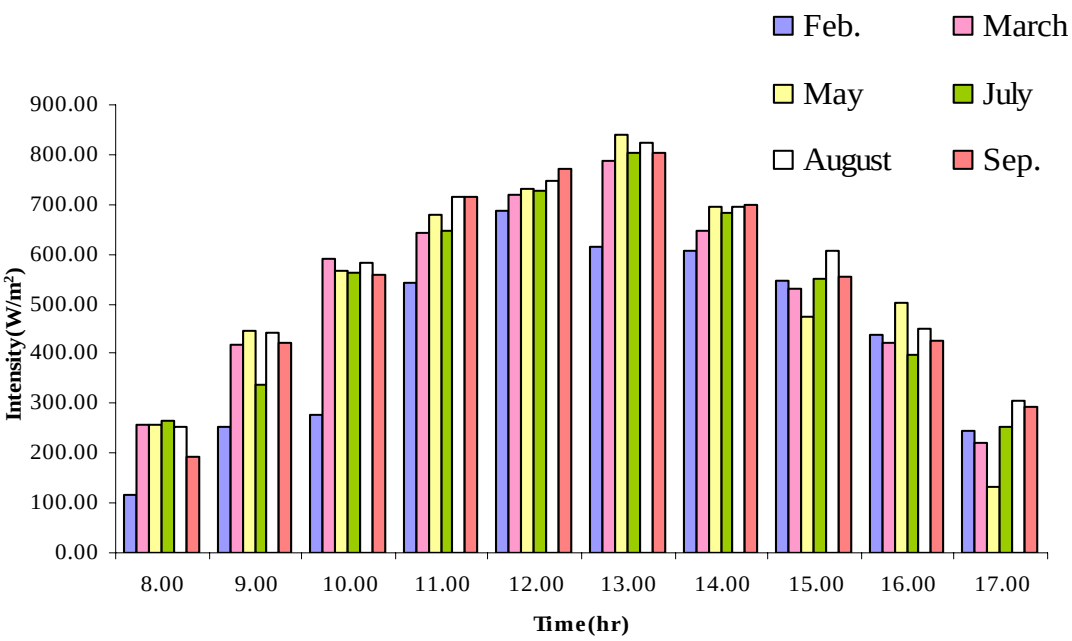
ภาคผนวก ก

ค่าความเข้มแสง



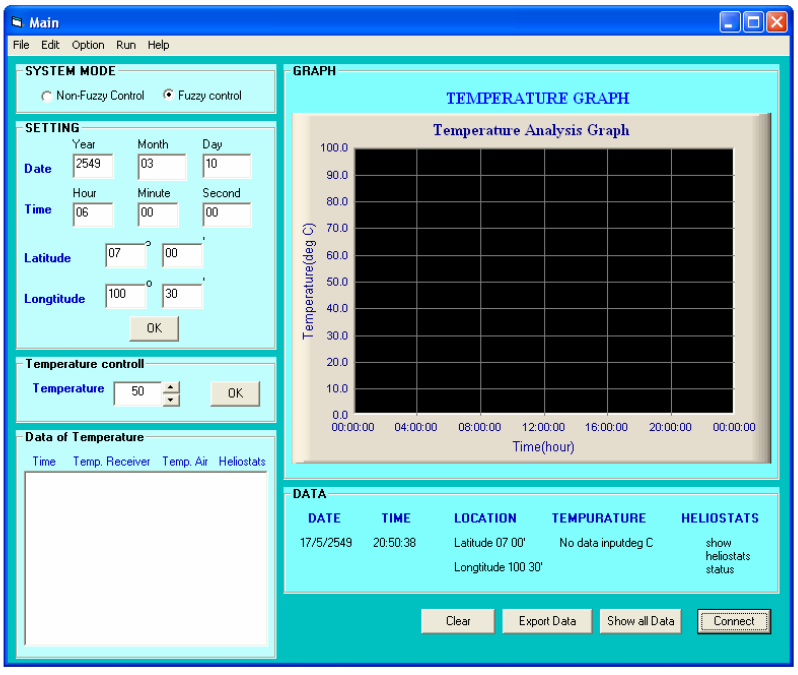
ภาพประกอบ ก-1 แสดงค่าความสัมพันธ์ของความเข้มแสงและเวลาที่พิกัด ลองจิจูด 100° 29′ E° ละติจูด 7°00′ N°

ภาคผนวก ข

การทำงานของเครื่องมือ

การทำงานของระบบหอคอยสุริยะที่ได้ออกแบบในงานวิจัยนี้ ใช้การควบคุมด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC18F458 และพัฒนาโปรแกรมการรับค่า เก็บข้อมูลและแสดงผลบนคอมพิวเตอร์ โดยใช้ Microsoft Visual Basic 6.0 ในการพัฒนาโปรแกรม ผู้พัฒนาโปรแกรมได้ทำการตั้งชื่อโปรแกรมที่เขียนขึ้นมาว่า Thermosolar 1.1 ดังแสดงในภาพประกอบ ก-1 ซึ่งโปรแกรมจะทำการติดต่อกับไมโครคอนโทรลเลอร์ผ่านทางการสื่อสารแบบอนุกรม RS232 ดังนั้นเมื่อจะใช้งานโปรแกรมจึงต้องต่อคอมพิวเตอร์ให้สามารถติดต่อกับไมโครคอนโทรลเลอร์ได้ โดยโปรแกรมที่เขียนขึ้นมีคุณสมบัติ ดังนี้

1. สามารถเลือกการทำงานได้ 2 แบบ คือ การทำงานแบบไม่ควบคุมอุณหภูมิบนตัวรวมรังสี และการทำงานโดยควบคุมอุณหภูมิบนตัวรวมรังสีอาทิตย์ด้วยฟัซซี่ลอจิก
2. แสดงกราฟความสัมพันธ์ของอุณหภูมิบนตัวรวมรังสี และอุณหภูมิอากาศ พร้อมทั้งแสดงสถานะการทำงานของระบบกระจกรับรังสีอาทิตย์
3. บันทึกอุณหภูมิที่อ่านได้ลงในฐานข้อมูล
4. สามารถ Export ข้อมูลอุณหภูมิไปยังโปรแกรม Microsoft Excel



ภาพประกอบ ข-1 แสดงโปรแกรมการทำงานที่ใช้ในการรับค่าและแสดงผลบนคอมพิวเตอร์

ขั้นตอนในการใช้งานของโปรแกรมควบคุมมีดังนี้

เมื่อทำการติดตั้ง โปรแกรม Thermsolar 1.1 เรียบร้อยแล้ว สามารถเปิดโปรแกรมขึ้นมาใช้งานได้ทันที โดยเริ่มกำหนดค่าข้อมูลดังต่อไปนี้

1. เลือกระบบการทำงานใน System mode ถ้าต้องการให้ระบบทำงานแบบไม่ควบคุมอุณหภูมิให้เลือกโหมด Non-Fuzzy control หรือถ้าต้องการให้ระบบทำงานแบบควบคุมอุณหภูมิให้เลือกโหมด Fuzzy control
2. กำหนดค่า วันที่ เวลา มุมละติจูด ลองจิจูด ใน Setting
3. ถ้าเลือกระบบการทำงานแบบ Fuzzy control ต้องกำหนดอุณหภูมิอ้างอิงใน Temperature control เมื่อเสร็จสิ้นการกำหนดค่าให้กดปุ่ม connect ซึ่งเป็นการเริ่มการทำงาน โดยจะส่งและรับค่าข้อมูลจากไมโครคอนโทรลเลอร์
4. หากต้องการดูผลของข้อมูลที่รับจากไมโครคอนโทรลเลอร์ทั้งหมดสามารถเลือกดูได้จาก Show all data และหากต้องการส่งค่าข้อมูลไปยัง Microsoft Excel สามารถเลือกได้จาก Export data

ภาคผนวก ค

วิธีการหาทิศเหนือ เพื่อประยุกต์ใช้ในการติดตั้งระบบหอคอยสุริยะ

The Method for Finding the North in the Application of the Solar Tower Installation

พรทิพย์ สุดเมือง[1], ภัทร อัยรักษ์[1*] และ เทพอักษร เพ็งพันธ์[1]

[1]ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ต. คอหงส์ อ.หาดใหญ่ จ. สงขลา 90110

*E-mail: pattara.a@psu.ac.th

บทคัดย่อ

ระบบหอคอยสุริยะเป็นระบบที่ประกอบด้วย กระจกรับรังสีอาทิตย์ (Heliostat) ทำหน้าที่สะท้อนแสงอาทิตย์เข้าสู่ที่ตัวรวมรังสีอาทิตย์ (Receiver) บนหอคอย (Tower) การหมุนของกระจกรับรังสีอาทิตย์และการหาทิศเหนือเพื่อใช้ในการติดตั้งระบบหอคอยสุริยะ จะมีผลต่อตำแหน่งแสงบนตัวรวมรังสีอาทิตย์ ถ้ามีความผิดพลาดเกิดขึ้นจะทำให้ตำแหน่งแสงบนตัวรวมรังสีอาทิตย์ผิดพลาดตามไปด้วย ในงานวิจัยนี้จึงได้ทำการออกแบบวิธีการหาทิศเหนือโดยการใช้เงาของดวงอาทิตย์เพื่อลดความผิดพลาดของระบบที่เกิดขึ้น โดยค่าความผิดพลาดของทิศเหนือที่หาได้จากระบบนี้จะมีค่าน้อยมาก หรือสามารถประมาณได้ว่าค่าความผิดพลาดของระบบเกิดจากการหมุนของกระจกรับรังสีอาทิตย์เท่านั้น โดยค่าความผิดพลาดในการหมุนของกระจกรับรังสีอาทิตย์ในแนวแกนอัลติจูดเท่ากับ ± 1 องศา และ แนวแกนอะซิมุธเท่ากับ ± 2 องศา ซึ่งเป็นค่าความผิดพลาดที่รับได้เนื่องจากไม่ทำให้แสงหลุดออกจากตัวรวมรังสีอาทิตย์ เมื่อทำการวัดอุณหภูมิบนตัวรวมรังสีอาทิตย์ จากช่วงเวลาตั้งแต่ดวงอาทิตย์ขึ้นจนถึงดวงอาทิตย์ตก จะได้ค่าประมาณ 23.70 – 70.80 ^{O}C

Attract

The solar tower system consists of a field of moveable mirrors (heliostats) reflecting the sunlight to a single fixed point in space, i.e. the receiver, on the tower. The movement of heliostats and the method of finding the North Pole for the installation of the solar tower system had effects on the image of the sunlight on the receiver. If the position to the North Pole is wrongly indicated, there will be an error on the position of light on the receiver. This research was to design the method of finding the North Pole using the shadow of the sun in order

to decrease the error. This method gave a better position of the North Pole and we can approximate the error in this system in the heliostats movement. The errors in the movement of the heliostats in altitude direction are ± 1 degree and in azimuth direction are ± 2 degree. The all-day results from the experiment were recorded and the temperature in the receiver varied between 23.70 – 70.80 ^{O}C.

Key words : Solar Tower, Heliostats, Receive, Solar azimuth, Solar altitude, Shadow angle

บทนำ

การนำพลังงานแสงอาทิตย์มาใช้ประโยชน์ส่วนใหญ่จะใช้ในรูปพลังงานความร้อนและพลังงานไฟฟ้า แต่การนำเอาพลังงานแสงอาทิตย์มาใช้มักจะมีปัญหา เพราะแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบพื้นโลกมีความเข้มต่ำ เนื่องจากพลังงานจะอยู่ในลักษณะของรูปแบบการกระจาย (Distribution) และแปรผันตามเวลา ไม่สามารถนำมาใช้ได้ทันที โดยปราศจากการรวบรวมและเปลี่ยนรูปแบบไปเป็นพลังงานอื่น จึงจำเป็นต้องมีตัวเก็บรังสีอาทิตย์ (Solar Collector) ซึ่งเป็นอุปกรณ์รับรังสีอาทิตย์มาเพิ่มความเข้มแสงและอุณหภูมิให้สูงขึ้น การสร้างหอคอยสุริยะ (Solar Tower) เป็นการสร้างตัวเก็บรังสีวิธีหนึ่งที่สามารถเพิ่มพลังงานแสงอาทิตย์ให้มีอุณหภูมิสูงขึ้นโดยมีหลักการและส่วนประกอบที่สำคัญ คือ กระจกรับแสงอาทิตย์ (Heliostat) ทำหน้าที่สะท้อนแสงมารวมที่ตัวรวมรังสีอาทิตย์ (Receiver) บนหอคอย (Tower) ดังแสดงในภาพประกอบ 1 ในระบบนี้หากกระจกรับแสงอาทิตย์วางอยู่นิ่ง รังสีแสงอาทิตย์ที่สะท้อนจากกระจกจะมีทิศทางเปลี่ยนแปลงไป เนื่องจากสาเหตุหลายประการ เช่น ผลกระทบจากการโคจรของโลกรอบดวงอาทิตย์ ที่มีลักษณะเป็นวงรี ผลกระทบจากแกนหมุนของโลกที่เอียงทำมุม 23.45 องศา และผลกระทบจากการหมุนรอบตัวเองของโลก (Stine and Harrigan, 1985) จากสาเหตุเหล่านี้จะทำให้รังสีแสงอาทิตย์จากท้องฟ้ามีทิศทางเปลี่ยนแปลงไป ส่งผลให้รังสีที่สะท้อนจากตัวรับในแต่ละแผ่นไม่สามารถรวมอยู่ที่จุดเดียวกันได้ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้ทำการควบคุมกระจกรับรังสีแสงอาทิตย์ให้เคลื่อนที่ตามดวงอาทิตย์ เพื่อปรับให้แสงอาทิตย์สะท้อนเข้าสู่ตัวรวมรังสีได้เพิ่มขึ้น ทำให้ความเข้มแสงและอุณหภูมิมีค่าเพิ่มขึ้นตามไปด้วย

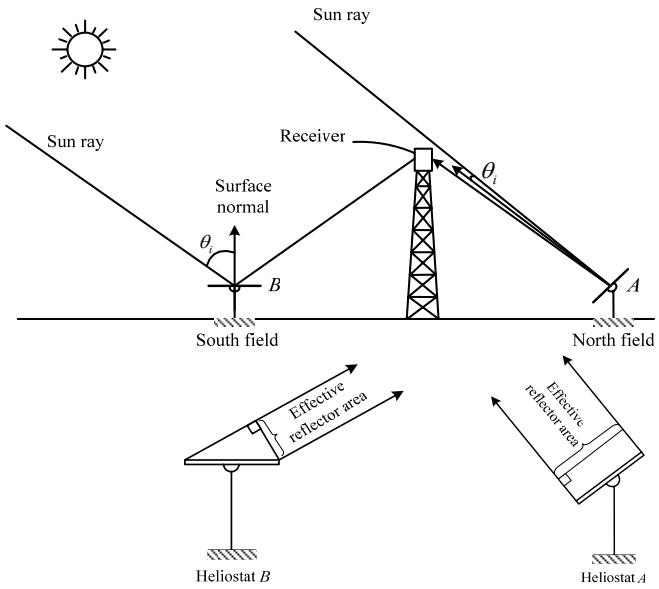


Figure 1 Diagram of the solar tower system

ในการติดตั้งระบบหอคอยสุริยะนั้น สิ่งที่จำเป็นอย่างยิ่งคือการวางตำแหน่งของกระจกรับรังสีอาทิตย์ เนื่องจากเมื่อวางตำแหน่งผิดพลาด รังสีอาทิตย์ที่สะท้อนจากกระจกจะมีทิศทางผิดพลาดตามไปด้วย ซึ่งการวางตำแหน่งนั้นจำเป็นต้องอ้างอิงทิศต่างๆ สิ่งสำคัญ คือการหาทิศเหนือที่ถูกต้อง เพราะเมื่อทราบทิศเหนือที่ถูกต้องแล้วจะสามารถหาทิศต่างๆ ตามมาได้ การหาทิศเหนือนั้นสามารถทำได้หลายวิธี แต่ละวิธีอาจจะเกิดความผิดพลาดและอาจมีข้อจำกัดต่างๆ เกิดขึ้น ซึ่งสามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้

- การสังเกตการขึ้นและตกของดวงอาทิตย์ วิธีการนี้จะสามารถหาทิศได้อย่างคร่าวๆ เท่านั้น เนื่องจากดวงอาทิตย์ไม่ได้ขึ้นทางทิศตะวันออกและตกทางทิศตะวันตกพอดี แต่จะขึ้นเอียงไปทางทิศเหนือหรือทิศใต้และจะมีค่าไม่คงที่ตลอดทั้งปี
- การใช้เข็มทิศ เป็นการหาทิศเหนือจากความสัมพันธ์ของแท่งแม่เหล็กและสนามแม่เหล็กโลก โดยเข็มทิศจะชี้ไปในทิศทางของสนามแม่เหล็กโลก ซึ่งในที่นี้ไม่ใช่ทิศเหนือที่แท้จริง และการใช้เข็มทิศจะมีข้อจำกัดเกิดขึ้นในกรณีที่บริเวณนั้นมีเหล็กกระจายอยู่ ซึ่งจะส่งผลให้เข็มทิศไม่สามารถชี้ทิศทางที่ถูกต้องได้ เนื่องจากเข็มทิศจะโดนเหนี่ยวนำด้วยเหล็กบริเวณนั้น

- การใช้ดาวเหนือ สามารถใช้ได้ในกรณีที่อยู่ในตำแหน่งพิกัดละติจูดสูง และสามารถมองเส้นขอบฟ้าได้ชัดเจน เช่น การหาทิศเหนือในการเดินเรือ เนื่องจากดาวเหนือจะอยู่จะสูงจากระนาบเส้นขอบฟ้าตามพิกัดที่ตั้งนั้นๆ
- การใช้ GPS ซึ่งเป็นอุปกรณ์บอกตำแหน่งที่แม่นยำ แต่ไม่สามารถบอกทิศทางที่ถูกต้องได้ เนื่องจากการหาทิศเหนือจาก GPS ต้องอ้างอิงจากจุด 2 จุด ซึ่งแต่ละจุดจะมีความคลาดเคลื่อนประมาณ 10 – 30 เมตร ดังนั้นทิศเหนือที่ได้จึงมีความผิดพลาดอยู่ในช่วงดังกล่าวดังแสดงในภาพประกอบ 2
- การสังเกตเงาของดวงอาทิตย์ในเวลาเที่ยงวันของเวลาสุริยะคติ (Solar Noon) ซึ่งเป็นเวลาที่เงาของดวงอาทิตย์มีระยะสั้นที่สุด และเป็นเวลาที่เงาของดวงอาทิตย์ชี้ไปในแนว เหนือ-ใต้ (Jackson, 2004) แต่วิธีการนี้จะใช้ได้ในช่วงเวลาขณะเวลาเที่ยงวันสุริยะคติเท่านั้น

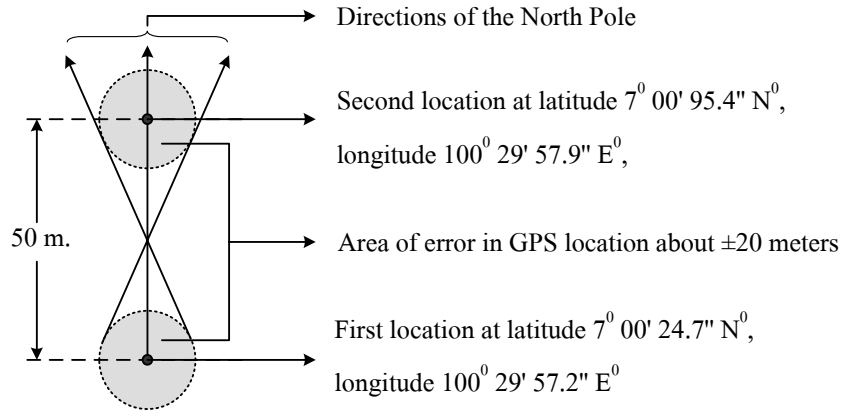


Figure 2 Diagram for calculating the direction of the North Pole

ดังนั้นในงานวิจัยจึงได้ทำการออกแบบวิธีการหาทิศเหนือ เพื่อใช้ในการติดตั้งระบบหอคอยสุริยะให้ทิศทางของแสงจากกระจกรับรังสีอาทิตย์มีความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุด ซึ่งทำให้เราสามารถนำพลังงานความร้อนที่ได้ไปใช้ให้เกิดประโยชน์สูงสุด ส่วนการนำพลังงานแสงอาทิตย์ที่ได้ไปประยุกต์ใช้งานนั้นสามารถทำได้หลากหลายเช่น การอบแห้ง การทำน้ำร้อน การเผาที่ต้องการใช้อุณหภูมิสูง และการเปลี่ยนเป็นพลังงานไฟฟ้า

ทฤษฎี

1. สมการการเคลื่อนที่ของดวงอาทิตย์

ขั้นตอนแรกของการทดลองได้ทำการศึกษาเส้นทางการเคลื่อนที่ของดวงอาทิตย์และวิเคราะห์สมการการเคลื่อนที่เพื่อนำไปใช้ในการวิเคราะห์หาทิศเหนือ และคำนวณมุมสะท้อนของกระจกรับรังสีอาทิตย์ ซึ่งได้ว่าการเคลื่อนที่ของดวงอาทิตย์จะอยู่ในเทอมของมุมอะซิมุธ และมุมอัลติจูด โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

มุมอะซิมุท (Azimuth, A) เป็นค่าระยะทางเชิงมุมที่วัดจากจุดทิศเหนือ (N) ในทิศทางตามเข็มนาฬิกา ไปยังทิศตะวันออก (E) จนถึงวงกลมแนวดิ่งของดวงอาทิตย์ หรือเงาของดวงอาทิตย์ในแนวราบ มุมอะซิมุทมีค่าระหว่าง 0 – 360 องศา หาได้จากสมการ

$$\alpha = \sin^{-1}\left(\sin\delta\sin\phi + \cos\delta\cos\omega\cos\phi\right) \tag{1}$$

มุมอัลติจูด (Altitude, α) เป็นค่ามุมเงย วัดจากเส้นขอบฟ้าขึ้นไปตามวงกลมแนวดิ่ง จนถึงตำแหน่งของดวงอาทิตย์บนทรงกลมท้องฟ้า มุมอัลติจูดจะมีค่าระหว่าง 0 – 90 องศา ถ้าดวงอาทิตย์อยู่ที่เส้นขอบฟ้า ค่าอัลติจูด เท่ากับ 0 องศา ถ้าดวงอาทิตย์อยู่เหนือศีรษะพอดีค่าอัลติจูด เท่ากับ 90 องศา หาได้จากสมการ

$$A = \sin^{-1}\left(\frac{-\cos\delta\sin\omega}{\cos\alpha}\right) \text{ (องศา)} \tag{2}$$

เมื่อ $\cos\omega \geq \left(\frac{\tan\delta}{\tan\phi}\right)$ จะได้ $A = 180^o - A$

เมื่อ $\cos\omega < \left(\frac{\tan\delta}{\tan\phi}\right)$ จะได้ $A = 360^o + A$

มุมทั้งสองนี้จะขึ้นอยู่กับ มุมละติจูด (Latitude, ϕ) มุมเดคลิเนชั่น (Declination, δ) และมุมชั่วโมง (Hour angle, ω) ซึ่งมีรายละเอียดได้ดังต่อไปนี้

ตำแหน่งละติจูด (Latitude, ϕ) เป็นตำแหน่งที่ตั้งของผู้สังเกต มีค่าตั้งแต่ + 90 องศา (ซีกโลกเหนือ) ถึง -90 องศา (ซีกโลกใต้) ถ้าผู้สังเกตอยู่ที่ตำแหน่งละติจูดต่างกัน จะสังเกตเห็นดวงอาทิตย์ในขณะเวลาเดียวกันมีค่าอัลติจูดและอะซิมุท แตกต่างกัน

มุมเคคลิเนชัน (Declination, δ) เป็นผลกระทบจากการเอียงของแกนหมุนของโลก หาได้จากระยะทางเชิงมุมทางเหนือหรือใต้จากเส้นศูนย์สูตรท้องฟ้า ขึ้นหรือลงไปตาม เส้นแนวรังสีจากดวงอาทิตย์ มีค่าเปลี่ยนแปลงอยู่ระหว่าง + 23.45 ถึง – 23.45 องศา ในช่วง 1 รอบปี คำนวณได้จากสมการ

$$\sin\delta = \cos\left[(n-173)\frac{180^o}{182.6}\right]\sin(23.45^o) \tag{3}$$

เมื่อ n คือ จำนวนวันในรอบปี โดย $n = 1$ ในวันที่ 1 มกราคม

มุมชั่วโมง (Hour Angle, ω) ใช้บอกตำแหน่งของดวงอาทิตย์บนท้องฟ้าในช่วงเวลาต่างๆ โดยวัดจากเส้นเมอริเดียนท้องฟ้าในทิศตามเข็มนาฬิกา (ทิศเดียวกับการหมุนของท้องฟ้า) ไปตามเส้นศูนย์สูตรท้องฟ้าจนถึงวงกลมชั่วโมงที่ผ่านตำแหน่งของดวงอาทิตย์โดยมีค่าอยู่ระหว่าง -180 องศา ถึง +180 องศา ซึ่งเป็นลบในช่วงเช้าก่อนเที่ยงวัน และเป็นบวกในช่วงบ่าย หาได้จากสมการ

$$\omega = 15(t_s - 12) \tag{4}$$

เมื่อ t_s คือ เวลาสุริยะคติ ซึ่งเป็นเวลาที่สังเกตจากดวงอาทิตย์จริง หรือคิดจากมุมชั่วโมงของดวงอาทิตย์จริง เช่น นาฬิกาแดด

2. การวิเคราะห์สมการในระบบหอคอยสุริยะ

ในการวิเคราะห์มุมสะท้อนของกระจกรับรังสีอาทิตย์จะอาศัยความสัมพันธ์ของมุมอะซิมุธและมุมอัลติจูดที่ได้กล่าวไว้ในหัวข้อก่อนหน้านี้ โดยความสัมพันธ์ของเวกเตอร์รังสีตกกระทบและรังสีสะท้อนบนระนาบของกระจกรับแสงอาทิตย์สามารถอธิบายได้จากเวกเตอร์ในระบบพิกัด ทิศเซนิท ทิศตะวันออก และทิศเหนือ หรือ z, e และ n ตามลำดับ เมื่อให้มุมสะท้อนของกระจกเป็น α_H และ A_H โดย α_H เป็น Reflector Altitude Angles หรือมุมอัลติจูดของกระจก และ A_H เป็น Reflector Azimuth Angles หรือมุมอะซิมุทของกระจก ดังแสดงในภาพประกอบ 3 ได้ความสัมพันธ์ดังนี้

$$\sin\alpha_H = \frac{R_z + \sin\alpha}{2\cos\theta_i} \tag{5}$$

$$\sin A_H = \frac{R_e + \cos\alpha \sin A}{2\cos\theta_i \cos\alpha_H} \tag{6}$$

$$\cos A_H = \frac{R_n + \cos\alpha \cos A}{2\cos\theta_i \cos\alpha_H} \tag{7}$$

R_z, R_e และ R_n สามารถหาได้จากเวกเตอร์หนึ่งหน่วยของเวกเตอร์รังสีสะท้อนของกระจกสู่ตัวรวมรังสีอาทิตย์ ($\hat{R}$) อธิบายได้ดังสมการ

$$\hat{R} = \frac{(z_0 - z_1)\hat{i} - e_1\hat{j} - n_1\hat{k}}{(z_0 - z_1)^2 + e_1^2 + n_1^2} \tag{8}$$

เมื่อ θ_i เป็นมุมตกกระทบ(มีค่าเท่ากับมุมหักเห) ระหว่างเวกเตอร์ของรังสีดวงอาทิตย์และแนวเส้นปกติของระนาบกระจกรับรังสีอาทิตย์ สามารถหาได้จากสมการ

$$\cos 2\theta_i = R_z \sin\alpha + R_e \cos\alpha \sin A + R_n \cos\alpha \cos A \tag{9}$$

โดยให้ตำแหน่งของตัวรวมรังสีอาทิตย์เป็น $(z_0, 0, 0)$ ตำแหน่งของกระจกรับรังสีเป็น (z_1, e_1, n_1)

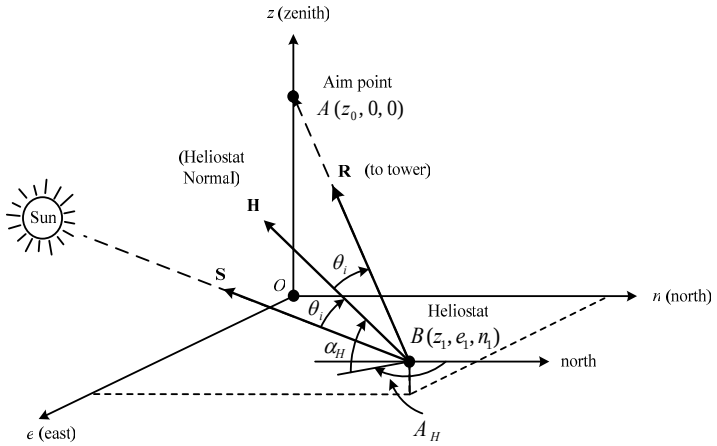
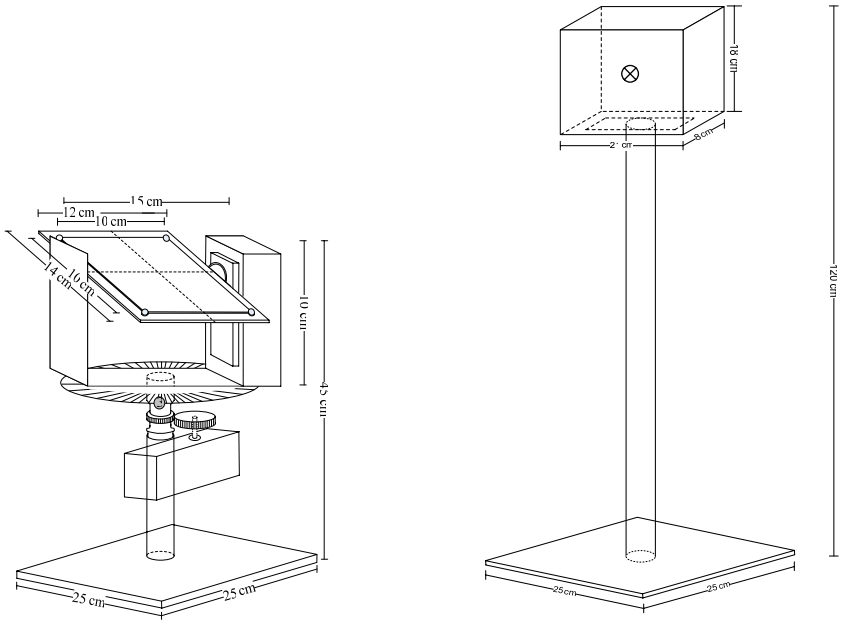


Figure 3 Coordinate defining the reflection of the sun's rays by a heliostat to a single aim point.

วิธีการทดลอง

1. การออกแบบระบบหอคอยสุริยะ

การออกแบบอุปกรณ์ต้นแบบของระบบหอคอยสุริยะ ประกอบด้วย 2 ส่วน คือ กระจกรับรังสีอาทิตย์ และหอคอย โดยได้ออกแบบกระจกรับรังสีอาทิตย์ทั้งหมด 5 บาน มีขนาดเท่ากับ 10×10 ตารางซม.ลักษณะดังภาพประกอบ 4 ซึ่งกระจกรับรังสีอาทิตย์จะออกแบบให้หมุนได้ในมุมกวาดแนวราบ และมุมเงยแนวดิ่ง หรือหมุนได้ตามมุมอัลติจูดของกระจก (α_H) และมุมอะซิมุทของกระจก (A_H) โดยมุมทั้งสองนี้จะมีค่าไม่เกิน 90 และ 360 องศาตามลำดับ จากการออกแบบได้ใช้เซอร์โวมอเตอร์ในการควบคุมการหมุนของกระจก คุณสมบัติของเซอร์โวมอเตอร์ที่ใช้สามารถหมุนได้ประมาณ 180 องศาเท่านั้น ดังนั้นในแนวมุมอะซิมุทของกระจกจึงได้ทดเฟืองเพื่อให้กระจกหมุนได้ 360 องศา ด้านหลังของกระจกรับรังสีอาทิตย์และด้านล่างของฐานรองกระจกรับรังสีอาทิตย์ได้ออกแบบอุปกรณ์สำหรับวัดมุมเอาไว้เพื่อตรวจสอบความถูกต้องในการหมุนของกระจก สำหรับส่วนของหอคอยสุริยะจะมีความสูง 120 ซม. ตัวรวมรังสีอาทิตย์ทำจากกล่องเหล็ก ซึ่งมีคุณสมบัติในการนำความร้อนได้ดี และได้ทำการติดตั้งอุปกรณ์สำหรับวัดอุณหภูมิไว้ตรงจุดศูนย์กลางของตัวรวมรังสีอาทิตย์ ดังแสดงในภาพประกอบ 4



(a) (b)

Figure 4 The schematic diagram of the prototype: (a) the heliostats, (b) the tower.

ในการออกแบบซอฟท์แวร์จะพัฒนาบนไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC18F458 ทำหน้าที่คำนวณค่ามุมต่างๆ เพื่อนำไปควบคุมการหมุนของกระจกรับรังสีให้สะท้อนแสงอาทิตย์เข้าสู่ตัวรวมรังสีอาทิตย์ พร้อมทั้งเป็นตัวควบคุมอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดอุณหภูมิอากาศและอุณหภูมิบนตัวรวมรังสีโดยได้ใช้ ไอซี Dallas 1620 ในส่วนการรับส่งข้อมูลและการแสดงผลจะติดต่อผ่านทางโปรแกรมที่พัฒนาบน Visual Basic โดยลักษณะการออกแบบระบบการควบคุมได้แสดงดังภาพประกอบ 5

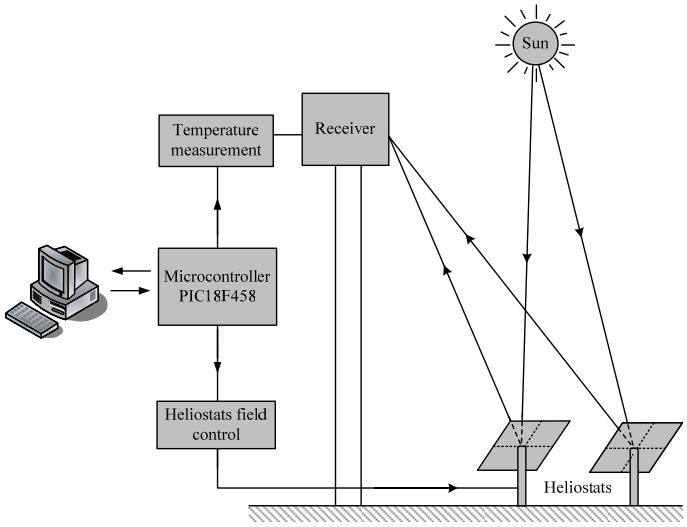


Figure 5 Diagram of the control system.

2. วิธีการหาทิศเหนือ

การออกแบบวิธีการหาทิศเหนือได้ใช้ความสัมพันธ์ของเงาของดวงอาทิตย์และตำแหน่งของดวงอาทิตย์ในขณะเวลาต่างๆ ซึ่งมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

วัดเงาของดวงอาทิตย์ในเวลา 9:00 น. 12:00 น. และเวลา 15:00 น. (อาจใช้เวลาอื่นตามความสะดวก) จำนวน 3 ตำแหน่ง (เนื่องจากพื้นที่ในการทดลองเป็นบริเวณกว้าง จึงทำการวัดในหลายๆ จุดเพื่อความถูกต้อง) คำนวณมุมอะซิมุท จากสมการ 2 แทนมุมชั่วโมงเป็นเวลาที่ทำการวัดเงา โดยเวลาและตำแหน่งที่ตั้งสามารถหาได้จาก GPS ความสัมพันธ์ของมุมอะซิมุทและเงาของดวงอาทิตย์ แสดงในภาพประกอบ 6 เมื่อทราบมุมอะซิมุท จะสามารถหามุมระหว่างเงาของดวงอาทิตย์กับทิศเหนือได้จาก

$$\varphi = |180 - A| \tag{10}$$

เมื่อ ϕ เป็นมุมระหว่างเงาของดวงอาทิตย์กับทิศเหนือ

จากวิธีการดังกล่าวสามารถที่จะหาทิศเหนือได้ตลอดเวลา เพียงคำนวณมุมอะซิมุธในช่วงเวลาที่ต้องการทำการทดลองเท่านั้น

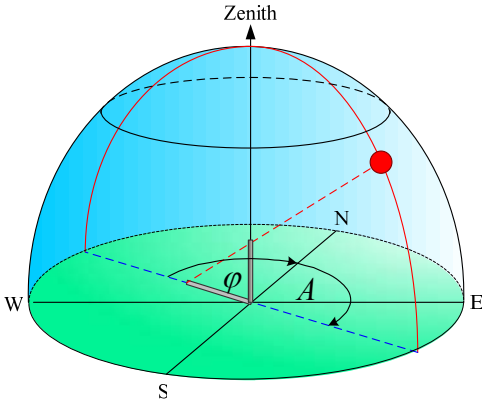


Figure 6 Diagram showing the solar azimuth angles, A and the shadow angle φ.

3. การติดตั้งอุปกรณ์

เมื่อทำการออกแบบอุปกรณ์ต้นแบบของระบบหอคอยสุริยะและหาทิศเหนือที่ถูกต้องแล้ว ขั้นตอนต่อไปจะนำอุปกรณ์ไปทำการทดลองเพื่อวัดอุณหภูมิบนตัวรวมรังสีอาทิตย์ โดยการทดลองจะติดตั้งอุปกรณ์ไว้บนดาดฟ้าของอาคารฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ซึ่งอยู่ที่พิกัด ลองจิจูด $100^{o}29'\ E^{o}$ ละติจูด $7^{o}00'\ N^{o}$ โดยวางหอคอยให้หันหน้าไปทางทิศใต้ และวางกระจกรับรังสีจำนวน 5 อันไว้รอบๆ ในแนวรัศมี มีมุมอะซิมุทของกระจกเริ่มต้นเท่ากับ 0 องศา หรือระนาบปกติของกระจกทำมุมกับทิศเหนือ 0 องศา ดังแสดงในภาพประกอบ 7 โดยกำหนดให้หอคอย เป็นจุดอ้างอิง อยู่ที่ตำแหน่ง (111, 0, 0) กระจกรับรังสี 5 อัน ห่างจากหอคอย เท่ากับ (29, 0, -75), (29, 25, -60), (29, 50, -45), (29, -25, -60) และ (29, -50, -75) มีหน่วยเป็นเซนติเมตรตามลำดับ และมีพิกัดตามแนว ทิศซินิท ทิศตะวันออก ทิศตะวันตก หรือ (z, e, n) ลักษณะเดียวกับภาพประกอบ 3

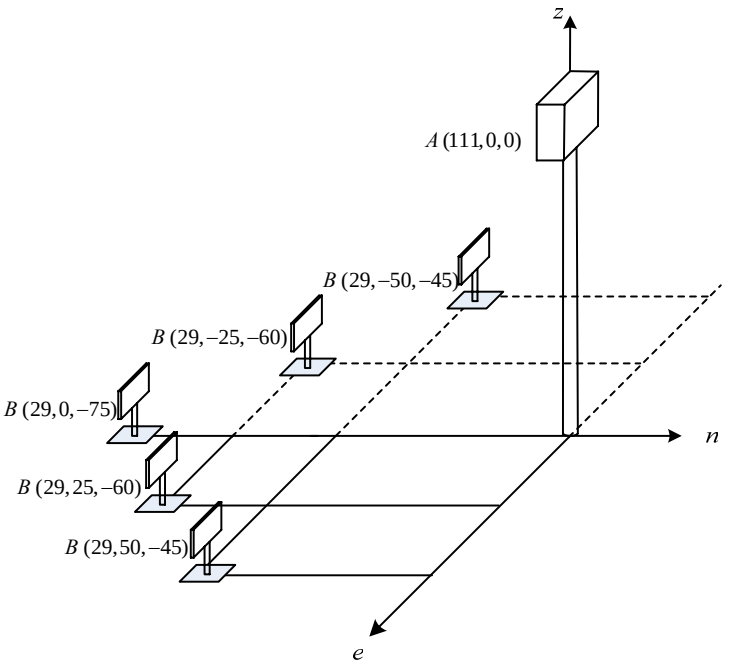


Figure 7 The configuration of the heliostats around the tower.

ผลและการวิจารณ์ผลการทดลอง

1. ผลการทำงานของซอฟแวร์และการวิเคราะห์ค่าความผิดพลาด

1.1 การเปรียบเทียบผลการคำนวณ

จากการทดลองจะเห็นว่าการทำงานของซอฟแวร์ต้องคำนวณค่าต่างๆ เช่น มุมอัลติจูด มุมอะซิมุธ มุมเดคลิเนชั่น มุมชั่วโมง ในที่นี้จึงได้เปรียบเทียบค่าต่างๆ ที่คำนวณได้กับโปรแกรม Voyager SkyGazer (Copyright Carina Solftwere, 1990 – 2002) ซึ่งค่าที่ได้มีความใกล้เคียงกันมากโดยสามารถคำนวณเวลาของดวงอาทิตย์ขึ้นและดวงอาทิตย์ได้ตรงกัน ส่วนค่ามุมอัลติจูดและมุมอะซิมุธที่คำนวณได้เมื่อเปรียบกันแล้ว ได้ค่าผิดพลาด ±34 ฟิลิปดา ซึ่งถือว่าเป็นค่าที่น้อยมาก

1.2 การวิเคราะห์ค่าความผิดพลาด

เมื่อวิเคราะห์ความผิดพลาดของทิศเหนือที่หาได้จากสมการ 1, 2 และ 10 จะได้ความสัมพันธ์ของค่าความผิดพลาดตามสมการ 11 และ 12 ซึ่งขึ้นอยู่กับ วัน เวลา และตำแหน่งละติจูด ในที่นี้ให้วันและเวลาไม่มีความผิดพลาด ค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้น จะขึ้นอยู่กับตำแหน่งละติจูดเท่านั้น ซึ่งในการทดลองการวัดตำแหน่งละติจูดจะใช้ GPS โดย GPS ที่ใช้มีค่าความ

ผิดพลาดในการวัด เท่ากับ ±20 เมตรในแนวรัศมี หรือมีค่าประมาณ 0.000018 องศา (ระยะทาง 110 กิโลเมตร เท่ากับละติจูด 1 องศา)

$$\Delta\alpha = \left| \frac{(\sin\phi\cos\delta\cos\omega) + (\cos\phi\sin\delta)}{\cos\alpha} \right| \Delta\phi \qquad (11)$$

$$\Delta A = \Delta\varphi = \left| \frac{(\cos\delta\sin\omega\sin\alpha)}{\cos^2\alpha} \right| \Delta\alpha \qquad (12)$$

ยกตัวอย่างการคำนวณค่าความผิดพลาดจากการทดลองในวันที่ 1 มกราคม 2549 เวลา 10:00 น. เมื่อคำนวณค่าความผิดพลาดตามสมการ 11 และ 12 จะได้ความผิดพลาดของมุมอัลติจูด $(\Delta\alpha)$ เท่ากับ $\pm$ 1.205×10^{-5} องศา และความผิดพลาดของมุมอัลซิมุธจะเท่ากับมุมระหว่างเงาของดวงอาทิตย์กับทิศเหนือ $(\Delta A = \Delta\varphi)$ ซึ่งมีค่าเท่ากับ $\pm$ 8.707×10^{-6}องศา จะเห็นว่าค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นมีค่าน้อยมาก จึงสามารถประมาณได้ว่าไม่มีความผิดพลาดในการหาทิศเหนือเพื่อติดตั้งอุปกรณ์

เมื่อนำซอฟแวร์ที่ออกแบบไว้ไปควบคุมการหมุนของกระจกรับรังสีอาทิตย์ ในตอนแรกได้ศึกษาลักษณะและตำแหน่งของแสงบนตัวรวมรังสีอาทิตย์ เพื่อตรวจสอบว่าระบบสามารถควบคุมกระจกรับรังสีอาทิตย์ให้สะท้อนแสงอาทิตย์เข้าสู่ตัวรวมรังสีอาทิตย์ได้ตลอดทั้งวัน โดยทำการบันทึกภาพไว้ทุกๆ 1 ชั่วโมง จะพบว่าแสงที่ตกกระทบบนตัวรวมรังสีอาทิตย์มีลักษณะเปลี่ยนแปลงไป ขนาดและตำแหน่งจะไม่คงที่ แต่ยังคงอยู่บนตัวรวมรังสีอาทิตย์ ดังแสดงในภาพประกอบ 8 ซึ่งเป็นตัวอย่างการเก็บภาพบนตัวรวมรังสีอาทิตย์ในตอนเช้า (09:00 น.) เที่ยง (12:00 น.) และเย็น (15:00 น.) เมื่อวิเคราะห์ค่าความผิดพลาดที่ทำให้ตำแหน่งของแสงเปลี่ยนแปลงไป จะได้ว่า ความความผิดพลาดที่เกิดขึ้นมาจากข้อจำกัดในการหมุนของกระจกรับรังสีอาทิตย์ในแนวราบ เนื่องจากกระจกรับรังสีในแนวราบมีการทดเฟือง ค่าละเอียดสุดที่หมุนได้คือครั้งละ 2 องศา หรือมีค่าความคลาดเคลื่อน ±1 องศา อีกประการคือความผิดพลาดจากการหมุนของเซอร์โวมอเตอร์ คือการหมุนของเซอร์โวจะมีการเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ เมื่อทำการทดลองบนดาดฟ้าซึ่งมีอุณหภูมิสูงจึงมีความผิดพลาดเกิดขึ้น ในการทดลองได้ทำการวัดมุมอัลติจูดและมุมอะซิมุธที่กระจกรับรังสีอาทิตย์หมุนไปได้จริง เปรียบเทียบกับค่ามุมที่คำนวณได้จากซอฟแวร์ พบว่าความความผิดพลาดในแนวแกนอัลติจูดของกระจก มีค่าเท่ากับ ±1 องศา และในแนวแกนอะซิมุธของกระจกมีค่าเท่ากับ ±2 องศา เมื่อนำค่าความผิดพลาดในการหมุนของกระจก

รับรังสีอาทิตย์ไปหาความผิดพลาดของตำแหน่งแสงที่ตกกระทบบนตัวรวมรังสีอาทิตย์ จากสมการการคำนวณหามุมสะท้อนของกระจก (สมการ 5, 6 และ 7) จะได้ว่า

$$\Delta R_z = \left|2\{[-\sin\alpha_H \sin\theta]_i \Delta\theta_i + [\cos\theta_i \cos\alpha_H]\Delta\alpha_H\}\right| \tag{13}$$

$$\Delta R_e = \left|\begin{matrix}2\{-\sin A_H[(-\cos\theta_i \sin\alpha_H)\Delta\alpha_H + (-\cos\alpha_H \sin\theta_i)\Delta\theta_i] + \\ [\cos\alpha_H \cos\theta_i \cos A_H]\Delta A_H\}\end{matrix}\right| \tag{14}$$

$$\Delta R_n = \left|\begin{matrix}2\{\cos A_H[(-\cos\theta_i \sin\alpha_H)\Delta\alpha_H + (-\cos\alpha_H \sin\theta_i)\Delta\theta_i] + \\ [-\cos\theta_i \cos\alpha_H \sin A_H]\Delta A_H\}\end{matrix}\right| \tag{15}$$

ค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นจะประกอบด้วยกัน 3 ค่า คือ ΔR_z, ΔR_e และ ΔR_n ซึ่งเป็นค่าที่บอกถึงความผิดพลาดของตำแหน่งแสงจากจุดศูนย์กลางของตัวรวมรังสีอาทิตย์ไปตามทิศแนวดิ่ง *(z)* ทิศตะวันออก *(e)* และทิศเหนือ *(n)* ตามลำดับ ยกตัวอย่างการคำนวณ ถ้าสมมุติความผิดพลาดในการหมุนของกระจกรับแสงอาทิตย์ ให้ค่าความผิดพลาดของมุมยกของกระจก ($\Delta\alpha_H$) เท่ากับ 1 องศา ค่าความผิดพลาดของมุมกวาดของกระจก (ΔA_H) เท่ากับ 1 องศา และไม่มีความผิดพลาดในการติดตั้งอุปกรณ์ จะได้ว่า ΔR_z = ± 0.386 ซม., ΔR_e = ± 1.517 ซม. และ ΔR_n = ± 1.661 ซม. หมายความว่า ตำแหน่งของแสงจะขยับจากจุดศูนย์กลางของตัวรวมรังสีอาทิตย์ ไปในแนวดิ่งเท่ากับ ± 0.386 ซม. ทิศตะวันตกเท่ากับ ± 1.517 ซม. ทิศเหนือเท่ากับ ± 1.661 ซม. ส่วนในกรณีที่นำวิธีการอื่นมาใช้หาทิศเหนือจะทำให้เกิดข้อผิดพลาดเพิ่มขึ้น โดยค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้น จะมีผลทำให้ค่ามุมอะซิมุธของกระจกรับรังสีอาทิตย์คลาดเคลื่อนตามไปด้วย เนื่องจากมุมอะซิมุธของกระจกรับรังสีอาทิตย์จะอ้างอิงจากทิศเหนือ ดังภาพประกอบ 4 ถ้าหาทิศเหนือผิดพลาดเท่ากับ 1 องศา จะทำให้มุมอะซิมุธของกระจกรังสีอาทิตย์ผิดพลาดไป 1 องศาเช่นเดียวกัน

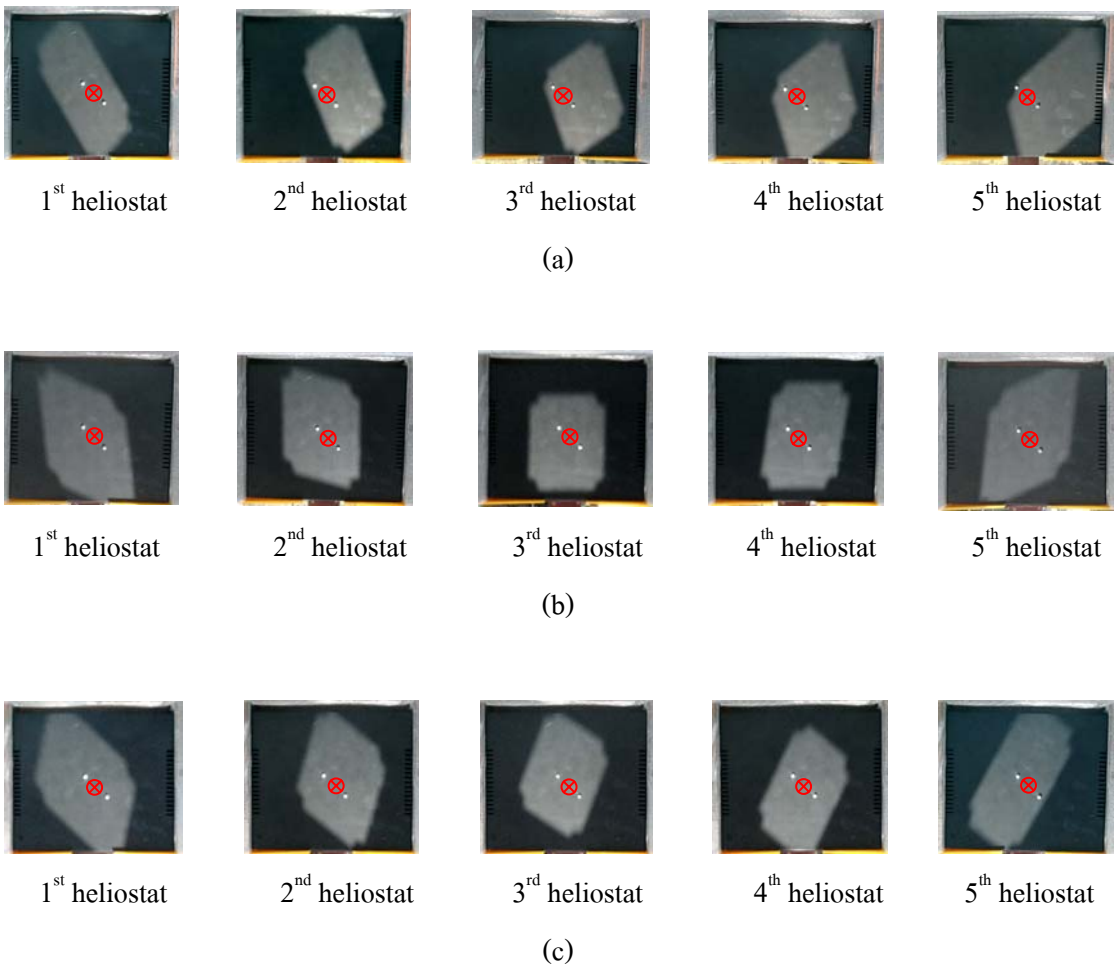


Figure 8 The image of the sun projected by the heliostats on the receiver: (a) at 09:00 am., (b) at 12:00 am., (c) at 03:00 pm.. Where, ⊗ which is the center of the receiver and the position of temperature measurement.

2. ผลการทดลองวัดอุณหภูมิบนตัวรวมรังสีอาทิตย์

การทดลองได้ศึกษาอุณหภูมิบนตัวรวมรังสีอาทิตย์เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงจำนวนกระจกจากไม่มีกระจก จนถึงมีกระจกจำนวน 5 บาน โดยทำการทดลองแบบละ 5 วัน ช่วงเวลาตั้งแต่ดวงอาทิตย์ขึ้นจนถึงดวงอาทิตย์ตก ยกตัวอย่างความสัมพันธ์ในภาพประกอบ 9 และ 10 ซึ่งเป็นการทดลองในกรณีที่ไม่ได้ใช้กระจกและใช้กระจกจำนวน 5 บาน และเมื่อพิจารณาข้อมูลของอุณหภูมิในการทดลองแต่ละแบบ เฉลี่ยทั้ง 5 วัน ดังแสดงในตาราง 1 จะได้ว่าค่าอุณหภูมิบนตัวรวมรังสีอาทิตย์มีการเปลี่ยนแปลงขึ้นกับเวลา จำนวนกระจก และสภาพอากาศ คือ

เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ของอุณหภูมิบนตัวรวมรังสีอาทิตย์กับเวลา พบว่าอุณหภูมิจะมีค่าเพิ่มขึ้นจากเวลาตั้งแต่ดวงอาทิตย์ขึ้นจนถึงเวลาประมาณ 12:30 น. จากนั้นอุณหภูมิจะมีค่าลดลงจนกระทั่งดวงอาทิตย์ตก เนื่องจากปริมาณรังสีขึ้นอยู่กับระยะทางที่แสงเดินทางผ่านชั้นบรรยากาศ (ยุทธ อัครมาส, 2530) ช่วงเวลา 12:30 น. ดวงอาทิตย์จะทำมุมสูงสุดกับแนวระดับ ทำให้อุณหภูมิมีค่าสูงสุด

เมื่อนำอุณหภูมิบนตัวรวมรังสีอาทิตย์และอุณหภูมิอากาศมาวิเคราะห์โดยหาผลต่างของอุณหภูมิทั้งสอง จะพบว่าเมื่อมีการเพิ่มจำนวนกระจกขึ้นค่าอุณหภูมิบนตัวรวมรังสีจะมีค่าเพิ่มขึ้น โดยผลต่างระหว่างอุณหภูมิมีค่าเพิ่มขึ้นดังภาพประกอบ 11

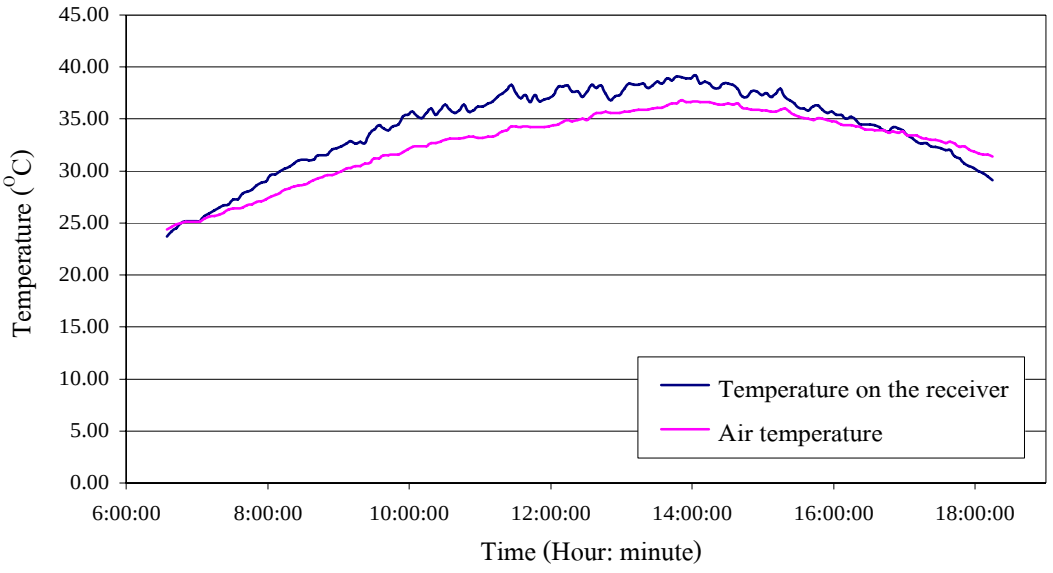


Figure 9 The temperature on the receiver with non heliostat.

ประการสุดท้าย คือ อุณหภูมิจะมีการเปลี่ยนแปลงโดยขึ้นกับลักษณะอากาศ เนื่องจากเมื่อมีเมฆบังความเข้มแสงบนตัวรวมรังสีอาทิตย์จะลดลงหรือหายไป ทำให้อุณหภูมิลดลงอย่างเห็นได้ชัด ซึ่งเกิดจากรังสีที่สะท้อนจากกระจกรับแสงอาทิตย์เป็นรังสีตรง (รังสีที่มาจากดวงอาทิตย์โดยตรงมีทิศทางแน่นอนที่เวลาใดเวลาหนึ่ง) เมื่อมีเมฆบังดวงอาทิตย์อุณหภูมิจะลดลงอย่างรวดเร็ว แต่จะแตกต่างจากอุณหภูมิอากาศ เพราะถึงแม้จะมีเมฆบังอุณหภูมิอากาศจะยังคงที่หรือลดลงเพียงเล็กน้อย เนื่องจากอุณหภูมิอากาศจะขึ้นอยู่กับรังสีตรงและรังสีกระจาย (รังสีอาทิตย์ที่ถูกสะท้อนและกระจายโดยแก๊ส ฝุ่นละอองและวัตถุต่างๆ ที่เป็นตัวขวางกั้นทางเดินแสง) ขณะที่มีเมฆมากรังสีตรงจะลดลง แต่รังสีกระจายจะมีค่าสูงขึ้น ทำให้อุณหภูมิอากาศเกิดการเปลี่ยนแปลงไม่มากนัก

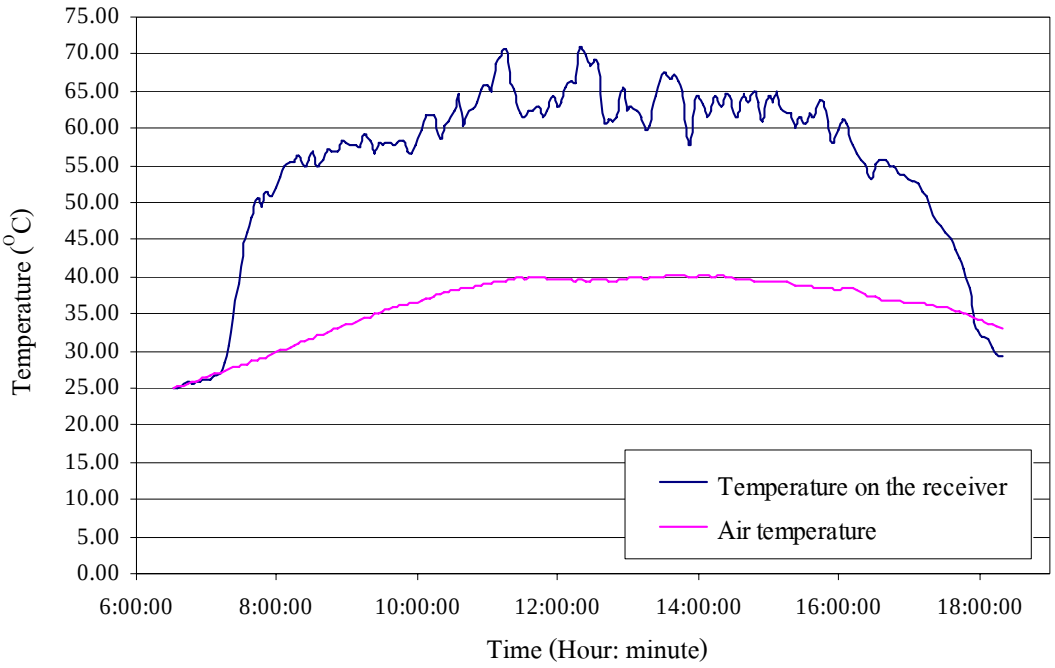


Figure 10 The temperature on the receiver with five heliostats.

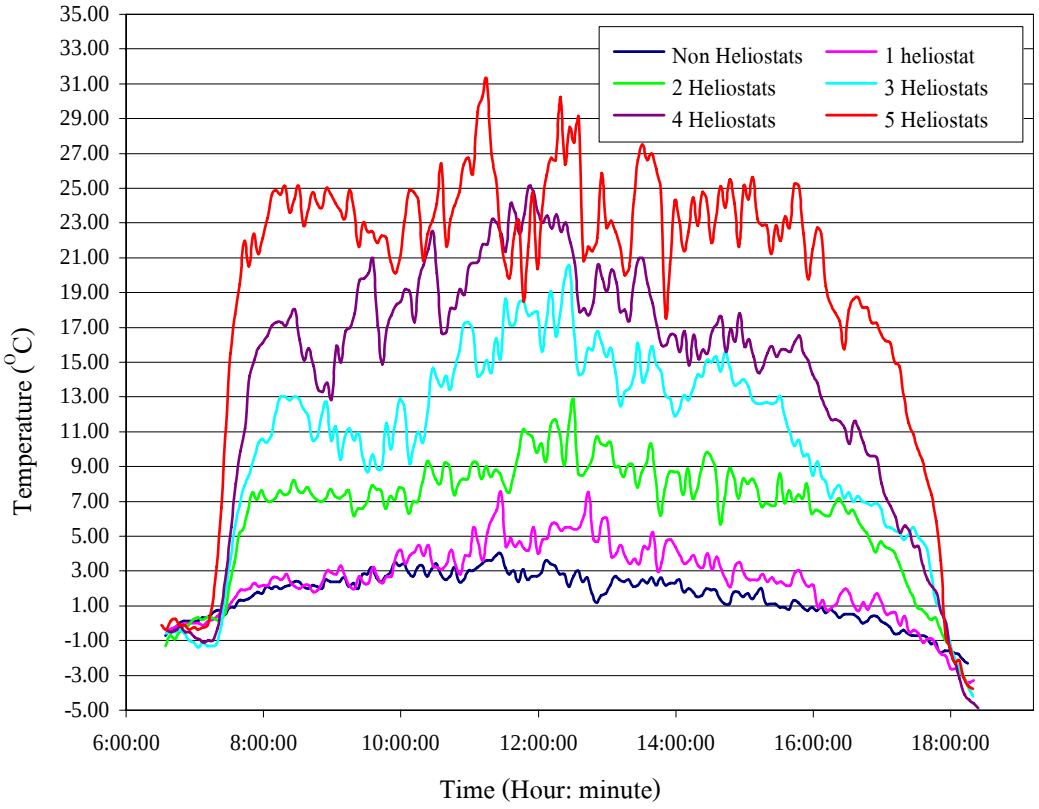


Figure 11 The deference between the temperatures on the receiver and the air temperature from non-heliostat to five heliostats.

Table 1 The result of the temperature on the receiver from non-heliostat to five heliostats.

Number of heliostats / Data	0	1	2	3	4	5
Maximum temperature (^{O}C)	29.20	45.20	52.30	59.80	65.80	70.80
Time at maximum temperature (hour : minute)	14:02:39	12:43:41	12:30:23	12:27:02	11:48:05	12:19:02
Minimum temperature (^{O}C)	23.70	24.40	23.20	24.20	24.80	24.80
Time at minimum temperature (hour : minute)	06:36:53	06:35:40	06:35:22	06:35:01	06:34:01	06:31:52

สรุป

จากผลการทดสอบการทำงานของระบบหอคอยสุริยะแสดงให้เห็นว่า การหาทิศเหนือสำหรับติดตั้งกระจกรับรังสีอาทิตย์ และการหมุนของกระจกรับรังสีอาทิตย์ มีส่วนทำให้ตำแหน่งของแสงบนตัวรวมรังสีอาทิตย์เปลี่ยนแปลงไป เมื่อนำวิธีการหาทิศเหนือโดยการใช้เงาของดวงอาทิตย์มาใช้ จะทำให้ทิศเหนือที่หาได้มีค่าความผิดพลาดน้อยมาก หรือประมาณได้ว่าความผิดพลาดของระบบเกิดจากการหมุนของกระจกรับรังสีอาทิตย์เพียงอย่างเดียว โดยมีความผิดพลาดในการหมุนของกระจก แนวแกนอัลติจูดเท่ากับ ± 1 องศา และแนวแกนอะซิมุธเท่ากับ ± 2 องศา ซึ่งความผิดพลาดนี้เป็นผลมาจากข้อจำกัดของอุปกรณ์ที่ใช้ในการออกแบบ แต่อย่างไรก็ตามความผิดพลาดที่เกิดขึ้นนั้นเป็นค่าที่สามารถรับได้ เนื่องจากไม่ทำให้แสงที่สะท้อนจากกระจกรับรังสีอาทิตย์หลุดออกจากตัวรวมรังสีอาทิตย์ เมื่อทำการศึกษาความสัมพันธ์ของอุณหภูมิกับการเปลี่ยนแปลงจำนวนกระจก จะพบว่าอุณหภูมิบนตัวรวมรังสีอาทิตย์มีการเปลี่ยนแปลงขึ้นกับจำนวนกระจก เวลา และสภาพอากาศ เมื่อทดลองในสภาพอากาศท้องฟ้าแจ่มใส ไม่มีเมฆ สามารถวัดอุณหภูมิสูงสุดเฉลี่ยในขณะเวลาเที่ยงวันสุริยะคติ (ประมาณ 12 : 30 น.) ได้ 70.80 ^{O}C เมื่อใช้กระจกจำนวน 5 บาน และวัดอุณหภูมิต่ำสุดเฉลี่ยในขณะเวลาดวงอาทิตย์ขึ้น (ประมาณ 06 : 30 น.) ได้ 23.70 ^{O}C เมื่อไม่ใช้กระจก