

การศึกษาประสิทธิภาพความเข้มแสงของแผงสะท้อนรังสีแสงอาทิตย์  
สำหรับระบบหอคอยรวมแสงอาทิตย์

A Study on the Intensity Efficiency of a Solar Heliostat  
for a Central Receiver Solar Collector

อำนาจ เงินปลับปลา

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ปีการศึกษา 2556

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

การศึกษาประสิทธิภาพความเข้มแสงของแสงสะท้อนรังสีแสงอาทิตย์  
สำหรับระบบหอคอยรวมแสงอาทิตย์

อำนาจ เงินปลับปลา

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล  
คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ปีการศึกษา 2556

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การศึกษาประสิทธิภาพความเข้มแสงของแผงสะท้อนรังสีแสงอาทิตย์สำหรับระบบหอคอยรวมแสงอาทิตย์
ชื่อ – นามสกุล	นายอำนาจ เงินลับปลา
สาขาวิชา	วิศวกรรมเครื่องกล
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์บุญฤทธิ์ ประสาทแก้ว, D.Eng.
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	นายมนูศักดิ์ จานทอง, Dr.-Ing.
ปีการศึกษา	2556

### บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นการศึกษาเชิงทดลองเกี่ยวกับสมรรถนะของระบบสะท้อนแสงอาทิตย์ที่ใช้สำหรับระบบหอคอยรวมแสงอาทิตย์ ซึ่งระบบหอคอยรวมแสงอาทิตย์จะมีแผงสะท้อนแสงหลายแผงและติดตั้งไว้ในตำแหน่งที่เหมาะสม โดยแต่ละแผงจะทำงานอิสระต่อกัน แผงสะท้อนแสงจะทำหน้าที่สะท้อนแสงไปยังตัวรับแสงที่ถูกติดตั้งไว้บนหอคอยทำให้ความเข้มแสงสูงขึ้น ความเข้มแสงเฉลี่ยที่ตกกระทบบนตัวรับแสงในแต่ละวันจะขึ้นอยู่กับตัวแปรที่สำคัญ เช่น จำนวนแผง ลักษณะและคุณสมบัติของตัวสะท้อนแสง ตำแหน่งของแผงและตัวรับแสง เป็นต้น ซึ่งตัวแปรเหล่านี้มีผลต่อความเข้มแสง กล่าวคือจะทำให้ขนาดพื้นที่ตกกระทบบนตัวรับแสงที่เวลาใดๆ มีค่าแตกต่างกันไป

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาประสิทธิภาพระบบสะท้อนรังสีแสงอาทิตย์ที่มีขนาดใกล้เคียงกับขนาดที่ใช้ในงานจริงและทดสอบความแม่นยำในการสะท้อนรังสี โดยศึกษาทั้งแผงสะท้อนรังสีแบบแผ่นเรียบและแบบที่มีการเพิ่มความเข้มแสง มีการวิเคราะห์ประสิทธิภาพความเข้มของแสงที่เปลี่ยนไปอันเนื่องมาจากมุมสะท้อนที่เปลี่ยนแปลงตลอดวัน โดยมีการออกแบบโปรแกรมและสร้างระบบควบคุมแผงสะท้อนแสงด้วยวิธีคำนวณหาตำแหน่งดวงอาทิตย์เพื่อกำหนดมุมของแผง

ผลการทดสอบแผงสะท้อนแสงแบบแผ่นเรียบพบว่า ประสิทธิภาพความเข้มแสงมีค่าอยู่ระหว่าง 0.5-0.7 ผลการทดลองแผงสะท้อนแสงแบบที่มีการเพิ่มความเข้มแสงพบว่าประสิทธิภาพความเข้มแสงสูงสุดเกิดขึ้นเวลาใกล้เคียงวันมีค่าประมาณ 11 และมีอัตราความเข้มแสงเฉลี่ยอยู่ที่ประมาณ 9 และความเข้มของแสงจะลดลงในช่วงเช้าและบ่าย โดยทั้งช่วงเช้าและบ่ายมีอัตราความเข้มแสงลดลงและมีค่าใกล้เคียงกันในเชิงสมมาตร โดยมีค่าความเข้มแสงอยู่ระหว่าง 5-7 จากผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าแบบที่มีการเพิ่มความเข้มแสงให้ประสิทธิภาพความเข้มแสงสูงกว่าแบบแผ่นเรียบมีค่าเฉลี่ยประมาณ 6.5 สำหรับความแม่นยำของระบบสะท้อนแสงมีค่ายอมรับได้คือพื้นที่ตกกระทบบนตัวรับแสงที่ไม่หลุดออกจากพื้นที่ของตัวรับแสง

คำสำคัญ : แผงสะท้อนแสง พลังงานแสงอาทิตย์ หอคอยรวมแสงอาทิตย์ ความร้อนแสงอาทิตย์

<b>Thesis Title</b>	A Study on the Intensity Efficiency of a Solar Heliostat for a Central Receiver Solar Collector
<b>Name - Surname</b>	Mr. Amnart Ngernplabplar
<b>Thesis Advisor</b>	Assistant Professor Boonrit Prasartkaew, D.Eng.
<b>Thesis Co-advisor</b>	Mr. Manusak Janthong, Dr.-Ing.
<b>Academic Year</b>	2556

## ABSTRACT

This thesis presents an experimental study on the performance of a solar heliostat for a solar tower system. This system is usually equipped with the multi-heliostats which are located at the appropriate locations. These heliostats are independent to each other. The heliostat works as a reflector to direct the sun ray to a receiver which is fixed on the tower. The more number of heliostat used, the more solar intensity on the receiver is obtained. The daily average solar intensity depends on the important parameters, e.g., number of heliostat, feature and properties of reflector, locations of heliostat and receiver. These parameters affect on the incident area on the receiver.

This research aims to determine the performance of a prototype solar heliostat which is closed to the actual system size to assess its reflection accuracy. Two types of heliostat, flat and concentrated types, were fabricated and used in this current study. The Influence of angle parameters which affects on the reflection performance was studied. To satisfy the objectives, the heliostat controller system was designed and installed in the experimental setup. The control system in this study is used to adjust the heliostat position by using the calculated solar azimuth and altitude angles.

The experimental results show that, for flat plate heliostat, the intensity efficiency is varied between 0.5-0.7. For concentrated type, the experimental results show that the maximum intensity efficiency occurred at noon with the maximum value of about 11 and the average intensity efficiency is about 9. It can be observed that the intensity efficiency of a concentrated heliostat is higher than the flat plate type about 6.5. In addition, all reflected radiation areas are on the receiver area, it can be concluded that the reflection accuracy is acceptable.

**Keywords:** heliostat, solar energy, solar collector, solar thermal.

## กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.บุญยฤทธิ์ ประสาทแก้ว อาจารย์ที่ปรึกษา และ ดร.มนุศักดิ์ จานทอง อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ที่ได้ให้คำปรึกษาและข้อเสนอแนะในการทำวิจัย รวมถึงแนวทางการแก้ปัญหาและการจัดหาอุปกรณ์ต่างๆ ที่ใช้ในการทำวิจัย ทำให้วิทยานิพนธ์สำเร็จไปด้วยดี

ขอขอบพระคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ผศ. ดร.ทศพล เขตเจนการ กรรมการ ผู้ทรงคุณวุฒิภายนอก ดร.สถาพร ทองวิก ประธานกรรมการ และ ดร.ศโรชา เจริญวิชัย กรรมการ ที่ได้สละเวลาในการให้คำแนะนำเพิ่มเติมพร้อมทั้งข้อเสนอแนะ เพื่อให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น เพื่อใช้ในการพัฒนางานวิจัยต่อไปและสามารถนำไปใช้งานจริงได้อย่างเป็นประโยชน์ต่อไปในอนาคต

ขอขอบพระคุณอาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลและบุคคลากรทุกท่านที่ได้ให้ความอนุเคราะห์อุปกรณ์เครื่องมือต่างๆที่จำเป็นต้องใช้สำหรับงานวิจัยนี้ ตลอดจนอำนวยความสะดวกในเรื่องต่างๆให้กับผู้เขียนทำงานได้อย่างราบรื่น รวมไปถึงเพื่อนนักศึกษาที่คอยให้การสนับสนุนและช่วยเหลือเสมอมา

คุณค่าและผลสำเร็จจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ขอมอบเพื่อบูชาพระคุณบิดา มารดา ครูอาจารย์ และผู้มีพระคุณทุกท่าน ที่มีส่วนในการช่วยเหลือให้งานวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

อำนาจ เงินปลับปลา

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย .....	(3)
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ .....	(4)
กิตติกรรมประกาศ .....	(5)
สารบัญ .....	(6)
สารบัญตาราง .....	(8)
สารบัญรูป .....	(9)
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา .....	12
1.2 วัตถุประสงค์ของ โครงการวิจัย .....	14
1.3 ขอบเขตของ โครงการวิจัย .....	14
1.4 ขั้นตอนการศึกษา .....	15
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ .....	15
บทที่ 2 ทฤษฎีและวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง	
2.1 วรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง .....	16
2.2 เวลาและมุมต่างๆที่เกี่ยวข้องกับ โลกและดวงอาทิตย์ .....	19
2.3 เส้นทางการเดินของดวงอาทิตย์ .....	28
2.4 การแปลงพิกัดระหว่างพิกัดทรงกลมและพิกัดคาร์ทีเซียน (Cartesian) .....	29
2.5 แผงสะท้อนแสงอาทิตย์สำหรับระบบหอคอยแสงอาทิตย์ .....	30
2.6 การหาประสิทธิภาพความเข้มแสง .....	37
2.7 วรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง .....	39
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย	
3.1 แผนการดำเนินงานวิจัย .....	54
3.2 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย .....	55
3.3 เครื่องมือและวิธีการ .....	55
3.4 วิธีวิเคราะห์ข้อมูล .....	64
3.5 ขั้นตอนการเขียนโปรแกรมติดตามและสะท้อนรังสีแสงอาทิตย์ .....	71

## สารบัญ (ต่อ)

### บทที่ 4 ผลการทดลอง

4.1 การทดลองหาประสิทธิภาพของแผงสะท้อนรังสี ..... 73

4.2 การทดสอบความแม่นยำของการสะท้อนรังสีแสงอาทิตย์ ..... 90

### บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง ..... 94

5.2 ปัญหาที่พบในการทำวิจัยและแนวทางการแก้ปัญหา ..... 96

5.3 ข้อเสนอแนะและแนวทางการพัฒนา ..... 97

รายการอ้างอิง ..... 99

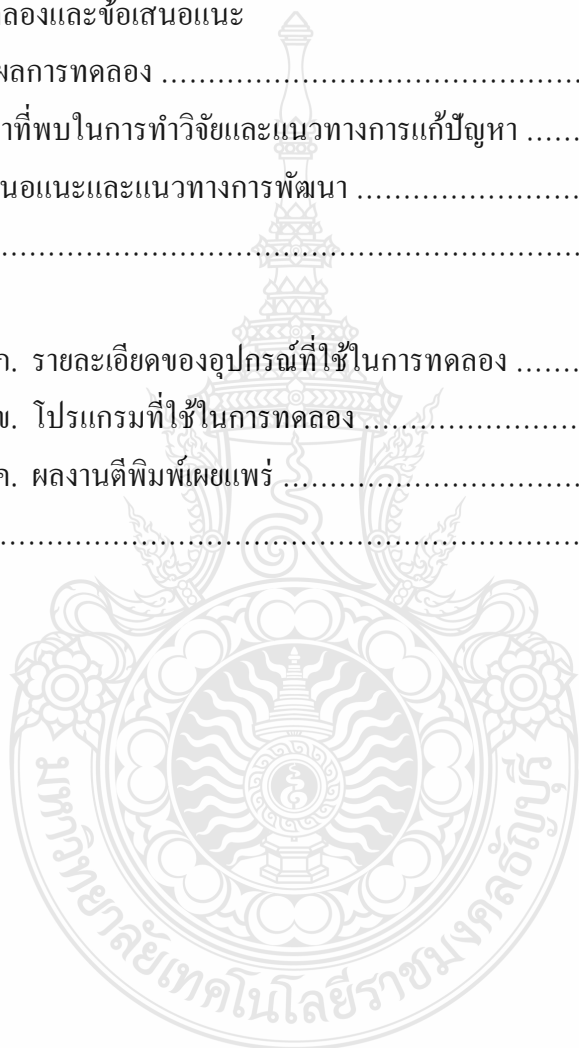
### ภาคผนวก

ภาคผนวก ก. รายละเอียดของอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง ..... 103

ภาคผนวก ข. โปรแกรมที่ใช้ในการทดลอง ..... 121

ภาคผนวก ค. ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่ ..... 126

ประวัติผู้เขียน ..... 146



## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 3.1 แผนการดำเนินงานวิจัย .....	54
ตารางที่ 4.1 มุมแพ่งสะท้อนรังสีเพื่อสะท้อนสู่แพ่งรับรังสีรวมกลาง.....	82
ตารางที่ 4.2 บันทึกข้อมูลจากซอฟต์แวร์โปรแกรมเลี้ยว.....	83
ตารางที่ 4.3 ผลการเก็บข้อมูลพื้นที่รังสีแสงอาทิตย์สะท้อนไปยังเป้าหมายครั้งที่ 1 .....	84
ตารางที่ 4.4 ผลการเก็บข้อมูลพื้นที่รังสีแสงอาทิตย์สะท้อนไปยังเป้าหมายครั้งที่ 2 .....	85
ตารางที่ 4.5 ผลการเก็บข้อมูลพื้นที่รังสีแสงอาทิตย์สะท้อนไปยังเป้าหมายครั้งที่ 3 .....	86
ตารางที่ 4.6 ค่าความแม่นยำในการสะท้อนรังสี.....	91
ตารางที่ ก.1 ผลการทดลองประสิทธิภาพของแพ่งสะท้อนรังสีแบบรวมแสง .....	104





## สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 ภาพถ่ายดวงอาทิตย์ .....	17
รูปที่ 2.2 บริวารของดวงอาทิตย์ในระบบสุริยะ .....	17
รูปที่ 2.3 ภาพถ่ายโลก .....	18
รูปที่ 2.4 กราฟสมการเวลา .....	18
รูปที่ 2.5 โครงสร้างของเส้นบอกตำแหน่งต่างๆบนโลก .....	19
รูปที่ 2.6 ตำแหน่งเส้นละติจูดและลองจิจูด .....	20
รูปที่ 2.7 รูปวงโคจรของโลกรอบดวงอาทิตย์ .....	20
รูปที่ 2.8 มุมซัวโมง .....	22
รูปที่ 2.9 วงโคจรของโลกรอบดวงอาทิตย์และมุมเดคลิเนชัน .....	23
รูปที่ 2.10 แผนภูมิอะนาเลมมา (Analemma) .....	24
รูปที่ 2.11 มุมเซนิต มุมอัลติจูด มุมอะซิมุท .....	26
รูปที่ 2.12 ตำแหน่งมุมตกกระทบและมุมเซนิต .....	27
รูปที่ 2.13 เส้นทางเดินของตำแหน่งดวงอาทิตย์ .....	28
รูปที่ 2.14 ตำแหน่งพิกัดทรงกลมและพิกัด คาร์ทีเซียน (Cartesian).....	30
รูปที่ 2.15 เวกเตอร์ หนึ่งหน่วย ของดวงอาทิตย์ .....	32
รูปที่ 2.16 การวัดตำแหน่งเป้าหมาย .....	33
รูปที่ 2.17 เวกเตอร์ หนึ่งหน่วย ของตำแหน่งเป้าหมาย .....	34
รูปที่ 2.18 เวกเตอร์ หนึ่งหน่วยตั้งฉาก ของระบบสะท้อนแสงอาทิตย์ .....	35
รูปที่ 2.19 มุมตกกระทบและมุมสะท้อนรังสีแสงอาทิตย์ .....	37
รูปที่ 2.20 การเปรียบเทียบค่าพลังงานแสงอาทิตย์ .....	39
รูปที่ 2.21 การเปรียบเทียบค่าพลังงานแสงอาทิตย์ แบบแผงสะท้อนรังสียึดติดอยู่กับที่ และแบบควบคุมการหมุน 2 แกน.....	41
รูปที่ 2.22 การกำหนดตำแหน่งการติดตั้งแผงสะท้อนรังสีแสงอาทิตย์ .....	42
รูปที่ 2.23 มุมตกกระทบและเวลาสุริยะสำหรับตำแหน่งที่กำหนดของแผงสะท้อนรังสี .....	42
รูปที่ 2.24 มุมตกกระทบและเวลาสุริยะสำหรับตำแหน่งที่กำหนดของแผงสะท้อนรังสี .....	43
รูปที่ 2.25 มุมตกกระทบและเวลาสุริยะสำหรับตำแหน่งที่กำหนดของแผงสะท้อนรังสี .....	43

## สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 2.26 การกระจายประสิทธิภาพมุมโคซายน์ของสนามแสงสะท้อนรังสี .....	44
รูปที่ 2.31 เปรียบเทียบประสิทธิภาพมุมโคซายน์ในเวลาต่างกัน .....	46
รูปที่ 2.32 พื้นที่สะท้อนรังสีสุทธิ .....	47
รูปที่ 2.33 ตำแหน่งเวกเตอร์ของหอคอยรังสีรวมกลางและแสงสะท้อนรังสี .....	47
รูปที่ 2.34 การลดลงของพื้นที่แสงสะท้อนรังสีสุทธิจากผลกระทบของมุมโคซายน์ .....	49
รูปที่ 2.35 การสูญเสียของแสงสะท้อนรังสีแสงอาทิตย์ .....	50
รูปที่ 2.36 ความสูงของหอคอยรับรังสีรวมกลางที่เหมาะสมที่สุด .....	51
รูปที่ 2.37 ความสูงของหอคอยรับรังสีรวมกลาง .....	51
รูปที่ 2.38 มุมของรังสีแสงอาทิตย์ .....	52
รูปที่ 2.39 ผลกระทบการแผ่กระจายของภาพสะท้อนรังสีแสงอาทิตย์ .....	52
รูปที่ 3.1 เข็มทิศ .....	56
รูปที่ 3.2 อุปกรณ์วัดมุมก้มเงย (altitude angle).....	57
รูปที่ 3.3 แผนผังการวัดหาตำแหน่งเป้าหมาย .....	58
รูปที่ 3.4 แสงสะท้อนแสงอาทิตย์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้.....	59
รูปที่ 3.5 วงจรการต่อระบบไฟฟ้าของสเต็ปปีงมอเตอร์และ ไดรเวอร์ (driver).....	60
รูปที่ 3.6 ระบบส่งกำลังและขับเคลื่อนแสงสะท้อนแสงอาทิตย์.....	61
รูปที่ 3.7 โปรแกรมแล็บวิว ส่วนชุดควบคุมเพื่อหาตำแหน่งดวงอาทิตย์ (front panel) .....	62
รูปที่ 3.7 เป้าหมายหอคอยรังสีแสงอาทิตย์ (solar tower).....	62
รูปที่ 3.8 การติดตั้งสเต็ปปีงมอเตอร์เพื่อขับเคลื่อนของแสงสะท้อนรังสีแสงอาทิตย์ .....	62
รูปที่ 3.9 เป้าหมายหอคอยรังสีแสงอาทิตย์ (solar tower).....	63
รูปที่ 3.9 ส่วนเขียนและพัฒนาโค้ดของโปรแกรมแล็บวิว (block diagram) .....	63
รูปที่ 3.10 งานปรับปรุงแสงรับรังสีหอคอยแสงอาทิตย์ (solar tower).....	63
รูปที่ 3.11 แสงสะท้อนรังสีที่จัดเตรียมเพื่อการทดสอบประสิทธิภาพความเข้มแสง .....	64
รูปที่ 3.12 ระยะเวลาแม่นยำของการสะท้อนรังสีแสงอาทิตย์ .....	65
รูปที่ 4.1 พื้นที่รังสีแสงอาทิตย์ที่สะท้อนสู่เป้าหมาย .....	74

## สารบัญรูป(ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.2 แผงสะท้อนรังสีแสงอาทิตย์แบบแผ่นเรียบ .....	74
รูปที่ 4.3 แผงรับรังสีหอคอยแสงอาทิตย์ .....	75
รูปที่ 4.4 การต่อสแต็ปปั๊มมอเตอร์ควบคุมแผงสะท้อนรังสี .....	76
รูปที่ 4.5 วงจรการต่ออุปกรณ์ควบคุมแผงสะท้อนรังสี .....	76
รูปที่ 4.6 ซอฟต์แวร์โปรแกรมเล็บบทวิที่เขียนขึ้นเพื่อใช้ในการควบคุมอุปกรณ์ .....	78
รูปที่ 4.7 พื้นที่รังสีแสงอาทิตย์ที่สะท้อนสู่เป้าหมาย .....	78
รูปที่ 4.8 ตำแหน่งรังสีแสงอาทิตย์ที่สะท้อนสู่เป้าหมาย .....	79
รูปที่ 4.9 ผลการทดลองประสิทธิภาพของแผงสะท้อนรังสีแบบแผ่นเรียบ .....	80
รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ของประสิทธิภาพของแผงสะท้อนรังสีกับมุมต่างๆ.....	81
รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ของประสิทธิภาพมุมโคไซน์กับมุมของแผงสะท้อนรังสี.....	82
รูปที่ 4.12 แผงสะท้อนรังสีแบบรวมแสง .....	87
รูปที่ 4.13 การตัดภาพรังสีฉายบนแผงรับรังสีและการหาพื้นที่ด้วยซอฟต์แวร์โปรแกรม .....	88
รูปที่ 4.14 ผลการทดลองประสิทธิภาพของแผงสะท้อนรังสีวันที่ 1 .....	88
รูปที่ 4.15 ผลการทดลองประสิทธิภาพของแผงสะท้อนรังสีวันที่ 2.....	89
รูปที่ 4.16 ผลการทดลองประสิทธิภาพของแผงสะท้อนรังสีวันที่ 3.....	89
รูปที่ 4.17 ความสัมพันธ์ของความเข้มแสงของแผงสะท้อนรังสีแบบรวมแสงกับมุมต่างๆ.....	90
รูปที่ 4.18 การวัดความแม่นยำของการสะท้อนรังสี.....	92
รูปที่ 4.19 การวัดความแม่นยำของการสะท้อนรังสี (ต่อ).....	93

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันสถานการณ์ด้านพลังงานและสิ่งแวดล้อมถูกกำหนดให้เป็นหัวข้อหรือประเด็นหลักในการวางแผนเพื่อการพัฒนาประเทศ ซึ่งปัญหาเหล่านี้กำลังได้รับความสนใจจากประเทศต่างๆ ทั่วโลก เนื่องจากหลายประเทศเกิดความไม่มั่นคงด้านพลังงานที่ผลิตจากเชื้อเพลิงฟอสซิล ความผันผวนของราคาน้ำมันซึ่งมีแนวโน้มที่จะมีราคาสูงขึ้นไปอีกอย่างต่อเนื่อง อันเนื่องจากแหล่งเชื้อเพลิงฟอสซิลมีแนวโน้มลดลงอย่างรวดเร็วและจะหมดไปในระยะเวลาอีกไม่นานนี้ ขณะที่ปัญหาด้านสิ่งแวดล้อมกำลังทวีความรุนแรงมากขึ้นอย่างเห็นได้ชัด ดังนั้นนานาประเทศจึงให้ความสนใจและมุ่งมั่นที่จะพัฒนาพลังงานทดแทนอย่างจริงจัง โดยเฉพาะอย่างยิ่งมีการค้นคว้าวิจัยที่จะนำพลังงานหมุนเวียน เช่น พลังงานแสงอาทิตย์ พลังงานน้ำ และพลังงานลม มาใช้ให้มากขึ้นเพื่อลดปริมาณการใช้เชื้อเพลิงฟอสซิลซึ่งจะสามารถแก้ปัญหาดังกล่าวข้างต้นได้

ดวงอาทิตย์เป็นแหล่งพลังงานที่ใหญ่ที่สุดของโลก เป็นพลังงานสะอาด มีปริมาณมากใช้ได้ อีกนาน คาดว่าประมาณหนึ่งพันล้านปี [1] พลังงานแสงอาทิตย์ที่ส่องมายังโลกในช่วงเวลา 1 เดือน มีค่าพลังงานเท่ากับถ่านหิน  $8 \times 10^{12}$  ตัน ซึ่งเป็นปริมาณถ่านหินที่คาดกันว่ามีเหลืออยู่ในโลกทั้งหมดขณะนี้ [1] ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่า พลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานทดแทนที่จะช่วยแก้ปัญหาการขาดแคลนพลังงานและปัญหาด้านสิ่งแวดล้อมได้อย่างแท้จริง

เทคโนโลยีของพลังงานแสงอาทิตย์โดยทั่วไป แบ่งออกเป็น 2 ลักษณะ คือ พลังงานในรูปความร้อน และ พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตจากเซลล์แสงอาทิตย์ ในประเทศไทยมีงานวิจัยเกี่ยวกับการนำความร้อนจากแสงอาทิตย์มาใช้ในระบบต่างๆ เช่น เครื่องทำน้ำร้อนแสงอาทิตย์ เตาปรุงอาหาร เครื่องอบแห้งเพื่อเพิ่มผลผลิตด้านเกษตรกรรม เป็นต้น แต่สำหรับการนำพลังงานความร้อนที่ได้จากพลังงานแสงอาทิตย์มาผลิตกระแสไฟฟ้านั้น ยังไม่ได้มีการศึกษาวิจัยอย่างจริงจัง และอย่างเป็นรูปธรรม ซึ่งระบบดังกล่าวมีแนวคิดที่จะนำความร้อนจากแสงอาทิตย์ มาแทนเชื้อเพลิงแบบฟอสซิล เพื่อใช้ผลิตไฟฟ้า

ปัจจุบันระบบการผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์มีหลายรูปแบบสามารถแบ่งตามลักษณะของตัวสะสมความร้อนแสงอาทิตย์ที่มีใช้กันอยู่ในปัจจุบันได้ 3 แบบ แบบแรกคือแบบรางพาราโบลา (parabolic trough) เทคโนโลยีการผลิตไฟฟ้าแบบรางพาราโบลา มักจะใช้แผ่นกระจกหรือวัสดุสะท้อนแสงโค้งหน้าตัดรูปพาราโบลามีลักษณะเป็นรางยาว ทำหน้าที่รวมพลังงาน

แสงอาทิตย์ไปยังท่อหรือวัสดุรับแสงยาวนานกับรางตรงตำแหน่งโฟกัสของรางพาราโบลา เพื่อถ่ายเทพลังงานความร้อนให้กับของเหลวซึ่งเป็นสารทำงาน เพื่อให้มีอุณหภูมิสูงขึ้นและสามารถนำพลังงานความร้อนไปใช้งานได้ โดยการทำความร้อนด้วยวิธีนี้สามารถทำอุณหภูมิสูงถึง 400 องศาเซลเซียส เนื่องจากอุณหภูมิสูงมากทำให้น้ำในท่อกลายเป็นไอน้ำ ต่อจากนั้นจะถูกส่งไปยังกังหันไอน้ำ (steam turbine) ซึ่งแกนต่ออยู่กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ซึ่งสามารถนำไฟฟ้าไปใช้งานต่อไป [22]

แบบที่สองคือ แบบจานพาราโบลา (parabolic dish) ลักษณะเป็นจานกลมทรงพาราโบลา (คล้ายกระทะ) ทำหน้าที่สะท้อนพลังงานแสงอาทิตย์ไปยังตัวรับความร้อนที่ตั้งอยู่บนจุดโฟกัส แผงสะท้อนโค้งทำด้วยกระจกหรือฟิล์มบาง ใช้ระบบหมุนตามดวงอาทิตย์ 2 แกน เพื่อรวมแสงเป็นจุดเดียว และแบบสุดท้ายคือแบบรับสี่รวมกลาง (central receiver solar collector) ที่มีตัวรับความร้อนติดตั้งบนหอคอยรวมแสงที่ล้อมรอบด้วยแผงสะท้อนรังสี ทำหน้าที่สะท้อนรังสีไปยังหอคอยรวมแสงอาทิตย์ซึ่งทำหน้าที่ดูดซับพลังงานความร้อนไว้และจะส่งความร้อนไปใช้ประโยชน์หรือนำไปเก็บไว้ในถังเก็บกักเพื่อนำมาใช้งานต่อไป [2]

งานวิจัยก่อนหน้านี้ส่วนใหญ่เป็นงานวิจัยเกี่ยวกับการออกแบบและสร้างระบบสะท้อนรังสีแสงอาทิตย์ เพื่อให้ได้พลังงานความร้อนสูงสุดสำหรับนำไปใช้ในการผลิตกระแสไฟฟ้า ดังนั้นการหาตำแหน่งดวงอาทิตย์ และการควบคุมแผงสะท้อนแสงอาทิตย์ถือว่าเป็นเรื่องที่สำคัญที่สุดแต่ก็ยังไม่มีการนำเสนอรายละเอียดเกี่ยวกับเรื่องนี้ เช่น โครงการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานความร้อนของแสงอาทิตย์กำลังผลิต 11 MW ให้พลังงานไฟฟ้า 24.3 GW-h ต่อปี ใช้แผงสะท้อนรังสี 624 แผง แผงละ  $120\text{ m}^2$  ซึ่งผิวถูกทำให้โค้งเพื่อรวมแสงอาทิตย์ไปยังแผงรับพลังงานแสงอาทิตย์ [3] ระบบทำงานด้วยน้ำร้อนซึ่งเป็นไอน้ำอัดตัวที่ อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียสที่ความดัน 40 บาร์ที่ด้านบนของหอคอยและจ่ายน้ำร้อนลงมาให้กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังไอน้ำเพื่อผลิตไฟฟ้า แผงรับพลังงานแสงอาทิตย์ถูกติดตั้งที่ความสูง 115 เมตรซึ่งทำให้มีพื้นที่สำหรับการแลกเปลี่ยนความร้อนประมาณ  $200\text{ m}^2$  กับน้ำ

งานวิจัยนี้ [3] เป็นงานวิจัยที่ศึกษาเกี่ยวกับการติดตามดวงอาทิตย์ และการปรับปรุงแก้ไขการโยกของหอคอยรวมแสงโดยใช้กล้องจับการเคลื่อนไหวของศูนย์กลางของหอคอยรวมแสง ต่อมา [4], ได้พัฒนาระบบติดตามดวงอาทิตย์โดยใช้เทคนิคการประมวลผลภาพ จากนั้น [5] ศึกษาและนำเสนอเกี่ยวกับการออกแบบและสร้างระบบติดตามดวงอาทิตย์ 2 ระบบคือด้วยกล้องและการคำนวณหาพิกัดตำแหน่งดวงอาทิตย์ วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นการศึกษาเกี่ยวกับประสิทธิภาพสำหรับระบบพลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์ แบบรับสี่รวมกลาง (central receiver) อันเนื่องมาจากความเข้มแสงที่เปลี่ยนแปลงตามช่วงเวลา รวมทั้งตัวแปรต่างๆ เช่น ความแม่นยำ ที่มีผลต่อความเข้มของแสงและประสิทธิภาพที่ส่งไปยังหอคอยรวมแสง โดยใช้วิธีการติดตามดวงอาทิตย์ ด้วยการคำนวณหาพิกัด

ตำแหน่งของดวงอาทิตย์และสังเกตสัญญาณไปควบคุมการหมุนของแผงสะท้อนแสงอาทิตย์ในตำแหน่งต่างๆ ให้รังสีสะท้อนไปยังตัวรับรังสี โดยทำการปรับปรุงแผงสะท้อนแสงอาทิตย์ซึ่งเขียนและพัฒนาโปรแกรมควบคุมการทำงานเองทั้งหมด

## 1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

1.2.1 เพื่อสร้างแผงสะท้อนรังสีแสงอาทิตย์ทั้งแบบผิวเรียบและผิวโค้งสำหรับระบบสะสมความร้อนแสงอาทิตย์แบบรังสีรวมกลาง

1.2.2 ออกแบบโปรแกรมควบคุมการทำงานของแผงสะท้อนรังสีแสงอาทิตย์

1.2.3 เพื่อทดสอบประสิทธิภาพและศึกษาเกี่ยวกับอิทธิพลของตัวแปรต่างๆที่มีต่อประสิทธิภาพการสะท้อนแสงอาทิตย์ที่ออกแบบให้มีการติดตามดวงอาทิตย์ด้วยวิธีคำนวณหาพิกัดตำแหน่งของดวงอาทิตย์อย่างต่อเนื่องด้วยเวลาจริง (real time)

## 1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย

1.3.1 สร้างระบบสะท้อนแสงอาทิตย์ทั้งแบบผิวเรียบและแบบผิวโค้งหรือแบบที่มีการเพิ่มความเข้มแสง (concentrated type) สำหรับใช้ในการทดลองโดยมีขนาดใกล้เคียงกับขนาดที่ใช้ในงานจริง

1.3.2 ออกแบบโปรแกรมควบคุมแผงสะท้อนรังสีแสงอาทิตย์ที่ควบคุมโดยการคำนวณหาตำแหน่งดวงอาทิตย์

1.3.3 ทดสอบและวิเคราะห์ประสิทธิภาพของระบบสะท้อนแสงในช่วงเวลาต่างๆโดยเปรียบเทียบระหว่างแบบผิวเรียบและผิวโค้ง

ซึ่งโครงการวิจัยดังกล่าวมีสมมุติฐานในการออกแบบดังนี้คือ

1. ให้แกนโลกเอียง 23.45 องศา
2. ใช้ระบบระบุตำแหน่งพิกัดบนพื้นโลก (global positioning system)ซึ่งมีค่าความคลาดเคลื่อนประมาณ 15-25 เมตร เพื่อหาตำแหน่งลัดติจูดท้องถิ่นและลองติจูดท้องถิ่น ของตำแหน่งเสาสะท้อนแสงอาทิตย์เพื่อใช้ในการคำนวณ
3. การหาตำแหน่งของ เป้าหมาย ใช้การวัดด้วยม้วนเทปวัดระยะทางโดยใช้เข็มทิศเป็นเครื่องมือช่วยในการวัด
4. ค่าที่วัดได้พิจารณาเป็นค่าที่ความสูงที่ระดับน้ำทะเลปานกลาง

## 1.4 ขั้นตอนการศึกษา

- 1.4.1 ศึกษารวบรวมข้อมูลการทำงานและออกแบบแผงสะท้อนรังสีแสงอาทิตย์
- 1.4.2 สร้างแผงสะท้อนรังสีแสงอาทิตย์
- 1.4.3 ศึกษาและออกแบบระบบควบคุมมอเตอร์ เพื่อควบคุมการหมุนของแผงสะท้อนรังสีแสงอาทิตย์
- 1.4.4 ติดตั้งมอเตอร์ และอุปกรณ์เพื่อควบคุมการหมุนของระบบสะท้อนแสงอาทิตย์
- 1.4.5 ทดสอบการสะท้อนสู่เป้าหมายของแผงสะท้อนรังสีแสงอาทิตย์
- 1.4.6 ทดสอบหาความเข้มของแสง และความแม่นยำของการสะท้อนและค่ามุมต่างๆของเป้าหมายรังสีรวมกลางแบบผิวเรียบ
- 1.4.7 ทดสอบหาความเข้มของแสง และความแม่นยำของการสะท้อนและค่ามุมต่างๆของเป้าหมายรังสีรวมกลางแบบผิวโค้ง
- 1.4.8 วิเคราะห์และสรุปผลงานวิจัย
- 1.4.9 สรุปและจัดพิมพ์รายงาน

## 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.5.1 ได้ข้อมูลเกี่ยวกับการออกแบบและควบคุมระบบสะท้อนรังสีแสงอาทิตย์สำหรับใช้เป็นแนวทางในการพัฒนาวิศวกรรมพลังงานแสงอาทิตย์ต่อไปในอนาคต
- 1.5.2 เข้าใจถึงระบบการติดตามดวงอาทิตย์โดยเข้าใจการเคลื่อนที่ของดวงอาทิตย์ และระบบสะท้อนแสงอาทิตย์และสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในระบบอื่นๆ เพื่อใช้เป็นพลังงานแบบผสมผสานได้
- 1.5.3 ข้อดีและข้อเสียของระบบดังกล่าวเพื่อวัดประสิทธิภาพของระบบต่อการลงทุน
- 1.5.4 เป็นระบบที่สามารถนำไปพัฒนาต่อเพื่อให้เป็นระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานหมุนเวียนที่สามารถแก้ปัญหาด้านพลังงานและสิ่งแวดล้อมได้ในอนาคต

## บทที่ 2

### ทฤษฎีและวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

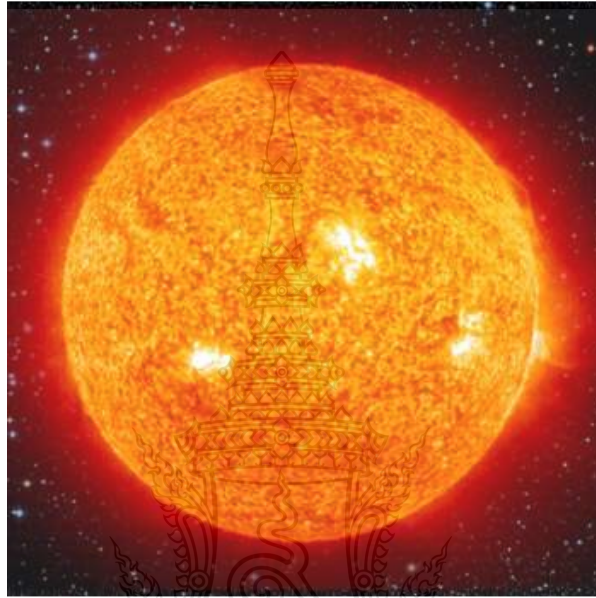
#### 2.1 ข้อมูลเบื้องต้นเกี่ยวกับดวงอาทิตย์และโลก

ดวงอาทิตย์ เป็นดาวฤกษ์ที่ใหญ่ที่สุดในระบบสุริยะมีลักษณะดังรูปที่ 2.1 ดวงอาทิตย์เป็นศูนย์กลางของระบบสุริยะและมีดาวเคราะห์ (planet) เป็นบริวาร โคจรรอบอยู่โดยรอบดังรูปที่ 2.2 เมื่อสภาพแวดล้อมเอื้ออำนวยต่อการดำรงชีวิต สิ่งมีชีวิตก็จะเกิดขึ้นบนดาวเคราะห์เหล่านั้น ความร้อนและแสงอาทิตย์มีความสำคัญต่อการดำรงชีวิตของสิ่งมีชีวิตทุกชีวิตบนโลก ดวงอาทิตย์มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ  $1.4 \times 10^6$  กิโลเมตรและมีมวลประมาณ  $2 \times 10^{30}$  กิโลกรัมเมื่อเทียบกับขนาดของดวงอาทิตย์กับดาวต่างๆแล้วมีขนาดใหญ่กว่าดาวเหล่านั้นมากจึงทำให้มีแรงโน้มถ่วงสูงมากสามารถดึงดูดสิ่งต่างๆในระบบสุริยะไว้ได้ และเคลื่อนที่รอบดวงอาทิตย์ตลอดเวลา ดวงอาทิตย์มีเส้นผ่านศูนย์กลางยาวกว่าโลกประมาณ 110 เท่า และมีพื้นที่ผิวมากกว่าโลกประมาณ 11,900 เท่า ประกอบด้วย ไฮโดรเจนประมาณ 71% ฮีเลียม 27.1% และธาตุชนิดอื่นๆ 1.9% โดยน้ำหนักพื้นผิวของดวงอาทิตย์มีอุณหภูมิประมาณ 5,500 องศาเซลเซียส (5,760 K) ปฏิกิริยาฟิวชั่น (fusion reaction) ของดวงอาทิตย์ทำให้เกิดการแผ่รังสีออกไปยังอวกาศในรูปแบบ รังสีแม่เหล็กไฟฟ้า (electromagnetic radiation) ที่มีความยาวคลื่นต่างๆ ที่มนุษย์เรียกว่าพลังงานแสงอาทิตย์ (solar energy) หรือเรียกโดยทั่วไปว่า แสงแดด ซึ่งรังสีเหล่านี้ประกอบด้วย รังสีแกมมา (gamma rays ความยาว  $10^{-10}$  cm และสั้นกว่า) ไปจนถึงคลื่นวิทยุ (radio waves ความยาว  $10^5$  cm และยาวกว่า) ปัจจุบันดวงอาทิตย์อยู่ในสภาวะสมดุลที่เรียกว่า “hydrostatic balance” หมายถึง ดวงอาทิตย์ไม่ได้กำลังขยายตัวหรือหดตัว ดวงอาทิตย์สร้างพลังงานโดยผ่านกระบวนการนิวเคลียร์ฟิวชั่น โดยที่ดวงอาทิตย์หมุนรอบตัวเองหนึ่งรอบใช้เวลาประมาณ 25–35 วัน [6]

โลก (Earth) มีลักษณะดังรูปที่ 2.3 โลกเป็นดาวเคราะห์ที่อยู่ห่างจากดวงอาทิตย์เป็นลำดับที่สาม และเป็นดาวเคราะห์ที่ใหญ่ที่สุดในระบบสุริยะ ระบบสุริยะคือกลุ่มของดวงดาวซึ่งประกอบไปด้วย ดาวฤกษ์ ดาวเคราะห์ และวัตถุบนท้องฟ้า ดาวฤกษ์มีเพียงดวงเดียวคือ ดวงอาทิตย์ ส่วนดาวเคราะห์มี 9 ดวง ได้แก่ ดาวพุธ ดาวศุกร์ โลก ดาวอังคาร ดาวพฤหัสบดี ดาวเสาร์ ดาวยูเรนัส ดาวเนปจูน ดาวพลูโต โลกมีลักษณะเป็นทรงวงรี โดยในแนวตั้งเส้นผ่านศูนย์กลางยาว 12,711 กม. ในแนวนอนยาว 12,755 กม. ต่างกัน 44 กม. มีพื้นน้ำ 3 ส่วน หรือ 71% และมีพื้นดิน 1 ส่วน หรือ 29% แกนโลกจะเอียง 23.45 องศา กับแนวตั้ง โลกหมุนรอบดวงอาทิตย์เป็นวงรี



ความเร็วประมาณ 30 km/s หมุนครบรอบดวงอาทิตย์ใช้เวลา 1 ปี ในขณะที่เดียวกัน โลกก็หมุนรอบตัวเองไปด้วย โดยครบรอบตัวเองใช้เวลา 24 ชั่วโมงหรือชั่วโมงละ 15 องศา แนวเอียงของแกนโลกจะคงที่ตลอดการโคจรรอบดวงอาทิตย์ โลกถูกห่อหุ้มด้วยชั้นบรรยากาศ (atmosphere) หนาประมาณ 100 km ซึ่งประกอบด้วย ไนโตรเจน 78.08% ออกซิเจน 20.95% อากอน 0.93% และแก๊สอื่นๆ



รูปที่ 2.1 ภาพถ่ายดวงอาทิตย์ [7]

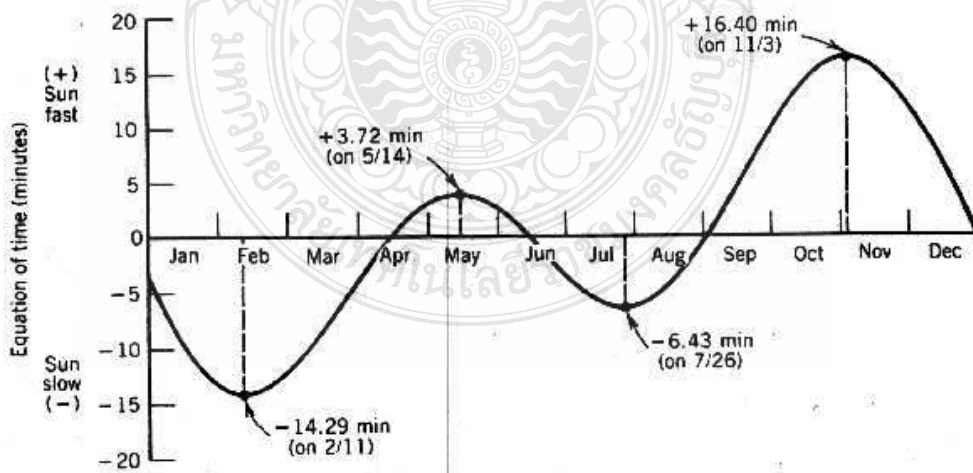


รูปที่ 2.2 บริวารของดวงอาทิตย์ในระบบสุริยะ [7]



รูปที่ 2.3 ภาพถ่ายโลก [8]

จากรูปที่ 2.4 แสดงความแตกต่างระหว่าง เวลาสุริยะปรากฏและเวลาสุริยะเฉลี่ย ในช่วงเวลา 1 ปี ที่โลกโคจรรอบดวงอาทิตย์โดยที่เวลาสุริยะปรากฏนั้นเร็วกว่าสุริยะเฉลี่ยอยู่ 2 ช่วงเวลา คือ ช่วงเดือน เมษายนถึงเดือนมิถุนายนและช่วงเดือนกันยายนถึงเดือนธันวาคมและช้ากว่า สุริยะเฉลี่ย อยู่ 2 ช่วงเช่นกันคือ ช่วงเดือนมกราคมถึงกลางเดือนเมษายน และช่วงมิถุนายน ถึงกันยายน



รูปที่ 2.4 สมการของเวลา (นาทื) ความแตกต่างระหว่างเวลาสุริยะปรากฏและเวลาสุริยะเฉลี่ย [9]

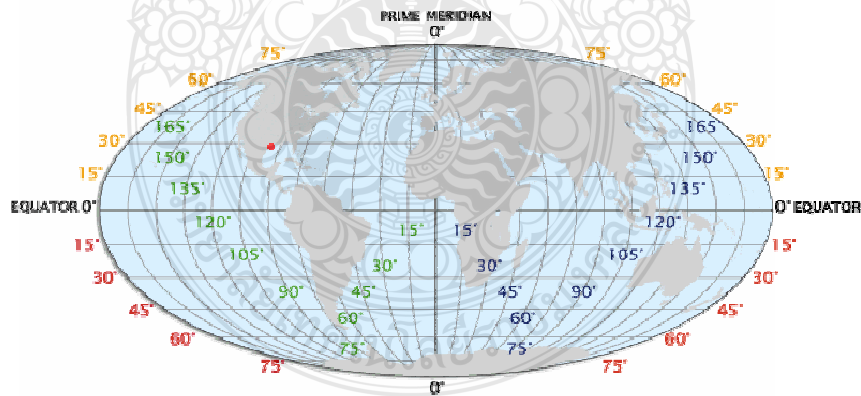
## 2.2 เวลาและมุมต่างๆ ในระบบสุริยะที่เกี่ยวข้องกับโลกและดวงอาทิตย์

ละติจูด (latitude) หรือเส้นรุ้ง คือมุมที่วัดระหว่างจุดใด ๆ กับเส้นศูนย์สูตร มีค่าสูงสุด 90 องศา เส้นที่ลากต่อเชื่อมทุกจุดที่มีละติจูดเท่ากันเราเรียกว่า เส้นขนาน (parallel) เวียนเป็นวงกลมรอบโลก โดยขั้วโลกแต่ละขั้วจะมีค่าละติจูดเป็น 90 องศา เช่น ขั้วโลกเหนือมีละติจูด 90 องศาเหนือ

ลองจิจูด (longitude) หรือเส้นแวง คือ มุมที่วัดจากเส้นไพรม์เมอร์ริเดียนไปทางตะวันออก จาก 0 ถึง +180 องศา และไปทางตะวันตก 0 ถึง -180 องศา โดยที่เส้นไพรม์เมอร์ริเดียน เป็นเส้นสมมุติที่กำหนดให้ เมืองกรีนิชประเทศอังกฤษเป็นแนว 0 องศาลองจิจูดโดยลากเส้นจากแนวเหนือใต้ของโลก

เส้นศูนย์สูตร คือเส้นที่ลากรอบโลกจากฝั่งตะวันตกไปยังตะวันออกที่มีระยะห่างของขั้วโลกเหนือและขั้วโลกใต้เท่ากัน ทำให้เกิดการแบ่งโลกออกเป็น 2 ส่วนเท่าๆกันคือ ซีกโลกเหนือและซีกโลกใต้ หรือเส้นละติจูดที่ 0 องศา

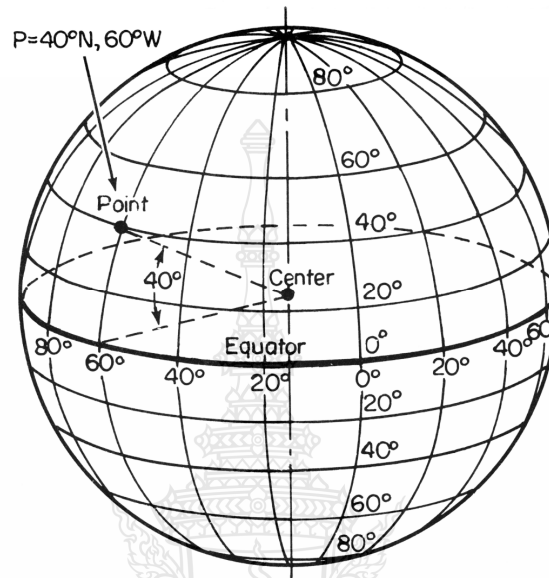
เส้นไพรม์เมอร์ริเดียน คือ เส้นเมริเดียนที่ถูกกำหนดให้เป็น 0 องศา ในการประชุมสากลทั่วโลก ปัจจุบันกำหนดให้เป็นเส้นที่ลากผ่านเมืองกรีนิชประเทศอังกฤษ โดยแนวเส้นเริ่มต้นจากขั้วโลกเหนือ ผ่าน ประเทศฝรั่งเศส สเปน และอีกหลายประเทศไปยังขั้วโลกใต้ ทั้งเส้นศูนย์สูตรและเส้นไพรม์เมอร์ริเดียนถูกแสดงดังในรูปที่ 2.5 และจากรูปที่ 2.6 แสดงตัวอย่างการบอกตำแหน่งพิกัดจุด บนละติจูดที่ 40 องศาเหนือ ลองจิจูดที่ 60 องศาตะวันตก



รูปที่ 2.5 โครงสร้างของเส้น บอกตำแหน่งต่างๆบนโลก [10]

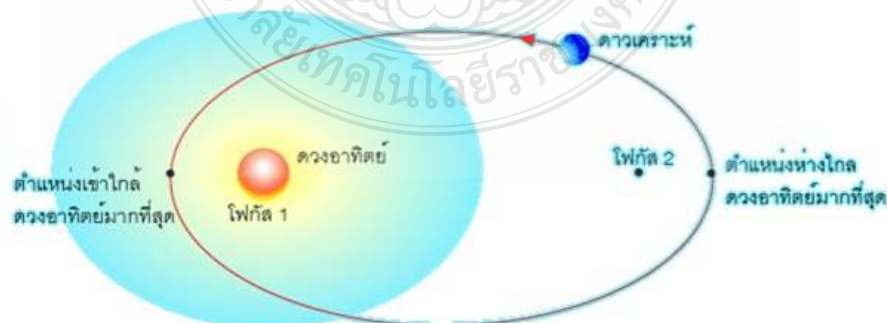
2.2.1 เวลาสุริยะปรากฏ (apparent solar time) เป็นเวลาที่กำหนดโดยใช้ตำแหน่งของดวงอาทิตย์ที่กำหนดบนท้องฟ้าเป็นหลักโดยกำหนดเป็นมุมชั่วโมงอุปกรณที่ใช้อบอกเวลาสุริยะปรากฏ

คือ นาฬิกาแดด (sundial) ช่วงวันสุริยะหมายถึงช่วงเวลาที่ดวงอาทิตย์ผ่านเมอริเดียน2ครั้งการทำให้เกิดเวลาสุริยะ เนื่องจากการหมุนรอบตัวเองของโลก และเวลาสุริยะในรอบปีจะมีค่าที่แตกต่างกันเนื่องจาก โลกมีการเคลื่อนที่ในลักษณะ โคจรรอบดวงอาทิตย์โดยมีวงโคจรเป็นรูปวงรี



รูปที่ 2.6 ตำแหน่งเส้นลัดติจูดและลองติจูด [11]

ทำให้เกิดความแตกต่างของวันเวลาสุริยะดังกล่าว เมื่อดวงอาทิตย์อยู่ตำแหน่งเมอริเดียนของท้องฟ้าพอดี เวลาสุริยะปรากฏจะมีค่าเป็น 0 ชั่วโมง ดวงอาทิตย์ จะปรากฏมีการเคลื่อนที่เร็วเมื่อตำแหน่งของโลกบนวงโคจรอยู่ใกล้ดวงอาทิตย์ และจะปรากฏว่าเคลื่อนที่ช้าเมื่อตำแหน่งของโลกบนวงโคจรอยู่ไกลจากดวงอาทิตย์ดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 รูปวงโคจรของโลกรอบดวงอาทิตย์ [12]

## 2.2.2 เวลาสุริยະเฉลี่ย (mean solar time)

เนื่องจากความเร็วในการเคลื่อนที่ที่ปรากฏของดวงอาทิตย์จริงไม่คงที่ดังนั้นเพื่อสะดวกต่อการกำหนดสเกลของเวลา จึงต้องกำหนด “ดวงอาทิตย์เฉลี่ย” ขึ้นมาโดยสมมุติว่าดวงอาทิตย์เฉลี่ยนี้เคลื่อนที่ด้วยอัตราเร็วคงที่ ตามแนววิถีเคอเลอร์ที่องฟ้าซึ่งมีค่าเท่ากับค่าเฉลี่ยของอัตราการเคลื่อนที่เชิงมุมของดวงอาทิตย์จริงใน 1 ปีตามแนวอคลิปติก

ค่าเวลาสุริยະเฉลี่ยกำหนดโดยค่ามุมชั่วโมงของดวงอาทิตย์เฉลี่ยซึ่งเมื่อตำแหน่งของดวงอาทิตย์เฉลี่ยอยู่บนเมอริเดียนพอดีค่าเวลาสุริยະเฉลี่ยจะเป็น 0 ชั่วโมงและช่วงเวลาที่ดวงอาทิตย์เฉลี่ยอยู่บนเมอริเดียน 2 ครั้งติดกันกำหนดว่าเป็น 1 วันสุริยະเฉลี่ย (mean solar day) ซึ่งวันดังกล่าวนี้จะมีช่วงเวลาที่ต่างกันหมด ความแตกต่างระหว่างเวลาสุริยະปรากฏและเวลาสุริยະเฉลี่ยเรียกว่า “สมการเวลา (equation of time)” ในระหว่างปี ค่าสมการเวลาเปลี่ยนแปลงอยู่ในช่วง -14.2 ถึง +16.3 นาที และสามารถหาสมการของเวลาได้จากรูปที่ 2.4 หรือคำนวณได้จากสมการที่ 2.3

การคำนวณในวิศวกรรมพลังงานแสงอาทิตย์ จะใช้เวลาดวงอาทิตย์ (solar time) ในการคำนวณทั้งสิ้น ซึ่งสามารถหาได้จากสมการที่ 2.1

$$S_t = W_t + EOT - \Delta \quad (2.1)$$

ซึ่ง

$S_t$  คือเวลาดวงอาทิตย์ (solar time)

$W_t$  คือเวลานาฬิกาบนโลก (watch time)

$EOT$  คือสมการปรับเวลามีหน่วยเป็นนาที

$\Delta$  คือความแตกต่างระหว่างเวลาในช่วง เส้นลองจิจูดมาตรฐานและลองจิจูดท้องถิ่น (4 นาทีต่อ 1 องศา) หน่วยเป็นนาที ดังนั้น จะได้

$$\Delta = 4(l_{st} - l_{lo}) \quad (2.2)$$

ซึ่ง

$l_{st}$  คือเส้นลองจิจูดมาตรฐาน

$l_{lo}$  คือลองจิจูดท้องถิ่น

โดยที่สมการของเวลา ( $EOT$ ) สามารถหาได้จากสมการที่ 2.3

$$EOT = 9.87 \sin 2B - 7.53 \cos B - 1.5 \sin B \quad (2.3)$$

เมื่อ

$$B = 360(N - 81)/364 \text{ หน่วยเป็นองศา}$$

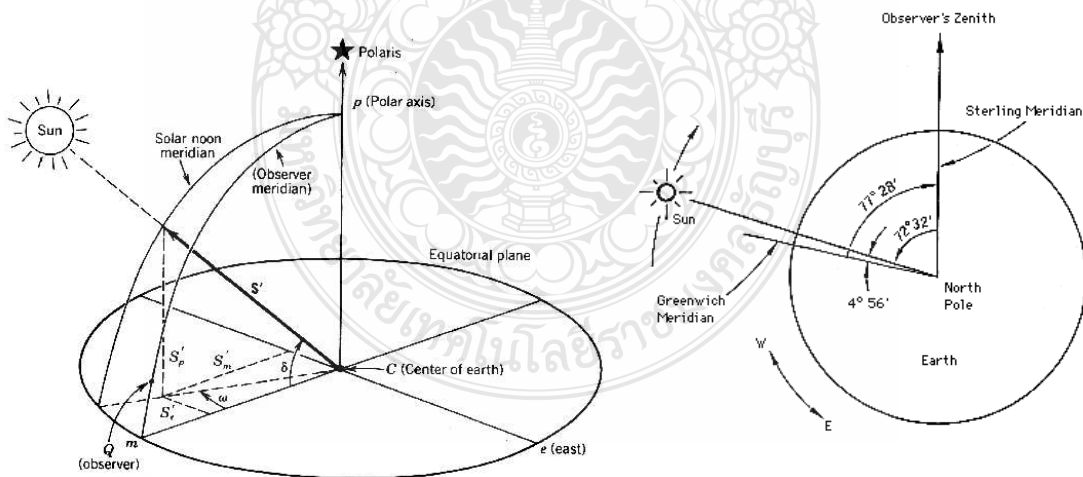
$N =$  จำนวนนับของวันใน 1 ปี

หรือ  $EOT$  สามารถหาค่าได้จากรูปที่ 2.4

2.2.3 มุมชั่วโมง (hour angle,  $\omega$ ) คือ มุมที่วัดจาก เส้นเมริเดียน (meridian) ที่องัดันตามแนวระนาบเส้นศูนย์สูตรไปยังตำแหน่งดวงอาทิตย์ หากวัดไปทางทิศตะวันออกมีค่าเป็นลบหมายถึงเป็นช่วงเวลาก่อนเที่ยงสุริยะ และวัดไปทางทิศตะวันตกมีค่าเป็นบวกหมายถึงเป็นช่วงเวลาลงเที่ยงสุริยะ โดยมีค่า 15 องศาต่อชั่วโมง

มุมชั่วโมงสามารถหาได้จากสมการที่ 2.4 ดังนี้คือ

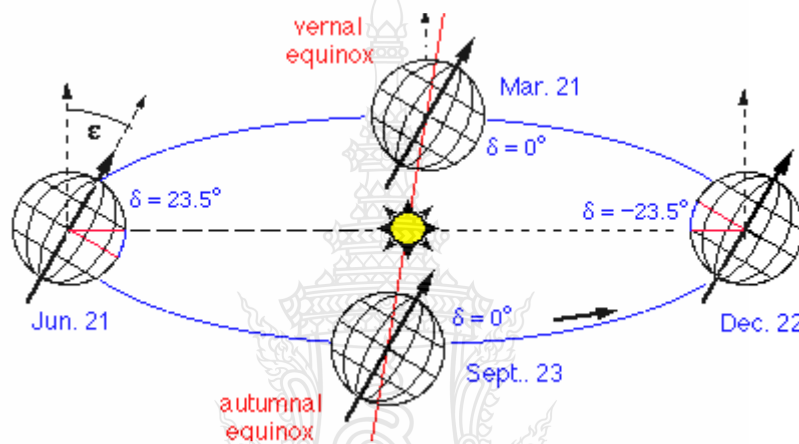
$$\omega = 15(S_t - 12) \quad (2.4)$$



รูปที่ 2.8 มุมชั่วโมง [9]

2.2.4 มุมเดคลิเนชัน (declination angle,  $\delta$ ) คือมุมระหว่างแนวเส้นแวงอาทิตย์ เมื่อเทียบกับ ระนาบศูนย์สูตร มีค่าเป็นบวกเมื่อวัดจากเส้นศูนย์สูตรไปทางทิศเหนือ และมีค่าเป็นลบเมื่อวัดไปทาง ทิศใต้ ในช่วงเวลา 1 ปี มุมเดคลิเนชันเปลี่ยนทุกวันตั้งแต่ +23.45 องศา ถึง -23.45 องศา สามารถ คำนวณได้จากสมการที่ 2.5 หรือจากการหาค่าโดยใช้แผนภูมิอะนาเลมมา (analemma) ดังรูปที่ 2.8

$$\delta = 23.45 \sin \left\{ \frac{360(284 + N)}{365} \right\} \quad (2.5)$$



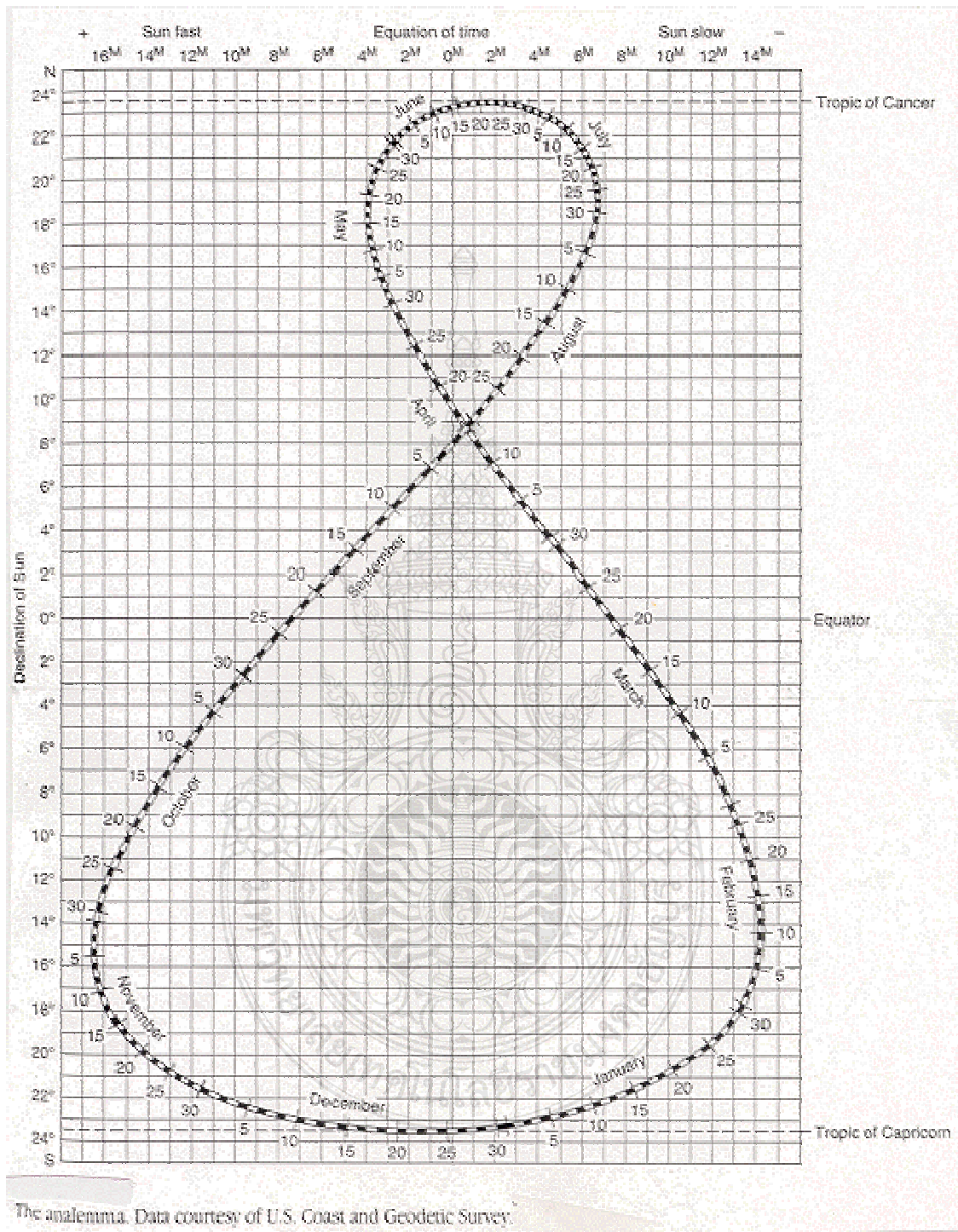
รูปที่ 2.9 วงโคจรของโลกรอบดวงอาทิตย์และมุมเดคลิเนชัน [13]

2.2.5 มุมอัลติจูดดวงอาทิตย์ (solar altitude angle,  $\alpha$ ) คือมุมเงยที่ใช้บอกตำแหน่ง ดวงอาทิตย์ใช้ร่วมกับมุมอะซิมูทโดยวัดจาก แนวระนาบพื้นดินไปยังตำแหน่งดวงอาทิตย์ มุมอัลติจูดสามารถหาได้จากสมการที่ 2.6 ดังนี้

$$\sin \alpha = \cos \phi \cos \delta \cos \omega + \sin \phi \sin \delta \quad (2.6)$$

2.2.6 มุมอะซิมูทดวงอาทิตย์ (solar azimuth angle,  $\gamma_s$ ) คือมุมที่ใช้บอกตำแหน่งของ ดวงอาทิตย์ ใช้ร่วมกับมุมอัลติจูดโดย วัดจากแนวทิศใต้ในระนาบศูนย์สูตร ไปทางทิศตะวันออกหรือ ทิศตะวันตก โดยมีค่าเป็นลบและเป็นบวกตามลำดับ หาได้จากสมการที่ 2.7 ดังนี้

$$\gamma_s = c_1 c_2 \gamma'_s + c_3 (1 - c_1 c_2) (180) / 2 \quad (2.7)$$



รูปที่ 2.10 แผนภูมิอะนาเลมมา (Analemma) [14]



เมื่อ  $\gamma'_s$  หาได้จาก สมการที่ 2.8 ดังนี้ คือ

$$\gamma'_s = \sin^{-1} \left( \frac{\cos \delta \sin \omega}{\cos \alpha_s} \right) \quad (2.8)$$

เมื่อ  $c_1 = 1$  ถ้า  $|\omega| \leq \omega_{ew}$  หรือ  $\omega_{ew} = error$   
 $c_1 = -1$  ถ้า  $|\omega| > \omega_{ew}$

เมื่อ  $c_2 = 1$  ถ้า  $\phi(\phi - \delta) \geq 0$   
 $c_2 = -1$  ถ้า  $\phi(\phi - \delta) < 0$

เมื่อ  $c_3 = 1$  ถ้า  $\omega \geq 0$   
 $c_3 = -1$  ถ้า  $\omega < 0$

$$\omega_{ew} = \cos^{-1} \left[ \frac{\tan \delta}{\tan \phi} \right] \quad (2.9)$$

จากการคำนวณหา  $\omega_{ew}$  [15] ในสมการที่ 2.9 ถ้าผลที่ได้ มีค่าความผิดพลาด (error) นั่นคือ  $|\delta| > |\phi|$  ให้  
 ค่า  $c_1 = 1$  ถ้า  $c_1 c_2 = 1$  สมการ 2.7 จะเป็น

$$\gamma_s = \gamma'_s \quad (2.10)$$

ถ้า  $c_1 c_2 = -1$  สมการ 2.7 จะเป็น

$$\gamma_s = 180c_3 - \gamma'_s \quad (2.11)$$

2.2.7 มุมตกกระทบ (incident angle ,  $\theta$ ) คือมุม ระหว่างแนวลำแสงอาทิตย์ กับแนวเส้น  
 ตั้งฉากกับพื้นผิวรับแสงซึ่งหาได้จากสมการที่ 2.12

$$\begin{aligned} \cos\theta &= \sin\delta \sin\phi \cos\beta - \sin\delta \cos\phi \sin\beta \cos\gamma + \cos\delta \cos\phi \cos\beta \cos\omega \\ &+ \cos\delta \sin\phi \sin\beta \cos\gamma \cos\omega + \cos\delta \sin\beta \sin\gamma \sin\omega \end{aligned} \quad (2.12)$$

เมื่อ

$\theta$  คือ มุมตกกระทบ (incident angle)

$\delta$  คือ มุมเดคลิเนชัน

$\phi$  คือ ลัตติจูดของตำแหน่งที่พิจารณา

$\beta$  คือ มุมเอียง ของพื้นเอียง

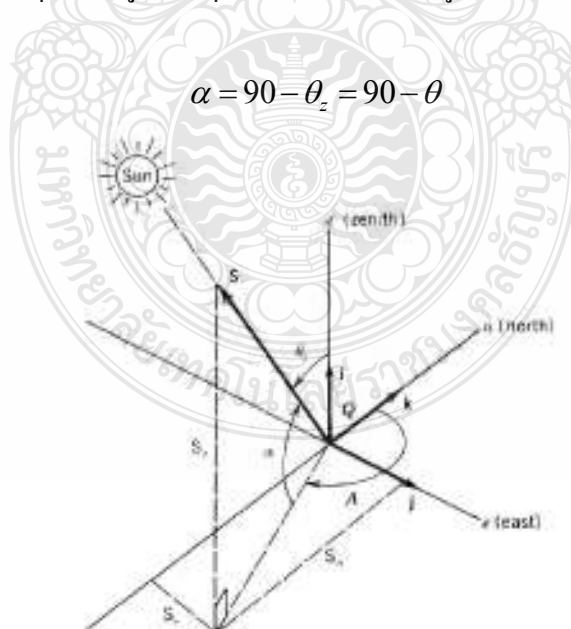
$\gamma$  คือ มุมอะซิมูท (azimuth angle)

ในกรณี พื้นผิวรับแสงเป็นพื้นผิวแนวราบหรือมุม tilt angle เป็น 0 ( $\beta=0$ ) มุมตกกระทบ ก็คือ มุมเซนิต ดังนั้นในสมการ 2.12 จะเป็น

$$\cos\theta = \cos\theta_z = \sin\delta \sin\phi + \cos\delta \cos\phi \cos\omega \quad (2.13)$$

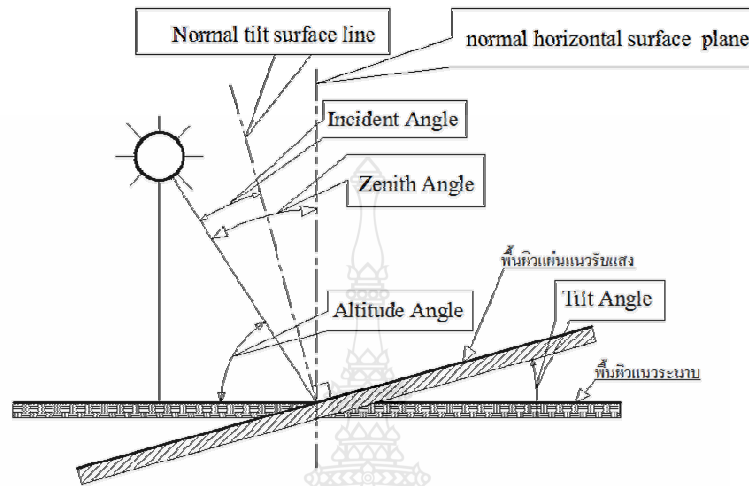
ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างมุม อัลดิจูดและมุมเซนิตพิจารณาจากรูปที่ 2.10 จะได้ดังนี้คือ

$$\alpha = 90 - \theta_z = 90 - \theta \quad (2.14)$$



รูปที่ 2.11 มุมเซนิต มุมอัลดิจูด มุมอะซิมูท [9]

2.2.8 มุมเซนิต (*Zenith Angle* ,  $\theta_z$ ) คือมุมระหว่างแนวลำแสงอาทิตย์ กับแนวเส้นตั้งฉากกับพื้นผิวรับแสงแนวระนาบพื้นแสดงดังรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 ตำแหน่งมุมตกกระทบและมุมเซนิต

2.2.9 มุมชั่วโมงพระอาทิตย์ตก (*sunset hour angle* ,  $\omega_s$ ) หน่วยเป็นองศา ซึ่งก็คือมุมชั่วโมงในช่วงเวลาที่พระอาทิตย์ตก นั่นคือขณะที่มุม Zenith = 90 องศา หรือ อัลติจูด = 0 เมื่อแทนค่าดังกล่าวแล้ว ดังนั้นจากสมการที่ 2.13 จะได้

$$\omega_s = \cos^{-1}(-\tan \phi \tan \delta) \quad (2.15)$$

ดังนั้นสามารถ หาเวลาพระอาทิตย์ตก (*sun set time* , *sst* ) ได้ดังนี้

$$sst = \frac{\omega_s}{15} \quad (2.16)$$

ดังนั้นสามารถ หาเวลาพระอาทิตย์ตก (*sun rise time* , *srt* ) ได้ดังนี้

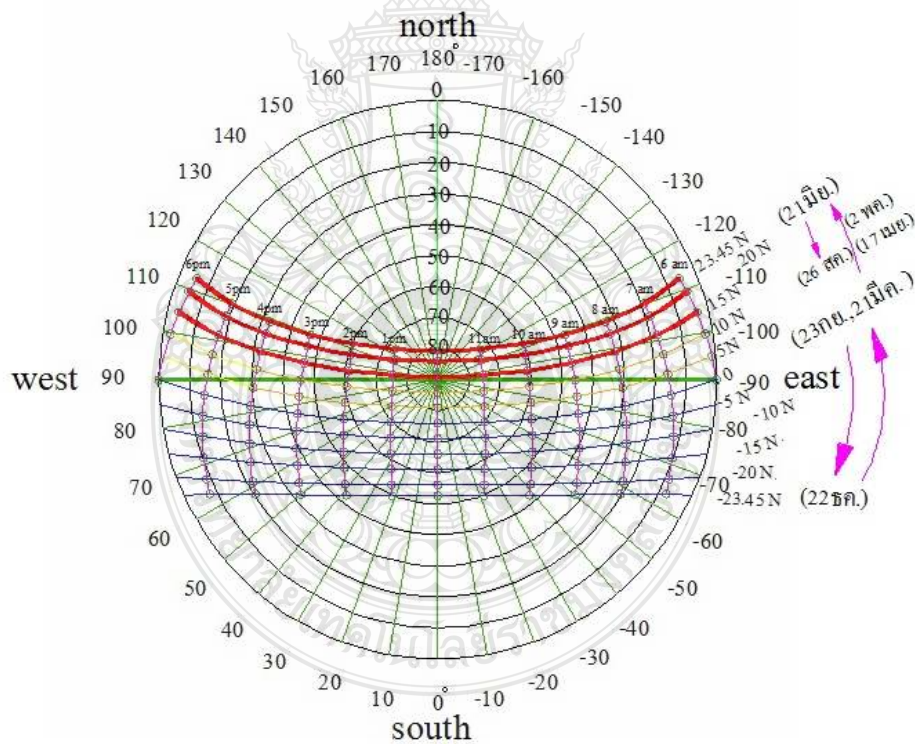
$$srt = 12 - sst \quad (2.17)$$

ดังนั้น ความยาวนานของแต่ละวัน (day length,  $D_l$ ) หน่วยเป็นชั่วโมง จะหาได้จากสมการที่ 2.18

$$D_l = \frac{2\omega_s}{15} = \frac{2}{15} \cos^{-1}(-\tan \phi \tan \delta) \quad (2.18)$$

### 2.3 เส้นทางเดินของดวงอาทิตย์

จากรูปที่ 2.10 และรูปที่ 2.13 แสดงแผนภูมิอะนาเลมมา (Analemma) และ แสดงเส้นทางเดินของดวงอาทิตย์ที่ตำแหน่งละติจูด 14.01 องศาเหนือ ตามลำดับ ด้วยแผนภูมิอะนาเลมมา และ เส้นทางเดินของดวงอาทิตย์ (sun path diagram) จะทำให้เราสามารถประมาณตำแหน่งดวงอาทิตย์ได้ง่ายและรวดเร็วได้ตลอดปี แต่จะต้องใช้เฉพาะตำแหน่งละติจูดของแผนที่ที่ระบุเท่านั้น โดยที่ค่ามุมเดคลิเนชัน, สมการเวลา ก็สามารถอ่านค่าได้จากแผนภูมิอะนาเลมมาเช่นกัน



รูปที่ 2.13 เส้นทางเดินตำแหน่งดวงอาทิตย์ที่ละติจูด 14.01 องศาเหนือ

## 2.4 การแปลงพิกัด ระหว่าง พิกัดทรงกลมและพิกัด คาร์ทีเซียน (Cartesian) [16]

การแปลงตำแหน่งเวกเตอร์ของ ระบบตำแหน่งพิกัด ทรงกลม และระบบตำแหน่งพิกัดคาร์ทีเซียน พิจารณา จากรูปที่ 2.14 จะได้

$$s = \sqrt{x^2 + y^2} = \rho \sin \phi \quad (2.19)$$

$$\rho = \sqrt{s^2 + z^2} = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} \quad (2.20)$$

$$x = s \cos \theta = \rho \sin \phi \cos \theta \quad (2.21)$$

$$y = s \sin \theta = \rho \sin \phi \sin \theta \quad (2.22)$$

$$z = \rho \cos \phi \quad (2.23)$$

ดังนั้น เมื่อต้องการ แปลงจากระบบ พิกัดทรงกลม (sphere coordinates) ไปเป็นพิกัดฉาก (cartesian coordinates) จะได้

$$x = \rho \sin \phi \cos \theta \quad (2.24)$$

$$y = \rho \sin \phi \sin \theta \quad (2.25)$$

$$z = \rho \cos \phi \quad (2.26)$$

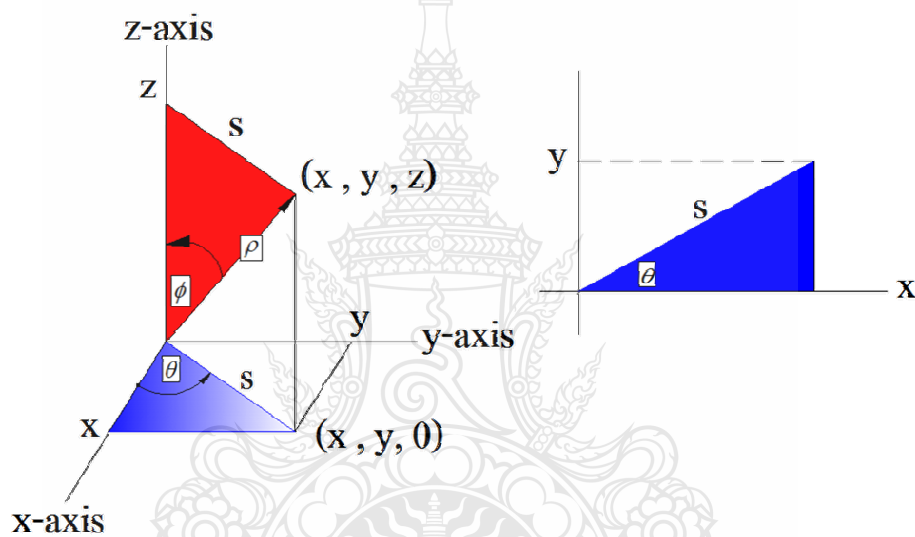
เมื่อต้องการแปลงจากระบบพิกัดฉาก (Cartesian coordinates) ไปเป็นพิกัด ทรงกลม (sphere coordinates) จะได้

$$\rho = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} \quad (2.27)$$

$$s = \sqrt{x^2 + y^2} \quad (2.28)$$

$$\phi = \cos^{-1}\left(\frac{z}{\rho}\right) \quad (2.29)$$

$$\theta = \sin^{-1}\left(\frac{y}{s}\right) \quad (2.30)$$



รูปที่ 2.14 ตำแหน่งพิกัดทรงกลมและพิกัดคาร์ทีเซียน [16]

## 2.5 แผงสะท้อนแสงอาทิตย์สำหรับระบบหอคอยแสงอาทิตย์

### 2.5.1 แผงสะท้อนรังสีแสงอาทิตย์คืออะไร [3]

แผงสะท้อนรังสีแสงอาทิตย์ คืออุปกรณ์ที่ทำหน้าที่สะท้อนรังสีของแสงอาทิตย์โดยติดตามดวงอาทิตย์ตลอดทั้งวันเพื่อสะท้อนแสงไปยังเป้าหมายที่ต้องการเช่น หอคอยแสงอาทิตย์ (solar tower) เพื่อทำให้เกิดแหล่งพลังงานความร้อนและนำไปใช้งานได้ วัสดุที่ใช้ในการสะท้อนรังสีแสงอาทิตย์จะต้องมีคุณสมบัติในการสะท้อนรังสีได้เป็นอย่างดี เช่นกระจก หรือ แผ่นอลูมิเนียมขัดเงาบาง เป็นต้น การทำงานของแผงสะท้อนรังสีมี 2 แบบคือ แบบรวมแสง (concentrated type) และแบบแผ่นเรียบสะท้อนแสง (flat type) โดยทั่วไปแล้วแผงสะท้อนรังสีจะใช้คอมพิวเตอร์เป็นตัวควบคุม

สั่งการให้เกิดมุมสะท้อนที่ถูกต้องไปยังเป้าหมาย โดยอาศัย การหาตำแหน่งดวงอาทิตย์ที่ได้จากการหาสมการทางดาราศาสตร์ (astronomical equations) และตำแหน่งของเป้าหมาย ซึ่งรู้ตำแหน่งได้จากการติดตั้งออกแบบ นอกจากนี้ก็ยังมีแผงสะท้อนรังสีแสงอาทิตย์ ที่ใช้อุปกรณ์ตรวจจับแสง (sensor) เพื่อหาตำแหน่งของดวงอาทิตย์และในบางกรณีที่มี แผงสะท้อนรังสีจำนวนมาก ก็จะไม่ใช้การติดตามดวงอาทิตย์ทั้งหมดโดยมีการพิจารณาปรับตั้งมุมด้วยมือเป็นต้น

### 2.5.2 การหาตำแหน่งดวงอาทิตย์

ในการควบคุมและออกแบบระบบสะท้อนแสงอาทิตย์จำเป็นต้อง หาเวกเตอร์ตำแหน่งของดวงอาทิตย์ จากนั้นแปลงเวกเตอร์ตำแหน่งของดวงอาทิตย์และเป้าหมายให้เป็นตำแหน่งการหมุนของระบบสะท้อนแสง เพื่อสะท้อนพลังงานความร้อนไปยังเป้าหมาย ซึ่งวิธีหนึ่งการหาเวกเตอร์ตำแหน่งของดวงอาทิตย์นั้น สามารถหามุมอะซิมูท และมุมอัลติจูด ได้จากสมการทางดาราศาสตร์ ในสมการที่ 2.6 และ 2.7 ตามลำดับ (ซึ่งเป็นพิกัดตำแหน่งดวงอาทิตย์ในรูปพิกัดทรงกลม) จากนั้นแปลงเวกเตอร์ ให้เป็นพิกัดแบบ คาร์ทีเซียนโดยพิจารณาจากรูป 2.15 จะได้ดังนี้

$$V_s = x_s i + y_s j + z_s k \quad (2.31)$$

$$|V_s| = \sqrt{x_s^2 + y_s^2 + z_s^2} \quad (2.32)$$

เมื่อ

$|V_s|$  คือขนาดของเวกเตอร์ตำแหน่งดวงอาทิตย์

$V_s$  คือ เวกเตอร์ตำแหน่งของดวงอาทิตย์

$x_s$  คือ เวกเตอร์ ตำแหน่งของ ดวงอาทิตย์ในแนวแกน x

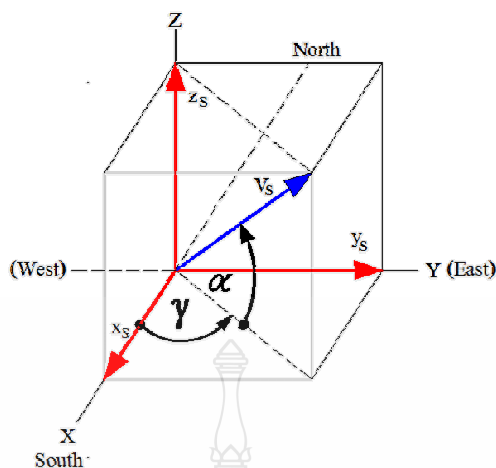
$y_s$  คือ เวกเตอร์ ตำแหน่งของ ดวงอาทิตย์ในแนวแกน y

$z_s$  คือ เวกเตอร์ ตำแหน่งของ ดวงอาทิตย์ในแนวแกน z

$$x_s = \cos \alpha \cos \gamma \quad (2.33)$$

$$y_s = \cos \alpha \sin \gamma \quad (2.34)$$

$$z_s = \sin \alpha \quad (2.35)$$



รูปที่ 2.15 เวกเตอร์ หนึ่งหน่วยของดวงอาทิตย์

เมื่อ

$\alpha$  คือมุมอัลติจูดของดวงอาทิตย์

$\gamma$  คือมุมอะซิมูทของดวงอาทิตย์

จากสมการที่ 2.31 และสมการที่ 2.32 สามารถหาเวกเตอร์หนึ่งหน่วยของดวงอาทิตย์ ( $n_s$ ) ได้ดังนี้

$$n_s = \frac{V_s}{|V_s|} = n_{sx}i + n_{sy}j + n_{sz}k \quad (2.36)$$

เมื่อ

$n_{sx}$  คือเวกเตอร์ตั้งฉากหนึ่งหน่วย ของดวงอาทิตย์ในแกน X สามารถหาได้จาก

$$n_{sx} = \frac{x_s}{\sqrt{x_s^2 + y_s^2 + z_s^2}} \quad (2.37)$$

$n_{sy}$  คือเวกเตอร์ตั้งฉากหนึ่งหน่วย ของดวงอาทิตย์ในแกน y สามารถหาได้จาก

$$n_{sy} = \frac{y_s}{\sqrt{x_s^2 + y_s^2 + z_s^2}} \quad (2.38)$$

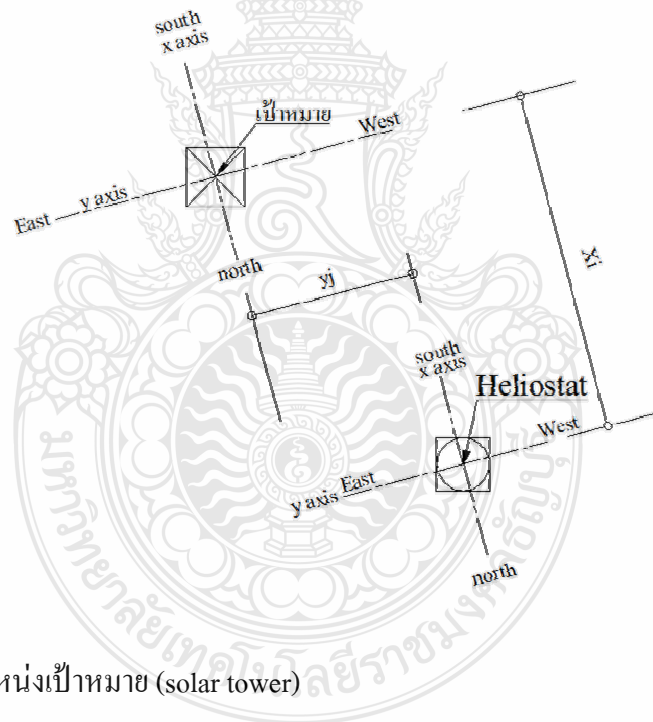


$n_{sz}$  คือเวกเตอร์ตั้งฉากหนึ่งหน่วย ของดวงอาทิตย์ในแกน  $z$  สามารถหาได้จาก

$$n_{sz} = \frac{z_s}{\sqrt{x_s^2 + y_s^2 + z_s^2}} \quad (2.39)$$

### 2.5.3 การหาค่าตำแหน่งของเป้าหมาย

เนื่องจากตำแหน่งของเป้าหมาย (ในที่นี้หมายถึง solar tower) ผู้ออกแบบติดตั้งระบบ เป็นผู้กำหนดตำแหน่งของ เป้าหมายให้มีความสูง ( $z_T$ ) และระยะทางตามแนวแกน  $x$  โดยให้แนวแกน  $x$  เป็นแนวตามทิศเหนือ-ใต้ ( $x_T$ ) และระยะทางตามแนวแกน  $y$  เป็นแนวตามทิศตะวันออก-ตะวันตก ( $y_T$ ) (เพื่อให้สัมพันธ์ กับมุมที่คำนวณได้จากสมการทางดาราศาสตร์) เพื่อให้เป็นแหล่งสะสมพลังงานและพร้อมที่จะนำไปใช้งาน สามารถหาค่าได้จากกรวด ดังในรูปที่ 2.17



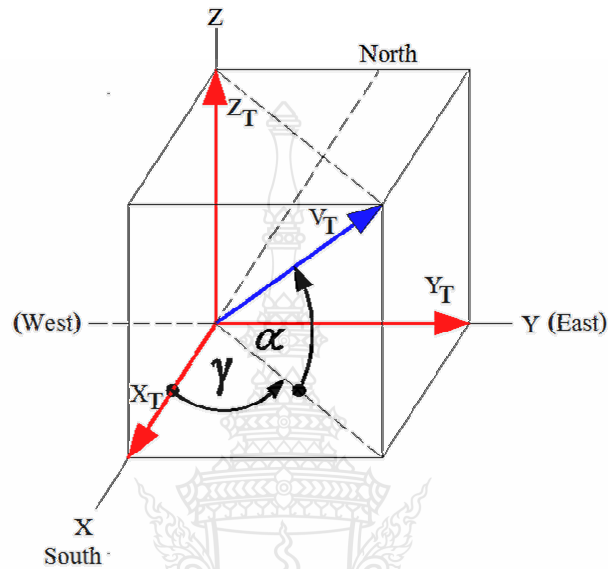
รูปที่ 2.16 การวัดตำแหน่งเป้าหมาย (solar tower) เมื่อ

$z_T$  คือ ระยะความสูงจากกึ่งกลาง แผงสะท้อนรังสีกับกึ่งกลางของเป้าหมาย

$y_T$  คือ ระยะความยาวจากแผงสะท้อนรังสีไปยังเป้าหมาย ตามแนวแกน  $y$  หรือแนวทิศตะวันออก – ตะวันตก

$x_T$  คือ ระยะความยาวจากแผงสะท้อนรังสีไปยังเป้าหมาย ตามแนวแกน  $x$  หรือแนวทิศเหนือ – ใต้

2.5.4 เวกเตอร์ตำแหน่งของเป้าหมาย คือตำแหน่งเป้าหมายที่จะสะท้อนแสงอาทิตย์ไปยังตำแหน่งนั้นสามารถหาได้จากการวัดตำแหน่งดังที่กล่าวมาแล้ว เขียนได้ดังสมการที่ 2.40 โดยมี เวกเตอร์หนึ่งหน่วยของตำแหน่งเป้าหมายดังรูปที่ 2.16



รูปที่ 2.17 เวกเตอร์ หนึ่งหน่วย ของตำแหน่งเป้าหมาย

$$V_T = x_T i + y_T j + z_T k \quad (2.40)$$

$$|V_T| = \sqrt{x_T^2 + y_T^2 + z_T^2} \quad (2.41)$$

เมื่อ

$|V_T|$  คือขนาดของ เวกเตอร์ เป้าหมาย

$V_T$  คือเวกเตอร์ตำแหน่งเป้าหมาย

$x_T$  คือ เวกเตอร์ ตำแหน่งของ เป้าหมายในแนวแกน x

$y_T$  คือ เวกเตอร์ ตำแหน่งของ เป้าหมายในแนวแกน y

$z_T$  คือ เวกเตอร์ ตำแหน่งของ เป้าหมายในแนวแกน z

$$n_T = \frac{V_T}{|V_T|} = n_{Tx} i + n_{Ty} j + n_{Tz} k \quad (2.42)$$

$n_{Tx}$  คือเวกเตอร์ตั้งฉากหนึ่งหน่วย ของเป้าหมายในแกน X สามารถหาได้จาก

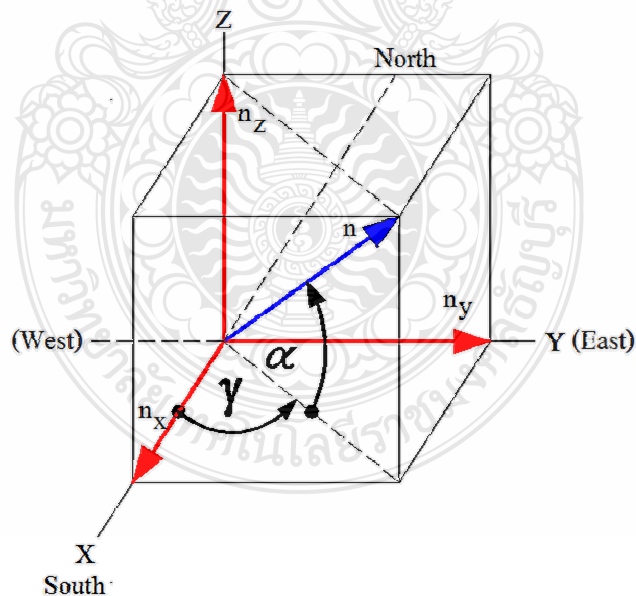
$$n_{Tx} = \frac{x_T}{\sqrt{x_T^2 + y_T^2 + z_T^2}} \quad (2.43)$$

$n_{Ty}$  คือเวกเตอร์ตั้งฉากหนึ่งหน่วย ของเป้าหมาย ในแกน Y สามารถหาได้จาก สมการที่ (2.44)

$$n_{Ty} = \frac{y_T}{\sqrt{x_T^2 + y_T^2 + z_T^2}} \quad (2.44)$$

$n_{Tz}$  คือเวกเตอร์ตั้งฉากหนึ่งหน่วย ของเป้าหมายในแกน Z สามารถหาได้จาก

$$n_{Tz} = \frac{z_T}{\sqrt{x_T^2 + y_T^2 + z_T^2}} \quad (2.45)$$



รูปที่ 2.18 เวกเตอร์ หนึ่งหน่วยตั้งฉาก ของระบบสะท้อนแสงอาทิตย์ [17]

### 2.5.5 การหามุมในการหมุนของระบบสะท้อนแสงอาทิตย์ [17]

สามารถหาได้โดยอาศัยความสัมพันธ์ระหว่าง เวกเตอร์ตำแหน่งของดวงอาทิตย์ และ เวกเตอร์ตำแหน่งของเป้าหมายโดยสามารถหาเวกเตอร์ตั้งฉากของระบบสะท้อนแสงอาทิตย์ ( $n$ ) ได้ ดังนี้

$$n = \frac{n_s + n_T}{|n_s + n_T|} = n_x i + n_y j + n_z k \quad (2.46)$$

เมื่อ

$n_x$  คือเวกเตอร์ตั้งฉากหนึ่งหน่วย ของระบบสะท้อนแสงอาทิตย์ ในแกน X สามารถหาได้จาก

$$n_x = \frac{n_{sx} + n_{Tx}}{\sqrt{(n_{sx} + n_{Tx})^2 + (n_{sy} + n_{Ty})^2 + (n_{sz} + n_{Tz})^2}} \quad (2.47)$$

$n_y$  คือเวกเตอร์ตั้งฉากหนึ่งหน่วย ของระบบสะท้อนแสงอาทิตย์ ในแกน y สามารถหาได้จาก

$$n_y = \frac{n_{sy} + n_{Ty}}{\sqrt{(n_{sx} + n_{Tx})^2 + (n_{sy} + n_{Ty})^2 + (n_{sz} + n_{Tz})^2}} \quad (2.48)$$

$n_z$  คือเวกเตอร์ตั้งฉากหนึ่งหน่วย ของระบบสะท้อนแสงอาทิตย์ ในแกน z สามารถหาได้จาก

$$n_z = \frac{n_{sz} + n_{Tz}}{\sqrt{(n_{sx} + n_{Tx})^2 + (n_{sy} + n_{Ty})^2 + (n_{sz} + n_{Tz})^2}} \quad (2.49)$$

ดังนั้นจากรูปที่ 2.14 และ 2.18 จะสามารถหามุมสะท้อนแสงอาทิตย์ได้ดังนี้คือ

$$\alpha_h = \sin^{-1}(n_z) \quad (2.50)$$

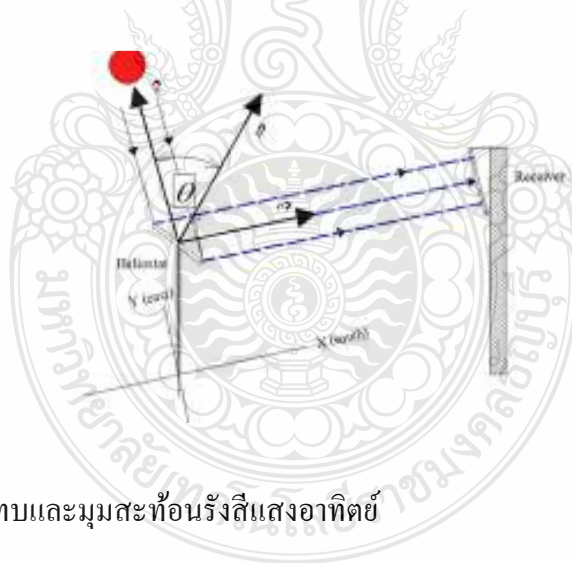
$$\gamma_h = \sin^{-1}\left(\frac{n_y}{\sqrt{n_x^2 + n_y^2}}\right) \quad (2.51)$$

เมื่อ

$\alpha_h$  คือ มุมอัตรัดจุดของ แผลงสะท้อนแสงอาทิตย์

$\gamma_h$  คือ มุมอะซิมุทของ แผลงสะท้อนแสงอาทิตย์

ในการควบคุมการสะท้อนรังสีไปยังแผงรับรังสี ทั้งมุมอัตรัดจุดและมุมอะซิมุท ของ แผลงสะท้อนรังสี จะเปลี่ยนแปลงไป ตามสมการที่ 2.50 และ สมการที่ 2.51 ซึ่งทำให้ แผลงสะท้อนแสงอาทิตย์อยู่ในตำแหน่ง เวกเตอร์ตั้งฉาก (normal vector) เสมอ อันเนื่องมาจากตำแหน่งของ พระอาทิตย์เคลื่อนที่ตลอดเวลา ดังรูปที่ 2.19 จากสมการดังกล่าว จะสามารถหาค่ามุมอัตรัดจุดและ มุมอะซิมุทของแผลงสะท้อนรังสี เพื่อสะท้อนรังสีให้เข้าเป้าหมายที่เวลาใดเวลาหนึ่งได้ เมื่อเวลา เปลี่ยนไป ตำแหน่งดวงอาทิตย์ก็เปลี่ยนไป ค่ามุมสะท้อนรังสีทั้ง 2 ค่า ของแผลงสะท้อนรังสี ก็จะ เปลี่ยนแปลงตามไปด้วย เพื่อรักษาทิศทางการสะท้อนให้เข้าเป้าหมายตลอดเวลา การควบคุมระบบ สะท้อนรังสี จึงใช้ระบบคอมพิวเตอร์ เป็นอุปกรณ์ช่วยในการคำนวณหามุมสะท้อนนี้ตามสมการที่ได้ กล่าวมาแล้ว และสั่งการส่งค่ามุมสะท้อนรังสี ผ่านโปรแกรม แล็บวิว (LabVIEW) ไปควบคุมเสต็ปปีง มอเตอร์ (stepping motor) จำนวน 2 ชุด (ชุดที่ 1 ควบคุมมุมอะซิมุท , ชุดที่ 2 ควบคุม มุมอัตรัดจุด ) ให้ หมุนแผลงสะท้อนรังสี ไปยังตำแหน่งมุมสะท้อนรังสีที่ต้องการได้อย่างถูกต้องตลอดเวลาการทำงาน



รูปที่ 2.19 มุมตกกระทบและมุมสะท้อนรังสีแสงอาทิตย์

## 2.6 การหาประสิทธิภาพความเข้มแสง

ประสิทธิภาพความเข้มแสงคือ สัดส่วนระหว่างพื้นที่ของแสงบนเป้าหมายต่อพื้นที่รับแสง ของแผลงสะท้อนรังสี ในกรณี เมื่อแผลงสะท้อนรังสี สะท้อนรังสีแสงอาทิตย์ไปยังเป้าหมายโดยที่แนว ลำแสงตั้งฉากกับแผลงสะท้อนรังสีและเป้าหมายแล้ว พื้นที่รับแสงที่ตกลงบนเป้าหมายจะเท่ากับพื้นที่ แผลงสะท้อนรังสี ดังนั้นจะได้

$$A_1 = A_2 \quad (2.52)$$

$$x_1 = x_2 \quad (2.53)$$

เนื่องจากแสงจากดวงอาทิตย์มีความเข้มของแสงคงที่ณวันเวลาใดๆ ดังนั้น ความเข้มแสงที่แผงสะท้อนรังสีสะท้อนในแนวตั้งจากณวันเวลาใดๆ มีค่า เป็น  $x \text{ W/m}^2$  (แผงสะท้อนรังสี มีพื้นที่  $1 \text{ m}^2$ )

เมื่อ

$A_1$  =พื้นที่ของแผงสะท้อนรังสี

$A_2$  =พื้นที่ของแสงที่ตกลงบนเป้าหมาย

$x_1$  =ค่าพลังงานความร้อนที่สะท้อนจากแผงสะท้อนรังสี (W)

$x_2$  =ค่าพลังงานความร้อนที่เป้าหมายได้รับ (W)

ในกรณีนี้ แผงสะท้อนรังสีสะท้อนลำแสงไม่ตั้งฉากกับเป้าหมาย จะได้

$$A_1 \neq A_2 \quad (2.54)$$

ดังนั้นประสิทธิภาพของการรับพลังงานของเป้าหมาย (central receiver)จะได้

$$Eff = \frac{x_2/A_2}{x_1/A_1} = \frac{A_1}{A_2} \quad (2.55)$$

$$\eta_I = \frac{A_A}{A_T} \quad (2.56)$$

เมื่อ

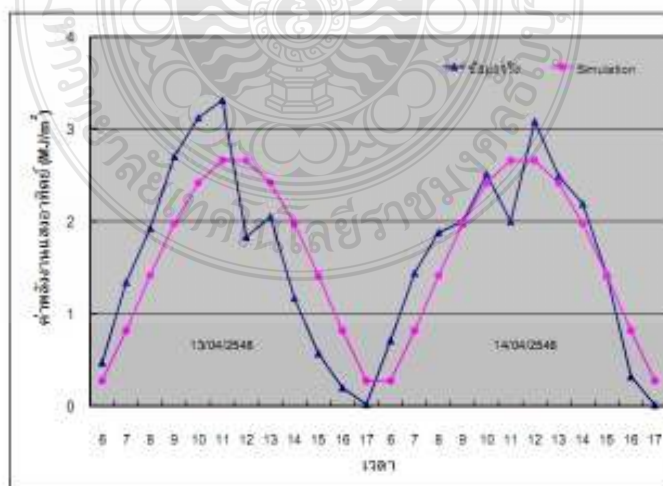
$A_T$  คือ พื้นที่ตกกระทบฉายบนแผงรับรังสีแสงอาทิตย์

$A_A$  คือ พื้นที่สะท้อนแสงของแผงสะท้อนรังสี

## 2.7 วรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

เนื่องจากงานวิจัยด้านพลังงานแสงอาทิตย์กำลังได้รับความสนใจอย่างแพร่หลาย ซึ่งส่วนใหญ่งานวิจัยทั้งหลายได้มุ่งเน้นศึกษาประเด็นต่างๆ ที่สำคัญดังนี้คือ

คงฤทธิ แม้นศิริและคณะ [18] ศึกษาและออกแบบโปรแกรม หาค่าแหน่งดวงอาทิตย์และการจำลอง (sun tracking and simulation) สำหรับการศึกษาและหาค่าพลังงานแสงอาทิตย์ โดยงานวิจัยนี้ช่วยให้สามารถหาค่าแหน่งดวงอาทิตย์ได้อย่างสะดวกและรวดเร็ว โดยแสดงผลในรูปแบบกราฟฟิกและแบบข้อมูล สามารถนำไปพัฒนาเพื่อหาค่าแหน่งและติดตามดวงอาทิตย์เพื่อรับพลังงานจากดวงอาทิตย์ได้อย่างมีประสิทธิภาพผ่านอุปกรณ์รับพลังงานแสงอาทิตย์เช่น แผงรูปพาราโบลิก, แผงสะท้อนรังสี และส่งผ่านพลังงานเพื่อไปใช้งานในรูปแบบต่างๆต่อไป นอกจากนี้โปรแกรมยังสามารถหาค่ามุมต่างๆที่สำคัญได้ เช่น มุม เกล็ดเนินชัน, มุมเซนิต และมุมชั่วโมง สามารถเปรียบเทียบค่าพลังงานแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบบนตัวรับรังสีต่อหน่วยพื้นที่ทั้งแบบเคลื่อนที่ตามดวงอาทิตย์และแบบติดตั้งอยู่กับที่เทียบกับค่าพลังงาน แสงอาทิตย์ที่ตกกระทบในแนวระนาบ จากผลการวิจัยพบว่าพลังงานแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบบนตัวรับรังสีต่อหน่วยพื้นที่แบบเคลื่อนที่ตามดวงอาทิตย์มีค่าเท่ากับ  $23.4 MJ / day.m^2$  และค่าพลังงานแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบบนตัวรับรังสีดวงอาทิตย์ติดตั้งในแนวราบมีค่าเท่ากับ  $19.4 MJ / day.m^2$  งานวิจัยนี้เป็นส่วนหนึ่งของโครงการผลิตพลังงานไฟฟ้าด้วยความร้อนจากแสงอาทิตย์ด้วยระบบ เครื่องยนต์พลังงานความร้อน (dish stirling engine) โดยการหาค่าพลังงานที่ได้จากการวัดเทียบกับการหาค่าพลังงานที่ได้จากการจำลอง (simulation) มีความคลาดเคลื่อนประมาณ 1.36 % ดังแสดงในรูปที่ 2.20



รูปที่ 2.20 การเปรียบเทียบค่าพลังงานแสงอาทิตย์ [18]

การศึกษาเกี่ยวกับระบบติดตามดวงอาทิตย์ โดยใช้เทคนิคการประมวลผลภาพได้ถูกนำเสนอ โดยศักดิ์สิทธิ์ บัวเงินและคณะ [19] งานวิจัยนี้ใช้เทคนิคการติดตามดวงอาทิตย์ด้วยการถ่ายภาพและหาตำแหน่งของดวงอาทิตย์ จากนั้นระบบควบคุมจะสั่งงานให้ สเต็ปป์มอเตอร์ ทำงานหมุนให้แผงโซลาร์เซลล์ตั้งฉากกับตำแหน่งดวงอาทิตย์เพื่อให้สามารถรับพลังงานได้อย่างมีประสิทธิภาพและเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตไฟฟ้า จากการพัฒนาโครงการระบบติดตามดวงอาทิตย์โดยใช้เทคนิคการประมวลผลภาพสามารถสรุปสาระจากการทำโครงการนี้ได้ดังนี้คือ

1. การถ่ายภาพแบบอยู่กับที่ ไม่เหมาะสมกับงานที่ต้องติดตามดวงอาทิตย์ตลอดเวลา
2. การถ่ายภาพโดยให้เคลื่อนที่ไปพร้อมกับแผงเซลล์แสงอาทิตย์เหมาะสมกับงานที่ต้องติดตามดวงอาทิตย์ตลอดเวลา

3. จากการทดลองที่ได้ของระบบติดตามดวงอาทิตย์โดยใช้เทคนิคการประมวลผลภาพสามารถติดตามได้จริงตามที่ออกแบบไว้ โดยการขับ Stepping motor ให้เคลื่อนที่ได้ทั้งสองแนวแกนคือแกนอัลติจูดและแกนอะซิมูท โดยมีการทำงานที่สัมพันธ์กันสำหรับข้อดีของระบบติดตามดวงอาทิตย์นี้จะทำให้ได้ภาพในมุมมองที่กว้างกว่าการใช้โฟโต้ทรานซิสเตอร์ อย่างไรก็ตามระบบติดตามดวงอาทิตย์ยังสามารถใช้เทคนิคอื่นๆได้อีก ดังนั้นในการพิจารณาเชิงประสิทธิภาพว่าเทคนิคใดเหมาะสมที่สุดจึงจำเป็นต้องมีการศึกษาเปรียบเทียบกับเทคนิคอื่นๆต่อไป

ต่อมาการออกแบบและสร้างระบบติดตามดวงอาทิตย์แบบ 2 แกนเพื่อการปรับปรุงประสิทธิภาพของ ตัวรับพลังงานแสงอาทิตย์แบบรางพาราโบลา (parabolic trough collector) ได้ถูกศึกษาโดย George C. Bakos [20] งานวิจัยนี้ ได้ศึกษาการเก็บพลังงานแสงอาทิตย์จาก ตัวรับพลังงานแสงอาทิตย์แบบรางพาราโบลา ในลักษณะการทำงานอย่างต่อเนื่องของระบบติดตามดวงอาทิตย์แบบ 2 แกน โดยใช้ โฟโต้ทรานซิสเตอร์ การเก็บพลังงานได้ถูกวัดและเปรียบเทียบกับ ตัวรับพลังงานแสงอาทิตย์แบบรางพาราโบลา แบบ ฐานยึดคงที่ โดยมีมุมเอียงที่ 40 องศา หันไปทางใต้ ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าการเก็บพลังงานแสงอาทิตย์แบบแผงเคลื่อนที่มีค่าสูงกว่า แบบฐานยึดคงที่ ถึง 46.46% ดังรูปที่ 2.21 ระบบติดตามดวงอาทิตย์ที่นำเสนอนี้มีลักษณะ โครงสร้างเรียบง่าย ธรรมดาและค่าใช้จ่ายในระบบการควบคุมต่ำรวมทั้งค่าบำรุงรักษาต่ำและง่ายต่อการติดตั้งเพื่อการทำงานของระบบ

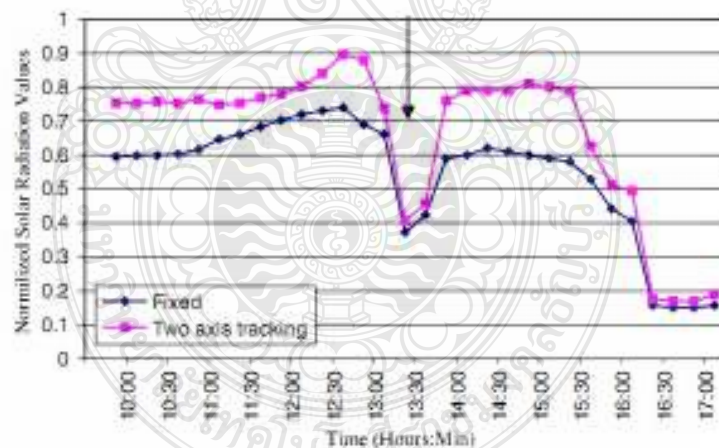
Omar และคณะ [21] ศึกษาเกี่ยวกับการกระจายประสิทธิภาพมุม โคซายน์ของ สนามแสงสะท้อนรังสีของ โรงผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์ (solar thermal power tower plant) งานวิจัยนี้มุ่งเน้นศึกษาประสิทธิภาพที่เกิดจาก ประสิทธิภาพมุม โคซายน์ อันเนื่องจากการจัดวางแผงสะท้อนรังสีในสนามแสงสะท้อนรังสี ที่ลัดติจูด 40.4 องศาซีกโลกเหนือโดยการจัดผังของ



แผงสะท้อนรังสีที่ดีที่สุดคือจัดเรียงแบบแนวรัศมี (radial staggered) [22] และวิเคราะห์ช่องว่างตามแนวรัศมีไม่ให้เกิดการบดบังหรือกีดขวางแนวสะท้อนของแผงสะท้อนรังสีซึ่งกันและกัน (shadow & blocking) ดังรูปที่ 2.30 เพื่อให้มีประสิทธิภาพที่ดีในการจัดวางแผงสะท้อนรังสี ผลการทดลองประสิทธิภาพมุม โคซายน์ จากช่วงเวลา 8.00 -16.00น. โดยการเปรียบเทียบมุมตกกระทบในช่วง Equinox โชน ประสิทธิภาพมุมโคซายน์ที่สูงกว่าจะเคลื่อนตัวจากด้านตะวันตกเฉียงเหนือ ไปยังตะวันออกเฉียงเหนือและในช่วงเวลา 12.00น. จะมีการกระจายตัวในลักษณะใกล้เคียงกัน โดยหอคอยรับรังสีแสงอาทิตย์รวมกลาง (solar tower) มีความสูง ( $h_t$ ) สูง 93 เมตร แผงสะท้อนรังสีแนวรัศมีวงแรกมีค่าประมาณ  $0.8h_t$  ย่านสนามแผงสะท้อนรังสี อยู่ที่ 140 องศา จำนวนแนวรัศมีติดตั้งแผงสะท้อนรังสี เท่ากับ 24 วงรัศมีแผงสะท้อนรังสีทั้งหมด 380 ตัวดังแสดงในรูปที่ 2.24

Experimental average daily total solar radiation in MJ/m<sup>2</sup>

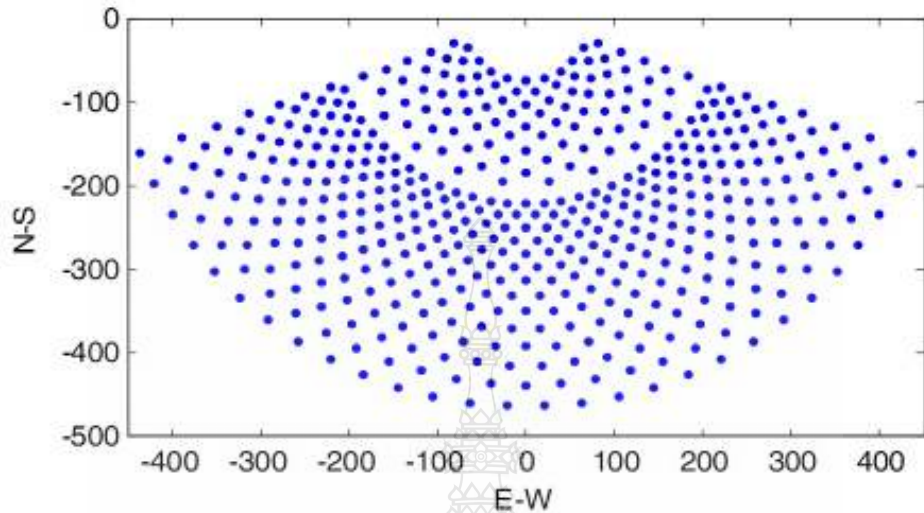
Date	Two axis tracking (MJ/m <sup>2</sup> )	Fixed at 40° latitude (MJ/m <sup>2</sup> )	Gain (%)
20-04-04	34.07	23.52	44.86
12-05-04	35.76	24.55	45.66
01-06-04	38.15	25.63	48.85
Average	35.99	24.57	46.46



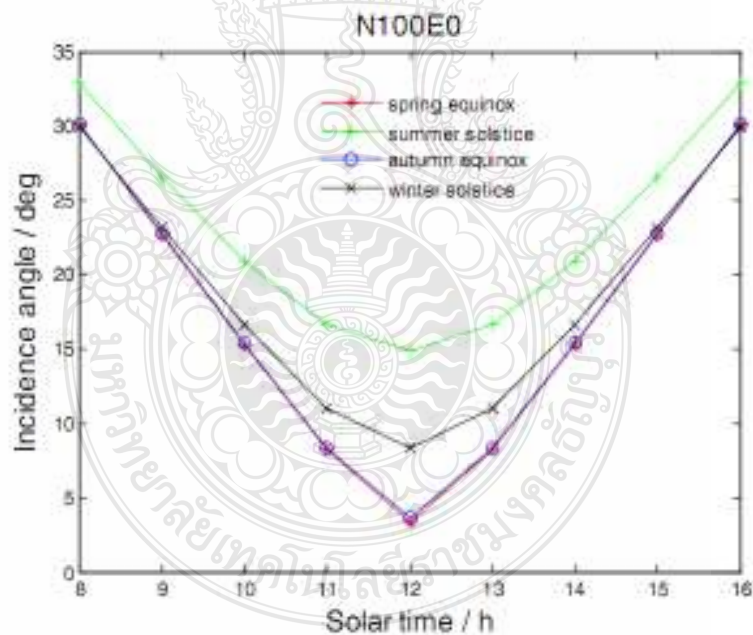
รูปที่ 2.21 การเปรียบเทียบค่าพลังงานแสงอาทิตย์ แบบยึดติดและแบบควบคุมการหมุนของแผงสะท้อนรังสี [21]

จากรูปที่ 2.23 ตำแหน่งติดตั้ง ของแผงสะท้อนรังสี อยู่ที่ N100E0 ก็คือตำแหน่งที่อยู่ในแนวเหนือใต้ สังเกตพิกัดตำแหน่งได้ดังรูปที่ 2.22 ดังนั้นมุมตกกระทบที่กระทำต่อแผงสะท้อนรังสีแสงอาทิตย์ จึงมีค่าเชิงสมมาตรกันระหว่างช่วงเช้าและช่วงบ่ายดังนั้น ค่าประสิทธิภาพมุมโคซายน์

จึงใกล้เคียงกันในช่วงเช้าและช่วงบ่าย



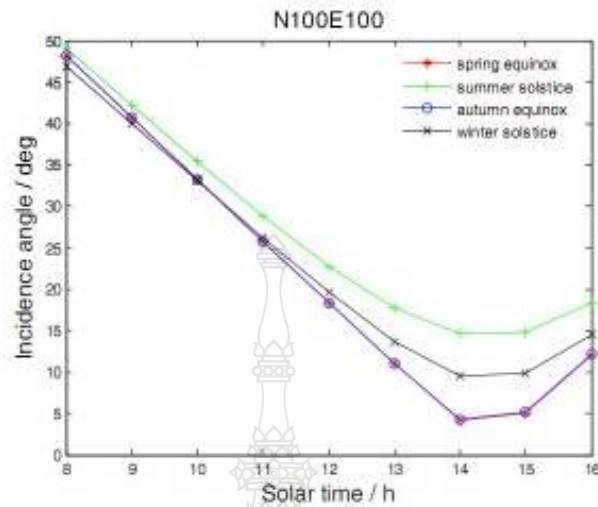
รูปที่ 2.22 การกำหนดตำแหน่งการติดตั้งแผงสะท้อนรังสีแสงอาทิตย์ [27]



รูปที่ 2.23 มุมตกกระทบและเวลาสุริยะสำหรับตำแหน่งที่กำหนดของแผงสะท้อนรังสี [27]

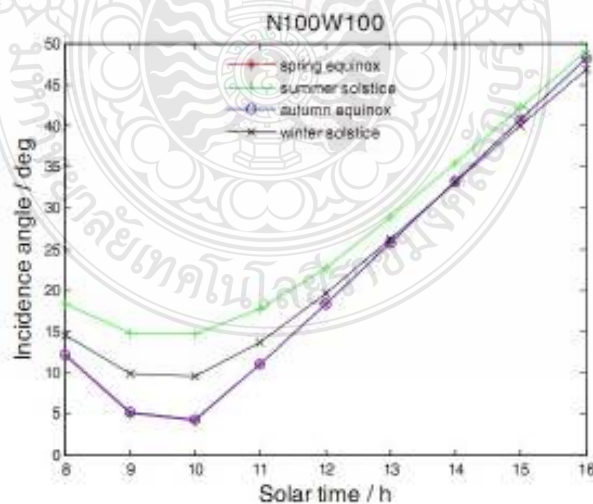
จากรูปที่ 2.24 ตำแหน่งติดตั้ง ของแผงสะท้อนรังสี อยู่ที่ N100 E 100 ก็คือตำแหน่งที่อยู่เอียงไปทางทิศตะวันออกเล็กน้อย สังเกตพิกัดตำแหน่งได้ดังรูปที่ 2.22 ดังนั้นมุมตกกระทบที่กระทำต่อแผงสะท้อนรังสีแสงอาทิตย์ ในช่วงเช้าจะมีค่าสูงกว่าช่วงบ่าย ส่งผลให้ประสิทธิภาพมุมโคซายน์

ในช่วงเช้ามีค่ามาก ( $\theta_i$  มีค่าน้อย) กว่าช่วงบ่าย



รูปที่ 2.24 มุมตกกระทบและเวลาสุริยะสำหรับตำแหน่งที่กำหนดของแผงสะท้อนรังสี [22]

จากรูปที่ 2.25 ตำแหน่งติดตั้ง ของแผงสะท้อนรังสี อยู่ที่ N100 W100 ก็คือตำแหน่งที่อยู่  
 เยื้องไปทางทิศตะวันตกเล็กน้อย สังเกตพิกัดตำแหน่งได้ดังรูปที่ 2.22 ดังนั้นมุมตกกระทบที่กระทำ  
 ต่อแผงสะท้อนรังสีแสงอาทิตย์ ในช่วงบ่ายจะมีค่าสูงกว่าช่วงเช้า ส่งผลให้ประสิทธิภาพมุม โคซายน์  
 ในช่วงบ่ายมีค่ามาก ( $\theta_i$  มีค่าน้อย) กว่าช่วงเช้า



รูปที่ 2.25 มุมตกกระทบและเวลาสุริยะสำหรับตำแหน่งที่กำหนดของแผงสะท้อนรังสี [22]

สรุปผลการทดลองงานวิจัยหัวข้อนี้ สามารถอธิบายตามรูปที่ 2.26 ถึง 2.30 ได้ดังนี้คือ

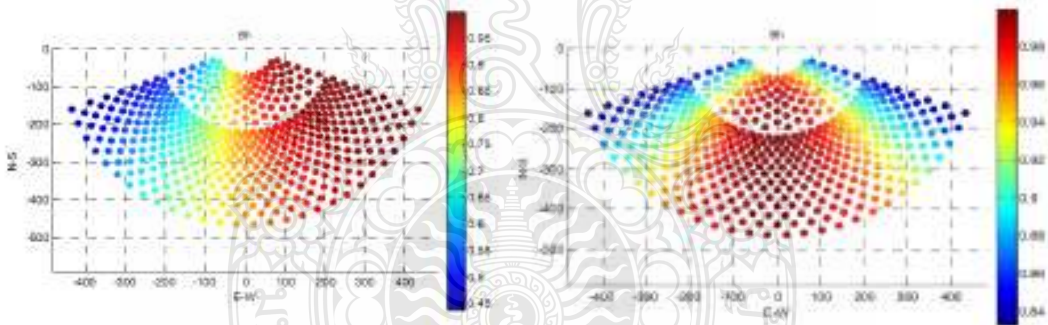
ประสิทธิภาพมุมโคชาชนัน จะดีที่สุดบริเวณ กึ่งกลางแนวเหนือใต้ในช่วงเวลากลางวัน (12:00น.) ทั้งแบบแผงสะท้อนรังสีแสงอาทิตย์แบบ fixed และแบบควบคุมการหมุนเพื่อสะท้อนรังสี

หากเป็นแผงสะท้อนรังสีแบบหมุน เมื่อทำงานในแต่ละช่วงเวลาจะมีค่าประสิทธิภาพมุมโคชาชนัน ที่ดีอยู่ในช่วงแนวเหนือใต้ในลักษณะสมมาตร

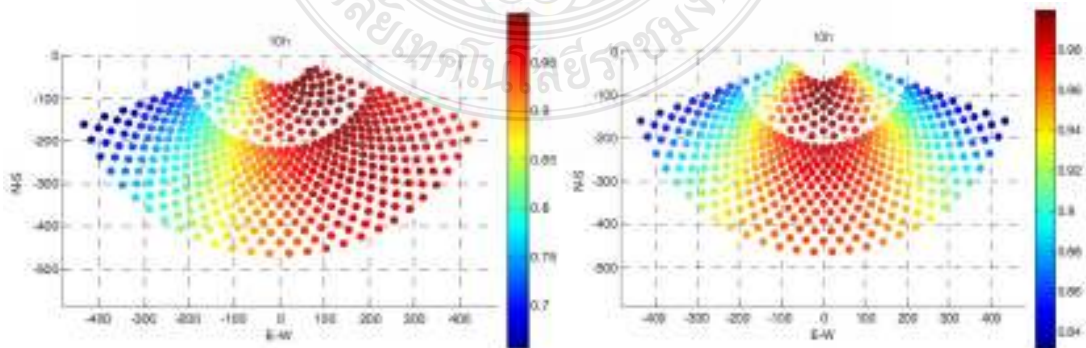
หากเป็นแผงสะท้อนรังสีแบบ fixed ค่า ประสิทธิภาพมุม โคชาชนัน ของแผงจะดีทางโซน ทิศตะวันตกเมื่อเวลาช่วงเช้า(พระอาทิตย์อยู่ทางทิศตะวันออก) และในทางกลับกัน ประสิทธิภาพมุม โคชาชนัน ของจะดีทางโซนทิศตะวันออกเมื่อเวลาช่วงบ่าย(พระอาทิตย์อยู่ทางทิศตะวันตก )

ประสิทธิภาพมุม โคชาชนัน ของแผงสะท้อนรังสีแบบควบคุมการหมุนจะมีค่าอยู่ระหว่าง 0.92-0.94 ดังแสดงในรูปที่ 2.31

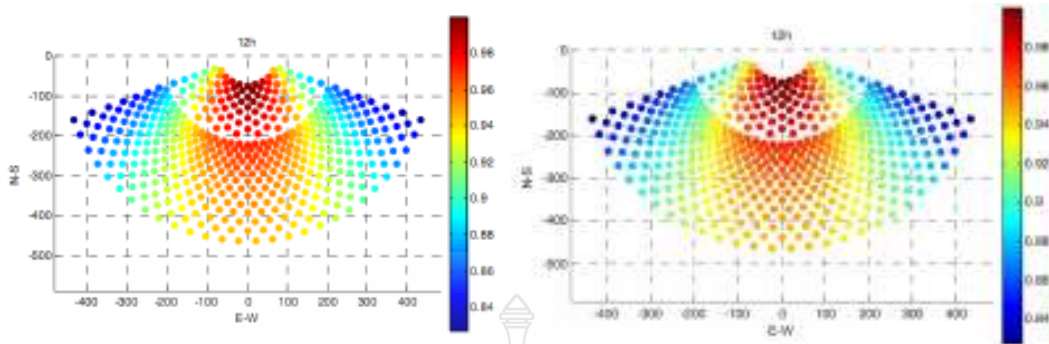
ประสิทธิภาพมุม โคชาชนัน ของแผงสะท้อนรังสี แบบ ยึดติดกับที่ จะมีค่าค่อยๆเพิ่มมากขึ้น ในช่วงเวลาเช้าถึงเที่ยงวัน และจะมีค่าน้อยค่อนๆน้อยลงจาก เที่ยงวันจนถึง16:00 น. ดังแสดง ในรูปที่ 2.31



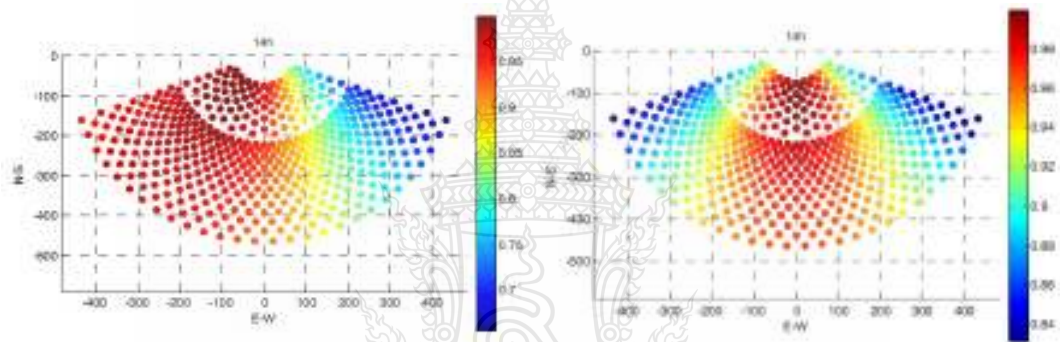
รูปที่ 2.26 การกระจายประสิทธิภาพ มุม โคชาชนัน ของสนามแผงสะท้อนรังสีช่วง 8:00น. [22]



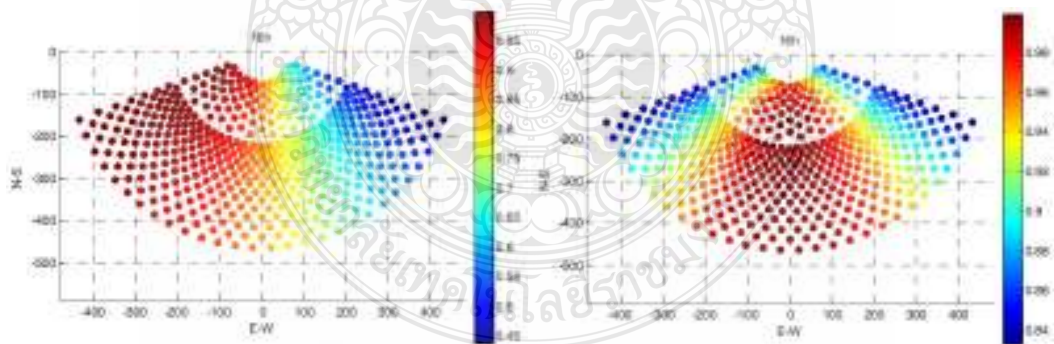
รูปที่ 2.27 การกระจายประสิทธิภาพ มุม โคชาชนัน ของสนามแผงสะท้อนรังสีช่วง 10:00น. [22]



รูปที่ 2.28 การกระจายประสิทธิภาพ มุม โคชานน์ ของสนามแผงสะท้อนรังสีช่วง 12:00น. [22]

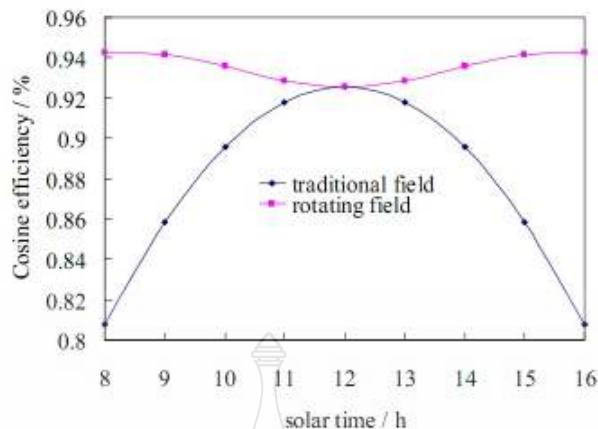


รูปที่ 2.29 การกระจายประสิทธิภาพ มุม โคชานน์ ของสนามแผงสะท้อนรังสีช่วง 14:00น. [22]



รูปที่ 2.30 การกระจายประสิทธิภาพมุม โคชานน์ ของสนามแผงสะท้อนรังสีช่วง 16:00น.

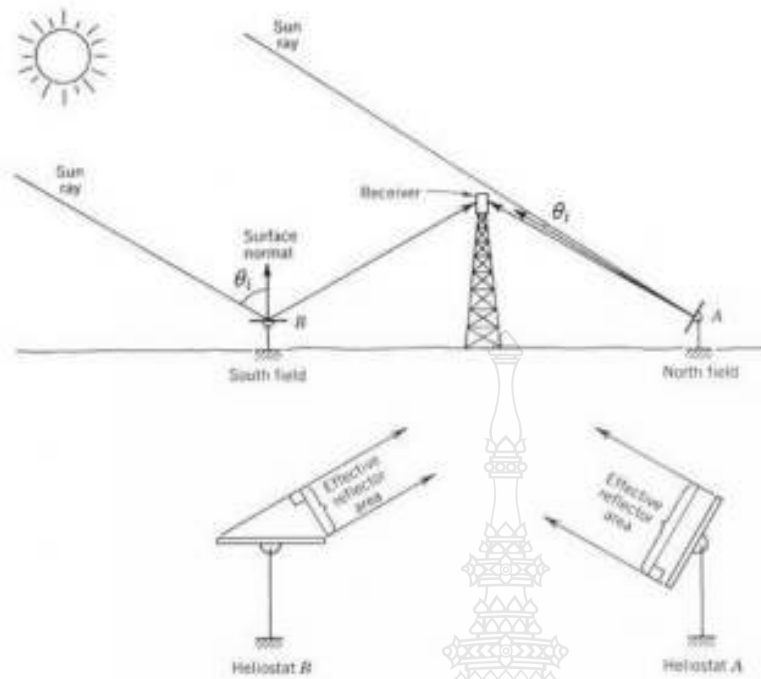
แผงสะท้อนรังสีแบบควบคุมการหมุนและตำแหน่งหอคอยรวมแสงอาทิตย์ซึ่งทำงานสัมพันธ์กับตำแหน่งการเคลื่อนที่ของมุมอะซิมุทของดวงอาทิตย์มีผลต่อการเพิ่มประสิทธิภาพมุม โคชานน์



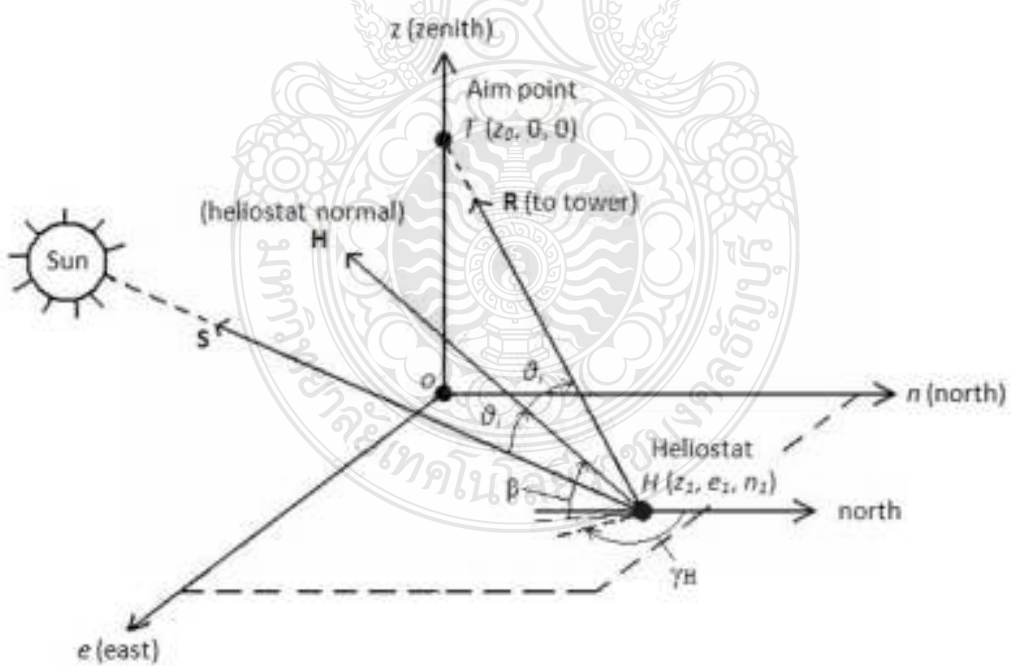
รูปที่ 2.31 เปรียบเทียบประสิทธิภาพมุมโคซายน์ในเวลาที่แตกต่างกัน

Danial James Murray และคณะ [23] ศึกษาการออกแบบและวิเคราะห์ระบบหอคอยรับพลังงานแสงอาทิตย์รวมกลางแบบขนาดเล็ก งานวิจัยหัวข้อนี้เพื่อพัฒนาและวิเคราะห์รูปแบบโรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนของระบบหอคอยรับรังสีแสงอาทิตย์รวมกลางที่แคลิฟอร์เนียร์ พิกัดที่ละติจูด 35.28 องศาเหนือและลองจิจูดที่ 120.66 องศาตะวันตกรูปแบบโมเดลนี้วิเคราะห์การส่งพลังงานแบบทั่วไปที่เวลาใดๆระหว่างปี โรงไฟฟ้าถูกออกแบบเพื่อให้มีกำลังผลิตไฟฟ้าที่ 100 kW และถูกเสริมจากการเผาไหม้ของแก๊สธรรมชาติ วัตถุประสงค์เพื่อหาขนาดที่เหมาะสมและแผนผังการติดตั้งของแผงสะท้อนรังสี, ความสูงของหอคอยรับรังสีรวมกลางที่เหมาะสม, และการเลือกขนาดกังหันไอน้ำ, ขนาดของตัวรับรังสีรวมกลาง ข้อกำหนดในการออกแบบนี้คือใช้พลังงานจากแสงอาทิตย์สูงขึ้นไปจนถึง 73.2 % การทำงานเฉลี่ยทั้งปี = 44 % โดยใช้ต้นทุนกำลังในการขับเคลื่อนกำเนิดไฟฟ้า เป็น กังหันไอน้ำ แบบพลังงานผสมผสานสำหรับสัดส่วนของพลังงานแสงอาทิตย์จะเพิ่มมากขึ้นนั้นไม่สามารถเป็นไปได้เนื่องจากขนาดของพื้นที่มีจำกัด (ประมาณ 0.5 เฮกตาร์ที่ใช้ในโครงการนี้) ซึ่งทำให้ถูกจำกัดจำนวนที่เป็นไปได้ในการติดตั้งของ แผงสะท้อนรังสีแสงอาทิตย์

จากรูปที่ 2.32 และ 2.34 แสดงให้เห็นความแตกต่างของ ผลกระทบมุมโคซายน์ (cosine effect) เมื่อมีความแตกต่างของตำแหน่งสนามแผงสะท้อนรังสีแสงอาทิตย์ เมื่อแต่ละสนามมีค่า  $\theta_i$  ต่างกัน ประสิทธิภาพมุมโคซายน์ จึงมีค่าต่างกัน จากรูปดังกล่าวประสิทธิภาพมุมโคซายน์ของสนามแผงสะท้อนรังสีแสงอาทิตย์ด้านทิศเหนือดีกว่าทางด้านสนามแผงสะท้อนรังสีทางทิศใต้



รูปที่ 2.32 พื้นที่สะท้อนรังสีสุทธี [22]



รูปที่ 2.33 ตำแหน่งเวกเตอร์ของหอคอยรังสีรวมกลางและแผงสะท้อนรังสี [22]

ตามกฎการสะท้อนของกระจก

$$\theta_{incident} = \theta_{reflected} \quad (2.57)$$

ดังนั้น เวกเตอร์ H จะแบ่งมุมเป็น 2 ส่วนระหว่าง เวกเตอร์ S และ vector R ซึ่ง

$$\cos(2\theta_i) = S.R \quad (2.58)$$

$$\cos(2\theta_i) = R_z \sin \alpha_s + R_e \cos \alpha_s \sin(\gamma_s) + R_n \cos(\alpha) \cos(\lambda_s) \quad (2.59)$$

$$\cos(2\theta_i) = \frac{(z_0 - z_1) \sin(\alpha_s) - e_1 \cos \alpha_s \sin \gamma_s - n_1 \cos \alpha_s \cos \gamma_s}{\sqrt{(z_0 - z_1)^2 + e_1^2 + n_1^2}} \quad (2.60)$$

เมื่อสามารถหาค่ามุม  $\theta_i$  ได้จากสมการที่ 2.60 โดยการแทนค่าตัวแปรต่างๆ และค่าตำแหน่งของแผงสะท้อนรังสีดังรูปที่ 2.33 ดังนั้นก็จะสามารถหาพื้นที่แผงสะท้อนรังสีสุทธิ (effective area) ได้จากสมการที่ 2.61 ซึ่งพื้นที่แผงสะท้อนรังสีสุทธิสามารถอธิบายได้ดังรูปที่ 2.34 และสมการที่ 2.61 นั่นคือ

หาก  $\theta_i$  มีค่าน้อย จะทำให้  $\cos \theta_i$  มีค่ามาก ซึ่งหากค่า  $\cos \theta_i$  ยิ่งมีค่าเข้าใกล้ 1 มากขึ้นเท่าไรหมายถึง พื้นที่แผงสะท้อนรังสีสุทธิเข้าใกล้เคียงพื้นที่แผงสะท้อนรังสี (heliostat) ซึ่งจะเป็นผลดีต่อประสิทธิภาพของแผงสะท้อนรังสีมากขึ้นตามไปด้วย ดังสมการที่ 2.61

ในทางตรงข้ามหาก  $\theta_i$  มีค่ามาก จะทำให้  $\cos \theta_i$  มีค่าน้อย ซึ่งหากค่า  $\cos \theta_i$  ยิ่งมีค่ามากขึ้นเท่าไร นั่นหมายถึง พื้นที่แผงสะท้อนรังสีสุทธิจะต่างกับพื้นที่แผงสะท้อนรังสี (heliostat) มากขึ้นซึ่งจะเป็นผลเสียต่อประสิทธิภาพของแผงสะท้อนแสงมากขึ้นด้วย

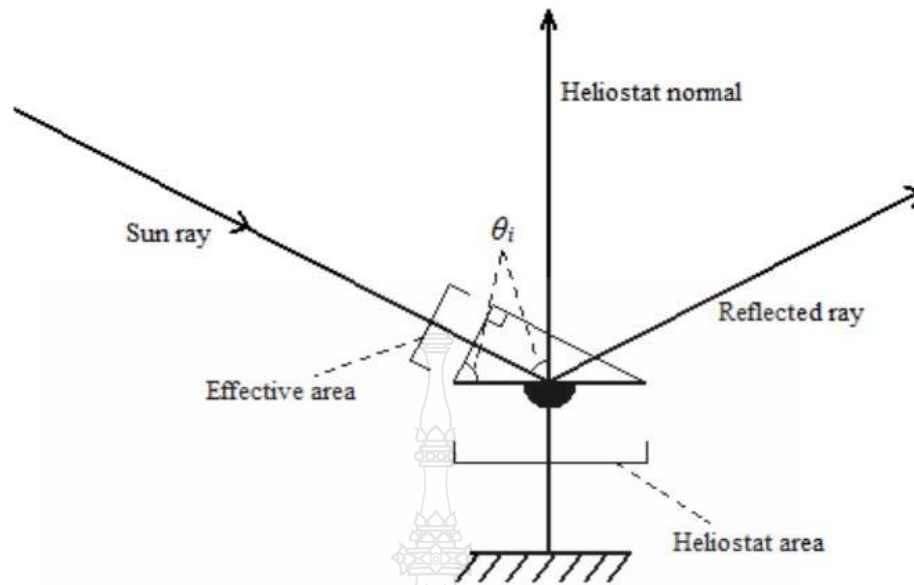
$$\text{Effective Area} = \text{Heliostat Area} \times \cos(\theta_i) \quad (2.61)$$

การสูญเสียของแผงสะท้อนรังสีประกอบด้วย

การสูญเสียลักษณะ มุมโคซายน์ เนื่องจากมุมตกกระทบทำมุมเอียงกับแผงสะท้อนรังสีมากเกินไป ทำให้พื้นที่แผงสะท้อนรับแสงรังสีสุทธิน้อยลง

การสูญเสียที่เกิดขึ้น เมื่อรังสีแสงอาทิตย์ซึ่งถูกสะท้อนออกมาจากแผงสะท้อนรังสีได้ถูกบดบังด้วยแผงสะท้อนรังสีที่อยู่ด้านหน้า (blocking loss) แสดงดังรูปที่ 2.35





รูปที่ 2.34 การลดลงของพื้นที่แผงสะท้อนรังสีสุทธิจากผลกระทบของมุมโคซายน์ [22]

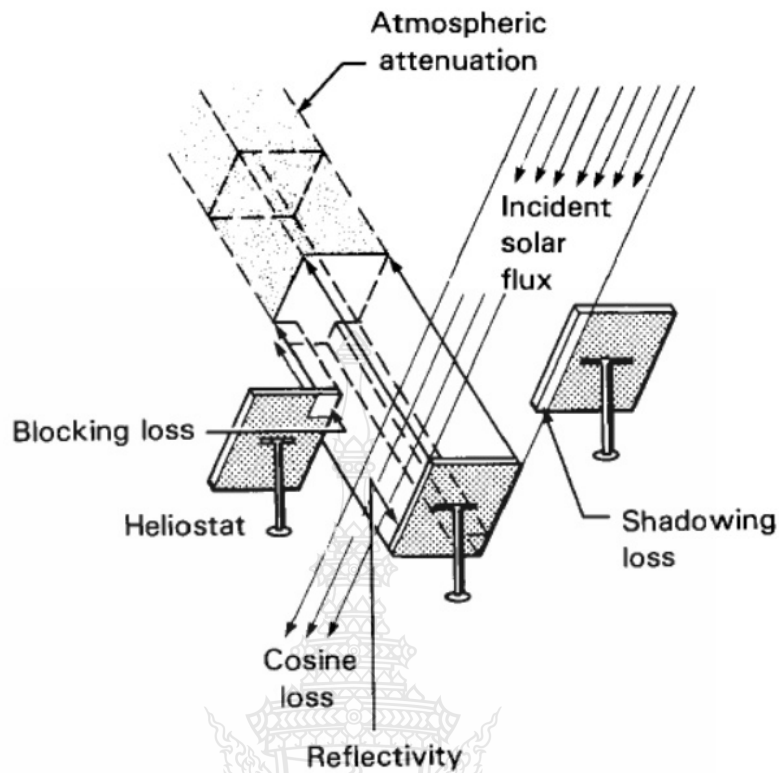
การสูญเสียลักษณะ จะเกิดขึ้นเมื่อรังสีแสงอาทิตย์ถูกบังจากแผงสะท้อนรังสีตัวข้างเคียง ก่อนจะถึงแผงสะท้อนรังสีเป้าหมาย (shadow loss)

เมื่อพลังงานจากการสะท้อนของแผงสะท้อนรังสีแสงอาทิตย์ถูกกระจายออกไปหรือถูกดูดกลืนด้วยบรรยากาศเราเรียกการสูญเสียลักษณะเช่นนี้ว่า “Atmospheric attenuation” รายละเอียดการสูญเสียดังกล่าวแสดงดังรูปที่ 2.35

การสูญเสียที่เกิดจากความสามารถในการสะท้อนเช่นความสกปรก, ปัญหาผิวกระจก เราเรียกว่า “reflectivity and soiling loss” และการสูญเสียเนื่องจาก แผงรับรังสีสะท้อนแสงอาทิตย์ เล็กเกินไป เราเรียกว่า “spillage loss”

ความสูงของหอคอยรับรังสีรวมกลาง (tower height) จากเอกสารอ้างอิง [23] โดยทั่วไป ความสูงที่เหมาะสมที่สุดคือประมาณ 5-7 เท่า ของความยาวจากแผงสะท้อนรังสีตัวที่ไกลที่สุดในสนาม

แผงสะท้อนรังสีถึงหอคอยรวมกลางดังแสดงในรูปที่ 2.36 เมื่อรู้ความสูงของหอคอย ดังนั้นจะทำให้เรากำหนดค่าเทอมสำคัญได้อีกหลายตัวเช่น มุมขอบของหอคอย (rim angle,  $\theta_r$ )



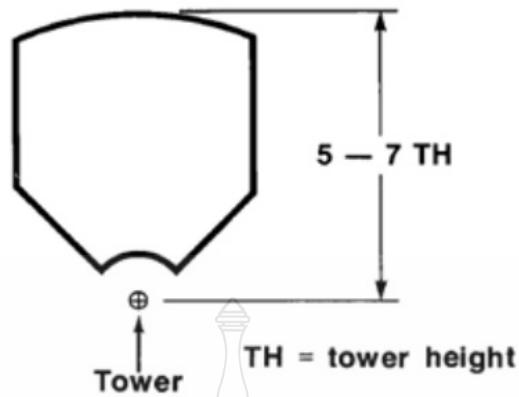
รูปที่ 2.35 การสูญเสียของแผงสะท้อนรังสีแสงอาทิตย์ [22]

ระยะที่วัดจากแผงสะท้อนไปยังหอคอยตามแนวอากาศ (Air distance,  $D_{air}$ ) และระยะที่วัดจากแผงสะท้อนไปยังหอคอยตามแนวพื้น (ground distance,  $D_{ground}$ ) ดังแสดงในรูปที่ 2.37 ซึ่งเทอมต่างๆ สามารถหาค่าได้ดังสมการที่ 2.62 และ สมการที่ 2.63, สมการที่ 2.64 ตามลำดับ

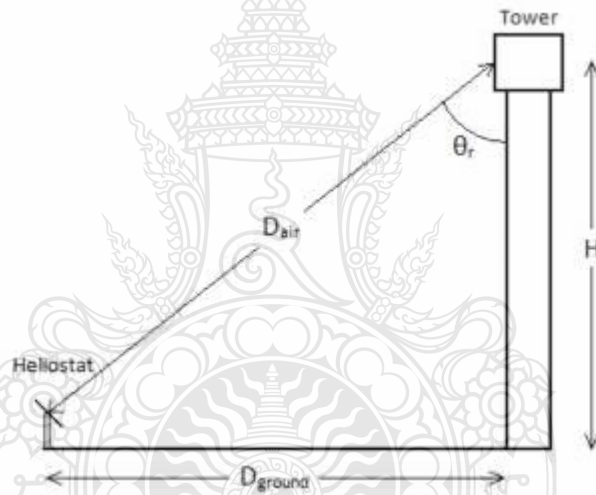
$$\theta_r = \tan^{-1}\left(\frac{D_{ground}}{H}\right) \quad (2.62)$$

$$d_{air} = \left(\frac{H}{\cos(\theta_r)}\right) \quad (2.63)$$

$$d_{air} = \sqrt{D_{ground}^2 + H^2} \quad (2.64)$$

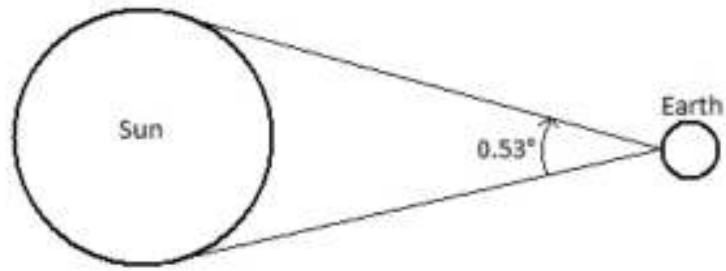


รูปที่ 2.36 ความสูงของหอคอยรับรังสีรวมกลางที่เหมาะสมที่สุด [23]



รูปที่ 2.37 ตัวแปรที่ใช้ในการออกแบบแผงสะท้อนรังสีและหอคอย [23]

ภาพการแพร่กระจายของรังสีแสงอาทิตย์ (image spread) รังสีแสงอาทิตย์ที่ส่องตรงมายังโลกในความเป็นจริงแล้วไม่ได้ขนานอย่างแท้จริง การปลดปล่อยรังสี โอบล้อมรูปทรงของดวงอาทิตย์ที่มุมประมาณ  $0.53^\circ$  ดังแสดงในรูปที่ 2.39 ดังนั้นเมื่อ รังสีแสงอาทิตย์ตกกระทบแผงสะท้อนรังสี ภาพจะสะท้อนแผ่กระจายออกไปทางด้านนอกและเพิ่มขึ้นประมาณ  $9.3 \text{ m/km}$  หรือ ประมาณ  $2.8 \text{ ฟุต/100}$  หลาดังแสดงในรูปที่ 2.38



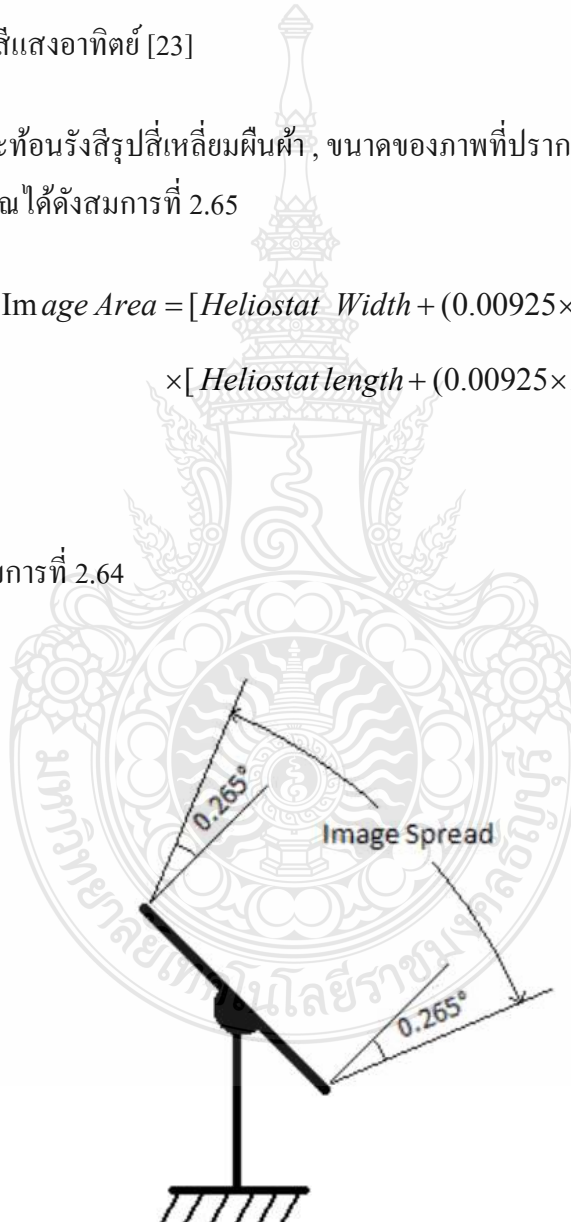
รูปที่ 2.38 มุมของรังสีแสงอาทิตย์ [23]

สมมติให้พื้นที่แผงสะท้อนรังสีรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า, ขนาดของภาพที่ปรากฏบนแผงรับรังสีแสงอาทิตย์สามารถหาค่าประมาณได้ดังสมการที่ 2.65

$$\begin{aligned} \text{Image Area} = & [\text{Heliostat Width} + (0.00925 \times D_{air})] \\ & \times [\text{Heliostat length} + (0.00925 \times D_{air})] \end{aligned} \quad (2.65)$$

ซึ่ง

หาค่า  $D_{air}$  ได้จากสมการที่ 2.64



รูปที่ 2.39 ผลกระทบการแผ่กระจายของภาพสะท้อนรังสีแสงอาทิตย์ [23]

ประสิทธิภาพรวมของสนามแสงสะท้อนรังสี (total field efficiency)

ประสิทธิภาพรวมของสนามแสงสะท้อนรังสีสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 2.66 คือ

$$\eta_{field} = \eta_{attenuation} \cdot \eta_{shadowing} \cdot \eta_{blocking} \cdot \eta_{spillage} \cdot \eta_{reflectivity} \cdot \eta_{soiling} \cdot \eta_{cosine} \cdot \eta_{tracking} \quad (2.66)$$

ซึ่งหากค่าประสิทธิภาพต่างๆสามารถคำนวณได้อย่างถูกต้องแม่นยำก็จะทำให้สามารถหาค่าประสิทธิภาพรวมของสนามได้อย่างแม่นยำเช่นกัน



### บทที่ 3

### วิธีการดำเนินงานวิจัย

#### 3.1 แผนการดำเนินงานวิจัย

ขั้นตอนการดำเนินงาน	เดือน - ปี												
	กพ. 2555	มี.ค. 2555	เม.ย. 2555	พ.ค. 2555	ก.ย. 2555	ต.ค. 2555	พ.ย. 2555	ก.ย. 2555	ต.ค. 2555	พ.ย. 2555	ธค. 2555	มค. 2556	
ศึกษาและรวบรวมข้อมูล													
วิเคราะห์และออกแบบระบบ Heliostat													
สร้างและเขียนโปรแกรมการหาตำแหน่งดวงอาทิตย์และโปรแกรมควบคุมแผงสะท้อนรังสี													
ออกแบบและติดตั้งมอเตอร์ขับเคลื่อนระบบแผงสะท้อนรังสี													
ทดสอบและวิเคราะห์ความแม่นยำของระบบสะท้อนแสงอาทิตย์สู่เป้าหมาย													
ทดสอบผลความเข้มของแสงและอุณหภูมิที่มุมต่างๆของเป้าหมายต่อการทำงานของระบบ													
ทดสอบและปรับปรุงการทำงานโดยภาพรวมของระบบ													
วิเคราะห์ปัญหาและแก้ปัญหาที่เกิดขึ้น													
สรุปและจัดพิมพ์รายงาน													

### 3.2 ขั้นตอนการดำเนินงาน

#### 3.2.1 ศึกษาและรวบรวมข้อมูล

#### 3.2.2 วิเคราะห์และออกแบบระบบสะท้อนแสงอาทิตย์

1. วิเคราะห์และออกแบบด้านการส่งกำลังหมุนแผงสะท้อนแสงด้านเครื่องกล
2. วิเคราะห์และออกแบบด้านระบบควบคุมสะท้อนแสงให้สะท้อนเข้าเป้าหมาย
3. วิเคราะห์ความเข้มของแสงที่สะท้อนเข้าเป้าหมาย

#### 3.2.3 เขียนโปรแกรมการหาตำแหน่งดวงอาทิตย์ และ โปรแกรมควบคุมแผงสะท้อนรังสีแสงอาทิตย์

#### 3.2.4 ติดตั้งและควบคุมชุดมอเตอร์ขับ แผงสะท้อนรังสีแสงอาทิตย์

1. ทดสอบด้านระบบควบคุม
2. ทดสอบด้านการส่งกำลังหมุนและความแม่นยำ
3. ทดสอบความเข้มของแสงที่เป้าหมาย ในช่วงเวลาต่างๆ และมุมของเป้าหมาย

#### 3.2.5 ทดสอบและวิเคราะห์ความแม่นยำของระบบสะท้อนแสงอาทิตย์สู่เป้าหมาย

#### 3.2.6 ทดสอบผลความเข้มของแสงที่มุมต่างๆของเป้าหมายต่อการทำงานของระบบ

#### 3.2.7 ทดสอบและปรับปรุงการทำงาน โดยภาพรวมของระบบ

#### 3.2.8 วิเคราะห์ปัญหาและแก้ปัญหาที่เกิดขึ้น

#### 3.2.9 สรุปและจัดพิมพ์รายงาน ผลงานวิจัย

### 3.3 เครื่องมือและวิธีการ

#### 3.3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์หลักที่ใช้ในการวิจัย

เครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัยสำหรับวิทยานิพนธ์นี้ประกอบด้วย

1. เครื่องวัดมุม อัลติจูด แบบแม่เหล็กเพื่อวัด ค่ามุม กัมเมย
2. เครื่องวัด ไฟฟ้า (multi meter)
3. โทรศัพท์มือถือ รุ่น ที่สามารถ ตรวจวัด ลัดติจูดท้องถิ่น (local latitude) และ ลองติจูดท้องถิ่น (local longitude) ค่าที่วัดได้มีทศนิยม 6 ตำแหน่งคือ ลัดติจูดท้องถิ่น (Local latitude) เท่ากับ 14.031518 N (ที่ตำแหน่ง แผงสะท้อนรังสี) และลองติจูดท้องถิ่น (Local longitude)เท่ากับ 100.727667 E
4. คอมพิวเตอร์โน้ตบุ๊ก จำนวน 1 เครื่อง
5. อุปกรณ์รับส่งข้อมูล (DAQ) จำนวน 1 เครื่องรุ่น “ NI USB 6229 BNC ”

6. สเตปปีงมอเตอร์จำนวน 2 เครื่อง รุ่น“57HS22” มีแรงบิด 2.2 N- m อัตราการกินไฟ 4 Amp
7. ตู้ควบคุม 1 ชุด ประกอบด้วยชุด หม้อแปลงไฟฟ้า , อุปกรณ์ตัดวงจรไฟฟ้ากำลังหลัก (main circuit breaker) พร้อมติดตั้ง ชุดสแต็ปปีง ไดรเวอร์ (stepping driver) จำนวน 2 ชุด รุ่น “M542”
8. แผ่นวัดมุมกวาด (azimuth angle monitor) ของแสงสะท้อนรังสี จำนวน 1 ชุด
9. เข็มทิศ ตามรูปที่ 3.1
10. กล้องถ่ายรูป จำนวน 1 เครื่อง



รูปที่ 3.1 เข็มทิศเพื่อใช้วัดแนวทิศเหนือได้

### 3.3.2 วิธีการหาตำแหน่งเป้าหมายและค่าที่ได้จากการวัด

เป้าหมายหรือแผงรับรังสีแสงอาทิตย์ที่ติดตั้งอยู่บนหอคอยรับรังสีแสงอาทิตย์มีขนาด 2.40 x2.40 เมตรวัสดุทำด้วยเหล็กมีความหนาประมาณ 1.5 มิลลิเมตร มีความสูงจากระดับพื้นดินถึงกึ่งกลางเป้าหมาย เท่ากับ 9.55 เมตรแสดงดังรูปที่ 3.9 และ 3.10

แผ่นสะท้อนรังสีแสงอาทิตย์มีโครงสร้างเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาด 3.10x3.60 เมตร แผ่นสะท้อนรังสี ติดตั้งอยู่บนเสาสะท้อนรังสีที่ความสูง จากระดับพื้นดินถึงกึ่งกลางแผ่นสะท้อนรังสี เท่ากับ 2.09 เมตร ลักษณะโครงสร้างของแผงสะท้อนรังสีถูกแสดงไว้ดังรูปที่ 3.4 โดยระยะความสูงระหว่างศูนย์กลางของแผงสะท้อนรังสีกับศูนย์กลางเป้าหมายเท่ากับ 7.46 เมตร ( $z_k = +7.46$  เมตร) เครื่องมือวัดที่ใช้วัดความสูงดังกล่าวคือใช้ตลับเมตรฝาคความยาว 50 เมตร แผงสะท้อนรังสีอยู่ห่างจากเป้าหมายวัดขนานตามแนวตะวันออก-ตะวันตกเท่ากับ 1.30 เมตร ( $y_j = +1.30$  เมตร) และอยู่ห่างจาก



เป้าหมายวัดขนานตามแนวเหนือใต้ เท่ากับ 19.63 เมตร ( $x_i = +19.63$  เมตร) ดังแสดงรายละเอียด ดังรูปที่ 3.3 จากการวัดด้วยตลับเมตรยาวดังกล่าวและใช้เข็มทิศในการหาแนวเหนือ-ใต้และ แนวตะวันออก-ตะวันตก จะได้ระยะที่ตำแหน่งเป้าหมายอยู่ห่างจากแผงสะท้อนรังสี ซึ่งก็คือ เวกเตอร์ของเป้าหมายนั่นเอง รายละเอียดดังแสดงในรูปที่ 3.3 สรุปได้ดังนี้คือ

$$x_i = +19.63 \text{ เมตร}$$

$$y_j = +1.30 \text{ เมตร}$$

$$z_k = +7.46 \text{ เมตร } (z_0 - z_1)$$

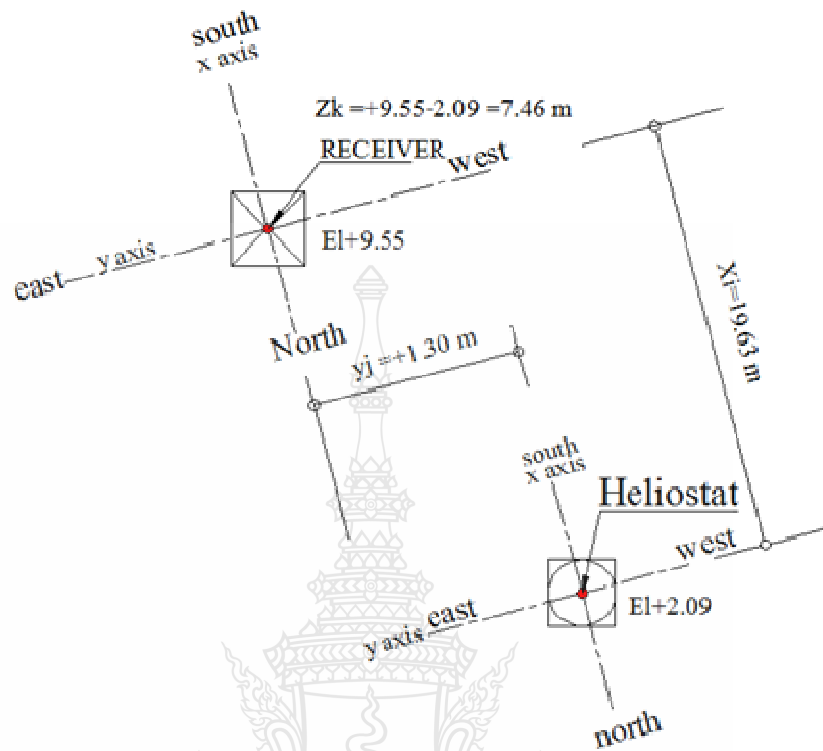
ดังนั้น เวกเตอร์เป้าหมายจะเป็นดังสมการที่ 3.1

$$V_T = 19.63i + 1.30j + 7.46k \quad (3.1)$$



รูปที่ 3.2 อุปกรณ์วัดมุมอัลติจูดขณะแผงสะท้อนรังสีแสงอาทิตย์ทำงาน

สำหรับเวกเตอร์ดวงอาทิตย์สามารถคำนวณหาได้จากสมการทางดาราศาสตร์ตามที่ได้อธิบายใน บทที่ 2 แล้ว ซึ่งวิทยานิพนธ์นี้ได้เขียน โปรแกรมเพื่อคำนวณหาเวกเตอร์ดวงอาทิตย์ไว้ด้วยแล้ว ดังรูปที่ 3.7 และ 3.10 เพื่อนำไปคำนวณหาตำแหน่งของแผงสะท้อนรังสี ให้สะท้อนรังสีเข้าสู่ เป้าหมายดังรูปที่ 3.12 ในลักษณะเวลาจริง (real time) โดยแผงสะท้อนรังสีถูกควบคุมการทำงานด้วย คอมพิวเตอร์เพื่อคำนวณหามุมสะท้อนรังสี เพื่อสะท้อนไปยังเป้าหมายได้อย่างถูกต้องและแม่นยำ



รูปที่ 3.3 แผนผังการวัดหาตำแหน่งเป้าหมาย

### 3.3.3 ระบบส่งกำลังหมุนของแผงสะท้อนรังสี

แผงสะท้อนรังสี สามารถหมุนได้ 2 แกน แกนที่หนึ่งคือแกนมุมอะซิมุท ซึ่งลักษณะการหมุนคือเริ่มหมุนจากแนวเหนือ-ใต้ซึ่งมีค่า 0 องศาเมื่อแผงสะท้อนรังสีหันไปทางทิศใต้และหมุนไปทางซ้ายหรือขวา หากแผงสะท้อนรังสี มีตำแหน่งอยู่ทางด้านซ้ายแสดงว่ามุมอะซิมุท มีค่าเป็นบวก และหากมีตำแหน่งทางด้านขวาแสดงว่ามีค่าเป็นลบ แกนที่สองคือแกนมุมอัลติจูดซึ่งลักษณะการหมุนคือ เริ่มหมุนจากแนวตั้งซึ่งมีค่า 0 องศาเมื่อแผงสะท้อนรังสีเงยมากมุมอัลติจูดจะมีค่ามากหากมีค่าน้อยแผงสะท้อนรังสีจะมีมุมเงยน้อยโดยมีค่าเป็นบวกเสมอ

หลักการทำงานในระบบส่งกำลัง มีดังนี้คือ เมื่อต้นกำลังคือสเต็ปปีงมอเตอร์ชุดที่ 1 ทำงานมอเตอร์จะทำหน้าที่หมุนส่งกำลังขับผ่านชุดเกียร์ทดที่สัมพันธ์กับมุมอะซิมุท (อัตราทด 10:1) เพื่อไปขับชุดเกียร์ทดอีกชุดหนึ่ง (อัตราทด 36:1) ของเสาสะท้อนรังสีและส่งกำลังให้แผงสะท้อนรังสีหมุนในแนวทิศทางของมุมอะซิมุท ดังนั้นอัตราทดรวมของมุมอะซิมุทจะมีค่าเท่ากับ 360:1 สำหรับ สเต็ปปีงมอเตอร์ชุดที่ 2 จะทำหน้าที่คล้ายกับชุดแรก แต่ขับผ่านชุดเกียร์ทดอีกชุดหนึ่งที่

สัมพันธ์กับมุมอัลติจูด (อัตราทด 50:1) เพื่อไปจับชุดเกียร์ทดอีกชุดหนึ่ง (อัตราทด40:1) โดยเกียร์ทดชุดแรกถูกต่อเข้ากับเกียร์ทดของเสาสะท้อนรังสีซึ่งส่งกำลังในแนวทิศทางของมุมอัลติจูดอีกชุดหนึ่งของเสาสะท้อนรังสีและส่งกำลังให้แผงสะท้อนรังสีหมุนในแนวทิศทางของมุมอัลติจูด ดังนั้นอัตราทดรวมของเกียร์ในทิศทางมุมอัลติจูดจะมีค่าเท่ากับ 2000:1

สรุปอัตราทดรวมมุมอะซิมูทเท่ากับ 360:1 และอัตราทดรวมของมุมอัลติจูดเท่ากับ 2000:1 การติดตั้งมอเตอร์เพื่อควบคุมการหมุนของแผงสะท้อนรังสีแสดงดังรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.4 แผงสะท้อนแสงอาทิตย์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้

### 3.3.4 ระบบควบคุมการหมุนของแผงสะท้อนรังสี

ออกแบบให้ใช้โปรแกรมแล็บวิว (LabVIEW) เป็นตัวควบคุมการทำงาน หลักการทำงานคือ โปรแกรมคอมพิวเตอร์จะเริ่มคำนวณหาตำแหน่งดวงอาทิตย์และหามุมสะท้อนของแผงสะท้อนรังสีดวงอาทิตย์เพื่อให้สะท้อนไปยังเป้าหมายได้อย่างถูกต้อง จากนั้นเมื่อได้ค่ามุมสะท้อนรังสี ของแผงสะท้อนรังสี ทั้ง 2 มุมแล้ว (มุมอะซิมูท และมุมอัลติจูด) โปรแกรมซอฟต์แวร์ที่ได้เขียนและพัฒนาขึ้น ก็จะส่งสัญญาณเป็นสัญญาณพัลส์ไปควบคุมให้สเต็ปปีงมอเตอร์ชุดที่ 1

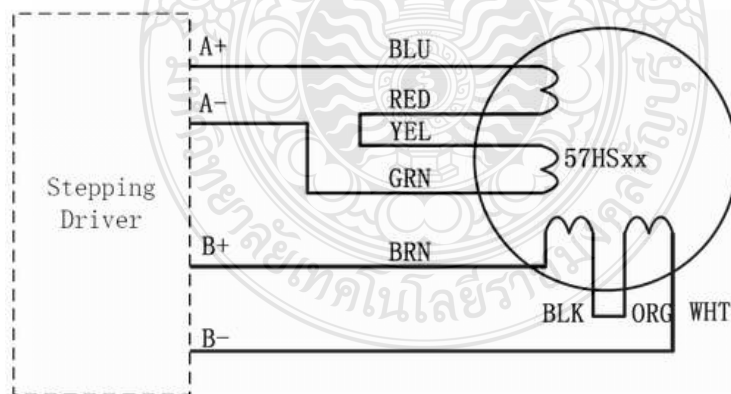
ไปหมุนแผงสะท้อนรังสีผ่านชุดเกียร์ทด เพื่อให้ได้มุมอะซิมุทตามที่ต้องการและ จากนั้นโปรแกรมก็จะส่งสัญญาณพัลส์ไปควบคุมให้ สเต็ปป์มอเตอร์ชุดที่ 2ทำงาน โดยไปหมุนขับแผงสะท้อนรังสีผ่านชุดเกียร์ทดอีกชุดหนึ่งให้หมุนได้มุมอัลติจูดตามต้องการเช่นกัน

แผงสะท้อนรังสีจะถูกควบคุมมุมการสะท้อนรังสีให้เข้าสู่เป้าหมายตลอดเวลาตามเวลาที่ใช้งานจริง โดยโปรแกรมควบคุมแผงสะท้อนรังสีแสงอาทิตย์จะสามารถทำหน้าที่สะท้อนรังสีแสงอาทิตย์ได้ทั้งในช่วงที่พระอาทิตย์อยู่ในตำแหน่งใต้แผงสะท้อนรังสีหรือเหนือแผงสะท้อนรังสี โดยจะสะท้อนรังสีตามการเคลื่อนที่ของตำแหน่งดวงอาทิตย์ที่ได้จากการคำนวณได้ตลอดทั้งวัน

### 3.3.5 การต่อวงจรควบคุม สเต็ปป์มอเตอร์

มอเตอร์ที่ใช้ในการควบคุมการหมุนของแผงสะท้อนรังสีเป็นรุ่น“57HS22” มีแรงบิด 2.2 นิวตัน-เมตร อัตรากินไฟ 4 Amp ต่อวงจรมอเตอร์แบบอนุกรมใช้ NI DAQ สำหรับพอร์ตยูเอสบี (USB) รุ่น “ NI USB 6229 BNC ”โดยเลือกให้ DAQ กำเนิดสัญญาณส่งออก (generate output) เป็นสัญญาณพัลส์ (pulse) เป็น “N pulse” เลือกความเร็วในการส่งเท่ากับ “pulse 3 m/sec” (ค่าขี้น้อยยิ่งเร็วขี้น) เลือกการควบคุมทิศทางการหมุนของมอเตอร์ด้วยการส่งสัญญาณอนาล็อกส่งออก (0-5 โวลท์) ให้กับสเต็ปป์มอเตอร์ (0 โวลท์ มอเตอร์หมุนทวนเข็มนาฬิกา เมื่อหันหน้าเข้าเพลามอเตอร์ ) โดยเลือกส่งสัญญาณที่ “1 sample ” (on demand)

เลือกให้สเต็ปป์มอเตอร์ ของชุดมอเตอร์ควบคุมมุมอัลติจูดส่งค่าที่ 3200 พัลส์ต่อรอบ  
เลือกให้สเต็ปป์มอเตอร์ของชุดมอเตอร์ควบคุมมุมอะซิมุทส่งค่าที่ 3200 พัลส์ต่อรอบ



รูปที่ 3.5 วงจรการต่อระบบไฟฟ้าของสเต็ปป์มอเตอร์และไดร์เวอร์ (driver)

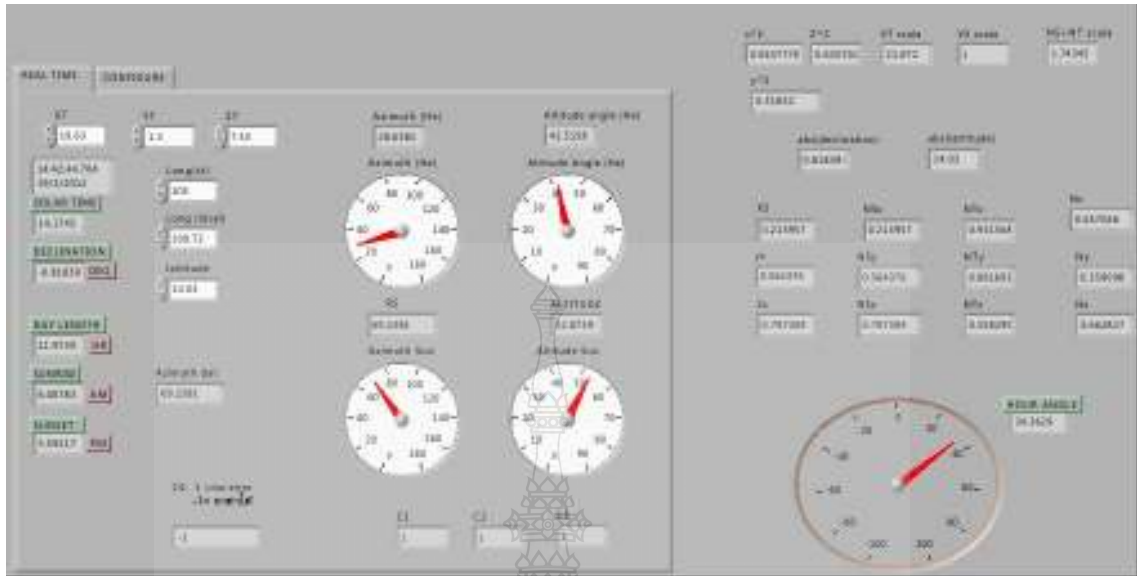
### 3.3.6 โปรแกรมควบคุมการทำงานของแผงสะท้อนรังสีแสงอาทิตย์แบบหอคอย

งานวิจัยนี้ได้เขียนและพัฒนาโปรแกรมเพื่อควบคุมแผงสะท้อนรังสี ด้วยโปรแกรม LabVIEW โดยในรายละเอียดของโปรแกรมมีข้อดีดังนี้คือ

1. สามารถใช้งานได้ตามวันเวลาจริง
2. สามารถนำไปควบคุมแผงสะท้อนรังสีแสงอาทิตย์ที่ตำแหน่งพิกัดอื่นๆได้ โดยการใส่ค่า ลັตติจูดของแผงสะท้อนรังสี , ลองติจูดของแผงสะท้อนรังสี , และตำแหน่งติดตั้งของเป้าหมายใน บอร์ดควบคุมส่วนหน้า (front panel) ของโปรแกรมที่ได้เตรียมไว้ ดังรูปที่ 3.8
3. สามารถควบคุมแผงสะท้อนรังสีให้สะท้อนเข้าเป้าหมายในในเวลาใดก็ได้ในรอบปี เนื่องจากในรอบปีดวงอาทิตย์เคลื่อนที่อยู่ตำแหน่งทั้งด้านใต้และด้านเหนือของแผงสะท้อนรังสีแสงอาทิตย์
4. สามารถอ่านค่าตำแหน่งของดวงอาทิตย์ ในช่วงเวลาใดๆได้ตลอดในรอบปีจาก บอร์ดควบคุมส่วนหน้า โดยค่าระบุเป็นพิกัดมุมอะซิมุทและอัลติจูดของดวงอาทิตย์
5. สามารถบันทึกข้อมูลของการผลการคำนวณหาตำแหน่งของแผงสะท้อนรังสี รวมทั้งค่าสัญญาณพัลส์ ที่ส่งไปให้สเต็ปมอเตอร์ด้วยทำงานของโปรแกรมได้ (data logger)
6. โปรแกรมสามารถรองรับการปรับปรุงและพัฒนา ให้มีการทำงานที่ดีขึ้นได้
7. ติดตั้งง่ายและสะดวกต่อการใช้งาน



รูปที่ 3.6 ระบบส่งกำลังและขับเคลื่อน แผงสะท้อนรังสีแสงอาทิตย์



รูปที่ 3.7 โปรแกรม แล็บVIEW ส่วนชุดควบคุมเพื่อ ควบคุมมุมสะท้อนของแผงสะท้อนรังสีแสงอาทิตย์



รูปที่ 3.8 การติดตั้งเตีปี่งมอเตอร์เพื่อส่งกำลังขับผ่านเกียร์ทดของแผงสะท้อนรังสีแสงอาทิตย์



รูปที่ 3.9 เป้าหมายรังสีหอคอยแสงอาทิตย์ (solar tower)



รูปที่ 3.10 งานปรับปรุงแผงรับรังสีหอคอยแสงอาทิตย์ (solar tower)

### 3.4 วิธีการดำเนินการเพื่อการทดสอบประสิทธิภาพและการวิเคราะห์ข้อมูล

#### 3.4.1 การทดสอบประสิทธิภาพแบบแผ่นเรียบ

ขั้นตอนและวิธีการดำเนินการเพื่อการทดสอบประสิทธิภาพความเข้มแสง เริ่มต้นด้วยการจัดเตรียมแผงสะท้อนรังสี โดยบริเวณกึ่งกลางแผงสะท้อนรังสีติดตั้งกระจกเงาชนิดสะท้อนแสงขนาด 1x1 เมตรซึ่งถูกปิดทับด้วยแผ่นไวนิลสีเข้มยกเว้นบริเวณมุมทั้ง 4 มุมของกระจกขนาดได้เปิดไว้ให้เห็นกระจกขนาด 10x10 เซนติเมตร ส่วนกระจกแผ่นอื่นๆที่อยู่โดยรอบถูกปิดทับด้วยไวนิลสีเข้มดังแสดงในรูปที่ 3.11

จากนั้น จัดเตรียมแผงรับรังสีแสงอาทิตย์ที่หอคอยแสงอาทิตย์โดยการทาสีให้เหมาะสมเพื่อสามารถตรวจสอบและมองเห็นภาพตกกระทบบนเป้าหมายหรือแผงรับรังสีได้อย่างชัดเจน ที่บริเวณขอบของแผงรับรังสี ถูกทำเป็นกริดไลน์ (grid line) แบ่งระยะไปตามแนวแกน X และแกน Y เพื่อใช้บันทึกตำแหน่งภาพตกกระทบบนจากการสะท้อนของแผงสะท้อนรังสีแสงอาทิตย์ดังรูปที่ 4.1

ขั้นตอนต่อไปคือติดตั้งชุดอุปกรณ์ควบคุมแผงสะท้อนรังสี ได้แก่ สเต็ปปีงมอเตอร์ , ตู้ควบคุมการทำงาน , ติดตั้งอุปกรณ์รับส่งสัญญาณควบคุมและต่อวงจรต่างๆเข้ากับคอมพิวเตอร์



รูปที่ 3.11 แผงสะท้อนรังสีที่จัดเตรียมเพื่อการทดสอบประสิทธิภาพความเข้มแสง



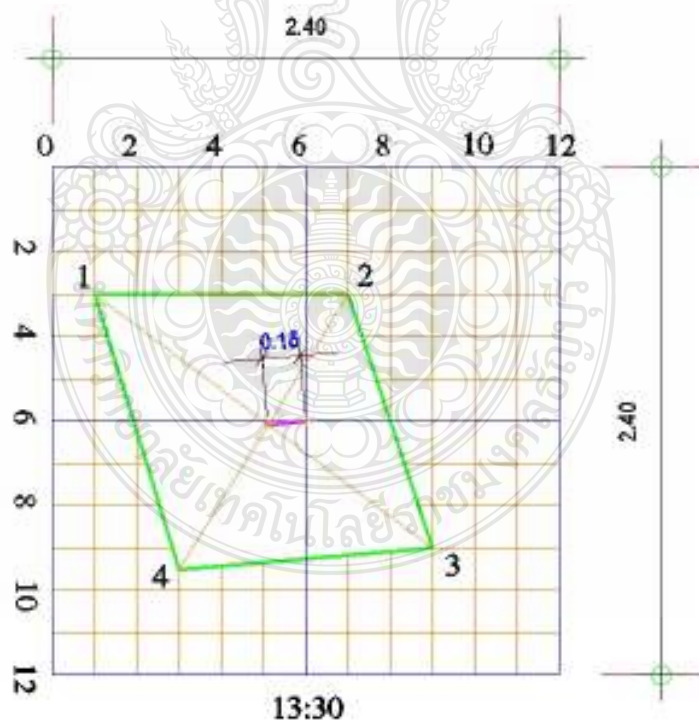
จากนั้นเปิดโปรแกรมซอฟต์แวร์เพื่อให้ระบบทำงานสะท้อนแสงอาทิตย์ไปยังเป้าหมายหรือแผงรับรังสีแสงอาทิตย์บนหอคอยโดยมีการตรวจสอบมุมของการสะท้อนรังสี คือมุมอัลติจูดและมุมอะซิมูทของแผงสะท้อนรังสี จากเครื่องมือวัดและโปรแกรม

จากนั้นบันทึกข้อมูลตำแหน่งภาพตกกระทบของรังสีแสงอาทิตย์ซึ่งสะท้อนมาจากแผงสะท้อนรังสีแสงอาทิตย์โดยเริ่มบันทึกตั้งแต่วันที่ 10.00 น.จนกระทั่งถึงเวลาประมาณ 16.00 น. ดังแสดงในรูปที่ 4.8

คำนวณหาพื้นที่จากภาพตกกระทบบนแผงรับรังสีแสงอาทิตย์ บริเวณพื้นที่ A9 ดังแสดงในรูปที่ 4.7

คำนวณประสิทธิภาพความเข้มของแสงอาทิตย์ จากพื้นที่ตกกระทบบนแผงรับรังสีเทียบกับพื้นที่แผงสะท้อนรังสี ตามสมการที่ 2.56

ตรวจสอบความแม่นยำของการสะท้อนรังสี ซึ่งวิธีการวัดความแม่นยำ ทำได้โดยการวัดระยะห่างระหว่างศูนย์กลางของภาพตกกระทบและศูนย์กลางแผงรับรังสีดังรูปที่ 3.10 หากมีระยะห่างมากความแม่นยำจะน้อยและหากระยะห่างมีค่าน้อย ค่าความแม่นยำจะมีสูง



รูปที่ 3.12 ระยะความแม่นยำของการสะท้อนรังสีแสงอาทิตย์

การวิเคราะห์ข้อมูลการทดสอบประสิทธิภาพแบบแผ่นเรียบ

การวิเคราะห์ข้อมูลโดยการพิจารณาประสิทธิภาพความเข้มแสงที่คำนวณได้เทียบกับเวลาที่เปลี่ยนแปลง หากประสิทธิภาพความเข้มแสงมากหรือหมายความว่าภาพที่ตกกระทบบนพื้นผิวที่ใกล้เคียงพื้นที่แผงสะท้อนรังสีเวลานั้นแสดงว่าจะเป็นเวลาที่มีประสิทธิภาพความเข้มแสงมากเช่นกันในวันที่ทำการทดสอบ

สรุปเป็นขั้นตอนวิธีการทดสอบประสิทธิภาพแบบแผ่นเรียบได้ดังนี้ คือ

1. จัดเตรียมแผงสะท้อนรังสี ตามที่ได้อธิบายในรายละเอียดข้างต้น จัดเตรียมแผงรับรังสีแสงอาทิตย์ที่หอคอยแสงอาทิตย์โดยการทาสีและตีกริดโลหะตามรายละเอียดข้างต้น
2. ติดตั้งชุดอุปกรณ์ควบคุม แผงสะท้อนรังสี ซึ่งประกอบด้วย สเต็ปป์มอเตอร์ ผู้ควบคุมการทำงาน , ติดตั้งอุปกรณ์รับส่งสัญญาณควบคุมและต่อวงจรต่างๆเข้ากับคอมพิวเตอร์
3. เปิดโปรแกรมซอฟต์แวร์เพื่อให้ระบบทำงานสะท้อนแสงอาทิตย์ไปยังเป้าหมาย
4. บันทึกข้อมูลตำแหน่งภาพตกกระทบบนแผงรับรังสีแสงอาทิตย์ซึ่งสะท้อนมาจากแผงสะท้อนรังสีแสงอาทิตย์
5. คำนวณหาพื้นที่จากภาพตกกระทบบนแผงรับรังสีแสงอาทิตย์และพื้นที่แผงสะท้อนรังสี
6. คำนวณประสิทธิภาพความเข้มของแสงอาทิตย์ จากพื้นที่ตกกระทบบนแผงรับรังสีเทียบกับพื้นที่แผงสะท้อนรังสี
7. ตรวจสอบความแม่นยำของการสะท้อนรังสี โดยการหาระยะห่างศูนย์กลางของภาพตกกระทบบนและศูนย์กลางของแผงรับรังสีแสงอาทิตย์

#### 3.4.2 การทดสอบประสิทธิภาพแผงสะท้อนรังสีแบบรวมแสง

ขั้นตอนและวิธีการดำเนินการเพื่อการทดสอบประสิทธิภาพความเข้มแสง เริ่มต้นด้วยการนำแผ่นไวเจลที่ปิดทับจากการทดสอบแบบแผ่นเรียบออกทั้งหมดโดยให้เห็นกระจกทั้งหมด จากนั้นปรับกระจกให้สะท้อนเข้ากึ่งกลางเป้าหมายหรือแผงรับรังสีแสงอาทิตย์โดยทำการปรับกระจกทุกแผ่นบนแผงสะท้อนรังสีในช่วงเวลาเที่ยงวันสุริยะ จนกระทั่งทุกแผ่นสะท้อนเข้าเป้าหมายได้ดีที่สุด

ขั้นตอนต่อไปคือติดตั้งชุดอุปกรณ์ควบคุมแผงสะท้อนรังสีได้แก่ สเต็ปป์มอเตอร์ ผู้ควบคุมการทำงาน , ติดตั้งอุปกรณ์รับส่งสัญญาณควบคุมและต่อวงจรต่างๆเข้ากับคอมพิวเตอร์

จากนั้นเปิดโปรแกรมซอฟต์แวร์เพื่อให้ระบบทำงานสะท้อนแสงอาทิตย์ไปยังเป้าหมาย หรือแผงรับรังสีแสงอาทิตย์บนหอคอยโดยมีการตรวจสอบมุมของการสะท้อนรังสี คือมุมอัลติจูดและมุมอะซิมูทของแผงสะท้อนรังสี จากเครื่องมือวัดและโปรแกรม

จากนั้นบันทึกข้อมูลตำแหน่งภาพตกกระทบของรังสีแสงอาทิตย์ซึ่งสะท้อนมาจากแผงสะท้อนรังสีแสงอาทิตย์ด้วยการถ่ายภาพโดยตั้งกล้องถ่ายภาพให้อยู่ในตำแหน่งกึ่งกลางของเป้าหมาย และปรับภาพให้มองเห็นได้อย่างชัดเจน โดยเริ่มบันทึกตั้งแต่วันที่ 10.00 น.จนกระทั่งถึงเวลา ประมาณ 16.00 น. ดังแสดงในรูปที่ 4.8

คำนวณหาพื้นที่จากภาพตกกระทบบนแผงรับรังสีแสงอาทิตย์ วิธีการทำโดยการนำภาพ โฟโต้ชอปมาเข้าสู่สเกลให้ได้ขนาดตามเป้าหมายจริงคือขนาดเท่ากับ  $2.40 \times 2.40$  เมตรด้วยโปรแกรม ออโต้แคด (AutoCAD) จากนั้นคำนวณหาพื้นที่ด้วยคำสั่งในโปรแกรม ออโต้แคด ดังแสดงในรูปที่ 4.12

คำนวณประสิทธิภาพความเข้มของแสงอาทิตย์ จากพื้นที่ตกกระทบบนแผงรับรังสีเทียบกับพื้นที่แผงสะท้อนรังสี

สรุปเป็นขั้นตอนวิธีการทดสอบประสิทธิภาพแบบรวมแสงได้ดังนี้ คือ

1. จัดเตรียมแผงสะท้อนรังสี ตามที่ได้อธิบายในรายละเอียดข้างต้น จัดเตรียมแผงรับรังสีแสงอาทิตย์ที่หอคอยแสงอาทิตย์โดยการเปิดแผ่นไว้นิตที่ปิดไว้ทั้งหมดตามรายละเอียดข้างต้น
2. ติดตั้งชุดอุปกรณ์ควบคุม แผงสะท้อนรังสี ซึ่งประกอบด้วย สเต็ปปีงมอเตอร์ผู้ควบคุมการทำงาน , ติดตั้งอุปกรณ์รับส่งสัญญาณควบคุมและต่อวงจรต่างๆเข้ากับคอมพิวเตอร์
3. เปิดโปรแกรมซอฟต์แวร์เพื่อให้ระบบทำงานสะท้อนแสงอาทิตย์ไปยังเป้าหมาย
4. บันทึกข้อมูลตำแหน่งภาพตกกระทบของรังสีแสงอาทิตย์ซึ่งสะท้อนมาจากแผงสะท้อนรังสีแสงอาทิตย์
5. คำนวณหาพื้นที่จากภาพตกกระทบบนแผงรับรังสีแสงอาทิตย์และพื้นที่แผงสะท้อนรังสี
6. คำนวณประสิทธิภาพความเข้มของแสงอาทิตย์ จากพื้นที่ตกกระทบบนแผงรับรังสีเทียบกับพื้นที่แผงสะท้อนรังสี

การวิเคราะห์ข้อมูลการทดสอบประสิทธิภาพแบบรวมแสง

การวิเคราะห์ข้อมูลโดยการพิจารณาความเข้มแสง สามารถอธิบายเป็นกรณีตัวอย่างได้ดังนี้คือเนื่องจากค่าความเข้มแสงจากดวงอาทิตย์ สมมุติว่ามีค่าประมาณเท่ากับ  $700 \text{ W} / \text{m}^2$  พื้นที่กระจกเพื่อ

สะท้อนรังสีแสงอาทิตย์บนแผงสะท้อนรังสี เท่ากับ 10.5 ตารางเมตร สามารถทำให้สะท้อนรังสีไปยังแผงรับรังสีมีพื้นที่ตกกระทบได้ 1.4 ตารางเมตร หมายความว่า ค่าความเข้มของแสงอาทิตย์ บนแผงรับรังสีแสงอาทิตย์แบบแผงสะท้อนชนิดรวมแสงมีค่าดังสมการที่ 3.1

$$I_i = I_s \times A_h / A_r \quad (3.1)$$

แทนค่าจะได้

$$I_i = 700W / m^2 \times 10.5m^2 / 1.4m^2 = 5250W / m^2 = 7.5X \quad (3.2)$$

ซึ่ง

$I_i$  = ความเข้มแสงบนแผงรับรังสีจากแผงสะท้อนรังสีแบบรวมแสง

$X$  = ค่าความเข้มแสงจากดวงอาทิตย์ สมมุติมีค่าประมาณเท่ากับ  $700 W / m^2$

$A_r$  = พื้นที่ตกกระทบบนแผงรับรังสีแสงอาทิตย์

$A_h$  = พื้นที่กระจกบนแผงสะท้อนรังสีแสงอาทิตย์ แบบรวมแสง หน่วยเป็น  $m^2$

$I_s$  = ค่าความเข้มแสงจากดวงอาทิตย์  $W / m^2$

หากเปรียบเทียบค่าความเข้มของแสงอาทิตย์บนแผงรับรังสีแสงอาทิตย์ของแผงสะท้อนชนิดแบบแผ่นเรียบซึ่งมีประสิทธิภาพการสะท้อนแสง 0.65 จะมีค่าดังสมการที่ 3.3

$$I_f = I_s \times A_{hf} / (A_{hf} / eff) \quad (3.3)$$

แทนค่าจะได้

$$I_f = 700W / m^2 \times 10.5m^2 / (10.5m^2 / 0.65) = 455W / m^2 = 0.65X \quad (3.4)$$

ซึ่ง

$I_f$  = ความเข้มแสงบนแผงรับรังสีจากแผงสะท้อนรังสีแบบแผ่นเรียบ  $W / m^2$

$A_{hf}$  = พื้นที่กระจกบนแผงสะท้อนรังสีแสงอาทิตย์ แบบรวมแสง  $m^2$

$X$  = ค่าความเข้มแสงจากดวงอาทิตย์ สมมุติมีค่าประมาณเท่ากับ  $700 \text{ W/m}^2$

ความแตกต่างของความเข้มแสงบนแผงรับรังสีของทั้งสองแบบ โดยแบบรวมแสงมีค่ามากกว่า  
ดังสมการที่ 3.3

$$\Delta I = 7.5X - 0.65X \quad (3.5)$$

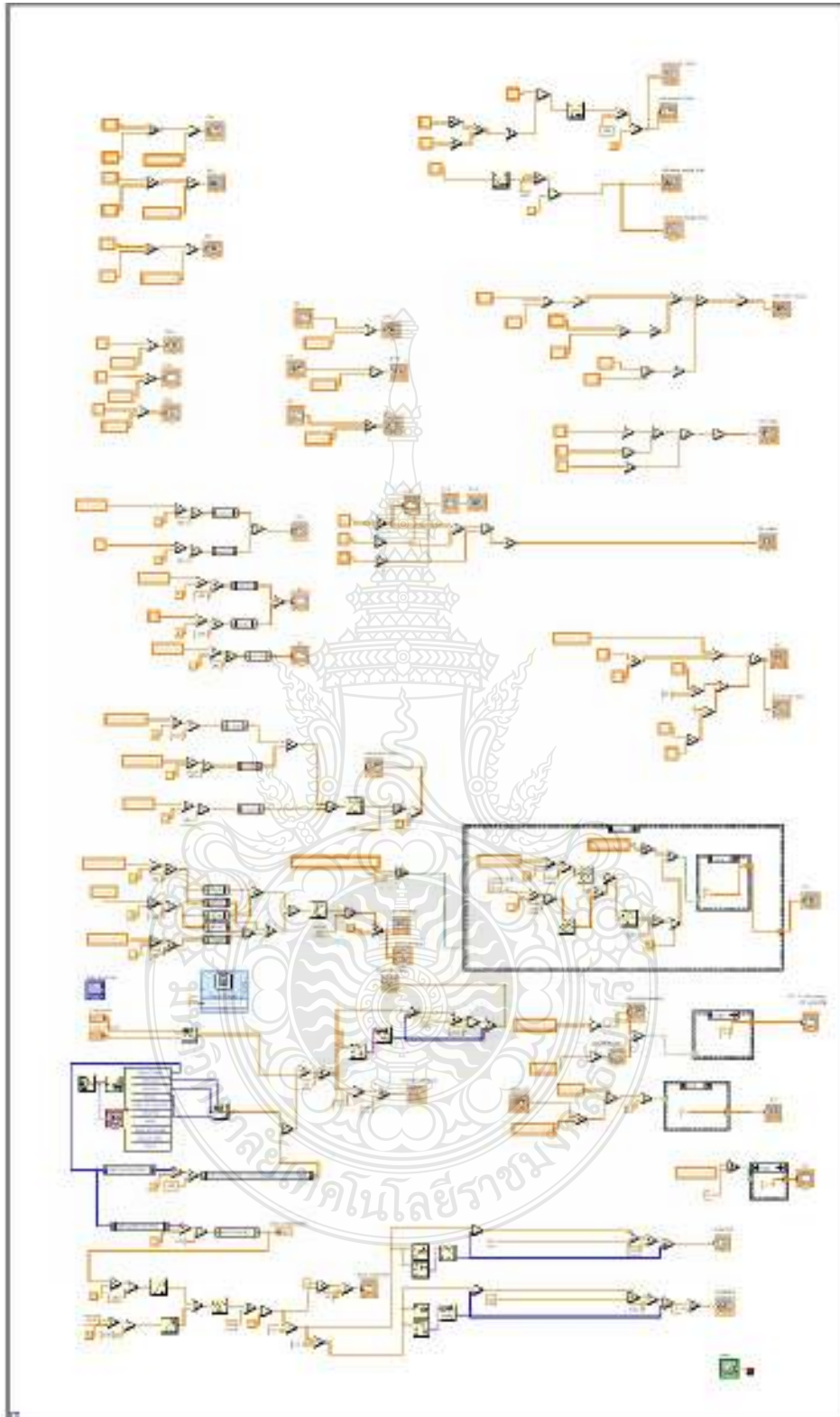
ซึ่ง

$\Delta I$  = ความแตกต่างของความเข้มแสงบนแผงรับรังสีจากแผงสะท้อนรังสีแบบแผ่นเรียบ  $\text{W/m}^2$

$X$  = ค่าความเข้มแสงจากดวงอาทิตย์ สมมุติมีค่าประมาณเท่ากับ  $700 \text{ W/m}^2$

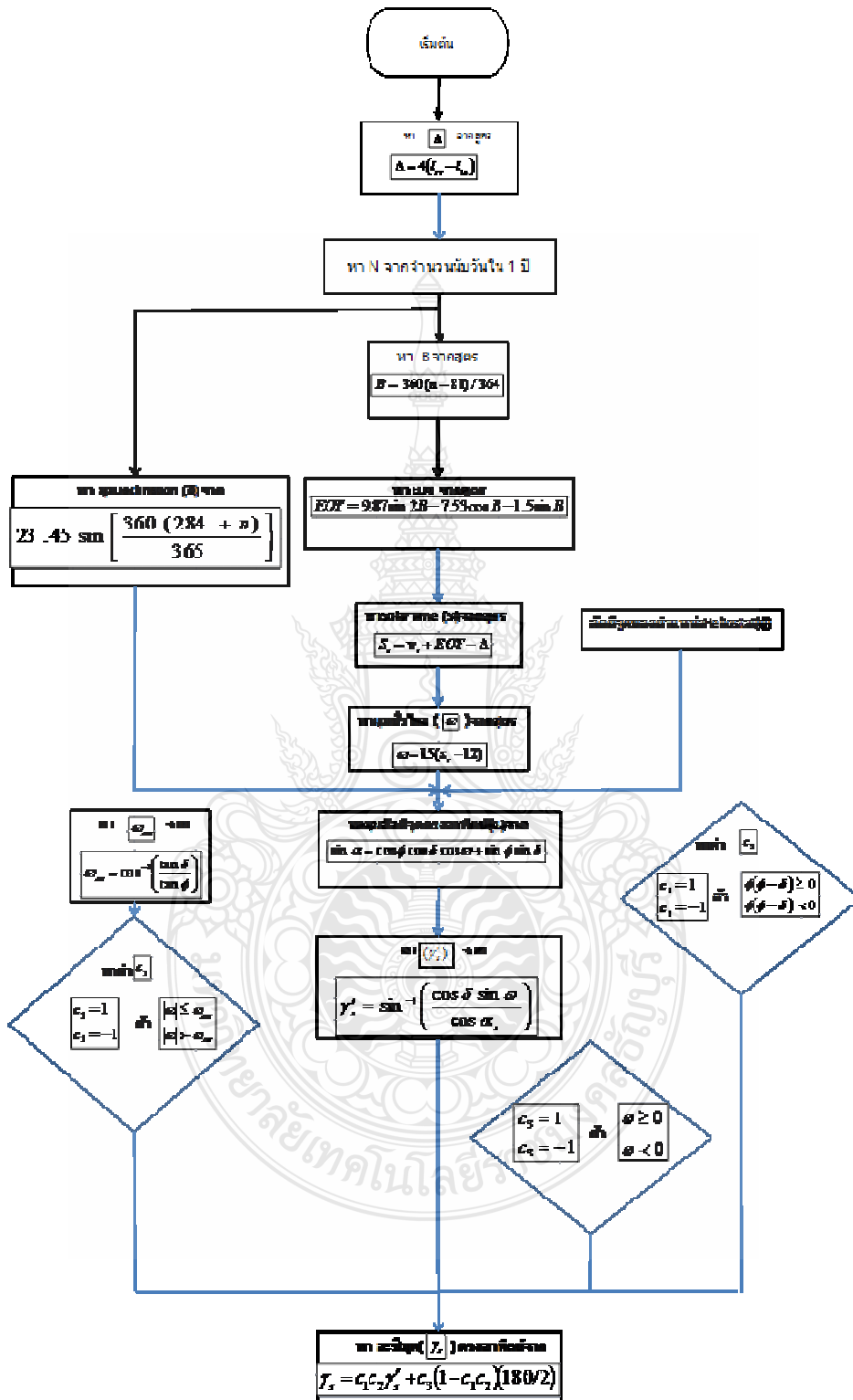
ดังนั้นจากข้อมูลดังกล่าวสามารถกล่าวเชิงวิเคราะห์สรุปได้ว่า

จากพื้นที่กระจกขนาด  $10.5 \text{ m}^2$  ของแผงสะท้อนรังสีทั้ง 2 แบบ แผงสะท้อนรังสีแบบรวมแสงสามารถให้ความเข้มแสงบนแผงรับรังสีได้  $7.5X \text{ W/m}^2$  ส่วนแผงสะท้อนรังสีแบบแผ่นเรียบจะให้ความเข้มแสงบนแผงรับรังสีได้  $0.65X \text{ W/m}^2$  โดยแผงสะท้อนรังสีแบบรวมแสงมีความเข้มแสงบนแผงรับรังสีมากกว่า มีค่าเท่ากับ  $6.85X \text{ W/m}^2$  ต่อพื้นที่กระจกขนาด  $10.5 \text{ m}^2$  ของแผงสะท้อนรังสี หรือมากกว่า มีค่าเท่ากับ  $0.652X \text{ W/m}^2$  ต่อพื้นที่กระจก  $1 \text{ m}^2$  ของแผงสะท้อนรังสี

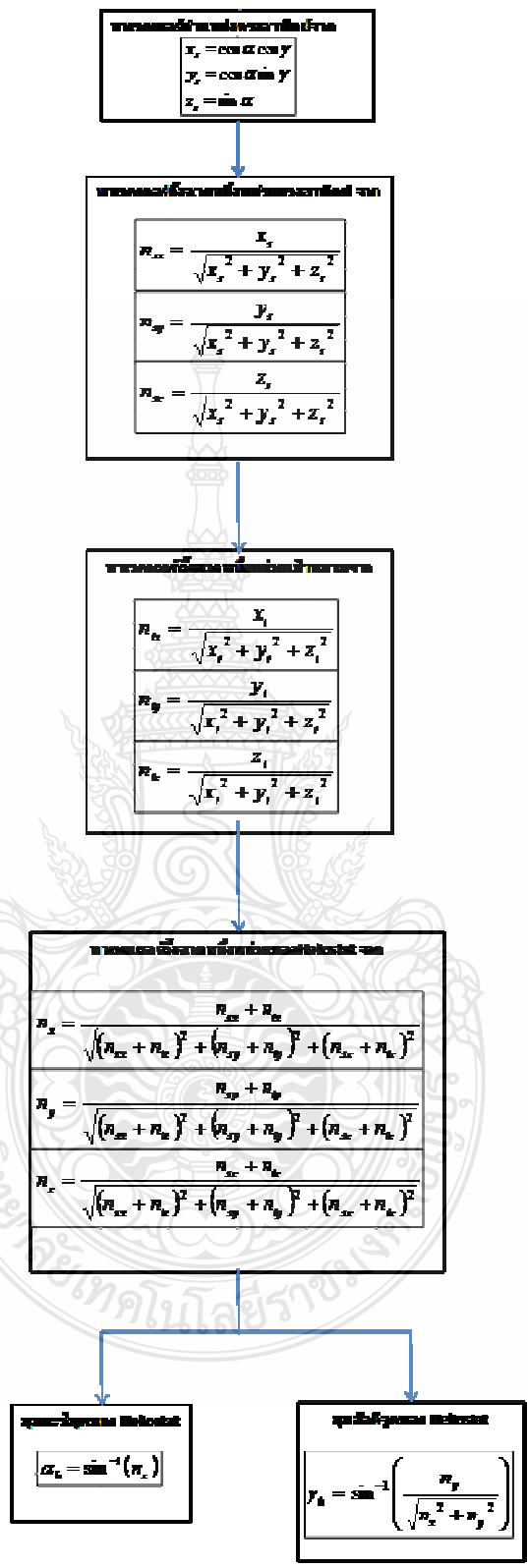


รูปที่ 3.13 ส่วนเขียนและพัฒนาโค้ดของโปรแกรม แล็บวีว (block diagram)

**ขั้นตอนการเขียนโปรแกรม คำนวณและหาค่ารัศมีวงอาทิตย์**



รูปที่ 3.14 แผนภูมิการออกแบบโปรแกรมติดตามและสะท้อนรังสี แสงอาทิตย์ขั้นที่ 1



รูปที่ 3.15 แผนภูมิการออกแบบโปรแกรมติดตามและสะท้อนรังสี แสงอาทิตย์ขั้นที่ 2



## บทที่ 4

### ผลการทดลอง

ในบทนี้ จะกล่าวถึงการทดสอบหาประสิทธิภาพความเข้มแสงของแผงสะท้อนรังสี แบบแผ่นเรียบ (flat plate type) และประสิทธิภาพความเข้มแสงของแผงสะท้อนรังสีแบบรวมแสง (concentrate type) โดยการทดลองจะเป็นการหาพื้นที่ที่ฉายลงบนแผงรับรังสีหอคอยแสงอาทิตย์ เมื่อใช้แผงสะท้อนรังสีแต่ละแบบตลอดทั้งวัน และนำมาคำนวณหาประสิทธิภาพ สำหรับการควบคุมแผงสะท้อนรังสีแสงอาทิตย์ให้สะท้อนรังสีแสงอาทิตย์ไปยังแผงรับรังสีหอคอยแสงอาทิตย์ตลอดเวลาเพื่อเก็บผลการทดลองนั้นใช้ซอฟต์แวร์โปรแกรมที่ผู้วิจัยเขียนและพัฒนาขึ้นเองโดยมีการวิเคราะห์สรุปผลความแม่นยำในการสะท้อนรังสีสู่เป้าหมาย

#### 4.1 การทดลองหาประสิทธิภาพของแผงสะท้อนรังสี

##### 4.1.1 การทดสอบหาประสิทธิภาพของแผงสะท้อนรังสีแบบแผ่นเรียบ

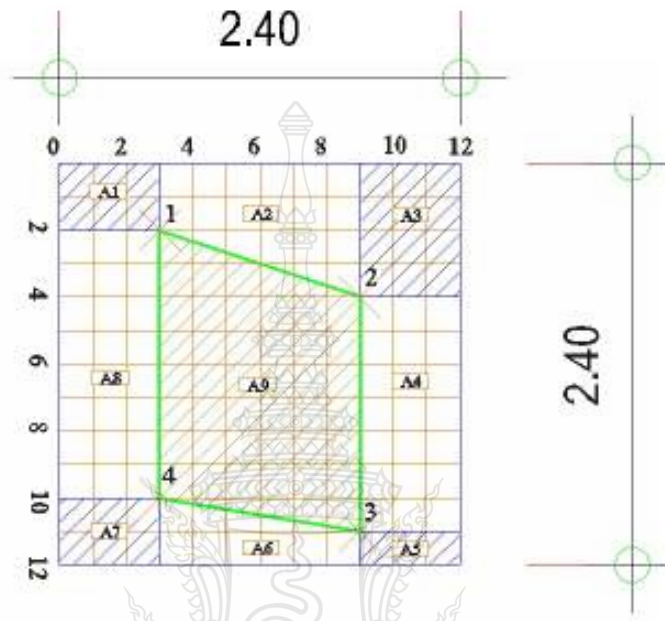
###### 1. วิธีการทดสอบหาประสิทธิภาพความเข้มแสงแบบแผ่นเรียบ

วิธีการทดสอบหาประสิทธิภาพความเข้มแสงของแผงรับรังสีแสงอาทิตย์จากแผงสะท้อนรังสีแบบใช้แผ่นเรียบนั้นทำโดยการหาพื้นที่ของแสงที่ตกกระทบบนแผงรับรังสีเทียบกับพื้นที่ของแผงสะท้อนรังสี หากความเข้มแสงมีค่า 100% หมายถึงพื้นที่ของแผงสะท้อนรังสีเท่ากับพื้นที่แสงที่ตกกระทบบนแผงรับรังสี ซึ่งการหาพื้นที่ของแสงที่ตกกระทบบนแผงรับรังสี นั้นทำได้โดยการติดตั้งกระจก ใว้ที่ มุม ทั้ง สี่ ของแผงสะท้อนรังสีขนาด 1x1 เมตรจากนั้นควบคุมให้แผงสะท้อนรังสีสะท้อนแสงไปยังแผงรับรังสีโดยโปรแกรมซอฟต์แวร์ที่เขียนพัฒนาขึ้นเอง จากนั้นจะเห็นแสงตกกระทบบนแผงรับรังสี เป็น 4 จุด ดังนั้นจะสามารถหาพื้นที่ ตกกระทบบน จาก การลากเส้นรอบรูปของทั้ง 4 จุดโดยการคำนวณดังรูปที่ 4.7

2. อุปกรณ์และส่วนประกอบหลักๆที่ใช้ในการทดสอบประสิทธิภาพของระบบสะท้อนรังสีแสงอาทิตย์ แบบแผ่นเรียบ ให้สะท้อนรังสีแสงอาทิตย์ไปยังเป้าหมาย (central receiver) ประกอบด้วย

แผงสะท้อนรังสี (แผงสะท้อนรังสี) มีโครงสร้างขนาดกว้าง 3.10 x 3.60 เมตร ติดตั้งอยู่บนเสาสะท้อนรังสีที่มีความสูงประมาณ 2.95 เมตรวัดจากระดับพื้นดินถึงกึ่งกลาง จากนั้นติดตั้งกระจกขนาด 1x1 เมตร ใว้ตรงกึ่งกลางแผง ตำแหน่งติดตั้งของแผงสะท้อนรังสีอยู่ที่

ละติจูด 14.03 N , ลองจิจูด 100.72 E ด้วย โดยแผ่นสะท้อนรังสีถูกปิดด้วยแผ่นพลาสติกไวไนลีสีดำโดยเปิดมุมกระจกไว้ทั้ง 4 มุมขนาด 10x10 เซนติเมตร เพื่อให้สะท้อนรังสีไปยังเป้าหมายดังแสดงในรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 พื้นที่รังสีแสงอาทิตย์ที่สะท้อนสู่เป้าหมาย



รูปที่ 4.2 แผงสะท้อนรังสีแสงอาทิตย์ แบบแผ่นเรียบ

เป้าหมาย (central receiver) เป้าหมายที่ติดตั้งมีขนาด 2.4x2.4 เมตรมีความสูง 10.50 เมตร วัดจากระดับพื้นดินถึงกึ่งกลางเป้าหมายและมีมุมก้มประมาณ 8 องศา ทาสีเพื่อให้เห็น แสงอาทิตย์ได้ชัดเจนยิ่งขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.3 แผงรับรังสีหอคอยแสงอาทิตย์ (solar tower)

ชุดควบคุมการหมุนของแผงสะท้อนรังสี

สเต็ปปีงมอเตอร์ตัวที่ 1 เพื่อใช้ควบคุมการหมุนของ แผงสะท้อนรังสี ในแนวมุม ก้มเงย (altitude angle) มีแรงบิดขนาด 2 นิวตัน-เมตร อัตราความเร็วของชุดเกียร์มุมก้มเงยเท่ากับ 1:360 และตั้งค่า พัลส์ไว้ที่ 1600 พัลส์ต่อรอบ

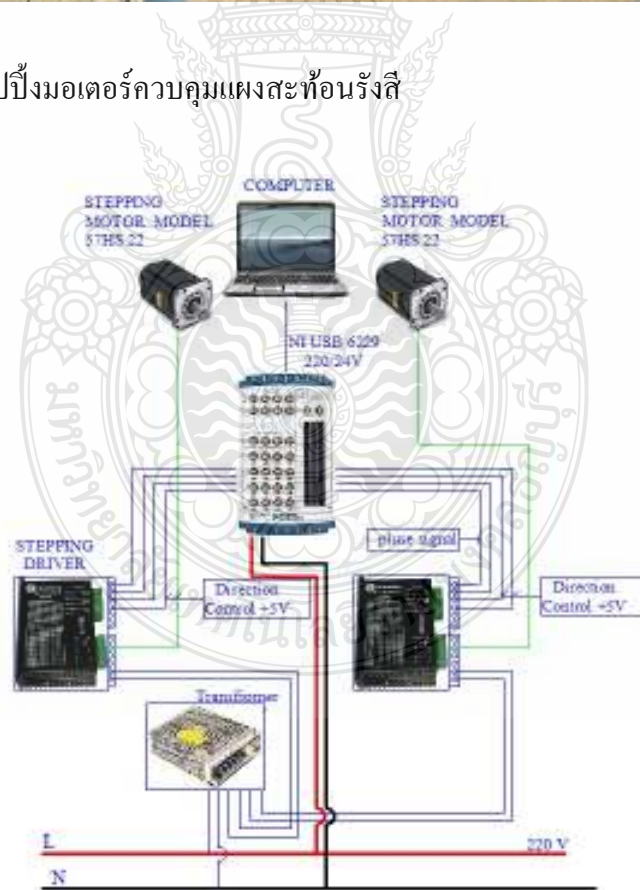
สเต็ปปีงมอเตอร์ตัวที่ 2 เพื่อใช้ควบคุมการหมุนของ แผงสะท้อนรังสี ในแนวมุม กวาด (azimuth angle) มีแรงบิดขนาด 2 นิวตัน-เมตร อัตราความเร็วของชุดเกียร์มุมกวาดเท่ากับ 1:2000 และตั้งค่า พัลส์ไว้ที่ 1600 พัลส์ต่อรอบ

ชุดควบคุมอุปกรณ์ (DAQ controller) เป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่เชื่อมโยง คำสั่งจาก ซอฟต์แวร์โปรแกรม ที่เขียนขึ้นด้วยโปรแกรมแล็บวิว เพื่อสั่งการทำงานไปยัง สเต็ปปีงมอเตอร์ให้ ทำงานตามความต้องการ ชุดควบคุมอุปกรณ์ ที่ติดตั้งใช้ รุ่น “NI 6229 BNC”

เครื่องคอมพิวเตอร์ ที่ลงโปรแกรมแล็บวิวโดยทำหน้าที่ สั่งการให้โปรแกรม ซอฟต์แวร์ที่เขียนขึ้นเพื่อสั่งให้ สเต็ปปีงมอเตอร์ทำงานผ่านชุดควบคุมอุปกรณ์เพื่อหมุนติดตามดวง อาทิตย์



รูปที่ 4.4 การต่อ สเต็ปป์มอเตอร์ควบคุมแผงสะท้อนรังสี



รูปที่ 4.5 วงจรการต่ออุปกรณ์ควบคุมแผงสะท้อนรังสี

3. ขั้นตอนการทำงานเพื่อเก็บข้อมูลและคำนวณหาประสิทธิภาพ มีรายละเอียดดังนี้  
เปิด ซอฟต์แวร์โปรแกรมควบคุมแผงสะท้อนรังสีที่เขียนและพัฒนาขึ้นเองจาก  
โปรแกรม แล็บวิว โดย ตั้งค่าตัวแปรต่างๆ

ทำการบันทึกข้อมูล (data logger) โดยการกำหนดไดร์ และ path และชื่อไฟล์ที่จะ  
บันทึกเช่น D:\ แผงสะท้อนรังสี.xls ลงในช่องสำหรับบันทึกข้อมูล ตัวอย่าง ค่ามุมของแผงสะท้อน  
รังสีที่ถูกบันทึกได้แสดงดังตัวอย่างใน ตารางที่ 4.3

ปรับแผงสะท้อนรังสีให้มีมุมก้มและมุมกวาดตามโปรแกรมที่กำหนดไว้ เพื่อให้  
แผงสะท้อนรังสีสะท้อนรังสีเข้าสู่เป้าหมาย

ตั้งการซอฟต์แวร์โปรแกรมที่พัฒนาขึ้นเองให้ทำงานควบคุมการหมุนของแผง  
สะท้อนรังสีให้สะท้อนรังสีแสงอาทิตย์เข้าสู่เป้าหมาย

เก็บข้อมูลตำแหน่งพื้นที่ของรังสีแสงอาทิตย์ที่ตกลงสู่เป้าหมาย ตามช่วงเวลาต่างๆ

บันทึกภาพตำแหน่งพื้นที่ของรังสีแสงอาทิตย์ที่ตกลงสู่เป้าหมาย

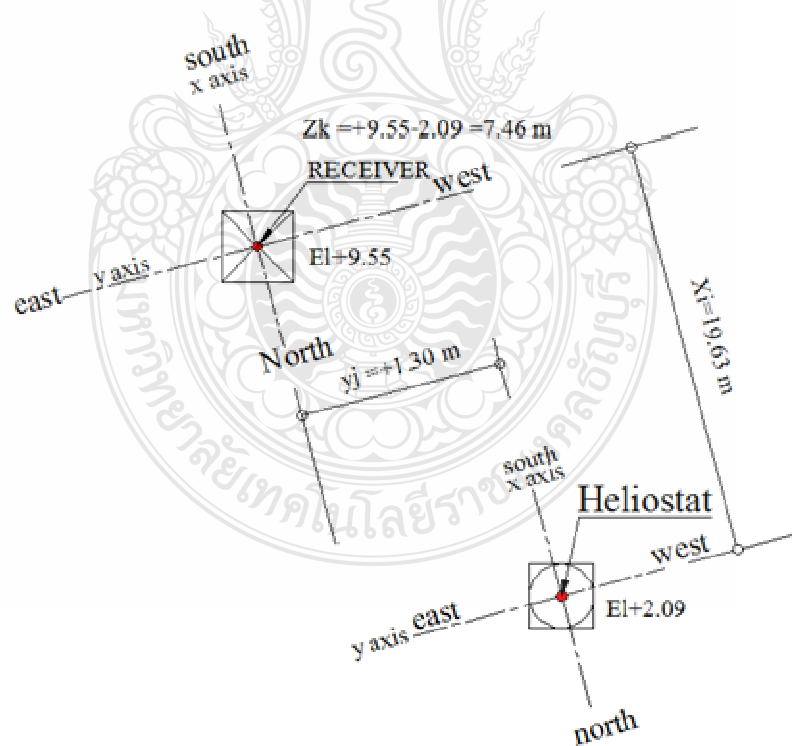
คำนวณหาประสิทธิภาพของความเข้มแสง

วงจรการต่อชุดควบคุม ประกอบด้วย คอมพิวเตอร์ , เพื่อสั่งการซอฟต์แวร์โปรแกรมที่  
พัฒนาขึ้นเพื่อหมุนแผงสะท้อนรังสีให้สะท้อนสู่เป้าหมายต่อเข้ากับอุปกรณ์ “NI DAQ” รุ่น “ NI USB  
6229 BNC” ผ่าน port USB เพื่อสื่อสารและสั่งการเพื่อควบคุมสเต็ปมอเตอร์ลักษณะการติดตั้ง  
มอเตอร์เพื่อขับแผงสะท้อนแสงอาทิตย์แสดงดังรูปที่ 4.3 และลักษณะการต่อวงจรควบคุมระบบ  
แสดงดังรูปที่ 4.4

ซอฟต์แวร์โปรแกรมที่เขียนขึ้นนั้น สามารถนำไปใช้ได้กับโครงการหรืองานวิจัยอื่นๆ ใน  
ตำแหน่งของแผงสะท้อนรังสีและเป้าหมายที่เปลี่ยนไปได้ทุกตำแหน่ง เนื่องจากสามารถกำหนดได้  
ค่าพารามิเตอร์ต่างๆตามตำแหน่งของแผงสะท้อนรังสี และค่าตำแหน่งเวกเตอร์ของเป้าหมายลงใน  
ส่วนควบคุมโปรแกรม (front panel) และปรับปรุงอัตราทคให้สัมพันธ์กับโครงสร้างของแผงสะท้อน  
รังสี จากนั้นก็นำไปใช้งานได้ ดังแสดงในรูปที่ 4.5 สำหรับงานวิจัยนี้ เวกเตอร์เป้าหมาย (ตำแหน่งของ  
solar tower) แสดงดังรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 ของซอฟต์แวร์โปรแกรมเส้นวิวที่เขียนขึ้นเพื่อใช้ในการควบคุมอุปกรณ์



รูปที่ 4.7 แผนผังการวัดหาตำแหน่งเป้าหมาย

ผลการทดลองประสิทธิภาพแผงสะท้อนรังสีแบบแผ่นเรียบ ( flat plate type)

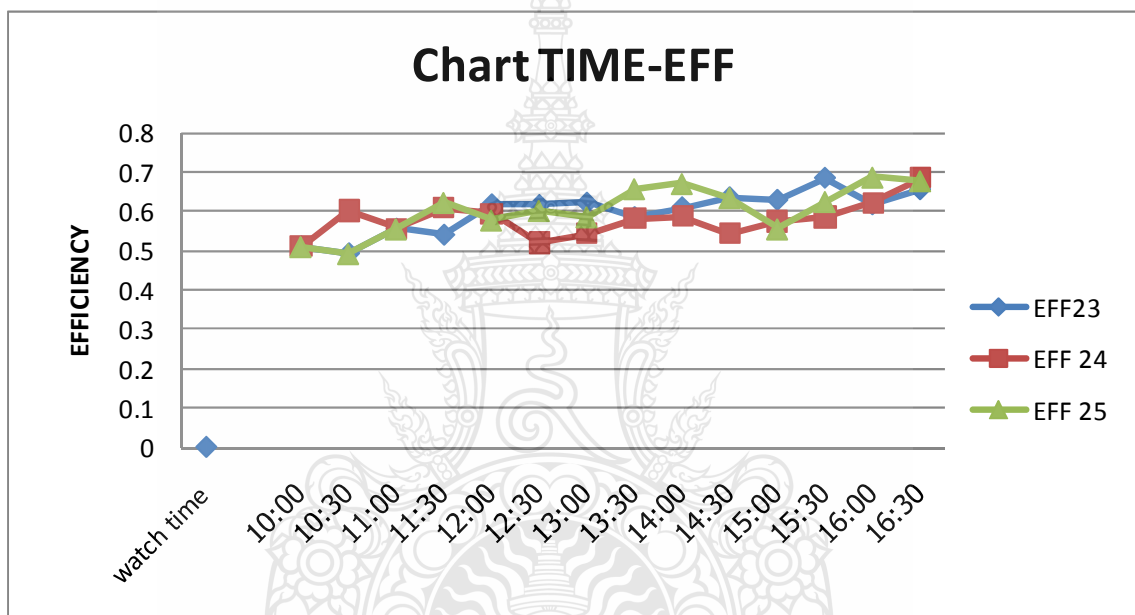
งานวิจัยได้ดำเนินการเก็บผลการทดลอง ที่มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ตั้งแต่ วันที่ 23 , 24 และวันที่ 25 กุมภาพันธ์ 2556 โดยผลการทดลองจะหาพื้นที่ที่ฉายลงบนแผงรับรังสี แสงอาทิตย์ (solar tower) จากจุดสะท้อนของกระจกทั้ง 4 มุมของแผงสะท้อนรังสี โดยลากเส้นรอบ รูปจากทั้ง4จุด โดยเริ่มเก็บค่าตั้งแต่เวลา 10.00 น.-16.30น. แผงรับรังสีอาทิตย์จะถูกทำกริดไลน์ (grid line) เพื่อให้สะดวกต่อการพล็อตตำแหน่งของแสงอาทิตย์ ที่ฉายลงบนแผงรับรังสีทั้ง 4 จุด สำหรับ พื้นที่ที่ต้องการหาค่าคือ A9 รายละเอียดดังแสดงในรูปที่ 4.7 ตำแหน่งทั้ง4จุดของรังสีแสงอาทิตย์ที่ ฉายกระทบลงบนแผงรับรังสีที่ได้จากการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4.8 ถูกนำมาสรุปเป็นตารางผลการ ทดลองทั้ง 3 วัน และคำนวณออกมาเป็นพื้นที่ ที่ฉายลงบนแผงรับรังสีแสงอาทิตย์ และคำนวณหา ประสิทธิภาพความเข้มของแสง ดังแสดงในตารางที่ 4.3 , 4.4 และ 4.5 ตามลำดับ



รูปที่ 4.8 ตำแหน่งรังสีแสงอาทิตย์ที่สะท้อนสู่เป้าหมาย

จากตาราง 4.3, 4.4 ,4.5 และรายการคำนวณ สามารถนำมาเขียนเป็นกราฟแสดง ประสิทธิภาพเทียบกับเวลาของแผงสะท้อนรังสีแบบแผ่นเรียบได้ดังรูปที่ 4.9 จากกราฟพบว่า ประสิทธิภาพของความเข้มแสงอาทิตย์ ณ.วันที่ 23 , 24 ,25 กุมภาพันธ์ (declination -10 องศา)ไม่ แตกต่างกันมาก โดยมีค่าประสิทธิภาพในแต่ละวัน มีค่าอยู่ระหว่าง 50- 70% และมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น

เล็กน้อย เมื่อเวลาเปลี่ยนแปลงไปจากช่วงเช้าถึงช่วงบ่ายคือช่วงเวลาประมาณ 10:00น.- 16:00น. และจากรูปที่ 4.10 แสดง ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพและมุมต่างๆในขณะที่ มุมอัลติจูดของแผงสะท้อนรังสี เคลื่อนที่ค่อนข้างสมมาตร โดยเคลื่อนที่เงยขึ้นตั้งแต่เวลา 10:00น.ถึงเวลา 12:30 น. ระหว่าง มุม 36 องศา ถึง 43 องศาจากนั้นเริ่มเคลื่อนที่ลงอยู่ระหว่าง 43 ถึง 32 องศาที่เวลาประมาณ 16:00 น. มุมอะซิมูท (azimuth angle) ของแผงสะท้อนรังสี เคลื่อนที่จากทิศตะวันออกไปยังทิศตะวันตกอยู่ระหว่าง 27 องศา (วัดจากแนวทิศเหนือใต้ไปทางทิศตะวันออกมีค่าเป็นบวก) ถึง-30 องศา (วัดจากแนวเหนือใต้ไปทางทิศตะวันตกมีค่าเป็นลบ)



รูปที่ 4.9 ผลการทดลองประสิทธิภาพของแผงสะท้อนรังสี แบบแผ่นเรียบ

การหาประสิทธิภาพมุมโคซายน์

ประสิทธิภาพมุมโคซายน์ ซึ่งหาได้จากสมการ ที่ 2.60 นั้นมีค่าตัวแปรที่ต้องใช้แทนค่าในสมการอยู่หลายตัวเช่น ตำแหน่งพิกัดของ แผงสะท้อนรังสี ( $z_1, e_1, n_1$ ) มุมอัลติจูดของดวงอาทิตย์, มุมอะซิมูทของดวงอาทิตย์เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 2.33 และรูปที่ 4.7 ตำแหน่งพิกัดของแผงสะท้อนรังสีที่ใช้ในการทดลองนี้มีค่าดังนี้

$$z_1 = \text{ความสูงของกึ่งกลางแผงสะท้อนรังสี} = 2.09 \text{ เมตร}$$

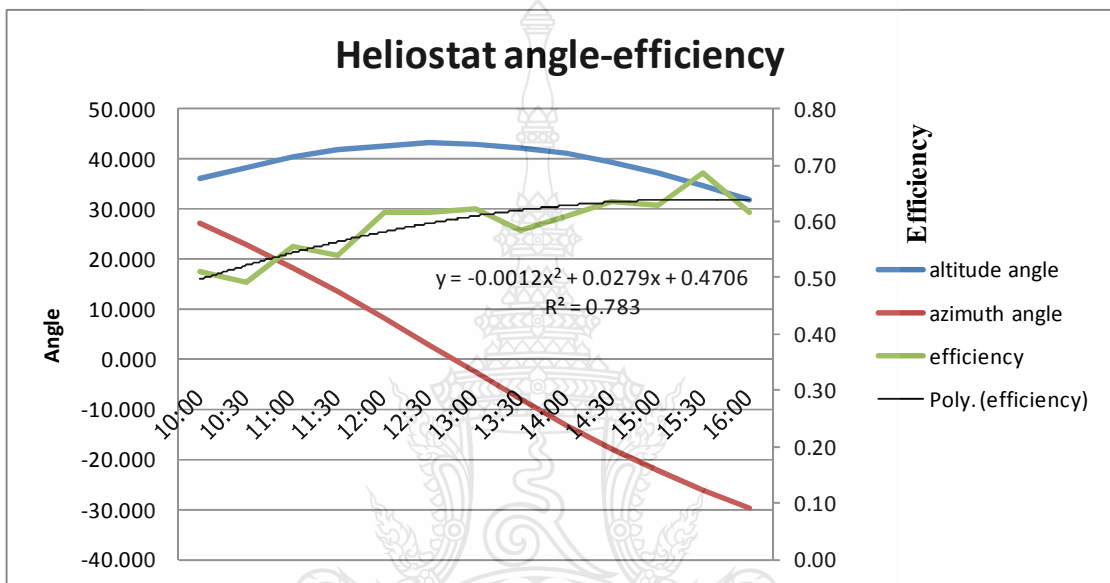
$$z_0 = \text{ความสูงของกึ่งกลางแผงรับรังสีแสงอาทิตย์} = 9.55 \text{ เมตร}$$

$$e_1 = \text{พิกัดตำแหน่งในแนวแกน x} = -1.3 \text{ เมตร}$$



$n_1$  = พิกัดตำแหน่งในแนวแกน  $y = 19.63$  เมตร

ดังนั้นหากแทนค่าพิกัดตำแหน่งของแผงสะท้อนรังสีที่ใช้ในการทดลองครั้งนี้และค่ามุมอัตรัดจุดของดวงอาทิตย์, มุมอะซิมุทของดวงอาทิตย์, ความสูงของแผงรับรังสีรวมกลาง ลงในสมการ 2.60 แล้วจะสามารถหาค่าประสิทธิภาพโคซายน์และประสิทธิภาพผลของพื้นที่สะท้อนแสงของแผงสะท้อนรังสี (effective area) ของการทดลองนี้ได้ดังแสดงในตารางที่ 4.5

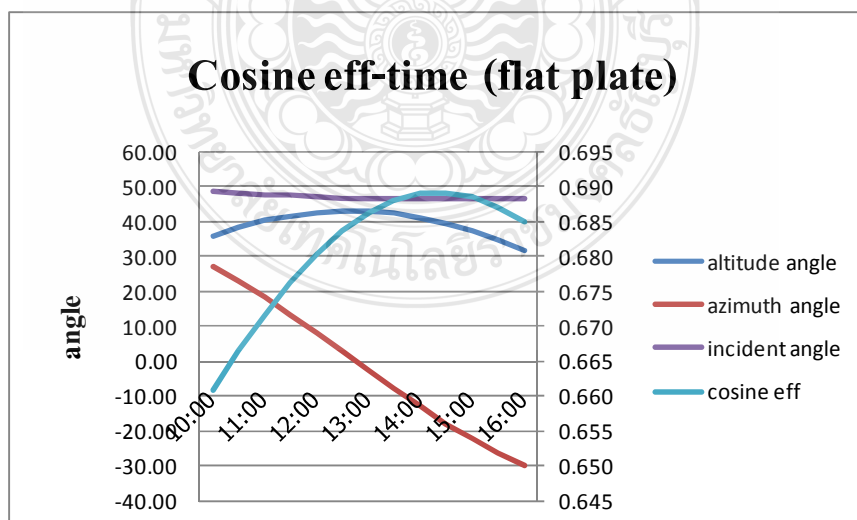


รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ของประสิทธิภาพ กับมุมต่างๆของแผงสะท้อนรังสีแบบแผ่นเรียบ

จากผลการทดลองดังตารางที่ 4.5 เมื่อนำมาเขียนเป็นกราฟดังแสดงในรูปที่ 4.11สามารถวิเคราะห์ได้ว่า หากค่ามุมอัตรัดจุดของแผงสะท้อนรังสีมีค่ามาก(หมายถึงพระอาทิตย์อยู่ในตำแหน่งสูง) ประสิทธิภาพมุมโคซายน์หรือประสิทธิภาพในการใช้พื้นที่ของแผงสะท้อนรังสี (effective area) เพื่อสะท้อนรังสีจะมีค่าสูงด้วยดังสมการที่ 2.61 และหากค่ามุมอะซิมุทของแผงสะท้อนรังสีมีค่าเข้าใกล้ 0 (หมายถึงพระอาทิตย์เคลื่อนตัวอยู่ใกล้แนวทิศเหนือ-ใต้) ช่วงเวลา 12:00-14:30 น. ประสิทธิภาพมุมโคซายน์จะมากเช่นกัน ดังนั้นหากจะติดตั้งแผงสะท้อนรังสี ควรจะต้องติดตั้งแผงสะท้อนรังสี (heliostat) ให้ใกล้กับตำแหน่งแนวเหนือใต้ของแผงรับรังสี และเพื่อให้เกิดความสมดุลย์ในการใช้ประสิทธิภาพแผงสะท้อนรังสีทั้งในช่วงเช้าและช่วงบ่าย

ตาราง 4.1 มุมแผงสะท้อนรังสีเพื่อสะท้อนสู่แผงรับรังสีแสงอาทิตย์

23กพ.					
Time	$\alpha_h$	$\gamma_h$	eff	$\theta_i$	$\eta_{\cos}$
10:00	36.098	27.049	0.510	48.63	0.661
10:30	38.412	22.921	0.493	48.2	0.667
11:00	40.307	18.362	0.556	47.8	0.672
11:30	41.742	13.424	0.540	47.44	0.676
12:00	42.680	8.194	0.617	47.13	0.680
12:30	43.091	2.785	0.615	46.87	0.684
13:00	42.963	-2.668	0.621	46.67	0.686
13:30	42.294	-8.024	0.585	46.53	0.688
14:00	41.099	-13.152	0.610	46.45	0.689
14:30	39.407	-17.944	0.635	46.44	0.689
15:00	37.253	-22.325	0.629	46.49	0.688
15:30	34.676	-26.247	0.685	46.6	0.687
16:00	31.714	-29.687	0.617	46.77	0.685



รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ของประสิทธิภาพมุมโคซายน์กับมุมต่างๆของแผงสะท้อนรังสีแบบเรียบ

จากตารางที่ 4.1 ซอฟต์แวร์โปรแกรมที่เขียนขึ้นนั้นสามารถบันทึกข้อมูลค่ามุมต่างๆที่สำคัญในขณะที่ทำงานได้ เช่น มุมอะซิมุทและมุมอัลติจูดของแสงสะท้อนรังสีรวมทั้งค่ามุมทั้งสองที่เปลี่ยนแปลงไปต่อหน่วยเวลาที่กำหนดเพื่อใช้ในการตรวจสอบความถูกต้องและคำนวณหาค่าจำนวนพัลส์ ซึ่งโปรแกรมจะสั่งการให้เสต็ปมอเตอร์ทำงานตามจำนวนพัลส์ที่คำนวณได้เพื่อไปจับแสงสะท้อนรังสีให้หมุนทำมุมตามที่ต้องการและสะท้อนรังสีเข้าสู่เป้าหมายหรือแผงรับรังสีแสงอาทิตย์ได้อย่างถูกต้อง

ตาราง 4.2 บันทึกข้อมูลจากซอฟต์แวร์โปรแกรมแล็บวิว

Time	AZimuth (HE)	Altitude(He)	Altitude angle changed	Altitude angle pulse	Azimuth angle change	Azimuth angle pulse
7:59	54.222632	29.8019	29.8019	529811.5581	54.222632	173512.4232
8:00	51.816937	34.223173	0.034741	617.617688	-0.021417	68.534273
8:01	51.730932	34.361976	0.034676	616.468713	-0.021552	68.964911
8:02	51.644389	34.500519	0.034612	615.31714	-0.021687	69.397236
8:03	51.557303	34.638804	0.034547	614.162916	-0.021822	69.831262
8:04	51.469674	34.776828	0.034482	613.005985	-0.021958	70.267004
8:05	51.381499	34.914591	0.034416	611.846292	-0.022095	70.704476
8:06	51.292775	35.052093	0.034351	610.68378	-0.022232	71.143692
8:07	51.203501	35.189333	0.034285	609.518395	-0.02237	71.584666
8:08	51.113675	35.32631	0.03422	608.350079	-0.022509	72.027413
8:09	51.023293	35.463024	0.034154	607.178776	-0.022647	72.471945
8:10	50.932355	35.599475	0.034088	606.00443	-0.022787	72.918279
8:11	50.840857	35.73566	0.034022	604.826983	-0.022927	73.366427
8:12	50.748798	35.87158	0.033955	603.646378	-0.023068	73.816403
8:13	50.656174	36.007234	0.033889	602.462558	-0.023209	74.26822
8:14	50.562985	36.142621	0.033822	601.275464	-0.023351	74.721894
8:15	50.469227	36.277741	0.033755	600.085038	-0.023493	75.177437
8:16	50.374898	36.412592	0.033688	598.891222	-0.023636	75.634863
8:17	50.279995	36.547175	0.03362	597.693957	-0.023779	76.094186
8:18	50.184518	36.681487	0.033553	596.493183	-0.023924	76.555418
8:19	50.088462	36.815529	0.033485	595.288843	-0.024068	77.018573
8:20	49.991825	36.949299	0.033417	594.080876	-0.024214	77.483665
8:21	49.894606	37.082797	0.033349	592.869222	-0.02436	77.950706
8:22	49.796801	37.216021	0.033281	591.65382	-0.024506	78.41971

ตาราง 4.3 ผลการทดลองเก็บข้อมูลพื้นที่รังสีแสงอาทิตย์สะท้อนไปยังเป้าหมายวันที่ 1

วันที่ 23-02-56														
watch time	ตำแหน่งจุดที่	ตำแหน่งแนวแกน		Area(sq. cm)										eff
		x	y	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A (heliostat)	A9	
10:00	1	2	2	1,600	9,800	6,000	7,200	1,200	4,200	1,600	6,400	10,000	19,600	0.510
	2	9	5											
	3	9	11											
	4	2	10											
10:30	1	2	2	1,600	7,000	3,600	8,400	2,400	6,300	2,000	6,000	10,000	20,300	0.493
	2	9	3											
	3	9	10											
	4	2	9.5											
11:00	1	3	2	2,400	7,200	4,800	8,400	1,200	3,600	2,400	9,600	10,000	18,000	0.556
	2	9	4											
	3	9	11											
	4	3	10											
11:30	1	2	2	1,600	6,000	4,800	9,800	2,400	5,200	2,000	7,200	10,000	18,600	0.53763
	2	8	3											
	3	9	10											
	4	2.5	10											
12:00	1	3	3	3,600	8,400	4,800	6,600	2,000	5,200	2,400	8,400	10,000	16,200	0.61728
	2	9	4											
	3	9.5	10											
	4	3	10											
12:30	1	2	2.5	2,000	7,150	4,200	7,200	3,000	6,600	3,500	7,700	10,000	16,250	0.61538
	2	8.5	3											
	3	9.5	9											
	4	3.5	9.5											
13:00	1	2	2.5	2,000	6,600	4,800	7,200	2,400	8,400	3,600	6,500	10,000	16,100	0.62112
	2	8	3											
	3	10	9											
	4	3	9											
13:30	1	2	2.5	2,000	6,000	4,000	7,800	3,500	8,400	2,500	6,300	10,000	17,100	0.5848
	2	8	2.5											
	3	9.5	8.5											
	4	2.5	9.5											
14:00	1	1.5	2.5	1,500	5,400	3,600	8,400	4,000	7,800	3,500	7,000	10,000	16,400	0.60976
	2	7.5	2											
	3	9.5	8											
	4	3.5	9.5											
14:30	1	1.5	2.5	1,500	5,400	3,600	7,800	3,200	8,400	4,800	7,150	10,000	15,750	0.63492
	2	7.5	2											
	3	10	8											
	4	4	9											
15:00	1	2	3	2,400	6,000	3,200	6,500	1,400	7,800	6,000	8,400	10,000	15,900	0.62893
	2	8	2											
	3	11	8.5											
	4	5	9											
15:30	1	1.5	2.5	1,500	5,400	3,600	6,500	4,000	8,800	5,400	7,800	10,000	14,600	0.68493
	2	7.5	2											
	3	10	7											
	4	4.5	9											
16:00	1	2	2.5	2,000	4,800	2,400	5,500	2,000	9,600	6,000	9,100	10,000	16,200	0.61728
	2	8	1.5											
	3	11	7											
	4	5	9											
16:30	1	1.5	3	1,800	5,500	4,000	8,400	3,200	7,150	4,500	7,800	10,000	15,250	0.65574
	2	7	2											
	3	10	8											
	4	4.5	9.5											

ตาราง 4.4 ผลการทดลองเก็บข้อมูลพื้นที่รังสีแสงอาทิตย์สะท้อนไปยังเป้าหมายวันที่ 2

วันที่ 24-02-56														
watch time	ตำแหน่งจุดที่	ตำแหน่งแนวแกน		area(sq. cm)										eff
		x	y	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A receiver	A9	
10:00	1	2	2	1,600	9,800	6,000	7,200	1,200	4,200	1,600	6,400	10,000	19,600	0.510
	2	9	5											
	3	9	11											
	4	2	10											
10:30	1	2	3	2,400	9,100	5,600	9,800	1,400	3,300	2,400	7,000	10,000	16,600	0.602
	2	8.5	4											
	3	8.5	11											
	4	3	10											
11:00	1	3	2	2,400	7,200	4,800	8,400	1,200	3,600	2,400	9,600	10,000	18,000	0.556
	2	9	4											
	3	9	11											
	4	3	10											
11:30	1	2	2	1,600	6,000	4,800	11,200	3,200	4,000	2,400	8,000	10,000	16,400	0.60976
	2	8	3											
	3	8	10											
	4	3	10											
12:00	1	2	3	2,400	8,400	6,400	8,400	2,400	3,600	1,200	8,000	10,000	16,800	0.59524
	2	8	4											
	3	9	10											
	4	3	11											
12:30	1	1	1	400	3,600	4,000	12,600	4,800	6,000	1,600	5,400	10,000	19,200	0.52083
	2	7	2											
	3	8	9											
	4	2	10											
13:00	1	1	3	1,200	8,400	4,800	8,450	2,500	5,850	2,400	5,600	10,000	18,400	0.54348
	2	8	3											
	3	9.5	9.5											
	4	3	10											
13:30	1	2	2	1,600	4,800	3,200	7,800	2,800	7,200	4,000	9,000	10,000	17,200	0.5814
	2	8	2											
	3	10	8.5											
	4	4	9.5											
14:00	1	1	2	800	3,900	1,800	10,500	4,800	7,000	4,800	7,000	10,000	17,000	0.58824
	2	7.5	1											
	3	9	8											
	4	4	9											
14:30	1	1.5	2	1,200	3,900	1,600	6,600	3,000	10,400	4,800	7,700	10,000	18,400	0.54348
	2	8	1											
	3	10.5	7											
	4	4	9											
15:00	1	1	3	1,200	6,000	4,000	8,400	3,200	7,200	3,200	7,000	10,000	17,400	0.57471
	2	7	2											
	3	10	8											
	4	4	10											
15:30	1	1	3.5	1,400	6,600	4,000	8,400	3,200	7,200	3,200	6,500	10,000	17,100	0.5848
	2	7	2											
	3	10	8											
	4	4	10											
16:00	1	2	3	2,400	5,500	3,600	7,200	2,400	6,600	4,000	9,800	10,000	16,100	0.62112
	2	7.5	2											
	3	10.5	8											
	4	5	10											
16:30	1	1	3.5	1,400	5,500	4,800	10,800	4,800	6,000	3,200	6,500	10,000	14,600	0.68493
	2	6	2											
	3	9	8											
	4	4	10											

ตาราง 4.5 ผลการทดลองเก็บข้อมูลพื้นที่รังสีแสงอาทิตย์สะท้อนไปยังเป้าหมายวันที่ 3

วันที่ 25-02-56														
watch time	ตำแหน่ง จุดที่	ตำแหน่ง แนวแกน		area(sq. cm)										eff
		x	y	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A receiver	A9	
10:00	1	2	2	1,600	9,800	6,000	7,200	1,200	4,200	1,600	6,400	10000	19,600	0.510
	2	9	5											
	3	9	11											
	4	2	10											
10:30	1	2	2	1,600	7,000	3,600	8,400	2,400	6,300	2,000	6,000	10,000	20,300	0.493
	2	9	3											
	3	9	10											
	4	2	9.5											
11:00	1	3	2	2,400	7,200	4,800	8,400	1,200	3,600	2,400	9,600	10,000	18,000	0.556
	2	9	4											
	3	9	11											
	4	3	10											
11:30	1	3	2.5	3,000	7,800	4,800	6,600	2,000	4,800	2,800	9,750	10,000	16,050	0.623
	2	9	4											
	3	9.5	10											
	4	3.5	10											
12:00	1	2	2	1,600	6,000	4,800	9,100	3,000	5,400	2,400	8,000	10,000	17,300	0.578
	2	8	3											
	3	9	9.5											
	4	3	10											
12:30	1	2	2	1,600	6,600	5,600	8,400	3,000	5,400	2,400	8,000	10,000	16,600	0.602
	2	8	3.5											
	3	9	9.5											
	4	3	10											
13:00	1	2	2	1,600	6,300	3,000	4,950	2,400	9,100	4,800	8,400	10,000	17,050	0.587
	2	9	2.5											
	3	10.5	8											
	4	4	9											
13:30	1	1	3	1,200	7,200	6,000	9,600	3,600	6,600	3,000	5,200	10,000	15,200	0.658
	2	7	3											
	3	9	9											
	4	3	9.5											
14:00	1	1	3	1,200	6,600	5,000	10,200	4,900	6,600	3,000	5,200	10,000	14,900	0.671
	2	7	2.5											
	3	8.5	8.5											
	4	3	9.5											
14:30	1	1	3	1,200	5,500	4,400	9,600	4,000	7,800	3,500	5,850	10,000	15,750	0.635
	2	6.5	2											
	3	9.5	8											
	4	3.5	9.5											
15:00	1	1	3.5	1,400	7,150	3,600	7,800	3,200	7,800	2,800	5,850	10,000	18,000	0.556
	2	7.5	2											
	3	10	8											
	4	3.5	10											
15:30	1	1	3	1,200	5,500	4,400	9,000	3,200	7,800	4,000	6,500	10,000	16,000	0.625
	2	6.5	2											
	3	10	8											
	4	4	9.5											
16:00	1	1	3	1,200	5,000	4,800	9,350	4,500	7,700	4,000	6,500	10,000	14,550	0.687
	2	6	2											
	3	9.5	7.5											
	4	4	9.5											
16:30	1	1	3	1,200	5,000	4,800	10,200	4,000	7,150	4,000	6,500	10,000	14,750	0.678
	2	6	2											
	3	9.5	8											
	4	4	9.5											

#### 4.1.2 การทดสอบหาประสิทธิภาพของแผงสะท้อนรังสีแบบรวมแสง (concentrated type)

##### 1. วิธีการทดสอบหาประสิทธิภาพความเข้มแสงแบบรวมแสง

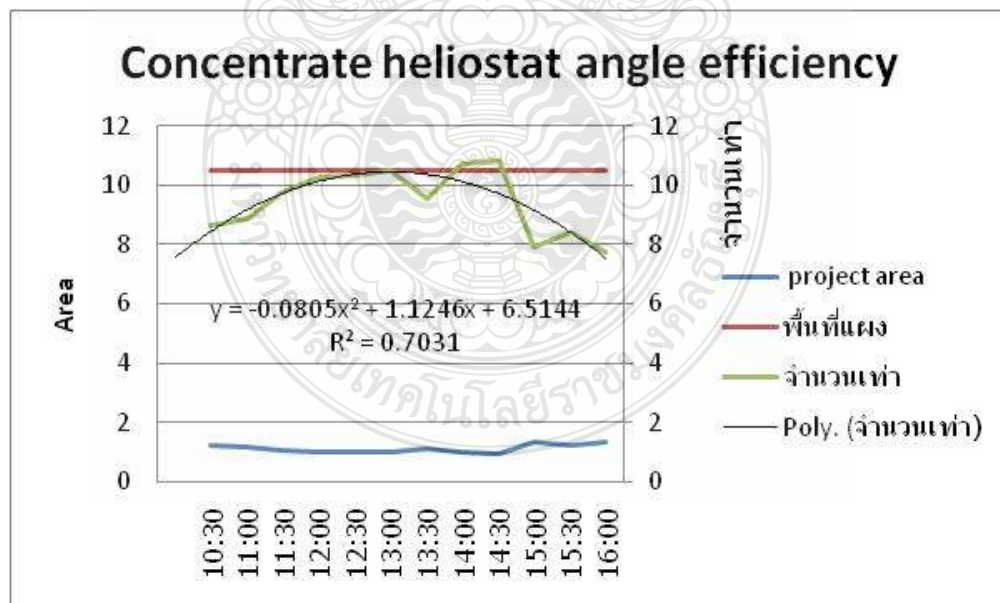
วิธีการทดลองจะใช้โครงสร้างแผงสะท้อนรังสี เช่นเดิมแต่ ติดตั้งกระจกแผ่นเล็กๆ ขนาด 50x50 ซม. ซึ่งกระจกแผ่นเล็กๆจะถูกปรับให้ เอียงเพื่อรวมแสงสะท้อนไปยังกึ่งกลางเป้าหมายหรือแผงรับรังสีแสงอาทิตย์ ในช่วงเวลาเที่ยงวันของเวลาสุริยะ (solar time) ซึ่งเป็นการรวมความเข้มของแสงที่ตำแหน่ง แผงรับรังสีรวมกลางซึ่งแผงสะท้อนรังสีแบบรวมแสงที่ใช้ในการทดลองแสดงดังในรูปที่ 4.12 งานวิจัยนี้ได้ดำเนินการเก็บผลการทดลอง ที่มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ตั้งแต่ วันที่ 25 พฤษภาคม, 2 มิถุนายน , และวันที่ 8 มิถุนายน 2556 โดยผลการทดลองจะหาพื้นที่ที่ฉายลงบนแผงรับรังสีแสงอาทิตย์ (solar tower)จากการสะท้อนของกระจกทุกแผ่นที่ติดตั้งบนแผงสะท้อนรังสีดังแสดงในรูปที่ 4.12 วิธีการหาพื้นที่ที่ฉายลงบนแผงรับรังสีทำได้โดยการถ่ายภาพพื้นที่รังสีแสงอาทิตย์ที่ปรากฏบนแผงรับรังสีรวมกลางจากนั้นใช้โปรแกรมซอฟต์แวร์ โฟโต้ชอป (photo shop) ตัดภาพเฉพาะแผงรับรังสีแสงอาทิตย์และพื้นที่ฉายที่ปรากฏบนแผงรับรังสี จากนั้นนำไปคำนวณหาพื้นที่โดยใช้โปรแกรม ออโต้แคด (AutoCAD) โดยทำการปรับให้มีสเกลเท่ากับขนาดเป้าหมาย 2.40x2.40 เมตร ดังรูปที่ 4.13 ภาพฉายบนแผงรับรังสีแสงอาทิตย์ ที่ใช้เก็บเป็นข้อมูลดังกล่าวแสดงในภาคผนวก ก รูปที่ ก.1-ก.6 การเก็บข้อมูลเริ่มเก็บค่าตั้งแต่เวลา 10:30 น.-16:00น. ของแต่ละวัน ค่าจากการบันทึกของข้อมูลและผลการคำนวณหาพื้นที่ แสดงดังตารางที่ ก.1



รูปที่ 4.12 แผงสะท้อนรังสีแบบรวมแสง

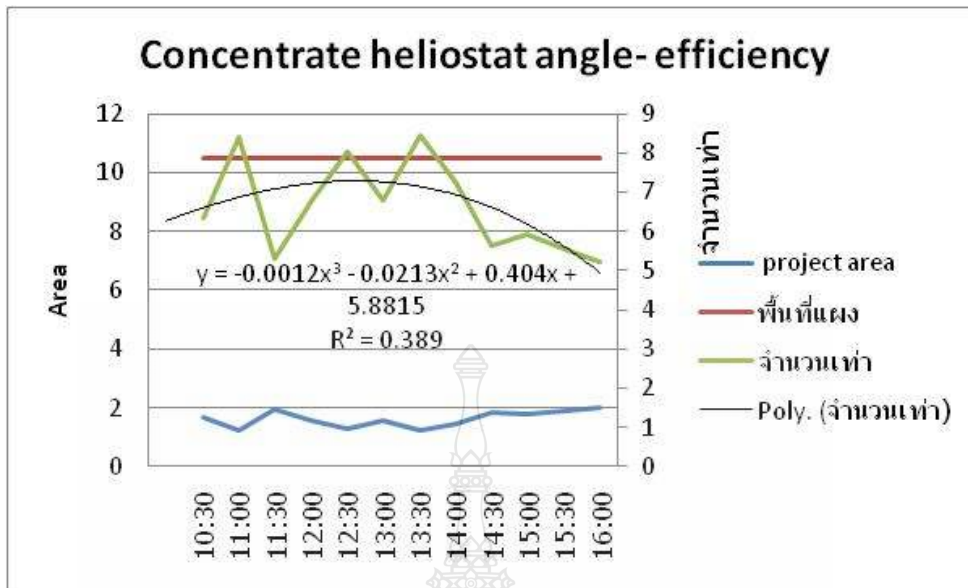


รูปที่ 4.13 การตัดภาพรังสีฉายบนแผงรับรังสี และการหาพื้นที่ด้วยซอฟต์แวร์โปรแกรม

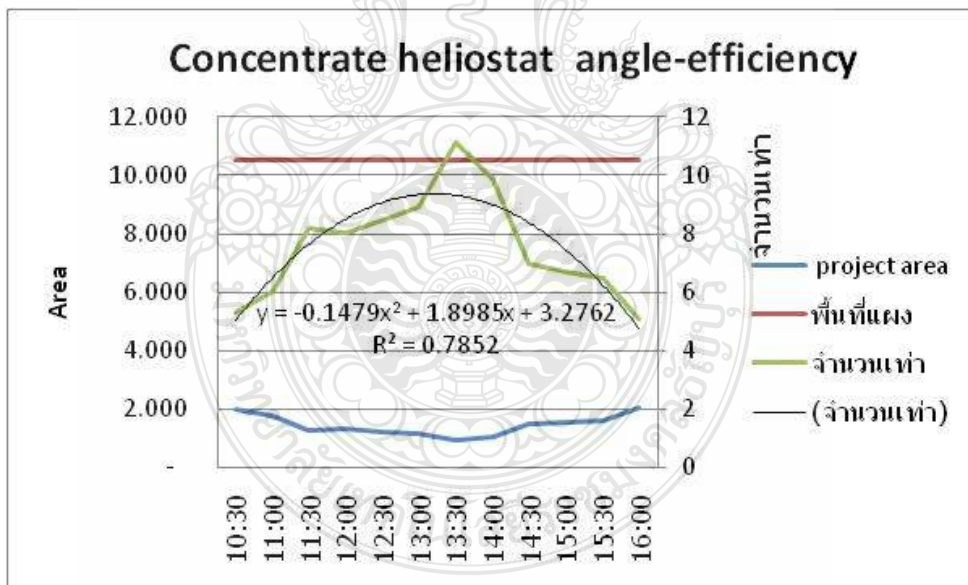


รูปที่ 4.14 ผลการทดลองประสิทธิภาพของแผงสะท้อนรังสี วันที่ 1

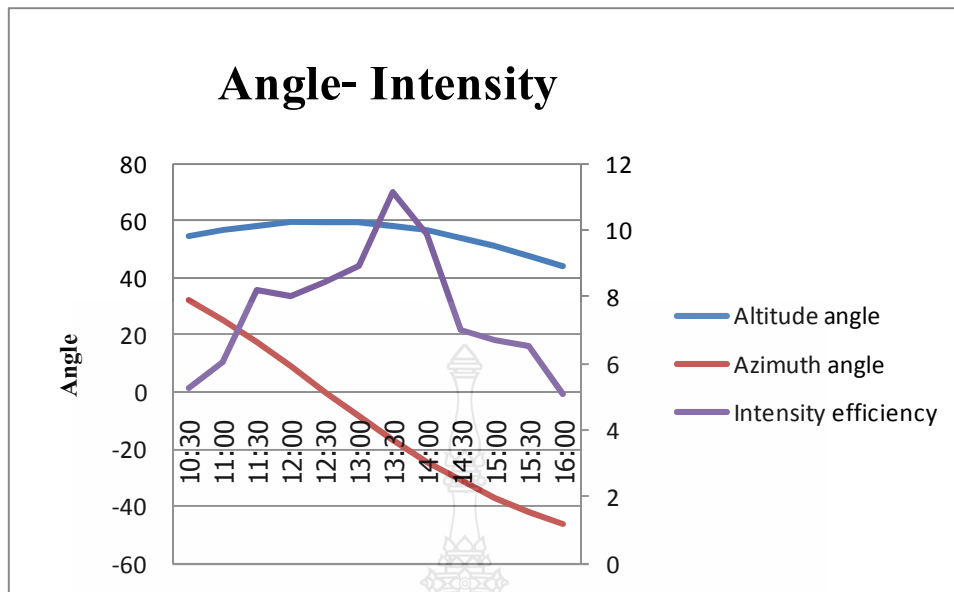




รูปที่ 4.15 ผลการทดลองประสิทธิภาพของแผงสะท้อนรังสี วันที่ 2



รูปที่ 4.16 ผลการทดลองประสิทธิภาพของแผงสะท้อนรังสี วันที่ 3



รูปที่ 4.17 ความสัมพันธ์ของความเข้มแสงของแผงสะท้อนรังสีรวมแสง กับมุมต่างๆ

ผลการทดลองแผงสะท้อนรังสีแบบรวมแสง (concentrate type)

จากตารางที่ ก.1 สามารถนำมาแสดงเป็นกราฟได้ดังรูปที่ 4.14, 4.15 , 4.16 , 4.17 เป็นกราฟแสดงประสิทธิภาพของแผงสะท้อนรังสีแบบรวมแสงและค่ามุมต่างๆ เทียบกับเวลา จากกราฟพบว่า พื้นที่ที่ตกลงยังแผงรับแสงอาทิตย์มีค่าอยู่ระหว่าง 1-2 ตารางเมตร โดยแผงสะท้อนรังสีมีพื้นที่ประมาณ 10.5 ตารางเมตร ประสิทธิภาพของความเข้มแสงอาทิตย์ ณ.วันที่ 25 พฤษภาคม , 2 , 8 มิถุนายน 2556 มีค่าอัตราความเข้มแสงสูงสุดในช่วงเวลากลางวันเวลาประมาณ 13:30 น.อยู่ที่ประมาณ 11เท่า ดังนั้นอัตราความเข้มแสงที่แผงรับรังสี จะเป็น  $11X \text{ W/m}^2$  (เมื่อ X คืออัตราความเข้มแสงที่แผงสะท้อนรังสี ณ.วันนั้นๆ) และช่วงเวลาประมาณ 12:30-14:00 น. เป็นช่วงที่อัตราความเข้มแสงเฉลี่ยอยู่ที่ประมาณ  $9X \text{ W/m}^2$  ความเข้มของแสงจะลดลงในช่วงเช้าและบ่าย โดยทั้งช่วงเช้าและบ่ายมีอัตราการลดลงของความเข้มแสงใกล้เคียงกันในเชิงสมมาตรและมีค่าใกล้เคียงกัน โดยมีความเข้มของแสงอยู่ระหว่าง  $5x - 7x \text{ W/m}^2$

## 4.2 การทดสอบความแม่นยำของการสะท้อนรังสีเข้าสู่เป้าหมาย

การทดสอบความแม่นยำของซอฟต์แวร์โปรแกรมในการสะท้อนรังสีเข้าสู่แผงรับรังสีแสงอาทิตย์นั้นพิจารณาจากภาพถ่ายจากการสะท้อนรังสีที่ตกกระทบเข้าสู่กึ่งกลางเป้าหมาย วิธีการทดสอบความแม่นยำคือ หากการสะท้อนรังสีเข้าเป้าหมายมีค่าแม่นยำดีที่สุด คือตำแหน่งที่กึ่งกลาง

ของภาพฉายที่ตกลงบนแผงรับรังสี ตรงกับกึ่งกลางของแผงรับรังสีแสงอาทิตย์พอดี จากการทดสอบความแม่นยำในการสะท้อนรังสีเริ่มตั้งแต่เวลา 10:30 น. -16:00 น. พบว่า มีค่าความแม่นยำที่สุดในช่วงเวลาประมาณ 12:00-12:30 คือ 4 เซนติเมตรและมีค่าความแม่นยำน้อยที่สุดคือ 28 เซนติเมตร ดังแสดงในรูปที่ 4.17 และ 4.18 ตามลำดับ ซึ่งสรุปผลการทดลองความแม่นยำตลอดทั้งวันมีค่าความแม่นยำที่ยอมรับได้ คือสามารถสะท้อนรังสีเข้าเป้าหมายได้โดยไม่หลุดจากกรอบของแผงรับรังสีแสงอาทิตย์

ตารางที่ 4.6 ค่าความแม่นยำในการสะท้อนรังสี

25/2/2556		
Watch time	ขนาดแผงรับ รังสีแสงอาทิตย์	ความแม่นยำ(cm.)
10:30	2.4x2.4 เมตร	8
11:00		16
11:30		17
12:00		4
12:30		4
13:00		20
13:30		18
14:00		28
14:30		21
15:00		9
15:30		17
16:00		23

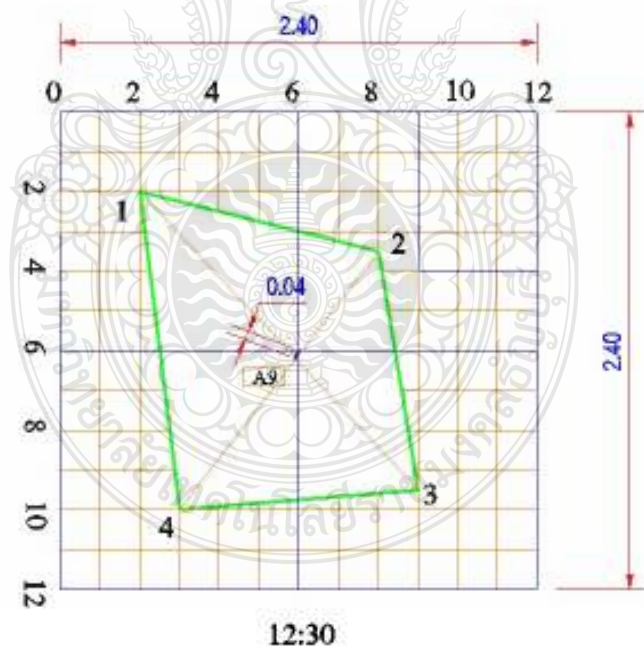
#### 4.2.1 ความแม่นยำมีตัวแปรหลายประเด็นที่ส่งผลต่อความแม่นยำ โดยมีประเด็นหลัก ดังนี้คือ

การวัดค่าพิกัดตำแหน่งของ แผงสะท้อนรังสี คือค่าลัดติจุดและลองติจูดวัดจาก โทรศัพทมือถือ มีค่าการคลาดเคลื่อน ถึง 15 -25 เมตร

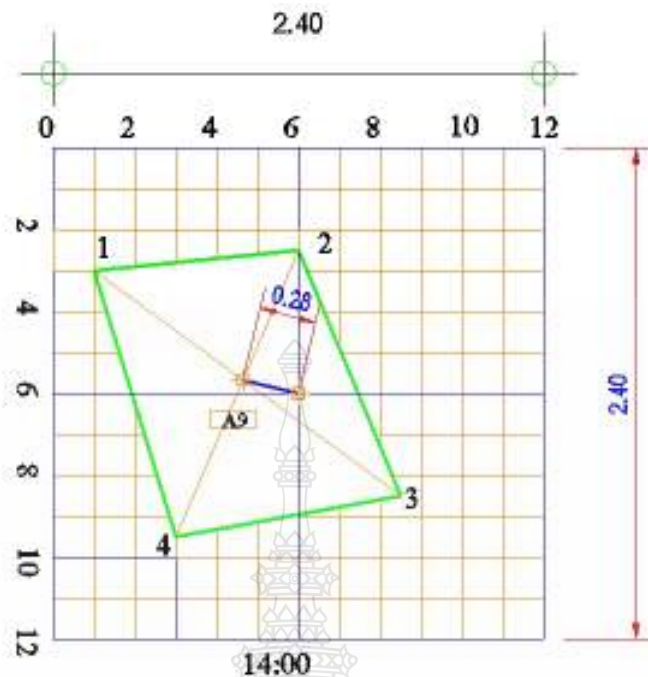
การวัดพิกัดตำแหน่งของเป้าหมายหรือการหาเวกเตอร์เป้าหมายใช้เข็มทิศและใช้การ วัดด้วยมือ ทำให้เกิดความคลาดเคลื่อน เมื่อพิกัดทั้งสอบผิวดพลาด การคำนวณหามุมสะท้อนก็มีความ ผิดพลาดหรือคลาดเคลื่อนได้เช่นกัน

ในกรณีมีลมพัดแรง ขณะระบบกำลังทำงาน เนื่องจากโครงสร้างของต้นกำลังจับเป็น เกียรติทมากซึ่งจะทำให้มีระยะพื้นเฟืองค่อนข้างมากทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนในการควบคุม มุมของแผงสะท้อนรังสี

มอเตอร์จับมีขนาดเล็กเกินไป ในกรณีรับ โหลดเช่นมีลมหรืออยู่ในตำแหน่งที่ต้องการ แรงบิดสูงๆ มอเตอร์จะไม่สามารถจับได้ชั่วขณะหรือเกิดการลื่นไถล ทำให้เสียจังหวะในการควบคุม มุมสะท้อนรังสี และสูญเสียความแม่นยำ



รูปที่ 4.18 การวัดความแม่นยำของการสะท้อนรังสี



รูปที่ 4.19 การวัดความแม่นยำของการสะท้อนรังสี (ต่อ)

การเปรียบเทียบประสิทธิภาพ ของแผงสะท้อนรังสี แบบแผ่นเรียบและแบบรวมแสง

จากผลการทดลองสำหรับแผงสะท้อนรังสีแบบแผ่นเรียบ จะเห็นว่า สามารถให้ความเข้มแสงต่อแผงรับรังสีแสงอาทิตย์ มีค่าอยู่ระหว่าง 50-70 % ของความเข้มแสงที่แผงสะท้อนรังสี หรือเฉลี่ย 60 % ของความเข้มแสงที่แผงสะท้อนรังสี หรือ  $0.6X$  วัดต่อตารางเมตรดังสมการที่ 3.3 (เมื่อความเข้มแสงที่แผงสะท้อนรังสี เท่ากับ  $X$  วัดต่อตารางเมตร)

สำหรับ แผงสะท้อนรังสีแสงอาทิตย์แบบรวมแสง จะสามารถให้ความเข้มแสงที่แผงรับรังสีแสงอาทิตย์ ได้ เท่ากับ  $7.5X$  วัดต่อตารางเมตรต่อพื้นที่สะท้อนแสง 10.5 ตารางเมตรดังสมการที่ 3.1 (พื้นที่รวมแสงเฉลี่ยเท่ากับ  $1.4 m^2$ ) ดังนั้นแผงสะท้อนรังสีแบบรวมแสงจะให้ค่าความเข้มแสงมากกว่าแบบแผ่นเรียบ มีค่าเท่ากับ

$$\Delta I = 7.5X - 0.60X = 6.9X \text{ } W/m^2 \text{ ต่อพื้นที่สะท้อนแสง 10.5 ตารางเมตร}$$

ซึ่ง

$\Delta I$  = ความแตกต่างของความเข้มแสงบนแผงรับรังสีจากแผงสะท้อนรังสีทั้งสองแบบ  $W/m^2$

หรือสรุปได้ว่า แผงสะท้อนรังสีแบบรวมแสงให้ค่าความเข้มแสงมากกว่าแบบแผ่นเรียบมีค่าเท่ากับ

$$6.9X / 10.5 = 0.65X \text{ } W/m^2 \text{ ต่อพื้นที่สะท้อนแสง 1 ตารางเมตร}$$

## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลอง

#### 5.1 สรุปผลการทดลอง

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำเสนอการหาประสิทธิภาพความเข้มแสงของแผงรับรังสีแสงอาทิตย์ (solar tower) จากแผงสะท้อนรังสีแบบแผ่นเรียบ (flat type heliostat) และแผงสะท้อนรังสีแบบรวมแสง (concentrate heliostat) โดยการทดสอบหาประสิทธิภาพความเข้มแสงของแผงรับรังสีแสงอาทิตย์จากแผงสะท้อนรังสีแบบใช้แผ่นเรียบนั้นทำโดยการหาพื้นที่ของแสงที่ตกกระทบบนแผงรับรังสีเทียบกับพื้นที่ของแผงสะท้อนรังสี หากความเข้มแสงมีค่า 100% หมายถึงพื้นที่ของแผงสะท้อนรังสีเท่ากับพื้นที่ของแสงที่ตกกระทบบนแผงรับรังสี ซึ่งการหาพื้นที่ของแสงที่ตกกระทบบนแผงรับรังสี นั้นทำได้โดยการติดตั้งกระจก ใว้ที่ มุมทั้ง 4 ของแผงสะท้อนรังสีขนาด 1x1 เมตร จากนั้นควบคุมให้แผงสะท้อนรังสีสะท้อนแสงไปยังแผงรับรังสี โดยโปรแกรมซอฟต์แวร์ที่เขียนพัฒนาขึ้นเอง จากนั้นจะเห็นแสงตกกระทบบนแผงรับรังสี เป็น 4 จุด ดังนั้นก็จะสามารถหาพื้นที่ ตกกระทบบน จาก การลากเส้นรอบรูปของทั้ง 4จุดโดยการคำนวณ และสำหรับ การทดสอบหาประสิทธิภาพความเข้มแสงของแผงรับรังสีแสงอาทิตย์จากแผงสะท้อนรังสีชนิดรวมแสง ทำได้โดยการติดตั้งกระจก เล็กๆจำนวนหลายแผ่น บน โครงสร้างของ แผงสะท้อนรังสี ซึ่งกระจกแต่ละแผ่นจะถูกปรับมุมเพื่อสะท้อนแสงเข้าตำแหน่งกึ่งกลางของแผงรับรังสีในช่วงเวลาเที่ยงวันสุริยะ จากนั้นใช้โปรแกรมซอฟต์แวร์ดังกล่าวควบคุมการทำงานให้สะท้อนรังสีไปยังกึ่งกลางแผงรับรังสีรวมกลางและทำการบันทึกภาพพื้นที่ตกกระทบบนแผงรับรังสี ในช่วงเวลาต่างๆที่ทำการทดสอบจากนั้นนำมาคำนวณหาพื้นที่ โดยใช้ โปรแกรมออโต้แคด (AutoCAD) โดยปรับสเกลภาพให้ได้ตามขนาดจริง ซึ่งความเข้มแสงจะเป็นสัดส่วนของพื้นที่ตกกระทบบนแผงรับรังสีและพื้นที่แผงสะท้อนรังสี หากพื้นที่ตกกระทบบนแผงรับรังสีมีพื้นที่น้อยกว่าความเข้มแสงจะมีมากขึ้น

การทดลองได้แบ่งออกเป็นสองส่วน คือส่วนแรก ทดสอบหาประสิทธิภาพความเข้มแสงของแผงรับรังสีแสงอาทิตย์จากแผงสะท้อนรังสีแบบแผ่นเรียบ โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาและวิเคราะห์ประสิทธิภาพของระบบ ส่วนการทดสอบในส่วนที่สองคือ การทดสอบประสิทธิภาพความเข้มแสงของแผงรับรังสีแสงอาทิตย์จากแผงสะท้อนรังสีแบบรวมแสง โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาและวิเคราะห์ประสิทธิภาพของระบบรวมทั้งเปรียบเทียบผลการทดลองทั้งสองส่วน

จากผลการทดลองการทำงานในส่วนแรกพบว่า ค่าประสิทธิภาพความเข้มแสงที่เกิดขึ้นตลอดทั้งวันของการทดสอบนั้นอยู่ระหว่าง 50-70%ซึ่งไม่ต่างกันมากโดยประสิทธิภาพมีแนวโน้ม

สูงขึ้นเล็กน้อยเมื่อเวลาเปลี่ยนจากช่วงเช้าถึงช่วงเย็นและสอดคล้องกับประสิทธิภาพมุม โคซายน์หรือพื้นที่สะท้อนแสงสุทธิ (effective area) ซึ่งจะสูงขึ้นตั้งแต่ช่วงเช้าจนถึงช่วงบ่ายและตกลงเล็กน้อยในช่วงเย็น โดยจะเห็นว่า หากติดตั้งให้ แผงสะท้อนรังสี อยู่ใกล้ๆ ในตำแหน่งแนวทิศเหนือใต้ซึ่งเป็นแนวตรงกันกับแผงรับรังสีมากที่สุด ( ค่า  $Y_j$  มีค่าเข้าใกล้ 0 มากที่สุดดังรูปที่ 4.6 ) จะทำให้พื้นที่ตกกระทบฉายใกล้เคียงกับพื้นที่ของแผงสะท้อนรังสีมากที่สุดเช่นกันซึ่งก็จะทำให้ได้ประสิทธิภาพมากที่สุดเช่นกัน ค่า declination (declination) ที่เปลี่ยนแปลงในแต่ละเดือน ในช่วงเวลาเดียวกันจะมีผลทำให้มุมของแผงสะท้อนรังสีที่ทำหน้าที่สะท้อนแสงเข้าสู่แผงรับรังสีเปลี่ยนแปลงเช่นกันนั่นคือ เมื่อพระอาทิตย์เคลื่อนที่อยู่ แนวด้านทิศเหนือของแผงสะท้อนรังสี มุมอัลติจูด ของแผงสะท้อนรังสีจะมีค่ามาก และในทางตรงกันข้ามหากพระอาทิตย์เคลื่อนที่อยู่ในแนวด้านทิศใต้แผงสะท้อนรังสีมุมอัลติจูดจะมีค่าน้อย หากวิเคราะห์ประสิทธิภาพดังกล่าวเมื่อเทียบกับงานวิจัยอื่น ๆ ที่มีการกล่าวถึงประสิทธิภาพแผงในรูปมุม โคซายน์ หรือมุมตกกระทบ ในตำแหน่งติดตั้งแผงสะท้อนรังสีลักษณะใกล้เคียงกับงานวิจัยนี้จะพบว่า มุมตกกระทบมีค่ามากในช่วงเช้าและค่อยลดลงเรื่อยๆจนถึงช่วงบ่ายและเพิ่มขึ้นเล็กน้อยในช่วงเย็นซึ่งมุมตกกระทบมีค่าผกผันกับประสิทธิภาพมุม โคซายน์ และการวิเคราะห์ด้วยการจำลองทางคณิตศาสตร์ของประสิทธิภาพมุม โคซายน์สำหรับแผงสะท้อนรังสีแบบควบคุมการหมุนจะมีค่ามากที่สุดเมื่อติดตั้งแผงในแนวทิศเหนือใต้ โดยมีประสิทธิภาพไม่แตกต่างกันมากในแต่ละช่วงเวลา ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยนี้

จากผลการทดลองการทำงานในส่วนที่สอง พบว่า ค่าประสิทธิภาพความเข้มแสงสูงสุดอยู่ในช่วงเวลากลางวันประมาณ 11 เท่าของอัตราความเข้มแสงที่แผงสะท้อนรังสีของวันนั้นๆ โดยในช่วงเวลาประมาณ 12:30-14:00 น. เป็นช่วงที่มีอัตราความเข้มแสงดี เฉลี่ยอยู่ที่ประมาณ 9 เท่าและความเข้มของแสงจะลดลงในช่วงเช้าและบ่าย โดยทั้งช่วงเช้าและบ่ายมีอัตราความเข้มแสงลดลงและมีค่าใกล้เคียงกันในเชิงสมมาตร โดยมีค่าความเข้มแสงอยู่ระหว่าง 5-7 เท่า

ผลของความแม่นยำในการสะท้อนแสงของระบบคอมพิวเตอร์ควบคุมแผงสะท้อนรังสีโปรแกรมสามารถติดตามดวงอาทิตย์และควบคุมให้แผงสะท้อนรังสี สะท้อนแสงอาทิตย์เข้าเป้าหมายในช่วงเวลากลางวันได้ดี แต่ความแม่นยำต่อกิ่งกลางเป้านั้นยังมีปัญหาอยู่บ้างเนื่องจากลม และมอเตอร์มีปัญหาในการขับเคลื่อน เนื่องจากแรงบิดน้อยเกินไป โดยไม่สามารถ ขับแผงให้สะท้อนรังสีหมุนได้ในขณะที่แผงสะท้อนรังสีอยู่ในตำแหน่งที่ต้องใช้แรงบิดมาก รวมทั้งมีระยะ ช่องว่างระหว่างพื้นเคียร์ ทำให้อัตราทคของระบบแผงสะท้อนรังสีไม่แม่นยำเท่าที่ควร โดยค่าความแม่นยำในช่วงที่ดีที่สุดมีระยะห่างจากจุดศูนย์กลางประมาณ 4 เซนติเมตรและระยะที่ไกลที่สุดคือมีระยะห่างประมาณ

28 เซนติเมตร ซึ่งสรุปได้ว่ามีค่าความแม่นยำที่ยอมรับได้เนื่องจากไม่หลุดจากกรอบของเป้าหมายและสามารถส่งพลังงานความร้อนสู่แผงรับรังสีรวมกลางได้

การเปรียบเทียบความเข้มแสงของแผงสะท้อนรังสี แบบแผ่นเรียบและแบบรวมแสง

จากผลการทดลองสำหรับแผงสะท้อนรังสีแบบแผ่นเรียบ จะเห็นว่า สามารถให้ความเข้มแสงต่อแผงรับรังสีแสงอาทิตย์ มีค่าอยู่ระหว่าง 50-70 % ของความเข้มแสงที่แผงสะท้อนรังสี หรือเฉลี่ย 60 % ของความเข้มแสงที่แผงสะท้อนรังสี หรือ  $0.6X$  วัตต์ต่อตารางเมตร (เมื่อความเข้มแสงที่แผงสะท้อนรังสี เท่ากับ  $X$  วัตต์ต่อตารางเมตร)

สำหรับ แผงสะท้อนรังสีแสงอาทิตย์แบบรวมแสง จะสามารถให้ความเข้มแสงที่แผงรับรังสีแสงอาทิตย์ ได้ เท่ากับ  $7.5X$  วัตต์ต่อตารางเมตรต่อพื้นที่สะท้อนแสง 10.5 ตารางเมตร หรือสรุปได้ว่า แผงสะท้อนรังสีแบบรวมแสงให้ค่าความเข้มแสงมากกว่าแบบแผ่นเรียบมีค่าเท่ากับ  $6.9X$  วัตต์ต่อตารางเมตร เมื่อใช้แผงสะท้อนรังสีชนิดรวมแสง (ใช้กระจกแผ่นเล็กขนาด 50x50 เซนติเมตร) มีพื้นที่สะท้อนแสง 10.5 ตารางเมตร

ดังนั้นแผงสะท้อนรังสีแบบรวมแสงจะให้ค่าความเข้มแสงมากกว่าแบบแผ่นเรียบ มีค่าเท่ากับ  $0.65X W / m^2$  ต่อพื้นที่สะท้อนแสง 1 ตารางเมตร

หากแผงสะท้อนรังสีแบบรวมแสงที่ติดตั้งด้วยกระจกหรือวัสดุสะท้อนรังสีซึ่งมีขนาดเล็ก ก็จะสามารถให้ค่าความเข้มแสงได้มากกว่าแผงซึ่งมีกระจกหรือวัสดุที่สะท้อนรังสีแผ่นใหญ่กว่าในปริมาณพื้นที่สะท้อนรังสีที่เท่ากัน

หากพิจารณาเรื่องค่าพลังงานที่จะได้รับจากแผงสะท้อนรังสีเทียบกับการลงทุนแล้ว สรุปได้ว่าแผงสะท้อนรังสีแบบรวมแสงจะคุ้มค่าต่อการลงทุนมากกว่า แบบแผ่นเรียบเนื่องจากต้นทุนเรื่องโครงสร้างหลักเหมือนกันทุกประการแตกต่างเรื่องขนาดกระจกและจำนวนกระจกเท่านั้น แต่ค่าความเข้มของแสง แบบชนิดรวมแสงให้ค่ามากกว่าแบบแผ่นเรียบถึง  $0.65X W / m^2$  ต่อพื้นที่สะท้อนแสง 1 ตารางเมตร

## 5.2 ปัญหาที่พบในการทำวิจัยและแนวทางการแก้ปัญหา

5.2.1 เนื่องจากมีชุดเกียร์ทดติดตั้งเพื่อใช้ในการขับเคลื่อนแผงสะท้อนรังสี ทั้ง 2 มุม คือ มุมอะซิมุทและมุมอัลติจูด ดังนั้นจึงมีระยะ ช่องว่างระหว่างพื้นเฟือง เมื่อเกิดลมแรงก็จะทำให้



ตำแหน่งของแผงสะท้อนรังสีแฉ่งไปมาแนวทางการแก้ไขคือการติดตั้งโซ้คและเพิ่มขนาดแรงบิดของ สเต็ปป์มอเตอร์

5.2.2 เครื่องมือ การตรวจวัดค่ามุมอะซิมุทและค่ามุมอัลติจูดของแผงสะท้อนรังสี เพื่อให้เปรียบเทียบค่ามุมดังกล่าวที่ได้จากการคำนวณของ โปรแกรม ยังไม่ละเอียดแม่นยำเท่าที่ควร วัตถุประสงค์ใช้ในการปรับปรุงพัฒนาโปรแกรมให้มีความแม่นยำมากขึ้น แนวทางการแก้ไข คือ ติดตั้งอุปกรณ์เครื่องมือวัดมุมอัลติจูดแบบอิเล็กทรอนิกส์และทำหน้าที่จอเพื่อใช้วัดค่ามุมอะซิมุทให้ละเอียดขึ้นโดยการวัดและหาเส้นแนวทิศเหนือ-ใต้ให้แม่นยำขึ้นด้วยอุปกรณ์พิเศษทางด้านวิศวกรรมโยธา

5.2.3 การส่งสัญญาณพัลส์ เพื่อควบคุมการหมุนของแผงสะท้อนรังสีให้หมุนไปยังมุมที่ต้องการ ได้จากคำนวณจากอัตราทดของเฟืองซึ่งอาจมีความคลาดเคลื่อนรวมทั้งโครงสร้างการติดตั้ง และการหมุนของแผงสะท้อนรังสีทำให้เกิดความไม่แม่นยำในการส่งคำสั่งสัญญาณ แนวทางแก้ไขหาค่าของมุมที่เปลี่ยนแปลงไปจากการทดสอบหมุนโครงสร้างจริงๆ ทั้ง 2 มุมและเก็บข้อมูลนำมาใช้งานในการควบคุมต่อไป

5.2.4 มอเตอร์ที่ใช้ขับเคลื่อนทั้ง 2 ชุดไม่ได้ติดตั้งคัปปลิง (coupling) เพื่อช่วยในการปรับระนาบของแกนเพลตามอเตอร์ (alignment) ซึ่งเป็นปัญหาในการติดตั้งมอเตอร์ และระหว่างการทำงานมอเตอร์มักจะเกิดปัญหา รับภาระแรงมากเกินไป (over load) เนื่องจากมอเตอร์มีขนาดแรงบิดน้อยเกินไป โดยเฉพาะช่วงมุมที่ต้องใช้แรงบิดมากๆ ทำให้ไม่สามารถหมุนชุดเกียร์ได้ส่งผลเสียต่อการควบคุมแผงสะท้อนรังสี การทำงานจึงต้องปรับให้หมุนในความเร็วค่อนข้างช้าเพื่อให้ได้ค่าแรงบิดที่ดีขึ้น แนวทางการแก้ไขคือ ติดตั้ง ชุดCoupling และเปลี่ยน สเต็ปป์ มอเตอร์ชุดขับเคลื่อนอัลติจูดให้มีแรงบิดมากขึ้นคือประมาณ 4-5 นิวตัน-เมตร และใช้ยี่ห้อที่มีมาตรฐานสูงกว่าที่ใช้ในการทดสอบนี้

5.2.5 แผงไม่สามารถหมุนช่วงเช้าประมาณ 9:00น. ได้ เนื่องจากฐานมอเตอร์ชุดขับเคลื่อนอะซิมุทชนกับชุดแผงสะท้อนรังสี ทำให้ไม่สามารถหมุนได้

5.2.6 ไม่สามารถติดตั้งอุปกรณ์ควบคุมไว้อย่างถาวรหรือระยะเวลาต่อเนื่องข้ามวันได้ เนื่องจากเกรงว่าจะเกิดการสูญหายของอุปกรณ์ควบคุมซึ่งมีราคาแพงและความเสียหายในกรณีฝนตก ดังนั้นแนวทางการแก้ไขคือต้องติดชุดควบคุมให้มีอุปกรณ์ป้องกันการขโมยอุปกรณ์ต่างๆ และติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันน้ำและให้สามารถระบายความร้อนของอุปกรณ์ได้ดี

### 5.3 ข้อเสนอแนะและแนวทางการพัฒนา

5.3.1 ควรติดตั้ง แผงสะท้อนรังสีเพิ่มเติมให้ได้ค่าพลังงานความร้อนที่เพียงพอ เพื่อพัฒนาเข้าไปสู่การนำค่าพลังงานที่ได้ไปใช้งานให้ได้จริง

5.3.2 ควรปรับปรุงโครงสร้างแผงสะท้อนรังสี ให้จุดกึ่งกลางแผงสะท้อนรังสี อยู่แนวศูนย์กลางเสาของแผงสะท้อนรังสี เพื่อเพิ่มความแม่นยำในการสะท้อนรังสีเข้าสู่ แผงรับรังสีรวมกลาง

5.3.3 ควรปรับปรุงระบบสะท้อนรังสีให้สามารถทำงานได้ต่อเนื่องยาวนานขึ้น เสมือนการใช้งานจริงรวมทั้งสามารถใช้ระบบจ่ายไฟฟ้าจ่ายให้กับ มอเตอร์และอุปกรณ์ควบคุมต่างๆของระบบ จากพลังงานทดแทนอื่นๆได้ เช่นพลังงานแสงอาทิตย์จาก แผงโซลาร์เซลล์ เป็นต้น

5.3.4 ควรวิเคราะห์วิธีและการหาตำแหน่งของแสงที่จะตกกระทบเข้าสู่แผงรับรังสีรวมกลาง จากแผงสะท้อนรังสีแบบรวมแสงซึ่งมีกระจกแผ่นเล็กหลายแผ่นที่อยู่แต่ละตำแหน่งบนแผงสะท้อนรังสี โดยการจำลองทางคณิตศาสตร์ เพื่อใช้ในการปรับกระจกแผ่นเล็กซึ่งมีจำนวนมากให้เข้าสู่กึ่งกลางเป้าหมายได้อย่างสะดวกรวดเร็ว หากมีแผงสะท้อนรังสีจำนวนหลายตัว

5.3.5 ควรพิจารณาปรับปรุงแก้ปัญหาเรื่องการสับคโยกของแผงสะท้อนรังสีเมื่อเกิดสภาวะลมแรง และระบบป้องกันความเสียหายของแผงสะท้อนรังสีเมื่อเกิดลมพายุ



## รายการอ้างอิง

- [1] “พลังงานแสงอาทิตย์,” กองวิจัยและพัฒนากรมพลังงานทหาร ศูนย์การอุตสาหกรรมป้องกันประเทศ และพลังงานทหาร [ออนไลน์] Available : [mod.go.th. www.mod.go.th/opsd/dedweb/energy/](http://mod.go.th/www.mod.go.th/opsd/dedweb/energy/) ,  
[สืบค้นเมื่อ 28 กุมภาพันธ์ 2555]
- [2] “โรงผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์,” Available : [sportact.obec.go.th/Thailand-go-green/Thailand-go-green-Solar-Energy](http://sportact.obec.go.th/Thailand-go-green/Thailand-go-green-Solar-Energy/) , [สืบค้นเมื่อ 28 กุมภาพันธ์ 2555]
- [3] Joel Thomas Masters. , March 2011 thesis “ Tower Tracking Heliostat Array. ” Master of science in mechanical engineering Thesis. the Faculty of California Polytechnic State University.
- [4] ศักดิ์สิทธิ์ บัวเงินและคณะ , “ ระบบติดตามดวงอาทิตย์ โดยใช้เทคนิคการประมวลผลภาพ ”,  
[online] Available:<http://thestar.spu.ac.th/content> , 2553
- [5] Roth,P., Georgive , A and Boudinob , H “ Design and Construction of a system for sun-tracking”  
Renewable Energy(Electronic),Vol.29 , 2004 pp.393-402. Available: Applied ScienceDirect
- [6] “ ระบบสุริยะ , ” [ออนไลน์] Available : [http://www.geocities.com/witit\\_mink/solarsystem.htm](http://www.geocities.com/witit_mink/solarsystem.htm).  
[สืบค้นเมื่อ 28 กุมภาพันธ์ 2555]
- [7] “ ลักษณะของดวงอาทิตย์ , ” [ออนไลน์] Available : <http://pimrumpa24.multiply.com/journal/item/4>  
[สืบค้นเมื่อ 28 กุมภาพันธ์ 2555]
- [8] “ วันสิ้นโลก , ” [ออนไลน์] Available : <http://thainakhu.blogspot.com/>[สืบค้นเมื่อ 28 กุมภาพันธ์ 2555]
- [9] “ the sun , s position ” [online]. Available : [www.powerfromthesun.net](http://www.powerfromthesun.net/) , [Retrieved Feb 28,2012]
- [10] “Location and Description.”[online]. Available : <http://www.proprofs.com/quiz-school/story.php> ,  
[Retrieved Feb 28,2012]
- [11] “ Learning How to use latitude and Longitude to plot Drifter Positions on a chart.” [online]. Available :  
<http://drifters.doe.gov/track-a-yoto/track-a-drifter.html> , [Retrieved Feb 28,2012]
- [12] “ Learning center for Earth Science and Astronomy” [online]. Available :  
<http://www.lesa.biz/astronomy/cosmos/kepler>, [Retrieved Feb 28,2012]
- [13] “ สุริยวิถี ” [online]. Available :  
[http://portal.edu.chula.ac.th/lesa\\_cd/assets/document/LESA212/1/celestial\\_sphere/ecliptic/ecliptic.html](http://portal.edu.chula.ac.th/lesa_cd/assets/document/LESA212/1/celestial_sphere/ecliptic/ecliptic.html)  
,[Retrieved Feb 28,2012]
- [14] “ analemma ” [online]. Available : <http://analemma-lab.seebyseeing.net/> , [Retrieved Feb 28,2012]
- [15] “Spherical Coordinate.”[online]. Available :  
<http://www.math.montana.edu/frankw/ccp/multiworld/multipleIVP/spherical/learn.htm> ,  
[Retrieved Feb 28,2012]

## รายการอ้างอิง (ต่อ)

- [16] อธิราช ประดิษฐ์อภัย , วิทยานิพนธ์ เรื่อง “การควบคุมด้วยภาพสำหรับระบบรับรังสีรวมกลาง ”  
วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยราชภัฏวชิรบุรี  
, 2554
- [17] ธนภัทร พรหมวัฒน์ภักดีและเอกชัย ดีศิริ , “ ระบบติดตามดวงอาทิตย์จากอุปกรณ์ตรวจจับตำแหน่งเชิงดิจิทัล  
ด้วยซีพีแอลดี, ” ศรีปทุมปริทัศน์,ฉบับที่ 1 , 2550.
- [18] How to maximize your Heliostat , Efficiency by choosing good Targets [online]. page 1-7 , Available:  
[http://www.cerebrelmelt.com/heliostatprojects/choosing\\_goods\\_Targets/index/html](http://www.cerebrelmelt.com/heliostatprojects/choosing_goods_Targets/index/html) ,  
[Retrieved Feb 28,2012]
- [19] JOHN A. DUFFIE , WILLIAM A. BECKMAN, Professor of Mechanical Engineering Solar Energy  
Laboratory University of Wisconsin – Madison “SOLAR ENGINEERING OF THERMAL  
PROCESSES”. Second Edition.
- [20] เจริญ เพชรมณี “ labview software for measurement and Automation ” ซีเอ็ดยูเคชั่น , 2546
- [21] ศ. ดร. จงจิตร หิรัญลาก “ กระบวนการ พลังงานรังสีแสงอาทิตย์ ในรูปความร้อน” สำนักพิมพ์ดวงกมล , 2520
- [22] มนุศักดิ์ จานทอง , อธิราช ประดิษฐ์อภัย การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย  
ครั้งที่ 25 “การควบคุมด้วยภาพสำหรับระบบรับรังสีรวมกลาง ”19-21 ตุลาคม 2554 จังหวัดกระบี่
- [23] คงฤทธิ์ แม้นศิริ นิพนธ์ เกตุข้อย วัฒนพงษ์ รัถยวิเชียร สุขฤดี นาถกรณกุล และ เอกลักษณ์ โรจนารณ์ ,  
Wang,minghuanguo ,Wenfeng liang “โปรแกรม Sun Tracking and Simulation สำหรับการศึกษาและ  
หาค่าพลังงานแสงอาทิตย์” วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยนครสวรรค์ , 11-13 พฤษภาคม 2548  
จังหวัดชลบุรี
- [24] ศักดิ์สิทธิ์ บัวเงิน สุรินทร์ วงศ์ษา ยุทธพงศ์ ศรีมุลนันท์ “ระบบติดตามดวงอาทิตย์โดยใช้เทคนิคการประมวล  
ภาพ” คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีปทุม , EC 45 กันยายน-ตุลาคม 2552
- [25] George C. Bakos\* “ Design and construction of a two axis Sun tracking system for parabolic trough collector  
(PTC) efficiency improvement” Democritus University of Thrace , 67100 Xanthi , Greece 2006
- [26] Omar M.Al-Rabghi and Moustafa M.Elsayed, “ Heliostat minimum radial spacing for no blocking and no  
shadowing condition ”, Renewable Energy,vol.1,1991,pp37-47
- [27] Hongli zhang , Zhifeng Wang,minghuanguo ,Wenfeng liang “Cosine efficiency distribution of heliostat filed  
of solar thermal power tower plants” institute of electrical engineering ,Chinese academy of sciences
- [28] Daniel James Murray “SMALL-SCALE SOLAR CENTRAL RECEIVER SYSTEM DESIGN AND  
ANALYSIS” The Faculty at California Polytechnic State University , June 2012

## รายการอ้างอิง (ต่อ)

[29] “การผลิตไฟฟ้าและการใช้ประโยชน์จากเทคโนโลยีโรงพาราโบลิค ,” [ออนไลน์] Available :

<http://www.thailandindustry.com/guru/view.php?id=14420&section=9&rcount=Y>,

[สืบค้นเมื่อ 28 กุมภาพันธ์ 2555]

[30] M. Ewert, O. Navarro Fuentes “Modelling and simulation of a solar tower power plant” Master student of computer at RWTH Aachen university, Master student of software systems engineering at RWTH Aachen university, Germany



ภาคผนวก



ภาคผนวก ก

รายละเอียดของอุปกรณ์ที่ใช้การทดลองและตารางข้อมูลการทดลอง



ตารางที่ ก.1 ผลการทดลองประสิทธิภาพของแผงสะท้อนรังสีแบบรวมแสง

watch time	A (heliostat)	25-05-56		2-06-56		8-06-56	
		A (project area)	จำนวนเท่าของความเข้มแสง	A (project area)	จำนวนเท่าของความเข้มแสง	A (project area)	จำนวนเท่าของความเข้มแสง
10:30	10.5	1.218	8.621	1.654	6.348	1.986	5.287
11:00	10.5	1.186	8.853	1.252	8.387	1.745	6.017
11:30	10.5	1.074	9.777	1.974	5.319	1.283	8.184
12:00	10.5	1.021	10.284	1.543	6.805	1.306	8.040
12:30	10.5	1.0180	10.314	1.3090	8.021	1.239	8.475
13:00	10.5	0.999	10.511	1.545	6.796	1.1750	8.936
13:30	10.5	1.0980	9.563	1.2430	8.447	0.943	11.135
14:00	10.5	0.9780	10.7362	1.4500	7.241	1.0640	9.868
14:30	10.5	0.969	10.836	1.857	5.654	1.501	6.995
15:00	10.5	1.330	7.895	1.770	5.932	1.563	6.718
15:30	10.5	1.249	8.407	1.898	5.532	1.615	6.502
16:00	10.5	1.354	7.755	2.007	5.232	2.070	5.072





วันที่ 1 เวลา 10:30 น.



วันที่ 1 เวลา 11:00 น.



วันที่ 1 เวลา 11:30 น.



วันที่ 1 เวลา 12:00 น.



วันที่ 1 เวลา 12:30 น.



วันที่ 1 เวลา 13:00 น.

รูปที่ ก.1 รูปฉายลงบนแผงรับรังสีแสงอาทิตย์วันที่ 1 เวลา 10.30-13.00 น.



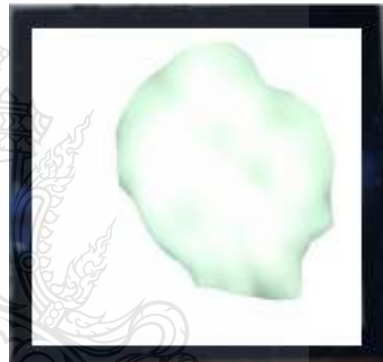
วันที่ 1 เวลา 13:30 น.



วันที่ 1 เวลา 14:00 น.



วันที่ 1 เวลา 14:30 น.



วันที่ 1 เวลา 15:00 น.



วันที่ 1 เวลา 15:30 น.



วันที่ 1 เวลา 16:00 น.

รูปที่ ก.2 รูปฉายลงบน แผงรับรังสีแสงอาทิตย์วันที่ 1 เวลา 13.30-16.00 น.



วันที่ 2 เวลา 10:30 น.



วันที่ 2 เวลา 11:00 น.



วันที่ 2 เวลา 11:30 น.



วันที่ 2 เวลา 12:00 น.



วันที่ 2 เวลา 12:30 น.



วันที่ 2 เวลา 13:00 น.

รูปที่ ก.3 รูปฉายลงบน แผงรับรังสีแสงอาทิตย์วันที่ 2 เวลา 10.30-13.00 น.



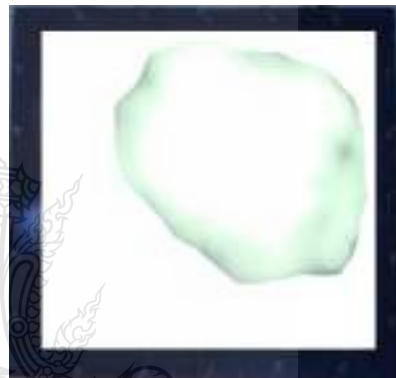
วันที่ 2 เวลา 13:30 น.



วันที่ 2 เวลา 14:00 น.



วันที่ 2 เวลา 14:30 น.



วันที่ 2 เวลา 15:00 น.



วันที่ 2 เวลา 15:30 น.



วันที่ 2 เวลา 16:00 น.

รูปที่ ก.4 รูปฉายลงบน แผงรับรังสีแสงอาทิตย์วันที่ 2 เวลา 13.30-16.00 น.



วันที่ 3 เวลา 10:30 น.



วันที่ 3 เวลา 11:00 น.



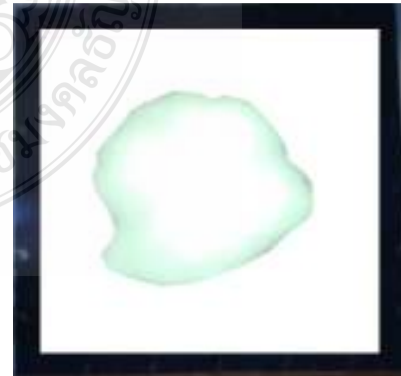
วันที่ 3 เวลา 11:30 น.



วันที่ 3 เวลา 12:00 น.

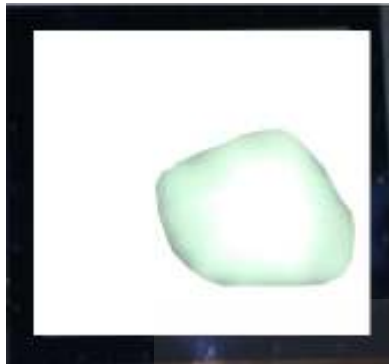


วันที่ 3 เวลา 12:30 น.



วันที่ 3 เวลา 13:00 น.

รูปที่ ก.5 รูปฉายลงบนแผงรับรังสีแสงอาทิตย์วันที่ 3 เวลา 10.30-13.00 น.



วันที่ 3 เวลา 13:30 น.



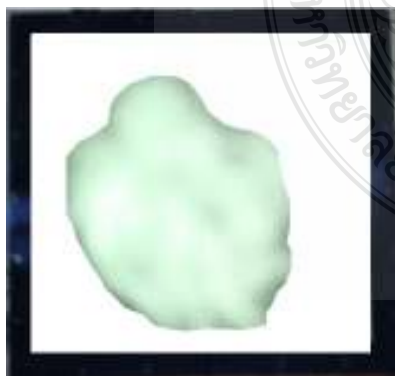
วันที่ 3 เวลา 14:00 น.



วันที่ 3 เวลา 14:30 น.



วันที่ 3 เวลา 15:00 น.



วันที่ 3 เวลา 15:30 น.



วันที่ 3 เวลา 16:00 น.

รูปที่ ก.6 รูปฉายลงบนแผงรับรังสีแสงอาทิตย์วันที่ 3 เวลา 13.30-16.00 น.

## M542 Economical Microstepping Driver

### 1. Introduction



The M542 is an economical microstepping driver based on patented technology of Leadshine. It is suitable for driving 2-phase and 4-phase hybrid stepping motors. By using the advanced 2-phase microstepping technology, it can output more speed and torque from the same rated current with higher resolution devices, such as 1.8 degree, 3.6-degree current control technology. It also can control 4-phase motor with relatively small current ripple, therefore, less motor heating is achieved.

### 2. Features

- Low cost and good high-speed torque
- Supply voltage up to 40VDC
- Output current up to 4.2A
- Optically isolated logic inputs
- Pulse frequency up to 200kHz
- Automatic 1.8-degree resolution
- 2-state current control technology
- 1.5-step microstepping
- Suitable for 2-phase and 4-phase motors
- 25% peak current rating with 2.0A limit
- CVCC67 mode for motor protection
- On-chip bridge and microstepping commutation
- Small size (18x25.4x20mm)

### 3. Applications

Suitable for a wide range of stepping motors from NEMA size 17 to 35. It can be used in various kinds of machines, such as CNC lathe, milling machines, laser cutters, engraving machines, pick-place devices, and so on. Particularly, suitable for applications requiring high resolution, high speed and high precision.

## 4. Specifications and Operating Environment

Electrical Specifications (T = 25°C)

Parameter	Min	Typical	Max	Unit
Driver current	1.0	-	4.2 (I.O.A.B.M.S)	A
Supply voltage	20	36	40	VDC
Logic input current	7	10	18	mA
Pin 2 input impedance	0	-	300	Ω
Isolation resistance	500	-	-	MΩ

### Operating Environment and other Specifications

Condition	Environment	Natural Cooling or Forced Cooling
Ambient Temperature	0°C ~ 50°C	Avoid dust, oil fog and corrosive gases
Humidity	40%RH ~ 90%RH	
Operating Temperature	10°C Max	70°C Max
Vibration	-20°C ~ 65°C	5.9m/s <sup>2</sup> Max
Storage Temperature	-20°C ~ 65°C	Approx. 280 gram (8.8 oz)

### Mechanical Specifications (Dimension, 1 inch = 25.4 mm)



Front View Side View

Figure 1: Mechanical specifications

\*Dimensions are in and tolerances are in unless better than otherwise specified.

5. Pin Assignment and Description

The M542 has two connectors, connector P1 for control signals connections, and connector P2 for power and motor connections. The following tables are brief descriptions of the two connectors of the M542.

Connector P1 Configurations

Pin Functions	Details
PUL-(+5V)	Pulse signal. In single pulse (intermittent) mode, this input represents pulse signal, active at each rising or falling edge (not both) pulse (1); 4-5V, when PUL-1(PUL1) is 0V, when PUL-1(PUL1) is 4-5V, pulse width (pulse pulse) does not represent pulse (PULSE) pulse, active at high level or low level (not both) (pulse jumper J1); For multiple pulses, please switch J1 to "Pulse" (Pulse) 1.5V. When "Pulse" remains, for current frequency, when = 12V, it is 200V/min.
DIR-(+5V)	DIR signal. In single pulse mode, DIR signal has two light output signals representing directions of pulse rotation, 0 (dir dir) pulse mode (not 5V) mode (jumper J2), DIR signal is standard TTL (CMOS) pulse, active at high level or low level (not both) (dir jumper J2); For multiple pulses, response DIR signal should be about 0.3V, interval by 500 μs, level = 5V, when DIR signal is 0V, when DIR signal is 5V.
ENA-(+5V)	Enable signal. This signal is used for controlling enabling the driver. High level (5V) control signal (PUL and DIR) control signals are on the contrary, namely Low level (for enabling) for enabling the driver and low level (for disabling) for disabling the driver (ENABLE).
ENA-(EN-A)	Selecting Active Edge or Active Level and Control Signal Mode. There are two jumpers J1 and J2, please refer to Figure 2 for active level and control signal mode, as shown in Figure 2. Default setting is PUL, DIR, enable and reverse signal edge active.



Figure 3.11 and 3.12 Jumper

Connector P2 Configurations

Pin Functions	Details
GNP	DC power ground
+V	DC power supply, 20-50VDC, including voltage fluctuations and 20MF voltage.
A+, A-	Motor Phase A
B+, B-	Motor Phase B

6. Selecting Microstep Resolution and Driver Output Current

This driver sets an 8-bit DIP switch to set microstep resolution, and motor operating current, as shown below.



Microstep Resolution Selection

Microstep resolution is set by SW1, SW2, SW3, SW4, SW5, SW6, SW7, SW8 of the DIP switch as shown in the following table:

Microstep Resolution	SW1	SW2	SW3	SW4	SW5	SW6	SW7	SW8
1	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF
2	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	ON
4	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	ON	ON
8	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	ON	ON	ON
16	OFF	OFF	OFF	ON	OFF	OFF	OFF	OFF
32	OFF	OFF	ON	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF
64	OFF	ON	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF
128	OFF	ON	ON	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF
256	ON	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF
512	ON	ON	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF
1024	ON	ON	ON	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF
2048	ON	ON	ON	ON	OFF	OFF	OFF	OFF
4096	ON	ON	ON	ON	ON	OFF	OFF	OFF
8192	ON	ON	ON	ON	ON	ON	OFF	OFF
16384	ON	ON	ON	ON	ON	ON	ON	OFF
32768	ON	ON	ON	ON	ON	ON	ON	ON

รูปที่ 6.8 คุณสมบัติ Driver model M542(ต่อ)



**Current Settings**

The first three bits (SM1, 2, 3) of the DIP switch are used to set the dynamic current. Select a setting closest to your motor's required current.

**Dynamic Current Setting**

Peak current (A)	SM5 (A3)	SM4 (A2)	SM3 (A1)
1.80	ON	ON	ON
1.46	OFF	ON	ON
1.81	ON	OFF	ON
2.37	OFF	OFF	ON
2.84	ON	OFF	OFF
3.31	OFF	ON	OFF
3.76	ON	OFF	OFF
4.23	OFF	ON	OFF

**Notes:** Due to motor inductance, the actual current in this table may be smaller than the dynamic current setting particularly under high speed condition.

**Standard Current Setting**

SM4 is used for this purpose. OFF indicates that the standard current is set to be half of the selected dynamic current, and ON means that standard current is set to be the same as the selected dynamic current.

The current automatically reduced to 60% of the selected dynamic current after the last pulse. Therefore, the set motor speed is about 20% (due to 1/4=0.25) of the target value. If the application needs a different speed, please contact us directly.

**7. Typical Connection**

A complete stepping motor should include stepping motor, stepping driver, power supply and motor type generator. A typical connection is shown as figure 7.

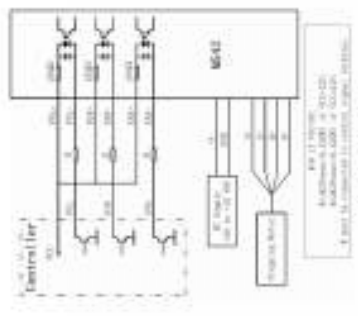


Figure 7 Typical connection

รูปที่ ก.9 คุณสมบัติ Driver model M542 (ต่อ)



### 57HS Series Hybrid Stepping Motors



#### General Specifications

Step Angle Degree	1.8°
Step Angle Accuracy	±5% (full step, no load)
Temperature Rise	80°C Max
Ambient Temperature	-10°C — +50°C
Insulation Resistance	100MΩ min. 500VDC
Dielectric Strength	500VAC for one minute
Shaft Radial Play	0.08 Max. (450g-load)
Shaft Axial Play	0.08 max. (450g-load)

#### Electrical Specifications

Model Number	Connection	Motor Length L (inch/mm)	Holding Torque $T_{H0}$ (Nm)	Number of Leads	Phase Current (Amps)	Phase Resistance (Ω/lot)	Phase Inductance (mH)	Motor Inertia $I_{M0}$ (g·cm <sup>2</sup> )	Detent Torque $T_{D0}$ (g·cm)	Weight $G_M$ (kg)
57HS04	(Bipolar) Series	1.81 (41)	56.64 (0.4)	6	2.0	1.84(10%)	1.84(10%)	0.001917 (135)	-	15.87 (0.45)
	Unipolar		59.65 (0.28)		2.8	0.74(10%)	0.354(10%)			
57HS09	(Bipolar) Parallel	2.13 (54)	184.08 (1.3)	8	4.0	0.44(10%)	1.24(10%)	0.003692 (260)	5.684 (408)	21.16 (0.6)
	(Bipolar) Series		184.08 (1.3)		2.0	1.84(10%)	4.94(10%)			
57HS13	Unipolar	2.99 (76)	127.44 (0.9)	8	2.8	0.84(10%)	1.24(10%)	0.005532 (400)	9.912 (714)	35.27 (1.0)
	(Bipolar) Parallel		254.88 (1.8)		4.0	0.54(10%)	2.14(10%)			
57HS22	(Bipolar) Series	3.19 (81)	311.52 (2.2)	8	5.7	0.44(10%)	1.84(10%)	0.008816 (640)	-	40.57 (1.15)
	(Bipolar) Parallel		311.52 (2.2)		2.8	1.84(10%)	7.24(10%)			
57HS22	Unipolar	3.19 (81)	312.4 (1.5)	8	4.0	0.84(10%)	1.84(10%)	-	-	-
	(Bipolar) Parallel		311.52 (2.2)		5.7	0.44(10%)	1.84(10%)			

\* Above tables are our typical models, and if you need a customization motor, please contact us.

#### Mechanical Specifications (Unit=mm, 1 inch=25.4mm)

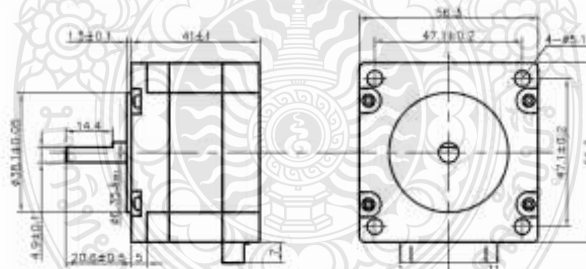


Figure 1—Mechanical specification of 57HS04

รูปที่ ก.10 คุณสมบัติ สเต็ปป์มอเตอร์

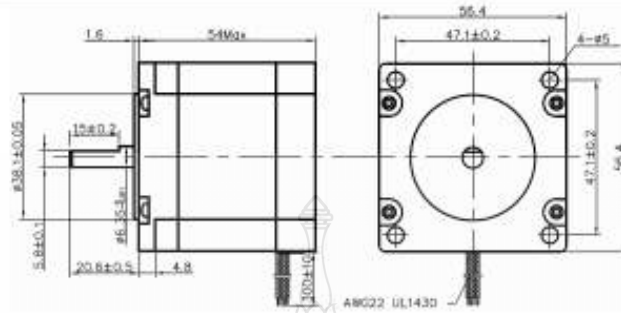


Figure 2- Mechanical specification of 57HS09

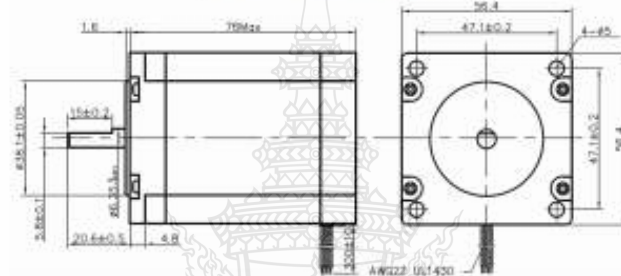


Figure 3- Mechanical specification of 57HS13

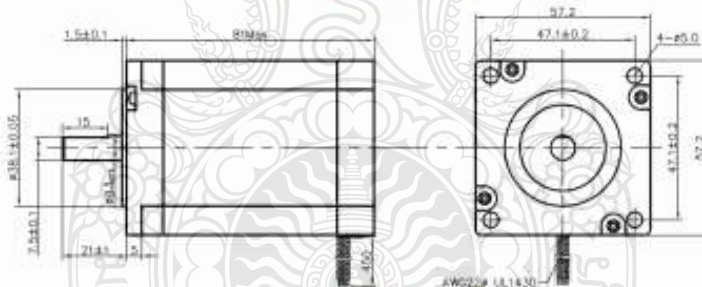


Figure 4- Mechanical specification of 57HS22

### Wiring Diagrams



Tel: +086 0755-26434369

Email: [sales@leadshine.com](mailto:sales@leadshine.com)

Web Site: [www.leadshine.com](http://www.leadshine.com)

รูปที่ ก.11 คุณสมบัติ สเต็ปปีงมอเตอร์ (ต่อ)

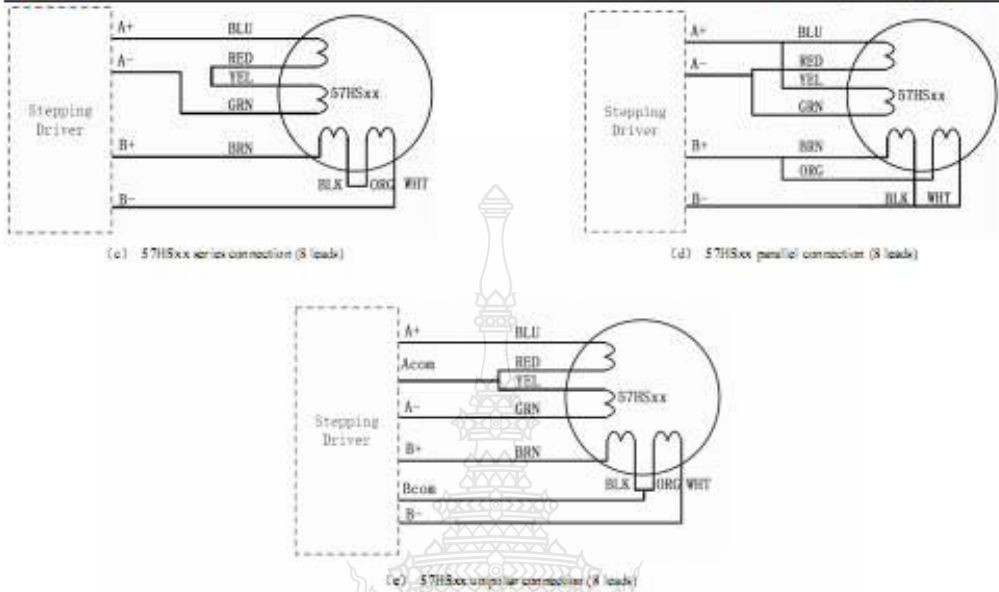


Figure 5: Wiring diagrams

### Speed-Torque Characteristics

Unipolar and bipolar half coil, because we're using less turns, doesn't give us great low speed torque, but because of the low inductance, holds the torque out to high speeds. Bipolar series uses the full coil so it gives very good low speed torque. But because of the high inductance, the torque drops off rapidly. Bipolar parallel also uses the full coil so it gives good low speed performance. And its low inductance allows the torque to be held out to high speeds. But remember, we must increase current by 40% to get those advantages. Speed-torque curves show the maximum torques that can be output at a given speed. When selecting a motor, make sure the required torque falls within the particular curve.

#### • 57HS04

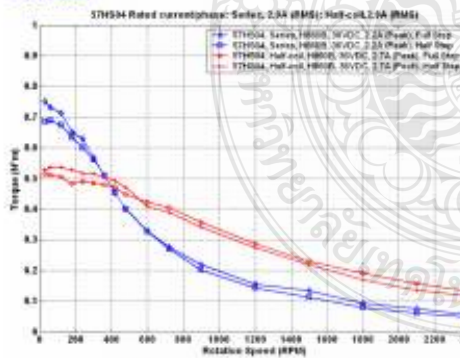


Figure 6: Speed-torque curves of the 57HS04

#### • 57HS09

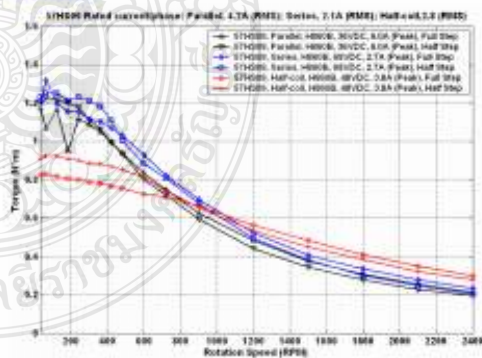


Figure 7: Speed-torque curves of the 57HS09



● 57HS13

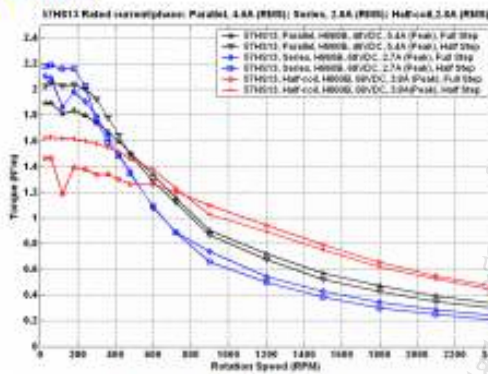


Figure 8: Speed-torque curves of the 57HS13

● 57HS22

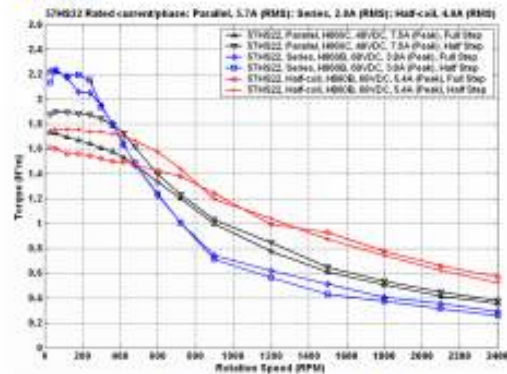
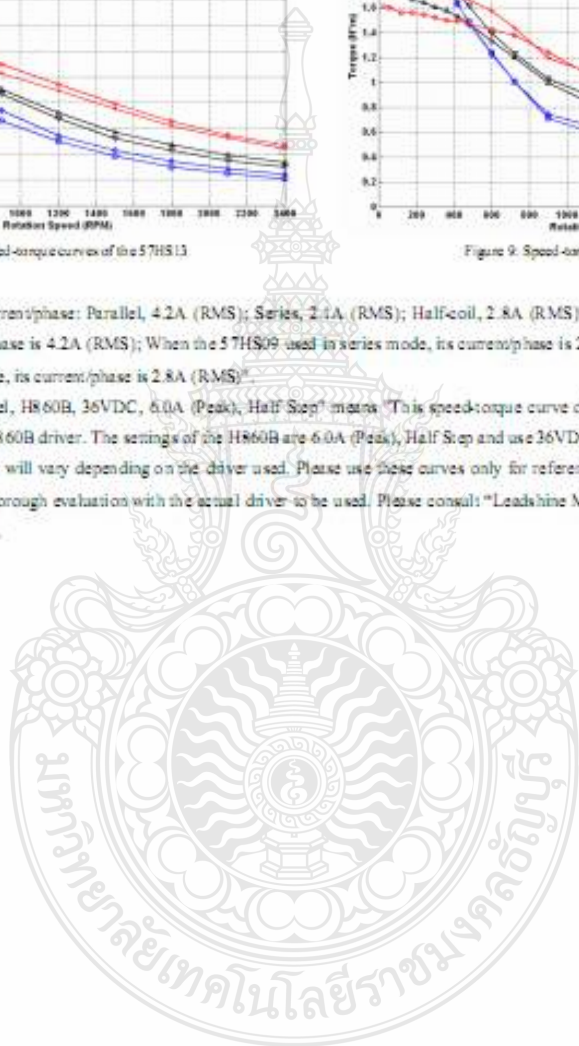
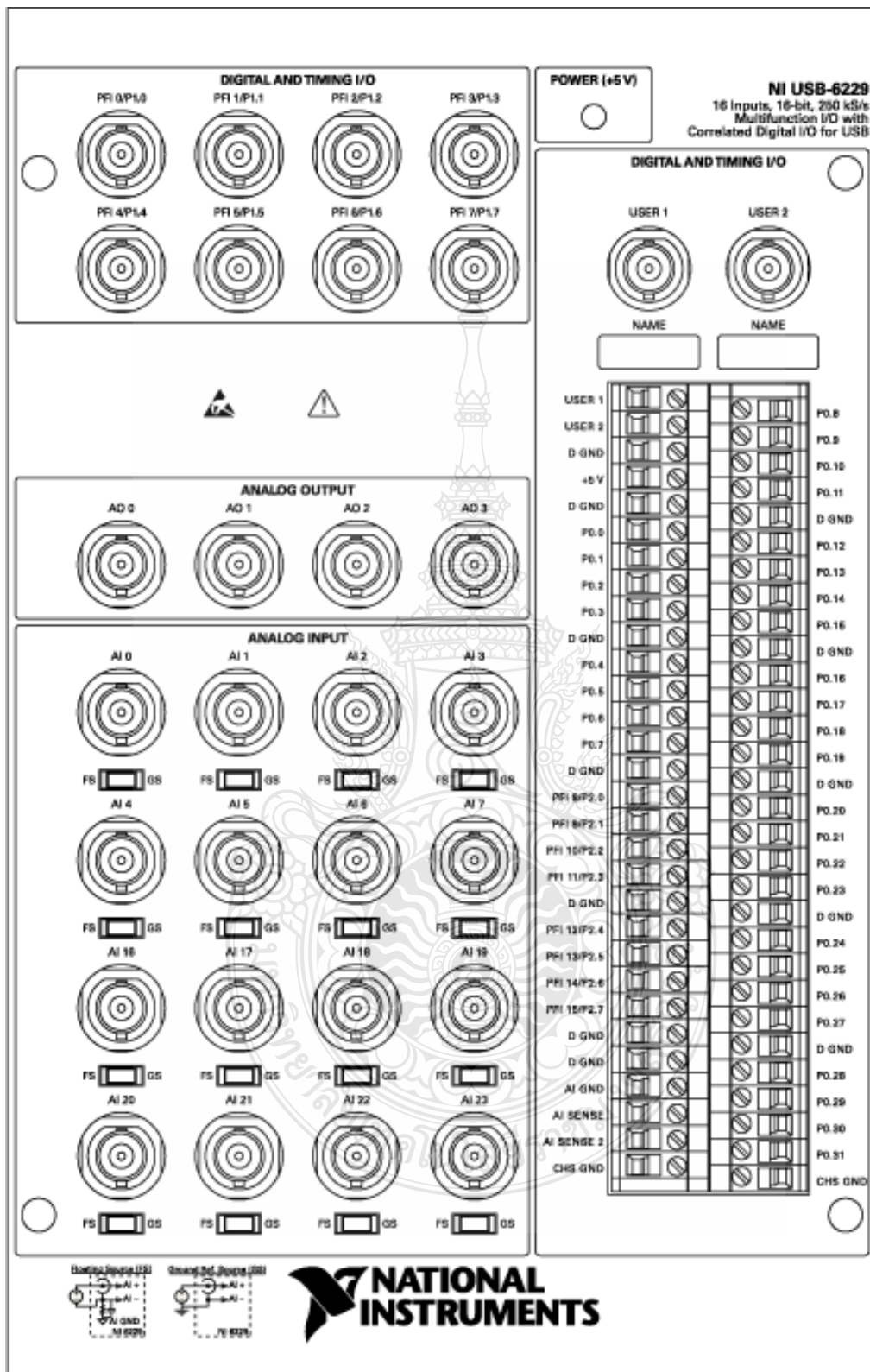


Figure 9: Speed-torque curves of the 57HS22

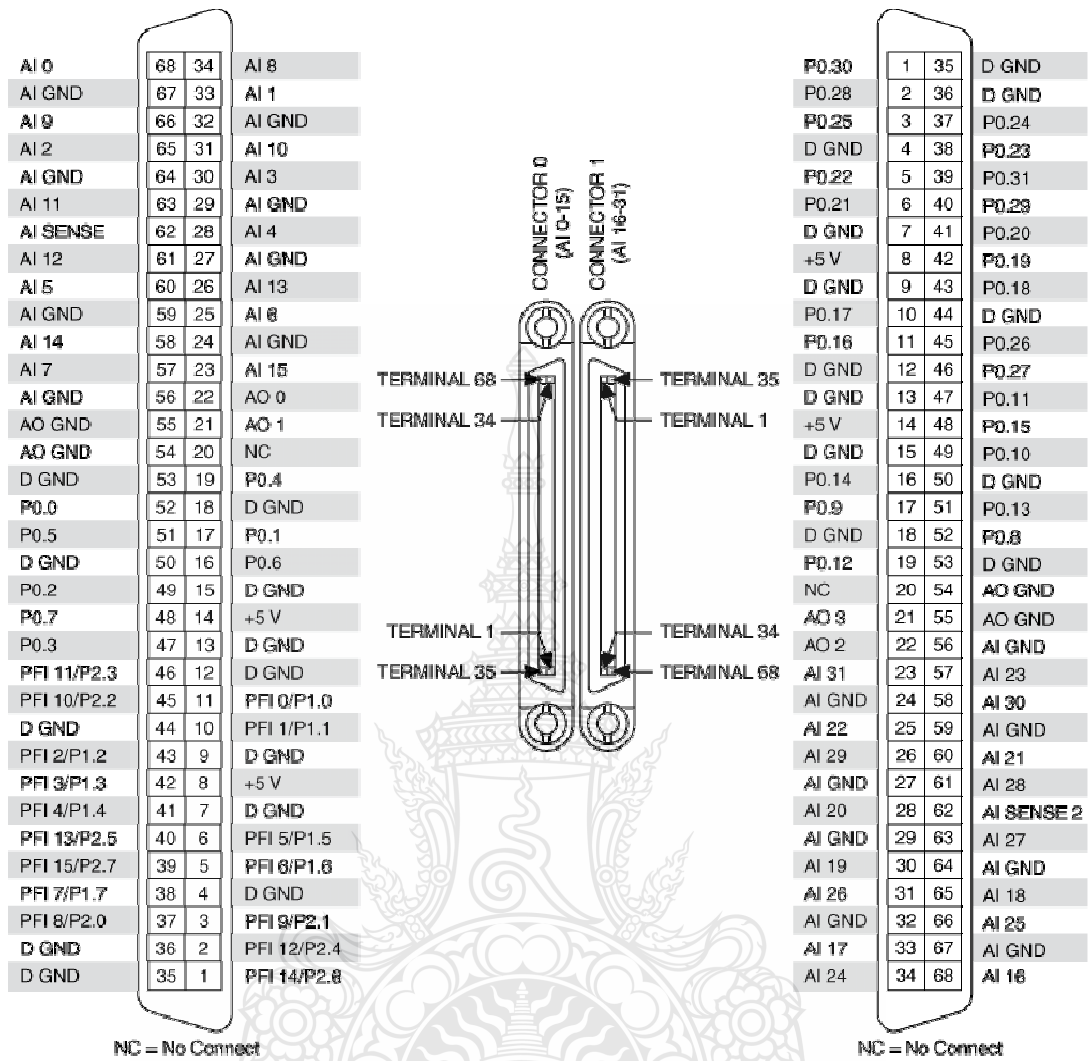
Remarks:

1. Title "57HS09 Rated current/phase: Parallel, 4.2A (RMS); Series, 2.1A (RMS); Half-coil, 2.8A (RMS)" means "When the 57HS09 used in parallel mode, its current/phase is 4.2A (RMS); When the 57HS09 used in series mode, its current/phase is 2.1A (RMS); When the 57HS09 used in half-coil or unipolar mode, its current/phase is 2.8A (RMS)".
2. Legend "57HS09, Parallel, H860B, 36VDC, 6.0A (Peak), Half Step" means "This speed-torque curve of the 57HS09 (connected in parallel mode) was done with the H860B driver. The settings of the H860B are 6.0A (Peak), Half Step and use 36VDC power supply".
3. The actual characteristics will vary depending on the driver used. Please use these curves only for reference purposes when selecting a motor. You must also conduct a thorough evaluation with the actual driver to be used. Please consult "Leadshine Motor and Driver Packages" for more information about this issue.

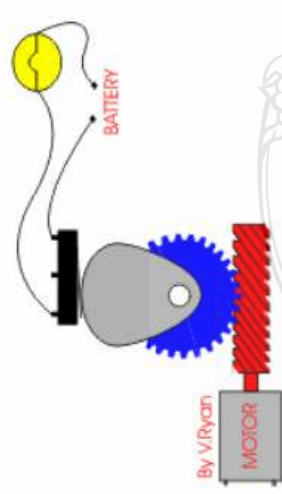




รูปที่ ก.14 จุดเชื่อมต่อของอุปกรณ์ “DAQ NI 6229 BNC”



รูปที่ ก.15 จุดเชื่อมต่อของอุปกรณ์ “DAQ NI 6229 BNC” (ต่อ)



The system opposite is used to control a set of traffic lights.  
 The mechanism involved includes a motor which drives a worm gear round, turning a wormwheel and the attached cam.  
 As the cam rotates it hits a micro switch which turns on a light

If the cam turns at one rev per minute (rpm) and the wormwheel has 110 teeth, how fast does the motor rotate?

First work out the gear ratio:

$$\frac{\text{Number of teeth on wormwheel}}{\text{Number of teeth on worm}} = \frac{\text{Number of teeth on wormwheel}}{1}$$

*It is always considered that a worm gear has just 1 tooth*

$$= \frac{110}{1} \quad \text{RATIO is } 110 : 1$$

The worm gear always rotates at a faster rate than the wormwheel.

RPM is  $110 \times 1 = 110$  rpm (motor rotates 110 times per minute)

The worm gear and motor rotates 110 times to every single rotation of the wormwheel.

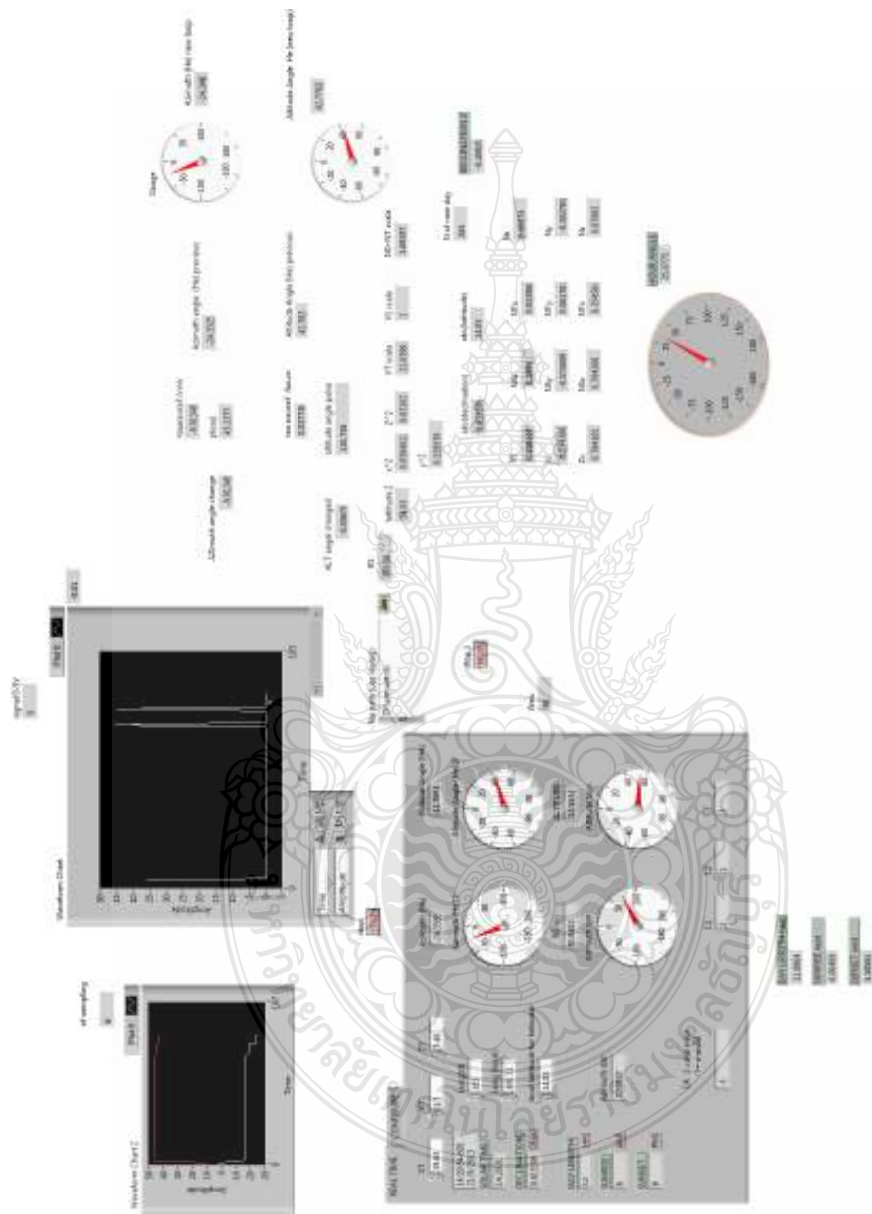
รูปที่ ก.16 อัตราทดของเฟืองตัวหนอน



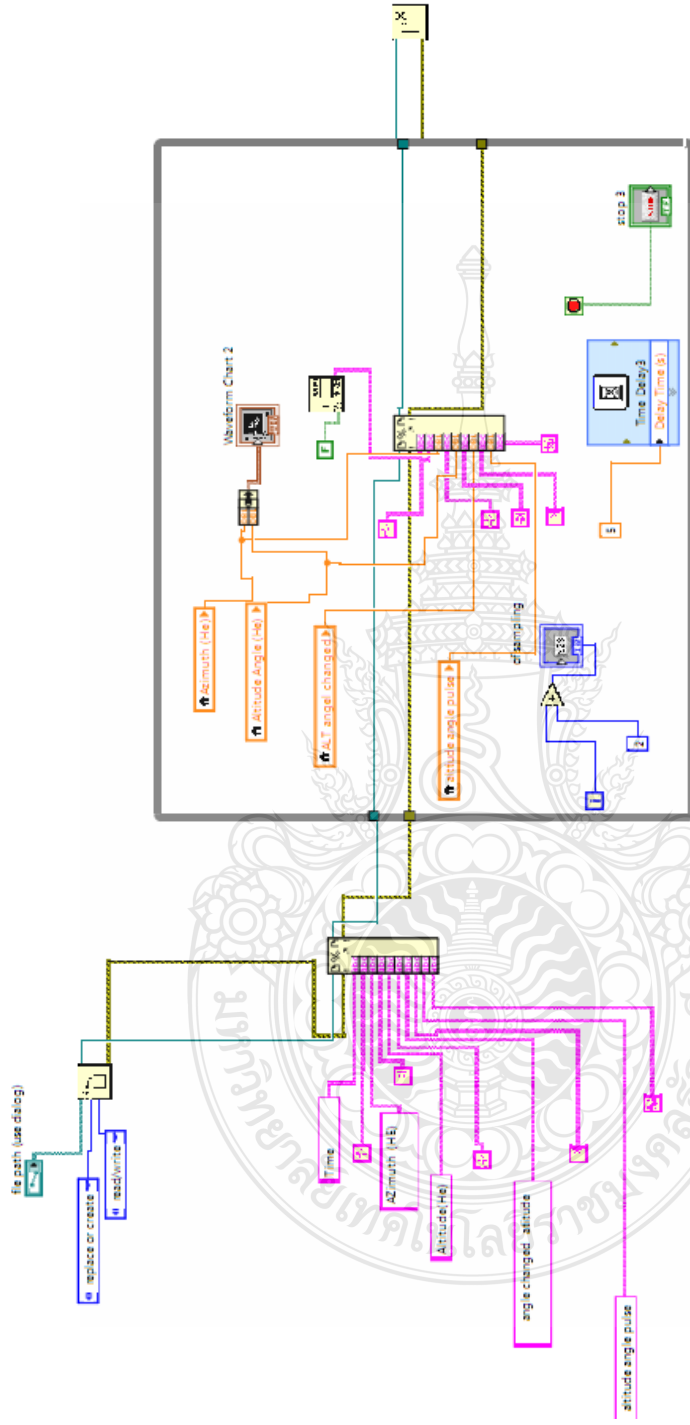


ภาคผนวก ข

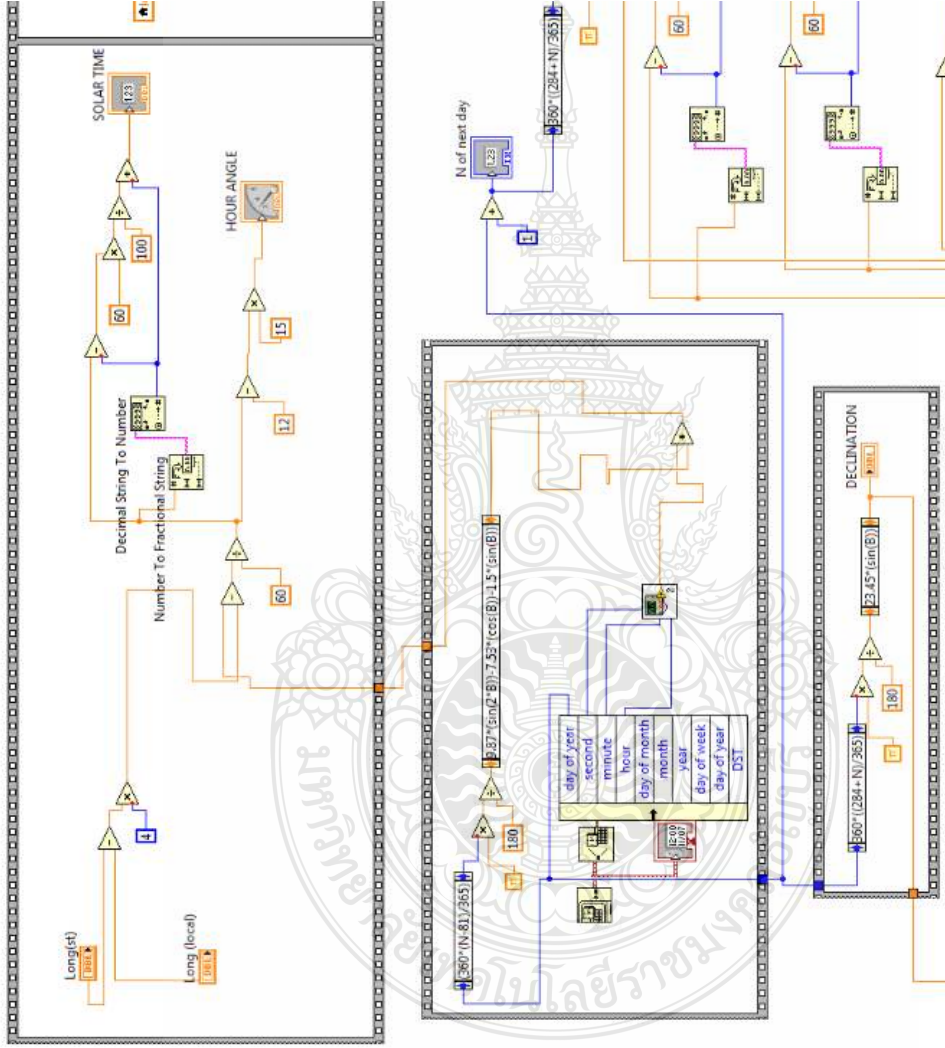
โปรแกรมที่ใช้ในการทดลอง



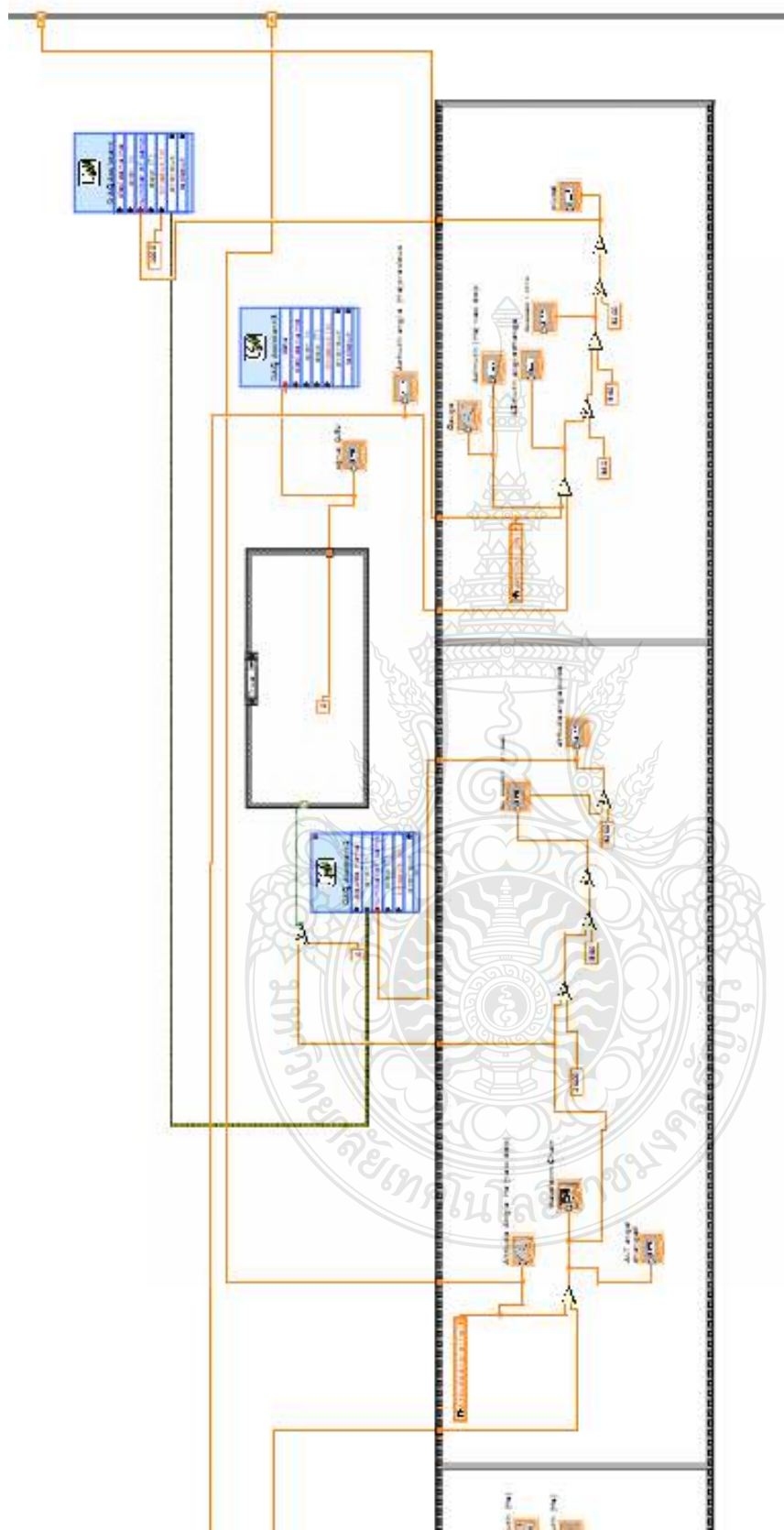
รูปที่ ข.1 Front panel ของโปรแกรม “LabVIEW” พัฒนาขึ้นเพื่อใช้ควบคุมและมอนิเตอร์  
แผงสะท้อนรังสีแสงอาทิตย์ระบบหอดูดาวรังสีรวมกลาง



รูปที่ ข.2 Block Diagram ของโปรแกรม LabVIEW พัฒนาขึ้นเพื่อเขียน data logger  
 นุม อะชิเมทและอัลติจูดของแผงสะทอนและจำนวนพัลส์ที่ส่งไปควบคุม สเต็ปป์มอเตอร์



รูปที่ ข.3 Block Diagram ของโปรแกรม LabVIEW พัฒนาขึ้นเพื่อความคุมแผงตะกอนรังสี



รูปที่ ข.4 Block Diagram ของโปรแกรม LabVIEWพัฒนาขึ้นเพื่อควบคุมแผงสะท้อนรังสี (ต่อ)



2013 International Conference  
on Alternative Energy in Developing  
Countries and Emerging Economies  
(2013 AEDCEE)

May 30-31, 2013

Pullman Bangkok King Power Hotel  
Bangkok, Thailand

Co-Organized by

- Research and Development Institute, Thaksin University, THAILAND
- Universite de Moncton, CANADA
- University of Maryland, USA
- National Research Council of Thailand (NRCT), THAILAND
- Faculty of Science, Thaksin University, THAILAND
- Research Center in Energy and Environment, Thaksin University, THAILAND



## Certificate of Presentation

This is to certify that

**Aninart Ngermplabplar**

has presented during the 2013 International Conference on Alternative Energy  
in Developing Countries and Emerging Economies  
which is held 30-31 May 2013, Bangkok, Thailand

Prof. Dr. Yves Gagnon  
Co-Organizer

Asst. Prof. Dr. Pornpun Khemakunasai  
Co-Chairman

Dr. Sarapee Chairat  
Chairman

Friday May 31, 2013 (cont.)

Parallel Technical Sessions

15:30-17:00	Alpha Room: Bioenergy - Biogas, Biogas Fuel, Hydrogen Storage and Materials Invited Speaker and Chair: Dr. Narsing Chakrabarti, MIT, USA Co-Chair: Dr. Sataoki Saito, Tokyo University, Thailand		
15:30-17:30	Invited Session: Dr. Narsing Chakrabarti "Current Status and Trend in Bioenergy Development in Thailand"		
18:15-19:30	The Effect of Alkali Metal Cation Exchange Modified on Zeolite on CO <sub>2</sub> Adsorption in Biogas	A. Bousath T. Piyawatt S. Tavee S. Nontanon P. Wongsong K. Poojira	Thailand
18:30-19:45	Co-Digestion of Seafood Cannery Wastewater with Glycerol Waste and Wastilla Artificial to Increase Biogas Production	K. Pongpang G. Srirattana W. Kharochito S. O-Thong	Thailand
19:45-20:00	Extraction of Helian-3 by Cyclotron Process	K. Serephtong R. Methakomarny S. Gopinath M.A.V. Anil	India
16:00-16:15	A Study on Performance of Direct Ethanol Fuel Cell (DEFC) by Modifying the Anode Electrode	P. Bocharanant A. Thairattanasong S. Thairattanasong	Thailand
16:15-16:30	Thermodynamic Analysis of Hydrogen Production from Methanol Reforming and Oxidation in Supercritical Water	N. Sriwatan C. Wuthithanyarat	Thailand
16:30-16:45	Single Conversion Method from Gasoline to Hydrogen Fuelled Small Engine to Proceed Electric Generator	I.W. Ariani T.G.T. Nindita I.K.A. Anitha D.N.K.P. Nigara J.W.P. Patta	Indonesia
16:45-17:00	New Synthesis Dation Particulate with Low Thermal Conductivity	S. Chonchai	Thailand
17:00-17:45	Closing Ceremony and Best Paper Awards (Alpha Room)		
15:00-17:30	Beta Room: Solar Energy and Hybrid Energy Invited Speaker and Chair: Prof. Dr. Chaiyaporn Sornthanasakuldech, MCE, Chonburi University, Thailand Co-Chair: Dr. Jaingorn Ratanak-Ong, Chonburi University, Thailand		
15:00-15:15	Electricity Generation from a Solar Parabolic Concentrate Collector via Thermoelectric Module	C. Lertthanasorn J. Jantadoladit M. Rangsiyapatt	Thailand
15:15-15:30	Experimental Investigation of the Thermal Efficiency of a Solar Heliotherm System	A. Nongplapla B. Prantakorn	Thailand
15:30-15:45	Development of the Solar Hybrid Power of Heat Engine: Parameters Affecting the Efficiency of the Engine	P. Rangsomboon S. Yongkietkietwong I. Sornthanasakuldech	Thailand
15:45-16:00	Introduction of Multi-layer Heat Exchanger from New Composite Zone of Solar Panels	V. Yagob A. Dair K. Alharazim	Arabic Malaysia
16:00-16:15	Auxiliary Hybrid System for a Solar-Gasoline Hybrid Cooking System	B. Prantakorn	Thailand
16:15-16:30	The Small Hybrid Solar and Wind for Residential House Coastal Area in Thailand	K. Klankiew	Thailand
16:30-16:45	Development of Auxiliary System Using Methodology for Alternative Fuel Cell	S. Kitmanong A. Sripakorn	Thailand
16:45-17:00	Social Acceptance of Solar Energy Applications in Household and Communities for Thailand	P. Paldarup J. Hirathub P. Wangrakai S. Thapa M. Anvesithanang V. Boonyasotin J. Khedai	Thailand
17:00-17:15	Field Measurements of Lab-Scale Bio Climate House	P. Thairattanasong J. Hirathub K. Sudaena M. Anvesithanang J. Khedai I. Waeuwak	Thailand
17:15-17:30	Air Conditioning using Waste Heat and Solar Energy with Phase Change Materials	J. Sufin B. Banath G. marakodan	India
17:30-17:45	Closing Ceremony and Best Paper Awards (Alpha Room)		



19.5	Design Modification and Optimization of Low Head Microhydro System for Electricity Generation	213
19.6	CFD Analysis on Blade's Performance of Propeller Hydro Turbine	214
19.7	The Design and Development of an Oscillating Water Turbine	215

**Session : Biohydrogen and Biofuel Cell**

20.1	Performance of Biocarbon Based Electrodes for Electrochemical Capacitor	219
20.2	Development of UBFC Biocatalyst Fuel Cell to Generate Power and Treat Industrial wastewaters	220
20.3	Application of UBFC-Biocatalyst Fuel Cell to Detox Sulfate-Sulfide Rich Wastewater	221
20.4	Efficacies of Various Inoculum Sources on Methane Production from Agro-Industrial Wastewaters	222
20.5	Ethanol and Hydrogen Production from Pineapple Peel by <i>Saccharomyces Cerevisiae</i> and <i>Enterobacter Aerogenes</i>	223
20.6	Oil Palm Wastes Hydrothermal Gasification for Hydrogen Production	224

**Session : Bioenergy - Biofuel, Biogas, Fuel, Hydrogen Storage and Materials**

21.1	The Effect of Alkali Metal Cation Exchange Modified on Zeolite on CO <sub>2</sub> Adsorption in Biogas	227
21.2	Co-Digestion of Seafood Cannery Wastewater with Glycerol Waste and <i>Woffia Arrhiza</i> to Increase Biogas Production	228
21.3	Extraction of Helium-3 by Cyclotron Process	229
21.4	A Study on Performance of Direct Ethanol Fuel cell (DEFC) by Modifying the Anode Electrode	230
21.5	Thermodynamic Analysis of Hydrogen Production from Methanol Reforming and Oxidation in Supercritical Water	231
21.6	Simple Conversion Method from Gasoline to Biogas Fueled Small Engine to Powered Electric Generator	232
21.7	New Binderless Durian Particleboard with Low Thermal Conductivity	233

**Session : Solar Energy and Applied Energy**

22.1	Electricity Generation from a Solar Parabolic Concentrator Coupled to a Thermoelectric Module	237
22.2	Experimental Investigation on the Intensity Efficiency of a Solar Heliostat System	238
22.3	Development of the Solar Liquid-Piston Stirling Engine: Parameters Affecting the Efficiency of the Engine	239
22.4	Introduction of Multi-Layer Heat Extraction from Non-Convective Zone of Solar Ponds	240
22.5	Auxiliary Heater Sizing for a Solar-Biomass Hybrid Cooling System	241

## International Scientific Committee

1. Prof. Dr. Yves Gagnon, Canada
2. Prof. Dr. Jianzhong Xu, China
3. Prof. Dr. Masatoshi Nakamura, Japan
4. Prof. Dr. Eicker Ursula, Germany
5. Prof. Dr. Joachim Peinke, Germany
6. Prof. Dr. Lazzarin Renato, Italy
7. Prof. Dr. A. Jagadeesh, India
8. Prof. Dr. Christos Pagageorgiou, Greece
9. Prof. Dr. Liqiu Wang, Hong Kong
10. Prof. Dr. Kim Hyung-Tack, Korea
11. Prof. Dr. Z. Sibel Ozdogan, Turkey
12. Prof. Dr. Somsak Panyakaew, Thailand
13. Prof. Dr. Surapong Jirattananon, Thailand
14. Prof. Dr. Somchart Soponronnarit, Thailand
15. Prof. Dr. Samroeng Jakjai, Thailand
16. Prof. Dr. Tanongkiat Kiatsiriroj, Thailand
17. Prof. Dr. Joseph Khedari, France
18. Prof. Dr. Jongjit Hirulabh, Thailand
19. Assoc. Prof. Dr. Bundit Fungthammasan, Thailand
20. Assoc. Prof. Dr. Wattanpong Rakwichian, Thailand
21. Assoc. Prof. Dr. Vladimir Ignatievich Kuprianov, Thailand
22. Assoc. Prof. Dr. Suppachart Chungpaiboonpatana, Thailand
23. Assoc. Prof. Bundit Limmechokchai, Thailand
24. Assoc. Prof. Dr. Serm Janjai, Thailand
25. Assoc. Prof. Dr. Sirichai Thepa, Thailand
26. Assoc. Prof. Dr. Pichai Namprakai, Thailand
27. Assoc. Prof. Dr. Rattanachai Pairin, Thailand
28. Assoc. Prof. Dr. Peerapong Teekasakul, Thailand
29. Assoc. Prof. Gampol Prateepchaikul, Thailand
30. Assoc. Prof. Dr. K. S. Ong, Malaysia

## Local Scientific Committee

1. Assoc. Prof. Dr. Sumate Chaiprapat, PSU
2. Asst. Prof. Dr. Sate Sampattakul, CMU
3. Asst. Prof. Dr. Chuleerat Kongruang, WU
4. Asst. Prof. Dr. Tika Bunnag, RMUTR
5. Asst. Prof. Dr. Naris Pratinthong, KMUTT
6. Asst. Prof. Dr. Nirundorn Matan, WU
7. Asst. Prof. Dr. Charongpun Musikavong, PSU
8. Asst. Prof. Dr. Sirinuch Chindaruk, NU
9. Asst. Prof. Dr. Somchai Manteewan, NU
10. Asst. Prof. Dr. Charoemporn Lertsatitthasakorn, MSU
11. Asst. Prof. Dr. Nattapol Poomsa-ud, MSU
12. Asst. Prof. Marina Mami, TSU
13. Asst. Prof. Dr. Prasong Kessaratikul, TSU
14. Asst. Prof. Dr. Thawatchai Tepnuat, TSU
15. Asst. Prof. Dr. Usa Onthong, TSU
16. Asst. Prof. Dr. Kornvika Kongkul, TSU
17. Asst. Prof. Dr. Jompob Waesak, TSU
18. Asst. Prof. Dr. Kanokphorn Sangcharak, TSU
19. Asst. Prof. Dr. Warangkham Keerativibool, TSU
20. Dr. Chontisa Sukkasem, TSU
21. Dr. Asadhawut Hirunrat, TSU
22. Dr. Wariam Chuayjan, TSU
23. Dr. Jitupom Kaew-On, TSU
24. Dr. Chontira Sangsubun, TSU
25. Dr. Tanate Chaichana, TSU
26. Dr. Panita Sumanatrakul, TSU
27. Dr. Pisit Manteechot, NU
28. Dr. Montana Rungsewipas, BUU
29. Dr. Warit Jarujit, WU
30. Dr. Warit Weerapan, PSU
31. Dr. Witsa Khongnakorn, PSU
32. Dr. Kaokanya Sudprasert, KMUTT
33. Dr. Panita Chirvetkivameh, KMUTT
34. Dr. Wihaya Puangsombut, RMUTR
35. Dr. Sarocha Charoenvai, RMUTT
36. Dr. Pakorn Dittakit, WU

# Experimental Investigation on the Intensity Efficiency of a Solar Heliostat System

A. Ngernplabpla\*, and B. Prasartkaew

Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Thunyaburi, Klong 6, Thunyaburi, Patumthani 12110 (Thailand)

## ABSTRACT

Nowadays, about four-fifth of the world's energy usage is derived from the burning/combustion of fossil fuels as primary energy. Therefore, it can be said that the facing environmental pollution, especially the global warming, has attributed to the use of fossil fuels. One of the best ways to address or mitigate this serious problem is replacing the fossil fuel based systems with the renewable energy based systems. As it is the biggest energy resource of the earth, the utilization of solar energy is, therefore, feasible and sustainable. A solar-power-tower or a central receiver solar collector is a high temperature solar thermal application which can be developed for a high capacity power plant suitable for the tropical countries as Thailand. This paper presents the experimental results of the performance test of a 1-m<sup>2</sup> solar heliostat equipped with the 7.46-m-height tower. The performance index, called intensity efficiency, was defined and evaluated. Two configurations of mirror arrangement, flat and concentrated heliostat system were tested. The experimental results show that, in February at the latitude of 14.03°N, the intensity efficiency of the fabricated solar heliostat is about 0.7.

**Keywords:** Solar energy; Solar power tower; Heliostat; Central receiver; Solar thermal.

## INTRODUCTION

Environmental pollution and energy crisis are the most serious problems for all lives on our earth and they are relates to each other. To address these issues, using renewable energies appear as an interesting alternative measure. Among all renewable resources, solar energy is the biggest source and can be utilized longer than 5,000 years [1]. Every hour, enough sunlight energy reaches the Earth to meet the world's energy demand for a whole year [2]. To reduce the electricity consumption and CO<sub>2</sub> emissions, solar energy can be possibly opted as the best way of above problems mitigation [3,4].

One of the most promising systems of solar thermal power generation is the solar power tower system, of sometime called a central receiver solar collector. It consists of a field of heliostat using continuous control for reflecting the incident radiation of the sun to a receiver to heat the working fluid inside. This hot fluid, can be high temperature hot oil, can either be used

directly for heat process or employed to drive a heat engine for power generation.

The key component of a solar power tower system is the heliostat field [5]. As it is a complicate and require many knowhow, the researches of solar power tower and heliostat field or even mono-heliostat have not extensively studied in Thailand where the solar energy potential (in thermal form of energy) is quite high due to it is in the tropical region [6]. This research aims at develop the solar power tower which fabricated using all materials locally available in Thailand and investigate its performance.

To analyze the heliostat performance, the intensity efficiency was defined and experimentally testes. This paper presents the experimental study results of a fabricated mono-heliostat equipped with the screen installed on the tower at high level. First, the system description is presented in Section *A*. Section *B* presents the calculation of sun position and heliostat direction. Experimental study and data acquisition are demonstrated in Section *C*. Sections *D* and *E* presents the calculation of projection area of reflected radiation and calculation of heliostat efficiency, respectively. Section *F* shows the study results and discussion. Finally, the conclusions are given in the last section of paper.

## A. System description

The experimental system of the heliostat was setup at Rajamangala University of Technology Thunyaburi (RMUTT), latitude of 14.03°N. This system comprises of three main parts, a flat type heliostat reflector (was covered or shaded to generate for four corner spots on the screen), a receiver screen (installed on the tower) and a heliostat controller (using LabVIEW software) as shown in Fig. 1 to 3, respectively

### Heliostat

A concentrated multi-mirror type heliostat with the effective area of 3.10x3.60 m<sup>2</sup> was used for this study. It height (when the reflector is in the horizontal position) is 2.1 m. A central mirror (1 m<sup>2</sup> size) was only used for this study. It was covered using black plastic sheet with 10x10 cm<sup>2</sup> square hole at the corner. Then four spots of light were generated on the screen as shown in Fig. 1. This heliostat was located at latitude of 14.03N and longitude of 100.72E.

### Receiver screen

A 2.4x2.4 m<sup>2</sup> blue screen target was installed on the tower at 9.55 m from ground level to the center of the

\*Corresponding Author: ngernplabpla@gmail.com

screen with the depression angle of 8 degree. This screen was scaled for observe the positions of the incident radiation as shown in Fig. 2.



Fig. 1. Photo of prototype heliostat.



Fig. 2. Photo of a receiver screen.

**Heliostat controller**

As a function of reflecting or redirecting the solar radiation to the required target, the heliostat has to be moved continuously through the day. It position must relates to the sun and target positions otherwise the reflected beam radiation will miss the target. This relation was theoretically calculated (any time through a year) and programed using LabVIEW computer software equipped with two stepping motors. The first stepping motor is used for altitude angle driving while another one is used for azimuth angle driving. These motors are controlled by programed controller via NI-DAQ card (model NI 6229 BNC). The photo of controller and driving mechanism is shown in Fig. 3.

Figure 4 shows the plan of the site location measured by using GPS tablet. This data was used at the input parameters for controller program.

**B. Calculation of sun position and heliostat direction**

The sun position and heliostat direction was calculated using the derived formulas. The important parameters, e.g.: altitude angle ( $\alpha_s$ ), Declination ( $\delta$ ), hour angle ( $\omega$ ), altitude ( $\phi$ ), normal vector of heliostat in x,y,z axis

( $n_x, n_y, n_z$ ), were defined and calculated as the following equations.

- Local latitude = 14.03 N
- Standard latitude = 14.07 N
- Standard longitude = 105 E
- Local longitude = 100.72 E



Fig. 3. Photo of controller and driving mechanism.

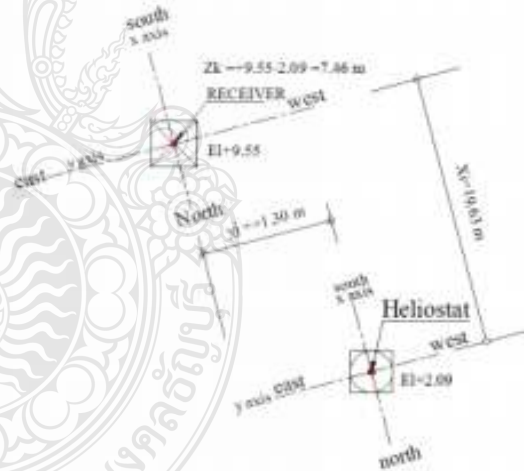


Fig. 4. plan of the site location measured by using GPS.

$$\sin \alpha_s = \cos \phi \cos \delta \cos \omega + \sin \phi \sin \delta \tag{1}$$

$$\gamma_s = c_1 c_2 \gamma'_s + c_3 (1 - c_1 c_2) (180) / 2 \tag{2}$$

$$\gamma'_s = \sin^{-1} \left( \frac{\cos \delta \sin \omega}{\cos \alpha_s} \right) \tag{3}$$

$$\alpha_h = \sin^{-1}(n_z) \quad (4)$$

$$\gamma_h = \sin^{-1}\left(\frac{n_y}{\sqrt{n_x^2 + n_y^2}}\right) \quad (5)$$

The incident and reflected solar radiation can be represented by the normal vectors as shown in Fig. 5.

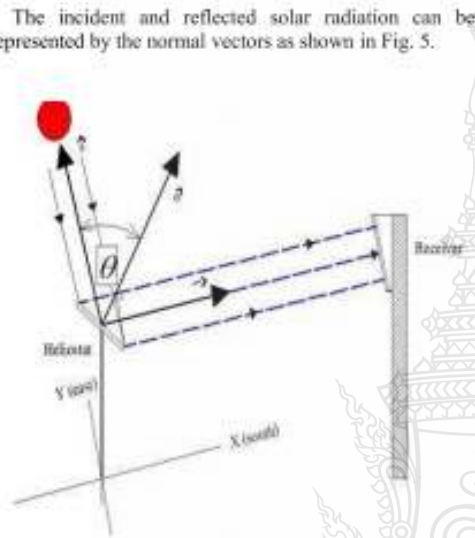


Fig. 5. Incident and reflected solar radiation.

C. Experimental study and data acquisition

The heliostat was tested for five days with clear sky condition in February 2013. The test and data recording started from 10am to 4pm. The data was recorded every half an hour using scale reading (on screen) and photo snap shot.

D. Calculation of projection area of reflected radiation

As the reflection efficiency of the heliostat can be evaluated by the ratio of input incident radiation (on the heliostat) to the useful reflected radiation incident on the receiver. As the assumption that the beam radiation incident on the heliostat is equal to the beam radiation reflected from heliostat, if the area of heliostat (aperture area) is equal to the incidental area on the receiver (projection area), the intensity efficiency is 100%. The bigger projection area, the lesser intensity efficiency is obtained.

The projection area on the screen (area 1-2-3-4 or A9) was determined by the total screen area minus A1 to A8 as shown in Fig. 6.

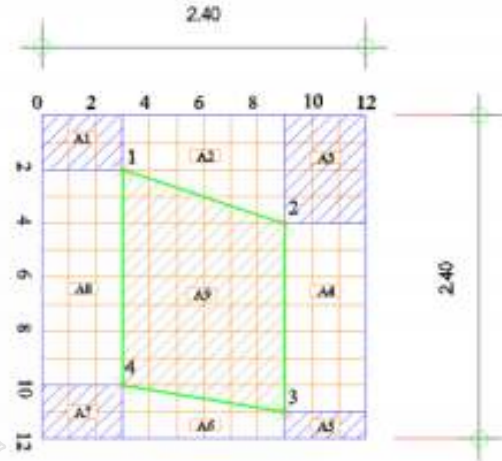


Fig. 6. Calculation of projection area on the screen

E. Calculation of heliostat efficiency

As mentioned above that if incidental area of input equal to of output then the useful output energy should be the same as demonstrated in Eq. (7) and (8).

$$A_1 = A_2 \quad (7)$$

$$x_1 = x_2 \quad (8)$$

where,  $A_1$  = heliostat effective area ( $m^2$ )

$A_2$  = projection area ( $m^2$ )

$x_1$  = input solar energy (W)

$x_2$  = useful output energy (W)

Actually, the solar power tower is operated with a field of heliostat array. The position between each heliostat and receiver is different, then the projection area will not equal to reflector area ( $A_1 \neq A_2$ ). As assumption that the input radiation energy is equal to the reflected energy, the intensity efficiency of the heliostat can be simply assessed by:

$$Eff = \frac{x_2/A_2}{x_1/A_1} = \frac{A_1}{A_2} \quad (10)$$

F. Results and discussion

Figure 7 shows the study results of three experimental days (23 to 25 February 2013). The results show that, among these three experimental days, the intensity efficiency of this heliostat is similar with the average efficiency of 0.6. The altitude and azimuth angles of operated heliostat are varied in the range of 31-36 and 27-30 degree, respectively. It should be suggested that, for

more reliable of the test, this test should be conducted through a year.

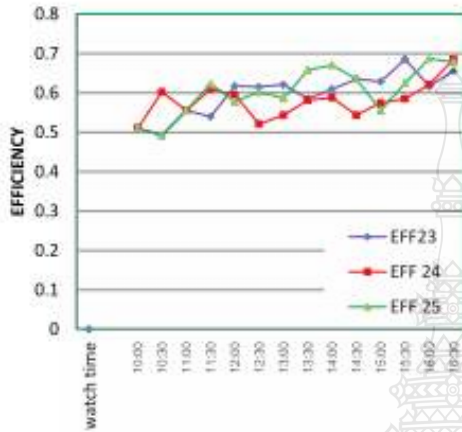


Fig. 7. Efficiency of example experimental days.

Figure 8 shows the measured altitude angle, azimuth angle and average intensity efficiency of heliostat. The data shows that the depression and elevation angles are quite symmetry varied in the range of 30–49 degree. The efficiency increased proportion to time and about 50% is obtained at around 10am. The maximum efficiency about 70% was obtained at around 4pm.

CONCLUSION

A prototype mono-heliostat was fabricated using local material which is available in the market, e.g.: mirror, structure, and driving system, etc. The experimental study was conducted to investigate the performance of this prototype heliostat. The study results demonstrated that, during the test, declination of 10 degree (in February), the intensity efficiency of this heliostat varied in the range of 50 to 70%.

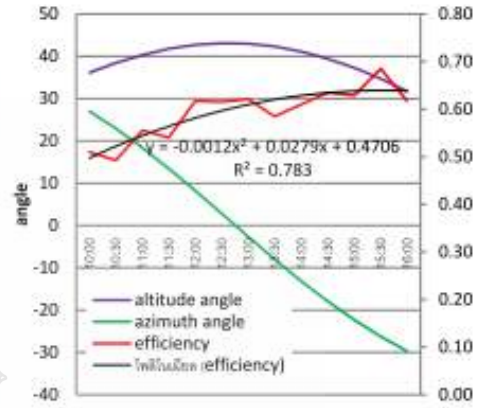


Fig. 8. measured altitude angle, azimuth angle and average intensity efficiency of heliostat.

ACKNOWLEDGMENT

The author wishes to thank Rajamangala University of Technology Thunyaburi (RMUTT) for providing financial support for this research.

REFERENCES

- [1] "Spherical Coordinate." [online]. Available: <http://www.math.montana.edu/frank/cp/multiworld/multiworld/spherical/learn.htm>, [Retrieved Feb 28,2012]
- [2] Hongli zhang,Zhaifeng Wang,minghuanguo,Wenfeng liang "Cosine efficiency distribution of heliostat filed of solar thermal power tower plants" institute of electrical engineering,Chinese academy of sciences.
- [3] B. Prasartkaew, S. Kumar, *A low carbon cooling system using renewable energy resources and technologies*, Energy and Buildings 42 (2010), pp. 1453–1462.
- [4] B. Prasartkaew, S. Kumar, *Experimental Study on the Performance of a Solar-Biomass Hybrid Air-Conditioning System*, Renewable Energy 57 (2013), pp. 86–93.
- [5] JOHN A. DUFFIE, WILLIAM A. BECKMAN, Professor of Mechanical Engineering Solar Energy Laboratory University of Wisconsin – Madison "SOLAR ENGINEERING OF THERMAL PROCESSES", Second Edition.
- [6] "the sun , s position." [online]. Available : [www.powerfromthesun.net](http://www.powerfromthesun.net), [Retrieved Feb 28,2012]



**Title:** Investigation on the Performance of a Paraboloids Heliostat for Concentrated Central Receiver Solar Collector

**Authors:** Boonrit Prasartkaew  
Annaj Ngemplabpla

**PAPER DEADLINE:**

**PAPER LENGTH:** 6 pages

**SEND PAPER TO:** Asst.Prof. Dr.Boonrit Prasartkaew  
Department of Mechanical Engineering  
Rajamangala University of Technology Thunyaburi  
Patumthani, 12110  
THAILAND

Tel: +662 549 3430, +668 8211 1484

Fax: +662 549 3432

E-mail: prasartkaew@yahoo.com





## ABSTRACT

As the main difference between the paraboloids concentrator and the central receiver solar collector is the position of their receiver. The receiver of the paraboloids concentrator must be fixed and moved together with the concentrator, therefore its capacity then be limited by weight. On the other hand, the receiver of the central receiver solar collector can be located on the ground; therefore its weight and capacity are not limited. The conventional central receiver solar collector system usually equipped with many flat heliostats and therefore, the concentration ratio depends on the number of heliostats used. To increase the radiance intensity and to reduce the heliostat number, this research aims at developing the paraboloids heliostat for the solar power tower, which fabricated using local materials, and to investigate its performance. This paper presents the experimental results of a paraboloids heliostat performance test. The experimental data demonstrate that, with the heliostat aperture area of  $10 \text{ m}^2$ , daily average projection area about  $1.5 \text{ m}^2$  and concentration ratio about 10 were obtained. The better performance occurs during solar noon period.

*Keywords:* Solar energy; Paraboloids heliostat; Central receiver solar collector.

## INTRODUCTION

As the perceived rapid advances in technology to improved comfortable living and abundant use of energy, cause two major serious problems to any life on the earth. One is fast depletion of fossil fuel resources (or energy crisis problem); the other is environmental pollution ( $\text{O}_2$  is more consumed; whilst  $\text{CO}_2$  and other toxic gases is more generated), especially global warming problem. To simultaneously mitigate these big problems, renewable energy utilizations should be encouraged [1].

Solar energy is the biggest energy source and fruitful for tropical area region. One of the most promising systems of solar thermal power generation is the solar power tower system, of sometime called a central receiver solar collector. It consists of a field of heliostat using continuous control for reflecting the incident radiation of the sun to a

---

Boonrit Prasankaew and Annaj Ngernplabpla, Combustion and Solar Energy Research Laboratory (CASE Lab.), Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Thunyaburi, Klong 6, Thunyaburi, Pathumthani 12110, THAILAND

receiver to heat the working fluid inside. This hot fluid, can be high temperature hot oil, can either be used directly for heat process or employed to drive heat engine for power generation. The key component of a solar power tower system is the heliostat field. As it is a complicate and require many knowhow, the researches of solar power tower and heliostat field or even mono-heliostat have not extensively studied in Thailand where the solar energy potential (in thermal form of energy) is quite high due to it is in the tropical region.

Generally, solar concentrators can be arranged into three types: (1) planar and non-concentrating type which provides concentration ratios (CR) of up to four and are of the flat plate type, (2) line focusing type produces a high density of radiation on a line at the focus (e.g.: cylindrical parabolic concentrators) which could produce concentration ratios of up to ten and (3) point focusing type generally produces much higher density of radiation in the vicinity of a point (e.g.: paraboloids concentrator and central receiver solar collector). The difference between the paraboloids concentrator and central receiver solar collector is the receiver position, where the receiver of the former type must be fixed and moved together with the concentrator whilst the receiver of the later type can be fixed on the ground. The central receiver solar collector system usually equipped with many flat heliostats and therefore, the concentration ratio depends on the number of heliostats used. This research aims at developing the paraboloids heliostat for the solar power tower which fabricated using all materials locally available in Thailand and investigate its performance. This paper presents the experimental results of a paraboloids heliostat performance test.

## SYSTEM DESCRIPTION

The experimental system of the heliostat was setup at Rajamangala University of Technology Thunyaburi (RMUTT), latitude of 14.03°N. This system comprises of three main parts, a paraboloids or focused heliostat reflector, a receiver screen (installed on the tower) and a heliostat controller (using LabVIEW software) as shown in Figure 1 to 3, respectively

### Paraboloids Heliostat

A paraboloids or concentrated using multi-mirror type heliostat with the effective area of 10 m<sup>2</sup> was used for this study. It height (when the reflector is in the horizontal position) is 2.1 m. as shown in Fig. 1. This heliostat was located at latitude of 14.03N and longitude of 100.72E.

In this study, the following terminology is used:

- |                      |   |
|----------------------|---|
| Aperture:            | This refers to the opening in the concentrator through which the solar radiation enters the concentrator. |
| Collector:           | This refers to the total system including the receiver and the concentrator.                              |
| Concentration ratio: | It is the ratio of the collector aperture area to the projection area.                                    |



Figure 1. Photo of a paraboloids heliostat used in this study.

### Receiver Screen

A  $2.4 \times 2.4 \text{ m}^2$  blue screen target was installed on the 18.5-m tower at 9.55 m from ground level to the center of the screen with the depression angle of 8 degree. This screen was scaled for observe the positions of the incident radiation as shown in Figure 2.



Figure 2. Photo of a receiver screen used in this study.

### Heliostat Controller

As a function of reflecting or redirecting the solar radiation to the required target, the heliostat has to be moved continuously through the day. Its position must relate to the sun and target positions otherwise the reflected beam radiation will miss the target. This relation was theoretically calculated (any time through a year) and programmed using Lab-VIEW computer software equipped with two stepping motors. The first stepping motor is used for altitude angle driving while another one is used for azimuth angle driving. These motors are controlled by programmed controller via NI-DAQ card

(model NI 6229 BNC). The photo of controller and driving mechanism is shown in Figure 3.



Figure 3. Photo of micro-controller and driving mechanism.

### CALCULATION OF SUN POSITION AND HELIOSTAT DIRECTION

The sun position and heliostat direction was calculated using the derived formulas. The important parameters, e.g.: altitude angle ( $\alpha_s$ ), Declination ( $\delta$ ), hour angle ( $\omega$ ), altitude ( $\phi$ ), normal vector of heliostat in x,y,z axis ( $n_x, n_y, n_z$ ), were defined and calculated as the following equations.

$$\sin \alpha_s = \cos \phi \cos \delta \cos \omega + \sin \phi \sin \delta \quad (1)$$

$$\gamma_s = e_1 e_2 \gamma'_s + e_2 (1 - e_1 e_2) (180) / 2 \quad (2)$$

$$\gamma'_s = \sin^{-1} \left( \frac{\cos \delta \sin \omega}{\cos \alpha_s} \right) \quad (3)$$

$$\alpha_s = \sin^{-1} (n_z) \quad (4)$$

$$\gamma_s = \sin^{-1} \left( \frac{n_y}{\sqrt{n_x^2 + n_y^2}} \right) \quad (5)$$

where, Local latitude = 14.03N, Standard latitude = 14.07N, Standard longitude = 105E and Local longitude = 100.72E. The incident and reflected solar radiation can be represented by the normal vectors as shown in Figure 4.

## EXPERIMENTAL STUDY AND DATA ACQUISITION

The heliostat was tested for five days with clear sky condition in June 2013. The test and data recording started from 10am to 4pm. The data was recorded (using snapshot camera) every half an hour using scale reading (on screen) and photo snap shot.

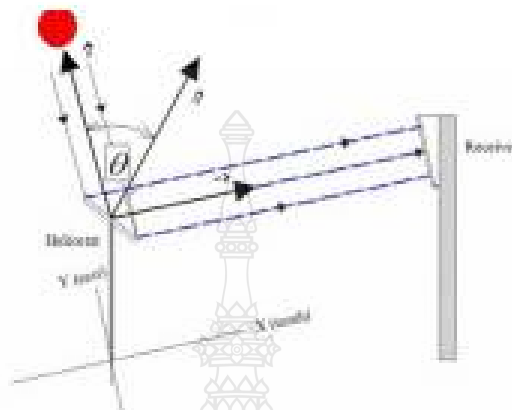


Figure 4. Incident and reflected solar radiation.

## DETERMINATION OF THE CONCENTRATION RATIO

As the reflection efficiency of the heliostat can be evaluated by the concentration ratio which relates to input incident radiation (on the heliostat) and the useful reflected radiation incident on the receiver (screen). The projection area on the screen was determined using the shot photo. The projection area of each photo was determined via Auto-CAD software. The concentration ratio (CR) can be calculated as:

$$CR = A_C / A_P \quad (5)$$

where,  $A_C$  is collector aperture area and  $A_P$  is projection area on receiver screen

## STUDY RESULTS

As The experimental data was collected for 3 days in June 2013 as the results shown in Figure 5. The results show that the concentration ratio obtains from this paraboloids heliostat is slightly varied through the experimental day where the better performance occur during solar noon period. The results show that the average projection area about 1.5 m<sup>2</sup> and concentration ratio about 10 was obtained.

## CONCLUSION

The paraboloids heliostat for the solar power tower was designed and fabricated using local materials available in Thailand. Its performance investigation was carried out. With this proposed paraboloids heliostat, the daily average projection area about

1.5 m<sup>2</sup> and concentration ratio about 10 were obtained. The better performance occurs during solar noon period.

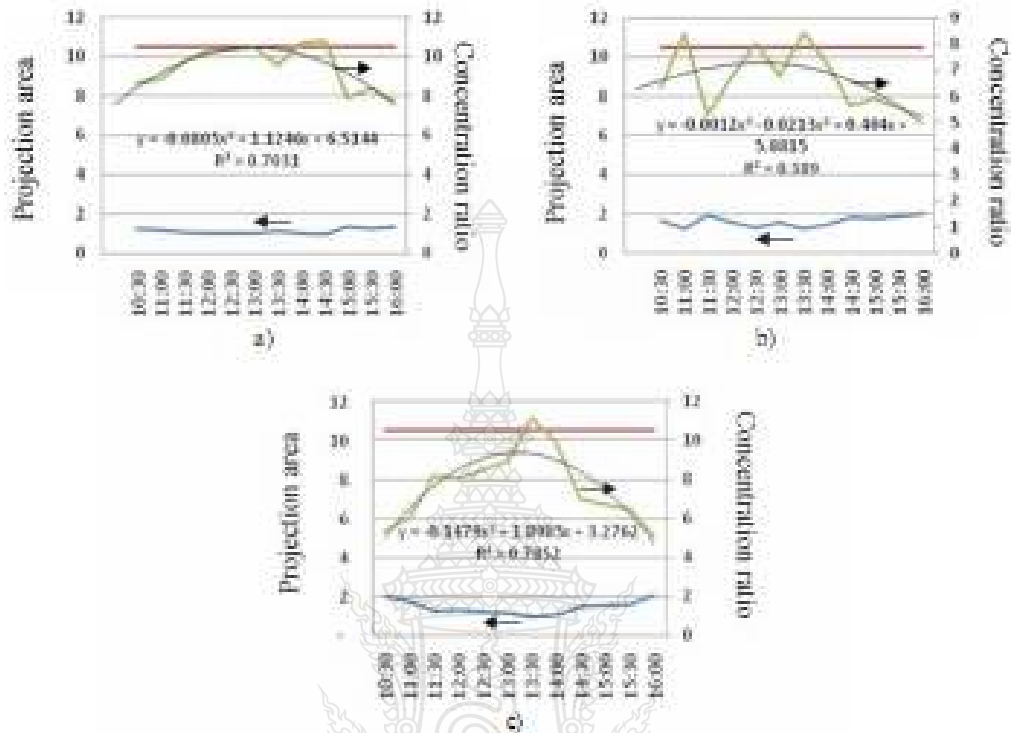


Figure 5. Experimental results a) the first, b) the second day and c) the third day.

## ACKNOWLEDGEMENT

The authors wish to thank Rajamangala University of Technology Thunyaburi (RMUTT) for providing financial support for their research.

## REFERENCES

1. B. Prasartkaew and S. Kumar (2013), Experimental Study on the Performance of a Solar-Biomass Hybrid Air-Conditioning System. *Renewable Energy*, Volume 57, pp. 86-93.
2. B. Prasartkaew, S. Kumar, A low carbon cooling system using renewable energy resources and technologies, *Energy and Buildings*, 42 (2010), pp. 1453-1462.
3. M. Wang, L. Wenfeng, "Cosine efficiency distribution of heliostat filed of solar thermal power tower plants" institute of electrical engineering, Chinese academy of sciences.
4. John A. Duffie, William A. Beckman, Solar Energy Laboratory University of Wisconsin – Madison "Solar Engineering of Thermal Processes". Second Edition.

## 2013 International Conference on Frontiers of Environment, Energy and Bioscience

---

Beijing, China

October 24-25, 2013

### The Presentation Certification of ICFEEB 2013

Dear Boonrit Prasartkaew,

Paper ID	FE1181
Paper Title	Investigation on the Performance of a Paraboloids Heliostat for Concentrated Central Receiver Solar Collector

**Congratulations!** The oral presentation of your paper for the 2013 International Conference on Frontiers of Environment, Energy and Bioscience (ICFEEB 2013) has been completed. We would like to further extend our sincere thanks to you and we are looking forward to meeting you next time.

Yours sincerely,

ICFEEB 2013 Organizing Committees

International Research Association of Information and Computer Science

Beijing, China

## 2013 International Conference on Frontiers of Environment, Energy and Bioscience

### The Acceptance Notification and Invitation Letter of ICFEEB 2013

Dear Boonrit Prasartkaew, Amnaj Ngermplabpla,

Paper ID	FE1181
Paper Title	Investigation on the Performance of a Paraboloids Heliostat for Concentrated Central Receiver Solar Collector

**Congratulations!** The review processes for the 2013 International Conference on Frontiers of Environment, Energy and Bioscience (ICFEEB 2013) has been completed. Based on the recommendations of the reviewers and the Technical Program Committees, we are pleased to inform you that your paper identified above has been accepted for publication and oral presentation. You are cordially invited to present the paper orally at ICFEEB 2013 to be held on October 24-25, 2013, Beijing, China. If you have any problem in preparing the final paper, please feel free to contact us.

Finally, we would like to further extend our congratulations to you and we are looking forward to meeting you in Beijing, China.

Yours sincerely,

ICFEEB 2013 Organizing Committees

<http://www.icfeeb.org>

Beijing, China



## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ – สกุล	นายอำนาจ เงินปลับปลา
วัน เดือน ปีเกิด	14 กันยายน 2506
ที่อยู่	15/2 หมู่ 3 ถนน ปทุมธานี-ลาดหลุมแก้ว ต.ลาดหลุมแก้ว อ.ลาดหลุมแก้ว จังหวัด ปทุมธานี 12140
การศึกษา	
พ.ศ. 2527	สำเร็จการศึกษาประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูง (ปวส.) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรีเทคนิคกรุงเทพ
พ.ศ. 2531	สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี (วศ.บ.) สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล สถาบันเทคโนโลยีราชมงคลวิทยาเขตเทเวศร์
ประสบการณ์การทำงาน	
พ.ศ. 2531-2532	ตำแหน่งวิศวกรเครื่องกลประจำหน่วยงาน โครงการ BIA 4 บริษัท อิตาเลียนไทย จำกัด
พ.ศ. 2532-2534	วิศวกรเครื่องกล บริษัทชินทัย จำกัด
พ.ศ. 2535-2538	วิศวกรเครื่องกล ควบคุมงานติดตั้งระบบประกอบอาคารและ งานด้านการบำรุงรักษา บริษัท ไทยเคนเมทอินแดนซ์เอนด์เซอร์วิส จำกัด
พ.ศ. 2538-2542	ผู้จัดการงานติดตั้งระบบประกอบอาคาร , ระบบสุขาภิบาล , ระบบ ปรับอากาศ , ระบบป้องกันอัคคีภัย บริษัท บิลด์เมค จำกัด
พ.ศ. 2543-ปัจจุบัน	ตำแหน่งผู้จัดการงานพัฒนาพื้นที่ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ
อีเมล	ngernplabplar@gmail.com