

การจำลองและเพิ่มความแม่นยำในการสะท้อนแสงของเฮลิโอสแตทที่มีความผิดพลาดในการ  
ติดตั้งและระบบขับเคลื่อน



นายพีรภัทร โอวาทชัยพงศ์

ศูนย์วิทยทรัพยากร

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2552

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

SIMULATING AND IMPROVING TARGETING ACCURACY FOR HELIOSTATS WITH  
INSTALLATION AND TRANSMISSION ERROR



Mr. Peerapat Owatchaiyapong

ศูนย์วิทยุโทรคมนาคม  
A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of Master of Engineering Program in Mechanical Engineering

Department of Mechanical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2009

Copyright of Chulalongkorn University



พีรภัทร โอวาทชัยพงศ์ : การจำลองและเพิ่มความแม่นยำในการสะท้อนแสงของเฮลิโอสแตทที่มีความผิดพลาดในการติดตั้งและระบบขับเคลื่อน. (SIMULATING AND IMPROVING TARGETING ACCURACY FOR HELIOSTATS WITH INSTALLATION AND TRANSMISSION ERROR) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : ผศ.ดร.ศุภวุฒิ จันทร์พานิชย์, อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม : อ.ดร.สวัสดิ์ เหลืองเรืองฤทธิ์, 109 หน้า.

ระบบตัวรับแสงส่วนกลาง (Central receiver) เป็นระบบพลังงานทดแทนที่ใช้แสงอาทิตย์เป็นแหล่งพลังงาน ระบบตัวรับแสงส่วนกลางประกอบด้วยตัวสะท้อนแสง (เฮลิโอสแตท) และตัวรับแสง เฮลิโอสแตททำงานแบบอัตโนมัติจะทำหน้าที่สะท้อนแสงไปยังตัวรับแสง ในขณะที่ตัวรับแสงจะทำหน้าที่รับแสงและเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานต่างๆ เช่น พลังงานไฟฟ้าและพลังงานความร้อน ระบบตัวรับแสงส่วนกลางที่มีใช้อยู่ในปัจจุบันมีความสามารถในการผลิตพลังงานได้เป็นจำนวนมากแต่ไม่ได้รับความนิยมในการใช้งานเนื่องจากปัญหาเรื่องค่าใช้จ่ายในการก่อสร้าง เช่น โรงไฟฟ้า Solar Tres ที่มีค่าใช้จ่ายประมาณ 58 ล้านดอลลาร์ สามารถผลิตกระแสไฟฟ้าได้ 15 เมกะวัตต์ต่อวัน 30-50% ของค่าใช้จ่ายนี้มาจากค่าใช้จ่ายในการผลิตและติดตั้งเฮลิโอสแตท เพื่อพัฒนาระบบตัวรับแสงส่วนกลางให้มีค่าใช้จ่ายลดลงจึงได้เสนอเฮลิโอสแตทต้นทุนต่ำที่มีการลดค่าใช้จ่ายในส่วนของการผลิตและการติดตั้งและเสนอวิธีการสอบเทียบและวิธีการปรับแก้ความผิดพลาดในการสะท้อนแสงของเฮลิโอสแตทต้นทุนต่ำจากผลของการผลิตและการติดตั้งนั้น วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ทำเพื่อตรวจสอบสมมติฐานของวิธีการสอบเทียบและวิธีการปรับแก้ที่ได้มีการนำเสนอไว้ก่อนหน้านี้, ทดสอบประสิทธิภาพของวิธีการสอบเทียบและวิธีการปรับแก้ในสภาพแวดล้อมจริงและประดิษฐ์โปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับจำลองการสะท้อนแสงของเฮลิโอสแตทต้นทุนต่ำในสภาพแวดล้อมจริงเพื่อหาเงื่อนไขที่ทำให้การปรับแก้ความผิดพลาดในการสะท้อนแสงมีประสิทธิภาพสูงที่สุด การตรวจสอบสมมติฐานของวิธีการสอบเทียบและวิธีการปรับแก้ทำโดยการจำแนกปัจจัยความคลาดเคลื่อนต่างๆ ที่มีผลต่อการสะท้อนแสงของเฮลิโอสแตทต้นทุนต่ำและจำลองผลกระทบที่เกิดขึ้นด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ผลจากการจำลองเราพบว่าความคลาดเคลื่อนของทิศทางวางตัวเริ่มต้นของกระจกเป็นปัจจัยที่ทำให้เกิดความผิดพลาดในการสะท้อนแสงสูงที่สุดซึ่งสอดคล้องกับสมมติฐานของวิธีการสอบเทียบและวิธีการปรับแก้ การทดสอบผลของวิธีการสอบเทียบและวิธีการปรับแก้ความผิดพลาดในการสะท้อนแสงของเฮลิโอสแตทต้นทุนต่ำในสภาพแวดล้อมจริง (จำนวนจุดสอบเทียบ 485 จุดสอบเทียบ ระยะเวลาของเวลา (interval) ที่ใช้ในเก็บข้อมูลการสอบเทียบเท่ากับ 5 นาที) เราพบว่าวิธีการสอบเทียบและวิธีการปรับแก้วิธีนี้สามารถลดความผิดพลาดในการสะท้อนแสงลงได้ประมาณ 5.8 เท่า และสุดท้ายผลจากการจำลองการสอบเทียบและการปรับแก้ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อหาเงื่อนไขที่ทำให้การปรับแก้ความผิดพลาดในการสะท้อนแสงของเฮลิโอสแตทต้นทุนต่ำมีประสิทธิภาพสูงที่สุด เราพบว่าจุดสอบเทียบจำนวน 40 จุดสอบเทียบและระยะเวลาของเวลา (interval) ในการเก็บข้อมูลการสอบเทียบเท่ากับ 60 นาที จะทำให้การปรับแก้มีประสิทธิภาพสูงที่สุด

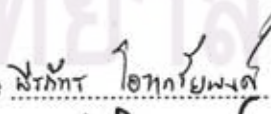
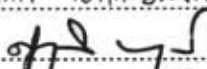
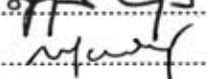
ภาควิชา... วิศวกรรมเครื่องกล... ลายมือชื่อนิสิต... พีรภัทร โอวาทชัยพงศ์  
 สาขาวิชา... วิศวกรรมเครื่องกล... ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก... ศุภวุฒิ จันทร์พานิชย์  
 ปีการศึกษา... 2552... ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม... สวัสดิ์ เหลืองเรืองฤทธิ์

## 4970485121 : MAJOR MECHANICAL ENGINEERING

KEYWORDS : SOLAR ENERGY / HELIOSTAT / CENTRAL RECEIVER / TARGETING ACCURACY / CALIBRATION

PEERAPAT OWATCHAIYAPONG : SIMULATING AND IMPROVING TARGETING ACCURACY FOR HELIOSTATS WITH INSTALLATION AND TRANSMISSION ERROR. THESIS ADVISOR : ASST.PROF. SUPAVUT CHANTRANUWATHANA, Ph.D., THESIS CO-ADVISOR : SAWAT LUENGRUENGRIT, D.Eng., 109 pp.

A central receiver system is a type of solar plant. It consists of many heliostats (reflectors) and one receiver. Heliostats are used to automatically reflect the sunlight to the receiver. The receiver collects and converts them to the other form of energy such as electrical and heat. The central receiver system has a huge potential but the system's initial cost is high. For example, the Solar Tres power plant that can produce 15 MW of electricity has the initial cost about 58 million Euro. As much as 30-50% of the initial cost is construction and installation cost of the heliostat system. To reduce cost of the system, our team proposed to use low-cost heliostats and applying a calibration and compensation method to decrease the error of heliostat's reflection that caused by the reduction of construction and installation cost. This thesis was proposed to verify the assumption of calibration and compensation method, to test the performance of this method in an experiment, and to write a computer program to find conditions for good performance of the calibration and compensation method. To verify the assumption of our method, we identified error sources that influence the accuracy of the reflection of the low-cost heliostat and simulate the result of those sources by a computer program. The simulation results showed that the initial mirror direction error is the dominating source of error which validated our assumption used in the calibration and compensation method. The experimental results in a simulated environment using 485 calibration points with 5 minute interval shown that our method can reduce the targeting error by 5.8 times. Furthermore, the simulation results found a good condition for the calibration and compensation method with 40 calibration points with 60 minute interval.

Department : .....	Mechanical Engineering	Student's Signature	
Field of Study : .....	Mechanical Engineering	Advisor's Signature	
Academic Year : .....	2009	Co-Advisor's Signature	

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ ด้วยความช่วยเหลือของผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศุภวุฒิ จันทรานูวัฒน์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ดร.สวัสดิ์ เหลืองเรืองฤทธิ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมชาย เกียรติกมลชัย อาจารย์ประจำภาควิชาฟิสิกส์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ผู้เป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์และเป็นหัวหน้าโครงการศึกษา ออกแบบ และสร้างต้นแบบเตาเผาสุริยะอุณหภูมิสูงซึ่งเป็นโครงการที่สนับสนุนการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ของข้าพเจ้า ท่านทั้ง 3 ได้เสียสละเวลาให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นต่างๆ ที่ทำให้ข้าพเจ้าเห็นแนวทางในการทำวิทยานิพนธ์และช่วยเหลือข้าพเจ้าทางด้านทุนทรัพย์ อุปกรณ์ และเครื่องมือต่างๆ สำหรับการทำวิทยานิพนธ์ และท่านทั้ง 3 ยังเป็นผู้ที่คอยให้โอกาสและให้ภัยต่อความผิดพลาดต่างๆ ของข้าพเจ้าที่เกิดขึ้นระหว่างการทำวิทยานิพนธ์ข้าพเจ้าจึงใคร่ขอขอบพระคุณไว้ ณ ที่นี้

ขอขอบพระคุณ ดร.นักษิทธิ์ นุ่มวงษ์ ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์และรองศาสตราจารย์ ดร.ประกอบ สุรวัฒนาวรรณ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ที่ได้สละเวลาตรวจสอบและให้คำแนะนำเพื่อให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สมบูรณ์ยิ่งขึ้นและขอขอบพระคุณคณาจารย์ทุกท่านในภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลที่ได้ประสิทธิ์ประสาทความรู้ต่างๆ อันเป็นความรู้พื้นฐานในการศึกษาและการทำวิทยานิพนธ์นี้

ขอกราบขอบพระคุณครอบครัวของข้าพเจ้าที่คอยเป็นกำลังใจ เป็นผู้สนับสนุนทุนทรัพย์สำหรับการศึกษาต่อในระดับปริญญาโท และเป็นที่ปรึกษาทั้งเรื่องภายในและเรื่องภายนอกมหาวิทยาลัยซึ่งทำให้ข้าพเจ้าสามารถทำวิทยานิพนธ์นี้จนสำเร็จ ขอกราบขอบพระคุณ น.ส.สิรินี โอวาทชัยพงศ์ (โกวเล็ก) ที่เป็นกำลังใจให้ข้าพเจ้าทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จนสำเร็จลุล่วงถึงแม้ว่าท่านจะจากข้าพเจ้าไปอย่างกะทันหันแล้วก็ตาม

สุดท้ายนี้ขอขอบคุณเพื่อนๆ รุ่นพี่ รุ่นน้องในห้องปฏิบัติการเตาเผาสุริยะอุณหภูมิสูง ภาควิชาฟิสิกส์และห้องปฏิบัติการหุ่นยนต์ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลที่คอยให้คำปรึกษาจนข้าพเจ้าสามารถทำวิทยานิพนธ์นี้ได้สำเร็จสมบูรณ์

ศูนย์วิจัยและพัฒนา  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญภาพ.....	ฎ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 ปัญหาและที่มาของงานวิจัย.....	2
1.3 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	3
1.4 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์.....	3
1.5 ขั้นตอนการดำเนินงาน.....	4
1.6 ประโยชน์ที่ได้รับ.....	5
1.7 โครงสร้างของวิทยานิพนธ์.....	5
2 ระบบตัวรับแสงส่วนกลางและการพัฒนาระบบตัวรับแสงส่วนกลางด้วยการ ลดค่าใช้จ่ายในการสร้างระบบ.....	7
2.1 ระบบพลังงานทดแทนแบบตัวรับแสงส่วนกลาง.....	7
2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องในการพัฒนาและปรับปรุงระบบตัวรับแสงส่วนกลาง.....	9
2.3 แนวทางที่ใช้ในการพัฒนาและปรับปรุงระบบตัวรับแสงส่วนกลางของโครงการ ศึกษา ออกแบบและสร้างต้นแบบเตาเผาสุริยะอุณหภูมิสูง.....	15
2.4 สรุป.....	16

3	วิธีการสอบเทียบและวิธีการปรับแก้ความผิดพลาดในการสะท้อนแสง.....	17
3.1	หลักการทํางานของเฮลิโอสแตทต้นทูนต่ำ.....	17
3.2	วิธีการสอบเทียบและวิธีการปรับแก้.....	18
3.2	อุปกรณ์และขั้นตอนของการสอบเทียบ.....	21
3.3	การทดสอบวิธีการสอบเทียบและวิธีการปรับแก้ในสภาพแวดล้อมจริง.....	22
4	<b>เฮลิโอสแตทต้นทูนต่ำและปัจจัยความคลาดเคลื่อนต่างๆ ที่ทำให้เกิดความผิดพลาดในการสะท้อนแสงของเฮลิโอสแตทต้นทูนต่ำ.....</b>	<b>24</b>
4.1	ระบบตัวรับแสงส่วนกลางที่โครงการศึกษา ออกแบบ และสร้างต้นแบบเตาเผาสุริยะอุณหภูมิสูงสนใจ.....	24
4.2	เฮลิโอสแตทต้นทูนต่ำ.....	25
4.3	ความคลาดเคลื่อนแบบต่างๆ ของเฮลิโอสแตทต้นทูนต่ำ.....	28
4.3.1	ความคลาดเคลื่อนของทิศทางแสงอาทิตย์เนื่องจากการคำนวณ.....	29
4.3.2	ความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งกึ่งกลางกระจกเนื่องจากการติดตั้ง.....	33
4.3.3	ความคลาดเคลื่อนของทิศการวางตัวเริ่มต้นของกระจกเนื่องจากการติดตั้ง.....	40
4.3.4	ความคลาดเคลื่อนของระบบขับเคลื่อนเนื่องจากการผลิตและการประกอบ.....	46
4.3.5	ความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งกึ่งกลางกระจกเนื่องจากการผลิตชิ้นส่วนและการประกอบ.....	51
4.4	สรุปผลของความคลาดเคลื่อนแบบต่างๆ ต่อการสะท้อนแสงของเฮลิโอสแตทต้นทูนต่ำ.....	55
5	<b>การสอบเทียบและการปรับแก้การสะท้อนแสงของเฮลิโอสแตทต้นทูนต่ำในสภาพแวดล้อมจริงและการจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์.....</b>	<b>57</b>
5.1	การทดสอบวิธีการสอบเทียบและวิธีการปรับแก้การสะท้อนแสงของเฮลิโอสแตทต้นทูนต่ำในสภาพแวดล้อมจริง.....	57
5.2	การจำลองการสอบเทียบและการปรับแก้การสะท้อนแสงของเฮลิโอสแตทต้นทูนต่ำด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์.....	61



บทที่	หน้า
5.2.1 การจำลองผลการสอบเทียบและการปรับแก้การสะท้อนแสงของเฮลิ- โอสเตทต้นทุนต่ำตลอดทั้งปีด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์.....	64
5.2.2 การหาจำนวนจุดสอบเทียบและระยะเวลาในการสอบเทียบที่เหมาะสม ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์.....	71
5.3 สรุป.....	77
<b>6 บทสรุปและข้อเสนอแนะ.....</b>	<b>78</b>
6.1 บทสรุป.....	78
6.2 ข้อเสนอแนะ.....	80
<b>รายการอ้างอิง.....</b>	<b>82</b>
<b>ภาคผนวก.....</b>	<b>83</b>
<b>ภาคผนวก ก.....</b>	<b>84</b>
วิธีการคำนวณทิศทางของแสงอาทิตย์และโปรแกรม PSA.....	85
<b>ภาคผนวก ข.....</b>	<b>89</b>
โปรแกรมที่ใช้ในการจำลองการสอบเทียบและการปรับแก้การสะท้อนแสงของ เฮลิโอสเตทต้นทุนต่ำ.....	90
<b>ภาคผนวก ค.....</b>	<b>99</b>
โปรแกรมที่ใช้สอบเทียบและปรับแก้การสะท้อนแสงของเฮลิโอสเตทต้นทุนต่ำใน สภาพแวดล้อมจริง.....	100
<b>ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....</b>	<b>109</b>

## สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	ค่าความผิดพลาดที่ยอมรับของการผลิตและการติดตั้งเฮลิโอสแตทต้นทุ่นต่ำของ Baheti.....	14
3.1	ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนข้อมูลที่ต้องใช้ในการประมาณค่า $R$ กับขอบเขตความผิดพลาดของความผิดพลาดของข้อมูล $m'$ .....	20
4.1	ค่าความคลาดเคลื่อนของทิศทางของแสงอาทิตย์ที่คำนวณได้จาก PSA algorithm เมื่อเปรียบเทียบกับทิศทางของแสงอาทิตย์ที่ได้จาก MICA ตั้งแต่ปี 1999-2015.....	31
4.2	ค่าระยะทางระหว่างตำแหน่งแสงสะท้อนจริงและตำแหน่งเป้าหมาย.....	32
4.3	ระยะความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งกึ่งกลางกระจกเนื่องจากการติดตั้ง ( $\Delta d$ ).	35
4.4	ค่าเฉลี่ย (average) และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD) ของค่าความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งกึ่งกลางกระจกเนื่องจากการติดตั้งในแนวแกนต่างๆ.....	36
4.5	ค่าระยะทางระหว่างตำแหน่งแสงสะท้อนจริงและตำแหน่งเป้าหมาย.....	37
4.6	ค่าความคลาดเคลื่อนของทิศการวางตัวเริ่มต้นของกระจกในแนวมุมกวาด (azimuth angle's error, $\Delta\theta_{az}$ ) เทียบกับทิศใต้.....	41
4.7	ค่าความคลาดเคลื่อนของทิศการวางตัวเริ่มต้นของกระจกในแนวมุมเงย (altitude angle's error, $\Delta\theta_{al}$ ) เทียบกับแนวระนาบ xy.....	42
4.8	ค่าเฉลี่ย (average) และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD) ของค่าความคลาดเคลื่อนของทิศการวางตัวเริ่มต้นของกระจกเนื่องจากการติดตั้งในแนวมุมกวาด ( $\Delta\theta_{az}$ ) และในแนวมุมเงย ( $\Delta\theta_{al}$ ).....	43
4.9	ค่าระยะทางระหว่างตำแหน่งแสงสะท้อนจริงและตำแหน่งเป้าหมาย.....	43
4.10	ค่าเฉลี่ย (average) และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD) ของค่าความผิดพลาดของมุมการหมุนเนื่องจากความไม่แน่นอนในการหมุนของสเต็ปเปอร์มอเตอร์....	48
4.11	ค่าระยะทางระหว่างตำแหน่งแสงสะท้อนจริงและตำแหน่งเป้าหมาย.....	49
4.12	ค่าความคลาดเคลื่อนของชิ้นส่วนที่วัดได้ในแนวแกน x y และ z.....	52

ตารางที่	หน้า	
4.13	ค่าเฉลี่ย (average) และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD) ของค่าความคลาดเคลื่อน ของแต่ละชิ้นส่วนในแต่ละแนวแกน.....	53
4.14	ค่าระยะทางระหว่างตำแหน่งแสงสะท้อนจริงและตำแหน่งเป้าหมาย.....	54
4.15	ผลของปัจจัยความคลาดเคลื่อนต่างๆ ต่อการสะท้อนแสงของเฮลิโอสแตทต้น ทุนต่ำ.....	56
5.1	ค่าระยะทางระหว่างตำแหน่งแสงสะท้อนจริงกับตำแหน่งเป้าหมายที่ได้รับการ ปรับแก้และไม่ได้รับการปรับแก้.....	61
5.2	ค่าความคลาดเคลื่อนต่างๆ ของเฮลิโอสแตทที่สามารถวัดได้.....	65
5.3	ผลการสอบเทียบและการปรับแก้การสะท้อนแสงของเฮลิโอสแตทต้นทุนต่ำด้วย โปรแกรมคอมพิวเตอร์.....	66
5.4	ค่า $\Delta\theta_{az}$ และ $\Delta\theta_{el}$ ที่คำนวณได้จากพจน์ต่างๆ ของค่า $R_{est}$ จากการจำลอง ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์, จากการสอบเทียบในสภาพแวดล้อมจริงและจาก การวัด.....	70
5.5	ค่าความคลาดเคลื่อนต่างๆ ที่มีผลต่อการสะท้อนแสงและการสอบเทียบของ เฮลิโอสแตทต้นทุนต่ำที่ใช้ในการจำลอง.....	72



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
2.1	(ก) เฮลิโอสแตท และ (ข) ตัวรับแสง (receiver).....	7
2.2	โรงไฟฟ้า Solar Tres.....	8
2.3	เฮลิโอสแตทที่ใช้กระจกผิวโค้งเป็นตัวสะท้อนแสง (Umuwa Solar Power Station).....	10
2.4	(ก) ลักษณะของโครงสร้างแบบแผ่นที่ยึดได้ที่ใช้ทำตัวสะท้อนแสง และ (ข) เฮลิโอสแตทของ Alpert.....	11
2.5	ทิศของแกนการหมุนของกระจกแต่ละบาน.....	12
2.6	เฮลิโอสแตทของ Chen (Non-focusing heliostat).....	13
2.7	เฮลิโอสแตทต้นทุ่นต่ำของ Baheti .....	14
3.1	การสะท้อนแสงของเฮลิโอสแตทต้นทุ่นต่ำตามกฎหมายของการสะท้อนแสง.....	17
3.2	ฉากสอบเทียบ.....	21
3.3	ผลการทดสอบวิธีการสอบเทียบและวิธีการปรับแก้.....	22
4.1	ระบบตัวรับแสงส่วนกลางที่โครงการวิจัยนี้สนใจ.....	25
4.2	drawing ของโครงสร้างของเฮลิโอสแตทต้นทุ่นต่ำ.....	26
4.3	(ก) วิธีการควบคุมทิศการสะท้อนแสงของเฮลิโอสแตทต้นทุ่นต่ำและ (ข) ชุดขับเคลื่อนสำหรับเฮลิโอสแตทต้นทุ่นต่ำ.....	27
4.4	ระบบที่ใช้ในการทดสอบผลของปัจจัยความคลาดเคลื่อนต่างๆ ต่อการสะท้อนแสง ของเฮลิโอสแตท.....	29
4.5	ผลของความคลาดเคลื่อนของทิศทางของแสงอาทิตย์ต่อการสะท้อนแสงของเฮลิ- โอสแตทต้นทุ่นต่ำ.....	30
4.6	ระบบพิกัดเชิงมุม (angular coordinate) สำหรับแสดงทิศทางของแสงอาทิตย์ ที่คำนวณได้จาก PSA algorithm.....	31
4.7	ตัวอย่างการจำลองผลของปัจจัยความคลาดเคลื่อนของทิศทางของแสงอาทิตย์ต่อ การสะท้อนแสงของเฮลิโอสแตทต้นทุ่นต่ำตลอดทั้งปี.....	33

ภาพที่	หน้า	
4.8	ผลของความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งกึ่งกลางกระจกต่อการสะท้อนแสงของเฮลิโอสแตทต้นทุ่นต่ำ.....	34
4.9	ตัวอย่างของอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดตำแหน่งด้วยวิธี EDM.....	35
4.10	(ก) ตัวอย่างผลการจำลองผลของปัจจัยความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งกึ่งกลางกระจกต่อการสะท้อนแสงของเฮลิโอสแตทต้นทุ่นต่ำตลอดทั้งปี, (ข) ตัวอย่างผลการสะท้อนแสงของเฮลิโอสแตทต้นทุ่นต่ำเมื่อตำแหน่งกึ่งกลางกระจกคลาดเคลื่อนในแนวแกน x, (ค) ตัวอย่างผลการสะท้อนแสงของเฮลิโอสแตทต้นทุ่นต่ำเมื่อตำแหน่งกึ่งกลางกระจกคลาดเคลื่อนในแนวแกน y และ (ง) ตัวอย่างผลการสะท้อนแสงของเฮลิโอสแตทต้นทุ่นต่ำเมื่อตำแหน่งกึ่งกลางกระจกคลาดเคลื่อนในแนวแกน z.....	38
4.11	ผลของความคลาดเคลื่อนของทิศทางวางตัวเริ่มต้นของกระจกต่อการสะท้อนแสงของเฮลิโอสแตทต้นทุ่นต่ำ.....	40
4.12	(ก) ตัวอย่างผลการจำลองผลของปัจจัยความคลาดเคลื่อนของทิศทางวางตัวเริ่มต้นของกระจกต่อการสะท้อนแสงของเฮลิโอสแตทต้นทุ่นต่ำตลอดทั้งปี, (ข) ตัวอย่างผลการสะท้อนแสงของเฮลิโอสแตทต้นทุ่นต่ำเมื่อทิศทางวางตัวเริ่มต้นของกระจกคลาดเคลื่อนในแนวมุมกวาด (azimuth angle's error) และ (ค) ตัวอย่างผลการสะท้อนแสงของเฮลิโอสแตทต้นทุ่นต่ำเมื่อทิศทางวางตัวเริ่มต้นของกระจกคลาดเคลื่อนในแนวมุมเงย (altitude angle's error).....	44
4.13	(ก) ตัวอย่างผลการจำลองผลของปัจจัยความคลาดเคลื่อนของระบบขับเคลื่อนต่อการสะท้อนแสงของเฮลิโอสแตทต้นทุ่นต่ำตลอดทั้งปีและ (ข) ผลของค่า phase shift ของค่า $\Delta\theta_{tolerance}$ ต่อการสะท้อนแสงของเฮลิโอสแตทต้นทุ่นต่ำ.....	50
4.14	ตำแหน่งชิ้นส่วนต่างๆ ของเฮลิโอสแตทต้นทุ่นต่ำที่มีผลต่อตำแหน่งกึ่งกลางกระจก.....	52
4.15	ตัวอย่างการจำลองการสะท้อนแสงของเฮลิโอสแตทต้นทุ่นต่ำตลอดทั้งปี.....	55
5.1	ตำแหน่งของเฮลิโอสแตทต้นทุ่นต่ำและอุปกรณ์สอบเทียบ.....	58
5.2	ผลการแสงสะท้อนของเฮลิโอสแตทต้นทุ่นต่ำที่ได้รับปรับแก้และไม่ได้รับการปรับแก้.....	60
5.3	(ก) รูปจากการถ่ายภาพ และ (ข) รูปจากการกรองแยก (filtering).....	62

ภาพที่	หน้า
5.4 ตำแหน่งพิกเซลของแสงสะท้อนจริงในฉากสอบเทียบ.....	63
5.5 ตำแหน่งของเวกเตอร์ A, B และ $P'$ บนฉากสอบเทียบ.....	63
5.6 (ก) ตัวอย่างการสะท้อนแสงของเฮลิโอสแตทต้นทุนต่ำที่ได้จากโปรแกรมคอมพิวเตอร์ และ (ข) การสะท้อนแสงของเฮลิโอสแตทต้นทุนต่ำในสภาพแวดล้อมจริง.....	68
5.7 (ก) การลู่เข้า (convergence) ของค่าผลต่าง ( $\Delta R_{est}$ ) ของ $R_{est}$ ตัวปัจจุบันและตัวที่คำนวณได้ก่อนหน้าที่มีระยะเวลา (interval) ที่ใช้ในการถ่ายภาพเท่ากับ 5, 10, 15, 20 และ 25 นาที, (ข) การลู่เข้า (convergence) ของค่าผลต่าง ( $\Delta R_{est}$ ) ของ $R_{est}$ ตัวปัจจุบันและตัวที่คำนวณได้ก่อนหน้าที่มีระยะเวลา (interval) ที่ใช้ในการถ่ายภาพเท่ากับ 30, 35, 40, 45 และ 50 นาที และ (ค) การลู่เข้า (convergence) ของค่าผลต่าง ( $\Delta R_{est}$ ) ของ $R_{est}$ ตัวปัจจุบันและตัวที่คำนวณได้ก่อนหน้าที่มีระยะเวลา (interval) ที่ใช้ในการถ่ายภาพเท่ากับ 55, 60, 120, 180 และ 240 นาที.....	74
5.8 (ก) ผลการปรับแก้ความผิดพลาดของการสะท้อนแสงที่มีระยะเวลา (interval) ที่ใช้ในการถ่ายภาพสำหรับการสอบเทียบเท่ากับ 5, 10, 15, 20 และ 25 นาที, (ข) ผลการปรับแก้ความผิดพลาดของการสะท้อนแสงที่มีระยะเวลา (interval) ที่ใช้ในการถ่ายภาพสำหรับการสอบเทียบเท่ากับ 30, 35, 40, 45 และ 50 นาที และ (ค) ผลการปรับแก้ความผิดพลาดของการสะท้อนแสงที่มีระยะเวลา (interval) ที่ใช้ในการถ่ายภาพสำหรับการสอบเทียบเท่ากับ 55, 60, 120, 180 และ 240 นาที.....	76
ก.1 ระบบพิกัดเชิงมุม (angular coordinate) สำหรับแสดงทิศทางของแสงอาทิตย์ที่คำนวณได้จาก PSA algorithm.....	85

## บทที่ 1 บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

โครงการศึกษา ออกแบบ และสร้างต้นแบบเตาเผาสุริยะอุณหภูมิสูงต้องการสร้างเตาเผาสุริยะอุณหภูมิสูงที่ใช้ระบบพลังงานทดแทนแบบระบบตัวรับแสงส่วนกลาง (Central receiver) ที่ใช้พลังงานจากแสงอาทิตย์เป็นแหล่งพลังงาน แต่จากการศึกษาพบว่าระบบตัวรับแสงส่วนกลางที่โครงการวิจัยนี้สนใจมีค่าใช้จ่ายในการสร้างระบบสูง เพื่อทำการปรับปรุงระบบให้มีค่าใช้จ่ายในการสร้างระบบลดลงจึงได้ทำการศึกษาระบบตัวรับแสงส่วนกลางที่สนใจนี้โดยละเอียด

ระบบตัวรับแสงส่วนกลาง (Central receiver) โดยทั่วไปจะประกอบด้วยตัวสะท้อนแสงที่เรียกว่า "เฮลิโอสแตท" จำนวนมากและตัวรับแสงที่มีลักษณะเป็นหอคอยทรงสูง 1 หอคอย เฮลิโอสแตทที่ใช้ในระบบจะทำงานแบบอัตโนมัติโดยทำหน้าที่สะท้อนแสงอาทิตย์ไปยังตัวรับแสง ตัวรับแสงทำหน้าที่รับแสงที่สะท้อนมาและเปลี่ยนแสงสะท้อนไปเป็นพลังงานในรูปแบบต่างๆ เพื่อนำไปใช้งาน เช่น พลังงานไฟฟ้าและพลังงานความร้อน เป็นต้น

สำหรับการสร้างระบบเตาเผาสุริยะอุณหภูมิสูงจะต้องคำนึงถึงปริมาณพลังงานที่ระบบตัวรับแสงส่วนกลางผลิตได้ ปริมาณพลังงานของระบบจะขึ้นอยู่กับจำนวนและความแม่นยำในการสะท้อนแสงของเฮลิโอสแตทที่ใช้ในระบบ สำหรับเฮลิโอสแตทที่ทำงานแบบอัตโนมัติที่ต้องการให้ความแม่นยำในการสะท้อนแสงจะต้องมีการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดและอุปกรณ์ป้อนกลับ (feedback sensor) และต้องมีความแม่นยำในการผลิตและการติดตั้งเฮลิโอสแตท ซึ่งเงื่อนไขต่างๆ เหล่านี้ทำให้ค่าใช้จ่ายในการผลิตเฮลิโอสแตทสูงขึ้น

จากการศึกษาพบว่า 30-50% ของค่าใช้จ่ายทั้งหมดที่ในการสร้างระบบมาจากค่าใช้จ่ายในการผลิตและติดตั้งเฮลิโอสแตท นักวิจัยของโครงการวิจัยนี้จึงได้เสนอให้ใช้เฮลิโอสแตทต้นทุนต่ำที่ลดค่าใช้จ่ายในส่วนของการผลิตและการติดตั้งและได้เสนอวิธีการสอบเทียบและวิธีการปรับแก้เพื่อปรับแก้ความผิดพลาดในการสะท้อนแสงของเฮลิโอสแตทต้นทุนต่ำที่เกิดจากการลดค่าใช้จ่ายในส่วนของการผลิตและการติดตั้งและทำการทดสอบผลการปรับแก้ของวิธีการดังกล่าวในสภาพแวดล้อมจริง

ผลของการทดสอบการสอบเทียบและการปรับแก้ที่ได้ไม่สอดคล้องกับสมมุติฐานที่ตั้งไว้ [1] ทำให้นักวิจัยของโครงการวิจัยนี้ไม่สามารถนำวิธีการสอบเทียบและวิธีการปรับแก้ไปใช้สร้างระบบตัวรับแสงส่วนกลางได้ ผู้วิจัยซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของโครงการศึกษา ออกแบบ และสร้างต้นแบบเตาเผาสุริยะจึงได้ทำการศึกษาวิธีการสอบเทียบและวิธีการปรับแก้ที่นักวิจัยของโครงการวิจัยนี้ได้นำเสนอไว้เพื่อที่จะยืนยันความถูกต้องของวิธีการสอบเทียบและวิธีการปรับแก้นี้ เพราะผู้วิจัยเชื่อว่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นน่าจะมาจากความคลาดเคลื่อนระหว่างการทดสอบ

## 1.2 ปัญหาและที่มาของงานวิจัย

วิธีการสอบเทียบและวิธีการปรับแก้ที่เสนอโดยนักวิจัยของโครงการศึกษา ออกแบบ และสร้างต้นแบบเตาเผาสุริยะนี้มีผลการทดสอบการปรับแก้ความผิดพลาดในการสะท้อนแสงของเฮลิโอสแตทในสภาพแวดล้อมจริงไม่สอดคล้องกับสมมุติฐานที่ได้ตั้งไว้ ทำให้นักวิจัยที่เป็นส่วนหนึ่งของโครงการวิจัยนี้ต้องการจะศึกษาวิธีการสอบเทียบและวิธีการปรับแก้เพื่อที่จะยืนยันความถูกต้องของวิธีดังกล่าวและทดสอบประสิทธิภาพของการปรับแก้ในสภาพแวดล้อมจริง

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีจุดประสงค์ที่จะยืนยันความถูกต้องของวิธีการสอบเทียบและวิธีการปรับแก้นี้ เพื่อที่จะสามารถนำเฮลิโอสแตทต้นทุนต่ำและวิธีการสอบเทียบและวิธีการปรับแก้ไปใช้งานจริงได้ การยืนยันความถูกต้องของวิธีการสอบเทียบและวิธีการปรับแก้ทำโดยเริ่มจากการจำแนกปัจจัยความคลาดเคลื่อนต่างๆ ที่มีผลต่อการสะท้อนแสงของเฮลิโอสแตทต้นทุนต่ำ จากนั้นจะทำการจำลองผลของปัจจัยเหล่านั้นต่อความผิดพลาดในการสะท้อนแสงของเฮลิโอสแตทเพื่อที่จะตรวจสอบความถูกต้องของสมมุติฐานที่นักวิจัยของโครงการวิจัยนี้ใช้เสนอวิธีการสอบเทียบและวิธีการปรับแก้

หลังจากที่สามารถยืนยันความถูกต้องของสมมุติฐานที่ใช้ในการนำเสนอวิธีการสอบเทียบและวิธีการปรับแก้ได้แล้ว ผู้วิจัยจะทำการทดสอบผลของวิธีการสอบเทียบและวิธีการปรับแก้ความผิดพลาดในการสะท้อนแสงของเฮลิโอสแตทต้นทุนต่ำในสภาพแวดล้อมจริง เพื่อศึกษาผลของการปรับแก้การความผิดพลาดในการสะท้อนแสงที่เกิดขึ้น

สุดท้ายจะทำการประดิษฐ์โปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อใช้ในการจำลองการสอบเทียบและการปรับแก้ความผิดพลาดในการสะท้อนแสงของเฮลิโอสแตทต้นทุนต่ำ โปรแกรมคอมพิวเตอร์จะ



ถูกใช้ในการจำลองการสะท้อนของเฮลิโอสแตทต้นทุนต่ำเพื่อศึกษาผลการปรับแก้ความผิดพลาดในการสะท้อนแสงตลอดทั้งปีแทนการทดสอบจริง และยังถูกใช้ในการจำลองการสะท้อนแสงเพื่อหาค่าตัวแปรต่างๆ ที่เหมาะสมที่ทำให้วิธีการสอบเทียบและวิธีการปรับแก้มีประสิทธิภาพสูงที่สุดในการปรับแก้ความผิดพลาดในการสะท้อนแสงของเฮลิโอสแตทต้นทุนต่ำ

### 1.3 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อยืนยันความถูกต้องของสมมุติฐานที่นักวิจัยของโครงการศึกษา ออกแบบ และสร้างต้นแบบเตาเผาสุริยะอุณหภูมิสูงใช้ในการนำเสนอวิธีการสอบเทียบและวิธีการปรับแก้ ด้วยการจำแนกและจำลองผลของปัจจัยความคลาดเคลื่อนต่างๆ ต่อการสะท้อนแสงของเฮลิโอสแตทต้นทุนต่ำ
2. เพื่อทดสอบประสิทธิภาพของวิธีการสอบเทียบและวิธีการปรับในสภาพแวดล้อมจริง
3. เพื่อศึกษาผลของการปรับแก้ความผิดพลาดในการสะท้อนแสงของเฮลิโอสแตทต้นทุนต่ำตลอดทั้งปี
4. เพื่อศึกษาหาค่าตัวแปรต่างๆ ที่เหมาะสมที่ทำให้วิธีการสอบเทียบและวิธีการปรับแก้มีประสิทธิภาพสูงที่สุดในการปรับแก้ความผิดพลาดในการสะท้อนแสง

### 1.4 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์

1. ศึกษาและจำลองผลของความคลาดเคลื่อนต่างๆ ที่เกิดขึ้นในเฮลิโอสแตทต้นทุนต่ำต่อความผิดพลาดในการสะท้อนแสงด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์และหาความคลาดเคลื่อนที่ทำให้เกิดความผิดพลาดสูงที่สุดในการสะท้อนของเฮลิโอสแตทต้นทุนต่ำ
2. ทดสอบผลของวิธีการสอบเทียบและวิธีการปรับแก้ความผิดพลาดในการสะท้อนของเฮลิโอสแตทต้นทุนต่ำที่นักวิจัยของโครงการศึกษา ออกแบบ และสร้างต้นแบบเตาเผาสุริยะอุณหภูมิสูงได้นำเสนอไว้ในสภาพแวดล้อมจริง

3. หามผลของการปรับแก้ความผิดพลาดในการสะท้อนแสงของเฮลิโอสแตทต้นทุนต่ำตลอดทั้งปีด้วยการจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

4. หาค่าตัวแปรต่างๆ ที่เหมาะสมที่ทำให้วิธีการสอบเทียบและวิธีการปรับแก้มีประสิทธิภาพสูงที่สุดในการปรับแก้ความผิดพลาดในการสะท้อนแสงของเฮลิโอสแตทต้นทุนต่ำด้วยการจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

### 1.5 ขั้นตอนการดำเนินงาน

1. ศึกษางานวิจัยที่ผ่านมาเพื่อเป็นประโยชน์ในการจำแนกปัจจัยความคลาดเคลื่อนต่างๆ ที่เกิดขึ้นเนื่องจากการลดค่าใช้จ่ายของเฮลิโอสแตทต้นทุนต่ำในส่วนของการผลิตและการติดตั้ง

2. ประดิษฐ์โปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อจำลองผลของความคลาดเคลื่อนต่างๆ ต่อการสะท้อนแสงของเฮลิโอสแตทต้นทุนต่ำ

3. ตรวจสอบวัดค่าความคลาดเคลื่อนต่างๆ ที่ได้จำแนกไว้ในระบบตัวรับแสงส่วนกลางที่ถูกจำลองขึ้นในพื้นที่ทดสอบเพื่อนำมาเป็นข้อมูลในการกำหนดค่าความคลาดเคลื่อนต่างๆ เพื่อใช้ในการจำลองผลของความคลาดเคลื่อนต่างๆ ต่อการสะท้อนแสงของเฮลิโอสแตทต้นทุนต่ำด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

4. จำลองผลของความคลาดเคลื่อนต่างๆ ต่อการสะท้อนแสงของเฮลิโอสแตทต้นทุนต่ำด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์และเปรียบเทียบผลของการสะท้อนแสงเหล่านั้นเพื่อใช้ในการยืนยันความถูกต้องของสมมุติฐานที่นักวิจัยของโครงการวิจัยนี้ใช้ในการนำเสนอวิธีการสอบเทียบและวิธีการปรับแก้

5. ทดสอบผลของวิธีการสอบเทียบและวิธีการปรับแก้ที่นักวิจัยของโครงการวิจัยนี้เสนอได้ในสภาพแวดล้อมจริง

6. ประดิษฐ์โปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ใช้ในการจำลองผลของวิธีการสอบเทียบและวิธีการปรับแก้ที่ได้ทดสอบมาแล้วนี้ในสภาพแวดล้อมจริงเพื่อทำนายผลของการสะท้อนแสงของเฮลิโอสแตทต้นทุนต่ำตลอดทั้งปีแทนการทดสอบจริง และเพื่อจำลองหาค่าตัวแปรต่างๆ ที่เหมาะสมที่

ทำให้วิธีการสอบเทียบและวิธีการปรับแก้ที่มีประสิทธิภาพสูงที่สุดในการปรับแก้ความผิดพลาดในการสะท้อนแสงของเฮลิโอสแตทต้นทุนต่ำ

## 1.6 ประโยชน์ที่ได้รับ

1. ค่าใช้จ่ายในการสร้างเฮลิโอสแตทลดลง
2. รู้ลำดับสำหรับการแก้ไขความผิดพลาดในการสะท้อนแสงของเฮลิโอสแตทต้นทุนต่ำ เนื่องจากผลของความคลาดเคลื่อนต่างๆ ต่อความผิดพลาดในการสะท้อนแสง
3. สามารถปรับปรุงผลของวิธีการสอบเทียบและวิธีการปรับแก้ให้มีประสิทธิภาพสูงที่สุดในการปรับแก้ความผิดพลาดในการสะท้อนแสงของเฮลิโอสแตทต้นทุนต่ำได้
4. สามารถทดสอบผลของวิธีการสอบเทียบและวิธีการปรับแก้แบบอื่นๆ ต่อการปรับแก้ความผิดพลาดในการสะท้อนแสงของเฮลิโอสแตทต้นทุนต่ำด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ประดิษฐ์ขึ้นก่อนทำการทดสอบในสภาพแวดล้อมจริงได้

## 1.7 โครงสร้างของวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์นี้ประกอบไปด้วยเนื้อหาทั้งหมด 6 บท และภาคผนวกอีก 3 บท โดยในแต่ละบทได้กล่าวถึงเนื้อหาดังต่อไปนี้

บทที่ 1 กล่าวถึงความเป็นมา ความสำคัญของปัญหา ขอบเขตวิทยานิพนธ์ ขั้นตอนการดำเนินงาน และประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการทำวิทยานิพนธ์

บทที่ 2 กล่าวถึงระบบตัวรับแสงส่วนกลางและการพัฒนาระบบตัวรับแสงส่วนกลางด้วยการลดค่าใช้จ่ายในการสร้างระบบ

บทที่ 3 กล่าวถึงวิธีการสอบเทียบและวิธีการปรับแก้ความผิดพลาดในการสะท้อนแสง

บทที่ 4 กล่าวถึงเฮลิโอสแตทต้นทุนต่ำและปัจจัยความคลาดเคลื่อนต่างๆ ที่ทำให้เกิดความผิดพลาดในการสะท้อนแสง

บทที่ 5 กล่าวถึงการทดสอบวิธีการสอบเทียบและวิธีการปรับแก้ความผิดพลาดในการสะท้อนแสงของเฮลิโอสแตทต้นทุนต่ำในสภาพแวดล้อมจริงและการทดสอบด้วยการจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

บทที่ 6 กล่าวถึงบทสรุปและข้อเสนอแนะในวิทยานิพนธ์นี้

ภาคผนวก ก แสดงวิธีการคำนวณทิศทางของแสงอาทิตย์และโปรแกรม PSA

ภาคผนวก ข แสดงโปรแกรมที่ใช้ในการจำลองการสอบเทียบและการปรับแก้การสะท้อนแสงของเฮลิโอสแตทต้นทุนต่ำ

ภาคผนวก ค แสดงโปรแกรมที่ใช้ทดสอบการสอบเทียบและการปรับแก้ความผิดพลาดในการสะท้อนแสงของเฮลิโอสแตทต้นทุนต่ำในสภาพแวดล้อมจริง



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 2

### ระบบตัวรับแสงส่วนกลางและการพัฒนาระบบตัวรับแสงส่วนกลางด้วยการลดค่าใช้จ่ายในการสร้างระบบ

ในบทนี้จะกล่าวถึงรายละเอียดต่างๆ ของระบบพลังงานทดแทนแบบตัวรับแสงส่วนกลาง ปัญหาของระบบตัวรับแสงส่วนกลางในด้านค่าใช้จ่ายในการสร้างระบบตัวรับแสงส่วนกลาง แนวทางในการลดเรื่องค่าใช้จ่ายของระบบ และแนวทางที่ใช้ในการพัฒนาระบบตัวรับแสงส่วนกลางของโครงการศึกษา ออกแบบและสร้างระบบเตาเผาสุริยะอุณหภูมิสูง

#### 2.1 ระบบพลังงานทดแทนแบบตัวรับแสงส่วนกลาง (Central Receiver)

ระบบพลังงานทดแทนแบบตัวรับแสงส่วนกลางหรือที่เรียกกันอีกชื่อหนึ่งว่าระบบ Central receiver เป็นระบบที่ใช้แสงจากดวงอาทิตย์เป็นแหล่งพลังงาน ระบบตัวรับแสงส่วนกลางนี้จะอาศัยการสะท้อนแสงในการผลิตพลังงาน ระบบประกอบด้วยตัวสะท้อนแสงหรือที่เรียกกันอีกชื่อหนึ่งว่า "เฮลิโอสแตท" จำนวนมาก และตัวรับแสงที่เรียกอีกชื่อหนึ่งว่า receiver จำนวน 1 ตัวที่มีลักษณะเป็นหอคอยทรงสูงโดยมากมักถูกล้อมรอบด้วยเฮลิโอสแตท ตัวอย่างของเฮลิโอสแตทและตัวรับแสงที่ใช้อยู่ในปัจจุบันถูกแสดงไว้ในรูปที่ 2.1(ก) และ (ข) ตามลำดับ



(ก)



(ข)

รูปที่ 2.1(ก) เฮลิโอสแตท และ (ข) ตัวรับแสง (receiver)

เฮลิโอสแตทแต่ละตัวจะทำงานแบบอัตโนมัติโดยทำหน้าที่สะท้อนแสงอาทิตย์ยังตัวรับแสง ตัวรับแสงจะทำหน้าที่รับแสงที่สะท้อนมาแล้วเปลี่ยนเป็นพลังงานในรูปแบบต่างๆ เช่น พลังงานไฟฟ้า หรือพลังงานความร้อนเป็นต้น ปริมาณพลังงานที่ผลิตได้จากระบบตัวรับแสงส่วนกลางนี้จะขึ้นอยู่กับความแม่นยำและจำนวนของเฮลิโอสแตทที่ใช้ในระบบ ตัวอย่างของระบบตัวรับแสงส่วนกลางที่ใช้สำหรับผลิตกระแสไฟฟ้าของโรงไฟฟ้า Solar Tree ในประเทศสเปน ถูกแสดงไว้ในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 โรงไฟฟ้า Solar Tree

ระบบตัวรับแสงส่วนกลางเป็นระบบที่สามารถประยุกต์ใช้กับงานด้านพลังงานได้หลายรูปแบบเนื่องจากเป็นระบบที่มีความสามารถในด้านการผลิตพลังงานต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ตัวสะท้อนแสงและการผลิตอุณหภูมิที่บริเวณจุดรวมแสงแต่ระบบตัวรับแสงส่วนกลางนี้ยังคงไม่ได้รับความนิยมในการใช้งานเท่าที่ควรเนื่องจากปัญหาเรื่องค่าใช้จ่ายในการสร้างระบบมีราคาสูง จากการเปรียบเทียบความสามารถในการผลิตพลังงานและอุณหภูมิที่จุดรวมแสงของระบบตัวรับแสงส่วนกลางกับระบบพลังงานทดแทนแบบอื่นๆ ที่อาศัยการสะท้อนแสงจากดวงอาทิตย์อย่างระบบ Parabolic Troughs และระบบ Parabolic Dishes พบว่าระบบตัวรับแสงส่วนกลางเป็นระบบที่สามารถผลิตพลังงานต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่การสะท้อนแสงของตัวสะท้อนแสงได้ปริมาณมาก และมีอุณหภูมิที่จุดรวมแสงสูงซึ่งเป็นข้อดีของระบบ Parabolic Troughs และระบบ Parabolic Dishes ตามลำดับ อย่างไรก็ตามปัญหาสำคัญของระบบตัวรับแสงส่วนกลางคือมีค่าใช้จ่ายในการสร้าง

ระบบสูง เนื่องจากจำเป็นจะต้องผลิตเฮลิโอสแตทจำนวนมากให้สะท้อนแสงไปยังตัวรับแสงได้อย่างแม่นยำ ในปัจจุบันค่าใช้จ่ายทั้งหมดในการสร้างระบบตัวรับแสงส่วนกลางเช่น โรงไฟฟ้า Solar Tres จะมีราคาอยู่ที่ประมาณ 58 ล้านยูโร และด้วยปัญหาทางด้านค่าใช้จ่ายนี้เองทำให้ระบบตัวรับแสงส่วนกลางไม่ได้รับความนิยมในการใช้งานเท่าที่ควร

เนื่องจากระบบตัวรับแสงส่วนกลางเป็นระบบที่สามารถประยุกต์ใช้ได้หลายรูปแบบดังที่ได้กล่าวมาแล้วในขั้นต้นแต่ยังไม่ได้รับความนิยมในการใช้งานเท่าที่ควรเนื่องจากปัญหาเรื่องค่าใช้จ่ายในการสร้างระบบ วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงสนใจที่จะพัฒนาและปรับปรุงระบบตัวรับแสงส่วนกลางนี้ให้มีการใช้งานกันอย่างแพร่หลาย จากการศึกษาพบว่าสาเหตุสำคัญที่ทำให้ระบบไม่เป็นที่นิยมคือค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างระบบมีราคาสูง ในการพัฒนาและปรับปรุงระบบตัวรับแสงส่วนกลางจึงเริ่มทำการศึกษาที่มาของค่าใช้จ่ายที่ใช้ในการสร้างระบบตัวรับแสงส่วนกลางก่อน จากการศึกษา [1] พบว่าค่าใช้จ่ายประมาณ 30-50% ของระบบมาจากค่าการผลิตและติดตั้งเฮลิโอสแตท เฮลิโอสแตทที่ทำงานแบบอัตโนมัติจะทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพจำเป็นจะต้องมีอุปกรณ์ตรวจจับ (sensor) และอุปกรณ์ป้อนกลับ (feed back sensor) ที่มีความแม่นยำสูงเพื่อใช้ควบคุมเฮลิโอสแตทให้สะท้อนแสงไปยังตัวรับแสงได้แม่นยำตลอดเวลา มีความแม่นยำในการผลิตและประกอบชิ้นส่วนต่างๆ ของเฮลิโอสแตท และมีความแม่นยำในการติดตั้งเฮลิโอสแตท จากเงื่อนไขดังกล่าวมาแล้วนี้ทำให้เฮลิโอสแตทที่ใช้สำหรับระบบตัวรับแสงส่วนกลางมีราคาสูงมาก และจึงเป็นผลทำให้ระบบตัวรับแสงส่วนกลางมีค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างสูงตามไปด้วย

## 2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องในการพัฒนาและปรับปรุงระบบตัวรับแสงส่วนกลาง

จากการศึกษางานวิจัยต่างๆ เพื่อหาแนวทางในการพัฒนาและปรับปรุงระบบตัวรับแสงส่วนกลางให้ใช้งานกันอย่างแพร่หลาย พบว่าการแก้ไขปัญหาเรื่องค่าใช้จ่ายจะเริ่มจากการลดค่าใช้จ่ายในการผลิตและติดตั้งเฮลิโอสแตท วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้สรุปรวมเป็น 3 แนวทางเพื่อใช้สำหรับลดค่าใช้จ่ายของเฮลิโอสแตทดังนี้

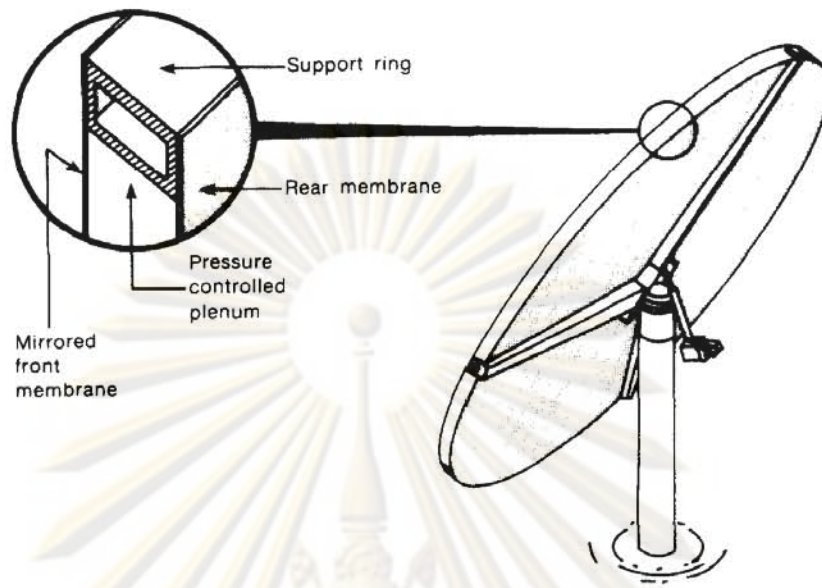
1. การเปลี่ยนวัสดุหรืออุปกรณ์ที่ใช้ให้มีราคาถูกลงแต่ยังคงคุณภาพและคุณสมบัติของการใช้งานเช่นเดิม โดยปกติถ้าต้องการให้จุดรวมแสงสูงบนตัว receiver มีอุณหภูมิสูงในการผลิตเฮลิโอสแตทจะใช้กระจกผิวโค้งเป็นตัวสะท้อนแสง กระจกมีความโค้งของกระจกแต่ละบานจะมีขนาดไม่เท่ากันขึ้นอยู่กับระยะทางระหว่างเฮลิโอสแตทกับตัว receiver ลักษณะของเฮลิโอสแตทที่ใช้กระจกผิวโค้งเป็นตัวสะท้อนแสงถูกแสดงไว้ในรูปที่ 2.3



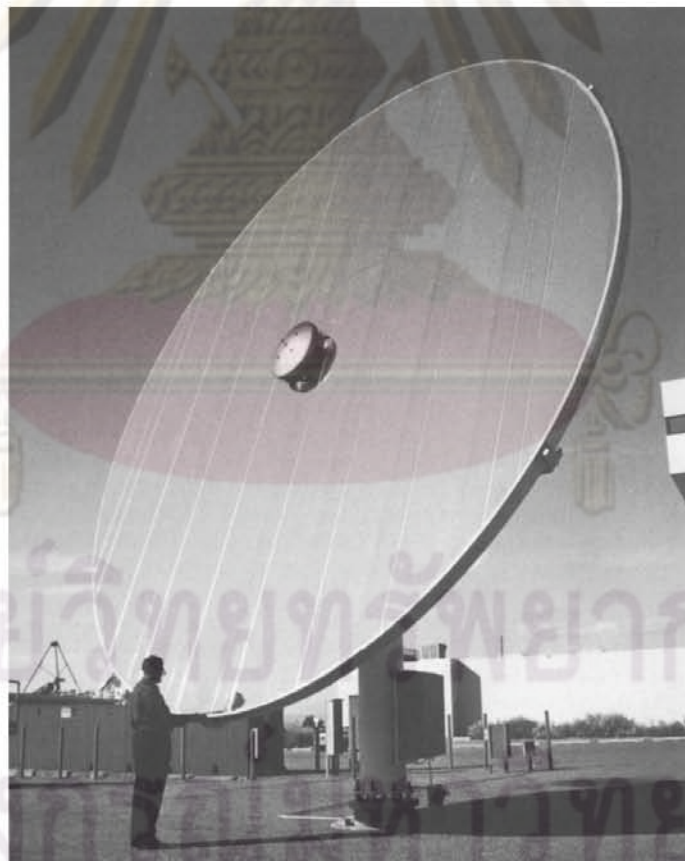
รูปที่ 2.3 เฮลิโอสแตทที่ใช้กระจกผิวโค้งเป็นตัวสะท้อนแสง (Umuwa Solar Power Station)

จากรูปที่ 2.3 จะเห็นได้ว่ากระจกผิวโค้งที่ใช้มีขนาดใหญ่มากเมื่อเทียบกับขนาดของคนปกติ (สูงกว่าคนประมาณ 5 เท่า) การผลิตกระจกผิวโค้งขนาดใหญ่นี้จะต้องเสียค่าใช้จ่ายจำนวนมากและด้วยขนาดที่ใหญ่นี้ทำให้วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ผลิตเฮลิโอสแตทต้องสามารถรับน้ำหนักของกระจกผิวโค้งนี้ได้ ซึ่ง Alpert และคณะ [2] ได้พยายามลดค่าใช้จ่ายในส่วนของตัวสะท้อนแสงด้วยการเสนอให้เปลี่ยนตัวสะท้อนแสงจากกระจกผิวโค้งมาใช้ระบบโครงสร้างแบบแผ่นที่ยืดได้ (stretched membrane) ที่หุ้มด้วยฟิล์มโพลีเมอร์สีเงิน (silver polymer film) แทน ดังแสดงในรูปที่ 2.4(ก) และ (ข) ที่แสดงถึงลักษณะของ stretched membrane และเฮลิโอสแตทที่ Alpert ได้เสนอไว้ตามลำดับ





(ก)



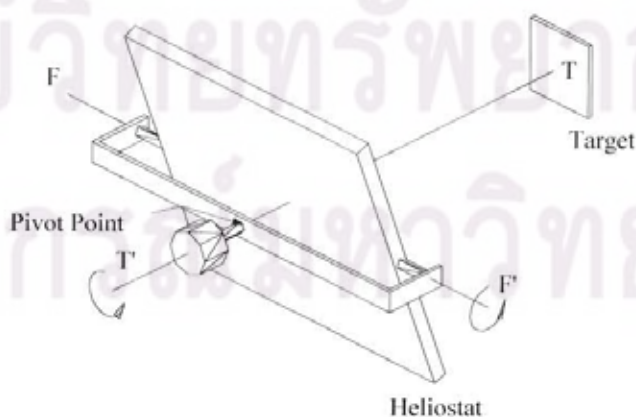
(ข)

รูปที่ 2.4(ก) ลักษณะของโครงสร้างแบบแผ่นที่ยืดได้ที่ใช้ทำตัวสะท้อนแสง และ

(ข) เอลิโอสแตทของ Alpert

จากรูปที่ 2.4(ก) โครงสร้างแบบแผ่นที่ยึดได้จะทำการปรับระยะรวมแสง (focus) เฮลิโอสแตทด้วยการปรับแรงดันในโครงสร้างเพื่อเพิ่มหรือลดระยะรวมแสงให้ได้ระยะรวมแสงตามที่ Alpert ต้องการ การใช้โครงสร้างแบบแผ่นที่ยึดได้กับฟิล์มโพลีเมอร์ดีเจินทำให้ตัวสะท้อนแสงของ Alpert มีน้ำหนักเบาและสามารถปรับรัศมีความโค้งของตัวสะท้อนแสงได้ และด้วยตัวสะท้อนแสงที่ Alpert เสนอนี้เราสามารถลดค่าใช้จ่ายของเฮลิโอสแตทที่มีพื้นที่ในการสะท้อนแสงประมาณ 150 ตารางเมตร ลงได้ประมาณ 50 US\$ จากราคาค่าต้นทุนประมาณ 130 US\$ ต่อตารางเมตร

2. การลดจำนวนชุดขับเคลื่อนที่ใช้ในการควบคุมทิศการสะท้อนแสงของเฮลิโอสแตท โดยทั่วไปเฮลิโอสแตท 1 ตัวจะประกอบด้วยกระจก 1 บานกับชุดขับเคลื่อน 2 ชุดเพื่อปรับองศาของกระจกในมุมกวาด (azimuth) และมุมเงย (altitude) ให้สะท้อนแสงไปยังเป้าหมายที่กำหนดไว้ ชุดขับเคลื่อนแต่ละชุดจะมีอุปกรณ์วัดมุม (encoder) เพื่อใช้ในการควบคุมการสะท้อนแสงของกระจกแบบการควบคุมแบบปิด (closed-loop control) ซึ่งค่าใช้จ่ายของชุดขับเคลื่อนส่วนใหญ่มาจากอุปกรณ์วัดมุมที่มีความละเอียดนี้เอง ซึ่ง Chen และคณะ [3] ได้พยายามจะลดค่าใช้จ่ายในส่วนนี้ของระบบขับเคลื่อนของเฮลิโอสแตทจึงได้เสนอความสัมพันธ์ของวิธีการควบคุมการสะท้อนแสงของกระจกในแนวแถวและคอลัมน์กับการจัดวางทิศของแกนการหมุนของเฮลิโอสแตทเพื่อลดจำนวนชุดขับเคลื่อนที่ใช้ในการควบคุมเฮลิโอสแตท โดยทั่วไปเฮลิโอสแตทจำนวน  $M \times N$  ตัว (แถว  $\times$  คอลัมน์) จะต้องใช้ชุดขับเคลื่อนจำนวน  $2 \times M \times N$  ชุด แต่เมื่อปรับปรุงเฮลิโอสแตทตามความสัมพันธ์ที่ Chen ได้เสนอไว้จำนวนชุดขับเคลื่อนที่ใช้ควบคุมเฮลิโอสแตทจะเหลือเพียง  $M+N$  ชุด ทิศของแกนการหมุนของกระจกแต่ละบานของเฮลิโอสแตทตามความสัมพันธ์ที่ Chen ได้เสนอไว้ถูกแสดงอยู่ในรูปที่ 2.5 ลักษณะการวางตัวของแกนหมุนจะวางตัวให้แกนหมุน  $T'$  ซึ่งไปยังเป้าหมายเสมอ



รูปที่ 2.5 ทิศของแกนการหมุนของกระจกแต่ละบาน

เฮลิโอสแตทแบบใหม่ที่ Chen เสนอไว้ตามความสัมพันธ์ขั้นต้นนี้จะทำหน้าที่เหมือนเฮลิโอสแตท 25 ตัว ที่สะท้อนแสงไปยังเป้าหมายเดียวกันโดยใช้ชุดขับเคลื่อนเพียง 10 ชุดเท่านั้นในการควบคุมทิศการสะท้อนแสงของกระจกทั้ง 25 บาน รูปที่ 2.6 แสดง Non-focusing heliostat ที่ Chen ได้เสนอไว้



รูปที่ 2.6 เฮลิโอสแตทของ Chen (Non-focusing heliostat)

3. การปรับลดคุณภาพของการติดตั้งและอุปกรณ์ต่างๆ ที่ใช้ในการผลิตเฮลิโอสแตทเพื่อลดค่าใช้จ่ายแล้วใช้การสอบเทียบและการปรับแก้มาชดความความแม่นยำในการสะท้อนแสงของเฮลิโอสแตทที่สูญเสียไป เช่นโดยทั่วไปแล้วการผลิตและการติดตั้งเฮลิโอสแตทจะต้องทำให้ใกล้เคียงกับการออกแบบมากที่สุดเพื่อให้การสะท้อนแสงของเฮลิโอสแตทมีความแม่นยำดังที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น เช่น การขึ้นรูปชิ้นส่วนต่างๆ ที่จะนำมาประกอบเป็นเฮลิโอสแตทจะต้องใช้ค่าความผิดพลาดที่ยอมรับ (tolerance) ที่ต่ำมากคือมีค่าไม่เกิน  $\pm 0.05$  mm. ซึ่งความแม่นยำในการผลิตระดับนี้จะส่งผลให้ค่าใช้จ่ายในการผลิตชิ้นส่วนต่างๆ ของเฮลิโอสแตทมีราคาสูงมากเป็นต้นเพื่อจะลดค่าใช้จ่ายของการผลิตและการติดตั้งเฮลิโอสแตท Baheti และคณะ [4] ได้เสนอเฮลิโอสแตทต้นทุนต่ำที่ใช้การควบคุมแบบเปิด (open-loop control) ในการควบคุมการสะท้อนแสงของกระจก เฮลิโอสแตทต้นทุนต่ำมีค่าความผิดพลาดที่ยอมรับของการผลิตและการติดตั้งดังแสดงในตารางที่ 2.1 เฮลิโอสแตทต้นทุนต่ำของ Baheti ถูกแสดงไว้ในรูปที่ 2.7

ตารางที่ 2.1 ค่าความผิดพลาดที่ยินยอมของการผลิตและการติดตั้งเฮลิโอสแตทต้นทุ่นต่ำ  
ของ Baheti

ความผิดพลาดในส่วนต่างๆ ของเฮลิโอสแตทต้นทุ่นต่ำ	ค่าความผิดพลาด ที่ยินยอม
การติดตั้งเฮลิโอสแตท 1. ระยะเวลาผิดพลาดในแกน x 2. ระยะเวลาผิดพลาดในแกน y 3. ความผิดพลาดของทิศทางวางตัวเริ่มต้นของกระจกวัดเทียบกับแนว ระดับ (Azimuth) 4. ความผิดพลาดของทิศทางวางตัวเริ่มต้นของกระจกวัดเทียบกับ แนวตั้ง (Elevation)	$\pm 0.5^{\circ}$ $\pm 0.5^{\circ}$ $\pm 0.5^{\circ}$ $\pm 0.25^{\circ}$
ระบบขับเคลื่อน 1. ขนาดของเฟือง 2. ความไม่ตั้งฉากของแกนการหมุน 3. ระยะเยื้องศูนย์ระหว่างผิวสะท้อนของกระจกกับแกนการหมุนของ ระบบขับเคลื่อน 4. ความละเอียดในการหมุนของมอเตอร์	$\pm 0.01$ ซม. $0.01^{\circ}$ $0.01^{\circ}$ $0.0143^{\circ}$



รูปที่ 2.7 เฮลิโอสแตทต้นทุ่นต่ำของ Baheti

เฮลิโอสแตทต้นทุนต่ำของ Baheti ที่ใช้ค่าความผิดพลาดยินยอมของการผลิตและการติดตั้งนี้ช่วยลดค่าใช้จ่ายของเฮลิโอสแตทลงได้อย่างมากแต่ก็ทำให้ความแม่นยำในการสะท้อนแสงของเฮลิโอสแตทต้นทุนต่ำลดลงด้วย เพื่อชดเชยความแม่นยำในการสะท้อนแสงที่สูงสูญเสียไป Baheti และคณะได้เสนอวิธีสอบเทียบและวิธีปรับแก้สำหรับเฮลิโอสแตทต้นทุนต่ำของเขา โดยการสอบเทียบทำเพื่อหาค่าความคลาดเคลื่อนต่างๆ ของเฮลิโอสแตทต้นทุนต่ำที่เกิดจากการผลิตและการติดตั้งด้วยค่าความผิดพลาดยินยอมดังแสดงในตารางที่ 2.1 ในส่วนของวิธีการปรับแก้ นั้นจะเป็นการนำเอาค่าความคลาดเคลื่อนของการผลิตและการติดตั้งที่คำนวณได้จากการสอบเทียบมาใช้ปรับแก้ทิศการสะท้อนแสงของเฮลิโอสแตท

ขั้นตอนของการสอบเทียบด้วยวิธีที่ Baheti เสนอไว้มีดังนี้

1. ติดตั้ง sun sensor บนผิวหน้าของกระจกของเฮลิโอสแตทที่ต้องการสอบเทียบ
2. ควบคุมเฮลิโอสแตทให้หันกระจกเข้าหาดวงอาทิตย์โดยอาศัย sun sensor บอกทิศทางของดวงอาทิตย์ ทิศทางของดวงอาทิตย์ที่วัดได้นี้กำหนดให้เป็นทิศทางดวงอาทิตย์จริง
3. นำมุมการหมุนของมอเตอร์ทั้ง 2 ตัวที่วัดได้จากอุปกรณ์วัดมุม (encoder) มาคำนวณหาทิศทางของดวงอาทิตย์ ทิศทางของดวงอาทิตย์ที่คำนวณได้นี้กำหนดให้เป็นทิศทางดวงอาทิตย์จากการคำนวณ (ถ้าไม่มีความคลาดเคลื่อนใดๆ ในเฮลิโอสแตททิศทางดวงอาทิตย์จริงกับทิศทางดวงอาทิตย์จากการคำนวณจะอยู่ในทิศทางเดียวกัน)
4. นำความแตกต่างของทิศทางดวงอาทิตย์ทั้ง 2 ทิศทางมาคำนวณหาค่าความคลาดเคลื่อนต่างๆ ของเฮลิโอสแตทด้วยระเบียบวิธีกำลังสองน้อยที่สุด (least square method)

จากการสอบเทียบเป็นเวลา 6 ชั่วโมง พบว่าวิธีการสอบเทียบและวิธีการปรับแก้ความผิดพลาดในการสะท้อนแสงของเฮลิโอสแตทต้นทุนต่ำของ Baheti สามารถลดความผิดพลาดในการสะท้อนแสงลงได้ประมาณ 5 เท่า ซึ่งระยะความผิดพลาดของตำแหน่งแสงสะท้อนที่เกิดขึ้นหลังจากทำการปรับแก้เป็นระยะความผิดพลาดที่ยอมรับได้สำหรับระบบตัวรับแสงส่วนกลางที่ Baheti สนใจ

### 2.3 แนวทางที่ใช้ในการพัฒนาและปรับปรุงระบบตัวรับแสงส่วนกลางของโครงการศึกษา ออกแบบและสร้างต้นแบบเตาเผาสุริยะอุณหภูมิสูง

จากการศึกษาแนวทางในการลดค่าใช้จ่ายของเฮลิโอสแตทแบบต่างๆ ดังที่ได้กล่าวมาแล้วนี้ โครงการศึกษา ออกแบบและสร้างต้นแบบเตาเผาสุริยะอุณหภูมิสูงเลือกใช้แนวทางที่ 3 ในการลดค่าใช้จ่ายของเฮลิโอสแตทเนื่องจากแนวทางนี้สามารถลดค่าใช้จ่ายสำหรับเฮลิโอสแตทได้มากที่สุด สำหรับระบบตัวรับแสงส่วนกลางที่โครงการวิจัยนี้สนใจซึ่งจะกล่าวถึงโดยละเอียดในบทที่ 4

จากการศึกษางานวิจัยของ Baheti เพื่อใช้เป็นแนวทางในการออกแบบเฮลิโอสแตทต้นทุนต่ำและนำเสนอวิธีการสอบเทียบและการปรับแก้ โครงการวิจัยนี้พบว่าวิธีของ Baheti นั้นมีข้อเสีย 2 ข้อ ข้อแรกคือระยะเวลาที่ใช้ในการสอบเทียบเฮลิโอสแตททั้งระบบ วิธีการสอบเทียบของ Baheti นั้นจะทำการสอบเทียบเฮลิโอสแตทได้เพียงครั้งละ 1 ตัว (ต่อ sun sensor 1 อัน) และใช้เวลาในการสอบเทียบประมาณ 6 ชม. ดังนั้นระยะเวลาทั้งหมดที่ใช้ในการสอบเทียบเฮลิโอสแตททั้งระบบจะขึ้นอยู่กับจำนวนของเฮลิโอสแตทที่มีในระบบ ซึ่งทำให้วิธีสอบเทียบนี้ไม่เหมาะสมอย่างยิ่งกับระบบตัวรับแสงส่วนกลางที่โครงการวิจัยนี้สนใจที่มีเฮลิโอสแตทในระบบถึงประมาณ 5,000 ตัว (ใช้เวลาประมาณ 5,000 วันในการสอบเทียบเฮลิโอสแตททั้งระบบ) และข้อที่สองคือความไม่แน่นอนในการติดตั้ง sun sensor เนื่องจาก Baheti ใช้ sun sensor เป็นอุปกรณ์ในการสอบเทียบ ซึ่งต้องการความแม่นยำในการติดตั้ง การติดตั้ง sun sensor ใหม่ทุกครั้งที่ในการสอบเทียบจึงเป็นการเพิ่มโอกาสให้มีความผิดพลาดในการติดตั้งสูงขึ้น

ข้อเสียที่เกิดขึ้นจากวิธีการสอบเทียบที่ Baheti เสนอไว้ทำให้โครงการวิจัยนี้นำเสนอวิธีสอบเทียบและวิธีปรับแก้ที่สามารถประยุกต์ใช้กับระบบตัวรับแสงส่วนกลางที่มีเฮลิโอสแตทจำนวนมากได้อย่างมีประสิทธิภาพ วิธีการสอบเทียบที่เสนอนี้จะใช้จากสอบเทียบและกลองดิจิตอลแทนการใช้ sun sensor ซึ่งการสอบเทียบด้วยวิธีที่เสนอนี้จะสามารถจัดลำดับการสะท้อนแสงของเฮลิโอสแตทแต่ละตัวได้ซึ่งจะทำให้สามารถสอบเทียบเฮลิโอสแตทแต่ละตัวในเวลาที่ไม่กี่วินาทีได้

## 2.4 สรุป

ระบบพลังงานทดแทนแบบตัวรับแสงส่วนกลาง (Central receiver) เป็นระบบพลังงานทดแทนที่มีประสิทธิภาพสูงแต่ไม่ได้รับความนิยมเนื่องจากปัญหาเรื่องค่าใช้จ่ายในการสร้างระบบมีราคาสูงมากโดยเฉพาะค่าใช้จ่ายเนื่องจากการผลิตและการติดตั้งเฮลิโอสแตท โครงการศึกษา ออกแบบและสร้างต้นแบบเตาเผาสุริยะอุณหภูมิสูงต้องการสร้างเตาเผาสุริยะอุณหภูมิสูงด้วยการใช้ระบบตัวรับแสงส่วนกลางเป็นแหล่งพลังงานของเตาเผาสุริยะอุณหภูมิสูงจึงสนใจที่จะพัฒนาและปรับปรุงระบบตัวรับแสงส่วนกลางนี้ จากการศึกษาแนวทางต่างๆ ที่ใช้ในการลดค่าใช้จ่ายของระบบตัวรับแสงส่วนกลางนี้ โครงการวิจัยนี้เลือกที่จะลดค่าใช้จ่ายของระบบนี้ด้วยการลดค่าใช้จ่ายของเฮลิโอสแตทในด้านของการผลิตและการติดตั้ง และได้นำเสนอวิธีการสอบเทียบที่สามารถประยุกต์ใช้กับระบบตัวรับแสงส่วนกลางแบบที่โครงการวิจัยนี้สนใจที่ประกอบด้วยเฮลิโอสแตทจำนวนมากได้อย่างมีประสิทธิภาพ

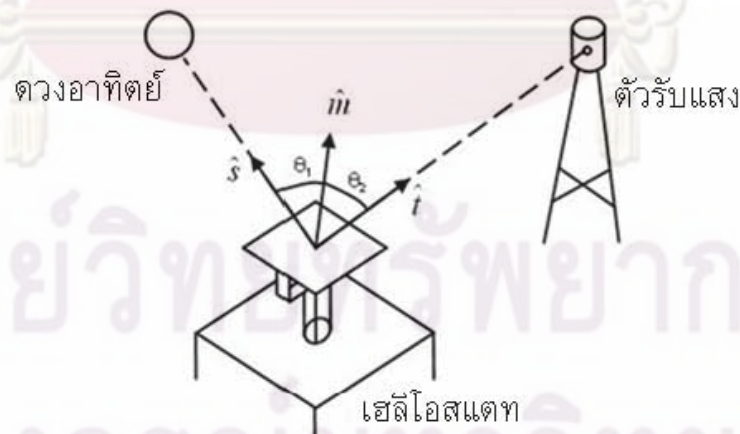
### บทที่ 3

#### วิธีการสอบเทียบและวิธีการปรับแก้ความผิดพลาดในการสะท้อนแสง

ในบทนี้เราจะกล่าวถึงรายละเอียดของวิธีการสอบเทียบและวิธีการปรับแก้ที่โครงการศึกษา ออกแบบและสร้างต้นแบบเตาเผาสุริยะอุณหภูมิสูงได้นำเสนอไว้ทั้งในส่วนของสมมุติฐาน สมการ ความสัมพันธ์ของความคลาดเคลื่อน และวิธีการแก้ไขความผิดพลาดที่เกิดจากสมการ ความสัมพันธ์ของความคลาดเคลื่อนนั้น และรวมถึงอุปกรณ์และขั้นตอนที่ใช้ในการสอบเทียบและ การปรับแก้ความแม่นยำในการสะท้อนแสงของเฮลิโอสแตทต้นทุ่นต่ำ เพื่อนำไปสู่ขั้นตอนของการ ตรวจสอบและการทดสอบวิธีการสอบเทียบและวิธีการปรับแก้ในบทถัดไป

#### 3.1 หลักการทำงานของเฮลิโอสแตทต้นทุ่นต่ำ

เฮลิโอสแตทต้นทุ่นต่ำที่ทำหน้าที่สะท้อนแสงอาทิตย์ไปยังตัวรับแสงจะทำงานแบบอัตโนมัติโดย อาศัยการควบคุมแบบเปิด (open-loop control) ควบคุมทิศการสะท้อนแสงของกระจก จะ สามารถคำนวณหาทิศการสะท้อนแสงของกระจก ( $\theta$ ) นี้ได้โดยอาศัยกฎของการสะท้อนแสง (Law of Reflection) ที่กล่าวว่า การสะท้อนแสงใดๆ จะมีมุมตกกระทบ ( $\theta_1$ ) เท่ากับมุมสะท้อน ( $\theta_2$ ) เสมอ การสะท้อนแสงของเฮลิโอสแตทต้นทุ่นต่ำตามกฎของการสะท้อนแสงถูกแสดงไว้ในรูป ที่ 3.1



รูปที่ 3.1 การสะท้อนแสงของเฮลิโอสแตทต้นทุ่นต่ำตามกฎของการสะท้อนแสง

โดยที่  $s$  คือทิศทางแสงอาทิตย์ที่เป็นรังสีตกกระทบและ

$i$  คือทิศทางของแสงสะท้อนที่เป็นรังสีสะท้อน

จากกฎของการสะท้อนแสงเราจะสามารถหาทิศการสะท้อนแสงของกระจก ( $\hat{m}$ ) ได้ดังแสดงในสมการที่ 3.1 เมื่อรู้ทิศทางของแสงอาทิตย์ ( $\hat{s}$ ) และทิศทางของแสงสะท้อน ( $\hat{i}$ ) ซึ่งสามารถคำนวณได้จากตำแหน่งที่ต้องการให้แสงตกกระทบบนตัวรับแสงและตำแหน่งกึ่งกลางกระจกของเฮลิโอสแตทต้นทูนต่ำ

$$\hat{m} = \frac{\hat{s} + \hat{i}}{|\hat{s} + \hat{i}|} \quad (3.1)$$

### 3.2 วิธีการสอบเทียบและวิธีการปรับแก้

จากแนวทางที่โครงการวิจัยนี้ใช้ในการแก้ไขปัญหาค่าใช้จ่ายของระบบตัวรับแสงส่วนกลางที่กล่าวไว้ในบทที่ 2 และหลักการทำงานของเฮลิโอสแตทต้นทูนต่ำนี้ โครงการวิจัยนี้ได้เสนอวิธีการสอบเทียบและวิธีการปรับแก้เพื่อลดความผิดพลาดในการสะท้อนแสงของเฮลิโอสแตทต้นทูนต่ำเนื่องจากความคลาดเคลื่อนของทิศการวางตัวเริ่มต้นของกระจก การลดค่าใช้จ่ายของเฮลิโอสแตทในส่วนของการผลิตและการติดตั้งจะทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนต่างๆ เช่น ตำแหน่งกึ่งกลางกระจกและทิศการวางตัวเริ่มต้นของกระจก เป็นต้น โครงการวิจัยนี้เชื่อว่าทิศการวางตัวเริ่มต้นของกระจกเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดความผิดพลาดในการสะท้อนแสงของเฮลิโอสแตทสูงที่สุดจึงได้เสนอระเบียบวิธีการ (algorithm) สำหรับการสอบเทียบและการปรับแก้ความผิดพลาดในการสะท้อนแสงขึ้นโดยตั้งสมมุติฐานว่าความผิดพลาดของการสะท้อนแสงของเฮลิโอสแตทเกิดขึ้นจากความคลาดเคลื่อนของทิศการวางตัวเริ่มต้นของกระจกเพียงอย่างเดียวเพื่อที่จะปรับแก้ความผิดพลาดในการสะท้อนแสงจากปัจจุบันก่อน จากสมมุติฐานนี้ทำให้สามารถเขียนความสัมพันธ์ของทิศของกระจกจริงขณะทำการสะท้อนแสง ( $\hat{m}'$ ) และทิศของกระจกที่ได้จากการคำนวณ ( $\hat{m}$ ) ได้ดังสมการที่ 3.2

$$\hat{m}' = R\hat{m} \quad (3.2)$$

โดยที่  $R \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$  เป็นเมตริกซ์ค่าคงที่ค่าหนึ่งซึ่งแสดงถึงความแตกต่างของทิศวางตัวเริ่มต้นของกระจกจริงกับทิศการวางตัวเริ่มต้นของกระจกที่ออกแบบไว้ จากความสัมพันธ์ในสมการที่ 3.2 จะเห็นได้ว่าตัวแปรที่ทำให้เกิดความผิดพลาดในการสะท้อนแสงของเฮลิโอสแตทคือค่า  $R$  ถ้าสามารถหาค่า  $R$  ได้ก็จะสามารถปรับแก้ความผิดพลาดในการสะท้อนแสงของเฮลิโอสแตทได้

วิธีสอบเทียบที่โครงการวิจัยนี้ได้นำเสนอไว้คือวิธีการคำนวณหาค่า  $R$  ของระบบ จากสมการที่ 3.2 จะเห็นว่าถ้าหากเราทราบค่า  $\hat{m}$  และ  $\hat{m}'$  เราจะสามารถคำนวณหาค่า  $R$  ได้ การสอบเทียบจึงแบ่งขั้นตอนออกเป็น 2 ส่วนใหญ่ดังนี้



1. ขั้นตอนในการหาค่า  $\hat{m}$  และ  $\hat{m}'$  ซึ่งจะกล่าวถึงโดยละเอียดในหัวข้อขั้นตอนของการสอบเทียบ

2. ขั้นตอนในการหาค่า  $R$

ในการหาค่า  $R$  นั้นในกรณีที่ความผิดพลาดของการสะท้อนแสงของเฮลิโอสแตทเกิดจากความคลาดเคลื่อนของทิศการวางตัวเริ่มต้นของกระจกเพียงอย่างเดียว ตามหลักการทางคณิตศาสตร์จะต้องการค่า  $\hat{m}$  และ  $\hat{m}'$  เพียง 3 คู่เท่านั้นในการแก้สมการ อย่างไรก็ตามในความเป็นจริงแล้วสิ่งที่ทำให้การสะท้อนแสงของเฮลิโอสแตทผิดพลาดไม่ได้เกิดจากความคลาดเคลื่อนของทิศการวางตัวเริ่มต้นของกระจกเพียงอย่างเดียวหากแต่มีปัจจัยอื่นๆ รวมอยู่ด้วย ดังนั้นในการคำนวณหาค่า  $R$  โคจรการวิจัยนี้จึงใช้หลักการทางสถิติเข้ามาช่วยในการประมาณค่า  $R$  ให้ได้ค่าใกล้เคียงกับความเป็นจริงมากที่สุด การประมาณค่า  $R$  โคจรการวิจัยนี้ได้เสนอให้ใช้ระเบียบวิธีกำลังสองน้อยที่สุด (least square method) ในการประมาณค่าดังแสดงในสมการที่ 3.3

$$R = (M' \cdot M^T)(M \cdot M^T)^{-1} \quad (3.3)$$

โดยที่  $M$  และ  $M' \in \mathbb{R}^{3 \times N}$  ที่มีคอลัมน์เวกเตอร์ที่  $j$  เท่ากับ  $\hat{m}_j$  และ  $\hat{m}'_j$  ตามลำดับ ความแม่นยำในการประมาณค่านี้จะขึ้นอยู่กับจำนวนข้อมูลของ  $\hat{m}$  และ  $\hat{m}'$  ที่ใช้ในการประมาณจากการทดสอบ [5] ด้วยการจำลองการสอบเทียบ (เก็บข้อมูลตำแหน่งแสงสะท้อนจริงทุกๆ 5 นาที) ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อนำค่า  $\hat{m}'$  ที่ได้มาวิเคราะห์ค่า condition number  $K$  หรืออัตราส่วนระหว่างค่า Singular value ของค่ามากที่สุดและค่าน้อยที่สุด เมื่อกำหนดให้อัตราส่วนของค่า singular value มากที่สุดมีค่าเท่ากับ 1 แล้ว ข้อมูลที่วัดได้จะเป็น full rank เมื่อค่า  $\frac{1}{K^2}$  มีค่ามากกว่าค่าความผิดพลาดของข้อมูลที่วัดได้ ผลของการมี full rank ของข้อมูลทำให้สามารถนำข้อมูลนี้ไปใช้ประมาณค่า  $R$  ได้ ซึ่งจากความสัมพันธ์นี้ทำให้สามารถกำหนดค่าความผิดพลาดของข้อมูลที่วัดได้ ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนข้อมูลที่ต้องใช้ประมาณค่า  $R$  กับขอบเขตความผิดพลาดของข้อมูล  $\hat{m}'$  ที่จำลองได้แสดงอยู่ในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนข้อมูลที่ต้องใช้ในการประมาณค่า  $R$  กับขอบเขตความผิดพลาดความผิดพลาดของข้อมูล  $m'$  [5]

จำนวน	3	6	9	12	15	18	21	24	27	30
ขอบเขต (%)	$7.3e^{-6}$	$2.3e^{-4}$	$1.1e^{-3}$	$2.7e^{-3}$	0.76	1.4	2.0	2.2	3.8	5.1

จำนวน	33	36	39	42	45	48	51	54	57	60
ขอบเขต (%)	5.8	5.6	6.8	6.6	6.5	6.5	7.0	6.8	6.7	6.8

จากค่าที่แสดงในตารางที่ 3.1 จะเห็นได้ว่าจำนวนข้อมูลที่ใช้ประมาณค่า  $R$  จะต้องการความแม่นยำของข้อมูล  $m'$  ต่างกัน ซึ่งโครงการวิจัยนี้เห็นว่าขอบเขตความผิดพลาดของข้อมูล  $m'$  ที่ 5.6% นี้เป็นช่วงค่าความผิดพลาดที่ไม่กว้างและไม่แคบจนเกินไป ดังนั้นจำนวนข้อมูล 36 ข้อมูลคือจำนวนที่เหมาะสมสำหรับการสอบเทียบเพื่อประมาณค่า  $R$  นี้

ค่า  $R$  ที่ประมาณได้จะถูกนำมาใช้ปรับแก้ความผิดพลาดของการสะท้อนแสงของเฮลิโอสแตท วิธีปรับแก้ที่คณะวิจัยได้เสนอไว้คือวิธีการกำจัดค่า  $R$  ที่ทำให้การสะท้อนแสงของเฮลิโอสแตทผิดพลาด จากสมการที่ 3.2 ที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $m$  และ  $m'$  ถ้าหากนำค่า  $R$  ที่ประมาณได้มาทำการ invert เมตริกซ์แล้วคูณกับค่า  $m$  จะได้ผลลัพธ์ดังสมการที่ 3.4

$$\begin{aligned} m' &= R(R^{-1}m) \\ m' &= (R \cdot R^{-1})m \\ m' &= Im \end{aligned} \tag{3.4}$$

โดยที่  $I \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$  เป็นเมตริกซ์เอกลักษณ์

การปรับแก้ในทางปฏิบัติคือการเปลี่ยนทิศการสะท้อนแสงของเฮลิโอสแตทจากทิศของกระจกที่คำนวณได้ ( $m$ ) เป็นทิศของกระจกสำหรับการปรับแก้ ( $R^{-1}m$ ) ซึ่งผลของการปรับแก้จะทำให้ทิศของกระจกจริงขณะทำการสะท้อนแสง ( $m'$ ) เท่ากับทิศของกระจกที่คำนวณได้ ( $m$ )

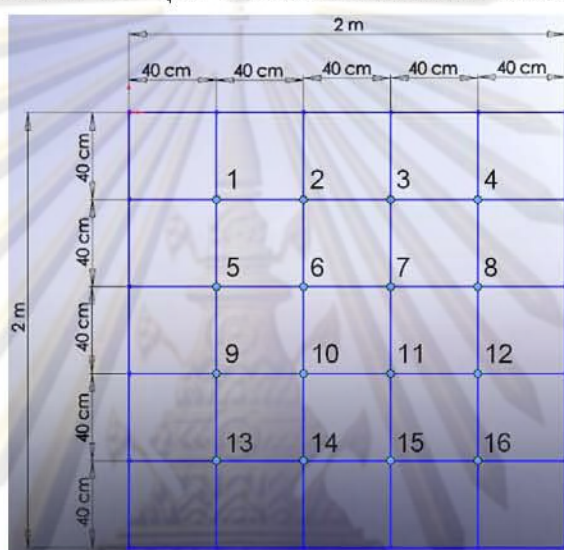
ในส่วนตัวไปจะเป็นการกล่าวถึงรายละเอียดของอุปกรณ์และขั้นตอนที่ใช้ในการสอบเทียบที่ทำให้วิธีการสอบเทียบที่นักวิจัยของโครงการวิจัยนี้เสนอไว้สามารถประยุกต์ใช้กับระบบตัวรับแสงส่วนกลางที่มีเฮลิโอสแตทจำนวนมากได้อย่างมีประสิทธิภาพ

### 3.2 อุปกรณ์และขั้นตอนของการสอบเทียบ

อุปกรณ์ที่ใช้สำหรับการสอบเทียบมีดังนี้

1. กล้องดิจิทัลที่มีความละเอียดในการถ่ายภาพขนาด 640x480 pixel สำหรับถ่ายภาพแสงสะท้อนบนฉากสอบเทียบ

2. ฉากสอบเทียบรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 2x2 เมตร ที่มีจุดสอบเทียบ 16 จุดดังแสดงในรูปที่ 3.2 เครื่องหมายวงกลม (สีฟ้า) 16 จุดภายในกรอบสี่เหลี่ยมคือตำแหน่งที่ใช้ในการสอบเทียบ



รูปที่ 3.2 ฉากสอบเทียบ

ขั้นตอนของการสอบเทียบ

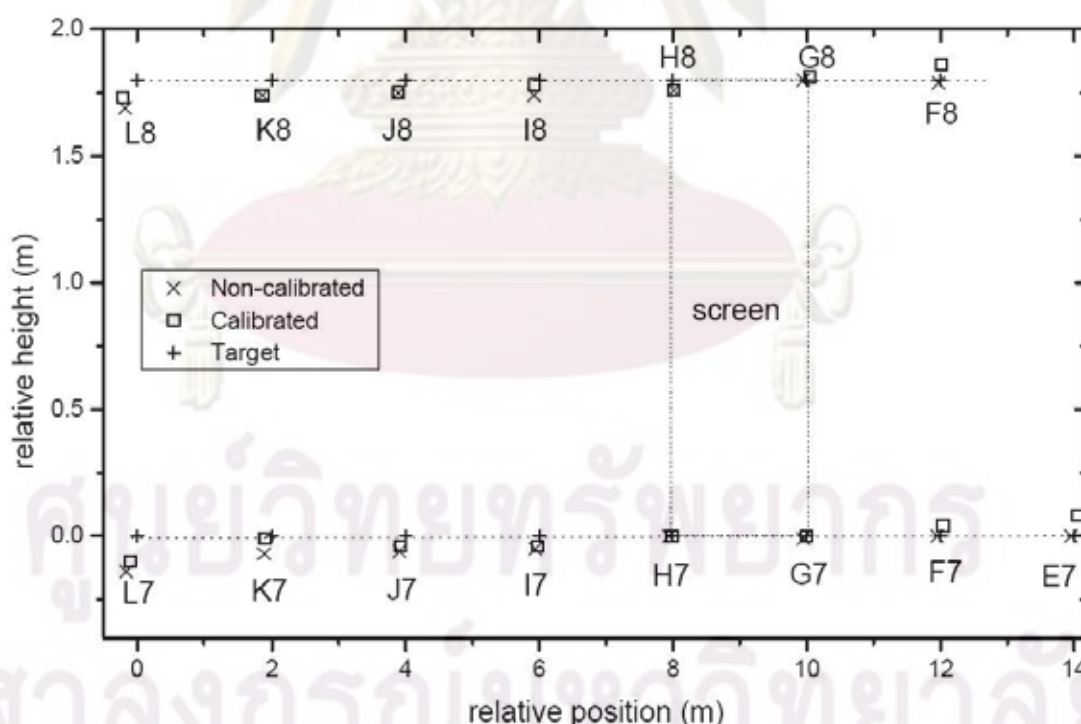
1. ติดตั้งฉากสอบเทียบและกล้องดิจิทัลบนตำแหน่งที่กำหนดไว้
2. กำหนดจำนวนจุดสำหรับการสอบเทียบและระยะเวลาที่ใช้ในการสอบเทียบ
3. ควบคุมเฮลิโอสแตทให้สะท้อนแสงไปยังจุดสอบเทียบที่กำหนดไว้บนฉากสอบเทียบ (จากจุดที่ 1 ไปยังจุดที่ 16) กรณีที่จำนวนจุดสอบเทียบที่กำหนดไว้มีมากกว่า 16 จุดสอบเทียบ การสะท้อนแสงไปยังจุดที่ 17 จะใช้การสะท้อนแสงไปยังจุดที่ 1 แทน
4. ถ่ายภาพแสงสะท้อนบนฉากสอบเทียบด้วยกล้องดิจิทัล
5. นำภาพถ่ายที่ได้มาประมวลผลหาตำแหน่ง centroid ของแสงสะท้อนบนแกนอ้างอิงเดียวกันกับตำแหน่งของเฮลิโอสแตทที่ใช้ในการคำนวณทิศการสะท้อนแสงของกระจก ตำแหน่ง centroid ที่ได้จะเป็นเสมือนตำแหน่งแสงสะท้อนที่เกิดขึ้นจริงบนฉากสอบเทียบ ( $P'$ ) (วิธีคำนวณตำแหน่งแสงสะท้อนที่เกิดขึ้นจริงบนฉากสอบเทียบจะแสดงอยู่ในบทที่ 5)
6. นำตำแหน่ง  $P'$  ที่ได้มาใช้คำนวณหาทิศการสะท้อนแสงของกระจกที่เกิดขึ้นจริง ( $m'$ )
7. ทำข้อ 3-6 ซ้ำจนครบจำนวนจุดสำหรับการสอบเทียบที่กำหนดไว้ในข้อ 2

8. นำข้อมูลของ  $m$  และ  $m'$  ที่ได้มาจัดเรียงในรูปของ  $M$  และ  $M'$  ดังที่ได้แสดงไว้ในสมการที่ 3.2 เพื่อใช้ในการประมาณค่า  $R$  ด้วยระเบียบวิธีกำลังสองน้อยที่สุด (least square method)

หมายเหตุ : ในการคำนวณหาทิศการสะท้อนแสงของกระจกจริง ( $m'$ ) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3.1 โดยในการคำนวณทิศของแสงสะท้อนจะใช้ตำแหน่งแสงสะท้อนจริง ( $P'$ ) แทนตำแหน่งที่ต้องการให้แสงตกกระทบบนตัวรับแสง

### 3.3 การทดสอบวิธีการสอบเทียบและวิธีการปรับแก้ในสภาพแวดล้อมจริง

จากรายละเอียดของวิธีการสอบเทียบและวิธีการปรับแก้ที่โครงการวิจัยนี้ได้เสนอไว้ในขั้นตอนนักวิจัย [1] ของโครงการวิจัยนี้ได้ทำการทดสอบวิธีการสอบเทียบและวิธีการปรับแก้ที่นำเสนอไว้ในสภาพแวดล้อมจริง โดยทำการทดสอบในวันที่ 17 มกราคม พ.ศ. 2547 ซึ่งผลของการทดสอบนี้ไม่สอดคล้องกับสมมุติฐานที่ตั้งไว้กล่าวคือมีเฉพาะบริเวณที่ใช้เป็นฉากสอบเทียบเท่านั้นที่วิธีการสอบเทียบและวิธีการปรับแก้สามารถลดความผิดพลาดในการสะท้อนแสงของเฮลิโอสแตทต้นทุ่นต่ำได้ ผลการทดสอบวิธีการสอบเทียบและวิธีการปรับแก้ในสภาพแวดล้อมจริงนี้ถูกแสดงอยู่ในรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 ผลการทดสอบวิธีการสอบเทียบและวิธีการปรับแก้ [1]

จากรูปที่ 3.3 screen เป็นพื้นที่ที่ใช้เป็นฉากสอบเทียบ เครื่องหมายกากบาท, เครื่องหมายสี่เหลี่ยม และเครื่องหมายบวก (x, □ และ +) เป็นเครื่องหมายแสดงตำแหน่งแสงสะท้อนของเฮลิโอสแตทที่ไม่ได้รับการปรับแก้, ตำแหน่งแสงสะท้อนของเฮลิโอสแตทที่ได้รับการปรับแก้แล้ว และตำแหน่งเป้าหมายที่ต้องการให้เฮลิโอสแตทสะท้อนแสงไป

ผู้วิจัยเชื่อว่าผลการสะท้อนแสงที่ไม่สอดคล้องกับสมมุติฐานที่ตั้งไว้นี้มาจากความคลาดเคลื่อนอื่นๆ ระหว่างการทดลองดังนั้นในบทต่อไปจะเป็นการจำแนกและจำลองผลของปัจจัยความคลาดเคลื่อนต่างๆ ของเฮลิโอสแตทต้นทุนต่ำต่อความผิดพลาดในการสะท้อนแสงเพื่อยืนยันความถูกต้องของสมมุติฐานที่นักวิจัยของโครงการวิจัยนี้ใช้เสนอวิธีการสอบเทียบและวิธีการปรับแก้ความผิดพลาดในการสะท้อนแสงของเฮลิโอสแตทต้นทุนต่ำ



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 4

### เฮลิโอสแตตต้นทุนต่ำและปัจจัยความคลาดเคลื่อนต่างๆ ที่ทำให้เกิด ความผิดพลาดในการสะท้อนแสงของเฮลิโอสแตตต้นทุนต่ำ

ในบทนี้จะกล่าวถึงรายละเอียดของระบบตัวรับแสงส่วนกลางที่โครงการศึกษา ออกแบบและสร้าง ต้นแบบเตาเผาสุริยะอุณหภูมิสูงสนใจ เฮลิโอสแตตต้นทุนต่ำที่ได้ทำการออกแบบไว้ และปัจจัย ความคลาดเคลื่อนต่างๆ ที่ทำให้เกิดความผิดพลาดในการสะท้อนแสงของเฮลิโอสแตตต้นทุนต่ำ รวมถึงการจำลองการสะท้อนแสงของเฮลิโอสแตตต้นทุนต่ำเนื่องจากปัจจัยความคลาดเคลื่อน ต่างๆ ที่ได้กล่าวไว้แล้วที่จะปัจจัยด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อตรวจวัดผลกระทบของปัจจัย เหล่านั้นต่อการสะท้อนแสง

#### 4.1 ระบบตัวรับแสงส่วนกลาง (Central receiver) ที่โครงการศึกษา ออกแบบ และสร้าง ต้นแบบเตาเผาสุริยะอุณหภูมิสูงสนใจ

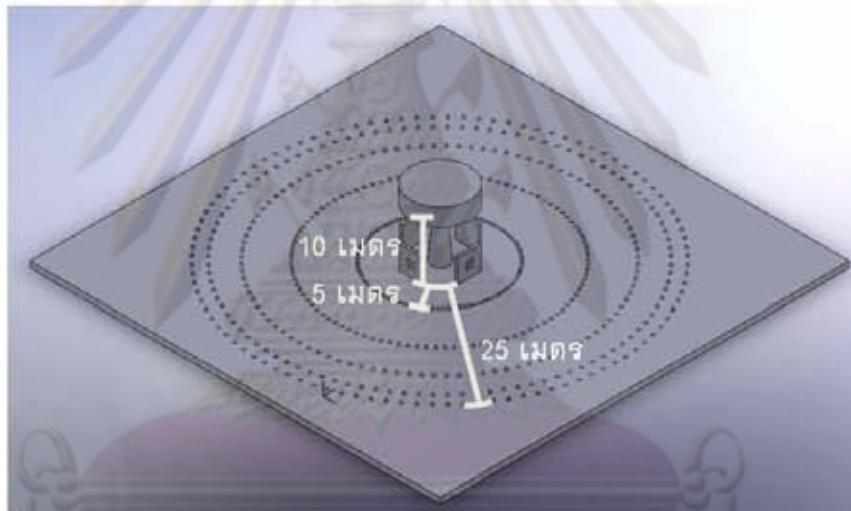
ระบบตัวรับแสงส่วนกลางที่โครงการวิจัยสนใจจะต้องเป็นระบบที่สามารถผลิตอุณหภูมิที่จตุรวม แสงได้ประมาณ 1,000 องศาเซลเซียสเพื่อใช้สำหรับการสร้างเตาเผาสุริยะอุณหภูมิสูง การสร้าง ระบบตัวรับแสงส่วนกลางที่มีอุณหภูมิที่จตุรวมแสงประมาณ 1,000 องศาเซลเซียส จำเป็นที่ต้อง ทราบถึงปริมาณพลังงานที่ใช้สำหรับสร้างอุณหภูมิที่ตำแหน่งตกกระทบประมาณ 1,000 องศา เซลเซียส จาก Stefan's law [5] ที่บอกถึงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการแผ่พลังงานคลื่น แม่เหล็กไฟฟ้าของวัตถุดำ ( $I$ ) กับอุณหภูมิของวัตถุดำ ( $T$ ) สามารถใช้คำนวณปริมาณพลังงานที่ ต้องการสำหรับสร้างอุณหภูมิที่จตุรวมแสงประมาณ 1,000 องศาเซลเซียสดังแสดงในสมการที่ 4.1

$$I = \sigma T^4 \quad (4.1)$$

โดยที่  $\sigma$  เป็นค่าคงที่ที่มีค่าเท่ากับ  $5.6696 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$

จากการสมการที่ 4.1 ถ้าหากเราต้องการสร้างระบบตัวรับแสงส่วนกลางที่มีอุณหภูมิที่จตุรวมแสง ประมาณ 1,000 องศาเซลเซียสเราจะต้องใช้พลังงานทั้งหมดเท่ากับ 148,890 วัตต์ต่อตารางเมตร หรือเทียบเท่ากับจำนวนดวงอาทิตย์ประมาณ 212 ดวง (ค่าเฉลี่ยความหนาแน่นพลังงานดวง อาทิตย์หนึ่งดวงเท่ากับ 700 วัตต์ต่อตารางเมตร) ดังนั้นสำหรับระบบตัวรับแสงส่วนกลางที่จะ นำไปใช้ในการสร้างเตาเผาสุริยะอุณหภูมิสูงที่มีพื้นที่ผิวของเตาเผาประมาณ 5 ตารางเมตร จะต้องใช้พลังงานทั้งสิ้นประมาณ 744,450 วัตต์ เนื่องจากเฮลิโอสแตตต้นทุนต่ำที่ได้ออกแบบไว้ สำหรับการสร้างเตาเผาสุริยะอุณหภูมิสูงนี้เป็นแบบใช้กระจกเงาราบในการสะท้อนแสงโดยมีพื้นที่

ในการสะท้อนแสงเท่ากับ  $0.2 \times 0.2$  ตารางเมตร ดังนั้นการสร้างเตาเผาสุริยะอุณหภูมิสูงนี้จะต้องใช้เฮลิโอสแตทประมาณ 5,000 ตัว (โดยมีค่าความปลอดภัย (safety factor) เท่ากับ 1.2) และเฮลิโอสแตทแต่ละตัวมีความผิดพลาดในการสะท้อนแสงเป็นระยะทางไม่เกิน 40 เซนติเมตร จากตำแหน่งเป้าหมายบนตัวรับแสง ในส่วนของการจัดวางเฮลิโอสแตททั้ง 5,000 ตัวนี้จะวางอยู่รอบๆ ตัวรับแสงบนพื้นที่รูปวงกลมที่มีความยาวของเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 30 เมตร เฮลิโอสแตทตัวที่อยู่ใกล้ตัวตัวรับแสงที่สุดอยู่ห่างจากตัวตัวรับแสงเป็นระยะทาง 5 เมตร และเฮลิโอสแตทตัวที่อยู่ไกลที่สุดอยู่ห่างจากตัวรับแสงเป็นระยะทาง 25 เมตร ตัวรับแสงตั้งอยู่ที่จุดศูนย์กลางวงกลมที่อยู่สูงจากพื้น 10 เมตร ลักษณะของระบบตัวรับแสงส่วนกลางที่โครงการวิจัยนี้สนใจแสดงอยู่ในรูปที่ 4.1



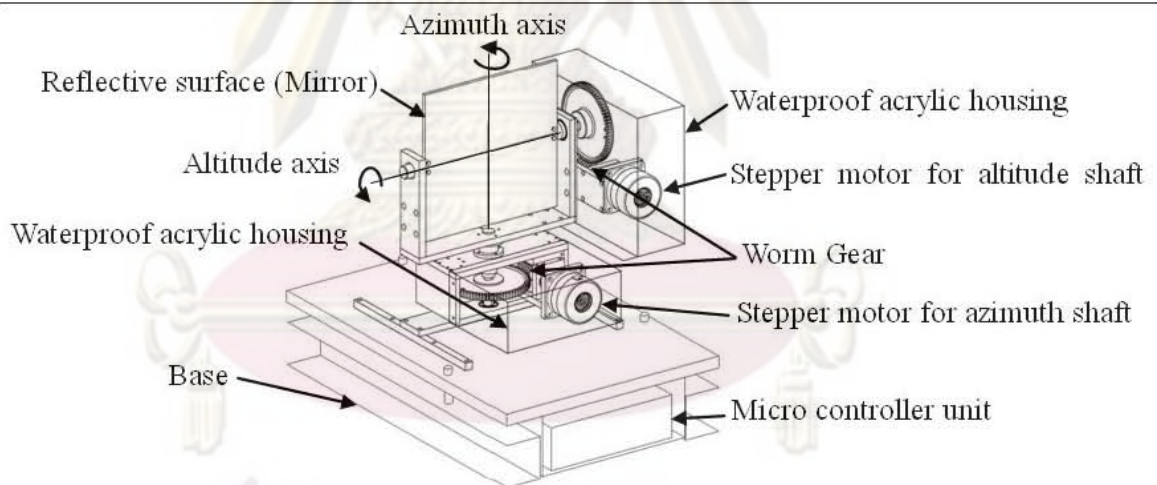
รูปที่ 4.1 ระบบตัวรับแสงส่วนกลางที่โครงการวิจัยนี้สนใจ

#### 4.2 เฮลิโอสแตทต้นทุนต่ำ (Low-cost Heliostat)

หลักของการออกแบบเฮลิโอสแตทต้นทุนต่ำเพื่อลดค่าใช้จ่ายของระบบตัวรับแสงส่วนกลางที่เราสนใจคือผลของการลดค่าใช้จ่ายในการผลิตและการติดตั้งเฮลิโอสแตทอาจทำให้ความแม่นยำในการสะท้อนแสงของเฮลิโอสแตทลดลงได้แต่จะต้องไม่ทำให้ความสามารถในการซ้ำเติม (Repeatability) ของเฮลิโอสแตทสูญเสียไป หรือสามารถกล่าวอีกนัยหนึ่งได้ว่าถ้าความผิดพลาดของเฮลิโอสแตทต้นทุนต่ำที่ผลิตได้เป็นเป็นฟังก์ชันคงที่ใดๆ ผู้วิจัยจะสามารถทำการเปรียบเทียบเพื่อหาว่าค่าของฟังก์ชันนั้นๆ และนำฟังก์ชันที่หาได้มาใช้ปรับแก้ความผิดพลาดของการสะท้อนแสงของเฮลิโอสแตท จากหลักการที่ใช้ในการออกแบบทำให้เฮลิโอสแตทต้นทุนต่ำที่ออกแบบไว้มีโอกาสที่

ค่าความผิดพลาดเชิงระบบ (systematic error) จะสูงขึ้นเช่น ความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งกึ่งกลางกระจกหรือทิศการวางตัวเริ่มต้นของกระจก เป็นต้น รายละเอียดของเฮลิโอสแตทต้นทุ่นต่ำที่ออกแบบสำหรับระบบตัวรับแสงส่วนกลางที่โครงการวิจัยนี้สนใจมีดังนี้

1. โครงสร้าง โครงสร้างของเฮลิโอสแตทต้นทุ่นต่ำผลิตด้วยอะลูมิเนียมเพื่อป้องกันการขึ้นสนิมของชิ้นส่วนต่างๆ ในการใช้งานกลางแจ้ง โครงสร้างของเฮลิโอสแตทถูกออกแบบมาให้รองรับชุดขับเคลื่อนสำหรับการควบคุมทิศการเคลื่อนที่ของกระจกแบบ 2 แกนคือแกนหมุนมุมกวาด (azimuth axis) และแกนหมุนมุมเงย (altitude axis) โดยแกนการหมุนทั้ง 2 ถูกออกแบบให้ตัดกันที่จุดกึ่งกลางของกระจกซึ่งอยู่สูงขึ้นมาจากพื้นเป็นระยะทาง 40 เซนติเมตร ตัวสะท้อนแสงทำจากกระจกเงาราบขนาด 20x20 ตารางเซนติเมตร ค่าความผิดพลาดยินยอม (tolerance) ที่ใช้ในการผลิตชิ้นส่วนต่างๆ ส่วนใหญ่จะมีค่าเท่ากับ  $\pm 0.2$  มิลลิเมตร เฮลิโอสแตทต้นทุ่นต่ำที่ประกอบเสร็จแล้วจะมีขนาดกว้างxยาวxสูง เท่ากับ 40 เซนติเมตร x 40 เซนติเมตร x 50 เซนติเมตร drawing ของโครงสร้างของเฮลิโอสแตทต้นทุ่นต่ำจะถูกแสดงอยู่ในรูปที่ 4.2

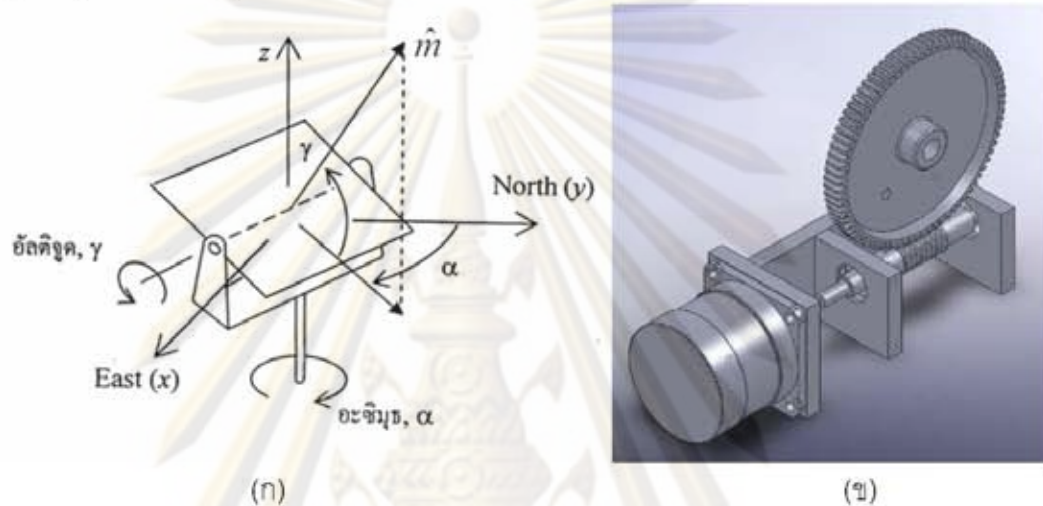


รูปที่ 4.2 drawing ของโครงสร้างของเฮลิโอสแตทต้นทุ่นต่ำ

2. ชุดขับเคลื่อน เฮลิโอสแตทต้นทุ่นต่ำที่เราออกแบบไว้จะใช้ชุดขับเคลื่อน 2 ชุดต่อเฮลิโอสแตท 1 ตัวเพื่อควบคุมทิศการสะท้อนแสงของกระจก โดยจะควบคุมทิศการสะท้อนแสงของกระจก ( $m$ ) ด้วยมุมกวาด (azimuth angle,  $\alpha$ ) และมุมเงย (altitude angle,  $\gamma$ ) ดังแสดงในรูปที่ 4.3 (ก) ชุดขับเคลื่อน 1 ชุดประกอบด้วยสเต็ปเปอร์มอเตอร์ 1 ตัวที่มีความละเอียด (resolution) ในการหมุนเท่ากับ 1.8 องศาต่อสเต็ป และชุดเฟืองทดที่มีอัตราทดเท่ากับ 1:100 รอบ ดังนั้นความละเอียดในการควบคุมทิศการสะท้อนแสงของเฮลิโอสแตทต้นทุ่นต่ำจะมีค่าเท่ากับ 0.018 องศา



ต่อสแต๊ป ชุดเฟืองทดที่ใช้เป็นแบบชุดเฟืองตัวหนอน (worm gear) ซึ่งมีข้อดีคือมีความสามารถในการล็อกตัวเอง (self-locking) ทำให้ไม่ต้องจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับมอเตอร์ตลอดเวลาเพื่อคงตำแหน่งการหมุนของมอเตอร์ไว้ สำหรับการผลิตชุดเฟืองทดสำหรับชุดขับเคลื่อนนี้จะใช้ค่าความผิดพลาดยินยอม (tolerance) ในการผลิตเท่ากับ  $\pm 0.2$  มิลลิเมตร ชุดขับเคลื่อนสำหรับเฮลิโอสแตท ต้นทุนต่ำถูกแสดงไว้ในรูปที่ 4.3(ข)



รูปที่ 4.3(ก) วิธีการควบคุมทิศการสะท้อนแสงของเฮลิโอสแตทต้นทุนต่ำ [1] และ (ข) ชุดขับเคลื่อนสำหรับเฮลิโอสแตทต้นทุนต่ำ

3. ระบบตรวจวัดทิศทางของดวงอาทิตย์ ทิศทางของแสงอาทิตย์คือสิ่งใช้ในการคำนวณทิศการสะท้อนแสงของกระจก ( $\hat{m}$ ) ดังแสดงไว้ในสมการที่ 3.1 (ในบทที่ 3) การหาทิศทางของแสงอาทิตย์สามารถทำได้ 2 วิธีดังนี้

3.1 การใช้อุปกรณ์สำหรับตรวจวัดทิศทางแสงอาทิตย์ (sun sensor) วิธีนี้จะมี ความแม่นยำสูงในการบอกทิศทางของแสงอาทิตย์แต่จะต้องเสียค่าใช้จ่ายจำนวนมากในกรณีที่ใช้ sun sensor 1 อันต่อเฮลิโอสแตท 1 ตัว

3.2 การใช้การคำนวณหาทิศทางของแสงอาทิตย์ ความแม่นยำของทิศทางที่คำนวณได้จะขึ้นอยู่กับค่าของตัวแปรต่างๆ ที่ใช้ในการคำนวณว่ามีค่าสอดคล้องกับความเป็นจริงมากน้อยเพียงใด

สำหรับเฮลิโอสแตทต้นทุนต่ำนี้ผู้วิจัยใช้การคำนวณในการหาทิศทางแสงอาทิตย์โดยใช้ PSA algorithm ที่พัฒนาโดย Blanco-Meriel และคณะ [6] ที่มีความคลาดเคลื่อนในการคำนวณทิศทางของแสงอาทิตย์ประมาณ  $\pm 8.33 \times 10^{-3}$  องศา ความคลาดเคลื่อนของทิศทางของแสงอาทิตย์ที่คำนวณด้วย PSA algorithm นี้จะกล่าวถึงโดยละเอียดในส่วนของปัจจัยความคลาดเคลื่อนต่างๆ

ที่ทำให้เกิดความผิดพลาดในการสะท้อนของเฮลิโอสแตทต้นทุนต่ำ และ source code ของ PSA algorithm นี้จะแสดงไว้ใน ภาคผนวก ก

นอกจากรายละเอียดของระบบตัวรับแสงส่วนกลางที่โครงการวิจัยนี้สนใจและเฮลิโอสแตทต้นทุนต่ำที่ผู้วิจัยได้ออกแบบไว้ การที่เราจะจำแนกปัจจัยความคลาดเคลื่อนต่างๆ ที่ทำให้เกิดความผิดพลาดในการสะท้อนแสงของเฮลิโอสแตทได้นั้นจำเป็นที่จะต้องรู้ถึงหลักการทำงานของเฮลิโอสแตทต้นทุนต่ำนี้ด้วยซึ่งได้กล่าวไว้แล้วในบทที่ 3 แต่สำหรับในขั้นตอนของการจำแนกปัจจัยความคลาดเคลื่อนต่างๆ และจำลองผลกระทบของปัจจัยเหล่านั้นต่อการสะท้อนแสงของเฮลิโอสแตทต้นทุนต่ำ สิ่งจำเป็นที่สำหรับการจำลองการสะท้อนแสงคือวิธีการคำนวณทิศของแสงสะท้อน ( $\hat{r}$ ) จากความสัมพันธ์ของทิศทางการสะท้อนแสงของกระจก ( $\hat{m}$ ) ทิศทางของแสงอาทิตย์ ( $\hat{s}$ ) และทิศทางของแสงสะท้อน ( $\hat{r}$ ) ตามกฎการสะท้อนแสง ทิศทางของแสงสะท้อน ( $\hat{r}$ ) จะสามารถหาได้จากสมการที่ 4.3

$$\hat{r} = 2(\hat{s} \cdot \hat{m})\hat{m} - \hat{s} \quad (4.3)$$

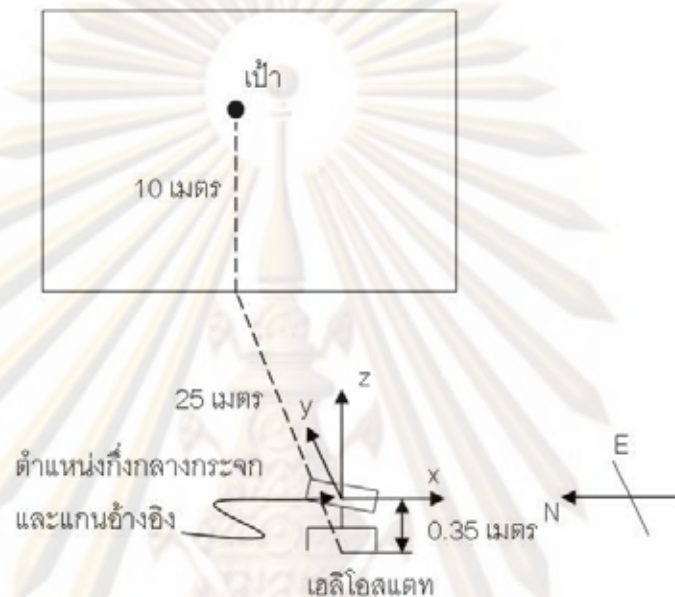
#### 4.3 ความคลาดเคลื่อนแบบต่างๆ ของเฮลิโอสแตทต้นทุนต่ำ

จากการศึกษาระบบตัวรับแสงส่วนกลางและเฮลิโอสแตทต้นทุนต่ำที่ได้ออกแบบไว้และหลักการทำงานของเฮลิโอสแตทต้นทุนต่ำ ผู้วิจัยสามารถจำแนกปัจจัยความคลาดเคลื่อนต่างๆ ที่ทำให้เฮลิโอสแตทต้นทุนต่ำสะท้อนผิดพลาดได้ดังนี้

1. ความคลาดเคลื่อนของทิศทางแสงอาทิตย์เนื่องจากการคำนวณ
2. ความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งกึ่งกลางกระจกเนื่องจากการติดตั้ง
3. ความคลาดเคลื่อนของทิศการวางตัวเริ่มต้นของกระจกเนื่องจากการติดตั้ง
4. ความคลาดเคลื่อนของระบบขับเคลื่อนเนื่องจากการผลิตและการประกอบ
5. ความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งกึ่งกลางกระจกเนื่องจากการผลิตชิ้นส่วนและการประกอบ

ปัจจัยความคลาดเคลื่อนเหล่านี้จะถูกนำมาทดสอบหาผลกระทบต่อการสะท้อนแสงของเฮลิโอสแตทต้นทุนต่ำที่ละปัจจัยด้วยการจำลองการสะท้อนแสงของเฮลิโอสแตทต้นทุนต่ำโดยอาศัยโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อที่จะตรวจสอบว่าปัจจัยความคลาดเคลื่อนใดมีผลกระทบต่อการสะท้อนแสงของเฮลิโอสแตทต้นทุนต่ำสูงที่สุด ระบบที่จำลองขึ้นเพื่อใช้ในการทดสอบการสะท้อนของเฮลิโอสแตทต้นทุนต่ำจะมีรายละเอียดดังแสดงในรูปที่ 4.4 เฮลิโอสแตทตั้งอยู่ที่พิกัดเส้นรุ้งที่ 13.7411 องศาเหนือ และเส้นแวงที่ 100.5319 องศาตะวันออกโดยอยู่ห่างจากตัวรับแสงเป็น

ระยะทาง 25 เมตร ตำแหน่งกึ่งกลางกระจกและตำแหน่งเป้าบนตัวรับแสงอยู่สูงจากพื้นเป็นระยะทาง 0.35 เมตร และ 10 เมตร ตามลำดับ ในส่วนของแกนที่ใช้ในการอ้างอิงจุดกำเนิด (Origin) จะตั้งอยู่ที่ตำแหน่งกึ่งกลางกระจกตามการออกแบบ โดยมีแกน  $x$  ชี้ไปทางทิศใต้ แกน  $y$  ชี้ไปทางทิศตะวันออก และแกน  $z$  ชี้ขึ้นจากพื้นตามลำดับ



รูปที่ 4.4 ระบบที่ใช้ในการทดสอบผลของปัจจัยความคลาดเคลื่อนต่างๆ ต่อการสะท้อนแสงของเฮลิโอสแตท

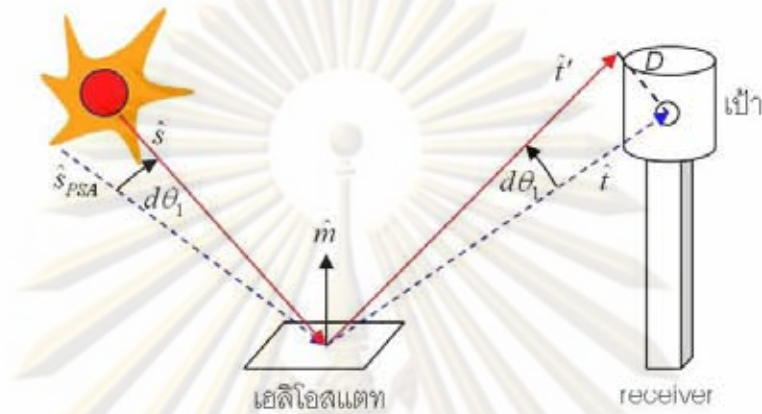
การจำลองการสะท้อนแสงของเฮลิโอสแตทต้นทุนต่ำจะทำการจำลองทุกๆ 1 ชั่วโมงตลอดทั้งปี พ.ศ. 2552 ตั้งแต่เวลา 9:00 น. ถึงเวลา 17:00 น.

ผลกระทบของปัจจัยความคลาดเคลื่อนต่างๆ ต่อการสะท้อนแสงของเฮลิโอสแตทต้นทุนต่ำจะแสดงอยู่ในรูปของระยะทางระหว่างตำแหน่งแสงสะท้อนจริงบนฉากกับตำแหน่งของเป้าหมายเฉลี่ยตลอดทั้งปี ( $D_{avg}$ ) โดยการทดสอบนี้จะใช้ค่า  $D_{avg}$  นี้เป็นค่าบ่งชี้ว่าปัจจัยความคลาดเคลื่อนชนิดใดส่งผลกระทบต่อการสะท้อนแสงของเฮลิโอสแตทต้นทุนต่ำสูงที่สุด

#### 4.3.1 ความคลาดเคลื่อนของทิศทางแสงอาทิตย์เนื่องจากการคำนวณ

ความคลาดเคลื่อนของทิศทางแสงอาทิตย์ ( $\delta$ ) เนื่องจากการคำนวณจะทำให้ทิศการสะท้อนแสงของกระจก ( $m$ ) ที่คำนวณได้จากสมการที่ 4.2 ผิดไปจากค่าที่ควรจะเป็น ดังที่ได้กล่าวมาแล้วว่าในการหาทิศทางของแสงอาทิตย์สำหรับเฮลิโอสแตทต้นทุนต่ำนี้ผู้วิจัยใช้วิธีการคำนวณด้วย PSA algorithm ในการหาทิศทางของแสงอาทิตย์ PSA algorithm จะคำนวณทิศทางของแสงอาทิตย์

( $\hat{s}$ ) โดยอาศัยตำแหน่งพิกัดของเฮลิโอสแตทบนผิวโลกที่บอกด้วยเส้นรุ้งและเส้นแวงและวันและเวลาที่สนใจที่อยู่ในรูปแบบของ Universal Time ผลของความคลาดเคลื่อนของทิศทางของแสงอาทิตย์ต่อการสะท้อนแสงของเฮลิโอสแตทต้นทุนต่ำจะถูกแสดงอยู่ในรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 ผลของความคลาดเคลื่อนของทิศทางของแสงอาทิตย์ต่อการสะท้อนแสงของเฮลิโอสแตทต้นทุนต่ำ

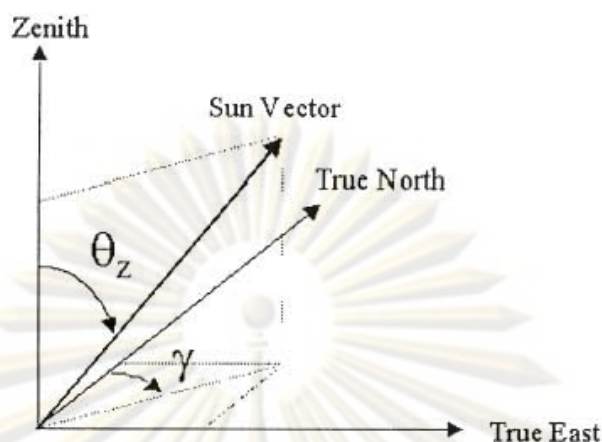
ผู้วิจัยสามารถประมาณระยะความผิดพลาดของการสะท้อนแสง ( $D$ ) เนื่องจากปัจจัยความคลาดเคลื่อนนี้ที่แสดงอยู่ในรูปของระยะทางระหว่างตำแหน่งแสงสะท้อนจริงกับตำแหน่งเป้าหมายที่สนใจบนฉากได้จากสมการที่ 4.4

$$D = L \times d\theta_1 \times \frac{\pi}{180} \quad (4.4)$$

โดยที่  $L$  คือระยะทางระหว่างตำแหน่งของเฮลิโอสแตทกับตำแหน่งเป้า และ  $d\theta_1$  คือค่าความผิดพลาดของมุมตกกระทบ (องศา)

ทิศทางของแสงอาทิตย์ที่คำนวณได้จาก PSA algorithm จะมีค่าความคลาดเคลื่อนไม่เกิน 0.5 ลิปดา ( $\approx 8.33 \times 10^{-3}$  องศา) จากทิศการสะท้อนแสงจริง [6] จากการศึกษางานวิจัยของ Blanco-Meriel และคณะ [6] พบว่าทิศทางของแสงอาทิตย์ที่คำนวณได้จาก PSA algorithm จะถูกแสดงอยู่ในรูปของมุมกวาด (azimuth angle,  $\gamma$ ) และมุมก้ม (zenith angle,  $\theta_z$ ) ดังแสดงในรูปที่ 4.6 มุม  $\gamma$  วัดจากแกน True North และมุม  $\theta_z$  วัดจากแกน Zenith

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.6 ระบบพิกัดเชิงมุม (angular coordinate) สำหรับแสดงทิศทางของแสงอาทิตย์  
ที่คำนวณได้จาก PSA algorithm

Blanco-Meriel ได้ทำการเปรียบเทียบทิศทางของแสงอาทิตย์ที่คำนวณได้จาก PSA algorithm กับทิศทางของแสงอาทิตย์ที่คำนวณได้จาก MICA (Multiyear Interactive Computer Almanac) ซึ่งมีความแม่นยำสูง โดยทิศทางของแสงอาทิตย์ที่คำนวณความคลาดเคลื่อนจากทิศทางของแสงอาทิตย์จริงไม่เกิน 0.5 พิลิปดา ( $\pm 1.39 \times 10^{-4}$  องศา) ผลการเปรียบเทียบทิศทางของแสงอาทิตย์ที่คำนวณได้จาก PSA algorithm และทิศทางแสงอาทิตย์ที่คำนวณได้จาก MICA ถูกแสดงอยู่ในรูปของผลต่างของมุมกวาด ( $y$ ) และผลต่างของมุมก้ม ( $\theta_z$ ) ดังแสดงในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ค่าความคลาดเคลื่อนของทิศทางของแสงอาทิตย์ที่คำนวณได้จาก PSA algorithm เมื่อเปรียบเทียบกับทิศทางของแสงอาทิตย์ที่ได้จาก MICA ตั้งแต่ปี 1999-2015

(หน่วย :  $10^{-3}$  องศา) [6]

	ค่าเฉลี่ย (average)	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD)
มุมกวาด ( $dy$ )	0.00	2.95
มุมก้ม ( $d\theta_z$ )	-1.33	1.78

ในการจำลองการสะท้อนแสงของเฮลิโอสแตทต้นทุนต่ำเนื่องจากความคลาดเคลื่อนของทิศทางของแสงอาทิตย์ ผู้วิจัยได้ตั้งสมมติฐานให้ค่าความคลาดเคลื่อนของทิศทางของแสงอาทิตย์มีลักษณะการกระจายตัวแบบ Normal Distribution โดยมีค่าเฉลี่ย (average) และค่าเบี่ยงเบน

มาตรฐาน (SD) ดังแสดงในตารางที่ 4.1 เพื่อใช้เป็นเงื่อนไขในการกำหนดทิศทางของแสงอาทิตย์จริง ( $s'$ ) สำหรับการจำลองการสะท้อนแสง ทิศทางของแสงอาทิตย์จริง ( $s'$ ) หาได้จากค่าทิศทางของแสงอาทิตย์ที่ได้จากการคำนวณ ( $s$ ) ด้วย PSA algorithm รวมกับค่าความคลาดเคลื่อนของทิศทางของแสงอาทิตย์ที่ถูกกำหนดขึ้นที่มีการกระจายตัวแบบ Normal distribution ตามที่ได้ตั้งสมมุติฐานไว้

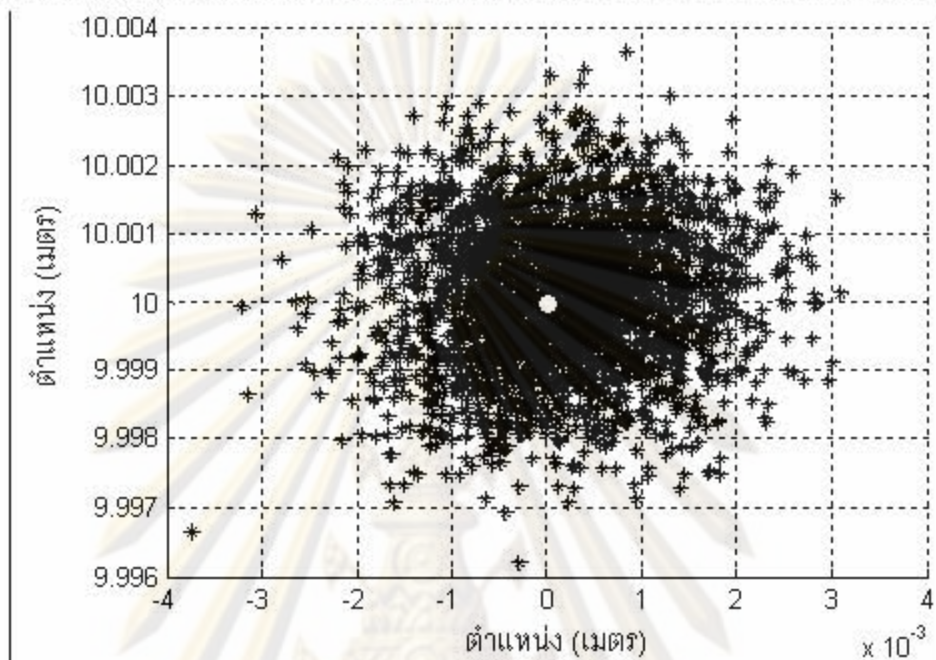
ผลจากการจำลองผลกระทบของปัจจัยความคลาดเคลื่อนของทิศทางของแสงอาทิตย์จากการคำนวณต่อการสะท้อนแสงของเฮลิโอสแตทต้นทุนต่ำ พบว่าตำแหน่งแสงสะท้อนที่เกิดขึ้นบนตัวรับแสงจะตกอยู่รอบตำแหน่งเป้าหมายที่กำหนดไว้ ค่าระยะทางระหว่างตำแหน่งแสงสะท้อนและตำแหน่งเป้าหมายค่าสูงที่สุด ( $D_{max}$ ) ค่าต่ำที่สุด ( $D_{min}$ ) และค่าเฉลี่ย ( $D_{avg}$ ) ตลอดทั้งปีแสดงอยู่ในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ค่าระยะทางระหว่างตำแหน่งแสงสะท้อนจริงและตำแหน่งเป้าหมาย  
(หน่วย : เซนติเมตร)

ครั้งที่	ค่าต่ำสุด ( $D_{min}$ )	ค่าสูงสุด ( $D_{max}$ )	ค่าเฉลี่ย ( $D_{avg}$ )
1	0.0021	0.4917	0.1215
2	0.0014	0.4370	0.1209
3	0.0019	0.4098	0.1228
4	0.0018	0.4827	0.1222
5	0.0015	0.4137	0.1237
6	0.0015	0.4078	0.1225
7	0.0024	0.4836	0.1223
8	0.0018	0.4027	0.1213
9	0.0016	0.4282	0.1219
10	0.0018	0.4190	0.1217
ค่าเฉลี่ย			0.1221

ค่า  $D_{avg}$  เฉลี่ยจากการจำลองทั้ง 10 ครั้ง (การจำลองแต่ละครั้งจำลองการสะท้อนแสงตลอด 1 ปี) มีค่าเท่ากับ 0.1221 เซนติเมตร ตัวอย่างการจำลองผลของปัจจัยความคลาดเคลื่อนของทิศทางของแสงอาทิตย์ต่อการสะท้อนแสงของเฮลิโอสแตทต้นทุนต่ำตลอดทั้งปีถูกแสดงอยู่ในรูปที่ 4.7

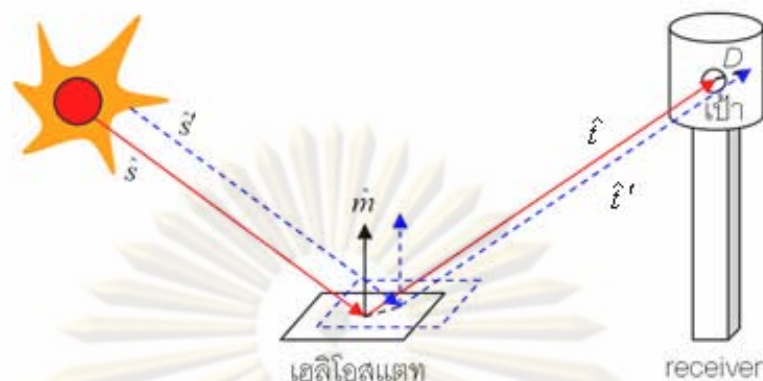
โดยแกน  $x$  และแกน  $z$  แสดงตำแหน่งบนตัวรับแสงมีหน่วยเป็นเมตร เครื่องหมายดอกจัน (\*) และ เครื่องหมายวงกลม (o) แทนตำแหน่งแสงสะท้อนและตำแหน่งเป้าหมายบนตัวรับแสงตามลำดับ



รูปที่ 4.7 ตัวอย่างการจำลองผลของปัจจัยความคลาดเคลื่อนของทิศทางของแสงอาทิตย์ต่อการสะท้อนแสงของเฮลิโอสแตทต้นทูลด้าตลอดทั้งปี

#### 4.3.2 ความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งกึ่งกลางกระจกเนื่องจากการติดตั้ง

ความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งกึ่งกลางกระจกเนื่องจากการติดตั้งจะทำให้ทิศทางของเป้าหมาย ( $\hat{e}$ ) ที่ใช้ในการคำนวณหาทิศทางการสะท้อนแสงของกระจก ( $\hat{m}$ ) ผิดพลาดไปจากความเป็นจริง การคำนวณหาทิศทางการสะท้อนแสงของกระจก ( $\hat{m}$ ) จะต้องใช้ทิศทางของแสงอาทิตย์ ( $\hat{e}$ ) และทิศทางของเป้าหมาย ( $\hat{e}$ ) ดังที่แสดงไว้ในสมการที่ 3.1 เมื่อตำแหน่งกึ่งกลางกระจกของเฮลิโอสแตทต้นทูลด้าคลาดเคลื่อนไปจากตำแหน่งที่ออกแบบไว้ ทิศทางเป้าหมาย ( $\hat{e}$ ) ที่ต้องคำนวณจากตำแหน่งกึ่งกลางกระจกกับตำแหน่งของเป้าหมายบนตัวรับแสงจึงมีความคลาดเคลื่อนตามไปด้วย ผลของปัจจัยความคลาดเคลื่อนอันนี้ทำให้ทิศทางการสะท้อนแสงของกระจกที่คำนวณได้ ( $\hat{m}$ ) ผิดพลาดไป ผลของความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งกึ่งกลางกระจกเนื่องจากการติดตั้งต่อการสะท้อนแสงของเฮลิโอสแตทต้นทูลด้าจะถูกแสดงไว้ในรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.8 ผลของความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งกึ่งกลางกระจกต่อการสะท้อนแสงของสถานีเอสแตทต้นทูนต่ำ

จากรูปที่ 4.8 เนื่องจากดวงอาทิตย์เป็นแหล่งกำเนิดแสงขนาดใหญ่และอยู่ห่างจากผิวโลกเป็นระยะทางที่ไกลมากทำให้ผลของความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งกึ่งกลางกระจกที่เกิดขึ้นต่อทิศทางของแสงอาทิตย์ที่คำนวณได้ ( $\hat{s}$ ) มีค่าน้อยมากจนสามารถละเลยได้ ผลของความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งกึ่งกลางกระจกที่เกิดขึ้นจึงเป็นเสมือนการย้ายตำแหน่งของกระจกที่ใช้สำหรับการสะท้อนแสงโดยมีทิศทางของรังสีตกกระทบหรือทิศทางของแสงอาทิตย์จริง ( $\hat{s}'$ ) คงเดิมและมีทิศทางของรังสีสะท้อนหรือทิศทางของแสงสะท้อนที่เกิดขึ้น ( $\hat{i}'$ ) ชนากับทิศทางของเป้าหมายที่ออกแบบไว้ ( $\hat{i}$ ) เราสามารถประมาณระยะความผิดพลาดของการสะท้อนแสง ( $D$ ) เนื่องจากผลของปัจจัยความคลาดเคลื่อนนี้ได้จากสมการที่ 4.5

$$D = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} \quad (4.5)$$

โดยที่  $x$ ,  $y$  และ  $z$  คือระยะความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งกึ่งกลางกระจกในแนวแกน  $x$ ,  $y$  และ  $z$  ตามลำดับ

ความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งกึ่งกลางกระจกเนื่องจากการติดตั้งเกิดจากความคลาดเคลื่อนในการรังวัดตำแหน่งสำหรับติดตั้งสถานีเอสแตทและความคลาดเคลื่อนในการติดตั้งสถานีเอสแตทบนตำแหน่งที่ได้ทำการรังวัดไว้ วิธีการรังวัดตำแหน่งมีหลายวิธีโดยแบ่งวิธีการรังวัดตามอุปกรณ์ที่ใช้ในการรังวัด การรังวัดตำแหน่งของระบบตัวรับแสงส่วนกลางที่เราสนใจใช้วิธีรังวัดแบบ Electrical Distance Measurement (EDM) [7] ในการรังวัดซึ่งมีความคลาดเคลื่อนในการรังวัดเนื่องจากอุปกรณ์ที่ใช้ไม่เกิน  $\pm 0.5$  เซนติเมตรสำหรับการวัดระยะที่มีความยาวไม่เกิน 1 กิโลเมตร รูปที่ 4.9 แสดงตัวอย่างของอุปกรณ์ที่ใช้ในการรังวัดตำแหน่งด้วยวิธี EDM





รูปที่ 4.9 ตัวอย่างของอุปกรณ์ที่ใช้ในการรังวัดตำแหน่งด้วยวิธี EDM [7]

ในส่วนของการติดตั้งเสลิวัดแบบบนตำแหน่งที่ได้จากการรังวัดเราใช้การประมาณด้วยสายตาในการติดตั้งเพื่อลดค่าใช้จ่ายในส่วนของอุปกรณ์ระบุตำแหน่ง เช่น เครื่องวัดระยะด้วยเลเซอร์หรือเครื่องวัดระยะด้วยคลื่นอัลตราโซนิก เป็นต้น ความคลาดเคลื่อนในส่วนนี้จะมีมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับทักษะในการติดตั้งของแต่ละบุคคล จากการตรวจวัดตำแหน่งของจุดกึ่งกลางของกระจกหลังจากการติดตั้งเสลิวัดแบบบนตำแหน่งที่รังวัดไว้ด้วยการใช้สายวัด 3 เส้นวัดระยะจากตำแหน่งอ้างอิง 3 จุด (ตำแหน่งที่ได้จากการรังวัด) ถึงตำแหน่งกึ่งกลางกระจกที่ออกแบบไว้พร้อมกันแล้วใช้ไม้บรรทัดวัดระยะระหว่างตำแหน่งกึ่งกลางกระจกจากการออกแบบกับตำแหน่งกึ่งกลางของกระจกที่ได้จากการติดตั้ง ( $\Delta d$ ) ผลการวัดค่า  $\Delta d$  จากการทดสอบติดตั้งเสลิวัดแบบบนตำแหน่งตำแหน่งรังวัดทั้งหมด 10 ครั้งถูกแสดงไว้ในตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ระยะเวลาความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งกึ่งกลางกระจกเนื่องจากการติดตั้ง ( $\Delta d$ ) (หน่วย : เซนติเมตร)

ครั้งที่	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$\Delta d$	0.7	1.2	0.8	1.1	1.0	0.9	1.3	0.7	1.0	0.8

อย่างไรก็ตามดังที่กล่าวไว้ข้างต้นว่าระยะความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งกึ่งกลางกระจกจากการติดตั้งเฮลิโอสแตทต้นทูนตำแหน่งรังวัดจะขึ้นอยู่กับทักษะในการติดตั้งของแต่ละบุคคล ดังนั้นระยะความคลาดเคลื่อนที่ยอมรับได้สำหรับการติดตั้งระบบตัวรับแสงส่วนกลางที่เราสนใจจะมีค่าไม่เกิน  $\pm 1.0$  เซนติเมตร ในแต่ละแนวแกน (แกนอ้างอิงที่กำหนดไว้ข้างต้น)

การทดสอบผลกระทบของปัจจัยความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งกึ่งกลางกระจกต่อการสะท้อนแสงของเฮลิโอสแตทต้นทูนต่ำจะใช้ค่าความคลาดเคลื่อนที่ได้จากการสุ่มค่า ผู้วิจัยได้ตั้งสมมุติฐานให้ค่าความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งกึ่งกลางกระจกเนื่องจากการติดตั้งในแต่ละแนวแกนมีการกระจายตัวแบบ Normal distribution โดยมีค่าเฉลี่ย (average) และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD) ดังแสดงในตารางที่ 4.4 เพื่อใช้เป็นเงื่อนไขในการกำหนดค่าความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งกึ่งกลางของกระจกที่ใช้ในการจำลองการสะท้อนแสง

ตารางที่ 4.4 ค่าเฉลี่ย (average) และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD) ของค่าความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งกึ่งกลางกระจกเนื่องจากการติดตั้งในแนวแกนต่างๆ (หน่วย : เซนติเมตร)

แกน	ค่าเฉลี่ย (average)	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD)
x	0.0	0.5
y	0.0	0.5
z	0.0	0.5

ผลจากการจำลองผลกระทบของปัจจัยความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งกึ่งกลางกระจกเนื่องจากการติดตั้งต่อการสะท้อนแสงของเฮลิโอสแตทต้นทูนต่ำ พบว่าตำแหน่งแสงสะท้อนที่เกิดขึ้นบนตัวรับแสงจะตกอยู่ที่ตำแหน่งเดียวกันตลอดทั้งปี ค่าระยะทางระหว่างตำแหน่งแสงสะท้อนและตำแหน่งเป้าหมายมีค่าสูงที่สุด ( $D_{max}$ ) ค่าต่ำที่สุด ( $D_{min}$ ) และค่าเฉลี่ย ( $D_{avg}$ ) ดังแสดงอยู่ในตารางที่ 4.5

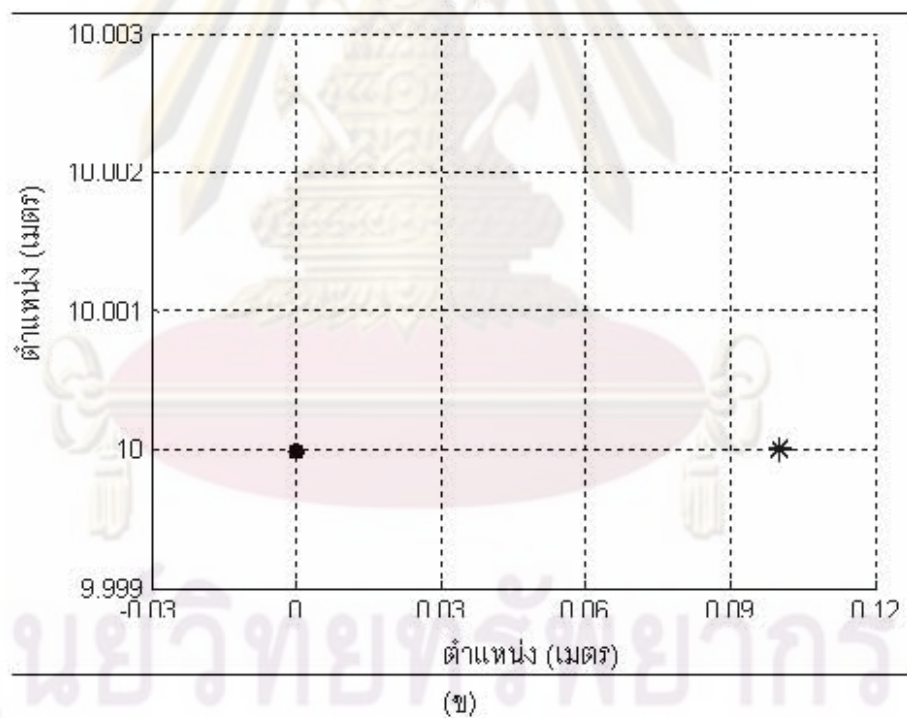
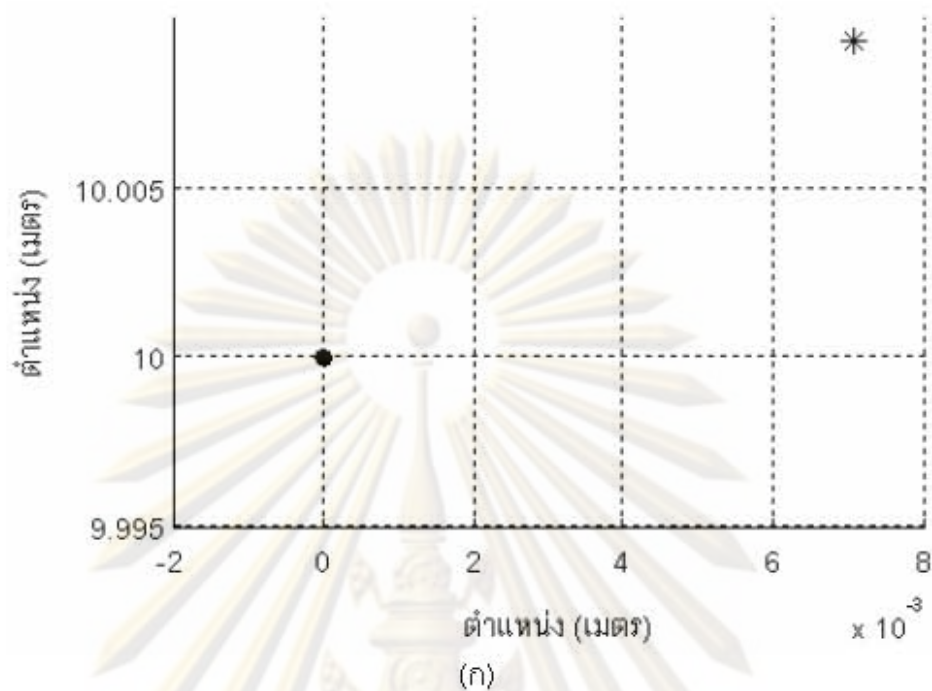
ตารางที่ 4.5 ค่ำระยะทางระหว่างตำแหน่งแสงสะท้อนจริงและตำแหน่งเป้าหมาย

(หน่วย : เซนติเมตร)

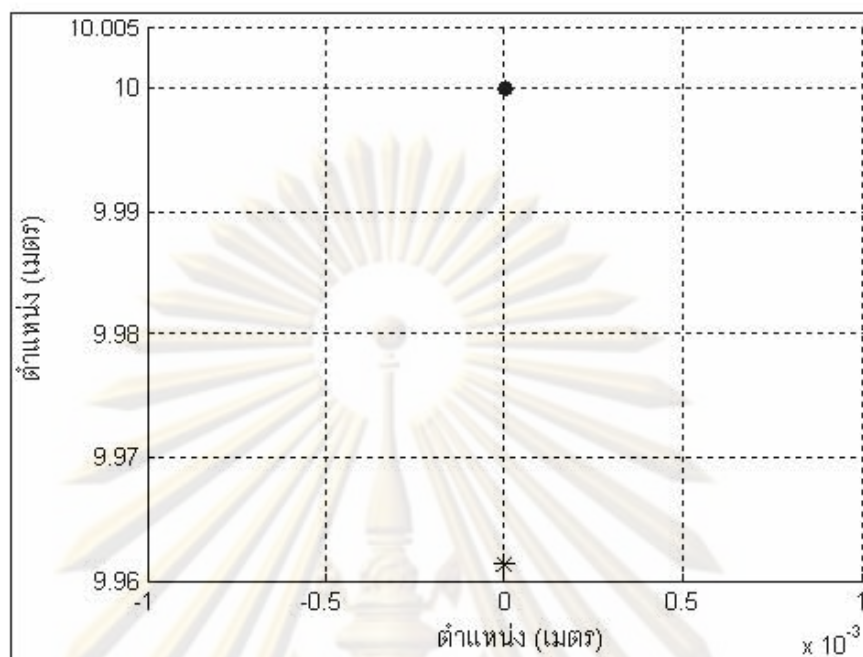
ครั้งที่	ค่าต่ำสุด ( $D_{\min}$ )	ค่าสูงสุด ( $D_{\max}$ )	ค่าเฉลี่ย ( $D_{avg}$ )
1	0.5938	0.5938	0.5938
2	1.1684	1.1684	1.1684
3	0.6852	0.6852	0.6852
4	1.0475	1.0475	1.0475
5	1.2528	1.2528	1.2528
6	0.7910	0.7910	0.7910
7	0.5477	0.5477	0.5477
8	0.4362	0.4362	0.4362
9	0.4092	0.4092	0.4092
10	0.9406	0.9406	0.9406
ค่าเฉลี่ย			0.7872

ค่า  $D_{avg}$  เฉลี่ยจากการจำลองทั้ง 10 ครั้งมีค่าเท่ากับ 0.7872 เซนติเมตร ตัวอย่างผลการจำลองผลของปัจจัยความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งกึ่งกลางกระจกต่อการสะท้อนแสงของเฮลิโอสแตทต้นทุนต่ำตลอดทั้งปีถูกแสดงอยู่ในรูปที่ 4.10(ก) ในขณะที่รูปที่ 4.10(ข), (ค) และ (ง) จะแสดงตัวอย่างผลของความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งกึ่งกลางกระจกเฉพาะในแนวแกน x แนวแกน y และแนวแกน z ตามลำดับ ในรูปที่ 4.10 แกน x และแกน z แสดงตำแหน่งบนตัวรับแสงมีหน่วยเป็นเมตร เครื่องหมายดอกจัน (\*) และเครื่องหมายวงกลม (•) แทนตำแหน่งแสงสะท้อนและตำแหน่งเป้าหมายบนตัวรับแสงตามลำดับ

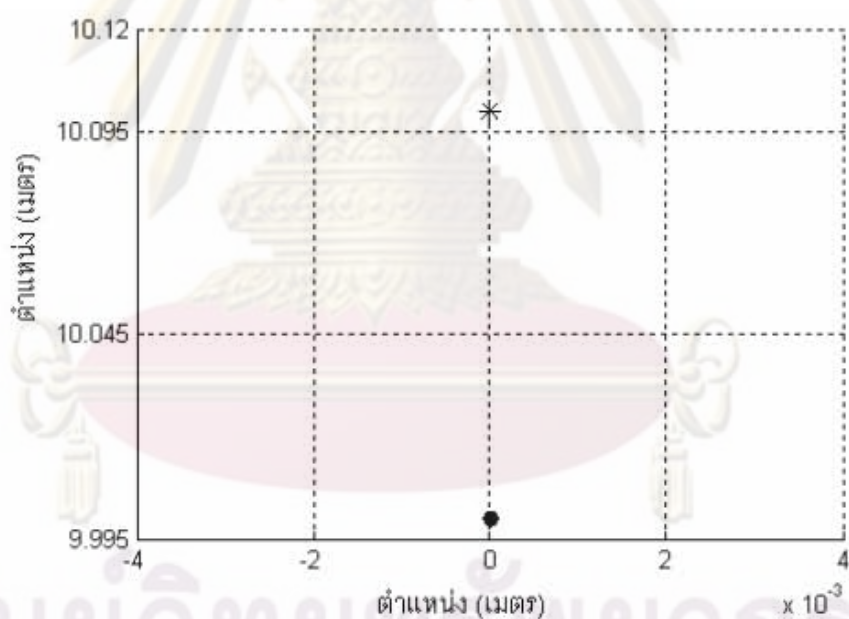
ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ศูนย์วิจัยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



(ค)



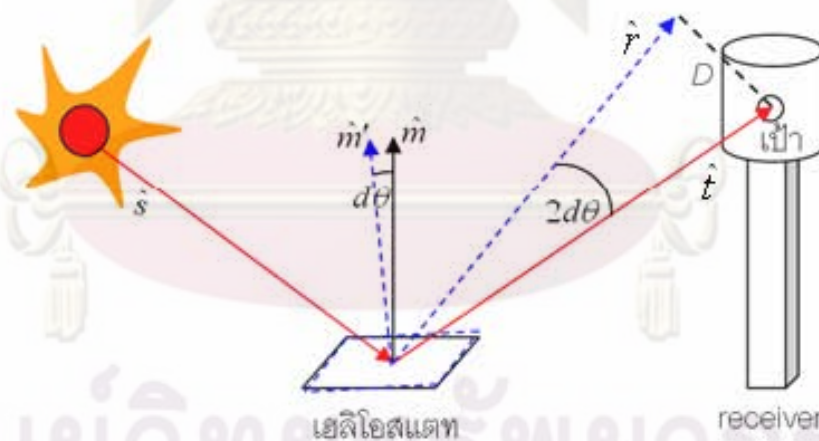
(ง)

รูปที่ 4.10(ก) ตัวอย่างผลการจำลองผลของปัจจัยความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งกึ่งกลางกระจก ต่อการสะท้อนแสงของเฮลิโอสแตทต้นทุนต่ำตลอดทั้งปี, (ข) ตัวอย่างผลการสะท้อนแสงของเฮลิโอสแตทต้นทุนต่ำเมื่อมีคลาดเคลื่อนในแนวแกน x, (ค) ตัวอย่างผลการสะท้อนแสงของเฮลิโอสแตทต้นทุนต่ำเมื่อมีคลาดเคลื่อนในแนวแกน y และ (ง) ตัวอย่างผลการสะท้อนแสงของเฮลิโอสแตทต้นทุนต่ำเมื่อมีคลาดเคลื่อนในแนวแกน z

ลักษณะเฉพาะของการสะท้อนแสงของเฮลิโอสแตทต้นทุนต่ำดังที่ได้แสดงไว้ในรูปที่ 4.10(ข), (ค) และ (ง) ทำให้เราสามารถประมาณค่าความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งกึ่งกลางกระจกได้ว่า ตำแหน่งกึ่งกลางกระจกมีความคลาดเคลื่อนไปในแนวแกนใดและเป็นระยะทางเท่าไร ซึ่งอาจจะสามารถนำค่าที่ประมาณนี้มาใช้เป็นค่าปรับแก้ตำแหน่งกึ่งกลางกระจกในเบื้องต้นได้

#### 4.3.3 ความคลาดเคลื่อนของทิศการวางตัวเริ่มต้นของกระจกเนื่องจากการติดตั้ง

ความคลาดเคลื่อนของทิศการวางตัวเริ่มต้นของกระจกเนื่องจากการติดตั้งจะส่งผลให้ทิศการสะท้อนแสงของกระจกที่ได้จากการคำนวณ ( $\hat{m}$ ) กับทิศการสะท้อนแสงจริงของกระจก ( $\hat{m}'$ ) มีค่าต่างกันเท่ากับค่าความคลาดเคลื่อนของทิศการวางตัวเริ่มต้นของกระจกจากการออกแบบเสมอ เฮลิโอสแตทแบบที่ไม่มีอุปกรณ์วัดทิศทาง (directional sensor) และอุปกรณ์วัดมุมการหมุนของเพลลาขับ (encoder) จะใช้ทิศการวางตัวเริ่มต้นของกระจกเป็นค่าอ้างอิงในการควบคุมเฮลิโอสแตทให้สะท้อนแสงไปยังเป้าหมายที่กำหนดไว้ เมื่อค่าทิศการวางตัวเริ่มต้นของกระจกที่ใช้สำหรับการอ้างอิงคลาดเคลื่อนทิศการสะท้อนแสงของกระจกจึงคลาดเคลื่อนตามไปด้วย ผลของความคลาดเคลื่อนของทิศการวางตัวเริ่มต้นของกระจกเนื่องจากการติดตั้งต่อการสะท้อนแสงของเฮลิโอสแตทต้นทุนต่ำนี้ถูกแสดงไว้ในรูปที่ 4.11



รูปที่ 4.11 ผลของความคลาดเคลื่อนของทิศการวางตัวเริ่มต้นของกระจกต่อการสะท้อนแสงของเฮลิโอสแตทต้นทุนต่ำ

จากรูปที่ 4.11 จะเห็นว่าความคลาดเคลื่อนของทิศการสะท้อนแสงของกระจก ( $d\theta$ ) ทำให้ทิศทางของแสงสะท้อน ( $\hat{r}$ ) ผิดพลาดไป  $2d\theta$  องศา จากทิศทางของเป้าหมาย ( $\hat{r}'$ ) เมื่อความคลาดเคลื่อนของทิศการวางตัวเริ่มต้นของกระจกเกิดขึ้นในระนาบเดียวกันกับการสะท้อนแสง ซึ่งความผิดพลาดในการสะท้อนแสงที่เกิดขึ้นจะเป็นค่าความผิดพลาดสูงที่สุดที่เกิดขึ้นได้ ค่าระยะความ

ผิดพลาดสูงที่สุดในการสะท้อนแสง ( $D$ ) เนื่องจากผลของปัจจัยความคลาดเคลื่อนนี้สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 4.6

$$D = L \times 2d\theta \times \frac{\pi}{180} \quad (4.6)$$

โดยที่  $L$  คือระยะทางระหว่างตำแหน่งของเฮลิโอสแตทกับตำแหน่งเป้า

การติดตั้งเฮลิโอสแตทต้นทุ่นต่ำของระบบตัวรับแสงส่วนกลางนี้จะติดตั้งให้เฮลิโอสแตทต้นทุ่นต่ำทุกตัวมีทิศการวางตัวเริ่มต้นของกระจกชี้ไปทางทิศใต้ (azimuth angle's calibration) และวางตัวขนานกับระนาบ xy (altitude angle's calibration) ซึ่งผู้วิจัยจะแบ่งขั้นตอนการติดตั้งออกเป็น 2 ขั้นตอนดังนี้

1. การติดตั้งให้ทิศการวางตัวเริ่มต้นของกระจกชี้ไปทางทิศใต้ (azimuth angle's calibration) ในการสำรวจรังวัดตำแหน่งสำหรับติดตั้งเฮลิโอสแตทในหัวข้อที่แล้ว แกนอ้างอิงที่ใช้บอกทิศทาง  $x$  และ  $y$  ของตำแหน่งรังวัดจะมีแกน  $x$  และแกน  $y$  ชี้ไปยังทางทิศเหนือและทิศตะวันออกตามลำดับ ซึ่งทำให้สามารถหาทิศใต้จากตำแหน่งรังวัดได้โดยความคลาดเคลื่อนของทิศใต้ที่หาได้นี้จะมีความคลาดเคลื่อนไม่เกิน  $\pm 0.3$  องศา (คำนวณจากค่าความคลาดเคลื่อนสูงสุดของการรังวัดตำแหน่ง  $\pm 0.5$  เซนติเมตร) การติดตั้งทิศการวางตัวเริ่มต้นของกระจกให้ชี้ไปทางทิศใต้จะใช้เวลาประมาณด้วยสายตาเทียบกับเส้นทิศใต้ที่หาได้จากการผลของการรังวัดตำแหน่งความคลาดเคลื่อนส่วนนี้จึงขึ้นอยู่กับทักษะในการติดตั้งของแต่ละบุคคล จากการตรวจวัดทิศทางของกระจกหลังจากการติดตั้งทั้งหมด 10 ครั้ง ค่าความคลาดเคลื่อนของทิศการวางตัวเริ่มต้นของกระจกในแนวมุมกวาด (azimuth angle error,  $\Delta\theta_{az}$ ) เทียบกับทิศใต้แสดงอยู่ในตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 ค่าความคลาดเคลื่อนของทิศการวางตัวเริ่มต้นของกระจกในแนวมุมกวาด (azimuth angle error,  $\Delta\theta_{az}$ ) เทียบกับทิศใต้ (หน่วย : องศา)

ครั้งที่	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$\Delta\theta_{az}$	-0.8	1.0	0.7	-0.7	-1.0	-1.1	-0.9	1.0	0.8	0.8

การวัดค่าความคลาดเคลื่อนนี้ทำโดยการนำเลเซอร์ชี้ตำแหน่ง (Laser pointer) มาติดตั้งฉากกับผิวกระจก จากนั้นจึงปรับกระจกให้ก้ำมลงหาพื้นที่องศาต่างกัน 2 ค่าเพื่อให้แสงจากเลเซอร์ชี้ตำแหน่งปรากฏบนพื้น 2 ตำแหน่งแล้วทำการมาร์คจุดที่แสงเลเซอร์ชี้เอาไว้ จากนั้นจึงลากส่วนของเส้นตรงจากจุดทั้ง 2 แล้ววัดมุมที่เกิดขึ้นระหว่างส่วนของเส้นตรงที่ได้นี้กับเส้นทิศใต้ที่ได้จากการรังวัด

2. การติดตั้งให้ทิศการวางตัวเริ่มต้นของกระจกวางตัวขนานกับระนาบ xy (altitude angle calibration) ในการติดตั้งทิศการวางตัวเริ่มต้นของกระจกให้วางตัวขนานกับระนาบ xy นั้นจะใช้เพียงระดับน้ำ (spirit level) เท่านั้นในการตรวจวัดระนาบของกระจก การปรับระดับทำโดยการวางระดับน้ำบนผิวกระจกจากนั้นทำการปรับทิศทางของกระจกในแนวมุมเงย (altitude angle) ด้วยชุดขับเคลื่อนของเฮลิโอสแตทต้นทุนต่ำจนกระทั่งได้ระดับ (ทิศทางของกระจกจะตั้งฉากกับระนาบ xy) แล้วจึงปรับทิศทางของกระจกกลับมา 90 องศาเพื่อให้ทิศทางของกระจกขนานกับระนาบ xy ความคลาดเคลื่อนในส่วนนี้จะมีค่าไม่เกินความคลาดเคลื่อนของระดับน้ำที่ใช้ซึ่งมีค่าไม่เกิน  $\pm 0.057$  องศา จากการตรวจวัดทิศทางของกระจกหลังจากการติดตั้งทั้งหมด 10 ครั้งด้วยเครื่องวัดมุม ค่าความคลาดเคลื่อนของทิศการวางตัวเริ่มต้นของกระจกในแนวมุมเงย (Altitude angle error,  $\Delta\theta_{al}$ ) เทียบกับแนวระนาบ xy แสดงอยู่ในตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.7 ค่าความคลาดเคลื่อนของทิศการวางตัวเริ่มต้นของกระจกในแนวมุมเงย (altitude angle error,  $\Delta\theta_{al}$ ) เทียบกับแนวระนาบ xy (หน่วย : องศา)

ครั้งที่	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$\Delta\theta_{al}$	0.033	-0.035	-0.040	0.031	-0.039	0.036	-0.037	0.031	0.032	0.034

ความคลาดเคลื่อนของทิศการวางตัวเริ่มต้นของกระจกจากการติดตั้งทั้ง 2 ขั้นตอนนี้จะมีมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับทักษะการติดตั้งของแต่ละบุคคล อย่างไรก็ตามสำหรับระบบตัวรับแสงส่วนกลางที่สนใจนี้ค่าความคลาดเคลื่อนของทิศการวางตัวเริ่มต้นของกระจกที่ยอมรับได้จะมีค่าความคลาดเคลื่อนในแนวมุมกวาด (azimuth angle error) และในแนวมุมเงย (altitude angle error) ไม่เกินมุมละ  $\pm 3.0$  องศา

ในการจำลองการสะท้อนแสงของเฮลิโอสแตทต้นทุนต่ำเนื่องจากปัจจัยความคลาดเคลื่อนของทิศการวางตัวเริ่มต้นของกระจก ผู้วิจัยได้ตั้งสมมุติฐานให้ค่าความคลาดเคลื่อนของทิศการวางตัวเริ่มต้นของกระจกเนื่องจากการติดตั้งในแนวมุมกวาด ( $\Delta\theta_{az}$ ) และในแนวมุมเงย ( $\Delta\theta_{al}$ ) มีการกระจายตัวแบบ Normal distribution โดยมีค่าเฉลี่ย (average) และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD) ดังแสดงในตารางที่ 4.8 เพื่อใช้เป็นเงื่อนไขในการหาค่าความคลาดเคลื่อนของทิศการวางตัวเริ่มต้นของกระจกที่ใช้ในการจำลองการสะท้อนแสง



ตารางที่ 4.8 ค่าเฉลี่ย (average) และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD) ของค่าความคลาดเคลื่อนของ  
 ทิศการวางตัวเริ่มต้นของกระจกในแนวมุมกวาดและในแนวมุมเงย (หน่วย : องศา)

มุม	ค่าเฉลี่ย (average)	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD)
$\Delta\theta_{az}$	0.0	1.0
$\Delta\theta_{al}$	0.0	1.0

ค่าความคลาดเคลื่อนของทิศการวางตัวเริ่มต้นของกระจกเนื่องจากการติดตั้งจะถูกกำหนดขึ้นจาก  
 การกระจายของค่าความคลาดเคลื่อนตัวแบบ Normal distribution ตามที่ได้ตั้งสมมุติฐานไว้

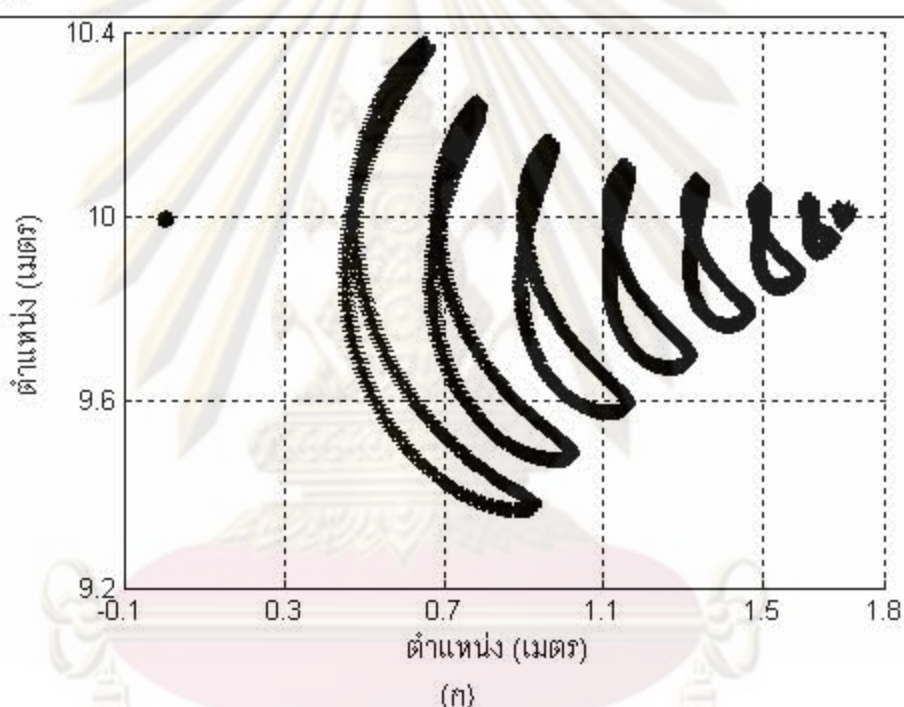
ผลจากการจำลองผลกระทบของปัจจัยความคลาดเคลื่อนของทิศการวางตัวเริ่มต้นของ  
 กระจกเนื่องจากการติดตั้งต่อการสะท้อนแสงของเฮลิโอสแตตต้นทุนต่ำ พบว่าตำแหน่งแสงสะท้อน  
 ที่เกิดขึ้นบนตัวรับแสงจะมีรูปแบบเฉพาะตัวขึ้นอยู่กับขนาดของมุมกวาดและมุมเงยที่สุ่มได้ว่าอัน  
 ใดมีขนาดใหญ่กว่ากันโดยเครื่องหมายของมุมจะเป็นตัวกำหนดบริเวณที่แสงจะสะท้อนไป ค่า  
 ระยะทางระหว่างตำแหน่งแสงสะท้อนและตำแหน่งเป้าหมายมีค่าสูงสุด ( $D_{max}$ ) ค่าต่ำที่สุด  
 ( $D_{min}$ ) และค่าเฉลี่ย ( $D_{avg}$ ) ถูกแสดงอยู่ในตารางที่ 4.9

ตารางที่ 4.9 ค่าระยะทางระหว่างตำแหน่งแสงสะท้อนจริงและตำแหน่งเป้าหมาย

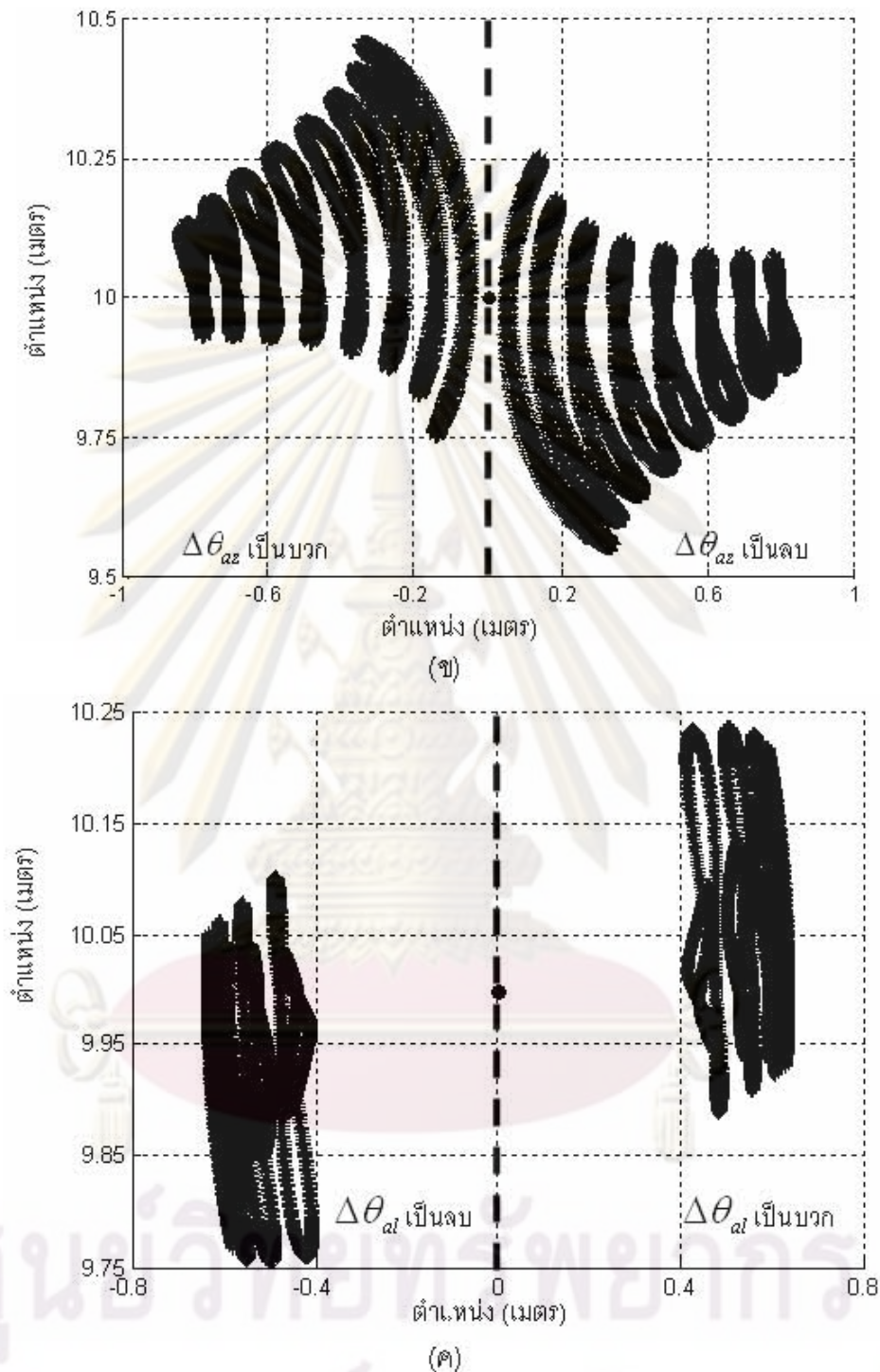
(หน่วย : เซนติเมตร)

ครั้งที่	ค่าต่ำสุด ( $D_{min}$ )	ค่าสูงสุด ( $D_{max}$ )	ค่าเฉลี่ย ( $D_{avg}$ )
1	46.0784	171.1422	125.3584
2	11.9660	69.3458	46.4282
3	2.4579	19.5019	14.5823
4	6.7897	107.4208	55.0387
5	60.8414	112.8465	98.6863
6	0.6950	41.3916	21.3380
7	76.4370	142.5853	124.2837
8	3.4249	72.6403	37.2514
9	36.7200	150.1558	107.7248
10	0.1280	84.4934	43.6878
ค่าเฉลี่ย			67.4380

ค่า  $D_{off}$  เฉลี่ยจากการจำลองทั้ง 10 ครั้งมีค่าเท่ากับ 13.4715 เซนติเมตร ตัวอย่างผลการจำลองผลของปัจจัยความคลาดเคลื่อนของทิศทางวางตัวเริ่มต้นของกระจกต่อการสะท้อนแสงของเฮลิโอสแตตต้นทูนต่ำตลอดทั้งปีถูกแสดงอยู่ในรูปที่ 4.12(ก) ในขณะที่รูปที่ 4.12 (ข) และ (ค) จะแสดงตัวอย่างผลของความคลาดเคลื่อนของทิศทางวางตัวเริ่มต้นของกระจกเฉพาะในแนวมุมกวาด (azimuth angle error,  $\Delta\theta_{az}$ ) และในแนวมุมเงย (altitude angle error,  $\Delta\theta_{el}$ ) ตามลำดับ ในรูปที่ 4.12 แกน x และแกน z แสดงตำแหน่งบนตัวรับแสงมีหน่วยเป็นเมตร เครื่องหมายดอกจัน (\*) และเครื่องหมายวงกลม (•) แทนตำแหน่งแสงสะท้อนและตำแหน่งเป้าหมายบนตัวรับแสงตามลำดับ



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.12(ก) ตัวอย่างผลการจำลองผลของปัจจัยความคลาดเคลื่อนของทิศการวางตัวเริ่มต้นของ  
 กระจกต่อการสะท้อนแสงของเฮลิโอสแตตต้นทูนต่ำตลอดทั้งปี, (ข) ตัวอย่างผลการสะท้อนแสง  
 ของเฮลิโอสแตตต้นทูนต่ำเมื่อทิศการวางตัวเริ่มต้นของกระจกคลาดเคลื่อนในแนวมุมกวาด  
 (azimuth angle error) และ (ค) ตัวอย่างผลการสะท้อนแสงของเฮลิโอสแตตต้นทูนต่ำเมื่อทิศการ  
 วางตัวเริ่มต้นของกระจกคลาดเคลื่อนในแนวมุมเฝย (altitude angle error)

ลักษณะเฉพาะของการสะท้อนแสงของเฮลิโอสแตทต้นทุ่นต่ำดังที่ได้แสดงไว้ในรูปที่ 4.12 (ข) จะเห็นได้ว่าในขณะที่ค่าความคลาดเคลื่อนของมุมกวาดมีค่าเป็นบวก (วัดมุมการหมุนตามกฏมือขวา) ผลการสะท้อนแสงจะตกอยู่บริเวณฝั่งซ้ายของตำแหน่งเป้าและเมื่อมีค่าเป็นลบผลการสะท้อนแสงจะตกอยู่บริเวณฝั่งขวาของตำแหน่งเป้า ในขณะที่รูปที่ 4.12 (ค) แสดงให้เห็นว่าเมื่อค่าความคลาดเคลื่อนของมุมเงยมีค่าเป็นบวกผลการสะท้อนแสงจะตกอยู่บริเวณด้านบนซ้ายของตำแหน่งเป้า และตกอยู่บริเวณด้านล่างขวาของตำแหน่งเป้าเมื่อค่าความคลาดเคลื่อนของมุมเงยมีค่าเป็นลบ จากลักษณะเฉพาะของการสะท้อนแสงดังกล่าวทำให้เราสามารถประมาณค่าความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งกึ่งกลางกระจกได้ว่าทิศการวางตัวเริ่มต้นของกระจกมีความคลาดเคลื่อนไปในทิศทางใดและทำมุมกี่องศากับทิศทางการวางตัวเริ่มต้นของกระจกที่ได้ออกแบบไว้ ซึ่งอาจจะสามารถนำค่าที่ประมาณนี้มาใช้เป็นค่าปรับแก้ทิศการวางตัวเริ่มต้นของกระจกในเบื้องต้นได้

#### 4.3.4 ความคลาดเคลื่อนของระบบขับเคลื่อนเนื่องจากการผลิตและการประกอบ

ความคลาดเคลื่อนของระบบขับเคลื่อนเนื่องจากการผลิตและการประกอบจะส่งผลให้ขนาดของมุมที่สั่งให้ชุดขับเคลื่อนหมุนไป ( $\theta_{order}$ ) และขนาดของมุมที่ได้จากการหมุนของชุดขับเคลื่อน ( $\theta_{actual}$ ) ไม่เท่ากัน ระบบขับเคลื่อนที่ไม่มีอุปกรณ์ตรวจวัดมุมการหมุน (encoder) และใช้การควบคุมแบบเปิด (open-loop control) ในการควบคุมทิศการสะท้อนแสงของกระจกจะมีความเป็นไปได้สูงมากที่มุม  $\theta_{order}$  และมุม  $\theta_{actual}$  ที่ได้จะมีค่าไม่เท่ากันซึ่งเป็นผลมาจากระยะที่คลาดเคลื่อนระหว่างฟันของเฟืองที่ขบกัน (tooth-to-tooth composite error) การหมุนเยื้องจุดศูนย์กลางของเฟืองตาม (runout position error) และความไม่แน่นอนในการหมุนของมอเตอร์ ความแตกต่างระหว่างมุม  $\theta_{order}$  และมุม  $\theta_{actual}$

ผลของความแตกต่างระหว่างมุม  $\theta_{order}$  และมุม  $\theta_{actual}$  ทำให้ทิศการสะท้อนแสงจริงของกระจก ( $\hat{m}'$ ) ผิดพลาดซึ่งจะมีผลคล้ายกับผลจากความคลาดเคลื่อนของทิศการวางตัวเริ่มต้นของกระจกแต่แตกต่างกันตรงที่ขนาดของมุมความผิดพลาด ( $d\theta$ ) ที่เกิดจากปัจจัยความคลาดเคลื่อนนี้จะมีค่าไม่คงที่โดยค่า  $d\theta$  ระหว่างทิศการสะท้อนแสงของกระจกจากการคำนวณ ( $\hat{m}$ ) และทิศการสะท้อนแสงจริงของกระจก ( $\hat{m}'$ ) นี้จะมีค่าเปลี่ยนแปลงไปตามฟังก์ชันที่ขึ้นกับมุมการหมุนของชุดเฟืองทดและมอเตอร์ ผลของความคลาดเคลื่อนของระบบขับเคลื่อนเนื่องจากการผลิตและการประกอบต่อการสะท้อนแสงของเฮลิโอสแตทต้นทุ่นต่ำและระยะความผิดพลาดของการสะท้อนแสง (D) เนื่องจากผลของปัจจัยความคลาดเคลื่อนนี้แสดงอยู่ในรูปที่ 4.11 และสมการที่ 4.6 ตามลำดับ

เช่นเดียวผลของความคลาดเคลื่อนและระยะความผิดพลาดของการสะท้อนแสงที่เกิดขึ้นเนื่องจากความคลาดเคลื่อนของทิศทางวางตัวเริ่มต้นของกระจก

ความผิดพลาดของมุมการหมุน ( $d\theta$ ) ระหว่างมุม  $\theta_{order}$  และมุม  $\theta_{actual}$  ของระบบขับเคลื่อนของเฮลิโอสแตทต้นทุนต่ำที่เกิดขึ้นนี้มีผลเนื่องมาจากค่าความผิดพลาดที่ยอมรับ (Tolerance) ที่ใช้ในการผลิตและการประกอบชุดเพื่องทดและค่าความไม่แน่นอนในการหมุนของสเต็ปเปอร์มอเตอร์ ความผิดพลาดของมุมการหมุนทั้ง 2 ส่วนมีรายละเอียดดังต่อไปนี้ [8]

1. ความผิดพลาดของมุมการหมุนเนื่องมาจากค่าความผิดพลาดที่ยอมรับ (tolerance) ที่ใช้ในการผลิตและการประกอบชุดเพื่องทด การผลิตชุดเพื่องตัวหนอนสำหรับเฮลิโอสแตทต้นทุนต่ำ ค่าความผิดพลาดที่ยอมรับ (tolerance) ที่ใช้ในการผลิตชุดเพื่องทดเท่ากับ  $\pm 0.2$  มิลลิเมตรซึ่งทำให้ขนาดของฟันเฟืองและจุดหมุนของเฟืองที่ผลิตได้มีขนาดและตำแหน่งคลาดเคลื่อนไปจากการออกแบบ ผลจากการตรวจวัดความผิดพลาดของชุดเพื่องทดนี้ของ [8] พบว่าความผิดพลาดของมุมการหมุนเนื่องจากค่าความผิดพลาดที่ยอมรับสามารถประมาณได้จากสมการที่ 4.7

$$\Delta\theta_{tolerance} = 0.065 \sin(\theta_{order} + \phi) + 0.025 \sin(100 \cdot \theta_{order} + \phi) \quad (4.7)$$

โดยที่  $\phi$  คือค่า phase shift ของชุดเพื่องตัวหนอน (หน่วย : องศา) ซึ่งผลจากการวัดมีค่าเท่ากับ 155.8 องศา

2. ความผิดพลาดของมุมการหมุนเนื่องมาจากความไม่แน่นอนในการหมุนของสเต็ปเปอร์มอเตอร์ ( $\Delta\theta_{random}$ ) ดังที่กล่าวมาแล้วว่าหลักการของการออกแบบเฮลิโอสแตทต้นทุนต่ำเพื่อลดค่าใช้จ่ายในการผลิตและการติดตั้งเฮลิโอสแตทอาจทำให้ความแม่นยำในการสะท้อนแสงของเฮลิโอสแตทลดลงได้แต่จะต้องไม่ทำให้ความสามารถในการซ้ำเติม (Repeatability) ของเฮลิโอสแตทสูญเสียไป ดังนั้นการเลือกใช้มอเตอร์สำหรับสร้างระบบขับเคลื่อนของเฮลิโอสแตทจึงต้องคำนึงถึงค่าความไม่แน่นอนในการหมุนของมอเตอร์เป็นหลักโดยค่าความไม่แน่นอนในการหมุนจะต้องมีค่าน้อยกว่าความละเอียดในการขับของระบบขับเคลื่อนเสมอ จากผลการตรวจวัดค่าความไม่แน่นอนในการหมุนของสเต็ปเปอร์มอเตอร์ของ [8] พบว่าค่าความไม่แน่นอนในการหมุนของสเต็ปเปอร์มอเตอร์มีค่าไม่เกิน  $9.868 \times 10^{-3}$  องศา และมีค่ารากเฉลี่ยกำลังสอง (Root Mean Square, RMS) เท่ากับ  $3.304 \times 10^{-3}$  องศา ซึ่งถือว่าเป็นค่าที่ยอมรับได้เนื่องจากมีค่าน้อยกว่าความละเอียดในการหมุนของระบบขับเคลื่อน (ความละเอียดในการหมุนของระบบขับเคลื่อนเท่ากับ  $18 \times 10^{-3}$ )

ในการจำลองการสะท้อนแสงของเฮลิโอสแตทต้นทุนต่ำเนื่องจากปัจจัยความคลาดเคลื่อนของระบบขับเคลื่อนเราจะแบ่งค่าความผิดพลาดของมุมการหมุนออกเป็น 2 ส่วนคือค่าความผิดพลาดของมุมการหมุนเนื่องจากค่าความผิดพลาดที่ยอมรับ ( $\Delta\theta_{tolerance}$ ) ที่ใช้ในการผลิตและการ

ประกอบที่สามารถคำนวณได้จากความสัมพันธ์ดังสมการที่ 4.7 และค่าความผิดพลาดของมุมการหมุนเนื่องจากความไม่แน่นอนในการหมุนของสเต็ปเปอร์มอเตอร์ ( $\Delta\theta_{random}$ ) ที่ได้จากการสุ่มค่า โดยผู้วิจัยจะตั้งสมมติฐานให้ค่าความผิดพลาดของมุมการหมุนเนื่องจากความไม่แน่นอนในการหมุนของสเต็ปเปอร์มอเตอร์ ( $\Delta\theta_{random}$ ) มีรูปแบบการกระจายตัวแบบ Normal distribution โดยมีค่าเฉลี่ย (average) และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD) ดังแสดงในตารางที่ 4.10 เพื่อใช้เป็นเงื่อนไขในการสุ่มค่าสำหรับการจำลองการสะท้อนแสง

ตารางที่ 4.10 ค่าเฉลี่ย (average) และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD) ของค่าความผิดพลาดของมุมการหมุนเนื่องจากความไม่แน่นอนในการหมุนของสเต็ปเปอร์มอเตอร์ (หน่วย :  $10^{-3}$  องศา)

มุม	ค่าเฉลี่ย (average)	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD)
$\Delta\theta_{random}$	3.304	3.289

ค่าความผิดพลาดของมุมการหมุนเนื่องจากความไม่แน่นอนในการหมุนของสเต็ปเปอร์มอเตอร์ ( $\Delta\theta_{random}$ ) จะถูกสุ่มขึ้นจากการกระจายตัวแบบ Normal distribution ตามที่ได้ตั้งสมมติฐานไว้ โดยมีระดับความเชื่อมั่นของข้อมูลอยู่ที่ 95% จากนั้นค่าที่ได้จะถูกนำมารวมกับค่า  $\Delta\theta_{tolerance}$  ที่คำนวณได้เพื่อใช้แทนค่าความคลาดเคลื่อนของระบบขับเคลื่อนสำหรับจำลองการสะท้อนแสงของเฮลิโอสแตทต้นทุ่นต่ำต่อไป

ผลจากการจำลองผลกระทบของปัจจัยความคลาดเคลื่อนของระบบขับเคลื่อนเนื่องจากการผลิตและการประกอบต่อการสะท้อนแสงของเฮลิโอสแตทต้นทุ่นต่ำพบว่าตำแหน่งแสงสะท้อนที่เกิดขึ้นบนตัวรับแสงจะเรียงตัวกันอย่างหนาแน่นที่บริเวณใดบริเวณหนึ่งของตำแหน่งเป้าหมาย โดยค่า Phase shift ของค่า  $\Delta\theta_{tolerance}$  จะเป็นตัวกำหนดบริเวณที่มีตำแหน่งแสงสะท้อนหนาแน่น ค่าระยะทางระหว่างตำแหน่งแสงสะท้อนและตำแหน่งเป้าหมายมีค่าสูงที่สุด ( $D_{max}$ ) ค่าต่ำที่สุด ( $D_{min}$ ) และค่าเฉลี่ย ( $D_{avg}$ ) ดังแสดงอยู่ในตารางที่ 4.11

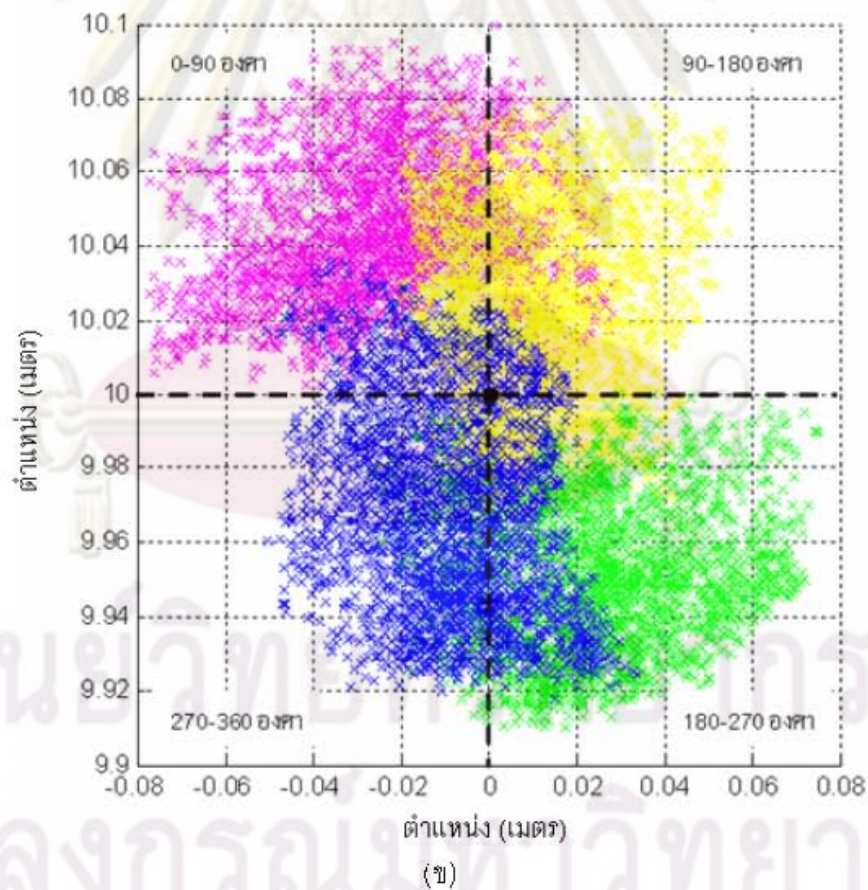
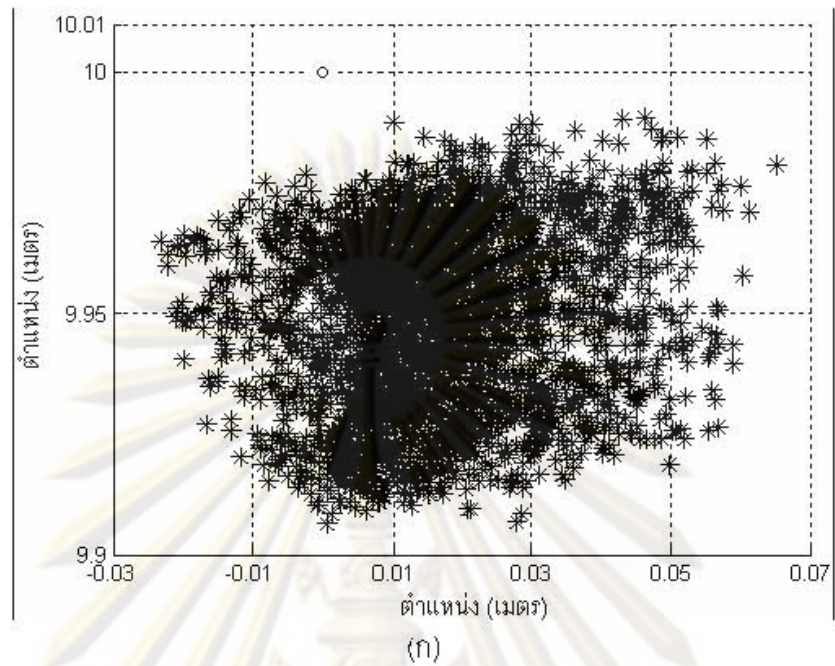
ตารางที่ 4.11 ค่าระยะทางระหว่างตำแหน่งแสงสะท้อนจริงและตำแหน่งเป้าหมาย

(หน่วย : เซนติเมตร)

ครั้งที่	ค่าต่ำสุด ( $D_{\min}$ )	ค่าสูงสุด ( $D_{\max}$ )	ค่าเฉลี่ย ( $D_{avg}$ )
1	1.3982	9.8785	5.6079
2	1.5103	9.8896	5.6155
3	1.3626	9.8419	5.6249
4	1.2697	10.2194	5.6079
5	1.3203	10.1653	5.6177
6	1.2368	10.0189	5.6158
7	1.3791	10.0790	5.6086
8	1.2785	10.2188	5.6200
9	1.3893	10.1372	5.6197
10	1.4111	10.1156	5.6090
ค่าเฉลี่ย			5.6147

ค่า  $D_{avg}$  เฉลี่ยจากการจำลองทั้ง 10 ครั้งมีค่าเท่ากับ 1.0740 เซนติเมตร ตัวอย่างผลการจำลองผลของปัจจัยความคลาดเคลื่อนของระบบขับเคลื่อนต่อการสะท้อนแสงของเฮลิโอสแตทต้นทูนต่ำตลอดทั้งปีถูกแสดงอยู่ในรูปที่ 4.13(ก) และในรูปที่ 4.13(ข) จะแสดงผลของค่า phase shift ของค่า  $\Delta\theta_{tolerance}$  ต่อการสะท้อนแสงของเฮลิโอสแตทต้นทูนต่ำ ในรูปที่ 4.13(ก) แกน x และแกน z จะแสดงตำแหน่งบนตัวรับแสงมีหน่วยเป็นเมตร เครื่องหมายดอกจัน (\*) และเครื่องหมายวงกลม (o) แทนตำแหน่งแสงสะท้อนและตำแหน่งเป้าหมายบนตัวรับแสงตามลำดับ และรูปที่ 4.13(ข) แกน x และแกน z จะแสดงตำแหน่งบนตัวรับแสงมีหน่วยเป็นเมตร เครื่องหมายกากบาท (x) และเครื่องหมายวงกลม (•) แทนตำแหน่งแสงสะท้อนและตำแหน่งเป้าหมายบนตัวรับแสงตามลำดับ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.13(ก) ตัวอย่างผลการจำลองผลของปัจจัยความคลาดเคลื่อนของระบบขับเคลื่อนต่อการสะท้อนแสงของเฮลิโอสแตทต้นทุนต่ำตลอดทั้งปี และ (ข) ผลของค่า phase shift ของค่า

$\Delta\theta_{tolerance}$  ต่อการสะท้อนแสงของเฮลิโอสแตทต้นทุนต่ำ



ในรูปที่ 4.13(ข) ค่า phase shift ประมาณ 0-90 องศาจะทำให้ตำแหน่งแสงสะท้อนตกอยู่บริเวณด้านซ้ายบนของเป้าหมาย ในขณะที่ค่าประมาณ 90-180 องศาจะอยู่ที่บริเวณขวาบนของเป้าหมาย และค่าประมาณ 180-270 องศาและค่าประมาณ 270-360 องศาแสงสะท้อนจะอยู่ที่บริเวณขวาล่างและซ้ายล่างของเป้าหมายตามลำดับ

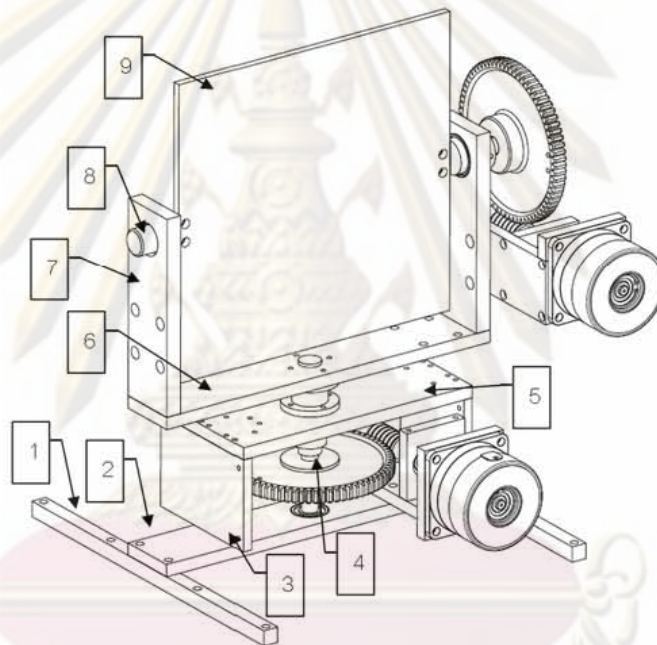
#### 4.3.5 ความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งกึ่งกลางกระจกเนื่องจากการผลิตชิ้นส่วนและการประกอบ

ความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งกึ่งกลางกระจกเนื่องจากการผลิตชิ้นส่วนและการประกอบจะมีผลทำให้ทิศของเป้าหมาย ( $\hat{r}$ ) ที่ใช้ในการคำนวณทิศการสะท้อนแสงของกระจก ( $\hat{m}$ ) ผิดพลาดไป การลดค่าใช้จ่ายของเฮลิโอสแตทด้วยการเพิ่มค่าความผิดพลาดที่ยอมรับ (tolerance) ในการผลิตชิ้นส่วนให้สูงขึ้นนั้นจะเป็นการเพิ่มโอกาสให้ชิ้นส่วนที่ผลิตได้คลาดเคลื่อนจากการออกแบบมากขึ้น ความคลาดเคลื่อนนี้เองที่ส่งผลทำให้ตำแหน่งกึ่งกลางของกระจกและแกนการหมุนของเฮลิโอสแตทคลาดเคลื่อนไปจากที่ออกแบบไว้ โดยเฉพาะในส่วนของแกนการหมุนนี้จะแบ่งผลกระทบที่เกิดขึ้นออกเป็น 2 กรณีคือถ้าหากว่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นทำให้แกนการหมุนหมุนเยื้องจุดศูนย์กลางแล้วตำแหน่งกึ่งกลางกระจกก็จะมีการเปลี่ยนตำแหน่งทุกครั้งที่มีการหมุนแกนดังกล่าว ซึ่งส่งผลกระทบต่อทิศของเป้าหมาย ( $\hat{r}$ ) ที่ใช้ในการคำนวณและถ้าความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นทำให้แกนการหมุนทั้ง 2 แกนไม่ตั้งฉากกันแล้วทิศการสะท้อนแสงของกระจกที่ได้จากการคำนวณ ( $\hat{m}$ ) กับทิศการสะท้อนแสงจริงของกระจก ( $\hat{m}'$ ) จะมีค่าไม่เท่ากัน

เฮลิโอสแตทต้นทุนต่ำที่ออกแบบนี้จะยอมให้มีความคลาดเคลื่อนเฉพาะในส่วนของตำแหน่งกึ่งกลางกระจกและการหมุนเยื้องจุดศูนย์กลางของแกนการหมุนเท่านั้นโดยค่าความผิดพลาดที่ยอมรับ (Tolerance) ที่ใช้ในการผลิตชิ้นส่วนของเฮลิโอสแตทต้นทุนต่ำโดยทั่วไปจะมีค่าเท่ากับ  $\pm 0.2$  มิลลิเมตร ผลความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งกึ่งกลางกระจกเนื่องจากการผลิตชิ้นส่วนและการประกอบต่อการสะท้อนแสงของเฮลิโอสแตทต้นทุนต่ำนี้จะมีลักษณะคล้ายกับผลของความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งกึ่งกลางกระจกเนื่องจากการติดตั้งแต่แตกต่างกันตรงที่ตำแหน่งกึ่งกลางกระจกจะเปลี่ยนตำแหน่งไปทุกครั้งที่มีการปรับทิศการสะท้อนแสงของกระจก ผลของปัจจัยความคลาดเคลื่อนนี้ต่อการสะท้อนแสงของเฮลิโอสแตทต้นทุนต่ำและระยะความผิดพลาดของการสะท้อนแสง ( $D$ ) แสดงอยู่ในรูปที่ 4.8 และสมการที่ 4.5 ตามลำดับ เช่นเดียวกับผลจากความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งกึ่งกลางกระจกเนื่องจากการติดตั้ง

ความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งกึ่งกลางกระจกเนื่องจากการผลิตชิ้นส่วนและการประกอบจะขึ้นอยู่กับค่าความผิดพลาดที่ยอมรับ (tolerance) และจำนวนชิ้นส่วนของเฮลิโอสแตทต้นทุนต่ำที่

มีผลต่อตำแหน่งกึ่งกลางกระจก เฮลิโอสแตทต้นทุ่นต่ำที่ออกแบบไว้จะมีชิ้นส่วนที่มีผลต่อตำแหน่งกึ่งกลางกระจกอยู่ทั้งหมด 9 ชิ้นส่วนซึ่งใน 9 ชิ้นส่วนนี้จะมี 4 ชิ้นส่วนที่มีผลต่อการหมุนเอียงจุดศูนย์กลางของเฮลิโอสแตทต้นทุ่นต่ำ การผลิตชิ้นส่วนต่างๆ เหล่านี้จะใช้ค่าความผิดพลาดที่ยอมรับ (Tolerance) เท่ากับ  $\pm 0.2$  มิลลิเมตร จากการวัดระยะต่างๆ ของชิ้นส่วนที่ผลิตได้ที่มีผลต่อตำแหน่งกึ่งกลางกระจกในแนวแกน x y และ z (วัดระยะในแนวแกนต่างๆ ตามลักษณะการประกอบและการติดตั้งเฮลิโอสแตทต้นทุ่นต่ำสำหรับการใช้งานในระบบตัวรับแสงส่วนกลาง) ค่าความคลาดเคลื่อนของชิ้นส่วนถูกแสดงไว้ในตารางที่ 4.12 รูปที่ 4.14 แสดงตำแหน่งชิ้นส่วนต่างๆ ของเฮลิโอสแตทต้นทุ่นต่ำ



รูปที่ 4.14 ตำแหน่งชิ้นส่วนต่างๆ ของเฮลิโอสแตทต้นทุ่นต่ำที่มีผลต่อตำแหน่งกึ่งกลางกระจก

ตารางที่ 4.12 ค่าความคลาดเคลื่อนของชิ้นส่วนที่วัดได้ในแนวแกน x y และ z (หน่วย : มิลลิเมตร)

ชิ้นที่	1	2	3	4	5	6	7	8	9				
x	0.10	-0.04	0.08	0.06	0.06	0.08	0.10	0.08	0.04	0.06	-0.02	0.04	0.04
y	0.04	0.06	0.06	0.14	0.10	0.14	0.02	0.18	0.04	0.18	0.02	0.10	0.02
z	0.06	0.04	0.02	0.10	0.06	0.20	0.02	0.06	0.02	0.08	0.04	-0.02	0.04

หมายเหตุ : 6°, 7°, 8° และ 9° เป็นชิ้นส่วนที่มีผลต่อการหมุนเอียงจุดศูนย์กลางของแกนการหมุน ในช่องแรกจะเป็นค่าที่ส่งผลต่อตำแหน่งกึ่งกลางกระจกและในช่องที่สองจะเป็นค่าที่ส่งผลต่อการหมุนเอียงจุดศูนย์กลางของแกนการหมุน

ในการจำลองการสะท้อนแสงของเฮลิโอสแตทต้นทุ่นต่ำเนื่องจากปัจจัยความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งกึ่งกลางกระจกเนื่องจากการผลิตชิ้นส่วนและการประกอบ เราได้ตั้งสมมติฐานให้ค่าความคลาดเคลื่อนของแต่ละชิ้นส่วนในแต่ละแนวแกนกระจายตัวแบบ Normal distribution โดยมีค่าเฉลี่ย (average) และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD) ดังแสดงในตารางที่ 4.13 เพื่อใช้เป็นเงื่อนไขในการหาค่าความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งกึ่งกลางกระจกที่ใช้ในการจำลองการสะท้อนแสง

ตารางที่ 4.13 ค่าเฉลี่ย (average) และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD) ของค่าความคลาดเคลื่อนของแต่ละชิ้นส่วนในแต่ละแนวแกน (หน่วย : มิลลิเมตร)

แกน	ค่าเฉลี่ย (average)	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD)
x	0.0	0.67
y	0.0	0.67
z	0.0	0.67

ค่าความคลาดเคลื่อนของชิ้นส่วนต่างๆ เนื่องจากการผลิตชิ้นส่วนจะถูกสุ่มขึ้นจากการกระจายตัวแบบ Normal distribution ตามที่ได้ตั้งสมมติฐานไว้ ค่าความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งกึ่งกลางกระจกเนื่องจากการผลิตและการประกอบนี้จะได้จากการรวมกันแบบเวกเตอร์ของค่าความคลาดเคลื่อนของแต่ละชิ้นส่วนในแต่ละแนวแกนที่กำหนดขึ้น

ผลจากการจำลองผลกระทบของปัจจัยความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งกึ่งกลางกระจกเนื่องจากการผลิตชิ้นส่วนและการประกอบต่อการสะท้อนแสงของเฮลิโอสแตทต้นทุ่นต่ำที่แสดงอยู่ในรูปค่าระยะทางระหว่างตำแหน่งแสงสะท้อนและตำแหน่งเป้าหมายค่าสูงที่สุด ( $D_{max}$ ) ค่าต่ำที่สุด ( $D_{min}$ ) และค่าเฉลี่ย ( $D_{avg}$ ) ถูกแสดงอยู่ในตารางที่ 4.14

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

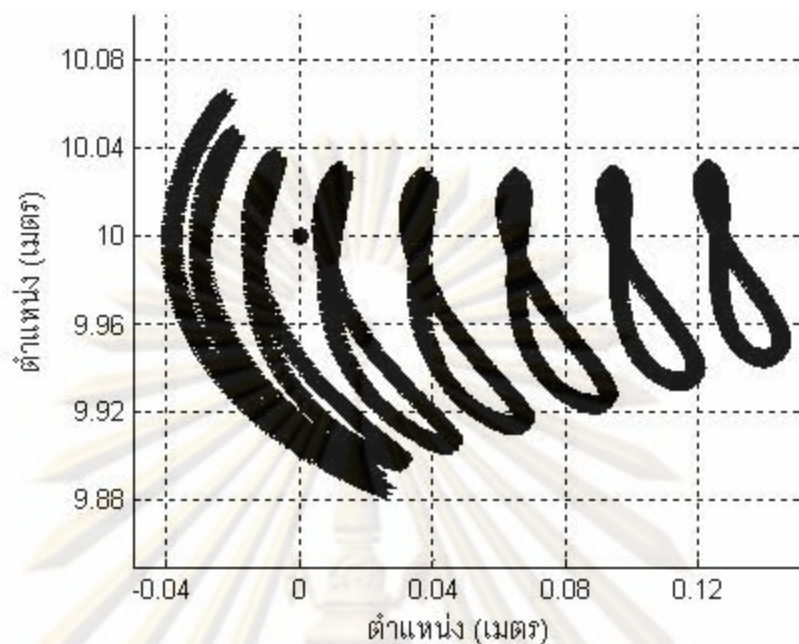
ตารางที่ 4.14 ค่าระยะทางระหว่างตำแหน่งแสงสะท้อนจริงและตำแหน่งเป้าหมาย

(หน่วย : เซนติเมตร)

ครั้งที่	ค่าต่ำสุด ( $D_{\min}$ )	ค่าสูงสุด ( $D_{\max}$ )	ค่าเฉลี่ย ( $D_{avg}$ )
1	15.7689	25.2588	22.3267
2	16.3353	33.5295	28.7830
3	0.6954	15.2823	7.8728
4	0.0689	10.1911	5.8273
5	11.0869	24.9744	20.7986
6	0.8222	7.7337	4.9347
7	4.6880	38.2186	24.3416
8	1.2877	14.9488	9.1194
9	7.4499	30.2653	21.7752
10	0.0223	7.0094	3.8327
ค่าเฉลี่ย			14.9612

ค่า  $D_{avg}$  เฉลี่ยจากการจำลองทั้ง 10 ครั้งมีค่าเท่ากับ 2.0944 เซนติเมตร ตัวอย่างผลการจำลองผลของปัจจัยความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งกึ่งกลางกระจกต่อการสะท้อนแสงของเฮลิโอสแตทต้นทุนต่ำตลอดทั้งปีถูกแสดงอยู่ในรูปที่ 4.15 แกน x และแกน z แสดงตำแหน่งบนตัวรับแสงมีหน่วยเป็นเครื่องหมายดอกจัน (\*) และเครื่องหมายวงกลม (•) แทนตำแหน่งแสงสะท้อนและตำแหน่งเป้าหมายบนตัวรับแสงตามลำดับ

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.15 ตัวอย่างผลการจำลองผลของปัจจัยความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งกึ่งกลางกระจก เนื่องจากการผลิตและการประกอบต่อการสะท้อนแสงของเฮลิโอสแตทต้นทุนต่ำตลอดทั้งปี

#### 4.4 สรุปผลของความคลาดเคลื่อนแบบต่างๆ ต่อการสะท้อนแสงของเฮลิโอสแตทต้นทุนต่ำ

ผลการจำลองปัจจัยความคลาดเคลื่อนต่างๆ ทั้ง 5 ปัจจัยต่อการสะท้อนแสงของเฮลิโอสแตทต้นทุนต่ำดังที่กล่าวมาแล้วในขั้นต้น เราพบว่าความคลาดเคลื่อนของทิศทางวางตัวเริ่มต้นของกระจก เนื่องจากการติดตั้งเป็นปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อค่าสะท้อนแสงของเฮลิโอสแตทต้นทุนต่ำสูงที่สุด เมื่อเปรียบเทียบผลกระทบนี้นี้จากค่าระยะทางระหว่างตำแหน่งแสงสะท้อนจริงกับตำแหน่งเป้าหมายเฉลี่ยตลอดทั้งปี ( $D_{avg}$ ) ซึ่งสอดคล้องกับสมมุติฐานที่ตั้งไว้ในกรณีการเปรียบเทียบและวิธีการปรับแก้ความแม่นยำในการสะท้อนแสงของเฮลิโอสแตทต้นทุนต่ำ ตารางที่ 4.15 แสดงผลของปัจจัยความคลาดเคลื่อนต่างๆ ต่อการสะท้อนแสงของเฮลิโอสแตทต้นทุนต่ำ

ตารางที่ 4.15 ผลของปัจจัยความคลาดเคลื่อนต่างๆ ต่อการสะท้อนแสงของเฮลิโอสแตทต้นทุ่นต่ำ (หน่วย : เซนติเมตร)

ปัจจัยความคลาดเคลื่อนที่ส่งผลต่อการสะท้อนแสง	$D_{min}$	$D_{max}$	$D_{avg}$
1. ทิศทางของแสงอาทิตย์เนื่องจากการคำนวณ	0.0000	0.1193	0.0245
2. ตำแหน่งกึ่งกลางกระจกเนื่องจากการติดตั้ง	0.3027	1.1897	0.6137
3. ทิศการวางตัวเริ่มต้นของกระจกเนื่องจากการติดตั้ง	0.1280	171.1422	67.4380
4. ระบบขับเคลื่อนเนื่องจากการผลิตและการประกอบ	1.2368	10.2194	5.6147
5. ตำแหน่งกึ่งกลางกระจกเนื่องจากการผลิตและการประกอบ	0.0224	38.2186	14.9612

จากตารางที่ 4.15 พบว่าความคลาดเคลื่อนของทิศการวางตัวเริ่มต้นของกระจกเนื่องจากการติดตั้งมีผลต่อการสะท้อนแสงของเฮลิโอสแตทต้นทุ่นต่ำสูงที่สุดเมื่อเปรียบเทียบผลของปัจจัยความคลาดเคลื่อนต่างๆ ต่อการสะท้อนแสงด้วยค่า  $D_{avg}$  ซึ่งจะมีค่ามากกว่าผลกระทบจากตำแหน่งกึ่งกลางกระจกเนื่องจากการผลิตชิ้นส่วนและการประกอบที่เป็นอันดับที่ 2 อยู่ประมาณ 4.5 เท่า และมีค่ามากกว่าผลกระทบจากระบบขับเคลื่อนที่เป็นผลกระทบอันดับที่ 3 อยู่ประมาณ 12.0 เท่า

ผลจากการจำลองการสะท้อนแสงเนื่องจากปัจจัยความคลาดเคลื่อนต่างๆ ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์นี้สอดคล้องกับสมมุติฐานของวิธีสอบเทียบและวิธีปรับแก้ที่โครงการวิจัยนี้ได้นำเสนอไว้ ในบทต่อไปจะทำการทดสอบผลของวิธีสอบเทียบและวิธีปรับแก้กับการสะท้อนแสงของเฮลิโอสแตทต้นทุ่นต่ำในสภาพแวดล้อมจริงและทำการหาจำนวนจุดสอบเทียบและระยะเวลาที่ใช้ในการสอบเทียบที่เหมาะสมสำหรับวิธีการสอบเทียบและวิธีการปรับแก้

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 5

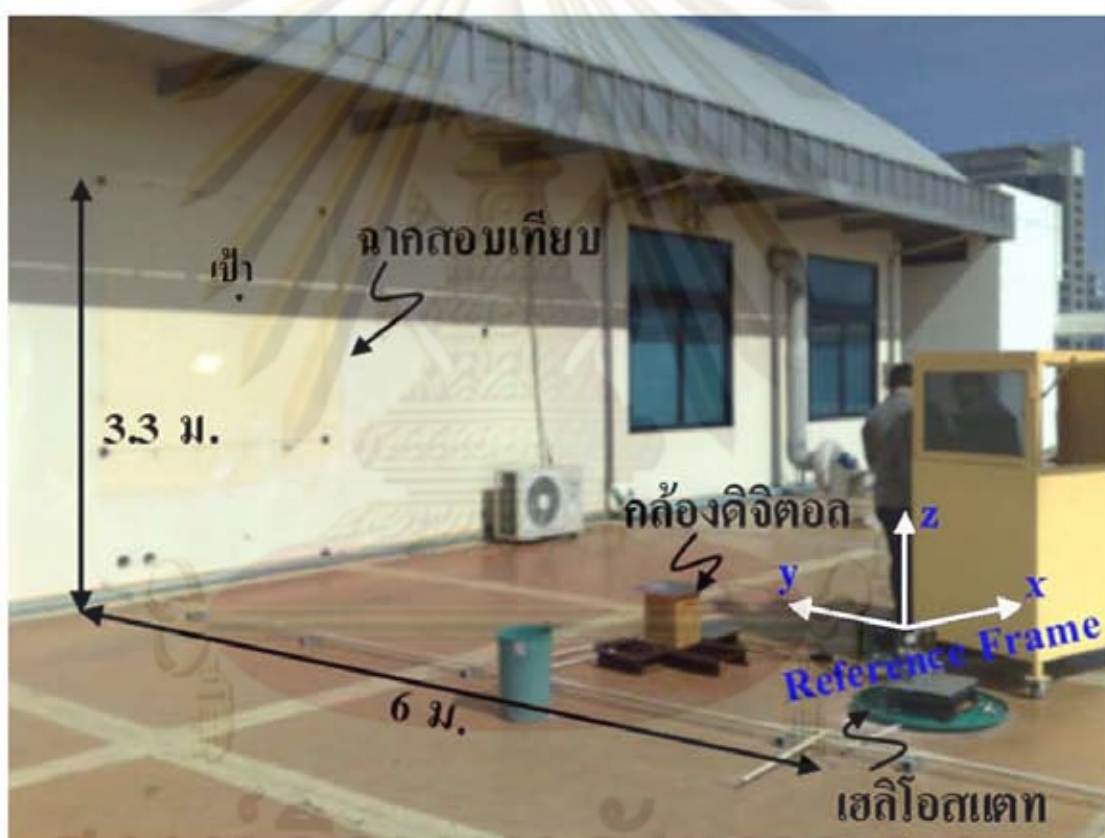
### การสอบเทียบและการปรับแก้การสะท้อนแสงของเฮลิโอสแตทต้นทุนต่ำใน สภาพแวดล้อมจริงและการจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

วิธีการสอบเทียบและวิธีการปรับแก้ที่เสนอไว้ในบทที่ 3 เป็นวิธีที่เสนอขึ้นโดยมีสมมุติฐานที่ว่า ความผิดพลาดในการสะท้อนแสงของเฮลิโอสแตทต้นทุนต่ำเกิดจากความคลาดเคลื่อนของทิศการวางตัวเริ่มต้นของกระจกเพียงอย่างเดียว แต่ในความเป็นจริงแล้วความผิดพลาดในการสะท้อนแสงของเฮลิโอสแตทต้นทุนต่ำยังเกิดจากปัจจัยอื่นๆ ดังที่ได้กล่าวไว้อย่างละเอียดในบทที่ 4 ในบทนี้จะทำการทดสอบการสอบเทียบและการปรับแก้การสะท้อนแสงของเฮลิโอสแตทต้นทุนต่ำในสภาพแวดล้อมจริงที่มีปัจจัยความคลาดเคลื่อนต่างๆ รวมอยู่ด้วยเพื่อทำการวัดผลของวิธีการสอบเทียบและวิธีการปรับแก้ที่โครงการวิจัยนี้ได้นำเสนอไว้ จากนั้นจะเป็นการจำลองการสะท้อนแสงด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ประดิษฐ์ขึ้นเพื่อดูผลของการปรับแก้การสะท้อนแสงตลอดทั้งปีแทนการทดสอบจริงและหาจำนวนจุดสอบเทียบและระยะเวลาสำหรับทำการสอบเทียบที่เหมาะสมที่สุดที่ทำให้การปรับแก้ความผิดพลาดในการสะท้อนแสงของเฮลิโอสแตทต้นทุนต่ำที่มีปัจจัยความคลาดเคลื่อนต่างๆ รวมอยู่ด้วยมีประสิทธิภาพสูงที่สุด

#### 5.1 การทดสอบวิธีการสอบเทียบและวิธีการปรับแก้การสะท้อนแสงของเฮลิโอสแตทต้นทุนต่ำในสภาพแวดล้อมจริง

วิธีการสอบเทียบและวิธีการปรับแก้ที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 3 นั้นจะถูกเสนอขึ้นโดยอาศัยสมมุติฐานที่ว่าความผิดพลาดของการสะท้อนแสงของเฮลิโอสแตทต้นทุนต่ำเกิดขึ้นจากความคลาดเคลื่อนของทิศการวางตัวเริ่มต้นของกระจกเพียงอย่างเดียว แต่ในความเป็นจริงแล้วความผิดพลาดในการสะท้อนแสงของเฮลิโอสแตทต้นทุนต่ำยังเกิดจากปัจจัยความคลาดเคลื่อนอื่นๆ ด้วย ผลของการลดค่าใช้จ่ายของเฮลิโอสแตทในส่วนของการผลิตและการติดตั้งจะทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนของทิศการวางตัวเริ่มต้นของกระจกซึ่งเป็นปัจจัยที่ทำให้การสะท้อนแสงของเฮลิโอสแตทต้นทุนต่ำมีความผิดพลาดสูงที่สุด ซึ่งสอดคล้องกับสมมุติฐานของวิธีการสอบเทียบและวิธีการปรับแก้ความผิดพลาดของการสะท้อนแสงของเฮลิโอสแตทต้นทุนต่ำที่โครงการวิจัยนี้ได้ทำการเสนอไว้ อย่างไรก็ตามเฮลิโอสแตทต้นทุนต่ำยังมีความคลาดเคลื่อนอื่นๆ รวมอยู่ด้วย ซึ่งผลจากความคลาดเคลื่อนต่างๆ เหล่านี้ย่อมทำให้วิธีการสอบเทียบและวิธีการปรับแก้ที่เสนอนั้นมีประสิทธิภาพลดลง

การทดสอบวิธีการสอบเทียบและวิธีการปรับแก้การสะท้อนแสงของเฮลิโอสแตทต้นทูนต่ำ ในสภาพแวดล้อมจริงทำเพื่อตรวจวัดประสิทธิภาพในการปรับแก้ความผิดพลาดในการสะท้อนแสงของเฮลิโอสแตทต้นทูนต่ำ เฮลิโอสแตทต้นทูนต่ำที่มีปัจจัยความคลาดเคลื่อนต่างๆ (ปัจจัยความคลาดเคลื่อนทั้ง 5 ปัจจัยที่นำเสนอไว้ในบทที่ 4) รวมอยู่ด้วยจะถูกนำมาทดสอบด้วยวิธีการสอบเทียบและวิธีการปรับแก้ที่เสนอไว้โดยคณะวิจัย การทดสอบนี้จัดทำขึ้นที่บริเวณดาดฟ้าของ ตึกมกุฏ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยมีระยะห่างระหว่างเฮลิโอสแตทต้นทูนต่ำ เป้าหมายและอุปกรณ์สอบเทียบดังแสดงในรูปที่ 5.1



รูปที่ 5.1 ตำแหน่งของเฮลิโอสแตทต้นทูนต่ำและอุปกรณ์สอบเทียบ

จากรูปที่ 5.1 เฮลิโอสแตทต้นทูนต่ำติดตั้งอยู่ห่างจากจุดกึ่งกลางของฉากสอบเทียบและเป้าหมายในการสะท้อนแสงในแนวระดับเป็นระยะทาง 6 เมตร ตำแหน่งกึ่งกลางกระจก จุดกึ่งกลางของฉากสอบเทียบและตำแหน่งเป้าอยู่สูงจากพื้น 0.35, 2.1 และ 2.3 เมตร ตามลำดับ ตำแหน่งพิกัดของเฮลิโอสแตทอยู่เส้นรุ้งที่ 13.7411 องศาเหนือ และเส้นแวงที่ 100.5319 องศาตะวันออก จำนวนจุดสอบเทียบที่ใช้สำหรับการสอบเทียบ 485 จุดสอบเทียบ ทำการเก็บข้อมูล



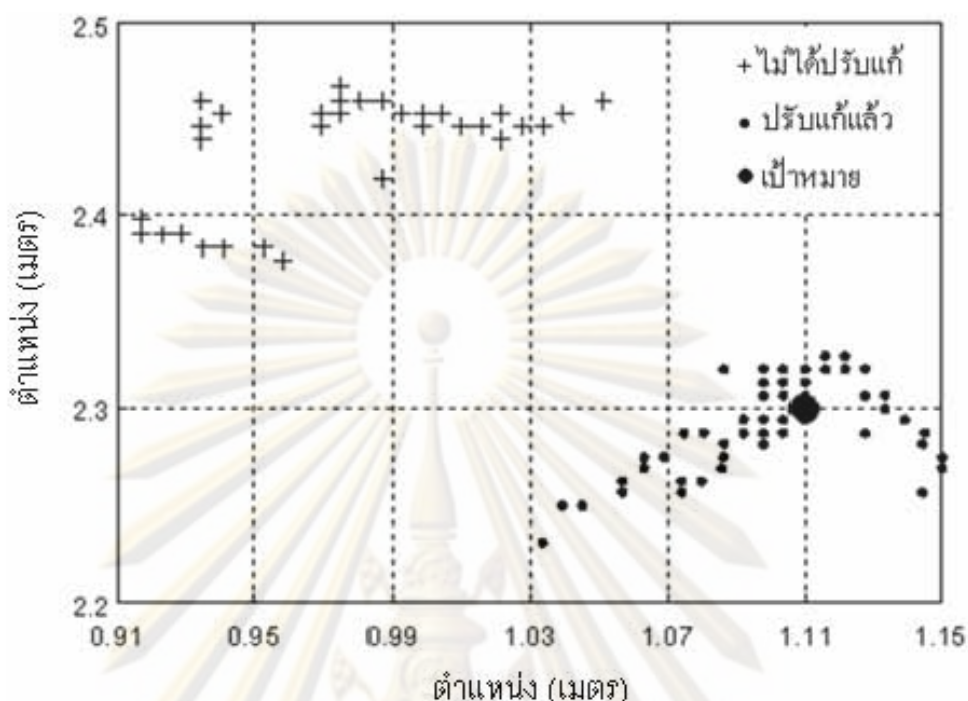
ทุกๆ 5 นาที ตั้งแต่วันที่ 14-19 มิถุนายน พ.ศ. 2552 ระหว่างเวลา 9:00 น. - 17:00 น. (เนื่องจากช่วงเวลาที่ทำการทดสอบเป็นช่วงฤดูฝนทำให้ไม่สามารถเก็บข้อมูลการสอบเทียบได้ครบทุกจุด ดังนั้นจำนวนจุดสอบเทียบและระยะเวลาสำหรับการสอบเทียบที่ใช้จึงไม่สามารถอ้างอิงค่าในตารางที่ 3.1 ได้) ผลจากการเก็บข้อมูลการสอบเทียบจำนวนจุดสอบเทียบที่สามารถนำมาใช้คำนวณค่า  $R_{est}$  ได้มีจำนวน 203 จุดสอบเทียบ ผลของการสอบเทียบและการใช้ระเบียบวิธีกำลังสองน้อยที่สุด (least square method) ในการประมาณค่า  $R$  ของระบบซึ่งจะสามารถคำนวณค่า  $R_{est}$  นี้ได้ดังนี้

$$R_{est} = \begin{bmatrix} 0.9579 & -0.0147 & -0.0022 \\ 0.0162 & 1.0001 & -0.0116 \\ -0.0062 & 0.0106 & 1.0004 \end{bmatrix}$$

ค่า  $R_{est}$  ที่คำนวณได้นี้เมื่อนำมาใช้เป็นค่าปรับแก้ความผิดพลาดในการสะท้อนแสงของเฮลิโอสแตทต้นทุ่นต่ำและทำการเปรียบเทียบผลของการสะท้อนแสงที่ได้กับผลการสะท้อนแสงที่ไม่ได้มีการปรับแก้พบว่าสามารถลดความผิดพลาดในการสะท้อนแสงของเฮลิโอสแตทต้นทุ่นต่ำลงได้ประมาณ 5.8 เท่า โดยลดค่าระยะทางระหว่างตำแหน่งแสงสะท้อนจริงกับตำแหน่งเป้าหมายเฉลี่ย ( $D_{avg}$ ) จาก 19.62 เซนติเมตรเหลือเพียง 3.39 เซนติเมตร การทดสอบการปรับแก้ความผิดพลาดในการสะท้อนแสงด้วยค่า  $R_{est}$  ทำในวันที่ 20-21 มิถุนายน พ.ศ.2552 ระหว่างเวลา 9:00 น. - 17:00 น. จากนั้นจึงนำผลที่ได้มาเปรียบเทียบกับผลการสะท้อนแสงของเฮลิโอสแตทต้นทุ่นต่ำที่ไม่ได้มีการปรับแก้ใดๆ ที่ได้ทำการทดสอบในวันที่ 22-23 มิถุนายน พ.ศ.2552 ผลการสะท้อนแสงของเฮลิโอสแตทต้นทุ่นต่ำที่ได้รับการปรับแก้และไม่ได้รับการปรับแก้ถูกแสดงไว้ในรูปที่ 5.2 แกน x และ แกน z แสดงตำแหน่งบนเป้าหมายมีหน่วยเป็นเมตร โดยมีเครื่องหมายวงกลมเล็ก, เครื่องหมายบวก และ เครื่องหมายวงกลมใหญ่ (•, + และ •) แทนตำแหน่งแสงสะท้อนที่ได้รับการปรับแก้แล้ว ตำแหน่งแสงสะท้อนที่ไม่ได้รับการปรับแก้ และตำแหน่งของเป้าหมายตามลำดับ

ศูนย์วิจัยทรัพยากร

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 5.2 ผลการแสงสะท้อนของเฮลิโอสแตทต้นทูนต่ำที่ได้รับการปรับแก้และไม่ได้รับการปรับแก้

จากรูปที่ 5.2 ค่าระยะทางระหว่างตำแหน่งแสงสะท้อนจริงกับตำแหน่งเป้าหมายที่เป็นค่าสูงที่สุด ( $D_{max}$ ) ค่าต่ำที่สุด ( $D_{min}$ ) ค่าเฉลี่ย ( $D_{avg}$ ) และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน ( $SD_D$ ) ของทดสอบการสะท้อนแสงนี้ถูกแสดงไว้ในตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 ค่าระยะทางระหว่างตำแหน่งแสงสะท้อนจริงกับตำแหน่งเป้าหมายที่ได้รับการปรับแก้และไม่ได้รับการปรับแก้ (หน่วย : เซนติเมตร)

การสะท้อนแสงของเฮลิโอสแตทต้นทูนต่ำ	$D_{min}$	$D_{max}$	$D_{avg}$	$SD_D$
ไม่มีการปรับแก้	16.44	23.89	19.62	2.14
มีการปรับแก้	0.00	12.68	3.39	2.62

จากค่าเฉลี่ยของระยะทางระหว่างตำแหน่งแสงสะท้อนจริงกับตำแหน่งเป้าหมาย ( $D_{avg}$ ) พบว่าวิธีการสอบเทียบและวิธีการปรับแก้ที่คณะวิจัยได้นำเสนอไว้สามารถลดความผิดพลาดในการสะท้อนแสงของเฮลิโอสแตทต้นทูนต่ำลงได้ประมาณ 5.8 เท่า ซึ่งระยะความผิดพลาดของแสงสะท้อนที่เกิดขึ้นหลังจากทำการปรับแก้แล้วยังอยู่ในช่วงความผิดพลาดของการสะท้อนแสงที่ยอมรับได้ของระบบตัวรับแสงส่วนกลางที่โครงการวิจัยนี้สนใจ

## 5.2 การจำลองการสอบเทียบและการปรับแก้การสะท้อนแสงของเฮลิโอสแตทต้นทุนต่ำด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

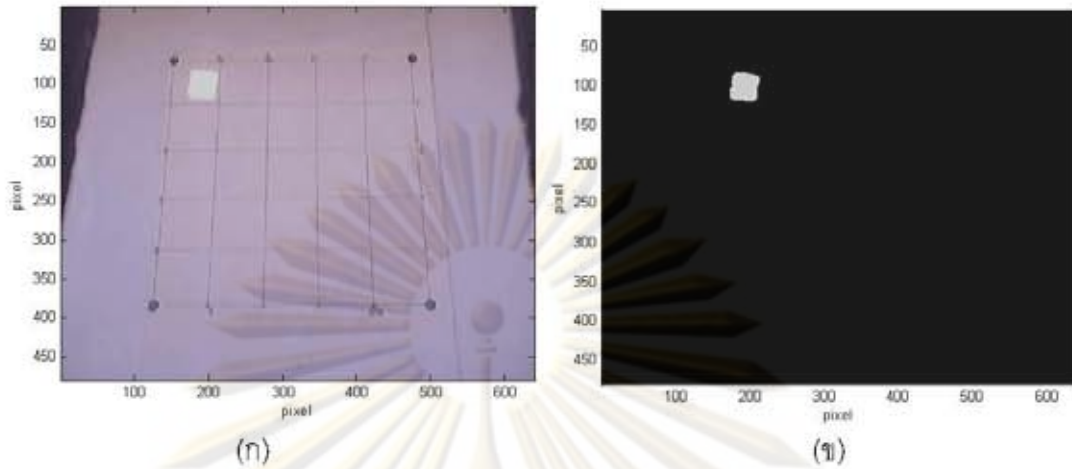
การทดสอบผลของวิธีการสอบเทียบและวิธีการปรับแก้การสะท้อนแสงของเฮลิโอสแตทต้นทุนต่ำในสภาพแวดล้อมจริงที่ได้นำเสนอไปแล้วเป็นผลการทดสอบการปรับแก้เพียง 2 วัน เพื่อที่จะสามารถทำนายผลการปรับแก้ความผิดพลาดในการสะท้อนแสงของเฮลิโอสแตทต้นทุนต่ำตลอดทั้งปีและหาจำนวนจุดสอบเทียบและระยะเวลาในการสอบเทียบที่เหมาะสมที่ทำให้วิธีการสอบเทียบและวิธีการปรับแก้มีประสิทธิภาพในการปรับแก้ความผิดพลาดในการสะท้อนแสงของเฮลิโอสแตทต้นทุนต่ำสูงสุด ผู้วิจัยจึงได้ประดิษฐ์โปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อจำลองการสอบเทียบและการปรับแก้เฮลิโอสแตทต้นทุนต่ำ

การประดิษฐ์โปรแกรมคอมพิวเตอร์นอกจากการจำลองปัจจัยความคลาดเคลื่อนต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับการสะท้อนแสงของเฮลิโอสแตทต้นทุนต่ำดังที่ได้กล่าวมาแล้วในบทที่ 4 ผู้วิจัยยังพบว่ายังมีปัจจัยความคลาดเคลื่อนอีกปัจจัยหนึ่งที่จะส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพของวิธีการสอบเทียบและวิธีการปรับแก้ซึ่งปัจจัยความคลาดเคลื่อนนั้นคือความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งแสงสะท้อนจริงที่เกิดจากความบิดเบือน (distortion) ของภาพถ่าย

ในขั้นตอนของการสอบเทียบจะมีอยู่ขั้นตอนหนึ่งที่จะทำให้การสอบเทียบคลาดเคลื่อนขั้นตอนที่กล่าวถึงนี้คือขั้นตอนในการถ่ายภาพตำแหน่งแสงสะท้อนจริงบนฉากสอบเทียบ ความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งแสงสะท้อนจริงที่เกิดจากความบิดเบือน (distortion) ของภาพถ่ายนี้จะทำตำแหน่งแสงสะท้อนจริง ( $P'$ ) ที่ได้จากภาพถ่ายผิดพลาดไป ตำแหน่งแสงสะท้อนจริง ( $P'$ ) ใช้สำหรับการหาทิศของแสงสะท้อน ( $i'$ ) ที่ใช้ในการคำนวณทิศการสะท้อนแสงจริง ( $m'$ ) ของกระจกที่เกิดขึ้นแล้วจึงนำไปใช้เป็นข้อมูลในการประมาณค่า  $R$  ตามลำดับ เมื่อตำแหน่งแสงสะท้อนจริง ( $P'$ ) ที่หาได้คลาดเคลื่อนไปจึงเป็นผลให้ค่า  $R_{est}$  ที่คำนวณได้นั้นคลาดเคลื่อนไปจากค่า  $R$  ที่แท้จริงของเฮลิโอสแตทต้นทุนต่ำมากขึ้น

วิธีการคำนวณตำแหน่งแสงสะท้อนจริงที่เกิดขึ้นจากภาพถ่ายเป็นอีกสาเหตุหนึ่งที่ทำให้ตำแหน่งแสงสะท้อนจริงที่คำนวณได้ผิดพลาดจากความเป็นจริง วิธีและขั้นตอนในการคำนวณตำแหน่งเป็นสาเหตุให้ตำแหน่งแสงสะท้อนจริงที่ได้จากภาพถ่ายมีความผิดพลาด ขั้นตอนในการคำนวณหาตำแหน่งแสงสะท้อนจริง ( $P'$ ) มีดังนี้

1. นำภาพที่ได้จากการถ่ายภาพดังแสดงในรูป 5.3(ก) มาทำการกรองแยก (filtering) ให้เหลือสี่เฉพาะบริเวณที่เป็นตำแหน่งแสงสะท้อนดังแสดงในรูปที่ 5.3(ข)



รูปที่ 5.3(ก) รูปจากการถ่ายภาพ และ (ข) รูปจากการกรองแยก (filtering)

2. นำภาพที่ได้จากการกรองแยก (filtering) แล้วมาหาค่าตำแหน่งแสงสะท้อนจริง ( $P'$ ) ของการสะท้อนแสงโดยบริเวณที่มีค่าความเข้มแสงสูงที่สุดคือตำแหน่งแสงสะท้อนจริง ( $P'$ ) จากเงื่อนไขนี้จะสามารถคำนวณหาตำแหน่งแสงสะท้อนจริง ( $P'$ ) จากวิธีการหาค่าตำแหน่งเซนทรอยด์ของบริเวณแสงสะท้อนได้ดังแสดงในสมการที่ 5.1 และ 5.2 โดยมีค่าระดับสีของภาพในแต่ละพิกเซล ( $I$ ) เป็นค่าถ่วงน้ำหนัก (weight)

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m I_{ij} x_i}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m I_{ij}} \quad (5.1)$$

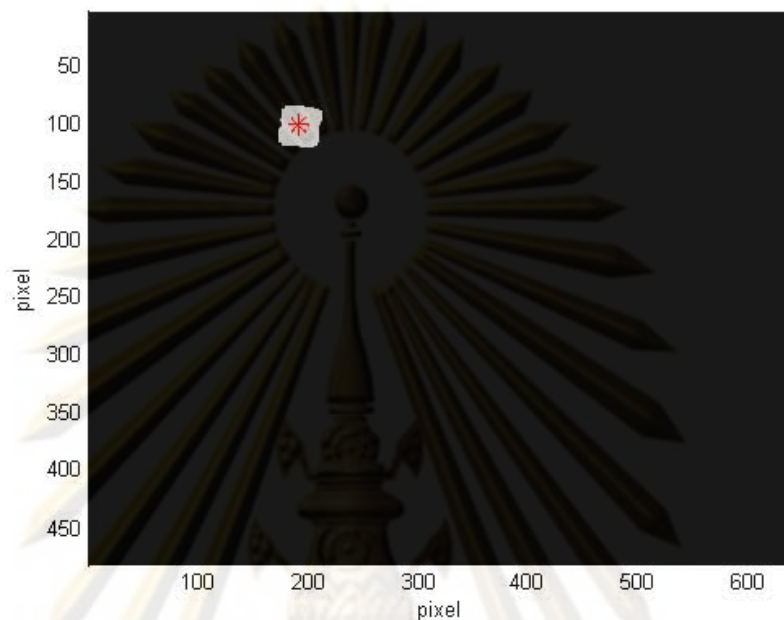
$$\bar{y} = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m I_{ij} y_i}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m I_{ij}} \quad (5.2)$$

โดยที่  $(x_i, y_i)$  เป็นตำแหน่งพิกเซลของจุดแสงบนภาพที่ทำการกรองแยก (filtering) แล้ว  $(\bar{x}, \bar{y})$  เป็นตำแหน่งพิกเซลที่ใช้แทนตำแหน่งแสงสะท้อนจริง ( $P'$ )

ค่าความแม่นยำของตำแหน่งแสงสะท้อนจริงที่คำนวณได้จะขึ้นอยู่กับความละเอียดของภาพถ่าย

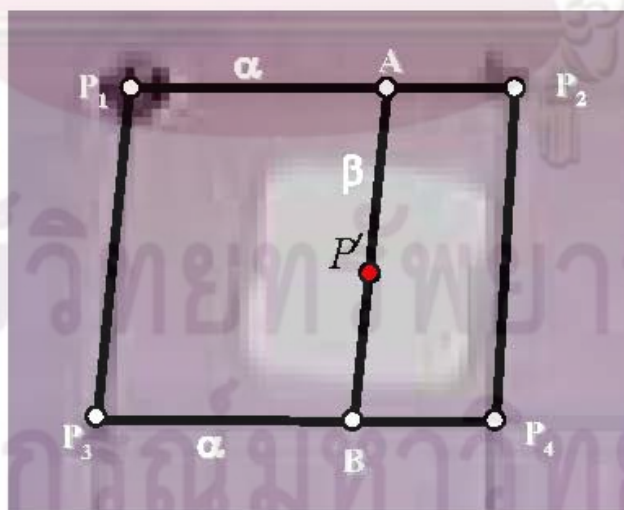
3. เปลี่ยนตำแหน่งแสงสะท้อนจริง ( $P'$ ) จากพิกัดพิกเซลเป็นตำแหน่งในพิกัดอ้างอิงของเฮลิโอสแตทต้นตุน้ำในขั้นตอนนี้ผลของการบิดเบือน (distortion) ของภาพจะส่งผลต่อวิธีที่ใช้ในการคำนวณตำแหน่งแสงสะท้อนจริง ( $P'$ ) ในพิกัดอ้างอิงของเฮลิโอสแตทต้นตุน้ำ ความบิดเบือน (Distortion) ของภาพทำให้ตำแหน่งต่างๆ ในภาพถ่ายไม่มีความสัมพันธ์เชิงเส้นแต่วิธีที่ใช้ในการคำนวณนั้น ผู้วิจัยจะตั้งสมมุติฐานให้ตำแหน่งต่างๆ ในภาพมีความสัมพันธ์เชิงเส้นเนื่องจากผล

จากการบิดเบือนนี้มีผลน้อยแต่อย่างไรก็ตามผลจากการคำนวณที่ได้นี้จะมีคลาดเคลื่อนจากความเป็นจริง วิธีการคำนวณทำได้โดยการหาความสัมพันธ์ของตำแหน่งต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 5.4



รูปที่ 5.4 ตำแหน่งพิกเซลของแสงสะท้อนจริงในฉากสอบเทียบ

จากรูปที่ 5.4 ที่แสดงถึงตำแหน่งเซนทรอยด์ของแสงสะท้อน การแปลงตำแหน่งของเซนทรอยด์ของแสงสะท้อนจากพิกัดพิกเซลเป็นพิกัดข้างอิงจะสามารถทำได้โดยการหาความสัมพันธ์ของเวกเตอร์  $A$ ,  $B$  และ  $P'$  ดังแสดงในรูปที่ 5.5 ได้จากสมการที่ 5.3, 5.4 และ 5.5



รูปที่ 5.5 ตำแหน่งของเวกเตอร์  $A$ ,  $B$  และ  $P'$  บนฉากสอบเทียบ

$$\bar{A} = \bar{P}_1 + \alpha(\bar{P}_2 - \bar{P}_1) \quad (5.3)$$

$$\bar{B} = \bar{P}_3 + \alpha(\bar{P}_4 - \bar{P}_3) \quad (5.4)$$

$$\bar{P}' = \bar{A} + \beta(\bar{B} - \bar{A}) \quad (5.5)$$

โดยที่  $\bar{P}_1, \bar{P}_2, \bar{P}_3$  และ  $\bar{P}_4$  คือจุดที่รู้ตำแหน่งในพิกัดพิกเซลและในพิกัดอ้างอิง

$\alpha$  และ  $\beta$  เป็นอัตราส่วนของส่วนของเส้นตรง  $\overline{P_2P_1}$  และส่วนของเส้นตรง  $\overline{AB}$  ตามลำดับ จากความสัมพันธ์ในสมการที่ 5.3, 5.4 และ 5.5 ในพิกัดอ้างอิงก็มีความสัมพันธ์ของตำแหน่งต่างๆ ในรูปแบบเดียวกันดังนั้นถ้าสามารถหาค่า  $\alpha$  และ  $\beta$  ได้ก็จะสามารถหาค่าของ  $P'$  ในพิกัดอ้างอิงได้

ผลจากการหาตำแหน่งแสงสะท้อนจริง ( $P'$ ) จากภาพถ่ายบนแกนอ้างอิงของเฮลิโอสแตท ต้นทุนต่ำตามวิธีดังที่กล่าวมาแล้วนี้ทำให้ตำแหน่งสะท้อนแสงจริงที่คำนวณได้ผิดพลาดจากความ เป็นจริง จากการวัดตำแหน่งแสงสะท้อนจริงเปรียบเทียบกับ การคำนวณพบว่าตำแหน่งแสงสะท้อนจริงที่ได้จากการคำนวณผิดพลาดจากตำแหน่งแสงสะท้อนจริงที่ได้จากการวัดเป็นระยะไม่เกิน  $\pm 14.2$  มิลลิเมตร หรือคิดเป็นระยะไม่เกิน  $\pm 2$  พิกเซล จากตำแหน่งที่ถูกต้อง (ระยะ 1 พิกเซลมีขนาดเท่ากับ  $7.1 \times 7.1$  มิลลิเมตร คิดจากระยะ 1 พิกเซลที่ทำให้ระยะทางในพิกัดอ้างอิงกว้างที่สุด)

การจำลองเพื่อทดสอบผลของวิธีการสอบเทียบและวิธีการปรับแก้ นี้ ผู้วิจัยจะใช้การสุ่ม เพื่อหาค่าความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งแสงสะท้อนจริงที่ได้จากการคำนวณเนื่องจากปัจจัย ความคลาดเคลื่อนนี้โดยผู้วิจัยจะตั้งสมมติฐานให้ค่าความคลาดเคลื่อนนี้มีการกระจายตัวแบบ Uniform distribution โดยมีขอบเขตของการกระจายตัวไม่เกิน  $\pm 2$  พิกเซลในแกน x และในแกน z เนื่องจากเป็นผลของการคำนวณและการประมาณค่าตำแหน่งแสงสะท้อนจริงที่เกิดจากความ บิดเบือน (distortion) ของภาพถ่ายตามวิธีการขั้นต้นทำให้ตำแหน่งแสงสะท้อนจริงที่ได้จากการ คำนวณมีโอกาสเท่าๆ กันที่จะคลาดเคลื่อนไปตามตำแหน่งต่างๆ รอบตำแหน่งที่ถูกต้อง

### 5.2.1 การจำลองผลการสอบเทียบและการปรับแก้การสะท้อนแสงของเฮลิโอสแตทต้นทุนต่ำตลอดทั้งปีด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

การจำลองการสอบเทียบและการปรับแก้ความผิดพลาดในการสะท้อนแสงของเฮลิโอสแตทต้นทุนต่ำด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์นี้ทำเพื่อทำนายผลการปรับแก้การสะท้อนแสงของเฮลิโอสแตท ต้นทุนต่ำตลอดทั้งปีแทนการทดสอบจริง ทำให้สามารถลดระยะเวลาในการทดสอบและช่วยให้ สามารถคาดคะเนผลการสะท้อนแสงที่จะเกิดขึ้นได้

การจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ประดิษฐ์ขึ้นนี้จะมีผลการจำลองน่าเชื่อถือเพียงใด ขึ้นอยู่กับปัจจัยความคลาดเคลื่อนต่างๆ ของเฮลิโอสแตทต้นทุนต่ำที่โปรแกรมนี้จำลองว่ามีความใกล้เคียงกับสภาพความเป็นจริงมากน้อยเพียงใด ในการจำลองการสอบเทียบและการปรับแก้การสะท้อนแสงของเฮลิโอสแตทต้นทุนต่ำโปรแกรมที่ใช้จะสุ่มค่าความคลาดเคลื่อนต่างๆ สำหรับเฮลิโอสแตทต้นทุนต่ำทั้งในส่วนที่มีผลต่อการสะท้อนแสงและในส่วนที่มีผลต่อการสอบเทียบตามสมมติฐานของการกระจายตัวของค่าความคลาดเคลื่อนต่างๆ ที่ได้ตั้งไว้ ค่าความคลาดเคลื่อนเหล่านี้จะประกอบด้วย

1. ค่าความคลาดเคลื่อนของทิศทางของแสงอาทิตย์เนื่องจากการคำนวณ
2. ค่าความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งกึ่งกลางกระจกเนื่องจากการติดตั้ง
3. ค่าความคลาดเคลื่อนของทิศการวางตัวเริ่มต้นของกระจกเนื่องจากการติดตั้ง
4. ค่าความคลาดเคลื่อนของระบบขับเคลื่อนจากการการผลิตและการประกอบ
5. ค่าความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งกึ่งกลางกระจกเนื่องจากการผลิตชิ้นส่วนและการประกอบ
6. ค่าความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งแสงสะท้อนจริงเนื่องจากการบิดเบือนของภาพถ่าย การตรวจสอบค่าความคลาดเคลื่อนต่างๆ ของเฮลิโอสแตทต้นทุนต่ำในสภาพแวดล้อมจริง สามารถทำการตรวจวัดได้เพียง 2 ค่าคือค่าตำแหน่งกึ่งกลางกระจกขณะทำการติดตั้งและค่าทิศการวางตัวเริ่มต้นของกระจกเท่านั้น ค่าความคลาดเคลื่อนของเฮลิโอสแตทต้นทุนต่ำที่วัดได้นี้ถูกแสดงอยู่ในตารางที่ 5.2

ตารางที่ 5.2 ค่าความคลาดเคลื่อนต่างๆ ของเฮลิโอสแตทที่สามารถวัดได้

ความคลาดเคลื่อนที่สามารถวัดได้	ค่าความคลาดเคลื่อนที่วัดได้
1. ตำแหน่งกึ่งกลางกระจกขณะทำการติดตั้ง ความคลาดเคลื่อนในแกน x ความคลาดเคลื่อนในแกน y ความคลาดเคลื่อนในแกน z	-0.9 เซนติเมตร -0.8 เซนติเมตร -1.2 เซนติเมตร
2. ทิศการวางตัวเริ่มต้นของกระจก ความคลาดเคลื่อนในมุมกวาด ความคลาดเคลื่อนในมุมเงย	0.95 องศา 0.45 องศา

ในการจำลองการสอบเทียบและการปรับแก้การสะท้อนแสงนอกจากความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งกึ่งกลางกระจกขณะทำการติดตั้งและทิศการวางตัวเริ่มต้นของกระจกแล้วค่าความคลาดเคลื่อนอื่นๆ จะถูกกำหนดค่าตามสมมติฐานของการกระจายตัวของค่าความคลาดเคลื่อนตามที่ได้ตั้งไว้ ระยะเวลาของเฮลิโอสแตทต้นทุ่นต่ำ เป้า และอุปกรณ์สอบเทียบจะมีค่าเท่ากับการทดสอบในสภาพแวดล้อมจริงทั้งหมด

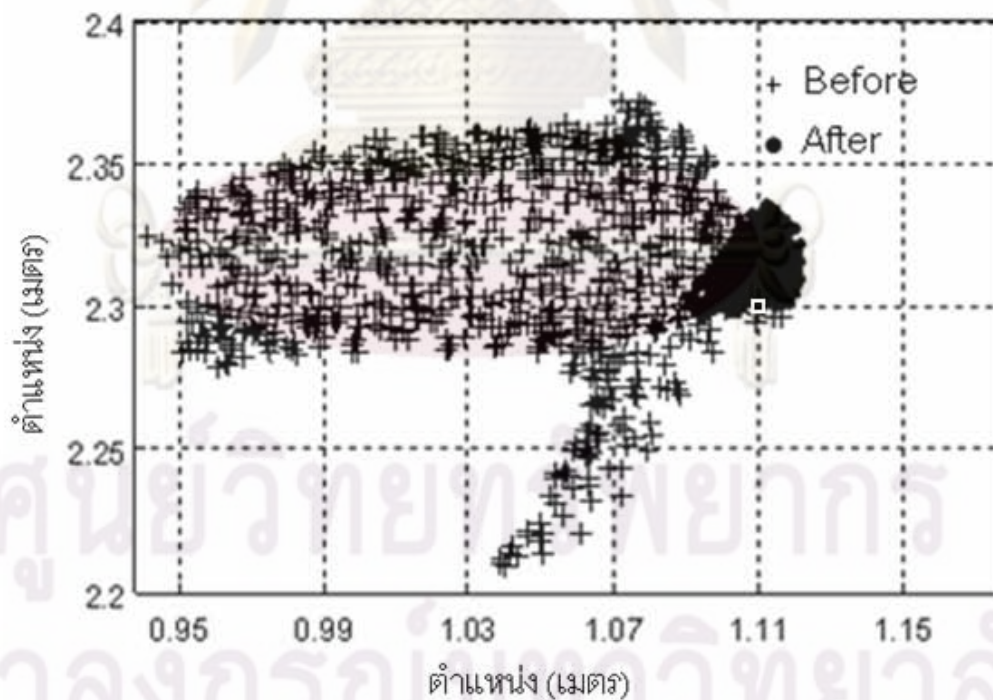
เมื่อทำการจำลองการสะท้อนแสงของเฮลิโอสแตทต้นทุ่นต่ำด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ตลอดทั้งปี 2552 ภายใต้เงื่อนไขดังกล่าว โดยเริ่มทำการสอบเทียบตั้งแต่วันที่ 1-4 มกราคม พ.ศ. 2552 ระยะเวลา 9:00 น. - 17:00 น. โดยใช้จำนวนจุดสอบเทียบและระยะเวลาในการสอบเทียบเดียวกับการทดสอบในสภาพแวดล้อมจริง จากนั้นจึงนำค่า  $R_{ss}$  ที่ประมาณได้ปรับแก้การสะท้อนแสงตลอดทั้งปี ผลจากการทดสอบการสอบเทียบและการปรับแก้การสะท้อนแสงของเฮลิโอสแตทต้นทุ่นต่ำด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ประดิษฐ์ขึ้นนี้จะแสดงอยู่ในรูปของระยะทางระหว่างตำแหน่งแสงสะท้อนจริงกับตำแหน่งเป้าหมายตลอดทั้งปี ( $D_{avg}$ ) ดังแสดงในตารางที่ 5.3 ที่แสดงผลของการสะท้อนแสงของเฮลิโอสแตทต้นทุ่นต่ำที่มีการสุ่มค่าความคลาดเคลื่อนต่างๆ ทั้งหมด 10 ตัวอย่างทั้งที่ได้รับการปรับแก้และไม่ได้รับการปรับแก้ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

ตารางที่ 5.3 ผลการสอบเทียบและการปรับแก้การสะท้อนแสงของเฮลิโอสแตทต้นทุ่นต่ำด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ (หน่วย : เซนติเมตร)

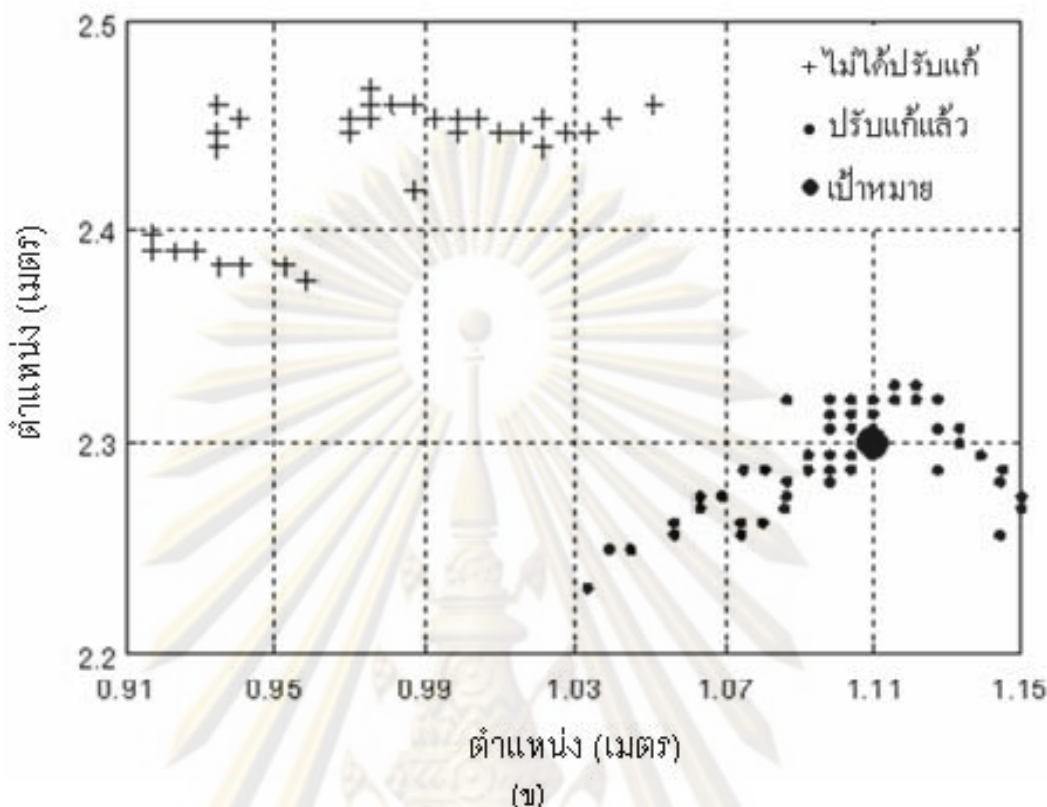
ตัวอย่างที่	ไม่ได้รับการปรับแก้	ได้รับการปรับแก้	ปรับแก้ความผิดพลาดได้ (เท่า)
1	12.7088	3.4450	3.69
2	38.4824	4.3707	8.80
3	12.089	8.9939	1.34
4	13.9243	0.9869	14.11
5	14.6943	7.7264	1.90
6	33.5385	4.6265	7.25
7	56.7960	9.7532	5.82
8	8.6868	1.6533	5.25
9	44.9098	10.3328	4.35
10	27.3682	4.2611	6.42



ผลของการปรับแก้ทั้ง 10 ตัวอย่างนี้ให้ผลการปรับแก้ความผิดพลาดในการสะท้อนแสงที่แตกต่างกันออกไปเนื่องจากค่าคลาดเคลื่อนที่ต่างกันที่ถูกระบุค่าแบบสุ่ม อย่างไรก็ตามจากการทดสอบทั้ง 10 ตัวอย่างพบว่ามียังตัวอย่างที่ให้ผลการจำลองใกล้เคียงกับการผลทดสอบจริง ลักษณะของแสงสะท้อนของเฮลิโอสแตทที่ไม่ได้รับการปรับแก้และได้รับการปรับแก้แล้วมีลักษณะใกล้เคียงการผลของการทดสอบในสภาพแวดล้อมจริง (ตัวอย่างที่ 8) ผลของการจำลองพบว่าวิธีการสอบเทียบและวิธีการปรับแก้สามารถปรับแก้ความผิดพลาดในการสะท้อนแสงได้ประมาณ 5.25 เท่า ในรูปที่ 5.6(ก) เป็นตัวอย่างของการสะท้อนแสงของเฮลิโอสแตทต้นทุนต่ำที่ได้จากโปรแกรมคอมพิวเตอร์ (ตัวอย่างที่ 8) โดยมีเครื่องหมายบวก (+), เครื่องหมายวงกลม (•) และเครื่องหมายสี่เหลี่ยม (■) แสดงถึงตำแหน่งแสงสะท้อนที่ไม่ได้รับการปรับแก้, ตำแหน่งแสงสะท้อนที่ได้รับการปรับแก้ และตำแหน่งเป้าหมายที่ต้องการให้เฮลิโอสแตทสะท้อนแสงไปตามลำดับ และในรูป 5.6(ข) แสดงผลของการสะท้อนแสงของเฮลิโอสแตทต้นทุนต่ำในสภาพแวดล้อมจริง โดยมีเครื่องหมายวงกลมเล็ก, เครื่องหมายบวก และ เครื่องหมายวงกลมใหญ่ (•, + และ •) แทนตำแหน่งแสงสะท้อนที่ได้รับการปรับแก้แล้ว ตำแหน่งแสงสะท้อนที่ไม่ได้รับการปรับแก้ และตำแหน่งของเป้าหมายตามลำดับ



(ก)



รูปที่ 5.6(ก) ตัวอย่างการสะท้อนแสงของเฮลิโอสแตทต้นทุนต่ำที่ได้จากโปรแกรมคอมพิวเตอร์ และ  
(ข) การสะท้อนแสงของเฮลิโอสแตทต้นทุนต่ำในสภาพแวดล้อมจริง

จากรูปที่ 5.6(ก) และ (ข) พบว่าลักษณะของการสะท้อนแสงจากการทดสอบในสภาพแวดล้อมจริง และจากโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่เกิดขึ้นมีลักษณะใกล้เคียงกันคือตำแหน่งของแสงสะท้อนที่ไม่ได้รับการปรับแก้จะเรียงตัวเป็นเส้นโค้งจากซ้ายไปขวาและอยู่ทางด้านบนซ้ายของตำแหน่งเป้า ในส่วนของผลของการสะท้อนแสงหลังจากทำการปรับแก้แล้วตำแหน่งแสงสะท้อนที่เกิดขึ้นย้ายมาใกล้เป้าหมายมากขึ้นโดยเรียงตัวเป็นเส้นโค้งจากซ้ายไปขวาและอยู่ด้านล่างบนของตำแหน่งเป้าเช่นเดียวกัน ผลของการปรับแก้สามารถลดความผิดพลาดของแสงสะท้อนจากการทดสอบจริงและการจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ลงได้ประมาณ 5.8 และ 5.25 เท่า ตามลำดับ

การพิจารณาค่า  $R_{\text{rms}}$  ของเฮลิโอสแตทต้นทุนต่ำที่คำนวณได้จากการทดสอบการสอบเทียบจากสภาพแวดล้อมจริงและจากการจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ พบว่าทิศการวางตัวเริ่มต้นของกระจกมีรูปแบบของความคลาดเคลื่อนที่ใกล้เคียงกัน การพิจารณาค่า  $R_{\text{rms}}$  ของเฮลิโอสแตทต้นทุนต่ำจากการทดสอบจริงและการจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ด้วยการแปลงค่าให้อยู่ในรูปของมุมความคลาดเคลื่อนในแนวมุมกวาด ( $\Delta\theta_x$ ) และในแนวมุมเงย ( $\Delta\theta_y$ ) เมื่อค่า

$R$  ของเฮลิโอสแตทที่เกิดจากความคลาดเคลื่อนของทิศการวางตัวเริ่มต้นของกระจกมีค่าดังแสดงในสมการที่ 5.6

$$R = \begin{bmatrix} \cos \Delta\theta_{az} \cos \Delta\theta_{al} & -\sin \Delta\theta_{az} \cos \Delta\theta_{az} \sin \Delta\theta_{al} \\ \sin \Delta\theta_{az} \cos \Delta\theta_{al} & \cos \Delta\theta_{az} \sin \Delta\theta_{al} \\ -\sin \Delta\theta_{al} & 0 & \cos \Delta\theta_{al} \end{bmatrix} \quad (5.6)$$

พบว่าผลจากการคำนวณหาค่า  $\Delta\theta_{az}$  และ  $\Delta\theta_{al}$  จากค่า  $R_{est}$  ที่ได้จากการสอบเทียบในสภาพแวดล้อมจริงและโปรแกรมคอมพิวเตอร์แสดงอยู่ในตารางที่ 5.4 โดยที่ค่า  $R_{est}$  จากการสอบเทียบในสภาพแวดล้อมจริงและโปรแกรมคอมพิวเตอร์มีค่าดังนี้

1. ค่า  $R_{est}$  จากการสอบเทียบในสภาพแวดล้อมจริง

$$R_{est} = \begin{bmatrix} 0.9579 & -0.0147 & -0.0022 \\ 0.0162 & 1.0001 & -0.0116 \\ -0.0062 & 0.0106 & 1.0004 \end{bmatrix}$$

2. ค่า  $R_{est}$  จากการสอบเทียบด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

$$R_{est} = \begin{bmatrix} 0.9698 & -0.0180 & -0.0030 \\ 0.0182 & 1.0465 & -0.0121 \\ -0.0064 & 0.0204 & 1.0667 \end{bmatrix}$$

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 5.4 ค่า  $\Delta\theta_{az}$  และ  $\Delta\theta_{ai}$  ที่คำนวณได้จากพจน์ต่างๆ ของค่า  $R_{est}$  จากการจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์, จากการสอบเทียบในสภาพแวดล้อมจริงและจากการวัด (หน่วย : องศา)

	สมการที่ใช้	โปรแกรมคอมพิวเตอร์	สภาพแวดล้อมจริง	การวัดจริง
$\Delta\theta_{az}$	$\tan^{-1}\left(\frac{R_{21}}{R_{11}}\right)$	1.0751	0.9689	0.95
	$\tan^{-1}\left(\frac{R_{12}}{R_{22}}\right)$	0.9854	0.8421	
	$\tan^{-1}\left(\frac{R_{23}}{R_{13}}\right)$	76.0752	79.2611	
ค่าเฉลี่ย		1.0303	0.9055	
$\Delta\theta_{ai}$	$\tan^{-1}\left(\frac{R_{13}}{R_{11}}\right)$	0.1772	0.1316	0.45
	$\tan^{-1}\left(\frac{R_{23}}{R_{21}}\right)$	36.7556	35.6045	
	$\tan^{-1}\left(\frac{R_{31}}{R_{33}}\right)$	0.3438	0.3551	
ค่าเฉลี่ย		0.2605	0.2434	

หมายเหตุ : การหาค่าเฉลี่ยทำโดยการตัดค่าสูงที่สุดออก

จากตารางที่ 5.4 จะเห็นได้ว่าค่า  $\Delta\theta_{az}$  และ  $\Delta\theta_{ai}$  ที่คำนวณได้นั้นมีความสอดคล้องกันกล่าวคือ ความผิดพลาดในการสะท้อนแสงที่เกิดขึ้นเป็นผลมาจากค่ามุมกวาด ( $\Delta\theta_{az}$ ) และมุมเงย ( $\Delta\theta_{ai}$ ) ที่เป็นค่าบวกทั้งคู่และมีขนาดของมุมกวาด ( $\Delta\theta_{az}$ ) ใหญ่กว่าขนาดของมุมเงย ( $\Delta\theta_{ai}$ )

ความใกล้เคียงกันของการทดสอบการปรับแก้ในสภาพแวดล้อมจริงและการจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ดังที่กล่าวมาแล้วนี้ทำให้ผู้วิจัยสามารถทำนายผลของวิธีการสอบเทียบและวิธีการปรับแก้ต่อการปรับแก้ความผิดพลาดในการสะท้อนแสงของเฮลิโอสแตทต้นทุนต่ำตลอดทั้งปีได้ดังนี้ วิธีการสอบเทียบและวิธีการปรับแก้สามารถลดความผิดพลาดในการสะท้อนแสงตลอดทั้งปีลงได้ประมาณ 5.25 เท่า โดยมีระยะทางระหว่างตำแหน่งแสงสะท้อนจริงกับตำแหน่งเป้าเฉลี่ยตลอดทั้งปีเท่ากับ 1.6533 เซนติเมตร

ผลของการปรับแก้นี้อาจไม่ใช่ผลการปรับแก้ที่ดีที่สุดเนื่องจากจำนวนจุดสอบเทียบและระยะเวลาที่ใช้ในการสอบเทียบอาจไม่ใช่ค่าที่เหมาะสมที่สุดสำหรับวิธีการสอบเทียบและวิธีการปรับแก้ ดังที่ได้กล่าวไว้แล้วในขั้นต้นว่าผลของวิธีการสอบเทียบและวิธีการปรับแก้ขึ้นอยู่กับค่า  $R_{ext}$  ที่ประมาณได้ว่าจะมีความใกล้เคียงกับค่าความคลาดเคลื่อนของทิศการวางตัวเริ่มต้นของกระจกมากน้อยเพียงใด และเนื่องจากวิธีที่ใช้ในการประมาณค่า  $R$  ของเฮลิโอสแตทต้นทุ่นตัวนี้ได้จากระเบียบวิธีกำลังสองน้อยที่สุด (least square method) ดังนั้นผลของการประมาณค่า  $R$  ของเฮลิโอสแตทต้นทุ่นตัวจึงขึ้นอยู่กับจำนวนจุดสอบเทียบและระยะเวลาที่ใช้ในการสอบเทียบ วิธีหาจำนวนจุดสอบเทียบและระยะเวลาที่ใช้ในการสอบเทียบที่เหมาะสมทำได้โดยการทดสอบเปลี่ยนค่าจำนวนจุดสอบเทียบและระยะเวลาในการสอบเทียบเพื่อวัดผลการปรับแก้ที่เกิดขึ้นซึ่งจะเสียเวลาในการทำการทดสอบมาก ผู้วิจัยจึงหาค่าที่จำนวนจุดสอบเทียบและระยะเวลาในการสอบเทียบที่เหมาะสมด้วยการจำลองการสอบเทียบและการปรับแก้การสะท้อนแสงของเฮลิโอสแตทต้นทุ่นตัวด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์แทน

### 5.2.3 การหาจำนวนจุดสอบเทียบและระยะเวลาในการสอบเทียบที่เหมาะสมด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

การจำลองการสอบเทียบและการปรับแก้เพื่อหาจำนวนจุดสอบเทียบและระยะเวลาการสอบเทียบที่เหมาะสมที่ทำให้วิธีการสอบเทียบและวิธีการปรับแก้มีประสิทธิภาพสูงที่สุดจะต้องทำการกำหนดค่าความคลาดเคลื่อนต่างๆ ของเฮลิโอสแตทต้นทุ่นตัว ค่าความคลาดเคลื่อนของเฮลิโอสแตทต้นทุ่นตัวที่ใช้ในการจำลองการสอบเทียบและการปรับแก้ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ถูกแสดงไว้ในตารางที่ 5.5

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 5.5 ค่าความคลาดเคลื่อนต่างๆ ที่มีผลต่อการสะท้อนแสงและการสอบเทียบของเฮลิโอสแตทต้นทุนต่ำที่ใช้ในการจำลอง

ความคลาดเคลื่อนแบบคงที่ (Systematic error)	ค่าความคลาดเคลื่อน
1. ตำแหน่งกึ่งกลางกระจกเนื่องจากการติดตั้ง แกน x แกน y แกน z	-0.977 ซม. -1.442 ซม. - 1.334 ซม.
2. ทิศการวางตัวเริ่มต้นของกระจก มุมกวาด ( $\Delta\theta_{az}$ ) มุมเงย ( $\Delta\theta_{ai}$ )	-1.3471 องศา -1.8475 องศา
3. ระบบขับเคลื่อน (ค่า Phase shift) แกนมุมกวาด ( $\phi_{az}$ ) แกนมุมเงย ( $\phi_{ai}$ )	-249.26 องศา 335.17 องศา
4. ตำแหน่งกึ่งกลางกระจกเนื่องจากการผลิต แกน x แกน y แกน z เยื้องศูนย์แกนหมุนมุมกวาด เยื้องศูนย์แกนหมุนมุมเงย	-0.28 มม. -1.50 มม. -0.74 มม. 3.11 มม. 0.43 มม.
ค่าความคลาดเคลื่อนแบบสุ่ม (Random error)	
1. ทิศทางของแสงอาทิตย์ มุมกวาด (Average, SD) มุมเงย (Average, SD)	(หน่วย : $10^3$ องศา) 0.0 , 2.63 -0.1 , 1.80
2. ระบบขับเคลื่อน ความไม่แน่นอนของการหมุน (Average, SD)	(หน่วย : $10^3$ องศา) 3.304 , 3.289
3. ตำแหน่งแสงสะท้อนจริงเนื่องจากการถ่ายภาพ แกน x (Limit) แกน z (Limit)	$\pm 2$ พิกเซล $\pm 2$ พิกเซล

ตำแหน่งของเฮลิโอสแตทต้นทุนต่ำและเป้าหมายที่ใช้ในการจำลองจะใช้ตำแหน่งเดียวกันการจำลองปัจจัยความคลาดเคลื่อนต่างๆ ต่อความผิดพลาดในการสะท้อนแสงของเฮลิโอสแตทต้นทุนต่ำ (ระยะไกลที่สุดของระบบตัวรับแสงส่วนกลางที่โครงการวิจัยนี้สนใจ) ระยะเวลาที่ใช้ในการสอบเทียบจะขึ้นอยู่กับเงื่อนไขการทดสอบที่จะกล่าวถึงในส่วนต่อไป ในส่วนของการปรับแก้จะทำการจำลองการปรับแก้ความผิดพลาดในการสะท้อนแสงของเฮลิโอสแตทต้นทุนต่ำตลอดทั้งปี 2552

การวัดผลของจำนวนจุดสอบเทียบและระยะเวลาในการสอบเทียบต่อผลของการปรับแก้การสะท้อนแสงของเฮลิโอสแตทต้นทุนต่ำสามารถทำได้โดย

1. การพิจารณาการลู่เข้า (Convergence) ของค่าผลต่างของ  $R_{est}$  ตัวปัจจุบันและตัวที่คำนวณได้ก่อนหน้า
2. ผลของการปรับแก้ความผิดพลาดของการสะท้อนแสงจากการสอบเทียบที่เพิ่มจำนวนจุดสอบเทียบแต่คงระยะห่างของเวลา (interval) ในการถ่ายภาพตำแหน่งแสงสะท้อนจริงแต่ละครั้งไว้

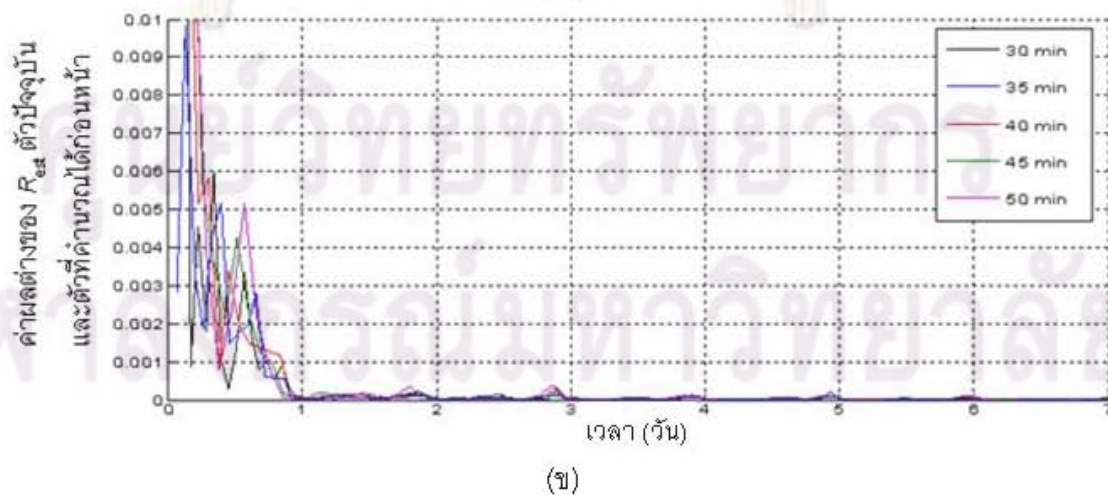
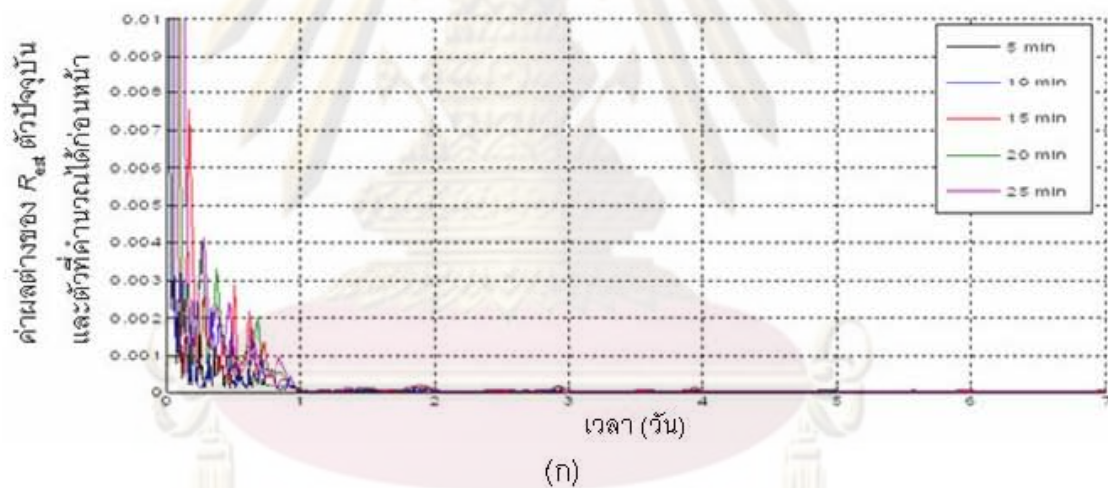
จำนวนและคุณภาพของข้อมูลมีผลต่อการคำนวณค่า  $R_{est}$  ด้วยระเบียบวิธีกำลังสองน้อยที่สุด (least square method) ดังนั้นเพื่อให้วิธีการปรับแก้ความผิดพลาดในการสะท้อนมีประสิทธิภาพสูงที่สุดผู้วิจัยจึงเป็นต้องทราบจำนวนของจุดสอบเทียบและระยะเวลาที่ใช้ในการสอบเทียบ การหาจำนวนจุดสอบเทียบและระยะเวลาที่ใช้ในการสอบเทียบที่เหมาะสมสำหรับวิธีการสอบเทียบและวิธีการปรับแก้มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1. ผลของการลู่เข้า (convergence) ของค่าผลต่างของ  $R_{est}$  ตัวปัจจุบันและตัวที่คำนวณได้ก่อนหน้า จำนวนของจุดสอบเทียบที่ใช้มีผลต่อการคำนวณค่า  $R_{est}$  โดยทุกครั้งที่มีการเพิ่มจำนวนจุดสอบเทียบ 1 จุดสอบเทียบค่า  $R_{est}$  ที่คำนวณได้จะมีค่าเปลี่ยนไปแต่เมื่อเพิ่มจำนวนจุดสอบเทียบถึงระดับหนึ่งค่า  $R_{est}$  จะเข้าสู่ภาวะเสถียรโดยค่าที่คำนวณได้จะมีค่าแตกต่างจากค่าที่คำนวณได้ก่อนหน้านี้น้อยมาก การเพิ่มจำนวนจุดสอบเทียบหลังจากสถานะเสถียรนี้จึงไม่มีผลต่อการคำนวณค่า  $R_{est}$  และเป็นการเพิ่มเวลาสำหรับการสอบเทียบโดยไม่จำเป็น การหาจำนวนจุดสอบเทียบก่อนสถานะเสถียรนี้จะพิจารณาการลู่เข้า (convergence) ของผลต่าง ( $\Delta R_{est}$ ) ของค่า  $R_{est}$  จากการเพิ่มจำนวนจุดสอบเทียบ ผลต่าง ( $\Delta R_{est}$ ) ระหว่างค่า  $R_{est}$  ตัวปัจจุบันที่ใช้จำนวนจุดสอบเทียบเท่ากับ  $n$  ( ${}_n R_{est}$ ) และตัวที่คำนวณได้ก่อนหน้านี่ที่ใช้จำนวนจุดสอบเทียบเท่ากับ  $n-1$  ( ${}_{n-1} R_{est}$ ) เมื่อ  $n$  เป็นจำนวนนับใดๆ ที่มีค่ามากกว่า 3 (การสอบเทียบต้องใช้จำนวนจุดสอบเทียบอย่างน้อย 3 จุด) จะสามารถหาได้จากสมการที่ 5.7

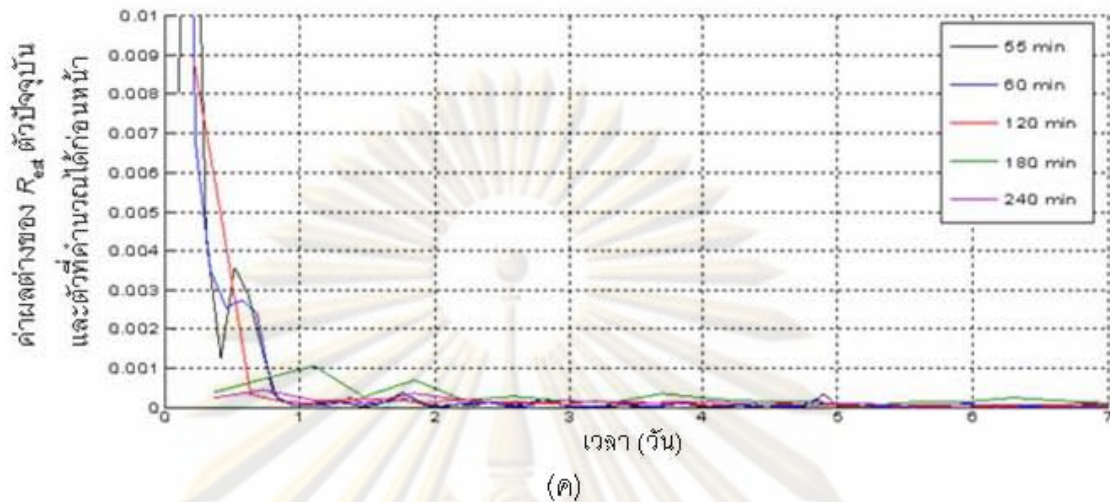
$$\Delta R_{est} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 (b_{ij} - a_{ij})^2}{9}} \quad (5.7)$$

$$\text{โดยที่ } {}_n R_{est} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix} \text{ และ } {}_{n-1} R_{est} = \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & b_{13} \\ b_{21} & b_{22} & b_{23} \\ b_{31} & b_{32} & b_{33} \end{bmatrix}$$

การทดสอบเพื่อวัดผลสำหรับการสอบเทียบนี้จะใช้ระยะเวลา (interval) ในการถ่ายภาพ ตำแหน่งแสงสะท้อนจริงแต่ละครั้งทั้งหมด 15 ค่า (ถ่ายภาพทุกๆ 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50, 55, 60, 120, 180 และ 240 นาที) ซึ่งการลู่เข้า (convergence) ของค่าผลต่าง ( $\Delta R_{est}$ ) ของ  $R_{est}$  เหล่านี้จากการจำลองจะแสดงอยู่ในรูปที่ 5.7(ก), (ข) และ (ค) แกน x แสดงระยะเวลาที่ใช้ในการสอบเทียบมีหน่วยเป็นวัน แกน y แสดงค่าผลต่าง ( $\Delta R_{est}$ ) ของค่า  $R_{est}$  ตัวที่ใช้จำนวนจุดสอบเทียบเท่ากับ  $n$  และตัวที่ใช้จุดสอบเทียบเท่ากับ  $n-1$  โดยมีเส้นกราฟแต่ละเส้นแสดงระยะเวลา (interval) ต่างๆ ที่ใช้ในการถ่ายภาพ





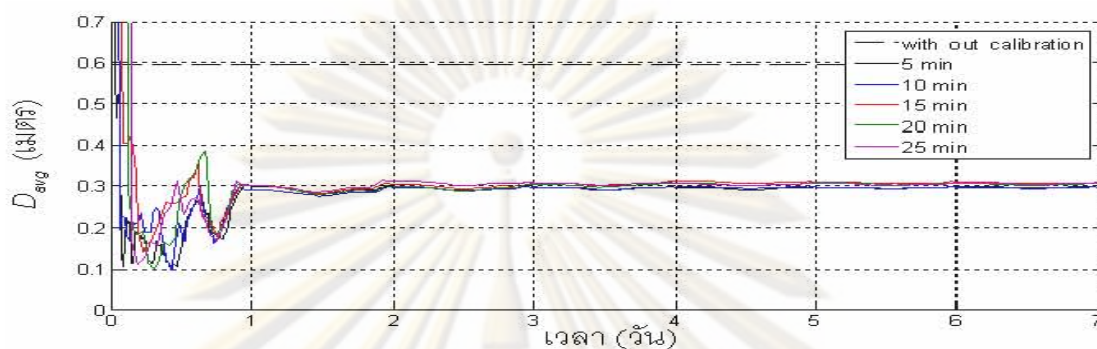


รูปที่ 5.7(ก) การลู่เข้า (convergence) ของค่าผลต่าง ( $\Delta R_{ess}$ ) ของ  $R_{ess}$  ตัวปัจจุบันและตัวที่คำนวณได้ก่อนหน้านี้ที่มีระยะห่างของเวลา (interval) ที่ใช้ในการถ่ายภาพเท่ากับ 5, 10, 15, 20 และ 25 นาที, (ข) การลู่เข้า (convergence) ของค่าผลต่าง ( $\Delta R_{ess}$ ) ของ  $R_{ess}$  ตัวปัจจุบันและตัวที่คำนวณได้ก่อนหน้านี้ที่มีระยะห่างของเวลา (interval) ที่ใช้ในการถ่ายภาพเท่ากับ 30, 35, 40, 45 และ 50 นาที และ (ค) การลู่เข้า (convergence) ของค่าผลต่าง ( $\Delta R_{ess}$ ) ของ  $R_{ess}$  ตัวปัจจุบันและตัวที่คำนวณได้ก่อนหน้านี้ที่มีระยะห่างของเวลา (interval) ที่ใช้ในการถ่ายภาพเท่ากับ 55, 60, 120, 180 และ 240 นาที

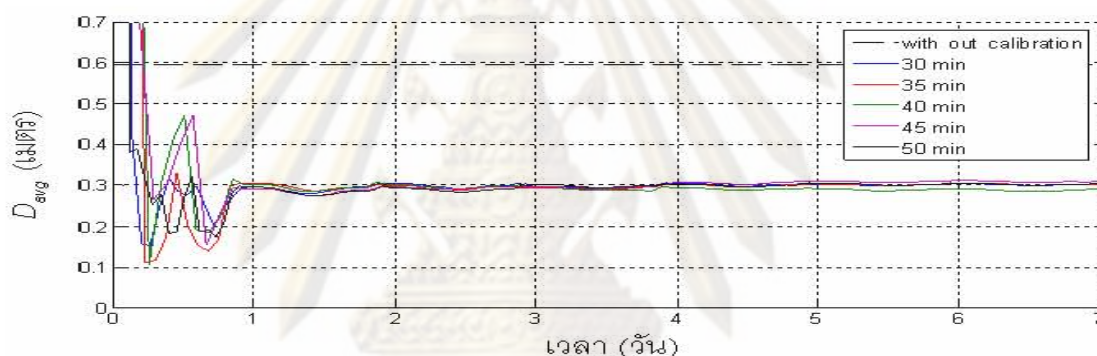
จากรูปที่ 5.7(ก), (ข) และ (ค) จะเห็นได้ว่าแต่ละระยะห่างของเวลา (interval) ที่ใช้ในการถ่ายภาพตำแหน่งแสงสะท้อนจริงเพื่อใช้ในการสอบเทียบจะทำให้ค่าผลต่าง ( $\Delta R_{ess}$ ) ของ  $R_{ess}$  ตัวปัจจุบันและตัวที่คำนวณได้ก่อนหน้านี้ลู่เข้าสู่ศูนย์ไม่พร้อมกัน แต่อย่างไรก็ตามเมื่อทำการสอบเทียบเป็นเวลา 4 วันทุกระยะเวลา (interval) ที่ใช้ในการถ่ายภาพจะทำให้ค่าผลต่าง ( $\Delta R_{ess}$ ) ของ  $R_{ess}$  ลู่เข้าสู่ศูนย์โดยมีค่าไม่เกิน 0.001 ผลจากการทดสอบนี้ทำให้สามารถกำหนดระยะเวลาที่ควรใช้ในการสอบเทียบได้เท่ากับ 4 วัน

2. ผลของการปรับแก้ความผิดพลาดของการสะท้อนแสง ผลการทดสอบในข้อที่ 1 ทำให้ผู้วิจัยสามารถกำหนดระยะเวลาที่ใช้ในการสอบเทียบได้เท่ากับ 4 วัน แต่ยังไม่สามารถกำหนดระยะห่างของเวลา (interval) ที่ใช้ในการถ่ายภาพตำแหน่งแสงสะท้อนจริงได้ การนำค่า  $R_{ess}$  ต่างๆ ที่คำนวณได้จากการทดสอบในข้อที่ 1 มาทดสอบการปรับแก้ความผิดพลาดของการสะท้อนแสงจะทำให้ทราบถึงประสิทธิภาพของ  $R_{ess}$  แต่ละตัวได้ ผลการปรับแก้ความผิดพลาดของการสะท้อนแสงถูกแสดงไว้ในรูปที่ 5.8 แกน x แสดงระยะเวลาที่ใช้ในการสอบเทียบมีหน่วยเป็นวัน

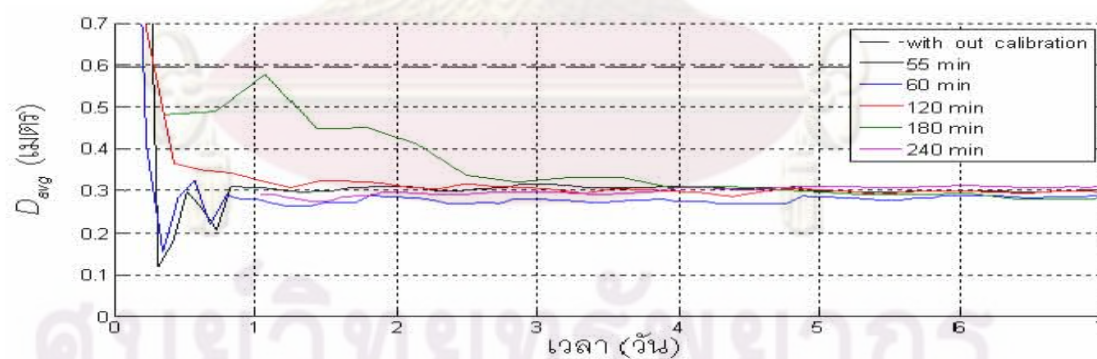
แกน y แสดงระยะทางระหว่างตำแหน่งแสงสะท้อนจริงกับตำแหน่งเป้าเฉลี่ยตลอดทั้งปี ( $D_{avg}$ ) มีหน่วยเป็นเมตร เส้นกราฟแต่ละเส้นแสดงระยะห่างของเวลา (interval) ต่างๆ ที่ใช้ในการถ่ายภาพ ยกเว้นเส้นปะที่แสดงผลการสะท้อนแสงที่ไม่ได้รับการปรับแก้



(ก)



(ข)



(ค)

รูปที่ 5.8(ก) ผลการปรับแก้ความผิดพลาดของการสะท้อนแสงที่มีระยะห่างของเวลา (interval) ที่ใช้ในการถ่ายภาพสำหรับการสอบเทียบเท่ากับ 5, 10, 15, 20 และ 25 นาที, (ข) ผลการปรับแก้ความผิดพลาดของการสะท้อนแสงที่มีระยะห่างของเวลา (interval) ที่ใช้ในการถ่ายภาพสำหรับการสอบเทียบเท่ากับ 30, 35, 40, 45 และ 50 นาที และ (ค) ผลการปรับแก้ความผิดพลาดของการสะท้อนแสงที่มีระยะห่างของเวลา (interval) ที่ใช้ในการถ่ายภาพสำหรับการสอบเทียบเท่ากับ 55, 60, 120, 180 และ 240 นาที

จากรูปที่ 5.8(ก), (ข) และ (ค) ผลการปรับแก้จากการทำการสอบเทียบทั้งหมด 4 วันของทุก ระยะห่างของเวลา (interval) ที่ใช้ในการถ่ายภาพทำให้ความผิดพลาดในการสะท้อนแสงลดลง ประมาณ 2 เท่า ระยะห่างของเวลา (interval) ที่ใช้ในการถ่ายภาพที่ทำให้ประสิทธิภาพในการ ปรับแก้สูงที่สุดคือ 60 นาที เมื่อใช้จำนวนจุดสอบเทียบเท่ากับ 40 จุดสอบเทียบจะสามารถลด ความผิดพลาดในการสะท้อนแสงลงได้ประมาณ 2.3 เท่า

### 5.3 สรุป

การสอบเทียบและการปรับแก้ความผิดพลาดในการสะท้อนแสงของเฮลิโอสแตทต้นทุนต่ำใน สภาพแวดล้อมจริงที่ทำการสอบเทียบทั้งหมด 5 วันคือในวันที่ 14 และวันที่ 16-19 มิถุนายน พ.ศ. 2552 ระหว่างเวลา 9:00 น.- 17:00 น. ระยะห่างของเวลา (interval) ที่ใช้เท่ากับ 5 นาที จำนวนจุด สอบเทียบเท่ากับ 485 จุดสอบเทียบ (ไม่สามารถใช้ค่าตามตารางที่ 3.1 ได้เนื่องจากช่วงเวลาที่ทำการ ทดสอบเป็นช่วงฤดูฝนทำให้ไม่สามารถเก็บข้อมูลการสอบเทียบได้ครบทุกจุด) ผลจากการสอบ เทียบพบว่าสามารถนำไปใช้ได้ทั้งหมด 203 จุดสอบเทียบ ซึ่งจะสามารถลดความผิดพลาดในการ สะท้อนแสงของเฮลิโอสแตทต้นทุนต่ำลงได้ประมาณ 5.8 เท่า และจากการจำลองการสอบเทียบ และการปรับแก้ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์พบว่าสามารถลดความผิดพลาดในการสะท้อนแสงของ เฮลิโอสแตทต้นทุนต่ำตลอดทั้งปีลงได้ประมาณ 5.25 เท่า

การจำลองการสะท้อนแสงของเฮลิโอสแตทต้นทุนต่ำที่มีค่าความคลาดเคลื่อนต่างๆ ที่ตั้ง แสดงไว้ในตารางที่ 5.5 ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อหาจำนวนจุดสอบเทียบและระยะเวลาที่ใช้ ในการสอบเทียบที่เหมาะสมที่สุดที่ทำให้การปรับแก้ความผิดพลาดในการสะท้อนด้วยวิธีสอบการ เทียบและวิธีการปรับแก้มีประสิทธิภาพสูงที่สุด ผลการจำลองพบว่าค่าที่เหมาะสมที่สุดสำหรับ วิธีการสอบเทียบนี้คือการใช้จุดสอบเทียบจำนวน 40 จุดสอบเทียบและใช้ระยะห่างของเวลา (interval) ที่ใช้ในการถ่ายภาพตำแหน่งแสงสะท้อนจริงจากการสอบเทียบเท่ากับ 60 นาที ซึ่ง จะสามารถลดความผิดพลาดในการสะท้อนแสงนี้ได้ประมาณ 2.3 เท่า

## บทที่ 6

### บทสรุปและข้อเสนอแนะ

#### 6.1 บทสรุป

โครงการศึกษา ออกแบบ และสร้างต้นแบบเตาเผาสุริยะอุณหภูมิสูงมีความต้องการที่จะสร้างเตาเผาสุริยะอุณหภูมิสูงด้วยการใช้ระบบตัวรับแสงส่วนกลางเป็นแหล่งพลังงาน แต่ระบบตัวรับแสงส่วนกลางที่โครงการวิจัยนี้สนใจมีค่าใช้จ่ายในการสร้างระบบสูงเนื่องจากระบบตัวรับแสงส่วนกลางนี้ประกอบด้วยเฮลิโอสแตทขนาดเล็กประมาณ 5,000 ตัว โดยแต่ละตัวจะมีพื้นที่ในการสะท้อนแสงเท่ากับ  $0.2 \times 0.2$  ตารางเมตร

เฮลิโอสแตทต้นทุนต่ำและวิธีการสอบเทียบและวิธีการปรับแก้ความผิดพลาดในการสะท้อนถูกเสนอขึ้นโดยนักวิจัยของโครงการวิจัยนี้เพื่อลดค่าใช้จ่ายของการสร้างระบบ นักวิจัยของโครงการวิจัยนี้ได้เสนอเฮลิโอสแตทต้นทุนต่ำที่ทำการลดค่าใช้จ่ายในส่วนของการผลิตชิ้นส่วนและการติดตั้ง และเสนอวิธีการสอบเทียบและวิธีการปรับแก้ความผิดพลาดในการสะท้อนแสงของเฮลิโอสแตทต้นทุนต่ำที่เกิดจากการลดค่าใช้จ่ายในส่วนของการผลิตชิ้นส่วนและการติดตั้ง

ผลการปรับแก้ความผิดพลาดในการสะท้อนแสงของเฮลิโอสแตทต้นทุนต่ำในสภาพแวดล้อมจริงไม่สอดคล้องกับสมมุติฐานที่ได้ตั้งไว้ โดยมีเฉพาะบริเวณที่ใช้สอบเทียบเท่านั้นที่วิธีการสอบเทียบและวิธีการปรับแก้สามารถลดความผิดพลาดในการสะท้อนแสงของเฮลิโอสแตทต้นทุนต่ำได้ ผลการทดลองนี้ทำให้เฮลิโอสแตทต้นทุนต่ำและวิธีการสอบเทียบและวิธีการปรับแก้ไม่สามารถนำไปใช้กับระบบตัวรับแสงส่วนกลางที่โครงการวิจัยนี้สนใจได้

อย่างไรก็ตามผู้วิจัยที่เป็นส่วนหนึ่งของโครงการวิจัยนี้เชื่อว่าผลของการปรับแก้ความผิดพลาดในการสะท้อนแสงของเฮลิโอสแตทต้นทุนต่ำที่ไม่สอดคล้องกับสมมุติฐานนี้น่าจะมีผลมาจากความคลาดเคลื่อนอื่นๆ ระหว่างทำการทดสอบ ผู้วิจัยจึงทำการศึกษาวิธีการสอบเทียบและวิธีการปรับแก้โดยเริ่มจากการจำแนกปัจจัยความคลาดเคลื่อนต่างๆ ที่มีผลต่อการสะท้อนแสงของเฮลิโอสแตทต้นทุนต่ำและทดสอบผลของปัจจัยเหล่านั้นต่อการสะท้อนแสงของเฮลิโอสแตทต้นทุนต่ำเพื่อยืนยันความถูกต้องของสมมุติฐานที่ใช้ในการนำเสนอวิธีการสอบเทียบและวิธีการปรับแก้

ผลของการจำลองผลกระทบของปัจจัยความคลาดเคลื่อนต่างๆ ต่อการสะท้อนแสงของเฮลิโอสแตทต้นทุนต่ำพบว่าทิศการวางตัวเริ่มต้นของกระจกทำให้เฮลิโอสแตทสะท้อนแสงผิดพลาดสูงที่สุด ผลของการจำลองพบว่าความคลาดเคลื่อนของทิศการวางตัวเริ่มต้นของกระจก

ทำให้การสะท้อนแสงของเฮลิโอสแตทต้นทูนต่ำที่อยู่ห่างจากเป้าหมายเป็นระยะทางประมาณ 27 เมตร (เป้าอยู่สูงจากพื้น 10 เมตร และอยู่ห่างจากเฮลิโอสแตทโดยวัดระยะในแนวระดับ 25 เมตร) มีค่าผิดพลาดไป โดยมีค่าระยะทางระหว่างตำแหน่งแสงสะท้อนจริงกับตำแหน่งเป้าหมายเฉลี่ยตลอดทั้งปี ( $D_{avg}$ ) เท่ากับ 67.4380 เซนติเมตร ซึ่งมีค่าสูงกว่าผลจากความคลาดเคลื่อนของระบบขับเคลื่อนซึ่งเป็นผลกระทบอันดับ 2 และผลจากความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งกึ่งกลางกระจก เนื่องจากการผลิตและการประกอบซึ่งเป็นผลกระทบอันดับ 3 อยู่ประมาณ 4.5 เท่า และ 12.0 เท่า ตามลำดับ ซึ่งผลจากการจำลองนี้ทำให้สามารถยืนยันได้ว่าสมมุติฐานที่นักวิจัยของโครงการวิจัยนี้ ชื่อนำเสนอวิธีการสอบเทียบและวิธีการปรับแก้มีความถูกต้องและสอดคล้องกับความเป็นจริง

การทดสอบประสิทธิภาพของวิธีการสอบเทียบและวิธีการปรับแก้ในสภาพแวดล้อมจริง พบว่าวิธีการสอบเทียบและวิธีการปรับแก้สามารถลดความผิดพลาดในการสะท้อนแสงของเฮลิโอสแตทต้นทูนต่ำลงได้ประมาณ 5.8 เท่า จากทดสอบวิธีการสอบเทียบและวิธีการปรับแก้ความผิดพลาดในการสะท้อนแสงของเฮลิโอสแตทต้นทูนต่ำในสภาพแวดล้อมจริงที่มีระยะทางระหว่างเฮลิโอสแตทต้นทูนต่ำกับตำแหน่งเป้าหมายประมาณ 6.3 เมตร ด้วยการสอบเทียบในวันที่ 14 และ วันที่ 16-19 มิถุนายน พ.ศ.2552 ระหว่างเวลา 9:00 น.- 17:00 น. รวมเป็นเวลาในการสอบเทียบทั้งหมด 5 วัน จำนวนจุดสอบเทียบที่ใช้ในการสอบเทียบมีจำนวน 485 จุดสอบเทียบ (ใช้ได้จริง 203 จุดสอบเทียบ) ระยะห่างของระยะเวลา (interval) ที่ใช้ในการถ่ายภาพตำแหน่งแสงสะท้อนจริงจากการสอบเทียบเท่ากับ 5 นาที ผลการสอบเทียบสามารถคำนวณค่า  $R_{est}$  ได้ดังนี้

$$R_{est} = \begin{bmatrix} 0.9579 & -0.0147 & -0.0022 \\ 0.0162 & 1.0001 & -0.0116 \\ -0.0062 & 0.0106 & 1.0004 \end{bmatrix}$$

เมื่อนำค่า  $R_{est}$  ที่ได้มาปรับแก้ความผิดพลาดในการสะท้อนแสงของเฮลิโอสแตทต้นทูนต่ำนี้เป็นเวลา 2 วันตั้งแต่วันที่ 20-21 มิถุนายน พ.ศ.2552 ระหว่างเวลา 9:00 น.- 17:00 น. แล้วนำมาเปรียบเทียบกับผลการสะท้อนแสงตั้งแต่วันที่ 22-23 มิถุนายน พ.ศ.2552 ระหว่างเวลา 9:00 น.- 17:00 น. ที่ไม่ได้รับการปรับแก้ จะพบว่าระยะทางระหว่างตำแหน่งแสงสะท้อนจริงกับตำแหน่งเป้าหมายเฉลี่ย ( $D_{avg}$ ) ของเฮลิโอสแตทต้นทูนต่ำที่ได้รับการปรับแก้และที่ไม่ได้รับการปรับแก้มีค่าเท่ากับ 3.39 และ 19.62 เซนติเมตรตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าวิธีปรับแก้สามารถลดความผิดพลาดในการสะท้อนแสงของเฮลิโอสแตทต้นทูนต่ำนี้ลงได้ประมาณ 5.8 เท่า

การจำลองการสอบเทียบและการปรับแก้ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่สร้างขึ้นเพื่อทำนายผลของวิธีการสอบเทียบและวิธีการปรับแก้ต่อการปรับแก้ความผิดพลาดในการสะท้อนแสงตลอดทั้งปี

ผลจากการจำลองพบว่าวิธีการสอบเทียบและวิธีการปรับแก้สามารถปรับแก้ความผิดพลาดในการสะท้อนแสงของเฮลิโอสแตทต้นทุ่นต่ำนี้ตลอดทั้งปีได้ประมาณ 5.25 เท่า โดยมีระยะทางระหว่างตำแหน่งแสงสะท้อนจริงกับตำแหน่งเป้าหมายเฉลี่ย ( $D_{avg}$ ) ตลอดทั้งปีเท่ากับ 1.6533 เซนติเมตร

การหาจำนวนจุดสอบเทียบและระยะเวลาที่ใช้ในการสอบเทียบที่เหมาะสมที่ทำให้วิธีการสอบเทียบและวิธีการปรับแก้มีประสิทธิภาพสูงที่สุดในการปรับแก้ความผิดพลาดในการสะท้อนแสงของเฮลิโอสแตทต้นทุ่นต่ำทำได้โดยการพิจารณาค่าความเสถียรของค่า  $R_{ext}$  ที่คำนวณได้จากการเพิ่มจำนวนจุดสอบเทียบแต่ไม่มีการเปลี่ยนค่าระยะห่างของเวลา (interval) ที่ใช้ในการถ่ายภาพตำแหน่งแสงสะท้อนจริงจากการสอบเทียบแต่ละจุดและการพิจารณาผลของการปรับแก้ความผิดพลาดในการสะท้อนแสงที่ดีที่สุดด้วยค่า  $R_{ext}$  เหล่านั้น

ผู้วิจัยพบว่าจำนวนจุดสอบเทียบและระยะห่างของเวลา (interval) ที่ใช้ในการถ่ายภาพตำแหน่งแสงสะท้อนจริงจากการสอบเทียบแต่ละจุดสอบเทียบที่ทำให้การปรับแก้ความผิดพลาดในการสะท้อนแสงด้วยวิธีการสอบเทียบนี้มีประสิทธิภาพสูงที่สุดคือทำการสอบเทียบทุกๆ 60 นาทีเป็นจำนวน 40 จุดสอบเทียบ จากการจำลองผลการปรับแก้ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์พบว่าหลังจากทำการสอบเทียบผ่านไป 4 วันค่า  $R_{ext}$  จะมีค่าเสถียร สำหรับทุกๆ ระยะห่างของเวลา (interval) ที่ใช้ในถ่ายภาพตำแหน่งแสงสะท้อนจริงการสอบเทียบแต่ละจุด (5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50, 55, 60, 120, 180 และ 240 นาที) และเมื่อทำการจำลองการปรับแก้จะพบว่าระยะห่างของเวลา (interval) ที่ใช้ในการถ่ายภาพเท่ากับ 60 นาทีและจำนวนจุดสอบเทียบเท่ากับ 40 จุดสอบเทียบจะทำให้การปรับแก้ความผิดพลาดในการสะท้อนแสงของเฮลิโอสแตทต้นทุ่นต่ำมีประสิทธิภาพสูงที่สุด

## 6.2 ข้อเสนอแนะ

1. การหาค่าขอบเขต (limit) และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD) ที่ใช้ในการกำหนดค่าความคลาดเคลื่อนต่างๆ สำหรับการจำลองการสอบเทียบและการปรับแก้ความผิดพลาดในการสะท้อนแสงของเฮลิโอสแตทต้นทุ่นต่ำ ค่าขอบเขต (limit) และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD) ที่ใช้ในการกำหนดค่าความคลาดเคลื่อนต่างๆ สำหรับการจำลองในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้มาจากค่าความผิดพลาดที่ยอมรับได้ของระบบตัวรับแสงส่วนกลางที่โครงการศึกษา ออกแบบ และสร้างต้นแบบเตาเผาสุริยะอุณหภูมิสูงสนใจ การเพิ่มความน่าเชื่อถือของการกำหนดค่าความคลาดเคลื่อนต่างๆ สำหรับการจำลองสามารถทำได้ด้วยการวัดค่าความคลาดเคลื่อนต่างๆ ที่เกิดขึ้นจริงอย่างน้อย 50

ค่า เพื่อนำข้อมูลเหล่านี้มาหาค่าขอบเขต (limit) และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD) ที่ใช้ในการกำหนดค่าความคลาดเคลื่อนต่างๆ (ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้วัดค่าความคลาดเคลื่อนต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับเฮลิโอสแตทต้นทุนต่ำเนื่องจากการผลิตและการติดตั้งอย่างละ 10 ครั้ง)

2. การลดความผิดพลาดในการสอบเทียบด้วยการแก้ไขความบิดเบี้ยว (distortion) ของภาพถ่ายก่อนการคำนวณหาตำแหน่งแสงสะท้อนจริงของการสอบเทียบบนแกนอ้างอิง การเก็บข้อมูลการสอบเทียบด้วยกล้องดิจิตอลภาพที่ถ่ายได้จะมีความบิดเบี้ยว (distortion) ซึ่งการหาตำแหน่งของแสงสะท้อนจริงของการสอบเทียบบนแกนอ้างอิงจากภาพถ่ายในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ไม่ได้ทำการแก้ไขความบิดเบี้ยว (distortion) ของภาพ ทำให้ตำแหน่งแสงสะท้อนจริงที่คำนวณได้มีความคลาดเคลื่อนไปจากความเป็นจริง การแก้ความบิดเบี้ยว (distortion) ของภาพถ่ายก่อนการคำนวณหาตำแหน่งแสงสะท้อนจริงของการสอบเทียบบนแกนอ้างอิงจะทำให้ตำแหน่งแสงสะท้อนที่คำนวณได้คลาดเคลื่อนลดลงซึ่งจะทำให้การสอบเทียบนี้มีความผิดพลาดลดลง

3. การทดสอบประสิทธิภาพของวิธีการสอบเทียบและวิธีการปรับแก้ความผิดพลาดในการสะท้อนแสงของเฮลิโอสแตทต้นทุนต่ำในสภาพแวดล้อมจริงควรทดสอบกับเฮลิโอสแตทต้นทุนต่ำมากกว่า 1 ตัวที่ติดตั้งในตำแหน่งที่แตกต่างกัน การทดสอบประสิทธิภาพของวิธีการสอบเทียบและวิธีการปรับแก้ในสภาพแวดล้อมจริงของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ทำการทดสอบกับเฮลิโอสแตทต้นทุนต่ำเพียงตัวเดียวที่ติดตั้งอยู่บนพื้นที่ทดสอบเพียงตำแหน่งเดียว หากสามารถทำการทดสอบกับเฮลิโอสแตทต้นทุนต่ำตัวอื่นๆ ที่ตำแหน่งอื่นๆ ด้วยจะทำให้ผลการทดสอบประสิทธิภาพของวิธีการสอบเทียบและวิธีการปรับแก้ในสภาพแวดล้อมจริงนี้มีความน่าเชื่อถือมากยิ่งขึ้น

4. การทดสอบผลของการปรับแก้ความผิดพลาดในการสะท้อนแสงของเฮลิโอสแตทต้นทุนต่ำในสภาพแวดล้อมจริงควรทดสอบผลการปรับแก้นี้เป็นเวลาอย่างน้อย 1 เดือน การทดสอบผลการปรับแก้ความผิดพลาดในการสะท้อนแสงของเฮลิโอสแตทต้นทุนต่ำของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ทำการทดสอบการสะท้อนแสงของเฮลิโอสแตทต้นทุนต่ำที่ไม่ได้รับการปรับแก้ 2 วัน และทดสอบการสะท้อนแสงของเฮลิโอสแตทต้นทุนต่ำที่ได้รับการปรับแก้แล้วอีก 2 วัน การเพิ่มความน่าเชื่อถือของผลการปรับแก้ความผิดพลาดในการสะท้อนแสงของเฮลิโอสแตทต้นทุนต่ำระยะเวลาที่ใช้ในการทดสอบผลการปรับแก้ไม่ควรจะไม่น้อยกว่า 1 เดือน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## รายการอ้างอิง

- [1] Kiatgamolchai, S., Chantranuwathana, S., Wongsaisuwan, M. and Smittakom, W. Design and Calibration of a Heliostat Prototype for Solar Energy Collections. In The 18th Annual Conference of Mechanical Engineering Network of Thailand, 2004.
- [2] Alpert, D.J., Houser, R.M., Hackes, A.A., Erdman, W.W. The Development of Stretched-membrane Heliostats in the United States. Solar Energy Materials, 21 (1990): 131-150.
- [3] Chen, Y.T., et al. Non-imaging, Focusing Heliostat. Solar Energy, 71 (March 2001): 155-164.
- [4] Baheti, R.S., Scott, P.F. Design of Self-Calibrating Controller for Heliostats in a Solar Power Plant. IEEE Transaction on Automatic Control, 25 (December 1980): 1091-1097.
- [5] สมชาย เกียรติกมลชัย และคณะ. โครงการการพัฒนาขั้นที่สอง-ความถูกต้อง ความแม่นยำ และการเทียบมาตรฐานของระบบเฮลิโอสแตท. กรุงเทพมหานคร: ภาควิชาฟิสิกส์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2550.
- [6] Blanco-Meriel, M., Alarcon-Padilla, D.C., Lopez-Moratalla, T., Lara-Coira, M., Computing the Solar Vector. Solar Energy, 70 (November 2000): 431-441.
- [7] วิชัย เยี่ยงวีรชน. การสำรวจรังวัด : ทฤษฎีการประยุกต์ใช้. พิมพ์ครั้งที่ 3. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2552.
- [8] สุริยา อุ่นจิตติ, สมชาย เกียรติกมลชัย, ชนัตต์ รัตนสุมาวงศ์ และ ศุภวุฒิ จันทร์พานุวัฒน์. การลดความผิดพลาดที่เกิดขึ้นจากระบบส่งกำลังของเฮลิโอสแตท. ใน การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 22, 2551





ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

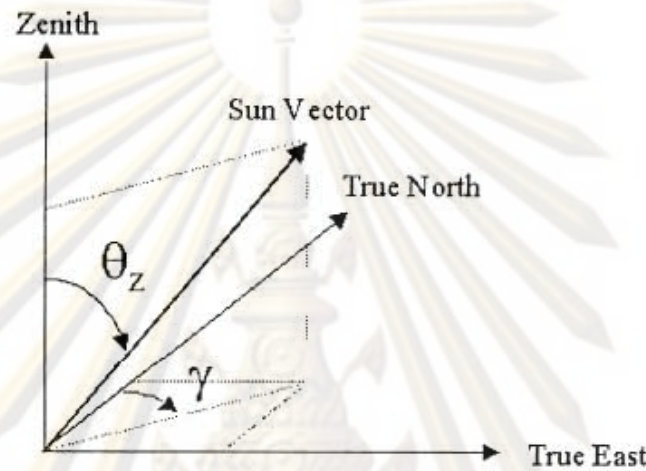


ภาคผนวก ก

# ศูนย์วิทยทรัพยากร จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## วิธีการคำนวณทิศทางของแสงอาทิตย์และโปรแกรม PSA

การคำนวณทิศทางของแสงอาทิตย์ด้วย PSA algorithm เป็นการคำนวณทิศทางเทียบกับตำแหน่งของผู้สังเกตบนผิวโลกโดยทิศทางที่คำนวณได้จะบอกอยู่ในพิกัดเชิงมุมในรูปของมุมกวาด (azimuth angle,  $\gamma$ ) และมุมก้ม (zenith angle,  $\theta_z$ ) ดังแสดงในรูปที่ ก.1



รูปที่ ก.1 ระบบพิกัดเชิงมุม (angular coordinate) สำหรับแสดงทิศทางของแสงอาทิตย์ที่คำนวณได้จาก PSA algorithm

ทิศทางของแสงอาทิตย์ที่ตำแหน่งของผู้สังเกตบนผิวโลกที่เวลาใดๆ สามารถคำนวณได้จากสมการดังต่อไปนี้ [6] (ค่าของมุมมีหน่วยเป็นเรเดียน)

$$n = jd - 2451545.0 \quad (ก.1)$$

$$\Omega = 2.1429 - 0.0010394594n \quad (ก.2)$$

$$L(\text{mean longitude}) = 4.8950630 + 0.017202791698n \quad (ก.3)$$

$$g(\text{mean anomaly}) = 6.2400600 + 0.0172019699n \quad (ก.4)$$

$$l(\text{ecliptic longitude}) = L + (0.03341607 \times \sin(g)) + (0.00034894 \times \sin(2g)) - 0.0001134 - (0.0000203 \times \sin(\Omega)) \quad (ก.5)$$

$$ep(\text{obliquity of the ecliptic}) = 0.4090928 - 6.2140 \times 10^{-9} n + 0.0000396 \times \cos(\Omega) \quad (ก.6)$$

$$ra(\text{right ascension}) = \tan^{-1} \left[ \frac{\cos(ep) \times \sin(l)}{\cos(l)} \right] \quad (ก.7)$$

$$\delta(\text{declination}) = \sin^{-1} [\sin(ep) \times \sin(l)] \quad (ก.8)$$

$$gmst = 6.6974243242 + 0.0657098283n + hour \quad (n.9)$$

$$lmst = (gmst \times 15 \times long) \times \left( \frac{\pi}{180} \right) \quad (n.10)$$

$$\varpi (\text{hour angle}) = lmst - ra \quad (n.11)$$

$$\theta_z = \cos^{-1} [\cos(\Phi) \cos(\varpi) \cos(\delta) + \sin(\delta) \sin(\Phi)] \quad (n.12)$$

$$\gamma = \tan^{-1} \left[ \frac{-\sin(\varpi)}{\tan(\delta) \cos(\Phi) - \sin(\Phi) \cos(\varpi)} \right] \quad (n.13)$$

$$Parallax = \frac{\text{Earth Mean Radius}}{\text{Astronomical Unit}} \times \sin(\theta_z) \quad (n.14)$$

$$\theta_z = \theta_z + Parallax \quad (n.15)$$

โดยที่ *Earth Mean Radius* = 6,371.01 กิโลเมตร

*Astronomical Unit* = 149,597,890 กิโลเมตร

*Jd* คือจูเลียนเดย์ (Julian day)

*hour* คือ เวลาที่สนใจแบบ Universal Time ในรูปทศนิยม

*n* คือ ผลต่างระหว่างจูเลียนเดย์ในปัจจุบันและจูเลียนเดย์เมื่อวันที่ 1 มกราคม 2000 เวลา 12:00 น.

*L* คือ Mean longitude of the Sun

*g* คือ Mean anomaly of the Sun

*l* คือ Ecliptic longitude of the Sun

*ep* คือ Obliquity of the ecliptic

*ra* คือ Right ascension

$\delta$  คือ Declination

*gmst* คือ Greenwich mean sidereal time

*lmst* คือ Long mean sidereal time

*long* คือ เส้นแวงที่ตำแหน่งของผู้สังเกตบนผิวโลก

$\Phi$  คือ เส้นรุ้งที่ตำแหน่งของผู้สังเกตบนผิวโลก

$\varpi$  คือ มุมชั่วโมง

$\theta_z$  คือ มุมกัม (zenith angle)

$\gamma$  คือ มุมกวาด (azimuth angle)

โปรแกรมสำหรับคำนวณ (m-file, Matlab)

```

1  function [dZenith, dAzimuth] = PSA_sunpos(iYear, iMonth, iDay, dHours,
2  dMinutes, dSeconds, dLongitude, dLatitude)
3
4  %definitions
5  %pi=3.14159265358979323846;
6  Rad=pi/180;
7  dEarthMeanRadius = 6371.01; % In km
8  dAstronomicalUnit = 149597890; % In km
9  %Main variables
10 dElapsedJulianDays=0;
11 dDecimalHours=0;
12 dEclipticLongitude=0;
13 dEclipticObliquity=0;
14 dRightAscension=0;
15 dDeclination=0;
16
17 %Auxiliary variables
18 dY=0;
19 dX=0;
20
21 % Calculate difference in days between the current Julian Day
22 % and JD 2451545.0, which is noon 1 January 2000 Universal Time
23 dJulianDate=0;
24 liAux1=0;
25 liAux2=0;
26 % Calculate time of the day in UT decimal hours
27 dDecimalHours = dHours + (dMinutes + dSeconds / 60.0) / 60.0;
28 % Calculate current Julian Day
29 liAux1 =(iMonth-14)/12;
30 liAux2=(1461*(iYear + 4800 + liAux1))/4 + (367*(iMonth - 2-12*liAux1))/12-...
31 (3*((iYear + 4900 + liAux1)/100))/4+iDay-32075;
32 dJulianDate=double(liAux2)-0.5+dDecimalHours/24.0;
33 % Calculate difference between current Julian Day and JD 2451545.0
34 dElapsedJulianDays = dJulianDate-2451545.0;
35
36 % Calculate ecliptic coordinates (ecliptic longitude and obliquity of the
37 % ecliptic in radians but without limiting the angle to be less than 2*Pi
38 % (i.e., the result may be greater than 2*Pi)
39
40 dMeanLongitude=0; %double
41 dMeanAnomaly=0;
42 dOmega=0;
43 dOmega=2.1429-0.0010394594*dElapsedJulianDays;
44 dMeanLongitude = 4.8950630+ 0.017202791698*dElapsedJulianDays; % Radians
45 dMeanAnomaly = 6.2400600+ 0.0172019699*dElapsedJulianDays;
46 dEclipticLongitude = dMeanLongitude + 0.03341607*sin( dMeanAnomaly ) + ...
47 0.00034894*sin( 2*dMeanAnomaly )-0.0001134 -0.0000203*sin(dOmega);
48 dEclipticObliquity = 0.4090928 - 6.2140e-9*dElapsedJulianDays +...
49 0.0000396*cos(dOmega);

```

```

47
48 % Calculate celestial coordinates ( right ascension and declination ) in radians
49 % but without limiting the angle to be less than 2*Pi (i.e., the result may be
50 % greater than 2*Pi)
51
52 dSin_EclipticLongitude=0; %double
53 dSin_EclipticLongitude= sin( dEclipticLongitude );
54 dY = cos( dEclipticObliquity ) * dSin_EclipticLongitude;
55 dX = cos( dEclipticLongitude );
56 dRightAscension = atan2( dY,dX );
57 if( dRightAscension < 0.0 )
58 dRightAscension = dRightAscension + 2*pi;
59 end
60 dDeclination = asin( sin( dEclipticObliquity )*dSin_EclipticLongitude );
61
62 % Calculate local coordinates ( azimuth and zenith angle ) in degrees
63
64 dGreenwichMeanSiderealTime=0; %all double
65 dLocalMeanSiderealTime=0;
66 dLatitudeInRadians=0;
67 dHourAngle=0;
68 dCos_Latitude=0;
69 dSin_Latitude=0;
70 dCos_HourAngle=0;
71 dParallax=0;
72 dGreenwichMeanSiderealTime = 6.6974243242 + ...
0.0657098283*dElapsedJulianDays + dDecimalHours;
73 dLocalMeanSiderealTime = (dGreenwichMeanSiderealTime*15 + dLongitude)*rad;
74 dHourAngle = dLocalMeanSiderealTime - dRightAscension;
75 dLatitudeInRadians = dLatitude*rad;
76 dCos_Latitude = cos( dLatitudeInRadians );
77 dSin_Latitude = sin( dLatitudeInRadians );
78 dCos_HourAngle= cos( dHourAngle );
79 dZenithAngle = (acos( dCos_Latitude*dCos_HourAngle*cos(dDeclination) + ...
sin( dDeclination )*dSin_Latitude));
80 dY = -sin( dHourAngle );
81 dX = tan( dDeclination )*dCos_Latitude - dSin_Latitude*dCos_HourAngle;
82 dAzimuth = atan2( dY, dX );
83 if ( dAzimuth < 0.0 )
84 dAzimuth = dAzimuth + 2*pi;
85 end
86 dAzimuth = 180-dAzimuth/rad;
87 % Parallax Correction
88 dParallax=(dEarthMeanRadius/dAstronomicalUnit)*sin(dZenithAngle);
89 dZenith=(dZenithAngle + dParallax)/rad;

```



ภาคผนวก ข

# ศูนย์วิทยทรัพยากร จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## โปรแกรมที่ใช้ในการจำลองการสอบเทียบและการปรับแก้การสะท้อนแสงของ เฮลิโอสแตทต้นทุนต่ำ

โปรแกรมที่ใช้ในการจำลองการสอบเทียบและการปรับแก้การสะท้อนแสงของเฮลิโอสแตทต้นทุนต่ำจะประกอบด้วยโปรแกรมย่อย (Function) ต่างๆ ดังต่อไปนี้

1. โปรแกรมคำนวณทิศทางของแสงอาทิตย์ (PSA\_sunpos.m) แสดงอยู่ในภาคผนวก ก
2. โปรแกรมแปลงเวกเตอร์จากพิกัดเชิงมุมเป็นพิกัดเชิงเส้น (unit\_vector\_by\_az.m) มี

รายละเอียดดังนี้ (m-file, Matlab)

```
1 function [d_az, d_az] = al_az_by_unit_vector (unit_vector)
2
3 d_az = atan2(unit_vector(2),unit_vector(1))*180/pi;
4 d_al = atan2(unit_vector(3),sqrt(unit_vector(1)^2+unit_vector(2)^2))*180/pi;
```

3. โปรแกรมหาทิศการสะท้อนแสงของกระจก (cal\_unit\_normal\_mirror.m) มี

รายละเอียดดังนี้ (m-file, Matlab)

```
1 function unit_normal_mirror=cal_unit_normal_mirror(unit_sun_vector,target_pos,helio_pos)
2 %To calculate unit normal mirror from sun and target vector.
3 %Dimension of unit normal mirror is 3x1.
4
5 target_vector=target_pos-helio_pos;
6 unit_target_vector=target_vector/sqrt(target_vector(1)^2+target_vector(2)^2+...
7 target_vector(3)^2);
8 normal_mirror=unit_sun_vector+unit_target_vector;
9 unit_normal_mirror=normal_mirror/sqrt(normal_mirror(1)^2+normal_mirror(2)^2+...
10 normal_mirror(3)^2);
```

4. โปรแกรมคำนวณตำแหน่งกึ่งกลางกระจกและทิศการวางตัวเริ่มต้นของกระจก

(transformation\_matrix.m) มีรายละเอียดดังนี้ (m-file, Matlab)

```
1 function [rotation_matrix,new_position] = transformation_matrix(l1,l2,l3,l4,l5,l6,l7,...
2 l8,l9,o1,o2,o4,o5,o6,o8,o9,o10,helio_pos)
3 %To calculate new normal mirror when the heliostat have some error such as
4 %position error, orientation error, transmission error and production error.
5 %The position error is represented by l1,l2,l3 which are the length of
6 %error in X,Y,Z direction.
7 %The orientation error is represented by o1,o2,o3 which are the angle of
8 %error around Z-axis,X-axis and Y-axis.
9 %The o7 and o11 are angles of azimuth and altitude. o7 and o8 = 0 except the
10 %production error case, the angle o7 will change for calculate the mirror position.
11 %The production error is represented by o4,o5,o6,l4,l5,l6 for azimuth angle
12 %and o8,o9,o10,l8,l9,l10 for altitude angle.
```



```

12 % Distance unit is meter.Angle unit is degree.
13
14 o1=o1*pi/180;o2=o2*pi/180;o4=o4*pi/180;o5=o5*pi/180;o6=o6*pi/180;o8=o8*pi/180;
15 o9=o9*pi/180;o10=o10*pi/180;
16
17 A0 = [ 1    0    0    l1
18         0    1    0    l2
19         0    0    1    l3
20         0    0    0    1    ];
21 A1 = [ cos(o1)  -sin(o1)  0    0
22         sin(o1)  cos(o1)  0    0
23         0         0        1    0
24         0         0        0    1    ];
25 A2 = [ cos(o2)  0    sin(o2)  0
26         0        1    0    0
27        -sin(o2)  0    cos(o2)  0
28         0        0        0    1    ];
29 A3 = [ 1    0    0    l4
30         0    1    0    l5
31         0    0    1    l6
32         0    0    0    1    ];
33 A4 = [ cos(o4)  -sin(o4)  0    0
34         sin(o4)  cos(o4)  0    0
35         0        0        1    0
36         0        0        0    1    ];
37 A5 = [ cos(o5)  0    sin(o5)  0
38         0        1    0    0
39        -sin(o5)  0    cos(o5)  0
40         0        0        0    1    ];
41 A6 = [ cos(o6)  -sin(o6)  0    0
42         sin(o6)  cos(o6)  0    0
43         0        0        1    0
44         0        0        0    1    ];
45 A7 = [ 1    0    0    l7
46         0    1    0    l8
47         0    0    1    l9
48         0    0    0    1    ];
49 A8 = [ cos(o8)  -sin(o8)  0    0
50         sin(o8)  cos(o8)  0    0
51         0        0        1    0
52         0        0        0    1    ];
53 A9 = [ cos(o9)  0    sin(o9)  0
54         0        1    0    0
55        -sin(o9)  0    cos(o9)  0
56         0        0        0    1    ];
57 A10 = [ cos(o10)  0    sin(o10)  0
58          0        1    0    0
59         -sin(o10)  0    cos(o10)  0
60          0        0        0    1    ];
61
62

```

```

63 A0_10=A0*A1*A2*A3*A4*A5*A6*A7*A8*A9*A10;
64
65 new_position=[A0_10(1,4)
66               A0_10(2,4)
67               A0_10(3,4)]+helio_pos;
68 rotation_matrix=[A0_10(1,1) A0_10(1,2) A0_10(1,3)
69                  A0_10(2,1) A0_10(2,2) A0_10(2,3)
70                  A0_10(3,1) A0_10(3,2) A0_10(3,3)];

```

5. โปรแกรมคำนวณความคลาดเคลื่อนจากระบบขับเคลื่อน (transmission\_error.m) มี

รายละเอียดดังนี้ (m-file, Mallab)

```

1 function actual_output=transmission_error(ideal_output,phase_shift)
2
3 % To calculate the error angle of gear that use in heliostat. If the
4 % reflection do not have error of transmission the amplitude of big wave and
5 % small wave will equal zero.
6 % The unit of phase shift are degree.
7
8 actual_output=ideal_output+((0.065*sin((ideal_output+phase_shift)*pi/180))+...
(0.025*sin(100*((ideal_output+phase_shift)*pi/180))));

```

6. โปรแกรมการสะท้อนแสง (reflection.m) มีรายละเอียดดังนี้ (m-file, Matlab)

```

1 function [Xtarget,Ytarget,Ztarget]=reflection(unit_sun_vector,unit_normal_mirror,...
helio_pos,target_pos)
2
3 PTactual=(2*dot(unit_sun_vector,unit_normal_mirror)*unit_normal_mirror)-...
unit_sun_vector;
4 PT=target_pos-helio_pos;
5 A=[PTactual(1) 1 0
6    PTactual(2) 0 0
7    PTactual(3) 0 1];
8 %target point on receiver, npvt=inv(A)*PT = [L;-X;-Z]
9 nptv=inv(A)*PT;
10 vectorA=target_pos-(nptv(2)*[1;0;0])-(nptv(3)*[0;0;1]);
11 Xtarget=vectorA(1);
12 Ytarget=vectorA(2);
13 Ztarget=vectorA(3);

```

7. โปรแกรมจำลองการสะท้อนแสงตลอดทั้งปี (test\_compensation\_one\_year.m) มี

รายละเอียดดังนี้ (m-file, Matlab)

```

Function [average_point,set_actual] = test_compensation_one_year(az1_year_test,...
al1_year_test,Hx2_year_test,Hy2_year_test,Hz2_year_test,az3_year_test,...
al3_year_test,ampA4_year_test,ampB4_year_test,phaseshift_az4_year_test,...
1 phaseshift_al4_year_test,az4_year_test,al4_year_test,Hx_d5_year_test,...
Hy_d5_year_test,Hz_d5_year_test,az_d5_year_test,al_d5_year_test,...
Hx_u5_year_test,Hy_u5_year_test,Hz_u5_year_test,az_u5_year_test,...
al_u5_year_test,test_helio,R_est)

```

```

2
3 test_target=[0 -5 10]';
4 Longitude=100+30/60; Latitude=13+45/60;
5 test_year=2009;
6 test_month=1;
7 test_day=1;
8 test_hour=2;
9 test_minute=0;
10 test_sec=0;
11 set_result=[];
12 set_actual=[];
13 counter=1;
14 % figure
15 % hold on
16 while test_year ~= 2010
17     % ----- before compensation -----
18     [als,azs] = PSA_sunpos(test_year,test_month,test_day,test_hour,test_minute,...
19 test_sec,Longitude,Latitude);
19     i_sun = unit_vector_by_al_az(als,azs);
20     a_sun = unit_vector_by_al_az(als+al1_year_test(counter),azs+az1_year_test(counter));
21     % ----- design mirror (d_mirror) -----
22     d_mirror = cal_unit_normal_mirror(i_sun,test_target,test_helio);
23     % -----
24     % ---- ideal and actual by heliostat's base location (d_helio to d_helio2) ----
25     [no_use,test_helio2] = transformation_matrix(Hx2_year_test,Hy2_year_test,...
26 Hz2_year_test,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,test_helio);
27     % -----
28     % ----- initial mirror direction error -----
29     [rotation3,no_use] = transformation_matrix(0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,az3_year_test,...
30 al3_year_test,0,0,0,0,0,0,[0;0;0]);
31     d_mirror3 = rotation3*d_mirror;
32     % ----- construction error (d_helio2 to d_helio5) (d_mirror3 to d_mirror5) -----
33     [rotation5,test_helio5] = transformation_matrix(0,0,0,Hx_d5_year_test,...
34 Hy_d5_year_test,Hz_d5_year_test,Hx_u5_year_test,Hy_u5_year_test,...
35 Hz_u5_year_test,0,0,az_d5_year_test,al_d5_year_test,0,az_u5_year_test,...
36 al_u5_year_test,0,test_helio2);
37     d_mirror5 = rotation5*d_mirror3;
38     % ----- transmission error (d_mirror5 to a_mirror) -----
39     d_az = atan2(d_mirror5(2),d_mirror5(1))*180/pi;
40     d_al = atan2(d_mirror5(3),sqrt(d_mirror5(1)^2+d_mirror5(2)^2))*180/pi;
41     a_az = transmission_error(d_az,phaseshift_az4_year_test);
42     a_al = transmission_error(d_al,phaseshift_al4_year_test);
43     a_az = a_az+az4_year_test(counter);
44     a_al = a_al+al4_year_test(counter);
45     a_mirror = unit_vector_by_al_az(a_al,a_az);
46     % ----- construction error (d_helio2 to a_helio) -----
47     a_helio = ([ cos(a_az)  -sin(a_az)  0
48                 sin(a_az)  cos(a_az)  0
49                 0  0  1 ]*(test_helio5-test_helio2))+test_helio2;
50     % ----- reflection -----

```

```

48 [Xtarget,Ytarget,Ztarget]=reflection(a_sun,a_mirror,a_helio,test_target);
49 % plot(Xtarget,Ztarget,'r');
50 before_result = comp_result(test_target,[Xtarget;Ytarget;Ztarget]);
51 % -----
52
53
54 % ----- after compensation -----
55 % ----- ideal and actual sun's position (i_sun to a_sun) -----
56 [als,azs] = PSA_sunpos(test_year,test_month,test_day,test_hour,test_minute,...
test_sec,Longitude,Latitude);
57 i_sun = unit_vector_by_al_az(als,azs);
58 a_sun = unit_vector_by_al_az(als+al1_year_test(counter),azs+az1_year_test(counter));
59 % -----
60 % ----- design mirror (d_mirror) -----
61 d_mirror = cal_unit_normal_mirror(i_sun,test_target,test_helio);
62 % ----- compensation comp_mirror = R_est*d_mirror -----
63 comp_mirror = inv(R_est)*d_mirror;
64 % -----
65 % ---- ideal and actual by heliostat's base location (d_helio to d_helio2) ----
66 [no_use,test_helio2] = transformation_matrix(Hx2_year_test,Hy2_year_test,...
Hz2_year_test,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,test_helio);
67 % -----
68 % ----- initial mirror direction error -----
69 [rotation3,no_use] = transformation_matrix(0,0,0,0,0,0,0,0,az3_year_test,...
al3_year_test,0,0,0,0,0,0,[0;0;0]);
70 d_mirror3 = rotation3*comp_mirror;
71 % -----
72 % ----- construction error (d_helio2 to d_helio5) (d_mirror3 to d_mirror5) -----
[rotation5,test_helio5] = transformation_matrix(0,0,0,Hx_d5_year_test,...
Hy_d5_year_test,Hx_u5_year_test,Hy_u5_year_test,...
Hz_u5_year_test,0,0,az_d5_year_test,al_d5_year_test,0,az_u5_year_test,...
al_u5_year_test,0,test_helio2);
73
74 d_mirror5 = rotation5*d_mirror3;
75 % ----- transmission error (d_mirror5 to a_mirror) -----
76 d_az = atan2(d_mirror5(2),d_mirror5(1))*180/pi;
77 d_al = atan2(d_mirror5(3),sqrt(d_mirror5(1)^2+d_mirror5(2)^2))*180/pi;
78 a_az = transmission_error(d_az,phaseshift_az4_year_test);
79 a_al = transmission_error(d_al,phaseshift_al4_year_test);
80 a_az = a_az+az4_year_test(counter);
81 a_al = a_al+al4_year_test(counter);
82 a_mirror = unit_vector_by_al_az(a_al,a_az);
83 % ----- construction error (d_helio2 to a_helio) -----
84 a_helio = ([ cos(a_az) -sin(a_az) 0
85 sin(a_az) cos(a_az) 0
86 0 0 1 ]*(test_helio5-test_helio2))+test_helio2;
87 % ----- reflection -----
88 [aXtarget,aYtarget,aZtarget]=reflection(a_sun,a_mirror,a_helio,test_target);
89 set_actual = [set_actual
90 Xtarget Ztarget aXtarget aZtarget];
91 % plot(aXtarget,aZtarget,'r');
92 after_result = comp_result(test_target,[aXtarget;aYtarget;aZtarget]);
93 set_result = [set_result

```

```

94         before_result after_result];
95     test_minute = test_minute+20;
96     if test_minute == 60
97         test_minute = 0;
98         test_hour = test_hour+1;
99         if test_hour == 10
100            test_hour = 2;
101            test_day = test_day+1;
102            if test_day == 31
103                test_day = 1;
104                test_month = test_month+1;
105                if test_month == 13
106                    test_year = test_year+1;
107                end
108            end
109        end
110    end
111    counter=counter+1;
112 end
113 % plot (-10,10,'bo');
114 % hold off
115 average_point = [mean(set_result(:,1)) mean(set_result(:,2))];

```

โปรแกรมจำลองการสอบเทียบและการปรับแก้ความผิดพลาดในการสะท้อนแสงของเฮลิโอสแตท

ต้นทนต์ามีรายละเอียดดังนี้ (m-file, Matlab)

```

1  clear all;
2  clc;
3  for n_round=1:1
4      load(strcat('C:\MATLAB701\work\test20090412\...
5          random_data\data',num2str(n_round),'.mat'))
6      Longitude=100+30/60; Latitude=13+45/60;
7      % ----- target_pos [3x16] -----
8      target_pos=[-9.4  25  0.4
9          -9.4  25  0.8
10         -9.4  25  1.6
11         -9.8  25  0.4
12         -9.8  25  0.8
13         -9.8  25  1.2
14         -9.8  25  1.6
15         -10.2 25  0.4
16         -10.2 25  0.8
17         -10.2 25  1.2
18         -10.2 25  1.6
19         -10.6 25  0.4
20         -10.6 25  0.8
21         -10.6 25  1.2
22         -10.6 25  1.6]';
23     d_helio = [-10 0 0.35

```



```

72     a_al = transmission_error(d_al,phaseshift_al4);
73     a_mirror = unit_vector_by_al_az (a_al+al4(counter),a_az+az4(counter));
74     % ----- construction error (d_helio5 to a_helio) -----
75     a_helio = ([ cos(a_az)  -sin(a_az)    0
76                sin(a_az)  cos(a_az)    0
77                0         0         1 ]*(d_helio5-d_helio2))+d_helio2;
78     % ----- reflection -----
79     [Xtarget,Ytarget,Ztarget]=reflection(a_sun,a_mirror,a_helio,target_pos(:,j));
80     Xtarget = Xtarget+digital_error(counter,1);
81     Ztarget = Ztarget+digital_error(counter,2);
82     %     set_a_reflected = [set_a_reflected
83     %                         [Xtarget Ytarget Ztarget]];
84     % ----- find mirror direction from P',H,s (c_mirror) -----
85     c_mirror = cal_unit_normal_mirror(i_sun,[Xtarget;Ytarget;Ztarget],d_helio(:,h));
86     set_c_mirror = [set_c_mirror c_mirror];
87     if counter <= 3
88         if counter == 3
89             % ----- estimated R when n == 3 -----
90             R_est_old = (set_c_mirror*set_d_mirror)*inv(set_d_mirror*set_d_mirror');
91             % -----
92             % ----- test compensation -----
93             average_point =test_compensation_one_year(az1_year,al1_year,...
Hx2,Hy2,Hz2,az3,al3,ampA4,ampB4,phaseshift_az4,phaseshift_al4,az4_year,...
al4_year,Hx_d5,Hy_d5,Hz_u5,az_d5,al_d5,Hx_u5,Hy_u5,Hz_u5,az_u5,al_u5,...
d_helio(:,h),R_est_old);
94             set_average_point = [set_average_point
95                                 average_point   ];
96             % -----
97         end
98         counter = counter+1;
99         j = j+1;
100        if interval(i) > 60
101            k = interval(i)/60;
102            hour = hour+k;
103            if hour > 10
104                hour = 2;
105                day = day+1;
106            end
107        else
108            minute = minute+interval(i);
109            if minute >= 60
110                hour = hour+floor(minute/60);
111                minute = mod(minute,60);
112                if hour > 10
113                    hour = 2;
114                    day = day+1;
115                end
116            end
117        end
118    else
119        % ----- estimated R when n > 3 -----
120        %     SET_d_mirror = [SET_d_mirror set_d_mirror [0;0;0]];

```

```

121     %       SET_c_mirror = [SET_c_mirror set_c_mirror [0;0;0]];
122     R_est_new = (set_c_mirror*set_d_mirror)*inv(set_d_mirror*set_d_mirror');
123     convert_R_est = norm_matrix(R_est_new,R_est_old);
124     set_convert_R = [set_convert_R
125                     convert_R_est];
126     R_est_old = R_est_new;
127     % -----
128     % ----- test compensation -----
129     average_point = test_compensation_one_year(az1_year,al1_year,...
Hx2,Hy2,Hz2,az3,al3,ampA4,ampB4,phaseshift_az4,phaseshift_al4,az4_year,...
al4_year,Hx_d5,Hy_d5,Hz_u5,az_d5,al_d5,Hx_u5,Hy_u5,Hz_u5,az_u5,al_u5,...
d_helio(:,h),R_est_old);
130     set_average_point = [set_average_point
131                         average_point   ];
132     % -----
133     counter = counter+1;
134     j = j+1;
135     if interval(i) > 60
136         k = interval(i)/60;
137         hour = hour+k;
138         if hour > 10
139             hour = 2;
140             day = day+1;
141         end
142     else
143         minute = minute+interval(i);
144         if minute >= 60
145             minute = mod(minute,60);
146             hour = hour+1;
147             if hour == 11
148                 hour = 2;
149                 day = day+1;
150             end
151         end
152     end
153     if j == 17
154         j = 1;
155     end
156     end
157     end
158     data_plot = [data_plot
159                 set_convert_R
160                 11111];
161     set_average_point=[set_average_point
162                       22222 33333];
163     save(strcat('C:\MATLAB701\work\test20090412\...',
result_data,result_h',num2str((h)),'_',num2str(interval(i)),'.mat'));
164     i
165     end
166     end
167     end

```





ภาคผนวก ค

# ศูนย์วิทยทรัพยากร จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## โปรแกรมที่ใช้สอบเทียบและปรับแก้การสะท้อนแสงของเฮลิโอสแตทต้นทุนต่ำใน สภาพแวดล้อมจริง

การทดสอบวิธีการสอบเทียบและวิธีการปรับแก้ความผิดพลาดในการสะท้อนแสงของเฮลิโอสแตทต้นทุนต่ำในสภาพแวดล้อมจริงใช้โปรแกรมย่อย (function) ต่างๆ ในการควบคุมการทำงานของเฮลิโอสแตทต้นทุนต่ำและการคำนวณหาตำแหน่งแสงสะท้อนจริงจากภาพถ่ายและรวมทั้งโปรแกรมย่อยที่ใช้ในการคำนวณทิศการสะท้อนแสงของกระจกที่ได้กล่าวถึงในภาคผนวก ข มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1. โปรแกรมควบคุมการหมุนของมอเตอร์ (motor\_control.m) มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

(m-file, Matlab)

```

1 function [c_step_al, c_step_az] = motor_control(o_step_al, o_step_az, d_al, d_az)
2
3 % digital io
4 dio = digitalio('nidaq','Dev1');
5 hline = addline(dio,0:7,'out');
6
7 sign_al = 1;
8 sign_az = -1;
9
10 if d_al < 0
11     sign_al = -1;
12 end
13 if d_az < 0
14     sign_az = 1;
15 end
16
17 num_step_al = round(abs(d_al*20000/360));
18 num_step_az = round(abs(d_az*20000/360));
19 num_step = max([num_step_al num_step_az]);
20
21 for i=1:num_step+1
22     if i-1 == num_step_al
23         c_step_al = o_step_al;
24         o_step_al = [0 0 0 0];
25     else
26         o_step_al = circshift(o_step_al,[0,sign_al]);
27     end
28     if i-1 == num_step_az
29         c_step_az = o_step_az;
30         o_step_az = [0 0 0 0];
31     else
32         o_step_az = circshift(o_step_az,[0,sign_az]);

```

```

33 end
34 pval = [o_step_az o_step_al];
35 putvalue(dio,pval);
36 start(dio);
37 stop(dio);
38 for delay_1=1:500000
39     nouse=3*delay_1;
40 end
41 end

```

2. โปรแกรมคำนวณหาตำแหน่งแสงสะท้อนจริงจากภาพถ่าย (world\_mapping.m) ซึ่งประกอบด้วยโปรแกรมย่อย (function) ดังนี้

2.1 โปรแกรมหาบริเวณที่ตำแหน่งแสงสะท้อนตกกระทบเทียบกับฉากสอบเทียบ (portion\_detector.m) มีรายละเอียดดังนี้ (m-file, Matlab)

```

1 function [top_left,top_right,bottom_left,bottom_right] = portion_detector (o_pos,...
   calibrate_screen)
2
3 rotate_90 = [0 1;-1 0];
4
5 i=1;
6 correct=0;
7 while correct==0
8     if mod(i,6)==0
9         i=i+1;
10    end
11    top_left=i;
12    top_right=i+1;
13    bottom_left=i+6;
14    bottom_right=i+7;
15    pos_ang = [top_left top_right bottom_right bottom_left top_left];
16    j=1;
17    po_dot_pv=1;
18    while po_dot_pv >= 0 && j<5
19        po = [o_pos(1)- calibrate_screen(pos_ang(j),5) o_pos(2)- ...
   calibrate_screen(pos_ang(j),6)];
20        pv = [calibrate_screen(pos_ang(j+1),5)-...
   calibrate_screen(pos_ang(j),5) calibrate_screen(pos_ang(j+1),6)-...
   calibrate_screen(pos_ang(j),6)]*rotate_90;
21        po_dot_pv = dot(po,pv);
22        j=j+1;
23    end
24    if j==5
25        correct=1;
26    end
27    i=i+1;
28 end
29 % hold on
30 % plot(o_pos(1),o_pos(2),'r','MarkerSize',20);

```

```

31 % axis ij; axis image; axis normal;
32 % hold off

```

2.2 โปรแกรมหาตำแหน่งแสงสะท้อนจริงจากภาพพิกัดพิกเซลเป็นพิกัดเชิงเส้นเทียบกับแกนอ้างอิงที่จุดกึ่งกลางกระจก (convert\_pixel2real.m) มีรายละเอียดดังนี้ (m-file, Matlab)

```

1 function [world_pos] = convert_pixel2real (pixel_pos,tl,tr,bl,br)
2
3 e = br(6)-bl(6)-tr(6)+tl(6);
4 g = bl(6)-tl(6);
5 h = tl(5)-pixel_pos(1);
6 k = tr(5)-tl(5);
7 m = pixel_pos(2)-tl(6);
8 n = tr(6)-tl(6);
9 r = bl(5)-tl(5);
10 t = br(5)-bl(5)-tr(5)+tl(5);
11
12 a = (e*k)-(n*t);
13 b = (g*k)+(h*e)+(m*t)-(n*r);
14 c = (h*g)+(m*r);
15
16 coe = [a b c];
17
18 aaa = roots(coe);
19 if aaa(1)>0 && aaa(1) <= 1
20     alfa = aaa(1);
21 else
22     alfa = aaa(2);
23 end
24 beta = (m-(alfa*n))/(g+(alfa*e));
25
26 % at world frame
27
28 Aw = [tl(2) tl(4)] + (alfa*([tr(2) tr(4)]-[tl(2) tl(4)]));
29 Bw = [bl(2) bl(4)] + (alfa*([br(2) br(4)]-[bl(2) bl(4)]));
30 world_pos = Aw + (beta*(Bw-Aw));

```

โปรแกรมคำนวณหาตำแหน่งแสงสะท้อนจริงจากภาพถ่าย (world\_mapping.m) มีรายละเอียดดังนี้ (m-file, Matlab)

```

1 function world_pos3D = world_mapping (t_point)
2
3 t_calibrate_point = [1 -1 6 3.1 153 69
4 2 -6 6 3.1 217 69
5 3 -2 6 3.1 280 68
6 4 .2 6 3.1 345 67
7 5 .6 6 3.1 409 67
8 6 1 6 3.1 473 66
9

```

```

10         7 -1 6 2.7 148 125
11         8 -6 6 2.7 214 124
12         9 -2 6 2.7 279 124
13        10 .2 6 2.7 346 123
14        11 .6 6 2.7 411 122
15        12 1 6 2.7 478 121
16
17        13 -1 6 2.3 143 182
18        14 -.6 6 2.3 210 181
19        15 -.2 6 2.3 278 181
20        16 .2 6 2.3 346 181
21        17 .6 6 2.3 414 181
22        18 1 6 2.3 483 181
23
24        19 -1 6 1.9 138 246
25        20 -.6 6 1.9 207 246
26        21 -.2 6 1.9 277 245
27        22 .2 6 1.9 347 245
28        23 .6 6 1.9 416 244
29        24 1 6 1.9 488 244
30
31        25 -1 6 1.5 132 312
32        26 -.6 6 1.5 204 312
33        27 -.2 6 1.5 275 312
34        28 .2 6 1.5 347 312
35        29 .6 6 1.5 419 312
36        30 1 6 1.5 494 312
37
38        31 -1 6 1.1 126 383
39        32 -.6 6 1.1 200 383
40        33 -.2 6 1.1 274 383
41        34 .2 6 1.1 348 382
42        35 .6 6 1.1 422 382
43        36 1 6 1.1 499 382];
44
45 [tl,tr,bl,br] = portion_detector (t_point,t_calibrate_point);
46 [world_pos2D] = convert_pixel2real (t_point,t_calibrate_point(tl,:),t_calibrate_point(tr,:),...
47 t_calibrate_point(bl,:),t_calibrate_point(br,:));
48 o1 = -8.7418*pi/180;
49 A1 = [ cos(o1) -sin(o1) 0
50       sin(o1)  cos(o1) 0
51       0 0 1];
52 world_pos3D = A1*[world_pos2D(1) 6 world_pos2D(2)];

```

### 3. โปรแกรมการควบคุมการทำงานของเฮลิโอสแตตต้นทุนต่ำเพื่อใช้ในการทดสอบการ

สอบเทียบและการปรับแก้ (calibration\_program.m,compensation\_program.m) มีรายละเอียด

ดังต่อไปนี้

3.1. โปรแกรมการสอบเทียบ (calibration\_program.m) มีรายละเอียดดังต่อไปนี้ (m-file,

Matlab)

```

1 clear all
2 close all
3 clc
4
5 load('C:\MATLAB\R2008a\work\test20090608\picture_backup1\pic0_0.mat',...
6 'counter','i','i_mirror_al','i_mirror_az','step_al','step_az');
7
8 num_calibration = 388;% every hour (9.00-17.00) for 4 day
9 start_time = 9;
10 stop_time = 17;
11 interval = 5;
12 before_cap = 2;
13
14 longitude = 100.5319; latitude = 13.7411;
15 i_helio = [0 0 0.4];
16
17 % field rotate
18 o1=-8.7418*pi/180;
19 A1 = [ cos(o1) -sin(o1) 0
20        sin(o1)  cos(o1) 0
21         0      0      1];
22
23 calibration_point = [-.6 6 2.7
24                    -.2 6 2.7
25                    .2 6 2.7
26                    .6 6 2.7
27                    -.6 6 2.3
28                    -.2 6 2.3
29                    .2 6 2.3
30                    .6 6 2.3
31                    -.6 6 1.9
32                    -.2 6 1.9
33                    .2 6 1.9
34                    .6 6 1.9
35                    -.6 6 1.5
36                    -.2 6 1.5
37                    .2 6 1.5
38                    .6 6 1.5];
39
40 calibration_point = A1*calibration_point ;
41
42 % video input
43 vid = videoinput('winvideo', 1, 'RGB24_640x480');
44 preview(vid);
45
46 cal_time = clock;
47
48 for counter=counter+1:num_calibration

```

```

48 while mod (cal_time(5),interval)-(interval-before_cap) ~= 0
49     cal_time = clock
50 end
51 while (cal_time(4) <= (start_time-1)) || (cal_time(4) >= stop_time)
52     cal_time = clock
53     if cal_time(4) == (start_time-1) && cal_time(5) == 58
54         cal_time(4) = start_time;
55         cal_time(5) = -before_cap
56     end
57 end
58
59 year = cal_time(1);
60 month = cal_time(2);
61 day = cal_time(3);
62 hour = cal_time(4)-7;
63 minute = cal_time(5)+before_cap;
64 second = cal_time(6);
65
66 if mod (minute,interval) == 0
67     i = i+1;
68 end
69 if i == 17
70     i = 1;
71 end
72 if counter == 1
73     i = 1;
74 end
75
76 [sun_al, sun_az] = PSA_sunpos(year, month, day, hour, minute, second,...
longitude, latitude);
77 i_sun = unit_vector_by_al_az (sun_al,sun_az);
78 i_mirror = cal_unit_normal_mirror(i_sun,calibration_point(:,i),i_helio);
79 [c_mirror_al, c_mirror_az] = al_az_by_unit_vector (i_mirror)
80 delta_al = c_mirror_al - i_mirror_al
81 delta_az = c_mirror_az - i_mirror_az
82 i_mirror_al = c_mirror_al;
83 i_mirror_az = c_mirror_az;
84 % motor control
85 [step_al, step_az] = motor_control(step_al, step_az, delta_al, delta_az);
86 % capture
87 while mod (cal_time(5),interval) ~= 0
88     cal_time = clock
89     end
90     data = getsnapshot(vid);
91     save(strcat('C:\MATLAB\R2008a\work\test20090608\picture_backup\pic',...
num2str(counter),'_',num2str(i),'.mat'),'data','hour','minute','second','cal_time',...
'i_mirror_al','i_mirror_az','i','counter','step_al','step_az');
92     if cal_time(4) == stop_time
93         % End day : return to al=0 az=0
94         delta_al = -i_mirror_al;
95         delta_az = -i_mirror_az;
96         [step_al, step_az] = motor_control(step_al, step_az, delta_al, delta_az);

```

```

97     i_mirror_al = 0;
98     i_mirror_az = 0;
99     save(strcat('C:\MATLAB\R2008a\work\test20090608\picture_backup1\...
pic0_0.mat'),'counter','i','i_mirror_al','i_mirror_az','step_al','step_az');
100    end
101    end
102    delta_al = -i_mirror_al;
103    delta_az = -i_mirror_az;
104    [step_al, step_az] = motor_control(step_al, step_az, delta_al, delta_az);
105    i_mirror_al = 0;
106    i_mirror_az = 0;
107    step_al = [0 0 0 1];
108    step_az = [0 0 0 1];
109    i = 1;
110    counter = 0;
111    save(strcat('C:\MATLAB\R2008a\work\test20090608\picture_backup1\...
pic0_0.mat'),'counter','i','i_mirror_al','i_mirror_az','step_al','step_az');

```

3.2. โปรแกรมการปรับแก้ (compensation\_program.m) มีรายละเอียดดังต่อไปนี้ (m-

file, Matlab)

```

1  clear all
2  close all
3  clc
4
5  load('C:\MATLAB\R2008a\work\test20090620\withoutcalibration\pic0.mat','counter',...
'i_mirror_al','i_mirror_az','step_al','step_az');
6
7  load('C:\MATLAB\R2008a\work\test20090620\com_picture\r_est.mat');
8
9  counter=145;
10
11  num_compensation = 200;
12  start_time = 9;
13  stop_time = 17;
14  interval = 5;
15  before_cap = 2;
16
17  longitude = 100.5319; latitude = 13.7411;
18  i_helio = [0 0 0.4];
19
20  % field rotate
21  o1=-8.7418*pi/180;
22  A1 = [ cos(o1) -sin(o1) 0
23        sin(o1)  cos(o1) 0
24        0      0      1];
25
26  target_point = [.2 6 2.3];
27
28  target_point = A1*target_point ;
29

```

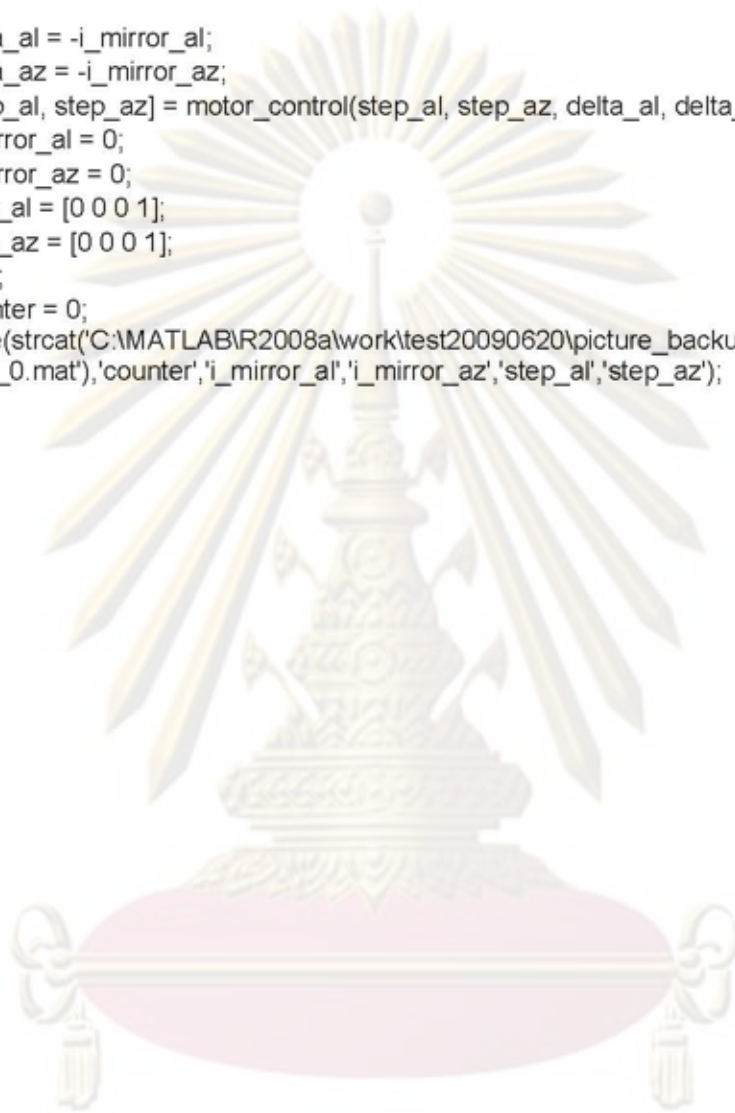


```

30 % video input
31 vid = videoinput('winvideo', 1, 'RGB24_640x480');
32 preview(vid);
33
34 cal_time = clock;
35
36 for counter=counter+1:num_compensation
37     while mod (cal_time(5),interval)-(interval-before_cap) ~= 0
38         cal_time = clock
39     end
40     while (cal_time(4) <= (start_time-1)) || (cal_time(4) >= stop_time)
41         cal_time = clock
42         if cal_time(4) == (start_time-1) && cal_time(5) == 58
43             cal_time(4) = start_time;
44             cal_time(5) = -before_cap
45         end
46     end
47
48     year = cal_time(1);
49     month = cal_time(2);
50     day = cal_time(3);
51     hour = cal_time(4)-7;
52     minute = cal_time(5)+before_cap;
53     second = cal_time(6);
54
55     [sun_al, sun_az] = PSA_sunpos(year, month, day, hour, minute, second,...
56     longitude, latitude);
57     i_sun = unit_vector_by_al_az (sun_al,sun_az);
58     i_mirror = cal_unit_normal_mirror(i_sun,target_point,i_helio);
59     com_mirror = inv(r_est)*i_mirror;
60     [c_mirror_al, c_mirror_az] = al_az_by_unit_vector (i_mirror)
61     delta_al = c_mirror_al - i_mirror_al
62     delta_az = c_mirror_az - i_mirror_az
63     i_mirror_al = c_mirror_al;
64     i_mirror_az = c_mirror_az;
65 % motor control
66 [step_al, step_az] = motor_control(step_al, step_az, delta_al, delta_az);
67 % capture
68 while mod (cal_time(5),interval) ~= 0
69     cal_time = clock
70     end
71     data = getsnapshot(vid);
72     save(strcat('C:\MATLAB\R2008a\work\test20090620\withoutcalibration\pic',...
73     num2str(counter),'.mat'),'data','hour','minute','second','cal_time','i_mirror_al',...
74     'i_mirror_az','counter','step_al','step_az');
75     if cal_time(4) == stop_time
76         % End day : return to al=0 az=0
77         delta_al = -i_mirror_al;
78         delta_az = -i_mirror_az;
79         [step_al, step_az] = motor_control(step_al, step_az, delta_al, delta_az);
80         i_mirror_al = 0;
81         i_mirror_az = 0;

```

```
79     save(strcat('C:\MATLAB\R2008a\work\test20090620\withoutcalibration\...  
pic0_1.mat'),'counter','i_mirror_al','i_mirror_az','step_al','step_az');  
80     end  
81 end  
82 delta_al = -i_mirror_al;  
83 delta_az = -i_mirror_az;  
84 [step_al, step_az] = motor_control(step_al, step_az, delta_al, delta_az);  
85 i_mirror_al = 0;  
86 i_mirror_az = 0;  
87 step_al = [0 0 0 1];  
88 step_az = [0 0 0 1];  
89 i = 1;  
90 counter = 0;  
91 save(strcat('C:\MATLAB\R2008a\work\test20090620\picture_backup1\...  
pic0_0.mat'),'counter','i_mirror_al','i_mirror_az','step_al','step_az');
```



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายพีรภัทร โอวาทชัยพงศ์ เกิดเมื่อวันที่ 10 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2525 เขตบางขุนเทียน กรุงเทพมหานคร เป็นบุตรของนายทรงพล และนางศิริกุล โอวาทชัยพงศ์ สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล จากมหาวิทยาลัยมหิดล เมื่อปีการศึกษา 2547 และได้เข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิตในปีการศึกษา 2549 ณ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยระหว่างการศึกษได้เข้าร่วมเป็นผู้ช่วยนักวิจัยโครงการศึกษา ออกแบบ และสร้างต้นแบบเตาเผาสุริยะอุณหภูมิสูงของโครงการของกรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน และได้เข้าร่วมการประชุมวิชาการ 2 งานคือการประชุมวิชาการ World Renewable Energy Congress 2009 ระหว่างวันที่ 19-22 พฤษภาคม พ.ศ.2552 ที่จัดขึ้นที่ BITEC ประเทศไทย โดยเสนอบทความในหัวข้อ Improving Targeting Accuracy of Heliostats by Installation and Construction Error Compensation และการประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 23 ระหว่างวันที่ 4-7 พฤศจิกายน พ.ศ.2552 ที่จัดขึ้นที่โรงแรมอิมพีเรียลแม่ปิ้ง จังหวัดเชียงใหม่ ประเทศไทย โดยเสนอบทความในหัวข้อการเพิ่มความแม่นยำของการสะท้อนแสงของเฮลิโอสแตทต้นทุนต่ำ (Improving Targeting Accuracy of Low-Cost Heliostats)



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย