



การออกแบบโครงสร้างรองรับแผงเซลล์แสงอาทิตย์
แบบติดตามดวงอาทิตย์

โดย

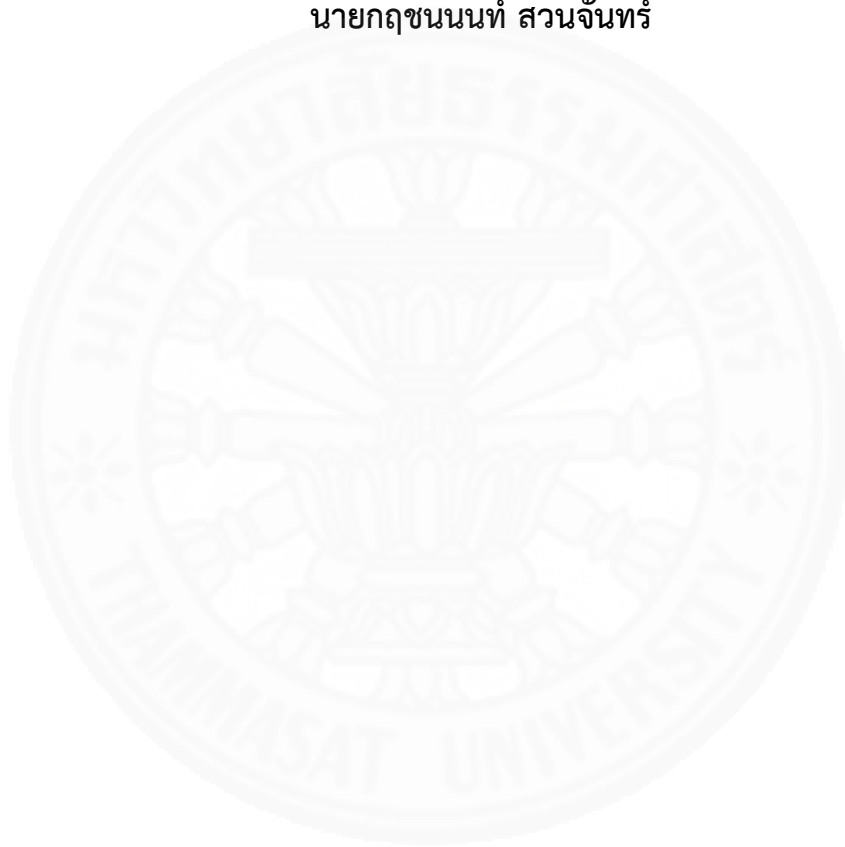
นายกฤษนนท์ สวนจันทร์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (เทคโนโลยีเพื่อการพัฒนาชนบท)
สาขาวิชาเทคโนโลยีเพื่อการพัฒนาที่ยั่งยืน
คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
ปีการศึกษา 2560
ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

การออกแบบโครงสร้างรองรับแผงเซลล์แสงอาทิตย์
แบบติดตามดวงอาทิตย์

โดย

นายกฤษนนท์ สวนจันทร์



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (เทคโนโลยีเพื่อการพัฒนาชนบท)
สาขาวิชาเทคโนโลยีเพื่อการพัฒนาที่ยั่งยืน
คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
ปีการศึกษา 2560
ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

DESIGN OF SUPPORT STRUCTURE FOR SOLAR TRACKING
PHOTOVOLTAIC SYSTEM

BY

MR. KRITCHANON SUANJAN



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF
THE REQUIREMENTS FOR THE DEGREE OF MASTER OF SCIENCE
(TECHNOLOGY FOR RURAL DEVELOPMENT)
DEPARTMENT OF SUSTAINABLE DEVELOPMENT TECHNOLOGY
FACULTY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY
THAMMASAT UNIVERSITY
ACADEMIC YEAR 2017
COPYRIGHT OF THAMMASAT UNIVERSITY

มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

วิทยานิพนธ์

ของ

นายภุชชนนท์ สวนจันทร์

เรื่อง

การออกแบบโครงสร้างรองรับแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบติดตามดวงอาทิตย์
ได้รับการตรวจสอบและอนุมัติ ให้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (เทคโนโลยีเพื่อการพัฒนาชนบท)

เมื่อ วันที่ 13 ธันวาคม พ.ศ. 2560

ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



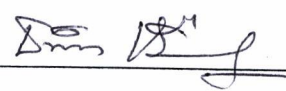
(รองศาสตราจารย์ ดร.บุญยัง ปลั่งกลาง)

กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก



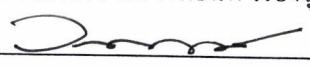
(รองศาสตราจารย์ ดร.สุเพชร จิระจรกุล)

กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม



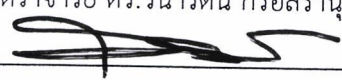
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธนิท เรืองรุ่งชัยกุล)

กรรมการสอบวิทยานิพนธ์



(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วนรัตน์ กรอิสรานุกุล)

คณบดี



(รองศาสตราจารย์ ดร.สมชาย ชคตระการ)

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การออกแบบโครงสร้างรองรับแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบติดตามดวงอาทิตย์
ชื่อผู้เขียน	นายภุชชนนท์ สอนจันทร์
ชื่อปริญญา	วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (เทคโนโลยีเพื่อการพัฒนาชนบท)
สาขาวิชา/คณะ/มหาวิทยาลัย	สาขาวิชาเทคโนโลยีเพื่อการพัฒนาที่ยั่งยืน คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รองศาสตราจารย์ ดร.สุเพชร จิระจรกุล
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธนิต เรืองรุ่งชัยกุล
ปีการศึกษา	2560

บทคัดย่อ

การศึกษานี้จัดทำขึ้นเพื่อออกแบบโครงสร้างรองรับแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบติดตามดวงอาทิตย์ โดยทำการศึกษาประสิทธิภาพของระบบติดตามดวงอาทิตย์ พบว่า ระบบติดตามดวงอาทิตย์แบบสองแกนมีประสิทธิภาพในการผลิตไฟฟ้าสูงที่สุด มากกว่าการติดตั้งแบบมุมคงที่ (Fixed system) ประมาณร้อยละ 30-40 การศึกษานี้จึงเลือกใช้ระบบติดตามดวงอาทิตย์สองแกนในการออกแบบโครงสร้างรองรับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ให้เหมาะสมกับประเทศไทย ซึ่งได้ออกแบบโครงสร้าง 2 รูปแบบ คือ 1) V-pole solar Tracking เป็นโครงสร้างแบบเสาเดี่ยวรูปตัววี (V) สามารถรองรับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ได้ 20 แผ่น และ 2) Louver Solar Tracking เป็นโครงสร้างที่ติดตั้งบนพื้น มีลักษณะการเคลื่อนที่คล้ายบานเกล็ดหน้าต่าง สามารถรองรับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ได้ 10 แผ่น การทดสอบโครงสร้างโดยใช้โปรแกรม ETABS เพื่อคำนวณวัสดุและค่าใช้จ่ายของโครงสร้าง พบว่า โครงสร้างที่เหมาะสมสำหรับประเทศไทยคือ Louver Solar Tracking เนื่องจากเป็นโครงสร้างที่แข็งแรง ไม่มีกลไกซับซ้อน วัสดุหาได้ทั่วไป โครงสร้างต้านกระแสมนน้อย ดูแลรักษาระบบและทำความสะอาดแผงเซลล์แสงอาทิตย์ง่าย และมีค่าใช้จ่ายของโครงสร้างน้อย อีกทั้งยังใช้พื้นที่ในการติดตั้งน้อยกว่า V-pole solar tracking

คำสำคัญ: โรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ (โซลาร์ฟาร์ม), ออกแบบโครงสร้าง, ติดตามดวงอาทิตย์

Thesis Title	DESIGN OF SUPPORT STRUCTURE FOR SOLAR TRACKING PHOTOVOLTAIC SYSTEM
Author	Mr. Kritchanon Suanjan
Degree	Master of Science (Technology for Rural Development)
Department/Faculty/University	Sustainable Development Technology Faculty of Science and Technology Thammasat University
Thesis Advisor	Associate Professor Supet Jirakajohnkool, Ph.D.
Thesis Co-Advisor	Assistant Professor Tanit Ruangrunghaikul, Ph.D.
Academic Year	2017

ABSTRACT

This study was undertaken to design the support structure of solar tracking photovoltaic system. The study on the efficiency of solar tracking system found that double-axis solar tracking system provides the highest efficiency for power generation, approximately 30-40% more than the fixed system. So, the double-axis solar tracking system was used, in this study, in order to design the support structure of solar modules appropriate for Thailand. There are 2 designed models from this study: 1) V-pole solar tracking, which is a V-shaped pole structure, supports for 20 solar panels, and 2) Louver Solar Tracking, which is a ground mounting structure that resembling an adjustable louver window, supports for 10 solar panels. The structure test, using ETABS program to calculate material and cost of the structures, revealed that the suitable structure for Thailand is Louver Solar Tracking, because it is a strong structure, less resistant to wind, no complicated mechanism, available of material, easy to maintenance and cleaning, less expense of the structure, and less area for installation, comparing to the V-pole solar tracking.

Keywords: Solar farm, Structural design, Solar tracking

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยเรื่อง การออกแบบโครงสร้างรองรับแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบติดตามดวงอาทิตย์ สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี ด้วยความอนุเคราะห์จาก รองศาสตราจารย์ ดร.สุเพชร จิระจรกุล และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธนิต เรืองรุ่งชัยกุล ที่ให้คำแนะนำเรื่อง ระเบียบวิธีวิจัย ความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับ ระบบติดตามดวงอาทิตย์ และแนวทางการออกแบบโครงสร้างรองรับแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบติดตามดวงอาทิตย์ รวมถึงแนวคิดในการทำงานวิจัยให้มีคุณภาพ ตั้งแต่เริ่มการศึกษจนถึงสิ้นสุดการศึกษา

ขอขอบคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.สายันต์ ศิริมนตรี และ คุณวสันต์ แสงศรี ที่ให้คำแนะนำโปรแกรมในการจำลองและทดสอบโครงสร้าง รวมถึงการคำนวณวัสดุที่ใช้ในโครงสร้างรองรับแผงเซลล์แสงอาทิตย์

และขอขอบคุณทุนบัณฑิตเรียนดีเพื่อศึกษาต่อระดับบัณฑิตศึกษา คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ประจำปีการศึกษา 2558 รวมถึงการสนับสนุนทุนนำเสนอผลงานวิทยานิพนธ์ในประเทศ

สุดท้ายนี้ ผู้วิจัยขอขอบพระคุณบิดามารดา และครอบครัว ซึ่งเปิดโอกาสให้ได้รับการศึกษาเล่าเรียน ตลอดจนความช่วยเหลือและให้กำลังใจแก่ผู้วิจัยเสมอมา จนสำเร็จการศึกษา

นายภุชชนนท์ สวานจันทร์

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	(1)
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	(2)
กิตติกรรมประกาศ	(3)
สารบัญตาราง	(8)
สารบัญภาพ	(9)
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ	1
1.2 วัตถุประสงค์	2
1.3 ขอบเขตการศึกษา	2
1.4 ข้อจำกัดของการศึกษา	2
1.5 ขั้นตอนการดำเนินงาน	3
1.6 ประโยชน์ที่จะได้รับ	3
บทที่ 2 วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับพลังงานแสงอาทิตย์	4
2.1.1 พลังงานแสงอาทิตย์	4
2.1.2 ศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์ของประเทศไทย	5
2.1.3 เซลล์แสงอาทิตย์	8
2.1.3.1 เซลล์แสงอาทิตย์แบบผลึกเดี่ยว หรือ Monocrystalline silicon	9
2.1.3.2 เซลล์แสงอาทิตย์แบบหลายผลึก หรือ Polycrystalline silicon	10

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.1.3.3 เซลล์แสงอาทิตย์แบบไม่เป็นรูปผลึก หรือ Amorphous silicon	12
2.1.4 การเคลื่อนที่ของดวงอาทิตย์	13
2.2 ระบบติดตามดวงอาทิตย์	15
2.3 รูปแบบการติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์	16
2.3.1 การติดตั้งบนเสาเดี่ยว (Pole Mounting)	16
2.3.2 การติดตั้งบนพื้น (Ground Mounting)	18
2.3.3 การติดตั้งบนหลังคา (Roof Mounting)	19
2.3.3.1 หลังคาลาดเอียง (Sloping Roof)	19
2.3.3.2 หลังคาแบบเรียบ (Flat Roof)	22
2.3.4 การติดตั้งแทนหลังคา (In-Roof System)	24
2.3.5 การติดตั้งบูรณาการกับตัวอาคาร (Building Integrated Photovoltaic)	25
2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	26
 บทที่ 3 วิธีการวิจัย	 38
3.1 การเก็บรวบรวมข้อมูลและการศึกษาข้อมูลเบื้องต้น	38
3.1.1 ศึกษาข้อมูลปฐมภูมิ (Primary data)	38
3.1.2 ศึกษาข้อมูลทุติยภูมิ (Secondary data)	39
3.2 การวิเคราะห์ประสิทธิภาพของระบบติดตามดวงอาทิตย์ที่นำมาใช้ในการออกแบบ โครงสร้าง	39
3.3 การออกแบบโครงสร้างรองรับแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบติดตามดวงอาทิตย์ เพื่อใช้งานกับโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์	39
3.3.1 การรับน้ำหนักและชุดขับเคลื่อนของโครงสร้าง	39
3.3.2 กระแสลม	40
3.3.3 ต้นทุนค่าใช้จ่ายของโครงสร้าง	40
3.3.4 การดูแลรักษา	40

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.4 การทดสอบโครงสร้างรองรับแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบติดตามดวงอาทิตย์ และ เปรียบเทียบต้นทุนในการติดตั้งโครงสร้าง	40
3.4.1 การออกแบบวัสดุที่ใช้ในโครงสร้าง	41
3.4.1.1 จำนวนน้ำหนักบรรทุกทั้งหมด	41
3.4.1.2 การคำนวณค่ามอดุลัสหน้าตัด (Section Modulus)	42
3.4.2 การจำลองและทดสอบโครงสร้าง	42
3.4.2.1 โมเมนต์ดัด (Bending moment)	43
3.4.2.2 แรงปฏิกิริยาที่กระทำกับเสา	43
3.4.3 จำนวนต้นทุนของโครงสร้าง	43
 บทที่ 4 ผลการวิจัยและอภิปรายผล	 45
4.1 ระบบผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์แบบติดตามดวงอาทิตย์	45
4.1.1 ประสิทธิภาพระบบติดตามดวงอาทิตย์	45
4.1.1.1 ประสิทธิภาพระบบติดตามดวงอาทิตย์แบบแกนเดียว	45
4.1.1.2 ประสิทธิภาพระบบติดตามดวงอาทิตย์แบบสองแกน	47
4.1.1.3 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพระบบติดตามดวงอาทิตย์	48
4.1.2 ลักษณะโครงสร้างรองรับแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบติดตามดวงอาทิตย์	50
4.1.2.1 การติดตั้งแบบเสาเดี่ยว (Pole mounting)	50
4.1.2.2 การติดตั้งบนพื้น (Ground mounting)	52
4.1.3 โครงสร้างรองรับแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบติดตามดวงอาทิตย์	54
4.1.3.1 ระบบติดตามดวงอาทิตย์สองแกน ที่ศูนย์การเรียนรู้เพื่อโลกสีเขียว (All Green Learning Center: AGLC)	55
4.1.3.2 ระบบติดตามดวงอาทิตย์สองแกน ที่สวนป่ามหาชีวลัยอีสาน	56
4.1.3.3 ระบบติดตามดวงอาทิตย์สองแกน บนอาคารเรวัตี 47 อพาร์ทเมนต์	58
4.2 การออกแบบโครงสร้างรองรับแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบติดตามดวงอาทิตย์ เพื่อใช้งานกับโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์	61

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.2.1 การออกแบบโครงสร้างรองรับแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบติดตามดวงอาทิตย์	61
4.2.1.1 V-pole solar tracking	62
4.2.1.2 Louver solar tracking	65
4.2.2 การทดสอบโครงสร้างรองรับแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบติดตามดวงอาทิตย์	68
4.2.2.1 ค่าโมเมนต์ดัดสูงสุดของแต่ละชั้นส่วนในโครงสร้าง	68
4.2.2.2 ค่าแรงกดลงฐานราก	72
4.2.3 ต้นทุนค่าใช้จ่ายของโครงสร้าง	76
4.2.3.1 พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จากโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์แบบหมุนคงที่	76
4.2.3.2 กำลังไฟฟ้าของโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์แบบสองแกน	76
4.2.3.3 ต้นทุนค่าใช้จ่ายของโครงสร้าง	77
4.3 อภิปรายผลการศึกษา	79
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	81
5.1 สรุปผลการวิจัย	81
5.2 ข้อเสนอแนะ	82
รายการอ้างอิง	83
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก รูปภาพการออกแบบและการทดสอบโครงสร้าง	92
ภาคผนวก ข ตารางคุณสมบัติและราคาเหล็ก	132
ภาคผนวก ค การคำนวณกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็ม	150
ภาคผนวก ง การใช้โปรแกรม ETABS	159
ประวัติผู้เขียน	173

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของเสาเดี่ยว	17
2.2 รายละเอียดการฝังเสาเดี่ยวลงในดิน	18
2.3 พลังงานและความเข้มแสงจากระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์รูปแบบต่าง ๆ	32
3.1 หน่วยแรงลมในการออกแบบโครงสร้างอาคาร	42
3.2 ค่าตัวประกอบการผลิตไฟฟ้า (Plant Factor) ของโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์	44
4.1 ประสิทธิภาพของระบบติดตามดวงอาทิตย์	49
4.2 ลักษณะโครงสร้างรองรับแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบติดตามดวงอาทิตย์	54
4.3 โครงสร้างรองรับแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบติดตามดวงอาทิตย์สองแกนในประเทศไทย	60
4.4 โครงสร้างแบบ V-pole และ โครงสร้างที่ติดตั้งในปัจจุบัน	64
4.5 โครงสร้างแบบ Louver และ โครงสร้างที่ติดตั้งในปัจจุบัน	67
4.6 วัสดุที่ใช้กับโครงสร้างแบบ V-pole solar tracking	69
4.7 วัสดุที่ใช้กับโครงสร้างแบบ Louver solar tracking	71
4.8 คำน้้ำหนักของ supports ของ V-pole solar tracking	72
4.9 คำน้้ำหนักของ supports ของ Louver solar tracking	74
4.10 ฐานรากและเสาเข็มของ V-pole solar tracking และ Louver solar tracking	75
4.11 ต้นทุนของโครงสร้างระบบติดตามดวงอาทิตย์สองแกน	78
4.12 ข้อได้เปรียบ-เสียเปรียบของโครงสร้างที่ออกแบบ	79

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
2.1 แผนที่ศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์เฉลี่ยตลอดปี	6
2.2 ค่าความเข้มรังสีดวงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อเดือน โดยเฉลี่ยทุกพื้นที่ทั่วประเทศ	7
2.3 แผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด Monocrystalline silicon	9
2.4 ขั้นตอนการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์แบบผลึกเดี่ยว	10
2.5 แผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด Polycrystalline silicon	11
2.6 ขั้นตอนการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์แบบหลายผลึก	11
2.7 แผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด Amorphous silicon	12
2.8 ขั้นตอนการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์แบบไม่เป็นรูปผลึก	13
2.9 ลักษณะการโคจรของโลกรอบดวงอาทิตย์	14
2.10 การเคลื่อนที่ของดวงอาทิตย์ในรอบปี	15
2.11 การติดตั้งบนเสาเดี่ยว	16
2.12 ลักษณะการติดตั้งเสาเหล็กเดี่ยว	17
2.13 การติดตั้งบนพื้นโดยมีฐานรากคอนกรีตและโครงอะลูมิเนียม	19
2.14 การติดตั้งบนหลังคาลาดเอียง	20
2.15 อุปกรณ์สำคัญของการติดตั้งบนหลังคาแบบเอียง	20
2.16 การติดตั้งรางรองรับแผง	21
2.17 ตัวล็อกแผง	22
2.18 การติดตั้งบนฐานน้ำหนักรถ	23
2.19 การติดตั้งเจาะยึดกับพื้นหลังคา	23
2.20 การติดตั้งโดยวางบนหลังคา	24
2.21 การติดตั้งแทนหลังคา	25
2.22 การติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์เพื่อเป็นผนังอาคาร	26
2.23 เครื่องกลอย่างง่ายสำหรับการติดตามดวงอาทิตย์	26
2.24 Aerodynamic analysis of a photovoltaic solar tracker	27
2.25 ระบบติดตามดวงอาทิตย์แบบถ่วงน้ำหนัก	28
2.26 ส่วนประกอบของระบบติดตามดวงอาทิตย์แบบถ่วงน้ำหนัก	28
2.27 Overall view of the designed open-loop sun tracker system	29

สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
2.28 Hydraulic Tracker Design	30
2.29 Angled Tracker Design	30
2.30 TIE Fighter Design	31
2.31 ระบบโซลาร์เซลล์เคลื่อนที่ได้สองแกนตามดวงอาทิตย์สำหรับใช้ควบคุมแผงโซลาร์เซลล์มากกว่าหนึ่งแผ่น	32
2.32 แผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ติดตั้งระบบติดตามแสงอาทิตย์สองแกนด้วยการปรับสมดุลน้ำ	33
2.33 ระบบติดตามดวงอาทิตย์สองแกนและระบบที่ติดตั้งแบบมุมคงที่	34
2.34 การเปรียบเทียบพลังงานของระบบติดตามดวงอาทิตย์สองแกนและระบบที่ติดตั้งแบบมุมคงที่	34
2.35 อุปกรณ์หมุนแผงเซลล์แสงอาทิตย์ขนาด 30 วัตต์	35
2.36 ระบบติดตามดวงอาทิตย์แบบสองแกนควบคุมด้วยแผงเซลล์แสงอาทิตย์	36
2.37 ระบบติดตามดวงอาทิตย์แบบติดตั้งแบบมุมคงที่ (ก) แบบติดตามดวงอาทิตย์ทิศเหนือ-ทิศใต้ (ข) และแบบติดตามดวงอาทิตย์ทิศตะวันออก-ทิศตะวันตก (ค)	37
4.1 โครงสร้างรองรับแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบติดตามดวงอาทิตย์แกนเดียวบนเสาเดี่ยว	51
4.2 โครงสร้างรองรับแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบติดตามดวงอาทิตย์สองแกนบนเสาเดี่ยว	51
4.3 Worm gear motor และ Linear tilt motor	52
4.4 โครงสร้างรองรับแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบติดตามดวงอาทิตย์แกนเดียวบนพื้น	52
4.5 โครงสร้างรองรับแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบติดตามดวงอาทิตย์สองแกนบนพื้น	53
4.6 โครงสร้างรองรับแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบที่ติดตามดวงอาทิตย์ที่ AGLC	55
4.7 มอเตอร์ที่ยึดกับสายเคเบิลเพื่อขับเคลื่อนโครงสร้างรองรับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ AGLC	55
4.8 โครงสร้างรองรับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่สวนป่ามหาชีวัลย์อีสาน	56
4.9 โครงสร้างรองรับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่สวนป่ามหาชีวัลย์อีสาน	57
4.10 จุดหมุนที่ติดตั้งกับโครงสร้างรองรับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่สวนป่ามหาชีวัลย์อีสาน	57
4.11 การติดตั้งโครงสร้างบนอาคารเรเวตี 47 อพาร์ทเมนต์	58
4.12 ลักษณะโครงสร้างรองรับแผงเซลล์แสงอาทิตย์บนอาคารเรเวตี 47 อพาร์ทเมนต์	59
4.13 อุปกรณ์ของโครงสร้างรองรับแผงเซลล์แสงอาทิตย์บนอาคารเรเวตี 47 อพาร์ทเมนต์	59

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4.14 ระบบติดตามดวงอาทิตย์สองแกนของชนิด เรืองรุ่งชัยกุล (2560)	61
4.15 V-pole solar tracking	62
4.16 ชุดขับเคลื่อนระบบติดตามดวงอาทิตย์ของ V-pole solar tracking	63
4.17 Louver solar tracking	65
4.18 แกนหมุน และตัวขับเคลื่อนแผงเซลล์แสงอาทิตย์ของ Louver solar tracking	66
4.19 การจำลองโครงสร้าง V-pole solar tracking	68
4.20 V-pole solar tracking DCRs	70
4.21 การจำลองโครงสร้าง Louver solar tracking	70
4.22 Louver solar tracking DCRs	72
4.23 ฐานรากและเสาเข็มของ V-pole solar tracking	73
4.24 ฐานรากและเสาเข็มของ Louver solar tracking	75

บทที่ 1 บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

พลังงานแสงอาทิตย์ เป็นพลังงานหมุนเวียนประเภทหนึ่ง ที่ได้รับความสนใจในการพัฒนา เพราะเป็นพลังงานสะอาด ไม่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ซึ่งประเทศไทยมีศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์ค่อนข้างสูง จากการคำนวณรังสีรวมของดวงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อปีของพื้นที่ทั่วประเทศ มีค่าเท่ากับ $17.8 \text{ MJ/m}^2\text{-day}$ (กระทรวงพลังงาน, 2559) การนำพลังงานแสงอาทิตย์มาประยุกต์ใช้ประโยชน์สามารถจำแนกได้เป็น 2 รูปแบบ คือ การใช้พลังงานแสงอาทิตย์เพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า และ การใช้พลังงานแสงอาทิตย์ในรูปของความร้อน เช่น การทำน้ำร้อน การนำมาใช้ในอุตสาหกรรมเกลือ การกลั่นน้ำ การอบแห้งผลผลิตทางการเกษตร เป็นต้น การวิจัยและพัฒนาด้านเทคโนโลยีพลังงานแสงอาทิตย์มีมาอย่างต่อเนื่อง รวมถึงระบบติดตามดวงอาทิตย์เพื่อที่จะนำพลังงานแสงอาทิตย์มาใช้ประโยชน์อย่างมีประสิทธิภาพและคุ้มค่าที่สุด (ธนิต เรื่องรุ่งชัยกุล และวัชรวิชัย เจียรวรรณ, 2558)

การติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์เพื่อนำไปใช้งานส่วนใหญ่ยังคงเป็นการติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบมุงคงที่ (Fixed system) ซึ่งเป็นการติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่กำหนดองศาของการติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์ตามองศาเส้นละติจูดของพื้นที่นั้น ๆ และหันแผงเซลล์แสงอาทิตย์เข้าหาเส้นศูนย์สูตรเพื่อรับพลังงานแสงอาทิตย์ได้อย่างมีประสิทธิภาพที่สุด แต่ได้รับค่าพลังงานแสงอาทิตย์ได้ดีเพียงบางช่วงเวลา (ประมาณ 5-6 ชั่วโมงต่อวัน) เพราะดวงอาทิตย์มีการเคลื่อนที่ตลอดทั้งวันจากทิศตะวันออกไปสู่ทิศตะวันตก ทำให้การติดตั้งแบบนี้ได้พลังงานสูงสุดในเวลาเที่ยงวันเท่านั้น ส่งผลให้ประสิทธิภาพการใช้งานของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ยังมีศักยภาพไม่เต็มที่ ด้วยเหตุนี้ นักวิจัยจึงมีการศึกษา ออกแบบ และพัฒนาระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์แบบติดตามดวงอาทิตย์ (Tracking system) โดยใช้เทคนิค วิธีการที่แตกต่างกัน ซึ่งคาดว่าจะสามารถรับแสงอาทิตย์ได้เพิ่มขึ้นอีกประมาณ 1.3-1.5 เท่า (การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย, 2559)

ในส่วนของโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ หรือเรียกว่า “Solar Farm” ส่วนใหญ่ยังติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบมุงคงที่ รวมถึงในประเทศไทย ส่งผลให้การผลิตไฟฟ้าได้ไม่เต็มประสิทธิภาพ ประกอบกับชุดควบคุมระบบติดตามดวงอาทิตย์ในปัจจุบันใช้ควบคุมแผงเซลล์แสงอาทิตย์ 1-2 แผ่น เมื่อนำมาติดตั้งกับระบบขนาดใหญ่ทำให้มีงบประมาณในการก่อสร้างสูงขึ้น (ราชรัฐ ยี่ตัน, 2556) ต่างกับต่างประเทศที่นำระบบติดตามดวงอาทิตย์มาใช้หลายรูปแบบ รวมถึง

การใช้กับโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ ซึ่งมีรูปแบบแตกต่างกันออกไป โดยเฉพาะลักษณะของโครงสร้าง ขึ้นอยู่กับการออกแบบและตำแหน่งทางภูมิศาสตร์ที่มีความเฉพาะในแต่ละพื้นที่ ด้วยสาเหตุนี้ ทำให้ผู้วิจัยสนใจศึกษาลักษณะการติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์ควบคู่กับระบบติดตามดวงอาทิตย์ และออกแบบโครงสร้างรองรับแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบติดตามดวงอาทิตย์ ให้มีความเหมาะสมกับประเทศไทย ติดตั้งได้ง่าย กลไกการทำงานไม่ซับซ้อน มีต้นทุนไม่สูงมาก สะดวกในการดูแลและบำรุงรักษาระบบ เพื่อการใช้งานได้อย่างยั่งยืน

1.2 วัตถุประสงค์

- (1) เพื่อศึกษาระบบผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์แบบติดตามดวงอาทิตย์และลักษณะการติดตั้ง
- (2) เพื่อออกแบบโครงสร้างและชุดขับเคลื่อนระบบติดตามดวงอาทิตย์สำหรับโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์

1.3 ขอบเขตการศึกษา

- (1) ออกแบบเพื่อใช้งานกับระบบติดตามดวงอาทิตย์ 2 แกน (4 ทิศทาง) คือ ทิศเหนือ-ทิศใต้ และ ทิศตะวันออก-ทิศตะวันตก
- (2) ศึกษาเปรียบเทียบกับโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ที่ติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบมุมคงที่ ขนาด 1 เมกะวัตต์

1.4 ข้อยกเว้นของการศึกษา

- (1) ข้อมูลเกี่ยวกับประสิทธิภาพของระบบผลิตไฟฟ้าจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบติดตามดวงอาทิตย์เป็นข้อมูลหตุยภูมิจากงานวิจัยที่ผ่านมา
- (2) ค่าใช้จ่ายของโครงสร้างเป็นการประมาณราคาจากข้อมูลในทางทฤษฎี และงานวิจัยที่ได้ศึกษามา

1.5 ขั้นตอนการดำเนินงาน

(1) ศึกษาข้อมูลทุติยภูมิเกี่ยวกับทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับประสิทธิภาพของระบบติดตามดวงอาทิตย์ และลักษณะโครงสร้างรองรับแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบติดตามดวงอาทิตย์

(2) ศึกษาข้อมูลปฐมภูมิของโครงสร้างรองรับแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบติดตามดวงอาทิตย์ที่มีการติดตั้งและใช้งานในประเทศไทย รวมทั้งสัมภาษณ์บุคคลที่มีความเกี่ยวข้องกับระบบติดตามดวงอาทิตย์

(3) ออกแบบโครงสร้างรองรับแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบติดตามดวงอาทิตย์

(4) ทดสอบโครงสร้างและชุดขับเคลื่อนแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ออกแบบโดยใช้ซอฟต์แวร์ และเปรียบเทียบต้นทุนในการติดตั้งโครงสร้าง

(5) สรุปผลการศึกษาและจัดทำรายงานการศึกษา

1.6 ประโยชน์ที่จะได้รับ

(1) สามารถติดตั้งและใช้งานโครงสร้างรองรับแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบติดตามดวงอาทิตย์ที่เหมาะสมกับประเทศไทย เพื่อให้มีประสิทธิภาพในการผลิตไฟฟ้าสูงสุด

(2) สามารถนำระบบที่ออกแบบไว้ไปประยุกต์ใช้งานภายในครัวเรือน หรือการเกษตรที่มีแรงดันไฟฟ้าสูง เช่น ระบบสูบน้ำพลังงานแสงอาทิตย์ ระบบผลิตไฟฟ้าบนหลังคา (Solar rooftop) เป็นต้น ซึ่งเป็นการส่งเสริมให้เกิดการนำพลังงานแสงอาทิตย์มาใช้อย่างเต็มประสิทธิภาพ

บทที่ 2

วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากการรวบรวมแนวคิด ทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับระบบผลิตไฟฟ้าจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบติดตามดวงอาทิตย์ และการวิเคราะห์เพื่อออกแบบโครงสร้างรองรับแผงเซลล์แสงอาทิตย์เพื่อให้มีความเข้าใจต่อการศึกษาในครั้งนี้ มีสาระสำคัญดังต่อไปนี้

2.1 ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับพลังงานแสงอาทิตย์

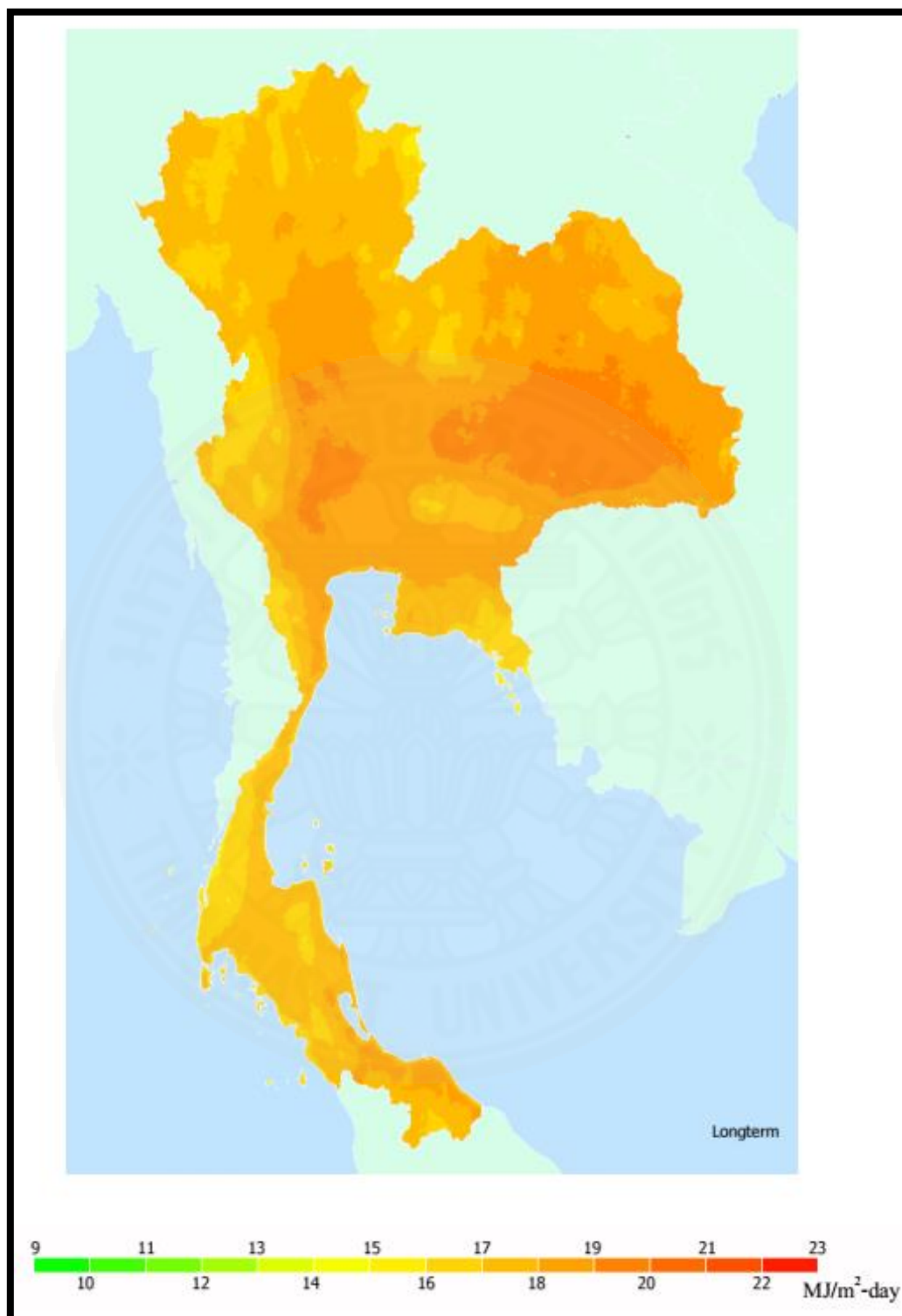
2.1.1 พลังงานแสงอาทิตย์

แสงอาทิตย์เป็นพลังงานสะอาด ไม่ทำปฏิกิริยาอันจะทำให้สิ่งแวดล้อมเป็นพิษ เป็นแหล่งพลังงานธรรมชาติที่มีขนาดใหญ่ที่สุดและมีอยู่ทั่วไป แต่การนำมาใช้ประโยชน์อาจยังมีข้อจำกัดอยู่บ้างเนื่องจากแสงอาทิตย์มีเฉพาะในตอนกลางวัน ตลอดจนมีความเข้มของแสงอาทิตย์ที่ไม่แน่นอนเพราะขึ้นอยู่กับสภาพอากาศและฤดูกาลที่เปลี่ยนไป แสงอาทิตย์เกิดจากปฏิกิริยาเทอร์โมนิวเคลียร์ในดวงอาทิตย์ เมื่อแสงอาทิตย์เดินทางมาถึงนอกชั้นบรรยากาศของโลกจะมีความเข้มของแสงอาทิตย์โดยเฉลี่ยประมาณ 1,350 วัตต์ต่อตารางเมตร แต่กว่าจะลงมาถึงพื้นโลกพลังงานบางส่วนต้องสูญเสียไปเมื่อผ่านชั้นบรรยากาศต่าง ๆ ที่ห่อหุ้มโลก เช่น ชั้นโอโซน ชั้นไอน้ำ ชั้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ทำให้ความเข้มแสงอาทิตย์ลดลงเหลือประมาณ 1,000 วัตต์ต่อตารางเมตร (หรือประมาณร้อยละ 70) ปริมาณแสงอาทิตย์ที่ได้รับบนพื้นที่ใดพื้นที่หนึ่งจะมีปริมาณสูงสุดเมื่อพื้นที่นั้นทำมุมตั้งฉากกับแสงอาทิตย์ ดังนั้นหากต้องการให้พื้นที่ได้รับแสงอาทิตย์ได้มากที่สุดต่อวันก็จะต้องปรับพื้นที่รับแสงนั้น ๆ ตามการเคลื่อนที่ของแสงอาทิตย์ซึ่งจะเคลื่อนที่จากทิศตะวันออกไปสู่ทิศตะวันตกเสมอ นอกจากนั้นจากการที่โลกเอียงทำให้ซีกโลกเหนือหันหน้าเข้าหาดวงอาทิตย์ในฤดูร้อนและเอียงซีกโลกใต้หันหน้าเข้าหาดวงอาทิตย์ในฤดูหนาว ดังนั้น เราจึงต้องปรับมุมพื้นที่รับแสงนั้น ๆ ในแนวเหนือใต้ (มุมก้มและมุมเงย) ให้สอดคล้องตามฤดูกาลด้วยเพื่อให้พื้นที่นั้น ๆ รับแสงอาทิตย์ได้มากที่สุดตลอดทั้งปี ประเทศไทยตั้งอยู่ระหว่างเส้นละติจูดที่ 6-20 องศาเหนือ จะได้รับแสงอาทิตย์เฉลี่ยทั้งปีประมาณ 4-5 กิโลวัตต์ชั่วโมงต่อตารางเมตรต่อวัน ซึ่งหากสามารถปรับพื้นที่รับแสงให้ติดตามแสงอาทิตย์ได้ตลอดเวลาแล้วคาดว่าจะสามารถรับแสงได้เพิ่มขึ้นอีกประมาณ 1.3-1.5 เท่า (การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย, 2559)

2.1.2 ศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์ของประเทศไทย

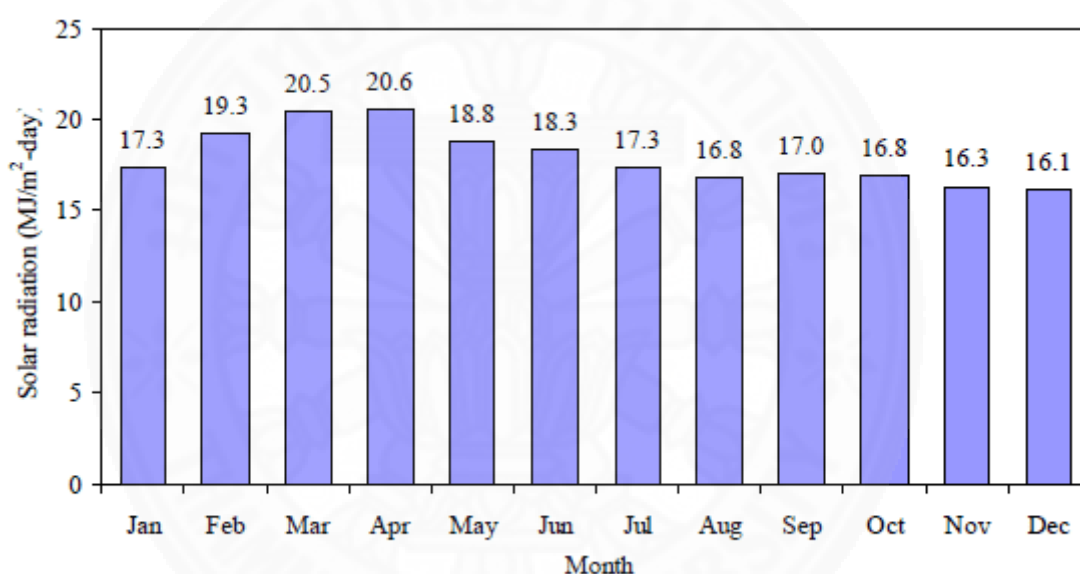
โดยทั่วไปศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์ของพื้นที่แห่งหนึ่งจะสูงหรือต่ำขึ้นกับปริมาณรังสีอาทิตย์ที่ตกกระทบพื้นที่นั้น หรือที่เรียกว่า “ค่าความเข้มรังสีอาทิตย์” (global radiation) มีหน่วยทางด้านพลังงานเป็น เมกกะจูลต่อตารางเมตร (MJ/m^2) โดยบริเวณที่ได้รับรังสีอาทิตย์มากก็จะมีศักยภาพในการนำพลังงานแสงอาทิตย์มาใช้สูง แนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของค่าความเข้มรังสีอาทิตย์จะเป็นไปตามพื้นที่ มีการเปลี่ยนแปลงตามเวลาในรอบวันและการเปลี่ยนแปลงตามฤดูกาลในรอบปี กล่าวคือ ในพื้นที่หนึ่ง ๆ ค่าความเข้มรังสีอาทิตย์จะเพิ่มขึ้นจากช่วงเช้าจนถึงค่าสูงสุดในช่วงเวลาเที่ยงวัน และลดต่ำลงจนถึงช่วงเย็น ซึ่งเป็นผลมาจากการเปลี่ยนแปลงของมวลอากาศ (air mass) ซึ่งรังสีอาทิตย์เคลื่อนที่ผ่านเข้ามายังพื้นผิวโลก และผลจากมุมตกกระทบของแสงอาทิตย์ซึ่งเปลี่ยนแปลงตั้งแต่เช้าจนถึงเย็น สำหรับการเปลี่ยนแปลงตามพื้นที่เป็นผลมาจากสภาพทางอุตุนิยมวิทยาโดยมีเมฆเป็นตัวแปรที่สำคัญ (การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย, 2559)

ภาพที่ 2.1 แสดงบริเวณที่ได้รับรังสีดวงอาทิตย์สูงสุด ($19\text{-}20 \text{ MJ}/\text{m}^2\text{-day}$) จะอยู่ในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ในบริเวณจังหวัดนครราชสีมา ชัยภูมิ ขอนแก่น มหาสารคาม บุรีรัมย์ สุรินทร์ ศรีสะเกษ ร้อยเอ็ด ยโสธร และอุบลราชธานี เนื่องจากเป็นบริเวณที่ราบสูงค่อนข้างแห้งแล้งมีการก่อดวงของเมฆน้อยจึงทำให้รังสีดวงอาทิตย์มีค่าสูง นอกจากนี้ยังมีพื้นที่ที่รับรังสีดวงอาทิตย์สูงอยู่ในบางส่วนของภาคกลางในบริเวณจังหวัดกำแพงเพชร พิจิตร ชัยนาท สิงห์บุรี อ่างทอง สุพรรณบุรี และกาญจนบุรี ทั้งนี้เพราะบริเวณดังกล่าวเป็นพื้นที่ราบลุ่มซึ่งมีการก่อดวงของเมฆน้อยกว่าบริเวณอื่นสำหรับภาคเหนือ ด้านตะวันตกของภาคกลางและภาคใต้รอยต่อระหว่างภาคเหนือ ภาคตะวันออกเฉียงเหนือและภาคตะวันออกจะได้รับรังสีดวงอาทิตย์ค่อนข้างต่ำ ทั้งนี้เพราะบริเวณดังกล่าวเป็นภูเขาและป่าไม้ซึ่งมีการก่อดวงของเมฆและฝนมากกว่าบริเวณพื้นที่ราบรังสีดวงอาทิตย์ในพื้นที่ดังกล่าวจึงมีค่าต่ำ กรณีของภาคใต้จะมีทั้งบริเวณที่ได้รับรังสีดวงอาทิตย์สูงและต่ำกระจายกันอยู่ ซึ่งเป็นผลมาจากอิทธิพลของลมมรสุมและลักษณะทางภูมิศาสตร์ของแต่ละพื้นที่ อย่างไรก็ตามเมื่อเฉลี่ยความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ทุกพื้นที่ตลอดทั้งปีพบว่ามีความเท่ากันกับ $18.0 \text{ MJ}/\text{m}^2\text{-day}$ ซึ่งถือว่ามีค่าค่อนข้างสูง (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2552)



ภาพที่ 2.1 แผนที่ศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์เฉลี่ยตลอดปี พ.ศ.2552, กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. “แผนที่ศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์ในประเทศไทย.” www.dede.go.th (สืบค้นเมื่อวันที่ 2 พฤศจิกายน 2559).

จากข้อมูลด้านศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์ของประเทศไทยที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น สรุปได้ว่าประเทศไทยนั้นมีศักยภาพทางด้านพลังงานแสงอาทิตย์ค่อนข้างสูง โดยเฉพาะในช่วงเดือนเมษายนถึงพฤษภาคม (ภาพที่ 2.2) จึงได้มีการพัฒนาเพื่อนำพลังงานแสงอาทิตย์มาใช้ให้เกิดประโยชน์ โดยกรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงานเสนอให้การใช้พลังงานจากแสงอาทิตย์เป็นหนึ่งในพลังงานทางเลือกทดแทนทางหนึ่ง โดยเริ่มดำเนินการมาตั้งแต่ปี พ.ศ. 2526 แต่พลังงานทางเลือกยังไม่เป็นที่ยอมรับอย่างแพร่หลายมากนักในตอนนั้น (เนื่องจากราคาน้ำมันมีราคาสูง) แต่ตั้งแต่ช่วงปี พ.ศ. 2540 เป็นต้นมา พลังงานทดแทนได้รับความสำคัญอีกครั้งหนึ่งซึ่งพลังงานแสงอาทิตย์ก็เป็นส่วนหนึ่งในการพัฒนาเป็นพลังงานทดแทน



ภาพที่ 2.2 ค่าความเข้มรังสีดวงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อเดือน โดยเฉลี่ยทุกพื้นที่ทั่วประเทศ, กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. “แผนที่ศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์ในประเทศไทย.” www.dede.go.th (สืบค้นเมื่อวันที่ 2 พฤศจิกายน 2559).

2.1.3 เซลล์แสงอาทิตย์

เซลล์แสงอาทิตย์ (Solar cell) มีชื่อเรียกหลายชื่อ เช่น เซลล์สุริยะ พีวี (PV) เป็นต้น มีที่มาจากคำว่า Photovoltaic โดยแยกออกเป็น *photo* หมายถึง แสง *volt* หมายถึง ความต่างศักย์ไฟฟ้า เมื่อรวมกันหมายถึง กระบวนการผลิตไฟฟ้าจากการตกกระทบของแสงบนวัสดุที่มีความสามารถในการเปลี่ยนพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้าได้โดยตรง เป็นสิ่งประดิษฐ์ทางอิเล็กทรอนิกส์ที่สร้างขึ้นเพื่อเป็นอุปกรณ์สำหรับเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์ให้เป็นพลังงานไฟฟ้า โดยการนำสารกึ่งตัวนำ เช่น ซิลิกอน ซึ่งมีราคาถูกที่สุดและมีมากที่สุดบนพื้นโลกมาผ่านกระบวนการทางวิทยาศาสตร์เพื่อผลิตให้เป็นแผ่นบางบริสุทธิ์ และทันทีที่แสงตกกระทบบนแผ่นเซลล์ รังสีของแสงที่มีอนุภาคของพลังงานประกอบที่เรียกว่า โฟตอน (Photon) จะถ่ายเทพลังงานให้กับอิเล็กตรอน (Electron) ในสารกึ่งตัวนำจนมีพลังงานมากพอที่จะกระโดดออกมาจากแรงดึงดูดของอะตอม (atom) และเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระ ดังนั้นเมื่ออิเล็กตรอนเคลื่อนที่ครบวงจรจะทำให้เกิดไฟฟ้ากระแสตรงขึ้น เมื่อพิจารณาลักษณะการผลิตไฟฟ้าจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์พบว่า เซลล์แสงอาทิตย์จะมีประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าสูงสุดในช่วงเวลากลางวัน ซึ่งสอดคล้องและเหมาะสมในการนำเซลล์แสงอาทิตย์มาใช้ผลิตไฟฟ้า เพื่อแก้ไขปัญหาการขาดแคลนพลังงานไฟฟ้าในช่วงเวลากลางวัน (การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย, 2558)

เซลล์แสงอาทิตย์ถูกสร้างขึ้นมาครั้งแรกในปี ค.ศ. 1954 (พ.ศ. 2497) โดยแชปปิน (Chapin), ฟูลเลอร์ (Fuller) และเพียร์สัน (Pearson) แห่งเบลล์เทเลโฟน (Bell Telephone) ทั้ง 3 ท่านนี้ได้ค้นพบเทคโนโลยีการสร้างรอยต่อ พี-เอ็น (P-N) แบบใหม่ โดยวิธีการแพร่สารเข้าไปในผลึกของซิลิกอน จนได้เซลล์แสงอาทิตย์อันแรกของโลก ซึ่งมีประสิทธิภาพเพียงร้อยละ 6 ปัจจุบันนี้เซลล์แสงอาทิตย์ได้ถูกพัฒนาขึ้นจนมีประสิทธิภาพสูงกว่าร้อยละ 15 ในระยะแรกเซลล์แสงอาทิตย์ส่วนใหญ่จะใช้สำหรับโครงการด้านอวกาศ ดาวเทียมหรือยานอวกาศที่ส่งจากพื้นโลกไปโคจรในอวกาศ ซึ่งใช้แผงเซลล์แสงอาทิตย์เป็นแหล่งกำเนิดพลังงานไฟฟ้า ต่อมาจึงได้มีการนำเอาแผงเซลล์แสงอาทิตย์มาใช้บนพื้นโลก เซลล์แสงอาทิตย์ในยุคแรก ๆ ส่วนใหญ่จะมีสีเทาดำ แต่ในปัจจุบันนี้ได้มีการพัฒนาให้เซลล์แสงอาทิตย์มีสีต่างกันไป เช่น แดง น้ำเงิน เขียว ทอง เป็นต้น เพื่อความสวยงาม

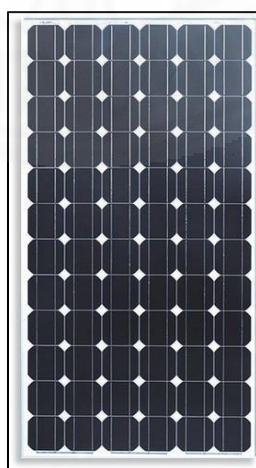
ในประเทศไทยเริ่มมีการติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์เพื่อผลิตไฟฟ้ามาตั้งแต่ปีพ.ศ. 2526 จนถึงปีพ.ศ. 2553 มียอดติดตั้งรวม 100.39 MW จ่ายไฟฟ้า (เฉพาะเชื่อมกับสายส่งของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย) ทั้งปีพ.ศ. 2553 รวม 21.6 GWh หรือ ร้อยละ 0.0134 ของปริมาณความต้องการใช้ไฟฟ้าทั้งหมด (161,350 GWh) โดยการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยผลิตไฟฟ้าได้ 2.2 GWh ผู้ผลิตรายย่อย 19.4 GWh

ตามพระราชบัญญัติการพัฒนาพลังงานหมุนเวียน 15 ปี นับจากปีพ.ศ. 2552 กำหนดเป้าหมายการใช้พลังงานหมุนเวียนไว้ที่ร้อยละ 20.3 ของพลังงานทั้งหมด โดยมีสัดส่วนของพลังงานจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์อยู่ที่ร้อยละ 6 ดังนั้น ตามแผนงาน ในปีพ.ศ. 2565 ประเทศไทย ต้องมีโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ด้วยเซลล์แสงอาทิตย์มีกำลังการผลิตรวม 500 MW ตัวเลขในปี พ.ศ. 2554 อยู่ระหว่างดำเนินการติดตั้ง 265 MW และอยู่ระหว่างการพิจารณาจากการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย อีก 336 MW (การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย, 2558)

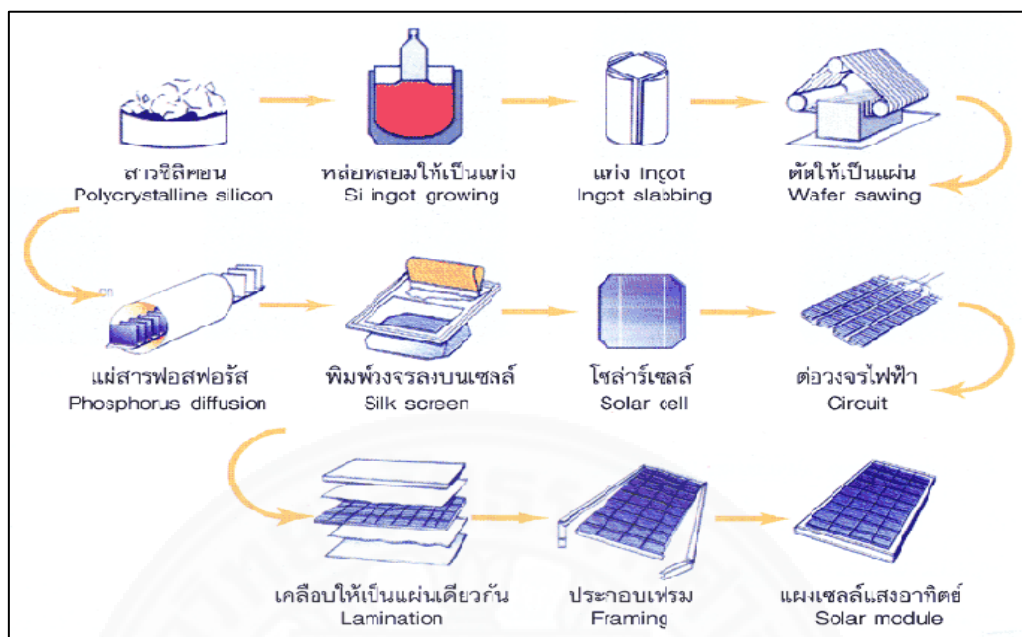
เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดที่ทำจากสารกึ่งตัวนำซิลิกอนแบ่งได้เป็น 3 ชนิดหลัก คือ

2.1.3.1 เซลล์แสงอาทิตย์แบบผลึกเดี่ยว หรือ Monocrystalline silicon

เซลล์แสงอาทิตย์แบบผลึกเดี่ยว มีประสิทธิภาพประมาณร้อยละ 15-20 (ภาพที่ 2.3) เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดนี้สร้างโดยการนำเอาซิลิกอนซึ่งผ่านการทำให้เป็นก้อนที่มีความบริสุทธิ์สูงมากถึงร้อยละ 99.999 ไปหลอมละลายที่อุณหภูมิสูงถึง 1,500 องศาเซลเซียส เพื่อทำการสร้างแท่งผลึกเดี่ยวขนาดใหญ่ (เส้นผ่าศูนย์กลาง 6-8 นิ้ว) จากผลึกตั้งต้น (Seed crystal) ด้วยเทคโนโลยีการดึงผลึก คุณภาพของผลึกเดี่ยวจะสำคัญมากต่อคุณสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์ต่อไปจะนำแท่งผลึกเดี่ยวนี้ไปตัดเป็นแผ่น ๆ เรียกว่า เวเฟอร์ หนาประมาณ 300 ไมโครเมตร และขัดความเรียบของผิว จากนั้นก็จะนำไปเจือสารที่จำเป็นในการทำให้เกิดเป็น p-n junction ขึ้นบนแผ่นเวเฟอร์ ด้วยวิธีการ diffusion ที่อุณหภูมิระดับ 1,000 องศาเซลเซียส หลังจากนั้นก็จะเป็นขั้นตอนการทำขั้วไฟฟ้าเพื่อนำกระแสไฟออกใช้ และขั้นสุดท้ายก็จะเป็นการเคลือบฟิล์มผิวหน้าเพื่อป้องกันการสะท้อนแสงให้น้อยที่สุดได้เซลล์ที่พร้อมใช้งาน หลังจากนั้นก็นำไปประกอบเข้าแผงดังภาพที่ 2.4



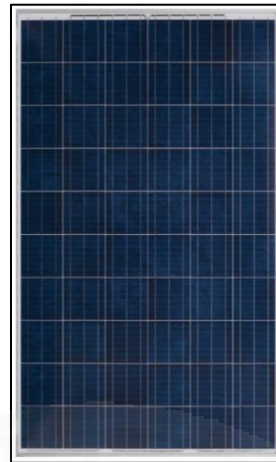
ภาพที่ 2.3 แผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด Monocrystalline silicon, Abha Energy “Solar Module.” www.abhaenergy.com (accessed November 15, 2016).



ภาพที่ 2.4 ขั้นตอนการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์แบบผลึกเดี่ยว, การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย. “เทคโนโลยีเซลล์แสงอาทิตย์.” <http://www3.egat.co.th/re/solarcell/solarcell.htm> (สืบค้นเมื่อวันที่ 10 ตุลาคม 2559).

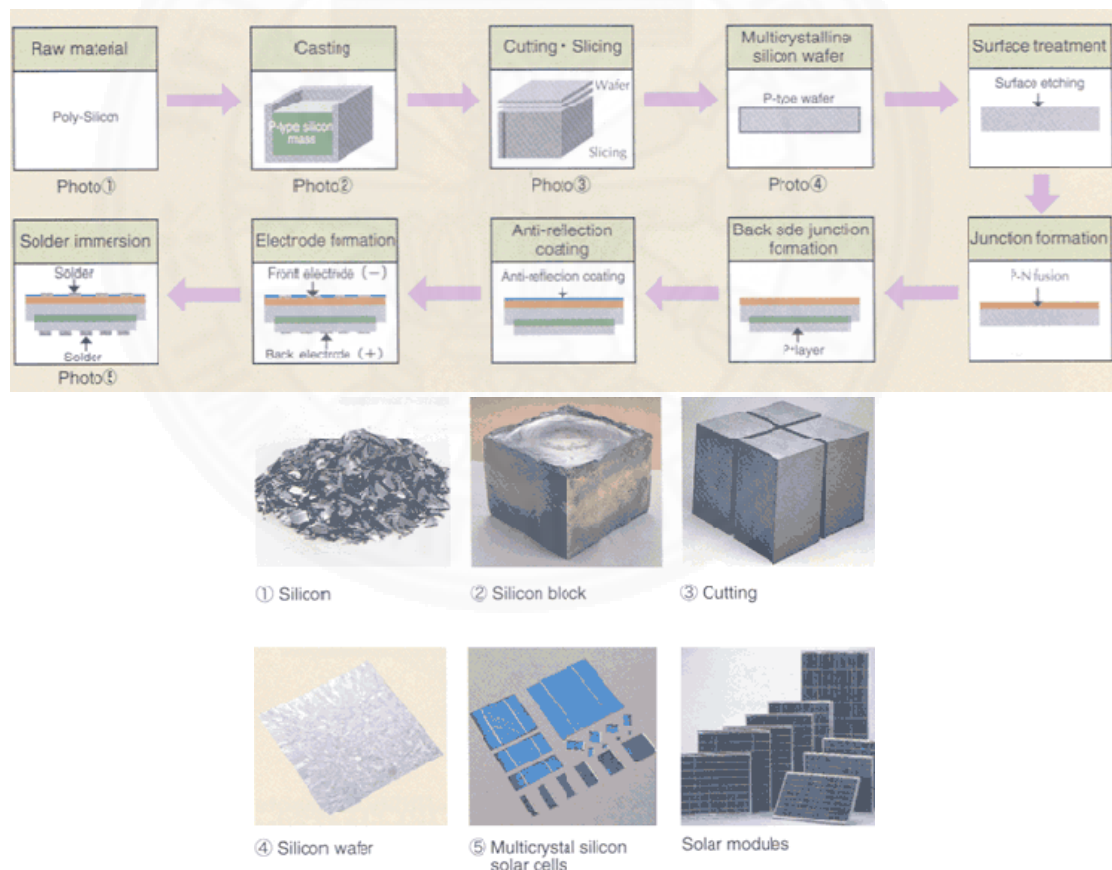
2.1.3.2 เซลล์แสงอาทิตย์แบบหลายผลึก หรือ Polycrystalline silicon

เซลล์แสงอาทิตย์แบบหลายผลึก มีประสิทธิภาพประมาณร้อยละ 13-16 (ภาพที่ 2.5) ได้ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อแก้ปัญหาต้นทุนสูงของเซลล์แสงอาทิตย์แบบผลึกเดี่ยวซิลิคอนแบบหลายผลึก คือก้อนซิลิคอนที่เกิดจากการรวมตัวกันของชิ้นเล็ก ๆ (ขนาดระดับไมโครเมตร-มิลลิเมตร) ของผลึกเดี่ยวของซิลิคอน ภาพที่ 2.6 แสดงขั้นตอนการผลิตของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดหลายผลึก ด้านบนของรูปแสดงการผลิตแบบ cast โดยจะเทซิลิคอนที่หลอมละลายเข้าไปใน crucible แล้วปล่อยให้เย็นลงอย่างช้า ๆ ซึ่งก็จะได้ก้อน ingot ของซิลิคอนหลายผลึกที่มีรูปร่างตาม crucible ที่ใช้ หลังจากนั้นการนำไปทำเป็นเซลล์แสงอาทิตย์ก็จะคล้ายกับกรณีของแบบผลึกเดี่ยว คือนำไปตัดเป็นเวเฟอร์หนาขนาด 300-400 ไมโครเมตร แล้วก็ทำ p-n junction ต่อไป ในส่วนของภาพด้านล่างเป็นการสร้างแผ่นซิลิคอนหลายผลึกที่จะใช้ในการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์โดยตรงจากสารหลอมเหลวของซิลิคอน เรียกวิธีนี้ว่า ribbon โดยวิธีนี้จะช่วยลดขั้นตอนที่จะต้องหั่นเป็นแผ่นเวเฟอร์ในกรณีที่ใช้ ingot



ภาพที่ 2.5 แผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด Polycrystalline silicon, DPA Solar. “Solar Panels.”

<http://dpasolar.com.au/solarpanels.html> (accessed November 17, 2016).



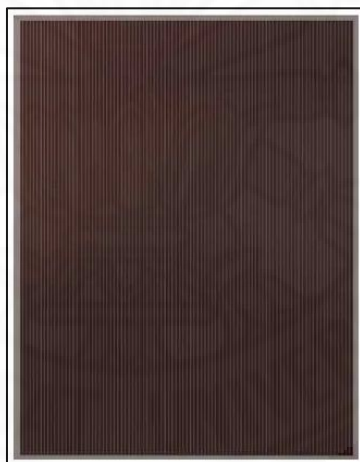
ภาพที่ 2.6 ขั้นตอนการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์แบบหลายผลึก, การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย.

“เทคโนโลยีเซลล์แสงอาทิตย์.” <http://www3.egat.co.th/re/solarcell/solarcell.htm> (สืบค้นเมื่อวันที่ 10 ตุลาคม 2559).

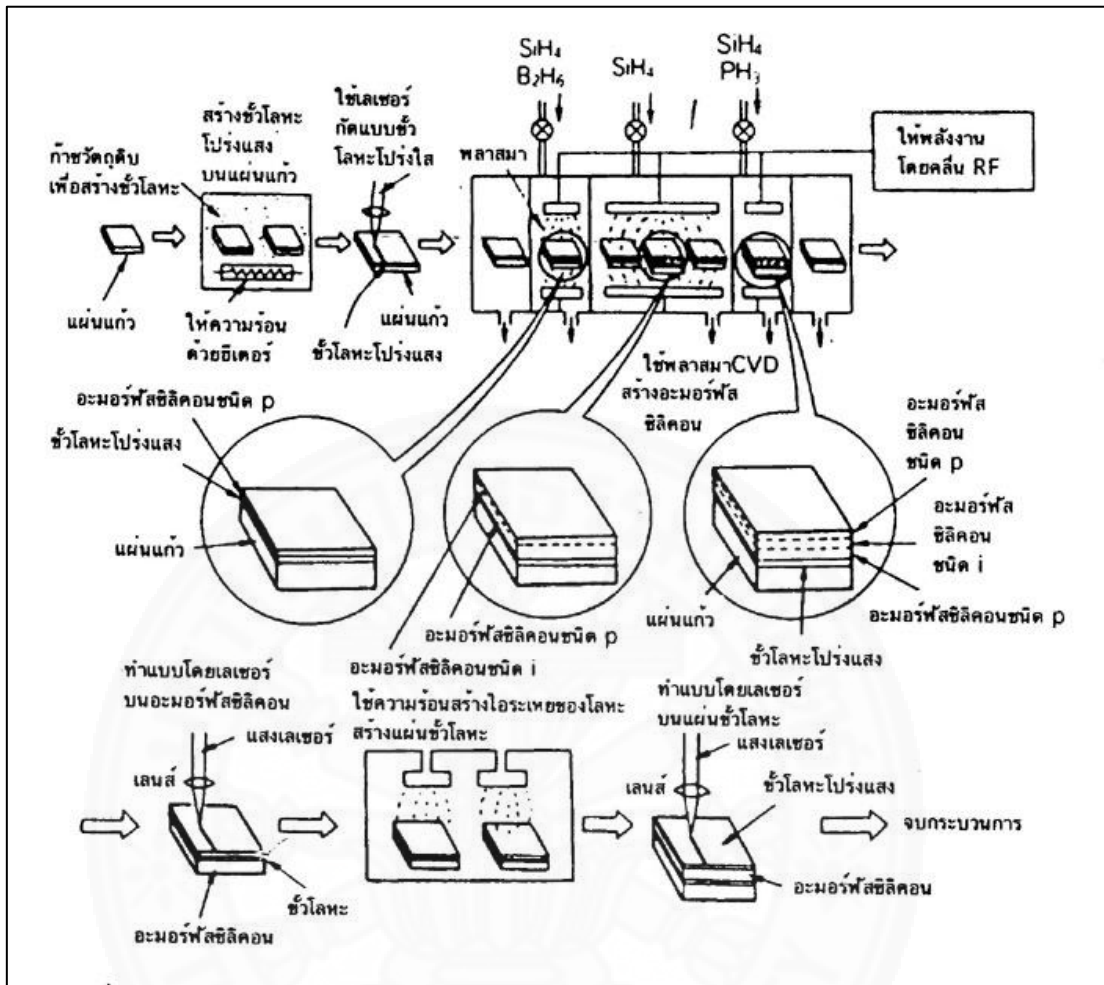
2.1.3.3 เซลล์แสงอาทิตย์แบบไม่เป็นรูปผลึก หรือ Amorphous silicon

เซลล์แสงอาทิตย์แบบไม่เป็นรูปผลึก หรือเรียกว่า เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบาง (Thin Film Solar Cell, TFSC) (ภาพที่ 2.7) หลักการการผลิตโดยทั่วไปคือ การนำเอาสารที่สามารถแปลงพลังงานจากแสงเป็นกระแสไฟฟ้า มาฉาบเป็นฟิล์มหรือชั้นบาง ๆ ซ้อนกันหลาย ๆ ชั้น (ภาพที่ 2.8) จึงเรียกเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดนี้ว่า ฟิล์มบาง หรือ thin film ซึ่งสารฉาบที่วานี้มีหลายชนิด ชื่อเรียกของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบางจึงแตกต่างกันออกไป ขึ้นอยู่กับชนิดวัสดุที่นำมาใช้ ได้แก่ อะมอร์ฟิซ Amorphous silicon (a-Si), Cadmium telluride (CdTe), Copper indium gallium selenide (CIS/CIGS) และ Organic photovoltaic cells (OPC)

ด้านประสิทธิภาพของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบางนั้นมีประสิทธิภาพเฉลี่ยอยู่ที่ร้อยละ 7-13 ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุที่นำมาทำเป็นฟิล์มฉาบ แต่สำหรับบ้านเรือนโดยทั่วไปแล้ว มีเพียงประมาณร้อยละ 6-8 เท่านั้น ที่ใช้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบาง (KLC Innovation, 2003)



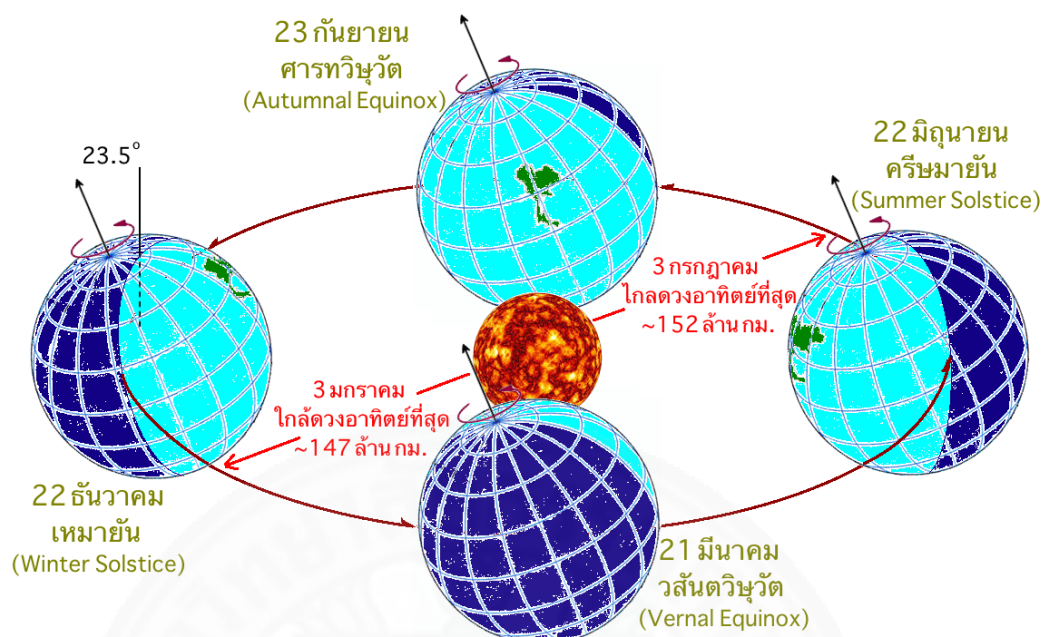
ภาพที่ 2.7 แผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด Amorphous silicon, Renewable Energy Infra structure Limited. “Amorphous silicon.” http://www.reihk.com/ps/category.php?id_category=33 (accessed November 10, 2016).



ภาพที่ 2.8 ขั้นตอนการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์แบบไม่เป็นรูปผลึก, อนุพล พรหมย้อย และ เบญจพร หนูคล้าย. “Solar cell แบบ Amorphous.” http://www.mne.eng.psu.ac.th/knowledge/student/solarcell/type_amor.htm (สืบค้นเมื่อวันที่ 25 พฤศจิกายน 2559).

2.1.4 การเคลื่อนที่ของดวงอาทิตย์

สุริยวิถี (Ecliptic) หมายถึง เส้นทางการเคลื่อนที่ของดวงอาทิตย์บนท้องฟ้า เกิดจากการที่โลกโคจรรอบดวงอาทิตย์เป็นรูปวงรี โดยที่แกนของโลกเอียง 23.5 องศา จากแนวตั้งฉากกับระนาบวงโคจร ในฤดูร้อนโลกหันขั้วเหนือเข้าหาดวงอาทิตย์ทำให้ซีกโลกเหนือกลายเป็นฤดูร้อน และซีกโลกใต้กลายเป็นฤดูหนาว หกเดือนต่อมาโลกโคจรไปอยู่อีกด้านหนึ่งของวงโคจร โลกหันขั้วใต้เข้าหาดวงอาทิตย์ (แกนของโลกเอียง 23.5 องศา คงที่ตลอดปี) ทำให้ซีกโลกใต้กลายเป็นฤดูร้อน และซีกโลกเหนือกลายเป็นฤดูหนาว ดังภาพที่ 2.9



ภาพที่ 2.9 ลักษณะการโคจรของโลกรอบดวงอาทิตย์, วฤทธิ มิตรธรรมศิริ. “ฤดูกาลและการโคจรของโลก
 โลกรอบดวงอาทิตย์.” ผลงานวิจัยสู่สังคม: คณะวิทยาศาสตร์ มหิดล <http://www.sc.mahidol.ac.th/usr/?p=400> (สืบค้นวันที่ 5 ตุลาคม 2559).

- วสันตวิษุวัต (Vernal Equinox) ประมาณวันที่ 20 - 21 มีนาคม
 ดวงอาทิตย์ขึ้นทางทิศตะวันออกเฉียง และตกทางทิศตะวันตกพอดี ทำให้กลางวันและกลางคืนยาวนาน
 เท่ากัน พออย่างเช้าฤดูหนาว ดวงอาทิตย์จะเคลื่อนที่ไปอยู่ในซีกฟ้าเหนือมากขึ้นในแต่ละวัน

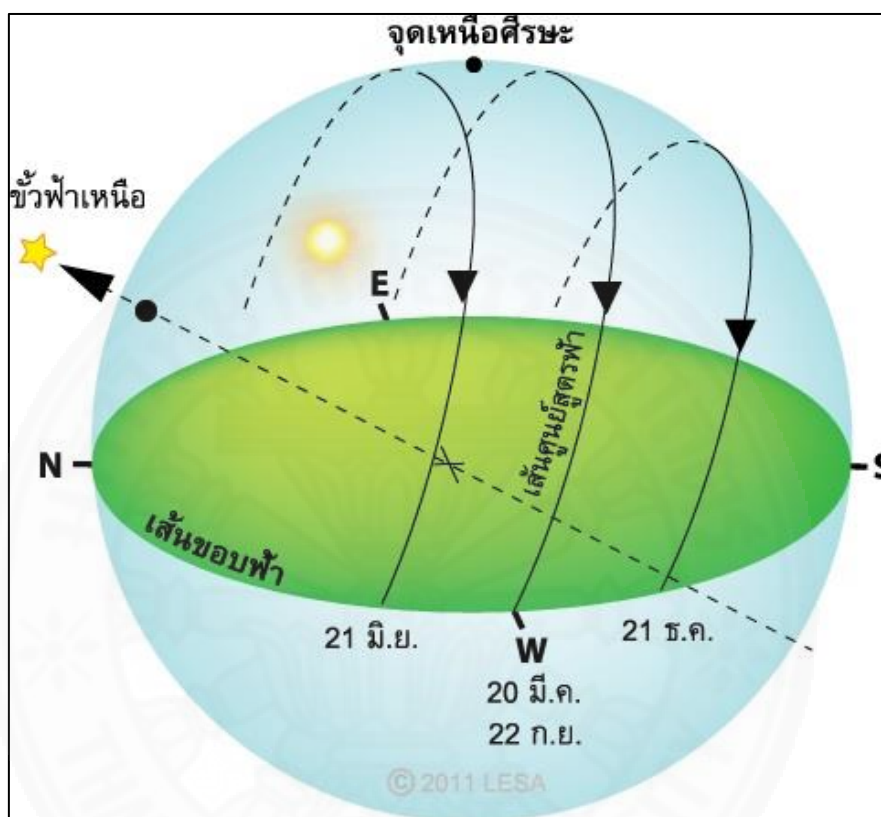
- ครีษมายัน (Summer Solstice) ประมาณวันที่ 20 - 21 มิถุนายน
 ดวงอาทิตย์อยู่ก่อนไปทางทิศเหนือมากที่สุด ทำให้ซีกโลกเหนือกลางวันยาวนานกว่ากลางคืน
 ดวงอาทิตย์ขึ้นเร็วและตกช้า หลังจากนั้นดวงอาทิตย์จะเคลื่อนที่ไปทางเส้นศูนย์สูตรฟ้า

- ศารทวิษุวัต (Autumnal Equinox) ประมาณวันที่ 22 - 23 กันยายน
 ดวงอาทิตย์จะขึ้นทางทิศตะวันออกเฉียงและตกทางทิศตะวันตกพอดีอีกครั้ง กลางวันและกลางคืนยาวนาน
 เท่ากัน พออย่างเช้าฤดูหนาว ดวงอาทิตย์จะเคลื่อนที่ไปอยู่ในซีกฟ้าใต้มากขึ้นในแต่ละวัน

- เหมายัน (Winter Solstice) ประมาณวันที่ 20 - 21 ธันวาคม
 ดวงอาทิตย์อยู่ก่อนไปทางทิศใต้มากที่สุด ทำให้ซีกโลกเหนือกลางวันยาวนานกว่ากลางวัน ดวงอาทิตย์
 ขึ้นช้าและตกเร็ว หลังจากนั้นดวงอาทิตย์จะเคลื่อนที่กลับมายังเส้นศูนย์สูตรฟ้าอีกครั้ง

เมื่อมองดูจากประเทศไทย ซึ่งอยู่บนซีกโลกเหนือ เราจะมองเห็นทิศทางการขึ้น-
 การตกของดวงอาทิตย์บนท้องฟ้าเริ่มจากวันที่ 21 มีนาคม ดวงอาทิตย์จะเริ่มขึ้นก่อนไปทาง
 ทิศตะวันออกเฉียงเหนือ ตกที่ ตะวันตกเฉียงเหนือ และก็เพิ่มองศาไปที่ละนิด จนมากที่สุดที่วันที่

21 มิถุนายน จากนั้นก็จะเคลื่อนที่ลงมาถึงวันที่ 21 กันยายน ที่ดวงอาทิตย์ขึ้นทิศตะวันออกเฉียง และ ตกทิศตะวันตกพอดี แล้วก็เริ่มเคลื่อนที่ลงใต้ไป จนถึง 21 ธันวาคม แล้วก็ขึ้นเหนือมาใหม่ในลักษณะเดียวกับภาพที่ 2.10



ภาพที่ 2.10 การเคลื่อนที่ของดวงอาทิตย์ในรอบปี, ศูนย์การเรียนรู้วิทยาศาสตร์โลกและดาราศาสตร์. “นาฬิกาแดด.” <http://www.lesa.biz/astromy/celestial-sphere/sundial> (สืบค้นเมื่อวันที่ 5 ตุลาคม 2559).

2.2 ระบบติดตามดวงอาทิตย์

ระบบติดตามดวงอาทิตย์หลักการทำงานทำหน้าที่ติดตามการเคลื่อนที่ของดวงอาทิตย์ บนท้องฟ้าในแต่ละวันโดยอัตโนมัติ จึงทำให้พื้นผิวของแผงเซลล์แสงอาทิตย์อยู่ในมุมที่ได้รับ แสงอาทิตย์เต็มที่ตามละติจูดของแต่ละพื้นที่ที่ติดตั้ง เป็นเทคโนโลยีที่ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการ นำพลังงานแสงอาทิตย์มาใช้ประโยชน์ให้มากที่สุด รวมถึงการผลิตไฟฟ้าจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ในปัจจุบันมีงานวิจัยเกี่ยวกับเรื่องนี้หลายเรื่อง เช่น แผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ติดตั้งระบบติดตาม แสงอาทิตย์สองแกนด้วยการปรับสมดุลน้ำ แผงที่มีระบบติดตามแสงอาทิตย์ ให้กำลังไฟฟ้าเฉลี่ย

มากกว่าแผงติดตั้งแบบมุมคงที่ ร้อยละ 37.63 (สิทธิชัย จินะวงษ์, น่านนที กัลยา, และ เสาวลักษณ์ ชัยยีน, 2556) เครื่องกลอย่างง่ายสำหรับการติดตามดวงอาทิตย์ พบว่าแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ติดตั้งอยู่กับเครื่องกลสามารถสูบน้ำได้มากกว่าแผ่นที่มุมคงที่ประมาณร้อยละ 17 (บุญรอด อาสาสะนา, 2551) เป็นต้น จากที่กล่าวมาจะเห็นได้ว่าระบบติดตามดวงอาทิตย์ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพได้ และมีการออกแบบที่แตกต่างกันออกไป

2.3 รูปแบบการติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์

การติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์มีหลายรูปแบบ ขึ้นอยู่กับลักษณะของพื้นที่ในการติดตั้ง สามารถแบ่งได้เป็น 5 ประเภท คือ การติดตั้งบนเสาเดี่ยว การติดตั้งบนพื้น การติดตั้งบนหลังคา การติดตั้งแทนหลังคา และการติดตั้งบูรณาการกับตัวอาคาร มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

2.3.1 การติดตั้งบนเสาเดี่ยว (Pole Mounting)

การติดตั้งบนเสาเดี่ยวเหมาะสำหรับการติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์จำนวนไม่มาก ตั้งแต่ 1 ถึง 12 แผ่น สามารถรับน้ำหนักสูงสุดได้ประมาณ 220 กิโลกรัม และใช้ขนาดเสาที่มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 6 - 6.625 นิ้ว (ภาพที่ 2.11) แต่ถ้าจำนวนแผงน้อยลง ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเสาก็ลดลงเช่นกัน ดังแสดงในตารางที่ 2.1



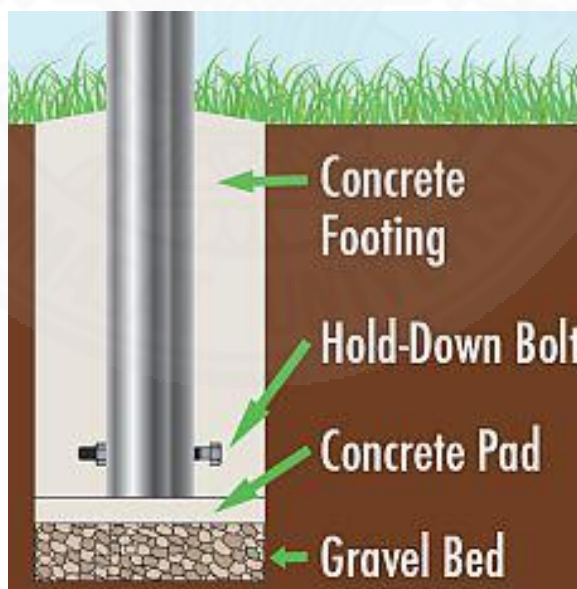
ภาพที่ 2.11 การติดตั้งบนเสาเดี่ยว, Jiangyin Titanergy Co., LTD. “Pole Ground Mounting System.” <http://www.titanergysolar.com/products.asp?Action=Detail&ID=87> (accessed April 18, 2017).

ตารางที่ 2.1 ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของเสาเดี่ยว

จำนวนแผง เซลล์แสงอาทิตย์	ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของเสา		น้ำหนักแผงฯ สูงสุด (กิโลกรัม)
	นิ้ว	มิลลิเมตร	
1-2	2.5	65	36
3-4	3	80	72
6-8	4	100	144
10-12	6	150	216

ที่มา: นภัทร วัจนเทพินทร์. การติดตั้งระบบไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยตนเอง. พิมพ์ครั้งที่ 1. ปทุมธานี: สกายบุ๊ก, 2553.

ลักษณะการติดตั้งบนเสาเดี่ยว เสาเดี่ยวต้องฝังลงในดินโดยการขุดหลุมให้ลึกพอรองรับหลุมด้วยอิฐหยาบหรือเทคอนกรีตให้แน่น เมื่อคอนกรีตแห้งแล้ว ตั้งเสาและเทคอนกรีตลงในหลุมจนถึงระดับของพื้นดิน เพื่อความแข็งแรงและทนต่อลมในพื้นที่ติดตั้งได้ ดังแสดงในภาพที่ 2.12 และตารางที่ 2.2



ภาพที่ 2.12 ลักษณะการติดตั้งเสาเหล็กเดี่ยว, Backyardcity.com. “Shade Sails Installation.” www.backyardcity.com/Shade-Sails/Shade-Sails-Installation.htm (accessed April 18, 2017).

ตารางที่ 2.2 รายละเอียดการฝังเสาเดี่ยวลงในดิน

พื้นที่แผงเซลล์ แสงอาทิตย์ (m ²)	ความเร็วลม (km/h)	เส้นผ่าศูนย์กลาง ของเสา (cm)	ระยะฝังตัวของ เสา (cm)	ปริมาตรคอนกรีต (m ³)
6	150	60	120	0.34
6	200	70	155	0.59
7	150	60	140	0.39
7	200	70	175	0.67
8	150	60	160	0.45
8	200	70	205	0.78
9	150	60	175	0.50
9	200	70	225	0.87
11	150	60	215	0.60
11	200	80	200	1.00

ที่มา: นภัทร วัจนเทพินทร์. การติดตั้งระบบไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยตนเอง. พิมพ์ครั้งที่ 1. ปทุมธานี: สกายบุ๊ก, 2553.

2.3.2 การติดตั้งบนพื้น (Ground Mounting)

การติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ขนาดใหญ่มาก เช่น โซลาร์ฟาร์ม (Solar Farm) หรือโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ (PV Power Plant) ที่มีกำลังผลิตหลายเมกะวัตต์ (ล้านวัตต์) รวมทั้งระบบขนาดใหญ่ที่มีกำลังผลิตหลายกิโลวัตต์ (พันวัตต์) จำเป็นต้องใช้พื้นที่ในการติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์จำนวนมาก ทางเลือกที่ดีคือติดตั้งบริเวณพื้นดินที่มีความเหมาะสม

สำหรับระบบขนาดเล็กกว่านั้น สามารถติดตั้งได้ทั้งบนโครงไม้และโครงเหล็กกันสนิม หรือโครงอะลูมิเนียม ขึ้นอยู่กับลักษณะของพื้นที่และสภาพภูมิอากาศ แต่ที่นิยมใช้กันคือทำฐานรากคอนกรีตและใช้โครงอะลูมิเนียมหรือโครงเหล็กชุบกำลวไนซ์เป็นเสา และวางรองรับชุดของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ดังแสดงในภาพที่ 2.13 เป็นการใช้อะลูมิเนียมและมีฐานรากเป็นคอนกรีตเป็นต้น

สำหรับวิธีการติดตั้ง ส่วนใหญ่จะใช้ฐานรากคอนกรีต เสา และคานรองรับแผงเซลล์แสงอาทิตย์เป็นอะลูมิเนียม



ภาพที่ 2.13 การติดตั้งบนพื้นโดยมีฐานรากคอนกรีตและโครงอะลูมิเนียม, Yanglin (Xiamen) Machinery & Technology Co.,Ltd. “4KW Ground Mounting System.” http://www.yanglinxm.com/case_detail/newsId=20.html (accessed April 18, 2017).

2.3.3 การติดตั้งบนหลังคา (Roof Mounting)

ลักษณะของหลังคาอาคาร บ้านพักอาศัย หรือสิ่งก่อสร้างอื่น ๆ แบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม คือ หลังคาลาดเอียง และหลังคาแบบเรียบ

2.3.3.1 หลังคาลาดเอียง (Sloping Roof)

หลังคาลาดเอียง (ภาพที่ 2.14) มีวัตถุประสงค์เพื่อให้ฝ้าฝนไหลลงมาจากหลังคาได้อย่างรวดเร็ว ดังนั้น การติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์บนหลังคาจะต้องไม่ให้ขวางทางเดินของน้ำ และต้องไม่ให้แผงเซลล์แสงอาทิตย์มีระยะสูงกว่าหลังคามากเกินไป เพราะจะเกิดปัญหาเรื่องลมและพายุ จะทำให้เกิดความเสียหายได้ โดยปกติจะมีค่าใช้จ่ายในการติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์น้อยกว่าการติดตั้งแบบเสาเดี่ยวและการติดตั้งบนพื้น แต่ข้อเสียคือ มุมเอียงของแผ่นเซลล์แสงอาทิตย์จะเท่ากับมุมเอียงของหลังคา ซึ่งอาจจะไม่ใช่มุมที่ได้รับพลังงานแสงอาทิตย์สูงสุดจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ เนื่องจากการติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์จะต้องติดตั้งให้ได้มุมเท่ากับมุมหลังคา มีอุปกรณ์ที่สำคัญสำหรับการติดตั้ง 3 ส่วน คือ ตัวยึดหลังคา (Roof Mounts) รางรองรับแผง (Rail Mounting) และตัวล็อกแผง (Module Fixings) ดังภาพที่ 2.15



ภาพที่ 2.14 การติดตั้งบนหลังคาลาดเอียง, DWF Solar Electric. “Solar Power Technologies For the Future.” <http://dfwsolarelectric.com/blog/> (accessed April 18, 2017).

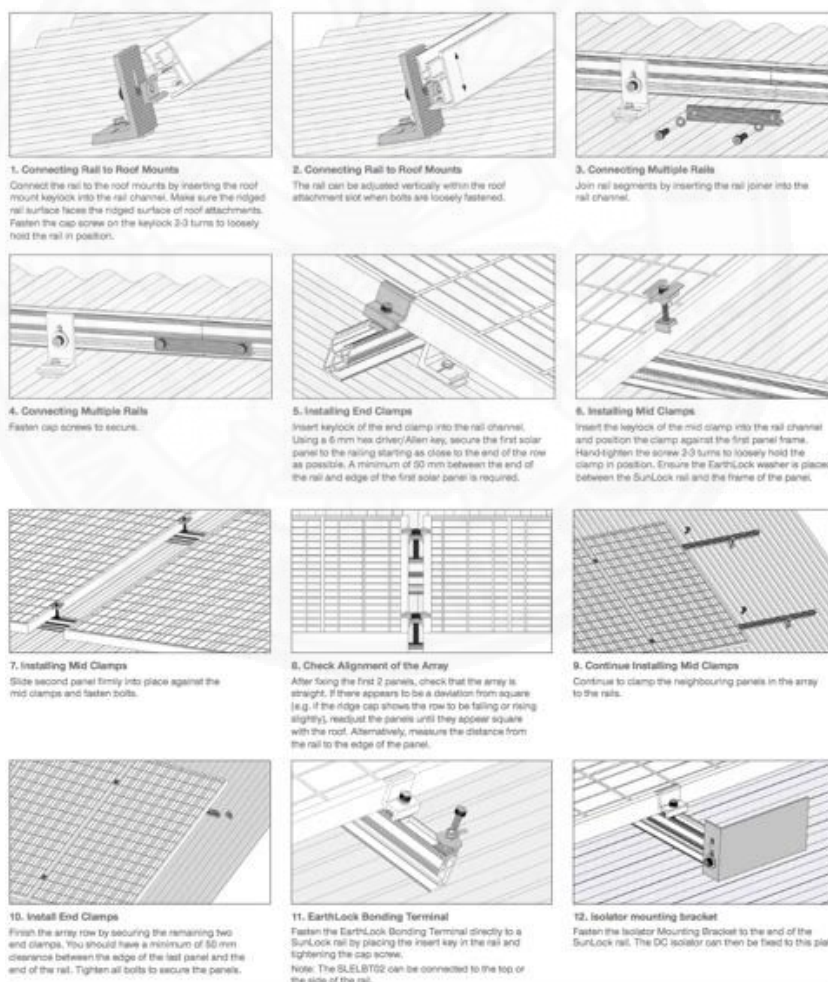


ภาพที่ 2.15 อุปกรณ์สำคัญของการติดตั้งบนหลังคาแบบเอียง, Solar Depot. “Solar Roof Mount.” www.solardepotng.com/SDN/product/solar-roof-mount/ (accessed April 18, 2017).

ตัวยึดหลังคา คืออุปกรณ์สำคัญที่สุด มีหลายลักษณะ ขึ้นอยู่กับลักษณะของหลังคา ถ้าเป็นหลังคาเหล็ก (Metal Sheet) ตัวยึดหลังคาจะเป็นแบบครอบและยึดด้วยน็อตด้านข้าง 2 ตัว และวางรองรับแผงด้านบน ดังภาพที่ 2.16 ซึ่งตัวยึดหลังคาทำหน้าที่เป็นฐานรองรับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ดังนั้นตัวยึดจะต้องยึดกับหลังคาเดิมและโครงหลังคาอย่างแน่นหนาและจะต้องมีระบบป้องกันน้ำรั่วซึมเข้าไปภายในบ้านเช่นกัน ตัวยึดหลังคาที่ดีต้องมีมาตรฐาน ติดตั้งง่าย สะดวก รวดเร็ว มีการเจาะหลังคาเดิมน้อยที่สุด และต้องไม่ขัดขวางการไหลของน้ำบนหลังคา

ตัวล๊อคแผง คือ อุปกรณ์ที่ใช้ยึดแผงเซลล์แสงอาทิตย์ให้ติดกับรางรองรับแผง เป็นอุปกรณ์ที่สำคัญ ถ้าเป็นอุปกรณ์ที่มาตรฐานจะติดตั้งง่าย ใช้เวลาในการติดตั้งน้อย ประหยัดค่าแรงในการติดตั้ง และต้องเป็นอุปกรณ์ที่ทำจากวัสดุไร้สนิม เช่น อะลูมิเนียม โพรไฟล์ หรือ สแตนเลส เป็นต้น โดยทั่วไปอุปกรณ์ล๊อคแผงเซลล์แสงอาทิตย์ลักษณะนี้จะมี 2 แบบ คือ แบบล๊อคระหว่างแผงที่รางติดกัน เรียกว่า “ตัวล๊อคกลาง (Mid Clamp)” และแบบที่ล๊อคแผงริมสุด เรียกว่า “ตัวล๊อคริม (End Clamp)” ดังภาพที่ 2.17

โดยทั่วไป ตัวยึดหลังคา รางรองรับแผง และตัวล๊อคแผง จะมีราคาสูงและหาซื้อยาก ซึ่งอาจตัดแปลงเองโดยใช้ไม้หรือวัสดุอื่น ๆ ทำเป็นตัวยึดแทนได้ ส่วนรางรองรับแผงและตัวล๊อคแผง อาจใช้รางอะลูมิเนียมขนาด 1½ นิ้วมาใช้ และควรใช้น็อตที่เป็นสแตนเลสเพื่อไม่ให้เกิดสนิม เพราะแผงเซลล์แสงอาทิตย์ต้องติดตั้งบนหลังคานานกว่า 20 ปี



ภาพที่ 2.16 การติดตั้งรางรองรับแผง, Pantip.com. “10 ข้อควรรู้ โซลาร์เซลล์หลังคาบ้าน.”
<https://pantip.com/topic/33690556> (สืบค้นวันที่ 18 เมษายน 2560).



ภาพที่ 2.17 ตัวล็อกแผง, Xiamen Rineng Solar Energy Technology Co.,LTD. “ROOF MOUNT SYSTEM.” www.rinengsolar.com/show-93-39-1.html (accessed April 18, 2017).

2.3.3.2 หลังคาแบบเรียบ (Flat Roof)

หลังคาอาคารแบบเรียบทำจากวัสดุหลายชนิด เช่น หลังคาคอนกรีตของอาคารพาณิชย์ หลังคาตึกสูง หลังคาห้างสรรพสินค้า หลังคาอาคารเรียน เป็นต้น ซึ่งสามารถติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์บนหลังคาแบบเรียบได้ 3 ลักษณะ คือ ติดตั้งบนฐานน้ำหนักถ่วง ติดตั้งเจาะยึดกับพื้นหลังคา และติดตั้งโดยวางบนหลังคา

(1) ติดตั้งบนฐานน้ำหนักถ่วง (Ballast-Mounted System) ข้อดีของการติดตั้งแบบนี้ คือ ไม่ตัด ไม่เจาะพื้นหลังคาของอาคารเพื่อยึดฐานหรือเสาโครงร่างที่ติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์ แต่ใช้วิธีวางแท่นคอนกรีตทับบนฐาน ให้แผงเซลล์แสงอาทิตย์สามารถวางบนหลังคาได้โดยไม่เคลื่อนที่หรือพังเสียหายเมื่อมีลมพายุ ข้อดีอีกประการหนึ่งคือ เคลื่อนย้ายตำแหน่งได้โดยทั่วไปน้ำหนักถ่วงนี้จะต้องมีขนาดไม่น้อยกว่า 100 กิโลกรัมต่อตารางเมตร (Earthscan, 2008) และควรเป็นวัสดุที่ทนทาน เช่น คอนกรีต หรือพลาสติกกรีซไคเคิล เป็นต้น การติดตั้งด้วยวิธีนี้มีความสะดวก รวดเร็ว เคลื่อนย้ายได้ และไม่ต้องเจาะพื้นหลังคา สำหรับหลังคาอาคารเขียว (อาคารที่มีการจัดสวน ปลูกต้นไม้ หรือดอกไม้บนหลังคา) ก็นิยมติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยวิธีนี้ ดังแสดงในภาพที่ 2.18



ภาพที่ 2.18 การติดตั้งบนฐานน้ำหนักร่อง, Connecticut Innovations. “Learning for Clean Energy Innovation.” www.sunviewer.net/portals/CCEF/ (accessed April 18, 2017).

(2) ติดตั้งเจาะยึดกับพื้นหลังคา (Fixing System) ดังภาพที่ 2.19 สำหรับกรณีความร้อนสูงและอยู่ในพื้นที่ที่มีลมแรงมาก เป็นแนวของพายุประจำฤดูกาล หรือเป็นพื้นที่ที่ไม่เหมาะสมที่จะใช้น้ำหนักร่องจำนวนมาก อาจเกิดจากโครงสร้างอาคารไม่แข็งแรงพอ ควรใช้วิธีเจาะยึดฐาน (เสาหรือราง) สำหรับการรองรับแผงเซลล์แสงอาทิตย์กับพื้นหลังคา โดยนิยมติดตั้งเสาหรือฐานรูปทรงกระบอก หรือทำรางยาวบนพื้นแล้วเจาะยึดด้วยน็อตสแตนเลส และใช้ระบบรางวางเป็นแถวเพื่อวางคานรองรับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งสามารถปรับมุมเอียงได้ตามต้องการ



ภาพที่ 2.19 การติดตั้งเจาะยึดกับพื้นหลังคา, Ace Solar. “Solar panels fitted onto aluminium A frames for flat roofs.” http://acesolar.co.uk/portfolio_item/solar-panels-fitted-onto-aluminium/ (accessed April 18, 2017).

(3) **ติดตั้งโดยวางบนหลังคา** เป็นการติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์โดยไม่ต้องเจาะหลังคา ไม่ต้องใช้แท่งคอนกรีตบล็อกเป็นน้ำหนักถ่วง โดยใช้อุปกรณ์ที่เรียกว่า Sunroof FS (Free Standing) ดังภาพที่ 2.20 ซึ่งติดตั้งง่าย รวดเร็ว และใช้น้ำหนักของแผงเซลล์แสงอาทิตย์จำนวนมากเป็นน้ำหนักถ่วงของฐาน มีข้อเสียคือ ถ้าติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์จำนวนน้อย จะไม่สามารถต้านทานแรงลมได้



ภาพที่ 2.20 การติดตั้งโดยวางบนหลังคา, Weland Stal AB. “Fixing system for solar panels.” <http://www.welandstal.se/images/galleri/be00002485.jpg> (accessed April 18, 2017).

2.3.4 การติดตั้งแทนหลังคา (In-Roof System)

การติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์แทนหลังคา แผงเซลล์แสงอาทิตย์จะทำหน้าที่สำคัญ 2 ประการ คือ ผลิตกระแสไฟฟ้า และป้องกันสภาวะอากาศภายนอก (น้ำฝน พายุ และ อุณหภูมิ) การติดตั้งเหมาะสำหรับบ้านหรืออาคารที่จะสร้างใหม่และวางแผนในการเชื่อมกับสถาปนิก ส่วนประกอบของอุปกรณ์ที่ใช้ในการติดตั้งแทนหลังคา ต้องมีแผ่นวัสดุกันน้ำขนาดใหญ่วางใต้แผงทั้งหมด รางรองรับแผงต้องเป็นชนิดพิเศษที่มียางกันน้ำรั่วซึมลงใต้หลังคา และมีรางสำหรับระบายน้ำเมื่อมีฝนด้วย ดังภาพที่ 2.2



ภาพที่ 2.21 การติดตั้งแทนหลังคา, Wind & Sun Ltd. “GSE Integration Roof Integrated.” www.windandsun.co.uk/products/PV-Mounting-Structures/GSE-Integration-Roof-Integrated (accessed April 18, 2017).

2.3.5 การติดตั้งบูรณาการกับตัวอาคาร (Building Integrated Photovoltaic)

การติดตั้งบูรณาการเข้ากับตัวอาคาร หรือติดตั้งผสมผสานเข้ากับตัวอาคาร หรือการออกแบบอาคารสร้างใหม่ เรียกว่า BIPV สามารถทำได้หลายลักษณะ เช่น ติดตั้งเป็นผนังอาคารชั้นนอก ติดตั้งเป็นหลังคาหรือเป็นกันสาด ส่วนที่ตกแต่งอาคาร เป็นต้น นิยมใช้กับอาคารสมัยใหม่เพื่อรองรับเรื่องอาคารเขียว (Green Building) หรืออาคารอนุรักษ์พลังงาน (Energy Saving Building) เช่น อาคารสำนักงาน อาคารของรัฐบาล อาคารศูนย์ประชุม ศูนย์แสดงสินค้า เป็นต้น การติดตั้งลักษณะนี้ต้องใช้เครื่องมือเฉพาะทาง อุปกรณ์จับยึด อุปกรณ์ติดตั้งที่ออกแบบมาโดยเฉพาะ ไม่สามารถติดตั้งด้วยตนเองได้ ข้อดีของการติดตั้งบูรณาการกับตัวอาคารคือ ไฟฟ้าที่ผลิตได้จะไม่สูงเท่ากับการติดตั้งแบบอื่น เพราะไม่สามารถปรับมุมของแผงเซลล์แสงอาทิตย์เพื่อผลิตไฟฟ้าให้ดีที่สุดได้

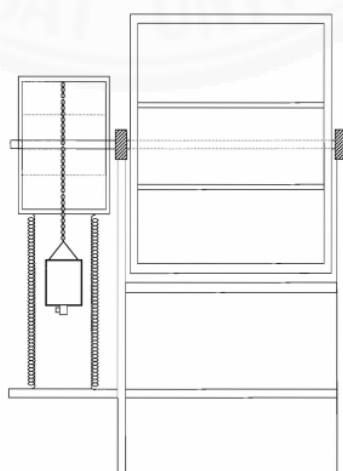
ข้อดีคือ ช่วยประหยัดงบประมาณค่าวัสดุลง เช่น กระจกหน้าต่าง กระจกผนัง หรือหลังคารับแสง (Sky Roof) โดยเลือกใช้แผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบโปร่งแสง (Trans Percent PV) มาใช้แทนกระจก เป็นต้น ซึ่งการใช้แผงเซลล์แสงอาทิตย์แทนกระจกจะทำให้แสงเข้ามาในตัวอาคารเพื่อลดการให้แสงสว่างในอาคาร ในขณะเดียวกันก็สามารถผลิตกระแสไฟฟ้าให้กับอาคารได้ด้วย ในปัจจุบันมีการพัฒนาให้เซลล์แสงอาทิตย์เพื่อเป็นผนังอาคาร (ภาพที่ 2.22) โดยมีแผงเซลล์แสงอาทิตย์แทรกอยู่ในแผ่นกระจก (กระจก 2 ชั้น) หรือเรียกว่า “กระจกผสมเซลล์แสงอาทิตย์ (Glass plus integrated solar cell)” ไปแทนกระจกได้ทันที ซึ่งมีประโยชน์ 4 ประการ คือ ใช้ผลิตกระแสไฟฟ้า ใช้เป็นกระจกบังแสงแดด (กรองแสง) ลดอุณหภูมิภายในอาคาร และใช้เป็นกระจกตกแต่งอาคาร



ภาพที่ 2.22 การติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์เพื่อเป็นผนังอาคาร, Ingenieurleistungen Manfred Starlinger. “ Building Integrated Photovoltaics (BIPV) .” ims-plan.com/building-integrated-photovoltaics-bipv.html (accessed April 18, 2017).

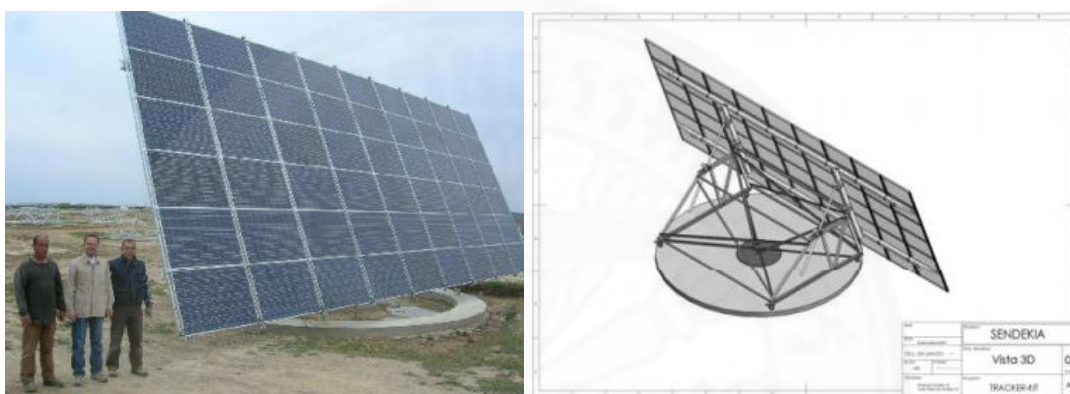
2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

บุญรอด อาสาสะนา (2551) ได้สร้างสิ่งประดิษฐ์เครื่องติดตามดวงอาทิตย์ที่สามารถทำงานได้โดยไม่ต้องอาศัยพลังงานไฟฟ้าในการขับเคลื่อน (ภาพที่ 2.23) อาศัยแรงคืนตัว (Restoring Force) ของสปริงและหลักการสมดุลต่อวัตถุแข็งเกร็ง สามารถติดตามดวงอาทิตย์ได้ดีพอสมควร มีความคลาดเคลื่อนประมาณ 2.2 องศาต่อชั่วโมง นำแผ่นเซลล์แสงอาทิตย์ขนาด 120 วัตต์ไปติดตั้งกับตัวหมุนของเครื่อง พบว่าแผ่นเซลล์แสงอาทิตย์ที่ติดอยู่กับเครื่องกลสามารถสูบน้ำได้มากกว่าแผงที่ติดตั้งแบบมุมคงที่ประมาณร้อยละ 17



ภาพที่ 2.23 เครื่องกลอย่างง่ายสำหรับการติดตามดวงอาทิตย์, บุญรอด อาสาสะนา. “เครื่องกลอย่างง่ายสำหรับการติดตามดวงอาทิตย์.” *วารสารวิทยาศาสตร์ประยุกต์*. ฉ. 2 (2551): 47-60.

S. Hernández, J. Méndez, F. Nieto, and J. Á. Jurado (2009) ได้ศึกษาวิเคราะห์ การเคลื่อนที่ของอากาศที่มีผลต่อโครงสร้างรองรับแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบติดตามดวงอาทิตย์ ซึ่งเป็นโครงถักมีชิ้นส่วน 370 ชิ้น จุดเชื่อมต่อ 479 จุด ดังภาพที่ 2.24 ใช้เหล็ก (yield strength = 275 MPa, $E = 2.1 \times 10^5$ N/mm², Density = 7.85 t/m³) และต้องวิเคราะห์น้ำหนักของโครงสร้าง (PP), ปริมาณหิมะ, แรงลม ผลการทดสอบพบว่า ที่มุมเอียง 30-50 องศา ทำให้ค่าความเครียดสูงกว่า เกณฑ์ที่ได้รับอนุญาต



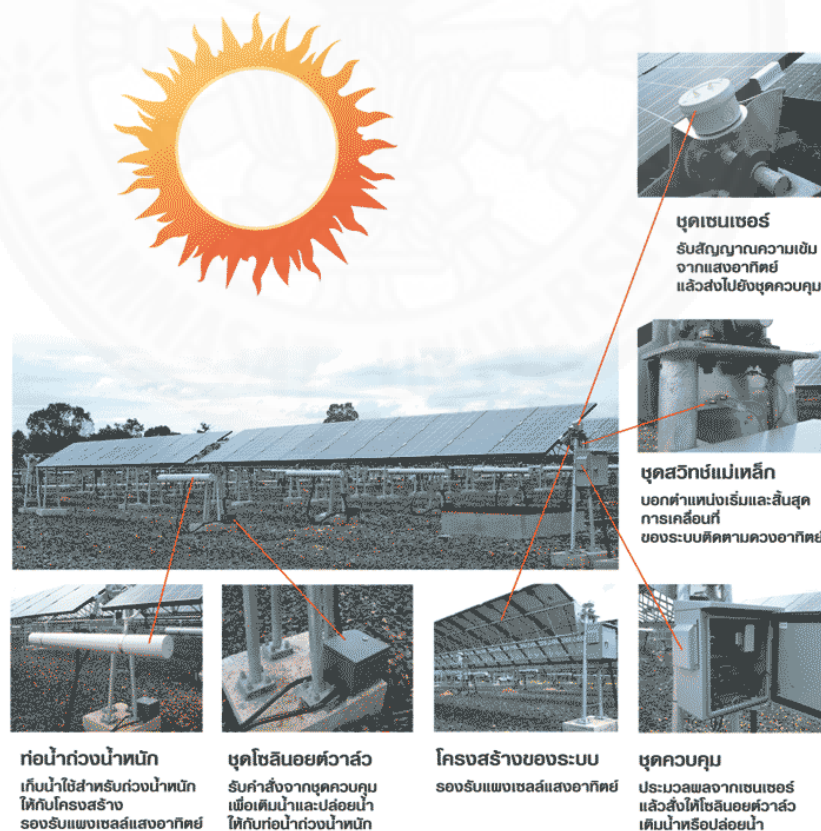
ภาพที่ 2.24 Aerodynamic analysis of a photovoltaic solar tracker, S. Hernández, J. Méndez, F. Nieto, and J. Á. Jurado. “Aerodynamic analysis of a photovoltaic solar tracker.” European and African Conference on Wind Engineering, no. 5 (2009): n.p.

การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย หรือ กฟผ. (2552) ได้ประดิษฐ์ระบบติดตาม ดวงอาทิตย์แบบถ่วงน้ำหนัก (Water Weight Tracking System) ที่โรงไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์เขื่อน สิรินธร จังหวัดอุบลราชธานี (ภาพที่ 2.25) ใช้หลักการถ่วงน้ำหนักโดยใช้น้ำเป็นตัวกลางในการ ถ่วงน้ำหนัก ตอนเช้า ท่อน้ำถ่วงน้ำหนักที่ติดตั้งไว้ทางทิศตะวันออกจะมีน้ำอยู่ ทำให้โครงสร้างรองรับ แผงเซลล์แสงอาทิตย์หันหน้าไปทางทิศตะวันออก (เป็นการเพิ่มน้ำหนักด้วยน้ำ) ชุดเซนเซอร์ที่ติดตั้ง และหันหน้าทางเดียวกับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ จะทำหน้าที่เป็นตัวตรวจจับตำแหน่งดวงอาทิตย์ เมื่อเซนเซอร์ตรวจจับตำแหน่งดวงอาทิตย์ได้ จะส่งให้ระบบควบคุมประมวลผลและสั่งให้โซลินอยด์- วาล์ว (Solenoid Valve) ปล่อน้ำออกจากท่อน้ำถ่วงน้ำหนัก เป็นการลดน้ำหนักน้ำในท่อน้ำ ถ่วงน้ำหนัก ทำให้โครงสร้างรองรับแผงและแผงเซลล์แสงอาทิตย์เคลื่อนที่ตามดวงอาทิตย์ไปทาง ทิศตะวันตก (ตอนเช้า-ตอนเย็น) ตอนกลางคืน ป้อนน้ำจะทำหน้าที่เติมน้ำเข้าสู่ชุดท่อน้ำถ่วงน้ำหนัก เป็นการเพิ่มน้ำหนักด้วยน้ำทางด้านทิศตะวันออก ทำให้โครงสร้างรองรับแผงและแผงเซลล์

แสงอาทิตย์เคลื่อนที่กลับไปทางทิศตะวันออก เพื่อเตรียมรับแสงอาทิตย์ตอนเช้าวันต่อไป ได้รับพลังงานไฟฟ้าสุทธิที่ผลิตได้เพิ่มขึ้น ประมาณร้อยละ 10 ดังภาพที่ 2.2



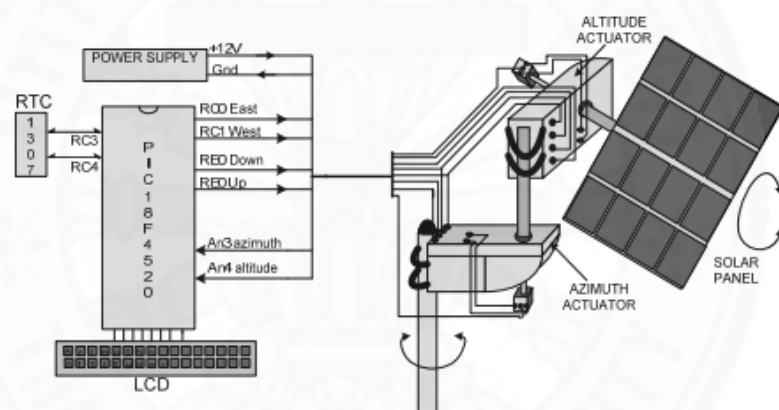
ภาพที่ 2.25 ระบบติดตามดวงอาทิตย์แบบถ่วงน้ำหนัก, การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย. “ระบบติดตามดวงอาทิตย์แบบถ่วงน้ำหนัก.” http://www3.egat.co.th/re/egat_pv/egatpv_silinthon/tracking_silinthon.htm (สืบค้นวันที่ 20 เมษายน 2560).



ภาพที่ 2.26 ส่วนประกอบของระบบติดตามดวงอาทิตย์แบบถ่วงน้ำหนัก, การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย. “ระบบติดตามดวงอาทิตย์แบบถ่วงน้ำหนัก.”, 28.

David Appleyard (2009) กล่าวว่า ระบบติดตามดวงอาทิตย์แกนเดียว ที่ติดตามดวงอาทิตย์ในทิศตะวันออก-ทิศตะวันตก สามารถผลิตไฟฟ้าได้มากกว่าระบบที่ติดตั้งแบบมุมคงที่ร้อยละ 27-32 และระบบติดตามดวงอาทิตย์แบบสองแกนสามารถผลิตไฟฟ้าได้มากกว่าระบบติดตั้งแบบมุมคงที่ร้อยละ 35-40

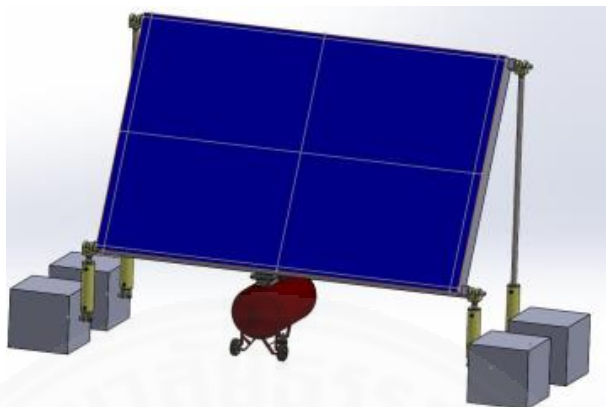
Sinan KIVRAK, Mustafa GUNDUZALP, and Furkan DINCER (2012) ได้ศึกษาออกแบบ ระบบติดตามดวงอาทิตย์สองแกนแบบ open-loop (ภาพที่ 2.27) เปรียบเทียบกับระบบติดตั้งแบบมุมคงที่ ทำมุม 37 องศา ในเมืองเดนิซลี (Denizli) ประเทศตุรกี โดยใช้มอเตอร์ Actuator 2 ตัว ในการเคลื่อนที่ นอกจากนั้นยังใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ Visual C#2005 เพื่อเขียนสมการตรงความเข้มแสงอาทิตย์ ผลการทดลองพบว่า ในช่วงเดือนพฤษภาคมและมิถุนายน พลังงานไฟฟ้าที่ติดตั้งกับระบบติดตามดวงอาทิตย์สองแกนเพิ่มขึ้นจากระบบติดตั้งแบบมุมคงที่ร้อยละ 64 และประสิทธิภาพของระบบในแต่ละเดือน ขึ้นอยู่กับการพัฒนาและออกแบบโปรแกรมคอมพิวเตอร์



ภาพที่ 2.27 Overall view of the designed open-loop sun tracker system, Sinan KIVRAK, Mustafa GUNDUZALP, and Furkan DINCER. “Theoretical and experimental performance investigation of a two axis solar tracker under the climatic condition of Denizli, Turkey.” *PRZEGLĄD ELEKTROTECHNICZNY (Electrical Review)*, no. 2 (2012): 332-336.

Belsheim Joshua, Francis Travis, He Jiayang, Moehling Anthony, Liu Pengyan, and Ziemkowski Micah (2013) ได้วิเคราะห์การออกแบบโครงสร้างระบบติดตามดวงอาทิตย์ 2 แบบ คือ แบบแรกเป็นการออกแบบชุดติดตามดวงอาทิตย์โดยใช้ไฮดรอลิก (Hydraulic Tracker Design) โดยใช้ Damper hydraulic มีของไหลแมกนีโตรีโอลोजิคอล บรรจุภายในเส้นผ่าศูนย์กลางลูกสูบขนาด 12.5 เซนติเมตร ยัดได้สูงสุด 1.045 เมตร รับน้ำหนักได้ 19.1 กิโลนิวตัน ใช้ปั๊มอัดไฮดรอลิกขนาด 80 บาร์ (ภาพที่ 2.28) แบบที่สองคือการออกแบบชุดติดตามดวงอาทิตย์แบบปรับมุม (Angled Tracker Design) ใช้เหล็กกลมขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 3 นิ้ว เป็นโครงสร้าง

มีจุดหมุนเป็นลูกปืน (Bearing) ยึดแฉงกับโครงสร้าง โดยแกนเพลลาขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 2 นิ้ว เชื่อมต่อกับระบบสายพานรอกโดยใช้เครื่องยนต์ และใช้เซนเซอร์เป็นตัวควบคุม (ภาพที่ 2.29)



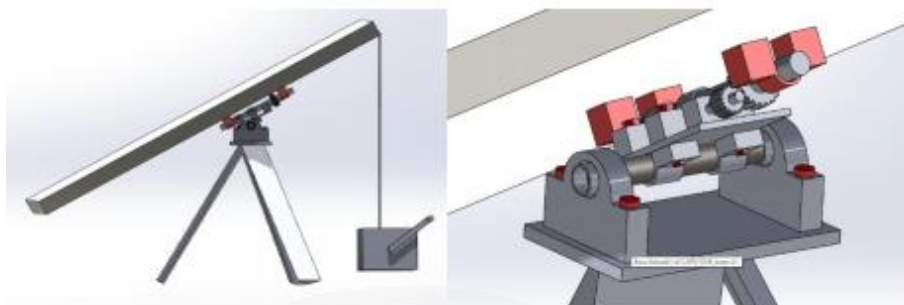
ภาพที่ 2.28 Hydraulic Tracker Design, Belsheim Joshua, Francis Travis, He Jiayang, Moehling Anthony, Liu Pengyan, and Ziemkowski Micah. “Solar Tracking Structure Design.” [https://www.cefn.s.nau.edu/capstone/projects/ME/2014/SolarTrackingA/Capstone_Website/DesignAnalysis\(Final%20Powerpoint\).pdf](https://www.cefn.s.nau.edu/capstone/projects/ME/2014/SolarTrackingA/Capstone_Website/DesignAnalysis(Final%20Powerpoint).pdf) (accessed April 11, 2017).



ภาพที่ 2.29 Angled Tracker Design, Belsheim Joshua, Francis Travis, He Jiayang, Moehling Anthony, Liu Pengyan, and Ziemkowski Micah. “Solar Tracking Structure Design.”, 30.

Hashem Bukhamsin, Angelo Edge, Roger Guiel, and Dan Verne (2013) ได้ออกแบบโครงสร้างรองรับแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบติดตามดวงอาทิตย์ที่มีราคาถูก พร้อมใช้งาน และใช้ประโยชน์สูงสุด (TIE Fighter Design) โดยใช้เหล็กคาร์บอน (yield strength = 60 ksi, $E = 190-210 \text{ GPa}$, Density = $7.7-8.3 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$) มีคุณสมบัติรับแรงได้สูง เป็นวัสดุที่ทนทานต่อโครงสร้าง ใช้มอเตอร์ Antennacraft TDP2 มีความสามารถ 8 ft/lbs ของแรงบิด ใช้กำลังไฟฟ้า 65 วัตต์ ซึ่งมอเตอร์ออกแบบเพื่อใช้กับการติดตามดวงอาทิตย์ หาได้ง่าย ราคาถูก มีความสามารถ

ในการเคลื่อนที่ 5.14 degrees/second ดังภาพที่ 2.30 มีต้นทุนรวม \$316.39 (10,955 บาท) และรับแรงลม (wind load) ได้ 210 ปอนด์

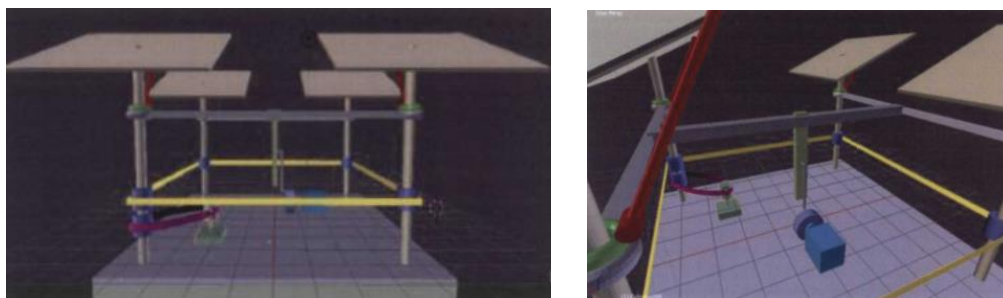


ภาพที่ 2.30 TIE Fighter Design, Hashem Bukhamsin, Angelo Edge, Roger Guiel, and Dan Verne. *Solar Tracking Structure Design*. Arizona: Department of Mechanical Engineering, Northern Arizona University, 2013.

ราชรัฐ ยี่ตัน (2556) ได้ออกแบบและพัฒนาระบบแผงเซลล์แสงอาทิตย์เคลื่อนที่ได้สองแกนตามดวงอาทิตย์สำหรับใช้ควบคุมแผงโซลาร์เซลล์มากกว่าหนึ่งแผ่น การเคลื่อนที่ในแนวแกนตั้งจะเคลื่อนที่โดยมีมอเตอร์สี่เหลี่ยมเป็นต้นกำลัง ส่งกำลังผ่านโซ่สีม่วงและเฟืองสีน้ำเงิน เมื่อเสาที่ติดกับมอเตอร์เริ่มหมุน ก็จะทำให้เสาอื่น ๆ หมุนตามไปด้วย เพราะมีการส่งกำลังผ่านโซ่สีเหลืองที่ล้อมอยู่ การเคลื่อนที่ตามแนวแกนนอน หลักการเคลื่อนที่อาศัยการยกตัวขึ้นลงของคานสีเทา คือเมื่อคานสีเทาถูกยกขึ้น คานสีแดงที่สามารถให้ตัวได้ก็จะบีบเข้าหาเสา และจะทำให้แผงโซลาร์เซลล์เอียงไปมาได้ตามแนวแกนนอน ส่วนที่เป็นสี่เหลี่ยมที่มีคานสีแดงเชื่อมติดไว้คือลูกปืน สามารถหมุนได้รอบเพื่อเวลาหมุนตามแนวแกนตั้ง จะทำให้คานสีแดงสามารถหมุนตามแผงเซลล์แสงอาทิตย์ได้โดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ประมวลค่าแสงจากตัวต้านทานไวแสงเพื่อควบคุมมอเตอร์ให้ติดตามดวงอาทิตย์ เมื่อทดสอบระบบติดตามดวงอาทิตย์แล้ว สามารถผลิตกำลังไฟฟ้าได้มากกว่าระบบติดตั้งคงที่มุม 15 องศา ร้อยละ 12.51 ดังภาพที่ 2.31

Anucha K., S. Chandra, and Mohan Reddy (2013) อ้างถึงใน Suneetha Racharla, and K. Rajan (2017) ศึกษาระบบติดตามดวงอาทิตย์แกนเดียวโดยใช้ ARM processor เป็นเวลา 6 วัน พบว่า สามารถผลิตไฟฟ้าได้มากกว่าระบบที่ติดตั้งแบบมุมคงที่ร้อยละ 40

Dhanabal R., V. Bharathi, R. Ranjitha, A. Ponna, S. Deepthi, and P. Mageshkannan (2013) อ้างถึงใน Suneetha Racharla, and K. Rajan (2017) ศึกษาเปรียบเทียบระบบที่ติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบมุมคงที่ และระบบติดตามดวงอาทิตย์แบบแกนเดียว และสองแกน บันทึกข้อมูลทุก ๆ ชั่วโมง ตั้งแต่เวลา 8.00 น. ถึงเวลา 18.00 น. มีผลการศึกษาคือระบบติดตามดวงอาทิตย์แกนเดียวผลิตไฟฟ้าเพิ่มขึ้นร้อยละ 32.17 และระบบติดตามดวงอาทิตย์สองแกนผลิตไฟฟ้าเพิ่มขึ้นร้อยละ 81.68 เมื่อเทียบกับระบบที่ติดตั้งแบบมุมคงที่



ภาพที่ 2.31 ระบบโซลาร์เซลล์เคลื่อนที่ได้สองแกนตามดวงอาทิตย์สำหรับใช้ควบคุมแผงโซลาร์เซลล์มากกว่าหนึ่งแผง, ราชรัฐ ยี่ตัน. “การออกแบบและพัฒนาระบบโซลาร์เซลล์เคลื่อนที่ได้สองแกนตามดวงอาทิตย์สำหรับควบคุมแผงโซลาร์เซลล์มากกว่าหนึ่งแผง.” วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชาเทคโนโลยีพลังงาน คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2556. ใน ThaiLis, <http://tdc.thailis.or.th/> (สืบค้นเมื่อวันที่ 24 มกราคม 2560).

Shahriar Bazyari, Reza Keypour, Shahrokh Farhangi, Amir Ghaedi, and Khashayar Bazyari (2014) ได้เปรียบเทียบความแตกต่างของระบบผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์ที่เกาะเคซม์ (Qeshm Island) ประเทศอิหร่าน จากการรับรังสีความร้อน เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ของระบบติดตามดวงอาทิตย์แกนเดียว (ตะวันออก-ตะวันตก) และสองแกน ซึ่งข้อมูลถูกบันทึกไว้บนเกาะในปีค.ศ. 2011 ผลการศึกษาพบว่า ค่าเฉลี่ยของพลังงานไฟฟ้าที่ได้รับจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ติดตามแบบแกนเดียวสูงกว่าแบบติดตั้งแบบมุมคงที่ 1.35 เท่า ขณะที่แบบติดตามดวงอาทิตย์สองแกนให้พลังงานไฟฟ้าสูงกว่าแบบแกนเดียว 1.04 เท่า ดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 พลังงานและความเข้มแสงจากระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์รูปแบบต่าง ๆ

Type	Fixed panel	Single axis	Double axis
Average daily received energy	4,205 wh/m ³	5,694 wh/m ³	5,926 wh/m ³
Maximum daily received energy	6,040 wh/m ³	8,387 wh/m ³	8,637 wh/m ³
Average received density	175 w/m ³	237 w/m ³	247 w/m ³
Maximum received density	1,098 w/m ³	1,120 w/m ³	1,140 w/m ³

ที่มา: Shahriar Bazyari, Reza Keypour, Shahrokh Farhangi, Amir Ghaedi, and Khashayar Bazyari. “A Study on the Effects of Solar Tracking Systems on the Performance of Photovoltaic Power Plants.” *Journal of Power and Energy Engineering*, no. 2 (2014): 718-728.

สิทธิชัย จินะวงษ์, นำนนที กัลยา และ เสาวลักษณ์ ชัยยืน (2556) นำเสนอเทคนิคใหม่ ของระบบติดตามดวงอาทิตย์ที่เชื่อมต่อกับลูกกลอยจะเคลื่อนที่ตามดวงอาทิตย์ด้วยการปรับสมดุลน้ำ (ภาพที่ 2.32) โดยใช้ปั๊มฉีดกระจกรถยนต์ขนาด 12 โวลต์ ควบคุมการทำงานทั้งหมดด้วย ไมโครคอนโทรลเลอร์ โดยรับค่าการตรวจจับแสงผ่านตัวต้านทานเปลี่ยนค่าตามแสง (LDR) และ เปรียบเทียบกับแรงดันอ้างอิง ซึ่งจะทำให้ลูกกลอยผลัดกันแฉงเคลื่อนที่ตามทิศทางของแสงอาทิตย์ สามารถควบคุมทิศทางการเคลื่อนที่ได้ 2 แกน คือ แกนทิศเหนือ-ทิศใต้ และแกนทิศตะวันออก- ทิศตะวันตก ผลการทดสอบเปรียบเทียบค่ากำลังไฟฟ้าที่ได้รับจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ 1 แผ่น ที่ติดตั้งระบบติดตามแสงอาทิตย์และแบบติดตั้งแบบมุมคงที่ พบว่า แผงที่มีระบบติดตามแสงอาทิตย์ ให้กำลังไฟฟ้าเฉลี่ยมากกว่าแผงติดตั้งแบบมุมคงที่ 7.91 วัตต์หรือสูงกว่าร้อยละ 37.63



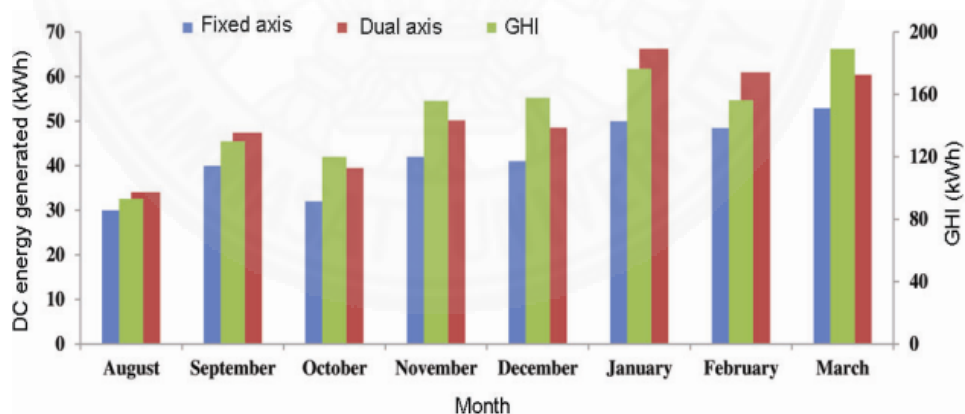
ภาพที่ 2.32 แผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ติดตั้งระบบติดตามแสงอาทิตย์สองแกนด้วยการปรับสมดุลน้ำ, สิทธิชัย จินะวงษ์, นำนนที กัลยา และ เสาวลักษณ์ ชัยยืน. “ระบบติดตามแสงอาทิตย์แบบสองแกน ด้วยการปรับสมดุลระดับน้ำ.” วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม, กันยายน-ธันวาคม (2556) 9(3).

Roshan R. Rao, H. R. Swetha, J. Srinivasan, and Sheela K. Ramasesha (2015) ได้ศึกษาประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์แบบติดตามดวงอาทิตย์สองแกนกับระบบที่ติดตั้งแบบ มุมคงที่ (ภาพที่ 2.33) ที่ละติจูด 13 องศาเหนือ ในช่วงเดือนสิงหาคม 2012 (2555) ถึงเดือนมีนาคม

2013 (2556) พบว่าแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ติดตั้งแบบมุมคงที่ (Fixed axis) ผลิตพลังงานไฟฟ้าได้ 336.3 กิโลวัตต์ชั่วโมงและแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบติดตามดวงอาทิตย์สองแกนผลิตพลังงานไฟฟ้าได้ 407.2 กิโลวัตต์ชั่วโมง ซึ่งผลิตพลังงานไฟฟ้าได้มากกว่าระบบที่ติดตั้งแบบมุมคงที่ (มุมที่ดีที่สุด) ร้อยละ 21.2 และมีระยะเวลาคืนทุนภายใน 450 วัน ดังภาพที่ 2.34

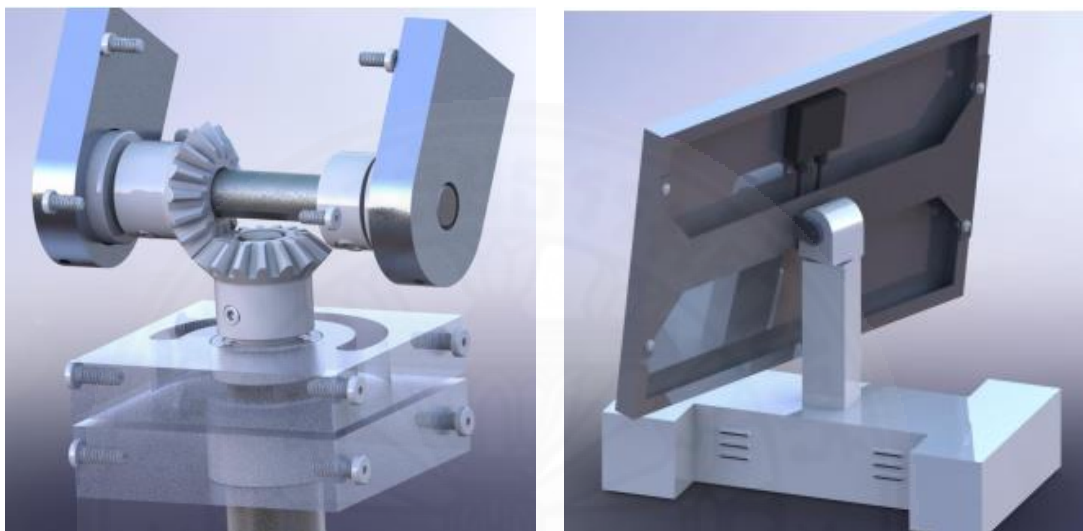


ภาพที่ 2.33 ระบบติดตามดวงอาทิตย์สองแกนและระบบที่ติดตั้งแบบมุมคงที่, Roshan R. Rao, H. R. Swetha, J. Srinivasan, and Sheela K. Ramasesha. “Comparison of performance of solar photovoltaics on dual axis tracker with fixed axis at 13°N latitude.” *Current Science*, no. 11 (2015): 2087-2094.



ภาพที่ 2.34 การเปรียบเทียบพลังงานของระบบติดตามดวงอาทิตย์สองแกนและระบบที่ติดตั้งแบบมุมคงที่, Roshan R. Rao, H. R. Swetha, J. Srinivasan, and Sheela K. Ramasesha. “Comparison of performance of solar photovoltaics on dual axis tracker with fixed axis at 13°N latitude.”, 2087-2094.

Croccifixio Knift, Julia Gu, and Amanda Madden (2016) ได้ศึกษาออกแบบ อุปกรณ์หมุนแผงเซลล์แสงอาทิตย์ขนาด 30 วัตต์ เพื่อติดตามดวงอาทิตย์ตลอดทั้งวัน ซึ่งแผง จะหมุนรอบแกนที่ขนานกับความยาวแผง โดยใช้มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงขับเคลื่อนแกนเพื่อบังคับ ทิศทางแผงเซลล์แสงอาทิตย์ และมีลิมิตสวิตช์ 4 ตัวเพื่อจำกัดไม่ให้แกนหมุนเกิน 170 องศา เพื่อความปลอดภัยในการทำงานภายใต้สภาพอากาศ ดังภาพที่ 2.35



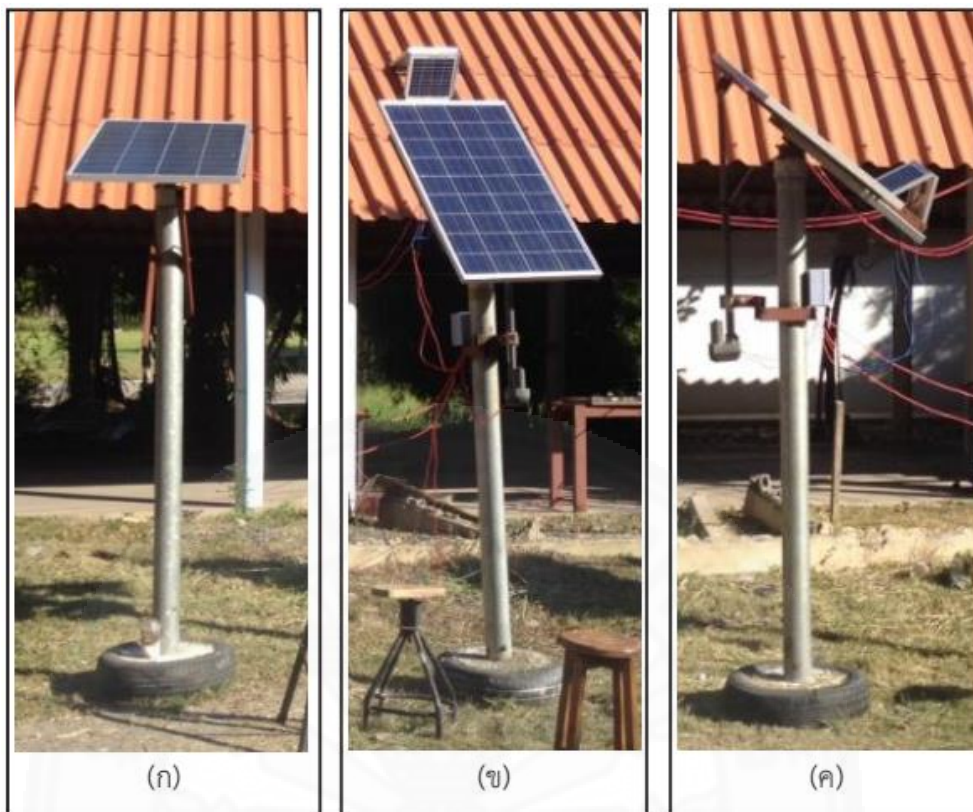
ภาพที่ 2.35 อุปกรณ์หมุนแผงเซลล์แสงอาทิตย์ขนาด 30 วัตต์, Croccifixio Knift, Julia Gu, and Amanda Madden. *Solar tracker design project*. Florida: University of Florida, 2016.

ธนิต เรืองรุ่งชัยกุล และ วัชรวิษณุ เจียรวรรณ (2558) ได้ออกแบบและสร้างระบบ ติดตามดวงอาทิตย์โดยอาศัยความแตกต่างระหว่างศักย์ไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ในการตรวจหา ตำแหน่งของดวงอาทิตย์ เพื่อกระตุ้นให้ระบบควบคุมทำงานตัดต่อวงจรในการขับเคลื่อนเพื่อปรับให้ แผงเซลล์แสงอาทิตย์หันเคลื่อนที่ติดตามดวงอาทิตย์ตลอดเวลา (ภาพที่ 2.36) มีโครงสร้างและวงจร การควบคุมที่ไม่ยุ่งยากซับซ้อน ติดตั้งได้ง่าย อุปกรณ์ที่ใช้หาได้ง่ายในท้องตลาดทั่วไป และมีต้นทุนต่ำ สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับระบบบ้านพักอาศัยพลังงานแสงอาทิตย์ได้



ภาพที่ 2.36 ระบบติดตามดวงอาทิตย์แบบสองแกนควบคุมด้วยแผงเซลล์แสงอาทิตย์, ธนิต เรืองรุ่งชัยกุล และ วัชรวิชญ์ เจียรวรรณ. “ระบบติดตามดวงอาทิตย์แบบสองแกนราคาถูกลำหรับบ้านพลังงานแสงอาทิตย์.” การประชุมสัมมนาเชิงวิชาการรูปแบบพลังงานทดแทนสู่ชุมชนแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 8, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี, คณะวิศวกรรมศาสตร์. 4-6 พฤศจิกายน 2558.

ธนิต เรืองรุ่งชัยกุล, กิตติ อภิชัยไพบุลย์ และ กิตติคุณ ชาตรักษา (2559) ได้ศึกษาเปรียบเทียบระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์แบบติดตามดวงอาทิตย์แกนเดียว (ภาพที่ 2.37) พบว่า ระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์แบบติดตามดวงอาทิตย์แกนเดียวจะผลิตไฟฟ้าได้มากกว่าระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์แบบติดตั้งแบบมุมคงที่ ประมาณร้อยละ 10 โดยระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์แบบติดตามดวงอาทิตย์ในแนวทิศตะวันออก-ทิศตะวันตก สามารถผลิตไฟฟ้าได้ดีที่สุด เนื่องจากการศึกษานี้ได้ทำการศึกษาทดลองในเดือนพฤศจิกายนซึ่งอยู่ในช่วงที่ดวงอาทิตย์เคลื่อนที่อ้อมไปทางทิศใต้



ภาพที่ 2.37 ระบบติดตามดวงอาทิตย์แบบติดตั้งแบบมุมคงที่ (ก) แบบติดตามดวงอาทิตย์ทิศเหนือ-ทิศใต้ (ข) และแบบติดตามดวงอาทิตย์ทิศตะวันออก-ทิศตะวันตก (ค), ธนิต เรืองรุ่งชัยกุล, กิตติอภิชัยไพบุลย์ และ กิตติคุณ ชาตธีรักษา. “ศึกษาเปรียบเทียบระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์แบบติดตามดวงอาทิตย์แกนเดียว.” การประชุมสัมมนาวิชาการรูปแบบพลังงานทดแทนสู่ชุมชนแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 9, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา, สถาบันวิจัยและพัฒนา. 29 พฤศจิกายน – 1 ธันวาคม 2559.

บทที่ 3 วิธีการวิจัย

การศึกษาออกแบบโครงสร้างรองรับแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบติดตามดวงอาทิตย์นี้ แบ่งการศึกษาออกเป็น 4 ช่วง ดังนี้

ช่วงที่ 1 เก็บรวบรวมข้อมูลและศึกษาข้อมูลเบื้องต้น

ช่วงที่ 2 วิเคราะห์ประสิทธิภาพของระบบติดตามดวงอาทิตย์ที่นำมาใช้ในการออกแบบโครงสร้าง

ช่วงที่ 3 ออกแบบโครงสร้างรองรับแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบติดตามดวงอาทิตย์เพื่อใช้งานกับโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์

ช่วงที่ 4 ทดสอบโครงสร้างรองรับแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบติดตามดวงอาทิตย์ และเปรียบเทียบต้นทุนในการติดตั้ง

3.1 การเก็บรวบรวมข้อมูลและศึกษาข้อมูลเบื้องต้น

ข้อมูลสำหรับศึกษานี้ แบ่งเป็น 2 ส่วน คือ ข้อมูลปฐมภูมิ และ ข้อมูลทุติยภูมิ ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

3.1.1 ศึกษาข้อมูลปฐมภูมิ (Primary data)

ทำการศึกษาข้อมูลปฐมภูมิ ได้แก่ ศึกษากลไกการทำงานของระบบติดตามดวงอาทิตย์สองแกนที่อาคารปฏิบัติการสาขาวิชาเทคโนโลยีเพื่อการพัฒนาที่ยั่งยืน คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต ของ ธนิต เรืองรุ่งชัยกุล (2560) ศึกษาโครงสร้างรองรับแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบติดตามดวงอาทิตย์ที่มีการติดตั้งและใช้งานในประเทศไทย เพื่อนำมาวิเคราะห์และออกแบบโครงสร้างที่เหมาะสม และสัมภาษณ์บุคคลที่มีความเกี่ยวข้องกับการติดตั้งระบบติดตามดวงอาทิตย์ภายในประเทศไทย เพื่อทราบถึงปัญหาในการดำเนินการ ข้อดี-ข้อเสีย ราคาของโครงสร้าง (ประมาณราคา) ของโครงสร้างที่ติดตั้งและใช้งานในปัจจุบัน

3.1.2 ศึกษาข้อมูลทุติยภูมิ (Secondary data)

ทำการศึกษาข้อมูลโดยค้นคว้าจากห้องสมุด (ตำรา วิทยานิพนธ์ บทความวิชาการ รายงานการวิจัยที่เกี่ยวข้อง) และสื่อออนไลน์ ในหัวข้อดังต่อไปนี้

(1) ประสิทธิภาพของระบบติดตามดวงอาทิตย์แกนเดี่ยว ระบบติดตามดวงอาทิตย์สองแกน และการติดตั้งแบบมอดูล (Fixed system)

(2) ลักษณะการติดตั้งและโครงสร้างรองรับแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบติดตามดวงอาทิตย์ทั้งในประเทศและต่างประเทศ

3.2 การวิเคราะห์ประสิทธิภาพของระบบติดตามดวงอาทิตย์ที่นำมาใช้ในการออกแบบโครงสร้าง

นำข้อมูลที่ศึกษาเบื้องต้น มาวิเคราะห์ประสิทธิภาพของระบบติดตามดวงอาทิตย์แบบแกนเดี่ยว และสองแกน เพื่อเลือกใช้งานระบบติดตามดวงอาทิตย์ที่มีประสิทธิภาพดีที่สุด ใช้ในการออกแบบโครงสร้างรองรับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ให้มีความสอดคล้องกับระบบติดตามดวงอาทิตย์

3.3 การออกแบบโครงสร้างรองรับแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบติดตามดวงอาทิตย์ เพื่อใช้งานกับโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์

เมื่อศึกษาโครงสร้างรองรับแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบติดตามดวงอาทิตย์สำหรับโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ในประเทศไทย และโครงสร้างระบบติดตามดวงอาทิตย์ของต่างประเทศ ทั้งแบบติดตามแกนเดี่ยว และสองแกน จึงนำมาวิเคราะห์ข้อดี ข้อจำกัด ของโครงสร้าง แล้วทำการออกแบบโครงสร้างรองรับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีความเหมาะสมกับโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ โดยมีหลักการออกแบบหรือต้องคำนึงถึงปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อโครงสร้างและการใช้งาน ดังต่อไปนี้

3.3.1 การรับน้ำหนักและชุดขับเคลื่อนของโครงสร้าง

ในการออกแบบโครงสร้างรองรับแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบติดตามดวงอาทิตย์ ต้องคำนึงถึงการรับน้ำหนักของโครงสร้างเป็นสำคัญ เพราะโครงสร้างมีการเคลื่อนที่ จึงต้องออกแบบโครงสร้างให้มีความสมดุล มั่นคง แข็งแรง และชุดขับเคลื่อนทำงานได้ง่าย สะดวกในการติดตั้งใช้งาน

3.3.2 กระแสลม

กระแสลมเป็นปัจจัยภายนอกที่มีผลต่อโครงสร้างเป็นอย่างมาก ซึ่งแปรผันตรงกับ ความสูง กล่าวคือ ถ้าโครงสร้างมีความสูงมาก กระแสลมก็จะมีผลมากเช่นกัน จึงต้องออกแบบ โครงสร้างให้ต้านทานกระแสน้อย หรือออกแบบโครงสร้างไม่ให้ต้านกระแสลม

3.3.3 ต้นทุนค่าใช้จ่ายของโครงสร้าง

การออกแบบโครงสร้างนั้น ต้องคำนึงถึงค่าใช้จ่ายในการก่อสร้าง เพื่อลดต้นทุน ให้เป็นเทคโนโลยีที่สามารถเข้าถึงได้ง่าย และให้ใช้งานได้อย่างยั่งยืน การศึกษาครั้งนี้ จึงใช้ต้นทุน ค่าใช้จ่ายโครงสร้างเพื่อประกอบการพิจารณา คัดเลือกโครงสร้างที่มีความเหมาะสมกับประเทศไทย

3.3.4 การดูแลรักษา

การออกแบบโครงสร้างรองรับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ต้องคำนึงถึงความสะดวก ในการดูแลรักษาแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งเมื่อใช้เป็นระยะเวลาานาน แผงเซลล์แสงอาทิตย์จะเกิดความ สกปรก เนื่องจากฝุ่นละออง เศษวัสดุจากธรรมชาติ (กิ่งไม้ ใบไม้) เกิดความชำรุดเสียหาย ซึ่งส่งผลต่อ กำลังการผลิตกระแสไฟฟ้าเป็นอย่างมาก สอดคล้องกับงานวิจัยของนิพนธ์ เกตจ้อย และ มรุพงศ์ กอนอยู่ (2556) ได้ศึกษาผลกระทบของฝุ่นบนแผงเซลล์แสงอาทิตย์ต่อการผลิตไฟฟ้าเป็นระยะเวลา 60 วัน พบว่า ฝุ่นที่ตกสะสมอยู่บนแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกเดี่ยว (Monocrystalline silicon) ที่ระยะเวลา 30 วัน และ 60 วัน ส่งผลให้กำลังการผลิตไฟฟ้าลดลงร้อยละ 2.96 และ 5.79 ตามลำดับ และฝุ่นที่ตกสะสมบนแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกผสมซิลิกอน (Polycrystalline silicon) ที่ระยะเวลา 30 วัน และ 60 วันเช่นกัน ส่งผลให้กำลังการผลิตไฟฟ้าลดลงร้อยละ 2.83 และ 6.03 ตามลำดับ ดังนั้น การดูแลรักษา และทำความสะอาดแผงเซลล์แสงอาทิตย์จึงเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่มี ความสำคัญ

3.4 การทดสอบโครงสร้างรองรับแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบติดตามดวงอาทิตย์ และเปรียบเทียบ ต้นทุนในการติดตั้ง

หลังจากศึกษา ออกแบบโครงสร้างและชุดขับเคลื่อนรองรับแผงเซลล์แสงอาทิตย์สำหรับ โรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ จากนั้นทดสอบโครงสร้างเพื่อเลือกใช้วัสดุที่มีความเหมาะสมกับ โครงสร้างนั้น ๆ คำนวณต้นทุนในการติดตั้งโครงสร้างสำหรับโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์แบบ ติดตามดวงอาทิตย์ที่ผลิตพลังงานไฟฟ้าเทียบเท่าโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ที่ติดตั้งแผงเซลล์

แสงอาทิตย์แบบมุมคงที่ขนาด 1 เมกะวัตต์ และเลือกโครงสร้างที่เหมาะสมที่สุดสำหรับโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ในประเทศไทย โดยมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

3.4.1 การออกแบบวัสดุที่ใช้ในโครงสร้าง

การออกแบบดังกล่าวใช้หลักของการออกแบบโครงสร้างเหล็ก ซึ่งการจำลองโครงสร้าง (Simulation) ต้องใส่วัสดุที่ใช้ในโครงสร้างลงในโปรแกรม ซึ่งได้จากการคำนวณมอดูลัสหน้าตัด (Section Modulus) เพื่อเลือกวัสดุที่มีความแข็งแรง รองรับน้ำหนักบรรทุกทั้งหมดที่เกิดขึ้นในโครงสร้าง มีวิธีการดังต่อไปนี้

3.4.1.1 คำนวณน้ำหนักบรรทุกทั้งหมด

ก่อนการจำลองโครงสร้างจะต้องคำนวณหาน้ำหนักบรรทุกทั้งหมด เพื่อหามอดูลัสหน้าตัด (Section modulus) และเลือกวัสดุที่ใช้กับโครงสร้าง แบ่งออกเป็น 3 ประเภทดังต่อไปนี้

(1) **น้ำหนักบรรทุกคงที่ (Dead Load: DL)** คือ น้ำหนักบรรทุกที่กระทำอยู่กับที่ คงที่ตายตัว ไม่มีการเคลื่อนย้ายหรือเปลี่ยนแปลงขนาดของน้ำหนัก ได้แก่ น้ำหนักโครงสร้างเหล็ก และน้ำหนักแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (10 กิโลกรัมต่อตารางเมตร) ที่เป็นน้ำหนักบรรทุกตายตัวส่วนเพิ่ม (Superimposed Dead Load: SDL) มีค่าเท่ากับ 10 กิโลกรัมต่อเมตร

(2) **น้ำหนักบรรทุกจร (Live Load: LL)** คือ น้ำหนักบรรทุกที่มีการเคลื่อนย้าย เคลื่อนที่ หรือมีการเปลี่ยนแปลงขนาดน้ำหนักอยู่ตลอดเวลา เช่น น้ำหนักของคนที่ยืนบนแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (60 กิโลกรัมต่อคน) เป็นต้น

(3) **กระแสดลม (Wind Load)** คือ น้ำหนักบรรทุกที่เกิดขึ้นจากกระแสดลม โดยแปลงจากความเร็วลมเป็นหน่วยแรงลมให้สามารถจำลองโครงสร้างในโปรแกรมได้ โดยหน่วยแรงลมตามกฎกระทรวงสำหรับอาคารหรือส่วนของอาคารที่สูงไม่เกิน 10 เมตร มีค่าเท่ากับ 50 กิโลกรัมต่อตารางเมตร ดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 หน่วยแรงลมในการออกแบบโครงสร้างอาคาร

ความสูงของอาคารหรือส่วนของอาคาร	หน่วยแรงลมอย่างน้อย กิโลปาสคาล (กิโลกรัมต่อตารางเมตร)
(1) ส่วนของอาคารที่สูงไม่เกิน 10 เมตร	0.5 (50)
(2) ส่วนของอาคารที่สูงเกิน 10 เมตร แต่ไม่เกิน 20 เมตร	0.8 (80)
(3) ส่วนของอาคารที่สูงเกิน 20 เมตร แต่ไม่เกิน 40 เมตร	1.2 (120)
(4) ส่วนของอาคารที่สูงเกิน 40 เมตร	1.6 (160)

ที่มา: กฎกระทรวง. *พระราชบัญญัติอาคาร*. กรุงเทพมหานคร: ประกาศในราชกิจจานุเบกษา เล่ม 123 ตอนที่ 70ก, 2549.

3.4.1.2 การคำนวณค่ามอดูลัสหน้าตัด (Section Modulus)

เพื่อหาขนาดวัสดุของแต่ละชั้นส่วนในโครงสร้าง เพื่อจำลองโครงสร้าง โดยหาจากสมการที่ 3.1

$$S_x = \frac{M}{\sigma} \quad (3.1)$$

เมื่อ	S_x	คือ	มอดูลัสหน้าตัด (Section Modulus) หน่วย: cm^3
	M	คือ	โมเมนต์สูงสุดของคาน หน่วย: kg-cm
	σ	คือ	ความเค้น (Normal stress) มีค่าเท่ากับ $0.6F_y$ ($F_y = 2,500 \text{ kg/cm}^2$)

เมื่อได้ค่ามอดูลัสหน้าตัดแล้ว ให้เปิดตารางที่ ข.1-ข.5 เพื่อเลือกวัสดุที่ใช้กับชิ้นส่วนโครงสร้างต่าง ๆ

3.4.2 การจำลองและทดสอบโครงสร้าง

เมื่อคำนวณน้ำหนักบรรทุก และทราบค่าวัสดุที่ใช้ในชิ้นส่วนโครงสร้างแล้ว ขั้นตอนต่อไปจะทำการจำลองโครงสร้าง โดยใช้โปรแกรม ETABS 9.7.4 (วิธีการใช้โปรแกรมในภาคผนวก ค) เป็นการจำลองโครงสร้างแบบ Allowable Stress Design (ASD) โดยเขียนโครงสร้างหลักลงใน

โปรแกรม ใส่วัสดุของโครงสร้าง และค่าน้ำหนักบรรทุกทั้งหมด ซึ่งค่าน้ำหนักถ่ายลงโครงสร้างแบบกลศาสตร์ (Static Load) และให้หน่วยแรงลมกระทำกับโครงสร้างในกรณีที่ร้ายแรงที่สุด (worst case) คือ แผงเซลล์แสงอาทิตย์ตั้งฉากกับพื้นดิน และเมื่อจำลองโครงสร้างแล้วจะได้ค่าดังต่อไปนี้

3.4.2.1 โมเมนต์ดัด (Bending moment)

โมเมนต์ดัด คือ ค่าแรงดัดที่กระทำต่อชิ้นส่วนต่าง ๆ ของโครงสร้าง โดยนำค่าโมเมนต์ดัดสูงสุด ไปคำนวณค่ามอดูลัสหน้าตัด และคำนวณขนาดของวัสดุใหม่ และทดสอบโครงสร้างโดยใช้โปรแกรมอีกครั้งเพื่อเป็นการตรวจสอบว่าโครงสร้างสามารถรับน้ำหนักได้ตามต้องการหรือไม่

3.4.2.2 แรงปฏิกิริยาที่กระทำกับเสา

เป็นค่าที่นำไปคำนวณฐานรากและกำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกเสาเข็มบนชั้นดินอ่อน (สมการที่ 3.2) ต้องมีความลึกของเสาเข็มไม่ต่ำกว่า 6 เมตร (กลุ่มงานวิเคราะห์วิจัย และพัฒนา, 2547) เพื่อรองรับน้ำหนักของโครงสร้าง (Safety factor = 3)

$$\text{แรงเสียดทานที่ผิวของเสาเข็ม} = nA_p \alpha c \quad (3.2)$$

เมื่อ	n	คือ	จำนวนเสาเข็ม
	A_p	คือ	พื้นที่ผิวส่วนที่ฝังอยู่ในดินของเสาเข็ม หน่วย: m^2
	α	คือ	adhesion factor (ภาคผนวก ค.1), $q_u = 5 \text{ t}/m^2$
	c	คือ	$q_u/2$

3.4.3 จำนวนต้นทุนของโครงสร้าง

การคำนวณค่าโครงสร้างรองรับแผงเซลล์แสงอาทิตย์นั้น จะคำนวณโครงสร้างรองรับแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบติดตามดวงอาทิตย์ (คาน เสา ฐานราก เสาเข็ม ชุดขับเคลื่อนระบบติดตามดวงอาทิตย์ และอุปกรณ์อื่น ๆ) ที่มีกำลังการผลิตไฟฟ้าเทียบเท่ากับโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ที่ติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบมุมคงที่ (Fixed system) ขนาด 1 เมกะวัตต์ โดยใช้กำลังการผลิตไฟฟ้าเป็นเกณฑ์ เพื่อเป็นการลดต้นทุนโครงสร้าง จำนวนแผงเซลล์แสงอาทิตย์ และอุปกรณ์แปลงกระแสไฟฟ้า (Inverter) รวมถึงเปรียบเทียบพื้นที่ในการติดตั้งของแต่ละโครงสร้างซึ่งสามารถคำนวณหาพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ ดังสมการที่ 3.3

$$EG = P \times H_{\text{day}} \times D_{\text{year}} \times PF \quad (3.3)$$

เมื่อ	EG	คือ	พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ (Electricity Generation) หน่วย: MWh/year
	P	คือ	กำลังการผลิตของโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ หน่วย: MW
	H _{day}	คือ	จำนวนชั่วโมงใน 1 วัน มีค่าเท่ากับ 24 hr/day
	D _{year}	คือ	จำนวนวันใน 1 ปี มีค่าเท่ากับ 365 day/year
	PF	คือ	ค่าตัวประกอบการผลิตไฟฟ้า (Plant Factor) ซึ่งในการศึกษานี้มีค่าเท่ากับ 0.1575 (ค่าเฉลี่ยจากการ ศึกษาข้อมูลอ้างอิง ดังตารางที่ 3.2)

ตารางที่ 3.2 ค่าตัวประกอบการผลิตไฟฟ้า (Plant Factor) ของโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์

แหล่งอ้างอิง	Plant Factor
Sunny Bangchak บางปะอิน*	
- ปี พ.ศ.2558	0.181
- ปี พ.ศ.2559	0.167
มูลนิธิพลังงานเพื่อสิ่งแวดล้อม (2554)	0.162
รองเพชร บุญช่วยดี (2560)	0.120
เฉลี่ย	0.1575

* คำนวณจากข้อมูลการผลิตไฟฟ้าจริงของโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ Sunny Bangchak (Sunny Bangchak, 2560)

บทที่ 4

ผลการวิจัยและอภิปรายผล

การออกแบบโครงสร้างรองรับแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบติดตามดวงอาทิตย์สำหรับโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ในประเทศไทย ได้แบ่งการศึกษาออกเป็น 2 ส่วนหลัก คือ 1) การศึกษาระบบผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์แบบติดตามดวงอาทิตย์และลักษณะการติดตั้ง และ 2) การออกแบบโครงสร้างและชุดขับเคลื่อนระบบติดตามดวงอาทิตย์สำหรับโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ มีผลการศึกษาดังต่อไปนี้

4.1 ระบบผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์แบบติดตามดวงอาทิตย์

ในการศึกษานี้ ได้ศึกษาประสิทธิภาพของระบบติดตามดวงอาทิตย์แบบแกนเดียว สองแกน เพื่อเลือกระบบติดตามดวงอาทิตย์ที่มีประสิทธิภาพดีที่สุดในการติดตั้งควบคู่กับโครงสร้างรองรับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ จากนั้นศึกษาลักษณะการติดตั้งโครงสร้างรองรับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีการติดตั้งในปัจจุบันจากงานวิจัย และเอกสารต่าง ๆ ทั้งในประเทศและต่างประเทศ เพื่อเป็นข้อมูลในการออกแบบโครงสร้าง และศึกษาการติดตั้งโครงสร้างรองรับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีการติดตั้งและใช้งานในประเทศไทย เพื่อทราบถึงข้อได้เปรียบ-เสียเปรียบของโครงสร้างแต่ละแบบ ซึ่งเป็นตัวแปรสำคัญในการออกแบบโครงสร้างรองรับแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบติดตามดวงอาทิตย์ มีผลการศึกษาดังต่อไปนี้

4.1.1 ประสิทธิภาพระบบติดตามดวงอาทิตย์

การศึกษาประสิทธิภาพของระบบติดตามดวงอาทิตย์ ได้ศึกษาระบบติดตามดวงอาทิตย์แบบแกนเดียว สองแกน เปรียบเทียบกับระบบที่ติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบมุมคงที่ เพื่อออกแบบโครงสร้างฯ ให้รองรับระบบติดตามดวงอาทิตย์ที่มีประสิทธิภาพดีที่สุด โดยศึกษาจากงานวิจัยที่ผ่านมา ดังนี้

4.1.1.1 ประสิทธิภาพระบบติดตามดวงอาทิตย์แบบแกนเดียว

จากการศึกษาของธนิต เรืองรุ่งชัยกุล, กิตติ อภิชัยไพบุลย์ และ กิตติคุณ ชาติรักษา (2559) พบว่า ระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์แบบติดตามดวงอาทิตย์แกนเดียว ในแนวทิศตะวันออก-ทิศตะวันตก สามารถผลิตไฟฟ้าได้มากกว่าระบบที่ติดตั้งแบบมุมคงที่ร้อยละ 10 ซึ่งในการศึกษาครั้งนี้ ทำการทดลองในเดือนพฤศจิกายน เป็นช่วงที่ดวงอาทิตย์เคลื่อนที่อ้อมไปทาง

ทิสได้ ทำให้ระบบที่ติดตามในแนวทิศตะวันออก-ทิศตะวันตก (ติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์หันไปทางทิศใต้ ทำมุม 14 องศากับพื้นดิน) สามารถผลิตไฟฟ้าได้มากกว่าระบบติดตามดวงอาทิตย์ในแนวทิศเหนือ-ทิสได้ อย่างไรก็ตาม คณะผู้ศึกษาวิจัยนี้ มีความเห็นว่า ในภาพรวมตลอดทั้งปีระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์แบบติดตามดวงอาทิตย์แกนเดียวในแนวทิศเหนือ-ทิสได้ มีแนวโน้มที่จะสามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าเฉลี่ยทั้งปีได้มากกว่าระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์แบบติดตามดวงอาทิตย์แกนเดียวในแนวทิศตะวันออก-ทิศตะวันตกเนื่องจากสามารถปรับมุมรับแสงอาทิตย์ให้หันไปในทิศที่ดวงอาทิตย์เคลื่อนที่ผ่านได้ตลอดทั้งปี โดยได้รับพลังงานแสงอาทิตย์สูงในช่วงเวลาประมาณ 11:00-13:00 น. ของทุก ๆ วัน ทำให้สามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าได้ใกล้เคียงกันในทุก ๆ วัน ในขณะที่ระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์แบบติดตามดวงอาทิตย์ในแนวทิศตะวันออก-ทิศตะวันตกจะสามารถทำงานได้ดีในช่วงที่ดวงอาทิตย์เคลื่อนที่อ้อมไปทางทิสได้เท่านั้น

ระบบติดตามดวงอาทิตย์แกนเดียวแบบถ่วงน้ำหนัก (Water weight tracking system) ของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (2552) ติดตั้งที่โรงไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์เขื่อนสิรินธร จังหวัดอุบลราชธานี โดยติดตามดวงอาทิตย์ในทิศตะวันออก-ทิศตะวันตกสามารถผลิตไฟฟ้าได้สูงกว่าการติดตั้งแบบมุมคงที่ร้อยละ 10

การศึกษาผลกระทบของระบบติดตามดวงอาทิตย์ต่อประสิทธิภาพของโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ในปี พ.ศ.2554 (ค.ศ.2011) พบว่าระบบติดตามดวงอาทิตย์แบบแกนเดียวสามารถผลิตไฟฟ้าได้เพิ่มขึ้น 1.35 เท่า (ร้อยละ 35) เมื่อเทียบกับระบบติดตั้งแบบมุมคงที่ (Shahriar B., Reza K., Shahrokh F., Amir G., and Khashayar B., 2014)

การสะสมพลังงานแสงอาทิตย์สูงสุดโดยมีระบบติดตามดวงอาทิตย์ที่ต่างกัน ในระยะเวลา 9 เดือน มีผลการศึกษาคือ ระบบติดตามดวงอาทิตย์แบบแกนเดียวโดยติดตามทิศเหนือ-ทิสได้ ผลิตไฟฟ้าได้มากกว่าระบบติดตั้งแบบมุมคงที่ร้อยละ 18 ระบบติดตามดวงอาทิตย์แบบแกนเดียวในทิศตะวันออก-ทิศตะวันตก ผลิตไฟฟ้าได้มากกว่าระบบติดตั้งแบบมุมคงที่เพียงร้อยละ 11 (N. H. Helwa, A. B. G. Bahgat, A. M. R. El Shafee, and E. T. El Shenawy, 2000)

David. Appleyard (2009) กล่าวว่า ระบบติดตามดวงอาทิตย์แกนเดียวที่ติดตามดวงอาทิตย์ในทิศตะวันออก-ทิศตะวันตก สามารถผลิตไฟฟ้าได้มากกว่าระบบที่ติดตั้งแบบมุมคงที่ร้อยละ 27-32

Anucha K., S. Chandra, and Mohan Reddy (2013) อ้างถึงใน Suneetha Racharla, and K. Rajan (2017) ศึกษาติดตามดวงอาทิตย์แกนเดียวโดยใช้ ARM processor เป็นเวลา 6 วัน พบว่า สามารถผลิตไฟฟ้าได้มากกว่าระบบที่ติดตั้งแบบมุมคงที่ร้อยละ 40

Dhanabal R., V. Bharathi, R. Ranjitha, A. Ponni, S. Deepthi, and P. Mageshkannan (2013) อ้างอิงใน Suneetha Racharla, and K. Rajan (2017) ศึกษาเปรียบเทียบระบบที่ติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบมวมคงที่ และระบบติดตามดวงอาทิตย์แบบแกนเดียว โดยบันทึกข้อมูลทุก ๆ ชั่วโมง ตั้งแต่เวลา 8.00 น. ถึงเวลา 18.00 น. มีผลการศึกษาคือระบบติดตามดวงอาทิตย์แกนเดียวผลิตไฟฟ้าเพิ่มขึ้นร้อยละ 32.17 เมื่อเทียบกับระบบที่ติดตั้งแบบมวมคงที่

4.1.1.2 ประสิทธิภาพระบบติดตามดวงอาทิตย์แบบสองแกน

ราชรัฐ ยี่ตัน (2556) ได้ออกแบบและพัฒนาระบบแผงเซลล์แสงอาทิตย์เคลื่อนที่ได้สองแกนตามดวงอาทิตย์สำหรับใช้ควบคุมแผงโซลาร์เซลล์มากกว่าหนึ่งแผง เมื่อทดสอบระบบติดตามดวงอาทิตย์แล้ว สามารถผลิตกำลังไฟฟ้าได้มากกว่าระบบติดตั้งคงที่มุม 15 องศาร้อยละ 12.51

การทดสอบแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ติดตั้งระบบติดตามแสงอาทิตย์สองแกนด้วยการปรับสมดุลน้ำ (ทดสอบเป็นระยะเวลา 5 วัน) สามารถให้กำลังไฟฟ้าเฉลี่ยสูงกว่าแผงที่ติดตั้งแบบมวมคงที่ร้อยละ 37.63 (สิทธิชัย จินะวงศ์, นำนนที กัลยา และ เสาวลักษณ์ ชัยยีน, 2556)

การศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์แบบติดตามดวงอาทิตย์สองแกนกับแบบติดตั้งแบบมวมคงที่ ที่เส้นละติจูด 13 องศาเหนือระหว่างเดือนสิงหาคม 2555 (ค.ศ.2012) ถึงเดือนมีนาคม 2556 (ค.ศ.2013) พบว่าระบบติดตามดวงอาทิตย์สองแกนผลิตไฟฟ้าได้มากกว่าแบบติดตั้งแบบมวมคงที่ร้อยละ 21.2 (Roshan R. Rao, H. R. Swetha, J. Srinivasan, and Sheela K. Ramasesha, 2015)

การศึกษาของ Rustu E. and Ali S., (2012) ซึ่งเปรียบเทียบประสิทธิภาพของระบบติดตามดวงอาทิตย์สองแกนกับระบบติดตั้งแบบมวมคงที่โดยใช้เวลาทดสอบ 1 ปี พบว่าระบบติดตามดวงอาทิตย์สองแกนสามารถผลิตไฟฟ้าได้มากกว่าแบบติดตั้งแบบมวมคงที่ร้อยละ 30.79

การออกแบบชุดติดตามดวงอาทิตย์สองแกนเพื่อให้ได้พลังงานสูงสุด พบว่าชุดติดตามดวงอาทิตย์สองแกนสามารถผลิตไฟฟ้าได้มากกว่าการติดตั้งแบบมวมคงที่ถึงร้อยละ 40 (A. Aashir Waleed and B. DR. K M Hassank, 2013)

การศึกษาผลกระทบของระบบติดตามดวงอาทิตย์ต่อประสิทธิภาพของ โรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ในปี พ.ศ.2554 (ค.ศ.2011) พบว่า ระบบติดตามดวงอาทิตย์แบบ สองแกนสามารถผลิตไฟฟ้าได้เพิ่มขึ้นร้อยละ 40.4 เมื่อเทียบกับระบบติดตั้งแบบมุมคงที่ (Shahriar B., Reza K., Shahrokh F., Amir G., and Khashayar B., 2014)

การสะสมพลังงานแสงอาทิตย์สูงสุดโดยมีระบบติดตามดวงอาทิตย์ ที่ต่างกัน ในระยะเวลา 9 เดือน มีผลการศึกษาคือ ระบบติดตามดวงอาทิตย์แบบสองแกนสามารถ ผลิตไฟฟ้าได้มากกว่าระบบติดตั้งแบบมุมคงที่ถึงร้อยละ 30 (N. H. Helwa, A. B. G. Bahgat, A. M. R. El Shafee, and E. T. El Shenawy, 2000)

David Appleyard (2009) กล่าวว่า ระบบติดตามดวงอาทิตย์แบบ สองแกนสามารถผลิตไฟฟ้าได้มากกว่าระบบติดตั้งแบบมุมคงที่ร้อยละ 35-40

Dhanabal R., V. Bharathi, R. Ranjitha, A. Ponni, S. Deepthi, and P. Mageshkannan (2013) อ้างถึงใน Suneetha Racharla, and K. Rajan (2017) ศึกษา เปรียบเทียบระบบที่ติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบมุมคงที่ และสองแกน บันทึกข้อมูลทุก ๆ ชั่วโมง ตั้งแต่เวลา 8.00 น. ถึงเวลา 18.00 น. มีผลการศึกษาคือ ระบบติดตามดวงอาทิตย์สองแกนผลิตไฟฟ้า เพิ่มขึ้นร้อยละ 81.68 เมื่อเทียบกับระบบที่ติดตั้งแบบมุมคงที่

Sinan KIVRAK, Mustafa GUNDUZALP, and Furkan DINCER (2012) ได้ศึกษาออกแบบ ระบบติดตามดวงอาทิตย์สองแกนแบบ open-loop เปรียบเทียบกับระบบติดตั้ง แบบมุมคงที่ โดยใช้มอเตอร์ Actuator 2 ตัว ในการเคลื่อนที่ และใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ Visual C#2005 เพื่อเขียนสมการตรงความเข้มแสงอาทิตย์ ผลการทดลองพบว่า ในช่วงเดือนพฤษภาคมและ มิถุนายน พลังงานไฟฟ้าที่ติดตั้งกับระบบติดตามดวงอาทิตย์สองแกนเพิ่มขึ้นจากระบบติดตั้งแบบ มุมคงที่ร้อยละ 64

4.1.1.3 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพระบบติดตามดวงอาทิตย์

จากข้อมูลข้างต้นจะเห็นว่า ระบบติดตามดวงอาทิตย์แบบสองแกน สามารถผลิตไฟฟ้าได้ดีที่สุด มากกว่าระบบติดตามดวงอาทิตย์แบบแกนเดียว และระบบติดตั้งแบบ มุมคงที่ ดังแสดงในตารางที่ 4.1 ซึ่งเป็นการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของระบบติดตามดวงอาทิตย์ ทั้ง 2 แบบ กับระบบที่ติดตั้งแบบมุมคงที่

ตารางที่ 4.1 ประสิทธิภาพของระบบติดตามดวงอาทิตย์

ระบบติดตามดวงอาทิตย์		ประสิทธิภาพที่สูงขึ้นเมื่อเทียบกับระบบที่ติดตั้งแบบมุมคงที่ (%)
แบบเดี่ยว	ธนิต เรืองรุ่งชัยกุล และคณะ (2559)	10 (E-W)
	การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (2552)	10 (E-W)
	Shahriar B. et al. (2014)	35
	N. H. Helwa et al. (2000)	18 (N-S), 11 (E-W)
	David Appleyard (2009)	27-32
	Anucha K. et al. (2013) อ้างถึงใน Suneetha R. et al. (2017)	40
	Dhanabal R. et al. (2013) อ้างถึงใน Suneetha R. et al. (2017)	32.17
สองแกน	ราชรัฐ ยี่ตัน (2556)	12.51
	สิทธิชัย จินะวงศ์ และคณะ (2556)	37.63
	Roshan R. Rao et al. (2015)	21.2
	Rustu E., and Ali S. (2012)	30.79
	A. Aashir Waleed et al. (2013)	40
	Shahriar B. et al. (2014)	40.4
	N. H. Helwa et al. (2000)	30
	David Appleyard (2009)	35-40
	Dhanabal R. et al. (2013) อ้างถึงใน Suneetha R. et al. (2017)	81.68
	Sinan KIVRAK et al. (2012)	64

จากตารางที่ 4.1 จะเห็นว่าระบบติดตามดวงอาทิตย์ทั้งแบบแกนเดี่ยวและแบบสองแกน มีประสิทธิภาพสูงกว่าระบบติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบมุมคงที่ ซึ่งจะแตกต่างกันไปตามลักษณะการออกแบบและพื้นที่ติดตั้ง อย่างไรก็ตาม ระบบติดตามดวงอาทิตย์สองแกน มีประสิทธิภาพสูงสุด ดังนั้น ในการศึกษาี้ผู้ศึกษาจึงเลือกออกแบบโครงสร้างรองรับแผงเซลล์แสงอาทิตย์สำหรับระบบติดตามดวงอาทิตย์สองแกน เพื่อให้สามารถผลิตไฟฟ้าได้สูงสุด

4.1.2 ลักษณะโครงสร้างรองรับแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบติดตามดวงอาทิตย์

ผู้วิจัยได้ศึกษาลักษณะโครงสร้างรองรับแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบติดตามดวงอาทิตย์ ที่ใช้งานกับโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ โดยศึกษาโครงสร้างที่มีการติดตั้งในประเทศไทย และโครงสร้างที่ติดตั้งในต่างประเทศ จากการศึกษาพบว่า มีการติดตั้งโครงสร้าง 2 รูปแบบ คือ การติดตั้งแบบเสาเดี่ยว (Pole mounting) และการติดตั้งบนพื้น (Ground mounting)

4.1.2.1 การติดตั้งแบบเสาเดี่ยว (Pole mounting)

การติดตั้งแบบเสาเดี่ยว เป็นการติดตั้งที่มีโครงสร้างรองรับแผงเซลล์แสงอาทิตย์อยู่ด้านบน มีเสาเพียงเสาเดี่ยวเพื่อรับน้ำหนักแผงเซลล์แสงอาทิตย์ จากการศึกษาโครงสร้างของ Lorentz อ้างถึงใน Courtenay Johnson (2014) ซึ่งมีโครงสร้างรองรับแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบติดตามดวงอาทิตย์ทั้งแกนเดี่ยว และสองแกน ในส่วนของโครงสร้างรองรับแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบแกนเดี่ยว โดยติดตามในแนวทิศเหนือ-ทิศใต้ มีกำลังการผลิตไฟฟ้า 10 กิโลวัตต์ มีคานรองรับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ 8 คาน แต่ละคานมีจุดหมุน และถ่ายแรงมายังคานหลักที่มีเสารองรับ ใช้มอเตอร์ปรับขางานดาวเทียมในการปรับทิศทางการหมุนของโครงสร้าง ออกแบบให้รองรับแรงลมที่มากที่สุด ซึ่งถ้าโครงสร้างไม่แข็งแรงจะทำให้โครงสร้างบิดงอได้ โดยใช้เหล็กชุบกำลัปวาไนซ์ ในการทำโครงสร้าง ดังภาพที่ 4.1

สำหรับโครงสร้างระบบติดตามดวงอาทิตย์สองแกน (ภาพที่ 4.2) มีฐานเป็นคอนกรีต ใช้ String inverters (กล่องสี่แดงติดตั้งกับเสา) ถูกล้อมรอบด้วยตู้ควบคุมอุณหภูมิ เพื่อปรับอุณหภูมิของ String inverters ในฤดูหนาว การติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์มีการเว้นระยะระหว่างแผงเซลล์แสงอาทิตย์ทั้งระยะระหว่างแผง และระหว่างแถว เพื่อลดการสะสมของแรงลม

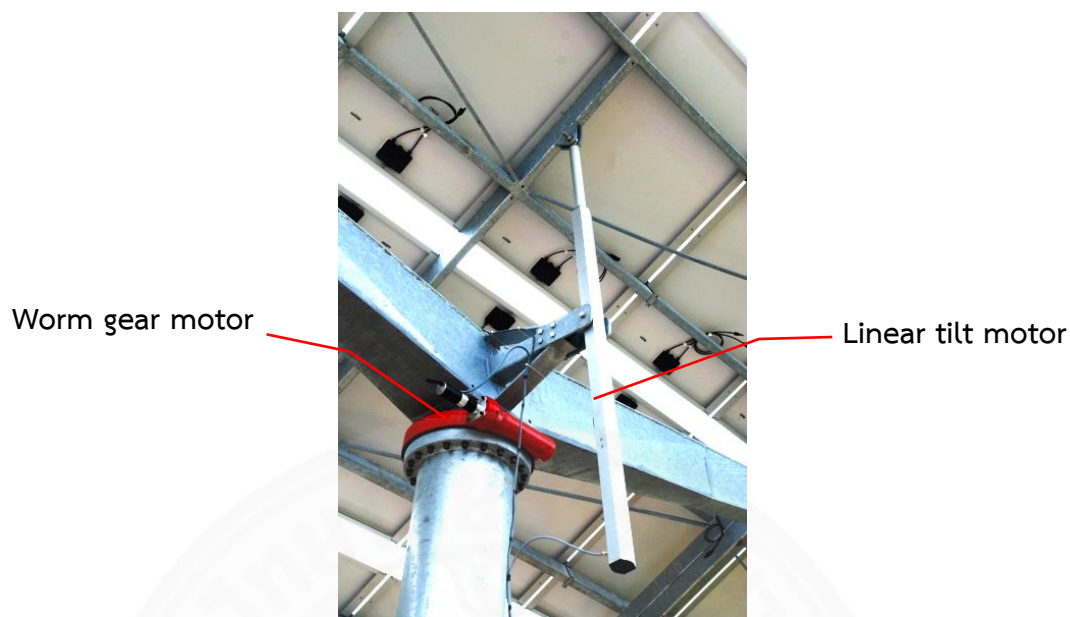
ระบบการขับเคลื่อนเพื่อปรับมุมแผงเซลล์แสงอาทิตย์ แสดงดังภาพที่ 4.3 ซึ่งประกอบด้วย Worm gear motor และ Linear tilt motor โดยการขับเคลื่อนเพื่อหมุนแผงเซลล์แสงอาทิตย์ในทิศตะวันออก-ตะวันตก ใช้ worm gear motor และเฟืองทด (ชิ้นส่วนสีแดงบริเวณหัวเสา) ส่วนการขับเคลื่อนเพื่อปรับโครงสร้างรองรับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ขึ้น-ลงสำหรับติดตามดวงอาทิตย์ในแนวทิศเหนือ-ทิศใต้ ใช้ linear tilt motor (แท่งสีเหลี่ยมทางขวา)



ภาพที่ 4.1 โครงสร้างรองรับแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบติดตามดวงอาทิตย์แกนเดียวบนเสาเดี่ยว, Ottawa Valley Photovoltaic. “Mounting Systems.” http://www.ottawavalleypv.ca/tracking_mount.html (accessed April 18, 2017).



ภาพที่ 4.2 โครงสร้างรองรับแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบติดตามดวงอาทิตย์สองแกนบนเสาเดี่ยว, เรื่องเดียวกัน, 51.



ภาพที่ 4.3 Worm gear motor และ Linear tilt motor, เรืองเดียวกัน, 51.

4.1.2.2 การติดตั้งบนพื้น (Ground mounting)

การติดตั้งบนพื้นดิน เป็นการติดตั้งโดยมีโครงสร้างรองรับแผงเซลล์แสงอาทิตย์บนพื้น มีโครงสร้างไม่สูง ใช้กับพื้นที่บริเวณกว้าง โครงสร้างรองรับแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบติดตามดวงอาทิตย์แกนเดียวที่ติดตั้งบนพื้นดิน (ภาพที่ 4.4) มีโครงสร้างเสาเอียงตามเส้นละติจูดของพื้นที่ มีเสาเป็นรูปสามเหลี่ยมสองด้าน รองรับคานที่สามารถหมุนแผงเซลล์แสงอาทิตย์บริเวณหัวเสาเพื่อปรับในแนวทิศตะวันออก-ทิศตะวันตก (Stephen Smith, 2011)



ภาพที่ 4.4 โครงสร้างรองรับแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบติดตามดวงอาทิตย์แกนเดียวบนพื้น, Stephen Smith. “ PV Trackers.” <http://solarprofessional.com/articles/products-equipment/racking/pv-trackers#.WdsRbzBx3Dc> (accessed June 21, 2017).

โครงสร้างรองรับแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบติดตามดวงอาทิตย์สองแกน ที่ติดตั้งบนพื้นของ Sedona Energy Labs (2009) โดยใช้อะลูมิเนียมเป็นโครงสร้างฐานทำเป็น สี่เหลี่ยม มีบานพับอยู่ด้านหนึ่งของฐาน โดยมี linear actuator ปรับมุมแนวทิศเหนือ-ทิศใต้ โครงสร้างส่วนบนที่ยึดกับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ทำเป็นกรอบสี่เหลี่ยม และมีขายึดกับโครงสร้างหลัก เพื่อให้มีการปรับมุมในแนวทิศตะวันออก-ทิศตะวันตกได้ โดยใช้ linear actuator อีกตัวหนึ่ง ขับเคลื่อนขึ้นส่วนที่ยึดแผงเซลล์แสงอาทิตย์ไว้ด้วยกัน เพื่อให้สามารถปรับมุมไปพร้อมกันได้ ดังภาพที่ 4.5 (ก) นอกจากนี้ยังมีโครงสร้างที่ติดตั้งบนเสา เพื่อรองรับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ด้านบน วางตาม แนวยาว ซึ่งมีจุดหมุนที่หัวเสาเพื่อให้แผงเซลล์แสงอาทิตย์เคลื่อนที่ โดยมี linear actuator ขับเคลื่อน ส่วนอีกแกนหนึ่งจะใช้ linear actuator อีกตัวหนึ่งขับเคลื่อนขึ้นส่วนที่ยึดแผงเซลล์แสงอาทิตย์ไว้ ให้มีการ เคลื่อนที่พร้อม ๆ กัน คล้ายบานเกล็ดหน้าต่าง ดังภาพที่ 4.5 (ข)



(ก)



(ข)

ภาพที่ 4.5 โครงสร้างรองรับแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบติดตามดวงอาทิตย์สองแกนบนพื้น, Sedona Energy Labs. “Solar Tracking Systems.” <http://www.glendongood.com/solar-tracking-systems/> (accessed June 21, 2017).

จากการศึกษาลักษณะโครงสร้างรองรับแผงเซลล์แสงอาทิตย์สามารถสรุป
ข้อแตกต่างของโครงสร้างรองรับแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบติดตามดวงอาทิตย์ได้ดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ลักษณะโครงสร้างรองรับแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบติดตามดวงอาทิตย์

ข้อเปรียบเทียบ	การติดตั้งแบบเสาเดี่ยว	การติดตั้งบนพื้น
1. เสา	ใช้เสาเดี่ยว ขนาดใหญ่	- ใช้หลายเสา ขนาดเล็ก - ใช้โครงถัก ถายน้ำหนักลงพื้น
2. โครงสร้างรองรับแผงเซลล์แสงอาทิตย์	ใช้คานยาววางซ้อนกันเพื่อถ่ายแรง	วางประกอบเพื่อรองรับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ใช้คานขนาดเล็ก
3. การวางแผงเซลล์แสงอาทิตย์	รองรับได้ 20 แผ่นขึ้นไป มีช่องว่างระหว่างแผงเซลล์แสงอาทิตย์เพื่อลดการต้านลม	รองรับได้ไม่เกิน 12 แผ่นต่อ 1 ชุดวางแผงเซลล์แสงอาทิตย์เพียงแถวเดียว
4. ชุดขับเคลื่อนและแกนหมุน	แกนหมุนมีอิสระต่อกัน แกนหนึ่งมีจุดหมุนอยู่ปลายคานที่ติดตั้งบนเสา อีกแกนหนึ่งอยู่ที่หัวเสา (หมุนรอบเสา) และมีชุดขับเคลื่อนขนาดใหญ่ ราคาสูง	แกนหมุนเป็นอิสระต่อกัน แกนหมุนใช้มอเตอร์ไฟฟ้า หรือ linear actuator ขับเคลื่อน มีลักษณะการทำงานคล้ายบานเกล็ดหน้าต่าง และชุดขับเคลื่อนขนาดเล็ก หาซื้อได้ง่าย
5. ฐานรากและเสาเข็ม	ใช้ฐานรากและเสาเข็มตามน้ำหนักบรรทุกของแต่ละโครงสร้าง	ส่วนใหญ่จะเทคอนกรีตรองรับโครงสร้าง ไม่ใช้เสาเข็ม
6. ความสูงของโครงสร้าง	มีความสูงไม่ต่ำกว่า 3 เมตร	ความสูงไม่เกิน 2 เมตร

4.1.3 โครงสร้างรองรับแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบติดตามดวงอาทิตย์

ในส่วนนี้ ผู้ศึกษาได้ทำการเก็บรวบรวมข้อมูลจากแหล่งทุติยภูมิและได้ทำการออกสำรวจและเก็บข้อมูลจากแหล่งปฐมภูมิ โดยพบว่า มีการติดตั้งใช้งานระบบติดตามดวงอาทิตย์แกนเดียวแบบถ่วงน้ำหนัก (Water weight tracking system) ที่โรงไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์เขื่อนสิรินธร จังหวัดอุบลราชธานี ดังที่กล่าวมาแล้วในบทที่ 2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง และยังมีการติดตั้งระบบติดตามดวงอาทิตย์สองแกนภายในประเทศไทยอีกหลายแห่ง ซึ่งผู้วิจัยได้ศึกษาดังต่อไปนี้

4.1.3.1 ระบบติดตามดวงอาทิตย์สองแกน ที่ศูนย์การเรียนรู้เพื่อโลกสีเขียว (All Green Learning Center: AGLC)

ศูนย์การเรียนรู้เพื่อโลกสีเขียวตั้งอยู่ที่บ้านโนนกระโศก ตำบลพญาเย็น อำเภอปากช่อง จังหวัดนครราชสีมา (ภาพที่ 4.6) เป็นโครงสร้างแบบเสาเดี่ยว รองรับแผงเซลล์แสงอาทิตย์จำนวน 24 แผง (6 กิโลวัตต์) ใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ควบคุมระบบติดตามดวงอาทิตย์แบบสองแกนเพื่อสั่งการมาให้มอเตอร์ทำงาน โดยติดตั้งมอเตอร์ 50 วัตต์จำนวน 2 ตัว ให้เชื่อมต่อกับสายเคเบิลควบคุมการหมุนสองแกน (มอเตอร์ 1 ตัว ควบคุม 1 แกน) ดังภาพที่ 4.7 เมื่อมอเตอร์หมุนจะดึงสายเคเบิลให้โครงสร้างรองรับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ปรับหาดวงอาทิตย์ มีราคาโครงสร้างประมาณ 1.5 ล้านบาท (60,000 ดอลลาร์สิงคโปร์) และจากการสอบถามคุณศรีศศิณ ด้านตระกูล และคุณกรณ์ กันทะชมพู พบว่า ในช่วงแรกของการติดตั้งโครงสร้าง ใช้งบประมาณในการก่อสร้างเสาและฐานรากมากเกินไปจนความจำเป็น ทำให้มีต้นทุนที่สูงขึ้น อีกทั้งการควบคุมโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ ต้องทำการระบุพิกัดของพื้นที่ที่ติดตั้งลงในโปรแกรมคอมพิวเตอร์ด้วย



ภาพที่ 4.6 โครงสร้างรองรับแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบที่ติดตามดวงอาทิตย์ที่ AGLC



ภาพที่ 4.7 มอเตอร์ที่ยึดกับสายเคเบิลเพื่อขับเคลื่อนโครงสร้างรองรับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ AGLC

4.1.3.2 ระบบติดตามดวงอาทิตย์สองแกน ที่สวนป่ามหาชีวาลัยอีสาน

สวนป่ามหาชีวาลัยอีสานตั้งอยู่ที่บ้านปากช่อง ตำบลสนามชัย อำเภอสตึก จังหวัดบุรีรัมย์ เป็นโครงสร้างแบบเสาเดี่ยวเช่นกัน เสาเป็นโครงถักทรงสามเหลี่ยมความสูง 6 เมตร ดังภาพที่ 4.8 มีโครงสร้างรองรับแผงเซลล์แสงอาทิตย์จำนวน 20 แผ่น กำลังการผลิตไฟฟ้า 5 กิโลวัตต์ แต่ละแผ่นมีระยะห่างระหว่างแผ่นเพื่อลดแรงต้านของลม และระบายความร้อนจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (ภาพที่ 4.9) ยอดเสาดัดตั้งแกนหมุนรอบเสา (ภาพที่ 4.10 (ก)) ฐานรากเป็นคอนกรีต ลึก 2 เมตร ขนาด 3x3 เมตร โดยใช้มอเตอร์ขนาด 1/2 แรงม้าขับเคลื่อนจากพื้นด้านล่าง โดยอาศัยเฟืองทดรอบให้หมุนช้าลง อีกแกนหนึ่งปรับแผงขึ้น-ลงคล้ายการทำงานของรถโดยใช้มอเตอร์ขนาดเดียวกันขับเคลื่อนติดอยู่ด้านบน (ภาพที่ 4.10 (ข)) นอกจากนี้ คุณตฤณ ตันตเศรษฐี ระบุว่า การติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีความสูงนั้น ต้องคำนึงถึงแรงลม (wind load) ที่มีผลต่อโครงสร้างอย่างมาก โดยเฉพาะพื้นที่โล่ง โครงสร้างดังกล่าวจึงมีการติดตั้งกระบอกโซ๊ค เพื่อช่วยเสริมความแข็งแรงของโครงสร้างในการรับแรงลมที่เกิดขึ้น และมอเตอร์จะหยุดการทำงานเมื่อมีกระแสลมมากเกินไป



ภาพที่ 4.8 โครงถักเสารองรับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่สวนป่ามหาชีวาลัยอีสาน



ภาพที่ 4.9 โครงสร้างรองรับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่สวนป่ามหาชีวาลัยอีสาน



(ก)



(ข)

ภาพที่ 4.10 จุดหมุนที่ติดตั้งกับโครงสร้างรองรับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่สวนป่ามหาชีวาลัยอีสาน

4.1.3.3 ระบบติดตามดวงอาทิตย์สองแกน บนอาคารเวรตี 47 อพาร์ทเมนต์

อาคารเวรตี 47 อพาร์ทเมนต์ตำบลตลาดขวัญ อำเภอเมืองนนทบุรี จังหวัดนนทบุรี เป็นโครงสร้างแบบสองเสาทรงสามเหลี่ยม (ภาพที่ 4.11 และ 4.12) ทำจากเหล็กกล่องสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 4x4 นิ้ว ห่างกัน 3.1 เมตร บนหัวเสาเป็นจุดหมุนโดยใช้ตลับลูกปืนตึกดา (UCP bearing units) และเพลากลม (ภาพที่ 4.13 (ก)) ยึดติดกับคานหลัก ใช้เหล็กกล่องสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 2x2 นิ้ว เชื่อมติดกับคานรองเป็นรูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้า ส่วนโครงสร้างที่ยึดแผงเซลล์แสงอาทิตย์ใช้เหล็กกล่องสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 1x1 นิ้ว มีคานเหล็กกล่องสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาด 2x1 เมตร รองรับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ยึดติดกับคานรองโดยใช้บูทกลม เพื่อเป็นจุดหมุนให้แผงหมุนแนวทิศเหนือ-ทิศใต้ มีคานยาวด้านล่างยึดติดกับ actuator ความยาว 24 นิ้ว เพื่อขับเคลื่อน (ภาพที่ 4.13 (ข)) ส่วนแกนทิศตะวันออก-ทิศตะวันตก มี actuator อีกตัวหนึ่งยึดติดกับคานระหว่างเสาเพื่อขับเคลื่อน (ภาพที่ 4.13 (ค)) มีกำลังการผลิต 1.2 กิโลวัตต์ แผงเซลล์แสงอาทิตย์แต่ละแผ่นวางตัวห่างกัน 0.57 เมตร เพื่อไม่ให้เกิดการบดบังแสงอาทิตย์ จากการสอบถามคุณไมตรี ช่างแต่ง พบว่า ได้ติดตั้งโครงสร้างดังกล่าวมาแล้ว 1 ปี ที่ความสูงจากพื้นดิน 15 เมตร สามารถรับแรงลมได้ตลอดทั้งปี และเมื่อเวลาไม่มีแสงอาทิตย์ ชุดขับเคลื่อนแผงเซลล์แสงอาทิตย์ถูกตั้งคำสั่งให้เคลื่อนที่กลับมาขนานกับพื้น เพื่อลดผลกระทบจากแรงลมและเตรียมเคลื่อนที่เมื่อได้รับแสงอาทิตย์อีกครั้ง มีค่าใช้จ่ายในการติดตั้งโครงสร้างประมาณ 21,000 บาท



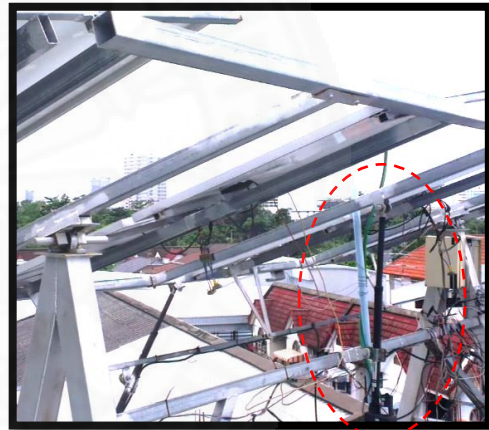
ภาพที่ 4.11 การติดตั้งโครงสร้างบนอาคารเวรตี 47 อพาร์ทเมนต์



ภาพที่ 4.12 ลักษณะโครงสร้างรองรับแผงเซลล์แสงอาทิตย์บนอาคารเร็วดี 47 อพาร์ทเมนต์



(ก)



(ข)



(ค)

ภาพที่ 4.13 อุปกรณ์ของโครงสร้างรองรับแผงเซลล์แสงอาทิตย์บนอาคารเร็วดี 47 อพาร์ทเมนต์

จากการศึกษาโครงสร้างรองรับแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบติดตามดวงอาทิตย์ที่มีการติดตั้งในประเทศไทย พบข้อจำกัดของโครงสร้างรองรับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (ตารางที่ 4.3) และนำข้อมูลไปใช้ในการออกแบบโครงสร้างต่อไป

ตารางที่ 4.3 โครงสร้างรองรับแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบติดตามดวงอาทิตย์สองแกนในประเทศไทย

ข้อเปรียบเทียบ	AGLC นครราชสีมา	สวนป่าฯ บุรีรัมย์	เรเวดี 47 นนทบุรี
1. ลักษณะโครงสร้าง	เสาเดี่ยว	เสาเดี่ยว (โครงถัก)	ติดตั้งบนพื้น
2. ความสูงของโครงสร้าง	4 เมตร	6 เมตร	1.5 เมตร
3. ข้อจำกัดในการติดตั้ง	<ul style="list-style-type: none"> - ต้องตั้งค่าหรือป้อนข้อมูลชุดควบคุมในแต่ละพื้นที่ - โครงสร้างเป็นเสายาว เสาเกิดการคดได้ง่าย - ไม่สะดวกในการทำความสะอาด - ต้นทุนสูง 	<ul style="list-style-type: none"> - ตั้งอยู่บริเวณพื้นที่โล่ง กระแสลมกระทำต่อโครงสร้างมาก - ติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์ยาก เนื่องจากโครงสร้างสูง - ไม่สะดวกในการทำความสะอาด - ต้นทุนสูง 	<ul style="list-style-type: none"> - โครงสร้างอยู่บนตึกที่มีความสูงจากพื้นดิน 15 เมตร ลมมีผลต่อโครงสร้างมาก - ต้นทุนไม่สูงมาก
4. การแก้ปัญหา	<ul style="list-style-type: none"> - ส่วนล่างใช้โครงถักเป็นเสาเพื่อเพิ่มความแข็งแรง 	<ul style="list-style-type: none"> - วางแผงเซลล์แสงอาทิตย์ให้มีช่องสำหรับลดแรงต้านของลม - ติดตั้งกระบอกโช๊คเพื่อช่วยเสริมความแข็งแรงของโครงสร้าง ในการรับแรงลมที่เกิดขึ้น - ใช้รถเครนช่วยในการติดตั้งโครงสร้าง 	<ul style="list-style-type: none"> - เมื่อไม่มีแผงอาทิตย์ โครงสร้างจะปรับให้ขนานกับพื้นดิน ลดการต้านของลม

4.2 การออกแบบโครงสร้างรองรับแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบติดตามดวงอาทิตย์ เพื่อใช้งานกับโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์

หลังจากศึกษาลักษณะโครงสร้างรองรับแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบติดตามดวงอาทิตย์ ทั้งในและต่างประเทศ และสัมภาษณ์บุคคลที่มีความเกี่ยวข้องกับระบบติดตามดวงอาทิตย์ ผู้วิจัยจึงได้ออกแบบโครงสร้าง 2 รูปแบบ คือ ออกแบบโดยใช้เสาเดี่ยว และออกแบบโดยติดตั้งบนพื้นดิน โดยทั้งสองแบบรองรับระบบติดตามดวงอาทิตย์และชุดควบคุมที่พัฒนาโดย ธนิต เรืองรุ่งชัยกุล (2560) ซึ่งทำงานโดยอาศัยความแตกต่างระหว่างศักย์ไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ขนาดเล็กในการตรวจหาตำแหน่งของดวงอาทิตย์ เพื่อกระตุ้นให้ระบบควบคุมทำงานตัดต่อวงจรในการขับมอเตอร์ (actuator) เพื่อปรับให้แผงเซลล์แสงอาทิตย์หันเคลื่อนที่ติดตามดวงอาทิตย์ มีโครงสร้างและวงจรการควบคุมที่ไม่ยุ่งยากซับซ้อน ติดตั้งได้ง่าย อุปกรณ์ที่ใช้หาได้ง่ายในท้องตลาดทั่วไป และมีต้นทุนต่ำ ดังภาพที่ 4.14



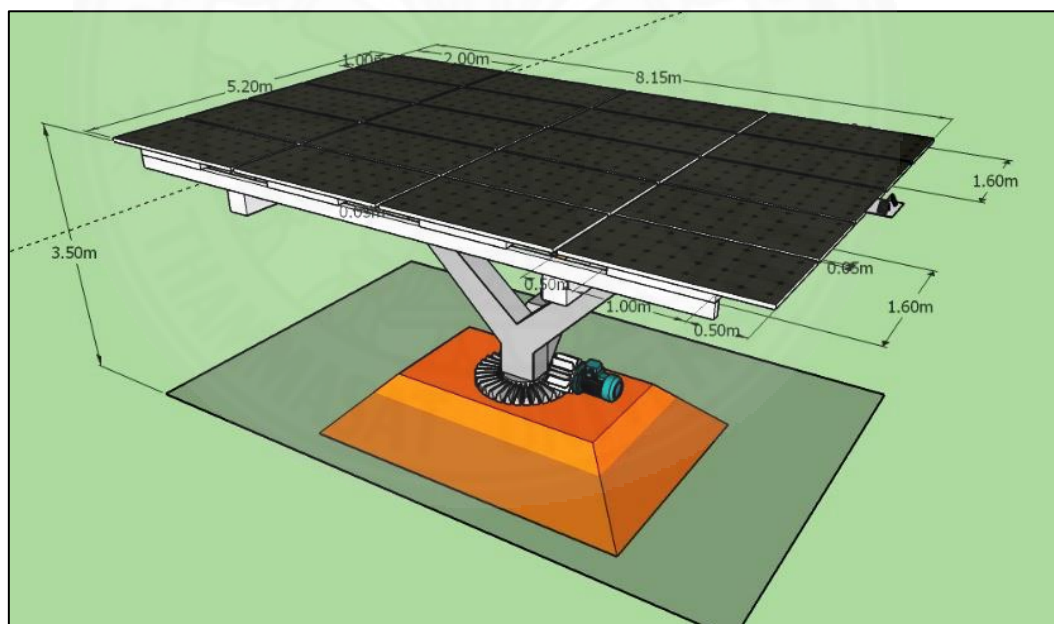
ภาพที่ 4.14 ระบบติดตามดวงอาทิตย์สองแกนของธนิต เรืองรุ่งชัยกุล (2560)

4.2.1 การออกแบบโครงสร้างรองรับแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบติดตามดวงอาทิตย์

จากการศึกษาโครงสร้างรองรับแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบติดตามดวงอาทิตย์สองแกน พบว่า สามารถออกแบบโครงสร้างได้ 2 รูปแบบ คือ แบบเสาเดี่ยว และแบบติดตั้งบนพื้น โดยนำข้อดี และข้อจำกัดของโครงสร้างที่ได้ศึกษามาใช้ในการออกแบบให้โครงสร้างสามารถใช้งานได้ มีแนวทางในการออกแบบและลักษณะโครงสร้าง ดังต่อไปนี้

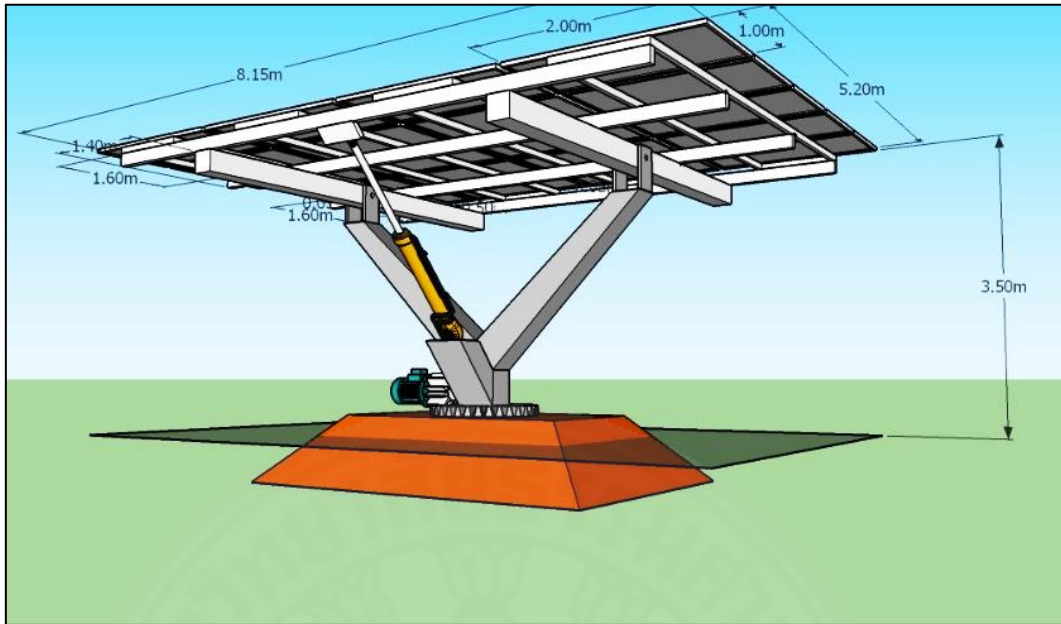
4.2.1.1 V-pole solar tracking

V-pole solar tracking เป็นโครงสร้างแบบเสาเดี่ยวรูปตัววี มีความยาวแขน 2.6 เมตร แขนเสาทำมุม 50 องศาับแนวดิ่ง ฐานเสาสูง 0.6 เมตร รองรับแผงเซลล์แสงอาทิตย์จำนวน 20 แผ่น กว้าง 5.2 เมตร ยาว 8.15 เมตร (42.38 ตารางเมตร) มีช่องว่างระหว่างแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ช่องละ 5 เซนติเมตร เพื่อลดแรงต้านจากกระแสลม และระบายความร้อน มีความสูงจากพื้น 3.5 เมตร (ภาพที่ 4.15 (ก)) ซึ่งเป็นความสูงต่ำที่สุดที่ติดตั้งเพื่อให้ปรับมุมได้โดยไม่ติดพื้นดิน และลดแรงต้านจากกระแสลม ด้านล่างแผงเซลล์แสงอาทิตย์มีคานรองรับ 4 แถว ถ้าย่น้ำหนักลงยังคานรองอีก 4 คาน และถ่ายลงคานหลักอีก 2 คานที่ติดตั้งบนเสารูปตัววี (ภาพที่ 4.15 (ข)) มีจุดหมุนบนหัวเสา ซึ่งเคลื่อนที่ขึ้นลงติดตามดวงอาทิตย์ในแนวทิศเหนือ-ทิศใต้ โดยใช้กระบอกลูกสูบไฮดรอลิกเป็นตัวขับเคลื่อน ส่วนอีกแกนหนึ่งจะอยู่บริเวณด้านล่างของเสารูปตัววี มีลักษณะเป็นฟันเฟืองให้ชุดโครงสร้างหมุนตามทิศตะวันออก-ทิศตะวันตก โดยใช้มอเตอร์ไฟฟ้าเป็นตัวขับเคลื่อนแกนหมุน (ภาพที่ 4.16) โดยมีข้อดีและข้อแตกต่างจากโครงสร้างที่มีการติดตั้งในปัจจุบัน ดังตารางที่ 4.4



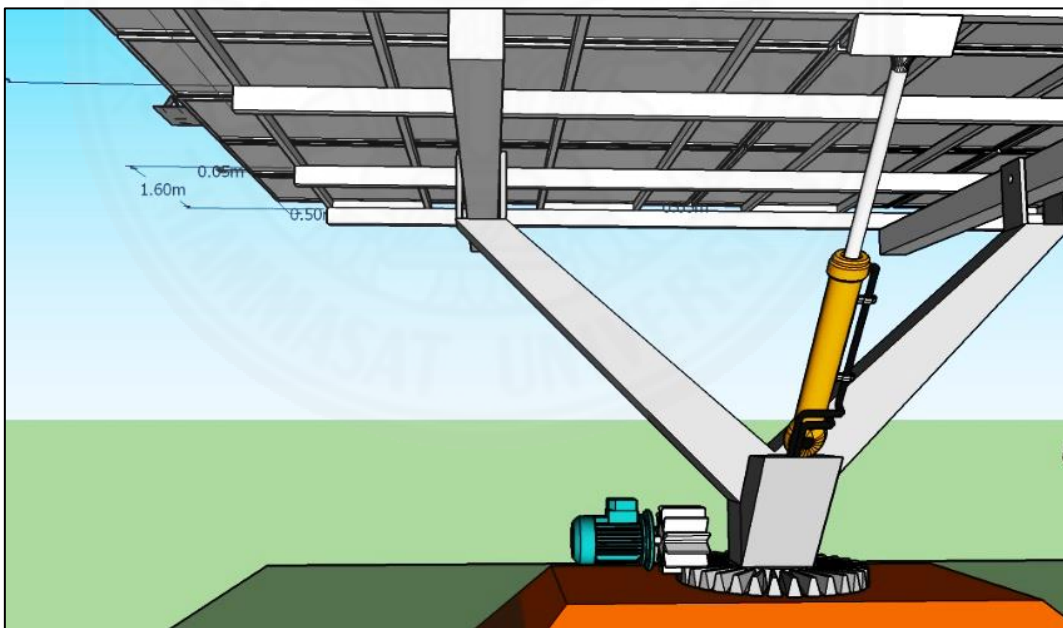
(ก)

ภาพที่ 4.15 V-pole solar tracking



(ข)

ภาพที่ 4.15 V-pole solar tracking (ต่อ)



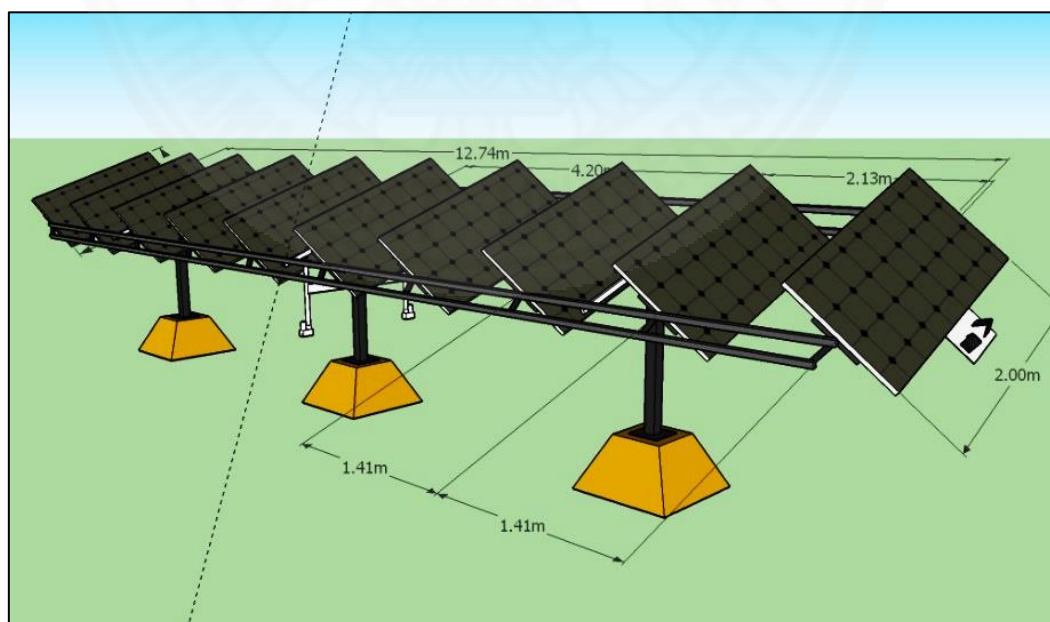
ภาพที่ 4.16 ชุดขับเคลื่อนระบบติดตามดวงอาทิตย์ของ V-pole solar tracking

ตารางที่ 4.4 โครงสร้างแบบ V-pole และ โครงสร้างที่ติดตั้งในปัจจุบัน

ปัจจัยในการออกแบบ	โครงสร้างที่ติดตั้งแล้ว	โครงสร้างที่ออกแบบ
1. ความสูงของโครงสร้าง	มีความสูง 4-6 เมตร <u>ข้อดี:</u> อยู่เหนือศีรษะของมนุษย์ ป้องกันอันตราย <u>ข้อเสียเปรียบ:</u> ถ้าโครงสร้างชำรุด จะเกิดความเสียหายมาก และ ทำความ สะอาด แผง เซลล์ แสงอาทิตย์ยาก	ให้มีความสูง 3.5 เมตร ซึ่งเป็นความสูงต่ำ ที่สุดที่ติดตั้งเพื่อให้ปรับมุมได้โดยไม่ติด พื้นดิน (โครงสร้างเอียง 30 องศา จะสูงจาก พื้น 2 เมตร)
2. โครงสร้างรองรับแผง เซลล์แสงอาทิตย์	ใช้การถ่ายน้ำหนักบรรทุกลงคาน เพื่อถ่ายแรงลงเสา <u>ข้อดี:</u> ชิ้นส่วนโครงสร้างรับน้ำหนัก- น้อย มีความสมดุลของโครงสร้าง	ใช้โครงสร้างเช่นเดียวกับที่ติดตั้งแล้ว <u>แต่มีความพิเศษ</u> คือ โครงสร้างที่รับน้ำหนัก แผงเซลล์แสงอาทิตย์ด้านบนจะแบ่งออกเป็น 4 ชุด แต่ละชุดรับ น้ำหนัก แผงเซลล์ แสงอาทิตย์ 5 แผ่น เพื่อสามารถถอด ประกอบได้ง่าย และเพิ่มความแข็งแรง
3. ลักษณะของเสา	- เป็นเสาเดี่ยว ขึ้นเดียว - เป็นโครงถัก - เป็นรูปตัว Y แขนกว้าง	ออกแบบเป็นรูปตัว V ได้ต้นแบบจาก โครงสร้างรองรับทางยกระดับขนาดใหญ่ ที่ใช้เสาเพียงต้นเดียว และคล้ายการยก น้ำหนักของมนุษย์ โครงสร้างจะ <u>ช่วยถ่ายแรง</u> และมีความมั่นคงแข็งแรง มากกว่า การใช้ เสาเพียงต้นเดียวแล้วมีจุดหมุนตรงกลาง
4. ชุดแกนหมุน	- ใช้ Worm gear motor ติดตั้ง บริเวณหัวเสา <u>ข้อเสียเปรียบ:</u> ไม่สะดวกในการ เปลี่ยนอุปกรณ์	ออกแบบ เป็นชุด Worm gear motor เช่นกัน แต่ชุดขับเคลื่อนจะติดตั้งไว้ด้านล่าง เพื่อความสะดวก
5. การรับแรงลม	- มีช่องว่างระหว่างแผงเซลล์ แสงอาทิตย์ เพื่อให้ลมผ่านได้ - ติดตั้งโช๊คเพื่อช่วยเสริมความ แข็งแรงของโครงสร้าง ในการรับ แรงลมที่เกิดขึ้น	มีช่องว่างระหว่างแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ช่องละ 5 เซนติเมตร เพื่อลดแรงต้านจากลม และระบายความร้อน
6. การติดตั้ง	- ต้องใช้รถเครนช่วยในการติดตั้ง เพราะโครงสร้างมีความสูง และมี น้ำหนักมาก	ต้องใช้รถเครนช่วยติดตั้งเช่นกัน แต่โครงสร้างที่ออกแบบจะดูแลรักษาได้ง่าย กว่า เพราะไม่สูงจนเกินไป และมีความมั่นคง แข็งแรง

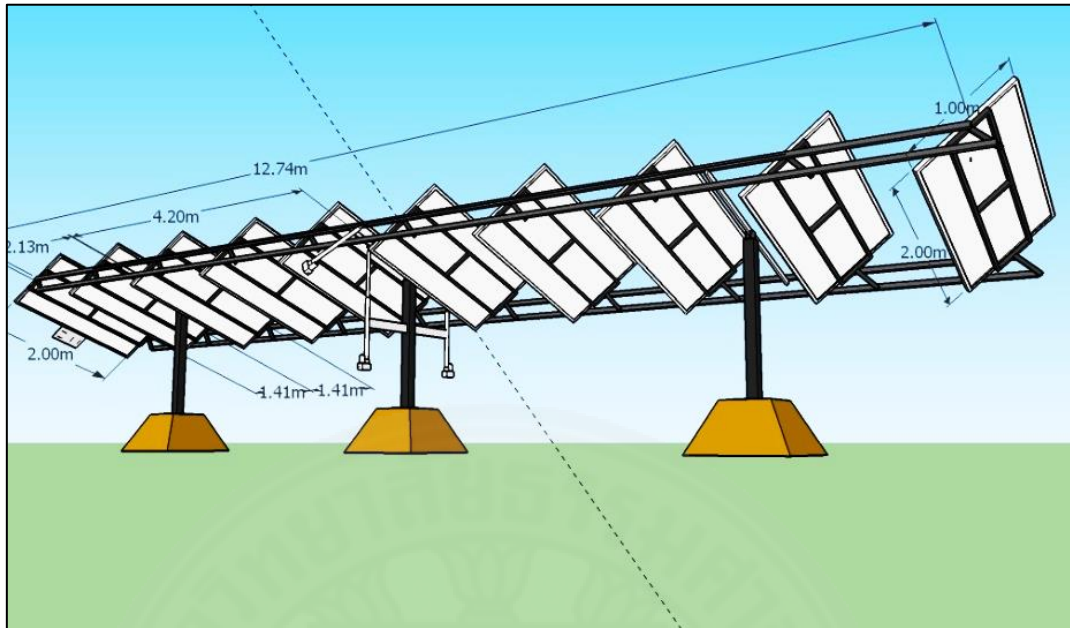
4.2.1.2 Louver solar tracking

Louver solar tracking เป็นโครงสร้างที่ติดตั้งบนพื้นดิน ที่ประยุกต์มาจากระบบติดตามดวงอาทิตย์สองแกนที่เร็วดี 47 อพาร์ทเมนต์ จังหวัดนนทบุรี และระบบติดตามดวงอาทิตย์สองแกนของ Sedona Energy Labs (2009) ประเทศสหรัฐอเมริกา ซึ่งโครงสร้างประกอบด้วยเสา 3 เสา แต่ละเสาห่างกัน 4.2 เมตร รองรับแผงเซลล์แสงอาทิตย์จำนวน 10 แผ่น แต่ละแผ่นห่างกัน 0.41 เมตร เพื่อลดแรงต้านจากกระแสลม และไม่ให้แผงเซลล์แสงอาทิตย์บดบังแสงอาทิตย์ต่อกัน มีความกว้าง 2 เมตร ยาว 12.8 เมตร (25.6 ตารางเมตร) สูง 1.5 เมตร เพื่อให้สะดวกต่อการดูแลรักษาแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (ภาพที่ 4.17 (ก)) ด้านล่างแผงเซลล์แสงอาทิตย์มีคานรองรับเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาด 2x0.4 เมตร ปลายคานรองรับทั้งสองด้าน มีจุดหมุนตรงกลางคาน ยึดติดกับคานยาว ยาว 12.74 เมตร และเชื่อมขายาว 0.5 เมตร บริเวณกึ่งกลางคานรองรับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ทั้งสองด้านยาว โดยยึดติดกับคานยาวอีกคานหนึ่งที่ปลายขา เพื่อเป็นจุดหมุนอีก 1 แกน (ภาพที่ 4.17 (ข)) ซึ่งคานหลักจะเชื่อมต่อกับจุดหมุนที่อยู่บนหัวเสาเพื่อขับเคลื่อนแกนทิศตะวันออก-ทิศตะวันตก โดยใช้มอเตอร์ปรับขางานดาวเทียม (Actuator) 2 ตัว อีกแกนหนึ่งจะมีลักษณะการทำงานคล้ายกับบานเกล็ดหน้าต่าง โดยมีมอเตอร์ปรับขางานดาวเทียมอีกตัวหนึ่งขับเคลื่อนเพื่อให้แผงเคลื่อนที่ในทิศเหนือ-ทิศใต้ ดังภาพที่ 4.18 โดยมีข้อดีและข้อแตกต่างจากโครงสร้างที่มีการติดตั้งในปัจจุบัน ดังตารางที่ 4.5



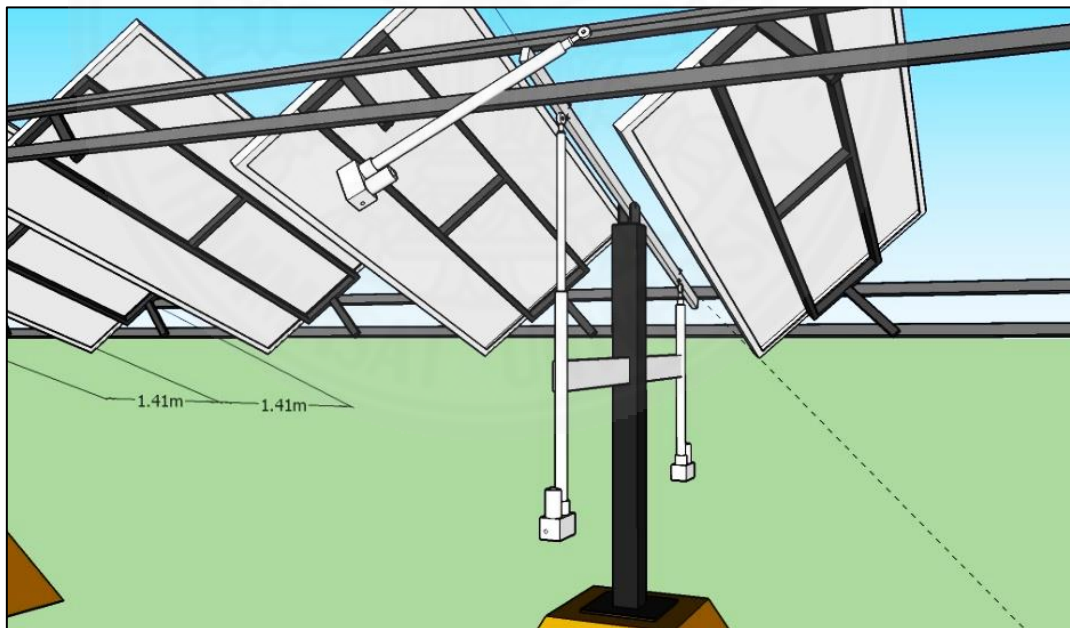
(ก)

ภาพที่ 4.17 Louver solar tracking



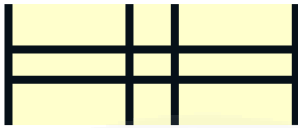
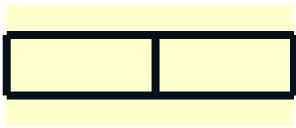
(จ)

ภาพที่ 4.17 Louver solar tracking (ต่อ)



ภาพที่ 4.18 แกนหมุน และตัวขับเคลื่อนแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบ Louver solar tracking

ตารางที่ 4.5 โครงสร้างแบบ Louver และ โครงสร้างที่ติดตั้งในปัจจุบัน

ปัจจัยในการออกแบบ	โครงสร้างที่ติดตั้งแล้ว	โครงสร้างที่ออกแบบ
1. ความสูงของโครงสร้าง	มีความสูง 1.5 เมตร (เรวตี 47 อพาร์ทเมนต์) ข้อดี: สามารถดูแลรักษาระบบได้ง่าย	สูง 1.5 เมตรเท่ากัน
2. โครงสร้างรองรับแผงเซลล์แสงอาทิตย์		
3. ลักษณะของเสา	- เป็นเสาตรง 3 ต้น - เป็นเสา สามเหลี่ยม	ออกแบบเป็นเสาตรง เพราะสามารถประหยัดต้นทุนของฐานราก เสาเสริมได้ เนื่องจากโครงสร้างมีการถ่ายแรงกระจายทั้งโครงสร้าง
4. ชุดแกนหมุน	- ใช้ Actuator ขนาด 24 นิ้ว 2 ตัว	ใช้ Actuator เช่นกัน แต่แกนที่มีจุดหมุนบนหัวเสา จะใช้ Actuator 2 ตัวเพื่อช่วยประคองโครงสร้าง และช่วยรับน้ำหนักของโครงสร้าง
5. การรับแรงลม	- มีระยะห่างระหว่างแผง	มีระยะห่างระหว่างแผง 0.42 เมตร ช่วยลดการต้านของแรงลม อีกทั้ง เป็นระยะที่เมื่อแผงเซลล์แสงอาทิตย์ติดตั้งตามดวงอาทิตย์ จะไม่บังแสงต่อกัน และ Actuator มีส่วนช่วยในการรับแรงลม
6. การติดตั้ง	- สามารถติดตั้งได้ง่าย ไม่สามารถถอดประกอบได้ เพราะใช้บุทกลึงเป็นจุดหมุน	สามารถถอดประกอบได้ง่ายขึ้น โดยใช้เพลลาในการยึดจุดหมุนบริเวณแผงเซลล์แสงอาทิตย์แทนการใช้บุทกลึง ง่ายต่อการซ่อมบำรุง แต่ยังคงความแข็งแรงไว้

4.2.2 การทดสอบโครงสร้างรองรับแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบติดตามดวงอาทิตย์

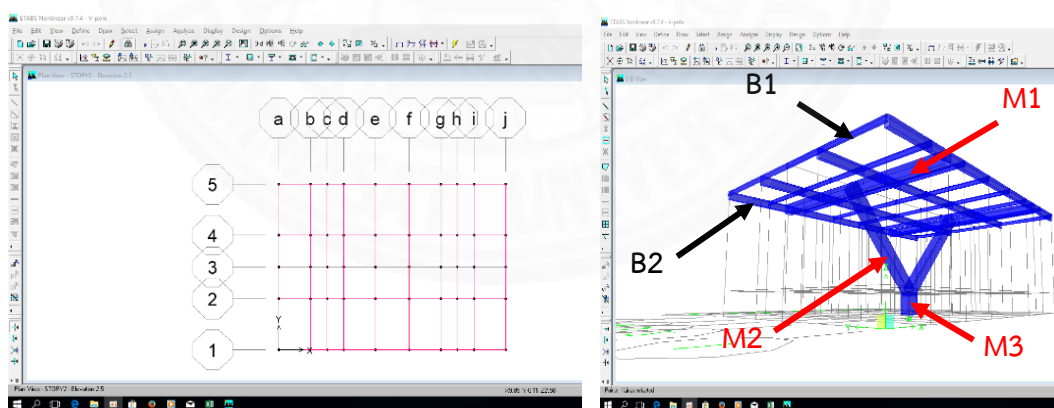
หลังจากศึกษา ออกแบบโครงสร้างและชุดขับเคลื่อนรองรับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ สำหรับโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ จากนั้นจำลองโครงสร้างโดยใช้โปรแกรม ETABS 9.7.4 โดยใส่วัสดุที่ใช้ในโครงสร้างลงในโปรแกรม ซึ่งได้จากการคำนวณมอดูลัสหน้าตัด (Section Modulus) เพื่อเลือกวัสดุที่มีความแข็งแรง เหมาะสมกับโครงสร้าง และสามารถรองรับน้ำหนักบรรทุกทั้งหมด ที่กระทำกับโครงสร้างได้ ซึ่งมีวิธีการดังต่อไปนี้

4.2.2.1 ค่าโมเมนต์ดัดสูงสุดของแต่ละชั้นส่วนในโครงสร้าง

ค่าโมเมนต์ดัดสูงสุดเกิดขึ้นจากน้ำหนักบรรทุกลงในโครงสร้างสามารถ ตรวจสอบโมเมนต์ดัดสูงสุดจากการรวมน้ำหนักบรรทุกทั้งหมด ($DSTLS3 = 1DL+1SDL+1LL+1WL$) เพื่อคำนวณมอดูลัสหน้าตัด และเลือกหน้าตัดที่รองรับโมเมนต์ดัดได้ มีผลการทดลองดังต่อไปนี้

(1) โครงสร้างแบบ V-pole solar tracking (ภาพที่ 4.19)

เป็นโครงสร้างที่รองรับน้ำหนักแผงเซลล์แสงอาทิตย์จำนวน 20 แผ่น (แผ่นละ 20 กิโลกรัม) ลงบนคาน B1 (10 กิโลกรัมต่อเมตร) และมีคาน B2 รองรับด้านล่าง ซึ่งเป็นคานที่รับหน่วยแรงลม โดยคาน B2 ด้านริมทั้งสองฝั่ง รับหน่วยแรงลม 40 กิโลกรัมต่อเมตร อีกสองคานตรงกลางรับแรงลม 88 กิโลกรัมต่อเมตร เมื่อรวมน้ำหนักบรรทุกแล้วจะได้โมเมนต์ดัดที่คานแต่ละชั้น ดังตารางที่ 4.6

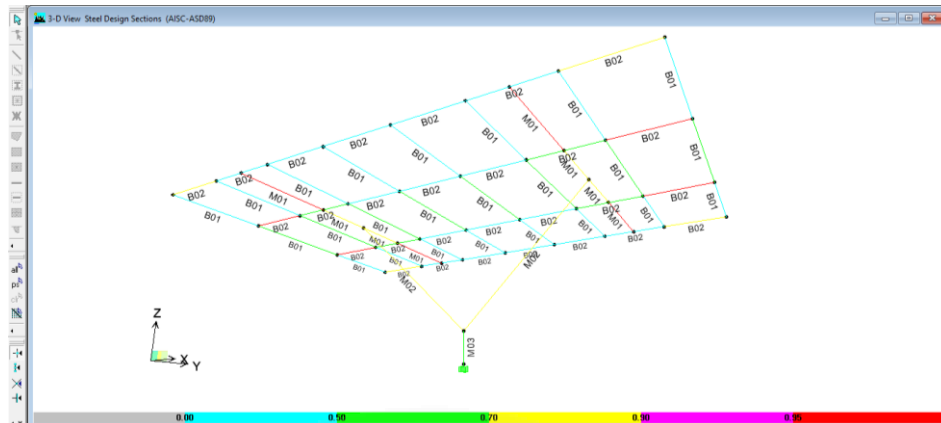


ภาพที่ 4.19 การจำลองโครงสร้าง V-pole solar tracking

ตารางที่ 4.6 วัสดุที่ใช้กับโครงสร้างแบบ V-pole solar tracking

Member	Name	M (kg-m)	M _{max} (Kg-cm)	F _y (kg/cm ²)	Section Modulus (cm ³)	Material (mm)	Thickness (mm)
B1	a	24.767	2,735.50	2,500	1.824	Box 38x38	2.3
	b	21.392					
	d	21.011					
	e	25.768					
	f	20.251					
	g	27.355					
	i	21.392					
	j	16.815					
B2	1	82.292	19,892.10	2,500	13.261	Box 100x50	3.2
	2	198.921					
	4	172.344					
	5	82.23					
M1	c	897.921	89,792.10	2,500	59.861	Box 125x125	4.5
	h	897.921					
M2		2,288	228,800	2,500	152.533	Box 175x175	4.5
M3		4,576	457,600	2,500	305.067	Box 200x200	8

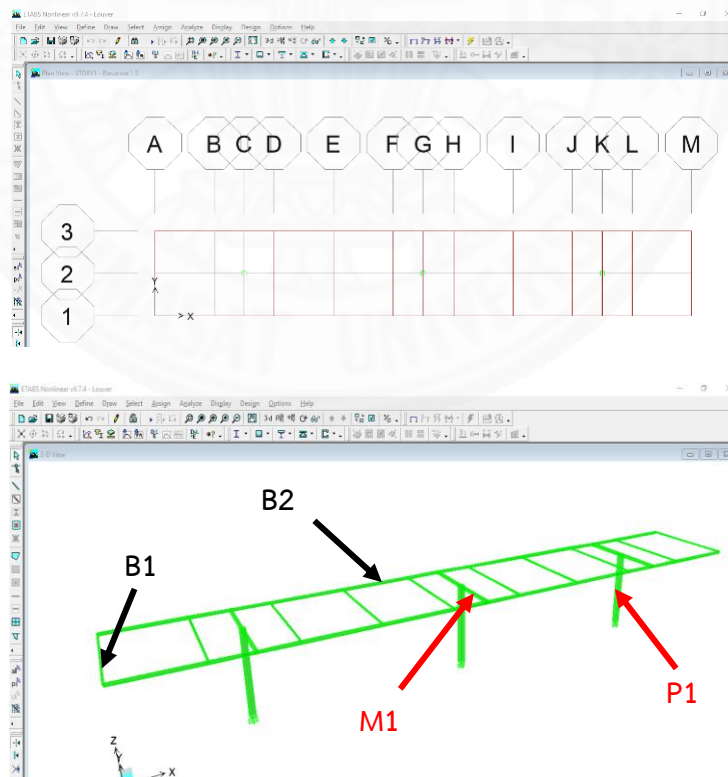
หลังจากนั้น ป้อนข้อมูลวัสดุใส่โครงสร้างในโปรแกรม ETABS อีกครั้ง เพื่อทดสอบและตรวจสอบโครงสร้างสำหรับใช้งาน ผลการศึกษาพบว่า สามารถใช้งานโครงสร้างนี้ได้ โดยมีค่า Demand/Capacity ratio (DCRs) น้อยกว่า 1 ดังภาพที่ 4.20



ภาพที่ 4.20 V-pole solar tracking DCRs

(2) โครงสร้างแบบ Louver solar tracking (ภาพที่ 4.21)

เป็นโครงสร้างที่รองรับน้ำหนักแผงเซลล์แสงอาทิตย์จำนวน 10 แผ่น (แผ่นละ 20 กิโลกรัม) ลงบนคาน B1 (10 กิโลกรัมต่อเมตร) และรับน้ำหนักหน่วยแรงลมในแนวราบ 50 กิโลกรัมต่อเมตร ถ่ายแรงไปยังคาน B2 ในแนวยาว ซึ่งรองรับด้วยคานหลักและเสา 3 ต้น ซึ่งมีโมเมนต์ดัดเกิดขึ้นกับแต่ละชิ้นส่วน ดังตารางที่ 4.7

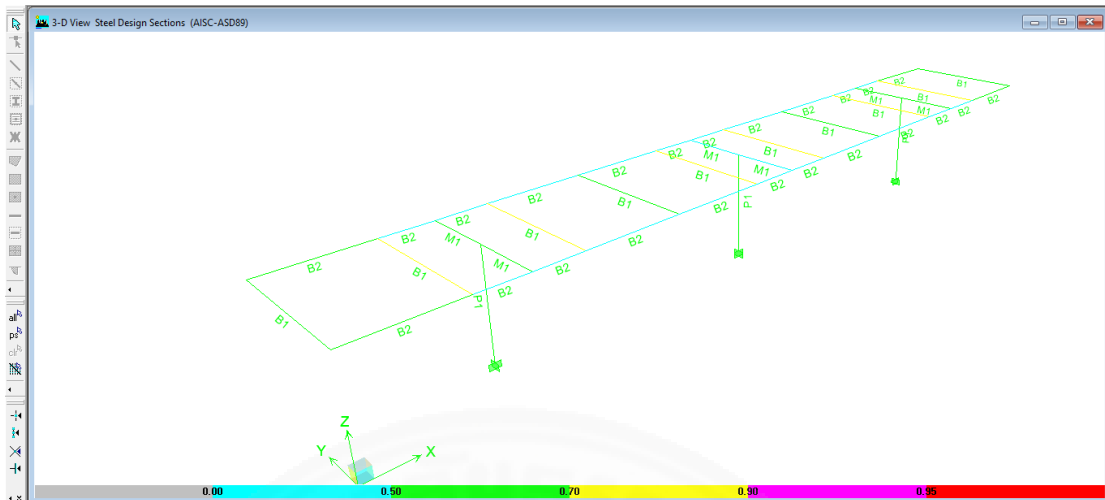


ภาพที่ 4.21 การจำลองโครงสร้าง Louver solar tracking

ตารางที่ 4.7 วัสดุที่ใช้กับโครงสร้างแบบ Louver solar tracking

Member	Name	M (kg-m)	M _{max} (Kg-cm)	F _y (kg/cm ²)	Section Modulus (cm ³)	Material (mm)	Thickness (mm)
B1	A	13.937	1,393.70	2,500	0.929	Box 25x25	2.3
	B	11.588					
	D	12.064					
	E	12.19					
	F	11.093					
	H	11.116					
	I	12.105					
	J	12.269					
	L	11.805					
	M	13.808					
B2	1	125.558	12,555.80	2,500	8.371	Box 90x45	3.2
	3	125.558					
M1	C	135.057	14,393.50	2,500	9.596	Box 75x45	3.2
	G	87.051					
	K	143.935					
P1	C2	482.934	48,293.40	2,500	32.196	Box 100x100	3.2
	G2	470.277					
	K2	482.934					

และเมื่อนำวัสดุที่ได้จากการคำนวณไปทดสอบและตรวจสอบ
โครงสร้างด้วยโปรแกรมแล้ว ผลการตรวจสอบพบว่าโครงสร้างสามารถรับน้ำหนักได้ ซึ่งมีค่า DCRs
น้อยกว่า 1 ดังภาพที่ 4.22



ภาพที่ 4.22 Louver solar tracking DCRs

4.2.2.2 ค่าแรงกดลงฐานราก

ค่าแรงกดลงฐานรากเกิดจากการถ่ายน้ำหนักทั้งหมดของโครงสร้าง เพื่อใช้ในการออกแบบฐานรากและเสาเข็มของโครงสร้าง มีผลการทดลองดังต่อไปนี้

(1) ฐานรากและเสาเข็มแบบ V-pole solar tracking

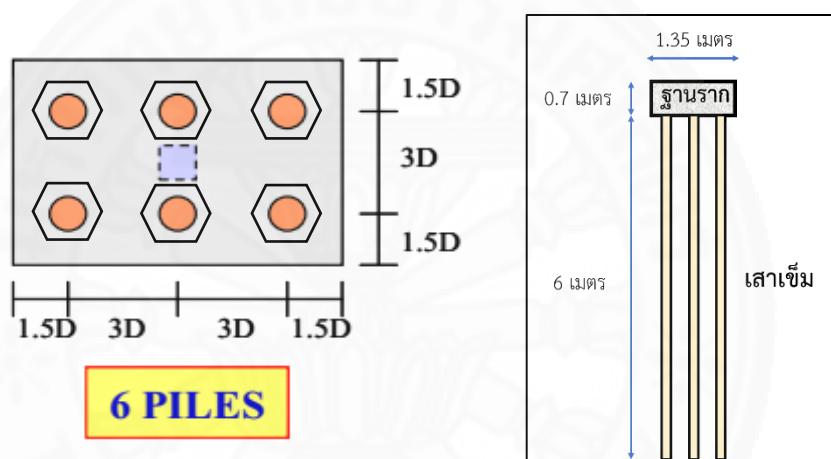
น้ำหนักที่ถ่ายลงบนเสาของโครงสร้างแบบ V-pole solar tracking มีค่าสูงสุดประมาณ 3,000 กิโลกรัม (ตารางที่ 4.8) ซึ่งเมื่อคิदनน้ำหนักปลอดภัยเพื่อถ่ายลงฐานรากต้องมีค่าไม่ต่ำกว่า 9,000 กิโลกรัม (Safety factor = 3) เลือกใช้เสาเข็มจำนวน 6 เสา ตอกลงในชั้นดินอ่อน 6 เมตร (ภาพที่ 4.23) เลือกใช้เสาคอนกรีตชนิดหกเหลี่ยมกลวง ขนาด 0.15x0.15 เมตร ยาว 6 เมตร (ภาคผนวก ค.2) รวมใช้เสาหกเหลี่ยมกลวง 6 ต้นต่อโครงสร้าง มีค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกเสาเข็มรวมเท่ากับ 12,670 กิโลกรัม (ภาคผนวก ค.1) ดังนั้นเสาเข็มดังกล่าวสามารถรับน้ำหนักบรรทุกทั้งหมดที่กระทำกับโครงสร้างได้อย่างปลอดภัย และใช้ฐานราก (Footings) ขนาดกว้าง 0.9 เมตร ยาว 1.35 เมตร และหนา 0.7 เมตร (ภาคผนวก ค.4)

ตารางที่ 4.8 ค่าน้ำหนักลง supports ของ V-pole solar tracking

Story	Point	Load	F_x	F_y	F_z	M_x
BASE	53	DSTLS1	0	0	1675.21	0
BASE	53	DSTLS2	0	0	2923.21	0
BASE	53	DSTLS3	0	-1830.4	2923.21	4576
BASE	53	DSTLS4	0	1830.4	2923.21	-4576

ตารางที่ 4.8 คำนวณน้ำหนักลง supports ของ V-pole solar tracking (ต่อ)

Story	Point	Load	F_x	F_y	F_z	M_x
BASE	53	DSTLS5	0	-1830.4	1675.21	4576
BASE	53	DSTLS6	0	1830.4	1675.21	-4576
BASE	53	DSTLS7	0	-1830.4	1675.21	4576
BASE	53	DSTLS8	0	1830.4	1675.21	-4576
BASE	53	DSTLD1	0	0	1675.21	0
BASE	53	DSTLD2	0	0	2923.21	0



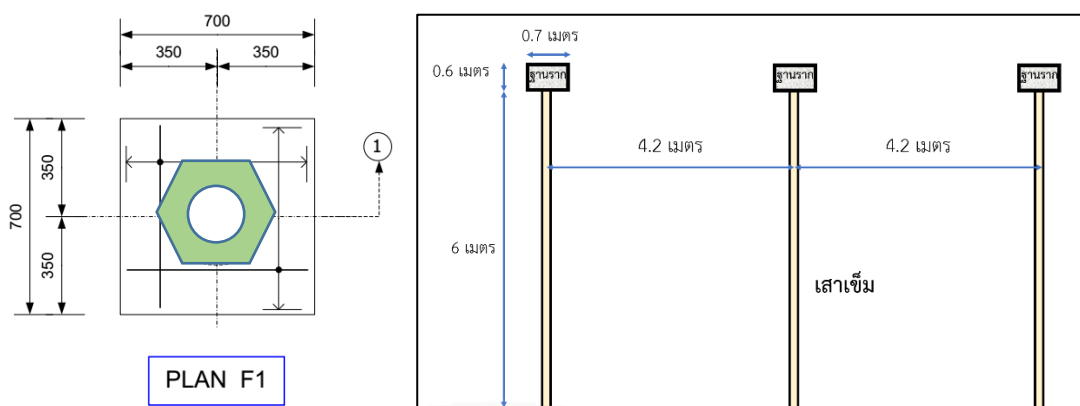
ภาพที่ 4.23 ฐานรากและเสาเข็มของ V-pole solar tracking

(2) ฐานรากและเสาเข็มแบบ Louver solar tracking

น้ำหนักที่ถ่ายลงบนเสาของโครงสร้างแบบ Louver solar tracking มีค่าสูงสุดประมาณ $F_z = 400$ กิโลกรัม (ตารางที่ 4.9) ซึ่งเมื่อคือน้ำหนักปลอดภัยเพื่อถ่ายลงฐานราก ต้องมีค่าไม่ต่ำกว่า 1,200 กิโลกรัม (Safety factor = 3) เลือกใช้เสาเข็มจำนวน 1 เสา ตอกลงในชั้นดินอ่อน 6 เมตร (ภาพที่ 4.24) เลือกใช้เสาคอนกรีตชนิดหกเหลี่ยมกลวง ขนาด 0.15x0.15 เมตร ยาว 6 เมตร (ภาคผนวก ค.2) รวมใช้เสาหกเหลี่ยมกลวง 3 ต้นต่อโครงสร้าง มีค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกเสาเข็มรวมเท่ากับ 2,125 กิโลกรัม (ภาคผนวก ค.1) ดังนั้นเสาเข็มดังกล่าวสามารถรับน้ำหนักบรรทุกทั้งหมดที่กระทำกับโครงสร้างได้อย่างปลอดภัย และใช้ฐานราก (Footings) ขนาดกว้าง 0.7 เมตร ยาว 0.7 เมตร และหนา 0.6 เมตร (ภาคผนวก ค.4)

ตารางที่ 4.9 คำนวณน้ำหนักของ supports ของ Louver solar tracking

Story	Point	Load	F_x	F_y	F_z	M_x	M_y
BASE	1	DSTLS1	-13.08	0	142.36	0	2.704
BASE	1	DSTLS2	-43.01	0	370.08	0	8.891
BASE	1	DSTLS3	-374.71	0	360.48	0	-465.151
BASE	1	DSTLS4	288.68	0	379.69	0	482.934
BASE	1	DSTLS5	-344.78	0	132.76	0	-471.338
BASE	1	DSTLS6	318.62	0	151.97	0	476.746
BASE	1	DSTLS7	-344.78	0	132.76	0	-471.338
BASE	1	DSTLS8	318.62	0	151.97	0	476.746
BASE	1	DSTLD1	-13.08	0	142.36	0	2.704
BASE	1	DSTLD2	-43.01	0	370.08	0	8.891
BASE	2	DSTLS3	-336.6	0	252.01	0	-470.277
BASE	2	DSTLS4	336.6	0	252.01	0	470.277
BASE	2	DSTLS5	-336.6	0	107.45	0	-470.277
BASE	2	DSTLS6	336.6	0	107.45	0	470.277
BASE	2	DSTLS7	-336.6	0	107.45	0	-470.277
BASE	2	DSTLS8	336.6	0	107.45	0	470.277
BASE	3	DSTLS1	13.08	0	142.36	0	-2.704
BASE	3	DSTLS2	43.01	0	370.08	0	-8.891
BASE	3	DSTLS3	-288.68	0	379.69	0	-482.934
BASE	3	DSTLS4	374.71	0	360.48	0	465.151
BASE	3	DSTLS5	-318.62	0	151.97	0	-476.746
BASE	3	DSTLS6	344.78	0	132.76	0	471.338
BASE	3	DSTLS7	-318.62	0	151.97	0	-476.746
BASE	3	DSTLS8	344.78	0	132.76	0	471.338
BASE	3	DSTLD1	13.08	0	142.36	0	-2.704
BASE	3	DSTLD2	43.01	0	370.08	0	-8.891



ภาพที่ 4.24 ฐานรากและเสาเข็มของ Louver solar tracking

จากค่าแรงกดลงฐานราก เพื่อคำนวณขนาดของฐานรากและเสาเข็มของโครงสร้างรองรับแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบติดตามดวงอาทิตย์ที่ออกแบบตามการศึกษาี้ สามารถสรุปเปรียบเทียบได้ดังตารางที่ 4.10

ตารางที่ 4.10 ฐานรากและเสาเข็มของ V-pole solar tracking และ Louver solar tracking

ข้อเปรียบเทียบ	V-pole solar tracking		Louver solar tracking	
1. น้ำหนักเสาทั้งหมด	3,000 กิโลกรัม (1 เสา)		1,200 กิโลกรัม (รวม 3 เสา)	
2. น้ำหนักเสาต่อต้น	3,000 กิโลกรัม		400 กิโลกรัม	
3. น้ำหนักบรรทุกทุกปลอดภัยของเสา	9,000 กิโลกรัม (SF = 3)		1,200 กิโลกรัม (SF = 3)	
4. ความลึกของเสาเข็ม	6 เมตร		6 เมตร	
5. ชนิดเสาเข็ม	ทกเหลี่ยมกลวง 0.15x0.15x6 ม.		ทกเหลี่ยมกลวง 0.15x0.15x6 ม.	
6. น้ำหนักบรรทุกทุกปลอดภัยของเสาเข็ม	4 เสา	8,500 กิโลกรัม	1 เสา	2,125 กิโลกรัม
	5 เสา	10,625 กิโลกรัม	2 เสา	4,250 กิโลกรัม
	6 เสา	12,670 กิโลกรัม	3 เสา	6,375 กิโลกรัม
	7 เสา	14,875 กิโลกรัม	4 เสา	8,500 กิโลกรัม
7. สัดส่วนการใช้งานเสาเข็ม	ร้อยละ 60		ร้อยละ 23	
8. จำนวนเสาเข็ม	6 ต้นต่อโครงสร้าง		3 ต้นต่อโครงสร้าง	
9. ขนาดของฐานราก	1.35x0.9x0.7 ม.		0.7x0.7x0.6 ม	

4.2.3 ต้นทุนค่าใช้จ่ายของโครงสร้าง

การศึกษานี้ทำการเปรียบเทียบต้นทุนของโครงสร้างรองรับแผงเซลล์แสงอาทิตย์สำหรับโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์แบบติดตามดวงอาทิตย์สองแกน ที่ผลิตพลังงานไฟฟ้าต่อปีได้ เทียบเท่ากับโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์แบบมุมคงที่ ขนาดกำลังการผลิต 1 เมกะวัตต์ (ซึ่งมีค่า Plant Factor = 0.1575 ดังที่กล่าวมาแล้วในบทที่ 3) มีผลการศึกษาดังต่อไปนี้

4.2.3.1 พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จากโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์แบบมุมคงที่

จากสมการที่ 3.3 สามารถคำนวณหาปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จากโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์แบบมุมคงที่ ขนาด 1 เมกะวัตต์ ได้ดังนี้

$$\begin{aligned} EG &= P \times H_{\text{day}} \times D_{\text{year}} \times PF \\ &= 1 \text{ MW} \times 24 \text{ hr/day} \times 365 \text{ day/year} \times 0.1575 \\ &= 1,379.7 \text{ MWh/year} \end{aligned}$$

4.2.3.2 กำลังไฟฟ้าของโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์แบบสองแกน

จากข้อมูลปริมาณไฟฟ้าที่ผลิตได้จากโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์แบบมุมคงที่ ขนาด 1 เมกะวัตต์ สามารถคำนวณหาขนาดกำลังผลิตไฟฟ้าของโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์แบบติดตามดวงอาทิตย์สองแกนได้ โดยการศึกษานี้ กำหนดให้โรงไฟฟ้าที่ติดตั้งระบบติดตามดวงอาทิตย์มีประสิทธิภาพสูงกว่าโรงไฟฟ้าที่ติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบมุมคงที่เฉลี่ยร้อยละ 35 ($\eta_{2\text{axis}} = 1.35$)

$$\begin{aligned} EG &= P_{2\text{axis}} \times H_{\text{day}} \times D_{\text{year}} \times PF \times \eta_{2\text{axis}} \\ 1,379.7 \text{ MWh/year} &= P_{2\text{axis}} \times 24 \text{ hr/day} \times 365 \text{ day/year} \times 0.1575 \times 1.35 \\ &= \frac{1,379.7 \text{ MWh/year}}{(24 \text{ hr/day})(365 \text{ day/year})(0.1575)(1.35)} \\ P_{2\text{axis}} &= 0.741 \text{ MW} \end{aligned}$$

4.2.3.3 ต้นทุนค่าใช้จ่ายโครงสร้าง

ต้นทุนค่าใช้จ่ายของโครงสร้าง ทำการเปรียบเทียบระหว่างโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์แบบติดตามดวงอาทิตย์สองแกนที่ติดตั้งแบบ V-pole solar tracking กับ Louver solar tracking ขนาดกำลังการผลิตไฟฟ้าไม่น้อยกว่า 0.741 เมกะวัตต์ (741 กิโลวัตต์) ตามที่คำนวณได้ข้างต้น อย่างไรก็ตามในการศึกษาออกแบบครั้งนี้ ทำการออกแบบโครงสร้างสำหรับระบบที่ใช้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ขนาด 300 วัตต์ จำนวน 20 แผ่น (6,000 วัตต์) ซึ่งในทางปฏิบัติจะต้องติดตั้งระบบที่มีกำลังการผลิต 744 กิโลวัตต์ (6,000 วัตต์/ชุด x 124 ชุด) พบว่าโครงสร้างแบบ Louver solar tracking มีต้นทุนต่ำกว่าโครงสร้างแบบ V-pole solar tracking ประมาณ 1.95 ล้านบาท หรือร้อยละ 28.83 มีรายละเอียดดังตารางที่ 4.11

นอกจากนั้น เมื่อเปรียบเทียบพื้นที่ติดตั้งโครงสร้างทั้งสองระบบที่ผลิตพลังงานไฟฟ้าเทียบเท่ากับโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ที่ติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบมุมคงที่ พบว่า โครงสร้างแบบ V-pole solar tracking จะต้องวางโครงสร้างให้ห่างกันอย่างน้อย 5x5 เมตร เพื่อความปลอดภัย และไม่ให้อับบังแสงอาทิตย์ต่อกัน รวมต้องใช้พื้นที่ในการติดตั้งทั้งหมดประมาณ 16,600 ตารางเมตร (≈ 10.38 ไร่) ส่วนโครงสร้างแบบ Louver solar tracking ต้องวางโครงสร้างให้ห่างกันอย่างน้อย 2x2 เมตร รวมต้องใช้พื้นที่ในการติดตั้งทั้งหมดประมาณ 14,600 ตารางเมตร (≈ 9.13 ไร่)

จากการศึกษาในบทนี้พบว่า ต้นทุนค่าใช้จ่ายของโครงสร้างรองรับแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบติดตามดวงอาทิตย์ที่ออกแบบทั้ง 2 ระบบ คือ โครงสร้างแบบ V-pole solar tracking และโครงสร้างแบบ Louver solar tracking สามารถประหยัดกำลังการผลิตไฟฟ้าได้ 256 กิโลวัตต์ คิดเป็นจำนวนเงิน 7.68 ล้านบาท (ค่าแผงเซลล์แสงอาทิตย์ 25,000 บาทต่อกิโลวัตต์ และ ค่า Inverter 5,000 บาทต่อกิโลวัตต์) ซึ่งโครงสร้างทั้งแบบ V-pole solar tracking และโครงสร้างแบบ Louver solar tracking มีต้นทุนค่าใช้จ่ายของโครงสร้างต่ำกว่าค่าใช้จ่ายที่ประหยัดได้ (ค่าแผงเซลล์แสงอาทิตย์ และ ค่า Inverter) 0.95 และ 2.89 ล้านบาท ตามลำดับ โดยสามารถทดแทนต้นทุนของโครงสร้างรองรับแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบติดตามดวงอาทิตย์สองแกนได้ อย่างไรก็ตาม โครงสร้างรองรับแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบติดตามดวงอาทิตย์สองแกนที่เหมาะสมกับโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ในประเทศไทยคือ โครงสร้างแบบ Louver solar tracking เพราะเป็นโครงสร้างที่ไม่ซับซ้อน มีการถ่ายน้ำหนักอย่างสม่ำเสมอ รับหน่วยแรงลมน้อย สะดวกในการติดตั้ง โครงสร้างสามารถซ่อมบำรุง และทำความสะอาดได้ง่าย มีพื้นที่ติดตั้งน้อยกว่า และต้นทุนของโครงสร้างต่ำกว่าโครงสร้างแบบ V-pole solar tracking

ตารางที่ 4.11 ต้นทุนของโครงสร้างระบบติดตามดวงอาทิตย์สองแกน

V-pole solar tracking (20 แผ่น)		Louver solar tracking (20 แผ่น, 2 ชุด ๆ ละ 10 แผ่น)	
รายการ (จำนวน)	ราคา (บาท)	ราคา (บาท)	รายการ (จำนวน)
1. โครงสร้างเหล็ก (ยาว 6 เมตร) เหล็กกล่อง 38x38 มม. (9) เหล็กกล่อง 100x50 มม. (5) เหล็กกล่อง 125x125 มม. (2) เหล็กกล่อง 175x175 มม. (1) เหล็กกล่อง 200x200 มม. (1).	22,630	21,540	1. โครงสร้างเหล็ก (ยาว 6 เมตร) เหล็กกล่อง 25x25 มม. (18) เหล็กกล่อง 90x45 มม. (14) เหล็กกล่อง 75x45 มม. (2) เหล็กกล่อง 100x100 มม. (2) เหล็กฉาก 25x25 มม. (4)
2. ฐานรากและเสาเข็ม เสาเข็มหกเหลี่ยมกลางขนาด 150x150 มม. ยาว 6 ม. (6) ฐานราก 1.35x0.9x0.7 ม.	6,860	4,860	2. ฐานรากและเสาเข็ม เสาเข็มหกเหลี่ยมกลางขนาด 150x150 มม. ยาว 6 ม. (6) ฐานราก 0.7x0.7x0.6 ม. (6)
3. ชุดขับเคลื่อนแผงเซลล์แสงอาทิตย์ เฟือง+Worm gear motor (1+1) ชุดขับไฮดรอลิก 2 ม. (1)	19,800	7,200	3. ชุดขับเคลื่อนแผงเซลล์แสงอาทิตย์ Actuator 24 นิ้ว (6)
4. อุปกรณ์อื่น ๆ น็อต Bolt Plate ลวดเชื่อม	5,000	5,000	4. อุปกรณ์อื่น ๆ น็อต Bolt Plate ลวดเชื่อม
ราคารวมต่อชุด (6,000 W)	54,290	38,600	ราคารวม (6,000 W)
ราคารวม (744 kW)	6,731,960	4,786,400	ราคารวม (744 kW)

4.3 อภิปรายผลการศึกษา

(1) โครงสร้างรองรับแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบติดตามดวงอาทิตย์ที่ออกแบบทั้ง 2 โครงสร้าง คือ แบบ V-pole solar tracking และ แบบ louver solar tracking มีข้อได้เปรียบเสียเปรียบต่างกัน ซึ่งสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 4.12

ตารางที่ 4.12 ข้อได้เปรียบ-เสียเปรียบของโครงสร้างที่ออกแบบ

รายการ	V-pole solar tracking	Louver solar tracking
1. ลักษณะโครงสร้าง	<u>ข้อได้เปรียบ:</u> มีโครงสร้างที่มั่นคง แข็งแรง และโดดเด่น <u>ข้อเสียเปรียบ:</u> โครงสร้างมีน้ำหนักมาก โครงสร้างสูง	<u>ข้อได้เปรียบ:</u> ติดตั้ง และประกอบโครงสร้างได้ง่าย รับน้ำหนักบรรทุกที่น้อย <u>ข้อเสียเปรียบ:</u> ถ้ามีแรงลมมาก คานยาวจะเกิดการสั่นไหว
2. การต้านหน่วยแรงลม	40 กิโลกรัมต่อเมตร และ 88 กิโลกรัมต่อเมตร	50 กิโลกรัมต่อเมตร
3. การดูแลรักษาและทำความสะอาด	<u>ข้อเสียเปรียบ:</u> โครงสร้างสูงต้องมีอุปกรณ์ช่วยทำความสะอาดแผงเซลล์แสงอาทิตย์	<u>ข้อได้เปรียบ:</u> โครงสร้างสูงใกล้เคียงกับมนุษย์ ซึ่งสามารถดูแลและทำความสะอาดระบบได้ง่าย
4. ต้นทุนของโครงสร้าง	6,731,960 บาท	4,786,400 บาท
5. พื้นที่ติดตั้ง	10.38 ไร่	9.13 ไร่

(2) การติดตั้งโครงสร้างรองรับแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบติดตามดวงอาทิตย์สองแกนสำหรับโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์นั้น จะมีค่าใช้จ่ายเพิ่มขึ้นจากการติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบมุมคงที่ (Fixed system) และอาจใช้พื้นที่ในการติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์มากกว่าเช่นกัน (พื้นที่ติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์ขึ้นอยู่กับการออกแบบในแต่ละพื้นที่) เพราะโครงสร้างมีการเคลื่อนที่ตลอดทั้งวัน ทำให้ต้องมีระยะห่างของแต่ละชุดโครงสร้าง อีกทั้งเป็นการป้องกันการบดบังแสงอาทิตย์ของโครงสร้าง แต่ถ้าเปรียบเทียบการผลิตพลังงานไฟฟ้าต่อปีเท่ากับการติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบมุมคงที่ การติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบติดตามดวงอาทิตย์สองแกนจะติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์จำนวนน้อยกว่า เป็นการประหยัดต้นทุนของจำนวนแผงเซลล์แสงอาทิตย์ และจำนวนอุปกรณ์แปลงกระแสไฟฟ้า (Inverter) ได้

(3) ในการศึกษา เลือกใช้โครงสร้างเหล็กในการออกแบบ เพราะเป็นวัสดุที่หาซื้อได้สะดวก ราคาไม่สูงมาก และสามารถจำลองโครงสร้างในโปรแกรม ETABS ได้ แต่ถ้าต้องการเปลี่ยนวัสดุที่ใช้ ก็สามารถทำได้โดยเลือกวัสดุที่มีค่าโมเมนต์หน้าตัด ไม่ต่ำกว่าโมเมนต์หน้าตัดที่เกิดขึ้นจากน้ำหนักบรรทุกของโครงสร้างนั้น (ตารางที่ 4.6 และตารางที่ 4.7)

(4) การจำลองโครงสร้างเป็นการจำลองแบบโครงสร้างหยุดนิ่ง จำลองขณะที่โครงสร้างมีความสมดุล โดยใช้กรณีที่ร้ายแรงที่สุด คือให้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ตั้งฉากกับพื้น มีแรงลมมากระทำโครงสร้างมากที่สุด และคำนวณฐานรากและเสาเข็มของโครงสร้างโดยใช้น้ำหนักบรรทุกปลอดภัย (Safe Load) เมื่อโครงสร้างเกิดการหมุนจะไม่ส่งผลกระทบต่อโครงสร้าง อีกทั้งจุดหมุนที่ออกแบบไว้มีความแข็งแรงเช่นกัน



บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

จากการศึกษาครั้งนี้ สามารถสรุปผลการศึกษา และมีข้อเสนอแนะเพื่อเป็นประโยชน์กับผู้ที่มีความสนใจในเรื่องนี้ ดังต่อไปนี้

5.1 สรุปผลการวิจัย

การศึกษารออกแบบโครงสร้างรองรับแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบติดตามดวงอาทิตย์ ได้ศึกษาประสิทธิภาพของระบบติดตามดวงอาทิตย์แบบแกนเดียว สองแกน เปรียบเทียบกับระบบที่ติดตั้งแบบมุมคงที่ เพื่อออกแบบโครงสร้างให้รองรับชุดติดตามดวงอาทิตย์อย่างเหมาะสม จากงานวิจัย พบว่า ระบบติดตามดวงอาทิตย์แบบสองแกนมีประสิทธิภาพสูงสุด ดังนั้น ในการศึกษาครั้งนี้ ผู้ศึกษาจึงเลือกออกแบบโครงสร้างรองรับแผงเซลล์แสงอาทิตย์สำหรับระบบติดตามดวงอาทิตย์สองแกน เพื่อให้สามารถผลิตไฟฟ้าได้สูงที่สุด

ในการออกแบบโครงสร้างรองรับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ผู้วิจัยได้ศึกษาโครงสร้างจากงานวิจัย และโครงสร้างที่มีการติดตั้งแล้วทั้งในและต่างประเทศ เพื่อประยุกต์ให้เป็นโครงสร้างที่เหมาะสมกับประเทศไทย โดยนำชุดควบคุมการติดตามดวงอาทิตย์แบบสองแกนราคาถูก กลไกการทำงานไม่ซับซ้อนของรณิท เรืองรุ่งชัยกุล (2560) มาใช้ในการขับเคลื่อน ซึ่งได้ออกแบบโครงสร้างรองรับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ 2 ลักษณะ คือ 1) V-pole Solar Tracking เป็นโครงสร้างแบบเสาเดี่ยว และ 2) Louver Solar Tracking เป็นโครงสร้างแบบติดตั้งบนพื้น มีลักษณะเหมือนบานเกล็ดหน้าต่าง ทำการทดสอบโดยจำลองโครงสร้างเหล็ก (Steel frame design) ด้วยโปรแกรม ETABS หาค่าโมเมนต์ดัดสูงสุดของแต่ละชั้นส่วนของโครงสร้าง และน้ำหนักที่ถ่ายเทลงบน support เพื่อหาขนาดวัสดุ ฐานราก และเสาเข็มที่ใช้ในโครงสร้าง พบว่า โครงสร้างที่ออกแบบทั้งสองโครงสร้างสามารถใช้งาน และรับน้ำหนักบรรทุกได้

จากการเปรียบเทียบโครงสร้างที่ออกแบบทั้ง 2 รูปแบบ สามารถสรุปได้ว่า โครงสร้างที่มีความเหมาะสมที่สุดกับโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ในประเทศไทย คือ โครงสร้างแบบ Louver Solar Tracking โดยมีจุดเด่นคือ เป็นโครงสร้างที่ต้านกระแสลมน้อย โครงสร้างและชุดขับเคลื่อนแกนหมุนไม่มีความซับซ้อน สามารถดูแลรักษาและทำความสะอาดแผงเซลล์แสงอาทิตย์ได้ง่าย มีต้นทุนของโครงสร้าง 4.79 ล้านบาท และใช้พื้นที่ในการติดตั้งประมาณ 9.13 ไร่ ซึ่งผลิตพลังงานไฟฟ้าได้เทียบเท่ากับโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ที่ติดตั้ง แผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบมุมคงที่ขนาด 1 เมกะวัตต์ (Plant Factor = 0.1575)

5.2 ข้อเสนอแนะ

(1) การศึกษานี้ ไม่ได้ประเมินความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ของโครงการโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์แบบติดตามดวงอาทิตย์ที่ออกแบบทั้ง 2 ระบบ ซึ่งก่อนการนำไปใช้งานจริง ควรมีการศึกษาในประเด็นนี้ เพื่อใช้ประกอบการตัดสินใจลงทุนติดตั้งระบบ

(2) การศึกษานี้ ออกแบบโดยใช้เหล็กเป็นวัสดุของโครงสร้างทั้งหมด ซึ่งอาจทำการศึกษาเพิ่มเติมโดยเปรียบเทียบวัสดุชนิดอื่นมาใช้กับโครงสร้าง เช่น อะลูมิเนียม เป็นต้น

(3) การศึกษานี้ ไม่ได้คำนวณพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ขณะขับเคลื่อนชุดติดตามดวงอาทิตย์ ส่งผลให้ค่าพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จากโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์แบบติดตามดวงอาทิตย์ในการศึกษานี้มีค่าสูงกว่าที่ควรผลิตได้จริงที่ควรจะต้องหักลบพลังงานไฟฟ้าส่วนที่จะต้องจ่ายให้มอเตอร์ทำงานออกก่อน ดังนั้น อาจจะมีการศึกษาประเด็นนี้โดยละเอียดเพิ่มเติม เพื่อความถูกต้องสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

(4) โครงสร้างที่ออกแบบทั้ง 2 ระบบ รองรับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ 10 แผ่น (Louver) และ 20 แผ่น (V-pole) สามารถนำมาใช้งานกับระบบไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ที่มีขนาด 3,000 – 6,000 วัตต์ เพื่อใช้งานในระดับครัวเรือนได้ เช่น ระบบสูบน้ำ ระบบแสงสว่าง เป็นต้น

รายการอ้างอิง

หนังสือ

J. L. Meriam and L. G. Kraige. *Engineering Mechanics Volume 1 Statics*. 7th ed., United States of America: Virginia Polytechnic Institute and State University, 2006.

Mongkol Jirawacharadet. *Footing*. นครราชสีมา: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, มปป.

กฎกระทรวง. *พระราชบัญญัติอาคาร*. กรุงเทพมหานคร: ประกาศในราชกิจจานุเบกษา เล่ม 123 ตอนที่ 70ก, 2549.

กฤต ไ้วรณสุวรรณ. *ความแข็งแรงของวัสดุสำหรับสถาปนิก*. พิมพ์ครั้งที่ 1. มหาสารคาม: อินทนิล, 2555.

กลุ่มงานวิเคราะห์วิจัยและพัฒนา. *เสาเข็ม และการคำนวณการรับน้ำหนักของเสาเข็ม*. กรุงเทพมหานคร: สำนักควบคุมการก่อสร้าง, 2547.

นภัทร วัจนเทพินทร์. *การติดตั้งระบบไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยตนเอง*. พิมพ์ครั้งที่ 1. ปทุมธานี: สกายบุ๊ก, 2553.

รองเพชร บุญช่วยดี. *การประเมินปริมาณการลดก๊าซเรือนกระจกสำหรับโครงการผลิตพลังงานไฟฟ้าจากเทคโนโลยีพลังงานหมุนเวียน*. กรุงเทพมหานคร: องค์การบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจก (องค์การมหาชน), 2560.

หนังสือออนไลน์

J. Shingleton. *One-Axis Trackers – Improved Reliability, Durability, Performance, and Cost Reduction*. No. ZAX-4-33628-09. Battelle: Midwest Research Institute, 2007. www.nrel.gov/docs/fy08osti/42769.pdf (accessed May 2, 2017).

บทความวารสาร

- Anucha K., S. Chandra, and Mohan Reddy. "Design and Development of Real Time Clock Based Efficient Solar Tracking System." *International Journal of Engineering Research and Applications (IJERA)*, no. 3 (2013): 57-68. Quoted in Suneetha Racharla, and K. Rajan. "Solar tracking system." *International Journal of Sustainable Engineering*, no. 2 (2017): 72-81.
- David Appleyard. "Solar Trackers: Facing the Sun." *Renewable Energy World*, no. 3 (2009): n.p., <http://www.renewableenergyworld.com/articles/print/volume-12/issue-3/solar-energy/solar-trackers-facing-the-sun.html>.
- Dhanabal R., V. Bharathi, R. Ranjitha, A. Ponni, S. Deepthi, and P. Mageshkannan. "Comparison of Efficiencies of Solar Tracker Systems with Static Panel Single Axis Tracking System and Dual Axis Tracking System with Fixed Mount." *International Journal of Engineering and Technology (IJET)*, no. 2 (2013): 1925-1933. Quoted in Suneetha Racharla, and K. Rajan. "Solar tracking system." *International Journal of Sustainable Engineering*, no. 2 (2017): 72-81.
- Hema Venkatesh Bezawada, A.S. Sekhar, and K.S. Reddy. "Design and Analysis of Dual Axes Tracking System for Solar Photovoltaic Modules." *International Journal of Engineering Development and Research*, no. 2 (2014): 3181-3189.
- Roshan R. Rao, H. R. Swetha, J. Srinivasan, and Sheela K. Ramasesha. "Comparison of performance of solar photovoltaics on dual axis tracker with fixed axis at 13°N latitude." *Current Science*, no. 11 (2015): 2087-2094.
- Rustu E. and Ali S. "Performance comparison of a double-axis sun tracking versus fixed PV system." *Science Direct*, no. 1 (2012): 2665-2672.
- S. Hernández, J. Méndez, F. Nieto, and J. Á. Jurado. "Aerodynamic analysis of a photovoltaic solar tracker." *European and African Conference on Wind Engineering*, no. 5 (2009): n.p.

Shahriar Bazyari, Reza Keypour, Shahrokh Farhangi, Amir Ghaedi, and Khashayar Bazyari.

“A Study on the Effects of Solar Tracking Systems on the Performance of Photovoltaic Power Plants.” *Journal of Power and Energy Engineering*, no. 2 (2014): 718-728.

Sinan KIVRAK, Mustafa GUNDUZALP, and Furkan DINCER. “Theoretical and experimental performance investigation of a twoaxis solar tracker under the climatic condition of Denizli, Turkey.” *PRZEGLĄD ELEKTROTECHNICZNY (Electrical Review)*, no. 2 (2012): 332-336.

กรธรรม สิริกุล และ อภิญญา บุญประกอบ. “การพัฒนาระบบติดตามการเคลื่อนที่ของดวงอาทิตย์ ต้นทุนต่ำเพื่อการประยุกต์ใช้ในงานพลังงานทดแทน.” *Bulletin of Applied Science*, no. 2 (2013): 90-99.

นิพนธ์ เกตจ้อย และ มรุพงศ์ กอนอยู่. “การศึกษาผลกระทบของฝุ่นบนแผงเซลล์แสงอาทิตย์ต่อการผลิตไฟฟ้า.” *วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยมหาสารคาม*, ฉ. 5 (2556): 555-562.

บุญรอด อาสาสะนา. “เครื่องกลอย่างง่ายสำหรับการติดตามดวงอาทิตย์.” *วารสารวิทยาศาสตร์ประยุกต์*, ฉ. 2 (2551): 47-60.

ปรีชา มหาไม้, นำพร ปัญโญใหญ่ และ ภาสวรรณ วัชรดำรงศักดิ์. “การประยุกต์ใช้การติดตามดวงอาทิตย์แบบ 2 แกนแบบอัตโนมัติ.” *วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม*, ฉ. 2 (2555): 19-28.

สมภพ ผดุงพันธ์. “เครื่องขับเคลื่อนแผงโซลาร์เซลล์ตามแสงอาทิตย์อัตโนมัติ.” *วารสารมหาวิทยาลัยนราธิวาสราชนครินทร์*, ฉ. 1 (2558): 81-91.

สิทธิชัย จินะวงศ์, นานนที กัลยา และ เสาวลักษณ์ ชัยยีน. “ระบบติดตามแสงอาทิตย์แบบสองแกนด้วยการปรับสมดุลระดับน้ำ.” *วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม*, ฉ. 3 (2556): 151-165.

เอกสารรายงาน

Croccifixio Knift, Julia Gu, and Amanda Madden. *Solar tracker design project*. Florida: University of Florida, 2016.

Hashem Bukhamsin, Angelo Edge, Roger Guiel, and Dan Verne. *Solar Tracking Structure Design*. Arizona: Department of Mechanical Engineering, Northern Arizona University, 2013.

ชนัดต์ รัตนสุมาวงศ์. *เอกสารประกอบการสอนกลศาสตร์วิศวกรรม 1*. กรุงเทพมหานคร: ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล, คณะวิศวกรรมศาสตร์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, ม.ป.ป.

มูลนิธิพลังงานเพื่อสิ่งแวดล้อม. *โอกาสการลงทุนโครงการพลังงานหมุนเวียน เทคโนโลยีและตัวอย่างโครงการ*. กรุงเทพมหานคร: จตุจักร, 2554.

วิทยานิพนธ์

ราชรัฐ ยี่ตัน. “การออกแบบและพัฒนาระบบโซลาร์เซลล์เคลื่อนที่ได้สองแกนตามดวงอาทิตย์สำหรับควบคุมแผงโซลาร์เซลล์มากกว่าหนึ่งแผง.” วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชาเทคโนโลยีพลังงาน คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2556. ใน ThaiLis, <http://tdc.thailis.or.th/> (สืบค้นเมื่อวันที่ 24 มกราคม 2560).

อภิรัตน์ เจตบําเพ็ญกุล. “โซลาร์เซลล์เคลื่อนตามดวงอาทิตย์แบบเพิ่มปริมาณแสงด้วยกระจกเงา” วิทยานิพนธ์ปริญญาครุศาสตร์อุตสาหกรรมมหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรมและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2549.

เว็บไซต์

A. Aashir Waleed and B. DR. K M Hassank. “Designing a Dual Axis Solar Tracker for Optimum Power.” www.jee.ro (accessed May 18, 2017).

Abha Energy “Solar Module.” www.abhaenergy.com (accessed November 15, 2016).

Ace Solar. “Solar panels fitted onto aluminium A frames for flat roofs.” http://acesolar.co.uk/portfolio_item/solar-panels-fitted-onto-aluminium/ (accessed April 18, 2017).

- Backyardcity.com. "Shade Sails Installation." www.backyardcity.com/Shade-Sails/Shade-Sails-Installation.htm (accessed April 18, 2017).
- Belsheim Joshua, Francis Travis, He Jiayang, Moehling Anthony, Liu Pengyan, and Ziemkowski Micah. "Solar Tracking Structure Design." [https://www.cefns.nau.edu/capstone/projects/ME/2014/SolarTrackingA/Capstone_Website/DesignAnalysis\(Final%20Powerpoint\).pdf](https://www.cefns.nau.edu/capstone/projects/ME/2014/SolarTrackingA/Capstone_Website/DesignAnalysis(Final%20Powerpoint).pdf) (accessed April 11, 2017).
- Connecticut Innovations. "Learning for Clean Energy Innovation." www.sunviewer.net/portals/CCEF/ (accessed April 18, 2017).
- Courtenay Johnson. "Tracking Mounting Systems." http://www.ottawavalleypv.ca/tracking_mount.html (accessed June 21, 2017).
- DPA Solar. "Solar Panels." <http://dpasolar.com.au/solarpanels.html> (accessed November 17, 2016).
- DWF Solar Electric. "Solar Power Technologies For the Future." <http://dfwsolarelectric.com/blog/> (accessed April 18, 2017).
- Ingenieurleistungen Manfred Starlinger. "Building Integrated Photovoltaics (BIPV)." imsplan.com/building-integrated-photovoltaics-bipv.html (accessed April 18, 2017).
- Jiangyin Titanergy Co., LTD. "Pole Ground Mounting System." <http://www.titanergy.com/products.asp?Action=Detail&ID=87> (accessed April 18, 2017).
- Jim Dunlop Solar. "Chapter 10 Mechanical Integration." <http://ecgllp.com/files/5814/0200/1304/10-Mechanical-Integration.pdf> (accessed April 15, 2017).
- Jim Smith. "Estimating Material Cost for a Ground-Mounted PV Tracker Plant." http://www.proofengineering.com/white_papers/Estimating%20Material%20Cost%20for%20a%20Ground-Mounted%20PV%20Tracker%20Plant.pdf (accessed April 10, 2017).
- Mathias Aarre Maehlum. "Solar Cell Comparison Chart – Mono-, Polycrystalline and Thin Film." <http://energyinformative.org/solar-cell-comparison-chart-mono-polycrystalline-thin-film/> (accessed November 9, 2017).
- Meca Solar. "High Tech Solar Trackers." <http://mecasolar.com/pub/doc/File/ingl/2-axis-tracker-mecasolar-catalog.pdf> (accessed April 15, 2017).

- N. H. Helwa, A. B. G. Bahgat, A. M. R. El Shafee, and E. T. El Shenawy. "Maximum Collectable Solar Energy by Different Solar Tracking Systems." <http://dx.doi.org/10.1080/00908310050014180> (accessed May 20, 2017).
- Onestockhome. "เหล็กกล่องแบน." <https://www.onestockhome.com/th/steel/steel-rectangular-tube> (สืบค้นเมื่อวันที่ 11 พฤศจิกายน 2560).
- Onestockhome. "เหล็กกล่องสี่เหลี่ยม." <https://www.onestockhome.com/th/steel/steel-square-tube> (สืบค้นเมื่อวันที่ 11 พฤศจิกายน 2560).
- Ottawa Valley Photovoltaic. "Mounting Systems." http://www.ottawavalleypv.ca/tracking_mount.html (accessed April 18, 2017).
- Pantip.com. "10 ข้อควรรู้ โซลาร์เซลล์หลังคาบ้าน." <https://pantip.com/topic/33690556> (สืบค้นวันที่ 18 เมษายน 2560).
- Renewable Energy Infra structure Limited. "Amorphous silicon." http://www.reihk.com/ps/category.php?id_category=33 (accessed November 10, 2016).
- Sedona Energy Labs. "Solar Tracking Systems." <http://www.glendongood.com/solar-tracking-systems/> (accessed June 21, 2017).
- Shahriar B., Reza K., Shahrokh F., Amir G., and Khashayar B. "A Study on the Effects of Solar Tracking Systems on the Performance of Photovoltaic Power Plants." <http://dx.doi.org/10.4236/jpee.2014.24096> (accessed May 20, 2017).
- Solar Depot. "Solar Roof Mount." www.solardepotng.com/SDN/product/solar-roof-mount/ (accessed April 18, 2017).
- Stephen Smith. "PV Trackers." <http://solarprofessional.com/articles/products-equipment/racking/pv-trackers#.WdsRbzBx3Dc> (accessed June 21, 2017).
- Weland Stal AB. "Fixing system for solar panels." <http://www.welandstal.se/images/galleri/be00002485.jpg> (accessed April 18, 2017).
- Wind & Sun Ltd. "GSE Integration Roof Integrated." www.windandsun.co.uk/products/PV-Mounting-Structures/GSE-Integration-Roof-Integrated (accessed April 18, 2017).
- Xiamen Rineng Solar Energy Technology Co., Ltd. "ROOF MOUNT SYSTEM." www.rinengsolar.com/show-93-39-1.html (accessed April 18, 2017).

Yanglin (Xiamen) Machinery & Technology Co., Ltd. “4KW Ground Mounting System.”
http://www.yanglinxm.com/case_detail/newsId=20.html (accessed April 18, 2017).

กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. “เครื่องมือในการประเมินโครงการ.” <http://www2.dede.go.th/webpage/tools.htm> (สืบค้นวันที่ 1 พฤษภาคม 2560).

กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. “แผนที่ศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์ในประเทศไทย.” www.dede.go.th (สืบค้นเมื่อวันที่ 2 พฤศจิกายน 2559).

กระทรวงพลังงาน. “ศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์.” <http://www.energy.go.th> (สืบค้นเมื่อวันที่ 10 ตุลาคม 2559).

การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย. “เทคโนโลยีเซลล์แสงอาทิตย์.” <http://www3.egat.co.th/re/solarcell/solarcell.htm> (สืบค้นเมื่อวันที่ 10 ตุลาคม 2559).

การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย. “ระบบติดตามดวงอาทิตย์แบบถ่วงน้ำหนัก.” http://www3.egat.co.th/re/egat_pv/egatpv_silinthon/tracking_silinthon.htm (สืบค้นวันที่ 20 เมษายน 2560).

ชนพล พรหมย้อย และ เบญจพร หนูคล้าย. “Solar cell แบบ Amorphous.” http://www.mne.eng.psu.ac.th/knowledge/student/solarcell/type_amor.htm (สืบค้นเมื่อวันที่ 25 พฤศจิกายน 2559).

วฤทธิ มิตรธรรมศิริ. “ฤดูกาลและการโคจรของโลกรอบดวงอาทิตย์.” ผลงานวิจัยสู่สังคม: คณะวิทยาศาสตร์ มหิดล <http://www.sc.mahidol.ac.th/usr/?p=400> (สืบค้นวันที่ 5 ตุลาคม 2559).

ศูนย์การเรียนรู้วิทยาศาสตร์โลกและดาราศาสตร์. “นาฬิกาแดด.” <http://www.lesa.biz/astronomy/celestial-sphere/sundial> (สืบค้นเมื่อวันที่ 5 ตุลาคม 2559).

เอกสารการบรรยายและรายงานที่นำเสนอในการประชุม

ธนิต เรืองรุ่งชัยกุล และ วัชรวิชัย ใจยรรณ. “ระบบติดตามดวงอาทิตย์แบบสองแกนราคาถูกลำหรับบ้านพลังงานแสงอาทิตย์.” การประชุมสัมมนาเชิงวิชาการรูปแบบพลังงานทดแทนสู่ชุมชนแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 8, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี, คณะวิศวกรรมศาสตร์. 4-6 พฤศจิกายน 2558.

ธนิต เรืองรุ่งชัยกุล, กิตติ อภิชัยไพบูลย์ และ กิตติคุณ ชาตรีรักษา. “ศึกษาเปรียบเทียบระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์แบบติดตามดวงอาทิตย์แกนเดียว.” การประชุมสัมมนาวิชาการรูปแบบพลังงานทดแทนสู่ชุมชนแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 9, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา, สถาบันวิจัยและพัฒนา. 29 พฤศจิกายน – 1 ธันวาคม 2559.

การสัมภาษณ์

ศรีศศิน ต่านตระกูล และ กรณ์ กันทะชมพู. สัมภาษณ์โดย กฤษนนท์ สอนจันทร์, ศูนย์การเรียนรู้โลกสีเขียว, นครราชสีมา, 24 กุมภาพันธ์ 2560.

ตฤณ ตัณฑเศรษฐี. สัมภาษณ์โดย กฤษนนท์ สอนจันทร์, สอนปามหาชีวลัยอีสาน, บุรีรัมย์, 25 กุมภาพันธ์ 2560.

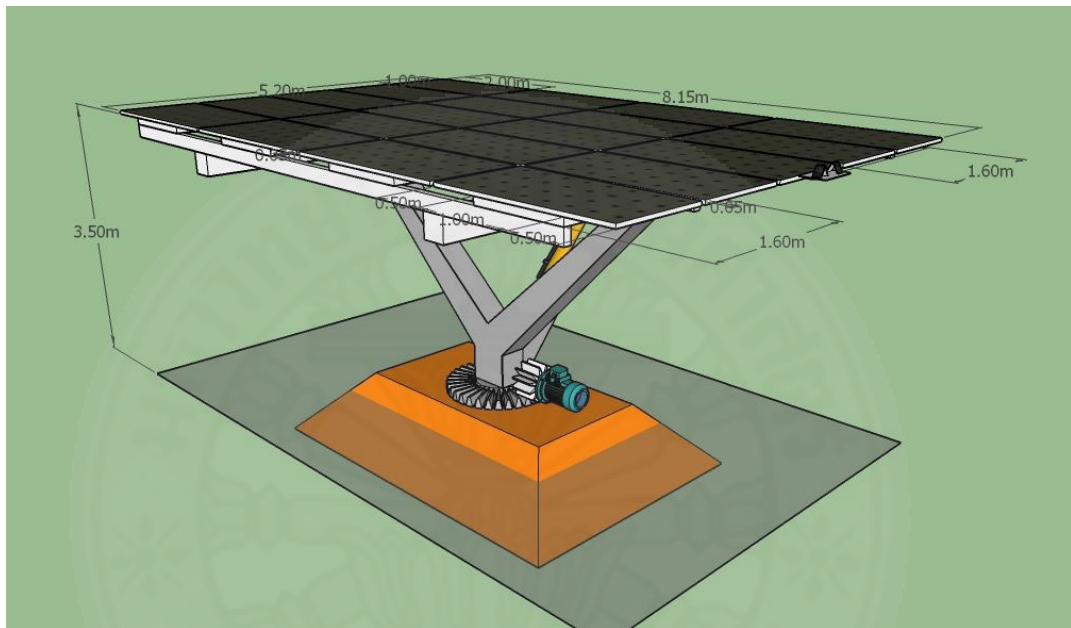
ไมตรี ช่างแต่ง. สัมภาษณ์โดย กฤษนนท์ สอนจันทร์, เรเวดี 47 อพาร์ทเมนต์, นนทบุรี, 5 พฤศจิกายน 2560.

ภาคผนวก

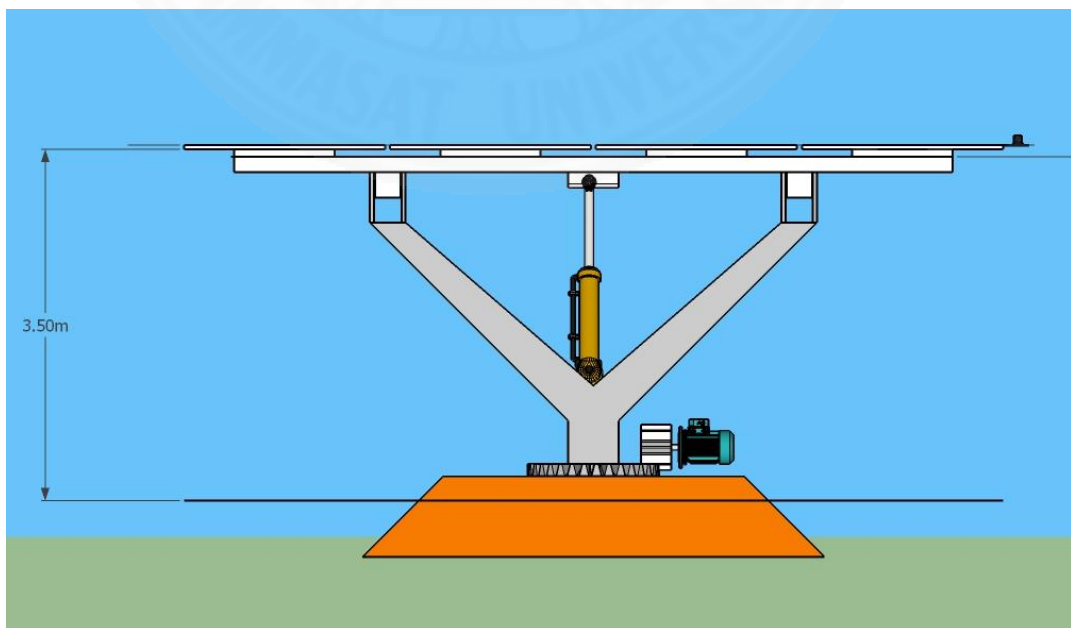


ภาคผนวก ก
รูปภาพการออกแบบและการทดสอบโครงสร้าง

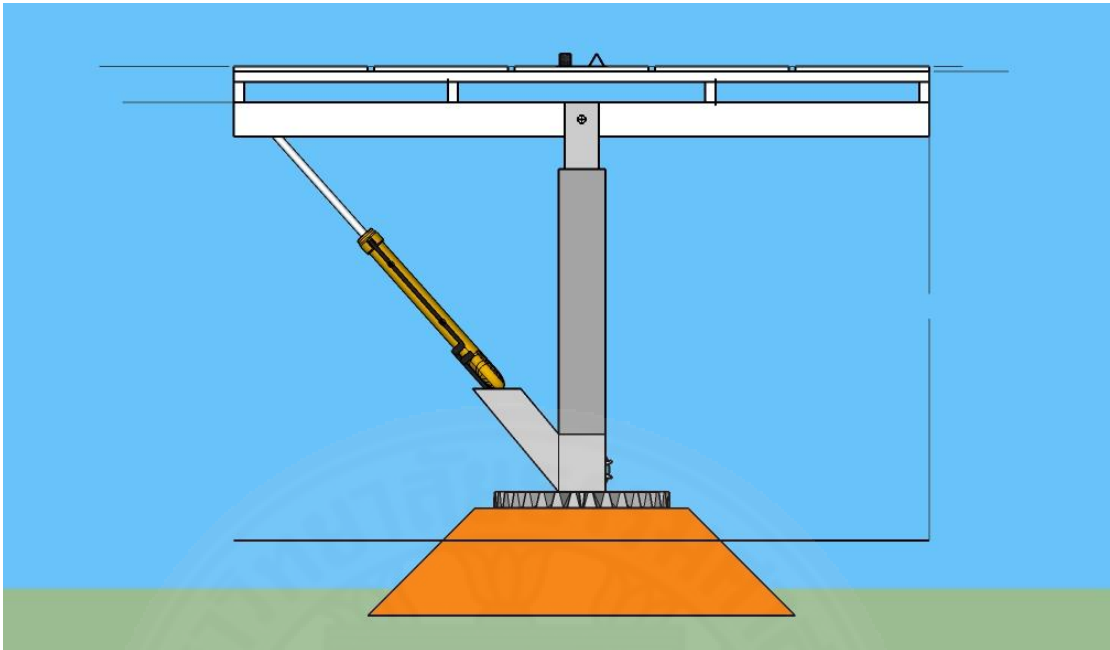
ก.1 ภาพฉายโครงสร้างของ V-pole solar tracking



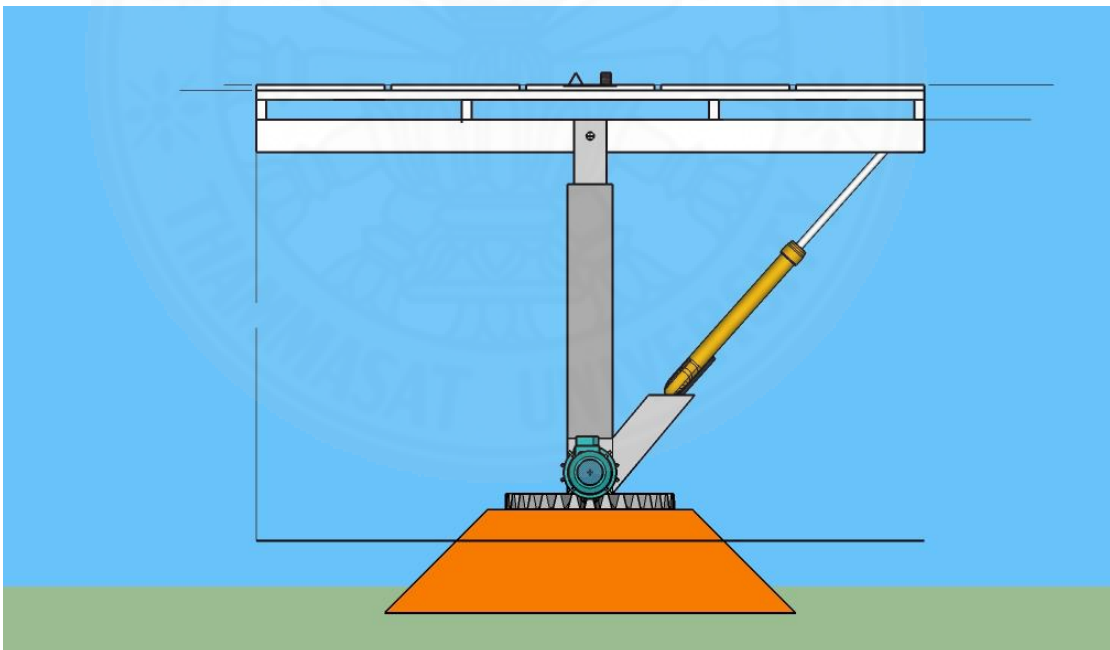
ภาพที่ ก.1 V-pole solar tracking (สามมิติ)



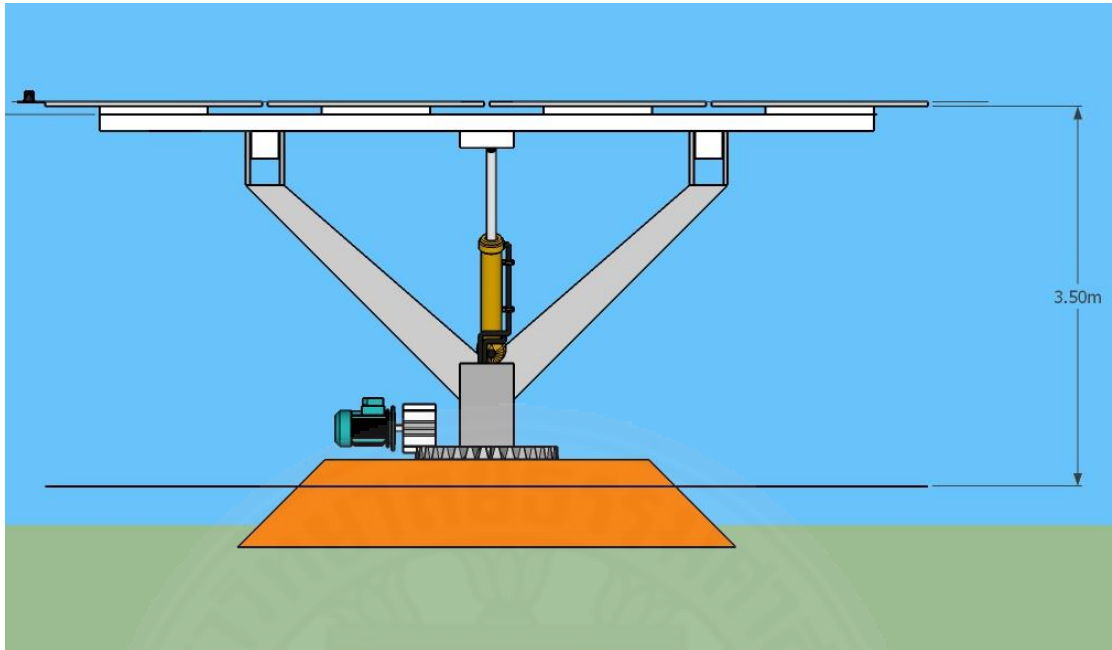
ภาพที่ ก.2 V-pole solar tracking (ด้านหน้า)



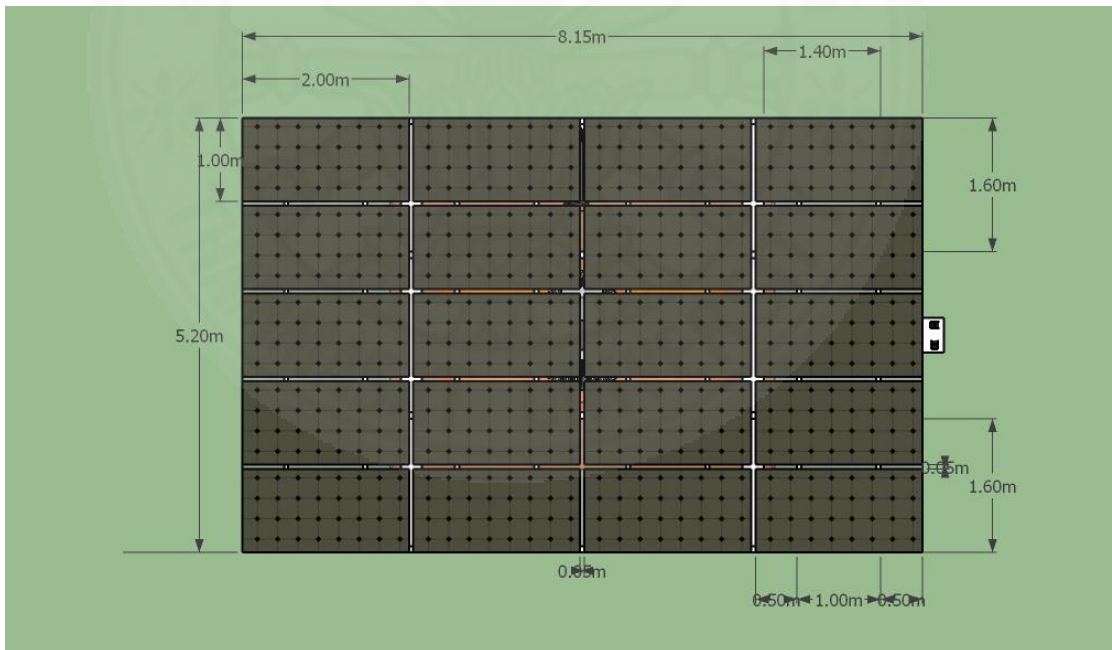
ภาพที่ ก.3 V-pole solar tracking (ด้านซ้าย)



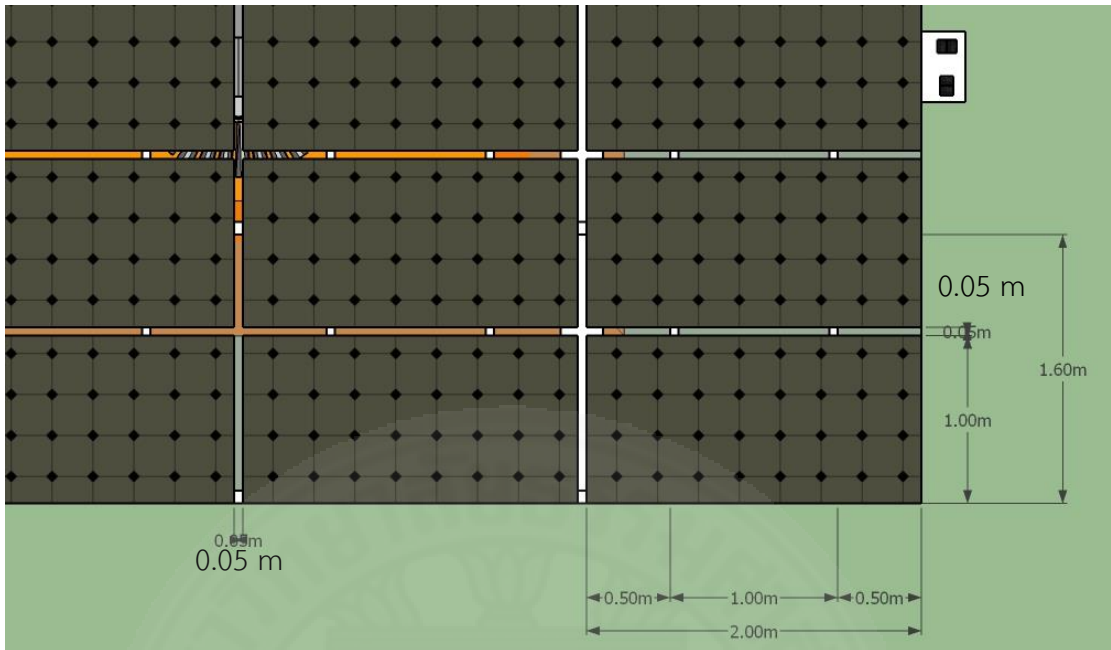
ภาพที่ ก.4 V-pole solar tracking (ด้านขวา)



ภาพที่ ก.5 V-pole solar tracking (ด้านหลัง)

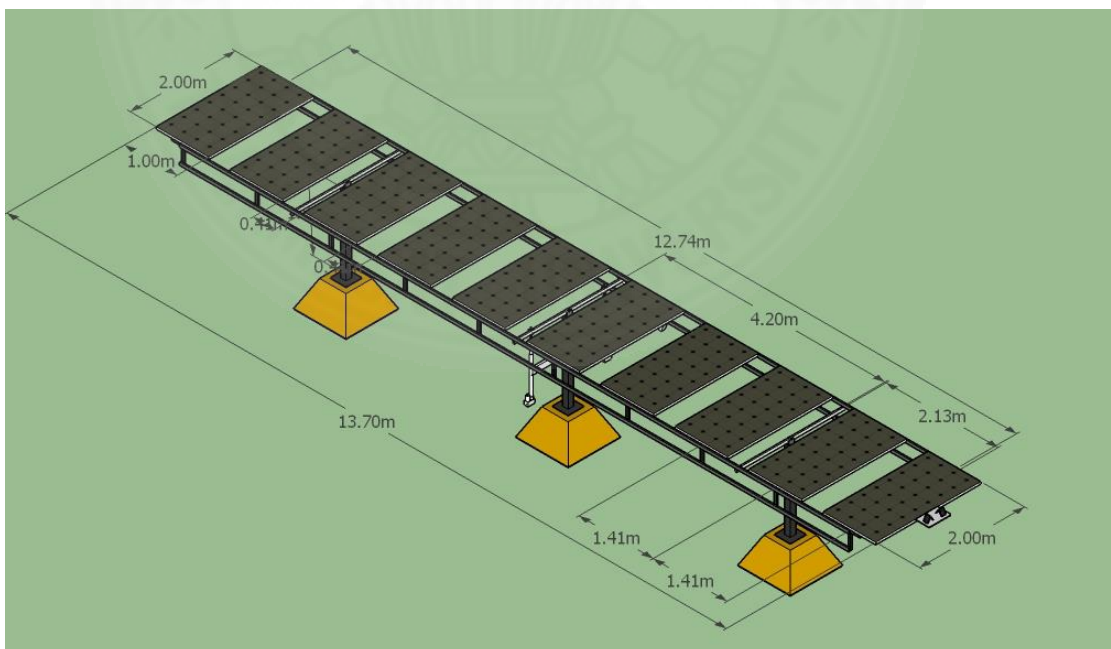


ภาพที่ ก.6 V-pole solar tracking (ด้านบน 1)

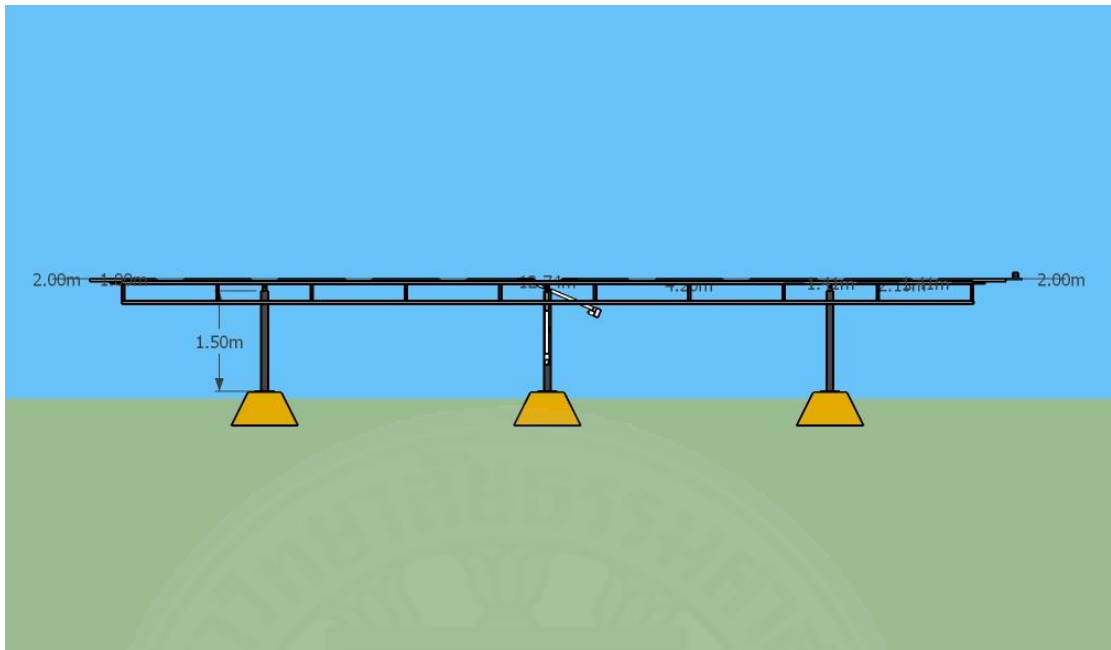


ภาพที่ ก.7 V-pole solar tracking (ด้านบน 2)

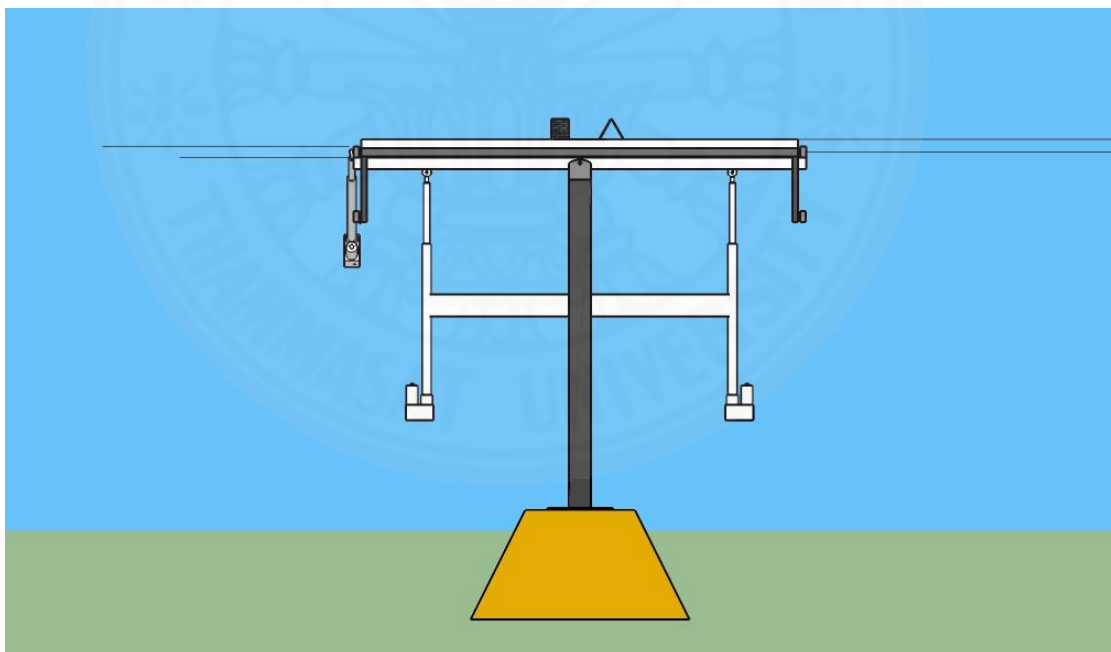
ก.2 ภาพฉายโครงสร้างของ Louver solar tracking



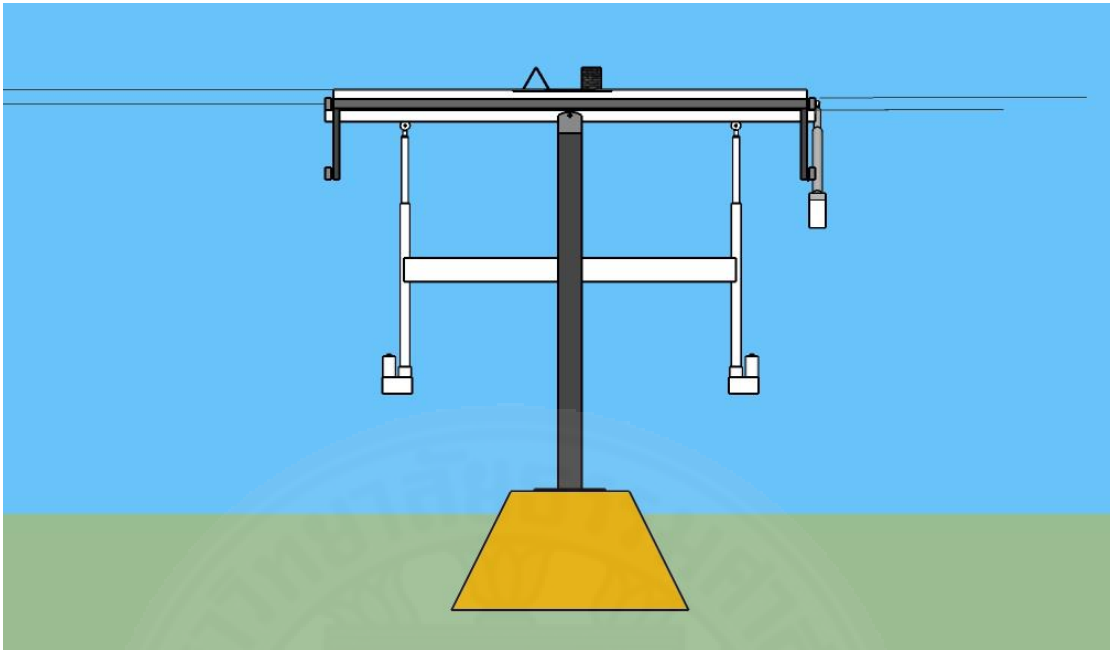
ภาพที่ ก.8 Louver solar tracking (สามมิติ)



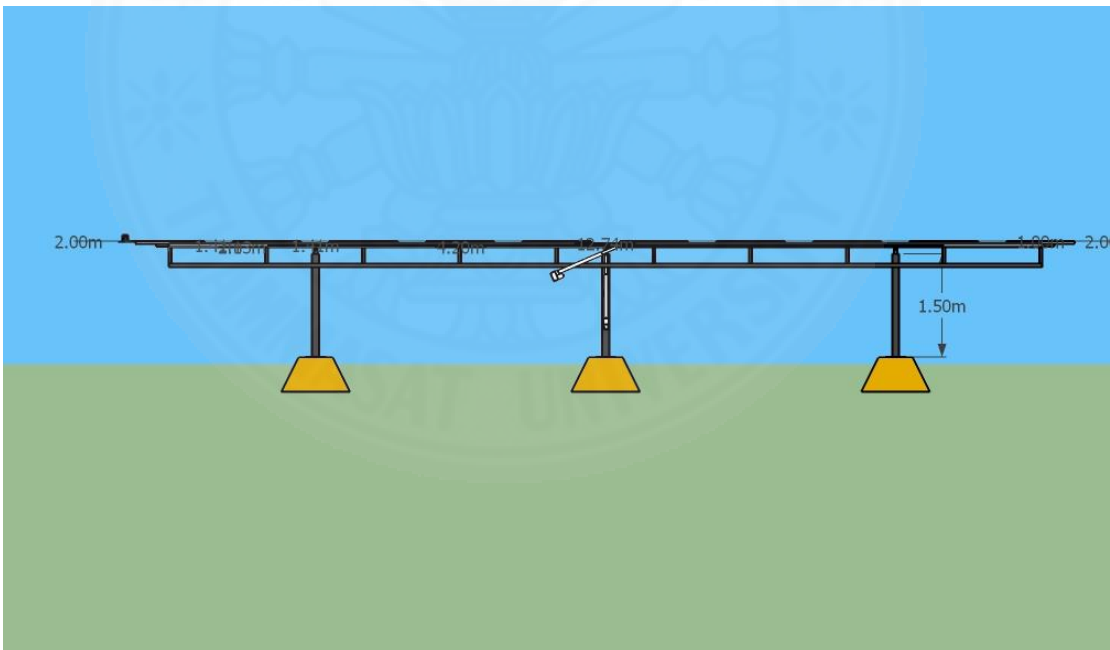
ภาพที่ ก.9 Louver solar tracking (ด้านหน้า)



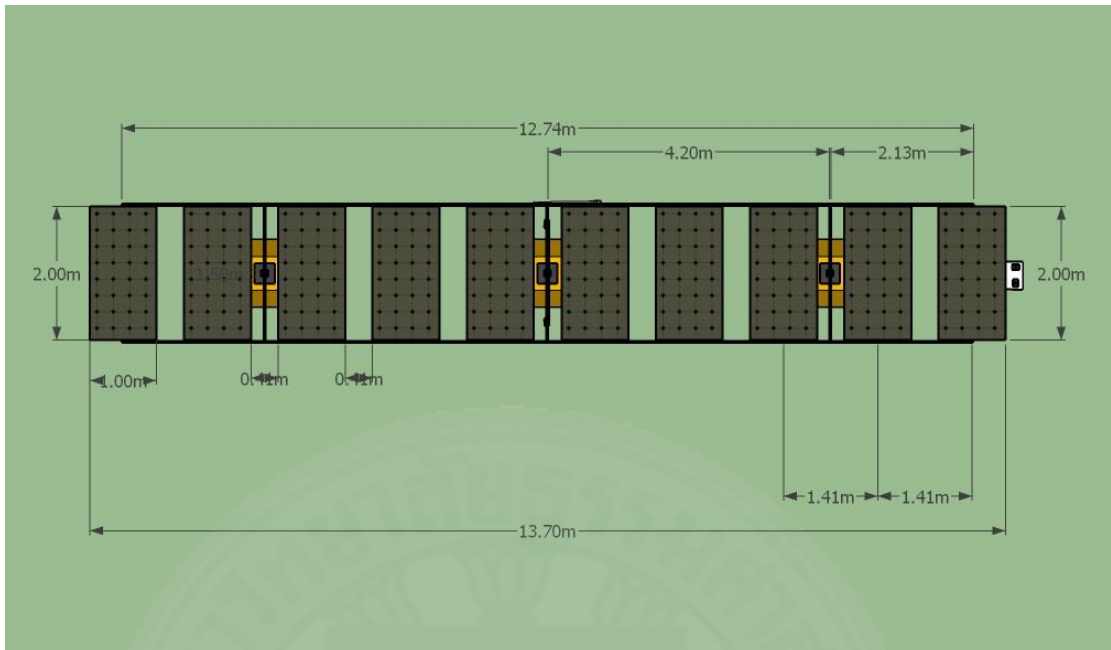
ภาพที่ ก.10 Louver solar tracking (ด้านซ้าย)



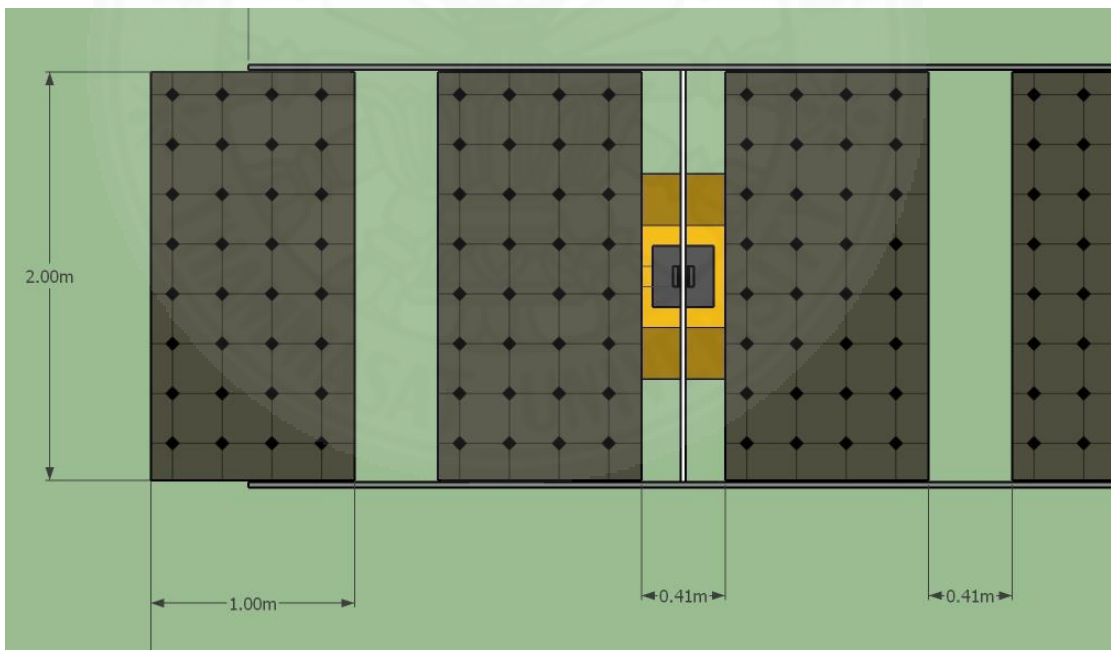
ภาพที่ ก.11 Louver solar tracking (ด้านขวา)



ภาพที่ ก.12 Louver solar tracking (ด้านหลัง)

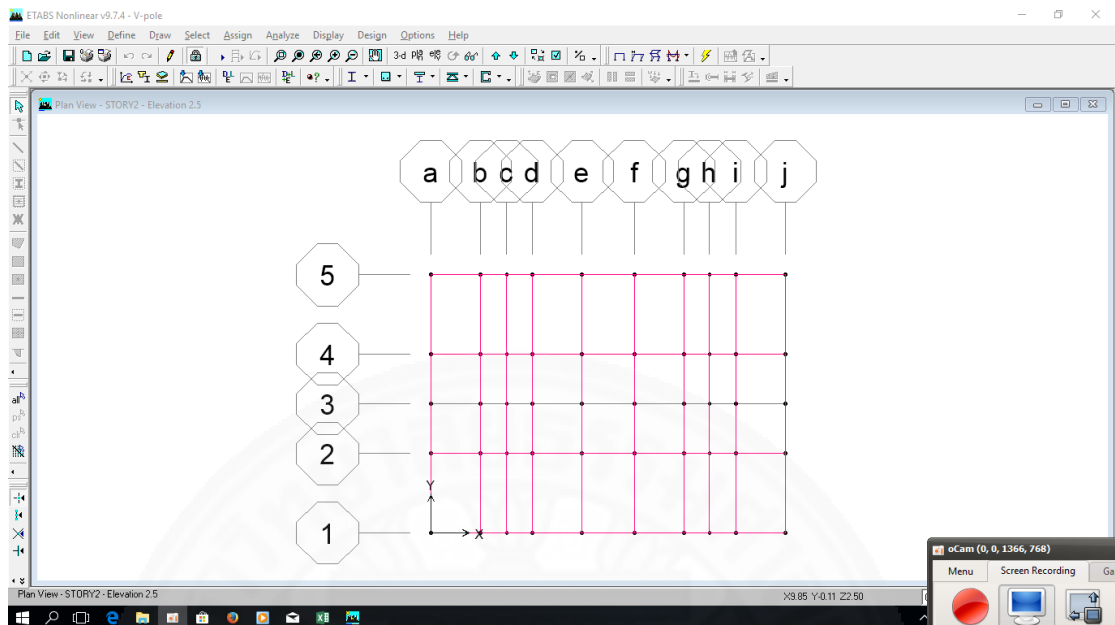


ภาพที่ ก.13 Louver solar tracking (ด้านบน 1)

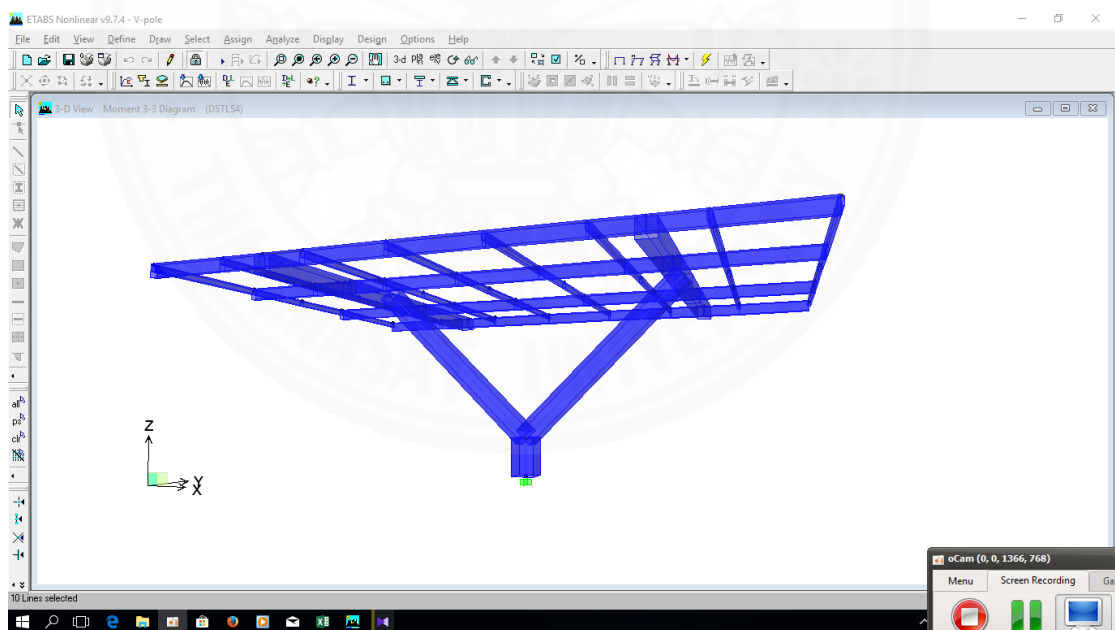


ภาพที่ ก.14 Louver solar tracking (ด้านบน 2)

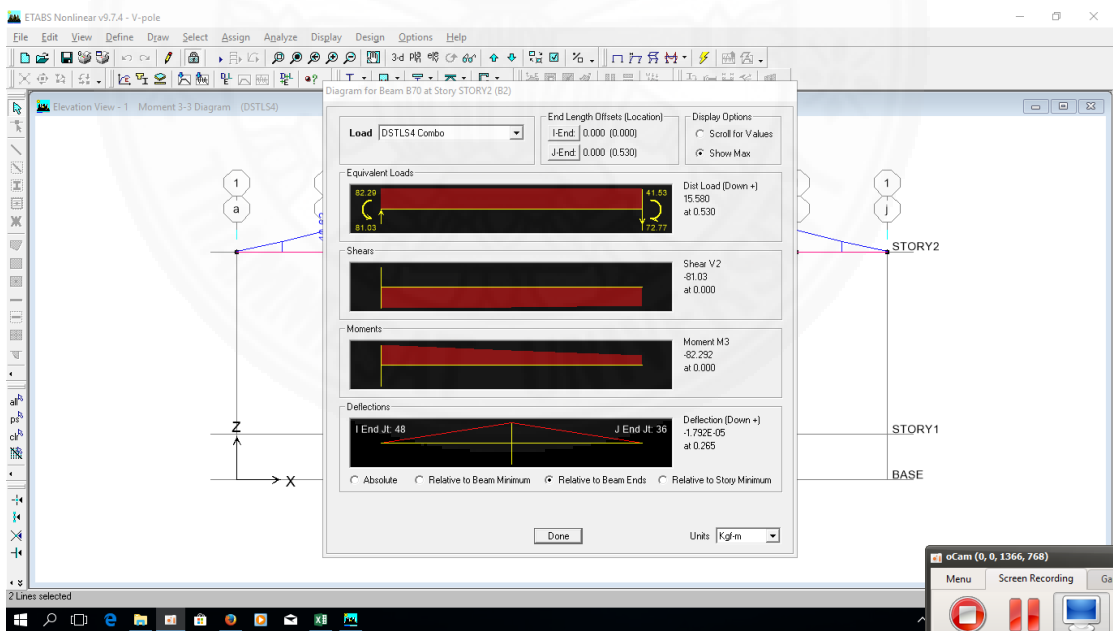
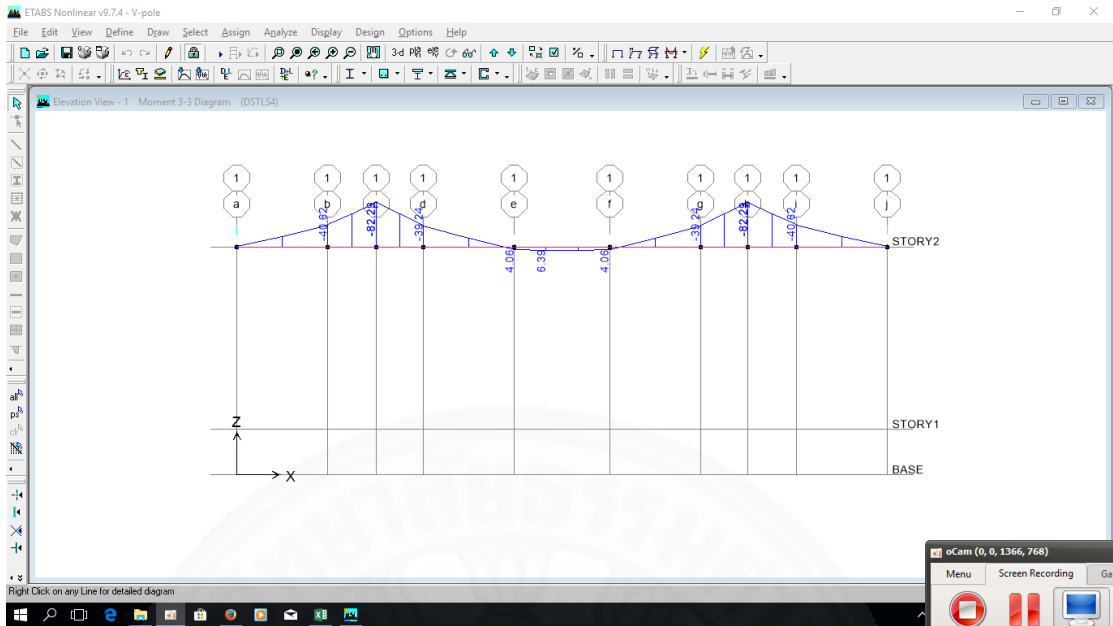
ก.2 การจำลองโครงสร้างโดยใช้โปรแกรม ETABS 9.7.4 (V-pole solar tracking)



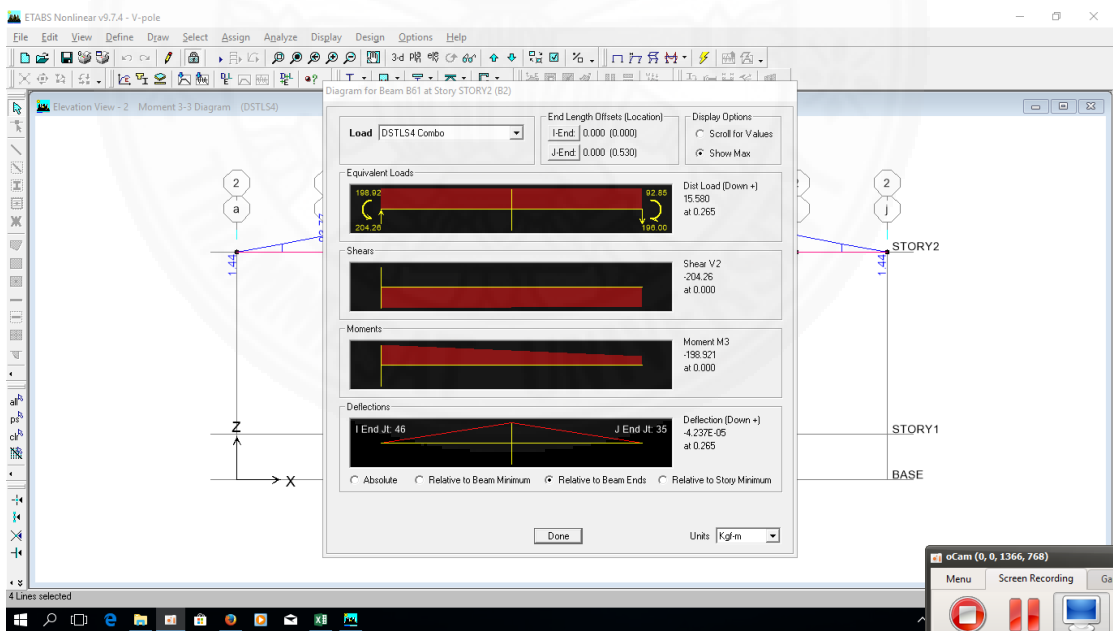
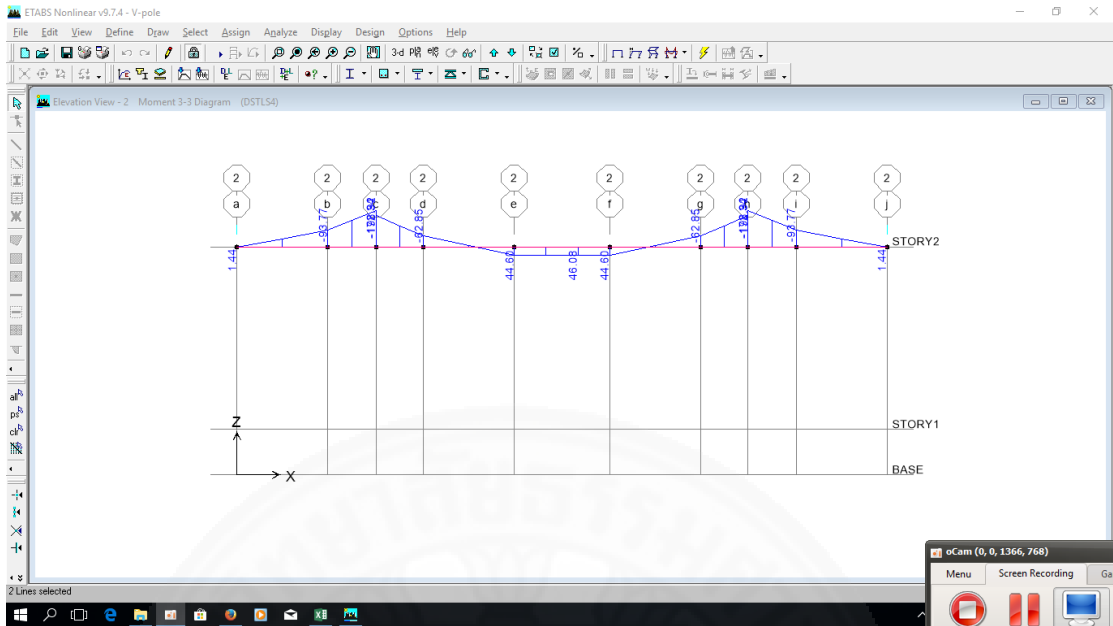
ภาพที่ ก.15 แพลนโครงสร้างของ V-pole solar tracking



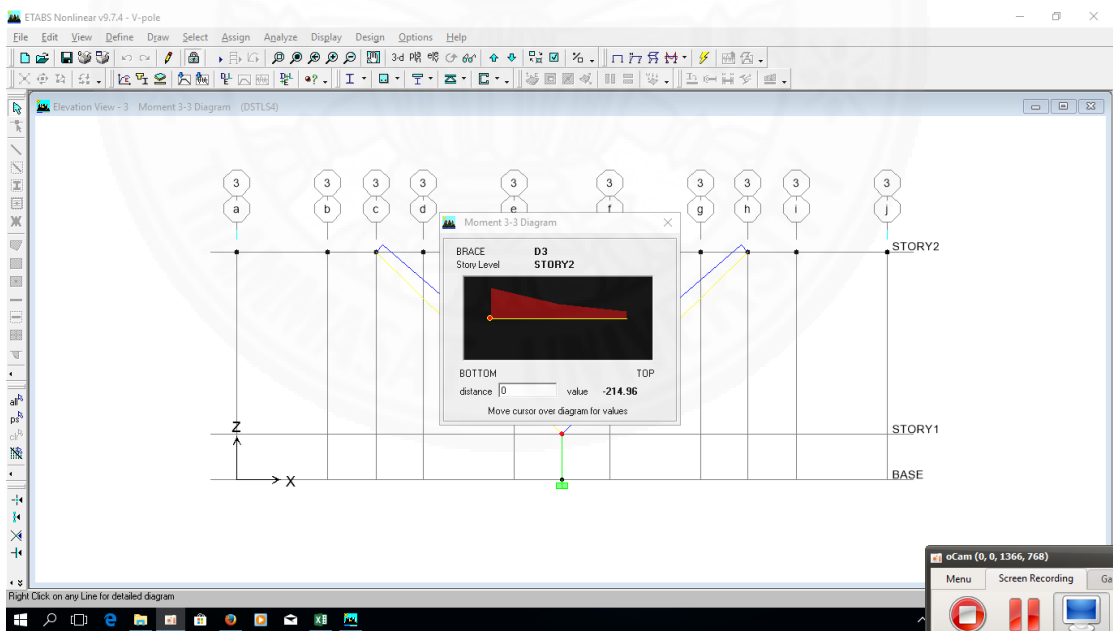
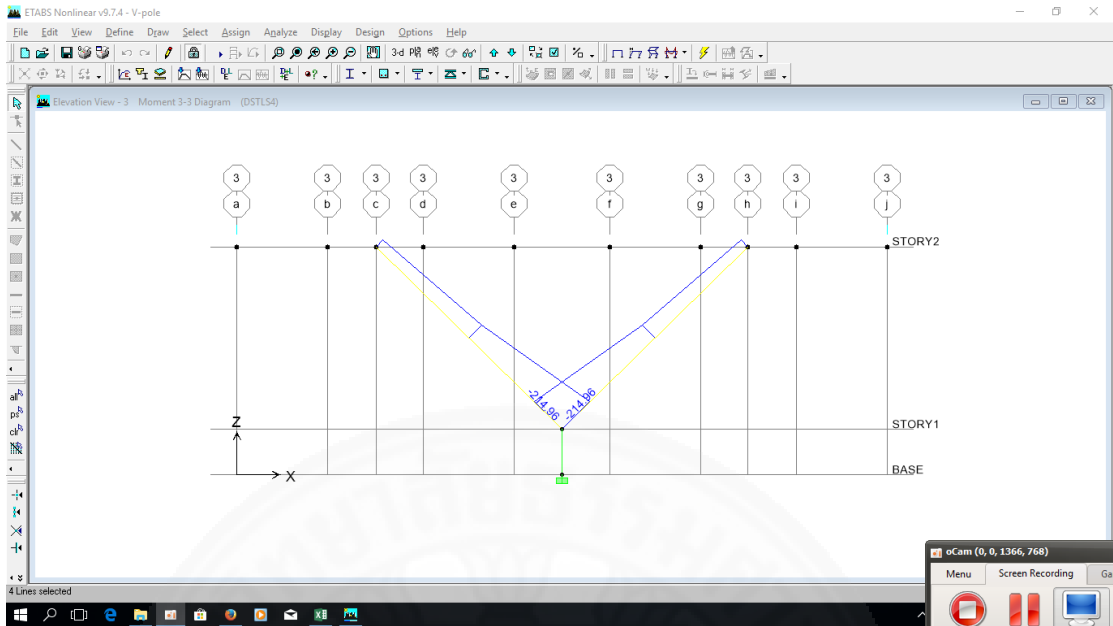
ภาพที่ ก.16 การจำลองสามมิติโครงสร้างของ V-pole solar tracking



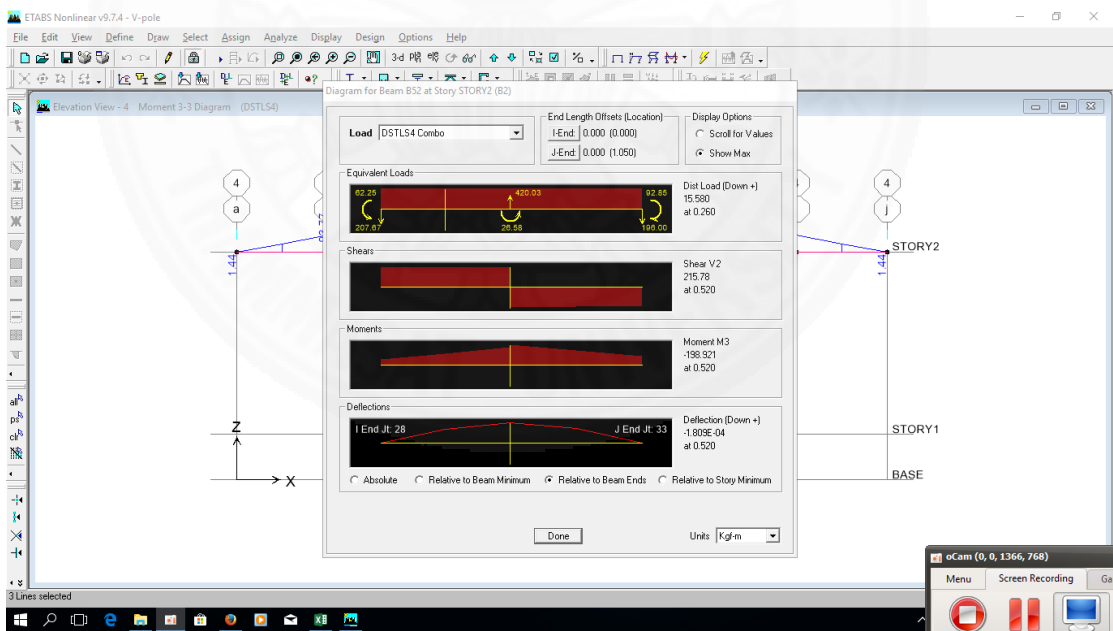
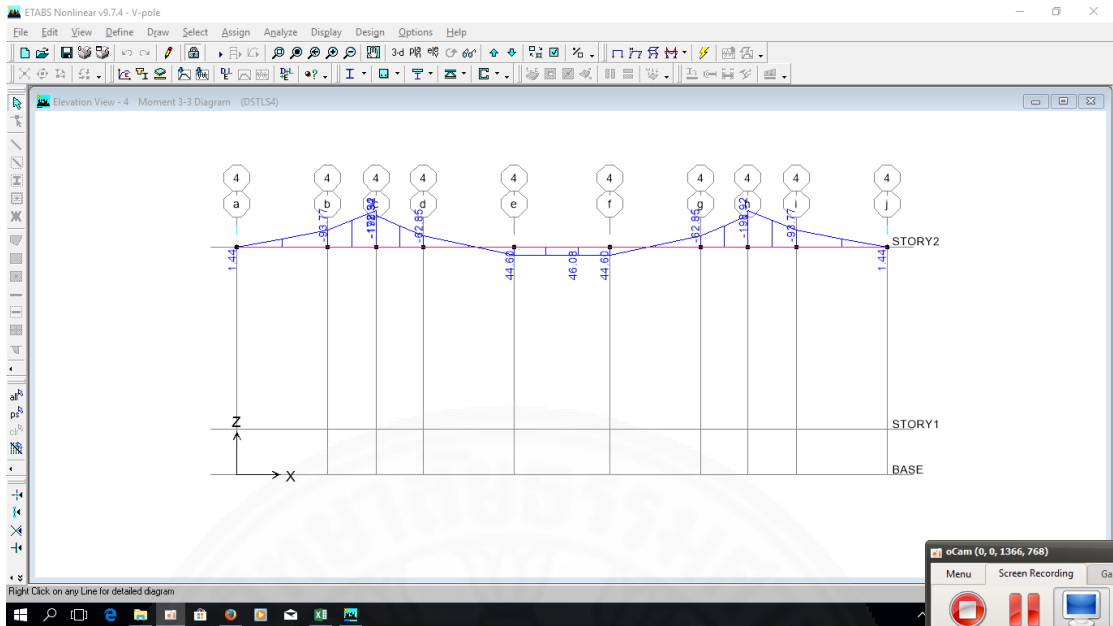
ภาพที่ ก.17 Shear force diagram และ bending moment diagram ที่หน้าตัด 1 (V-pole)



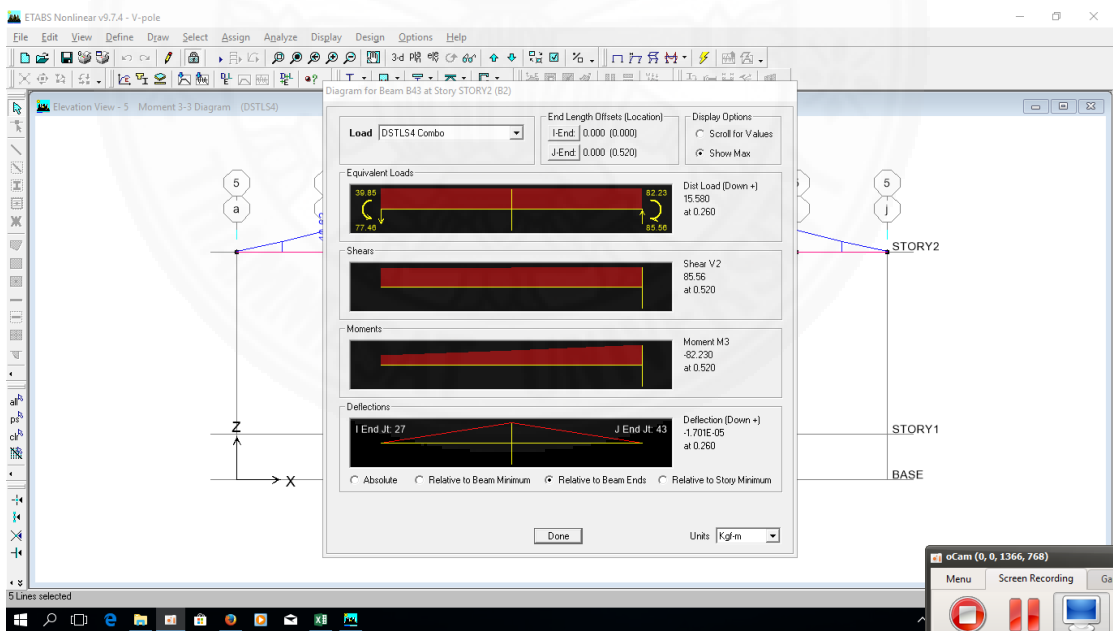
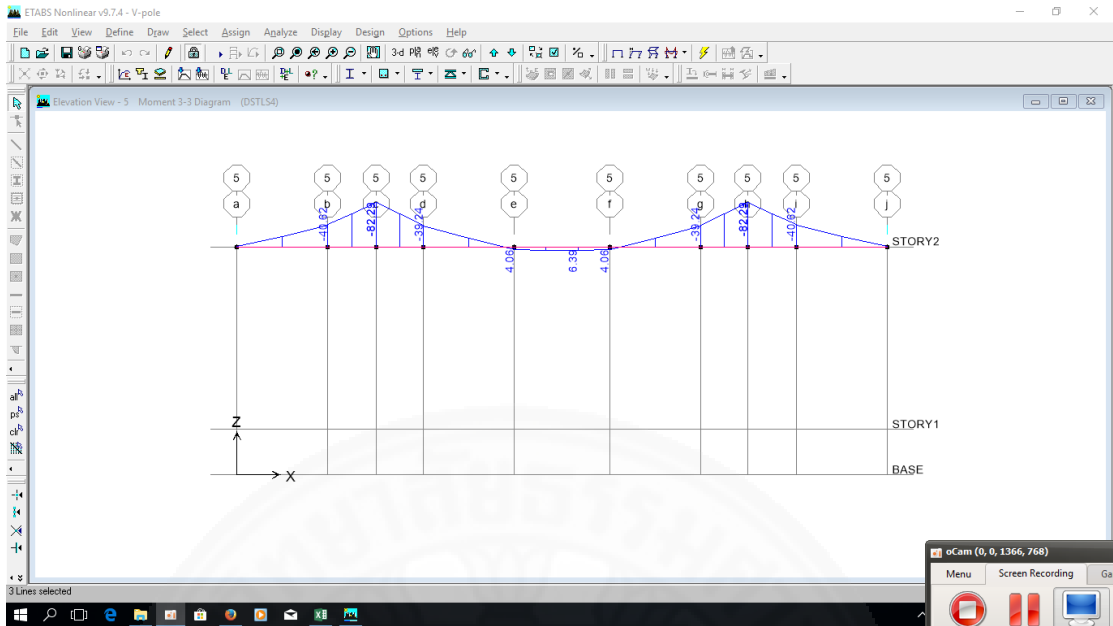
ภาพที่ ก.18 Shear force diagram และ bending moment diagram ที่หน้าตัด 2 (V-pole)



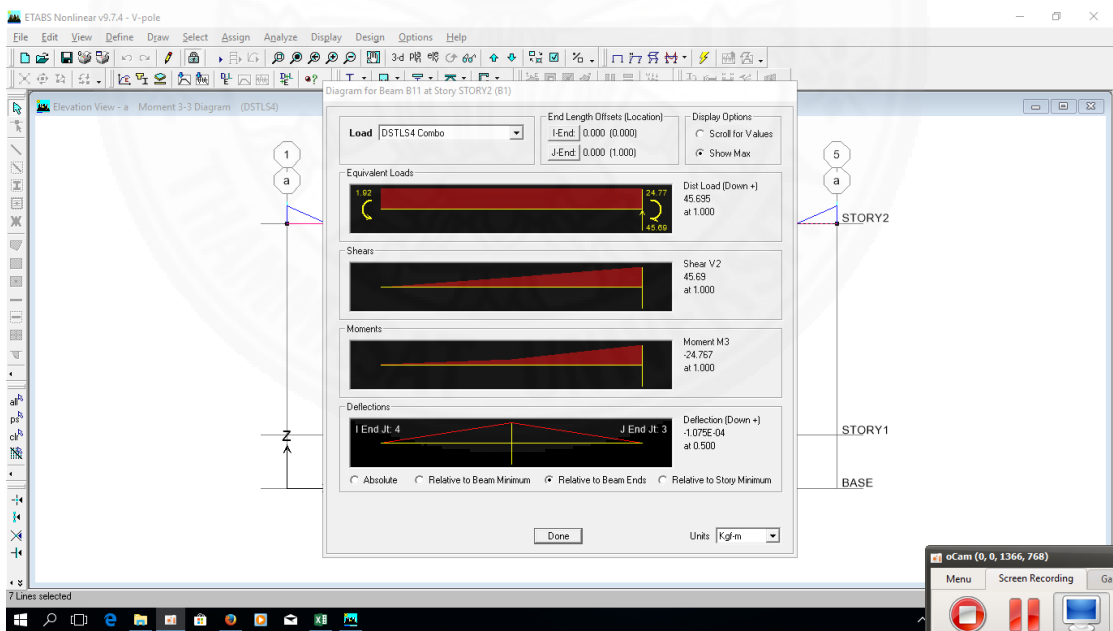
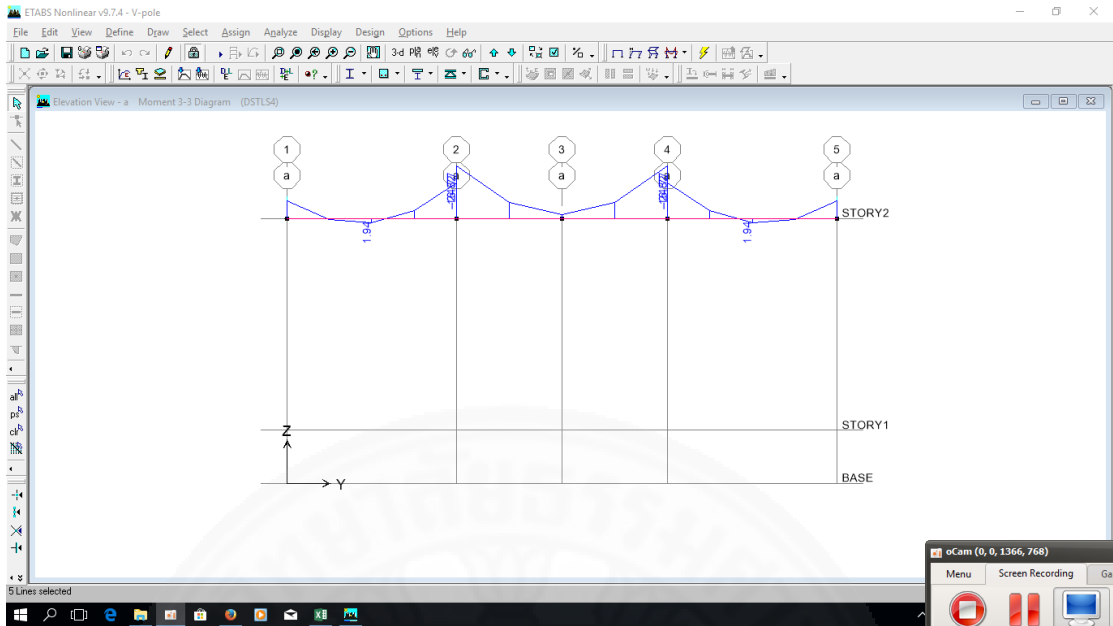
ภาพที่ ก.19 Shear force diagram และ bending moment diagram ที่หน้าตัด 3 (V-pole)



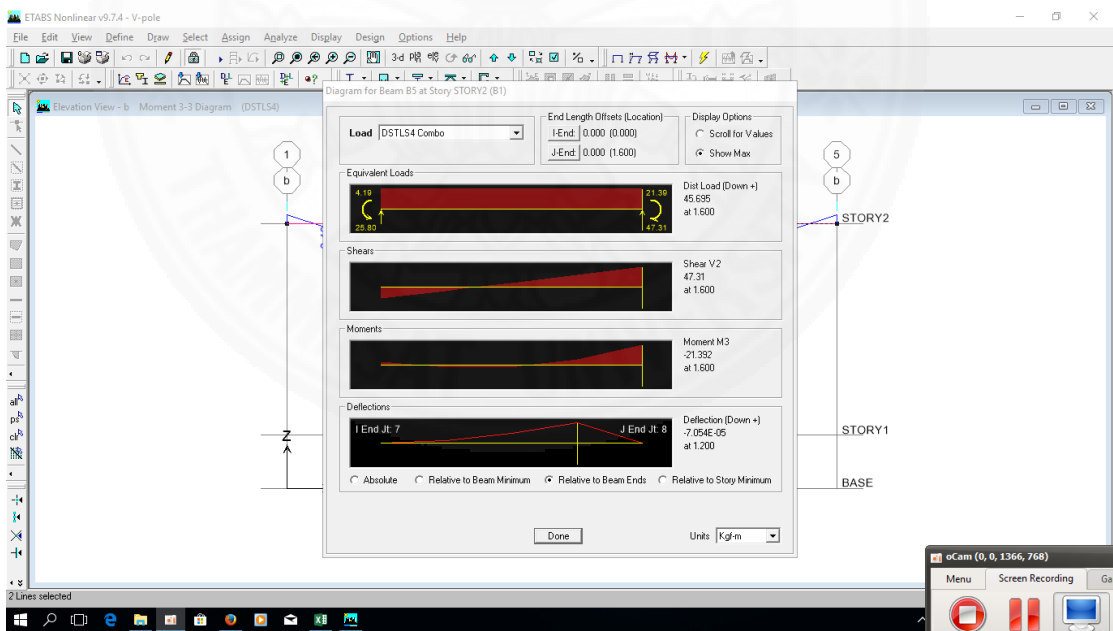
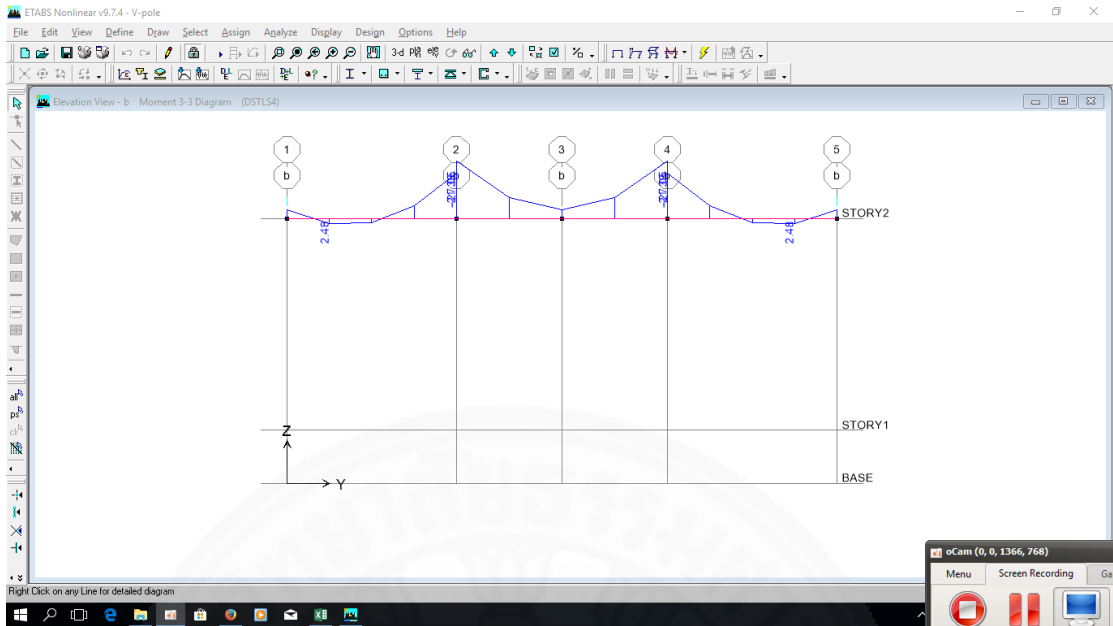
ภาพที่ ก.20 Shear force diagram และ bending moment diagram ที่หน้าตัด 4 (V-pole)



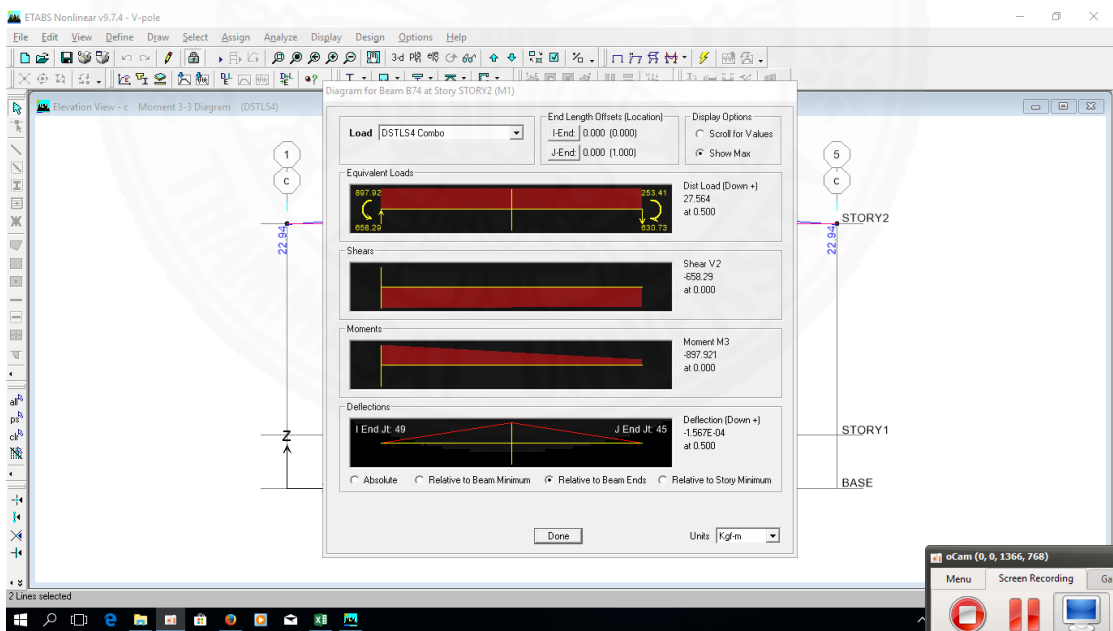
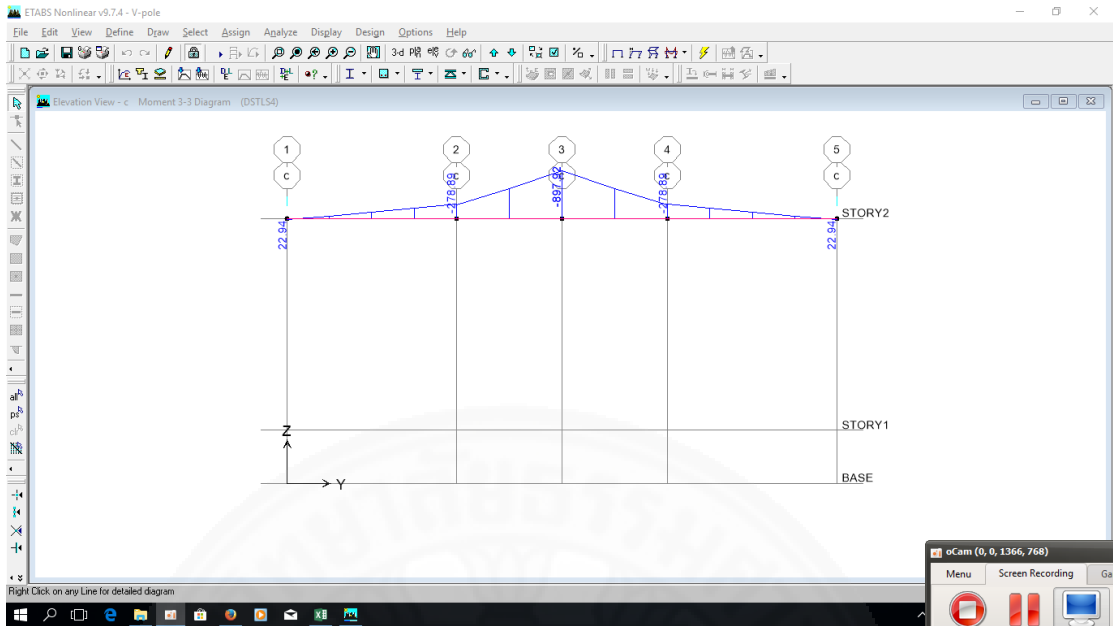
ภาพที่ ก.21 Shear force diagram และ bending moment diagram ที่หน้าตัด 5 (V-pole)



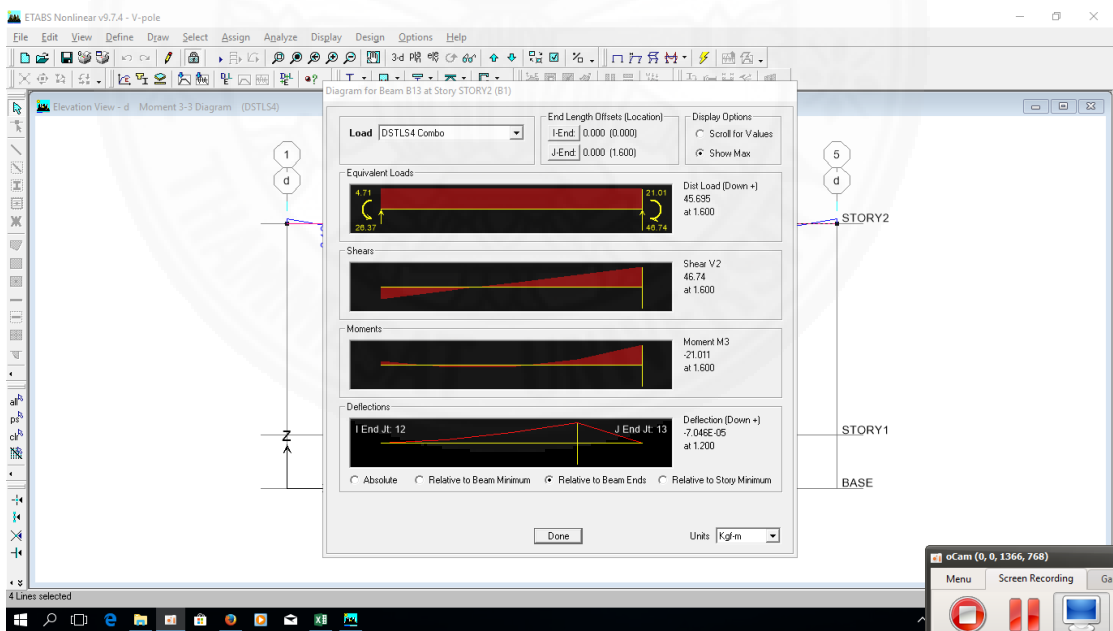
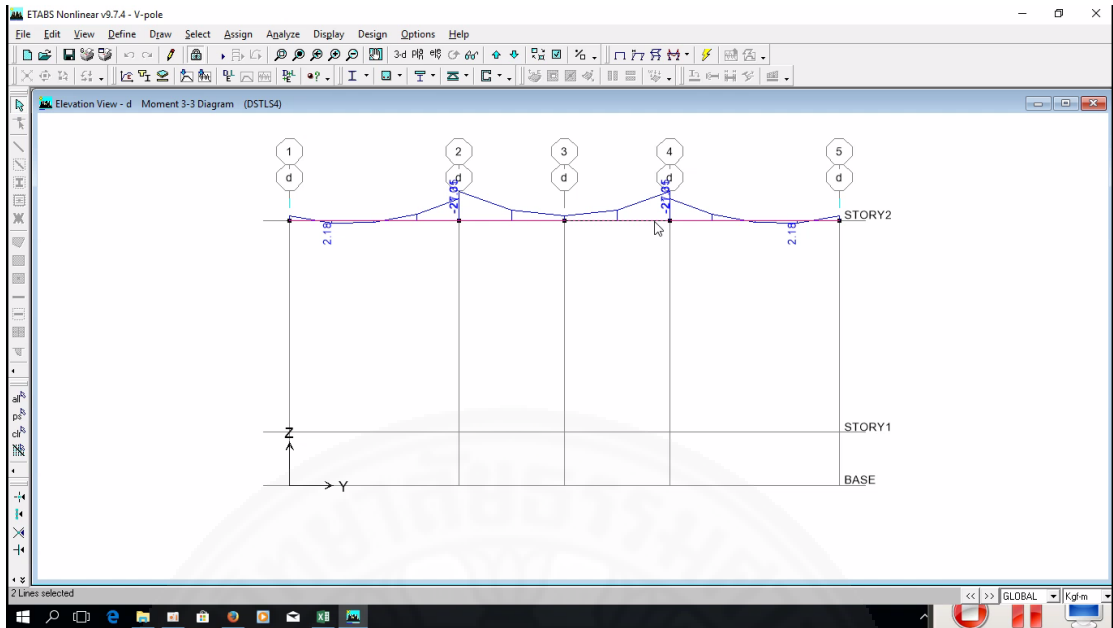
ภาพที่ ก.22 Shear force diagram และ bending moment diagram ที่หน้าตัด a (V-pole)



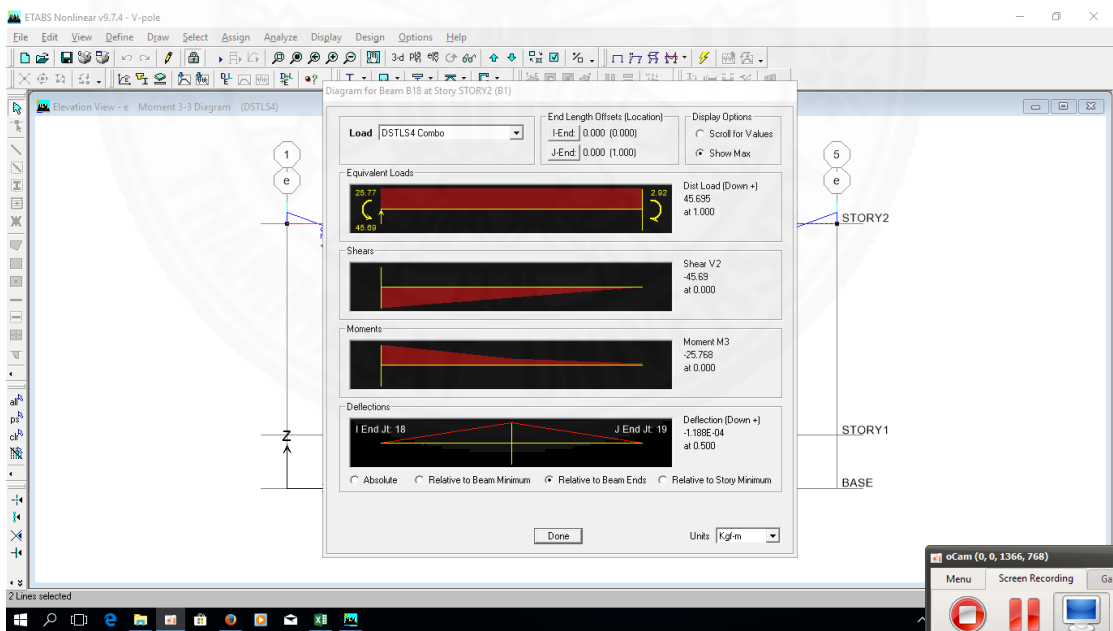
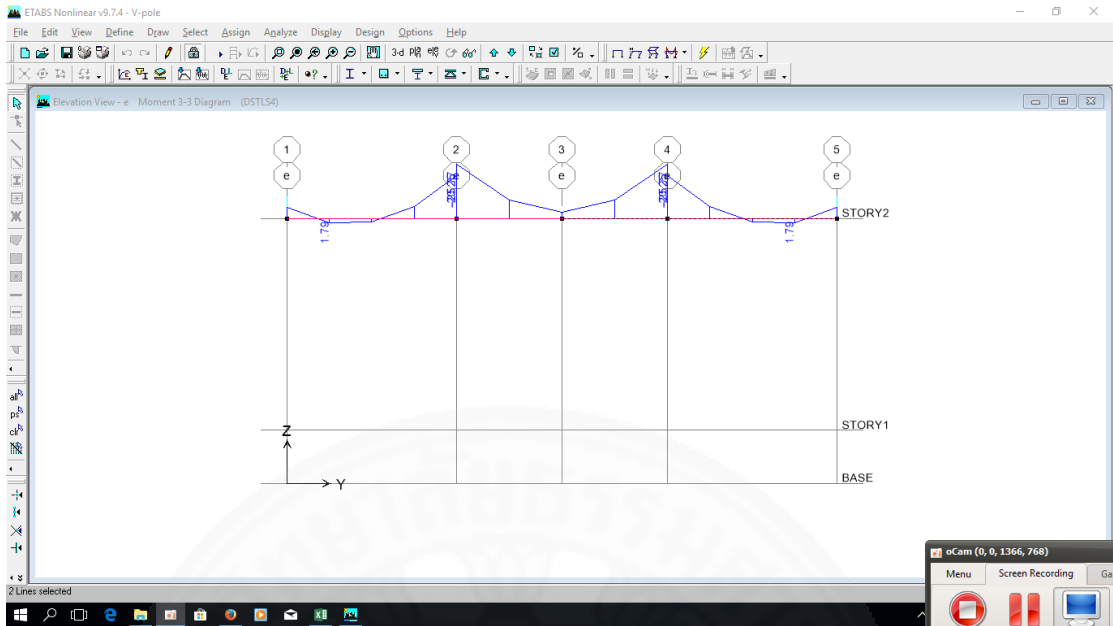
ภาพที่ ก.23 Shear force diagram และ bending moment diagram ที่หน้าตัด b (V-pole)



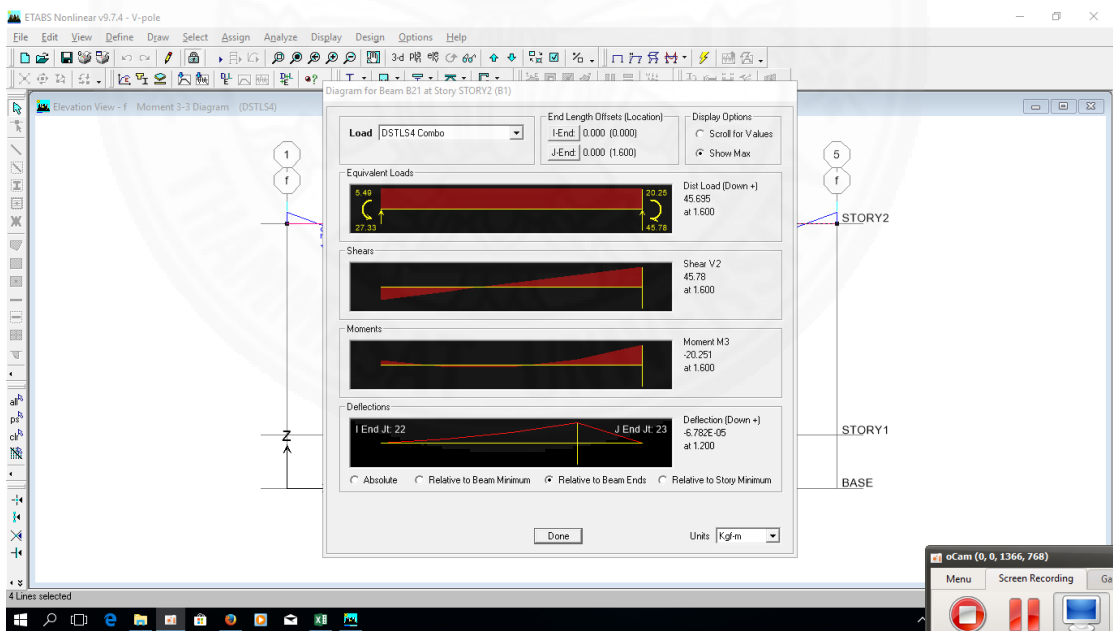
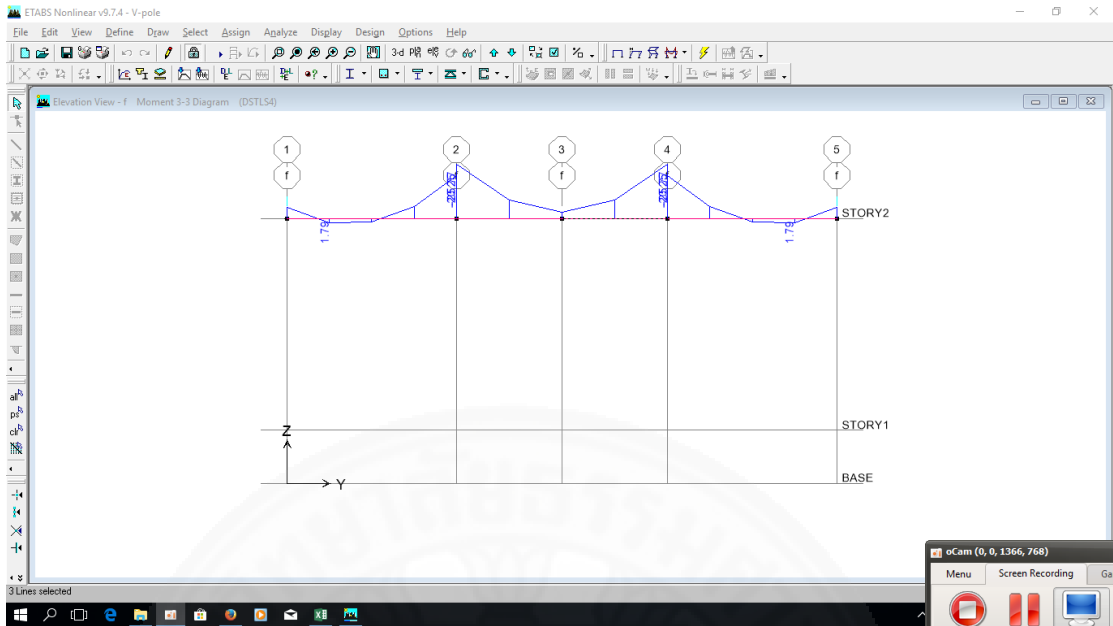
ภาพที่ ก.24 Shear force diagram และ bending moment diagram ที่หน้าตัด c (V-pole)



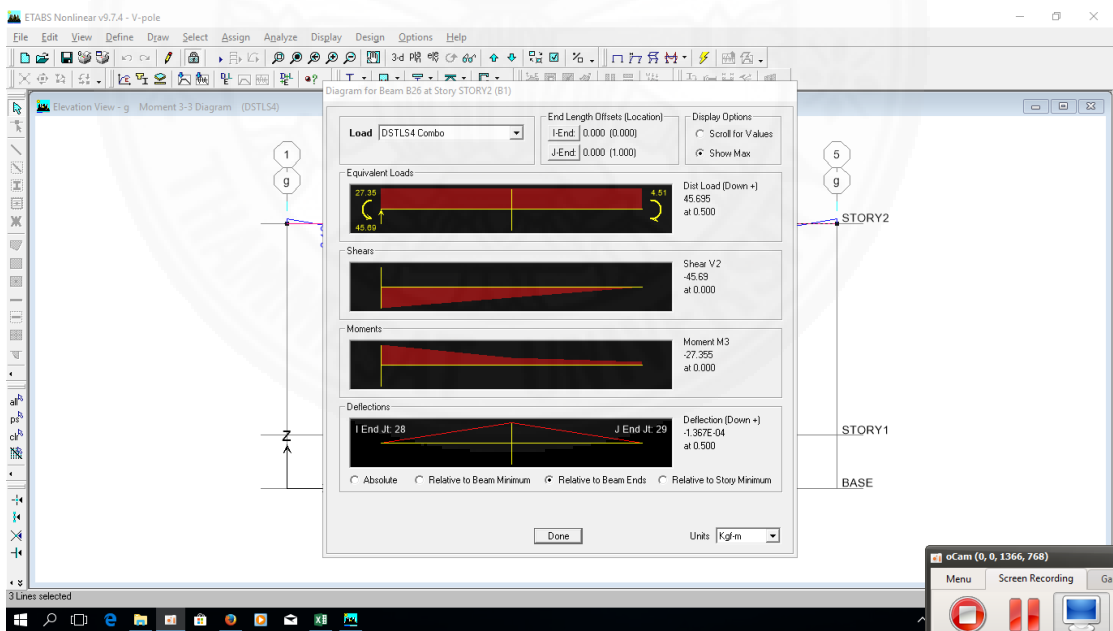
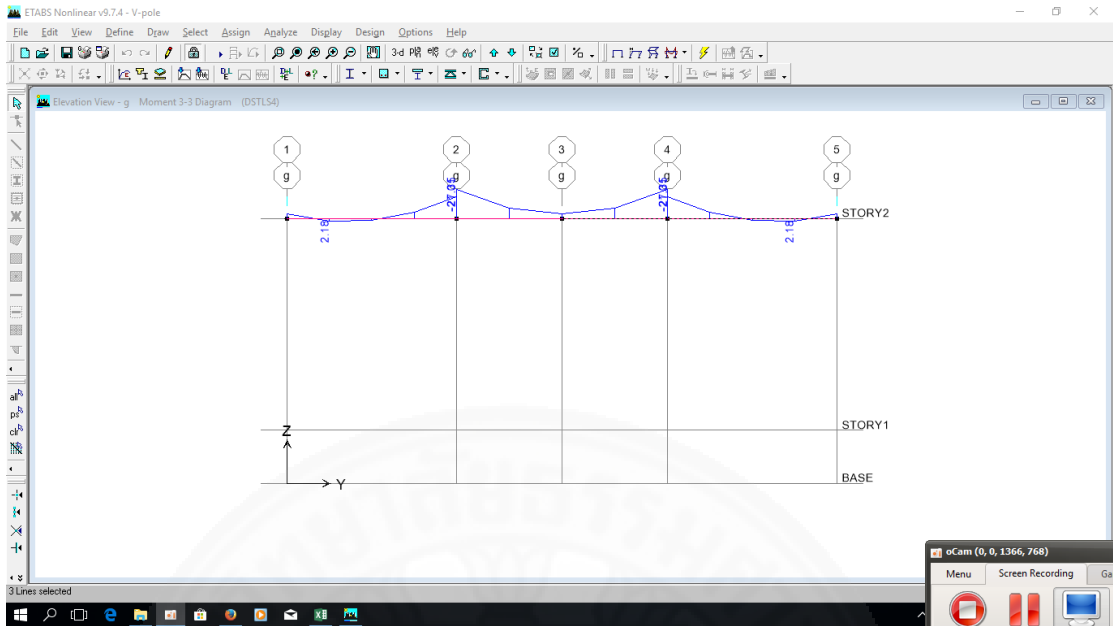
ภาพที่ ก.25 Shear force diagram และ bending moment diagram ที่หน้าตัด d (V-pole)



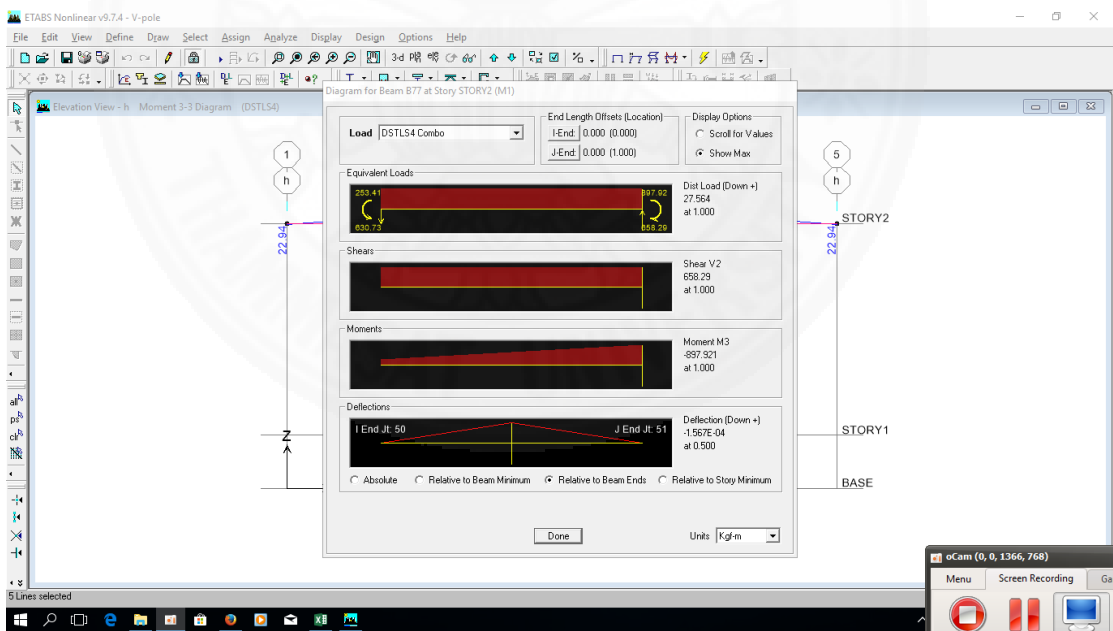
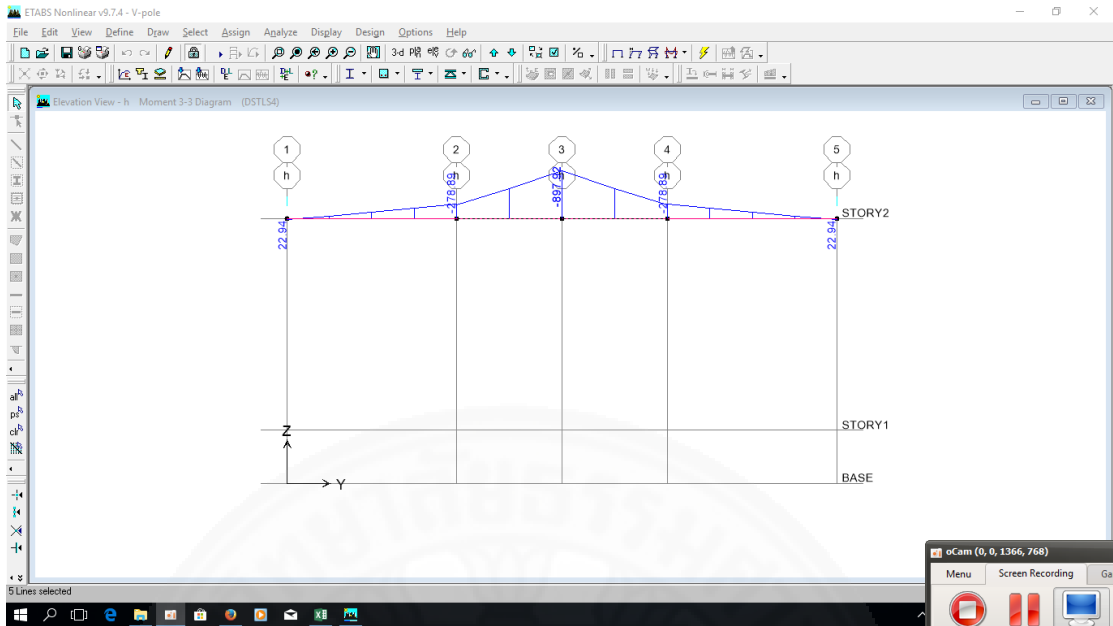
ภาพที่ ก.26 Shear force diagram และ bending moment diagram ที่หน้าตัด e (V-pole)



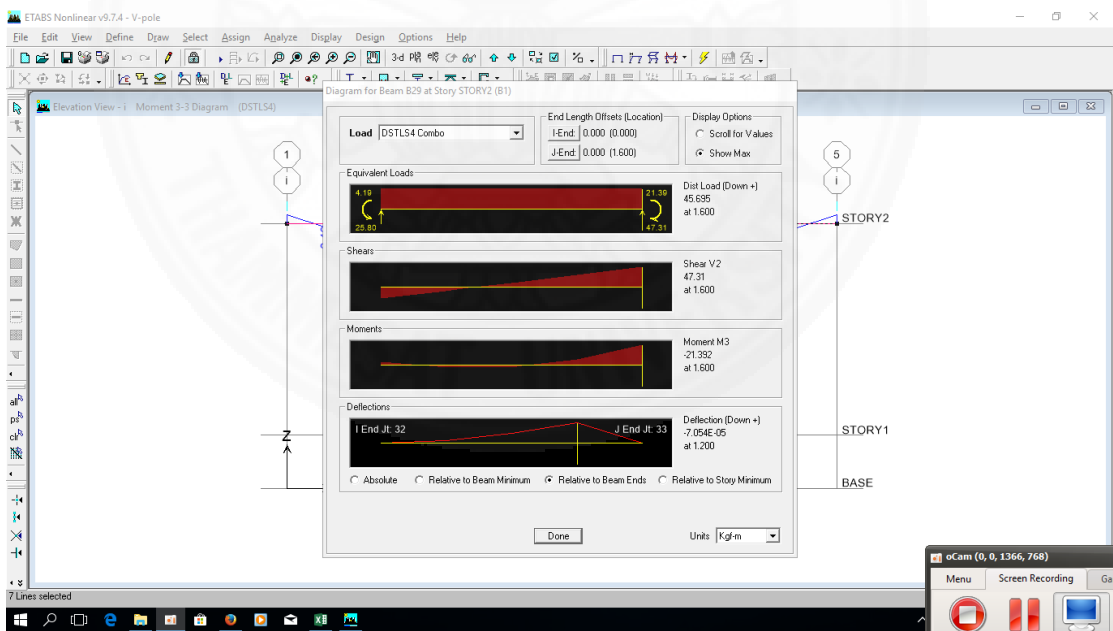
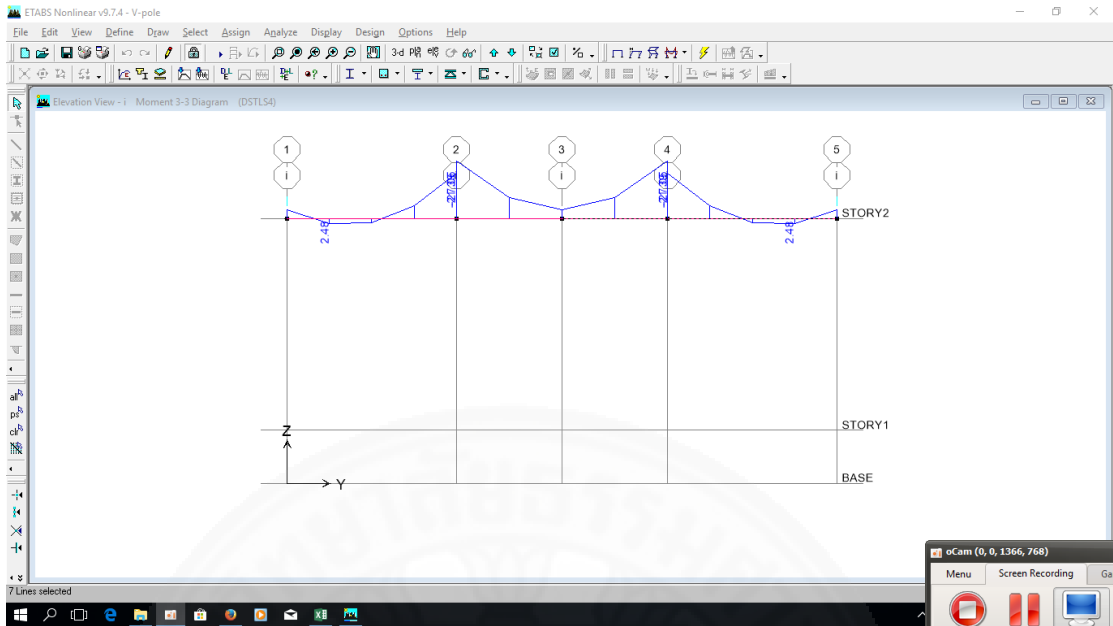
ภาพที่ ก.27 Shear force diagram และ bending moment diagram ที่หน้าตัด f (V-pole)



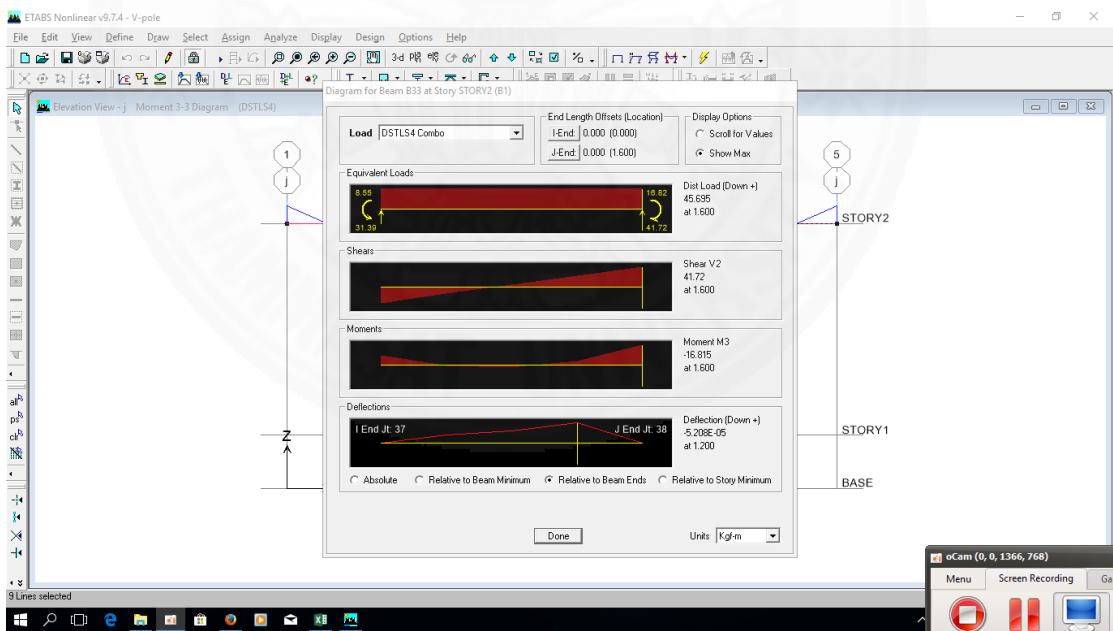
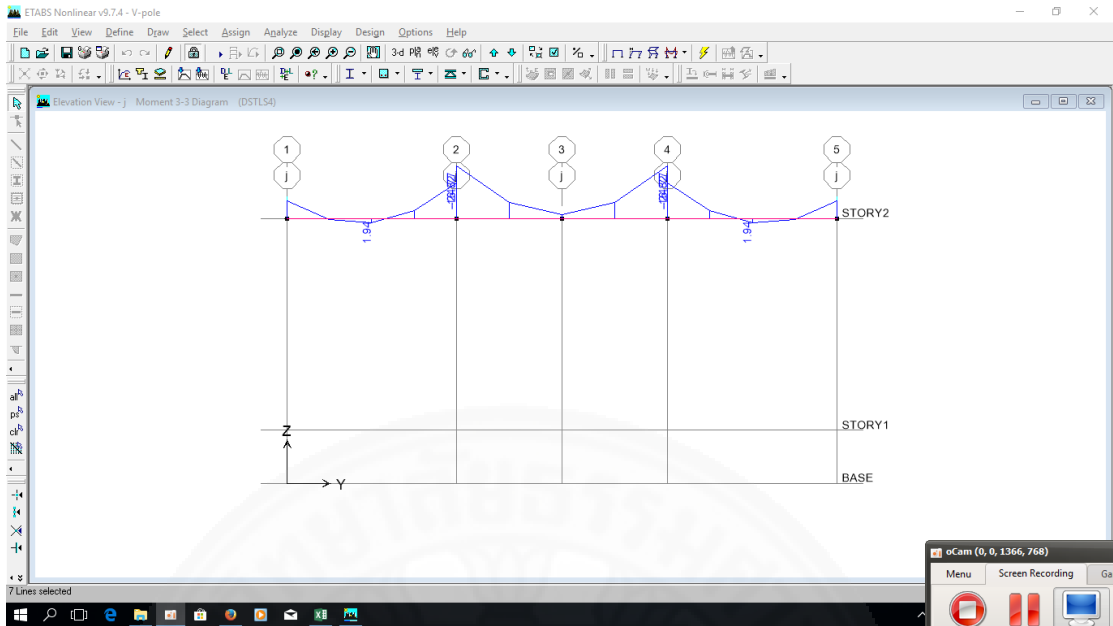
ภาพที่ ก.28 Shear force diagram และ bending moment diagram ที่หน้าตัด g (V-pole)



ภาพที่ ก.29 Shear force diagram และ bending moment diagram ที่หน้าตัด h (V-pole)

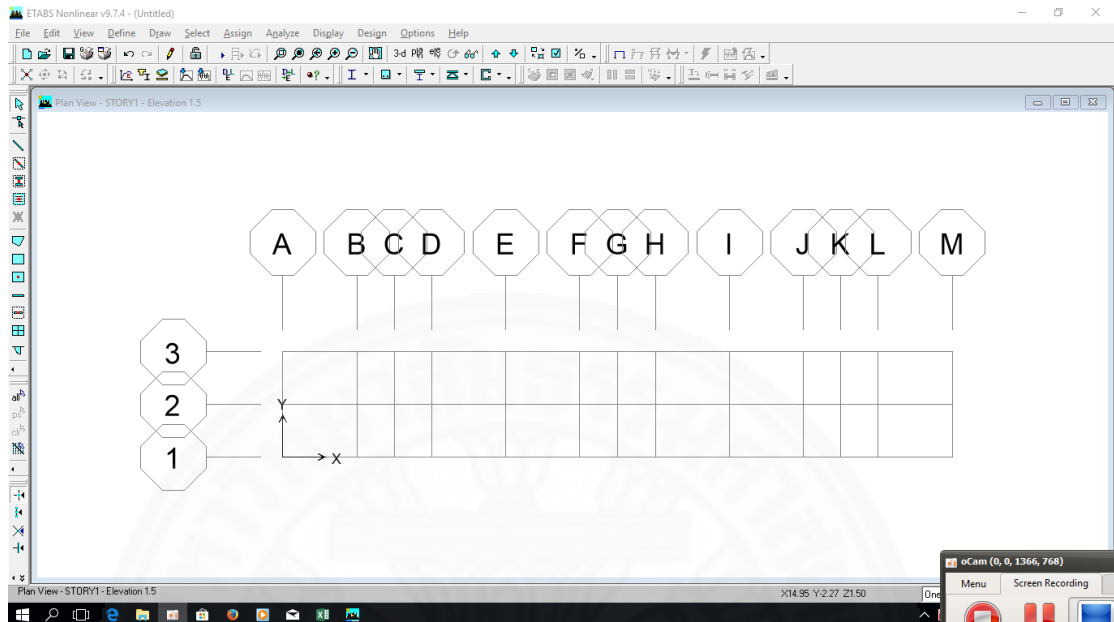


ภาพที่ ก.30 Shear force diagram และ bending moment diagram ที่หน้าตัด i (V-pole)

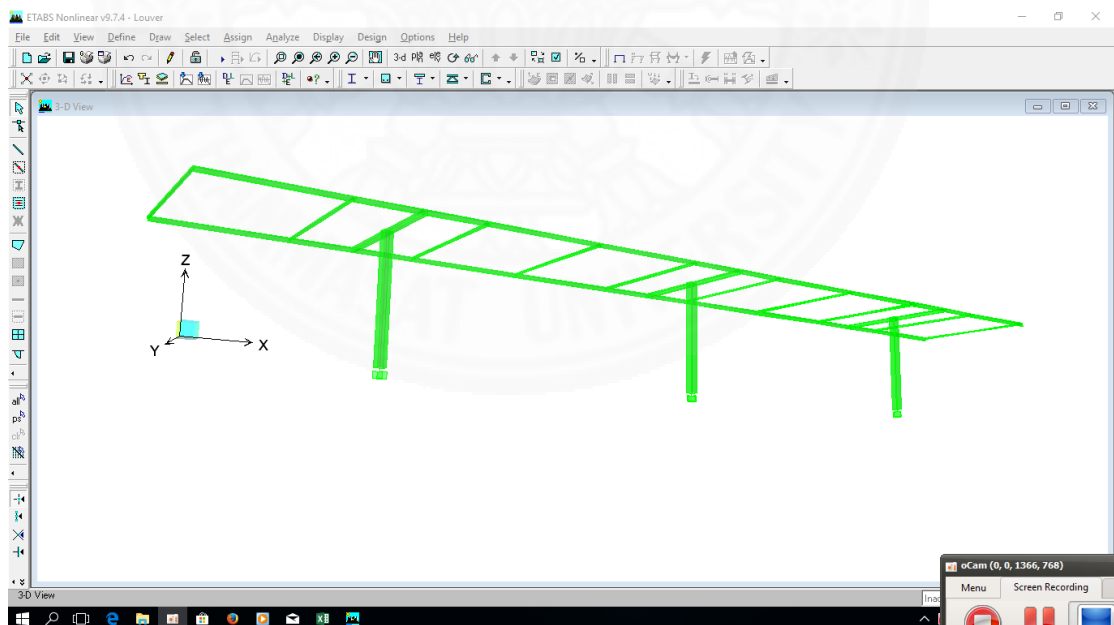


ภาพที่ ก.31 Shear force diagram และ bending moment diagram ที่หน้าตัด j (V-pole)

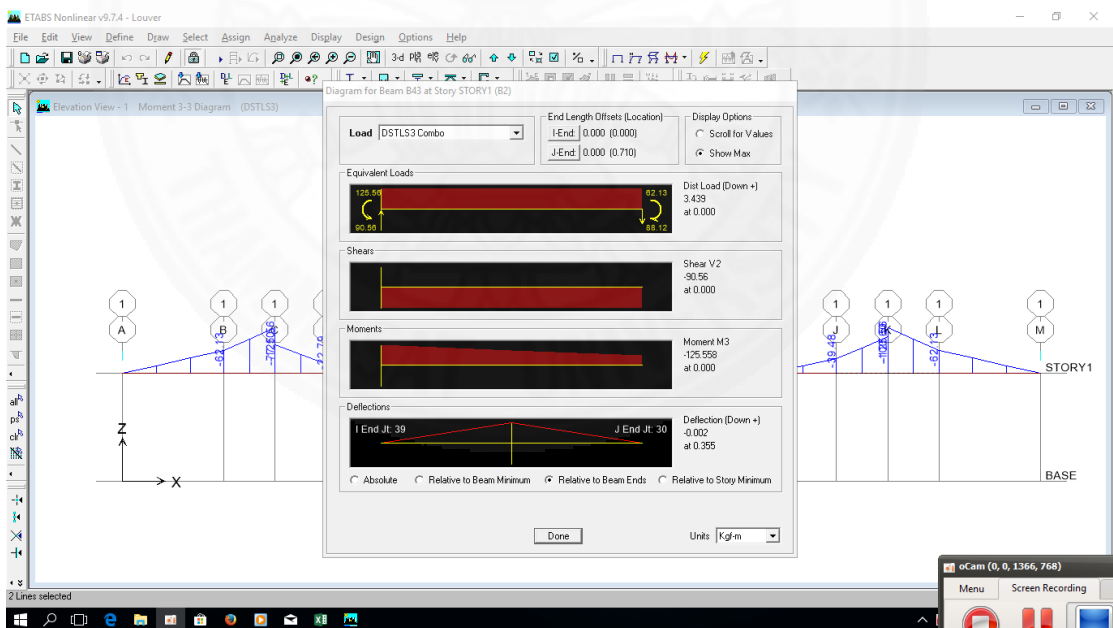
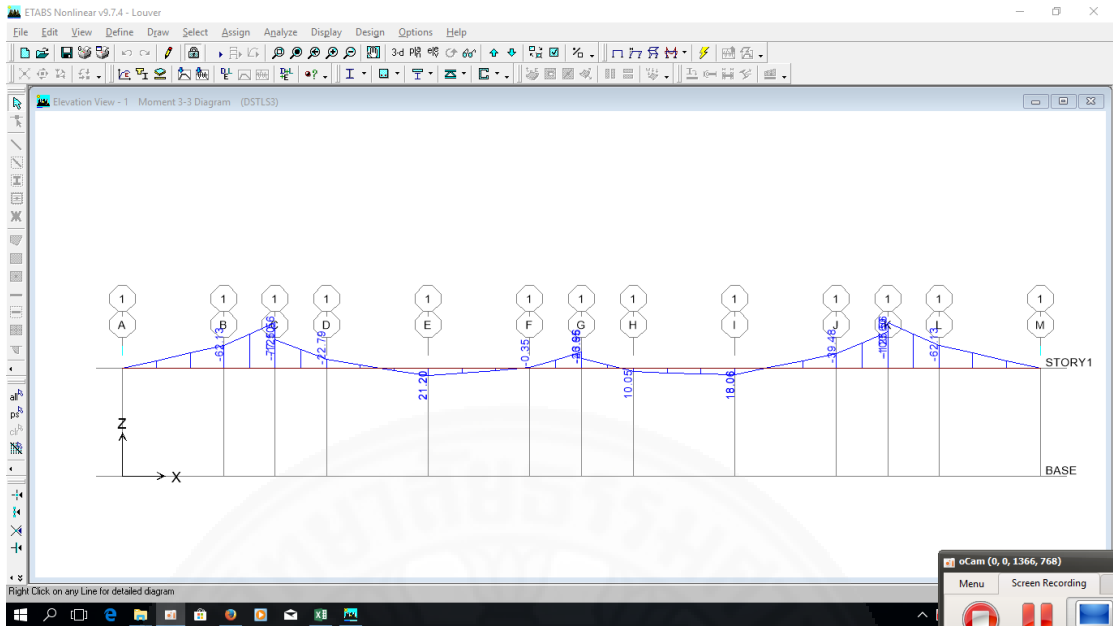
ก.3 การจำลองโครงสร้างโดยใช้โปรแกรม ETABS 9.7.4 (Louver solar tracking)



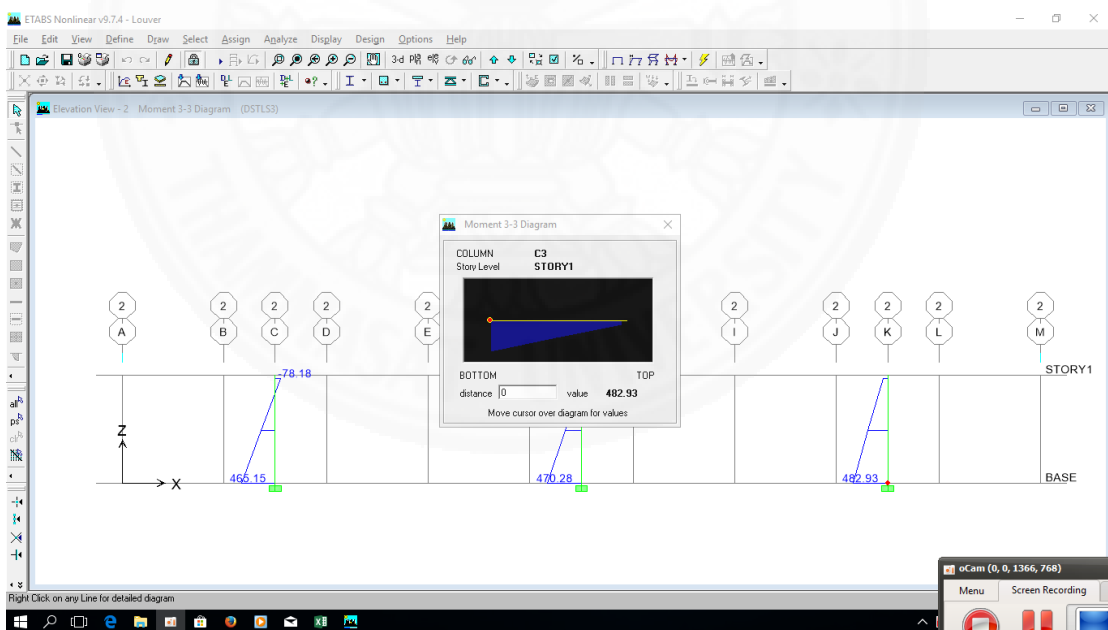
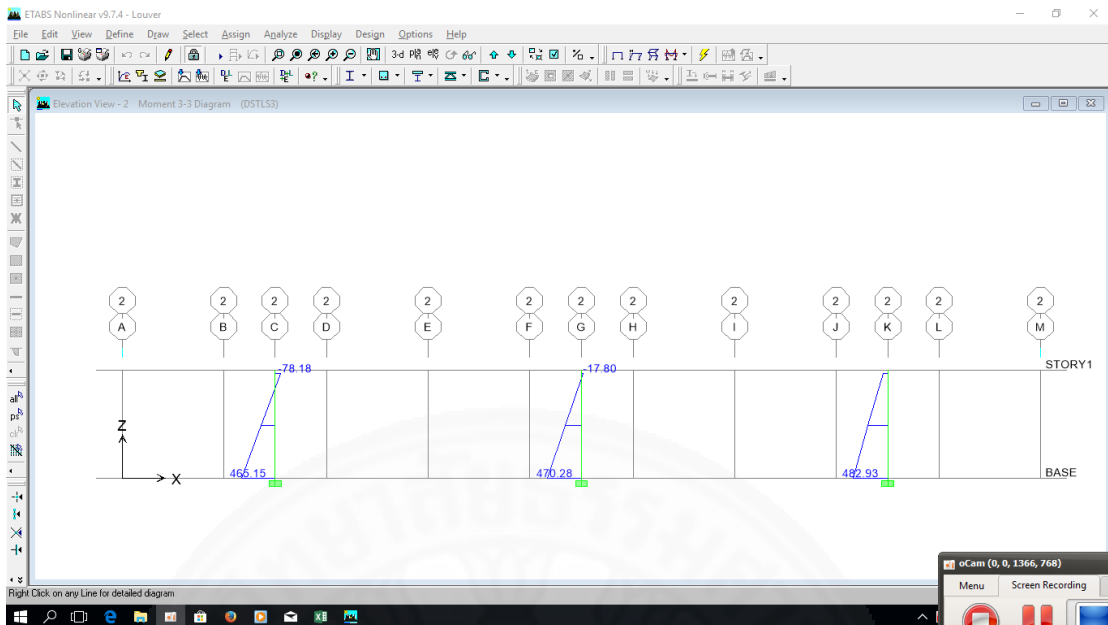
ภาพที่ ก.32 แพลนโครงสร้างของ Louver solar tracking



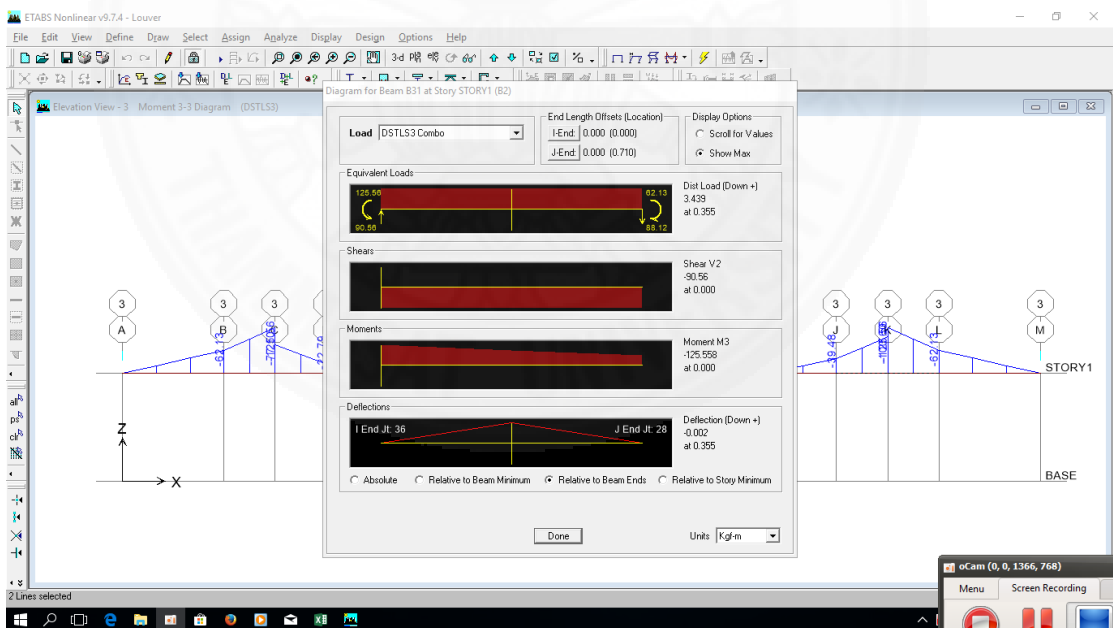
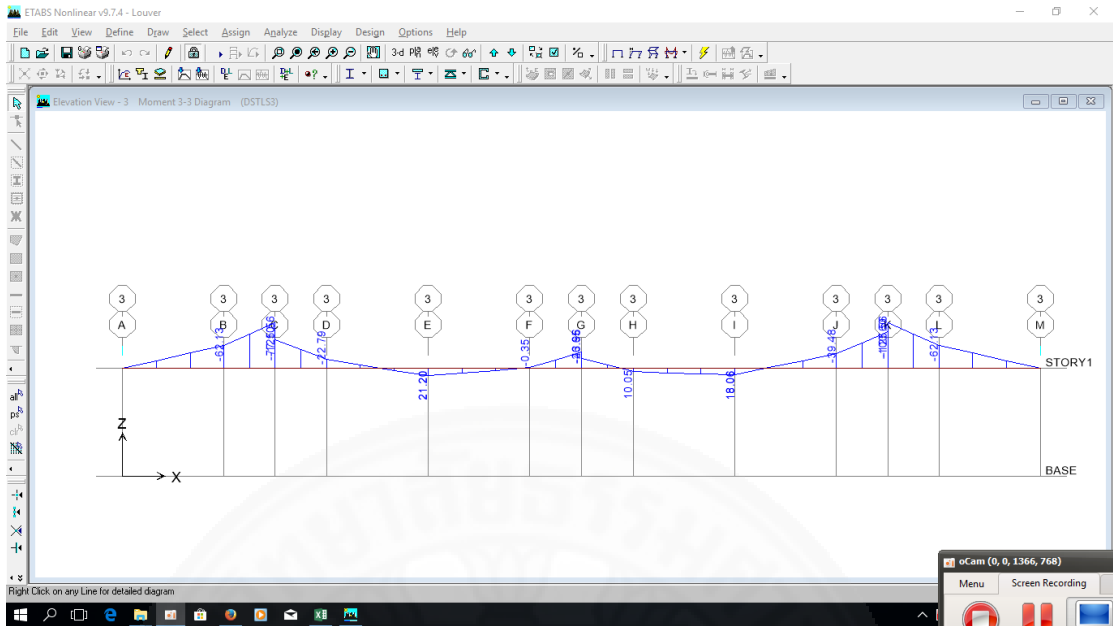
ภาพที่ ก.33 การจำลองโครงสร้างสามมิติโครงสร้างของ Louver solar tracking



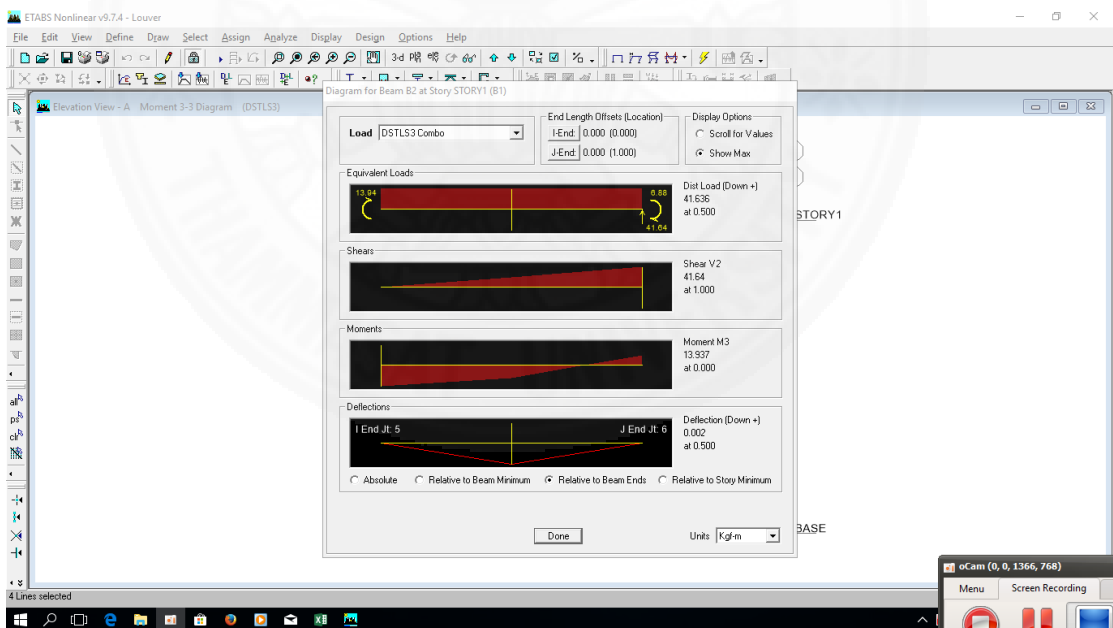
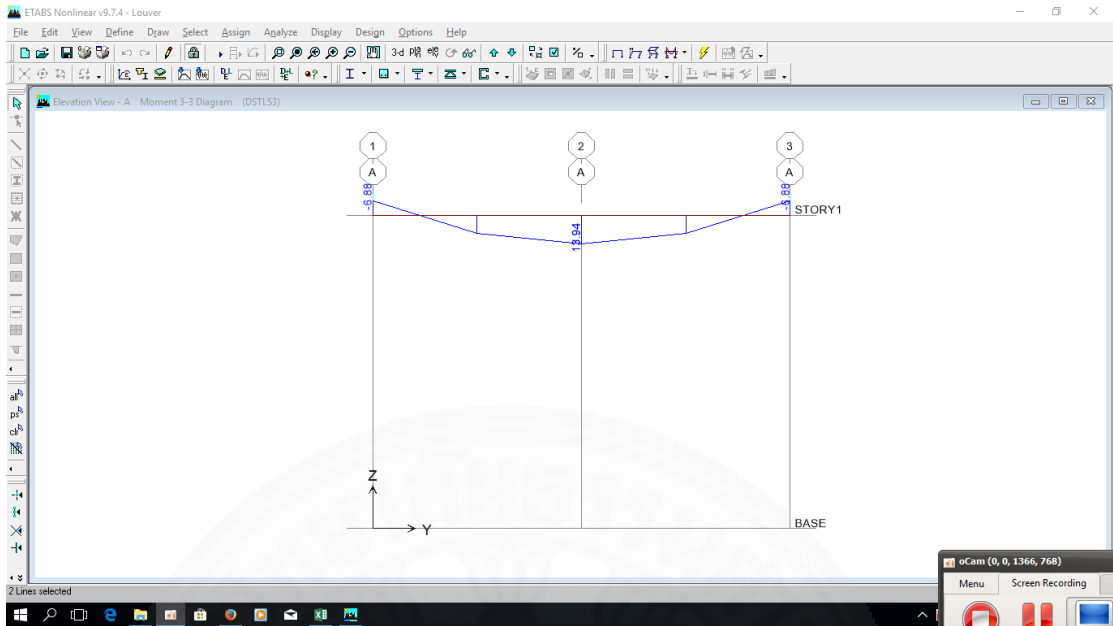
ภาพที่ ก.34 Shear force diagram และ bending moment diagram ที่หน้าตัด 1 (Louver)



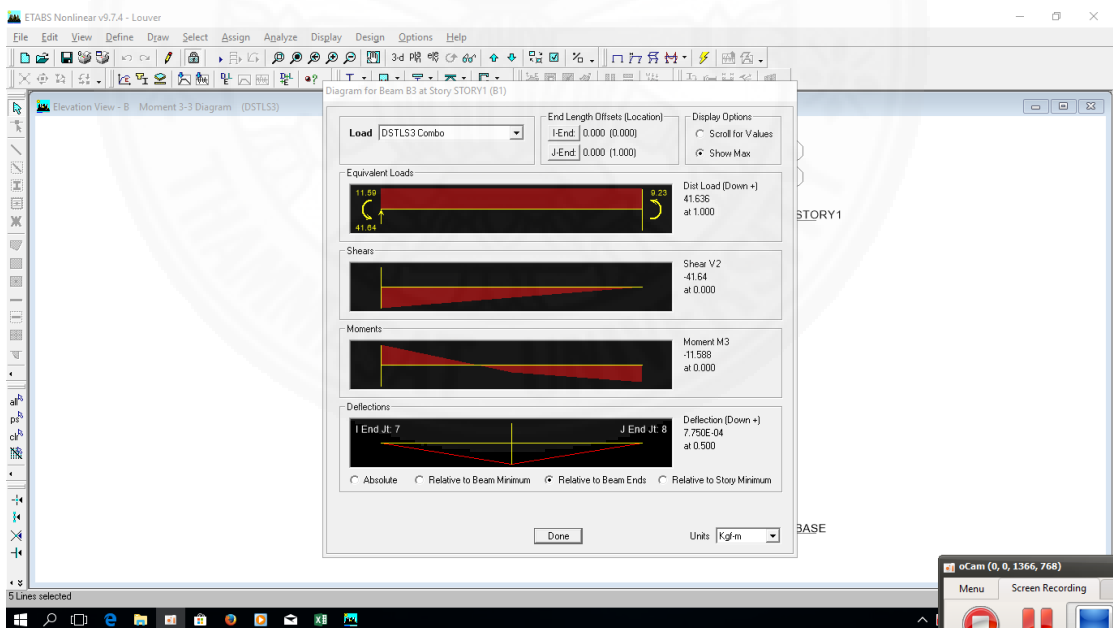
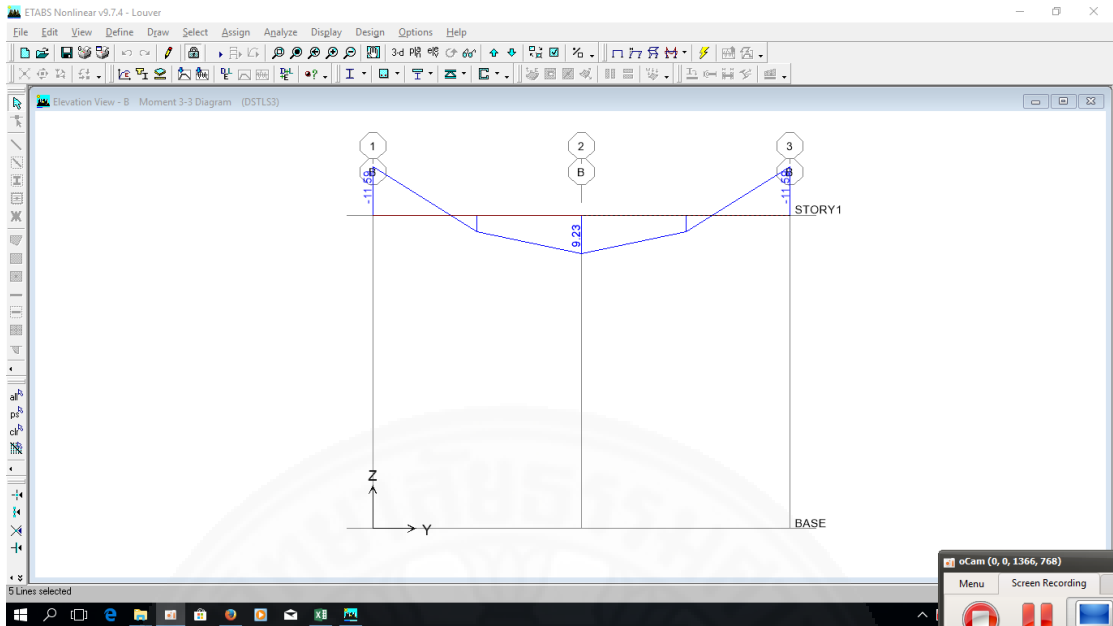
ภาพที่ ก.35 Shear force diagram และ bending moment diagram ที่หน้าตัด 2 (Louver)



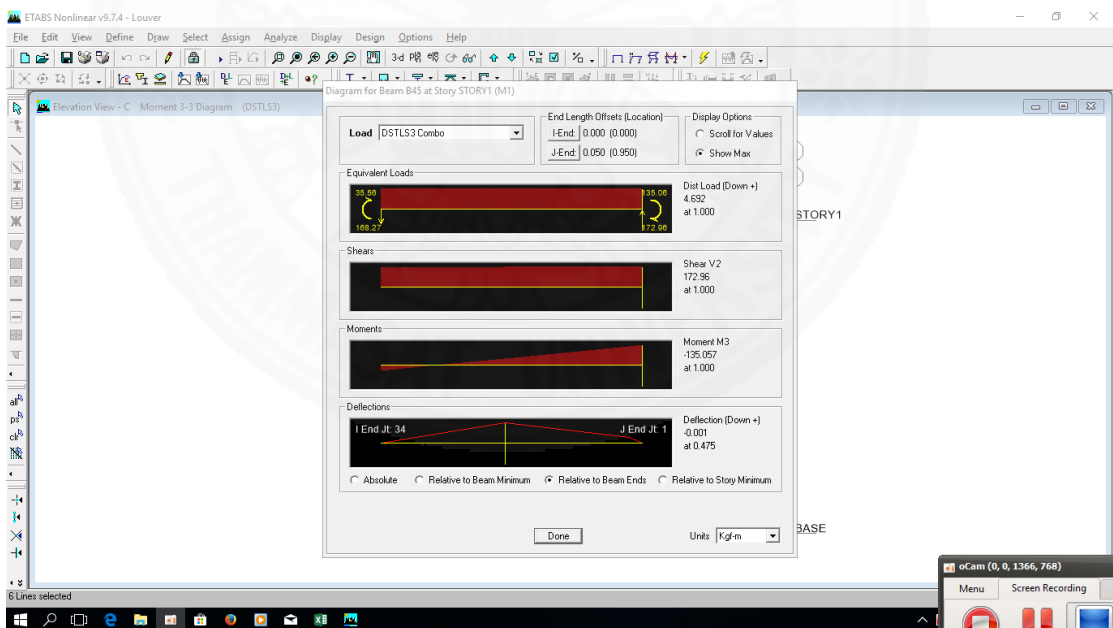
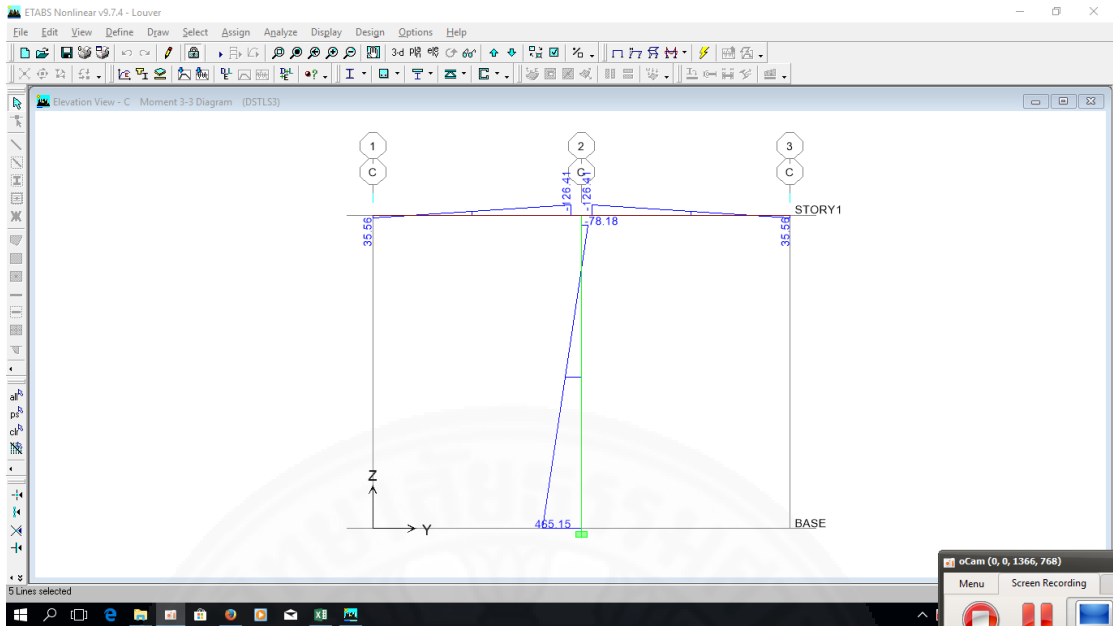
ภาพที่ ก.36 Shear force diagram และ bending moment diagram ที่หน้าตัด 3 (Louver)



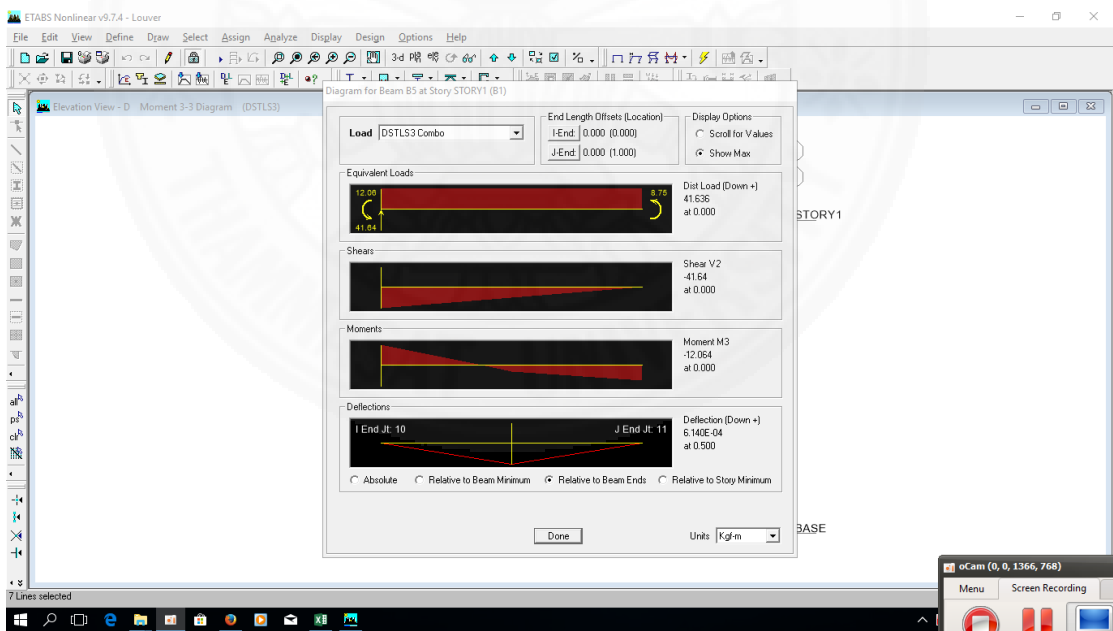
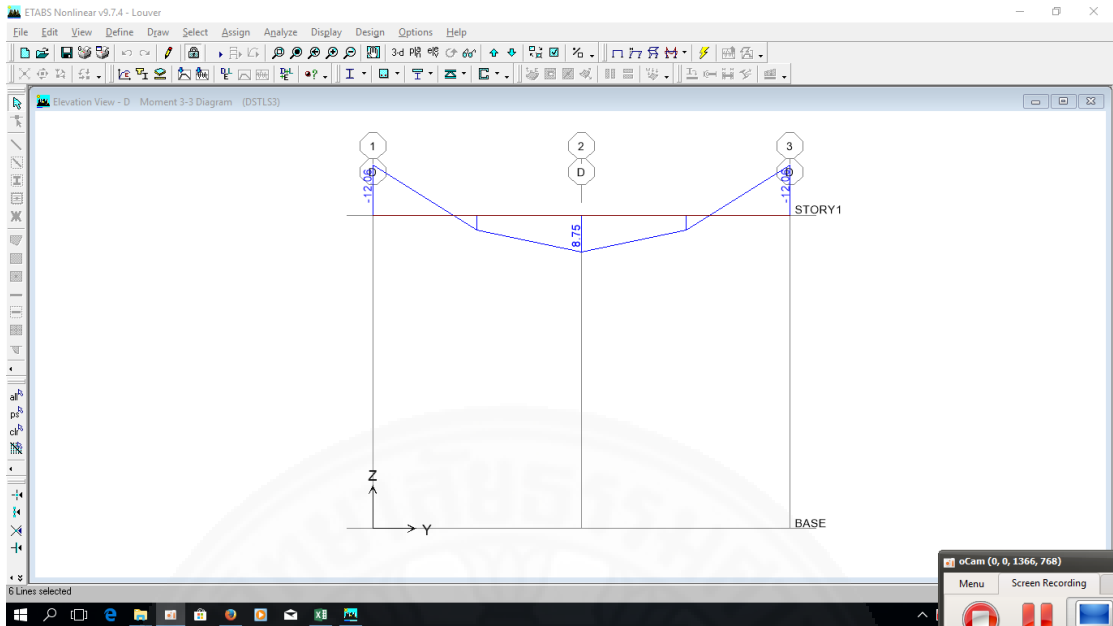
ภาพที่ ก.37 Shear force diagram และ bending moment diagram ที่หน้าตัด A (Louver)



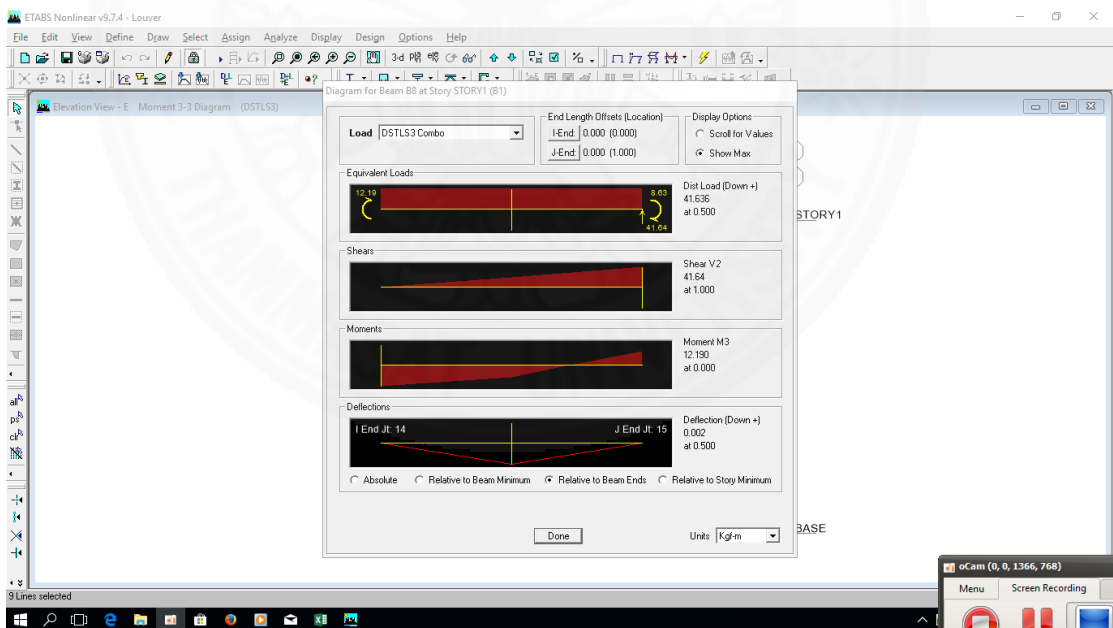
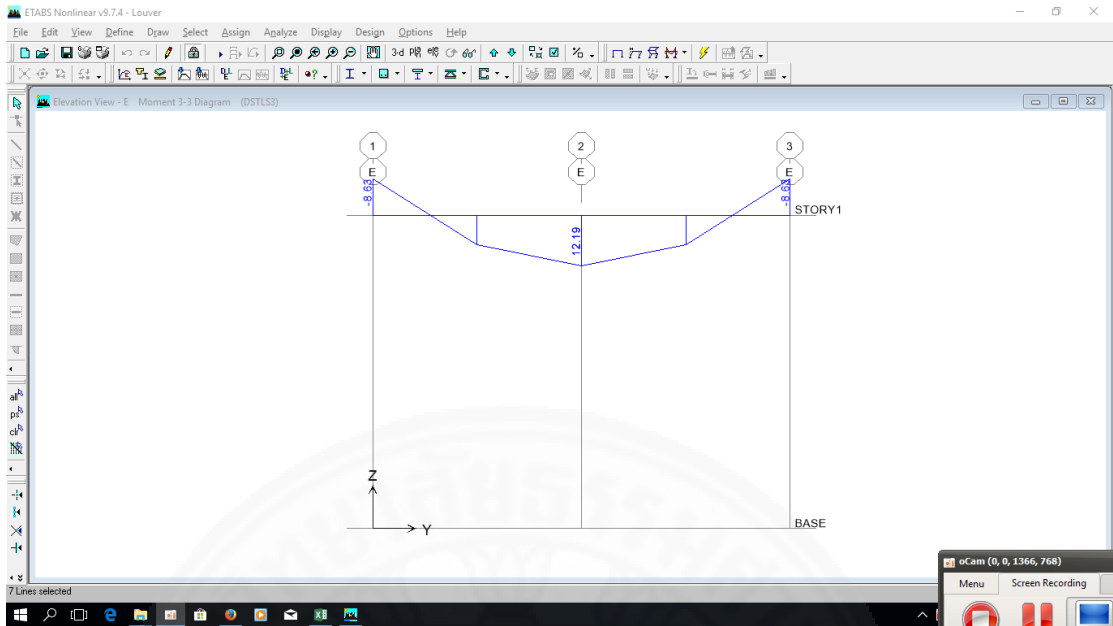
ภาพที่ ก.38 Shear force diagram และ bending moment diagram ที่หน้าตัด B (Louver)



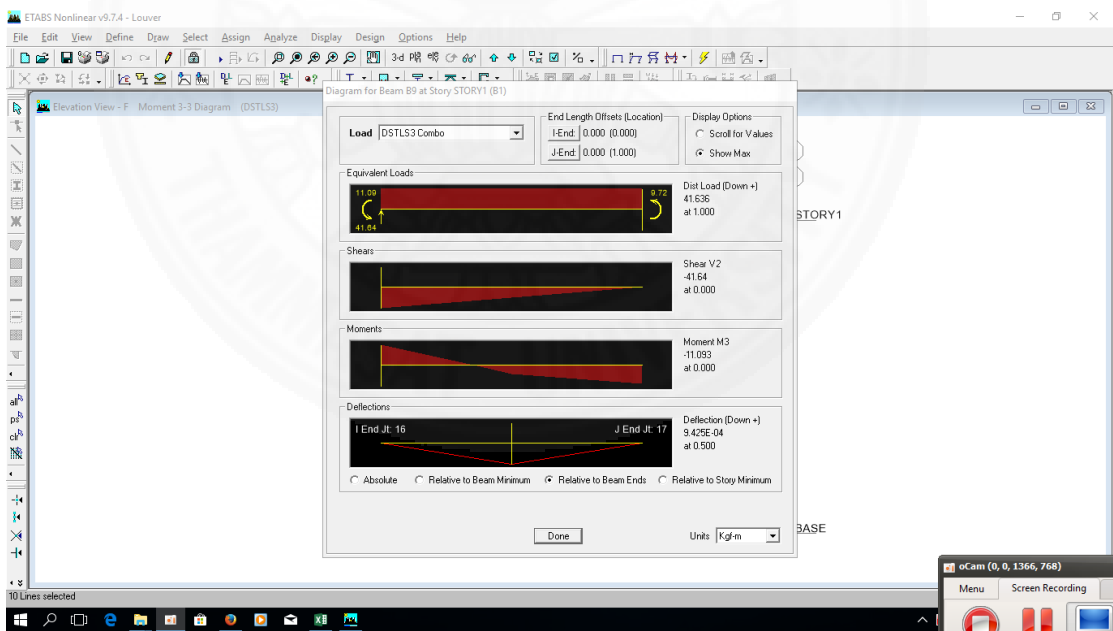
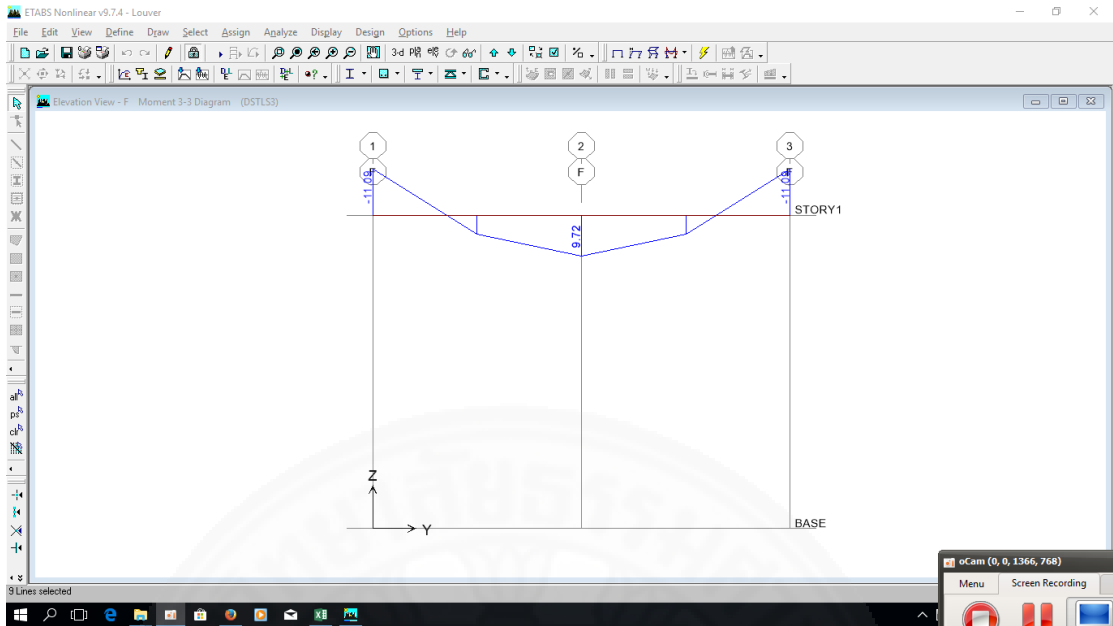
ภาพที่ ก.39 Shear force diagram และ bending moment diagram ที่หน้าตัด C (Louver)



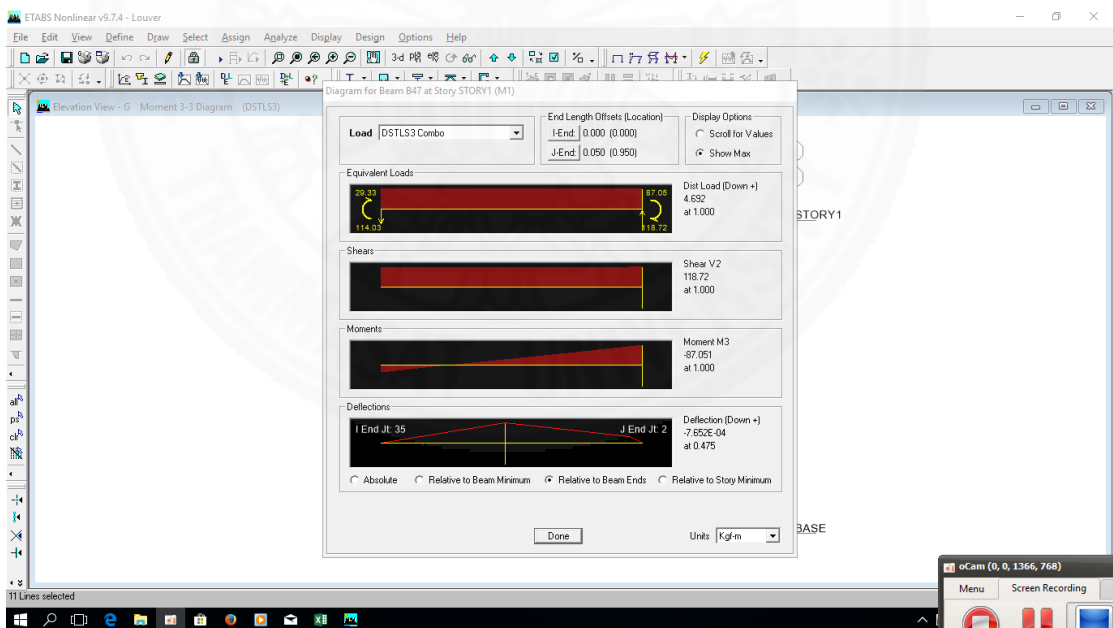
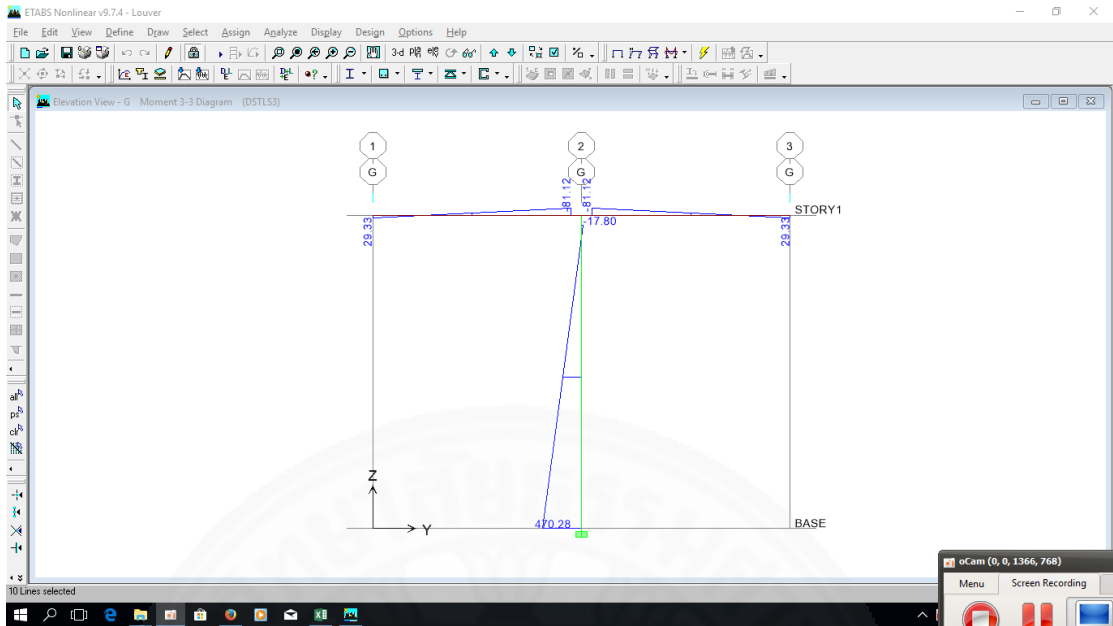
ภาพที่ ก.40 Shear force diagram และ bending moment diagram ที่หน้าตัด D (Louver)



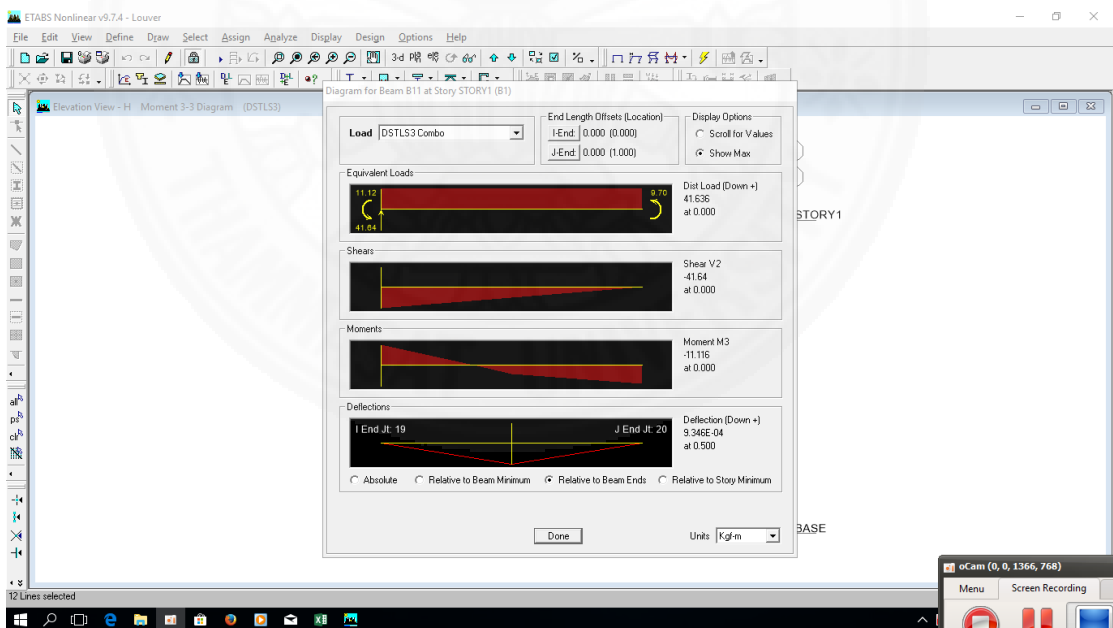
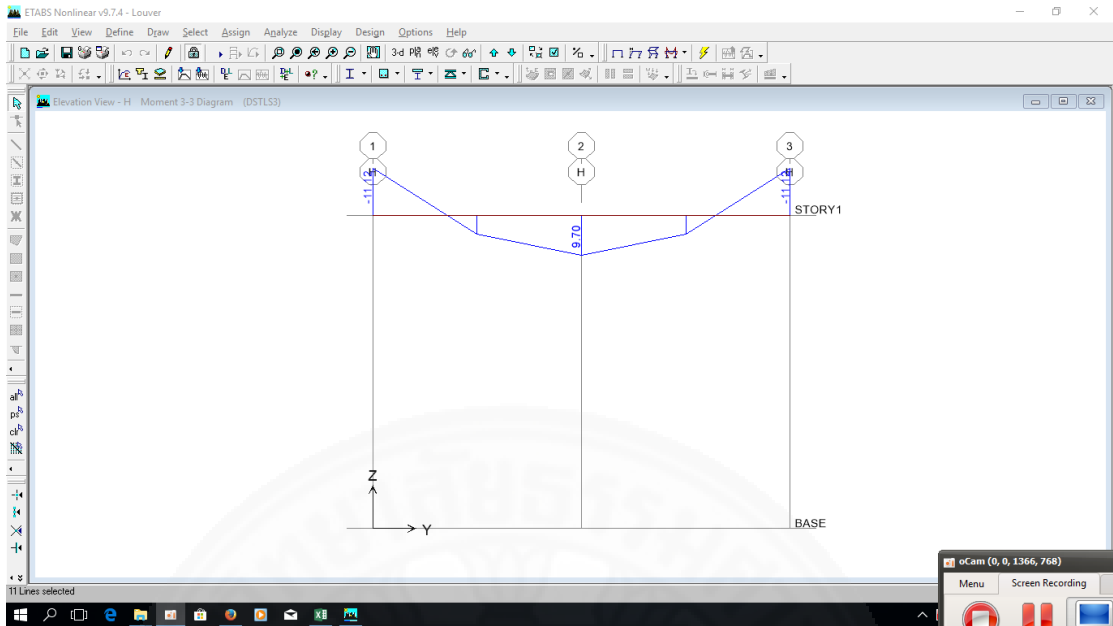
ภาพที่ ก.41 Shear force diagram และ bending moment diagram ที่หน้าตัด E (Louver)



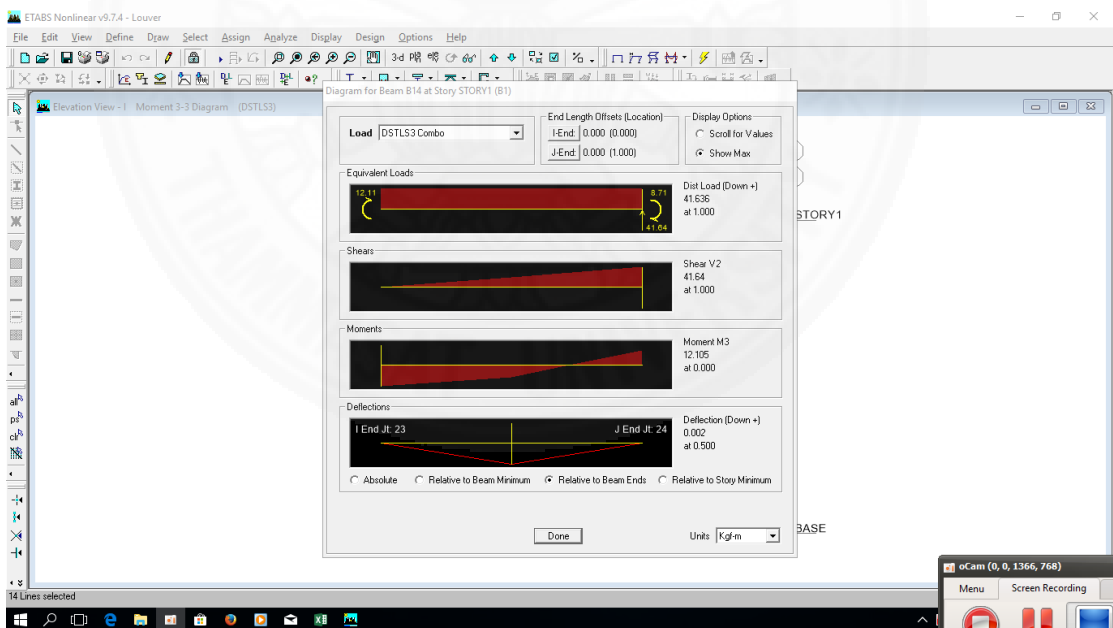
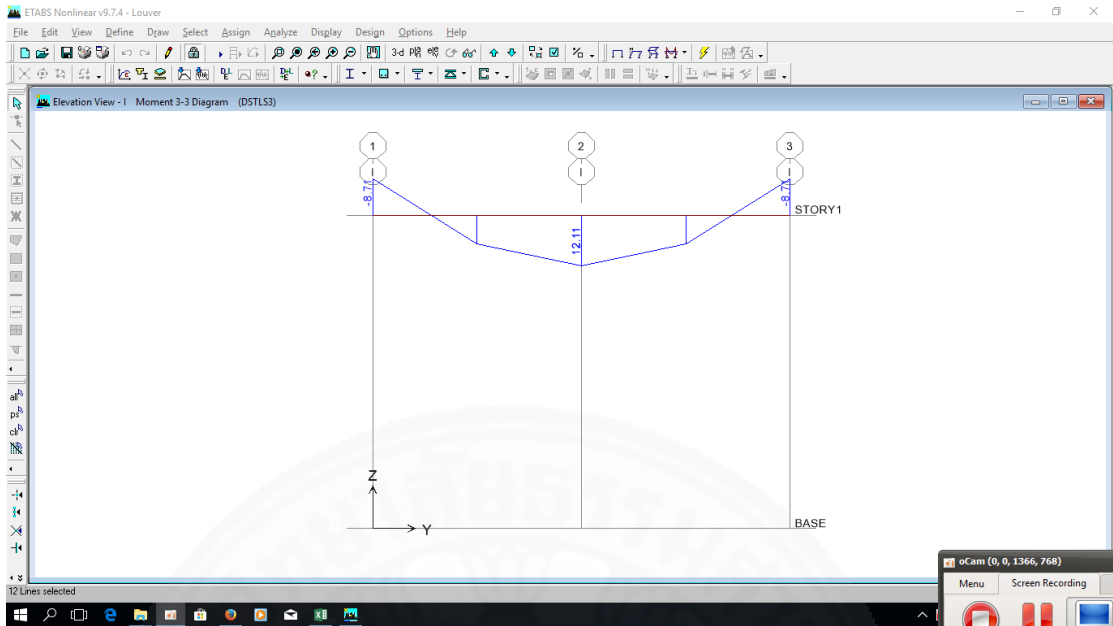
ภาพที่ ก.42 Shear force diagram และ bending moment diagram ที่หน้าตัด F (Louver)



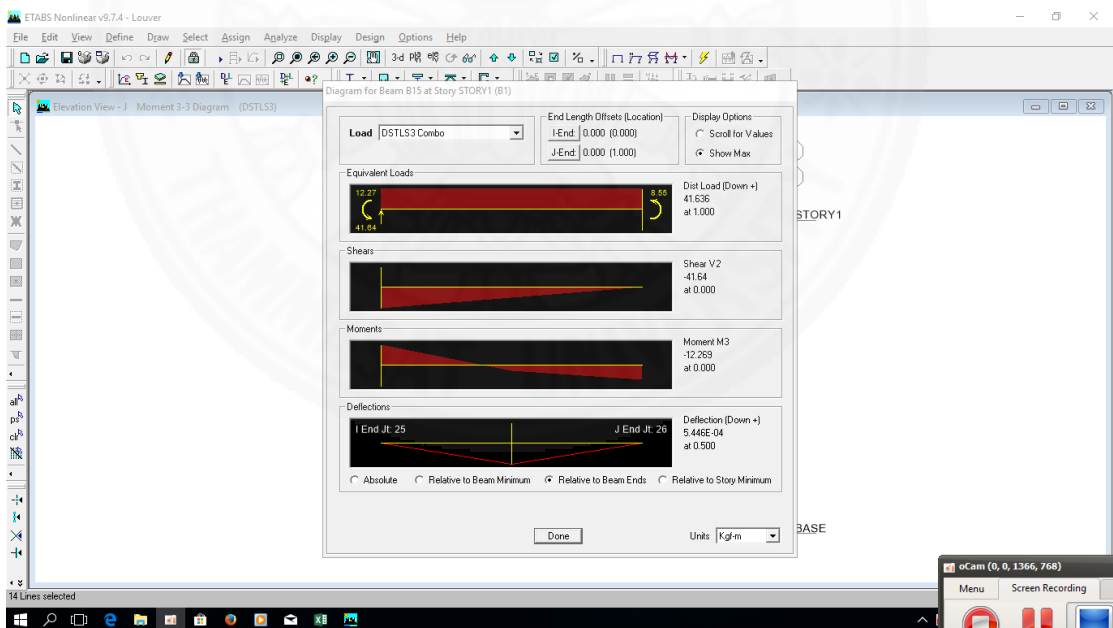
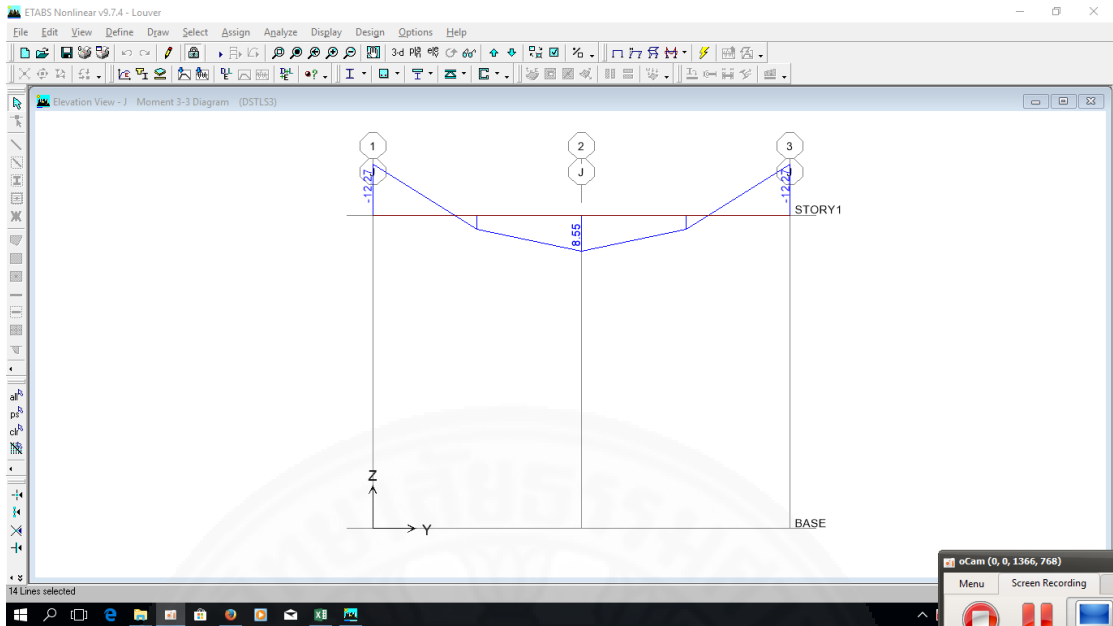
ภาพที่ ก.43 Shear force diagram และ bending moment diagram ที่หน้าตัด G (Louver)



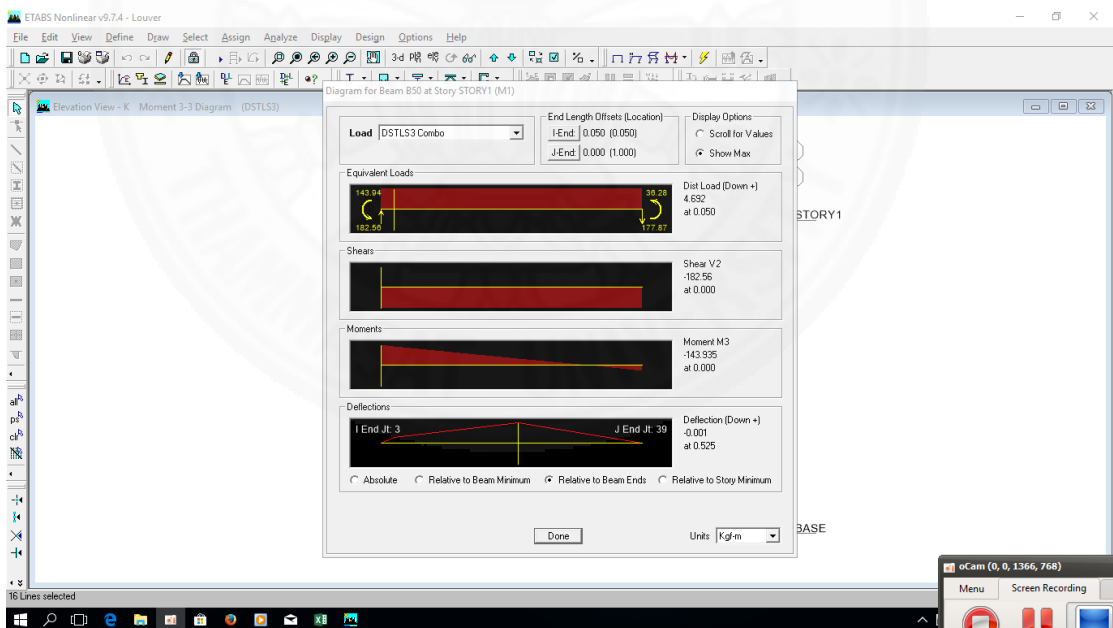
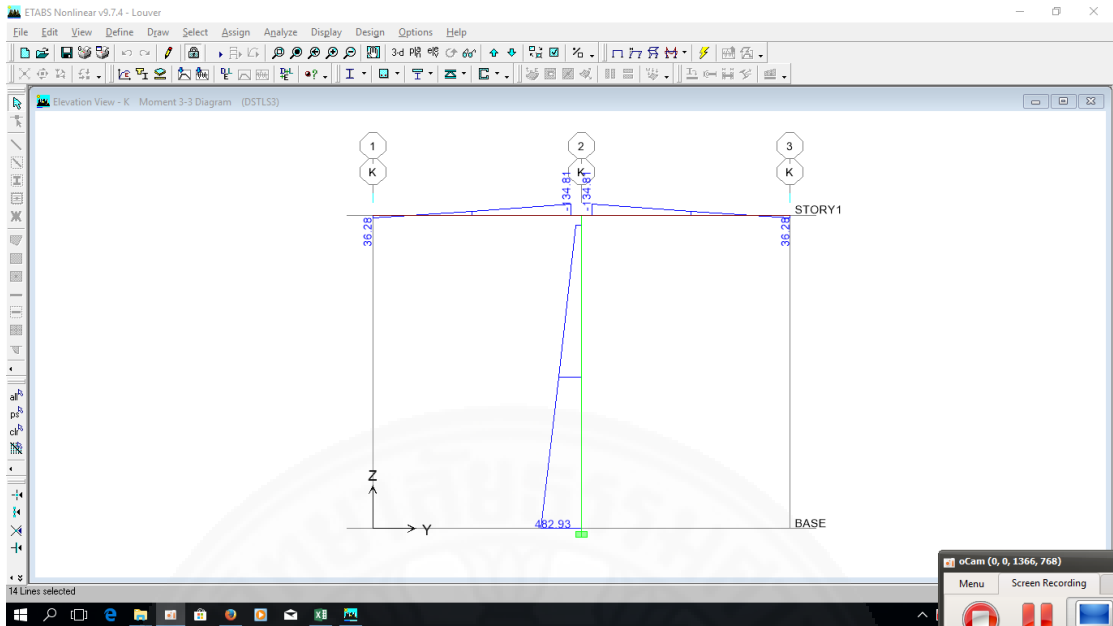
ภาพที่ ก.44 Shear force diagram และ bending moment diagram ที่หน้าตัด H (Louver)



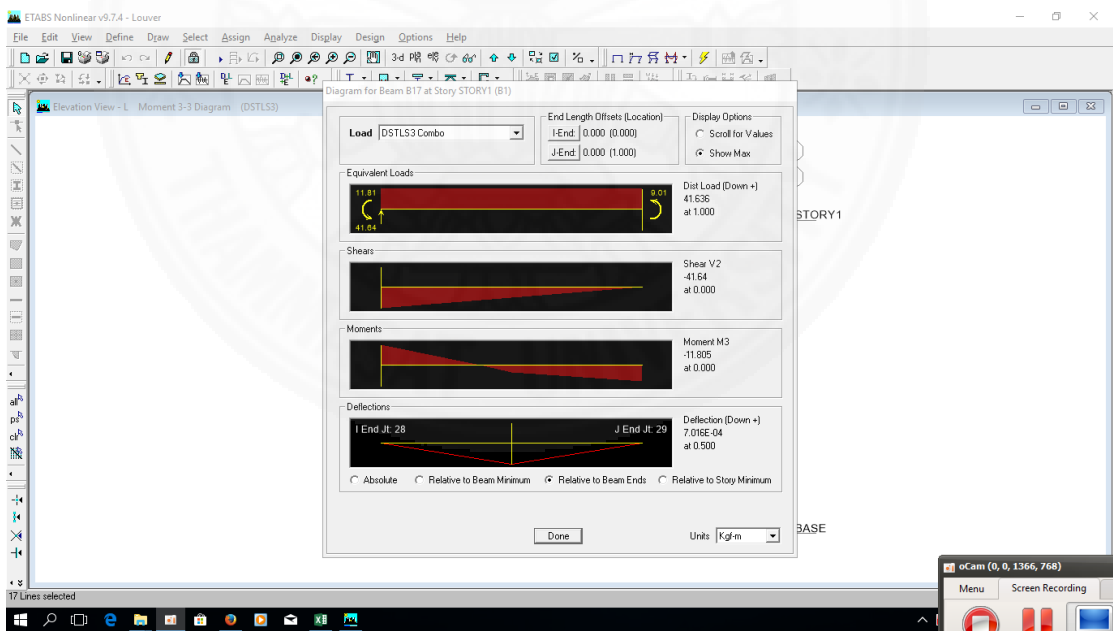
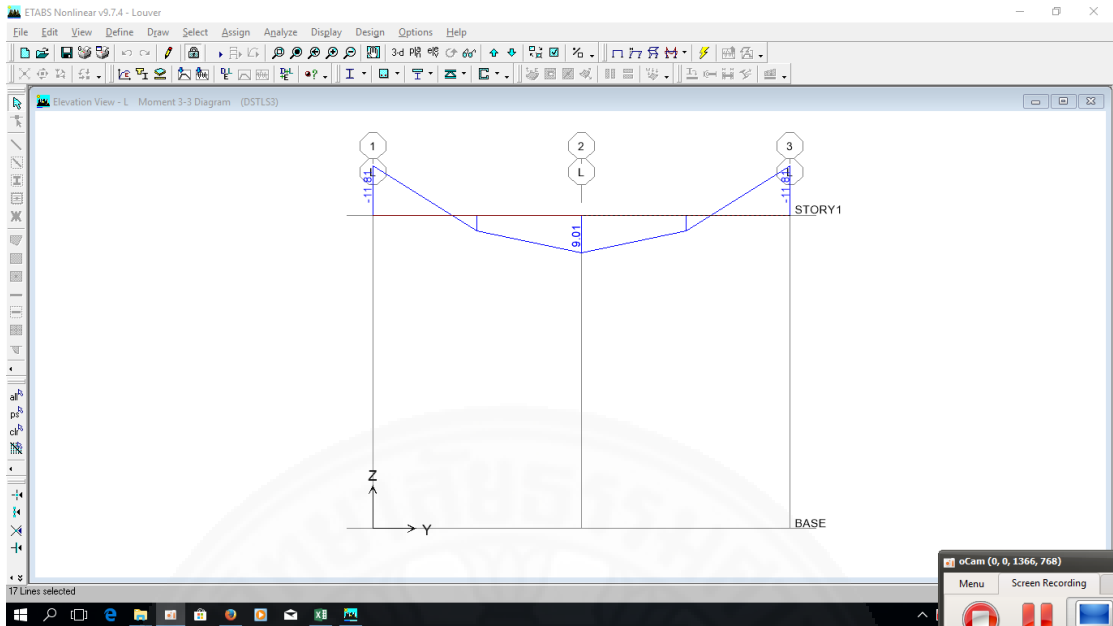
ภาพที่ ก.45 Shear force diagram และ bending moment diagram ที่หน้าตัด I (Louver)



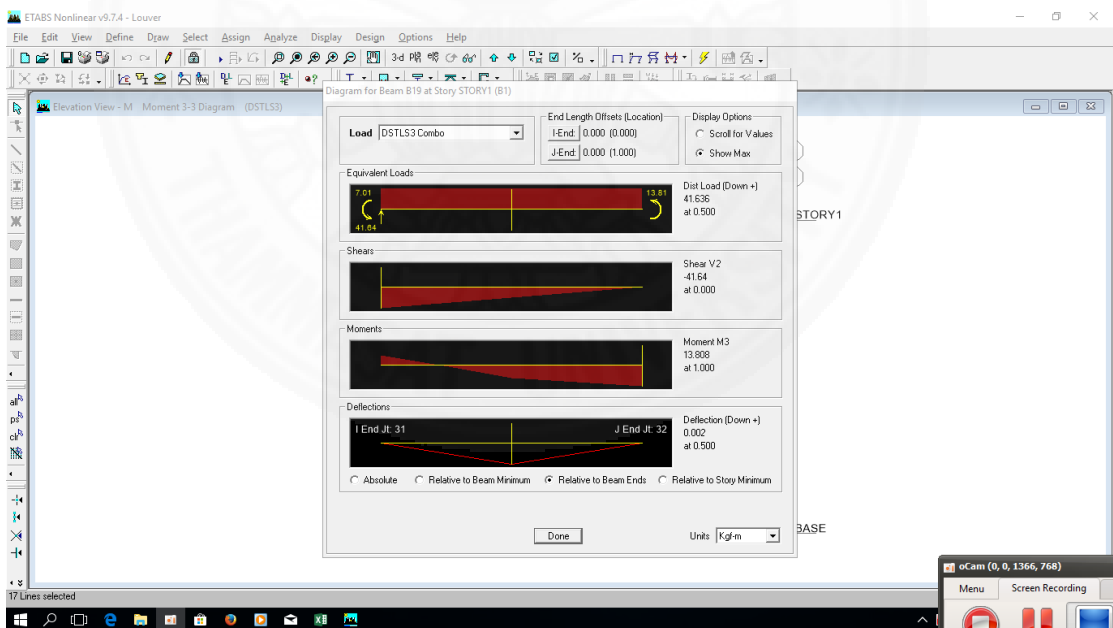
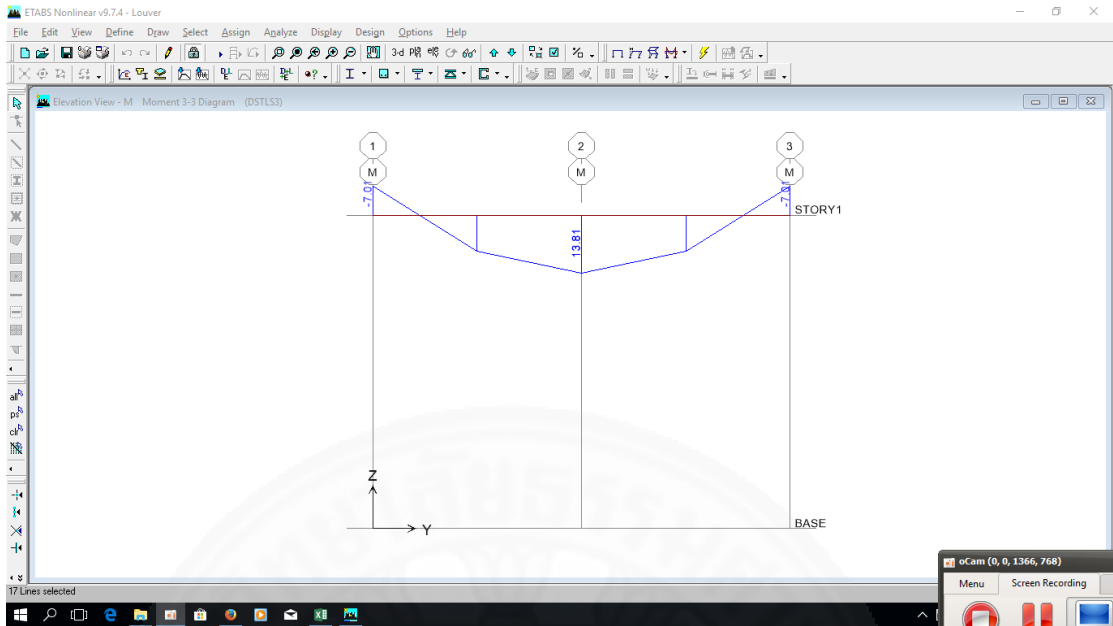
ภาพที่ ก.46 Shear force diagram และ bending moment diagram ที่หน้าตัด J (Louver)



ภาพที่ ก.47 Shear force diagram และ bending moment diagram ที่หน้าตัด K (Louver)



ภาพที่ ก.48 Shear force diagram และ bending moment diagram ที่หน้าตัด L (Louver)

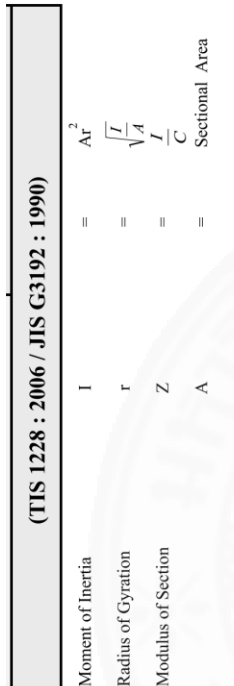


ภาพที่ ก.49 Shear force diagram และ bending moment diagram ที่หน้าตัด M (Louver)

ภาคผนวก ข
 ตารางคุณสมบัติและราคาเหล็ก

ตารางที่ ข.1 Carbon Steel Pipe (TIS 1228: 2006/JIS G3192: 1990)

Nominal dimension		Outside Diameter	Thickness	Calculate Weight	Cross Sectional Area	Geometrical Moment of Inertia	Modulus of Section	Radius of Gyration
DN	D	mm	T	W	A	I	Z	r
in (mm)	mm	mm	mm	kg/m	cm ²	cm ⁴	cm ³	cm
1/2 (15)	21.7	2	2	0.97	1.24	0.61	0.56	0.7
3/4 (20)	27.2	2	2	1.24	1.58	1.26	0.93	0.89
1 (25)	34	2.3	2.3	1.41	1.8	1.41	1.03	0.88
1 1/4 (32)	42.7	2.3	2.3	1.8	2.29	2.89	1.7	1.12
1 1/2 (40)	48.6	2.3	2.3	2.29	2.92	5.97	2.8	1.43
		2.5	2.5	2.48	3.16	6.4	3	1.42
		2.3	2.3	2.63	3.35	8.99	3.7	1.64
2 (50)	60.5	2.5	2.5	2.84	3.62	9.65	3.97	1.63
		2.8	2.8	3.16	4.03	10.6	4.36	1.62
		3.2	3.2	3.58	4.56	11.8	4.86	1.61
2 1/2 (65)	76.3	2.3	2.3	3.3	4.21	17.8	5.9	2.06
		3.2	3.2	4.52	5.76	23.7	7.84	2.03
		4	4	5.57	7.1	28.5	9.41	2
2 1/2 (65)	76.3	2.8	2.8	5.08	6.47	43.7	11.5	2.6
		3.2	3.2	5.77	7.35	49.2	12.9	2.59
		4	4	7.13	9.09	59.5	15.6	2.58

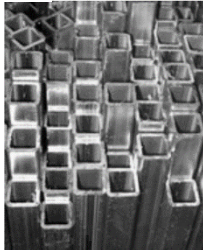
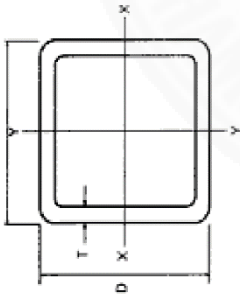


ตารางที่ ข.1 Carbon Steel Pipe (TIS 1228: 2006/JIS G3192: 1990) (ต่อ)

(TIS 1228 : 2006 / JIS G3192 : 1990)							
Nominal dimension	Outside Diameter	Thickness	Calculate Weight	Cross Sectional Area	Geometrical Moment of Inertia	Modulus of Section	Radius of Gyration
DN	D	T	W	A	I	Z	r
in (mm)	mm	mm	kg/m	cm ²	cm ⁴	cm ³	cm
3 (80)	89.1	2.8	5.96	7.59	70.7	15.9	3.05
		3.2	6.78	8.64	79.8	17.9	3.04
3 1/2 (90)	101.6	3.2	7.76	9.89	120	23.6	3.48
		4	9.63	12.26	146	28.8	3.45
		3.2	8.77	11.17	172	30.2	3.93
4 (100)	114.3	3.5	9.58	12.18	187	32.7	3.92
		4.5	12.2	15.52	234	41	3.89
		3.6	12.1	15.4	357	51.1	4.82
5 (125)	139.8	4	13.4	17.07	394	56.3	4.8
		4.5	15	19.13	438	62.7	4.79
		6	19.8	25.22	566	80.2	4.74
6 (150)	165.2	4.5	17.8	22.72	734	88.9	5.68
		5	19.8	25.16	808	97.8	5.67
		6	23.6	30.01	952	115	5.63
8 (200)	216.3	7.1	27.7	35.26	1,100.00	134	5.6
		4.5	23.5	29.94	1,680.00	155	7.49
		5.8	30.1	38.36	2,130.00	197	7.45
		7	36.1	46.03	2,520.00	233	7.4
		8.2	42.1	53.61	2,910.00	269	7.36

ตารางที่ ๒.2 Square Tube (TIS 1228: 2006/JIS G3192: 1990)

Side Length		Thickness	Calculate Weight	Cross Sectional Area	Geometrical Moment of Inertia	Modulus of Section	Radius of Gyration
D x D		T	W	A	$I_x = I_y$	$Z_x = Z_y$	$r_x = r_y$
in	mm	mm	kg/m	cm ²	cm ⁴	cm ³	cm
1 x 1	25 x 25	2	1.36	1.74	1.48	1.19	0.92
		2.3	1.53	1.97	1.61	1.29	0.9
		2.6	1.65	2.1	1.63	1.31	0.88
		3.2	1.91	2.44	1.75	1.4	0.85
$1\frac{1}{4} \times 1\frac{1}{4}$	32 x 32	2.3	2.04	2.6	3.71	2.32	1.2
		3.2	2.69	3.42	4.54	2.84	1.15
		2.3	2.47	3.15	6.54	3.44	1.44
$1\frac{1}{2} \times 1\frac{1}{2}$	38 x 38	3.2	3.29	4.19	8.18	4.3	1.4
		1.6	2.38	3.03	11.7	4.68	1.96
		2	2.91	3.7	13.9	5.57	1.94
		2.3	3.34	4.25	15.9	6.34	1.93
		3.2	4.5	5.73	20.4	8.16	1.89
2 x 2	50 x 50	3.6	4.9	6.24	21.4	8.58	1.85
		4	5.35	6.81	22.9	9.15	1.83
		5	6.39	8.14	25.7	10.3	1.78



(TIS 1228 : 2006 / JIS G3192 : 1990)

Moment of Inertia $I = \frac{Ar^2}{2}$

Radius of Gyration $r = \sqrt{\frac{I}{A}}$

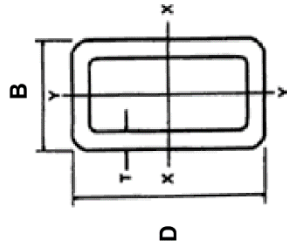
Modulus of Section $Z = \frac{I}{C}$

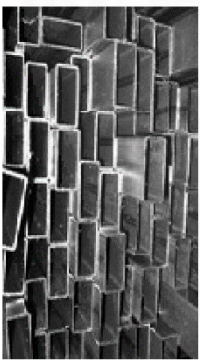
Sectional Area $A =$

ตารางที่ ๒.2 Square Tube (TIS 1228: 2006/JIS G3192: 1990) (ต่อ)

(TIS 1228 : 2006 / JIS G3192 : 1990)							
Side Length		Thickness	Calculate Weight	Cross Sectional Area	Moment of Inertia	Modulus of Section	Radius of Gyration
D x D	T	W	A	$I_x = I_y$	$Z_x = Z_y$	$r_x = r_y$	
in	mm	kg/m	cm ²	cm ⁴	cm ³	cm	
3 x 3	2.3	5.14	6.55	57.1	15.2	2.95	
	3.2	7.01	8.93	75.5	20.1	2.91	
	4	8.59	10.95	90.2	24.1	2.87	
4 x 4	4.5	9.55	12.17	98.6	26.3	2.85	
	2.3	6.95	8.85	140	27.9	3.97	
	3.2	9.52	12.13	187	37.5	3.93	
5 x 5	4	11.7	14.95	226	45.3	3.89	
	4.5	13.1	16.67	249	49.9	3.87	
	6	17	21.63	311	62.3	3.79	
6 x 6	3.2	12	15.33	376	60.1	4.95	
	4.5	16.6	21.17	506	80.9	4.89	
	5	18.3	23.36	553	88.4	4.86	
100 x 100	6	21.7	27.63	641	103	4.82	
	4.5	20.1	25.67	896	120	5.91	
	5	22.3	28.36	982	131	5.89	
125 x 125	6	26.4	33.63	1,150.00	153	5.84	
	6.3	27.4	34.8	1,174.00	156	5.8	

ตารางที่ ข.3 Rectangular Tube (TIS 1228: 2006/JIS G3192: 1990)





(TIS 1228 : 2006 / JIS G3192 : 1990)

Moment of Inertia $I = Ar^2$

Radius of Gyration $r = \sqrt{\frac{I}{A}}$

Modulus of Section $Z = \frac{I}{C}$

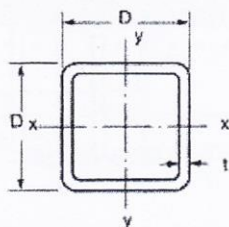
Sectional Area

Side Length		Thickness	Calculate Weight	Cross Sectional Area	Moment of Inertia		Modulus of Section		Radius of Gyration	
					Ix	Iy	Zx	Zy	rx	ry
D x B	mm	T	W	A	Ix	Iy	Zx	Zy	rx	ry
	in	mm	kg./m	cm ²	cm ⁴	cm ⁴	cm ³	cm ³	cm	cm
2 x 1	50 x 25	2	2.12	2.7	8.17	2.76	3.27	2.2	1.74	1.01
		2.3	2.44	3.1	9.31	3.1	3.72	2.48	1.68	0.96
		3.2	3.24	4.13	11.6	3.8	4.65	3.04	1.68	0.96
		3.6	3.48	4.44	11.7	3.86	4.7	3.09	1.63	0.93
3 x 1 $\frac{1}{4}$	75 x 38	2.3	3.81	4.85	34.6	12	9.23	6.3	2.67	1.57
		3.2	5.15	5.15	45	15.4	12	8.09	2.62	1.53
3 x 1 $\frac{3}{4}$	75 x 45	1.6	2.88	3.67	28.4	12.9	7.56	5.75	2.78	1.88
		2.3	4.06	5.17	38.9	17.6	10.4	7.82	2.74	1.84
4 x 2	100 x 50	3.2	5.5	7.01	50.8	22.8	13.5	10.1	2.69	1.8
		2	4.48	5.7	74.1	25.5	14.8	10.2	3.61	2.11
		2.3	5.14	6.55	84.8	29	17	11.6	3.6	2.1
		3.2	7.01	8.93	112	38	22.5	15.2	3.55	2.06
4 x 2	100 x 50	3.6	7.72	9.84	121	40.9	24.1	16.3	3.5	2.04
		4	8.59	10.95	142	46.7	28.4	18.7	3.55	2.03
4.5	9.55	12.17	147	48.9	29.3	19.5	3.47	2	2	

ตารางที่ ข.3 Rectangular Tube (TIS 1228: 2006/JIS G3192: 1990) (ต่อ)

(TIS 1228 : 2006 / JIS G3192 : 1990)										
Side Length		Thickness	Calculate Weight	Cross Sectional Area	Moment of Inertia		Modulus of Section		Radius of Gyration	
in	D x B mm	T mm	W kg./m	A cm ²	I _x cm ⁴	I _y cm ⁴	Z _x cm ³	Z _y cm ³	r _x cm	r _y cm
5 x 3	125 x 75	2.3	6.95	8.85	192	87.5	30.6	23.3	4.65	3.14
		3.2	9.52	12.13	257	117	41.1	31.1	4.6	3.1
		4	11.7	14.95	311	141	49.7	37.5	4.56	3.07
6 x 2	150 x 50	4.5	13.1	16.67	342	155	54.8	41.2	4.53	3.04
		6	17	21.63	428	192	68.5	51.1	4.45	2.98
		3.2	9.63	12.13	314.92	55.71	42.61	22.61	5.16	2.17
8 x 4	200 x 100	4.5	13.5	17.03	423.93	75.75	53.35	29.82	5.05	2.11
		6.3	18.77	22.84	536.98	93.65	72.76	36.87	4.93	2.03
		4.5	20.1	25.67	1,330.00	455	133	90.9	7.2	4.21
		6	26.4	33.63	1,700.00	577	170	115	7.12	4.14
		6.3	27.4	34.8	1,739.00	591	174	118	7.06	4.12

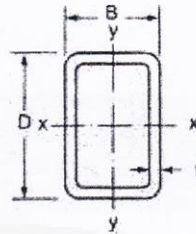
ตารางที่ ข.4 คุณสมบัติเหล็กกล่องสี่เหลี่ยมจัตุรัส



ขนาด (D × D) (mm)	ความหนา (t) (mm)	น้ำหนัก (w) (kg/m)	พื้นที่หน้าตัด (A) (cm ²)	โมเมนต์ เฉื่อยหลัก $I_x = I_y$ (cm ⁴)	ผลคูณขนานหน้าตัด $S_x = S_y$ (cm ³)	รัศมีโรเรชัน $r_x = r_y$ (cm)
25 × 25	1.6	1.12	1.432	1.28	1.02	0.34
38 × 38	1.6	1.78	2.264	4.92	2.59	1.47
50 × 50	1.6	2.38	3.032	11.71	4.68	1.96
	2.3	3.34	4.252	15.86	6.34	1.93
60 × 60	1.6	2.88	3.672	20.68	6.89	2.37
	2.3	4.06	5.172	28.31	9.44	2.34
75 × 75	2.3	5.14	6.552	57.10	15.23	2.95
	3.2	7.01	8.927	75.53	20.14	2.91
90 × 90	2.3	6.23	7.932	100.79	22.40	3.56
	3.2	8.51	10.847	134.51	29.89	3.52
100 × 100	2.3	6.95	8.852	139.73	27.95	3.97
	3.2	9.52	12.127	187.28	37.46	3.93
125 × 125	3.2	12.03	15.327	375.64	60.10	4.95
	4.0	14.87	18.948	457.23	73.16	4.91
150 × 150	5.0	22.26	28.356	982.12	130.95	5.89
	6.0	26.40	33.633	1,145.90	152.79	5.84
175 × 175	5.0	26.18	33.356	1,590.86	181.81	6.91
	6.0	31.11	39.633	1,864.02	213.03	6.86
200 × 200	6.0	35.82	45.633	2,832.74	283.27	7.88
	8.0	46.94	59.793	3,621.62	362.16	7.78
250 × 250	6.0	45.24	57.633	5,671.99	453.76	9.92
	8.0	59.50	75.793	7,315.63	585.25	9.82
300 × 300	6.0	54.66	69.633	9,963.65	664.24	11.96
	8.0	72.06	91.793	12,925.05	861.67	11.87

ที่มา: กฤต ไชยวรรณ .ความแข็งแรงของวัสดุสำหรับสถาปนิก .1 พิมพ์ครั้งที่ .มหาสารคาม :
อินทนิล, .2555

ตารางที่ ข.5 คุณสมบัติเหล็กกล่องสี่เหลี่ยมผืนผ้า



ขนาด (D×B) (mm)	ถว้หนา (t) (mm)	น้ำหนัก (w) (kg/m)	พื้นที่หน้าตัด (A) (cm ²)	โมเมนต์ล่้นคว้เบ้ $I_x = I_y$ (cm ⁴)		ผลล้ดหน้าตัด $S_x = S_y$ (cm ³)		รัศมีไล้เร้น $r_x = r_y$ (cm)	
				I_x	I_y	S_x	S_y	r_x	r_y
50 × 25	1.6	1.75	2.232	7.02	2.37	2.81	0.95	1.77	1.03
	2.3	2.44	3.102	9.31	3.10	3.72	1.24	1.73	1.00
60 × 30	1.6	2.13	2.712	12.49	4.25	4.16	1.42	2.15	1.25
	2.3	2.98	3.792	16.82	5.65	5.61	1.88	2.11	1.22
75 × 45	2.3	4.06	5.172	38.86	17.61	10.36	4.69	2.74	1.84
	3.2	5.50	7.007	50.77	22.81	13.54	6.08	2.69	1.80
90 × 45	2.3	4.60	5.862	60.98	20.75	13.55	4.61	3.23	1.88
	3.2	6.25	7.967	80.24	27.01	17.83	6.00	3.17	1.84
100 × 50	2.3	5.14	6.552	84.83	28.95	16.97	5.79	3.60	2.10
	3.2	7.01	8.927	112.29	37.95	22.46	7.59	3.55	2.06
125 × 40	2.3	5.69	7.242	130.92	21.64	20.95	3.46	4.25	1.73
	3.2	7.76	9.887	173.84	28.19	27.81	4.51	4.19	1.69
125 × 75	3.2	9.52	12.127	256.93	116.80	41.11	18.69	4.60	3.10
	4.0	11.73	14.948	310.76	140.65	49.72	22.50	4.56	3.07
150 × 80	4.5	15.20	19.369	562.76	211.47	75.03	28.20	5.39	3.30
	6.0	19.81	25.233	710.20	264.42	94.69	35.26	5.31	3.24
150 × 100	4.5	16.62	21.169	658.06	351.96	87.74	46.93	5.58	4.08
	6.0	21.69	27.833	834.68	444.19	111.29	59.23	5.50	4.01
200 × 100	4.5	20.15	25.669	1,331.44	454.64	133.14	45.46	7.20	4.21
	6.0	26.40	33.633	1,703.30	576.91	170.33	57.69	7.12	4.14

ที่มา: กฤต ไ้จวนสุวรรณ .ความแข็งแรงของวัสดุสำหรับสถาปนิก .1 พิมพ์ครั้งที่ .มหาสารคาม : อินทนิล, .2555

ตารางที่ ข.6 ราคาเหล็กกล่องสี่เหลี่ยมจัตุรัสแปซิฟิกไพพ์ (มอก. 107-2533)

ราคาท่อเหลี่ยมแปซิฟิกไพพ์ (เปลี่ยนแปลงล่าสุด 9 ต.ค.60)	ราคา
ขนาด 25 x 25 มม. หนา 2.00 มม. นน. 8.17 กก./เส้น	HS41 187 บาท/เส้น HS50 201 บาท/เส้น
ขนาด 25 x 25 มม. หนา 2.30 มม. นน. 9.19 กก./เส้น	HS41 211 บาท/เส้น HS50 218 บาท/เส้น
ขนาด 32 x 32 มม. หนา 2.30 มม. นน. 12.26 กก./เส้น	HS41 280 บาท/เส้น HS50 293 บาท/เส้น
ขนาด 32 x 32 มม. หนา 3.20 มม. นน. 16.16 กก./เส้น	HS41 381 บาท/เส้น HS50 397 บาท/เส้น
ขนาด 38 x 38 มม. หนา 2.30 มม. นน. 14.84 กก./เส้น	HS41 332 บาท/เส้น HS50 346 บาท/เส้น
ขนาด 38 x 38 มม. หนา 3.20 มม. นน. 19.77 กก./เส้น	HS41 442 บาท/เส้น HS50 461 บาท/เส้น
ขนาด 50 x 50 มม. หนา 2.30 มม. นน. 20.07 กก./เส้น	HS41 448 บาท/เส้น HS50 468 บาท/เส้น
ขนาด 50 x 50 มม. หนา 3.20 มม. นน. 27.04 กก./เส้น	HS41 604 บาท/เส้น HS50 631 บาท/เส้น
ขนาด 60 x 60 มม. หนา 2.30 มม. นน. 24.39 กก./เส้น	HS41 545 บาท/เส้น HS50 569 บาท/เส้น
ขนาด 60 x 60 มม. หนา 3.20 มม. นน. 33.04 กก./เส้น	HS41 738 บาท/เส้น HS50 771 บาท/เส้น
ขนาด 60 x 60 มม. หนา 4.00 มม. นน. 40.31 กก./เส้น	HS41 920 บาท/เส้น HS50 968 บาท/เส้น
ขนาด 75 x 75 มม. หนา 3.20 มม. นน. 42.12 กก./เส้น	HS41 941 บาท/เส้น HS50 982 บาท/เส้น
ขนาด 75 x 75 มม. หนา 4.00 มม. นน. 51.61 กก./เส้น	HS41 1,177 บาท/เส้น HS50 1,239 บาท/เส้น
ขนาด 90 x 90 มม. หนา 3.20 มม. นน. 51.13 กก./เส้น	HS41 1,152 บาท/เส้น HS50 1,202 บาท/เส้น

ขนาด 90 x 90 มม. หนา 4.00 มม. นน. 62.96 กก./เส้น	HS41 1,431 บาท/เส้น HS50 1,492 บาท/เส้น
ขนาด 90 x 90 มม. หนา 4.50 มม. นน. 70.11 กก./เส้น	HS41 1,645 บาท/เส้น HS50 1,709 บาท/เส้น
ขนาด 100 x 100 มม. หนา 3.20 มม. นน. 57.20 กก./เส้น	HS41 1,277 บาท/เส้น HS50 1,334 บาท/เส้น
ขนาด 100 x 100 มม. หนา 4.00 มม. นน. 70.29 กก./เส้น	HS41 1,569 บาท/เส้น HS50 1,652 บาท/เส้น
ขนาด 100 x 100 มม. หนา 4.50 มม. นน. 78.70 กก./เส้น	HS41 1,826 บาท/เส้น HS50 1,921 บาท/เส้น
ขนาด 150 x 150 มม. หนา 4.50 มม. นน. 120.76 กก./เส้น	HS41 2,779 บาท/เส้น HS50 2,920 บาท/เส้น
ขนาด 150 x 150 มม. หนา 6.00 มม. นน. 158.61 กก./เส้น	HS41 3,774 บาท/เส้น HS50 3,928 บาท/เส้น
ขนาด 200 x 200 มม. หนา 6.00 มม. นน. 215.09 กก./เส้น	HS41 5,485 บาท/เส้น HS50 5,700 บาท/เส้น
ขนาด 200 x 200 มม. หนา 8.00 มม. นน. 281.78 กก./เส้น	HS41 7,608 บาท/เส้น HS50 7,891 บาท/เส้น
ขนาด 200 x 200 มม. หนา 9.00 มม. นน. 314.22 กก./เส้น	HS41 8,920 บาท/เส้น HS50 9,241 บาท/เส้น

ที่มา: Onestockhome. “เหล็กกล่องสี่เหลี่ยม.” <https://www.onestockhome.com/th/steel/steel-square-tube> (สืบค้นเมื่อวันที่ 11 พฤศจิกายน 2560).

ตารางที่ ข.7 ราคาเหล็กกล่องสี่เหลี่ยมจัตุรัสแปซิฟิกไพ์พ (JIS G 3466)

Pacific Pipe JIS G 3466 (เปลี่ยนแปลง 15 พ.ค. 57)	ราคา
ขนาด 40 x 40 มม. หนา 1.60 มม. นน. 11.30กก./เส้น	STKR400 327 บาท/เส้น STKR490 338.4 บาท/เส้น
ขนาด 40 x 40 มม. หนา 2.30 มม. นน. 15.74กก./เส้น	STKR400 405.9 บาท/เส้น STKR490 420.4 บาท/เส้น
ขนาด 50 x 50 มม. หนา 1.60 มม. นน. 14.30กก./เส้น	STKR400 410 บาท/เส้น STKR490 424.6 บาท/เส้น
ขนาด 50 x 50 มม. หนา 2.30 มม. นน. 20.07กก./เส้น	STKR400 512.8 บาท/เส้น STKR490 533.5 บาท/เส้น
ขนาด 50 x 50 มม. หนา 3.20 มม. นน. 27.04กก./เส้น	STKR400 704.8 บาท/เส้น STKR490 732.8 บาท/เส้น
ขนาด 50 x 50 มม. หนา 4.50 มม. นน. 36.17กก./เส้น	STKR400 1,030.7 บาท/เส้น STKR490 1,070.1 บาท/เส้น
ขนาด 50 x 50 มม. หนา 6.00 มม. นน. 45.42กก./เส้น	STKR400 1,370.1 บาท/เส้น STKR490 1,419.9 บาท/เส้น
ขนาด 60 x 60 มม. หนา 1.60 มม. นน. 17.30กก./เส้น	STKR400 499.3 บาท/เส้น STKR490 519 บาท/เส้น
ขนาด 60 x 60 มม. หนา 2.30 มม. นน. 24.39กก./เส้น	STKR400 624.9 บาท/เส้น STKR490 649.8 บาท/เส้น
ขนาด 60 x 60 มม. หนา 3.20 มม. นน. 33.04กก./เส้น	STKR400 847 บาท/เส้น STKR490 880.2 บาท/เส้น
ขนาด 75 x 75 มม. หนา 1.60 มม. นน. 21.87กก./เส้น	STKR400 629 บาท/เส้น STKR490 652.9 บาท/เส้น
ขนาด 75 x 75 มม. หนา 2.30 มม. นน. 30.88กก./เส้น	STKR400 787.8 บาท/เส้น STKR490 819 บาท/เส้น
ขนาด 75 x 75 มม. หนา 3.20 มม. นน. 42.12กก./เส้น	STKR400 1,075.3 บาท/เส้น STKR490 1,117.9 บาท/เส้น
ขนาด 75 x 75 มม. หนา 4.50 มม. นน. 57.38กก./เส้น	STKR400 1,583.9 บาท/เส้น STKR490 1,644.1 บาท/เส้น

ขนาด 75 x 75 มม. ทหนา 6.00 มม. นน. 73.90กก./เส้น	STKR400 2,117.4 บาท/เส้น STKR490 2,194.2 บาท/เส้น
ขนาด 90 x 90 มม. ทหนา 2.30 มม. นน. 37.43กก./เส้น	STKR400 962.2 บาท/เส้น STKR490 1,000.6 บาท/เส้น
ขนาด 90 x 90 มม. ทหนา 3.20 มม. นน. 51.13กก./เส้น	STKR400 1,315.1 บาท/เส้น STKR490 1,367 บาท/เส้น
ขนาด 100 x 100 มม. ทหนา 2.30 มม. นน. 41.76กก./เส้น	STKR400 1,064.9 บาท/เส้น STKR490 1,107.5 บาท/เส้น
ขนาด 100 x 100 มม. ทหนา 3.20 มม. นน. 57.20กก./เส้น	STKR400 1,459.3 บาท/เส้น STKR490 1,517.5 บาท/เส้น
ขนาด 100 x 100 มม. ทหนา 4.00 มม. นน. 70.29กก./เส้น	STKR400 1,807 บาท/เส้น STKR490 1,879.7 บาท/เส้น
ขนาด 100 x 100 มม. ทหนา 4.50 มม. นน. 78.70กก./เส้น	STKR400 2,116.3 บาท/เส้น STKR490 2,198.3 บาท/เส้น
ขนาด 100 x 100 มม. ทหนา 6.00 มม. นน. 102.14กก./เส้น	STKR400 2,821.1 บาท/เส้น STKR490 2,926.9 บาท/เส้น
ขนาด 100 x 100 มม. ทหนา 8.00 มม. นน. 130.97กก./เส้น	STKR400 4,039.6 บาท/เส้น STKR490 4,178.6 บาท/เส้น
ขนาด 100 x 100 มม. ทหนา 9.00 มม. นน. 144.79กก./เส้น	STKR400 4,540.9 บาท/เส้น STKR490 4,698.6 บาท/เส้น
ขนาด 125 x 125 มม. ทหนา 3.20 มม. นน. 72.10กก./เส้น	STKR400 1,853.7 บาท/เส้น STKR490 1,927.4 บาท/เส้น
ขนาด 125 x 125 มม. ทหนา 4.50 มม. นน. 99.73กก./เส้น	STKR400 2,624.9 บาท/เส้น STKR490 2,725.6 บาท/เส้น
ขนาด 125 x 125 มม. ทหนา 5.00 มม. นน. 109.95กก./เส้น	STKR400 2,893.7 บาท/เส้น STKR490 3,005.8 บาท/เส้น
ขนาด 125 x 125 มม. ทหนา 6.00 มม. นน. 130.37กก./เส้น	STKR400 3,599.5 บาท/เส้น STKR490 3,735.5 บาท/เส้น
ขนาด 125 x 125 มม. ทหนา 8.00 มม. นน. 168.82กก./เส้น	STKR400 5,100.3 บาท/เส้น STKR490 5,276.7 บาท/เส้น

ขนาด 125 x 125 มม. ทหนา 9.00 มม. นน. 186.85กก./เส้น	STKR400 5,683.6 บาท/เส้น STKR490 5,880.8 บาท/เส้น
ขนาด 150 x 150 มม. ทหนา 3.20 มม. นน. 87.12กก./เส้น	STKR400 2,239.8 บาท/เส้น STKR490 2,328.1 บาท/เส้น
ขนาด 150 x 150 มม. ทหนา 4.50 มม. นน. 120.76กก./เส้น	STKR400 3,178.1 บาท/เส้น STKR490 3,301.6 บาท/เส้น
ขนาด 150 x 150 มม. ทหนา 5.00 มม. นน. 133.98กก./เส้น	STKR400 3,526.8 บาท/เส้น STKR490 3,661.8 บาท/เส้น
ขนาด 150 x 150 มม. ทหนา 6.00 มม. นน. 158.61กก./เส้น	STKR400 4,287.6 บาท/เส้น STKR490 4,448.5 บาท/เส้น
ขนาด 150 x 150 มม. ทหนา 8.00 มม. นน. 206.68กก./เส้น	STKR400 6,244.1 บาท/เส้น STKR490 6,459.9 บาท/เส้น
ขนาด 150 x 150 มม. ทหนา 9.00 มม. นน. 229.51กก./เส้น	STKR400 6,981 บาท/เส้น STKR490 7,223.8 บาท/เส้น
ขนาด 175x175 มม. 4.5 มม. 142.39กก.	3,974 บาท/เส้น
ขนาด 175x175 มม. 6 มม. 186.85กก.	5,251 บาท/เส้น
ขนาด 200 x 200 มม. ทหนา 4.50 มม. นน. 163.42กก./เส้น	STKR400 4,410.1 บาท/เส้น STKR490 4,580.3 บาท/เส้น
ขนาด 200 x 200 มม. ทหนา 6.00 มม. นน. 215.09กก./เส้น	STKR400 5,960.7 บาท/เส้น STKR490 6,184.9 บาท/เส้น
ขนาด 200 x 200 มม. ทหนา 8.00 มม. นน. 281.78กก./เส้น	STKR400 8,423.6 บาท/เส้น STKR490 8,716.3 บาท/เส้น
ขนาด 200 x 200 มม. ทหนา 9.00 มม. นน. 314.22กก./เส้น	STKR400 9,425.2 บาท/เส้น STKR490 9,752.2 บาท/เส้น

ที่มา: Onestockhome“ .เหล็กกล่องสี่เหลี่ยม ”. <https://www.onestockhome.com/th/steel/steel-square-tube> สืบค้นเมื่อวันที่ .(2560 พฤศจิกายน 11

ตารางที่ ข.8 ราคาเหล็กกล่องสี่เหลี่ยมผืนผ้าแปซิฟิกพอร์ท มอก. TIS 107-2533

มอก. TIS 107-2533 (เปลี่ยนแปลงวันที่ 15 พ.ค. 57)	ราคา
ขนาด 50 x 25 มม. หนา 2.30 มม. นน. 14.66 กก./เส้น	HS41 374.69 บาท/เส้น HS50 389.22 บาท/เส้น
ขนาด 50 x 25 มม. หนา 3.20 มม. นน. 19.47 กก./เส้น	HS41 507.54 บาท/เส้น HS50 527.26 บาท/เส้น
ขนาด 60 x 30 มม. หนา 2.30 มม. นน. 17.90 กก./เส้น	HS41 456.68 บาท/เส้น HS50 475.36 บาท/เส้น
ขนาด 60 x 30 มม. หนา 3.20 มม. นน. 23.97 กก./เส้น	HS41 624.82 บาท/เส้น HS50 649.73 บาท/เส้น
ขนาด 75 x 38 มม. หนา 2.30 มม. นน. 22.89 กก./เส้น	HS41 584.34 บาท/เส้น HS50 607.18 บาท/เส้น
ขนาด 75 x 38 มม. หนา 3.20 มม. นน. 30.94 กก./เส้น	HS41 806.45 บาท/เส้น HS50 838.63 บาท/เส้น
ขนาด 75 x 45 มม. หนา 2.30 มม. นน. 24.39 กก./เส้น	HS41 626.9 บาท/เส้น HS50 651.81 บาท/เส้น
ขนาด 75 x 45 มม. หนา 3.20 มม. นน. 33.04 กก./เส้น	HS41 850.05 บาท/เส้น HS50 884.3 บาท/เส้น
ขนาด 100 x 50 มม. หนา 3.20 มม. นน. 42.12 กก./เส้น	HS41 1,075.27 บาท/เส้น HS50 1,117.82 บาท/เส้น
ขนาด 100 x 50 มม. หนา 4.00 มม. นน. 51.61 กก./เส้น	HS41 1,355.5 บาท/เส้น HS50 1,409.47 บาท/เส้น
ขนาด 100 x 50 มม. หนา 4.50 มม. นน. 57.38 กก./เส้น	HS41 1,542.32 บาท/เส้น HS50 1,602.52 บาท/เส้น
ขนาด 125 x 75 มม. หนา 3.20 มม. นน. 57.20 กก./เส้น	HS41 1,501.85 บาท/เส้น HS50 1,562.04 บาท/เส้น
ขนาด 125 x 75 มม. หนา 4.00 มม. นน. 70.29 กก./เส้น	HS41 1,846.43 บาท/เส้น HS50 1,919.08 บาท/เส้น
ขนาด 125 x 75 มม. หนา 4.50 มม. นน. 78.70 กก./เส้น	HS41 2,116.28 บาท/เส้น HS50 2,198.28 บาท/เส้น

ขนาด 150 x 80 มม. หนา 4.50 มม. นน. 91.32 กก./เส้น	HS41 2,403.78 บาท/เส้น HS50 2,496.15 บาท/เส้น
ขนาด 150 x 80 มม. หนา 6.00 มม. นน. 118.96 กก./เส้น	HS41 3,252.78 บาท/เส้น HS50 3,372.14 บาท/เส้น
ขนาด 150 x 100 มม. หนา 4.50 มม. นน. 99.73 กก./เส้น	HS41 2,624.85 บาท/เส้น HS50 2,725.53 บาท/เส้น
ขนาด 150 x 100 มม. หนา 6.00 มม. นน. 130.37 กก./เส้น	HS41 3,599.44 บาท/เส้น HS50 3,735.41 บาท/เส้น
ขนาด 200 x 100 มม. หนา 4.50 มม. นน. 120.76 กก./เส้น	HS41 3,190.51 บาท/เส้น HS50 3,314.02 บาท/เส้น
ขนาด 200 x 100 มม. หนา 6.00 มม. นน. 158.61 กก./เส้น	HS41 4,396.55 บาท/เส้น HS50 4,560.54 บาท/เส้น

ที่มา: Onestockhome. “เหล็กกล่องแบน.” <https://www.onestockhome.com/th/steel/steel-rectangular-tube> (สืบค้นเมื่อวันที่ 11 พฤศจิกายน 2560).

ตารางที่ ข.9 ราคาเหล็กกล่องสี่เหลี่ยมผืนผ้าแปซิฟิกไพบ์ (JIS G 3466)

JIS G 3466 (เปลี่ยนแปลงล่าสุด 15 พ.ค. 57)	ราคา
ขนาด 60 x 30 มม. หนา 1.60 มม. นน. 12.80กก./เส้น	STKR400 369.5 บาท/เส้น STKR490 383 บาท/เส้น
ขนาด 60 x 30 มม. หนา 2.30 มม. นน. 17.90กก./เส้น	STKR400 456.7 บาท/เส้น STKR490 475.4 บาท/เส้น
ขนาด 60 x 30 มม. หนา 3.20 มม. นน. 23.97กก./เส้น	STKR400 624.9 บาท/เส้น STKR490 649.8 บาท/เส้น
ขนาด 75 x 45 มม. หนา 1.60 มม. นน. 17.30กก./เส้น	STKR400 499.3 บาท/เส้น STKR490 519 บาท/เส้น
ขนาด 75 x 45 มม. หนา 2.30 มม. นน. 24.39กก./เส้น	STKR400 626.9 บาท/เส้น STKR490 651.9 บาท/เส้น
ขนาด 75 x 45 มม. หนา 3.20 มม. นน. 33.04กก./เส้น	STKR400 850.1 บาท/เส้น STKR490 884.3 บาท/เส้น
ขนาด 100 x 50 มม. หนา 1.60 มม. นน. 21.87กก./เส้น	STKR400 631.1 บาท/เส้น STKR490 656 บาท/เส้น
ขนาด 100 x 50 มม. หนา 2.30 มม. นน. 30.88กก./เส้น	STKR400 787.8 บาท/เส้น STKR490 819 บาท/เส้น
ขนาด 100 x 50 มม. หนา 3.20 มม. นน. 42.12กก./เส้น	STKR400 1,075.3 บาท/เส้น STKR490 1,117.9 บาท/เส้น
ขนาด 100 x 50 มม. หนา 4.50 มม. นน. 57.38กก./เส้น	STKR400 1,542.4 บาท/เส้น STKR490 1,602.6 บาท/เส้น
ขนาด 100 x 50 มม. หนา 6.00 มม. นน. 73.90กก./เส้น	STKR400 2,083.1 บาท/เส้น STKR490 2,162 บาท/เส้น
ขนาด 125 x 75 มม. หนา 2.30 มม. นน. 41.76กก./เส้น	STKR400 1,070.1 บาท/เส้น STKR490 1,112.7 บาท/เส้น
ขนาด 125 x 75 มม. หนา 3.20 มม. นน. 57.20กก./เส้น	STKR400 1,496.7 บาท/เส้น STKR490 1,555.9 บาท/เส้น
ขนาด 125 x 75 มม. หนา 4.00 มม. นน. 70.29กก./เส้น	STKR400 1,846.5 บาท/เส้น STKR490 1,919.1 บาท/เส้น

ขนาด 125 x 75 มม. ทหนา 4.50 มม. นน. 78.70กก./เส้น	STKR400 2,116.3 บาท/เส้น STKR490 2,198.3 บาท/เส้น
ขนาด 125 x 75 มม. ทหนา 6.00 มม. นน. 102.14กก./เส้น	STKR400 2,821.1 บาท/เส้น STKR490 2,926.9 บาท/เส้น
ขนาด 150 x 50 มม. ทหนา 3.20 มม. นน. 57.20กก./เส้น	STKR400 1,501.9 บาท/เส้น STKR490 1,562.1 บาท/เส้น
ขนาด 150 x 75 มม. ทหนา 3.20 มม. นน. 64.89กก./เส้น	STKR400 1,668 บาท/เส้น STKR490 1,735.4 บาท/เส้น
ขนาด 150 x 75 มม. ทหนา 4.50 มม. นน. 89.52กก./เส้น	STKR400 2,357.1 บาท/เส้น STKR490 2,447.4 บาท/เส้น
ขนาด 150 x 75 มม. ทหนา 6.00 มม. นน. 115.95กก./เส้น	STKR400 3,202 บาท/เส้น STKR490 3,322.4 บาท/เส้น
ขนาด 150 x 75 มม. ทหนา 8.00 มม. นน. 150.20กก./เส้น	STKR400 4,318.8 บาท/เส้น STKR490 4,475.5 บาท/เส้น
ขนาด 150 x 80 มม. ทหนา 4.50 มม. นน. 91.32กก./เส้น	STKR400 2,403.8 บาท/เส้น STKR490 2,496.2 บาท/เส้น
ขนาด 150 x 80 มม. ทหนา 5.00 มม. นน. 100.93กก./เส้น	STKR400 2,666.4 บาท/เส้น STKR490 2,769.2 บาท/เส้น
ขนาด 150 x 80 มม. ทหนา 6.00 มม. นน. 118.96กก./เส้น	STKR400 3,226.9 บาท/เส้น STKR490 3,348.3 บาท/เส้น
ขนาด 150 x 100 มม. ทหนา 3.20 มม. นน. 72.10กก./เส้น	STKR400 1,853.7 บาท/เส้น STKR490 1,927.4 บาท/เส้น
ขนาด 150 x 100 มม. ทหนา 4.50 มม. นน. 99.73กก./เส้น	STKR400 2,624.9 บาท/เส้น STKR490 2,725.6 บาท/เส้น
ขนาด 150 x 100 มม. ทหนา 6.00 มม. นน. 130.37กก./เส้น	STKR400 3,599.5 บาท/เส้น STKR490 3,735.5 บาท/เส้น
ขนาด 150 x 100 มม. ทหนา 8.00 มม. นน. 168.82กก./เส้น	STKR400 5,046.3 บาท/เส้น STKR490 5,222.8 บาท/เส้น
ขนาด 150 x 100 มม. ทหนา 9.00 มม. นน. 186.85กก./เส้น	STKR400 5,723 บาท/เส้น STKR490 5,921.3 บาท/เส้น

ขนาด 200 x 100 มม. หนา 3.20 มม. นน. 87.12กก./เส้น	STKR400 2,248.1 บาท/เส้น STKR490 2,337.4 บาท/เส้น
ขนาด 200 x 100 มม. หนา 4.50 มม. นน. 120.76กก./เส้น	STKR400 3,190.6 บาท/เส้น STKR490 3,314.1 บาท/เส้น
ขนาด 200 x 100 มม. หนา 6.00 มม. นน. 158.61กก./เส้น	STKR400 4,396.6 บาท/เส้น STKR490 4,560.6 บาท/เส้น
ขนาด 200 x 100 มม. หนา 9.00 มม. นน. 229.51กก./เส้น	STKR400 7,029.7 บาท/เส้น STKR490 7,272.6 บาท/เส้น

ที่มา: Onestockhome. “เหล็กกล่องแบน.” <https://www.onestockhome.com/th/steel/steel-rectangular-tube> (สืบค้นเมื่อวันที่ 11 พฤศจิกายน 2560).

ภาคผนวก ค
การคำนวณกำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกของเสาเข็ม

ค.1 การคำนวณกำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกของเสาเข็ม

(1) เสาเข็มของ V-pole solar tracking

$$q_u = 5 \text{ t/m}^2$$

$$c = 2.5 \text{ t/m}^2$$

$$\alpha = 0.85$$

$$n = 6 \text{ piles}$$

$$A_p = \text{friction area}$$

$$= 0.5 \times 6$$

$$= 3 \text{ m}^2$$

$$\text{แรงเสียดทานรวม} = n A_p \alpha c$$

$$= 6 \times 3 \times 0.85 \times 2.5$$

$$= 38 \text{ tons}$$

$$\text{ใช้ Safety factor} = 3$$

$$\text{ดังนั้น Allowable load} = \frac{38}{3} = 12.67 \text{ tons}$$

(2) เสาค้ำของ Louver solar tracking

$$q_u = 5 \text{ t/m}^2$$

$$c = 2.5 \text{ t/m}^2$$

$$\alpha = 0.85$$

$$n = 1 \text{ piles}$$

$$A_p = \text{friction area}$$

$$= 0.5 \times 6$$

$$= 3 \text{ m}^2$$

$$\text{แรงเสียดทานรวม} = n A_p \alpha c$$

$$= 1 \times 3 \times 0.85 \times 2.5$$

$$= 6.375 \text{ tons}$$

$$\text{ใช้ Safety factor} = 3$$




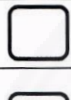


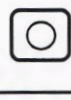


$$\text{ดังนั้น Allowable load} = \frac{6.375}{3} = 2.125 \text{ tons}$$

ค.2 การรับน้ำหนักปลอดภัยของเสาเข็ม หลายขนาด

น้ำหนักบรรทุกของเสาเข็ม						
รหัส	รูปตัด	ชนิดเข็ม	พื้นที่หน้าตัด (ซม ²)	เส้นรอบรูป (ซม)	น้ำหนัก (กก / ม.)	รับน้ำหนัก ปลอดภัย (ตัน)
		เสาเข็มไม้				
		φ 2" x 2.00 ม.	20	16.0		0.15
		φ 3" x 3.00 ม.	45	23.9		0.30
		φ 4" x 4.00 ม.	81	31.9		0.60
		φ 5" x 5.00 ม.	127	39.9		1.00
		φ 6" x 6.00 ม.	182	47.9		1.50
		φ 8" x 8.00 ม.	324	63.8		2.50
Hp-15		หกเหลี่ยมกลวง 0.15 x 0.15 x 3.00 ม. 0.15 x 0.15 x 4.00 ม. 0.15 x 0.15 x 5.00 ม. 0.15 x 0.15 x 6.00 ม.	138	50	33	0.70 1.00 1.30 1.60
I - 18		เสาเข็มตัวไอ I 0.18 x 0.18 x 12.00 ม. 0.18 x 0.18 x 14.00 ม. 0.18 x 0.18 x 16.00 ม.	235	83	57	7.5 10 15
I - 22		0.22 x 0.22 x 14.00 ม. 0.22 x 0.22 x 18.00 ม. 0.22 x 0.22 x 21.00 ม.	332	105	80	15 20 25
I - 26		0.26 x 0.26 x 21.00 - 24.00 ม.	460	126	110	30 - 35
I - 30		0.30 x 0.30 x 21.00 - 24.00 ม.	570	154	137	35 - 45
I - 35		0.35 x 0.35 x 21.00 - 24.00 ม.	880	165	211	50 - 60
I - 40		0.40 x 0.40 x 21.00 - 24.00 ม.	1,235	180	296	60 - 70
S - 16		สี่เหลี่ยมตัน 0.16 x 0.16 x 2.00 ม. 0.16 x 0.16 x 3.00 ม. 0.16 x 0.16 x 4.00 ม. 0.16 x 0.16 x 5.00 ม. 0.16 x 0.16 x 6.00 ม. 0.16 x 0.16 x 10.00 ม.	256	64	61	0.50 0.90 1.30 1.70 2.10 5.00
S - 18		0.18 x 0.18 x 12.00 ม. 0.18 x 0.18 x 16.00 ม. 0.18 x 0.18 x 18.00 ม.	324	72	78	10 15 20

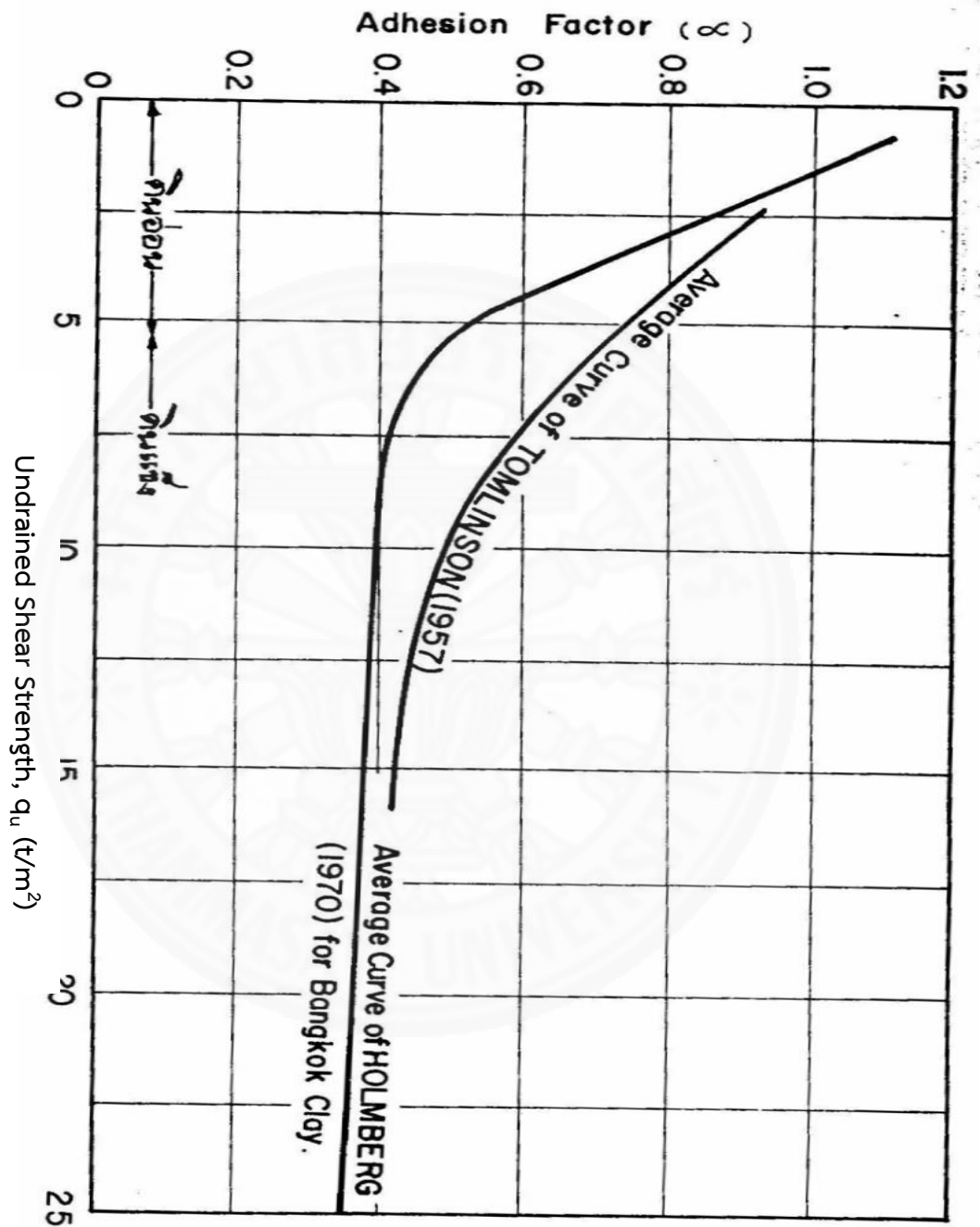
ที่มา: โยธาออนไลน์. “ตารางรับน้ำหนักปลอดภัยของเสาเข็ม หลายขนาด.” http://wongsanga.blogspot.com/2012/09/blog-post_2500.html (accessed November 9, 2017).

ค.2 การรับน้ำหนักปลอดภัยของเสาเข็ม หลายขนาด (ต่อ)

น้ำหนักบรรทุกของเสาเข็ม						
รหัส	รูปตัด	ชนิดเข็ม	พื้นที่หน้าตัด (ซม ²)	เส้นรอบรูป (ซม)	น้ำหนัก (กก / ม.)	รับน้ำหนัก ปลอดภัย (ตัน)
S - 22		สี่เหลี่ยมตัน 0.22 x 0.22 x 16.00 ม.	484	88	116	20
S - 22		0.22 x 0.22 x 18.00 ม.				25
S - 22		0.22 x 0.22 x 21.00 ม.				30
S - 26		0.26 x 0.26 x 21.00 - 24.00 ม.	676	104	160	35 - 40
S - 30		0.30 x 0.30 x 21.00 - 24.00 ม.	900	120	216	45 - 50
S - 35		0.35 x 0.35 x 21.00 - 26.00 ม.	1,225	140	294	50 - 60
S - 40		0.40 x 0.40 x 21.00 - 26.00 ม.	1,600	160	384	60 - 80
SO - 40		สี่เหลี่ยมกลวง 0.40 x 0.40 x 21.00 - 26.00 ม.	1,286	160	309	50 - 70
SO - 525		0.525 x 0.525 x 21.00 - 28.00 ม.	2,650	210	492	70 - 100
SPUN		เสาเข็มกลมแรงเหวี่ยง				
		0.25 x 28.00 ม.	337	79	87	30
		0.30 x 28.00 ม.	480	94	125	45
		0.35 x 28.00 ม.	616	110	160	60
		0.40 x 30.00 ม.	766	126	200	80
		0.50 x 30.00 ม.	1,159	157	300	100
		0.60 x 30.00 ม.	1,571	188	400	120
		0.80 x 30.00 ม.	2,564	251	660	200
BORED		เสาเข็มเจาะ				
		φ 0.35 x 21.00 ม.	962	110	231	30
		φ 0.40 x 21.00 ม.	1,257	126	302	40
		φ 0.50 x 21.00 ม.	1,964	157	471	50
		φ 0.60 x 21.00 ม.	2,828	188	679	60
		φ 0.80 x 40.00 ม.	5,027	251	1,206	200
		φ 1.00 x 50.00 ม.	7,854	314	1,855	400
		φ 1.20 x 50.00 ม.	11,310	377	2,714	600
		φ 1.50 x 50.00 ม.	17,672	471	4,241	1,000
φ 2.00 x 50.00 ม.	31,416	628	7,540	1,500		

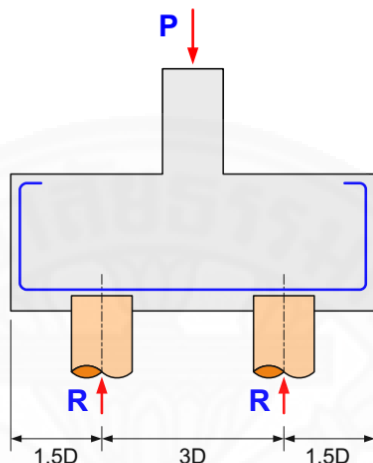
ที่มา: โยธาออนไลน์. “ตารางรับน้ำหนักปลอดภัยของเสาเข็ม หลายขนาด.” http://wongsanga.blogspot.com/2012/09/blog-post_2500.html (accessed November 9, 2017).

ค.3 adhesion factor (กลุ่มงานวิเคราะห์วิจัยและพัฒนา, 2547)



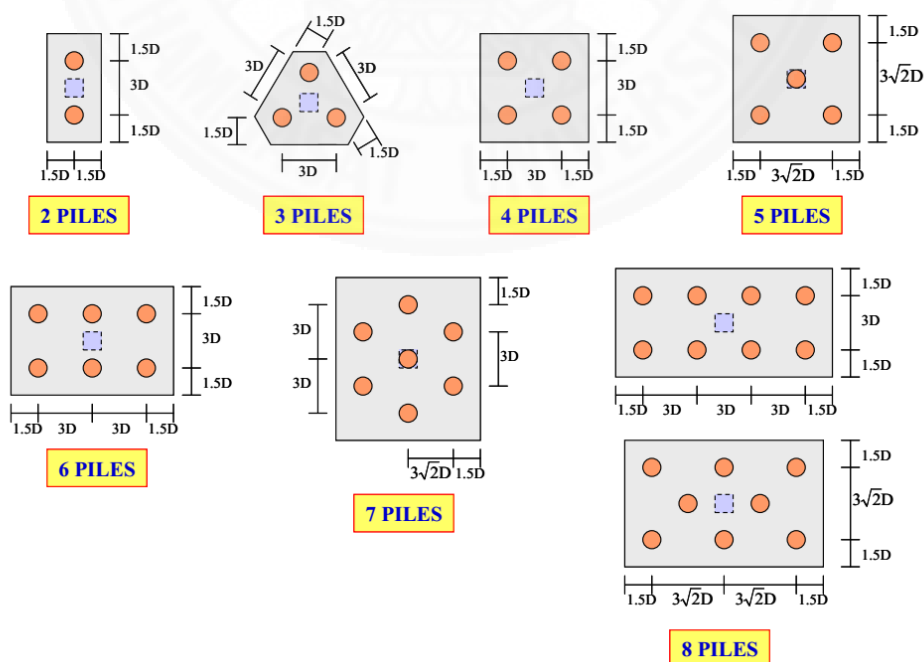
ค.4 การออกแบบฐานราก (Footing)

ฐานรากเสาเข็มรับน้ำหนักบรรทุกจากเสา และแรงปฏิกิริยาต้านทานจากเสาเข็ม มีลักษณะเหมือนคานรับแรงกระทำเป็นจุด ดังเช่นในรูปข้างล่างน้ำหนักบรรทุกจะทำให้ฐานแอ่นตัวจึงต้องเสริมเหล็กด้านล่าง และพยายามให้เสาเข็มอยู่ใกล้กันมากที่สุดเพื่อลดแรงภายในและจำกัดขนาดฐานราก โดยระยะห่างระหว่างเสาเข็มจะอยู่ที่ 3 เท่าของขนาดเสาเข็ม (D)



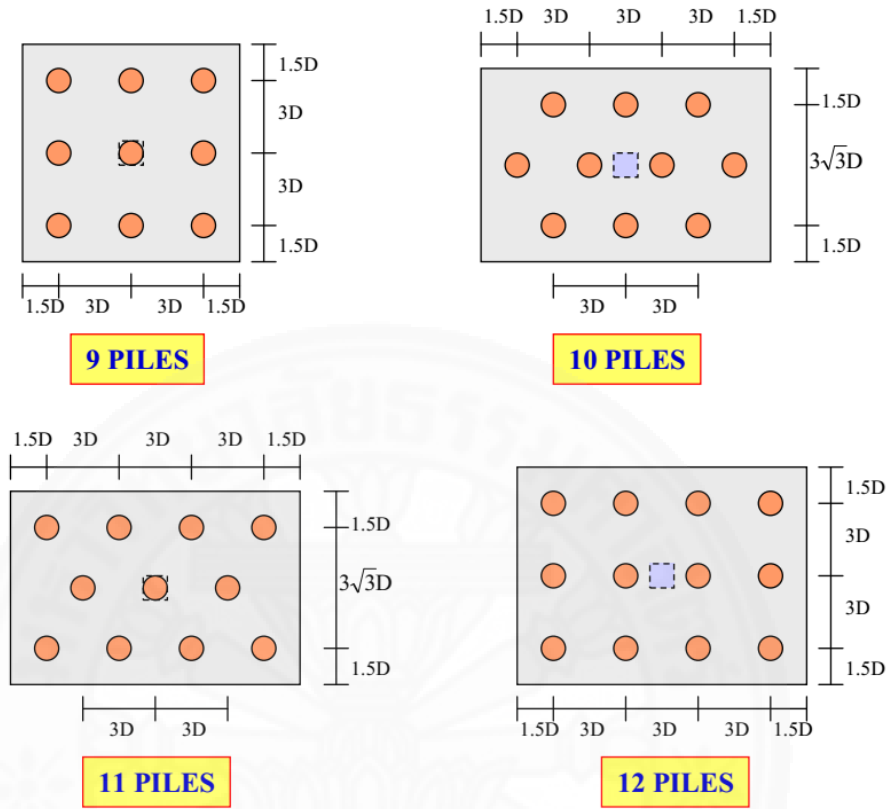
รูปที่ 6.10 แรงในฐานรากเสาเข็ม

ขนาดหรือจำนวนเสาเข็มจะเพิ่มขึ้นตามน้ำหนักบรรทุกจากเสา โดยรักษาระยะห่างระหว่างเสาเข็มสามเท่าของขนาดเข็ม (3D) รูปแบบของกลุ่มเสาเข็มจะมีได้หลายรูปแบบ

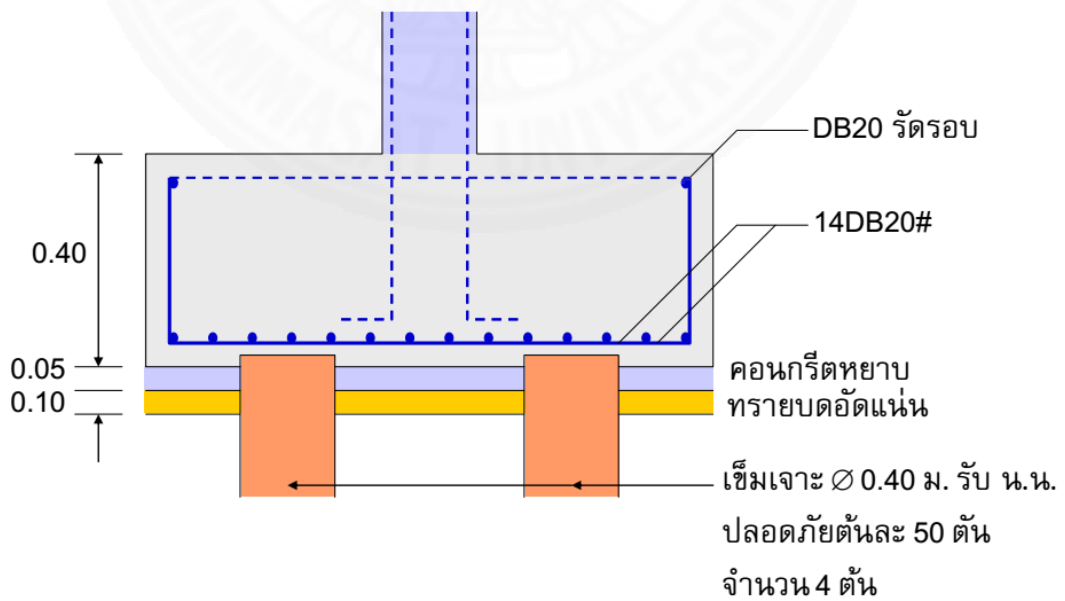


ที่มา: Mongkol Jirawacharadet. *Footing*. นครราชสีมา: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, มปป.

ค.4 การออกแบบฐานราก (Footing) (ต่อ)

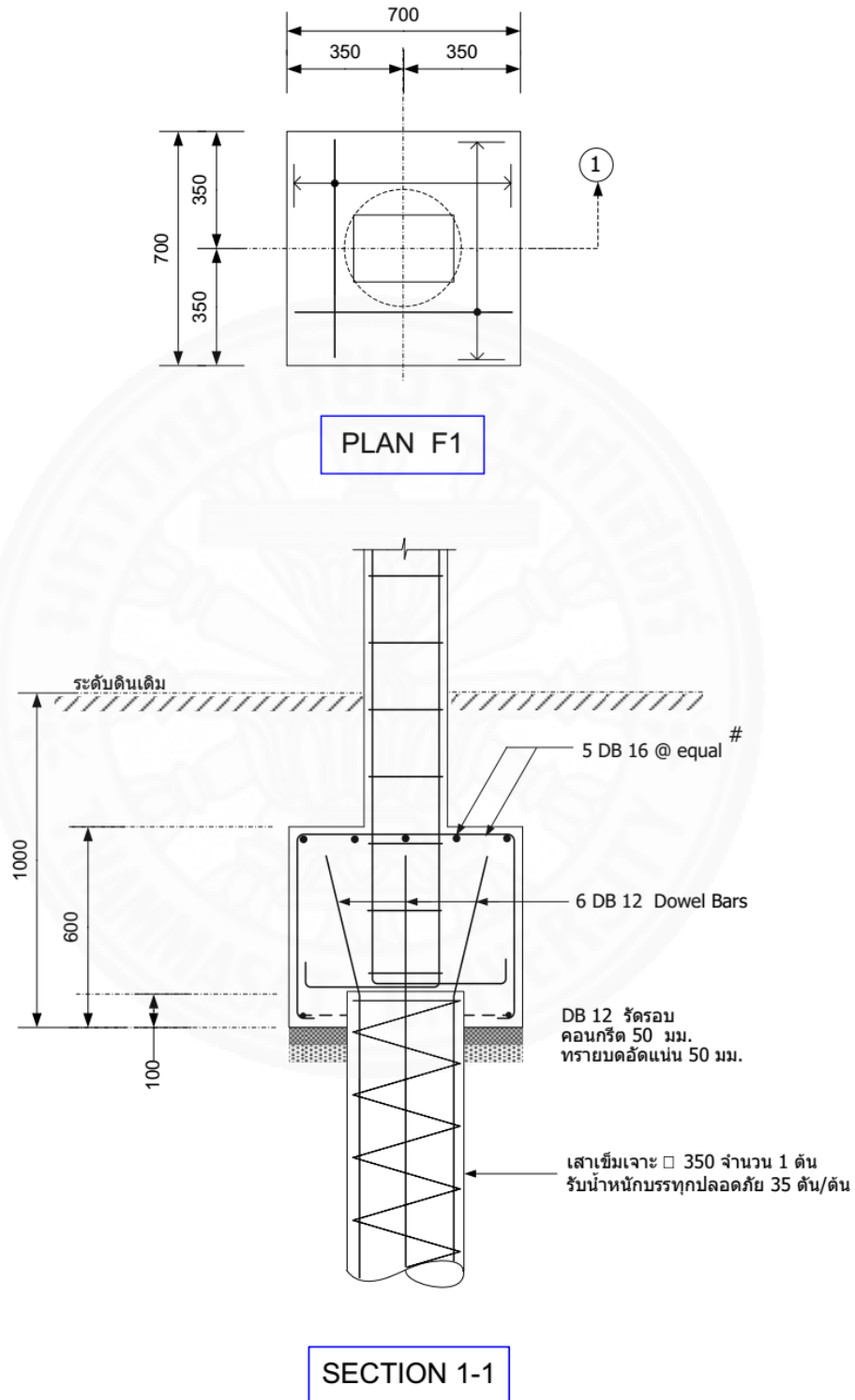


รูปที่ 6.11 รูปแบบการจัดวางเสาเข็ม



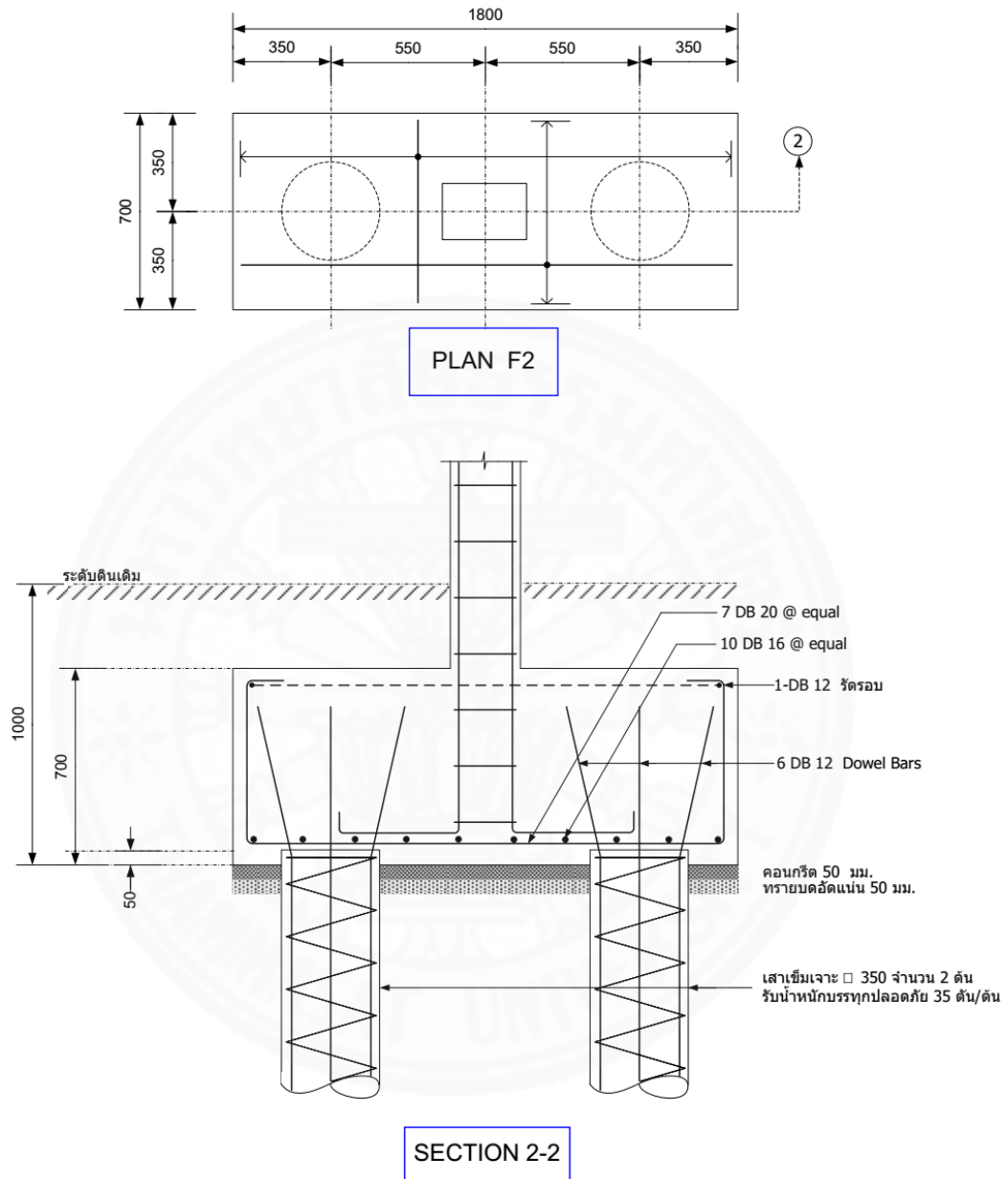
ที่มา: Mongkol Jirawacharadet. *Footing*. นครราชสีมา: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, มปป.

ค.4 การออกแบบฐานราก (Footing) (ต่อ)



ที่มา: Mongkol Jirawacharadet. *Footing*. นครราชสีมา: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, มปป.

ค.4 การออกแบบฐานราก (Footing) (ต่อ)



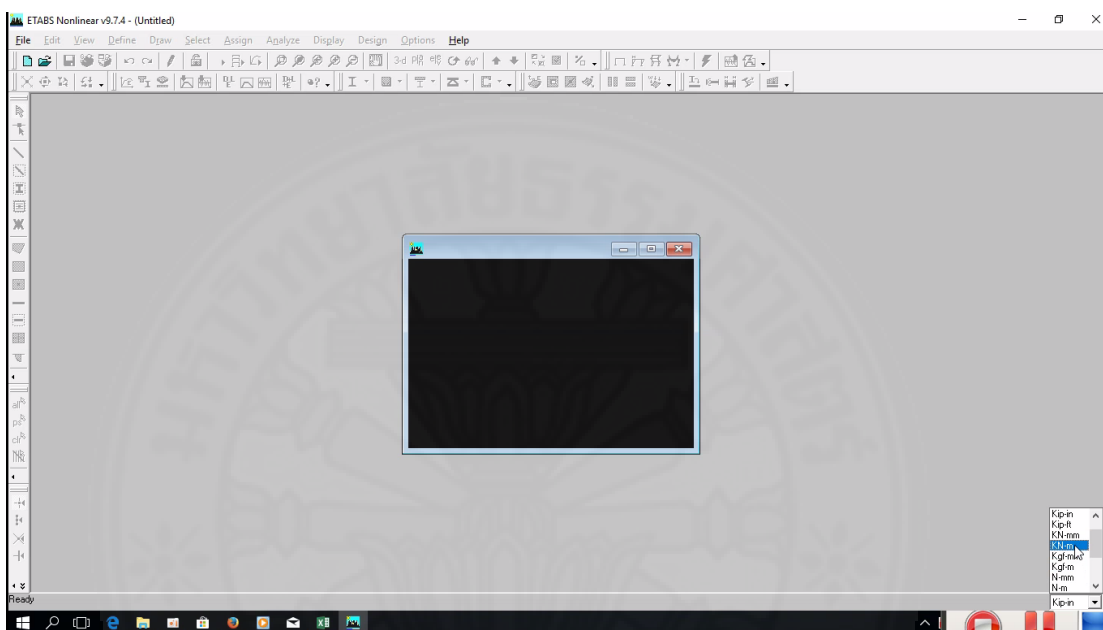
ที่มา: Mongkol Jirawacharadet. *Footing*. นครราชสีมา: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, มปป.

ภาคผนวก ง

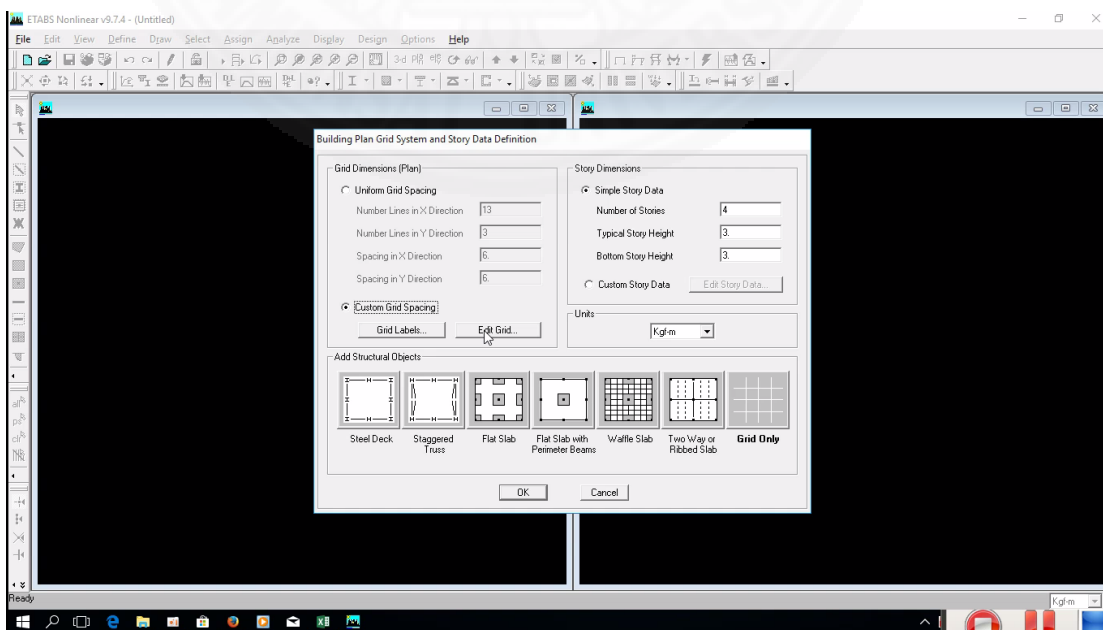
การใช้โปรแกรม ETABS

1. ร่างแบบของโครงสร้าง

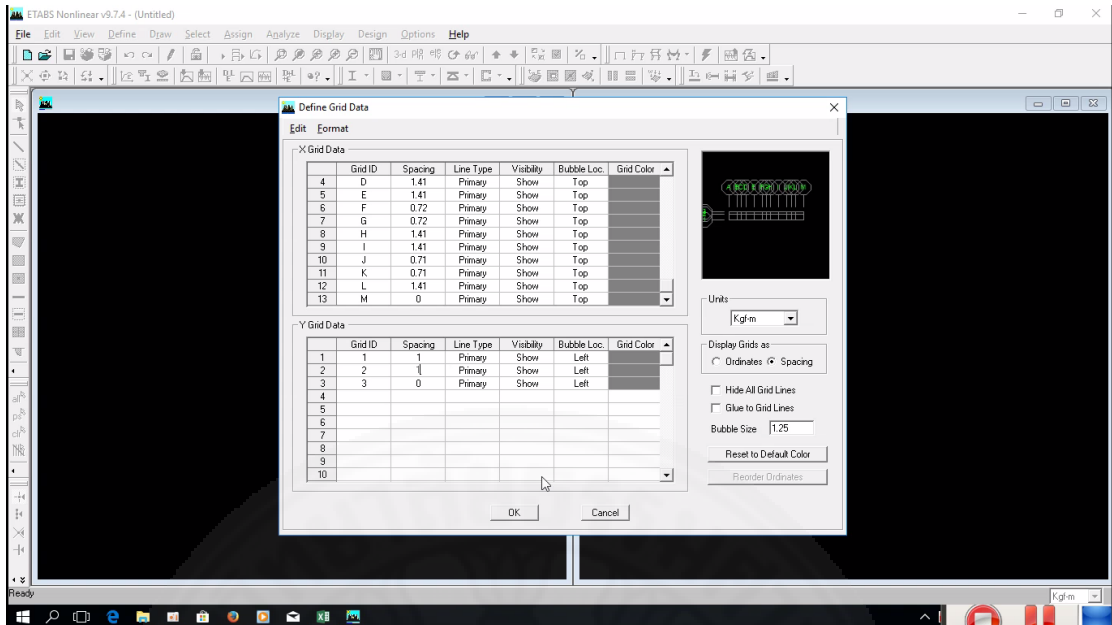
- เปิดโปรแกรม ETABS > เปลี่ยนหน่วยเป็น kgf-m



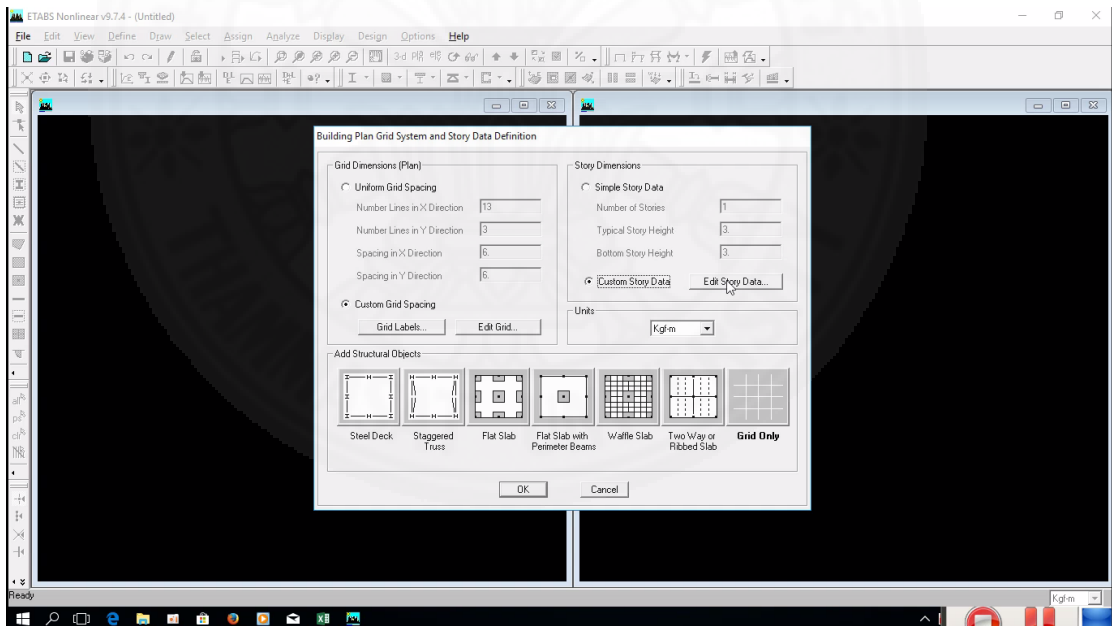
- File > New file > no > ใส่ Number Line in X direction และ Number Line in Y direction > กด Custom Grid space > Edit Grid



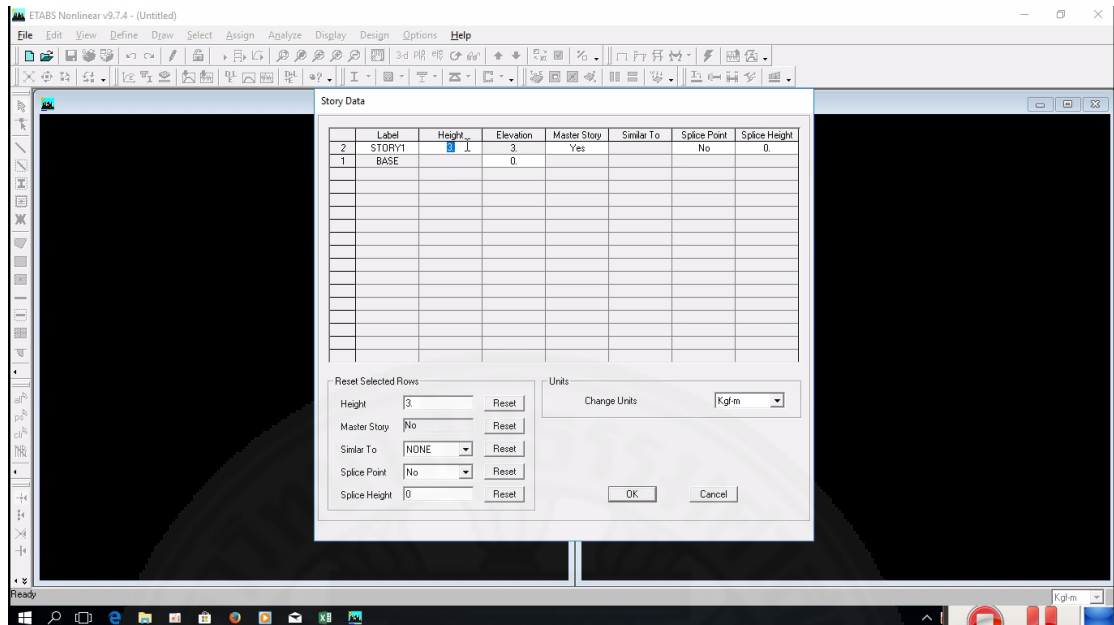
- กด Spacing ทางขวา แล้วใส่ระยะห่างของโครงสร้าง > OK



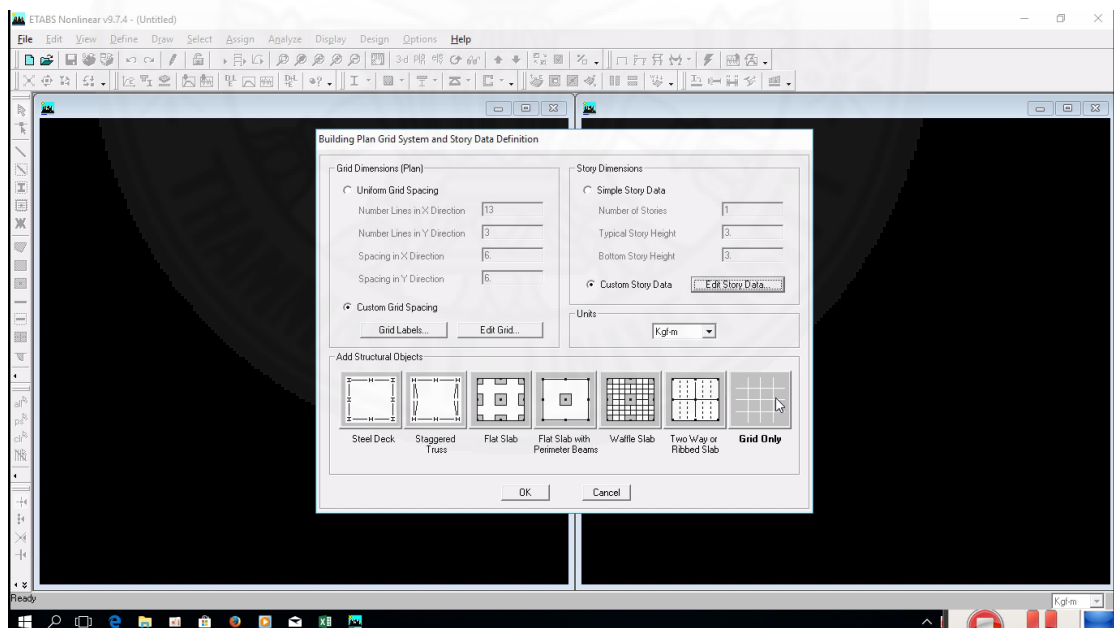
- ใส่ค่า Number of stories (จำนวนชั้น) > กด Custom story data > Edit story data



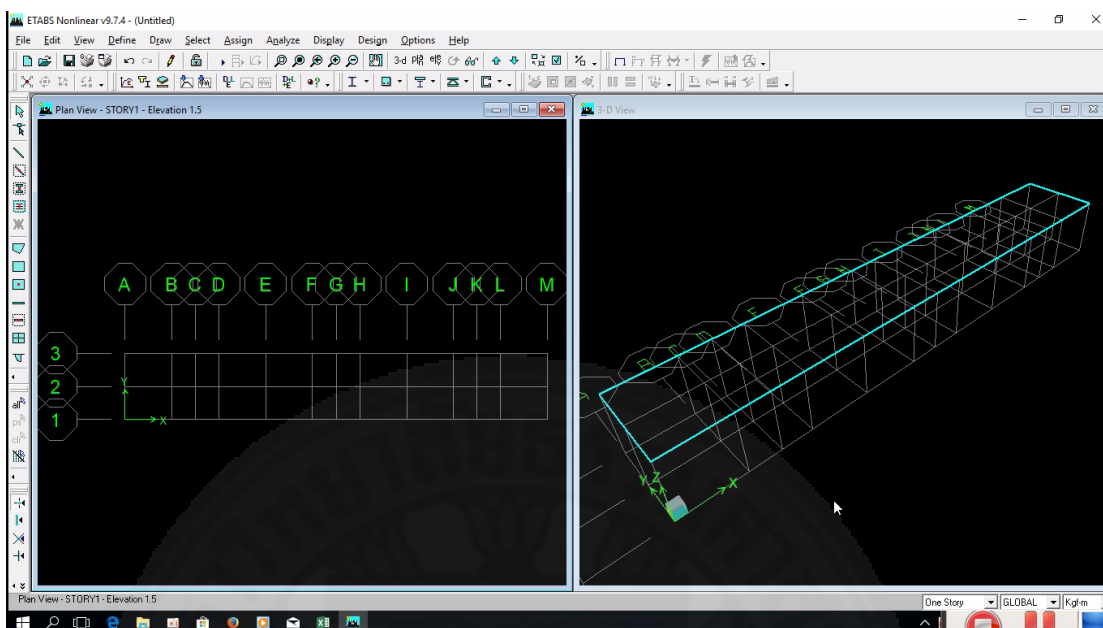
-ใส่ความสูงของชั้น > OK



- เลือก Structure objects เป็น Grid only > OK

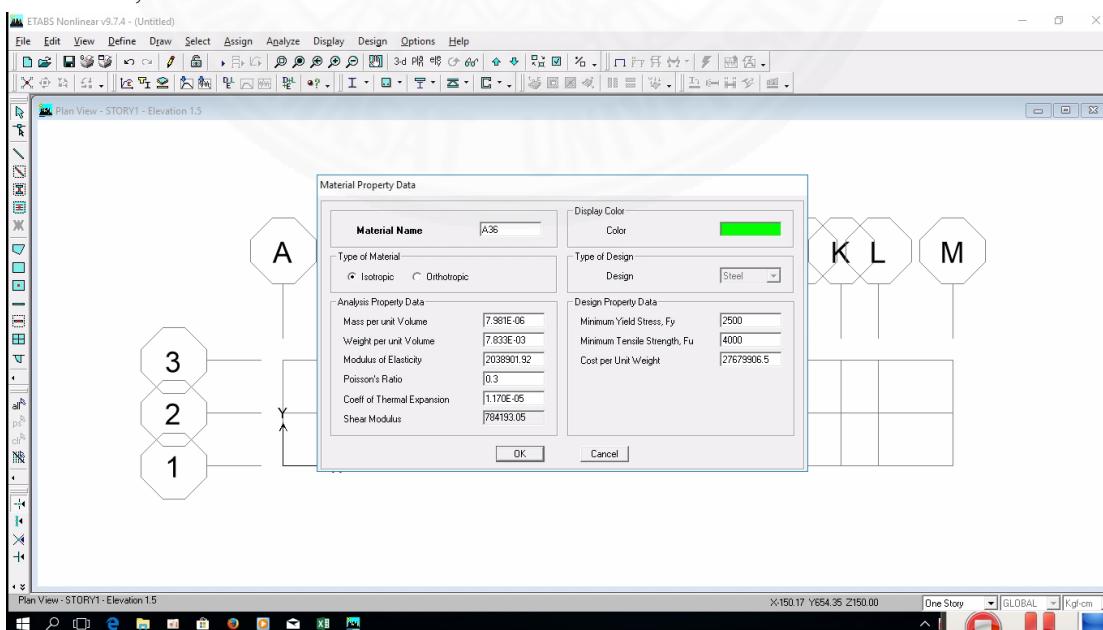


- จะได้แบบโครงสร้างตามที่เราเขียนไว้



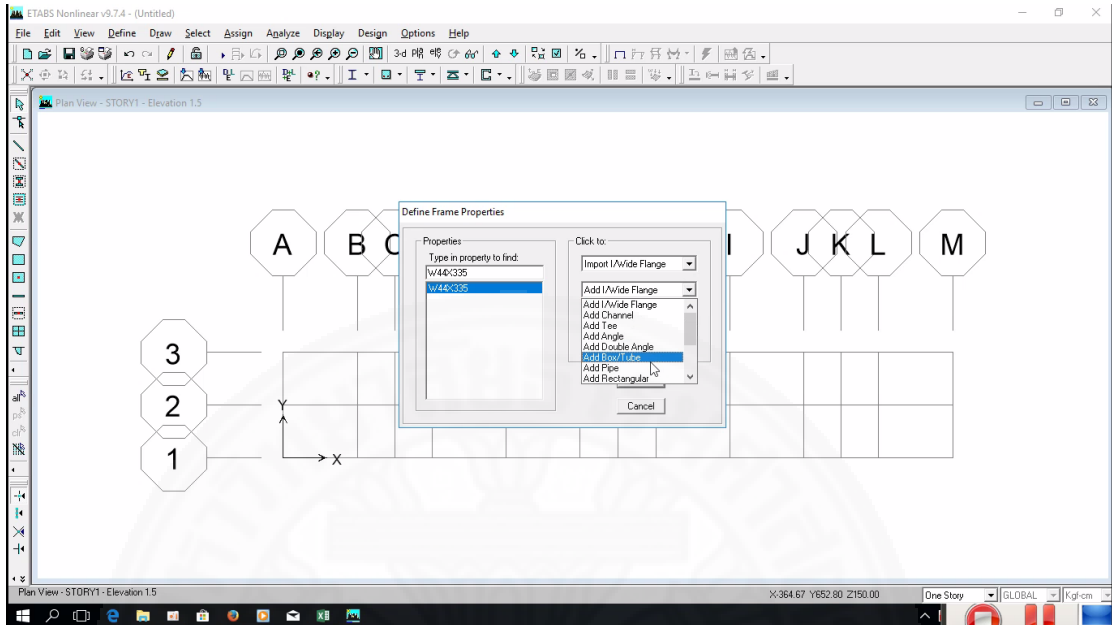
2. ใส่ค่าความแข็งแรงของวัสดุ

- เปลี่ยนหน่วยเป็น kgf-cm
- Define > Material properties > Steel > add new materials
- Material name: A36
- $F_y = 2500$, $F_u = 4000 > \text{OK}$

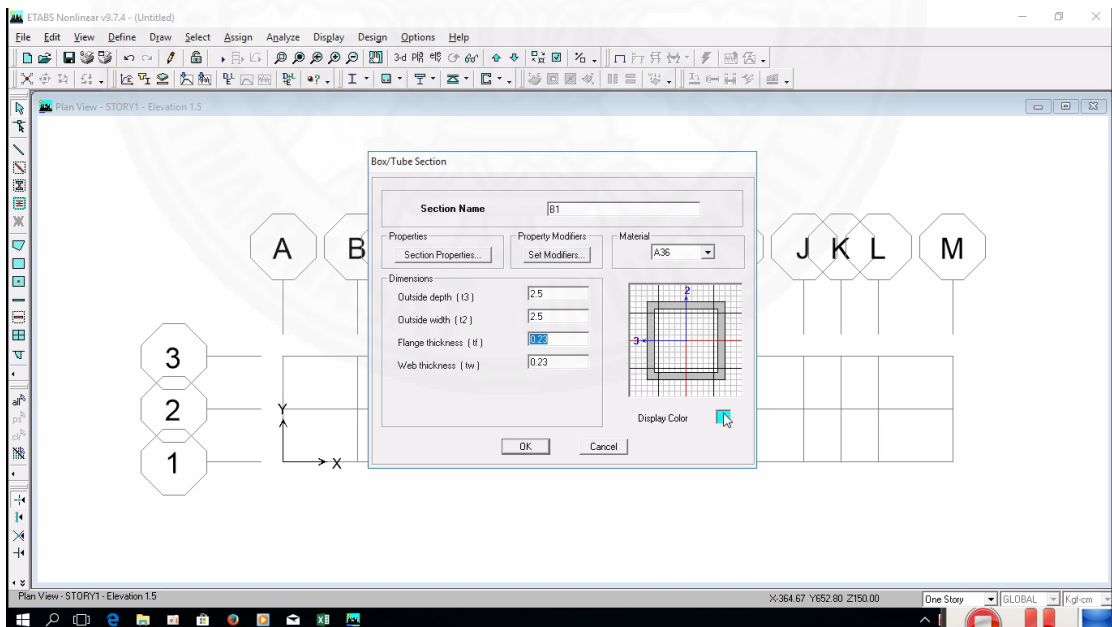


3. ใส่ลักษณะของวัสดุที่ใช้ทั้งหมด

- Define > Frame section > Add tube/Box

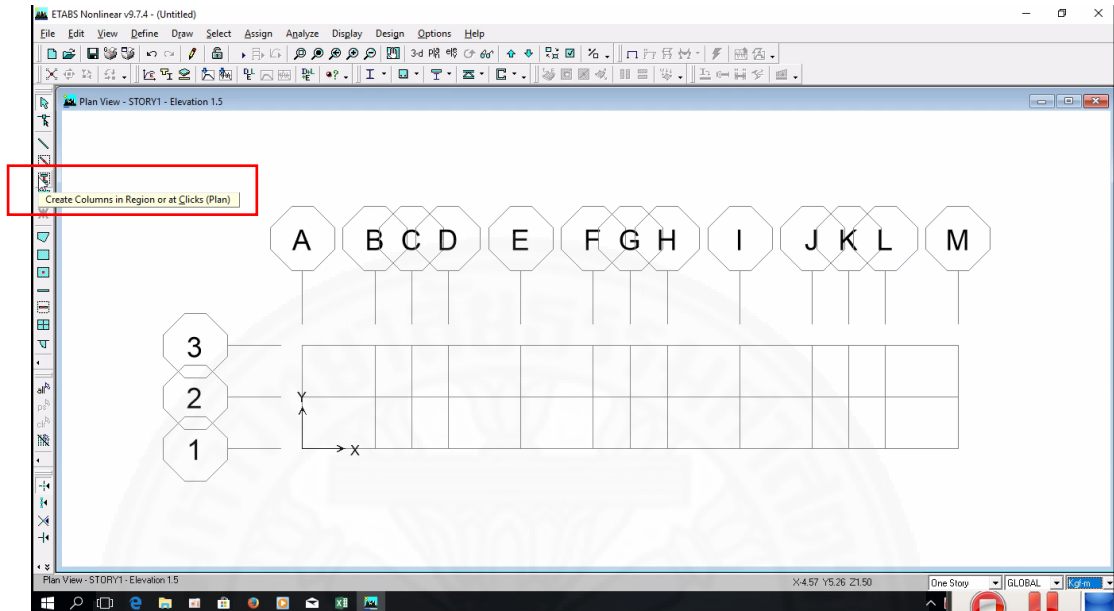


- ใส่ชื่อวัสดุ ความกว้าง ความยาว และความหนา (หน่วยเป็น เซนติเมตร)

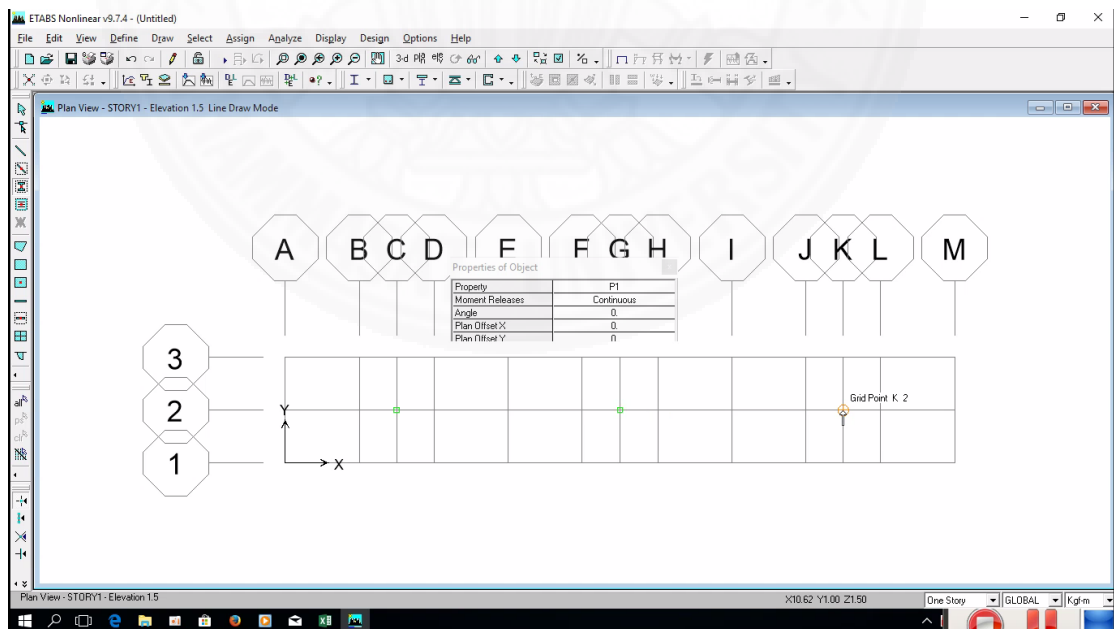


4. ใส่เสา

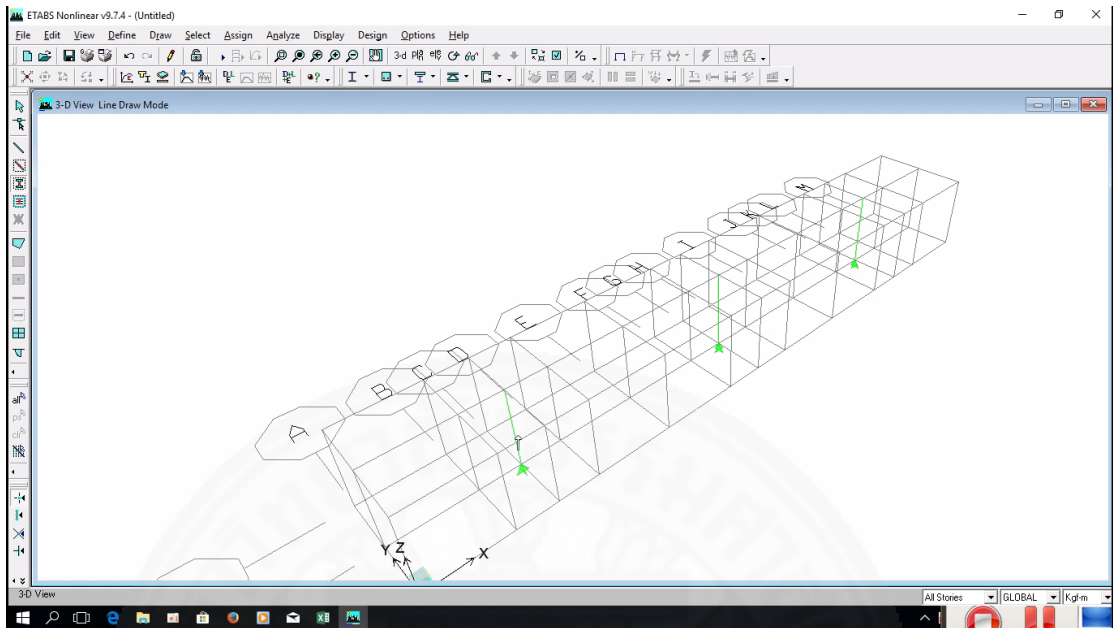
- เปลี่ยนหน่วยเป็น kgf-m
- กด Create column



- เลือกวัสดุ และกดที่จุดที่ตั้งตำแหน่งเสา

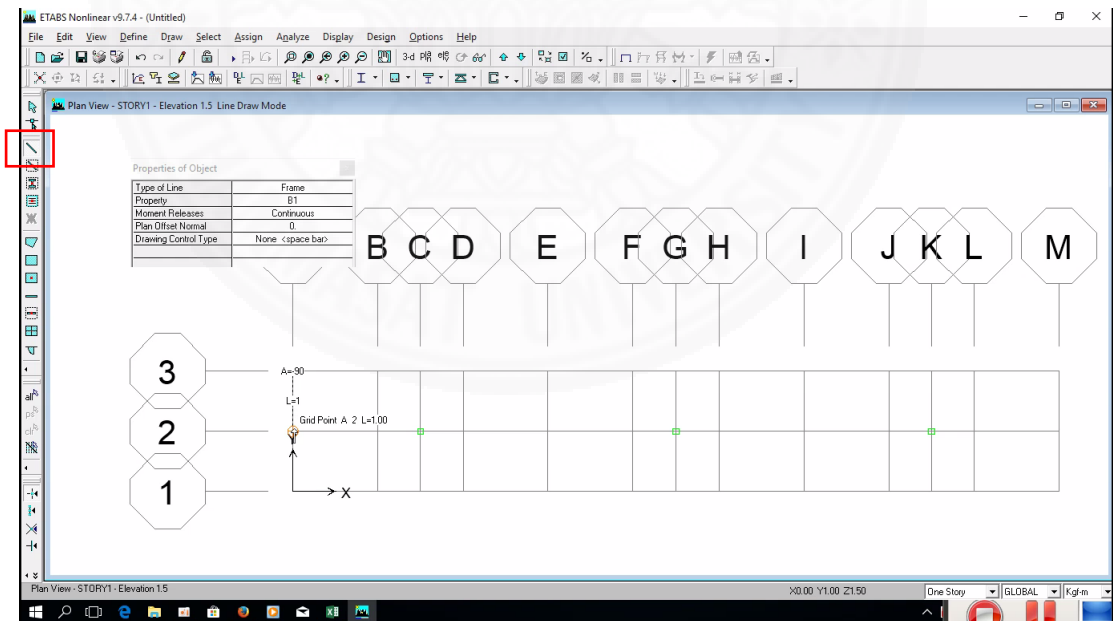


- ตำแหน่งเสา



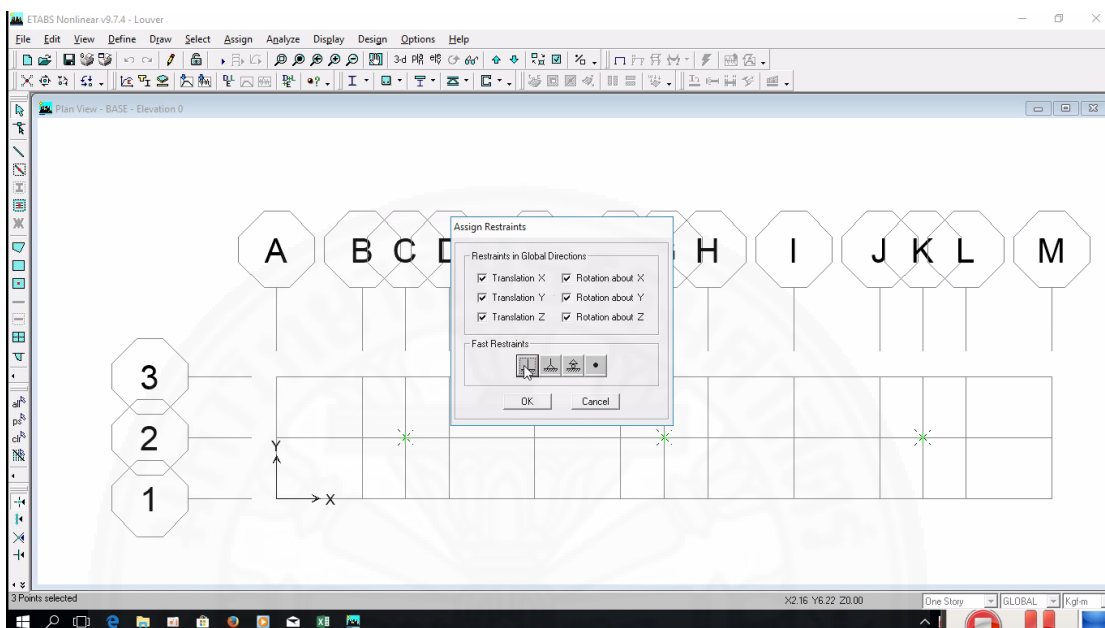
5. ใส่คาน

- Draw line > เลือกวัสดุ > ลาดเส้นจุดต่อจุด



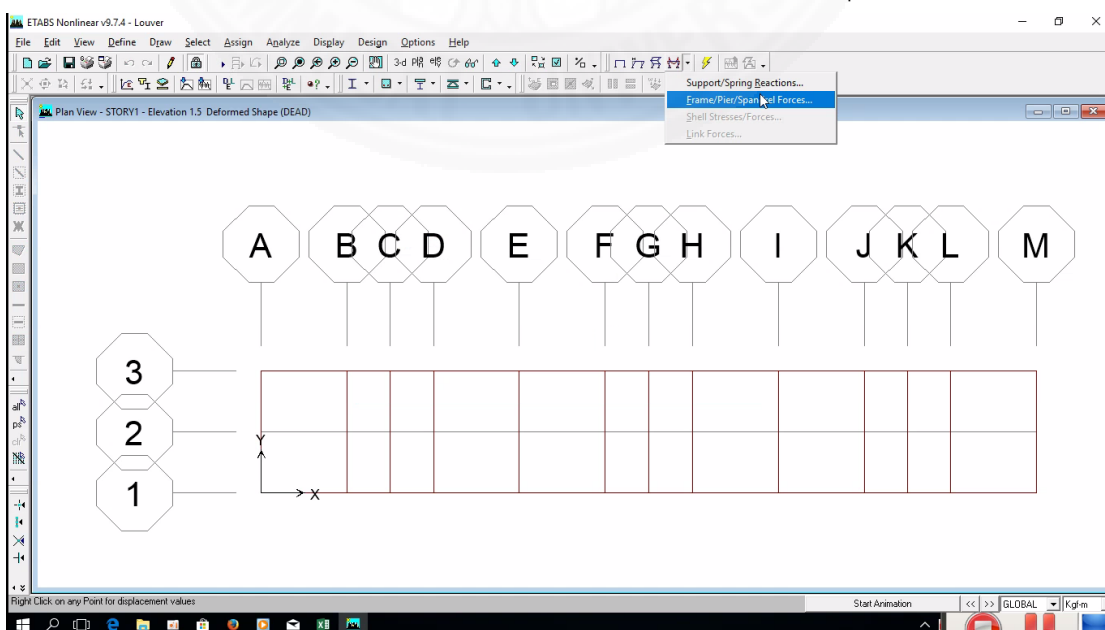
6. ใส่ support

- กด plan > Base > OK
- เลือกจุดที่ใส่ Support > Assign > Joint/point > Restraints (support) >เลือก Fixed support > OK

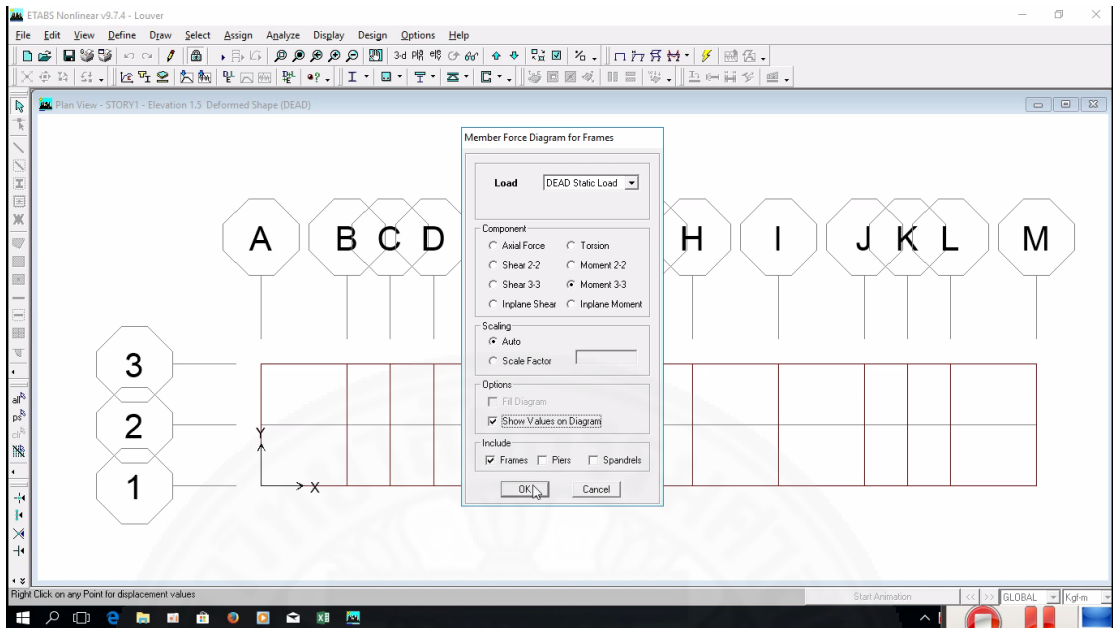


7. การแสดงผลของโครงสร้าง

- Run
- Show deformation, Show Member force > Frame/Pier /Spandel force

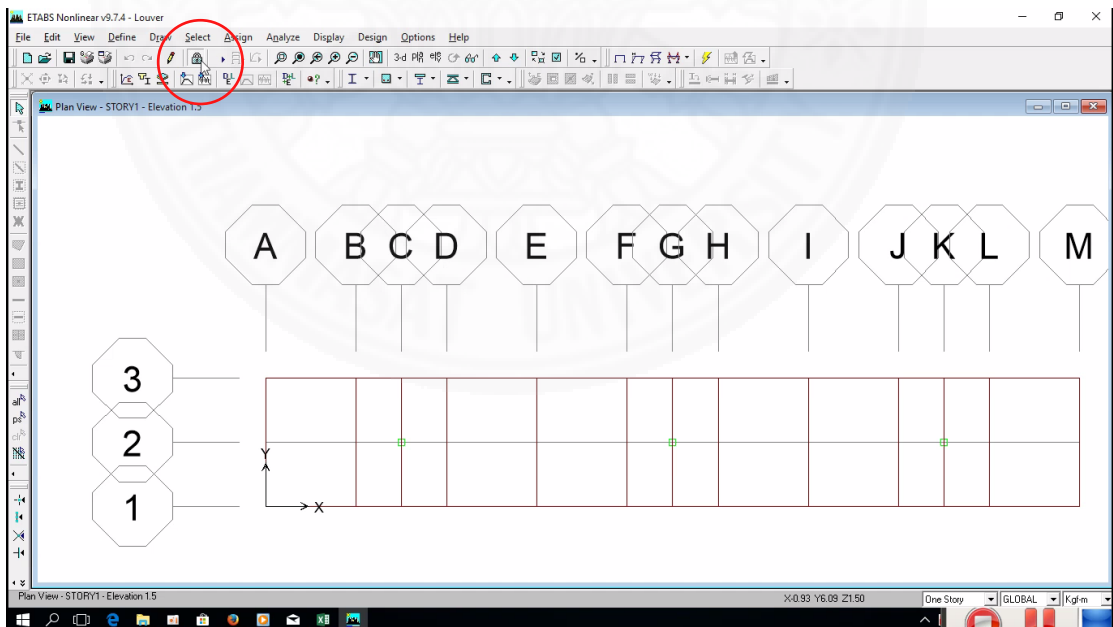


- Moment 3-3 > Options > เอา Fill Diagram ออก > เลือก Show value on diagram

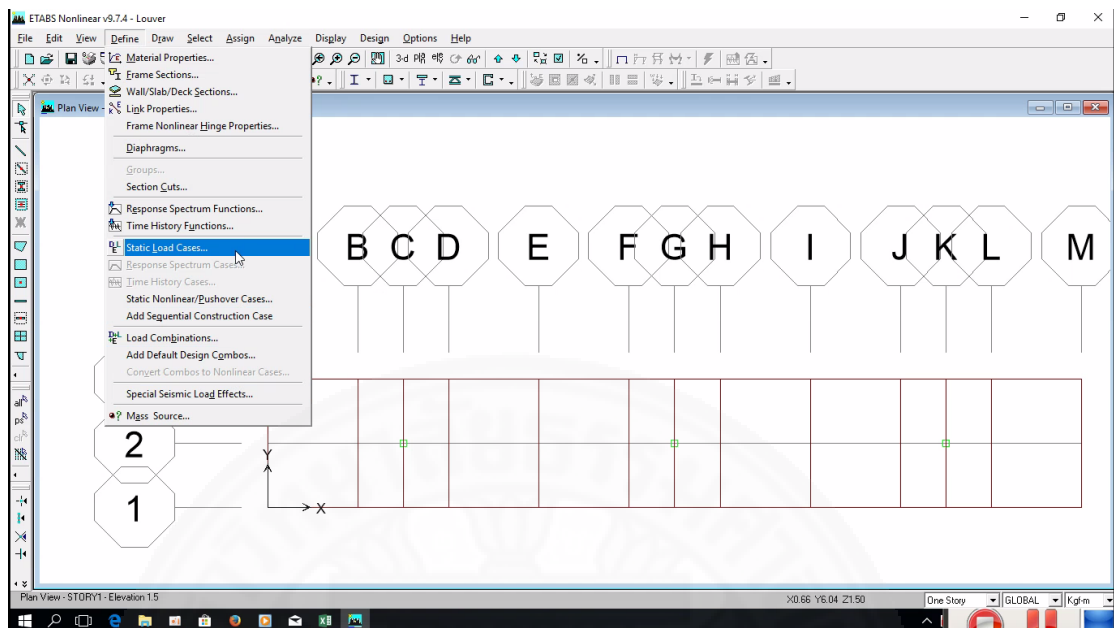


8. เพิ่มน้ำหนักบรรทุก

- กด Unlock > OK

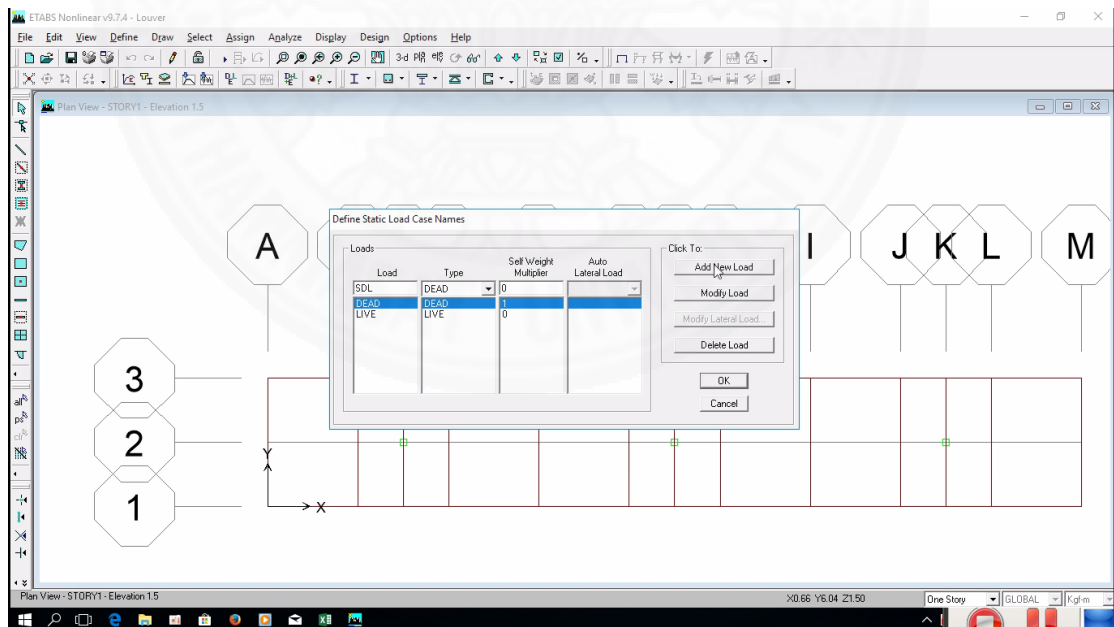


- Define > Static Load cases



- เพิ่ม Load: SDL, Type: DEAD, Set weight: 0 > Add new load

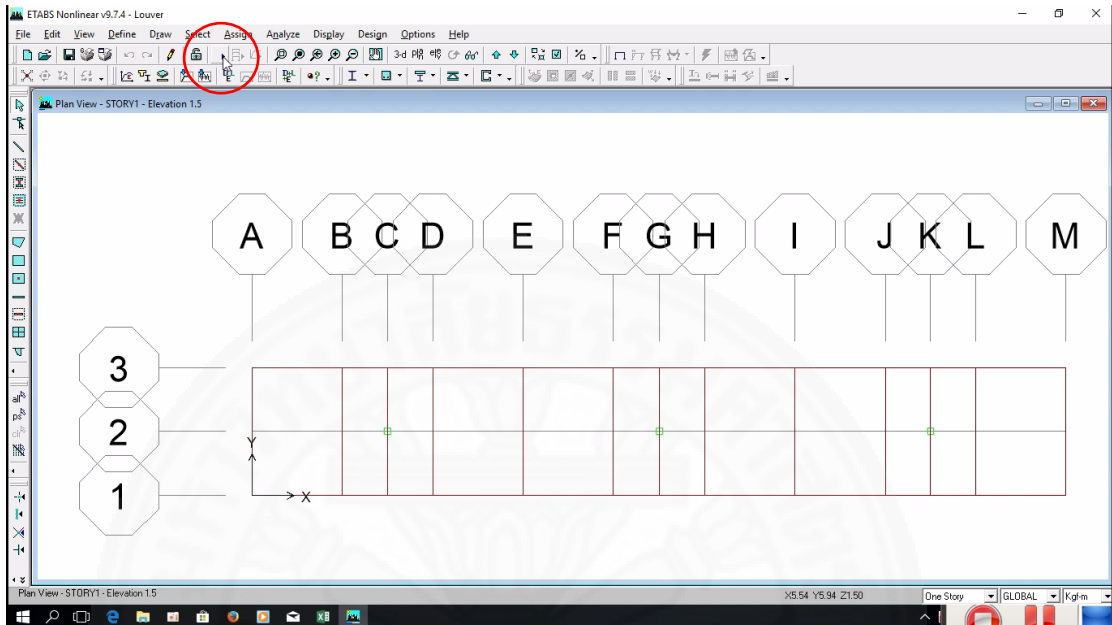
- เพิ่ม Load: WindX, Type: WIND > Add new load > OK



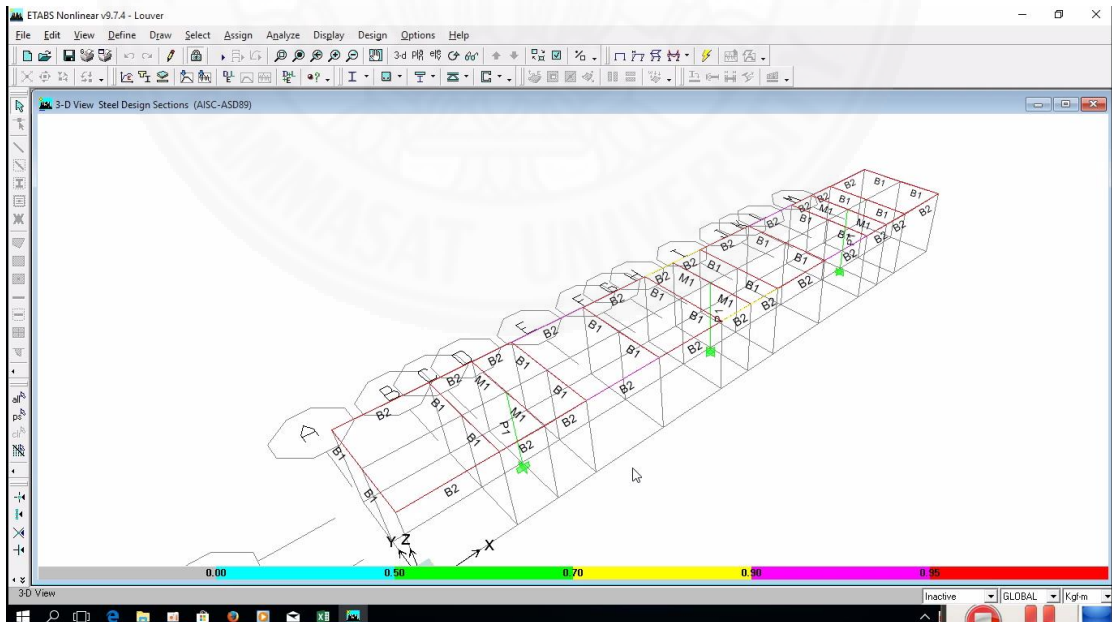
10. ตรวจสอบโครงสร้าง

- Option > Preference > Steel Frame design > D code: AISC 89 > OK

- Run

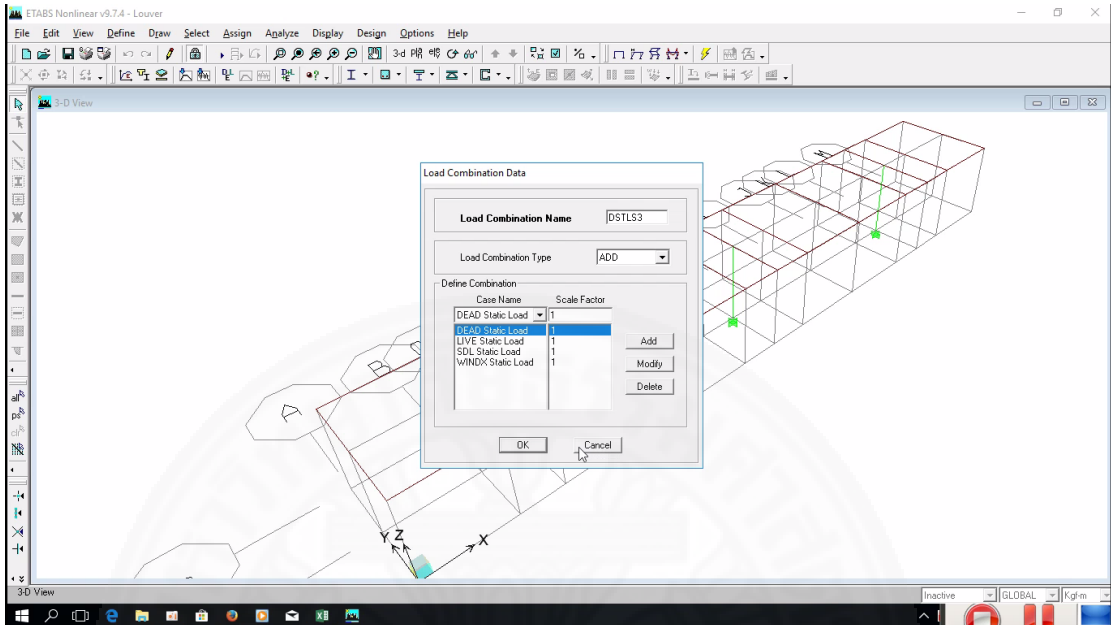


- Design > Steel Frame Design > Start Design/Check of Structure

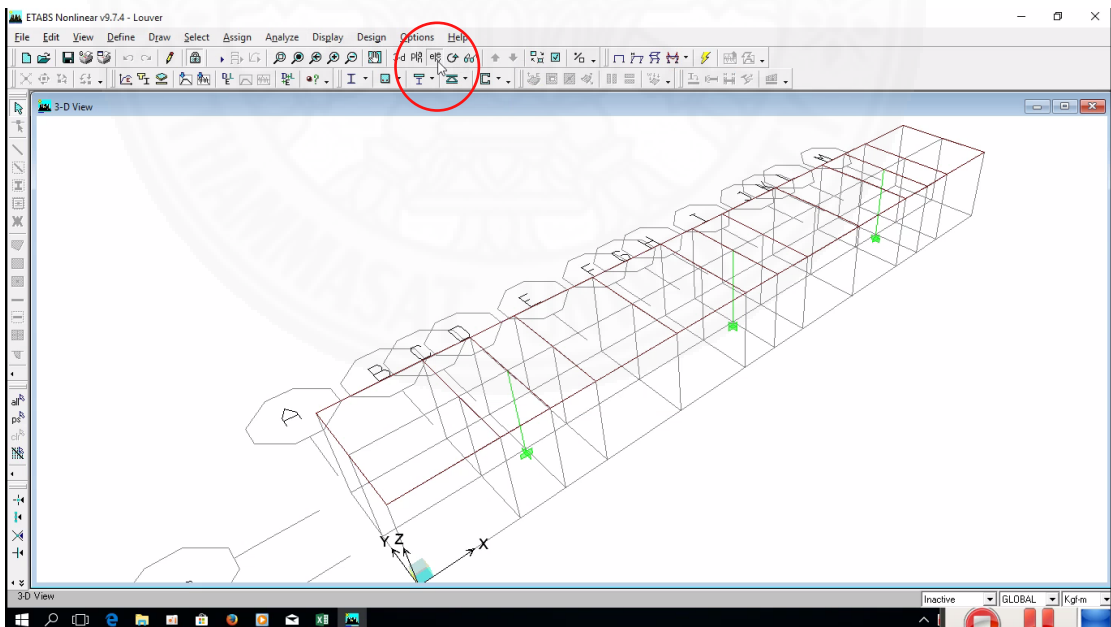


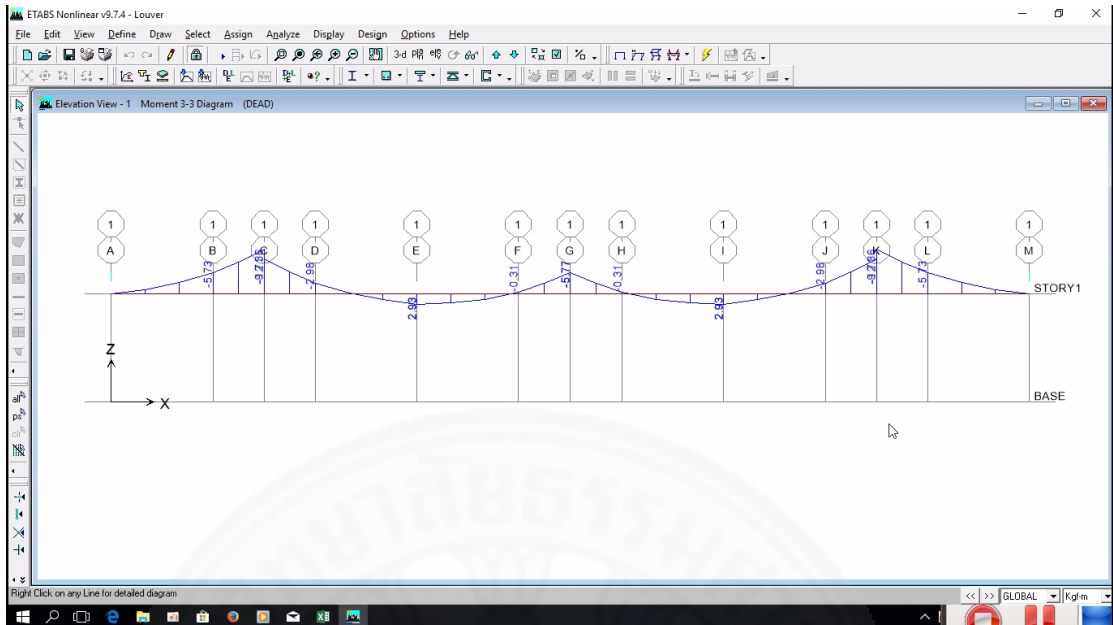
11. แสดงแรงที่กระทำต่อโครงสร้าง

- เลือกใช้ Load combination แบบ DSTLS3 เพราะ มี Load ทุกตัว (Factor = 1)



- กด Elevation > ตรวจสอบโมเมนต์มากที่สุดแต่ละคาน เพื่อหาขนาดวัสดุ

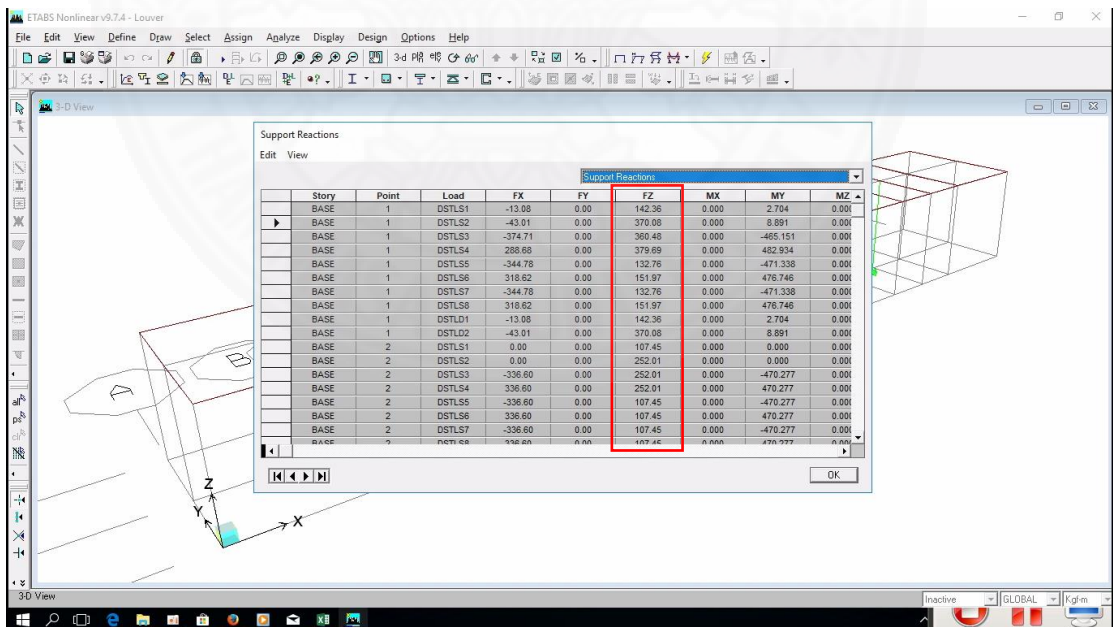




12. แสดงแรงกดลง Support

- Display > Show table > กด Reactions > Select case combo > เลือกตั้งแต่

DSTLD1Combo – DSTLS8Combo > OK > OK



ประวัติผู้เขียน

ชื่อ	นาย กฤษนนท์ สวนจันทร์
วันเดือนปีเกิด	20 ธันวาคม 2536
วุฒิการศึกษา	ปีการศึกษา 2558: วิทยาศาสตร์บัณฑิต (เทคโนโลยีเพื่อการพัฒนาที่ยั่งยืน) เกียรตินิยมอันดับสอง มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
ตำแหน่ง	ผู้ช่วยวิจัย
ทุนการศึกษา	ปีการศึกษา 2558: ทุนเรียนดี ประเภท ข คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
ผลงานทางวิชาการ	กฤษนนท์ สวนจันทร์, สุเพชร จิระจรกุล และ ธนิต เรืองรุ่งชัยกุล. “การออกแบบโครงสร้างรองรับแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบติดตั้งตามดวงอาทิตย์สำหรับโซลาร์ฟาร์ม.” การประชุมสัมมนาวิชาการรูปแบบพลังงานทดแทนสู่ชุมชนแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 10, มหาวิทยาลัยทักษิณ วิทยาเขตพัทลุง, หอประชุมเฉลิมพระเกียรติ. 29 พฤศจิกายน – 1 ธันวาคม 2560.
ประสบการณ์ทำงาน	2558 นักศึกษาฝึกงาน บริษัท ฟีนีสส์ ซอยล์ เทสติ้ง จำกัด 2559 ผู้ช่วยวิจัย สาขาวิชาเทคโนโลยีเพื่อการพัฒนาที่ยั่งยืน คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์