดอัดแน่น

	พื้นที่หน้าตัด (ตร.มม.)	$p_o$ (เมกกะปาสคาล)	F (นิวตัน)	M (นิวตัน-มม.)
1	2,819	503	1,418,158	159,755,521
2	560	503	281,680	25,013,184
3	560	503	281,680	25,013,184
4	453	503	227,736	8,118,780
5	453	503	227,736	8,118,780
6	453	503	227,736	8,118,780
7	453	503	227,736	8,118,780
8	560	503	281,680	25,013,184
9	560	503	281,680	25,013,184
10	2,819	503	1,418,158	159,755,521
	9,690		4,873,979	452,038,899

$$M_c = 4.52 \times 10^8 \quad \text{นิวตัน-มม.}$$

$$= 46.08 \quad \text{ตัน-ม.}$$

$$Z = 4.52 \times 10^8 / 503$$

$$= 8.99 \times 10^5 \quad \text{มม.}^3$$

## 7.2) การหาค่าโมดูลัสหน้าตัด (S)

การหาค่าโมดูลัสหน้าตัด สามารถหาค่าได้ดังนี้

$$\begin{aligned} I &= 9.26 \times 10^7 \quad \text{มม.}^4 \\ d &= 119 \quad \text{มม.} \\ S &= 9.26 \times 10^7 / 119 \\ &= 7.78 \times 10^5 \quad \text{มม.}^3 \end{aligned}$$

## 7.3) โมเมนต์ดัดต้านทานของรูปตัดชนิดไม่อัดแน่น

$$\begin{aligned} M_c &= [(7.78 \times 10^5 \times 503) + ((15.51 - 14.96) / (15.51 - 12.69)) \times \\ &\quad (8.99 \times 10^5 - 7.78 \times 10^5) \times (503 / 9.81 / 1000000)] / 1.2 \\ &= 34.4 \quad \text{ตัน-ม.} > 8.9 \quad \text{ตัน-ม.} \quad \text{ใช้ได้} \end{aligned}$$

## 8) การตรวจสอบการวิบัติของเอว

## 8.1) การโก่งเดาะของเอวทางข้าง (sidesway web buckling)

เมื่อตงรับน้ำหนักบรรทุกทุกแผ่นเอวทั้ง 2 ข้างอาจมีการโก่งเดาะเกิดขึ้นจึงต้องทำการตรวจสอบโดยคำนวณหาค่าแรงเฉือนวิกฤติ ( $V_c$ ) จากสมการที่ 2.8 และ 2.9 ดังนี้

$$\begin{aligned} d/t &= 142.6 / 6.35 \\ &= 22.46 \\ p_{v1} &= 4.9 \times 71700 / 22.46^2 \\ &= 697 \quad \text{เมกะปาสคาล} \\ V_c &= 142.6 \times 6.35 \times 2 \times 697 / 9.81 / 1000 / 1.2 \\ &= 107 \quad \text{ตัน} > 11 \quad \text{ตัน} \quad \text{ใช้ได้} \end{aligned}$$

## 8.2) การครากเฉพาะที่ของเอว (web local yielding)

เมื่อตรับน้ำหนักบรรทุกทุกในบริเวณแผ่นเอวทั้ง 2 ข้างอาจเกิดการโก่งเดาะของเอวจากแรงกระทำเป็นจุด เนื่องจากแผ่นเอวมีความหนาไม่เพียงพอ คำนวณค่าได้จากสมการที่ 2.10

จุดต่อแผ่นปีกและแผ่นเอว

$$\begin{aligned} W_c &= 2 \times 12.7 \times 16 \times 538 \times 2 / 9.81 / 1000 / 1.2 \\ &= 37 \text{ ตัน} > 11 \text{ ตัน} \quad \text{ใช้ได้} \end{aligned}$$

จุดต่อส่วนขยายของแผ่นเอว

$$\begin{aligned} W_c &= 2 \times 47.7 \times 6.35 \times 538 \times 2 / 9.81 / 1000 / 1.2 \\ &= 55 \text{ ตัน} > 11 \text{ ตัน} \quad \text{ใช้ได้} \end{aligned}$$

บนแกนสะเทิน

$$\begin{aligned} W_c &= 2 \times 119 \times 6.35 \times 538 \times 2 / 1.2 \\ &= 138 \text{ ตัน} > 11 \text{ ตัน} \quad \text{ใช้ได้} \end{aligned}$$

## 8.3) การโก่งของเอว (web crippling)

การโก่งของเอว เป็นการวิบัติที่มีลักษณะเหมือนการโก่งของเสา ซึ่งการหาค่า  $p_b$  สามารถหาได้โดยใช้สมการที่ 2.12 โดยเลือกการวิบัติกรณี C1 เนื่องจากรูปตัดมีตามลักษณะการวิบัติการโก่งเดาะของเสากรณีรูปตัดมีความสมมาตรและไม่มีการเชื่อม จากตารางที่ 2.7 ซึ่งได้ค่าพลาตุเรโซ ( $\lambda_1/\lambda_0$ ) เท่ากับ 0.20 และค่าอิมเพดเมนต์ ( $c$ ) เท่ากับ 0.20

$$\lambda_1/\lambda_0 = 0.20$$

$$c = 0.20$$

ค่า  $p_1$ ,  $X$ ,  $\alpha$ ,  $\lambda_0$ ,  $\gamma$  คำนวณได้จากสมการที่ 2.13, 2.14, 2.15, 2.16, 2.17 ตามลำดับ

$$p_1 = 503$$

$$X = 0.98$$

$$\alpha = 0.93$$

$$\lambda_0 = 37.53$$

$$\gamma = 36.65$$

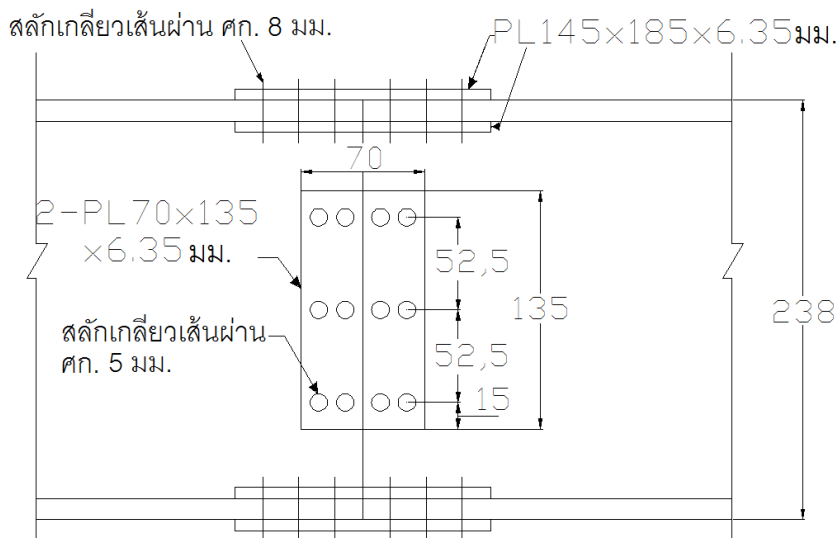
เมื่อได้ค่าตัวแปรที่เกี่ยวข้องก็สามารถหาค่า  $p_b$  และ  $W_c$  ได้

$$p_b = 346.3 \quad \text{เมกะปาสคาล}$$

$$W_c = 88 \text{ ตัน} > 10.9 \text{ ตัน} \quad \text{ใช้ได้}$$

#### 9) การหาจำนวนสลักเกลียวที่ต้องใช้

ตงอะลูมิเนียมเชื่อมต่อด้วยการยึดด้วยสลักเกลียวที่แผ่นปีกและแผ่นเอว เมื่อตงรับน้ำหนักบรรทุกทุกจะเกิดแรงอัดในสลักเกลียวที่อยู่เหนือแกนสะเทิน และเกิดแรงดึงในสลักเกลียวที่อยู่ใต้แกนสะเทิน ดังรูปที่ ค.2 การออกแบบจำนวนสลักเกลียวทำได้โดยการกำหนดจำนวนสลักเกลียวที่ต้องใช้ และตรวจสอบกำลังต้านทานโมเมนต์ตัดต้องไม่เกินโมเมนต์ตัดสูงสุดจากการวิเคราะห์



รูปที่ 5.67 แผ่นต่อตงที่ปีกและเอว

ออกแบบแผ่นต่อที่เอวรับแรงเฉือน 10.9 ตัน ใช้สลักเกลียวเหล็กชุบดำ เกรด 12.9 ขนาด M5 พื้นที่หน้าตัด 14.2 ตร.มม. หน่วยแรงเฉือนของสลักเกลียว 500 Mpa

$$(500/9.81/1000) \times (14.2 \times 2) = 1.45 \text{ ตัน/ตัว}$$

$$\text{จำนวนสลักเกลียวที่ต้องการ} = 10.9/1.45 = 8 \text{ ตัว}$$

ใช้สลักเกลียวเกรด 12.9 ขนาด M5 จำนวน 12 ตัว

## 10) ความหนาของแผ่นต่อ

การวิบัติของแผ่นต่อจะเกิดขึ้นบนหน้าตัดวิกฤต โดยตงมีหน้าตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยม มีเอว 2 ข้าง จากรูปที่ ค.2 เอวข้างหนึ่งจะใช้แผ่นต่อ 2 แผ่น รวมทั้งหมดมี 4 แผ่น และสลักเกลียวข้างละ 6 ตัว รวมทั้งหมด 12 ตัว ดังนั้น

## 10.1) ออกแบบต้านทานแรงเฉือน

$$\begin{aligned} \text{พื้นที่หน้าตัดสุทธิที่ต้องการ} &= 10.9 / (301 / 9.81 / 1000) / 4 \\ &= 89 \text{ ตร.มม. ต่อแผ่น} \end{aligned}$$

$$\text{พื้นที่หน้าตัดวิกฤต} = (135 - 3 \times 6)t = 117t \text{ ตร.มม. ต่อแผ่น}$$

$$\text{ความหนาที่ต้องการ} = 89 / 117 = 0.76 \text{ มม. ต่อแผ่น}$$

ใช้แผ่นอะลูมิเนียม 7075T651 หนา 6.35 มม. 4 แผ่น

## 10.2) ตรวจสอบการรับแรงแบกทาน

หน่วยแรงแบกทานของอะลูมิเนียม 7075 ( $p_p$ ) มีค่า 1,183 เมกกะปาสคาล จากรูปที่ ค.2 ตรวจสอบสลักเกลียวตัวริมของแผ่นต่อ 2 แผ่น

พิจารณาสลักเกลียวแถวที่ 1 (คู่บน)

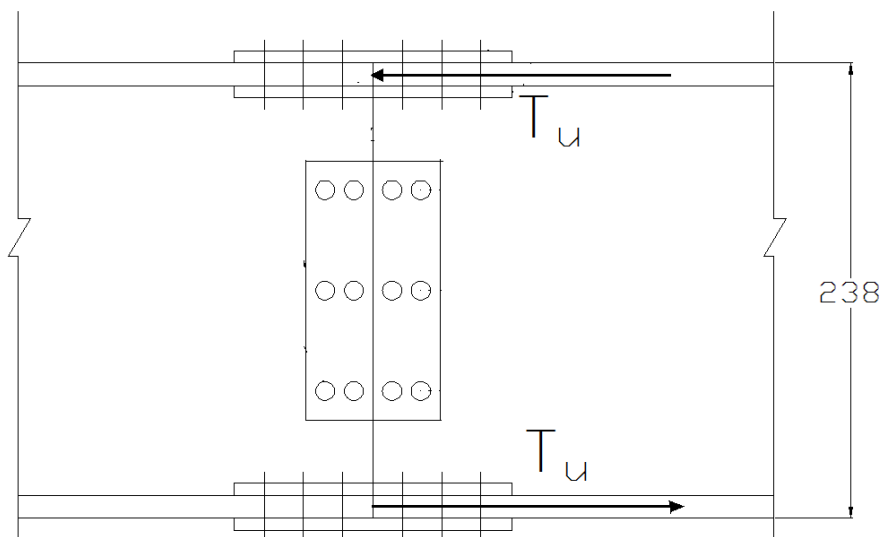
$$\begin{aligned} \text{การวิบัติจากแรงเฉือน} &= [2 \times (2 \times (15 - 0.5 \times 6) \times 6.35) \times 301 / 9.81 / 1000] / 1.2 \\ &= 7.8 \text{ ตันต่อตัว} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{การวิบัติจากแรงแบกทาน} &= [2 \times (5 \times 6.35) \times (1183 / 9.81 / 1000)] / 1.2 \\ &= 6.4 \text{ ตันต่อตัว} \end{aligned}$$

ดังนั้นสลักเกลียวแถวที่ 1 วิบัติจากแรงแบกทาน

$$\text{ดังนั้นกำลังต้านแรงแบกทานทั้งหมด} = 12 \times 6.4 = 28.8 \text{ ตัน} > 10.9 \text{ ตัน} \quad \text{ใช้ได้}$$

## 11) แผ่นต่อที่ปัก



รูปที่ 5.68 กำลังรับแรงดึงของแผ่นต่อที่ปัก

กำลังต้านทานแรงดึงที่ต้องการในแผ่นต่อ  $T_u = (8.9 \times 1000) / (238 - 12.7) = 39.5$  ตัน

## 11.1) ความหนาของแผ่นต่อ

จากรูปที่ ค.2 ใช้แผ่นต่อที่ปักทั้งหมด 2 คู่

พื้นที่หน้าตัดแผ่นต่อที่ต้องการ  $= 39.5 / (503 / 9.81 / 1000) = 770$  ตร.มม.

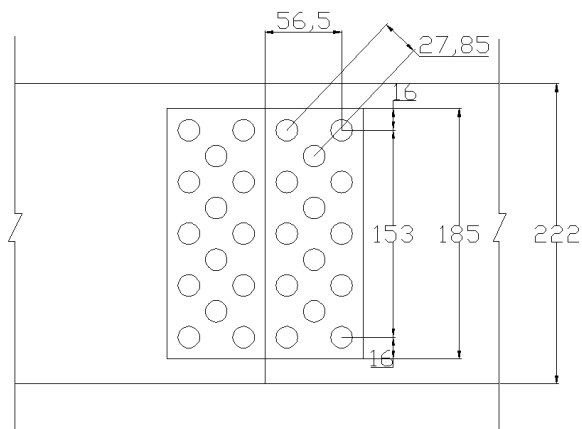
ใช้อะลูมิเนียม 7075 เป็นแผ่นต่อ ขนาด  $185 \times 145 \times 6.35$  มม. ทั้งหมด 4 แผ่น

พื้นที่หน้าตัดสุทธิ  $= (185 - 5 \times 9) \times 6.35 \times 2$

$= 1,778$  ตร.มม.  $> 805$  ตร.มม.

ใช้ได้

## 11.2) จำนวนสลักเกลียวที่ต้องการ



รูปที่ 5.69 จำนวนสลักเกลียวบนแผ่นต่อ

จากรูปแผ่นต่อใช้สลักเกลียวขนาด M8 พื้นที่หน้าตัด 36.6 ตร.มม.

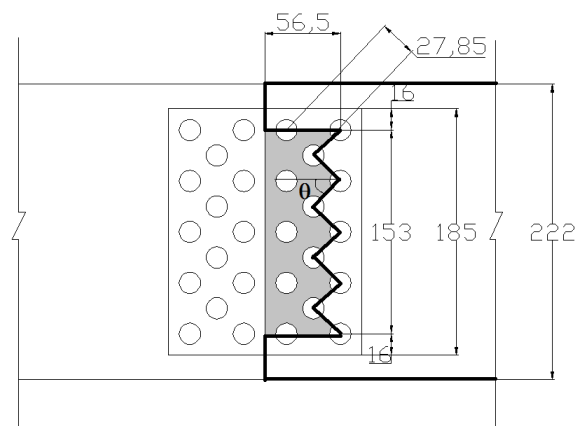
$$\begin{aligned} \text{กำลังแรงเฉือนที่สลักเกลียวสามารถรับได้} &= (500/9.81/1000) \times 36.6 \times 2 \\ &= 3.73 \text{ ตันต่อตัว} \end{aligned}$$

$$\text{จำนวนสลักเกลียวที่ต้องการ} = 39.5/3.73 = 11 \text{ ตัว}$$

ใช้สลักเกลียวเกรด 12.9 ขนาด M8 14 ตัว

## 11.3) ตรวจสอบการวิบัติเนื่องจากการเฉือนออก (block shear)

พิจารณาการเฉือนออกที่ปีก

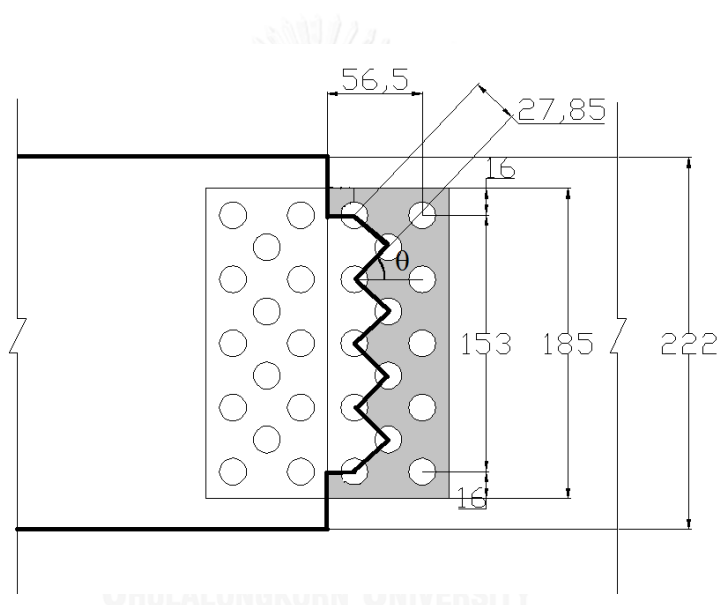


รูปที่ 5.70 การเฉือนออกที่ปีก

$$\begin{aligned}
 \text{ด้านที่รับแรงเฉือนอย่างเดียว} &= 2 \times [(56.5 - 1.5 \times 9) \times 12.7 \times (301 / 9.81 / 1000)] = 33.5 \text{ ตัน} \\
 \text{ด้านที่รับแรงเฉือนร่วมกับแรงดึง} &= 8 \times [(27.85 - 1 \times 9) \times 12.7 \times (301 / 9.81 / 1000) \cos \theta \\
 &\quad + (27.85 - 1 \times 9) \times 12.7 \times (503 / 9.81 / 1000) \sin \theta] \\
 &= 110 \text{ ตัน} \\
 \text{แรงเฉือนออกที่ปีก} &= 33.5 + 110 = 143.5 \text{ ตัน} > 39.5 \text{ ตัน} \quad \text{ใช้ได้}
 \end{aligned}$$

และการเฉือนออกที่ปีกแบบอื่นๆ มีค่ามากกว่าแรงดึงมากๆ

พิจารณาการเฉือนออกที่แผ่นต่อ



รูปที่ 5.71 การเฉือนออกที่แผ่นต่อ

$$\begin{aligned}
 \text{ด้านที่รับแรงเฉือนอย่างเดียว} &= 2 \times [(16 - 0.5 \times 9) \times 2 \times 6.35 \times (301 / 9.81 / 1000)] = 9 \text{ ตัน} \\
 \text{ด้านที่รับแรงเฉือนร่วมกับแรงดึง} &= 8 \times [(27.85 - 1 \times 9) \times 2 \times 6.35 \times (301 / 9.81 / 1000) \cos \theta \\
 &\quad + (27.85 - 1 \times 9) \times 2 \times 6.35 \times (503 / 9.81 / 1000) \sin \theta] \\
 &= 110 \text{ ตัน} \\
 \text{แรงเฉือนออกที่ปีก} &= 9 + 110 = 119 \text{ ตัน} > 39.5 \text{ ตัน} \quad \text{ผ่าน}
 \end{aligned}$$

และการเฉือนออกที่แผ่นต่อแบบอื่นๆ มีค่ามากกว่าแรงดึงมากๆ



## 11.4) ตรวจสอบกำลังรับแรงแบกทานของแผ่นปีก

พิจารณาสลักเกลียวแถวที่ 1 (ใกล้ขอบ)

$$\begin{aligned}\text{การวิบัติจากแรงเฉือน} &= [2 \times ((16 - 0.5 \times 9) \times 12.7) \times (301 / 9.81 / 1000)] / 1.2 \\ &= 7.5 \text{ ต้นต่อตัว}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{การวิบัติจากแรงแบกทาน} &= [(8 \times 12.7) \times (1183 / 9.81 / 1000)] / 1.2 \\ &= 10.2 \text{ ต้นต่อตัว}\end{aligned}$$

ดังนั้นสลักเกลียวแถวที่ 1 วิบัติจากแรงเฉือน แถวที่ 2 และ 3 วิบัติจากแรงแบกทาน

$$\text{ดังนั้นกำลังต้านทานการวิบัติ} = 5 \times 7.5 + 9 \times 10.2 = 129 \text{ ต้น} > 39.5 \text{ ต้น ใช้ได้}$$

## 11.5) ตรวจสอบกำลังรับแรงแบกทานของแผ่นต่อ

พิจารณาสลักเกลียวแถวที่ 1 (ใกล้ขอบ)

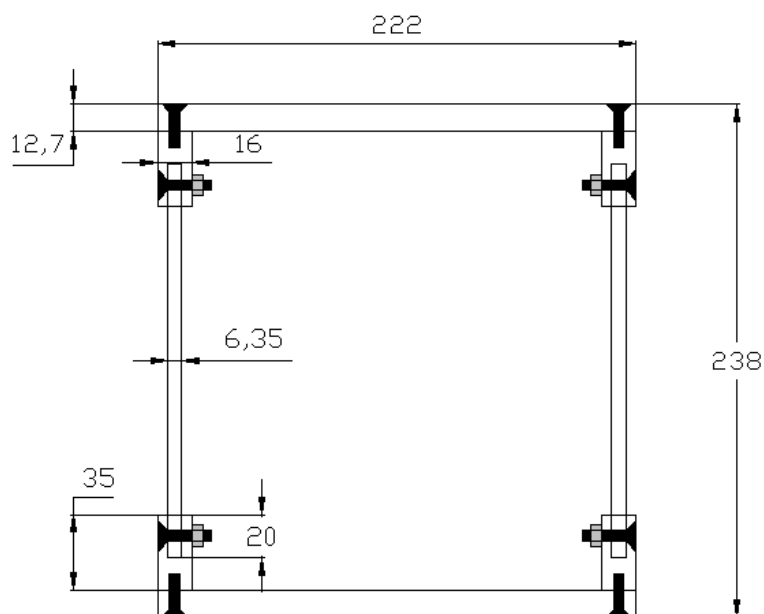
$$\begin{aligned}\text{การวิบัติจากแรงเฉือน} &= [2 \times (2 \times (16 - 0.5 \times 9) \times 6.35) \times (301 / 9.81 / 1000)] / 1.2 \\ &= 7.5 \text{ ต้นต่อตัว}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{การวิบัติจากแรงแบกทาน} &= [2 \times (8 \times 6.35) \times (1183 / 9.81 / 1000)] / 1.2 \\ &= 10.2 \text{ ต้นต่อตัว}\end{aligned}$$

ดังนั้นสลักเกลียวแถวที่ 1 วิบัติจากแรงเฉือน แถวที่ 2 และ 3 วิบัติจากแรงแบกทาน

$$\text{ดังนั้นกำลังต้านทานการวิบัติ} = 5 \times 7.5 + 9 \times 10.2 = 129 \text{ ต้น} > 39.5 \text{ ต้น ใช้ได้}$$

12) จำนวนสลักเกลียวที่ใช้ยึดแผ่นปีกกับแผ่นเอว



รูปที่ 5.72 รูปตัดแสดงจุดเชื่อมต่อสลักเกลียว

$I$	=	$9.26 \times 10^7$	มม. <sup>4</sup>
$V_{\max}$	=	10.9	ตัน
ความยาวตง	=	4600	มม.
สลักเกลียวรับแรงเฉือน	=	0.725	ตันต่อตัว
สลักเกลียวรับแรงเฉือนคู่	=	1.45	ตันต่อตัว

12.1) จุดต่อระหว่างปีกกับเอว

$Q$	=	$3.18 \times 10^5$	มม. <sup>3</sup>
$VQ/I$	=	0.0374	ตันต่อ มม.
แรงเฉือนแนวนอน	=	$0.0374 \times 4600$	
	=	172	ตัน
ต้องการสลักเกลียว	=	$172/0.725$	

$$= 238 \quad \text{ตัว}$$

ใช้สลักเกลียวเกรด 12.9 ขนาด M5 จำนวน 298 ตัว

### 12.2) จุดเชื่อมต่อแผ่นเอว

สลักเกลียวที่จุดยึดต่อแผ่นเอว จะรับแรงเฉือนคู่

$$Q = 3.93 \times 10^5 \quad \text{มม.}^3$$

$$VQ/I = 0.0463 \quad \text{ตันต่อ มม.}$$

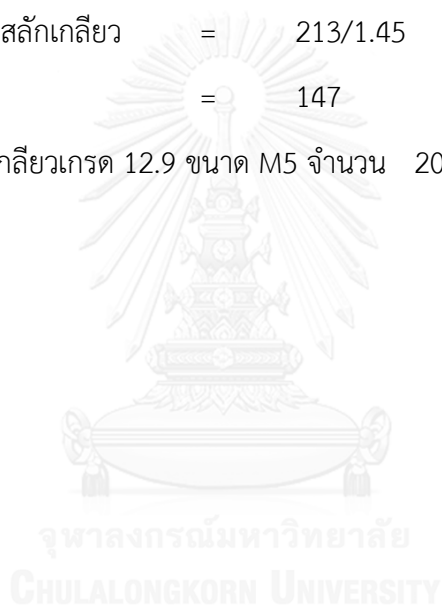
$$\text{แรงเฉือนแนวนอน} = 0.0463 \times 4600$$

$$= 213 \quad \text{ตัน}$$

$$\text{ต้องการสลักเกลียว} = 213/1.45$$

$$= 147 \quad \text{ตัว}$$

ใช้สลักเกลียวเกรด 12.9 ขนาด M5 จำนวน 208 ตัว



## ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

ร.ต.ชลิต สันติธรรารักษ์

เกิดเมื่อ 21 ส.ค. 2522

ประวัติการศึกษา

2533-2536 มัธยมต้น โรงเรียนบดินทร์เดชา2 กรุงเทพ

2537-2539 มัธยมปลาย โรงเรียนยุพราชวิทยาลัย เชียงใหม่

2540-2545 ปริญญาตรี วิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่  
จ.เชียงใหม่

2550-2552 ปริญญาโท เศรษฐศาสตร์ คณะเศรษฐศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่  
จ.เชียงใหม่

2558-2560 ปริญญาโท วิศวกรรมและเทคโนโลยีการป้องกันประเทศ จุฬาลงกรณ์  
มหาวิทยาลัยและโรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า จ.กรุงเทพ

ประวัติการทำงาน

2545-2554 ประกอบธุรกิจส่วนตัว

2555-2556 วิศวกร

2557-ปัจจุบัน รับราชการทหาร ตำแหน่งประจำห้องปฏิบัติการ กองวิชาวิศวกรรมโยธา  
ส่วนการศึกษา โรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า จ.นครนายก