

การออกแบบระบบขับเคลื่อนของเฮลิคอปเตอร์โดยใช้ระบบเฟือง



นายสุริยา ชุ่มจิตติ

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2551

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

DESIGN OF A GEAR DRIVE SYSTEM FOR HELIOSTATS



Mr. Suriya Ounchiti

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
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 2008


Copyright of Chulalongkorn University

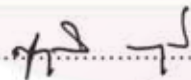
หัวข้อวิทยานิพนธ์	การออกแบบระบบขับเคลื่อนของเฮลิคอปเตอร์โดยใช้ระบบ เฟือง
โดย	นายสุรียา อุ่นจิตติ
สาขาวิชา	วิศวกรรมเครื่องกล
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศุภวดี จันทร์านุวัฒน์
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	อาจารย์ ดร.ชนัดต์ รัตนสุมาวงศ์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็น  
ส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบัณฑิต

  
..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์  
(รองศาสตราจารย์ ดร.บุญสม เลิศธีรวัจนวงศ์)


คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

  
..... ประธานกรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร.วิทยา ยงเจริญ)

  
..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศุภวดี จันทร์านุวัฒน์)

  
..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม  
(อาจารย์ ดร.ชนัดต์ รัตนสุมาวงศ์)

  
..... กรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร.รัชทิน จันทรเจริญ)

  
..... กรรมการ  
(อาจารย์ ดร.นักษิทธิ์ นุ่มวงษ์)

สุรียา อุ่นจิตติ : การออกแบบระบบขับเคลื่อนของเฮลิโอสแตทโดยใช้ระบบเฟือง.  
(DESIGN OF A GEAR DRIVE SYSTEM FOR HELIOSTATS) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์  
หลัก : ผศ.ดร.ศุภวดี จันทร์านุวัฒน์, อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม : ดร.ชนัดต์ รัตนสุมา  
วงศ์, 120 หน้า.

เฮลิโอสแตท (Heliostat) ที่ใช้ในการสะท้อนแสงอาทิตย์นั้นจำเป็นต้องมีระบบขับเคลื่อนที่มีความแม่นยำสูง วิทยานิพนธ์นี้มีเป้าหมายในการลดราคาของระบบขับเคลื่อนโดยการใช้ระบบควบคุมแบบเปิดซึ่งใช้ สเต็ปเปอร์มอเตอร์เป็นต้นกำลังเพราะไม่ต้องมีอุปกรณ์ตรวจวัดตำแหน่งที่แม่นยำให้ความแม่นยำสูงแต่ก็มีราคาสูงด้วย เพื่อคงความแม่นยำไว้จึงต้องมีวิธีการลดความผิดพลาดที่เกิดขึ้นจากระบบขับเคลื่อนของเฮลิโอสแตท วิธีที่ใช้ได้แก่ การจดจำความผิดพลาดที่วัดได้จริง, การประมาณค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นด้วยสมการคลื่นรูปไซน์ และการประมาณค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นด้วยสมการโพลิโนเมียลอันดับ 6 โดยจะนำความผิดพลาดดังกล่าวไปใช้ในการชดเชยการขับเคลื่อนภายในระบบเปิดให้มีความแม่นยำเพิ่มมากขึ้น ผลการทดลองจากวิธีการลดความผิดพลาดในการขับเคลื่อนทั้ง 3 วิธีนั้นวิธีการจดจำความผิดพลาดที่เกิดขึ้นจริงสามารถลดความผิดพลาดในรูปรากเฉลี่ยกำลังสอง(Root Mean Square, RMS) ของเฟืองฟันตรงได้จาก  $134.184 \times 10^{-3}$  องศา เหลือเพียง  $12.360 \times 10^{-3}$  องศา ลดลงถึง 9.211 เท่า ส่วนเฟืองตัวหนอนนั้นจาก  $49.085 \times 10^{-3}$  องศา เหลือเพียง  $6.653 \times 10^{-3}$  องศา ลดลงถึง 7.377 เท่า แต่วิธีแก้ไขวิธีนี้ ต้องใช้หน่วยความจำมากเนื่องจากต้องจดจำความผิดพลาดที่เกิดขึ้นจริงทุกตำแหน่งของการส่งกำลัง ส่วนวิธีการประมาณค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นด้วยสมการคลื่นรูปไซน์นั้น ในเฟืองฟันตรงสามารถลดความผิดพลาดในรูปรากเฉลี่ยกำลังสองได้เหลือ  $37.999 \times 10^{-2}$  องศา คิดเป็น 3.531 เท่าจากค่าเดิม ส่วนเฟืองตัวหนอนนั้นลดเหลือเพียง  $9.803 \times 10^{-3}$  องศา คิดเป็น 5.007 เท่าจากค่าเดิม วิธีนี้มีข้อดีคือใช้หน่วยความจำน้อยมากเพียง 1 สมการ 2 ตัวแปร เท่านั้น แต่มีข้อเสียคือต้องนำความผิดพลาดที่วัดได้มาหาจุดเริ่มต้นของความผิดพลาดก่อน ในขณะที่วิธีการประมาณค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นด้วยสมการโพลิโนเมียลอันดับ 6 ไม่จำเป็นต้องหาจุดเริ่มต้นของความผิดพลาด วิธีนี้สำหรับเฟืองฟันตรงสามารถลดความผิดพลาดในรูปรากเฉลี่ยกำลังสองเหลือ  $31.560 \times 10^{-3}$  องศา คิดเป็น 4.251 เท่าจากค่าเดิม ส่วนเฟืองตัวหนอนนั้นลดเหลือเพียง  $16.307 \times 10^{-3}$  องศา ลดลง 3.010 เท่าจากค่าเดิม การแก้ด้วยวิธีนี้ใช้หน่วยความจำเพียง 1 สมการ 6 ตัวแปรในการแทนความผิดพลาดที่เกิดขึ้นทุกตำแหน่งของการส่งกำลัง วิธีนี้เหมาะกับระบบที่มีความผิดพลาดที่เกิดขึ้นระหว่างฟันน้อยกว่าความผิดพลาดที่เกิดจากจุดหมุนเยื้องศูนย์กลางมาก ๆ

ภาควิชา.....วิศวกรรมเครื่องกล.....ลายมือชื่อนิสิต..... สุวิทย์ อุ่นจิตติ.....  
สาขาวิชา.....วิศวกรรมเครื่องกล.....ลายมือชื่ออ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก..... ๗๗ ๗๕.....  
ปีการศึกษา 2551.....ลายมือชื่ออ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม..... ๗๗๗.....

## 4870631321 : MAJOR MECHANICAL ENGINEERING

KEYWORDS : HELIOSTAT / SPUR GEAR / WORM GEAR / TRANSMISSION ERROR

SURIYA OUNCHITI : DESIGN OF A GEAR DRIVE SYSTEM FOR

HELIOSTATS. ADVISOR : SUPAVUT CHANTRANUWATHANA, Ph.D.,

CO-ADVISOR : CHANAT RATANASUMAWONG, Ph.D., 120 pp.

The heliostats must be designed to achieve a high degree of targeting accuracy. To reduce cost of heliostats, open-loop positioning system based on stepping motor and gearing are used. Although accurate encoders are not used because of their high cost, accuracy of the system may be recovered by compensating for transmission errors. In order to recover accuracy, three approaches are proposed. The first is error compensation by using actual recorded data, the second is error estimation by sine wave equation, and the last is error estimation by n-th order polynomial equation. For these approaches, transmission errors were recorded and used to compensate the input command of the stepper during actual positioning. From the first method, transmission error of the spur gear and the worm gear, based on Root Mean Square (RMS), can be reduced from  $134.184 \times 10^{-3}$  and  $49.085 \times 10^{-3}$  degree maximum to only  $12.360 \times 10^{-3}$  and  $6.653 \times 10^{-3}$  degree or 9.211 and 7.377 times in reduction, respectively. However, large amount of onboard memory is required to store the data. From the second method, transmission error of the spur gear and the worm gear, based on RMS, can be reduced to  $37.999 \times 10^{-2}$  and  $9.803 \times 10^{-3}$  degree which is equal to 3.531 and 5.007 times reduction, respectively. This method requires only a small amount of memory. A complicated calculation, however, is needed, but not for the last method. In other words, the last method used a sixth order polynomial equation to represent the data compactly. As a result, the error of the spur gear and the worm gear, based on RMS, can be reduced to  $31.560 \times 10^{-3}$  and  $16.307 \times 10^{-3}$  degree which is equal to 4.251 and 3.010 times reduction, respectively. The last method may be desirable if errors from gear tooth are small compared to eccentricity of the gear.

Department : Mechanical Engineering..

Field of Study : Mechanical Engineering..

Academic Year : 2008.....

Student's Signature *Suriya Ounchiti*

Advisor's Signature *Supat Chanth*

Co-Advisor's Signature *Chat Raj*

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ ด้วยความช่วยเหลือของผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศุภวุฒิ จันทรานุกวัฒน์ และ ดร.ชนัดต์ รัตนสุมาวงศ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ซึ่งได้สละเวลาให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นต่างๆ ทำให้ผู้วิจัยเห็นแนวทางในการทำวิทยานิพนธ์ รวมทั้งท่านยังเป็นผู้ที่คอยให้โอกาส และให้เกียรติต่อความผิดพลาดต่างๆของข้าพเจ้าที่เกิดขึ้นระหว่างทำวิทยานิพนธ์ ผู้วิจัยจึงใคร่ขอขอบพระคุณไว้ ณ ที่นี้

ขอขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ ดร.วิทยา ยงเจริญ ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ที่ได้สละเวลาตรวจสอบและให้คำแนะนำเพื่อให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น ขอขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ ดร.รัชทิน จันทรเจริญ และ ดร.นักสิทธิ์ นุ่มวงษ์ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่ได้สละเวลาตรวจสอบและให้คำแนะนำเพื่อให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น อีกทั้งให้ความเอ็นดู ความห่วงใย และให้ความช่วยเหลือในเรื่องเครื่องมือที่ใช้ในการทดลองแก่ผู้ทำวิจัยตลอดระยะเวลา 4 ปี ขอขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมชาย เกียรติกมลชัย อาจารย์ประจำภาควิชาฟิสิกส์ที่ได้สละเวลาให้คำแนะนำในการทดลองตลอดจนช่วยหาทุนในการวิจัย และขอขอบพระคุณคณาจารย์ทุกท่านในสาขาระบบควบคุม ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล ที่ได้ประสิทธิ์ประสาทความรู้พื้นฐานในวิชาทางระบบควบคุม อันเป็นพื้นฐานในการศึกษาและการทำวิทยานิพนธ์นี้

ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ที่เป็นกำลังใจและกำลังทรัพย์ตลอดเวลา รวมทั้งให้โอกาสผู้วิจัยได้ศึกษาต่อในระดับปริญญาโทมหาบัณฑิต ขอกราบขอบพระคุณลุงบุญเยี่ยม อุ่นจิตติ และน้ำ สมจิต อุ่นจิตติ ที่ให้คำแนะนำในการศึกษาและทุนการศึกษาในการเรียนทั้งในระดับปริญญาบัณฑิตและปริญญาโทมหาบัณฑิตของข้าพเจ้า

ขอขอบคุณน้อง นิภาพร เต็มแสงสิริศักดิ์ ห้องปฏิบัติการไฟไนต์เอลิเมนต์ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลที่คอยให้คำปรึกษาทางด้านทฤษฎีต่างๆ อีกทั้งยังเป็นกำลังใจและกำลังทรัพย์ในยามที่ผู้วิจัยท้อแท้

สุดท้ายนี้ขอขอบคุณเพื่อนๆรุ่นพี่ รุ่นน้องในห้องปฏิบัติการเตาเผาสุริยะอุณหภูมิต่ำ ภาควิชาฟิสิกส์และห้องปฏิบัติการหุ่นยนต์ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลที่ได้ให้กำลังใจและคำปรึกษา จนผู้วิจัยได้ทำวิทยานิพนธ์นี้สำเร็จสมบูรณ์

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฎ
สารบัญภาพ.....	ฌ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 ปัญหาและที่มาของงานวิจัย.....	2
1.3 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	3
1.4 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์.....	3
1.5 ขั้นตอนการดำเนินงาน.....	3
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
1.7 โครงสร้างของวิทยานิพนธ์.....	4
2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	6
2.1 เทคโนโลยีระบบรวมแสงอาทิตย์.....	6
2.2 ระบบรวมแสงแบบตัวรับส่วนกลาง.....	10
2.2.1 โครงการโซลาร์วันและโครงการโซลาร์ทูของกระทรวงพลังงานประเทศ สหรัฐอเมริกา .....	12
2.2.2 ห้องปฏิบัติการแห่งชาติซานเดียประเทศสหรัฐอเมริกา.....	12
2.3 ระบบรวมแสงแบบกระจกติดตามดวงอาทิตย์กับจานพาราโบลอยด์.....	13
2.3.1 เตาเผาที่ไอเอ็มพี-ซีเอ็นอาร์เอสประเทศสวิสเซอร์แลนด์.....	14

บทที่	หน้า
2.3.2	15
2.3.3	15
2.3.4	16
2.4	17
2.4.1	18
2.4.2	18
2.5	19
2.5.1	19
2.5.2	22
2.5.2.1	22
2.5.2.2	23
2.5.2.3	24
2.5.3	25
2.6	25
<b>3</b>	<b>26</b>
3.1	26
3.2	31
3.3	33
3.4	33
3.5	35
<b>4</b>	<b>37</b>
4.1	37
4.2	38
4.2.1	39
4.2.2	41
4.3	42
4.4	43
4.5	45



บทที่	หน้า
4.6 สรุปผลการจำลอง.....	47
<b>5 การทดลองลดความผิดพลาดที่เกิดจากการส่งกำลังด้วยระบบเฟืองฟันตรง และระบบเฟืองตัวหนอน.....</b>	<b>48</b>
5.1 การส่งกำลังด้วยเฟืองฟันตรง.....	48
5.1.1 ช่วงเวลาอยู่ตัวของสแต็ปเปอร์มอเตอร์.....	50
5.1.2 ความสามารถในการซ้ำที่เดิมของการส่งกำลังด้วยเฟืองฟันตรง.....	51
5.1.3 วัดความผิดพลาดที่เกิดขึ้นจากการส่งกำลังด้วยเฟืองฟันตรง.....	52
5.1.4 การประมาณค่าความผิดพลาดของเฟืองฟันตรงด้วยสมการคลื่นรูปไซน์	55
5.1.5 การประมาณค่าความผิดพลาดของเฟืองฟันตรงด้วยสมการโพลีโนเมียล	57
5.1.6 การทดลองลดความผิดพลาดของเฟืองฟันตรงโดยวิธีการจำความผิดพลาด ทุกตำแหน่งการหมุนของเฟือง.....	59
5.1.7 การทดลองลดความผิดพลาดของเฟืองฟันตรงโดยวิธีจำลองความผิดพลาด ด้วยสมการคลื่นรูปไซน์.....	60
5.1.8 การทดลองลดความผิดพลาดของเฟืองฟันตรงโดยวิธีจำลองความผิดพลาด ด้วยสมการโพลีโนเมียล.....	61
5.1.9 สรุปผลการทดลองหลังการแก้ไขความผิดพลาดของเฟืองฟันตรงทั้ง 3 วิธี	62
5.2 การวางตำแหน่งเริ่มต้นผิดพลาดในการส่งกำลังด้วยเฟืองฟันตรง.....	63
5.2.1 ทดลองวางตำแหน่งเริ่มต้นผิดพลาดในการส่งกำลังด้วยเฟืองฟันตรง.....	63
5.2.2 วิธีการแก้ไขการวางตำแหน่งเริ่มต้นของเฟืองฟันตรงผิดพลาดโดยใช้ สวิตช์แสง.....	66
5.2.3 สรุปการวางตำแหน่งเริ่มต้นผิดพลาดในการส่งกำลังด้วยเฟืองฟันตรง.....	67
5.3 การส่งกำลังด้วยเฟืองตัวหนอน	68
5.3.1 ความสามารถในการซ้ำที่เดิมของการส่งกำลังด้วยเฟืองตัวหนอน.....	70
5.3.2 วัดความผิดพลาดที่เกิดขึ้นจากการส่งกำลังด้วยเฟืองตัวหนอน.....	71
5.3.3 การประมาณค่าความผิดพลาดของเฟืองตัวหนอนด้วยสมการคลื่นรูปไซน์...	74
5.3.4 การประมาณค่าความผิดพลาดของเฟืองตัวหนอนด้วยสมการ โพลีโนเมียล.....	77
5.3.5 การทดลองลดความผิดพลาดของเฟืองตัวหนอนโดยวิธีการจำความผิดพลาด ทุกตำแหน่งการหมุน.....	79

บทที่	หน้า
5.3.6 การทดลองลดความผิดพลาดของเฟืองตัวหนอนโดยวิธีจำลองความผิดพลาดด้วยสมการคลื่นรูปไซน์.....	80
5.3.7 การทดลองลดความผิดพลาดของเฟืองตัวหนอนโดยวิธีจำลองความผิดพลาดด้วยสมการโพลีโนเมียล.....	81
5.3.8 สรุปผลการทดลองหลังการแก้ไขความผิดพลาดของเฟืองตัวหนอนทั้ง 3 วิธี.....	82
5.4 การวางตำแหน่งเริ่มต้นผิดพลาดในการส่งกำลังด้วยเฟืองตัวหนอน.....	83
5.4.1 ทดลองวางตำแหน่งเริ่มต้นผิดพลาดในการส่งกำลังด้วยเฟืองตัวหนอน.....	83
5.4.2 วิธีการแก้ไขการวางตำแหน่งเริ่มต้นของเฟืองตัวหนอนผิดพลาดโดยใช้ สวิทช์แสง.....	85
5.4.3 สรุปการวางตำแหน่งเริ่มต้นผิดพลาดในการส่งกำลังด้วยเฟืองตัวหนอน.....	86
<b>6 การจำลองการสะท้อนแสงจากเฮลิโอสแตทไปยังตัวรับส่วนกลางโดยใช้เฟืองตัวหนอนเป็นระบบส่งกำลัง.....</b>	<b>88</b>
6.1 ระบบเฮลิโอสแตทที่ทำการจำลองและตำแหน่งวางเฮลิโอสแตท.....	88
6.2 การจำลองการสะท้อนแสงจากเฮลิโอสแตทไปยังตัวรับส่วนกลาง.....	90
6.2.1 ผลการจำลองการสะท้อนแสงก่อนการแก้ไขความผิดพลาด.....	91
6.2.2 ผลการจำลองการสะท้อนแสงหลังการแก้ไขด้วยการจำทั้งหมด.....	92
6.2.3 ผลการจำลองการสะท้อนแสงหลังการแก้ไขด้วยวิธีประมาณความผิดพลาดด้วยสมการคลื่นรูปไซน์.....	92
6.2.4 ผลการจำลองการสะท้อนแสงหลังการแก้ไขด้วยวิธีประมาณความผิดพลาดด้วยสมการโพลีโนเมียล.....	93
6.3 สรุปการจำลองการสะท้อนแสง.....	94
<b>7 บทสรุปและข้อเสนอแนะ.....</b>	<b>96</b>
7.1 บทสรุป.....	96
7.2 ข้อเสนอแนะ.....	97

	หน้า
รายการอ้างอิง.....	99
ภาคผนวก.....	100
ภาคผนวก ก .....	101
โปรแกรมที่ใช้วัดความผิดพลาดที่เกิดขึ้นจากระบบส่งกำลัง.....	102
ภาคผนวก ข .....	113
โปรแกรมที่ใช้คำนวณการสะท้อนแสงจากเฮลิคอปเตอร์ไปยังตัวรับส่วนกลาง.....	114
ภาคผนวก ค .....	119
โปรแกรมที่ใช้คำนวณการเคลื่อนที่ของเฮลิคอปเตอร์ในแกนอะซิมูทและอัลติจูด..	120
ภาคผนวก ง .....	126
บทความที่ส่งเข้าร่วมการประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 22 เรื่อง การลดความผิดพลาดที่เกิดขึ้นจากระบบส่งกำลังของเฮลิคอปเตอร์.....	127
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	133


  
 ศูนย์วิทยทรัพยากร  
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
4.1	ความผิดพลาดของเฟืองเกaredต่างๆตามมาตรฐานของ AGMA.....	40
5.1	ความผิดพลาดที่เกิดขึ้นจากการวางตำแหน่งเริ่มต้นผิดพลาดในเฟืองฟันตรง.....	64
5.2	ความผิดพลาดที่เกิดขึ้นจากการวางตำแหน่งเริ่มต้นผิดพลาดในเฟืองหนอน.....	84
6.1	ผลการจำลองการสะท้อนแสง.....	95



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
2.1 เซลล์สุริยะติดบนหลังคาบ้าน.....	6
2.2 หลักการทำงานของเซลล์สุริยะ.....	7
2.3 อ่างพาราโบลิคของ Solitem Group.....	7
2.4 หลักการทำงานของอ่างพาราโบลิค.....	8
2.5 ระบบตัวรับส่วนกลางของห้องปฏิบัติการแห่งชาติซานเดีย ประเทศสหรัฐอเมริกา	9
2.6 หลักการทำงานของระบบตัวรับส่วนกลาง.....	9
2.7 แนวทางการสะท้อนแสงของระบบรวมแสงแบบตัวรับส่วนกลาง.....	10
2.8 แนวลำแสงที่สะท้อนของกระจกเงาราบ.....	11
2.9 แนวลำแสงที่สะท้อนของกระจกโค้ง.....	11
2.10 ระบบผลิตกระแสไฟฟ้าด้วยพลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์ของโครงการ โซลาร์วัน.....	12
2.11 ระบบรวมแสงแบบตัวรับส่วนกลางที่ห้องปฏิบัติการแห่งชาติซานเดีย.....	13
2.12 การวางระบบสะท้อนแสงแบบจานพาราโบลอยด์.....	14
2.13 ระบบเตาเผาสุริยะที่ไอเอ็มพี-ซีเอ็นอาร์เอสประเทศฝรั่งเศส.....	14
2.14 ระบบเตาเผาสุริยะที่สถาบันพอลเซอร์เล่อ ประเทศสวิตเซอร์แลนด์.....	15
2.15 ระบบเตาเผาสุริยะที่ห้องปฏิบัติการแห่งชาติซานเดีย.....	16
2.16 (ก) กระจกติดตามดวงอาทิตย์ซึ่งประกอบด้วยกระจกโค้งย่อยๆ และ (ข) การวางตัวเพื่อให้ได้จุดโฟกัส.....	16
2.17 แนวการสะท้อนแสงของจานพาราโบลอยด์.....	17
2.18 ระบบจานพาราโบลอยด์ติดตามดวงอาทิตย์ที่สถาบันพอลเซอร์เล่อ.....	18
2.19 จานพาราโบลอยด์ที่มหาวิทยาลัยแห่งชาติออสเตรเลีย.....	19
2.20 ระบบส่งกำลังโดยใช้มอเตอร์กระแสตรง.....	19
2.21 ส่วนประกอบเฮลิโอสแตทโครงการโซลาร์วัน.....	20
2.22 เฮลิโอสแตทของบริษัทซีเนอร์.....	20
2.23 ระบบขับเคลื่อนแกนเฮลิโอสแตทของบริษัทซีเนอร์.....	21
2.24 วงจรมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงอย่างง่าย.....	21
2.25 ชิ้นส่วนภายในของ สเต็ปเปอร์มอเตอร์.....	22

ภาพที่	หน้า	
2.26	ส่วนประกอบภายในของสเต็ปเปอร์มอเตอร์แบบแม่เหล็กถาวร.....	23
2.27	สเต็ปเปอร์มอเตอร์แบบแปรค่ารีลักแตนซ์.....	24
2.28	สเต็ปเปอร์มอเตอร์แบบผสม.....	24
3.1	แกนหมุนของโลกเอียงทำมุม 23.5 องศาับระนาบวงโคจร.....	26
3.2	การเปลี่ยนแปลงของระนาบการเคลื่อนที่ของดวงอาทิตย์.....	27
3.3	การบอกตำแหน่งของดวงอาทิตย์โดยใช้ระบบอะซิมุท-อัลติจูด.....	28
3.4	การบอกตำแหน่งดวงอาทิตย์โดยใช้ระบบศูนย์สูตร.....	29
3.5	ค่ามุมจากจุดศูนย์กลางของทรงกลมที่รับส่วนโค้ง ( $\delta$ ).....	29
3.6	การสะท้อนแสงของเฮลิโอสแตท.....	31
3.7	รูปแบบการปรับมุมกระจก.....	32
3.8	ค่ามุมต่างๆของระบบ อะซิมุท-อัลติจูด.....	33
3.9	พื้นที่วางเฮลิโอสแตทรอบตัวรับส่วนกลาง.....	34
3.10	ช่วงการเคลื่อนที่ของเฮลิโอสแตทแกนอะซิมุทรอบตัวรับส่วนกลาง.....	34
3.11	ช่วงการเคลื่อนที่ของเฮลิโอสแตทแกนอัลติจูดรอบตัวรับส่วนกลาง.....	35
4.1	การวัดความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นจากระยะห่างระหว่างพื้นที่ซบกันแบบ ต่างๆ.....	38
4.2	ความคลาดเคลื่อนของเฟืองที่เกิดขึ้นจริงเทียบกับการเคลื่อนที่ในอุดมคติ.....	39
4.3	การวางตัวและความผิดพลาดที่เกิดขึ้นจากจุดหมุนเยื้องศูนย์กลาง.....	41
4.4	ผลการจำลองความผิดพลาดที่เกิดขึ้นระหว่างฟัน.....	43
4.5	ผลการจำลองความผิดพลาดที่เกิดขึ้นจากจุดหมุนเยื้องศูนย์กลาง.....	44
4.6	ผลการจำลองความผิดพลาดรวมที่เกิดขึ้นในการส่งกำลังด้วยเฟืองฟันตรง.....	44
4.7	วิธีการลดความผิดพลาดที่เกิดขึ้นในเฟือง.....	45
4.8	ผลการจำลองความผิดพลาดหลังการแก้ไขด้วยวิธีการจำลองความผิดพลาดไว้ก่อน.....	45
4.9	ผลการจำลองความผิดพลาดหลังการแก้ไขโดยระบบมีความละเอียดในการขับ เคลื่อนขึ้นละ $3.6 \times 10^{-3}$ องศา.....	46
4.10	ความผิดพลาดรากล้อส่งกำลังสองก่อนและหลังการแก้ไขของเฟือง AGMA เบอร์ 5 - 12.....	47

ภาพที่	หน้า
5.1 ระบบทดลองวัดความผิดพลาดที่เกิดจากการส่งกำลังด้วยเฟืองฟันตรง.....	49
5.2 ระบบอ่านค่ามุมหมุน.....	50
5.3 ผลการทดลองหาช่วงเวลาอยู่ตัวของสเต็ปเปอร์มอเตอร์.....	51
5.4 ผลต่างของความผิดพลาดในรูปปรากฏเฉลี่ยกำลังสองของการขับเคลื่อนเฟืองฟันตรง 5 รอบ.....	52
5.5 ความผิดพลาดที่วัดได้จากการส่งกำลังด้วยเฟืองฟันตรง.....	52
5.6 ลากเส้นความผิดพลาดเฉลี่ย เพื่อหาตำแหน่งเริ่มต้นของความผิดพลาด.....	53
5.7 พิจารณาความผิดพลาดในช่วงเฟืองขับ 0 องศา ถึง 60 องศา.....	54
5.8 ความผิดพลาดหลังจากกำหนดตำแหน่งเริ่มต้นแล้ว.....	54
5.9 การจำลองความผิดพลาดที่เกิดจากจุดหมุนเยื้องศูนย์กลางในช่วง 0.230 - 0.115 องศา.....	55
5.10 ผลการประมาณความผิดพลาดด้วยคลื่นรูปไซน์ขนาด 0.185 องศา.....	56
5.11 ความผิดพลาดที่เกิดขึ้นระหว่างฟัน.....	56
5.12 ความผิดพลาดที่วัดได้เพื่อใช้ในการสร้างสมการโพลีโนเมียล.....	57
5.13 ความผิดพลาดที่ประมาณด้วยสมการโพลีโนเมียลอันดับ 6.....	58
5.14 ระบบควบคุมโดยลดความผิดพลาดด้วยวิธีจำลองความผิดพลาดทุกตำแหน่งการหมุน.....	59
5.15 ผลที่ได้จากการลดความผิดพลาดด้วยวิธีจำลองความผิดพลาดทุกตำแหน่งการหมุน.....	59
5.16 ระบบควบคุมโดยลดความผิดพลาดด้วยวิธีจำลองความผิดพลาดจากคลื่นรูปไซน์.....	60
5.17 ผลที่ได้จากการลดความผิดพลาดด้วยวิธีจำลองความผิดพลาดด้วยสมการคลื่นรูปไซน์.....	60
5.18 ระบบควบคุมโดยลดความผิดพลาดด้วยวิธีจำลองความผิดพลาดจากโพลีโนเมียล.....	61
5.19 ผลที่ได้จากการลดความผิดพลาดด้วยวิธีจำลองความผิดพลาดด้วยสมการโพลีโนเมียล.....	61
5.20 ผลที่ได้หลังจากลดความผิดพลาดด้วยวิธีต่างๆ.....	62
5.21 การติดตั้งเฟืองฟันตรงโดยมีตำแหน่งเริ่มต้นผิดพลาด $\pm 3.6$ องศา.....	63

ภาพที่	หน้า	
5.22	ความผิดพลาดรากเฉลี่ยกำลังสองที่เกิดขึ้นจากการวางตำแหน่งเริ่มต้น ผิดพลาดในเฟืองฟันตรง.....	65
5.23	สวิตช์แสงรุ่น H21A1.....	66
5.24	ติดตั้งระบบไฟเตือนเพื่อใช้หาตำแหน่งเริ่มต้นในการขับเคลื่อน.....	67
5.25	เฟืองตัวหนอน อัตราทด 1 ต่อ 100.....	68
5.26	อุปกรณ์ตรวจวัดมุม.....	69
5.27	ระบบที่ใช้ในการทดสอบความผิดพลาดของเฟืองตัวหนอน.....	69
5.28	ลักษณะการมัดเชือกติดมู่เส้ไว้กับสปริง.....	70
5.29	ผลต่างเฉลี่ยของความผิดพลาดที่เกิดขึ้นจากการส่งกำลัง 5 รอบ.....	71
5.30	ความผิดพลาดที่วัดได้จากการส่งกำลังด้วยเฟืองตัวหนอน อัตราทด 1 : 100.....	71
5.31	ลากเส้นความผิดพลาดเฉลี่ย เพื่อหาตำแหน่งเริ่มต้นของความผิดพลาด.....	72
5.32	พิจารณาจุดเริ่มต้นของความผิดพลาดในช่วงตำแหน่งเฟืองตามตั้งแต่ 120 องศา ถึง 180 องศา.....	73
5.33	ความผิดพลาดหลังจากกำหนดตำแหน่งเริ่มต้นแล้ว.....	73
5.34	ค่าความผิดพลาดที่เกิดจากจุดหมุนเยื้องศูนย์กลางและความผิดพลาดที่เกิดขึ้น ระหว่างฟันของการส่งกำลังด้วยเฟืองตัวหนอน.....	74
5.35	การจำลองความผิดพลาดที่เกิดขึ้นจากจุดหมุนเยื้องศูนย์กลาง.....	74
5.36	การจำลองค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นระหว่างฟันที่ขบกัน.....	75
5.37	ผลการจำลองความผิดพลาดรวมที่เกิดขึ้นจากการส่งกำลังด้วยเฟืองตัวหนอน..	75
5.38	การเปรียบเทียบความผิดพลาดที่ได้จากการทดลองและได้จากการจำลอง.....	76
5.39	การเปรียบเทียบในช่วงตำแหน่งเฟืองตาม 0 องศาถึง 60 องศา.....	76
5.40	ความผิดพลาดที่วัดได้จากการส่งกำลังด้วยเฟืองหนอนเพื่อใช้สร้างสมการ โพลีโนเมียล.....	77
5.41	ความผิดพลาดที่ประมาณด้วยสมการโพลีโนเมียลอันดับ 6.....	78
5.42	ผลต่างของความผิดพลาดจากการทดลองและจากการจำลองด้วยสมการ โพลีโนเมียล.....	78
5.43	ระบบควบคุมโดยลดความผิดพลาดด้วยวิธีจำลองความผิดพลาดทุกตำแหน่งการ หมุน.....	79



ภาพที่	หน้า
5.44 ผลที่ได้จากการลดความผิดพลาดด้วยวิธีจำลองความผิดพลาดทุกตำแหน่งการ หมุน.....	79
5.45 ระบบควบคุมโดยลดความผิดพลาดด้วยวิธีจำลองความผิดพลาดจากคลื่นรูป ไซน์.....	80
5.46 ผลที่ได้จากการลดความผิดพลาดด้วยวิธีจำลองความผิดพลาดด้วยสมการ คลื่นรูปไซน์.....	80
5.47 ระบบควบคุมโดยลดความผิดพลาดด้วยวิธีจำลองความผิดพลาดจากสมการ โพลีโนเมียล.....	81
5.48 ผลที่ได้จากการลดความผิดพลาดด้วยวิธีจำลองความผิดพลาดด้วยสมการ โพลีโนเมียล.....	81
5.49 ผลที่ได้หลังจากลดความผิดพลาดด้วยวิธีต่างๆ.....	82
5.50 การติดตั้งเฟืองเข้ากับเฮลิโอสแตทโดยมีตำแหน่งเริ่มต้นผิดพลาด $\pm 7.2$ องศา....	83
5.51 ความผิดพลาดรากเฉลี่ยกำลังสองที่เกิดขึ้นจากการวางตำแหน่งเริ่มต้นผิดพลาด ในเฟืองหนอน.....	85
5.52 ติดตั้งระบบไฟเตือนเพื่อใช้หาตำแหน่งเริ่มต้นในการขับเคลื่อน.....	86
6.1 บริเวณที่จะวางเฮลิโอสแตทโดยดูมุมการเคลื่อนที่น้อยสุดของแกนอะซิมุท.....	89
6.2 บริเวณที่จะวางเฮลิโอสแตทโดยดูมุมการเคลื่อนที่น้อยสุดของแกนอัลติจูด.....	89
6.3 ตำแหน่งวางเฮลิโอสแตทและตัวรับส่วนกลาง.....	90
6.4 ขนาดฉากรับแสง.....	90
6.5 ผลการจำลองการสะท้อนแสงที่เป็นผลมาจากความผิดพลาดก่อนการแก้ไขของ ระบบขับเคลื่อน.....	91
6.6 ผลการจำลองการสะท้อนแสงที่เป็นผลมาจากความผิดพลาดหลังการแก้ไขด้วย วิธีจำลองความผิดพลาดไว้ก่อน.....	92
6.7 ผลการจำลองการสะท้อนแสงที่เป็นผลมาจากความผิดพลาดหลังการแก้ไขด้วย วิธีประมาณความผิดพลาดด้วยสมการคลื่นรูปไซน์.....	93
6.8 ผลการจำลองการสะท้อนแสงที่เป็นผลมาจากความผิดพลาดหลังการแก้ไขด้วย วิธีประมาณความผิดพลาดด้วยสมการโพลีโนเมียล.....	94
6.9 ผลการจำลองการสะท้อนแสงที่เป็นผลมาจากสาเหตุต่างๆ.....	95

ภาพที่		หน้า
7.1	ความผิดพลาดที่วัดได้จริงเทียบกับความผิดพลาดที่คำนวณได้ของเฟืองฟันตรง	98
ก.1	หน้าต่างแรกเมื่อเริ่มใช้โปรแกรม.....	102
ก.2	หน้าต่างตั้งค่าการ์ดนับสัญญาณ.....	102
ก.3	หน้าต่างการใช้งาน.....	103
ค.1	พื้นที่วางเฮลิโอสแตทรอบตัวรับส่วนกลาง.....	120
ค.2	มุมการเคลื่อนที่ของเฮลิโอสแตทในแกนอะซิมุทเมื่อวางเฮลิโอสแตท ณ ทิศเหนือ ห่างจากตัวรับส่วนกลาง 30 เมตร.....	121
ค.3	มุมการเคลื่อนที่ของเฮลิโอสแตทในแกนอัลติจูดเมื่อวางเฮลิโอสแตท ณ ทิศเหนือ ห่างจากตัวรับส่วนกลาง 30 เมตร.....	121
ค.4	มุมการเคลื่อนที่ของเฮลิโอสแตทในแกนอะซิมุทเมื่อวางเฮลิโอสแตท ณ ทิศใต้ ห่างจากตัวรับส่วนกลาง 30 เมตร.....	122
ค.5	มุมการเคลื่อนที่ของเฮลิโอสแตทในแกนอัลติจูดเมื่อวางเฮลิโอสแตท ณ ทิศใต้ ห่างจากตัวรับส่วนกลาง 30 เมตร.....	122

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันพลังงานแสงอาทิตย์นับเป็นพลังงานทางเลือกใหม่ที่กำลังได้รับความสนใจ ด้วยเหตุผลที่ว่าพลังงานที่มาจากฟอสซิล อาทิ น้ำมันดิบ ก๊าซธรรมชาติ ถ่านหิน เป็นแหล่งพลังงานที่ไม่อาจสร้างขึ้นใหม่ได้ และด้วยอัตราการใช้พลังงานที่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องทำให้แหล่งพลังงานดังกล่าวใกล้หมดลงไปทุกขณะ การเปลี่ยนรูปแบบพลังงานแสงอาทิตย์เพื่อนำมาใช้งานนั้นมีหลายวิธีโดยวิธีที่นิยมแพร่หลายคือ การเปลี่ยนพลังงานแสงให้เป็นพลังงานไฟฟ้าหรือที่เรียกว่าเซลล์สุริยะนั่นเอง อย่างไรก็ตามก็ยังมีการเปลี่ยนพลังงานแสงไปเป็นพลังงานอีกรูปแบบหนึ่งซึ่งเริ่มเป็นที่สนใจมากขึ้นในปัจจุบันนั่นก็คือ การเปลี่ยนพลังงานแสงไปเป็นพลังงานความร้อน

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของโครงการศึกษา ออกแบบ และสร้างต้นแบบเตาเผาสุริยะอุณหภูมิสูง เนื่องมาจากประเทศไทยตั้งอยู่ในเขตร้อน มีปริมาณแสงแดดเกือบตลอดทั้งปี ซึ่งมีความเหมาะสมกับการสร้างเตาเผาสุริยะอย่างมาก ทางกรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงานจึงได้ร่วมมือกับจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยจัดตั้งโครงการดังกล่าว เพื่อศึกษาและวิจัยการนำพลังงานแสงอาทิตย์มาใช้เป็นพลังงานทดแทนต่อไปในอนาคต โดยคาดว่าจะประโยชน์อย่างยิ่งต่อภาคอุตสาหกรรมที่จำเป็นต้องใช้ปริมาณและแหล่งความร้อนสูง อีกทั้งต้องการลดการใช้พลังงานภายในประเทศ เช่น น้ำมัน ก๊าซธรรมชาติ และถ่านหิน ที่ล้วนส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมทั้งสิ้น

การสร้างเตาเผาสุริยะอุณหภูมิสูงนั้น ปัจจัยที่มีผลต่อการสร้างและออกแบบคือปริมาณพลังงานที่ต้องการ และอุณหภูมิที่ต้องการ การรวมแสงเพื่อให้เกิดปริมาณความร้อนเพียงพอต่อความต้องการนั้น จะต้องใช้กระจกสะท้อนแสงอาทิตย์ที่สามารถเคลื่อนที่ตามดวงอาทิตย์ได้ หรือเรียกว่าเฮลิโอสแตท (heliostat) โดยกระจกนี้จะทำหน้าที่สะท้อนแสงไปยังตัวรับส่วนกลาง (central receiver) เพื่อรวบรวมพลังงานจากแสงอาทิตย์ ปัจจุบันสามารถรวมพลังงานแสงได้ในระดับเมกะวัตต์ เช่นในโครงการโซลาร์วัน (solar one) และโซลาร์ทู (solar two) ของกระทรวงพลังงานประเทศสหรัฐอเมริกา แต่อุณหภูมิที่ได้จากการรวมแสงนั้นไม่สูงมากนัก ไม่เกิน 1,000 องศาเซลเซียส ส่วนระบบที่ต้องการอุณหภูมิสูงจะใช้จานพาราโบลอยด์รวมแสง ซึ่งการรวมแสงด้วยจานพาราโบลอยด์นี้ทำสถิติไว้มากกว่า 3,400 องศาเซลเซียสที่ประเทศมาเลเซีย สำหรับประเทศไทยสิ่งที่จะเป็นแนวทางที่เหมาะสมและเป็นแนวทางใหม่ของการพัฒนาเตาเผาสุริยะ คือการสร้างระบบรวมแสงที่ให้ทั้งพลังงานสูงและอุณหภูมิสูง นั้นหมายถึงระบบที่มีพื้นที่สะท้อนแสง

จำนวนมาก โดยกระจกที่ใช้สะท้อนแสงถ้าเป็นกระจกโค้งก็จะช่วยรวมแสงด้วยไปในตัวแต่จะมีต้นทุนการผลิตที่สูงกว่ากระจกแบนราบ จึงพิจารณาการใช้เฮลิโอสแตทที่ติดตั้งกระจกบานเล็กๆ เป็นตัวสะท้อนแสงไปยังระบบตัวรับส่วนกลางโดยไม่ต้องรวมแสงก่อน ซึ่งเฮลิโอสแตทชนิดนี้ต้องมีขนาดเล็กควบคุมได้ง่ายราคาถูกและมีระบบขับเคลื่อนที่มีความแม่นยำสูง

## 1.2 ปัญหาและที่มาของงานวิจัย

ในระบบเตาเผาสุริยะนั้นเฮลิโอสแตทและตัวรับส่วนกลางจะมีระยะห่างกันมาก ซึ่งมีระยะห่างตั้งแต่ 10 เมตรไปจนถึง 30 เมตร เพราะฉะนั้นตัวเฮลิโอสแตทต้องมีระบบขับเคลื่อนที่มีความแม่นยำในการเคลื่อนที่สูงมาก ไม่เช่นนั้นแล้วการสะท้อนแสงจากดวงอาทิตย์ไปยังตัวรับส่วนกลางจะมีความคลาดเคลื่อนเกิดขึ้นมากเกินไป เช่นเฮลิโอสแตทอยู่ห่างจากตัวรับส่วนกลาง 30 เมตร มีความผิดพลาดเกิดขึ้นในระบบขับเคลื่อนของเฮลิโอสแตท 0.1 องศา เมื่อเฮลิโอสแตทสะท้อนแสงจากพระอาทิตย์ไปกระทบยังตัวรับส่วนกลางจะเกิดความผิดพลาด 5.2 เซนติเมตร ความผิดพลาดนี้จะส่งผลให้การรวมแสงไม่ได้พลังงานและอุณหภูมิเท่าที่ต้องการ

แนวคิดใหม่ในการควบคุมเฮลิโอสแตทคือการใช้ระบบควบคุมแบบเปิด (open-loop control system) ซึ่งข้อดีคือระบบนี้มีราคาถูกกว่าระบบควบคุมแบบปิด (closed-loop control system) ที่มักเป็นที่นิยมใช้ในระบบขับเคลื่อนของเฮลิโอสแตท ระบบควบคุมแบบปิดจะมีอุปกรณ์ตรวจวัดมุมการหมุนซึ่งเฮลิโอสแตทบางโครงการจะใช้อุปกรณ์ตรวจวัดตำแหน่งดวงอาทิตย์แทน [1] โดยทำหน้าที่ในการส่งสัญญาณป้อนกลับไปยังระบบควบคุมการเคลื่อนที่ของเฮลิโอสแตท เพื่อควบคุมให้เฮลิโอสแตทเคลื่อนที่ไปอยู่ในตำแหน่งที่ต้องการอย่างแม่นยำ อุปกรณ์ชิ้นนี้เป็นสาเหตุทำให้ระบบการควบคุมแบบปิดมีราคาสูงกว่าระบบการควบคุมแบบเปิด

ในการติดตั้งเฮลิโอสแตทจะมีความคลาดเคลื่อนเกิดขึ้นเสมอ ซึ่งมาจากหลายสาเหตุ เช่น การวางฐานที่ไม่ได้ระดับกับผิวโลก การวางแกนหมุนไม่ได้แนวทิศเหนือ, ทิศใต้ของโลกเป็นต้น หากเฮลิโอสแตทใช้ระบบเปิดในการควบคุมระบบส่งกำลัง จะทำให้ไม่สามารถทราบถึงความผิดพลาดที่เกิดจากการติดตั้งได้ การสอบเทียบจึงได้ถูกนำมาใช้ช่วยลดความผิดพลาดที่เกิดขึ้นจากการติดตั้งดังกล่าว โดยมีหลักการทำงานคือจะบังคับให้เฮลิโอสแตทสะท้อนแสงไปยังจุดหลายๆจุด โดยจะมีกล้องถ่ายภาพที่สะท้อนนั้นส่งไปให้โปรแกรมในคอมพิวเตอร์คำนวณหาตำแหน่งวางที่ถูกต้องของเฮลิโอสแตท ซึ่งสามารถช่วยลดความผิดพลาดในการวางเฮลิโอสแตทได้ อย่างไรก็ตาม ความผิดพลาดที่เกิดขึ้นจากระบบขับเคลื่อนของเฮลิโอสแตทยังไม่เคยถูกนำมาพิจารณาร่วมด้วย

งานวิจัยนี้ได้นำเสนองานเกี่ยวกับวิธีการลดความผิดพลาดที่เกิดขึ้นจากระบบขับเคลื่อนของเฮลิคอปเตอร์ โดยจะเริ่มศึกษาจากแบบจำลองความผิดพลาดที่เกิดขึ้นจากระบบขับเคลื่อนของเฮลิคอปเตอร์ ตลอดจนความผิดพลาดที่เกิดขึ้นจริงและวิธีการลดความผิดพลาดดังกล่าว เพื่อนำไปใช้ในการออกแบบ, สร้างและควบคุมระบบขับเคลื่อนเฮลิคอปเตอร์ให้มีความแม่นยำเพิ่มขึ้น โดยที่ไม่จำเป็นต้องใช้ระบบขับเคลื่อนความแม่นยำสูงที่มีราคาแพง

### 1.3 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อออกแบบระบบขับเคลื่อนเฮลิคอปเตอร์ให้มีความเหมาะสมโดยศึกษาจากความผิดพลาดที่เกิดขึ้นในการส่งกำลังด้วยระบบเฟือง
2. เพื่อศึกษาความผิดพลาดโดยรวมที่เกิดขึ้นจริงในระบบขับเคลื่อนที่ได้ทำการออกแบบไว้ โดยนำไปเป็นข้อมูลในการพัฒนาความแม่นยำของระบบขับเคลื่อนต่อไป
3. เพื่อศึกษาหาวิธีการพัฒนาความแม่นยำของระบบขับเคลื่อนให้มีความแม่นยำสูงขึ้น

### 1.4 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์

1. ศึกษาและเสนอแบบจำลองของความผิดพลาดที่เกิดขึ้นภายในชุดขับเคลื่อนเฮลิคอปเตอร์ที่ได้ทำการออกแบบไว้ เพื่อนำมาใช้ในการออกแบบและสร้างระบบขับเคลื่อนเฮลิคอปเตอร์ให้มีความเหมาะสม
2. พัฒนาประสิทธิภาพของระบบขับเคลื่อนเฮลิคอปเตอร์ให้มีความแม่นยำสูงขึ้น โดยศึกษาจากความผิดพลาดจริงที่เกิดขึ้นภายในระบบขับเคลื่อน

### 1.5 ขั้นตอนการดำเนินงาน

1. ศึกษางานวิจัยที่ผ่านมาเพื่อเป็นประโยชน์ในหาแบบจำลองความผิดพลาดในชุดส่งกำลัง การออกแบบ การสร้างระบบขับเคลื่อนเฮลิคอปเตอร์ และวิธีการวัดความผิดพลาดที่เกิดขึ้นจริงในระบบขับเคลื่อน
2. ออกแบบและสร้างระบบขับเคลื่อนของเฮลิคอปเตอร์

3. ทำการทดลองหาความผิดพลาดที่เกิดขึ้นภายในระบบขับเคลื่อนโดยวัดมุมเฟืองขับกับวัดมุมเฟืองตามแล้วมาเปรียบเทียบเพื่อหาความผิดพลาดในการเคลื่อนที่
4. นำข้อมูลที่ได้จากผลการทดลองมาพิจารณาหาวิธีการลดความผิดพลาดของระบบขับเคลื่อน
5. ทำการทดลองหาความผิดพลาดที่เกิดขึ้นหลังจากใช้วิธีการลดความผิดพลาดของระบบขับเคลื่อน
6. ทำการจำลองการสะท้อนแสงจากเฮลิโอสแตทไปยังตัวรับส่วนกลางโดยใช้ระบบเฟืองที่ได้ทำการทดลองไว้ในตอนแรก ทั้งก่อนและหลังการเพิ่มความแม่นยำของระบบขับเคลื่อน เพื่อแสดงว่าวิธีการเพิ่มความแม่นยำสามารถนำไปใช้กับระบบเฮลิโอสแตทได้จริง

#### 1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. เป็นประโยชน์สำหรับผู้ที่ต้องการจะเพิ่มประสิทธิภาพความแม่นยำในระบบขับเคลื่อนที่มีลักษณะคล้ายกัน
2. สามารถหาแบบจำลองความผิดพลาดของระบบเฟืองที่ใช้ในการส่งกำลัง และลดความผิดพลาดที่เกิดขึ้นดังกล่าวได้
3. สามารถนำวิธีการที่ได้จากการเพิ่มประสิทธิภาพระบบขับเคลื่อนเฮลิโอสแตทไปใช้ได้จริง

#### 1.7 โครงสร้างของวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์นี้ประกอบไปด้วยเนื้อหาทั้งหมด 7 บทด้วยกัน และเพื่อความสมบูรณ์จึงได้เพิ่มเนื้อหาภาคผนวกอีก 2 บท โดยแต่ละบทกล่าวถึงเนื้อหาดังต่อไปนี้

บทที่ 1 กล่าวถึงความเป็นมา ความสำคัญของปัญหา ขอบเขตวิทยานิพนธ์ ขั้นตอนการดำเนินงาน และประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการทำวิทยานิพนธ์

บทที่ 2 กล่าวถึงเทคโนโลยีระบบรวมแสงอาทิตย์ ระบบคุมเฮลิโอสแตทแบบเปิดและปิด

บทที่ 3 กล่าวถึงทฤษฎีการหาตำแหน่งดวงอาทิตย์ ทฤษฎีการสะท้อนแสง และการจำลองการเคลื่อนที่ของเฮลิโอสแตทในรอบปี

บทที่ 4 กล่าวถึงทฤษฎีความผิดพลาดที่เกิดขึ้นในเฟืองฟันตรง วิธีการลดความผิดพลาด และการจำลองความผิดพลาดที่เกิดขึ้น

บทที่ 5 กล่าวถึงการทดลองลดความผิดพลาดที่เกิดจากการส่งกำลังด้วยระบบเฟืองตัว  
หนอนและเฟืองฟันตรง

บทที่ 6 กล่าวถึงการจำลองการสะท้อนแสงจากเฮลิโอสแตทไปยังตัวรับส่วนกลาง

บทที่ 7 กล่าวถึงบทสรุปและข้อเสนอนะในวิทยานิพนธ์นี้

ภาคผนวก ก โปรแกรมที่ใช้วัดความผิดพลาดที่เกิดขึ้นจากระบบส่งกำลัง

ภาคผนวก ข โปรแกรมที่ใช้คำนวณการสะท้อนแสงจากเฮลิโอสแตทไปยังตัวรับส่วนกลาง

ภาคผนวก ค โปรแกรมที่ใช้คำนวณการเคลื่อนที่ของเฮลิโอสแตทในแกนอะซิมูทและอัลติจูด

ภาคผนวก ง งานวิจัยที่ได้เข้าร่วมการประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่ง  
ประเทศไทยครั้งที่ 22



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 2

### เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้ ได้ทบทวนผลงานต่างๆเพื่อใช้เป็นข้อมูลในการพิจารณาระบบเฮลิโอสแตทที่จะสร้างในเตาเผาสุริยะ โดยศึกษาจะงานตีพิมพ์ที่เกี่ยวข้องกับการสร้างเตาเผาสุริยะ ทั้งทางทฤษฎีเกี่ยวกับแสงอาทิตย์ และระบบเตาเผาสุริยะต่างๆ ที่มีอยู่ในปัจจุบัน จากนั้นจึงสรุปปัจจัยต่างๆ ที่สำคัญต่อการพัฒนาทั้งทางเทคนิคและการลงทุน ซึ่งเนื้อหาส่วนหนึ่งนำมาจากโครงการศึกษา ออกแบบและสร้างต้นแบบเตาเผาสุริยะอุณหภูมิสูง ของกรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน

#### 2.1 เทคโนโลยีระบบรวมแสงอาทิตย์

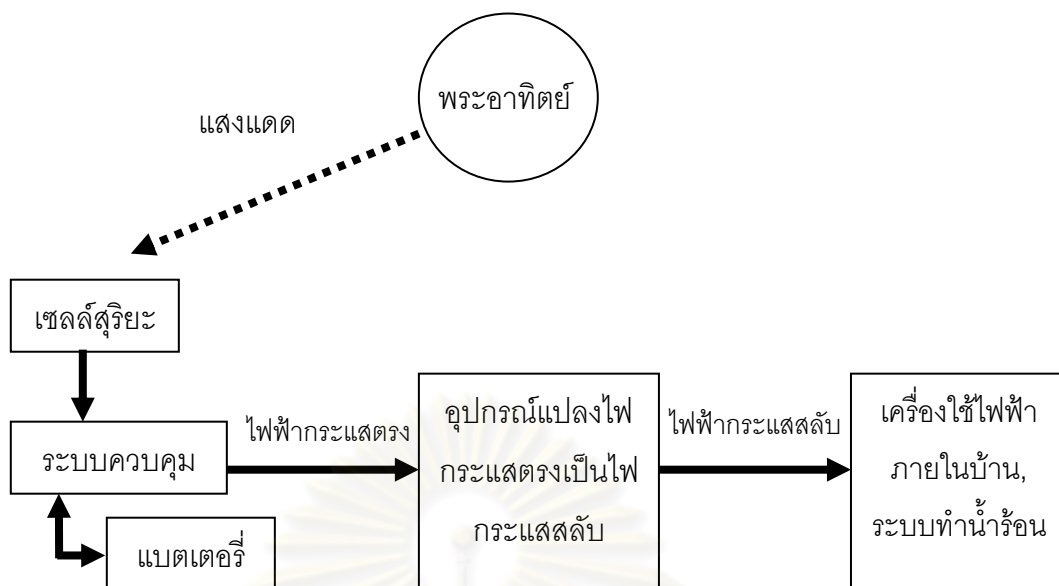
ในปัจจุบันเทคโนโลยีในการรวมแสงอาทิตย์นั้นมีมากมายหลายวิธีซึ่งสามารถจำแนกระบบการรวมแสงอาทิตย์ออกเป็น 3 ระบบใหญ่ๆได้แก่

1. ระบบ 1 มิติ ได้แก่ การใช้กระจกแผ่นราบแผ่นเดียว อาทิเช่น การใช้เซลล์สุริยะรับแสงอาทิตย์ดังรูปที่ 2.1 เพื่อผลิตกระแสไฟฟ้าใช้ภายในที่พักอาศัยหรือใช้ในระบบทำน้ำร้อน มีหลักการทำงานดังรูปที่ 2.2 โดยเซลล์สุริยะจะรับพลังงานแสงอาทิตย์เปลี่ยนเป็นพลังงานไฟฟ้ากระแสตรงส่งไปยังระบบควบคุมที่ต่อเข้ากับแบตเตอรี่เพื่อสำรองไฟฟ้า ซึ่งก่อนที่ไฟฟ้าที่ผลิตได้จะถูกนำไปใช้งานนั้นจะผ่านอุปกรณ์แปลงไฟฟ้ากระแสตรงให้เป็นไฟกระแสสลับก่อน เพื่อให้ไฟฟ้าที่ผลิตได้สามารถใช้กับอุปกรณ์ไฟฟ้าที่อยู่ภายในที่พักอาศัยได้



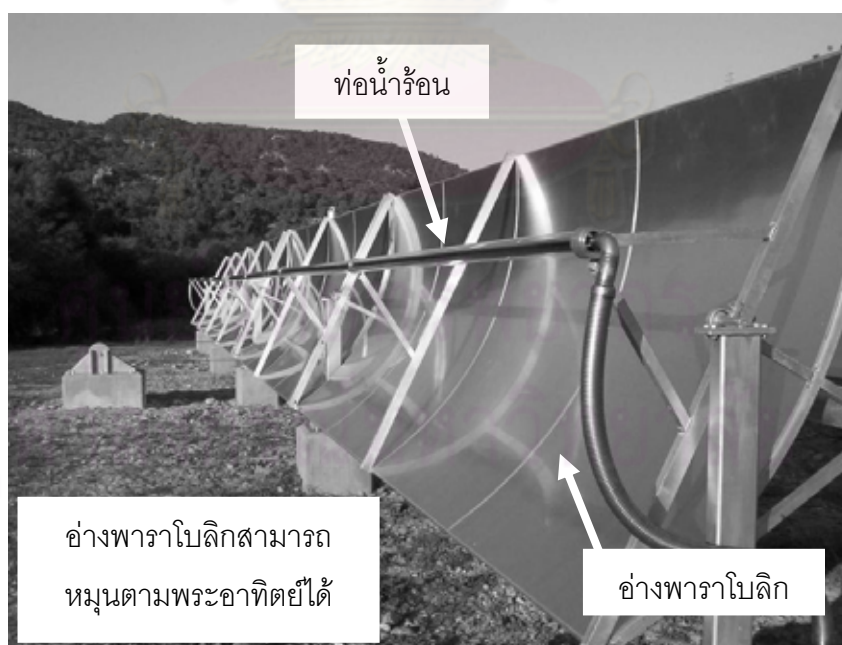
รูปที่ 2.1 เซลล์สุริยะติดบนหลังคาบ้าน





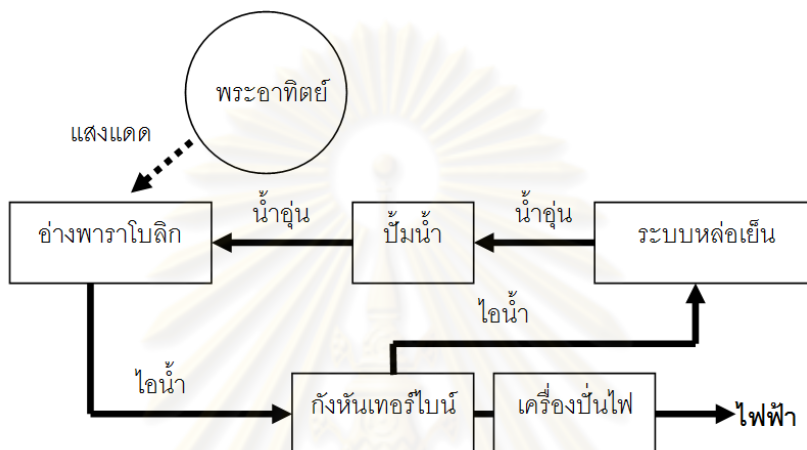
รูปที่ 2.2 หลักการทำงานของเซลล์สุริยะ

2. ระบบ 2 มิติ ได้แก่ ระบบอ่างพาราโบลาโบลิก(parabolic trough) ที่มีบริเวณรับแสงเป็นเส้น โฟกัสยาวตลอดแนวกระจก รูปที่ 2.3 แสดงอ่างพาราโบลาโบลิกของ Solitem Group ปัจจุบันระบบนี้ให้ความหนาแน่นพลังงานไม่สูงนัก เน้นการรับปริมาณพลังงาน เหมาะเป็นระบบทำน้ำร้อน การกลั่นน้ำ หรือระบบใดๆ ก็ได้ที่ไม่ต้องการอุณหภูมิสูง



รูปที่ 2.3 อ่างพาราโบลาโบลิกของ Solitem Group

ระบบอ่างพาราโบลิกนี้มีหลักการทำงานดังรูปที่ 2.4 โดยอ่างพาราโบลิกจะทำหน้าที่รวมแสงไปยังจุดรวมแสงซึ่งติดตั้งท่อน้ำไว้ ตัวอ่างสามารถเคลื่อนที่ติดตามดวงอาทิตย์ได้น้ำที่ไหลเวียนภายในท่อเมื่อได้รับพลังงานความร้อนก็จะเปลี่ยนสถานะจากของเหลวกลายเป็นไอ โดยไอน้ำที่ได้จะนำไปปั่นกังหันเทอร์ไบน์ที่ต่อกับเครื่องปั่นไฟเพื่อสร้างกระแสไฟฟ้า ไอน้ำที่ผ่านกังหันจะถูกส่งไปยังระบบหล่อเย็นเพื่อเปลี่ยนสถานะจากไอกลายเป็นของเหลวอีกครั้ง โดยปั๊มจะส่งน้ำกลับเข้าไปยังระบบอ่างพาราโบลิกต่อไป



รูปที่ 2.4 หลักการทำงานของอ่างพาราโบลิก

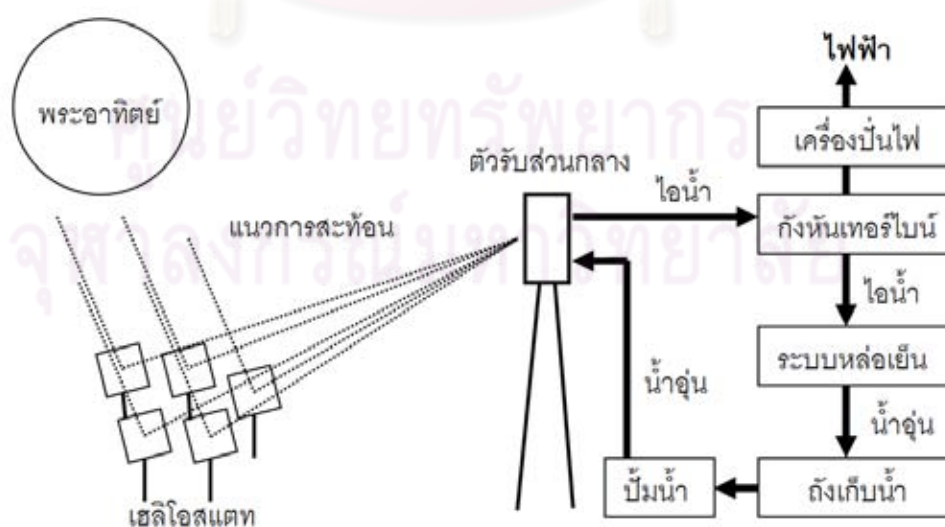
3. ระบบ 3 มิติ ได้แก่ การรวมแสงโดยใช้จานพาราโบลอยด์ รวมแสงเป็นจุดที่เรียกว่าจุดโฟกัส หรือใช้อุปกรณ์ชนิดอื่นรวมแสง เช่น กรวยรวมแสง (cone concentrator) หรือระบบรวมแสงตัวรับส่วนกลาง ระบบชนิดนี้สามารถรวมแสงอาทิตย์ได้อุณหภูมิเกิน 1,000 องศาเซลเซียส หรือคิดเป็นค่าความหนาแน่นดวงอาทิตย์กว่า 50,000 ดวง โดยอาจจำแนกต่อไปอีกได้เป็น

- กรณีที่ตัวรวมแสงอยู่กับที่แต่จุดโฟกัสเคลื่อนได้ (non-tracking system) ซึ่งไม่เหมาะกับการสร้างเตาเผาอุณหภูมิสูง
- ระบบการเลื่อนจานพาราโบลอยด์ตามดวงอาทิตย์
- ระบบการสร้างดวงอาทิตย์คงที่โดยใช้กระจกสะท้อนแสงอาทิตย์ที่สามารถตามวงโคจรของดวงอาทิตย์เพื่อให้แสงสะท้อนไปยังจุดรวมแสง หรือที่เรียกว่าเฮลิโอสแตท ซึ่งยังแบ่งออกได้อีกเป็น 3 ระบบใหญ่คือ ระบบตัวรับส่วนกลาง (central receiver) และระบบที่ใช้จานพาราโบลอยด์ที่อยู่กับที่เป็นตัวรวมแสง และระบบที่ใช้ตัวจานพาราโบลอยด์เคลื่อนที่ตามดวงอาทิตย์

ตัวอย่างของระบบรวมแสง 3 มิตินี้แสดงดังรูปที่ 2.5 ซึ่งเป็นระบบตัวรับส่วนกลางของห้องปฏิบัติการแห่งชาติซานเดียประเทศสหรัฐอเมริกา มีหลักการทำงานดังรูปที่ 2.6 โดยตัวเฮลิโอสแตททำหน้าที่สะท้อนแสงไปยังตัวรับส่วนกลาง น้ำที่ไหลเวียนภายในตัวรับส่วนกลางเมื่อได้รับพลังงานความร้อนก็จะกลายเป็นไอน้ำไปปั่นกังหันเทอร์ไบน์ที่ติดกับเครื่องปั่นไฟเพื่อสร้างกระแสไฟฟ้า โดยไอน้ำที่ผ่านกังหันจะถูกส่งไปยังระบบหล่อเย็นเพื่อเปลี่ยนสถานะไอให้กลายเป็นน้ำไหลไปเก็บในถังเก็บน้ำ ซึ่งปั๊มน้ำจะทำหน้าที่ส่งน้ำขึ้นไปยังตัวรับส่วนกลางต่อไป



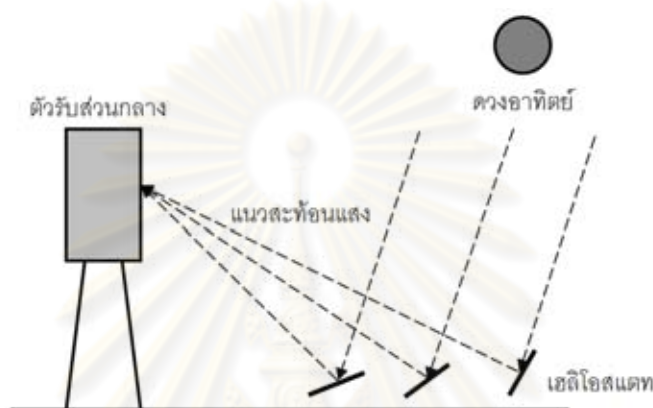
รูปที่ 2.5 ระบบตัวรับส่วนกลางของห้องปฏิบัติการแห่งชาติซานเดียประเทศสหรัฐอเมริกา



รูปที่ 2.6 หลักการทำงานของระบบตัวรับส่วนกลาง

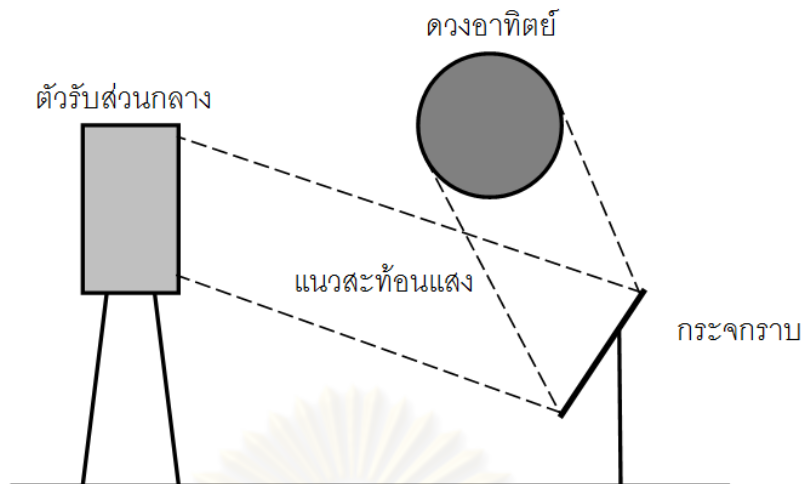
## 2.2 ระบบรวมแสงแบบตัวรับส่วนกลาง

ระบบตัวรับส่วนกลางเป็นระบบที่มักมีขนาดใหญ่ โดยจะมีพื้นที่รับแสงมากและรวมแสงโดยการใช้อะลูมิเนียมจำนวนมาก ในการสะท้อนแสงไปยังจุดรวมแสงที่จุดเดียวกันดังรูปที่ 2.7 ตัวอย่างของระบบแบบนี้ที่มีการเผยแพร่คือได้แก่ โครงการโซลาร์วัน (solar one) และ โซลาร์ทู (solar two) ของกระทรวงพลังงานประเทศสหรัฐอเมริกา, ระบบรวมแสงที่ห้องปฏิบัติการแห่งชาติซานเดีย ประเทศสหรัฐอเมริกา และที่ศูนย์วิจัยพลังงานสิ่งแวดล้อมและเทคโนโลยี ประเทศสเปน



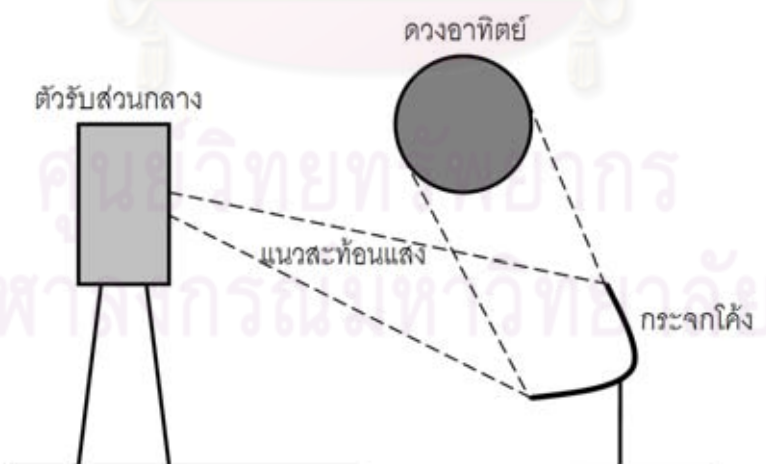
รูปที่ 2.7 แนวทางการสะท้อนแสงของระบบรวมแสงแบบตัวรับส่วนกลาง

ระบบตัวรับส่วนกลางนี้มีข้อดีคือสามารถรวบรวมปริมาณพลังงานได้สูงมากในระดับของเมกะวัตต์เลยทีเดียว โดยระบบนี้จำเป็นต้องใช้เฮลิโอสแตทขนาดใหญ่จำนวนมากในการเพิ่มพื้นที่รับแสง ในการสร้างนั้นสามารถกำหนดให้มีพื้นที่สะท้อนแสงมากกว่า 2,000 ตารางเมตรได้ แต่ข้อเสียของระบบนี้คืออุณหภูมิที่จุดรวมแสงจะไม่สูงนัก อยู่ในระดับไม่เกิน 1,000 องศาเซลเซียส ที่เป็นเช่นนี้เพราะลำแสงที่สะท้อนจากกระจกเฮลิโอสแตทซึ่งเป็นกระจกเงาราบ ไม่มีจุดโฟกัส ดังรูปที่ 2.8 ซึ่งทำให้อุณหภูมินั้นขึ้นอยู่กับจำนวนกระจก กล่าวคือยิ่งจำนวนกระจกมากขึ้น จุดรวมแสงก็จะเสมือนว่าได้แสงจากดวงอาทิตย์ที่มีจำนวนดวงเท่ากับจำนวนกระจก



รูปที่ 2.8 แนวลำแสงที่สะท้อนของกระจกเงาราบ

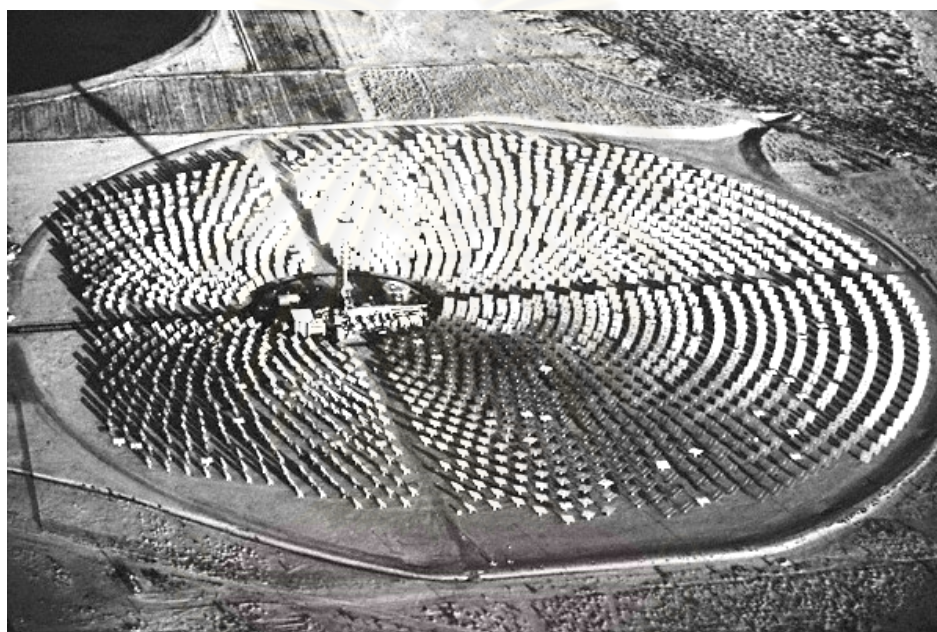
การแก้ไขอุณหภูมิที่จุมรวมแสงไม่สูงจากการใช้กระจกเงาราบนั้น อาจทำได้โดยการเปลี่ยนมาใช้กระจกโค้งแทน เพื่อช่วยให้มีการบีบลำแสงให้แคบลงในการสะท้อนแสง ดังรูปที่ 2.9 ทำให้ได้อุณหภูมิรวมแสงที่ตัวรับส่วนกลางสูงขึ้น แต่การออกแบบและสร้างกระจกโค้งเว้าจะสิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายกว่ากระจกกราบมาก เนื่องมาจากกระจกแต่ละบานจะมีความโค้งที่แตกต่างกันไปตามความยาวโฟกัส โดยความยาวโฟกัสนั้นขึ้นอยู่กับตำแหน่งที่ตั้งของเฮลิโอสแตท อีกทั้งยังต้องเสียค่าใช้จ่ายในการสร้างเฮลิโอสแตทและระบบควบคุมเฮลิโอสแตทที่มีจำนวนมาก



รูปที่ 2.9 แนวลำแสงที่สะท้อนของกระจกโค้ง

### 2.2.1 โครงการโซลาร์วันและโครงการโซลาร์ทูของกระทรวงพลังงานประเทศสหรัฐอเมริกา

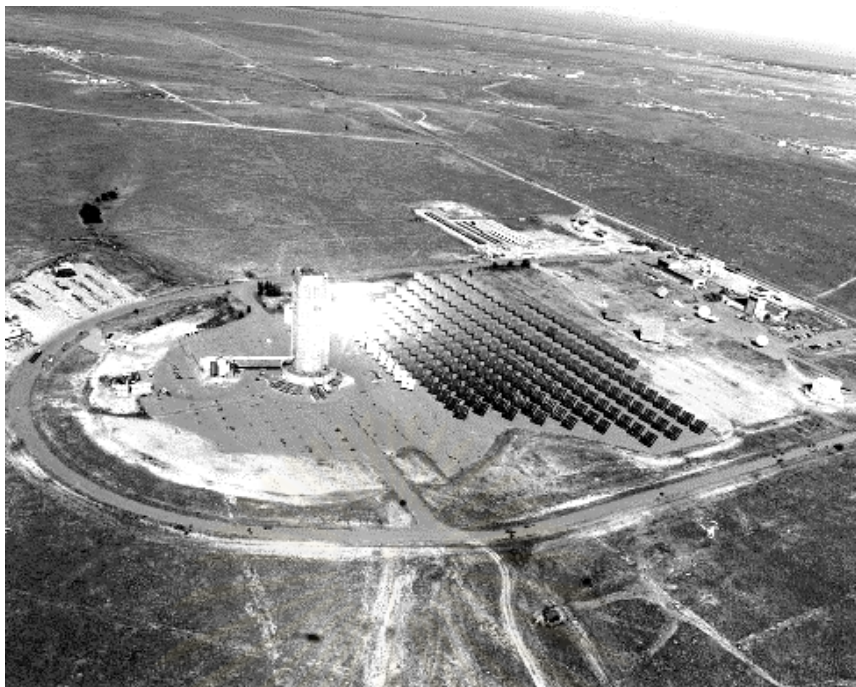
กระทรวงพลังงานของสหรัฐอเมริกาได้ทำการสร้างระบบผลิตกระแสไฟฟ้า โดยใช้พลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์เปลี่ยนน้ำให้กลายเป็นน้ำที่อุณหภูมิสูงถึง 565 องศาเซลเซียส ณ หอคอยสูง 90 เมตรจากพื้นดิน เป็นระบบรับพลังงานแสงอาทิตย์ ใช้กระจกติดตามแสงอาทิตย์ให้สะท้อนไปยังหอคอย จำนวน 1,818 ตัว ดังรูปที่ 2.10 ให้ความหนาแน่นพลังงานเทียบเท่าจำนวนดวงอาทิตย์ประมาณ 1,000 ดวง ระบบให้พลังงานทั้งสิ้น 10 เมกกะวัตต์ และมีระบบเก็บความร้อน (thermal storage) ซึ่งในโครงการโซลาร์ทูได้มีการเปลี่ยนตัวรับความร้อนจากน้ำเป็นสารละลายเกลือ (molten-salt) ซึ่งมีค่าความจุความร้อนจำเพาะสูงขึ้น ทำให้สามารถเก็บพลังงานความร้อนได้มากขึ้น



รูปที่ 2.10 ระบบผลิตกระแสไฟฟ้าด้วยพลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์ของโครงการโซลาร์วัน

### 2.2.2 ห้องปฏิบัติการแห่งชาติซานเดียประเทศสหรัฐอเมริกา

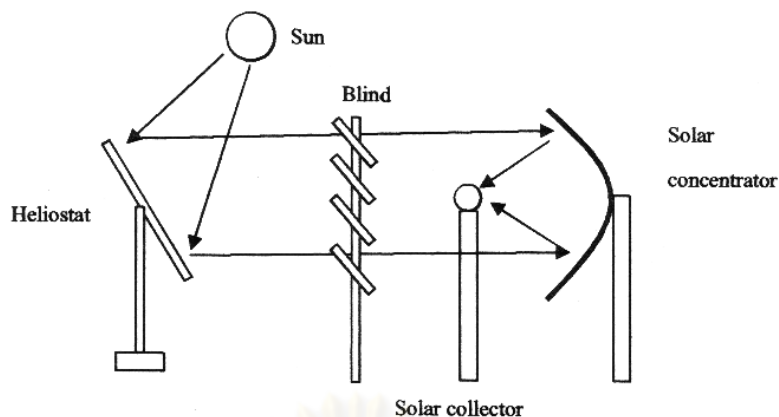
เตาเผาสุริยะแห่งนี้สามารถสร้างพลังงานความร้อนได้ 5 เมกกะวัตต์ รูปที่ 2.11 แสดงถึงระบบรวมแสงแบบตัวรับส่วนกลางที่ห้องปฏิบัติการแห่งชาติซานเดีย ระบบขับเคลื่อนใช้เพื่อองตัวหนอนต่อทดกัน 2 ชั้น โดยมีอัตราทดอยู่ที่ 1 : 18,600 จุดรวมแสงมีค่าความหนาแน่นพลังงานสูงสุดถึง 260 วัตต์/ตร.ซม. หรือคิดเป็นจำนวนดวงอาทิตย์ประมาณ 2,000 ดวง โดยเมื่อกำหนดให้ดวงอาทิตย์ 1 ดวงมีค่าเทียบเท่ากับค่าความหนาแน่นพลังงาน 700 วัตต์/ตร.ม.



รูปที่ 2.11 ระบบรวมแสงแบบตัวรับส่วนกลางที่ห้องปฏิบัติการแห่งชาติซานเดย์

### 2.3 ระบบรวมแสงแบบกระจกดัดตามดวงอาทิตย์กับจานพาราโบลอยด์

ระบบแบบนี้ได้รับความนิยมอย่างมากในการสร้างจุดรวมแสงที่มีความหนาแน่นพลังงานสูง ซึ่งมีการวางระบบดังรูปที่ 2.12 ระบบนี้ส่วนใหญ่จะใช้เฮลิโอสแตทขนาดใหญ่ 1 แผ่นหรือมากกว่า แต่จำนวนไม่มากเกิน 100 แผ่น เพื่อสะท้อนแสงให้ลำแสงไปตกกระทบบนจานพาราโบลอยด์ แล้วจานจะทำการรวมแสงให้ได้จุดโฟกัสที่มีความหนาแน่นพลังงานสูง มีสร้างในหลายประเทศ ยกตัวอย่างเช่น ไอเอ็มพี-ซีเอ็นอาร์เอส (AMP-CNRS, International Masters Publishers - Centre National de la Recherche Scientifique) ประเทศฝรั่งเศส เป็นเตาเผาขนาด 1,000 กิโลวัตต์ ซึ่งถือได้ว่ามีขนาดใหญ่มาก, เตาเผาที่สถาบันพอลเชอร์เลอ (Paul Scherrer Institute, PSI) ประเทศสวิสเซอร์แลนด์ เตาเผาขนาด 45 กิโลวัตต์ และเตาเผาที่ศูนย์วิจัยอวกาศแห่งชาติประเทศเยอรมนี (Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, DLR) ขนาด 20 กิโลวัตต์ ข้อดีของระบบนี้คือสามารถให้จุดรวมแสงที่มีความเข้มของพลังงานสูงซึ่งเป็นผลจากการใช้กระจกพาราโบลอยด์รวมแสง แต่มีข้อเสียคือ ได้ปริมาณพลังงานไม่สูงเท่าแบบตัวรับส่วนกลาง และเฮลิโอสแตทจำเป็นต้องวางให้อยู่ด้านหน้าของกระจกพาราโบลอยด์ หรือเบนไปจากแกนमुखสำคัญของตัวกระจกเป็นมุมน้อยๆเท่านั้น เพื่อให้แสงที่สะท้อนจากเฮลิโอสแตทไปยังจานพาราโบลอยด์มีการโฟกัสมากที่สุด ดังนั้นกระจกบนเฮลิโอสแตทจึงมีโอกาสบังกันเองได้ง่าย



รูปที่ 2.12 การวางระบบสะท้อนแสงแบบจวนพาราโบลอยด์

### 2.3.1เตาเผาที่ไอเอ็มพี-ซีเอ็นอาร์เอสประเทศสวิสเซอร์แลนด์

ระบบมีการใช้เฮลิโอสแตทจำนวน 63 ตัวอยู่บนพื้นดินที่ถูกปรับเป็นขั้นบันไดเพื่อให้มีระดับความสูงที่ต่างกัน แสดงในรูป 2.13 ส่งผลให้เฮลิโอสแตทไม่บังกัน แสงจะสะท้อนไปยังอาคารโค้งรูปพาราโบลอยด์ และไปรวมยังอาคารหลังเล็กในบริเวณที่ติดตั้ง พบว่ามีความหนาแน่นพลังงานแสงอาทิตย์เฉลี่ยอยู่ระหว่าง 800 ถึง 1,050 วัตต์/ตร.ม. ซึ่งจะให้ค่าความหนาแน่นพลังงาน ณ จุดโฟกัสเท่ากับ 1,000 วัตต์/ตร.ซม. หรือคิดเป็นจำนวนดวงอาทิตย์ประมาณ 1,500 ดวง สามารถให้อุณหภูมิช่วงทำงาน (operational temperature) อยู่ระหว่าง 800 ถึง 2,500 องศาเซลเซียส และได้มีการบันทึกไว้ว่าสามารถให้อุณหภูมิได้สูงสุดถึง 3,800 องศาเซลเซียส



รูปที่ 2.13 ระบบเตาเผาสุริยะที่ไอเอ็มพี-ซีเอ็นอาร์เอสประเทศฝรั่งเศส



### 2.3.2 เตาเผาที่สถาบันพอลเซอร์เล่อประเทศสวีเดน

สถาบันพอลเซอร์เล่อได้สร้างเตาเผาขนาด 40 กิโลวัตต์ ดังรูปที่ 2.14 เตาเผาเริ่มใช้ในปี ค.ศ. 1997 โดยมีพื้นที่กระจกสะท้อนแสงจำนวน 120 ตร.ม. ใช้การควบคุมแบบ 2 แกน ส่งกำลังด้วยเฟืองตัวหนอน อัตราทด 1 : 36,000 รวมแสงโดยจานพาราโบลอยด์ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 8.5 เมตร เตาเผาให้จุดโฟกัสที่มีความหนาแน่นพลังงานสูงถึง 5,000 กิโลวัตต์/ตร.ม. หรือเทียบเท่าจำนวนดวงอาทิตย์ประมาณ 7,000 ดวง ซึ่งยังสามารถเพิ่มได้สูงถึง 10,000 ดวงได้โดยการใช้ตัวรวมแสงชั้นที่สอง (โดยจานพาราโบลอยด์เป็นตัวรวมแสงชั้นแรก)



รูปที่ 2.14 ระบบเตาเผาสุริยะที่สถาบันพอลเซอร์เล่อ ประเทศสวีเดน

### 2.3.3 เตาเผาที่ห้องปฏิบัติการแห่งชาติซานเดีย

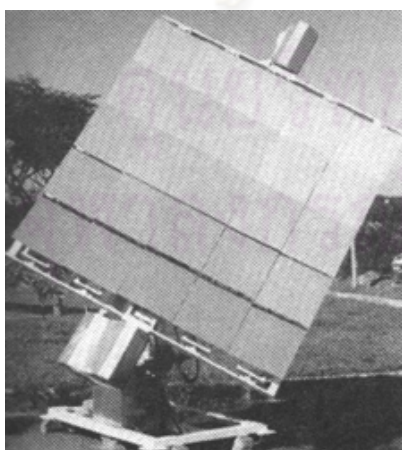
เป็นระบบรวมแสงที่มีลักษณะพิเศษคือสามารถควบคุมปริมาณแสงเพื่อควบคุมระดับอุณหภูมิได้ เฮลิโอสแตทมีพื้นที่รวม 95 ตร.ม. ดังแสดงในรูปที่ 2.15 โดยจานพาราโบลอยด์มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 6.71 เมตร จานพาราโบลอยด์มีลักษณะพิเศษคือเป็นชั้นเล็กๆ ที่ไม่ได้ต่อเป็นพื้นที่เดียวกันแต่ต่อกันเป็นลักษณะของเลนส์เฟรสเนล (Fresnel lens) ซึ่งเป็นการลดความลึกของจานพาราโบลอยด์ เตาเผาสามารถผลิตพลังงานความร้อนได้ 16 กิโลวัตต์ และที่จุดโฟกัสให้ความหนาแน่นพลังงานถึง 500 วัตต์/ตร.ม. หรือคิดเป็นจำนวนดวงอาทิตย์เท่ากับ 7,100 ดวง (เมื่อคิด 1 ดวงเท่ากับ 700 วัตต์/ตร.ม.)



รูปที่ 2.15 ระบบเตาเผาสุริยะที่ห้องปฏิบัติการแห่งชาติซานเดีย

#### 2.3.4 เฮลิโอสแตทแบบไร้ภาพที่ประเทศมาเลเซีย

แคนต์ (Chen) และคณะ (ค.ศ.2001,2002)[2] ได้รายงานการสร้างระบบเฮลิโอสแตทแบบไร้ภาพ (non-imaging) ซึ่งมีกระจกย่อยๆ หลายแผ่นดังรูปที่ 2.16(ก) โดยแต่ละแผ่นสามารถปรับมุมได้ กระจกทุกตัวติดตั้งโครงที่สามารถหมุนได้ใน 2 แกน ซึ่งจะวางตัวให้ได้จุดโฟกัสรูปที่ 2.16(ข) การทดลองให้แสงสะท้อนจากดวงอาทิตย์ไปยังจานพาราโบลอยต์ได้อุณหภูมิที่สูงถึงระดับ 3,400 องศาเซลเซียสซึ่งสังเกตได้จากการหลอมของทั้งสแตน



(ก)



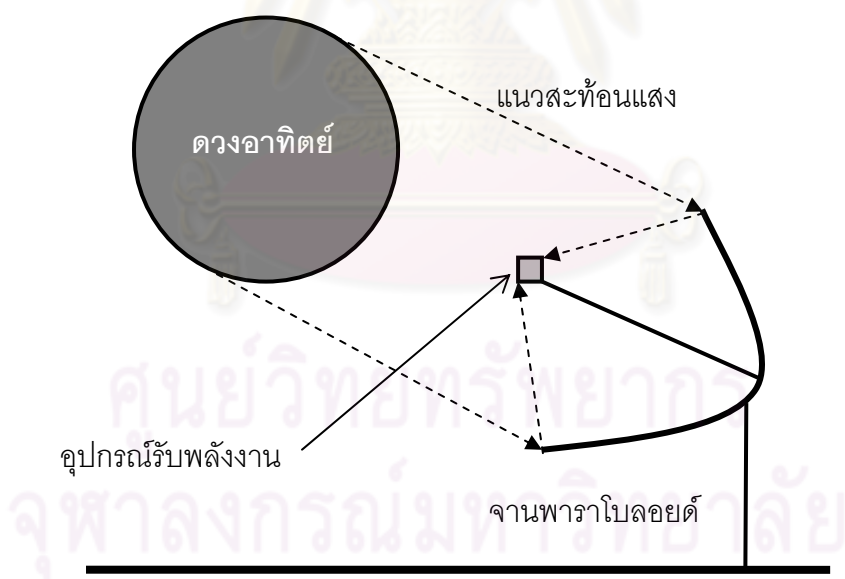
(ข)

รูปที่ 2.16 (ก) กระจกติดตั้งตามดวงอาทิตย์ซึ่งประกอบด้วยกระจกโค้งย่อยๆ และ (ข) การวางตัว เพื่อให้ได้จุดโฟกัส

## 2.4 ระบบรวมแสงแบบจานพาราโบลอยด์ติดตามดวงอาทิตย์

ระบบนี้ข้อดีคือการควบคุมง่ายที่เทียบเท่ากับเฮลิโอสแตทเพียงตัวเดียวและได้ระบบรวมแสงที่ดี โดยจะสร้างจานพาราโบลอยด์ขนาดใหญ่ ที่ติดตามการเคลื่อนที่ของดวงอาทิตย์และที่จุดโฟกัสติดตั้งอุปกรณ์รับพลังงานดังรูปที่ 2.17 ซึ่งจะต้องเคลื่อนที่ไปพร้อมกับจานพาราโบลอยด์ และอาจไม่ต้องมีความแม่นยำเท่ากับการสะท้อนแสงไปที่เป้าไกลๆ แต่ก็มีข้อเสียคือ ถ้าจานพาราโบลอยด์ที่ใช้มีขนาดใหญ่ ทำให้ต้องแบบโครงสร้างต่างๆ ให้ทนต่อสภาพลมแรง มอเตอร์ที่ขับเคลื่อนหมุนต่างๆ ต้องมีกำลังมาก อีกทั้งระบบนี้จะไม่สามารถขยายขนาดได้เนื่องจาก 2 ปัจจัยได้แก่

1. จานที่มีช่องรับแสงที่กว้างจะมีความยาวโฟกัสที่มากประมาณหนึ่งในสี่ของช่องรับแสง ความยาวโฟกัสที่มากนี้จะส่งผลให้การออกแบบโครงสร้างเพื่อรองรับน้ำหนักของอุปกรณ์ที่ตำแหน่งโฟกัสทำได้ยาก เพราะถ้าโครงสร้างรองรับจุดโฟกัสใหญ่ก็จะไปบังช่องรับแสง ของจานพาราโบลอยด์ด้วย
2. จานพาราโบลอยด์ที่ถูกออกแบบให้มีความยาวโฟกัสหนึ่งๆ จะมีขนาดของช่องรับแสงเพียงค่าเดียว หากต้องการเพิ่มขนาดของช่องรับแสงเพื่อเพิ่มปริมาณพลังงานที่เก็บสะสม ต้องสร้างจานพาราโบลอยด์ใหม่เท่านั้น ไม่สามารถต่อเติมจากจานที่มีอยู่เดิมได้



รูปที่ 2.17 แนวการสะท้อนแสงของจานพาราโบลอยด์

#### 2.4.1 งานพาราโบลอยด์ที่สถาบันพอลเซอร์เล่อประเทศสวิสเซอร์แลนด์

ที่สถาบันพอลเซอร์เล่อได้มีการสร้างงานพาราโบลอยด์จากกระจกโค้งชิ้นเล็กๆ จำนวน 82 ชิ้นซึ่งมีพื้นที่รวมกันทั้งสิ้น 87 ตารางเมตร ดังรูปที่ 2.18 สามารถให้กำลังได้ถึง 70 กิโลวัตต์ และมีความหนาแน่นพลังงานเท่ากับดวงอาทิตย์จำนวน 4,000 ดวง



รูปที่ 2.18 ระบบงานพาราโบลอยด์ติดตามดวงอาทิตย์ที่สถาบันพอลเซอร์เล่อ

#### 2.4.2 งานพาราโบลอยด์ที่มหาวิทยาลัยแห่งชาติออสเตรเลีย

มีการสร้างงานพาราโบลอยด์ซึ่งประกอบด้วยแผงกระจกจำนวน 54 แผง โดยเป็นชิ้นส่วนต้นแบบ 9 แผงและทำซ้ำชิ้นละ 6 แผง ดังรูปที่ 2.19 แต่ละแผงประกอบด้วยกระจกแผ่นเล็กๆ รูปสามเหลี่ยมด้านเท่าจำนวนมาก ซึ่งได้มาจากการตัดกระจกรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาด 63 x 146 เซนติเมตรแล้วมาต่อกัน การตัดวิธีนี้จะทำให้ใช้กระจกได้ทุกชิ้นที่ตัดโดยไม่มีการทิ้งเศษกระจกเลย ตัวงานมีขนาด 400 ตารางเมตร มีความยาวโฟกัส 31.1 เมตร สามเหลี่ยมแต่ละชิ้นเป็นส่วนโค้งของทรงกลม โดยกระจกนี้มีค่าความผิดพลาดของผิวโค้ง (surface slope error) 6.5 มิลลิเรเดียน ข้อดีอีกข้อคือกระจกทุกแผ่นมีความโค้งเท่ากันหมดทำให้ผลิตง่ายและเป็นการลดต้นทุนในการผลิตกระจกด้วย



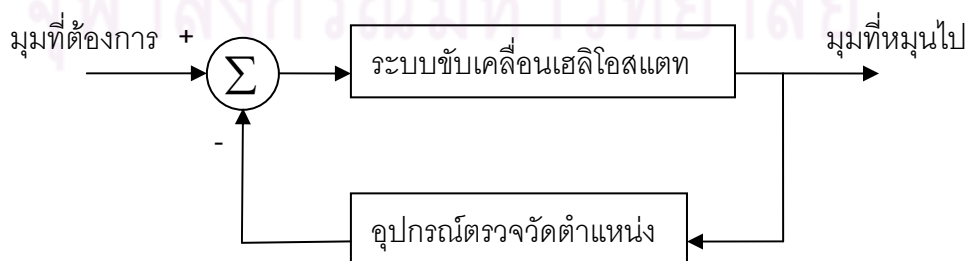
รูปที่ 2.19 จานพาราโบลอยด์ที่มหาวิทยาลัยแห่งชาติออสเตรเลีย

## 2.5 ระบบส่งกำลังของเฮลิโอสแตท

ระบบส่งกำลังของเฮลิโอสแตทโดยทั่วไป จะมีอยู่ 2 ระบบได้แก่ ระบบส่งกำลังที่ใช้มอเตอร์กระแสตรงใช้ในการควบคุมเฮลิโอสแตทแบบปิด และระบบส่งกำลังที่ใช้สเต็ปเปอร์มอเตอร์ในการควบคุมเฮลิโอสแตทแบบเปิด ซึ่งทั้งสองชนิดมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

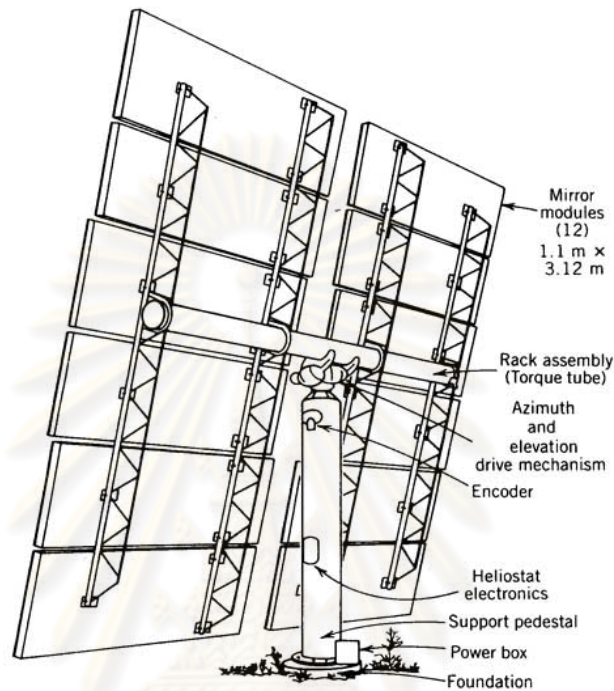
### 2.5.1 ระบบส่งกำลังโดยใช้มอเตอร์กระแสตรง

ระบบนี้ถูกใช้ควบคู่กับการควบคุมเฮลิโอสแตทแบบปิดโดยระบบปิดดังกล่าวมีรูปแบบการทำงานดังรูปที่ 2.20 ซึ่งอุปกรณ์ตรวจวัดตำแหน่งมุมที่หมุนไปของเฮลิโอสแตท หรือ อุปกรณ์ตรวจวัดตำแหน่งดวงอาทิตย์ จะใช้ในการระบุตำแหน่งปัจจุบันของเฮลิโอสแตทเพื่ออ้างอิงกับตำแหน่งที่ต้องการให้เฮลิโอสแตทเคลื่อนที่ไป



รูปที่ 2.20 ระบบส่งกำลังโดยใช้มอเตอร์กระแสตรง

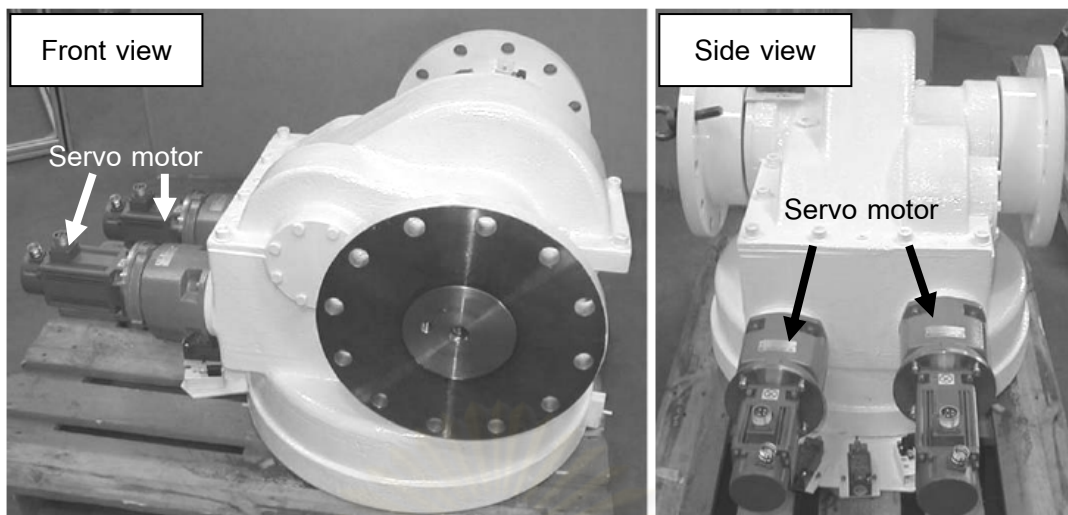
ระบบปิดนี้ถูกใช้ในหลายๆโครงการ ยกตัวอย่างเช่น โครงการโซลาร์วัน, โครงการโซลาร์ทู ซึ่งมีส่วนประกอบของเฮลิโอสแตตดังภาพที่ 2.21 และเฮลิโอสแตตของบริษัทซีเนอร์ (Sener Group) ซึ่งเป็นบริษัทที่รับปรึกษางานทางด้านวิศวกรรม ได้ออกแบบและสร้างเฮลิโอสแตตไว้ดังรูปที่ 2.22 โดยมีระบบขับเคลื่อนแกนกระจกที่เป็นระบบปิดแสดงดังภาพที่ 2.23



รูปที่ 2.21 ส่วนประกอบเฮลิโอสแตตโครงการโซลาร์วัน



รูปที่ 2.22 เฮลิโอสแตตของบริษัทซีเนอร์



รูปที่ 2.23 ระบบขับเคลื่อนแกนแอสลิโอสแตทของบริษัทซีเนอร์

การทำงานของมอเตอร์กระแสตรงจะใช้หลักการทำให้มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านลวดตัวนำซึ่งวางอยู่ในสนามแม่เหล็ก โดยจะทำให้เกิดแรงทางกลขึ้นที่ลวดตัวนำ และทำให้ลวดตัวนำเกิดการเคลื่อนที่ โดยมีวงจรรายง่ายดังรูปที่ 2.24 ซึ่งสามารถหาทิศทางได้โดยใช้กฎมือซ้ายของเฟลมมิ่ง (Fleming's left hand rule) สำหรับขนาดของแรงที่ผลักดันทำให้เกิดการเคลื่อนที่ในตัวนำให้เคลื่อนที่ในสนามแม่เหล็กนั้นจะมีความสัมพันธ์ตามสมการดังต่อไปนี้

$$F = BLI \quad (3.1)$$

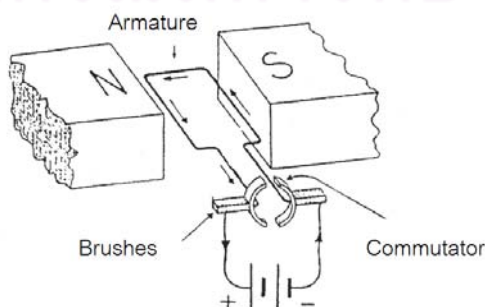
โดยที่

$F$  = แรงที่ผลักดันตัวนำ (นิวตัน)

$B$  = ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก

$L$  = ความยาวของลวดตัวนำในสนามแม่เหล็ก (เมตร)

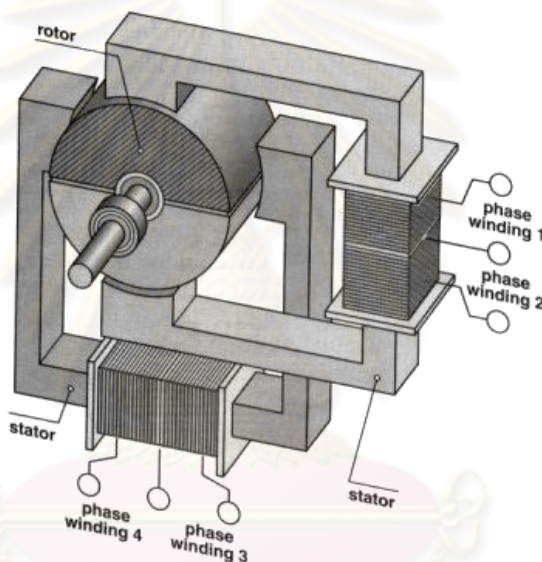
$I$  = กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านลวดตัวนำ (แอมแปร์)



รูปที่ 2.24 วงจรมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงอย่างง่าย [8]

## 2.5.2 ระบบส่งกำลังโดยใช้สเต็ปเปอร์มอเตอร์

สเต็ปเปอร์มอเตอร์ ใช้ในระบบควบคุมอิเล็กทรอนิกส์แบบเปิดเป็นมอเตอร์ที่มีการหมุนเป็นลำดับขั้น (step) เมื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าไปยังขดลวดที่พันอยู่บนสเตเตอร์ (stator) ในลักษณะสัญญาณที่ส่งมาจะเป็นพัลส์ (pulse) ในกรณีที่จ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับขดลวดหนึ่งของสเต็ปเปอร์มอเตอร์ จะทำให้เกิดการหมุนเพียงหนึ่งสเต็ปเท่านั้นซึ่งต่างจาก มอเตอร์กระแสตรง เมื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าให้ก็จะหมุนจนกว่าจะหยุดจ่ายกระแสไฟฟ้า ภายในสเต็ปเปอร์มอเตอร์จะมีส่วนประกอบที่สำคัญ 2 ส่วนด้วยกันคือ ส่วนที่ทำการหมุน (rotor) จะเป็นแม่เหล็กถาวรหรืออื่นๆและส่วนที่อยู่กับที่ สเตเตอร์ (stator) เป็นขดลวดที่พันไว้จำนวนหลายๆขด โดยมีชิ้นส่วนภายในดังรูปที่ 2.25 ชิ้นส่วนของสเต็ปเปอร์มอเตอร์ในปัจจุบันยังสามารถแบ่งได้แยกอีก3ชนิดได้แก่

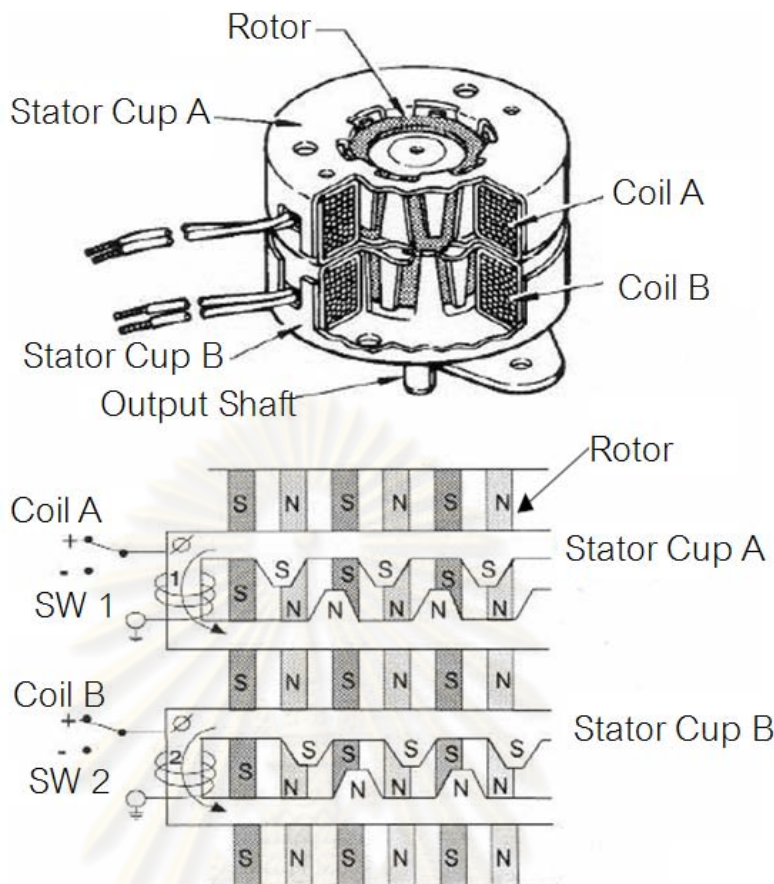


รูปที่ 2.25 ชิ้นส่วนภายในของ สเต็ปเปอร์มอเตอร์

### 2.5.2.1 สเต็ปเปอร์มอเตอร์แบบแม่เหล็กถาวร

สเต็ปเปอร์มอเตอร์ชนิดแม่เหล็กถาวร (permanent magnet stepper motor) จะมี สเตเตอร์ (stator) ที่พันขดลวดไว้หลายๆ โพล โดยมี โรเตอร์ (rotor) เป็นรูปทรง กระบอกฟันเลื่อย และโรเตอร์ทำด้วยแม่เหล็กถาวร (permanent magnet) เพื่อป้อนไฟกระแสตรง ให้กับขด สเตเตอร์ จะทำให้เกิดแรงแม่เหล็กไฟฟ้าผลักดันโรเตอร์ ทำให้มอเตอร์หมุนมอเตอร์แบบนี้จะเกิดแรงดูดยึดให้ โรเตอร์หยุดอยู่กับที่ แม้จะไม่ได้ป้อนไฟเข้าขดลวด ซึ่งมีส่วนประกอบดังรูปที่ 2.26

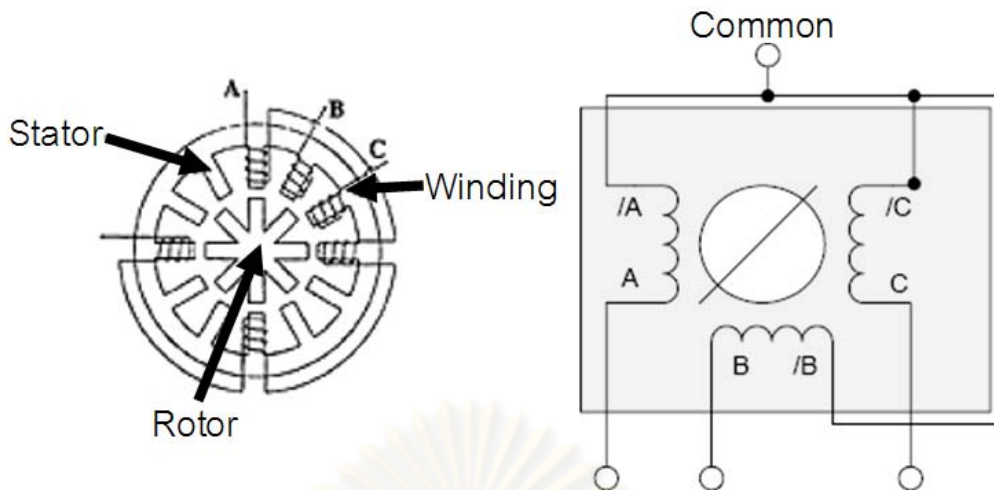




รูปที่ 2.26 ส่วนประกอบภายในของสเต็ปเปอร์มอเตอร์แบบแม่เหล็กถาวร

### 2.5.2.2 สเต็ปเปอร์มอเตอร์แบบแปรค่ารีลักแตนซ์

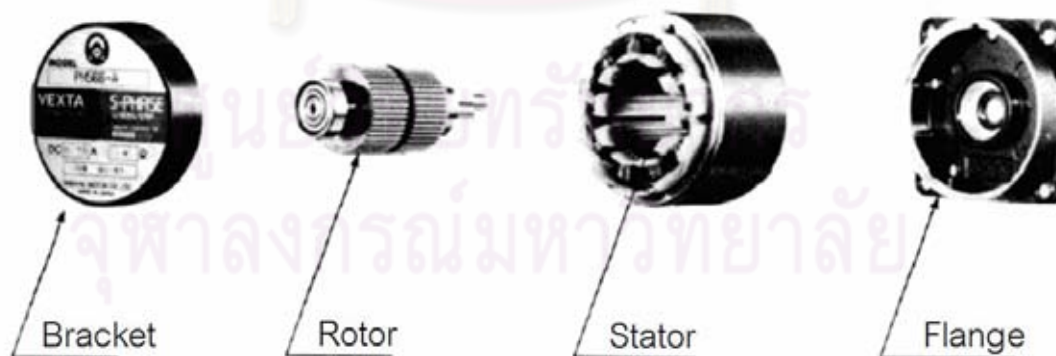
สเต็ปเปอร์มอเตอร์แบบแปรค่ารีลักแตนซ์นี้ (variable reluctance stepper motor) จะสามารถหมุนตัวโรเตอร์ได้อย่างอิสระ แม้จะไม่ได้จ่ายไฟให้โรเตอร์ซึ่งแตกต่างจากสเต็ปเปอร์มอเตอร์แบบแม่เหล็กถาวรที่ไม่สามารถหมุนโรเตอร์ได้อย่างอิสระ ตัวโรเตอร์ทำจากสารเฟอร์โรแมกเนติกกำลังอ่อน มีลักษณะเป็นฟันเลื่อยรูปทรงระบอก มีส่วนประกอบภายในดังรูปที่ 2.27 โดยแรงบิดที่เกิดขึ้นจะมีความสัมพันธ์โดยตรงกับจำนวนโพลในสเตเตอร์ ซึ่งจะไปหมุนโรเตอร์ไปในเส้นทางของอำนาจแม่เหล็กที่มีค่ารีลักแตนซ์ (reluctance) ต่ำที่สุด ซึ่งตำแหน่งที่จะเกิดขึ้นแน่นอนและมีเสถียรภาพแต่สามารถเกิดขึ้นได้หลายจุดดังนั้นเมื่อป้อนไฟเข้าขดลวดต่างๆ ในมอเตอร์แตกต่างกันไป ก็ทำให้มอเตอร์หมุนไปตำแหน่งต่างๆกัน สเต็ปเปอร์มอเตอร์แบบแปรค่ารีลักแตนซ์นี้มีความเฉื่อยของโรเตอร์น้อยจึงมีความเร็วรอบสูงกว่าสเต็ปเปอร์มอเตอร์แบบแม่เหล็กถาวร



รูปที่ 2.27 สเต็ปเปอร์มอเตอร์แบบแปรค่ารีลักแตนซ์

### 2.5.2.3 สเต็ปเปอร์มอเตอร์แบบผสม

สเต็ปเปอร์มอเตอร์แบบผสม (hybrid - H) ชนิดนี้จะเป็นลูกผสมของสเต็ปเปอร์มอเตอร์แบบแม่เหล็กถาวรและสเต็ปเปอร์มอเตอร์แบบแปรค่ารีลักแตนซ์ โดยจะมีสเตเตอร์คล้ายกับที่ใช้ในและสเต็ปเปอร์มอเตอร์แบบแปรค่ารีลักแตนซ์ โดยโรเตอร์มีหมวกหุ้มปลายซึ่งมีลักษณะของสารแม่เหล็กที่มีกำลังสูง การควบคุมขนาดรูปร่างของหมวกแม่เหล็กอย่างดีนี้ทำให้ได้มุมการหมุนที่แม่นยำ ให้แรงบิดสูง มีขนาดกระทัด และให้แรงดูดยึดโรเตอร์นิ่งแม้ไม่ได้จ่ายไฟให้กับขดลวด มีส่วนประกอบภายในดังรูปที่ 2.28



รูปที่ 2.28 สเต็ปเปอร์มอเตอร์แบบผสม

### 2.5.3 ข้อดีของสแต็ปเปอร์มอเตอร์เมื่อเปรียบเทียบกับมอเตอร์กระแสตรง

1. สามารถใช้งานควบคุมตำแหน่งในลักษณะ วงจรควบคุมแบบเปิด (open loop control) ได้ โดยที่ไม่ต้องการสัญญาณป้อนกลับ (feedback signal)
2. ไม่มีส่วนของแปรงถ่านที่จะสึกหรอ และไม่เกิดการสปาร์คที่แปรงถ่านซึ่งอาจก่อให้เกิดสัญญาณรบกวน
3. ราคาทั้งระบบของสแต็ปเปอร์มอเตอร์ถูกกว่ามอเตอร์กระแสตรง

## 2.6 สรุป

จากข้อมูลต่างๆโดยสรุปแล้วโครงการศึกษา ออกแบบ และสร้างต้นแบบเตาเผาสุริยะอุณหภูมิสูงของกรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน ได้ตัดสินใจที่จะสร้างระบบรวมแสงอาทิตย์แบบตัวรับส่วนกลาง เพื่อสร้างปริมาณพลังงานสูงและความเข้มข้นของพลังงานสูง จึงจำเป็นต้องใช้เฮลิโอสแตทจำนวนมาก ติดกระจุกบานเล็กแทนการใช้กระจุกแก้วเพื่อลดต้นทุนในการผลิต เลือกใช้ระบบเปิดในการควบคุมของเฮลิโอสแตทและใช้ระบบสอบเทียบในการแก้ไขความผิดพลาดที่เกิดจากการวางตำแหน่งเฮลิโอสแตทคลาดเคลื่อน โดยระบบขับเคลื่อนของเฮลิโอสแตทนั้นเลือกใช้สแต็ปเปอร์มอเตอร์เป็นตัวส่งกำลังเนื่องมาจากราคาทั้งระบบถูกกว่ามอเตอร์กระแสตรง

ฉะนั้นปัจจัยสำคัญในการสร้างเตาเผาสุริยะอุณหภูมิสูง คือการสร้างเฮลิโอสแตทขนาดเล็กให้มีราคาถูก และมีระบบขับเคลื่อนที่มีความแม่นยำสูง เพราะราคาของเฮลิโอสแตทและชุดควบคุมคิดเป็น 30% - 50% ของราคาเตาเผาสุริยะแบบตัวรับส่วนกลางเลยทีเดียว ส่วนที่สำคัญที่สุดในการลดต้นทุนการผลิตเฮลิโอสแตท คือการลดราคาในส่วนของบริษัทส่งกำลัง เนื่องมาจากส่วนนี้เป็นส่วนที่แพงสุดของเฮลิโอสแตท การออกแบบระบบขับเคลื่อนให้มีราคาถูกและมีความแม่นยำสูงนั้นเป็นไปได้ยาก จึงต้องคิดหาวิธีการเพิ่มความแม่นยำของระบบขับเคลื่อนแทนที่จะใช้ระบบขับเคลื่อนที่มีความแม่นยำสูงแต่มีราคาแพง ซึ่งเป็นที่มาของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

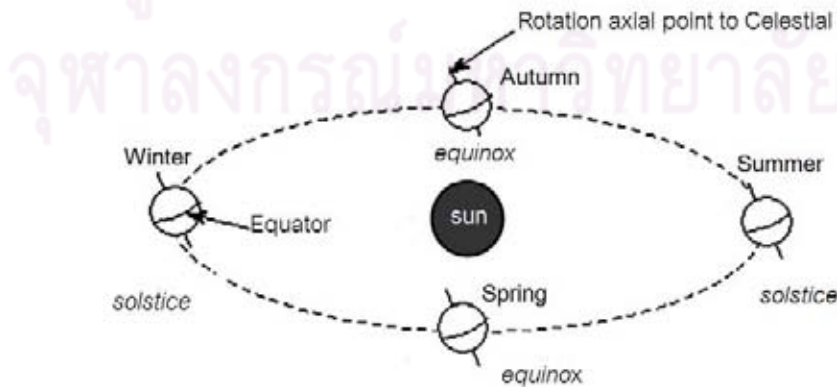
### บทที่ 3

## การจำลองการเคลื่อนที่ของเฮลิโอสแตทในรอบปี

เฮลิโอสแตทแต่ละตัวจะมีลักษณะการเคลื่อนที่ไม่เหมือนกัน อีกทั้งยังมีช่วงของการเคลื่อนที่ไม่เท่ากัน เนื่องจากตำแหน่งวางเฮลิโอสแตทที่แตกต่างกันนั่นเอง โดยในบทนี้จะทำการคำนวณลักษณะการเคลื่อนที่ในรอบปีของเฮลิโอสแตท ณ ตำแหน่งต่างๆรอบตัวรับส่วนกลาง เพื่อเป็นแนวทางในการออกแบบระบบขับเคลื่อนเฮลิโอสแตท ให้มีความเหมาะสมสอดคล้องกับลักษณะการเคลื่อนที่ของเฮลิโอสแตท การคำนวณการเคลื่อนที่ของเฮลิโอสแตทนั้นจำเป็นต้องรู้ลักษณะการเคลื่อนที่ของพระอาทิตย์ก่อน เนื้อหาส่วนมากภายในบทนี้จะนำมาจากโครงการศึกษาออกแบบและสร้างต้นแบบเตาเผาสุริยะอุณหภูมิสูง ของกรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน

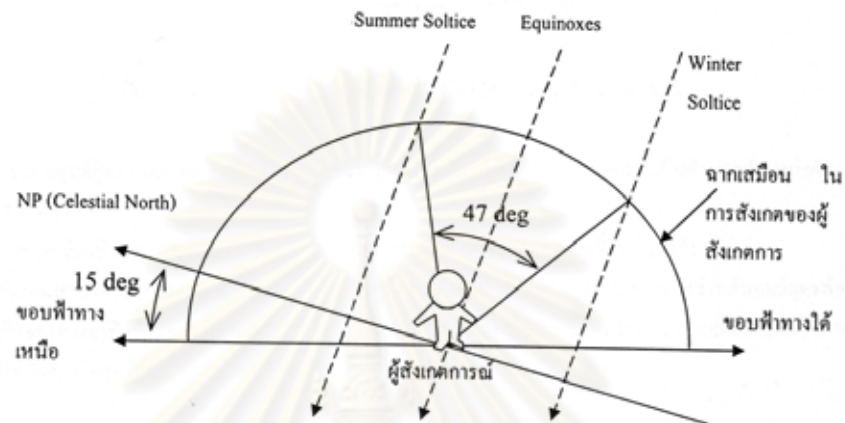
### 3.1 การคำนวณตำแหน่งปรากฏของดวงอาทิตย์

เหตุผลที่โลกมีฤดูต่างๆเนื่องมาจากแกนหมุนของโลกนั้นทำมุมเอียง 23.5 องศา กับเส้นตั้งฉาก (normal vector) ของระนาบการโคจรของโลกรอบดวงอาทิตย์ ดังรูปที่ 3.1 โดยที่ในหน้าร้อนนั้นดวงอาทิตย์จะอยู่สูงบนท้องฟ้า และช่วงเวลากลางวันจะยาวกว่ากลางคืน ในช่วง ศารทวิษุวัต (Fall equinox) เกิดในวันที่ 22 หรือ 23 กันยายนของทุกปี ซึ่งตรงกับฤดูใบไม้ร่วงของซีกโลกเหนือ และวสันตวิษุวัต (spring equinox) เกิดในวันที่ 20 หรือ 21 มีนาคมซึ่งตรงกับฤดูใบไม้ผลิของซีกโลกเหนือ โดยเป็นช่วงที่เวลากลางวันจะเท่ากับเวลากลางคืน



รูปที่ 3.1 แกนหมุนของโลกเอียงทำมุม 23.5 องศากับระนาบวงโคจร [7]

การเปลี่ยนแปลงของระนาบการเคลื่อนที่ของดวงอาทิตย์จะส่งผลให้เกิดฤดูต่างๆดังรูปที่ 3.2 จากรูปดังกล่าวผู้สังเกตจากตำแหน่งในประเทศไทยที่ละติจูด 15 องศา ซึ่งจะเห็นว่าแนวเส้นประแสดงระนาบการเคลื่อนที่ของดวงอาทิตย์ ที่ผู้สังเกตบนโลกเห็นที่เวลาต่างๆกัน แกน NP นั้นแสดงแนวแกนที่ขนานกับแนวแกนการหมุนของโลก ซึ่งผู้สังเกตบนโลกจะเห็นโดยประมาณว่าขึ้นไปที่ดาวเหนือ โดยที่ผู้สังเกตจะเห็นคล้ายกับว่าโลกหมุนรอบแกนนี้



รูปที่ 3.2 การเปลี่ยนแปลงของระนาบการเคลื่อนที่ของดวงอาทิตย์ [7]

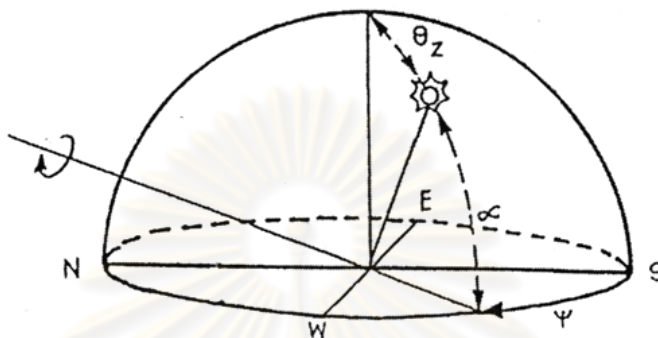
ผู้สังเกตการณ์บนโลกก็จะเห็นว่า ดาวต่างๆหมุนรอบแกนนี้ทุกๆ 23 ชั่วโมง 56 นาที เท่ากับคาบการหมุนของโลก เพราะดาวต่างๆ ถือว่าอยู่ไกลมากเปรียบเสมือนอยู่นิ่งเทียบกับการโคจรของโลก พิจารณาได้จากการที่ผู้สังเกตจะเห็นดาวต่างๆ เคลื่อนที่เป็นวงกลมรอบจุดหนึ่งที่อยู่ใกล้ดาวเหนือ แกน NP นี้จะทำมุมกับระนาบของพื้นเป็นมุมเดียวกัน ค่าละติจูดพอดี (15 องศาตามที่สมมุติข้างต้น ถ้าประมาณว่าโลกกลม) การบอกเวลาบนโลก 1 วัน จึงต้องมีการชดเชยเพิ่มอีก 4 นาที เป็น 24 ชั่วโมง เพื่อให้พระอาทิตย์ส่องสว่างในตอน 12 นาฬิกา ตลอดทั้งปี

วิธีการบอกตำแหน่งดวงอาทิตย์ในงานด้านพลังงานแสงอาทิตย์ มี 2 ระบบที่นิยมใช้ได้แก่

1. ระบบอะซิมุท-อัลติจูด (azimuth-altitude system) ระบบนี้ใช้ 2 มุมเป็นตัวบอกตำแหน่ง ดังรูปที่ 3.3 ที่ มุมอะซิมุท ( $\psi$ ) และ อัลติจูด ( $\alpha$ ) โดยที่
  - อะซิมุท ( $A_z$ ) เป็นมุมที่วัดระหว่างเวกเตอร์สองอันที่ฉายลงในแนวตั้งฉากบนระนาบของพื้นโลก (ระนาบในแนวระดับ) โดยที่เวกเตอร์สองอันนี้คือเวกเตอร์ที่ลากจากผู้สังเกตไปทางทิศใต้ กับเวกเตอร์ที่ลากจากผู้สังเกตไปยังดวงอาทิตย์ โดยกำหนดว่า ถ้าฉายเวกเตอร์

ที่ชี้ไปยังดวงอาทิตย์ไปทางทิศตะวันออกของเส้นที่ชี้ไปยังทิศใต้ อะซิมุทจะมีค่าเป็นบวก และถ้าอยู่ทางทิศตะวันตก จะมีค่าเป็นลบ ดังนั้น  $-180^\circ \leq A_z \leq 180^\circ$

- อัลติจูด ( $A_z$ ) เป็นมุมเงย ณ ตำแหน่งผู้สังเกต ที่วัดจากระนาบในแนวระดับ กับเวกเตอร์จากผู้สังเกต ไปยังดวงอาทิตย์ โดยที่  $0^\circ \leq A_z \leq 90^\circ$



รูปที่ 3.3 การบอกตำแหน่งของดวงอาทิตย์โดยใช้ระบบอะซิมุท-อัลติจูด

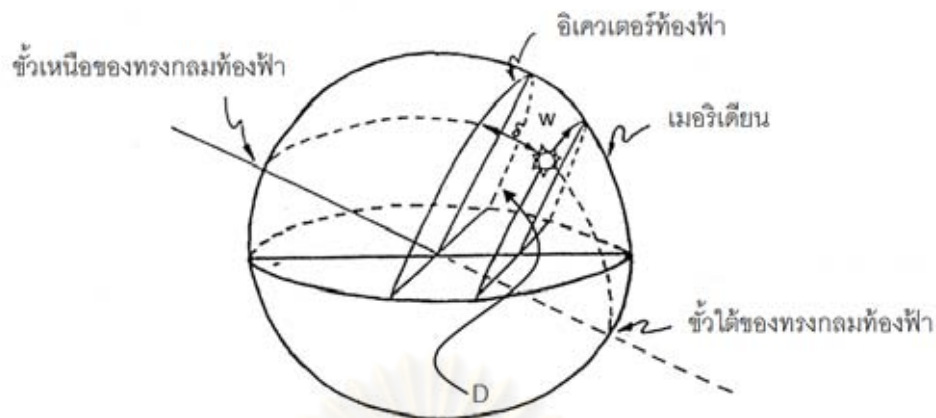
ข้อดีของการบอกตำแหน่งโดยใช้ระบบอะซิมุท-อัลติจูดนั้นคือเข้าใจง่าย ส่วนข้อเสียคือค่าจะเปลี่ยนแปลงไปทุกขณะตั้งแต่ดวงอาทิตย์ขึ้นจนตกดินและเปลี่ยนแปลงไปตามวันในรอบปีด้วย

2. ระบบศูนย์สูตร (equatorial system) ระบบนี้ใช้มุมหรือส่วนโค้งของทรงกลมท้องฟ้าเป็นตัวบอกตำแหน่งดังแสดงในรูปที่ 3.4 โดยที่
  - เดคลิเนชัน (declination,  $D$ ) ในรูปเป็นค่ามุมจากจุดศูนย์กลางของทรงกลมที่รับส่วนโค้ง  $\delta$  ค่าเดคลิเนชันเป็นส่วนโค้งของทรงกลมใหญ่ (great circle) แสดงในรูปที่ 3.5 ที่ผ่านขั้วทั้งสองของทรงกลมท้องฟ้าระหว่างเส้นศูนย์สูตรท้องฟ้า กับทางเดินของดวงอาทิตย์ มีค่าอยู่ระหว่าง  $-23.5^\circ < D < 23.5^\circ$  ซึ่งถือว่ามีค่าคงที่ในแต่ละวันและมีค่าเปลี่ยนแปลงไปตามวันในรอบปี การเปลี่ยนแปลงนี้เขียนเป็นสูตรได้ดังนี้

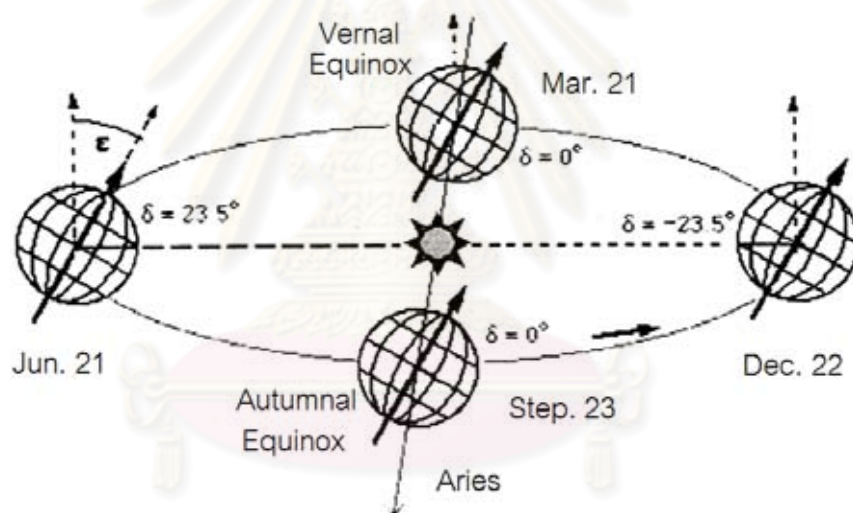
$$D = 23.45 \sin \left[ \left( \frac{360}{364} \right) (d_n + 284) \right] \tag{3.1}$$

โดยที่  $D$  = ค่าเดคลิเนชัน (องศา)

$d_n$  = วันในรอบปีมีค่าในช่วง 1 - 365 เช่น ในวันที่ 31 มกราคม  $d_n = 31$



รูปที่ 3.4 การบอกตำแหน่งดวงอาทิตย์โดยใช้ระบบศูนย์สูตร



รูปที่ 3.5 ค่ามุมจากจุดศูนย์กลางของทรงกลมที่รับส่วนโค้ง ( $\delta$ )

- มุมชั่วโมง (hour angle,  $H$ ) เป็นมุมที่ขั้วของทรงกลมท้องฟ้า (celestial pole) หรือส่วนโค้งของทรงกลมท้องฟ้าระหว่างเส้นเมอริเดียน (meridian) ของผู้สังเกตกับวงกลมใหญ่ที่ลากผ่านดวงอาทิตย์และขั้วทั้งสองของทรงกลมท้องฟ้า มีค่าเป็นบวกเมื่อดวงอาทิตย์อยู่ทางตะวันออกของเมอริเดียน และมีค่าเป็นลบเมื่ออยู่ทางตะวันตกของเมอริเดียน มุมชั่วโมงนั้นจะเปลี่ยนไปตามเวลา ถ้าในแต่ละวันนั้นใช้การนับเวลาเทียบกับเวลาดวงอาทิตย์ (solar time) ที่มีการปรับจากค่าเวลาท้องถิ่น โดยที่เวลาเที่ยง 12:00 น. เมื่อดวงอาทิตย์อยู่สูงที่สุดเสมอในแต่ละวัน จะได้

$$H = 15(12 - ST) \quad (3.2)$$

โดยที่  $H =$  มุมชั่วโมง (hour angle)

$ST =$  เวลาดวงอาทิตย์ (solar time)

ในระบบอะซิเมท-อัลติจูด และระบบศูนย์สูตร มีความสัมพันธ์กันดังสมการต่อไปนี้

$$A_l = \sin^{-1} [\cos(\phi) \cos(D) \cos(H) + \sin(\phi) \sin(D)] \quad (3.3)$$

$$\text{ในกรณีที่ } H \geq 0, A_z = \cos^{-1} \left[ \frac{\sin(A_l) \sin(\phi) - \sin(D)}{\cos(A_l) \cos(\phi)} \right] \quad (3.4ก)$$

$$\text{ในกรณีที่ } H < 0, A_z = -\cos^{-1} \left[ \frac{\sin(A_l) \sin(\phi) - \sin(D)}{\cos(A_l) \cos(\phi)} \right] \quad (3.4ข)$$

โดยที่  $\phi =$  ค่าละติจูดของตำแหน่งของผู้สังเกต โดยให้ค่าเป็นบวกเมื่ออยู่ทางทิศเหนือ และเป็นลบเมื่ออยู่ทางทิศใต้

ในการบอกตำแหน่งดวงอาทิตย์นั้น ยังสามารถบอกได้ด้วยเวกเตอร์ตั้งฉาก [3] ซึ่งหาได้จาก

$$\hat{s} = [n_x, n_y, n_z] = [\cos(A_l) \sin(A_z), \cos(A_l) \cos(A_z), \sin(A_l)] \quad (3.5)$$

โดยที่  $\hat{s} =$  เวกเตอร์ตั้งฉากของพระอาทิตย์ เทียบ ณ ตำแหน่งวางเฮลิโอสแตท

$A_l =$  มุมอัลติจูดของพระอาทิตย์ (องศา) ได้จากสมการที่ (3.3)

$A_z =$  มุมอะซิเมทของพระอาทิตย์ (องศา) ได้จากสมการที่ (3.4ก, 3.4ข)

$n_x =$  ตำแหน่งดวงอาทิตย์ แกน X อ้างอิงจากผิวโลกชี้ไปทางทิศตะวันออก

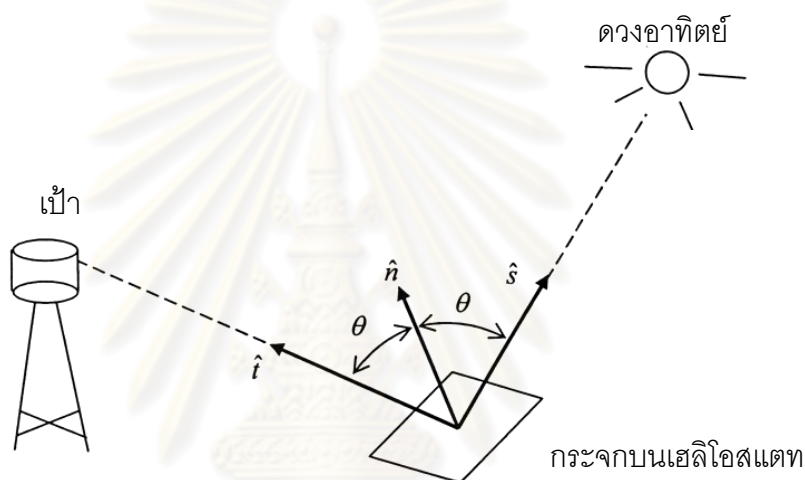
$n_y =$  ตำแหน่งดวงอาทิตย์ แกน Y อ้างอิงจากผิวโลกชี้ไปทางทิศเหนือจริง

$n_z =$  ตำแหน่งดวงอาทิตย์ แกน Z ชี้ขึ้นตั้งฉากกับผิวโลก



### 3.2 หลักการทำงานของเฮลิโอสแตท

เฮลิโอสแตทใช้ในการรวมแสงให้มีความหนาแน่นเพิ่มขึ้น ซึ่งส่วนหลักของเฮลิโอสแตทนั้นประกอบไปด้วยกระจกแผ่นราบหรือกระจกโค้งเล็กน้อย ทำหน้าที่สะท้อนแสงไปรวมกันที่ตัวรับส่วนกลาง การควบคุมเฮลิโอสแตทนั้นจะต้องมีการปรับมุมกระจกให้พอเหมาะตามเวลาในแต่ละวันและในแต่ละฤดู ซึ่งการปรับมุมกระจกนั้นขึ้นอยู่กับ การเคลื่อนที่ของดวงอาทิตย์ (พิจารณาให้โลกอยู่กับที่) และตำแหน่งตัวรับส่วนกลางกับตำแหน่งเฮลิโอสแตท นั้นหมายความว่า เฮลิโอสแตทแต่ละตัวที่วางคนละตำแหน่งจะเคลื่อนที่ไม่เหมือนกันเพื่อให้สะท้อนแสงไปยังตำแหน่งเดียวกัน ตำแหน่งการวางตัวแสดงดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 การสะท้อนแสงของเฮลิโอสแตท [7]

จากข้อมูลตำแหน่งต่างๆสามารถคำนวณมุมการวางตัวของกระจกได้ โดยที่เวกเตอร์หนึ่งหน่วย (unit vector) ที่ชี้ไปยังดวงอาทิตย์ ( $\hat{s}$ ) นั้นมาจากการคำนวณสมการที่ 3.5 ในหัวข้อที่ 3.1 เรื่องการคำนวณตำแหน่งปรากฏของดวงอาทิตย์ โดยเวกเตอร์หนึ่งหน่วยที่ชี้ไปยังเป้า ( $\hat{i}$ ) จะได้มาจากตำแหน่งการติดตั้งของเฮลิโอสแตทแต่ละตัว จากนั้นเวกเตอร์หนึ่งหน่วยที่ตั้งฉากกับระนาบของกระจก ( $\hat{n}$ ) ที่จะทำให้เกิดการสะท้อนแสงไปตกกระทบบที่เป้าสามารถหาได้จากกฎการสะท้อนแสง คือมุมตกกระทบบของแสงบนกระจกจะเท่ากับมุมสะท้อนของแสงออกจากกระจกหรือเขียนในรูปสมการได้

$$\hat{n} = \frac{\hat{i} + \hat{s}}{|\hat{i} + \hat{s}|} \quad (3.6)$$

เวกเตอร์หนึ่งหน่วยที่ชี้ไปยังเป้า ( $\hat{t}$ ) หาได้จากสมการ

$$\hat{t} = [t_x, t_y, t_z] = \frac{t_p}{|t_p|} \quad (3.7n)$$

$$\text{ซึ่ง } t_p = [x_p, y_p, z_p] \quad (3.7ข)$$

โดย  $\hat{t}$  = เวกเตอร์หนึ่งหน่วยที่ชี้ไปยังเป้า

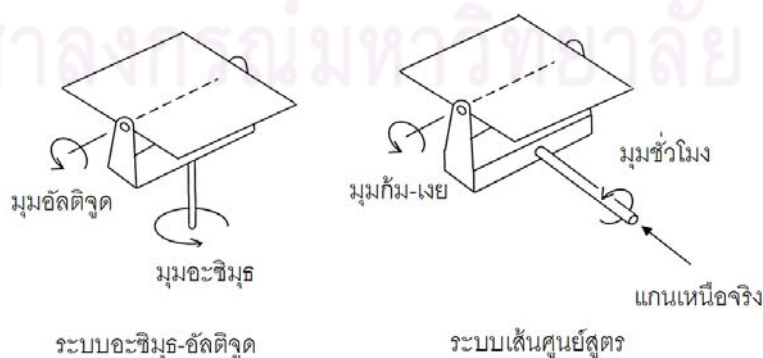
$t_p$  = เวกเตอร์ตำแหน่งของเป้าโดยเทียบจากตำแหน่ง เฮลิโอสแตท

$x_p$  = ระยะทาง(เมตร) จากตำแหน่งเฮลิโอสแตทถึงเป้า พิกัดแกน X ที่ไปทางทิศตะวันออก

$y_p$  = ระยะทาง(เมตร) จากตำแหน่งเฮลิโอสแตทถึงเป้า พิกัดแกน Y ที่ไปทางทิศเหนือ

$z_p$  = ระยะทาง(เมตร) จากตำแหน่งเฮลิโอสแตทถึงเป้า พิกัดแกน Z ที่ชี้ขึ้นข้างบน

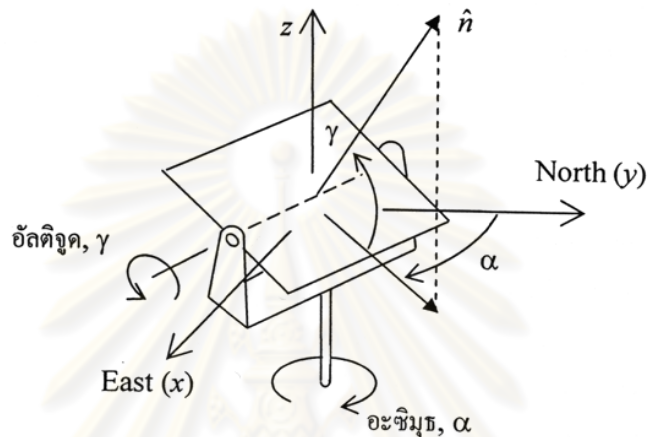
เมื่อทราบค่าเวกเตอร์หนึ่งหน่วยของกระจก ( $\hat{n}$ ) แล้วจะต้องมีระบบควบคุมในการปรับมุมกระจกให้ได้ตามที่ต้องการ โดยการปรับนั้นจะขึ้นอยู่กับรูปแบบของกลไกในการปรับกระจก รวมทั้งตำแหน่งและมุมการวางตัว (orientation) ของกระจกแต่ละตัว เทียบกับเป้า ในระบบทั่วๆไปนั้นการปรับมุมกระจกจะสามารถทำได้ในสองแฉกดังในรูปที่ 3.7 ในแบบแรกเป็นแบบ อะซิมุท-อัลติจูด ที่มีการปรับในแนวราบมุมอะซิมุท และในแนวระดับมุมอัลติจูด ซึ่งมีข้อดีคือสามารถสร้างได้ง่าย อีกแบบเป็นระบบเส้นศูนย์สูตร (equatorial) ซึ่งจำเป็นจะต้องติดตั้งให้แกนของมุมชั่วโมง (hour angle) นั้นตรงกับแกนเหนือจริง (celestial north) ข้อดีของระบบแบบนี้คือ การติดตามดวงอาทิตย์ในแต่ละวันนั้นสามารถทำได้โดยปรับเพียงแกนชั่วโมง แต่ข้อเสียคือผลิตได้ยากกว่า และเหมาะกับการติดตามดวงอาทิตย์เท่านั้น ไม่เหมาะในการใช้สะท้อนแสงอาทิตย์ไปยังตำแหน่งที่ต้องการเพราะการสะท้อนแสงจำเป็นต้องใช้การปรับสองแฉก



รูปที่ 3.7 รูปแบบการปรับมุมกระจก [7]

### 3.3 การคำนวณมุมการปรับแกนของเฮลิโอสแตท

เมื่อทราบค่า  $\hat{n}$  การคำนวณหาค่าตำแหน่งมุมต่างๆในระบบบกลไกการขับเคลื่อนนั้นจะสามารถทำได้ โดยใช้ทฤษฎีของสาขาวิชาวิศวกรรมหุ่นยนต์ที่เรียกว่า “Reverse kinematics” (Craig ค.ศ. 1989) [4] โดยพิจารณาระบบเฮลิโอสแตทแบบอะซิมูท-อัลติจูด ดังในรูปที่ 3.8 โดยสมมุติว่าไม่มีการผิดพลาดในการติดตั้งหรือความผิดพลาดในการผลิตเลย



รูปที่ 3.8 ค่ามุมต่างๆของระบบ อะซิมูท-อัลติจูด [7]

$$\text{จากสมการ } \hat{n} = [n_x, n_y, n_z] = [\cos(\gamma) \sin(\alpha), \cos(\gamma) \cos(\alpha), \sin(\gamma)] \quad (3.8)$$

โดยที่  $\hat{n}$  คือเวกเตอร์หนึ่งหน่วยของกระจก

ดังนั้นถ้ารู้ค่าเวกเตอร์หนึ่งหน่วยของกระจก จะสามารถหามุมอะซิมูทและอัลติจูดได้ ดังสมการ

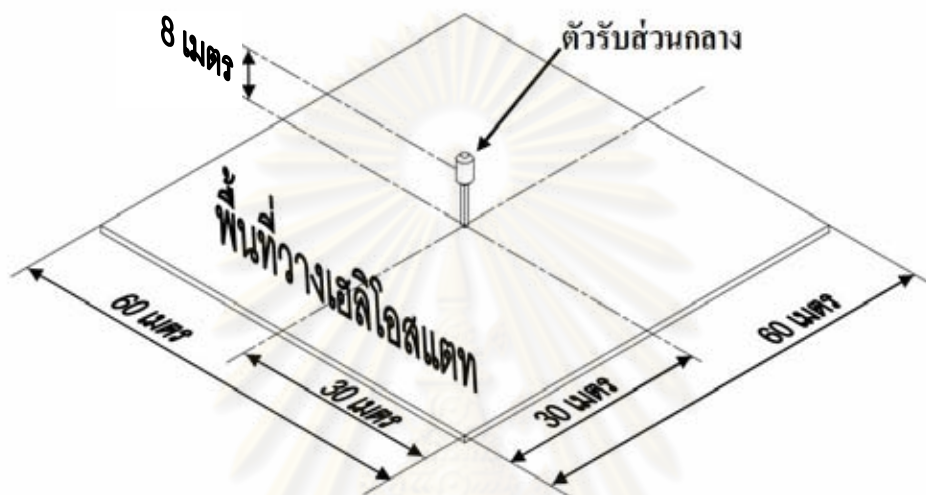
$$\gamma = \sin^{-1}(n_z) \quad (3.9)$$

$$\alpha = \sin^{-1}\left(\frac{n_x}{\cos(\gamma)}\right) = \cos^{-1}\left(\frac{n_y}{\cos(\gamma)}\right) \quad (3.10)$$

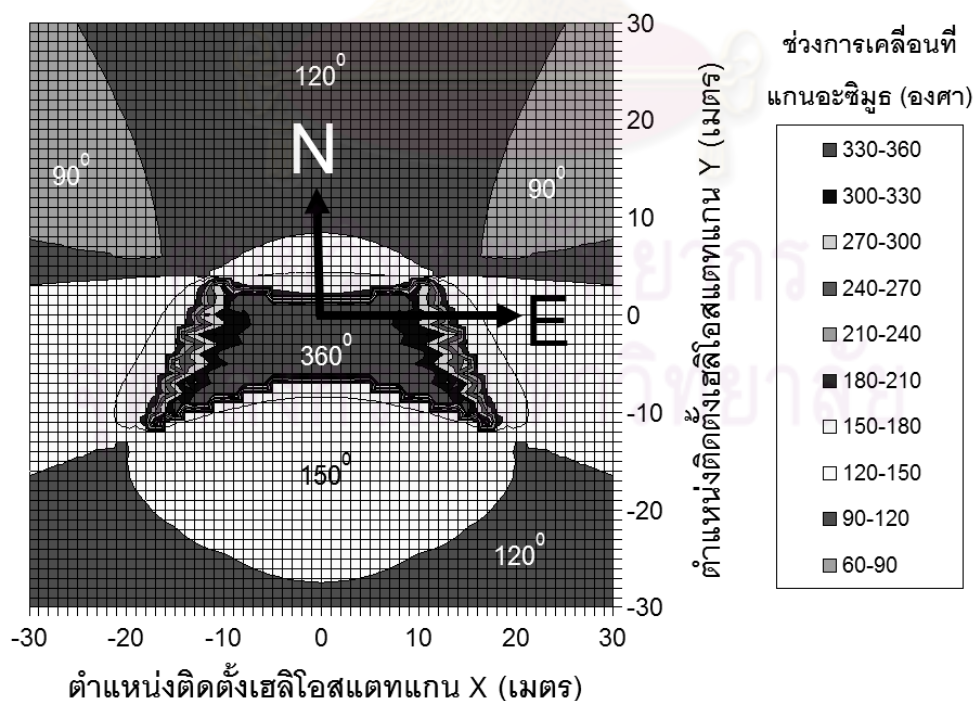
### 3.4 การจำลองช่วงการเคลื่อนที่ของเฮลิโอสแตท

ในหัวข้อนี้จะทำการจำลองการเคลื่อนที่ของเฮลิโอสแตทตลอดระยะเวลา 1 ปี หรือ 365 วัน เพื่อหาช่วงการเคลื่อนที่ของระบบขับเคลื่อนในแกนอะซิมูทและอัลติจูด โดยจะนำข้อมูลดังกล่าวมา

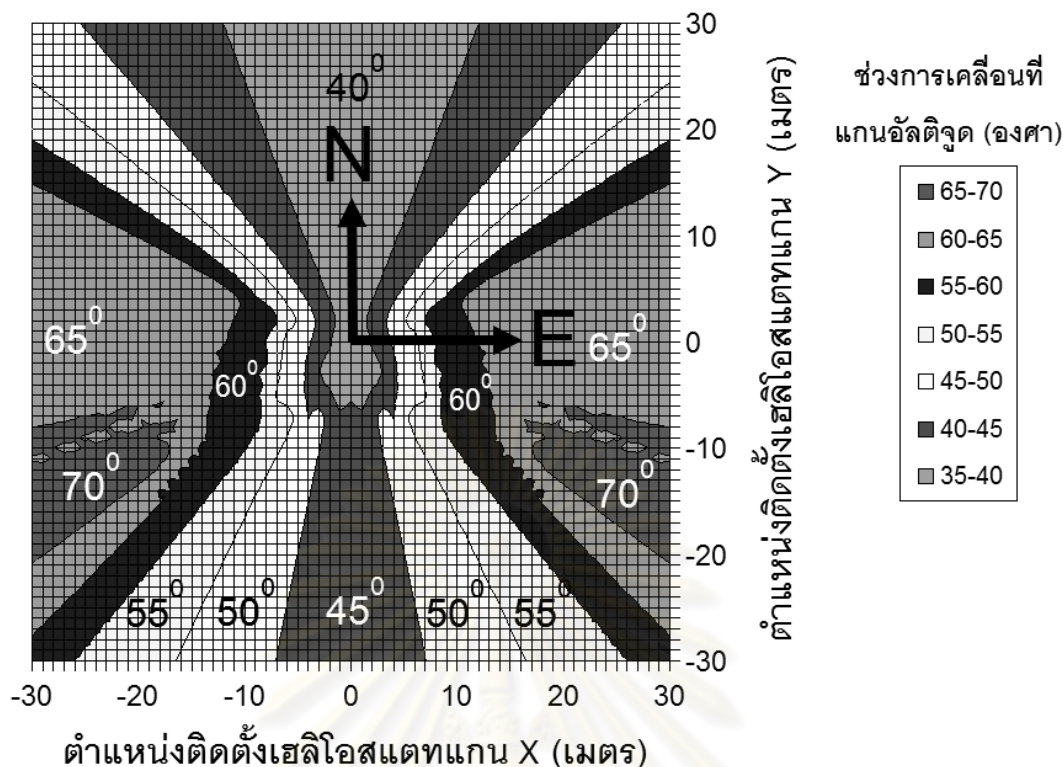
พิจารณาในการออกแบบระบบขับเคลื่อนต่อไป ระบบที่ทำการจำลองนั้นกำหนดให้เฮลิคอปเตอร์วางอยู่รอบๆตัวรับส่วนกลาง (central receiver) ในพื้นที่ 60 เมตร x 60 เมตร กำหนดให้ ตัวรับส่วนกลางมีความสูงจากพื้นดิน 8 เมตร ดังรูปที่ 3.9 ค่าละติจูดของตำแหน่งตัวรับส่วนกลางคือ 15 องศา (ละติจูดของประเทศไทย) โดยมีขอบเขตการคำนวณเริ่มเวลา 8.00 น. ถึง 16.00 น. ผลที่ได้จากการจำลองช่วงการเคลื่อนที่ของเฮลิคอปเตอร์แกนอะซิมุท แสดงดังรูปที่ 3.10 และแกนอัลติจูด แสดงดังรูปที่ 3.11 (ข้อมูลเพิ่มเติมอยู่ในภาคผนวก ค)



รูปที่ 3.9 พื้นที่วางเฮลิคอปเตอร์รอบตัวรับส่วนกลาง



รูปที่ 3.10 ช่วงการเคลื่อนที่ของเฮลิคอปเตอร์แกนอะซิมุทรอบๆตัวรับส่วนกลาง



รูปที่ 3.11 ช่วงการเคลื่อนที่ของเฮลิโอสแตทแกนอัลติจูดรอบๆตัวรับส่วนกลาง

จากผลการจำลองดังรูปที่ 3.11 จะเห็นได้ว่าการตั้งเฮลิโอสแตทในทิศเหนือและทิศใต้จะทำให้ช่วงการเคลื่อนที่ของเฮลิโอสแตทแกนอะซิมุทมีค่าน้อย อยู่ในช่วง 90-120 องศา และน้อยที่สุดในทิศตะวันออกเฉียงเหนือและทิศตะวันตกเฉียงเหนือในช่วง 60-90 องศา รูป 3.12 แสดงช่วงการเคลื่อนที่แกนอัลติจูดมีค่าน้อยในทิศเหนือและทิศใต้ โดยมีค่าอยู่ในช่วง 35-45 องศา แตกต่างจากการตั้งเฮลิโอสแตทในทิศตะวันออกและตะวันตกซึ่งจะทำให้เฮลิโอสแตทมีการเคลื่อนที่มากทั้งในแกนอะซิมุทและแกนอัลติจูด เพราะฉะนั้นหากต้องการออกแบบระบบขับเคลื่อนให้มีช่วงการเคลื่อนที่น้อยๆ ควรวางเฮลิโอสแตทในทิศเหนือและทิศใต้

### 3.5 สรุป

จากสมการการเคลื่อนที่ของดวงอาทิตย์และสมการการสะท้อนแสงของกระจกเฮลิโอสแตทสามารถนำมาจำลองการเคลื่อนที่ของเฮลิโอสแตทในรอบปีเพื่อหามุมการเคลื่อนที่สูงสุดได้ ซึ่งจากผลการจำลองโดยการกำหนดตัวรับส่วนกลางสูง 8 เมตร ตั้งบนประเทศไทย การวางเฮลิโอสแตทในทิศใต้จะส่งผลให้มุมการเคลื่อนที่ทั้งในแกนอะซิมุทและแกนอัลติจูดมีค่าน้อยที่สุด หากมีความจำเป็นต้องวางเฮลิโอสแตทรอบตัวรับส่วนกลาง การออกแบบระบบขับเคลื่อนในแกนอะซิมุท

จำเป็นต้องหมุนได้ 360 องศา แต่ลักษณะการหมุนคือหมุนแค่ 1 รอบ กลับไปกลับมาภายใน 360 องศา ส่วนระบบขับเคลื่อนในแกนอัลติจูด ไม่มีความจำเป็นที่จะต้องหมุนได้ 1 รอบ 360 องศา หมุนได้ 75 องศา ก็เพียงพอต่อการใช้งานในการสะท้อนแสงพระอาทิตย์ไปยังตัวรับส่วนกลางแล้ว



ศูนย์วิทยพัทยาการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

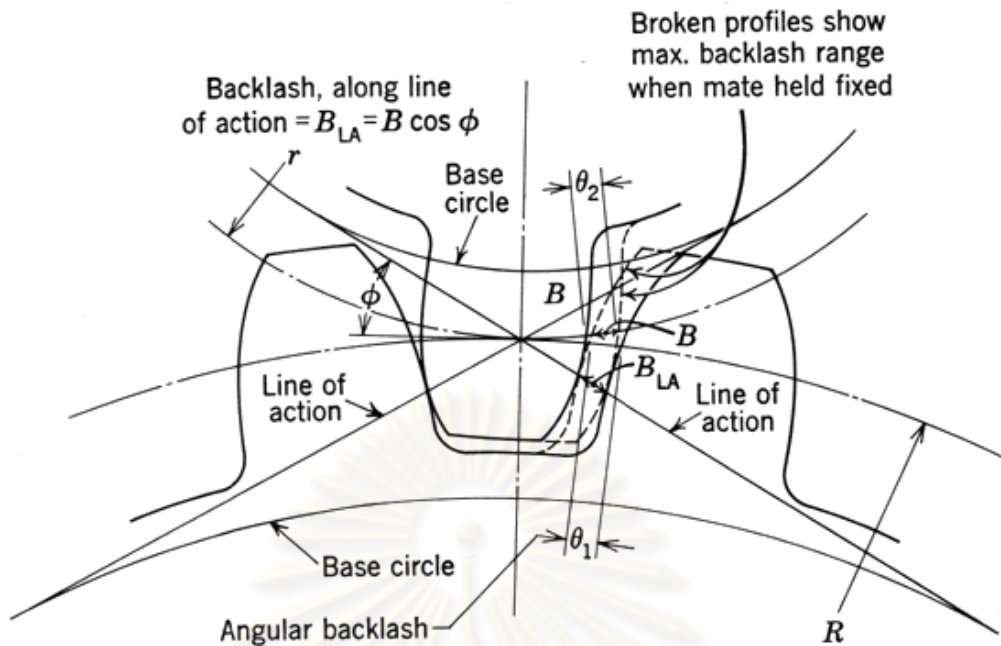
## บทที่ 4

### วิธีการลดความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นจากระบบขับเคลื่อนของเฮลิคอปเตอร์

เฟืองฟันตรง (spur gear) มีข้อดีตรงที่สามารถสร้างได้ง่ายและมีราคาไม่สูงมากนัก จึงเหมาะแก่การนำมาใช้ในการสร้างระบบส่งกำลังของเฮลิคอปเตอร์ แต่ระบบส่งกำลังของเฮลิคอปเตอร์นั้นจำเป็นต้องเป็นระบบที่มีความแม่นยำสูงมากเนื่องมาจากระยะห่างระหว่างเฮลิคอปเตอร์และตัวรับส่วนกลางมีระยะห่างหลายสิบเมตร ในบทนี้จึงศึกษาถึงความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นในการส่งกำลังด้วยเฟืองฟันตรง ซึ่งมีสาเหตุมาจากความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นจากระยะห่างระหว่างฟันที่ขบกัน (backlash error) และ ตำแหน่งการเคลื่อนที่ผิดพลาด (position error) ที่มีสาเหตุย่อยมาจากความผิดพลาดที่เกิดขึ้นระหว่างฟัน (tooth-to-tooth composite error, TTCE) และความผิดพลาดที่เกิดขึ้นจากจุดหมุนเยื้องศูนย์กลาง (runout position error) โดยจะพิจารณาว่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นจากสาเหตุต่างๆกันนั้นส่งผลกระทบต่ออย่างไรบ้าง และสามารถลดความคลาดเคลื่อนดังกล่าวได้มากน้อยเพียงไร

#### 4.1 ค่าความคลาดเคลื่อนแต่กำเนิดที่เกิดขึ้นในเฟือง

ในการส่งกำลังด้วยชุดเฟืองนั้นตำแหน่งมุมของเฟืองตามจะไม่เท่ากับตำแหน่งมุมเฟืองขับ (พิจารณาอัตราทดของชุดเฟืองร่วมด้วยแล้ว) ซึ่งเป็นผลมาจากคลาดเคลื่อนแต่กำเนิดของเฟือง โดยความคลาดเคลื่อนดังกล่าวเป็นสิ่งที่เกิดขึ้นเสมอ ไม่สามารถหลีกเลี่ยงได้ สามารถแบ่งสาเหตุได้เป็น 2 ชนิดหลักๆ คือ ความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นจากระยะห่างระหว่างฟันที่ขบกัน (backlash error) และ ตำแหน่งการเคลื่อนที่ผิดพลาด (position error) โดย ความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นจากรยะห่างระหว่างฟันที่ขบกัน ดังรูปที่ 4.1 เป็นค่าความผิดพลาดของการเคลื่อนที่ที่สูญเสียไปเนื่องจากการหมุนกลับทิศทาง เพราะเมื่อหมุนกลับทิศทางจะมีระยะห่างระหว่างฟันเกิดขึ้น ส่วนตำแหน่งการเคลื่อนที่ผิดพลาดนั้นเกิดขึ้นเมื่อมีตำแหน่งผิดพลาดในการส่งกำลัง ถึงแม้ว่าค่าความผิดพลาดทั้ง 2 แบบจะไม่สามารถแยกออกจากกันได้อย่างเด็ดขาด แต่ก็ยังมีความแตกต่างกัน เป็นอิสระต่อกัน และเกิดขึ้นจากสาเหตุที่แตกต่างกัน



รูปที่ 4.1 การวัดความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นจากระยะห่างระหว่างฟันที่ขบกันในรูปแบบต่างๆ [5]

จากรูปที่ 4.1  $B$  = ระยะห่างระหว่างฟัน (backlash) ที่วัดในแนววงกลมพิตช์

$\phi$  = มุมส่งกำลัง (pressure angle)

$B_{LA}$  = ระยะห่างระหว่างฟัน ที่วัดในแกนของมุมส่งกำลัง

$R$  = รัศมีพิตช์ (pitch radius)

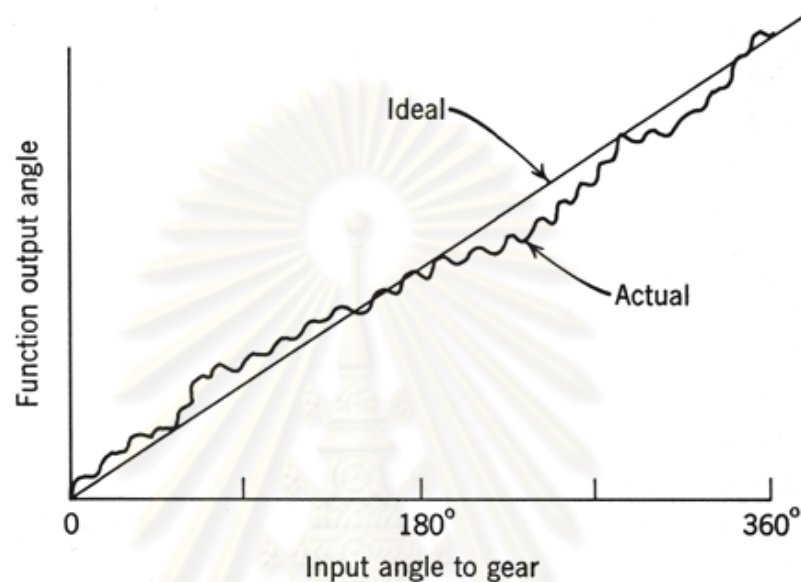
ในบทนี้จะยังไม่พิจารณาผลจากความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นจากระยะห่างระหว่างฟันที่ขบกัน (backlash error) เนื่องจากเวลาพิจารณาค่าความผิดพลาดของเฟือง จะกำหนดให้การส่งกำลังของเฟือง เป็นไปในทิศทางเดียว นั่นคือไม่มีการหมุนกลับทิศทาง ซึ่งผลจากความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นจากระยะห่างระหว่างฟันที่ขบกันจะเกิดก็ต่อเมื่อทำการหมุนกลับทิศทาง โดยจะคิดเพียงผลของตำแหน่งการเคลื่อนที่ผิดพลาดแต่เพียงตัวเดียว

#### 4.2 ตำแหน่งการเคลื่อนที่ผิดพลาด

ในการส่งกำลังด้วยชุดเฟืองนั้นตำแหน่งมุมเฟืองตามจะไม่เป็นไปตามอัตราทดของชุดเฟือง เนื่องจากมีตำแหน่งการเคลื่อนที่ผิดพลาดเกิดขึ้น ซึ่งเป็นผลมาจากความผิดพลาดที่เกิดขึ้นระหว่างฟัน (tooth-to-tooth composite error, TTCE) อักษรย่อคือ  $E_{tt}$  และความผิดพลาดที่



เกิดขึ้นจากจุดหมุนเยื้องศูนย์กลาง (runout position error) อักษรย่อคือ  $e$  ความผิดพลาดทั้งสองนี้สามารถรวมกันให้อยู่ในรูปผลรวมของความผิดพลาด (total composite error, TCE) อักษรย่อคือ  $E_{tc}$  โดยจะส่งผลให้เกิดความผิดพลาดในการเคลื่อนที่ของเฟืองดังรูปที่ 4.2 ซึ่งจะเห็นได้ว่าการส่งกำลังจริงที่มีความผิดพลาดเกิดขึ้นนั้นจะมีค่าไม่เท่ากับการส่งกำลังตามอุดมคติ โดยความผิดพลาดแต่ละส่วนที่กล่าวมามีรายละเอียดดังต่อไปนี้



รูปที่ 4.2 ความคลาดเคลื่อนของเฟืองที่เกิดขึ้นจริงเทียบกับการเคลื่อนที่ในอุดมคติ [5]

#### 4.2.1 ความผิดพลาดที่เกิดขึ้นระหว่างฟัน

ความผิดพลาดที่เกิดขึ้นระหว่างฟันนั้นเป็นผลรวมของความผิดพลาดที่เกิดขึ้นจากการผลิตซึ่งทำให้รูปร่างของฟันเฟืองไม่ได้มาตรฐาน ตำแหน่งของฟันไม่ได้มาตรฐาน และความหนาของฟันไม่ได้มาตรฐาน ความผิดพลาดนี้จะมีค่าไม่แน่นอนในแต่ละฟันของเฟือง ความผิดพลาดส่วนนี้แทนด้วยสัญลักษณ์  $E_f$  ซึ่งสามารถหาค่าประมาณได้จากตารางที่ 4.1 ตารางดังกล่าวจะแสดงความผิดพลาดของเฟืองเกรดต่างๆตามมาตรฐานแอกม่า (AGMA, American Gear Manufacturers Association) โดยเฟืองยังมีเกรดสูง (AGMA Quality No.) ความละเอียดและราคาก็จะยิ่งสูงตามไปด้วย

ตารางที่ 4.1 ความผิดพลาดของเฟืองเกเรตต่างๆตามมาตรฐานของ AGMA [5]

AGMA Quality No.	Number of Teeth & Pitch Diameter	Diameter Pitch Range	TTCE ( $E_{tt}$ )	TCE ( $E_p$ )
5	Up to 20 teeth inclusive	20 to 80	0.0037	0.0052
	Over 20 teeth, up to 1.999"	20 to 32	0.0027	0.0052
	Over 20 teeth, 2" to 3.999"	20 to 24	0.0027	0.0061
	Over 20 teeth, 4" and over	20 to 24	0.0027	0.0072
6	Up to 20 teeth inclusive	20 to 200	0.0027	0.0037
	Over 20 teeth, up to 1.999"	20 to 48	0.0019	0.0037
	Over 20 teeth, 2" to 3.999"	20 to 32	0.0019	0.0044
	Over 20 teeth, 4" and over	20 to 24	0.0019	0.0052
7	Up to 20 teeth inclusive	20 to 200	0.0019	0.0027
	Over 20 teeth, up to 1.999"	20 to 200	0.0014	0.0027
	Over 20 teeth, 2" to 3.999"	20 to 48	0.0014	0.0032
	Over 20 teeth, 4" and over	20 to 40	0.0014	0.0037
8	Up to 20 teeth inclusive	20 to 200	0.0014	0.0019
	Over 20 teeth, up to 1.999"	20 to 200	0.0010	0.0019
	Over 20 teeth, 2" to 3.999"	20 to 100	0.0010	0.0023
	Over 20 teeth, 4" and over	20 to 64	0.0010	0.0027
9	Up to 20 teeth inclusive	20 to 200	0.0010	0.0014
	Over 20 teeth, up to 1.999"	20 to 200	0.0007	0.0014
	Over 20 teeth, 2" to 3.999"	20 to 200	0.0007	0.0016
	Over 20 teeth, 4" and over	20 to 120	0.0007	0.0019
10	Up to 20 teeth inclusive	20 to 200	0.0007	0.0010
	Over 20 teeth, up to 1.999"	20 to 200	0.0005	0.0010
	Over 20 teeth, 2" to 3.999"	20 to 200	0.0005	0.0012
	Over 20 teeth, 4" and over	20 to 200	0.0005	0.0014
11	Up to 20 teeth inclusive	20 to 200	0.0005	0.0007
	Over 20 teeth, up to 1.999"	20 to 200	0.0004	0.0007
	Over 20 teeth, 2" to 3.999"	20 to 200	0.0004	0.0009
	Over 20 teeth, 4" and over	20 to 200	0.0004	0.0010
12	Up to 20 teeth inclusive	20 to 200	0.0004	0.0005
	Over 20 teeth, up to 1.999"	20 to 200	0.0003	0.0005
	Over 20 teeth, 2" to 3.999"	20 to 200	0.0003	0.0006
	Over 20 teeth, 4" and over	20 to 200	0.0003	0.0007

ความผิดพลาดที่เกิดขึ้นระหว่างฟันนี้สามารถประมาณค่าให้อยู่ในรูปแบบของคลื่นรูปไซน์ (sine wave) โดยพิจารณาให้อยู่ในรูปของพิกัดมุมได้จากสมการ

$${}_a E_{tt} = \frac{E_{tt}}{R} \sin(\theta.n) \quad (4.1)$$

โดย  ${}_a E_{tt}$  = ความผิดพลาดที่เกิดขึ้นระหว่างฟันในพิกัดมุม (องศา)

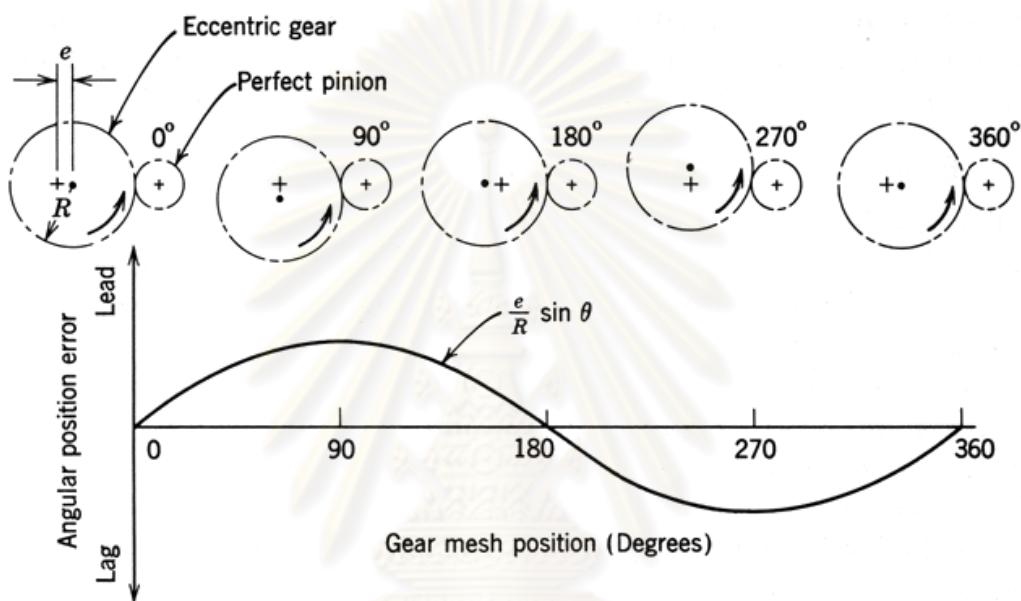
$E_{tt}$  = ความผิดพลาดที่เกิดขึ้นระหว่างฟัน (นิ้ว) หาได้จากตาราง 4.1

$R$  = รัศมีพิตช์ (นิ้ว),  $\theta$  = มุมที่หมุนไปของเฟือง (องศา)

$n$  = จำนวนฟันของเฟือง

#### 4.2.2 ความผิดพลาดที่เกิดขึ้นจากจุดหมุนเยื้องศูนย์กลาง

เฟืองที่ได้จากการผลิตนั้นตำแหน่งจุดหมุนจะมีความคลาดเคลื่อนไปจากตำแหน่งศูนย์กลางเฟืองเล็กน้อย เมื่อมีการส่งกำลังจะเกิดความคลาดเคลื่อนในการหมุนเยื้องศูนย์กลาง ซึ่งส่งผลให้มุมที่ได้จากการส่งกำลังมีตำแหน่งคลาดเคลื่อนไป โดยความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นนี้มีค่าขึ้นอยู่กับตำแหน่งจุดหมุนจริงของเฟืองเทียบกับองศาในการหมุนส่งกำลัง รูปที่ 4.3 แสดงความผิดพลาดในการส่งกำลังเทียบกับตำแหน่งจุดหมุนจริงของเฟืองโดยอักษรย่อ  $e$  คือความคลาดเคลื่อนในการหมุนเยื้องศูนย์กลาง



รูปที่ 4.3 การวางตัวและความผิดพลาดที่เกิดขึ้นจากจุดหมุนเยื้องศูนย์กลาง [5]

ความผิดพลาดที่เกิดขึ้นจากจุดหมุนเยื้องศูนย์กลางนี้สามารถหาได้จาก

$$E_{tc} = E_t + e \quad (4.2)$$

โดยค่า  $e$  หาได้จากสมการ  $e = E_{tc} - E_t \quad (4.3)$

จากสมการ 4.3 ค่า  $E_{tc}$  และ  $E_t$  สามารถหาได้จากตาราง 4.1 ซึ่งสามารถคำนวณความผิดพลาดที่เกิดขึ้นจากจุดหมุนเยื้องศูนย์กลางให้อยู่ในพิสัยมุมได้จากสมการ

$${}_a E_p = \frac{e}{R} \sin(\theta) \quad (4.4)$$

จากสมการ 4.4  ${}_a E_p$  = ความผิดพลาดที่เกิดขึ้นจากจุดหมุนเยื้องศูนย์กลางในพิกัดมุม (องศา)

$E_{tt}$  = ความผิดพลาดที่เกิดจากจุดหมุนเยื้องศูนย์กลาง (นิ้ว) หากจากสมการ 4.3

$R$  = รัศมีพิทช์ (นิ้ว)

$\theta$  = มุมที่หมุนไปของเฟือง (องศา)

สามารถหาความผิดพลาดรวม (TCE) ที่เกิดขึ้นในการเคลื่อนที่ของเฟืองให้อยู่ในพิกัดของมุมได้จากสมการ

$${}_a E_{tc} = {}_a E_{tt} + {}_a E_p \quad (4.5)$$

จากสมการที่ 4.5  ${}_a E_{tc}$  = ความผิดพลาดรวมที่เกิดขึ้น (องศา)

${}_a E_{tt}$  = ความผิดพลาดที่เกิดขึ้นระหว่างฟัน (องศา) หากจากสมการ 4.1

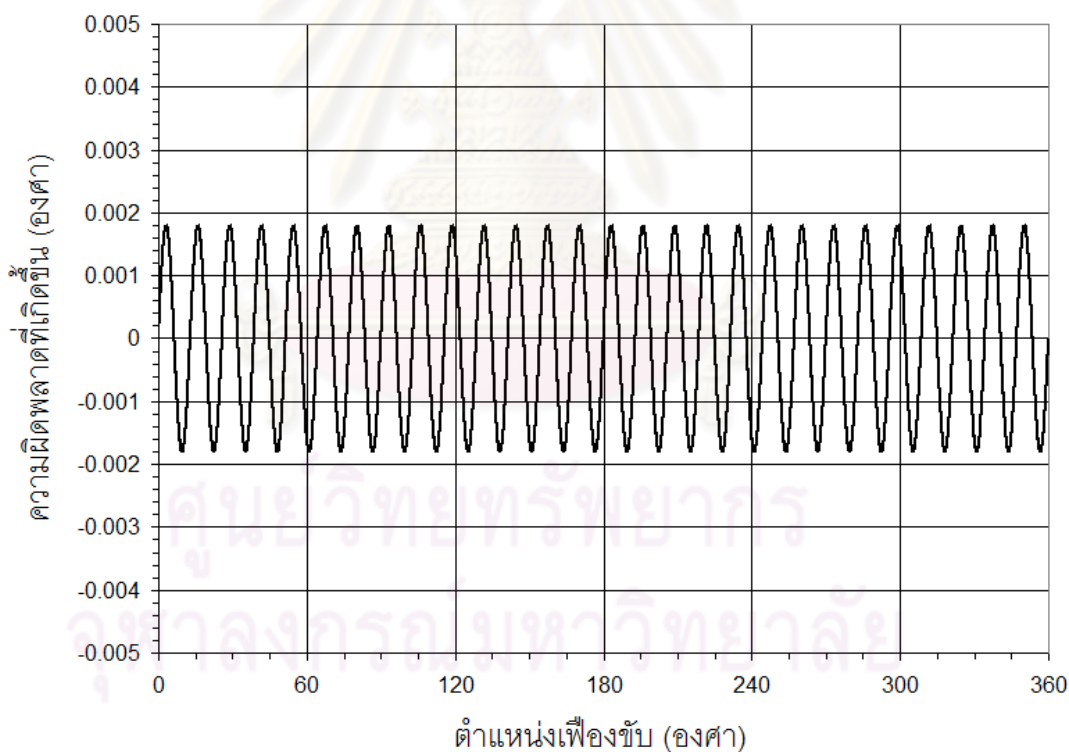
${}_a E_p$  = ความผิดพลาดที่เกิดขึ้นจากจุดหมุนเยื้องศูนย์กลาง (องศา) หากจากสมการ 4.4

### 4.3 สรุปสาเหตุความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นในการส่งกำลังของระบบเฟือง

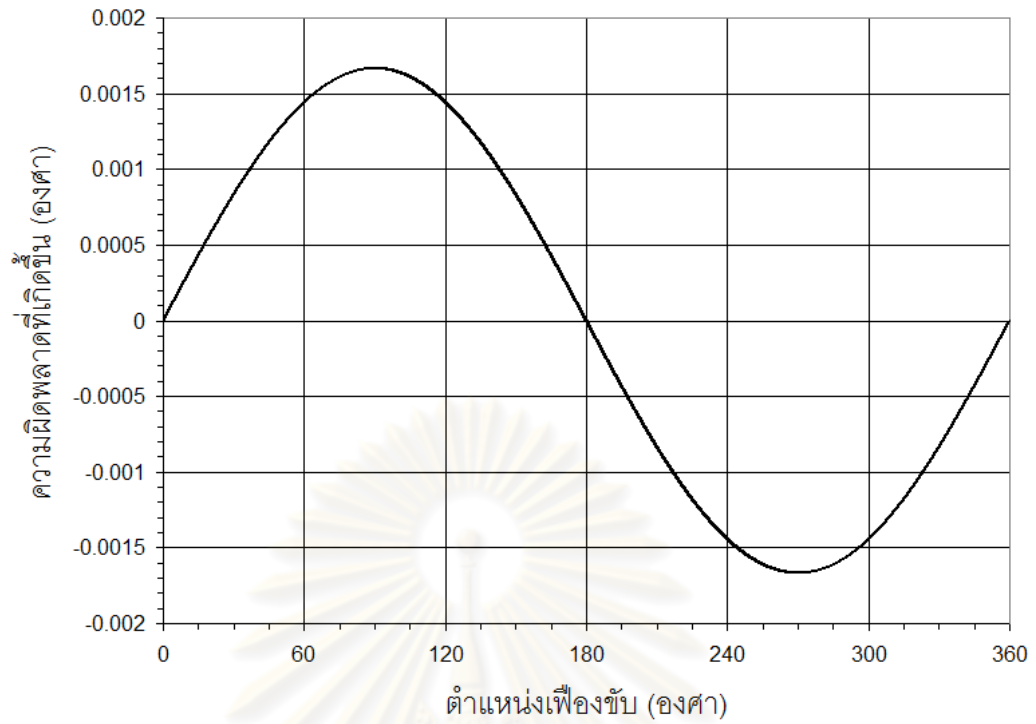
ความคลาดเคลื่อนแต่กำเนิดของเฟืองแบ่งออกได้เป็น 2 สาเหตุ คือ ความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นจากระยะห่างระหว่างฟันที่ขบกัน และ ความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากตำแหน่งการเคลื่อนที่ผิดพลาด ในบทนี้จะไม่พิจารณาผลของความผิดพลาดที่เกิดขึ้นจากระยะห่างระหว่างฟันที่ขบกัน (backlash) เพราะสามารถยับยั้งผลจากความผิดพลาดดังกล่าวได้โดยการส่งกำลังในทิศทางเดียว จึงจะพิจารณาเพียงผลของตำแหน่งการเคลื่อนที่ผิดพลาด ซึ่งความผิดพลาดดังกล่าวแบ่งย่อยออกไปได้อีก 2 สาเหตุได้แก่ความผิดพลาดที่เกิดขึ้นระหว่างฟันและความผิดพลาดที่เกิดขึ้นจากจุดหมุนเยื้องศูนย์กลาง จากสมการความผิดพลาด สามารถนำไปจำลองความผิดพลาดที่เกิดขึ้นในระบบส่งกำลัง เพื่อทดสอบการแก้ไขความผิดพลาดด้วยวิธีต่างๆ และวิเคราะห์ความผิดพลาดที่เกิดขึ้นจริงในระบบเฟืองว่าเกิดจากสาเหตุใด ซึ่งอยู่ในหัวข้อถัดไป

#### 4.4 การจำลองความผิดพลาดที่เกิดขึ้นจากเฟืองฟันตรง

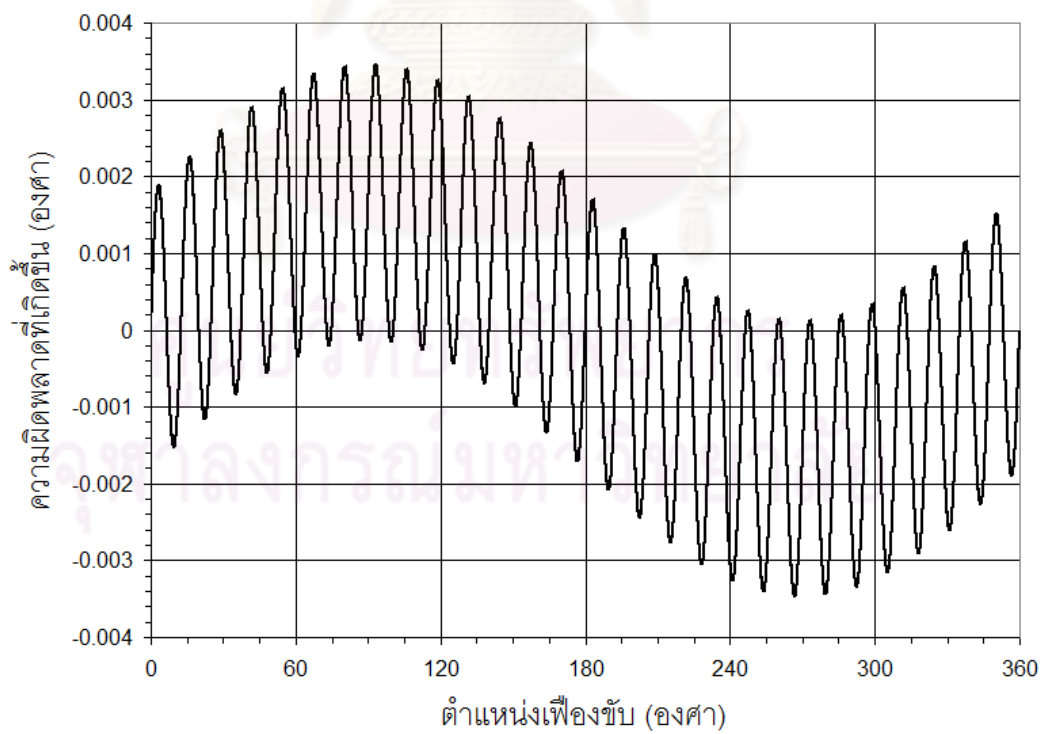
ในหัวข้อนี้จะทำการจำลองความผิดพลาดที่เกิดขึ้นจากการส่งกำลังด้วยเฟืองฟันตรงเพื่อนำค่าที่ได้ไปทดสอบการลดความผิดพลาดโดยการจำลองความผิดพลาดไว้ก่อน(หัวข้อ4.5) กำหนดให้เฟืองมีจำนวนฟันเท่ากับ 28 ฟัน และมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางพิตซ์ 1.5 นิ้ว เป็นเฟืองตามมาตรฐาน AGMA Quality No. 5 จากตาราง 4.1 มีค่า  $E_{\prime\prime} = 2.7 \times 10^{-3}$  นิ้ว,  $E_p = 5.2 \times 10^{-3}$  นิ้ว จากนั้นสามารถคำนวณหาความผิดพลาดที่เกิดขึ้นจากสมการต่างๆในหัวข้อที่ 4.2 โดยรูปที่ 4.4 แสดงความผิดพลาดที่เกิดขึ้นระหว่างฟัน (TTCE) ซึ่งมีความผิดพลาดเกิดขึ้นอยู่ในช่วง  $\pm 1.800 \times 10^{-3}$  องศา คิดเป็นค่ารากเฉลี่ยกำลังสอง (Root Mean Square, RMS)  $1.273 \times 10^{-3}$  องศา รูปที่ 4.5 แสดงความผิดพลาดที่เกิดขึ้นจากจุดหมุนเยื้องศูนย์กลาง (runout error) ซึ่งมีความผิดพลาดเกิดขึ้นอยู่ในช่วง  $\pm 1.667 \times 10^{-3}$  องศา คิดเป็นค่ารากเฉลี่ยกำลังสองอยู่ที่  $1.179 \times 10^{-3}$  องศา และรูปที่ 4.6 แสดงความผิดพลาดรวม(TCE) มีค่าอยู่ในช่วง  $\pm 3.464 \times 10^{-3}$  องศา คิดเป็นค่ารากเฉลี่ยกำลังสองอยู่ที่  $1.735 \times 10^{-3}$  องศา



รูปที่ 4.4 ผลการจำลองความผิดพลาดที่เกิดขึ้นระหว่างฟัน



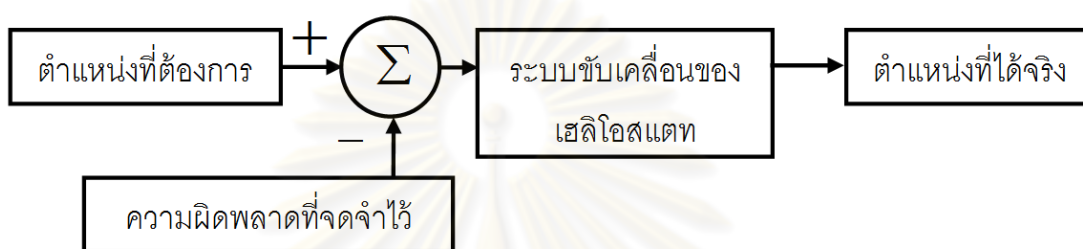
รูปที่ 4.5 ผลการจำลองความผิดพลาดที่เกิดขึ้นจากจุดหมุนเยื้องศูนย์กลาง



รูปที่ 4.6 ผลการจำลองความผิดพลาดรวมที่เกิดขึ้นในการส่งกำลังด้วยเฟืองฟันตรง

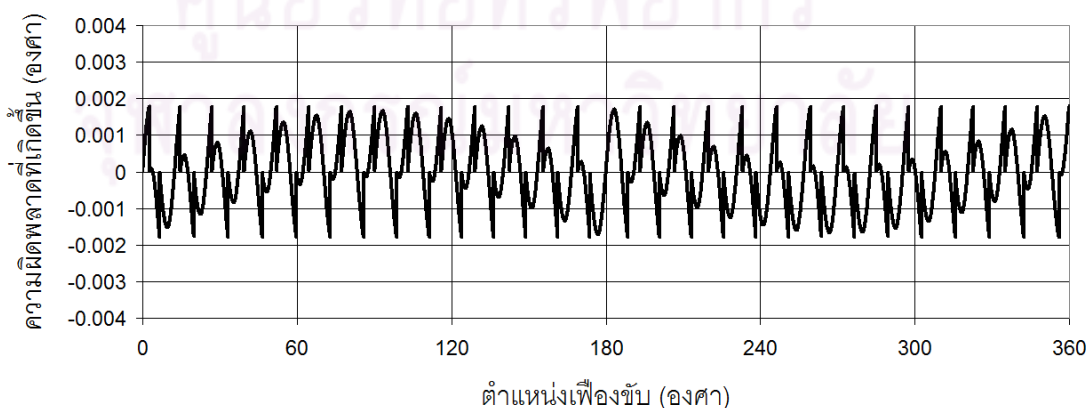
#### 4.5 การจำลองการแก้ไขความผิดพลาดที่เกิดขึ้นในเฟืองฟันตรง

ในหัวข้อนี้จะทำการแก้ไขความผิดพลาดที่เกิดขึ้นในเฟืองฟันตรง โดยการทำการจดจำความผิดพลาดที่เกิดขึ้นจากการส่งกำลังด้วยเฟืองไว้ก่อน (ในการจำลองนี้ความผิดพลาดที่เกิดขึ้นดังกล่าวหาได้จากการคำนวณในหัวข้อที่ 4.4) เมื่อทำการขับเคลื่อนจึงนำเอาความผิดพลาดที่จดจำไว้ดังกล่าวมาพิจารณาาร่วมด้วย [6] เพื่อหาตำแหน่งขับเคลื่อนที่มีความผิดพลาดเกิดขึ้นน้อยที่สุด ดังแสดงในรูปที่ 4.7

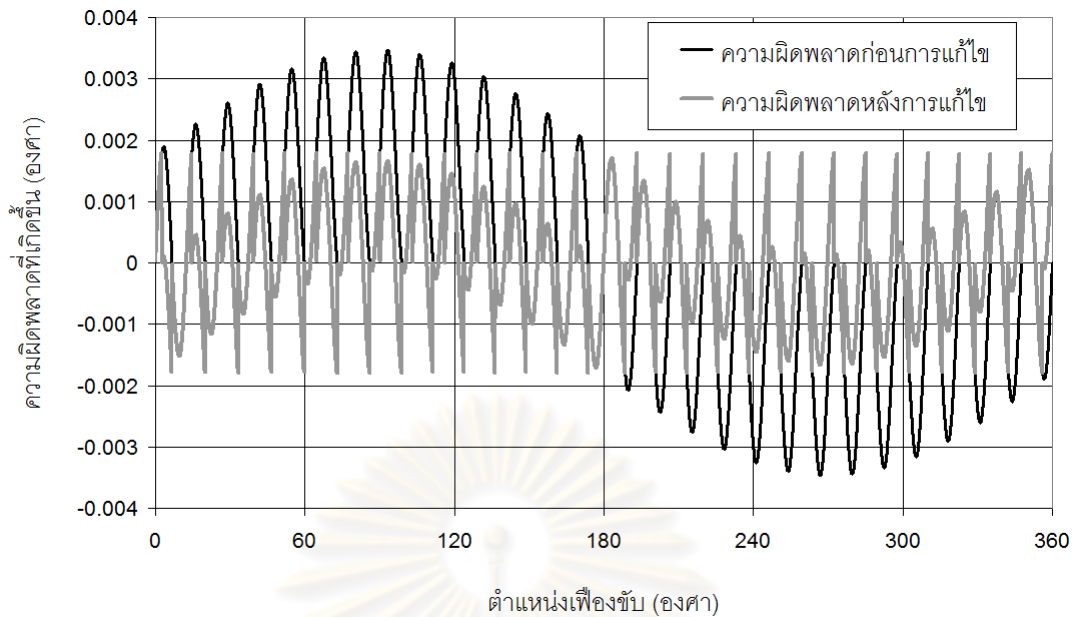


รูปที่ 4.7 วิธีการลดความผิดพลาดที่เกิดขึ้นในเฟือง

จากนั้นได้ทำการจำลองผลที่ได้จากการแก้ไขความผิดพลาด โดยกำหนดให้ระบบขับเคลื่อนเฟืองเป็นการขับเคลื่อนแบบลำดับขั้น (Step) มีความละเอียด 100,000 ขึ้นต่อการหมุนเฟือง 1 รอบ หรือคิดเป็นความละเอียดในการขับเคลื่อนแต่ละลำดับขั้นมีค่า  $3.600 \times 10^{-3}$  องศา โดยได้ผลการจำลองดังรูปที่ 4.8 โดยความผิดพลาดหลังการแก้ไขมีค่าอยู่ในช่วง  $\pm 1.800 \times 10^{-3}$  องศา คิดเป็นค่ารากเฉลี่ยกำลังสอง  $0.932 \times 10^{-3}$  องศา ซึ่งเมื่อนำมาเปรียบเทียบกับความผิดพลาดก่อนการแก้ไขในรูป 4.9 ซึ่งมีความผิดพลาดอยู่ในช่วง  $\pm 3.464 \times 10^{-3}$  องศา คิดเป็นค่ารากเฉลี่ยกำลังสองอยู่ที่  $1.735 \times 10^{-3}$  องศา มีค่าลดลงถึง 1.862 เท่า



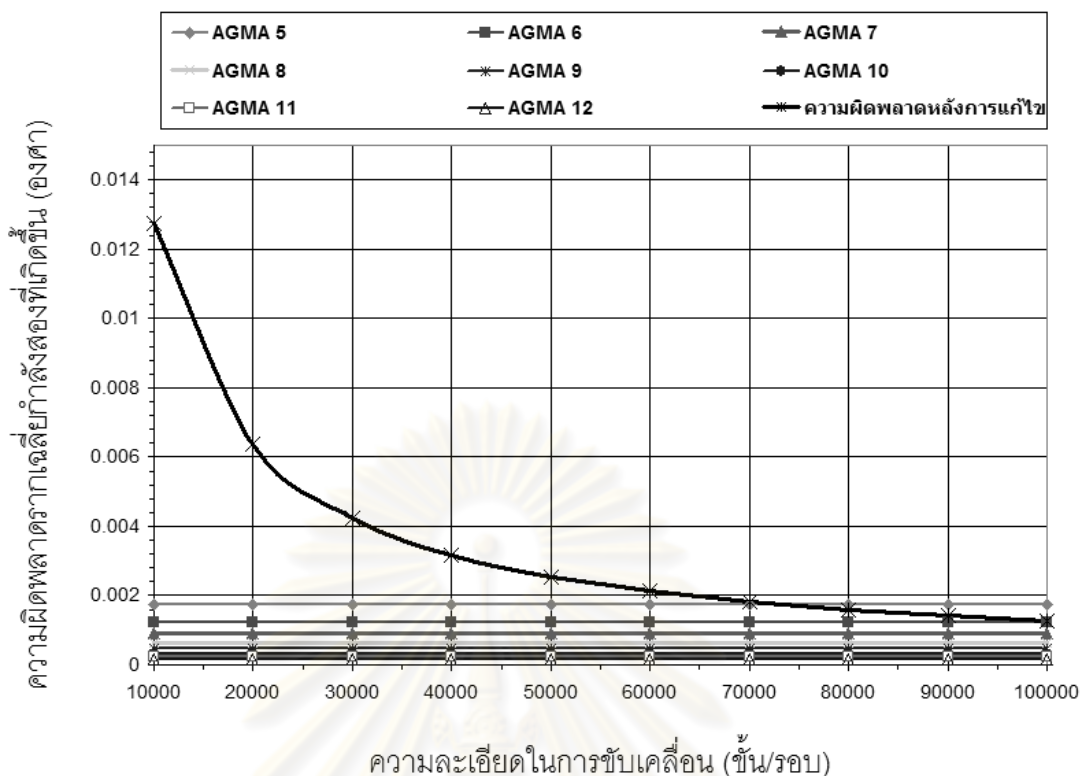
รูปที่ 4.8 ผลการจำลองความผิดพลาดหลังการแก้ไขด้วยวิธีการจำความผิดพลาดไว้ก่อน



รูปที่ 4.9 ผลการจำลองความผิดพลาดหลังการแก้ไขโดยระบบมีความละเอียดในการขับเคลื่อนชั้นละ  $3.6 \times 10^{-3}$  องศา

ทำการสร้างกราฟจำลองความผิดพลาด RMS ของเพ็อง AGMA เบอร์ 5 – 12 (กำหนดให้เพ็องมีจำนวนฟันเท่ากับ 28 ฟัน มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางพิตช์ 1.5 นิ้ว) เพื่อเปรียบเทียบความผิดพลาดหลังการแก้ไขโดยกำหนดให้ระบบขับเคลื่อนมีความละเอียดตั้งแต่ 20,000 – 100,000 ชั้นต่อการหมุนเพ็องขับ 1 รอบ คำนวณเพิ่มขึ้นทีละ 10,000 ชั้น ได้ผลการจำลองดังรูปที่ 4.10 ซึ่งจะเห็นได้ว่าความผิดพลาด RMS หลังการแก้ไขนั้นขึ้นอยู่กับความละเอียดของระบบขับเคลื่อนโดยยิ่งระบบขับเคลื่อนมีความละเอียดมากความผิดพลาดหลังการแก้ไขก็ยิ่งมีค่าน้อยลง ข้อมูลดังกล่าวสามารถใช้เป็นแนวทางในการเลือกความละเอียดของระบบขับเคลื่อนให้เหมาะสมกับเกรดของเพ็องและความละเอียดที่ต้องการได้ ยกตัวอย่างเช่น หากระบบส่งกำลังใช้เพ็อง AGMA 5 เพ็องมีจำนวนฟันเท่ากับ 28 ฟัน และมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางพิตช์ 1.5 นิ้ว ต้องการลดความผิดพลาด RMS ให้มีค่าไม่เกิน  $1.500 \times 10^{-3}$  องศา จากรูปที่ 4.10 เพ็อง AGMA เบอร์ 5 มีความผิดพลาด RMS อยู่ที่  $1.735 \times 10^{-3}$  องศา หากต้องการให้ความผิดพลาดรากเฉลี่ยกำลังสองหลังการแก้ไขมีค่าน้อยกว่า  $1.500 \times 10^{-3}$  องศา ควรเลือกระบบขับเคลื่อนให้มีความละเอียดมากกว่า 90,000 ชั้นต่อการหมุนเพ็องขับ 1 รอบ อย่างไรก็ตามความผิดพลาดที่แสดงให้เห็นในรูปที่ 4.10 นั้นเป็นเพียงความผิดพลาดที่เกิดจากเพ็องเท่านั้น ในการนำระบบเพ็องไปใช้ในการส่งกำลังจริง จะมีความผิดพลาดจากการติดตั้งรวมเข้าไปด้วย ซึ่งส่งผลให้ความผิดพลาดหลังจากการส่งกำลังมีค่าเพิ่มขึ้นมาก แต่ยังคงสามารถแก้ไขความผิดพลาดดังกล่าวไปพร้อมกับความผิดพลาดที่เกิดขึ้นจากเพ็องได้ด้วยวิธีการจำลองความผิดพลาดที่เกิดขึ้นไว้ทั้งหมดซึ่งจะแสดงในบทถัดไป





รูปที่ 4.10 ความผิดพลาดรากลูเลียดังสองก่อนและหลังการแก้ไขของเฟือง AGMA เบอร์ 5 - 12

#### 4.6 สรุปผลการจำลอง

จากผลการจำลองความผิดพลาดที่เกิดขึ้นในเฟืองฟันตรงนั้น สามารถแก้ไขความผิดพลาดที่เกิดขึ้นได้โดยการจำลองความผิดพลาดทั้งหมดที่เกิดขึ้นในการหมุนเฟืองไว้ก่อน จากนั้นเมื่อต้องการให้เฟืองหมุนไปในตำแหน่งที่ต้องการก็นำความผิดพลาด ณ ตำแหน่งนั้นที่บันทึกไว้ก่อนหน้านี้มาพิจารณาหาตำแหน่งที่เหมาะสมที่สุดที่เคลื่อนที่ไปแล้วจะทำให้เกิดความผิดพลาดน้อยที่สุด โดยความสามารถในการลดความผิดพลาดนี้ขึ้นอยู่กับความละเอียดของระบบขับเคลื่อน หากระบบมีความละเอียดมากก็จะส่งผลให้การขับเคลื่อนสามารถเลื่อนไปยังตำแหน่งที่เกิดความผิดพลาดน้อยที่สุดได้ไกลมากกว่า ทำให้ความผิดพลาดที่เกิดขึ้นมีค่าน้อย การจำลองความผิดพลาดที่เกิดขึ้นนั้นไม่จำเป็นต้องจำลองครบ 360 องศาของเฟืองส่งกำลัง โดยสามารถเลือกจำลองเฉพาะในช่วงการเคลื่อนที่จริงของเฮลิโอสแตทได้ โดยข้อมูลที่ใช้งานจริงได้จากบทที่ 3 หัวข้อที่ 3.4 เพื่อลดขนาดของข้อมูลความผิดพลาดที่ต้องเก็บไว้ให้น้อยที่สุด เพื่อให้ง่ายแก่การออกแบบชุดควบคุมระบบขับเคลื่อนของเฮลิโอสแตท เพราะในการสร้างเตาเผาสุริยะอุณหภูมิสูงนั้น ต้องสร้างเฮลิโอสแตทเพื่อใช้ในการรวมแสงเป็นจำนวนหลายพันตัวเลยทีเดียว

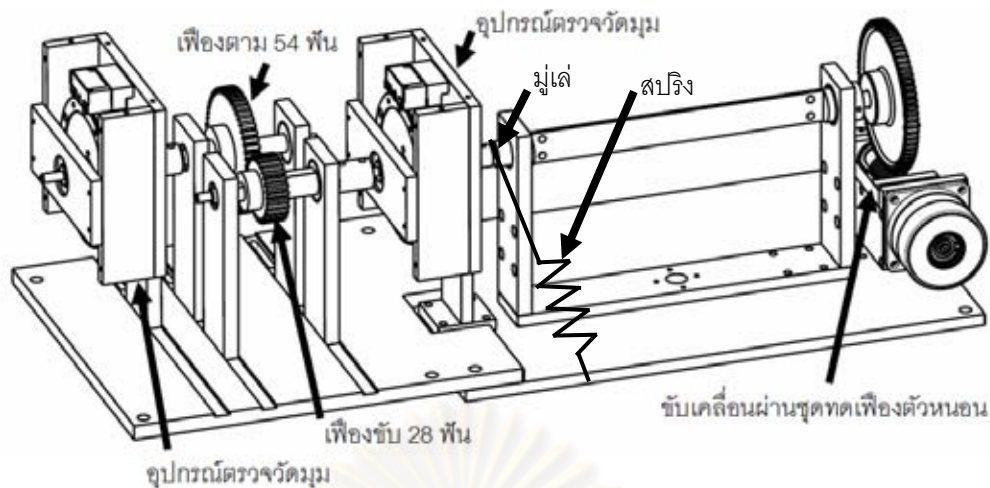
## บทที่ 5

### การทดลองลดความผิดพลาดที่เกิดจากการส่งกำลังด้วยระบบเฟืองฟันตรงและระบบเฟืองตัวหนอน

ในบทนี้จะทำการทดลองวัดความผิดพลาดที่เกิดขึ้นทั้งก่อนและหลังการลดความผิดพลาดโดยใช้เฟืองฟันตรงและเฟืองตัวหนอนเป็นตัวส่งกำลัง ซึ่งวิธีการลดความผิดพลาดที่จะใช้นั้นมี 3 วิธี ได้แก่ การนำความผิดพลาดที่เกิดขึ้นจริง, ความผิดพลาดที่ได้จากการประมาณด้วยสมการคลื่นรูปไซน์ และความผิดพลาดที่ได้จากการประมาณด้วยสมการโพลีโนเมียลมาร่วมพิจารณาในการขับเคลื่อนเพื่อหาตำแหน่งขับเคลื่อนที่ส่งผลให้เกิดความผิดพลาดน้อยที่สุด จากนั้นจะนำผลการทดลองมาวิเคราะห์ข้อดีข้อเสียของแต่ละวิธี ซึ่งจะนำผลการทดลองดังกล่าวไปใช้ร่วมในการจำลองการสะท้อนแสงจากเฮลิโอสแตทไปยังตัวรับส่วนกลางในบทต่อไปด้วย

#### 5.1 การส่งกำลังด้วยเฟืองฟันตรง

ในระบบการทดลองนี้ใช้เฟืองตัวหนอนอัตราทด 1 ต่อ 100 เป็นระบบส่งกำลังโดยจะนำไปต่อกับระบบเฟืองฟันตรงซึ่งมีอุปกรณ์ตรวจวัดมุมติดในตำแหน่งเฟืองขับและเฟืองตาม โดยเฟืองขับมีเส้นผ่านศูนย์กลางพิตช์ 1.5 นิ้ว 28 ฟัน เฟืองตามมีเส้นผ่านศูนย์กลางพิตช์ 3 นิ้ว 54 ฟัน เพื่อใช้ในการวัดความผิดพลาดที่เกิดจากการส่งกำลังด้วยเฟืองฟันตรง ระบบทดลองนั้นมีลักษณะดังรูปที่ 5.1 ตัวมอเตอร์ที่ใช้เป็นแบบสเต็ปเปอร์มอเตอร์แปรค่ารีลักแตนซ์ มีความละเอียด 200 ขั้นตอนการหมุน 1 รอบ คิดเป็นความละเอียดในการขับเคลื่อน 20,000 ขั้นตอนการหมุนเฟืองขับ 1 รอบ ในการทดลองนั้นจะหมุนเฟืองขับไปในทิศทางเดียวเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดความคลาดเคลื่อนจากระยะห่างระหว่างฟันที่ขบกัน (backlash error) อีกทั้งใช้เชือกมัดติดมู่เล่เส้นผ่านศูนย์กลาง 2 เซนติเมตร ไว้กับสปริงที่มีค่านิจสปริง (K) = 2.5 นิวตันต่อเซนติเมตร เพื่อให้เฟืองขับขบติดกับเฟืองตามตลอดเวลา ป้องกันไม่ให้เกิดตำแหน่งผิดพลาดไปเมื่อไม่ได้จ่ายไฟให้กับสเต็ปเปอร์มอเตอร์ (เนื่องมาจากใช้สเต็ปเปอร์มอเตอร์แบบแปรค่ารีลักแตนซ์ หากไม่จ่ายไฟให้ขดลวดของมอเตอร์ ตัวโรเตอร์จะสามารถหมุนได้อย่างอิสระ อาจทำให้ตำแหน่งของเฟืองที่ขบกันคลาดเคลื่อนได้)

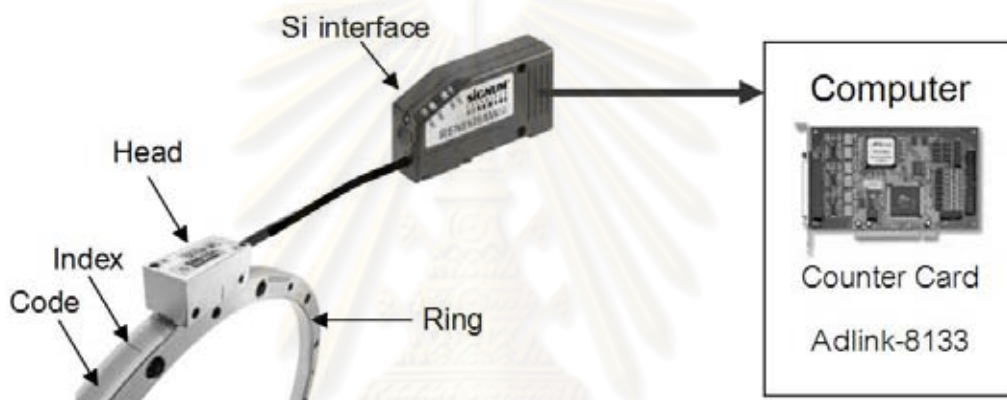


รูปที่ 5.1 ระบบทดลองวัดความผิดพลาดที่เกิดจากการส่งกำลังด้วยเฟืองฟันตรง

อุปกรณ์ตรวจวัดมุมนั้นใช้ของบริษัทรีเนซาล (RENISHAW™) เป็นอุปกรณ์ตรวจวัดมุมแบบอาร์อีเอสเอ็ม (RESM angle encoder) มีส่วนประกอบ 3 ส่วนหลักๆคือ วงแหวน (ring) เส้นผ่านศูนย์กลาง 100 มิลลิเมตร มีแถบรหัส (code) รอบวง 15,744 เส้น ระยะพิทช์ระหว่างเส้นแถบรหัส 20 ไมโครเมตร มีความแม่นยำของแถบรหัส  $\pm 2.1$  ฟิลิปดา (arc second) หรือคิดเป็น  $0.583 \times 10^{-3}$  องศา, หัวอ่าน (head) รุ่น RGH20 ความละเอียดในการอ่านค่า 1 ไมโครเมตร (อัตราขยาย 20 เท่า) และอุปกรณ์เชื่อมต่อเอสไอ (Si interface) ที่ทำหน้าที่แปลงสัญญาณ ดังภาพที่ 5.2 หลักการทำงานคือเมื่อวงแหวนมีการหมุน หัวอ่านจะอ่านค่าจากแถบรหัส (code) ที่อยู่รอบวงแหวนแล้วส่งค่าที่อ่านได้ไปยังอุปกรณ์เชื่อมต่อเอสไอเพื่อส่งสัญญาณจากหัวอ่านมาที่คอมพิวเตอร์ผ่านการ์ดนับสัญญาณ (counter card) ซึ่งตัวการ์ดที่ใช้เป็นของบริษัทแอดลิงค์ (Adlink) รุ่น PCI-8133

ความแม่นยำของอุปกรณ์ตรวจวัดมุมแบบอาร์อีเอสเอ็มนั้นนอกจากจะขึ้นอยู่กับขนาดและชนิดของวงแหวนแล้วยังขึ้นอยู่กับ การติดตั้งด้วย โดยการติดตั้งที่ได้มาตรฐานสำหรับวงแหวนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 มิลลิเมตร ระยะพิทช์ระหว่างเส้นแถบรหัส 20 ไมโครเมตร จะมีความแม่นยำอยู่ที่  $\pm 2.9$  ฟิลิปดา หรือคิดเป็น  $\pm 0.805 \times 10^{-3}$  องศา เนื่องจากใช้หัวอ่านที่มีความละเอียดในการอ่านค่า 1 ไมโครเมตร ความละเอียด (resolution) ในการอ่านค่าของระบบจึงอยู่ที่ 314,880 ค่าต่อการหมุนอุปกรณ์วัดมุม 1 รอบ (ได้จากแถบรหัสรอบวง 15,744 เส้น  $\times$  อัตราขยายของหัวอ่าน 20 เท่า) หรือคิดเป็น  $1.143 \times 10^{-3}$  องศา จะเห็นได้ว่าระบบวัดมุมนี้มีความแม่นยำมากกว่าความละเอียดเล็กน้อย ซึ่งหากต้องการเพิ่มความละเอียดของระบบสามารถทำได้โดยการเปลี่ยนหัวอ่านที่มีความละเอียดสูงขึ้น อย่างไรก็ตามหัวอ่านที่ใช้มีความละเอียดเพียงพออยู่แล้วเพราะมีความละเอียดมากกว่าระบบขับเคลื่อนถึง 15.744 เท่า (ระบบขับเคลื่อนมีความละเอียด 20,000 ค่าต่อ

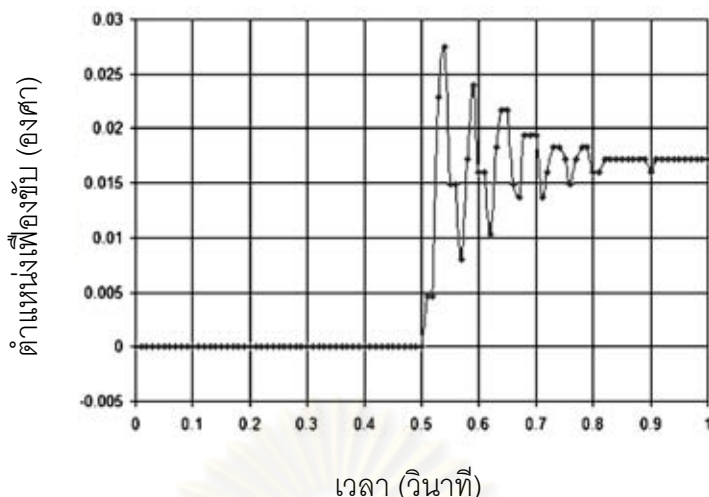
การหมุนเฟืองขับ 1 รอบ หรือ 0.018 องศาเฟืองขับต่อการขับเคลื่อนมอเตอร์ 1 ชั้น) ชนิดของอุปกรณ์ตรวจวัดมุมนี้คือแบบนับเพิ่มขึ้น (incremental encoder) ซึ่งจุดที่เริ่มต้นอ่านค่ามุมจะเป็น 0 องศาเสมอ เมื่อมีการหมุนก็จะใช้ตำแหน่งเริ่มต้นอ้างอิงเพื่อบันทึกค่าเพิ่มหรือลดลงไปเรื่อยๆ แตกต่างจากอุปกรณ์ตรวจวัดมุมชนิดค่าสมบูรณ์ (absolute encode) ที่สามารถวัดมุมทุกตำแหน่งการหมุนได้โดยไม่ต้องอาศัยจุดเริ่มต้นอ้างอิง เพราะฉะนั้นก่อนการเริ่มทดสอบทุกครั้งจะทำการหาตำแหน่งอ้างอิง (index) จากอุปกรณ์ตรวจวัดมุมที่ติดอยู่ ณ ตำแหน่ง เฟืองตาม และเฟืองขับตามลำดับ เพื่อให้การทดสอบเริ่มจากจุดเริ่มต้นเดียวกันเสมอ ไม่เช่นนั้นหากจุดเริ่มต้นในการทดสอบแต่ละครั้งไม่ตรงกันจะทำให้ค่าที่อ่านได้อ้างอิงจากตำแหน่งต่างกัน ซึ่งจะนำมาเปรียบเทียบกันไม่ได้



รูปที่ 5.2 ระบบอ่านค่ามุมหมุน

### 5.1.1 ช่วงเวลาอยู่ตัวของสเต็ปเปอร์มอเตอร์

ในหัวข้อนี้จะทำการหาช่วงเวลาอยู่ตัว (setting time) ของสเต็ปเปอร์มอเตอร์ที่ใช้ขับเฟืองฟันตรง เพื่อพิจารณาว่าต้องทำการหน่วงเวลาในการขับแต่ละขั้นนานเท่าใดที่จะทำให้ค่าที่อ่านได้จากอุปกรณ์วัดมุมนั้นเป็นค่าที่มีความแม่นยำ วิธีการทดลองทำโดยการอ่านค่าจากอุปกรณ์วัดมุม แล้วขับสเต็ปเปอร์มอเตอร์ไป 1 ชั้น เพื่อดูมุมที่เปลี่ยนไปเทียบกับเวลาว่าต้องใช้เวลาเท่าใดกว่าค่ามุมที่อ่านได้จะนิ่ง ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 5.3

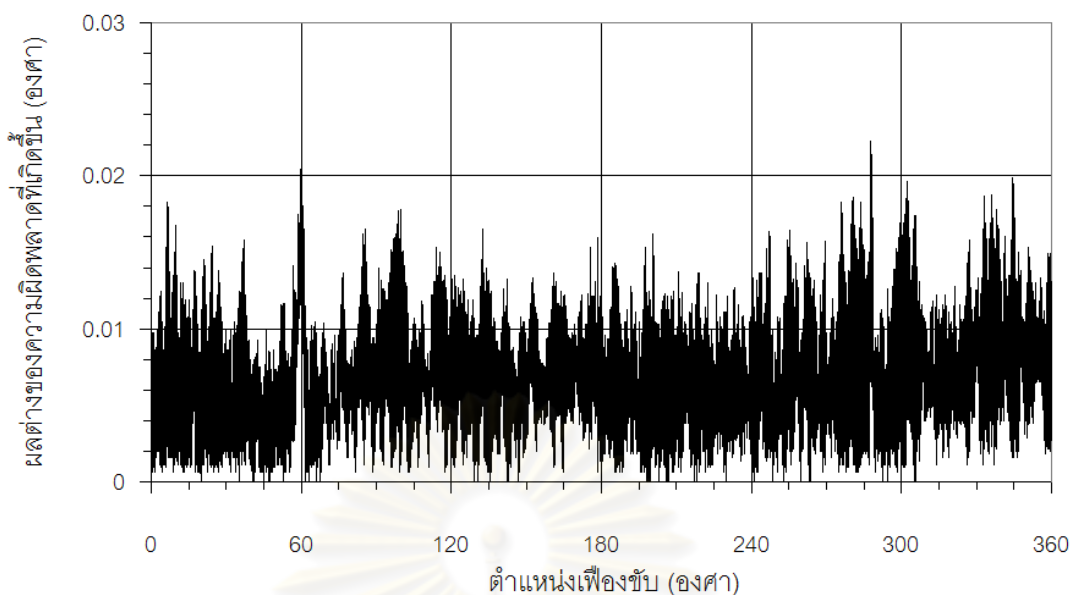


รูปที่ 5.3 ผลการทดลองหาช่วงเวลาอยู่ตัวของสเต็ปเปอร์มอเตอร์

จากผลการทดลองรูปที่ 5.3 เริ่มขับเคลื่อนมอเตอร์ที่เวลา 0.5 วินาที ค่ามุมที่อ่านได้เริ่มนิ่งที่เวลา 0.91 วินาที ดังนั้นช่วงเวลาอยู่ตัวของสเต็ปเปอร์มอเตอร์คือ 0.41 วินาที ฉะนั้นในการทดลองต้องปรับตั้งการหน่วงสัญญาณในการหมุนสเต็ปเปอร์มอเตอร์แต่ละขั้นอย่างน้อย 0.41 วินาที เพื่อที่จะทำให้ค่าที่อ่านได้จากอุปกรณ์ตรวจวัดมุมเป็นค่าที่มีความแม่นยำ

### 5.1.2 ความสามารถในการซ้ำที่เดิมของการส่งกำลังด้วยเฟืองฟันตรง

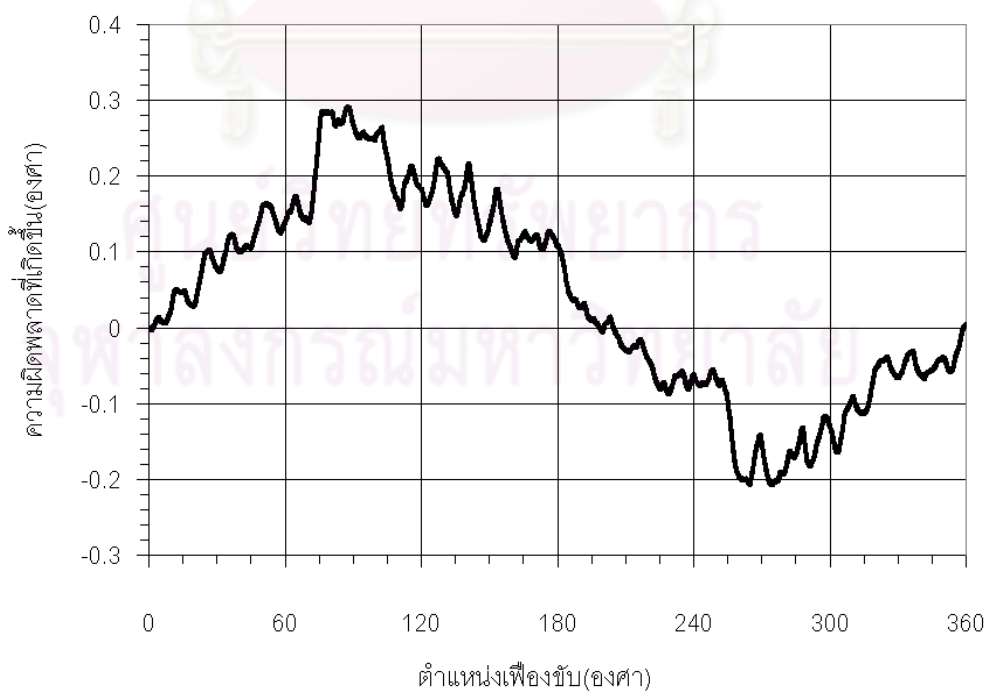
ทำการทดสอบความสามารถในการซ้ำที่เดิม (repeatability) ของเฟืองฟันตรงว่ามีหรือไม่ หากไม่มีความสามารถนี้ตำแหน่งที่ได้จากการส่งกำลังจะมีค่าไม่แน่นอนส่งผลให้ความผิดพลาดที่เกิดขึ้นมีค่าไม่แน่นอนตามไปด้วย ซึ่งจะทำให้ไม่สามารถแก้ไขความผิดพลาดโดยการจำความผิดพลาดที่เกิดขึ้นไว้ก่อนได้ การทดลองนี้ทำโดยการอ่านค่ามุมที่เกิดจากการหมุนเฟืองฟันตรง 1 รอบ แล้วหมุนย้อนกลับมาที่ตำแหน่งเดิม ทำการทดลองซ้ำอีก 5 รอบ จากนั้นหาค่ารากเฉลี่ยกำลังสอง (Root Mean Square, RMS) ของผลต่างในการทดลองแต่ละรอบแต่ละตำแหน่งของเฟืองมาสร้างกราฟ ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 5.4 ซึ่งมีค่าสูงสุดอยู่ที่  $22.267 \times 10^{-3}$  องศา พิจารณาในรูปรากเฉลี่ยกำลังสองได้  $7.504 \times 10^{-3}$  องศา ถือว่าเป็นค่าที่ยอมรับได้เพราะมีค่าน้อยกว่าความละเอียดของระบบขับเคลื่อน (สเต็ปเปอร์มอเตอร์หมุนไป 1 ขั้น จะทำให้เฟืองขับเคลื่อนไป  $18 \times 10^{-3}$  องศา) ยิ่งถ้าเทียบกับความผิดพลาดรวมที่เกิดขึ้น (เนื้อหาในหัวข้อถัดไป) ที่มีค่าในรูปรากเฉลี่ยกำลังสอง  $134.184 \times 10^{-3}$  องศา คิดเป็นเพียง 5.592% แสดงให้เห็นว่าผลต่างของการส่งกำลังในแต่ละครั้งนั้นส่งผลต่อความผิดพลาดรวมที่เกิดขึ้นน้อยมาก จึงสามารถสรุปได้ว่าการส่งกำลังโดยใช้เฟืองฟันตรงนี้มีความสามารถในการซ้ำที่เดิมเพียงพอต่อการใช้เป็นระบบขับเคลื่อนของแอพลิเคชัน



รูปที่ 5.4 ผลต่างของความผิดพลาดในรูปรากเฉลี่ยกำลังสองของการขับเคลื่อนเฟืองฟันตรง 5 รอบ

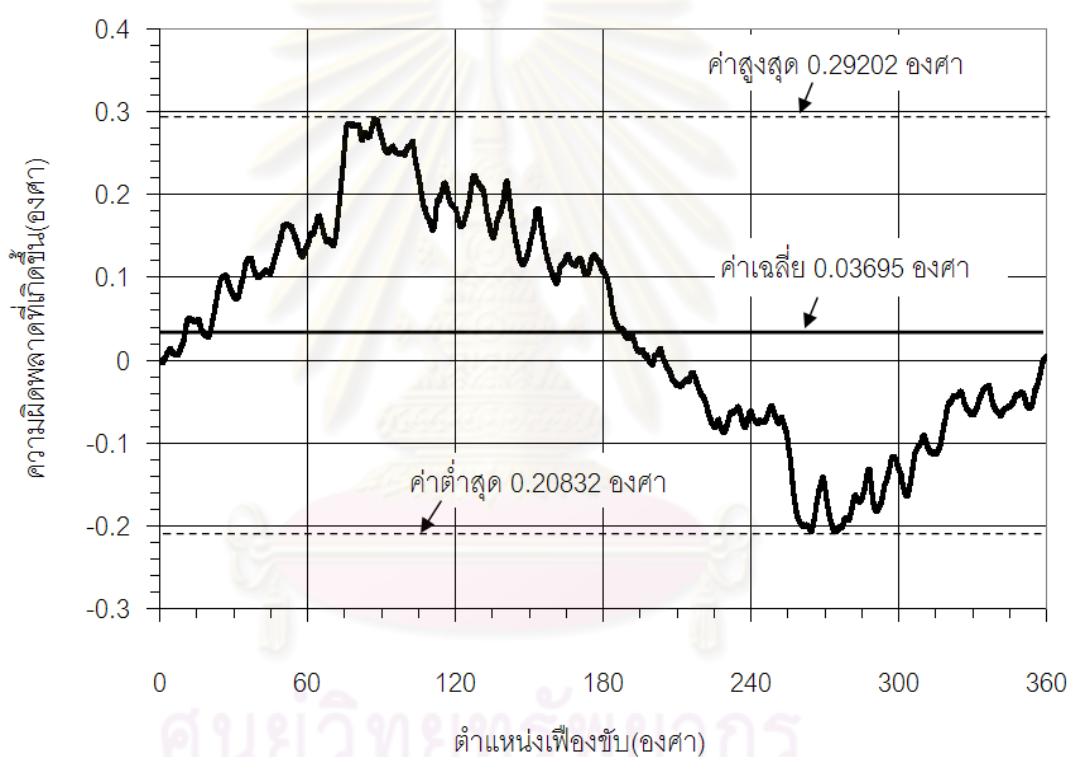
### 5.1.3 วัดความผิดพลาดที่เกิดขึ้นจากการส่งกำลังด้วยเฟืองฟันตรง

ในการวัดความผิดพลาดที่เกิดขึ้นจากการส่งกำลัง จะทำโดยการหมุนเฟืองขับ 1 รอบหรือ หมุนไป 360 องศา ซึ่งในขณะที่หมุนจะเก็บค่าตำแหน่งการเคลื่อนที่ไว้เพื่อหาความผิดพลาดที่เกิดขึ้นจากการส่งกำลัง ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 5.5



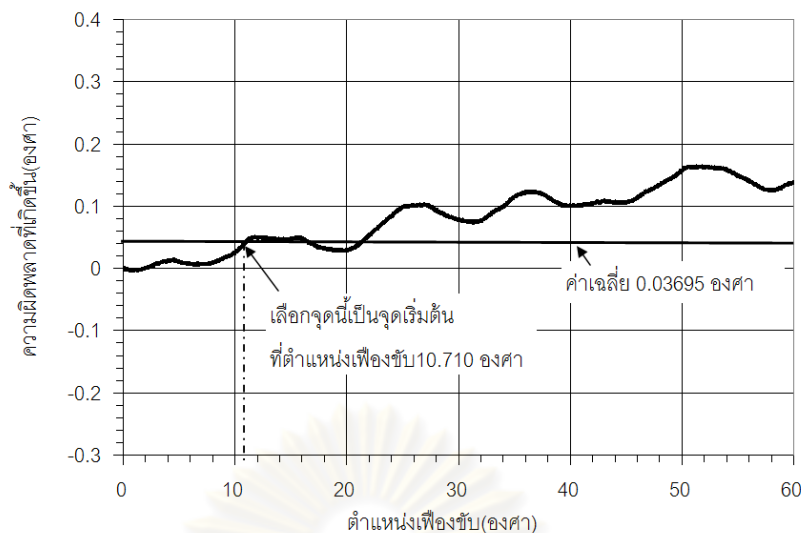
รูปที่ 5.5 ความผิดพลาดที่วัดได้จากการส่งกำลังด้วยเฟืองฟันตรง

ทำการจัดตำแหน่งเริ่มต้นของความผิดพลาดใหม่ เพื่อให้ความผิดพลาดที่วัดได้นั้นสามารถนำไปเปรียบเทียบกับความผิดพลาดที่คำนวณได้จากทฤษฎี เนื่องมาจากก่อนการทดลองจะไม่ทราบว่าตำแหน่งใดของเฟืองเป็นตำแหน่งเริ่มต้นของความผิดพลาด จึงต้องทำการวัดความผิดพลาดที่เกิดขึ้นก่อน จากนั้นค่อยทำการหาจุดเริ่มต้นของความผิดพลาดซึ่งตามทฤษฎีความผิดพลาดที่เกิดขึ้นภายในเฟืองนั้น จุดเริ่มต้นของความผิดพลาดจะอยู่ ณ ตำแหน่งกึ่งกลางของความผิดพลาดทั้งหมดที่วัดได้ โดยความผิดพลาดสูงสุดอยู่ที่ 0.29202 องศา และต่ำสุดอยู่ที่ 0.20832 องศา ค่าเฉลี่ยของความผิดพลาดจึงมีค่าเท่ากับ 0.03695 องศา ทำการลากเส้นตัด ณ ตำแหน่งดังกล่าว ดังรูปที่ 5.6 เพื่อใช้ในการพิจารณาหาจุดเริ่มต้นของความผิดพลาดที่เกิดขึ้น



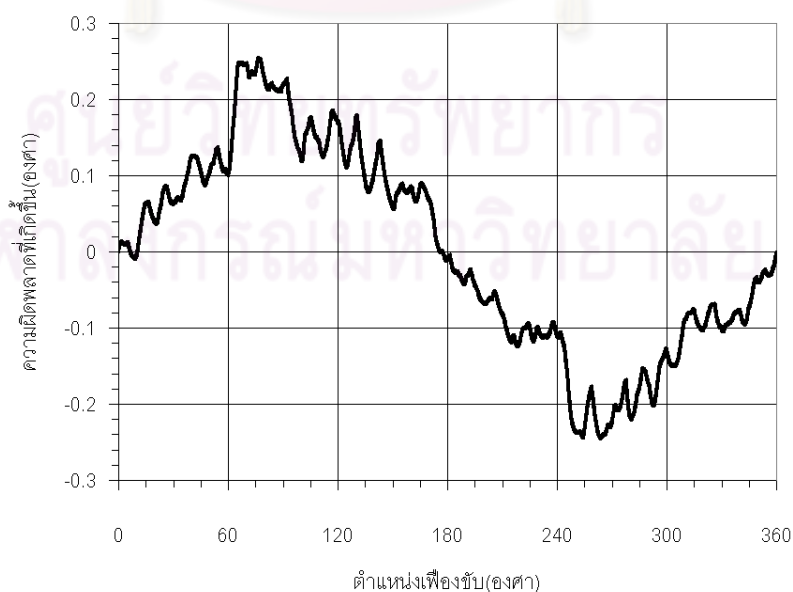
รูปที่ 5.6 ลากเส้นความผิดพลาดเฉลี่ย เพื่อหาตำแหน่งเริ่มต้นของความผิดพลาด

พิจารณาเส้นค่าเฉลี่ยตัดกับค่าความผิดพลาดที่วัดได้ ณ ตำแหน่งเฟืองขับ 0 องศา ถึง 60 องศา และเลือกค่าเริ่มต้นโดยดูตรงจุดตัดที่อยู่ตรงจุดเริ่มต้นของคลื่นรูปไซน์ลูกเล็ก ดังรูปที่ 5.7 เลือกจุดตัด ณ ตำแหน่ง 10.710 องศา



รูปที่ 5.7 พิจารณาความผิดพลาดในช่วงเฟืองขับ 0 องศา ถึง 60 องศา

ทำการเรียงข้อมูลความผิดพลาดที่วัดได้ใหม่ โดยกำหนดจุดเริ่มต้นดังกล่าวให้มีความผิดพลาดเริ่มต้นเป็น 0 องศา ซึ่งจะได้ความผิดพลาดที่จัดรูปใหม่ดังรูปที่ 5.8 ความผิดพลาดที่จัดรูปใหม่นี้เรียกว่าความผิดพลาดรวม (total composite error, TCE) วัดในรูปรากเฉลี่ยกำลังสอง (RMS) ได้  $134.184 \times 10^{-3}$  องศา ประกอบไปด้วย 2 ส่วนคือ คลื่นรูปไซน์ลูกใหญ่ 1 ลูก โดยคลื่นรูปไซน์ใหญ่นี้แสดงถึงความผิดพลาดที่เกิดขึ้นจากจุดหมุนเยื้องศูนย์กลางของเฟืองตาม (runout position error) และคลื่นรูปไซน์ลูกเล็กซึ่งจะอยู่บนคลื่นรูปไซน์ลูกใหญ่อีกที โดยคลื่นรูปไซน์เล็กนี้แสดงถึงความผิดพลาดที่เกิดขึ้นระหว่างฟันของเฟืองที่ขบกัน (tooth-to-tooth composite error, TTCE)

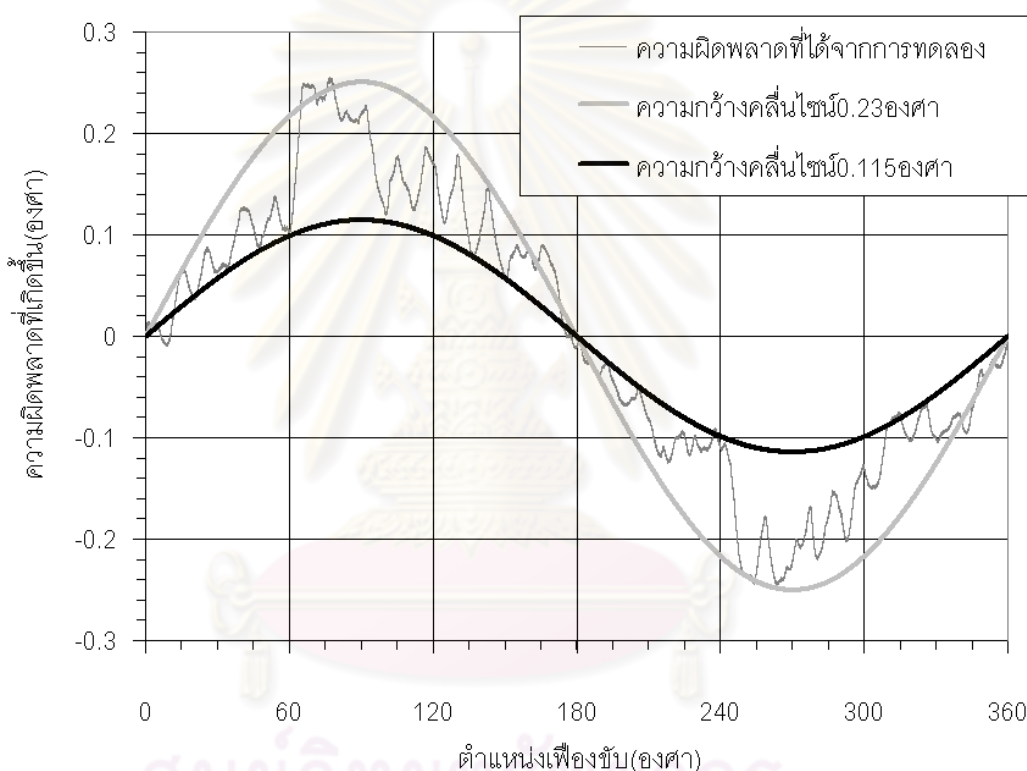


รูปที่ 5.8 ความผิดพลาดหลังจากกำหนดตำแหน่งเริ่มต้นแล้ว



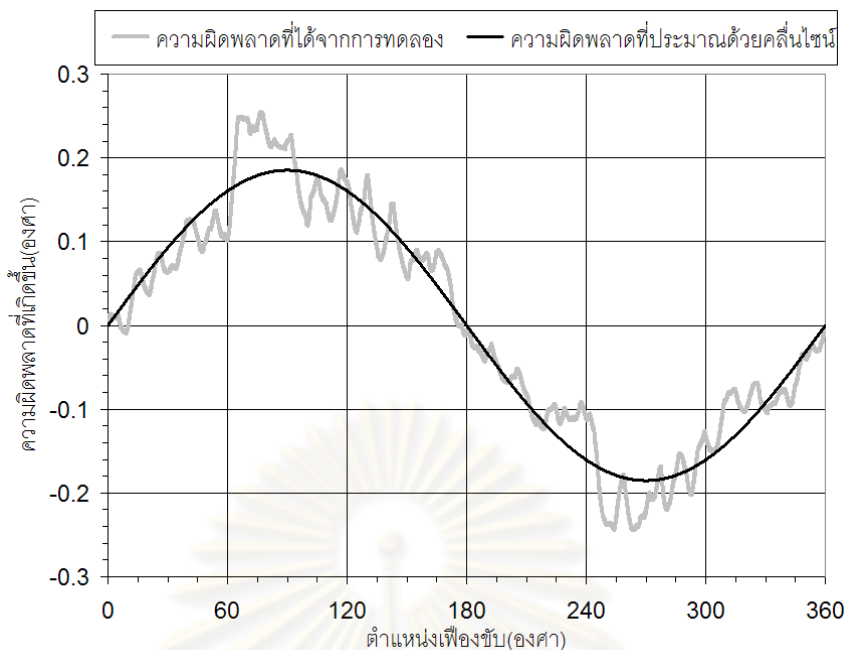
### 5.1.4 การประมาณค่าความผิดพลาดของเฟืองฟันตรงด้วยสมการคลื่นรูปไซน์

จากผลการทดลองที่ได้ทำการจัดวางตำแหน่งเริ่มต้นความผิดพลาดใหม่แล้วนั้น ไม่สามารถวัดความผิดพลาดที่เกิดจากจุดหมุนเยื้องศูนย์กลางและความผิดพลาดที่เกิดขึ้นระหว่างฟันได้โดยตรง เนื่องจากความผิดพลาดที่เกิดขึ้นระหว่างฟันมีค่าไม่แน่นอน จึงต้องทำการจำลองความผิดพลาดที่เกิดขึ้น โดยเริ่มจากคำนวณความผิดพลาดที่เกิดจากการวางตำแหน่งจุดหมุนเยื้องศูนย์กลางซึ่งมีลักษณะความผิดพลาดเป็นคลื่นรูปไซน์ 1 ลูก โดยกำหนดขอบเขตที่จะคำนวณคลื่นรูปไซน์ในช่วง 0.230 องศา ถึง 0.115 องศา พิจารณาทีละช่วง 0.005 องศา ดังรูปที่ 5.9



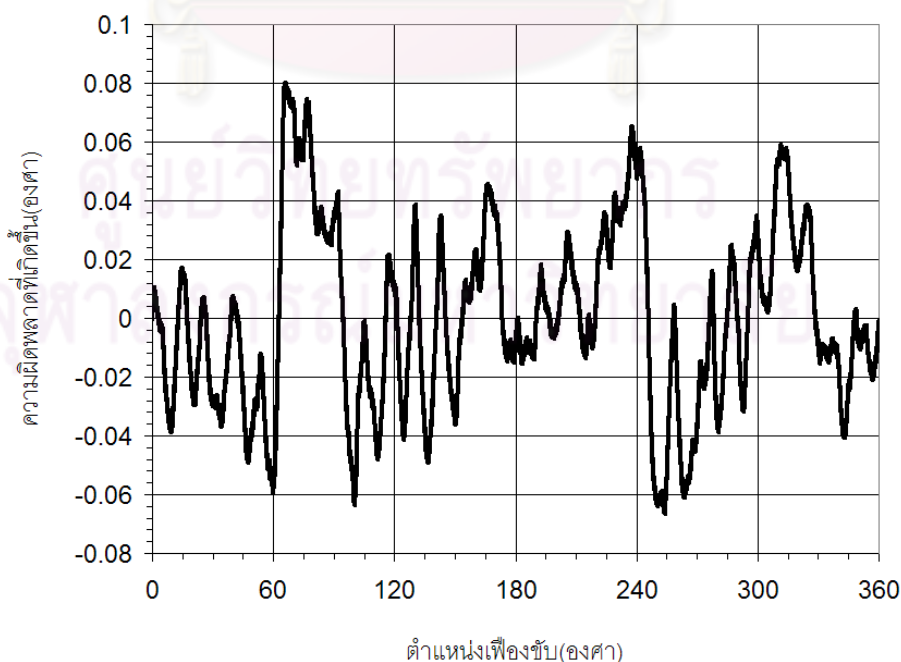
รูปที่ 5.9 การจำลองความผิดพลาดที่เกิดจากจุดหมุนเยื้องศูนย์กลางในช่วง 0.230 - 0.115 องศา

จากการจำลองหาคลื่นรูปไซน์ที่ทำให้ความผิดพลาดที่เกิดขึ้นระหว่างฟัน (TTCE) ในรูปรากเฉลี่ยกำลังสอง (RMS) มีค่าน้อยที่สุด ได้ผลการจำลองคือคลื่นรูปไซน์ 0.185 องศา ดังรูปที่ 5.10 ซึ่งทำให้เกิดความผิดพลาดระหว่างฟันในรูปรากเฉลี่ยกำลังสองน้อยที่สุดคือ  $3.104 \times 10^{-2}$  องศา ดังนั้นเลือกค่าความผิดพลาดที่เกิดจากจุดหมุนเยื้องศูนย์กลาง (runout error) 0.185 องศา



รูปที่ 5.10 ผลการประมาณความผิดพลาดด้วยคลื่นรูปไซน์ขนาด 0.185 องศา

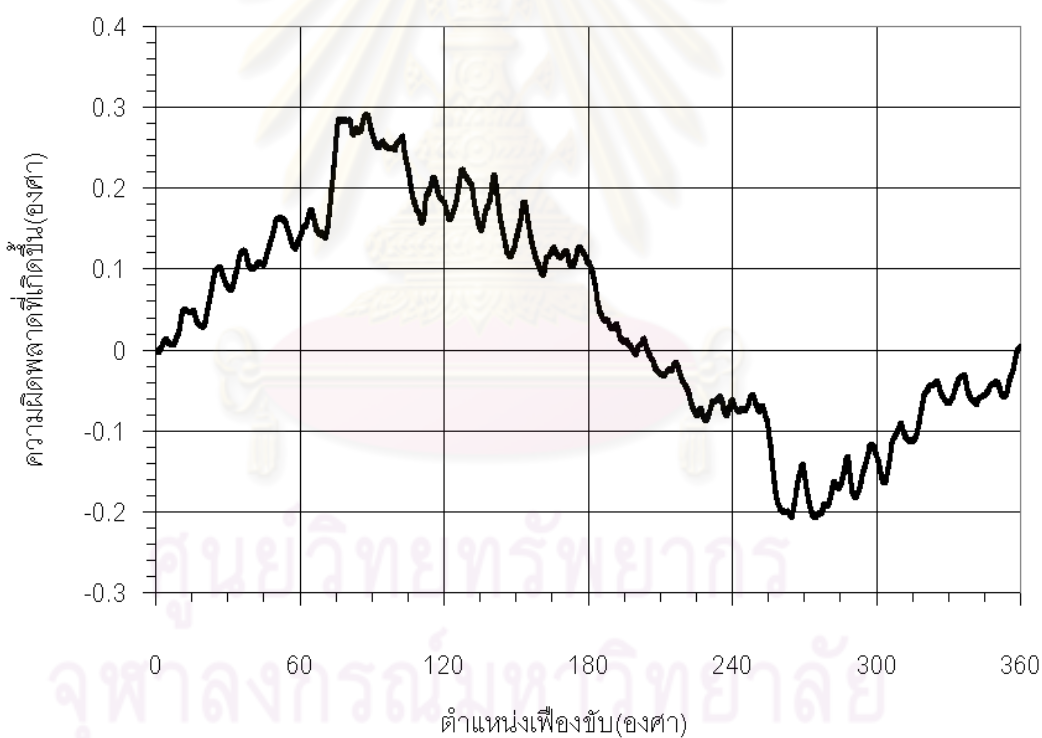
เมื่อเอาความผิดพลาดรวมที่วัดได้ (TCE) ลบด้วยความผิดพลาดที่เกิดขึ้นจากจุดหมุนเยื้องศูนย์กลาง (runout error) จะได้ความผิดพลาดที่เกิดขึ้นระหว่างฟัน (TTCE) ดังรูปที่ 5.11 จะเห็นว่า มีรูปร่างที่ไม่แน่นอน โดยมีความในช่วง  $+8.049 \times 10^{-2}$  องศา ถึง  $-6.664 \times 10^{-2}$  องศา พิจารณาในรูปรากเฉลี่ยกำลังสอง (RMS) ได้  $3.105 \times 10^{-2}$  องศา



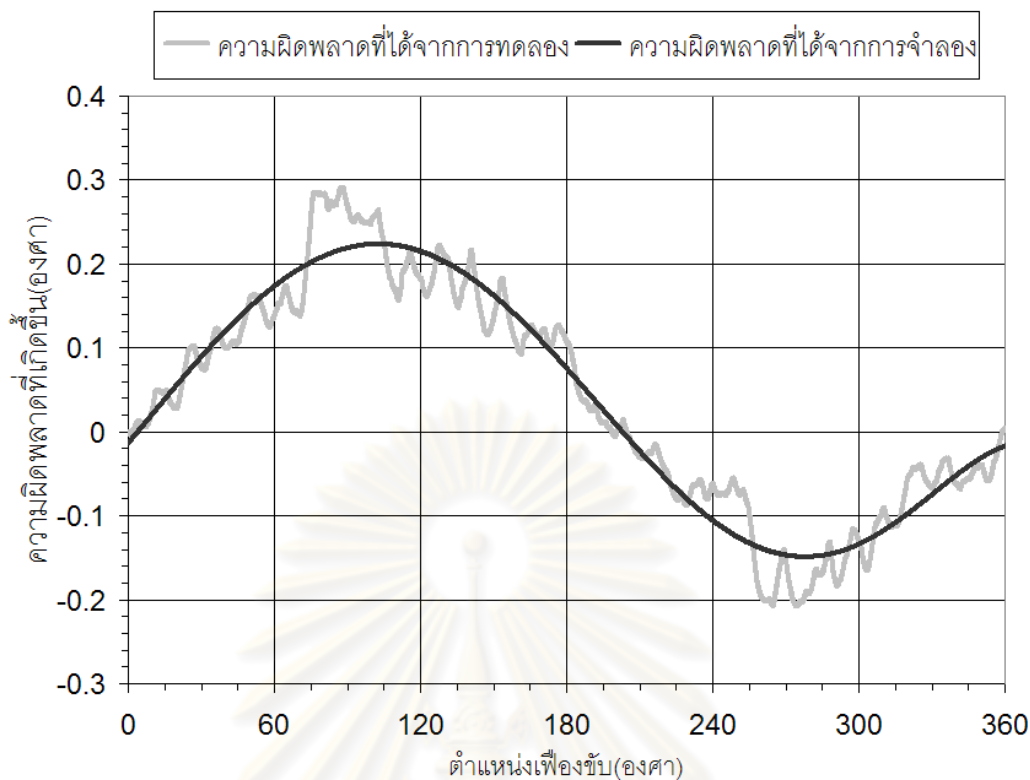
รูปที่ 5.11 ความผิดพลาดที่เกิดขึ้นระหว่างฟัน

### 5.1.5 การประมาณค่าความผิดพลาดของเฟืองฟันตรงด้วยสมการโพลีโนเมียล

แนวทางในการจำลองความผิดพลาดที่เกิดขึ้นอีกวิธีคือการใช้สมการโพลีโนเมียลประมาณค่า ซึ่งสมการนี้สามารถจำลองความผิดพลาดที่เกิดขึ้นจากข้อมูลความผิดพลาดที่วัดได้จริงโดยไม่ต้องทำการปรับแต่งข้อมูลที่วัดได้เลย แตกต่างจากการประมาณความผิดพลาดที่เกิดขึ้นโดยใช้ทฤษฎีความผิดพลาดของเฟืองซึ่งจำลองโดยใช้สมการคลื่นรูปไซน์ดังหัวข้อที่ 5.1.4 ที่ต้องนำความผิดพลาดที่วัดได้มาพิจารณาหาจุดเริ่มต้นของความผิดพลาดก่อน เพื่อใช้ในการจัดเรียงจุดเริ่มต้นใหม่ นอกจากนี้ยังต้องทำการคำนวณความผิดพลาดที่เป็นผลมาจากจุดหมุนเยื้องศูนย์กลางเพื่อใช้ค่าดังกล่าวในการสร้างสมการความผิดพลาดแทนความผิดพลาดจริงที่เกิดขึ้น จากการทดลองวัดความผิดพลาดที่เกิดขึ้นจริงเพื่อใช้ในการสร้างสมการโพลีโนเมียล ได้กราฟดังรูปที่ 5.12 นำค่าที่ได้ดังกล่าวมาสร้างสมการโพลีโนเมียล โดยเลือกใช้โพลีโนเมียลอันดับ 6 เพราะให้ผลที่ได้จากการประมาณค่าความผิดพลาด ใกล้เคียงกับความผิดพลาดที่วัดได้จริง ดังรูปที่ 5.13



รูปที่ 5.12 ความผิดพลาดที่วัดได้เพื่อใช้ในการสร้างสมการโพลีโนเมียล



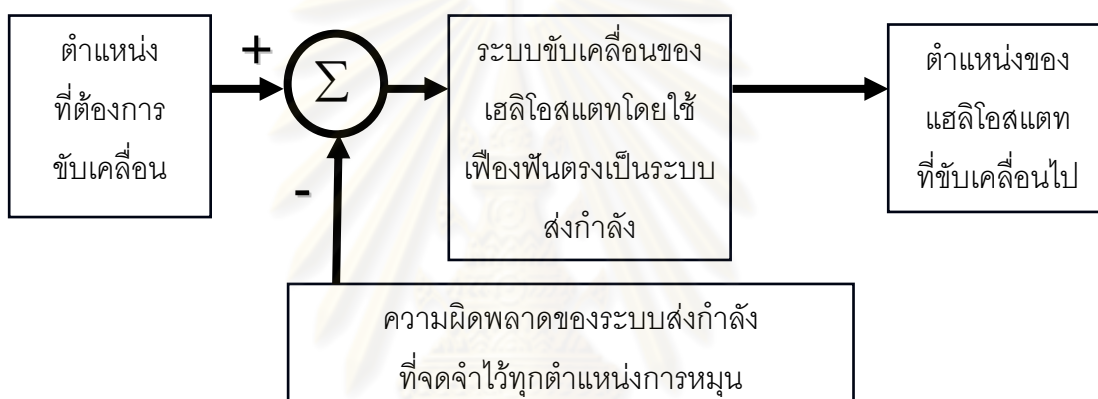
รูปที่ 5.13 ความผิดพลาดที่ประมาณด้วยสมการโพลิโนเมียลอันดับ 6

จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่าความผิดพลาดที่ได้จากการทดลองและความผิดพลาดที่ได้จากการจำลองด้วยสมการโพลิโนเมียลมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน อย่างไรก็ตามการจำลองนี้ประมาณค่าความผิดพลาดได้เพียงความผิดพลาดที่เกิดขึ้นจากจุดหมุนเยื้องศูนย์กลางเท่านั้น ไม่สามารถประมาณความผิดพลาดที่เกิดขึ้นระหว่างพื้นที่ได้ ผลของการประมาณค่าความผิดพลาดด้วยสมการโพลิโนเมียลนี้จะนำไปใช้ในการลดความผิดพลาดที่เกิดขึ้นในหัวข้อต่อไป

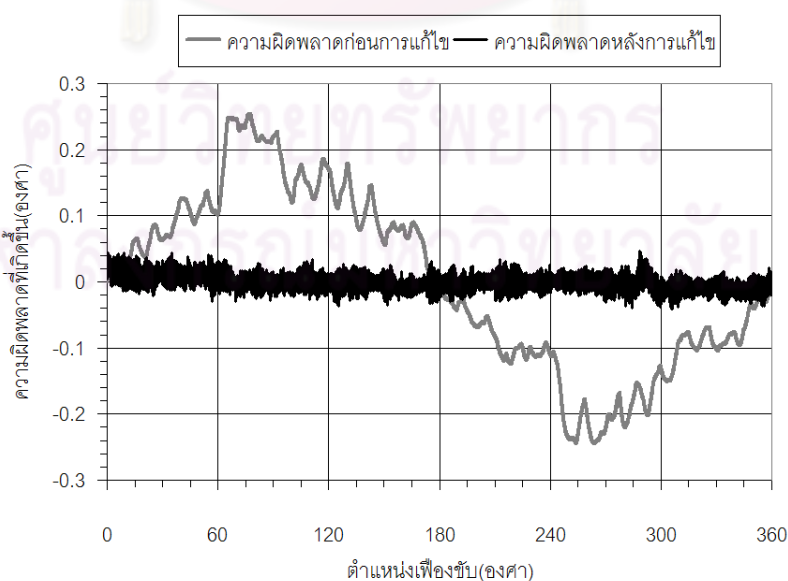
ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

### 5.1.6 การทดลองลดความผิดพลาดของเฟืองฟันตรงโดยวิธีการจำความผิดพลาดทุกตำแหน่งการหมุนของเฟือง

ทำการลดความผิดพลาดที่เกิดขึ้นด้วยวิธีการควบคุมแบบเปิดดังรูปที่ 5.14 โดยจะนำความคลาดเคลื่อนของระบบส่งกำลังที่จดจำไว้มาพิจารณาในการขับเคลื่อนเพื่อให้ได้ตำแหน่งในการหมุนของเฮลิโอสแตทที่มีความแม่นยำเพิ่มขึ้น ในการทดลองนี้จะแทนค่าความคลาดเคลื่อนของระบบส่งกำลังที่จดจำไว้ด้วยความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นจริงที่ได้จากการทดลอง ซึ่งหลังจากการแก้ไขแล้ว ได้ผลดังรูปที่ 5.15 จากผลการทดลองสามารถลดความผิดพลาดที่เกิดขึ้นในรูปแบบรากเฉลี่ยกำลังสอง (RMS) จาก  $13.418 \times 10^{-2}$  องศา เหลือเพียง  $1.236 \times 10^{-2}$  องศา ซึ่งมีค่าลดลงถึง 9.211 เท่า



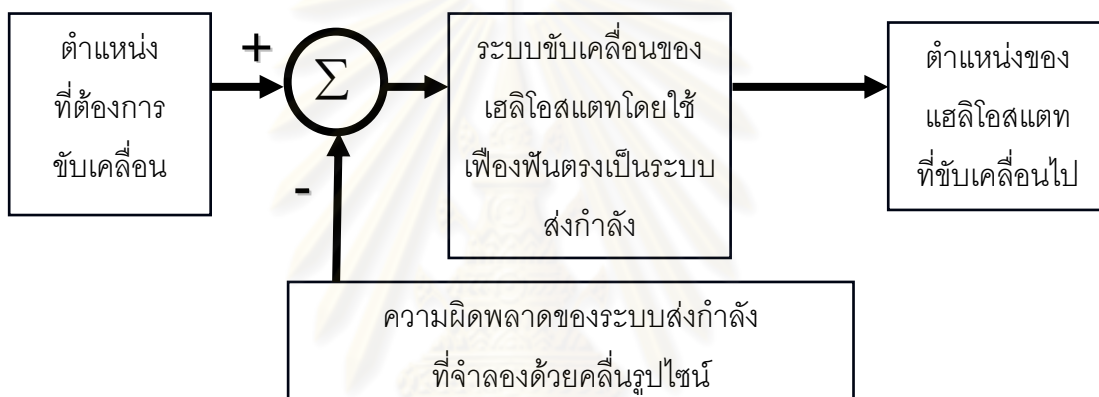
รูปที่ 5.14 ระบบควบคุมโดยลดความผิดพลาดด้วยวิธีจำความผิดพลาดทุกตำแหน่งการหมุน



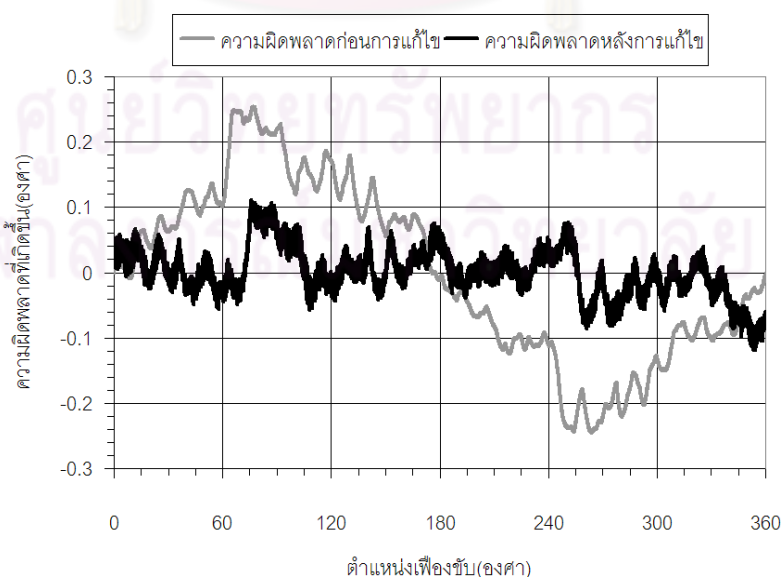
รูปที่ 5.15 ผลที่ได้จากการลดความผิดพลาดด้วยวิธีจำความผิดพลาดทุกตำแหน่งการหมุน

### 5.1.7 การทดลองลดความผิดพลาดของเฟืองฟันตรงโดยวิธีจำลองความผิดพลาดด้วยสมการคลื่นรูปไซน์

ทำการลดความผิดพลาดที่เกิดขึ้นด้วยวิธีการควบคุมแบบเปิดดังรูปที่ 5.16 โดยจะนำความคลาดเคลื่อนของระบบส่งกำลังที่จดจำไว้มาพิจารณาในการขับเคลื่อนเพื่อให้ได้ตำแหน่งในการหมุนของเฮลิโอสแตทที่มีความแม่นยำเพิ่มขึ้น ในการทดลองนี้จะแทนค่าความคลาดเคลื่อนของระบบส่งกำลังที่จดจำไว้ด้วยความคลาดเคลื่อนที่จำลองจากสมการคลื่นรูปไซน์จากหัวข้อ 5.1.4 ซึ่งหลังจากการแก้ไขแล้ว ได้ผลดังรูปที่ 5.17 จากผลการทดลองสามารถลดความผิดพลาดที่เกิดขึ้นในรูปแบบรากเฉลี่ยกำลังสอง (RMS) จาก  $13.418 \times 10^{-2}$  องศา เหลือเพียง  $3.799 \times 10^{-2}$  องศา ซึ่งมีค่าลดลงถึง 3.531 เท่า



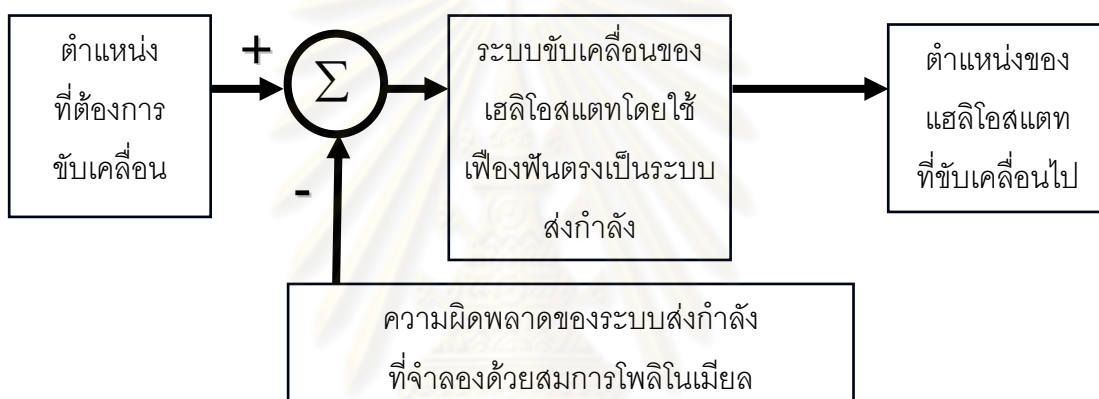
รูปที่ 5.16 ระบบควบคุมโดยลดความผิดพลาดด้วยวิธีจำลองความผิดพลาดจากคลื่นรูปไซน์



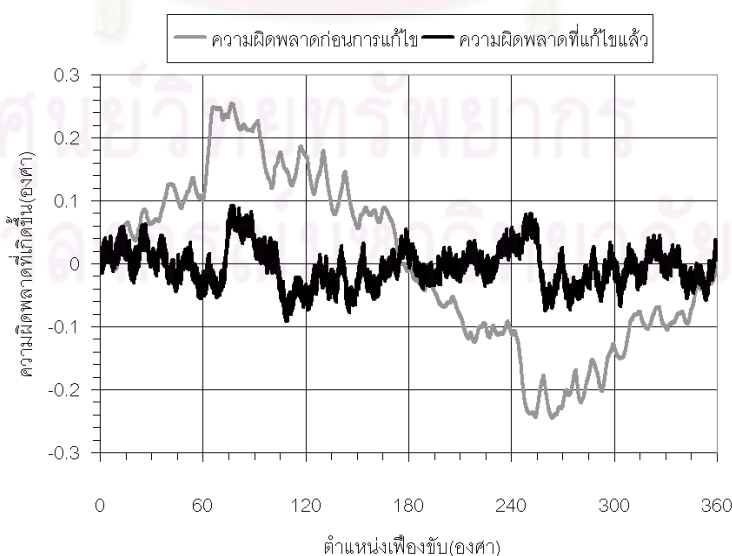
รูปที่ 5.17 ผลที่ได้จากการลดความผิดพลาดด้วยวิธีจำลองความผิดพลาดด้วยสมการคลื่นรูปไซน์

### 5.1.8 การทดลองลดความผิดพลาดของเฟืองฟันตรงโดยวิธีจำลองความผิดพลาดด้วยสมการโพลีโนเมียล

ทำการลดความผิดพลาดที่เกิดขึ้นด้วยวิธีการควบคุมแบบเปิดดังรูปที่ 5.18 โดยจะนำความคลาดเคลื่อนของระบบส่งกำลังที่จดจำไว้มาพิจารณาในการขับเคลื่อนเพื่อให้ได้ตำแหน่งในการหมุนของเฮลิโอสแตทที่มีความแม่นยำเพิ่มขึ้น ในการทดลองนี้จะแทนค่าความคลาดเคลื่อนของระบบส่งกำลังที่จดจำไว้ด้วยความคลาดเคลื่อนที่จำลองจากสมการโพลีโนเมียลจากหัวข้อ 5.1.5 ซึ่งหลังจากการแก้ไขแล้ว ได้ผลดังรูปที่ 5.19 จากผลการทดลองสามารถลดความผิดพลาดที่เกิดขึ้นในรูปแบบรากเฉลี่ยกำลังสอง (RMS) จาก  $13.418 \times 10^{-2}$  องศา เหลือเพียง  $3.156 \times 10^{-2}$  องศา ซึ่งมีค่าลดลงถึง 4.251 เท่า



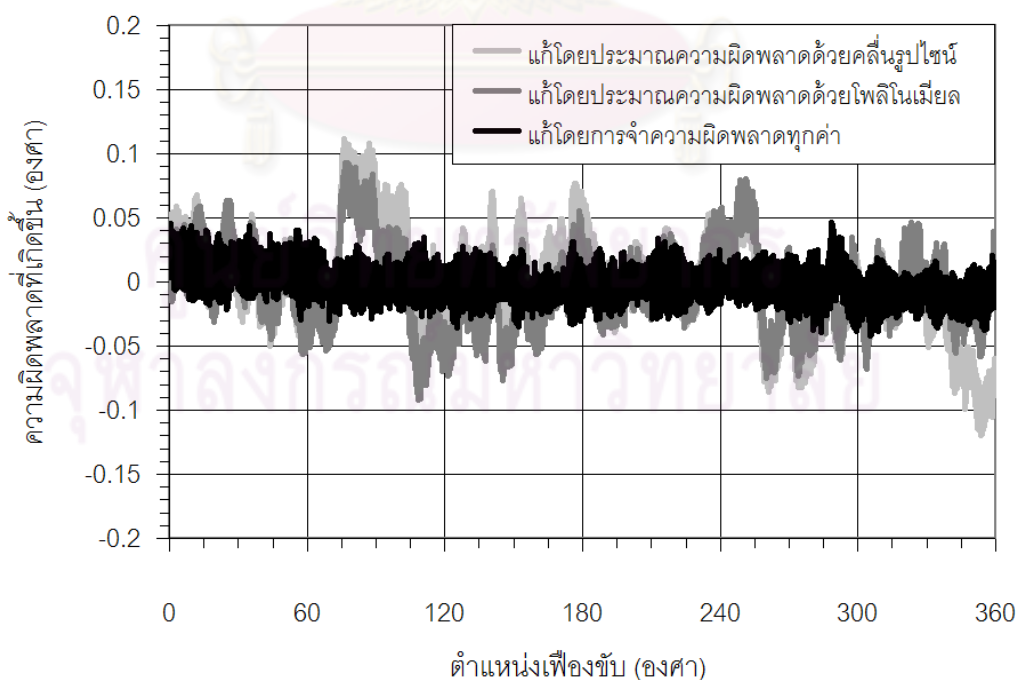
รูปที่ 5.18 ระบบควบคุมโดยลดความผิดพลาดด้วยวิธีจำลองความผิดพลาดจากโพลีโนเมียล



รูปที่ 5.19 ผลที่ได้จากการลดความผิดพลาดด้วยวิธีจำลองความผิดพลาดด้วยสมการโพลีโนเมียล

### 5.1.9 สรุปผลการทดลองหลังการแก้ไขความผิดพลาดของเฟืองฟันตรงทั้ง 3 วิธี

นำความผิดพลาดหลังการแก้ไขทั้ง 3 วิธีได้แก่ วิธีแก้ไขโดยจำความผิดพลาดที่เกิดขึ้นจริงทุกค่า, วิธีแก้ไขโดยการจำลองความผิดพลาดด้วยสมการคลื่นรูปไซน์ และวิธีแก้ไขโดยการจำลองความผิดพลาดด้วยสมการโพลีโนเมียลทั้งหมดมาเปรียบเทียบกันได้ผลดังรูปที่ 5.20 จะเห็นได้ว่าวิธีแก้ไขความผิดพลาดโดยการจำความผิดพลาดที่เกิดขึ้นจริงไว้ก่อนนั้น มีความผิดพลาดหลังการแก้ไขเกิดขึ้นน้อยที่สุดโดยมีความผิดพลาดในรูปแบบรากเฉลี่ยกำลังสอง (RMS) เพียง  $1.236 \times 10^{-2}$  องศา แต่วิธีการนี้จำเป็นต้องใช้ความจำในการเก็บข้อมูลความผิดพลาดที่เกิดขึ้นจริงมากถึง 20,000 ค่าต่อระบบขับเคลือน 1 ชุด รองลงมาคือวิธีแก้ไขความผิดพลาดโดยการจำลองความผิดพลาดด้วยสมการโพลีโนเมียลอันดับ 6 หลังการแก้ไขเกิดความผิดพลาดในรูปแบบรากเฉลี่ยกำลังสอง  $3.156 \times 10^{-2}$  องศาข้อดีคือใช้หน่วยความจำเก็บค่าตัวแปรเพียง 6 ตัวแปร อีกทั้งไม่จำเป็นต้องจัดจุดเริ่มต้นความผิดพลาดแบบการแก้ไขด้วยสมการคลื่นรูปไซน์ สุดท้ายคือวิธีแก้ไขความผิดพลาดโดยการจำลองความผิดพลาดด้วยสมการคลื่นรูปไซน์ หลังการแก้ไขด้วยวิธีนี้เกิดความผิดพลาดในรูปแบบรากเฉลี่ยกำลังสอง  $3.799 \times 10^{-2}$  องศา ซึ่งวิธีนี้แม้จะใช้หน่วยความจำเก็บค่าตัวแปรเพียง 1 ตัวแปรเท่านั้น ตัวแปรที่ว่าคือค่า  $e/R$  (ขนาดของ runout error) แต่การจะได้ค่าตัวแปรนี้ต้องทำการจัดตำแหน่งเริ่มต้นของความผิดพลาดที่วัดได้ใหม่ก่อนจากนั้นต้องจำลองความผิดพลาดที่เกิดจากจุดหมุนเยื้องศูนย์กลางเพื่อหาค่าที่ส่งผลให้เกิดความผิดพลาดระหว่างฟันน้อยที่สุด (หัวข้อที่ 5.1.5)

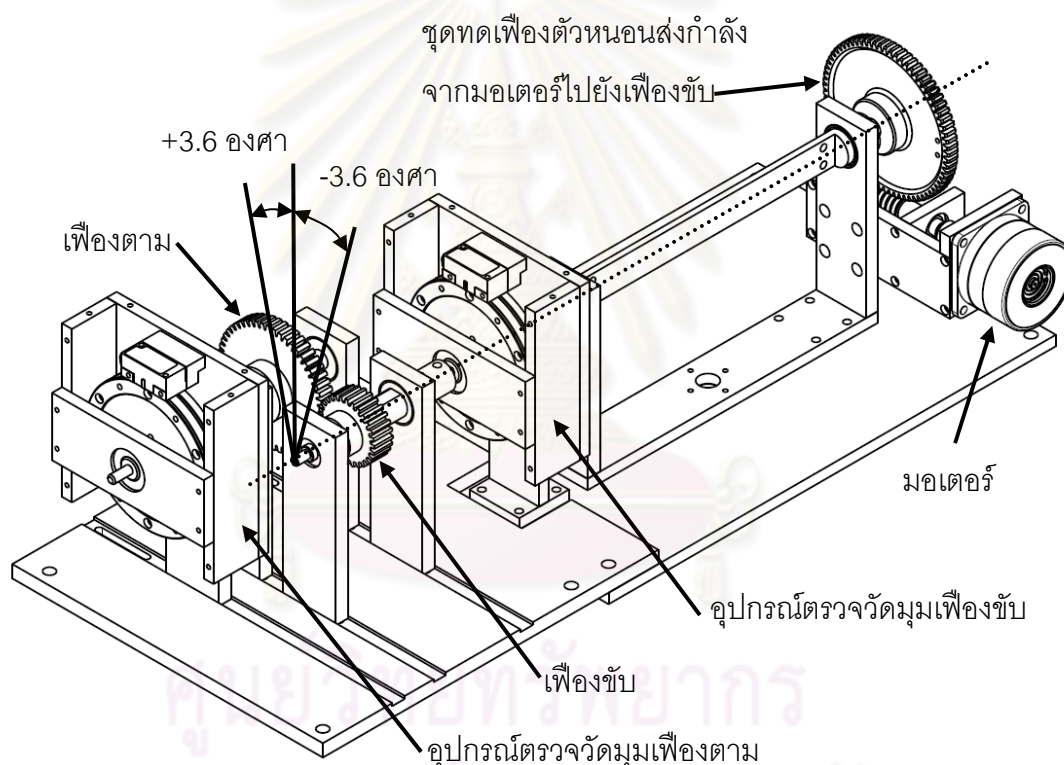


รูปที่ 5.20 ผลที่ได้หลังจากลดความผิดพลาดด้วยวิธีต่างๆ



## 5.2 การวางตำแหน่งเริ่มต้นผิดพลาดในการส่งกำลังด้วยเฟืองฟันตรง

ในการติดตั้งระบบส่งกำลังเข้ากับเฮลิคอปเตอร์อาจจะมีตำแหน่งในการวางจุดเริ่มต้นคลาดเคลื่อนไปบ้างโดยจะส่งผลให้ความผิดพลาดหลังการแก้ไขมีค่าเปลี่ยนไป ซึ่งความผิดพลาดในหัวข้อนี้จะพิจารณาเพียงการวางตำแหน่งเริ่มต้นผิดพลาดของระบบส่งกำลังด้วยเฟืองฟันตรงเท่านั้น ไม่พิจารณาชุดทดเฟืองตัวหนอนที่ต่อกับสแตปเปอร์มอเตอร์เพื่อส่งกำลังไปยังเฟืองขับของเฟืองฟันตรง จากการทดลองตั้งจุดเริ่มต้นของระบบขับเคลื่อนเฟืองฟันตรงโดยใช้การสังเกตจากเครื่องหมายที่ทำไว้เพื่อกำหนดจุดเริ่มต้นแทนที่จะใช้ตำแหน่งอ้างอิงจากอุปกรณ์ตรวจวัดมุม ส่งผลให้การกำหนดจุดเริ่มต้นมีความคลาดเคลื่อนประมาณอยู่ในช่วง  $\pm 3.6$  องศา ดังรูปที่ 5.21



รูปที่ 5.21 การติดตั้งเฟืองฟันตรงโดยมีตำแหน่งเริ่มต้นผิดพลาด  $\pm 3.6$  องศา

### 5.2.1 ทดลองวางตำแหน่งเริ่มต้นผิดพลาดในการส่งกำลังด้วยเฟืองฟันตรง

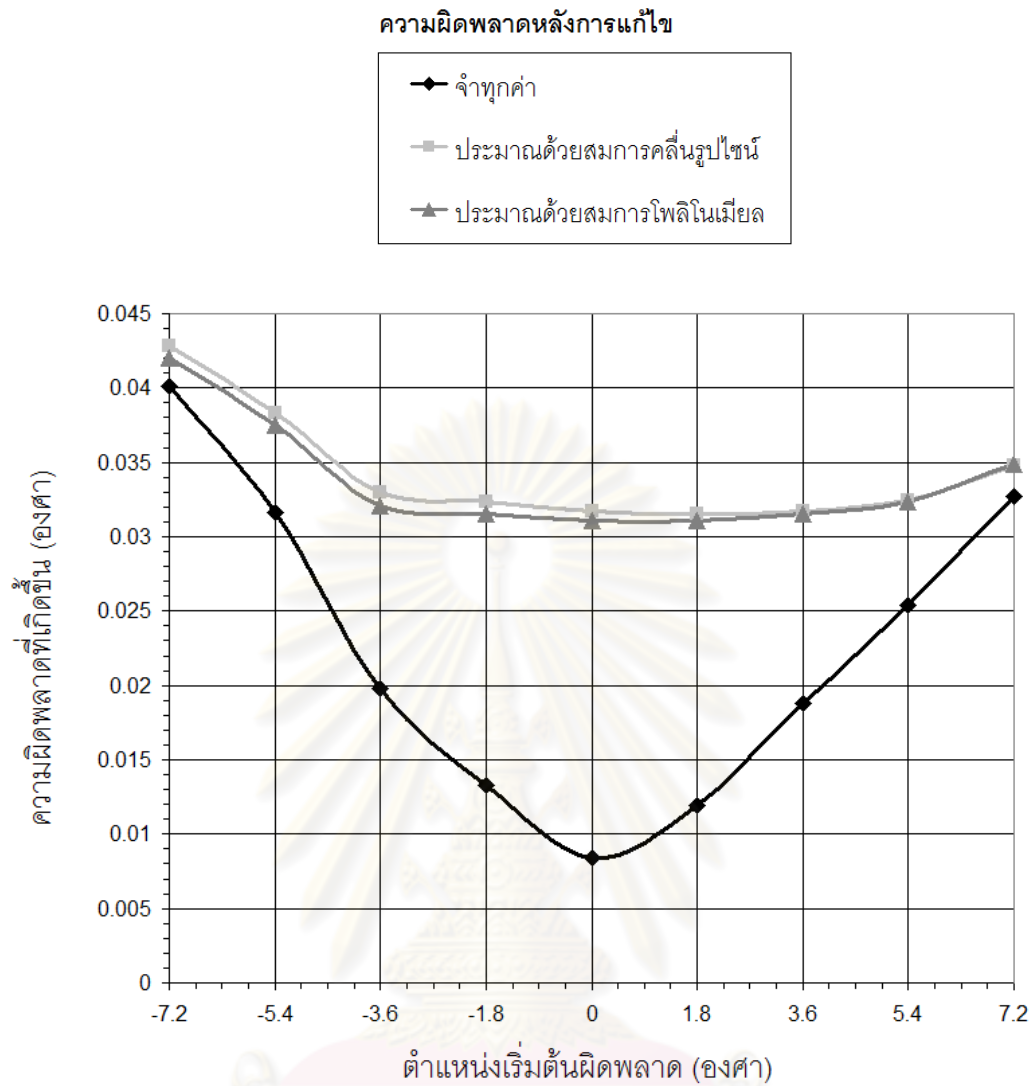
ทำการทดลองวัดความผิดพลาดที่เกิดขึ้นจากการส่งกำลัง โดยกำหนดช่วงของการวางตำแหน่งเริ่มต้นผิดพลาดไว้ที่  $\pm 3.6$  องศา ของตำแหน่งเฟืองขับ โดยแบ่งเป็นขั้น ทีละ 0.9 องศา ทดลองโดยใช้วิธีแก้ไขความผิดพลาดทั้ง 3 วิธี ได้แก่วิธีแก้ไขโดยการจำความผิดพลาดที่เกิดขึ้นทั้งหมด,

วิธีแก้ไขโดยประมาณความผิดพลาดด้วยสมการคลื่นรูปไซน์ และวิธีแก้ไขโดยประมาณความผิดพลาดด้วยสมการโพลีโนเมียล ได้ความผิดพลาดรากเฉลี่ยกำลังสอง (RMS) ของแต่ละวิธีการแก้ไขความผิดพลาด ดังตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 ความผิดพลาดที่เกิดขึ้นจากการวางตำแหน่งเริ่มต้นผิดพลาดในเฟืองฟันตรง

วิธีแก้ไขความ ตำแหน่ง ผิดพลาด เริ่มต้นผิดพลาด	จำความผิดพลาดที่ เกิดขึ้นทั้งหมด RMS (องศา)	ประมาณโดย สมการคลื่นรูปไซน์ RMS (องศา)	ประมาณโดย สมการโพลีโนเมียล RMS (องศา)
+3.6 องศา	$32.717 \times 10^{-3}$	$34.761 \times 10^{-3}$	$34.889 \times 10^{-3}$
+2.7 องศา	$25.413 \times 10^{-3}$	$32.408 \times 10^{-3}$	$32.352 \times 10^{-3}$
+1.8 องศา	$18.806 \times 10^{-3}$	$31.744 \times 10^{-3}$	$31.515 \times 10^{-3}$
+0.9 องศา	$11.894 \times 10^{-3}$	$31.493 \times 10^{-3}$	$31.059 \times 10^{-3}$
<b>0 องศา</b>	<b><math>8.407 \times 10^{-3}</math></b>	<b><math>31.685 \times 10^{-3}</math></b>	<b><math>31.047 \times 10^{-3}</math></b>
-0.9 องศา	$13.320 \times 10^{-3}$	$32.332 \times 10^{-3}$	$31.555 \times 10^{-3}$
-1.8 องศา	$19.748 \times 10^{-3}$	$32.986 \times 10^{-3}$	$32.079 \times 10^{-3}$
-2.7 องศา	$31.640 \times 10^{-3}$	$38.345 \times 10^{-3}$	$37.514 \times 10^{-3}$
-3.6 องศา	$40.137 \times 10^{-3}$	$42.824 \times 10^{-3}$	$42.040 \times 10^{-3}$

จากตารางที่ 5.1 นำมาเขียนกราฟเพื่อเปรียบเทียบผลได้ดังรูปที่ 5.22 ซึ่งจะเห็นได้ว่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นจากการติดตั้งตำแหน่งเริ่มต้นผิดพลาดส่งผลให้ความผิดพลาดที่เกิดขึ้นหลังการแก้ไขโดยวิธีการประมาณโดยสมการลูกคลื่นไซน์และประมาณโดยสมการโพลีโนเมียลมีค่าเปลี่ยนแปลงไปเพียงเล็กน้อยเท่านั้น เช่น การติดตั้งตำแหน่งเริ่มต้นเฟืองขับเคลื่อนเคลื่อนไป ณ ตำแหน่ง + 3.6 องศา ส่งผลให้ความผิดพลาดในรูปร่างเฉลี่ยกำลังสอง (RMS) ที่ได้หลังจากการแก้ไขความผิดพลาดโดยการประมาณโดยสมการลูกคลื่นไซน์นั้นมีค่าเพิ่มขึ้นจาก  $31.685 \times 10^{-3}$  องศา เป็น  $34.761 \times 10^{-3}$  องศา หรือเพิ่มขึ้นเพียง  $3.076 \times 10^{-3}$  องศา ซึ่งเมื่อเทียบกับความผิดพลาดก่อนการแก้ไขในรูปร่างเฉลี่ยกำลังสอง  $134.180 \times 10^{-3}$  องศา คิดเป็นเพียง 2.292% แตกต่างจากการแก้ไขด้วยวิธีจำความผิดพลาดที่เกิดขึ้นทั้งหมดซึ่งการวางตำแหน่งผิดพลาดนั้นส่งผลกระทบต่อความผิดพลาดที่วัดได้มากพอสมควร เช่นการวางตำแหน่งผิดพลาดที่ +3.6 องศา ส่งผลให้ความผิดพลาดเพิ่มจาก  $8.407 \times 10^{-3}$  องศา เป็น  $32.717 \times 10^{-3}$  องศา เพิ่มขึ้น  $24.310 \times 10^{-3}$  องศา หรือคิดเป็น 18.117% เมื่อเทียบกับความผิดพลาดก่อนการแก้ไขในรูปร่างเฉลี่ยกำลังสองที่มีค่า  $134.180 \times 10^{-3}$  องศา

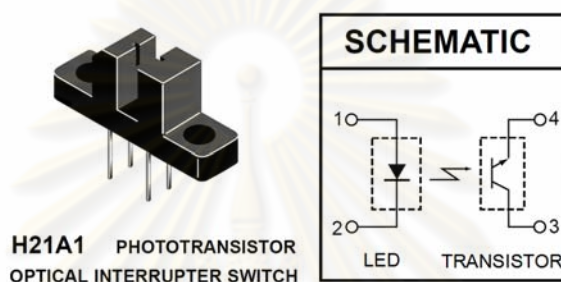


รูปที่ 5.22 ความผิดพลาดรากเฉลี่ยกำลังสองที่เกิดขึ้นจากการวางตำแหน่งเริ่มต้นผิดพลาดในเฟืองฟันตรง

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

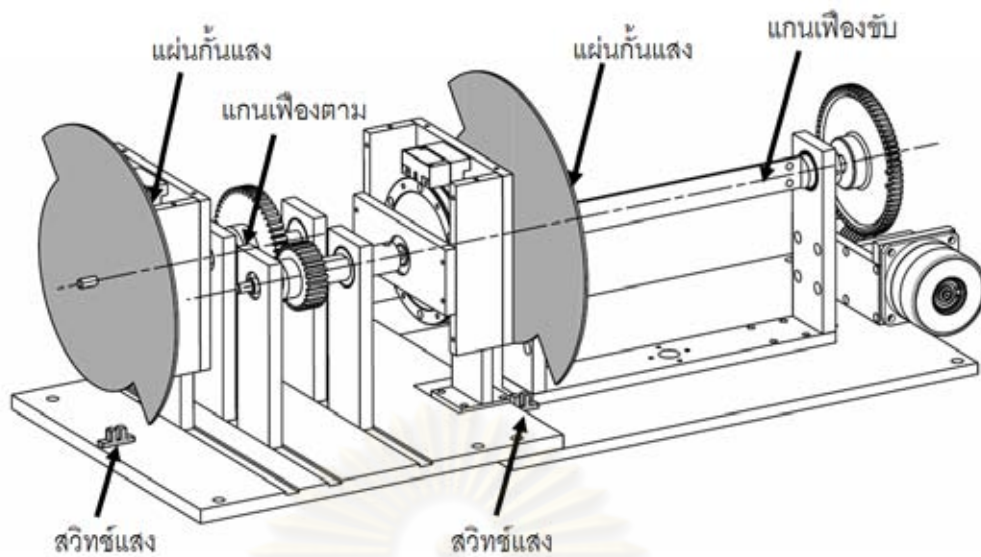
## 5.2.2 วิธีการแก้ไขการวางตำแหน่งเริ่มต้นของเฟืองฟันตรงผิดพลาดโดยใช้สวิทช์แสง

แนวทางในการลดความผิดพลาดจากการวางตำแหน่งเริ่มต้นของเฟืองผิดพลาด คือการใช้สวิทช์แสงช่วยหาตำแหน่งเริ่มต้นของเฟืองแทนที่จะใช้การสังเกตจากเครื่องหมายที่ทำไว้ โดยสวิทช์แสงที่ใช้จะเป็นรุ่น H21A1 ดังรูปที่ 5.23 ปกติไดโอดเปล่งแสง (light emitting diode, LED) จะส่งแสงไปยังทรานซิสเตอร์ (Transistor) ทำให้ไฟฟ้าไหลจากขั้ว 3 ไป ขั้ว 4 ได้ เมื่อมีสิ่งกีดขวางระหว่างไดโอดเปล่งแสงกับทรานซิสเตอร์จะทำให้ไฟฟ้าไม่สามารถไหลผ่านจากขั้ว 3 ไปขั้ว 4 นำหลักการทำงานของสวิทช์นี้มาสร้างระบบไฟเตือนเมื่อมีวัตถุขึ้นระหว่างไดโอดเปล่งแสงกับทรานซิสเตอร์



รูปที่ 5.23 สวิทช์แสงรุ่น H21A1

นำระบบไฟเตือนดังกล่าวติดตั้งไว้ที่เฟืองขับและเฟืองตามดังรูปที่ 5.24 กำหนดจุดเริ่มต้นของความผิดพลาดด้วยวิธีการหมุนเฟืองขับในทิศทางตามเข็มนาฬิกาไปเรื่อยๆจนแผ่นกั้นแสงที่เฟืองตามหมุนตัดกับสวิทช์แสงทำให้ไฟเตือนสว่างขึ้น จากนั้นหมุนเฟืองขับไปอีกจนแผ่นกั้นแสงที่เฟืองขับหมุนตัดกับสวิทช์แสงอีกครั้งจนไฟเตือนสว่างจึงหยุดหมุน แล้วกำหนดให้ตำแหน่งนี้เป็นตำแหน่งเริ่มต้นของความผิดพลาด ซึ่งจากการทดลองหาจุดเริ่มต้นโดยวิธีการนี้ เกิดความผิดพลาดขึ้น  $\pm 20$  ชั้นของสเต็ปเปอร์มอเตอร์ หรือคิดเป็น  $\pm 0.36$  องศาเฟืองขับ ลดลง 10 เท่าจากการกำหนดจุดเริ่มต้นโดยการสังเกตเครื่องหมายที่มีความผิดพลาดในการวางจุดเริ่มต้น  $\pm 3.6$  องศาเฟืองขับ วิธีการลดความผิดพลาดนี้มีข้อดีคืออุปกรณ์ราคาไม่แพง ระบบไม่ยุ่งยาก ติดตั้งง่าย และลดความผิดพลาดจากการวางตำแหน่งได้มาก ในการสร้างเฮลิโอสแตทที่ใช้ระบบเฟืองฟันตรงเป็นตัวส่งกำลังและใช้วิธีการแก้ไขความผิดพลาดด้วยวิธีการจำความผิดพลาดที่เกิดขึ้นทั้งหมดไว้ก่อน ควรจะติดตั้งระบบนี้เพิ่มเข้าไป เพราะความผิดพลาดที่เพิ่มขึ้นจากการวางตำแหน่งผิดพลาดด้วยวิธีการแก้ไขนี้มีค่ามาก เช่นการวางตำแหน่งผิดพลาด  $-3.6$  องศา ส่งผลให้มีความผิดพลาดรวมเกิดขึ้นในรูปรากเฉลี่ยกำลังสอง  $40.137 \times 10^{-3}$  องศา หากตำแหน่งวางผิดพลาด  $-0.9$  องศา จะทำให้ความผิดพลาดรวมในรูปรากเฉลี่ยกำลังสองมีค่า  $13.320 \times 10^{-3}$  องศา ซึ่งลดลงถึง  $26.817 \times 10^{-3}$  องศา คิดเป็น 19.985% เมื่อเทียบกับความผิดพลาดก่อนการแก้ไขในรูปรากเฉลี่ยกำลังสองที่มีค่า  $134.180 \times 10^{-3}$  องศา



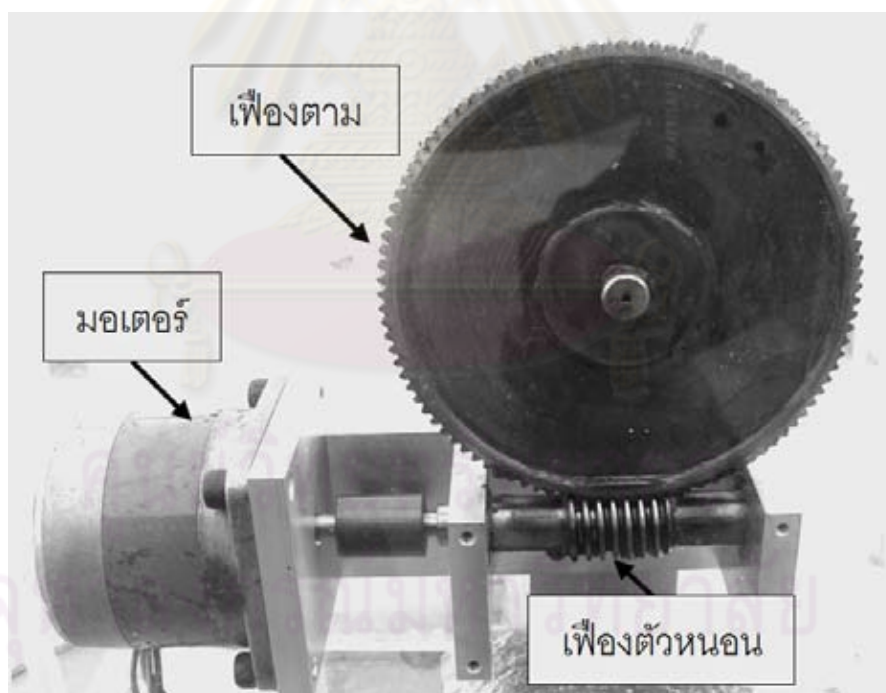
รูปที่ 5.24 ติดตั้งระบบไฟเตือนเพื่อใช้หาตำแหน่งเริ่มต้นในการขับเคลื่อน

### 5.2.3 สรุปการวางตำแหน่งเริ่มต้นผิดพลาดในการส่งกำลังด้วยเฟืองฟันตรง

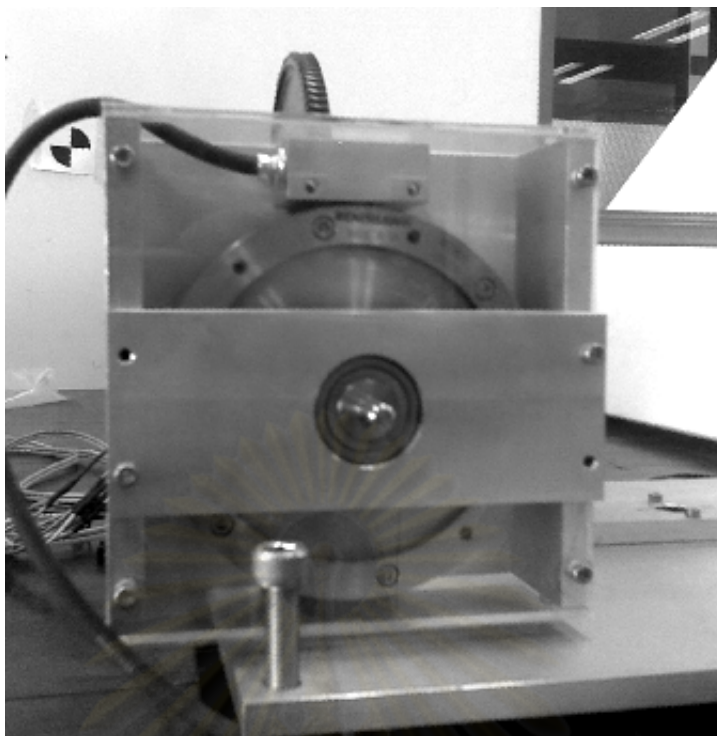
ผลของการวางตำแหน่งเริ่มต้นผิดพลาดในช่วงเฟืองขับ  $\pm 3.6$  องศา ส่งผลให้ความผิดพลาดหลังการแก้ไขด้วยวิธีการกำจัดความผิดพลาดทุกตำแหน่ง, การประมาณความผิดพลาดด้วยคลื่นรูปไซน์ และการประมาณความผิดพลาดด้วยสมการโพลีโนเมียลนั้นมีความผิดพลาดเพิ่มขึ้นสูงสุดคือ 23.647%, 8.445% และ 8.193% ตามลำดับ (เทียบกับความผิดพลาดรากเฉลี่ยกำลังสองก่อนการแก้ไขที่มีค่า  $134.180 \times 10^{-3}$  องศา ณ ตำแหน่งเฟืองขับเริ่มต้นผิดพลาด -3.6 องศา) แม้การวางตำแหน่งเริ่มต้นผิดพลาดนี้จะส่งผลให้เกิดความคลาดเคลื่อนในระบบส่งกำลังเพิ่มขึ้นไม่มากนัก แต่หากต้องการให้ระบบขับเคลื่อนมีประสิทธิภาพสูงขึ้นสามารถทำได้โดยการใช้ระบบไฟเตือนกำหนดตำแหน่งเริ่มต้นในการส่งกำลัง โดยระบบไฟเตือนนี้จะมีสวิตช์แสงเป็นอุปกรณ์ในการบอกตำแหน่งอ้างอิง จากผลการทดลองสามารถลดความผิดพลาดจากการวางตำแหน่งเริ่มต้น  $\pm 3.6$  องศาเฟืองขับ เหลือเพียง  $\pm 0.360$  องศาเฟืองขับ ลดลงถึง 10 เท่า การใช้ระบบไฟเตือนเพื่อบอกตำแหน่งเริ่มต้นของระบบขับเคลื่อนนี้มีข้อดีตรงที่อุปกรณ์ราคาไม่แพง, ระบบไม่ยุ่งยาก, ติดตั้งง่าย และเพิ่มความแม่นยำในการกำหนดจุดเริ่มต้นของเฟืองฟันตรงสูงกว่าเดิมมากเมื่อเทียบกับการกำหนดจุดเริ่มต้นโดยการดูจากเครื่องหมายที่ทำไว้

### 5.3 การส่งกำลังด้วยเฟืองตัวหนอน

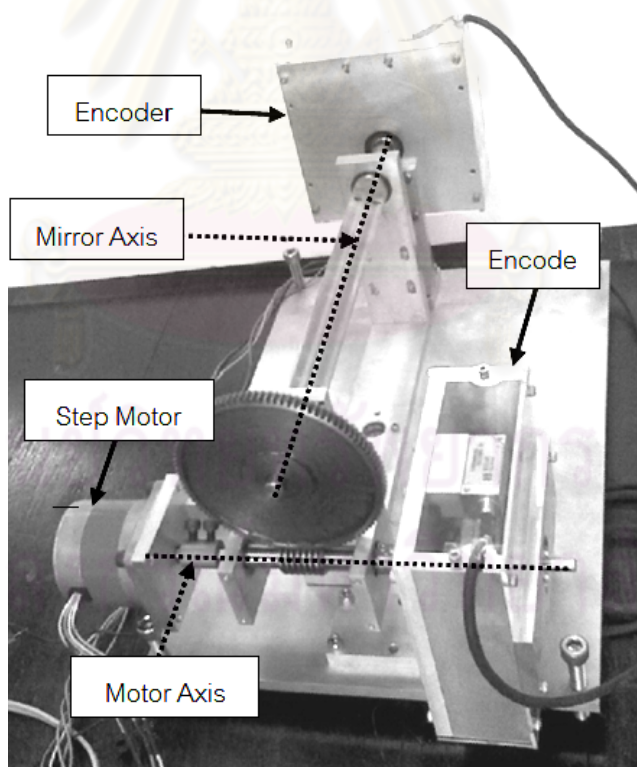
ในระบบการทดลองจะใช้เฟืองตัวหนอนที่มีอัตราทด 1 ต่อ 100 โดยเฟืองตามมีจำนวนฟันเท่ากับ 100 ฟัน ดังรูปที่ 5.25 ซึ่งนำมาต่อเข้ากับแกนกระจกของแฮลิโอสแตทและนำระบบอุปกรณ์ตรวจวัดมุม (encoder) รูปที่ 5.26 มาติดตั้ง ณ ตำแหน่งแกนกระจกและแกนมอเตอร์ ระบบโดยรวมของชุดทดสอบนั้นแสดงในรูปที่ 5.27 ตัวมอเตอร์ที่ใช้เป็นสเต็ปเปอร์มอเตอร์แบบแปรค่ารีลักแตนซ์ มีความละเอียด 200 ขั้นต่อการหมุน 1 รอบ คิดเป็นความละเอียดในการขับเคลื่อน 20,000 ขั้นต่อการหมุนแกนกระจกแฮลิโอสแตท 1 รอบ ในการทดลองนั้นจะหมุนแกนกระจกไปในทิศทางเดียวเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดความคลาดเคลื่อนจากระยะห่างระหว่างฟันที่ขบกัน (backlash error) อีกทั้งใช้เชือกมัดติดมู่เล่เส้นผ่านศูนย์กลาง 2 เซนติเมตร ไว้กับสปริงที่มีค่านิจสปริง ( $K$ ) = 2.5 นิวตันต่อเซนติเมตร ดังรูปที่ 5.28 เพื่อให้เฟืองตัวหนอนขบติดกับเฟืองตามตลอดเวลา ป้องกันไม่ให้ตำแหน่งผิดพลาดไปเมื่อไม่ได้จ่ายไฟให้กับสเต็ปเปอร์มอเตอร์ (เนื่องมาจากใช้สเต็ปเปอร์มอเตอร์แบบแปรค่ารีลักแตนซ์ หากไม่จ่ายไฟให้ขดลวดของมอเตอร์ ตัวโรเตอร์จะสามารถหมุนได้อย่างอิสระ)



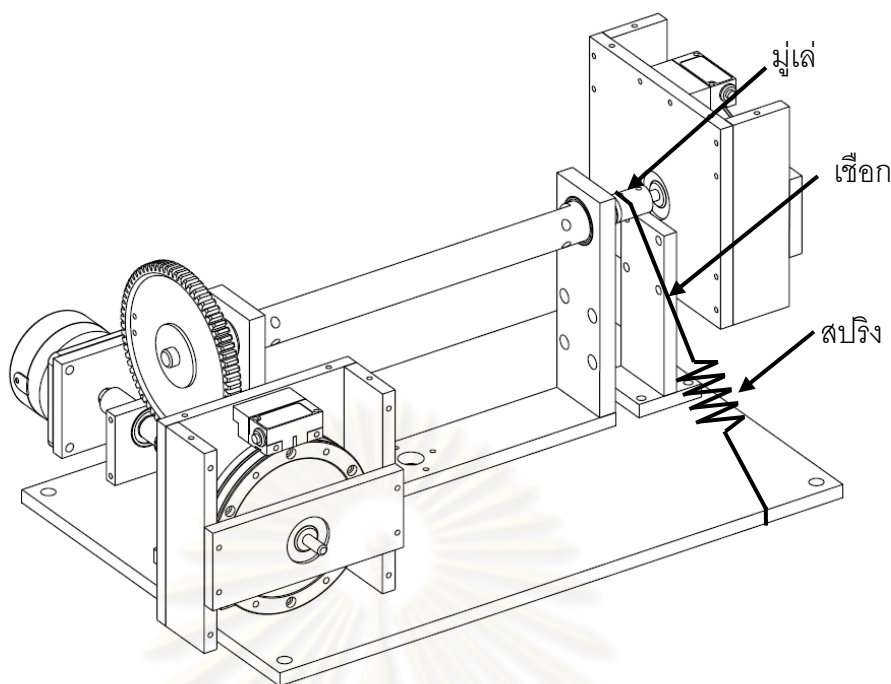
รูปที่ 5.25 เฟืองตัวหนอน อัตราทด 1 ต่อ 100



รูปที่ 5.26 อุปกรณ์ตรวจวัดมุม



รูปที่ 5.27 ระบบที่ใช้ในการทดสอบความผิดพลาดของเฟืองตัวหนอน

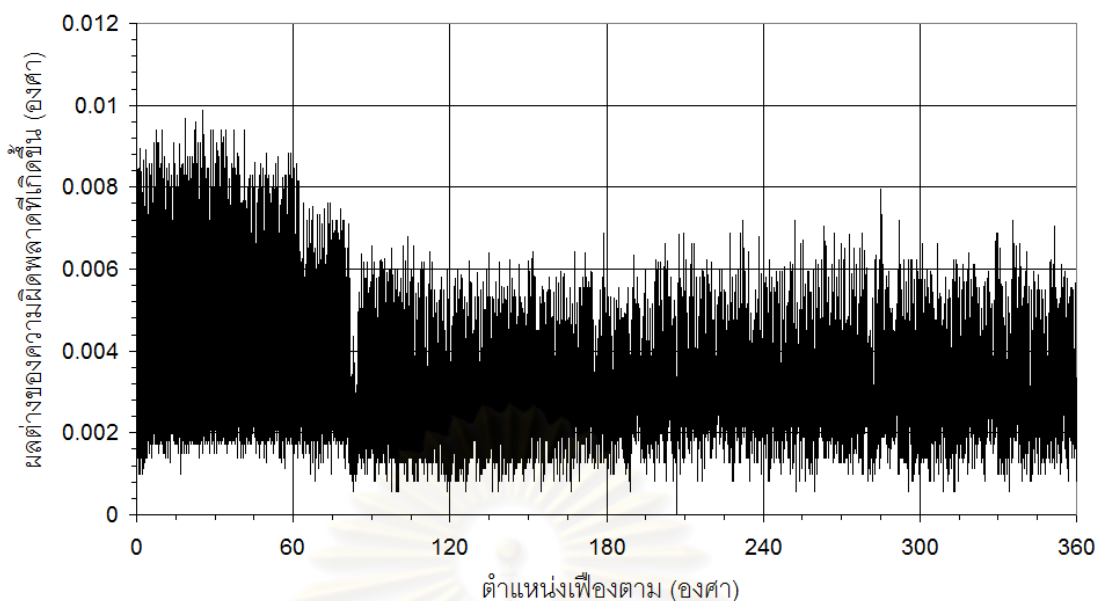


รูปที่ 5.28 ลักษณะการมัดเชือกติดมู่เล่ไว้กับสปริง

### 5.3.1 ความสามารถในการซ้ำที่เดิมของการส่งกำลังด้วยเฟืองตัวหนอน

ในหัวข้อนี้จะทำการทดสอบความสามารถในการซ้ำที่เดิม (repeatability) ในการส่งกำลังด้วยเฟืองตัวหนอนว่ามีหรือไม่ หากไม่มีความสามารถนี้ตำแหน่งที่ได้จากการส่งกำลังจะมีค่าไม่แน่นอน ส่งผลให้ความผิดพลาดที่เกิดขึ้นมีค่าไม่แน่นอนตามไปด้วย ซึ่งจะทำให้ไม่สามารถแก้ไขความผิดพลาดโดยการจำความผิดพลาดที่เกิดขึ้นไว้ก่อนได้ การทดลองนี้ทำโดยการอ่านค่ามุมที่เกิดจากการหมุนเฟืองตัวหนอน 1 รอบ แล้วหมุนย้อนกลับมาที่ตำแหน่งเดิม ทำการทดลองซ้ำอีก 5 รอบ จากนั้นหาค่ารากเฉลี่ยกำลังสอง (Root Mean Square, RMS) ของผลต่างในการทดลองแต่ละรอบแต่ละตำแหน่งของเฟืองมาสร้างกราฟ ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 5.29 ซึ่งมีผลต่างสูงสุดอยู่ที่  $9.868 \times 10^{-3}$  องศา พิจารณาในรูปรากเฉลี่ยกำลังสองได้  $3.304 \times 10^{-3}$  องศา ถือเป็นค่าที่ยอมรับได้ เพราะมีค่าน้อยกว่าความละเอียดของระบบขับเคลื่อน (สเต็ปเปอร์มอเตอร์หมุนไป 1 ขั้น จะทำให้เฟืองตัวหนอนหมุนไป  $18 \times 10^{-3}$  องศา) ยิ่งถ้าเทียบกับความผิดพลาดรวมที่เกิดขึ้น (เนื้อหาในหัวข้อถัดไป) ที่มีค่าในรูปรากเฉลี่ยกำลังสอง  $49.085 \times 10^{-3}$  องศา คิดเป็นเพียง 6.731% แสดงให้เห็นว่าผลต่างของการส่งกำลังในแต่ละครั้งนั้นส่งผลต่อความผิดพลาดรวมที่เกิดขึ้นน้อยมาก จึงสามารถสรุปได้ว่าการส่งกำลังโดยใช้เฟืองฟันตรงนี้มีความสามารถในการซ้ำที่เดิมเพียงพอต่อการใช้เป็นระบบขับเคลื่อนของแอสลิโอสแตท

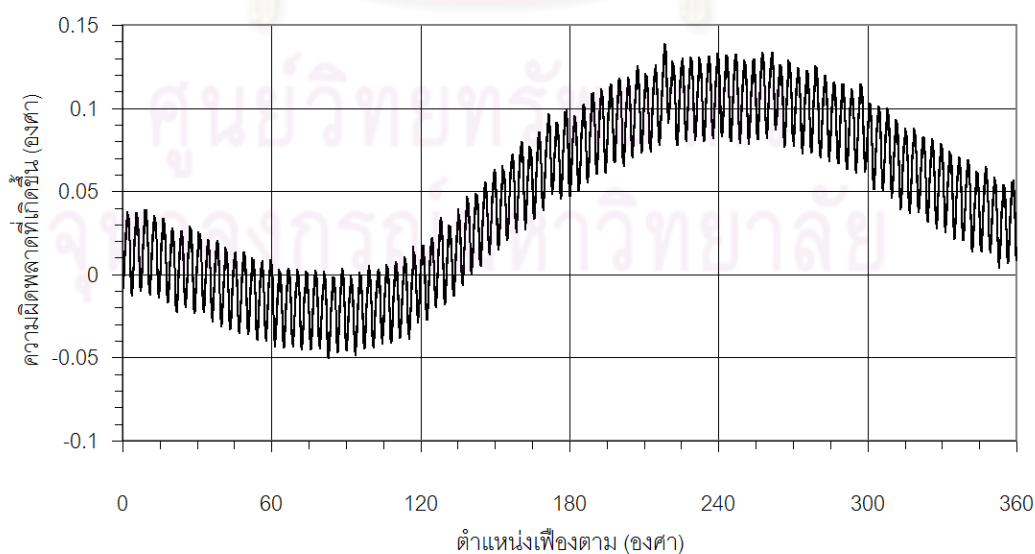




รูปที่ 5.29 ผลต่างเฉลี่ยของความผิดพลาดที่เกิดขึ้นจากการส่งกำลัง 5 รอบ

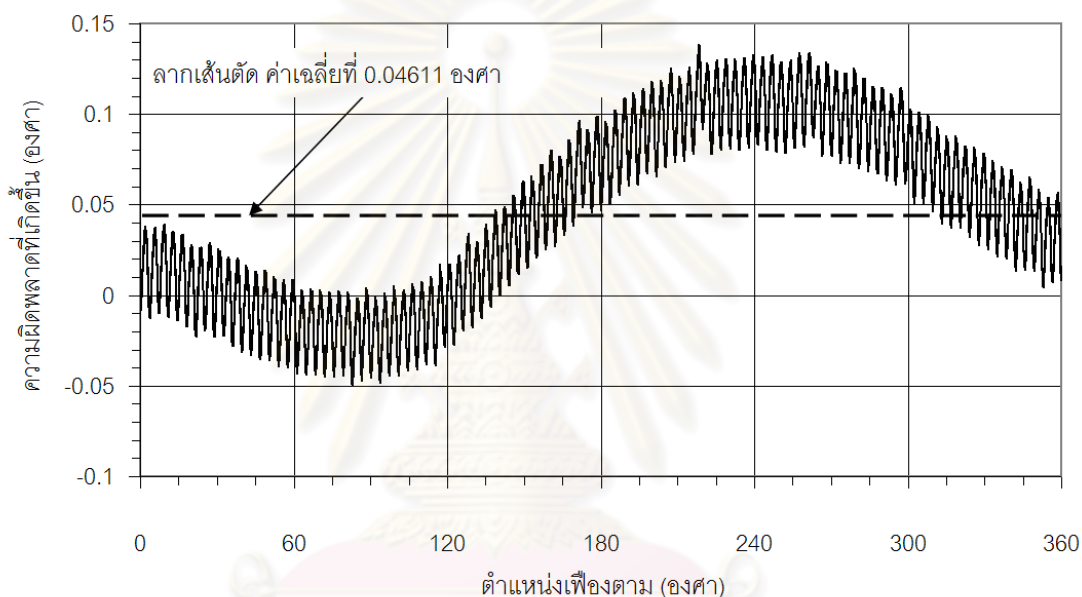
### 5.3.2 วัดความผิดพลาดที่เกิดขึ้นจากการส่งกำลังด้วยเฟืองตัวหนอน

ทำการทดลองโดยหมุนเฟืองตัวหนอน 100 รอบ เพื่อขับเฟืองตามให้หมุนไป 1 รอบหรือ หมุนไป 360 องศา โดยจะเก็บค่าตำแหน่งการเคลื่อนที่ไว้เพื่อหาความผิดพลาดที่เกิดขึ้นจากการส่งกำลัง ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 5.30 เพื่อให้ดูง่ายความผิดพลาดที่วัดได้จะเทียบกับตำแหน่งเฟืองตาม เนื่องจากเฟืองตัวหนอนมีอัตราทด 1 ต่อ 100 หากวัดความผิดพลาดเทียบกับเฟืองขับ จะต้องใช้มุมเปรียบเทียบตำแหน่งถึง 3,600 องศา



รูปที่ 5.30 ความผิดพลาดที่วัดได้จากการส่งกำลังด้วยเฟืองตัวหนอน อัตราทด 1 : 100

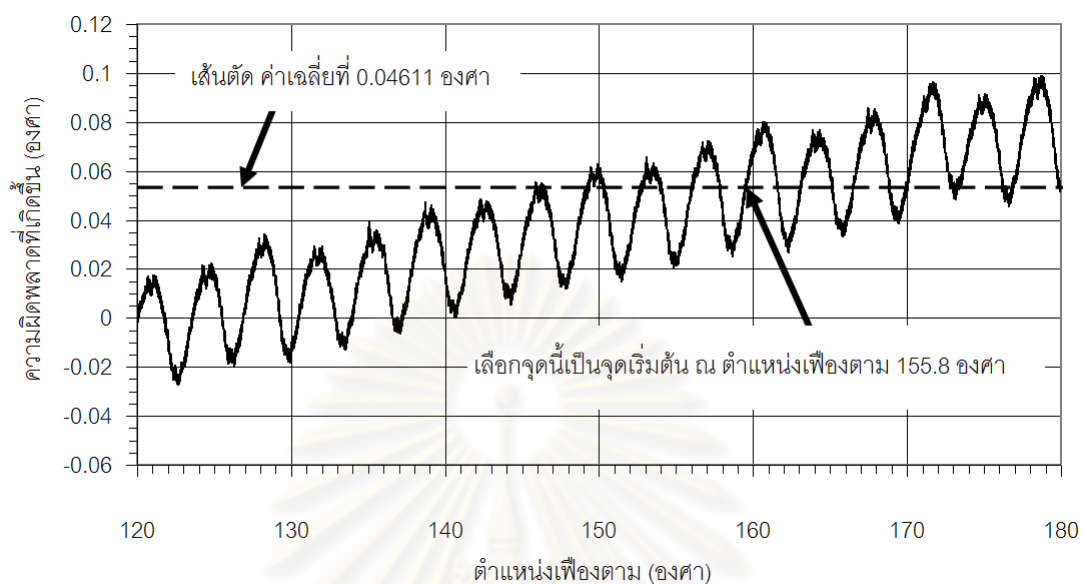
ทำการจัดตำแหน่งเริ่มต้นของความผิดพลาดใหม่ เพื่อให้ความผิดพลาดที่วัดได้นั้นสามารถนำไปเปรียบเทียบกับความผิดพลาดที่คำนวณได้จากทฤษฎี เนื่องมาจากก่อนการทดลองจะไม่ทราบว่าตำแหน่งใดของเฟืองเป็นตำแหน่งเริ่มต้นของความผิดพลาด จึงต้องทำการวัดความผิดพลาดที่เกิดขึ้นก่อน จากนั้นค่อยทำการหาจุดเริ่มต้นของความผิดพลาดซึ่งตามทฤษฎีความผิดพลาดที่เกิดขึ้นภายในเฟืองนั้น จะให้จุดเริ่มต้นของความผิดพลาดจะอยู่ ณ ตำแหน่งกึ่งกลางของความผิดพลาดทั้งหมดที่วัดได้ ซึ่งมีค่าเฉลี่ยของความผิดพลาดเป็น 0 องศา จากผลการทดลองนี้สามารถหาค่าเฉลี่ยของความผิดพลาดได้ 0.04611 องศา ดังนั้นทำการลากเส้นตัด ณ ตำแหน่งดังกล่าว ดังรูปที่ 5.31 เพื่อหาจุดเริ่มต้นของความผิดพลาด



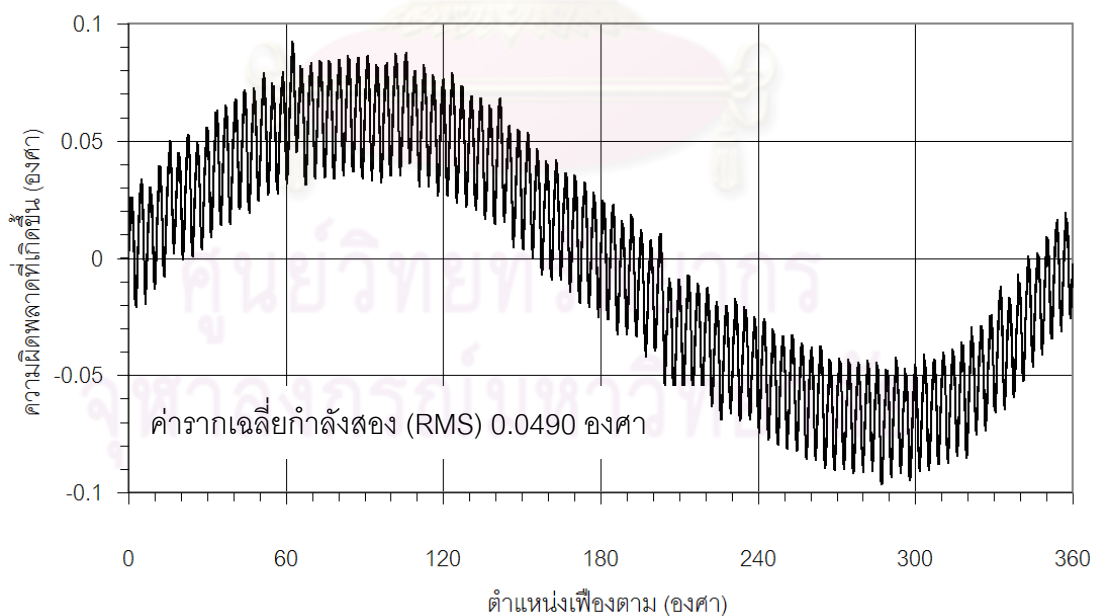
รูปที่ 5.31 ลากเส้นความผิดพลาดเฉลี่ย เพื่อหาตำแหน่งเริ่มต้นของความผิดพลาด

พิจารณาเส้นค่าเฉลี่ยตัดกับค่าความผิดพลาดที่วัดได้ ณ ตำแหน่งเฟืองตาม 120 องศา ถึง 180 องศา และเลือกค่าเริ่มต้นโดยดูตรงจุดตัดที่อยู่ตรงจุดเริ่มต้นของคลื่นรูปไซน์ลูกเล็ก ดังรูปที่ 5.32 เลือจุดตัด ณ ตำแหน่ง เฟืองตามที่ 155.8 องศา จากนั้นทำการเรียงข้อมูลความผิดพลาดที่วัดได้ใหม่ โดยกำหนดจุดเริ่มต้นดังกล่าวให้มีความผิดพลาดเริ่มต้นเป็น 0 องศา ซึ่งจะได้ความผิดพลาดที่จัดรูปใหม่ดังรูปที่ 5.33 ความผิดพลาดที่จัดรูปใหม่นี้เรียกว่าความผิดพลาดรวม (total composite error, TCE) มีค่ารากเฉลี่ยกำลังสอง(RMS)  $49.085 \times 10^{-3}$  องศา ความผิดพลาดนี้ประกอบไปด้วย 2 ส่วนคือ คลื่นรูปไซน์ลูกใหญ่ 1 ลูก โดยคลื่นรูปไซน์ใหญ่นี้แสดงถึงความผิดพลาดที่เกิดขึ้นจากจุดหมุนเยื้องศูนย์กลางของเฟืองตาม (runout position error) และคลื่นรูปไซน์ลูกเล็กซึ่งจะอยู่บนคลื่นรูปไซน์ลูกใหญ่อีกที มีจำนวน 100 ลูก เท่ากับจำนวนฟันเฟืองตาม คลื่นรูปไซน์เล็กนี้แสดงถึงความผิดพลาดที่เกิดขึ้นระหว่างฟัน ของเฟืองที่ขบกัน (tooth-to-tooth

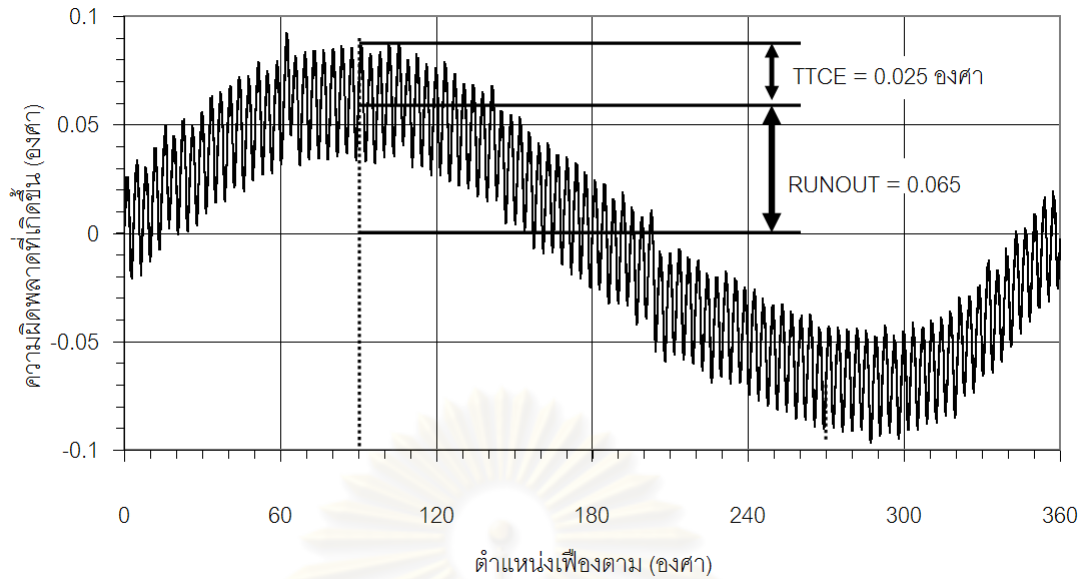
composite error, TTCE) ซึ่งสามารถวัดความผิดพลาดที่เกิดจากจุดหมุนเยื้องศูนย์กลางได้  $\pm 0.065$  องศา และความผิดพลาดที่เกิดขึ้นระหว่างพื้น ได้  $\pm 0.025$  องศา ดังแสดงในรูปที่ 5.34



รูปที่ 5.32 พิจารณาจุดเริ่มต้นของความผิดพลาดในช่วงตำแหน่งเพ็องตามตั้งแต่ 120 องศา ถึง 180 องศา



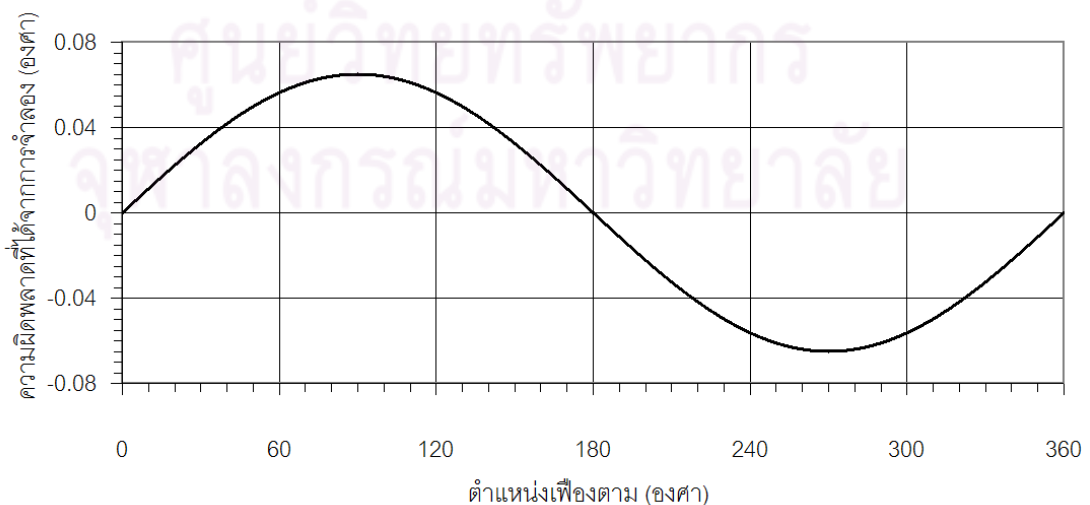
รูปที่ 5.33 ความผิดพลาดหลังจากกำหนดตำแหน่งเริ่มต้นแล้ว



รูปที่ 5.34 ค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นจากจุดหมุนเยื้องศูนย์กลางและความผิดพลาดที่เกิดขึ้นระหว่างพื้นของการส่งกำลังด้วยเฟืองตัวหนอน

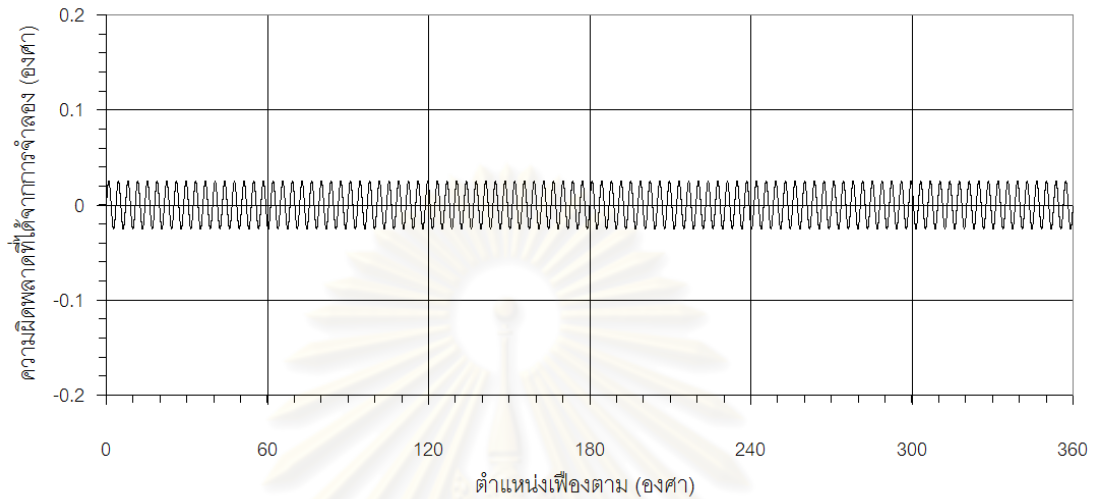
### 5.3.3 การประมาณค่าความผิดพลาดของเฟืองตัวหนอนด้วยสมการคลื่นรูปไซน์

ทำการจำลองความผิดพลาดที่เกิดขึ้นทางทฤษฎีโดยใช้สมการคลื่นรูปไซน์ เพื่อนำมาเปรียบเทียบกับความผิดพลาดจริงที่วัดได้ เริ่มโดยการจำลองความผิดพลาดที่เกิดขึ้นจากจุดหมุนเยื้องศูนย์กลางก่อน จากรูปที่ 5.34 กำหนดให้ค่า  $\frac{e}{R}$  (ขนาดของ runout error) มีค่า  $\pm 0.065$  องศา แทนในสมการที่ 4.4 ได้กราฟดังรูปที่ 5.35



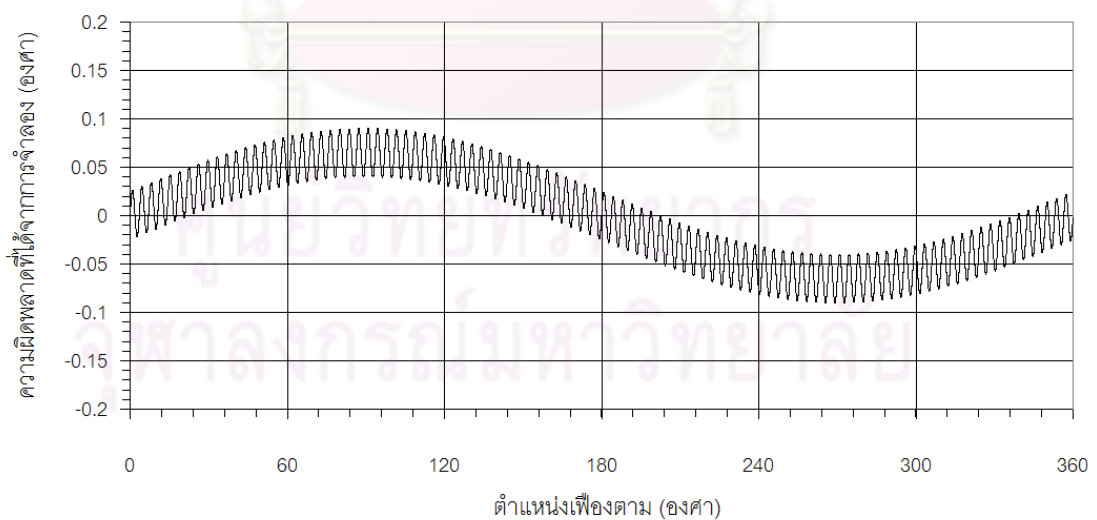
รูปที่ 5.35 การจำลองความผิดพลาดที่เกิดขึ้นจากจุดหมุนเยื้องศูนย์กลาง

ทำการจำลองความผิดพลาดที่เกิดขึ้นระหว่างฟัน จากรูปที่ 5.34 กำหนดให้  $\frac{E_H}{R}$  (ขนาดของ TTCE) มีค่า  $\pm 0.025$  องศา แทนลงในสมการที่ 4.1 ได้กราฟดังรูปที่ 5.36 ซึ่งกราฟที่ได้มีลักษณะเป็นคลื่นรูปไซน์ 100 ลูก เท่ากับจำนวนฟันของเฟืองตาม



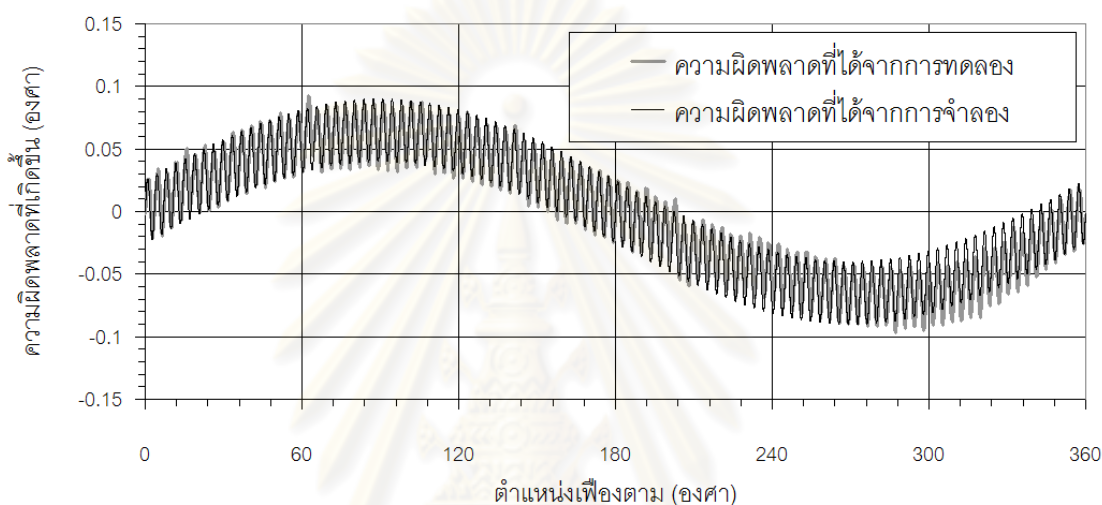
รูปที่ 5.36 การจำลองค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นระหว่างฟันที่ขบกัน

จากนั้นนำความผิดพลาดที่เกิดจากจุดหมุนเยื้องศูนย์กลางและความผิดพลาดที่เกิดขึ้นระหว่างฟันมารวมกันกลายเป็นความผิดพลาดรวม ซึ่งได้ผลการจำลองดังรูป 5.37

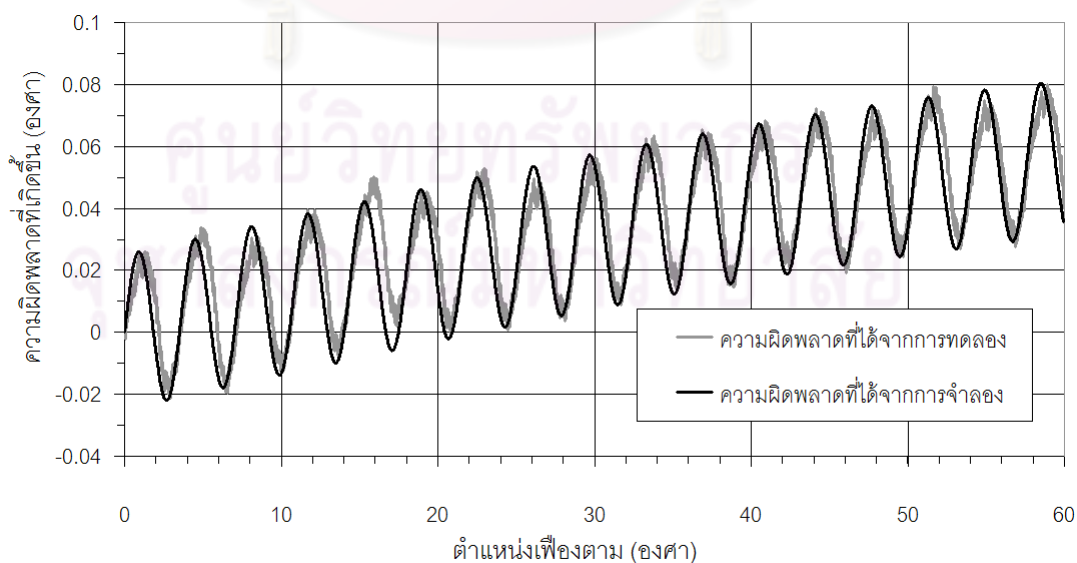


รูปที่ 5.37 ผลการจำลองความผิดพลาดรวมที่เกิดขึ้นจากการส่งกำลังด้วยเฟืองตัวหนอน

นำความผิดพลาดที่ได้จากการจำลองในรูปที่ 5.37 มาเปรียบเทียบกับความผิดพลาดที่ได้จากการทดลองในรูปที่ 5.33 ได้กราฟดังรูปที่ 5.38 ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบความผิดพลาดจากทั้ง 2 วิธีแล้วมีลักษณะคล้ายกันมาก โดยมีความแตกต่างในรูปร่างเฉลี่ยกำลังสอง (Root Mean Square, RMS) เพียง  $9.671 \times 10^{-3}$  องศา คิดเป็นเพียง 10.454% ของความผิดพลาดสูงสุดที่เกิดขึ้นจริง  $92.506 \times 10^{-3}$  องศา เพื่อให้เห็นผลต่างของทั้งสองวิธีอย่างชัดเจนได้จึงได้ทำการขยายกราฟในช่วงตำแหน่งเฟืองตาม 0 องศา ถึง 60 องศา ได้ผลดังรูปที่ 5.39 โดยจะนำค่าที่ได้จากการจำลองนี้ไปใช้ในการลดความผิดพลาดที่เกิดขึ้นในหัวข้อต่อไป



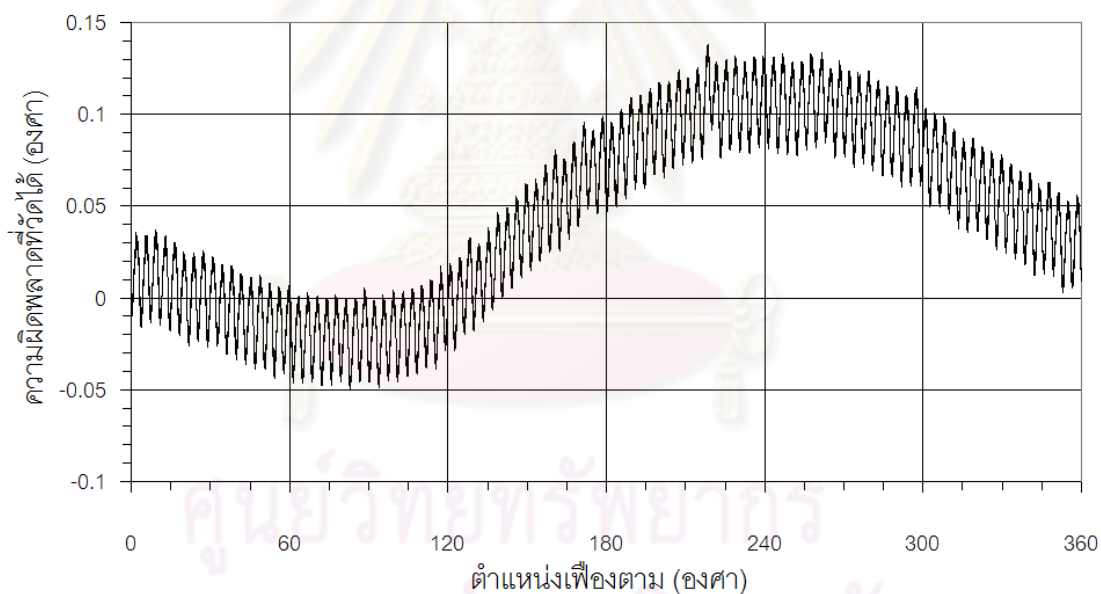
รูปที่ 5.38 การเปรียบเทียบความผิดพลาดที่ได้จากการทดลองและได้จากการจำลอง



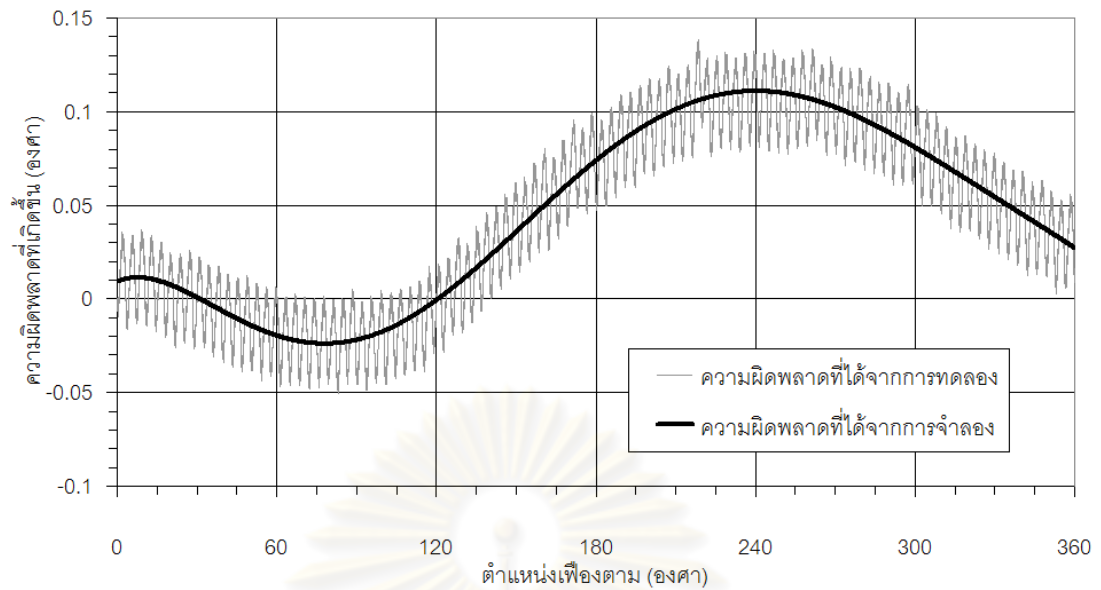
รูปที่ 5.39 การเปรียบเทียบในช่วงตำแหน่งเฟืองตาม 0 องศาถึง 60 องศา

### 5.3.4 การประมาณค่าความผิดพลาดของเฟืองตัวหนอนด้วยสมการโพลีโนเมียล

แนวทางในการจำลองความผิดพลาดที่เกิดขึ้นอีกวิธีคือการใช้สมการโพลีโนเมียลประมาณค่า ซึ่งสมการนี้สามารถจำลองความผิดพลาดที่เกิดขึ้นจากข้อมูลความผิดพลาดที่วัดได้จริงโดยไม่ต้องทำการปรับแต่งข้อมูลที่วัดได้เลย แตกต่างจากการประมาณความผิดพลาดที่เกิดขึ้นโดยใช้ทฤษฎีความผิดพลาดของเฟืองซึ่งจำลองโดยใช้สมการคลื่นรูปไซน์ดังหัวข้อที่ 5.3.3 ที่ต้องนำความผิดพลาดที่วัดได้มาพิจารณาหาจุดเริ่มต้นของความผิดพลาดก่อน เพื่อใช้ในการจัดเรียงจุดเริ่มต้นใหม่ นอกจากนี้ยังต้องทำการวัดความผิดพลาดที่เป็นผลมาจากจุดหมุนเอียงศูนย์และความผิดพลาดที่เป็นผลมาจากฟันที่ขบกันอีกด้วย เพื่อใช้ค่าดังกล่าวในการสร้างสมการความผิดพลาดที่มีความแม่นยำใกล้เคียงกับความผิดพลาดจริงที่เกิดขึ้น จากการทดลองวัดความผิดพลาดที่เกิดขึ้นจริงเพื่อใช้ในการสร้างสมการโพลีโนเมียล ได้กราฟดังรูปที่ 5.40 นำค่าที่ได้ดังกล่าวมาสร้างสมการโพลีโนเมียล โดยเลือกใช้โพลีโนเมียลอันดับ 6 เพราะให้ผลที่ได้จากการประมาณค่าความผิดพลาดใกล้เคียงกับความผิดพลาดที่วัดได้จริง ดังรูปที่ 5.41

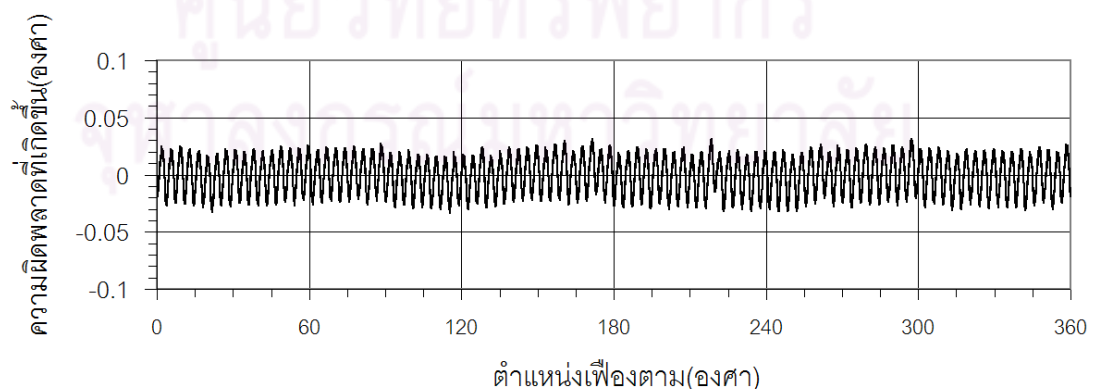


รูปที่ 5.40 ความผิดพลาดที่วัดได้จากการส่งกำลังด้วยเฟืองหนอนเพื่อใช้สร้างสมการโพลีโนเมียล



รูปที่ 5.41 ความผิดพลาดที่ประมาณด้วยสมการโพลีโนเมียลอันดับ 6

จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่าความผิดพลาดที่ได้จากการทดลองและความผิดพลาดที่ได้จากการจำลองด้วยสมการโพลีโนเมียลมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน อย่างไรก็ตามเมื่อนำความผิดพลาดทั้งสองมาลบกันเพื่อหาผลต่าง ได้ผลดังรูปที่ 5.42 โดยมีลักษณะเป็นคลื่นรูปไซน์ 100 ลูก เท่ากับจำนวนฟันของเฟืองตามซึ่งเป็นลักษณะของความผิดพลาดที่เกิดขึ้นระหว่างฟัน ฉะนั้นการจำลองด้วยสมการโพลีโนเมียลสามารถประมาณค่าความผิดพลาดได้เพียงความผิดพลาดที่เกิดขึ้นจากจุดหมุนเยื้องศูนย์กลางเท่านั้น ไม่สามารถประมาณความผิดพลาดที่เกิดขึ้นระหว่างฟันได้ ผลของการประมาณค่าความผิดพลาดด้วยสมการโพลีโนเมียลนี้จะนำไปใช้ในการลดความผิดพลาดที่เกิดขึ้นในหัวข้อต่อไป

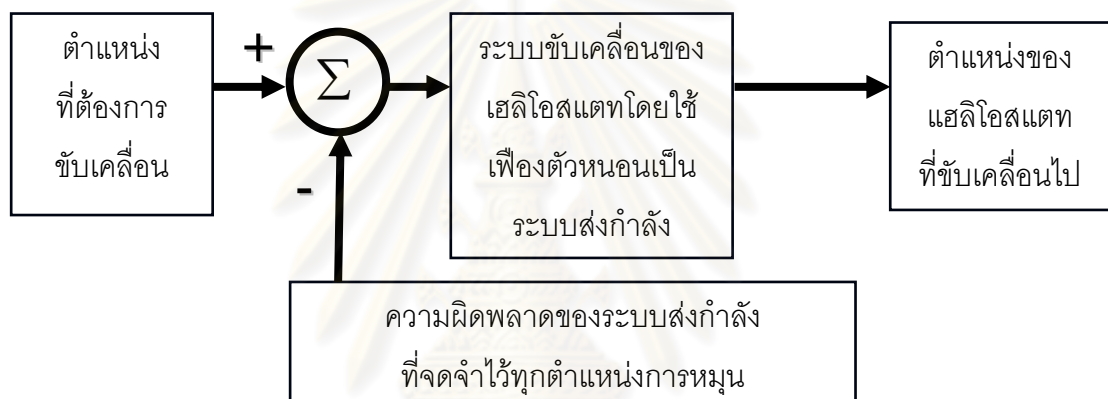


รูปที่ 5.42 ผลต่างของความผิดพลาดจากการทดลองและจากการจำลองด้วยสมการโพลีโนเมียล

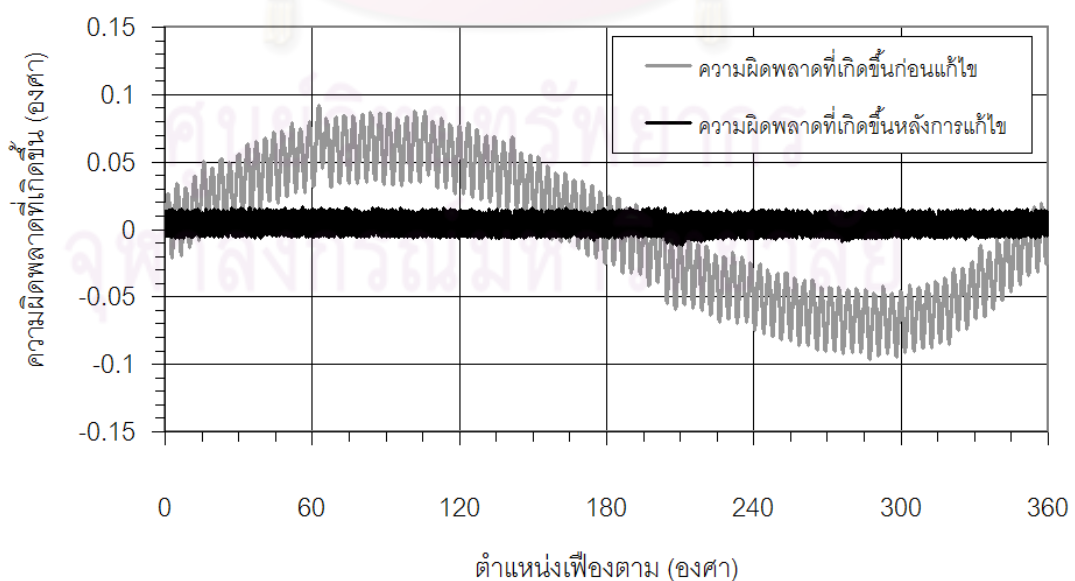


### 5.3.5 การทดลองลดความผิดพลาดของเฟืองตัวหนอนโดยวิธีการจำความผิดพลาดทุกตำแหน่งการหมุน

ทำการลดความผิดพลาดที่เกิดขึ้นด้วยวิธีการควบคุมแบบเปิดดังรูปที่ 5.43 โดยจะนำความคลาดเคลื่อนของระบบส่งกำลังที่จดจำไว้มาพิจารณาในการขับเคลื่อนเพื่อให้ได้ตำแหน่งในการหมุนของเฮลิโอสแตทที่มีความแม่นยำเพิ่มขึ้น ในการทดลองนี้จะแทนค่าความคลาดเคลื่อนของระบบส่งกำลังที่จดจำไว้ด้วยความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นจริงที่ได้จากการทดลอง ซึ่งหลังจากการแก้ไขแล้ว ได้ผลดังรูปที่ 5.44 จากผลการทดลองสามารถลดความผิดพลาดที่เกิดขึ้นในรูปแบบรากเฉลี่ยกำลังสอง (RMS) จาก  $49.085 \times 10^{-3}$  องศา เหลือเพียง  $6.653 \times 10^{-3}$  องศา ซึ่งมีค่าลดลงถึง 7.377 เท่า



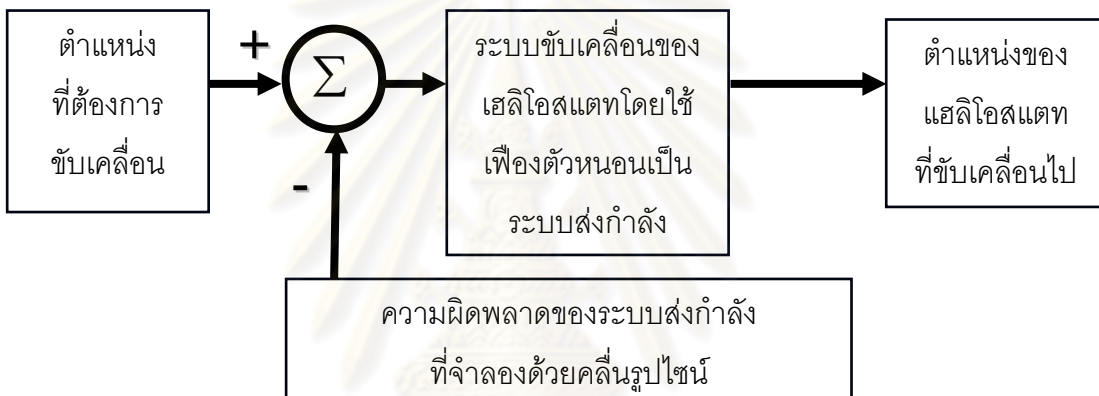
รูปที่ 5.43 ระบบควบคุมโดยลดความผิดพลาดด้วยวิธีจำความผิดพลาดทุกตำแหน่งการหมุน



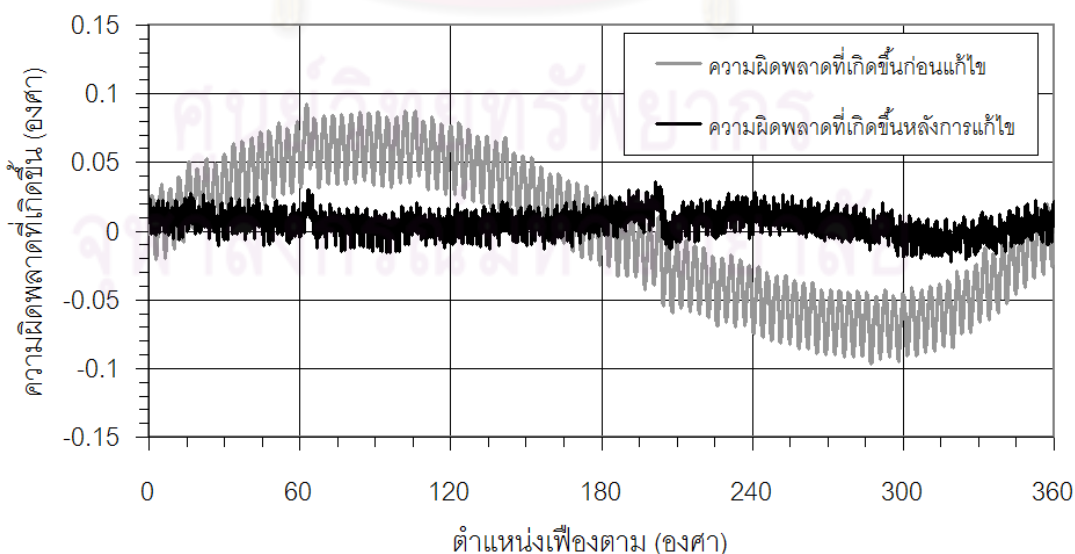
รูปที่ 5.44 ผลที่ได้จากการลดความผิดพลาดด้วยวิธีจำความผิดพลาดทุกตำแหน่งการหมุน

### 5.3.6 การทดลองลดความผิดพลาดของเฟืองตัวหนอนโดยวิธีจำลองความผิดพลาดด้วยสมการคลื่นรูปไซน์

ทำการลดความผิดพลาดที่เกิดขึ้นด้วยวิธีการควบคุมแบบเปิดดังรูปที่ 5.45 โดยจะนำความคลาดเคลื่อนของระบบส่งกำลังที่จดจำไว้มาพิจารณาในการขับเคลื่อนเพื่อให้ได้ตำแหน่งในการหมุนของเฮลิโอสแตทที่มีความแม่นยำเพิ่มขึ้น ในการทดลองนี้จะแทนค่าความคลาดเคลื่อนของระบบส่งกำลังที่จดจำไว้ด้วยความคลาดเคลื่อนที่จำลองจากสมการคลื่นรูปไซน์จากหัวข้อ 5.3.3 ซึ่งหลังจากการแก้ไขแล้ว ได้ผลดังรูปที่ 5.46 จากผลการทดลองสามารถลดความผิดพลาดที่เกิดขึ้นในรูปแบบรากเฉลี่ยกำลังสอง (RMS) จาก  $49.085 \times 10^{-3}$  องศา เหลือเพียง  $9.803 \times 10^{-3}$  องศา ซึ่งมีค่าลดลงถึง 5.007 เท่า



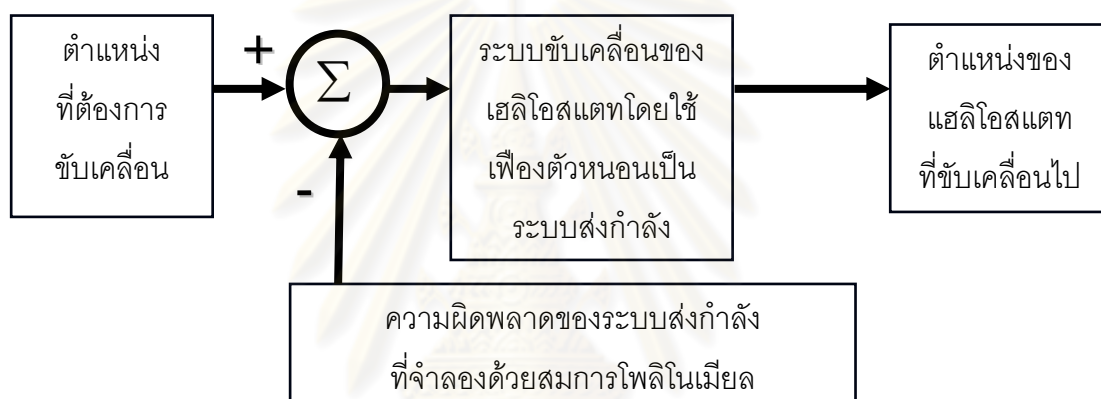
รูปที่ 5.45 ระบบควบคุมโดยลดความผิดพลาดด้วยวิธีจำลองความผิดพลาดจากคลื่นรูปไซน์



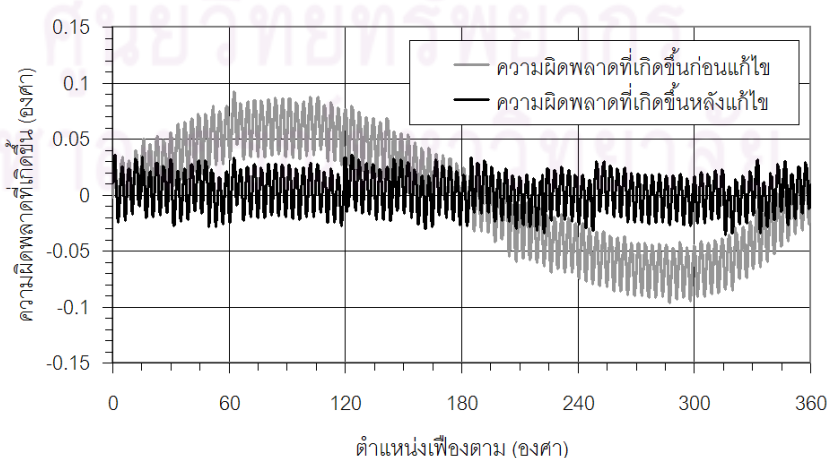
รูปที่ 5.46 ผลที่ได้จากการลดความผิดพลาดด้วยวิธีจำลองความผิดพลาดด้วยสมการคลื่นรูปไซน์

### 5.3.7 การทดลองลดความผิดพลาดของเฟืองตัวหนอนโดยวิธีจำลองความผิดพลาดด้วยสมการโพลีโนเมียล

ทำการลดความผิดพลาดที่เกิดขึ้นด้วยวิธีการควบคุมแบบเปิดดังรูปที่ 5.47 โดยจะนำความคลาดเคลื่อนของระบบส่งกำลังที่จดจำไว้มาพิจารณาในการขับเคลื่อนเพื่อให้ได้ตำแหน่งในการหมุนของเฮลิคอปเตอร์ที่มีความแม่นยำเพิ่มขึ้น ในการทดลองนี้จะแทนค่าความคลาดเคลื่อนของระบบส่งกำลังที่จดจำไว้ด้วยความคลาดเคลื่อนที่จำลองจากสมการโพลีโนเมียลจากหัวข้อ 5.3.4 ซึ่งหลังจากการแก้ไขแล้ว ได้ผลดังรูปที่ 5.48 จากผลการทดลองสามารถลดความผิดพลาดที่เกิดขึ้นในรูปแบบรากเฉลี่ยกำลังสอง (RMS) จาก  $49.085 \times 10^{-3}$  องศา เหลือเพียง  $16.307 \times 10^{-3}$  องศา ซึ่งมีค่าลดลงถึง 3.010 เท่า



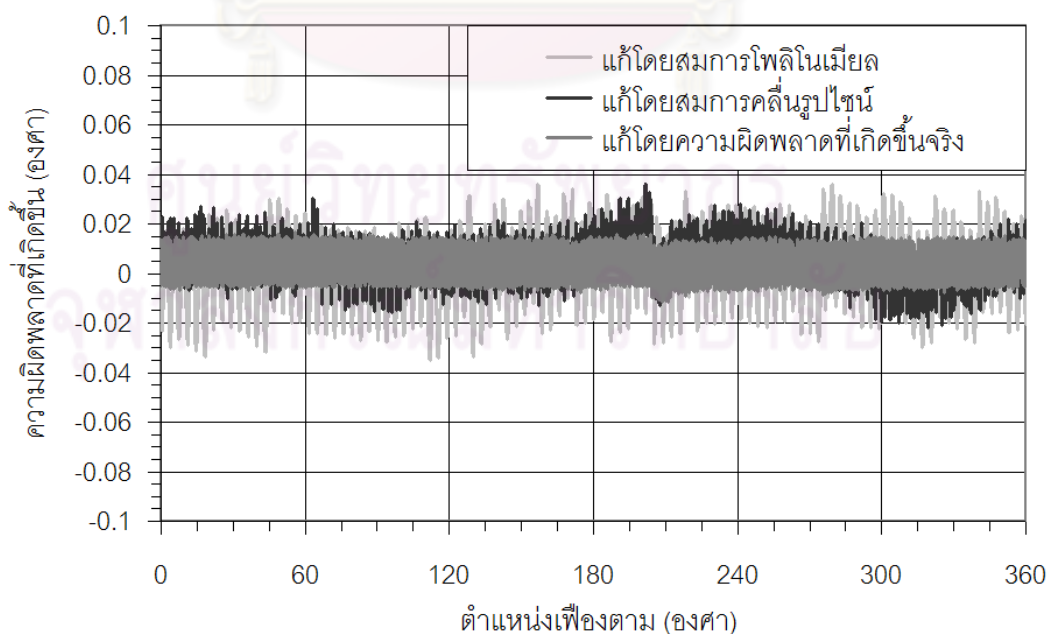
รูปที่ 5.47 ระบบควบคุมโดยลดความผิดพลาดด้วยวิธีจำลองความผิดพลาดจากสมการโพลีโนเมียล



รูปที่ 5.48 ผลที่ได้จากการลดความผิดพลาดด้วยวิธีจำลองความผิดพลาดด้วยสมการโพลีโนเมียล

### 5.3.8 สรุปผลการทดลองหลังการแก้ไขความผิดพลาดของเฟืองตัวหนอนทั้ง 3 วิธี

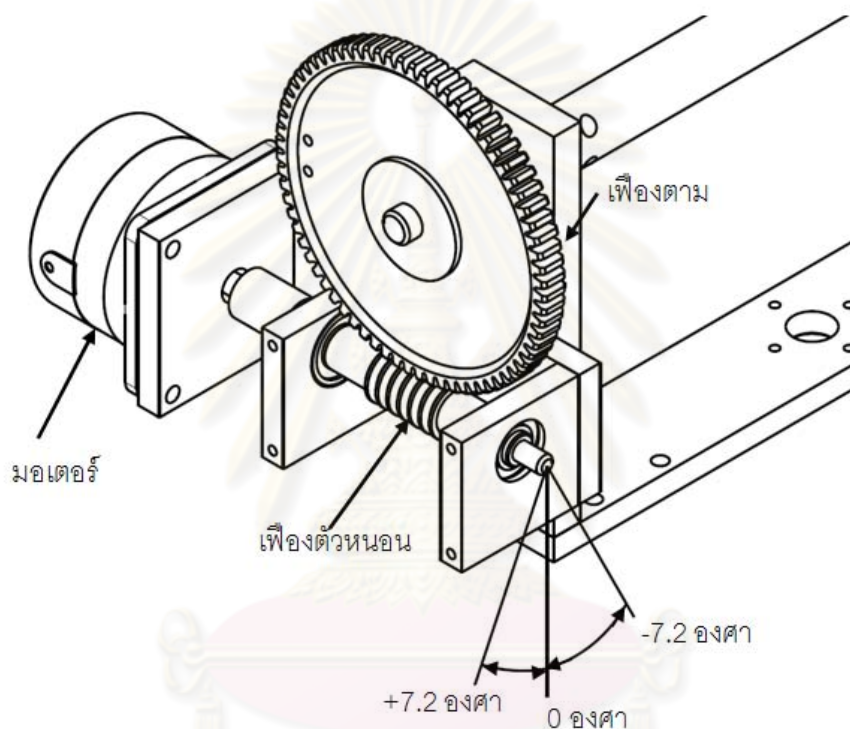
นำความผิดพลาดหลังการแก้ไขทั้ง 3 วิธีได้แก่ วิธีแก้ไขโดยจำความผิดพลาดที่เกิดขึ้นจริงทุกค่า, วิธีแก้ไขโดยการจำลองความผิดพลาดด้วยสมการคลื่นรูปไซน์ และวิธีแก้ไขโดยการจำลองความผิดพลาดด้วยสมการโพลีโนเมียลทั้งหมดมาเปรียบเทียบกันได้ผลดังรูปที่ 5.49 จะเห็นได้ว่าวิธีแก้ไขความผิดพลาดโดยการจำความผิดพลาดที่เกิดขึ้นจริงไว้ก่อนนั้น มีความผิดพลาดหลังการแก้ไขเกิดขึ้นน้อยที่สุดโดยมีความผิดพลาดในรูปแบบรากเฉลี่ยกำลังสอง (RMS) เพียง  $6.653 \times 10^{-3}$  องศา แต่วิธีการนี้จำเป็นต้องใช้ความจำในการเก็บข้อมูลความผิดพลาดที่เกิดขึ้นจริง มากถึง 20,000 ค่าต่อระบบขับเคลื่อน 1 ชุด รองลงมาคือวิธีแก้ไขความผิดพลาดโดยการจำลองความผิดพลาดด้วยสมการคลื่นรูปไซน์ หลังการแก้ไขด้วยวิธีนี้เกิดความผิดพลาดในรูปแบบรากเฉลี่ยกำลังสอง (RMS)  $9.803 \times 10^{-3}$  องศา ซึ่งวิธีนี้ใช้หน่วยความจำเก็บค่าตัวแปรเพียง 2 ตัวแปรเท่านั้น ตัวแปรที่ว่าคือค่า  $e/R$  (ขนาดของ runout error) และ  $E_{\omega}/R$  (ขนาดของ TTCE) แต่การจะได้ค่าตัวแปรทั้งคู่จำเป็นต้องทำการจัดตำแหน่งเริ่มต้นของความผิดพลาดที่วัดได้ใหม่ก่อนถึงจะวัดค่าดังกล่าวออกมาได้ (หัวข้อที่ 5.3.3) สุดท้ายคือวิธีแก้ไขความผิดพลาดโดยการจำลองความผิดพลาดด้วยสมการโพลีโนเมียลอันดับ 6 หลังการแก้ไขเกิดความผิดพลาดในรูปแบบรากเฉลี่ยกำลังสอง  $16.307 \times 10^{-3}$  องศา ซึ่งมากที่สุดในการแก้ไขทั้ง 3 วิธี เหตุผลเป็นเพราะว่าการแก้ไขด้วยวิธีนี้ไม่สามารถแก้ความผิดพลาดที่เกิดขึ้นระหว่างฟันได้ แต่มีข้อดีคือใช้หน่วยความจำเก็บค่าตัวแปรเพียง 6 ตัวแปร และไม่จำเป็นต้องจัดจุดเริ่มต้นความผิดพลาดแบบการแก้ไขด้วยสมการคลื่นรูปไซน์



รูปที่ 5.49 ผลที่ได้หลังจากลดความผิดพลาดด้วยวิธีต่างๆ

#### 5.4 การวางตำแหน่งเริ่มต้นผิดพลาดในการส่งกำลังด้วยเฟืองตัวหนอน

ในการติดตั้งระบบส่งกำลังเข้ากับเฮลิคอปเตอร์อาจจะมีตำแหน่งในการวางจุดเริ่มต้นคลาดเคลื่อนไปบ้างซึ่งจะส่งผลให้ความผิดพลาดหลังการแก้ไขมีค่าเปลี่ยนไป จากการทดลองโดยการตั้งจุดเริ่มต้นของระบบขับเคลื่อนโดยใช้การสังเกตจากเครื่องหมายที่ทำไว้เพื่อกำหนดจุดเริ่มต้นแทนที่จะใช้ตำแหน่งอ้างอิงจากอุปกรณ์ตรวจวัดมุม ส่งผลให้การกำหนดจุดเริ่มต้นมีความคลาดเคลื่อนอยู่ในช่วง  $\pm 4$  ขั้น (step) ของสเต็ปเปอร์มอเตอร์ โดยมีความละเอียดในการขับเคลื่อน 200 ขั้นต่อการหมุน 1 รอบ เพราะฉะนั้น  $\pm 4$  ขั้น จึงคิดเป็น  $\pm 7.2$  องศา ดังรูปที่ 5.50



รูปที่ 5.50 การติดตั้งเฟืองเข้ากับเฮลิคอปเตอร์โดยมีตำแหน่งเริ่มต้นผิดพลาด  $\pm 7.2$  องศา

##### 5.4.1 ทดลองวางตำแหน่งเริ่มต้นผิดพลาดในการส่งกำลังด้วยเฟืองตัวหนอน

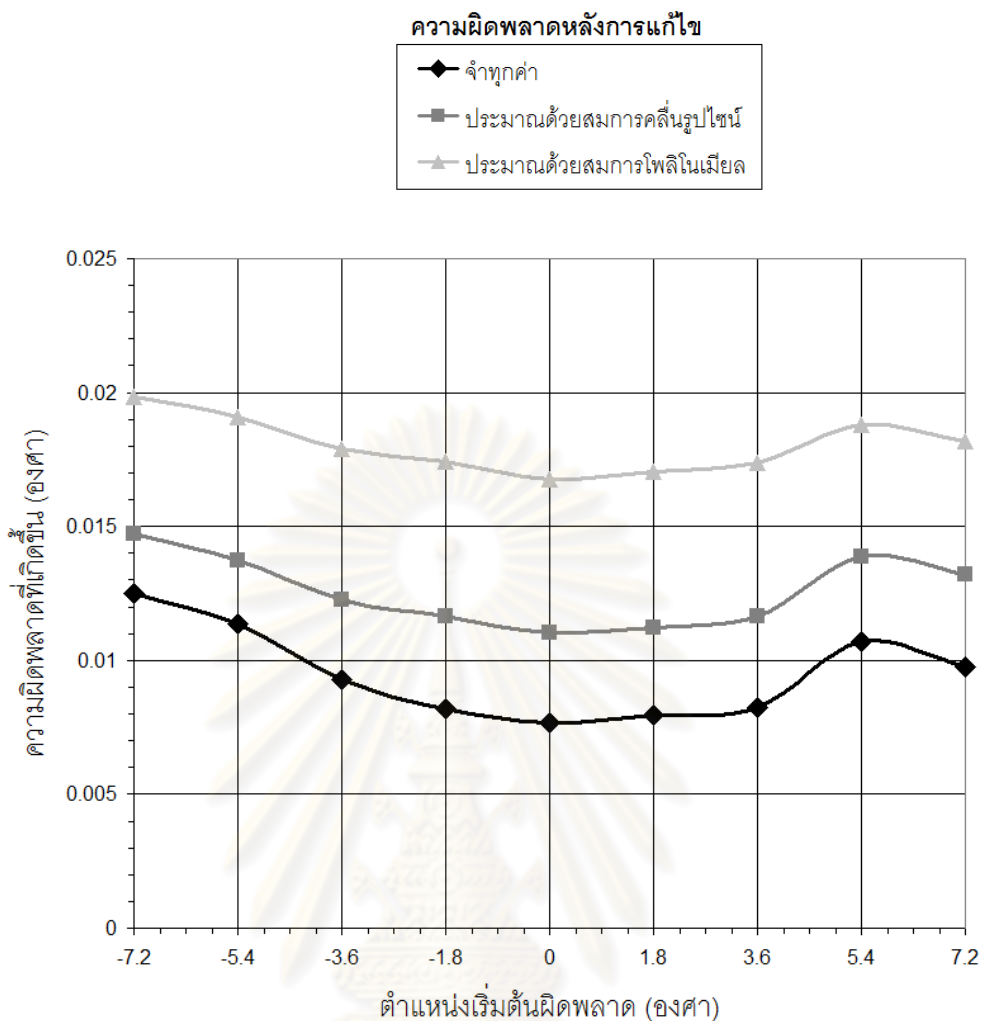
ทำการทดลองวัดความผิดพลาดที่เกิดขึ้นจากการส่งกำลัง โดยกำหนดช่วงของการวางตำแหน่งเริ่มต้นผิดพลาดไว้ที่  $\pm 7.2$  องศา ของตำแหน่งเฟืองขับ โดยแบ่งเป็นขั้น ทีละ 1.8 องศา ทดลองโดยใช้วิธีแก้ไขความผิดพลาดทั้ง 3 วิธี ได้แก่วิธีแก้ไขโดยการจำความผิดพลาดที่เกิดขึ้นทั้งหมด, วิธีแก้ไขโดยประมาณความผิดพลาดด้วยสมการคลื่นรูปไซน์ และวิธีแก้ไขโดยประมาณความผิดพลาดด้วยสมการโพลีโนเมียล ได้ความผิดพลาดรากเฉลี่ยกำลังสอง (RMS) ของแต่ละวิธีการแก้ไขความผิดพลาด ดังตารางที่ 5.2

ตารางที่ 5.2 ความผิดพลาดที่เกิดขึ้นจากการวางตำแหน่งเริ่มต้นผิดพลาดในเฟืองหนอน

วิธีแก้ไขความ ตำแหน่ง ผิดพลาด เริ่มต้นผิดพลาด	จำนวนผิดพลาดที่ เกิดขึ้นทั้งหมด RMS (องศา)	ประมาณโดย สมการคลื่นรูปไซน์ RMS (องศา)	ประมาณโดย สมการโพลีโนเมียล RMS (องศา)
+7.2 องศา	$9.754 \times 10^{-3}$	$13.198 \times 10^{-3}$	$18.167 \times 10^{-3}$
+5.4 องศา	$10.716 \times 10^{-3}$	$13.872 \times 10^{-3}$	$18.790 \times 10^{-3}$
+3.6 องศา	$8.222 \times 10^{-3}$	$11.633 \times 10^{-3}$	$17.380 \times 10^{-3}$
+1.8 องศา	$7.938 \times 10^{-3}$	$11.236 \times 10^{-3}$	$17.036 \times 10^{-3}$
<b>0 องศา</b>	<b><math>7.670 \times 10^{-3}</math></b>	<b><math>11.018 \times 10^{-3}</math></b>	<b><math>16.747 \times 10^{-3}</math></b>
-1.8 องศา	$8.194 \times 10^{-3}$	$11.635 \times 10^{-3}$	$17.437 \times 10^{-3}$
-3.6 องศา	$9.283 \times 10^{-3}$	$12.256 \times 10^{-3}$	$17.910 \times 10^{-3}$
-5.4 องศา	$11.371 \times 10^{-3}$	$13.747 \times 10^{-3}$	$19.074 \times 10^{-3}$
-7.2 องศา	$12.514 \times 10^{-3}$	$14.729 \times 10^{-3}$	$19.843 \times 10^{-3}$

จากตารางที่ 5.2 นำมาสร้างกราฟดังรูปที่ 5.51 เพื่อให้เห็นผลเปรียบเทียบได้ชัดเจนจะเห็นได้ว่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นจากการติดตั้งตำแหน่งเริ่มต้นผิดพลาดส่งผลให้ความผิดพลาดที่เกิดขึ้นหลังการแก้ไขโดยวิธีการจำทุกค่า, ประมาณโดยสมการลูกคลื่นไซน์และประมาณโดยสมการโพลีโนเมียลมีค่าเปลี่ยนแปลงไปเพียงเล็กน้อยเท่านั้น เช่น การติดตั้งตำแหน่งเริ่มต้นเฟืองขับเคลื่อนเคลื่อนไป + 7.2 องศา ส่งผลให้ความผิดพลาดในรูปรากเฉลี่ยกำลังสอง (RMS) ที่ได้หลังจากการแก้ไขความผิดพลาดโดยการประมาณโดยสมการลูกคลื่นไซน์นั้นมีค่าเพิ่มขึ้นจาก  $7.670 \times 10^{-3}$  องศา เป็น  $9.754 \times 10^{-3}$  องศา หรือเพิ่มขึ้นเพียง  $2.084 \times 10^{-3}$  องศา ซึ่งเมื่อเทียบกับความผิดพลาดก่อนการแก้ไขในรูปรากเฉลี่ยกำลังสองที่มีค่า  $49.085 \times 10^{-3}$  องศา คิดเป็นเพียง 4.245% อย่างไรก็ตาม มีวิธีการลดความผิดพลาดในส่วนนี้ซึ่งจะอยู่ในหัวข้อถัดไป

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

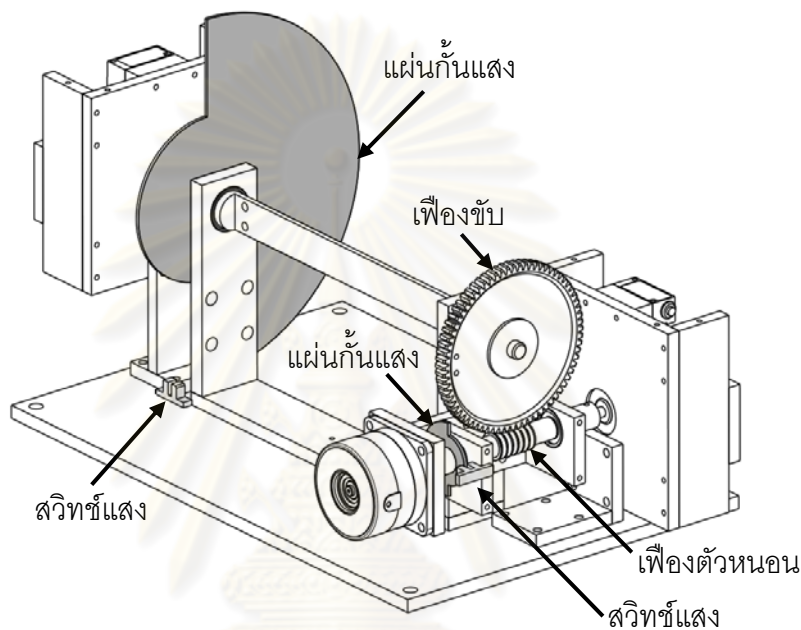


รูปที่ 5.51 ความผิดพลาดรากเฉลี่ยกำลังสองที่เกิดขึ้นจากการวางตำแหน่งเริ่มต้นผิดพลาดในเฟืองหนอน

#### 5.4.2 วิธีการแก้ไขการวางตำแหน่งเริ่มต้นของเฟืองตัวหนอนผิดพลาดโดยใช้สวิทช์แสง

แนวทางในการลดความผิดพลาดจากการวางตำแหน่งเริ่มต้นของเฟืองผิดพลาด คือการใช้สวิทช์แสงมาสร้างระบบไฟเตือนเพื่อช่วยหาตำแหน่งเริ่มต้นของเฟืองแทนที่จะใช้การสังเกตจากเครื่องหมายที่ทำไว้ โดยสวิทช์แสงที่ใช้จะเป็นรุ่น H21A1 ซึ่งมีหลังการทำงานดังหัวข้อที่ 5.2.2 นำระบบไฟเตือนดังกล่าวติดตั้งไว้ ณ ตำแหน่งเฟืองขับและเฟืองตามดังรูปที่ 5.52 กำหนดจุดเริ่มต้นของความผิดพลาดด้วยวิธีการหมุนเฟืองตัวหนอนในทิศทางตามเข็มนาฬิกาไปเรื่อยๆจนแผ่นกันแสงที่เฟืองตามหมุนตัดกับสวิทช์แสงทำให้ไฟเตือนสว่างขึ้น จากนั้นหมุนเฟืองตัวหนอนต่อไปอีกจนแผ่นกันแสงที่เฟืองตัวหนอนหมุนตัดกับสวิทช์แสงอีกครั้งจนไฟเตือนสว่างจึงหยุดหมุน แล้วกำหนดให้ตำแหน่งดังกล่าวเป็นตำแหน่งเริ่มต้นของความผิดพลาด ซึ่งจากการทดลองหาจุดเริ่มต้น

โดยวิธีการนี้ เกิดความผิดพลาดขึ้นเพียง  $\pm 1$  ชั้นของสเต็ปเปอร์มอเตอร์หรือคิดเป็น  $\pm 1.8$  องศา เพียงขั้นเท่านั้น ลดลงจากการกำหนดจุดเริ่มต้นโดยการสังเกตเครื่องหมายที่ทำไว้ที่มีความผิดพลาดในการวางจุดเริ่มต้นถึง  $\pm 4$  ชั้นของสเต็ปเปอร์มอเตอร์ หรือคิดเป็น  $\pm 7.2$  องศาเพียงขั้น ซึ่งวิธีการลดความผิดพลาดนี้มีข้อดีคืออุปกรณ์ราคาไม่แพงและระบบไม่ยุ่งยาก โดยจะนำระบบไฟเตียนนี้ไปใช้ในการออกแบบและสร้างเฮลิโอสแตทจริง เพื่อใช้ในการอ้างอิงตำแหน่งเริ่มต้นของระบบส่งกำลังทั้งในแกนอะซิมูทและแกนอัลติจูดของเฮลิโอสแตท



รูปที่ 5.52 ติดตั้งระบบไฟเตียนเพื่อใช้หาตำแหน่งเริ่มต้นในการขับเคลื่อน

#### 5.4.3 สรุปการวางตำแหน่งเริ่มต้นผิดพลาดในการส่งกำลังด้วยเฟืองตัวหนอน

ผลของการวางตำแหน่งเริ่มต้นผิดพลาดในช่วงเฟืองตัวหนอน  $\pm 7.2$  องศา ส่งผลให้ความผิดพลาดหลังการแก้ไขด้วยวิธีการจำความผิดพลาดทุกตำแหน่ง, การประมาณความผิดพลาดด้วยคลื่นรูปไซน์และการประมาณความผิดพลาดด้วยสมการโพลีโนเมียลนั้นมีความผิดพลาดเพิ่มขึ้นสูงสุดคือ 9.868%, 7.560% และ 6.307% ตามลำดับ (เทียบกับความผิดพลาดรากเฉลี่ยกำลังสองก่อนการแก้ไขที่มีค่า  $49.085 \times 10^{-3}$  องศา ณ ตำแหน่งเฟืองตัวหนอนเริ่มต้นผิดพลาด  $-7.2$  องศา) แม้การวางตำแหน่งเริ่มต้นผิดพลาดนี้จะส่งผลให้เกิดความคลาดเคลื่อนในระบบส่งกำลังเพิ่มขึ้นไม่มากนัก แต่หากต้องการให้ระบบขับเคลื่อนมีประสิทธิภาพสูงขึ้นสามารถทำได้โดยการนำระบบไฟเตียนกำหนดตำแหน่งเริ่มต้นในการส่งกำลัง โดยระบบไฟเตียนนี้จะมีสวิตช์แสงเป็นอุปกรณ์ในการบอกตำแหน่งอ้างอิง จากผลการทดลองสามารถลดความผิดพลาดจากการวางตำแหน่งเริ่มต้น  $\pm 4$  ชั้น



ของสแต็ปเปอร์มอเตอร์ หรือคิดเป็น  $\pm 7.2$  องศาเพียงตัวหนอน เหลือเพียง  $\pm 1$  ชั้นของสแต็ปเปอร์มอเตอร์ หรือคิดเป็น  $\pm 1.8$  องศาเพียงตัวหนอน ซึ่งการใช้ระบบไฟเตือนเพื่อบอกตำแหน่งเริ่มต้นของระบบขับเคลื่อนนี้มีข้อดีตรงที่อุปกรณ์ราคาไม่แพง, ระบบไม่ยุ่งยากและติดตั้งง่าย โดยจะนำระบบดังกล่าวไปใช้จริงในการกำหนดจุดเริ่มต้นของระบบขับเคลื่อนภายในเฮลิคอปเตอร์ต่อไป



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

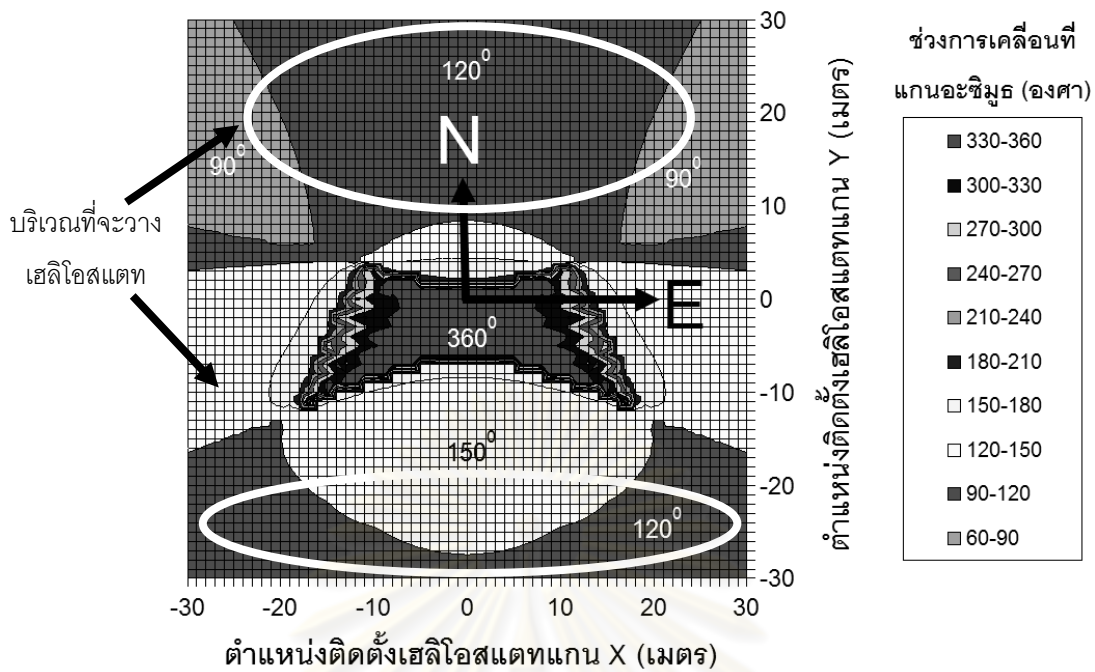
## บทที่ 6

### การจำลองการสะท้อนแสงจากเฮลิโอสแตทไปยังตัวรับส่วนกลางโดยใช้เฟืองตัว หนอนเป็นระบบส่งกำลัง

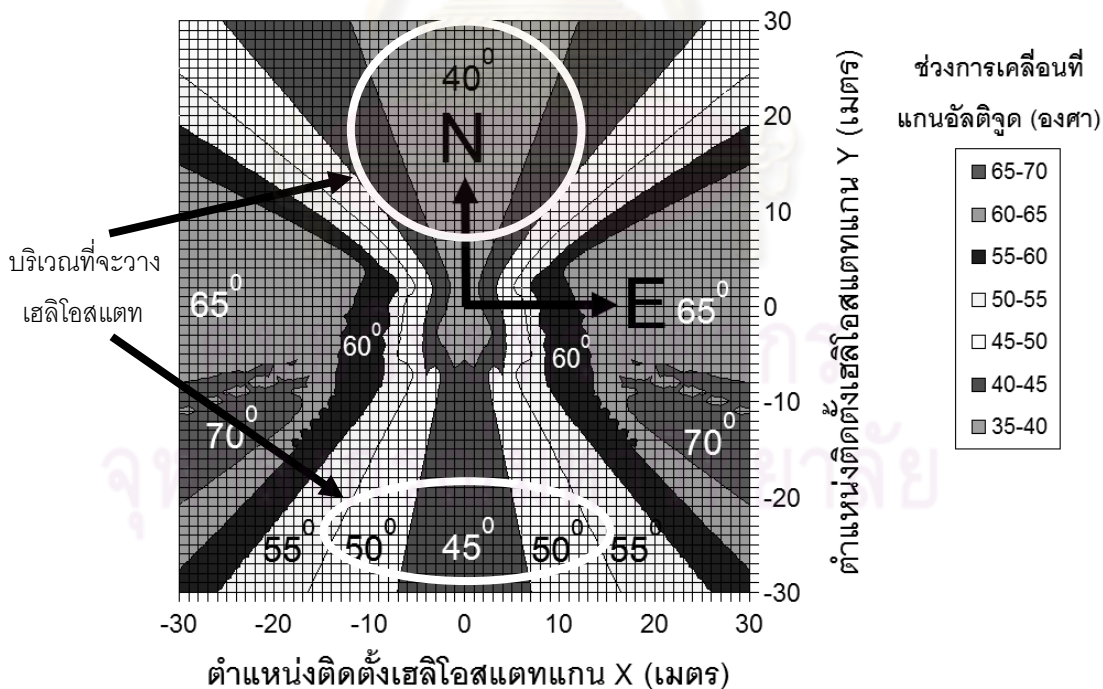
ในบทนี้จะทำการจำลองการสะท้อนแสงอาทิตย์จากเฮลิโอสแตทไปยังตัวรับส่วนกลาง เพื่อแสดงให้เห็นผลของการสะท้อนแสงที่คลาดเคลื่อนไปจากตำแหน่งที่ต้องการเมื่อมีความผิดพลาดเกิดขึ้นในระบบขับเคลื่อน โดยจะนำความผิดพลาดที่ได้จากการทดลองในบทที่ 5 มาใช้ร่วมในการจำลองการสะท้อนแสง ระบบเฮลิโอสแตทที่ใช้ในการจำลองจะใช้รูปแบบการปรับมุมกระจกแบบอะซิมูทกับอัลติจูดเพราะง่ายต่อการเขียนโปรแกรมจำลองการสะท้อนแสง โดยระบบขับเคลื่อนที่ใช้ในการจำลองทั้ง 2 แกนจะใช้เฟืองตัวหนอนอัตราทด 1 ต่อ 100 เป็นตัวส่งกำลังต่อกับสเต็ปเปอร์มอเตอร์ความละเอียด 200 ขั้นต่อการหมุน 1 รอบ

#### 6.1 ระบบเฮลิโอสแตทที่ทำการจำลองและตำแหน่งวางเฮลิโอสแตท

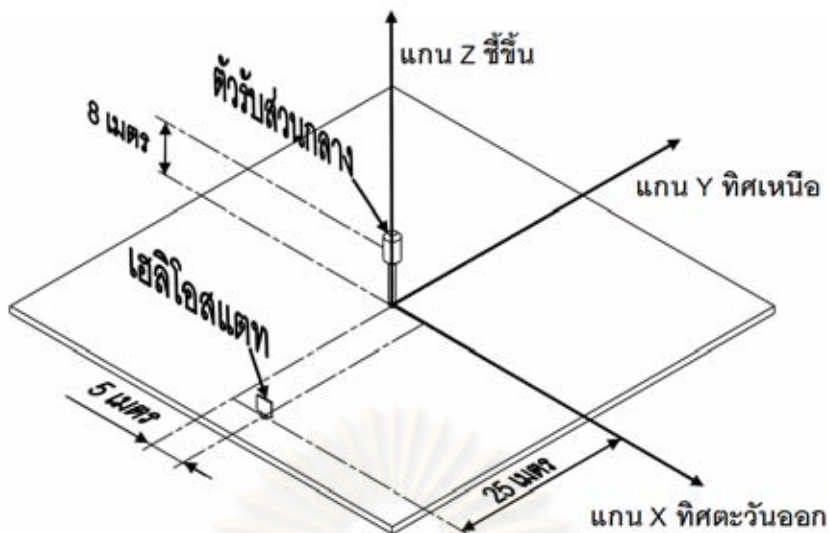
เฮลิโอสแตทที่ทำการจำลองนั้นกำหนดให้ส่งกำลังโดยใช้เฟืองตัวหนอนอัตราทด 1 ต่อ 100 ซึ่งต่อผ่าน สเต็ปเปอร์มอเตอร์ความละเอียด 20,000 ขั้นต่อการหมุน 1 รอบ โดยจะเลือกวางเฮลิโอสแตท บริเวณที่มีช่วงการเคลื่อนที่ในแกนอะซิมูทและแกนอัลติจูดในรอบปีไม่มาก จากหัวข้อที่ 3.4 จะเห็นได้ว่ามีช่วงการเคลื่อนที่ในแกนอะซิมูทน้อยในตำแหน่งวางเฮลิโอสแตทในทิศเหนือและทิศใต้ดังรูปที่ 6.1 และช่วงการเคลื่อนที่ในแกนอัลติจูดน้อยในตำแหน่งวางเฮลิโอสแตทในทิศเหนือและทิศใต้เช่นกัน ดังรูปที่ 6.2 ทำการเลือกตำแหน่งวางเฮลิโอสแตททางทิศใต้ ที่ตำแหน่งแกน  $X = 5$  เมตร  $Y = -25$  เมตร  $Z = 0$  เมตร ดังรูปที่ 6.3 โดยกำหนดให้ตัวรับส่วนกลางสูง 8 เมตรซึ่งตำแหน่งที่ต้องการจะสะท้อนแสงไปคือตำแหน่ง  $X = 0$  เมตร  $Y = 0$  เมตร และ  $Z = 8$  เมตร แสดงดังรูปที่ 6.3



รูปที่ 6.1 บริเวณที่จะวางเฮลิโอสแตทโดยดูมุมการเคลื่อนที่น้อยสุดของแกนอะซิมูท



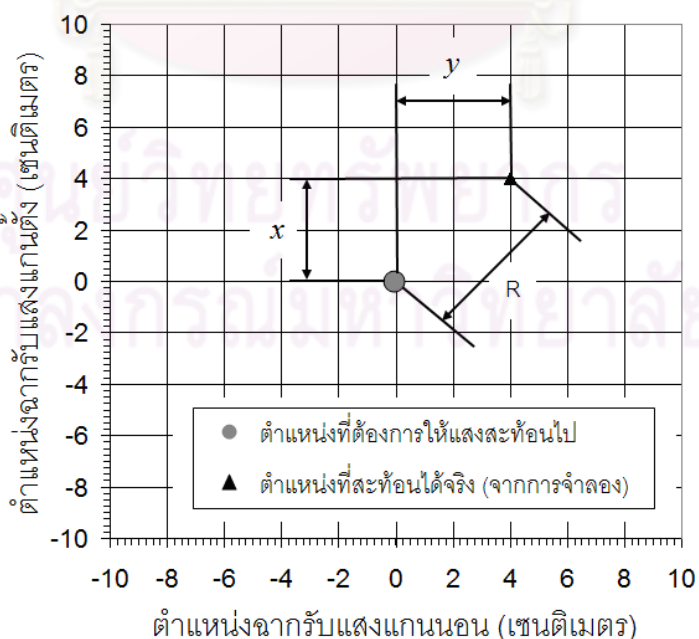
รูปที่ 6.2 บริเวณที่จะวางเฮลิโอสแตทโดยดูมุมการเคลื่อนที่น้อยสุดของแกนอัลติจูด



รูปที่ 6.3 ตำแหน่งวางเฮลิโอสแตทและตัวรับส่วนกลาง

6.2 การจำลองการสะท้อนแสงจากเฮลิโอสแตทไปยังตัวรับส่วนกลาง

ทำการจำลองการสะท้อนแสงในรอบ 1 ปี โดยเริ่มคำนวณตั้งแต่ เวลา 8.00 น. ถึง 16.00 น. โดยกำหนดให้ฉากรับแสงวางตั้งฉากกับทิศเหนือ ณ ตำแหน่งตัวรับส่วนกลาง ฉากรับแสงมีขนาดกว้าง 20 เซนติเมตร ยาว 20 เซนติเมตร จุดที่ต้องการให้แสงสะท้อนไปคือตำแหน่งกึ่งกลางฉากดังรูปที่ 6.4 ความผิดพลาดของการสะท้อนแสงเมื่อวัดตามรัศมีจะใช้สัญลักษณ์ R ซึ่งหาจากสมการที่ 6.1



รูปที่ 6.4 ขนาดฉากรับแสง

$$R = \sqrt{x^2 + y^2} \quad (6.1)$$

จากสมการที่ 6.1

R = ความผิดพลาดในแนวรัศมี

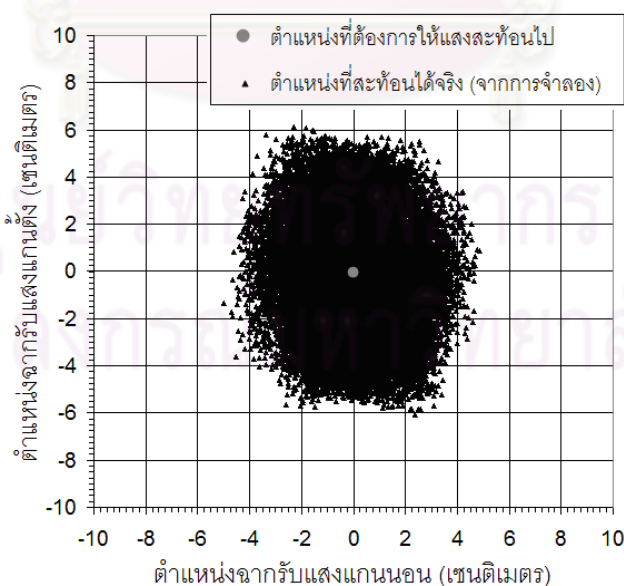
x = ความผิดพลาดในแกนนอนของฉากรับแสง

y = ความผิดพลาดในแกนตั้งของฉากรับแสง

ความผิดพลาดของระบบที่พิจารณานี้จะใช้ค่าความผิดพลาดก่อนการแก้ไขและหลังการแก้ไขด้วยวิธีจำความผิดพลาดทั้งหมด ประมาณความผิดพลาดด้วยสมการคลื่นรูปไซน์และประมาณด้วยสมการโพลีโนเมียล ที่ได้จากการทดลองในบทที่ 5 ซึ่งจะนำผลการจำลองทั้งหมดมาเปรียบเทียบและสรุปผลในหัวข้อต่อไป

### 6.2.1 ผลการจำลองการสะท้อนแสงก่อนการแก้ไขความผิดพลาด

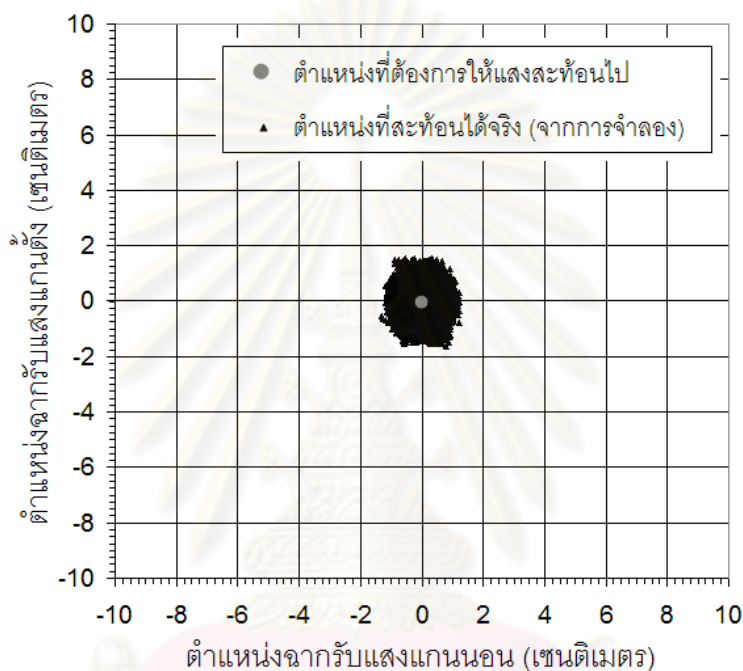
ทำการจำลองการสะท้อนแสงโดยพิจารณาให้เฟืองตัวหนอนในแกนอะซิมูทและแกนอัลติจูดมีความผิดพลาดรากเฉลี่ยกำลังสอง (RMS) ของระบบขับเคลื่อนก่อนการแก้ไขอยู่ที่  $49.085 \times 10^{-3}$  องศา (จากการทดลองในบทที่ 5) ได้ผลการจำลองการสะท้อนแสงอาทิตย์จากเฮลิโอสแตทไปยังฉากรับแสง ดังรูปที่ 6.5 โดยมีความผิดพลาดสูงสุดในการสะท้อนแสงในแนวรัศมี ( $R_{max}$ ) อยู่ที่ 6.712 เซนติเมตร



รูปที่ 6.5 ผลการจำลองการสะท้อนแสงที่เป็นผลมาจากความผิดพลาดก่อนการแก้ไขของระบบขับเคลื่อน

## 6.2.2 ผลการจำลองการสะท้อนแสงหลังการแก้ไขด้วยการจำทั้งหมด

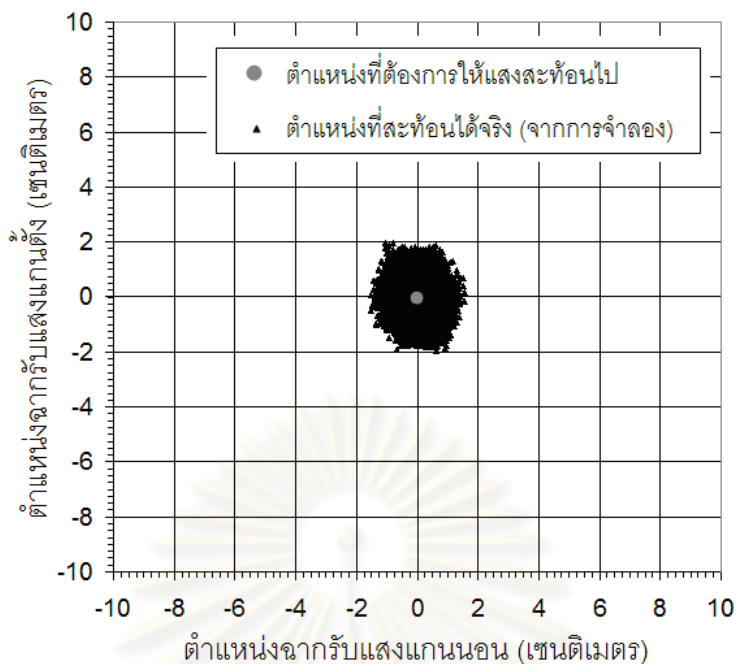
ทำการจำลองการสะท้อนแสงโดยพิจารณาให้เฟืองตัวหนอนในแกนอะซิมุทและแกนอัลติจูดมีความผิดพลาดรากเฉลี่ยกำลังสอง (RMS) หลังการแก้ไขด้วยวิธีจำความผิดพลาดที่เกิดขึ้นทั้งหมดไว้ก่อน โดยมีค่าความผิดพลาดของระบบขั้วเคลือบอยู่ที่  $6.653 \times 10^{-3}$  องศา (จากการทดลองในบทที่ 5) ได้ผลการจำลองการสะท้อนแสงอาทิตย์จากเฮลิโอสแตทไปยังฉากรับแสง ดังรูปที่ 6.6 โดยมีความผิดพลาดสูงสุดในการสะท้อนแสงในแนวรัศมี ( $R_{max}$ ) อยู่ที่ 1.794 เซนติเมตร



รูปที่ 6.6 ผลการจำลองการสะท้อนแสงที่เป็นผลมาจากความผิดพลาดหลังการแก้ไขด้วยวิธีจำความผิดพลาดไว้ก่อน

## 6.2.3 ผลการจำลองการสะท้อนแสงหลังการแก้ไขด้วยวิธีประมาณความผิดพลาดด้วยสมการคลื่นรูปไซน์

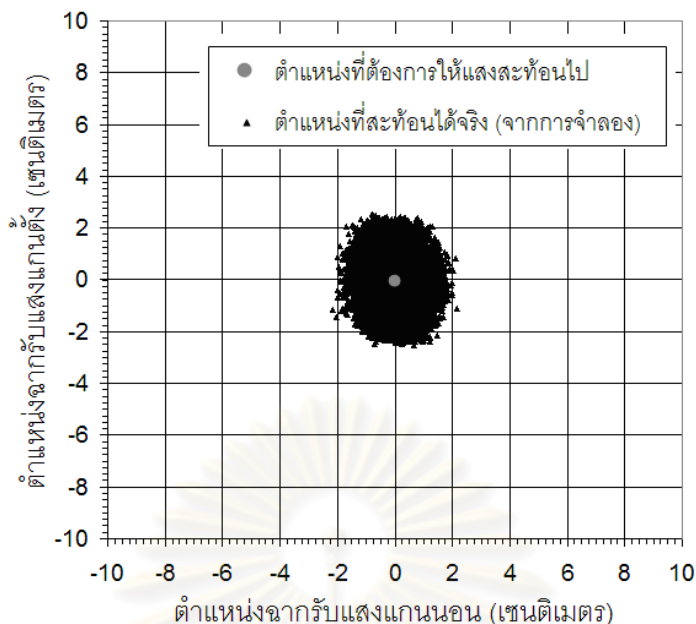
ทำการจำลองการสะท้อนแสงโดยพิจารณาให้เฟืองตัวหนอนในแกนอะซิมุทและแกนอัลติจูดมีความผิดพลาดรากเฉลี่ยกำลังสอง (RMS) หลังการแก้ไขด้วยวิธีประมาณความผิดพลาดด้วยสมการคลื่นรูปไซน์ โดยมีค่าความผิดพลาดของระบบขั้วเคลือบอยู่ที่  $9.803 \times 10^{-3}$  องศา (จากการทดลองในบทที่ 5) ได้ผลการจำลองการสะท้อนแสงอาทิตย์จากเฮลิโอสแตทไปยังฉากรับแสง ดังรูปที่ 6.7 โดยมีความผิดพลาดสูงสุดในการสะท้อนแสงในแนวรัศมี ( $R_{max}$ ) อยู่ที่ 2.239 เซนติเมตร



รูปที่ 6.7 ผลการจำลองการสะท้อนแสงที่เป็นผลมาจากความผิดพลาดหลังการแก้ไขด้วยวิธีประมาณความผิดพลาดด้วยสมการคลื่นรูปไซน์

#### 6.2.4 ผลการจำลองการสะท้อนแสงหลังการแก้ไขด้วยวิธีประมาณความผิดพลาดด้วยสมการโพลีโนเมียล

ทำการจำลองการสะท้อนแสงโดยพิจารณาให้เฟืองตัวหนอนในแกนอะซิมุทและแกนอัลติจูดมีความผิดพลาดรากเฉลี่ยกำลังสอง (RMS) หลังการแก้ไขด้วยวิธีประมาณความผิดพลาดด้วยสมการโพลีโนเมียล โดยมีค่าความผิดพลาดของระบบขับเคลื่อนอยู่ที่  $16.307 \times 10^{-3}$  องศา (จากการทดลองในบทที่ 5) ได้ผลการจำลองการสะท้อนแสงอาทิตย์จากเฮลิโอสแตทไปยังจากรับแสง ดังรูปที่ 6.8 โดยมีความผิดพลาดสูงสุดในการสะท้อนแสงในแนวรัศมี ( $R_{max}$ ) อยู่ที่ 2.703 เซนติเมตร



รูปที่ 6.8 ผลการจำลองการสะท้อนแสงที่เป็นผลมาจากความผิดพลาดหลังการแก้ไขด้วยวิธี  
ประมาณความผิดพลาดด้วยสมการโพลีโนเมียล

### 6.3 สรุปการจำลองการสะท้อนแสง

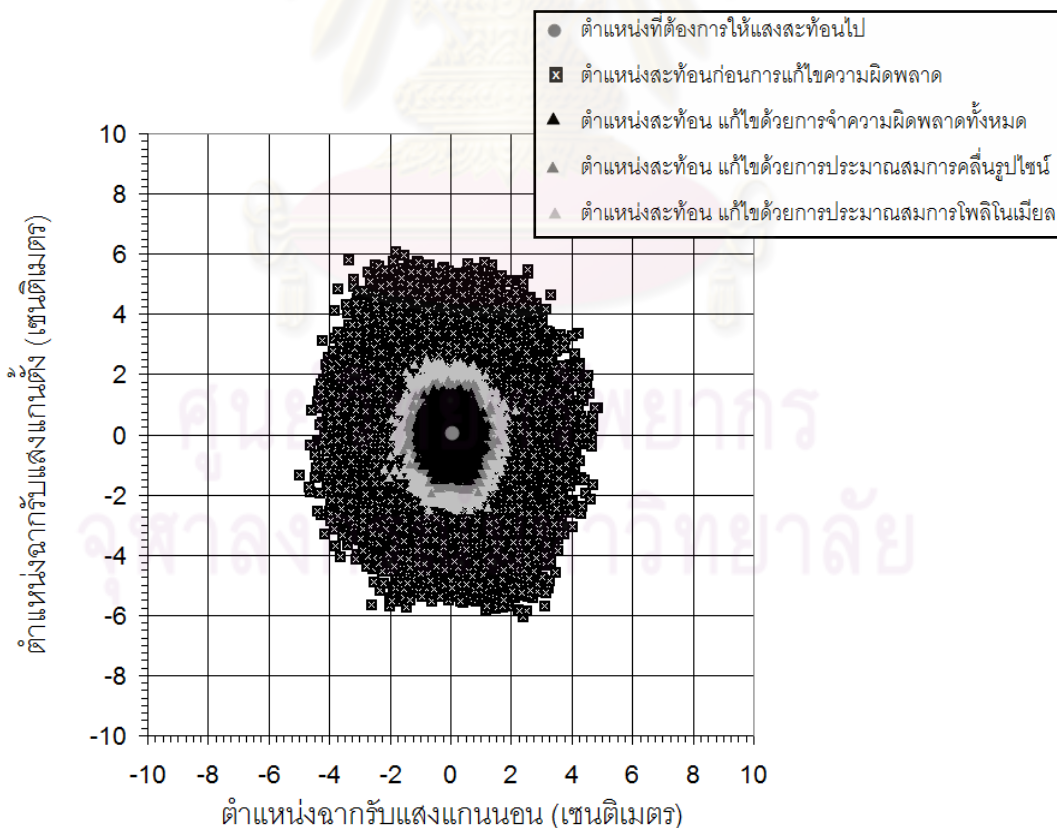
จากผลการจำลองการสะท้อนแสงสามารถสรุปความผิดพลาดที่เกิดขึ้นได้ดังตารางที่ 6.1 และรูปที่ 6.9 โดย  $TCE_{RMS}$  คือความผิดพลาดรวมรากเฉลี่ยกำลังสอง และ  $R_{max}$  คือความผิดพลาดสูงสุดของการสะท้อนแสงไปยังฉากในพิกัดมุม จากผลการจำลองนี้สามารถนำผลการทดลองที่ได้ไปพิจารณาเลือกวิธีการแก้ไขความผิดพลาดของระบบส่งกำลังให้เหมาะสมกับการสร้างระบบเตาเผาสุริยะได้ ยกตัวอย่างเช่น หากระบบเตาเผาสุริยะที่จะทำการสร้าง ต้องการความแม่นยำในการสะท้อนแสง  $R_{max}$  อยู่ที่  $\pm 2.5$  เซนติเมตรเพื่อให้อุณหภูมิที่จุดรวมแสงมีค่าคงที่ หากใช้ระบบขับเคลื่อนโดยไม่มีการแก้ไขความผิดพลาดส่งผลให้เกิด  $R_{max} = 6.712$  เซนติเมตร ซึ่งค่าที่ได้ไม่เพียงพอต่อความต้องการ หากใช้การลดความผิดพลาดโดยการจำลองความผิดพลาดทั้งหมดไว้ก่อน แม้สามารถลดความผิดพลาด  $R_{max}$  ได้เหลือเพียง 1.794 เซนติเมตร เพียงพอต่อการใช้งาน แต่เฮลิโอสแตท 1 ตัว ต้องเก็บค่าความผิดพลาดไว้มากถึง 40,000 ค่า (ระบบขับเคลื่อนมี 2 ชุด โดยมีความละเอียด 20,000 ค่าต่อการหมุนในแกนอะซิมุทและแกนอัลติจูด 1 รอบ และในระบบเตาเผาสุริยะนั้นจำเป็นต้องใช้เฮลิโอสแตทหลายพันตัว ขึ้นอยู่กับปริมาณความร้อนและอุณหภูมิที่ต้องการ) วิธีการแก้ไขนี้จำเป็นต้องใช้หน่วยความจำมากทำให้การออกแบบระบบขับเคลื่อนทำได้ยากและอาจจะมีราคาแพง หากใช้การแก้ไขโดยสมการโพลีโนเมียลอันดับ 6 แม้จะใช้



หน่วยความจำไม่มากเพียง 6 ตัวแปรต่อระบบขับเคลื่อน 1 ชุด หรือต้องใช้หน่วยความจำ 12 ค่าต่อเฮลิโอสแตท 1 ตัว แต่ความละเอียด  $R_{max}$  ที่ได้กลับมีค่าเพียง 2.703 เซนติเมตร ซึ่งไม่เพียงพอต่อความต้องการ แตกต่างจากการแก้ไขโดยสมการคลื่นรูปไซน์ ที่สามารถลดความผิดพลาด  $R_{max}$  เหลือเพียง 2.239 เซนติเมตร เพียงพอต่อการใช้งาน อีกทั้งใช้หน่วยความจำเพียง 2 ตัวแปรต่อระบบขับเคลื่อน 1 ชุด หรือต้องใช้หน่วยความจำ 4 ค่าต่อเฮลิโอสแตท 1 ตัว แต่การเลือกใช้วิธีนี้ต้องยอมเสียเวลาในการจัดรูปความผิดพลาดที่วัดได้ก่อน ดังหัวข้อที่ 5.3.3

ตารางที่ 6.1 ผลการจำลองการสะท้อนแสง

ความผิดพลาดของระบบขับเคลื่อน	TCE <sub>RMS</sub> (องศา)	R <sub>max</sub> (เซนติเมตร)
ก่อนการแก้ไข	$49.085 \times 10^{-3}$	6.712
แก้โดยจำความผิดพลาดทั้งหมด	$6.653 \times 10^{-3}$	1.794
แก้โดยสมการคลื่นรูปไซน์	$9.803 \times 10^{-3}$	2.239
แก้โดยสมการโพลีโนเมียล	$16.307 \times 10^{-3}$	2.703



รูปที่ 6.9 ผลการจำลองการสะท้อนแสงที่เป็นผลมาจากสาเหตุต่างๆ

## บทที่ 7

### บทสรุปและข้อเสนอแนะ

#### 7.1 บทสรุป

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีเป้าหมายในการลดราคาของระบบขับเคลื่อนเฮลิคอปเตอร์โดยการใช้ระบบควบคุมการขับเคลื่อนแบบเปิด ซึ่งระบบเปิดนั้นมีข้อดีคือไม่จำเป็นต้องมีอุปกรณ์ตรวจวัดตำแหน่งแบบระบบปิดที่แม้จะให้ความแม่นยำสูงแต่ก็มีราคาสูงเช่นกัน ดังนั้นเพื่อให้ระบบขับเคลื่อนยังคงความแม่นยำสูงอยู่ จำเป็นต้องมีวิธีการลดความผิดพลาดที่เกิดขึ้นจากการส่งกำลัง ซึ่งวิธีที่ใช้ในการลดความผิดพลาดนั้นมีหลักการคือวัดความผิดพลาดที่เกิดขึ้นไว้ก่อนแล้วนำความผิดพลาดดังกล่าวไปพิจารณาร่วมในการขับเคลื่อนเพื่อให้ตำแหน่งหลังการขับเคลื่อนมีความผิดพลาดเกิดขึ้นน้อยที่สุด โดยความผิดพลาดที่จะนำมาพิจารณาร่วมในการแก้ไขความผิดพลาดในการส่งกำลังนั้นแบ่งได้เป็น 3 วิธีได้แก่

1. การแก้ไขความผิดพลาดที่เกิดขึ้นในระบบส่งกำลังโดยการแทนความผิดพลาดที่วัดได้จริงไปพิจารณาร่วมในการขับเคลื่อน วิธีแก้ไขนี้สามารถลดความผิดพลาดสูงสุดในรูปรากเฉลี่ยกำลังสอง(Root Mean Square, RMS) ของเฟืองฟันตรงได้จาก  $134.184 \times 10^{-3}$  องศา เหลือเพียง  $12.360 \times 10^{-3}$  องศา ลดลงถึง 9.211 เท่า ส่วนเฟืองตัวหนอนนั้นจาก  $49.085 \times 10^{-3}$  องศา เหลือเพียง  $6.653 \times 10^{-3}$  องศา ลดลงถึง 7.377 เท่า วิธีแก้ไขวิธีนี้จำเป็นต้องใช้หน่วยความจำมากเนื่องจากต้องจดจำความผิดพลาดที่เกิดขึ้นจริงทุกตำแหน่งของการส่งกำลังซึ่งในการทดลองนั้นต้องจดจำความผิดพลาด 20,000 ค่าต่อชุดส่งกำลัง 1 ชุดซึ่งในการสร้างเฮลิคอปเตอร์ 1 ตัวจำเป็นต้องใช้ชุดส่งกำลัง 2 ชุด และระบบเตาเผาสุริยะจำเป็นต้องใช้เฮลิคอปเตอร์หลายพันตัวขึ้นอยู่กับปริมาณความร้อนและอุณหภูมิที่ต้องการ ซึ่งการใช้หน่วยความจำมากอาจจะทำให้การออกแบบระบบควบคุมโดยรวมยุ่งยากขึ้น
2. การแก้ไขความผิดพลาดที่เกิดขึ้นในระบบส่งกำลังโดยการประมาณความผิดพลาดด้วยสมการคลื่นรูปไซน์จากข้อมูลความผิดพลาดที่เกิดขึ้นจริงเพื่อนำไปพิจารณาร่วมในการขับเคลื่อน วิธีนี้สามารถลดความผิดพลาดในรูปรากเฉลี่ยกำลังสองในการส่งกำลังของเฟืองฟันตรงได้จาก  $134.184 \times 10^{-3}$  องศา เหลือ  $37.999 \times 10^{-2}$  องศา คิดเป็น 3.531 เท่าจากค่าเดิม ส่วนเฟืองตัวหนอนนั้นลดจาก  $49.085 \times 10^{-3}$  องศา เหลือเพียง  $9.803 \times 10^{-3}$  องศา คิดเป็น 5.007 เท่าจากค่าเดิม วิธีนี้มีข้อดีคือใช้หน่วยความจำน้อยมากเพียง 1 สมการ 2 ตัวแปร ต่อ

ระบบขับเคลื่อน 1 ชุดเท่านั้น แต่มีข้อเสียคือต้องนำความผิดพลาดที่วัดได้มาหาจุดเริ่มต้นของความผิดพลาดตามทฤษฎีก่อน อีกทั้งวิธีนี้ให้ผลการแก้ไขไม่ค่อยดีนักเมื่อใช้กับเฟืองฟันตรง เนื่องจากว่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นระหว่างฟัน (TTCE) ของเฟืองฟันตรงมีรูปแบบไม่แน่นอน จึงไม่สามารถแทนความผิดพลาดส่วนนี้ด้วยสมการคลื่นรูปไซน์ได้ แตกต่างจากความผิดพลาดที่เกิดขึ้นระหว่างฟันของเฟืองตัวหนอน ที่มีลักษณะเป็นคลื่นรูปไซน์อย่างชัดเจน

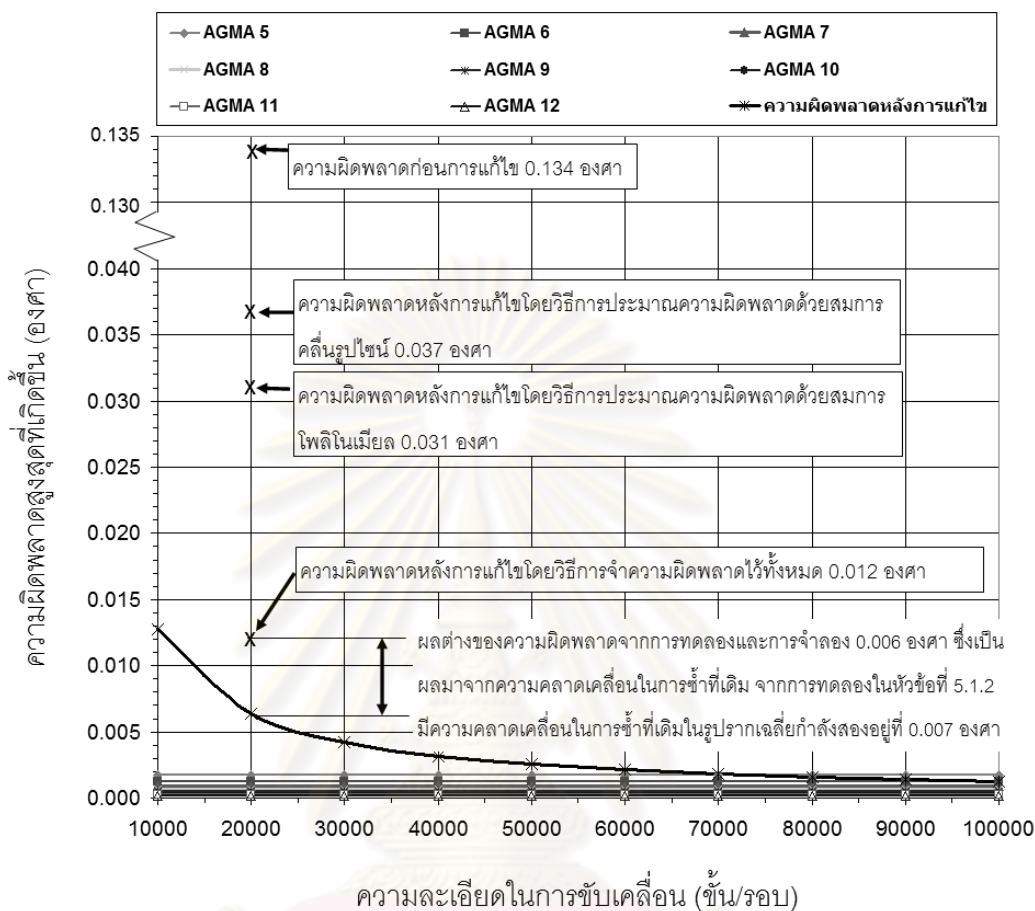
3. การแก้ไขความผิดพลาดที่เกิดขึ้นในระบบส่งกำลังโดยการประมาณความผิดพลาดด้วยสมการโพลีโนเมียลจากข้อมูลความผิดพลาดที่เกิดขึ้นจริงเพื่อนำไปพิจารณาร่วมในการขับเคลื่อน ซึ่งวิธีการนี้สำหรับเฟืองฟันตรงสามารถลดความผิดพลาดในรูปร่างเฉลี่ยกำลังสองจาก  $134.184 \times 10^{-3}$  องศา เหลือเพียง  $31.560 \times 10^{-3}$  องศา คิดเป็น 4.251 เท่าจากค่าเดิม ส่วนเฟืองตัวหนอนนั้นลดจาก  $49.085 \times 10^{-3}$  องศา เหลือเพียง  $16.307 \times 10^{-3}$  องศา หรือลดลง 3.010 เท่าจากค่าเดิม การแก้ด้วยวิธีนี้ไม่จำเป็นต้องหาจุดเริ่มต้นความผิดพลาดแบบวิธีประมาณด้วยสมการคลื่นรูปไซน์และใช้หน่วยความจำเพียง 1 สมการ 6 ตัวแปรต่อระบบขับเคลื่อน 1 ชุดเท่านั้น วิธีนี้เหมาะกับระบบที่มีความผิดพลาดที่เกิดระหว่างฟัน (TTCE) น้อยกว่าความผิดพลาดที่เกิดจากจุดหมุนเยื้องศูนย์กลาง (runout error) มากๆ

ในการติดตั้งระบบส่งกำลังเข้ากับเฮลิคอปเตอร์อาจทำให้ตำแหน่งเริ่มต้นของเฟืองคลาดเคลื่อนไปบ้าง ส่งผลให้ความผิดพลาดที่จดจำไว้ไม่ตรงกับตำแหน่งของเฟือง ทำให้ความผิดพลาดหลังการแก้ไขมีค่าเปลี่ยนไปจากที่ควรจะเป็น ความผิดพลาดในการติดตั้งนี้สามารถใช้สวิตช์แสงช่วยในการกำหนดตำแหน่งเริ่มต้นของเฟืองได้ โดยสามารถลดความผิดพลาดจากการติดตั้งเฟืองฟันตรงที่มีความผิดพลาดอยู่ในช่วง  $\pm 3.6$  องศาเฟืองขับ เหลือเพียง  $\pm 0.360$  องศาเฟืองขับ ส่วนเฟืองตัวหนอนลดลงจาก  $\pm 7.2$  องศาเฟืองขับ เหลือเพียง  $\pm 1.8$  องศาเฟืองขับ

## 7.2 ข้อเสนอแนะ

1. ความผิดพลาดที่เกิดขึ้นในการส่งกำลังด้วยเฟืองฟันตรงโดยคำนวณจากสมการมีค่าน้อยกว่าความผิดพลาดที่วัดได้จริงมาก โดยแสดงเปรียบเทียบผลของความผิดพลาดที่เกิดขึ้นจริงและความผิดพลาดที่ได้จากการคำนวณดังภาพที่ 7.1 ความผิดพลาดที่วัดได้จริงมีค่าสูงสุดที่  $255.068 \times 10^{-3}$  องศา ในขณะที่ความผิดพลาดที่ได้จากการคำนวณนั้นมีค่าเพียง  $3.464 \times 10^{-3}$  องศา สาเหตุเป็นเพราะความผิดพลาดที่วัดได้จริงนั้นมีความผิดพลาดจากการติดตั้งรวมอยู่ด้วย เช่น ความไม่ได้ศูนย์ของเพลลา, ความไม่ได้ศูนย์ของตลับลูกปืนที่ใช้,

ระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางของเฟืองขับและเฟืองตามไม่เป็นไปตามทฤษฎีเป็นต้น จึงควรศึกษาถึงผลกระทบจากการติดตั้งด้วย



รูปที่ 7.1 ความผิดพลาดที่วัดได้จริงเทียบกับความผิดพลาดที่คำนวณได้ของเฟืองฟันตรง

2. ในการทดลองที่ผ่านมาพิจารณาระบบส่งกำลังโดยใช้ชุดทดรอบเพียงชุดเดียว ควรศึกษาความผิดพลาดจากการนำชุดทดรอบหลายๆชุดมาต่ออนุกรมกันเพื่อพิจารณาถึงความผิดพลาดเกิดขึ้นว่ามีลักษณะเป็นอย่างไรและสามารถลดความผิดพลาดดังกล่าวได้มากน้อยเพียงไร เพื่อใช้เป็นแนวทางในการออกแบบระบบขับเคลื่อนที่มีความแม่นยำสูงโดยใช้ชุดทดรอบที่มีอัตราทดต่ำหลายๆชุดมาต่ออนุกรมกันเพื่อให้ได้ชุดทดรอบที่มีอัตราทดสูง
3. ในการแก้ไขความผิดพลาดในการส่งกำลังของเฟืองโดยวิธีการประมาณด้วยสมการอาจจะใช้วิธี FFT (Fast Fourier transform) ในการประมาณความผิดพลาดที่วัดได้จริง ซึ่งวิธีนี้มีข้อดีคือไม่ต้องจัดตำแหน่งจุดเริ่มต้นของความผิดพลาดเหมือนวิธีประมาณด้วยสมการคลื่นรูปไซน์ อีกทั้งน่าจะให้ผลการทดลองดีกว่าการประมาณด้วยสมการโพลีโนเมียลเพราะสามารถประมาณความผิดพลาดที่เกิดขึ้นระหว่างฟัน (TTCE) ได้ด้วย

## รายการอ้างอิง

- [1] Baheti, R.S., Scott, P.F.. Design of self-calibrating controllers of heliostats in a solar power plant. IEEE Transactions on Automatic Control AC-25(6) (December 1980) : 1091-1097.
- [2] Chen Y.T., et al. Report of the first prototype of Non-imagine focusing Heliostat and Its Application in High Temperature Solar Furnace. Solar Energy Vol.72 No.6 (2002) : pp.551-544.
- [3] Francis B. Hildebrand. Advanced Calculus For Applications. 2nd edition. New Jersey : Prentice-Hall, 1976.
- [4] John J. Craig. Introduction to robotics Mechanics and control. 2nd edition. United States of America : Addison-Wesley, 1986.
- [5] George W. Michalec. Precision Gearing Theory and Practice. New York : John Wiley & Sons, 1996.
- [6] วิบูลย์ แสงวีระพันธุ์ศิริ. การควบคุมระบบพลศาสตร์. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพมหานคร : จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2548.
- [7] สมชาย เกียรติกมลชัย และคณะ. โครงการศึกษา ออกแบบและสร้างต้นแบบเตาเผา สุริยะ อุณหภูมิสูง. กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน, 2547.
- [8] ไวยพจน์ ศรีธัญ. เครื่องกลไฟฟ้ากระแสตรง. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร : วังอักษร, 2548.



ภาคผนวก

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

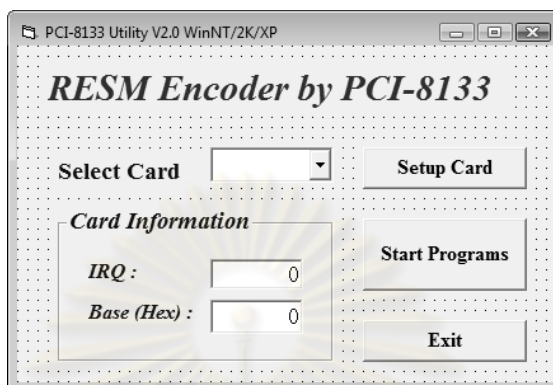


ภาคผนวก ก

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

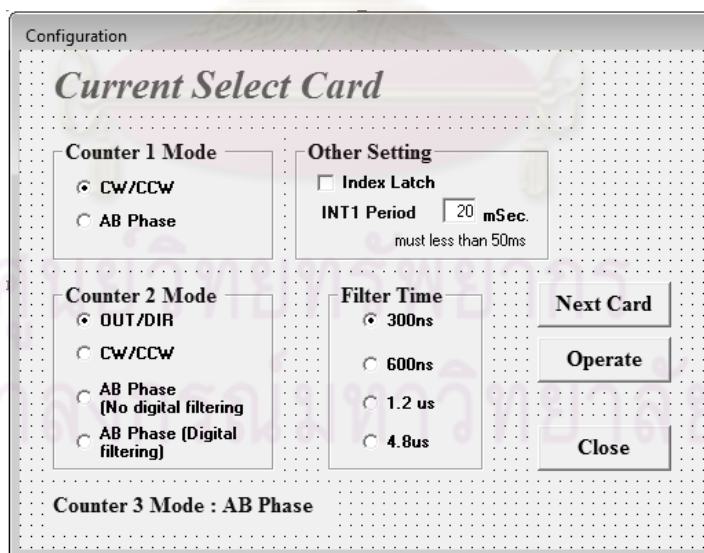
## โปรแกรมที่ใช้วัดความผิดพลาดที่เกิดขึ้นจากระบบส่งกำลัง

โปรแกรมที่ใช้วัดความผิดพลาดนี้พัฒนามาจากโปรแกรมนับสัญญาณของบริษัท Adlink เขียนขึ้นโดยโปรแกรม visual basic 6 ซึ่งมีหน้าต่างแวกดังรูปที่ ก.1



รูปที่ ก.1 หน้าต่างแรกเมื่อเริ่มใช้โปรแกรม

จากรูป ก.1 ในส่วน select card จะทำการเลือกการ์ดนับสัญญาณ (counter card) ที่ใช้ในการทดลองใช้การ์ดรุ่น PCI-8133 ส่วน Card Information จะแสดง IRQ และ Base ของการ์ดที่ใช้งาน ในส่วนของ Setup Card เมื่อกดเลือกจะมีหน้าต่างขึ้นมาดังรูปที่ ก.2

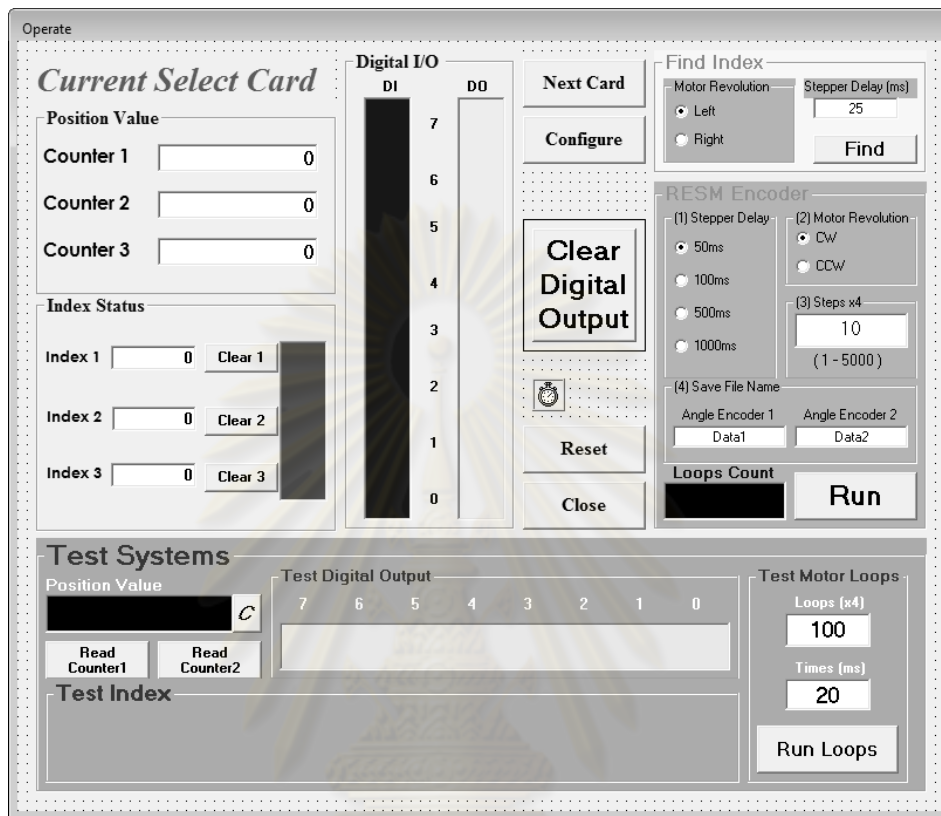


รูปที่ ก.2 หน้าต่างตั้งค่าการนับสัญญาณ

จากรูปที่ ก.2 ในส่วนของ Counter 1 นั้นจะทำการต่อเข้ากับอุปกรณ์วัดมุมเฟืองขับ ส่วน Counter 2 นั้นจะทำการต่อเข้ากับอุปกรณ์วัดมุมในเฟืองตาม ซึ่งโหมดการทำงานนั้นเลือกเป็น AB



Phase นี้จะขึ้นอยู่กับชนิดของอุปกรณ์วัดมุม ในส่วน Other Setting ให้คลิกเลือกหัวข้อ Index Latch เพื่อที่จะใช้ตำแหน่ง Index ของอุปกรณ์วัดมุมในการหาตำแหน่งเริ่มต้นการทดสอบทุกครั้ง เมื่อกดปุ่ม Operate จะเข้าสู่เมนูการใช้งานดังรูปที่ ก.3



รูปที่ ก.3 หน้าต่างการใช้งาน

จากรูป ก.3 ประกอบไปด้วย

1. Position Value จะแสดงตำแหน่งมุมที่อ่านได้จากอุปกรณ์วัดมุม
2. Index Status จะแสดงตำแหน่ง Index ของอุปกรณ์วัดมุม
3. Digital I/O จะแสดงสถานะเปิด, ปิด ของช่องสัญญาณ Digital Input และ Digital Output โดยในส่วนของ Digital Output จะนำไปต่อเข้ากับระบบขับเคลื่อนของมอเตอร์เพื่อใช้ในการสั่งให้มอเตอร์ทำงาน
4. Test Systems ใช้ตรวจสอบการอ่านค่าจากอุปกรณ์วัดมุมและทดสอบการขับเคลื่อนมอเตอร์

5. Find Index ใช้หาตำแหน่งเริ่มต้นในการทดลอง โดยพิจารณาจาก Index ของอุปกรณ์วัดมุมในตำแหน่งเฟืองตามและเฟืองขับ
6. RESM ENCODER ใช้ในการวัดความผิดพลาดที่เกิดขึ้นในการส่งกำลังทั้งในเฟืองตรงและเฟืองขับ โดยสามารถกำหนดการหน่วงเวลาการทำงานของมอเตอร์ได้ กำหนดทิศทางการเคลื่อนที่ทวนเข็มนาฬิกาตามเข็มนาฬิกา กำหนดตำแหน่งที่ต้องการให้มอเตอร์หมุนไปได้ และกำหนดชื่อไฟล์ที่จะทำการบันทึกข้อมูลลงไป โดยกดปุ่ม RUN เพื่อเริ่มโปรแกรม

โปรแกรมที่ใช้ในการอ่านค่ามุมจากอุปกรณ์ตรวจวัดมุม

```

1 Option Explicit
2 -----
3 Private Sub Command1_Click()
4 ' Next Card button pressed, display relative information
5   If cardNo < TotalCard - 1 Then
6     cardNo = cardNo + 1
7   Else
8     cardNo = 0
9   End If
10  Label4.Caption = "Current Select Card : " + Str(cardNo)
11  DBoolean2.Value = DOut(cardNo)
12 End Sub
13 -----
14 Private Sub Command10_Click()
15 DBoolean2.Value = 0
16
17 End Sub
18 -----
19 Private Sub Command11_Click()
20 Dim motortimer As Integer
21 Dim motorrevolution As Integer
22 Dim Index1 As Long
23 Dim Index2 As Long
24 Dim Index1e As Long
25 Dim Index2e As Long
26
27
28
29
30 ' revolution right or left
31 If Option8.Value = True Then
32 motorrevolution = 1
33 Else
34 motorrevolution = 2
35 End If
36
37 'timer

```

```

38  motortimer = Text6.Text
39
40  ' Clear index1
41  Idx0(cardNo) = 0
42  ' initial index 1
43      Index1 = Oct(Idx0(cardNo))
44      Index1e = 0
45
46  'loop1-----encoder heliostat-----
47  Do While Index1e = 0
48
49      If motorrevolution = 1 Then
50          driveM (motortimer)
51      Else
52          driveMR (motortimer)
53      End If
54
55      Index1e = Index1 - Oct(Idx0(cardNo))
56  Loop
57  'end loop1-----
58
59
60  ' Clear index2
61  Idx1(cardNo) = 0
62  ' initial index 2
63      Index2 = Oct(Idx1(cardNo))
64      Index2e = 0
65
66  'loop2-----encoder motor-----
67  Do While Index2e = 0
68
69      If motorrevolution = 1 Then
70          driveM (motortimer)
71      Else
72          driveMR (motortimer)
73      End If
74
75      Index2e = Index2 - Oct(Idx1(cardNo))
76  Loop
77  'end loop2-----
78
79
80
81  ' clear digital output
82  DBoolean2.Value = 0
83
84  End Sub
85  -----
86  Private Sub Command12_Click()
87      Dim ij As Long
88      ij = Str(Count1(cardNo))
89      D7Segment2.Value = ij

```

```

90 End Sub
91 -----
92
93 Private Sub Command13_Click()
94 D7Segment2.Value = 0
95 End Sub
96 -----
97 Private Sub Command2_Click()
98 ' Configure button clicked
99     Operate.Hide
100    Config.Show
101 End Sub
102 -----
103 Private Sub Command3_Click()
104 ' Close button clicked
105     Operate.Hide
106     Main.Show
107 End Sub
108 -----
109 Private Sub Command4_Click()
110 ' Latch 1 clear button pressed
111     W_8133_CLR_IdxLah cardNo, 1
112     Idx0(cardNo) = 0
113 End Sub
114 -----
115 Private Sub Command5_Click()
116 ' Latch 3 clear button pressed
117     W_8133_CLR_IdxLah cardNo, 3
118     Idx2(cardNo) = 0
119 End Sub
120 -----
121 Private Sub Command6_Click()
122 ' Latch 2 clear button pressed
123     W_8133_CLR_IdxLah cardNo, 2
124     Idx1(cardNo) = 0
125 End Sub
126
127 -----
128
129 Private Sub Command7_Click()
130 Command7.Enabled = False
131
132 Dim i As Integer
133 Dim motorrevolution As Integer
134 Dim motortimer As Integer
135 Dim stg1 As String
136 Dim stg2 As String
137 Dim stp As Integer
138
139 stg1 = Text4.Text & ".txt"
140 stg2 = Text5.Text & ".txt"
141

```

```
142
143 stp = Text1.Text
144
145
146 ' if programs
147
148 If Option1.Value = True Then
149 motorrevolution = 1
150 Else
151 motorrevolution = 2
152 End If
153
154 If Option3.Value = True Then
155 motortimer = 50
156 End If
157
158 If Option4.Value = True Then
159 motortimer = 100
160 End If
161
162 If Option5.Value = True Then
163 motortimer = 500
164 End If
165
166 If Option6.Value = True Then
167 motortimer = 1000
168 End If
169
170
171
172 ReDim angle1(0) As Long
173 ReDim angle2(0) As Long
174 Dim ii As Integer
175
176 For ii = 1 To stp
177 Sleep (motortimer)
178 Command7.Caption = ii
179 ReDim Preserve angle1(ii - 1)
180 ReDim Preserve angle2(ii - 1)
181 angle1(ii - 1) = Str(Count0(cardNo))
182 angle2(ii - 1) = Str(Count1(cardNo))
183 D7Segment1.Value = ii * 4
184
185 'function drive motor
186
187 If motorrevolution = 1 Then
188 driveM (motortimer)
189 Else
190 driveMR (motortimer)
191 End If
192
193 Next
```

```

194
195
196 ' save array
197 Open stg1 For Output As #1
198 For i = 0 To UBound(angle1)
199 Print #1, angle1(i)
200 Next i
201 Close #1
202
203 Open stg2 For Output As #2
204 For i = 0 To UBound(angle2)
205 Print #2, angle2(i)
206 Next i
207 Close #2
208 '.....
209
210
211 Command7.Enabled = True
212 Command7.Caption = "Run"
213 DBoolean2.Value = 0
214
215
216 End Sub
217 -----
218 Sub driveM(mt)
219 ' mt =motor timer
220 Dim i As Integer
221 Dim iM As Integer
222 Dim Bi As Byte
223
224 ' mv = 1 is cw
225 ' mv = 2 is ccw
226
227 For iM = 1 To 4
228
229 If iM = 1 Then
230 Bi = 1
231 End If
232 If iM = 2 Then
233 Bi = 2
234 End If
235 If iM = 3 Then
236 Bi = 4
237 End If
238 If iM = 4 Then
239 Bi = 8
240 End If
241
242 ' input value to digital out
243 DOut(cardNo) = Bi
244
245 For i = 0 To TotalCard - 1

```

```

246     'Write output value
247     W_8133_DO i, DOut(i)
248     Next
249     Sleep (mt)
250     Next
251     End Sub
252     -----
253     Sub driveMR(mt)
254     ' mt =motor timer
255     Dim i As Integer
256     Dim iM As Integer
257     Dim Bi As Byte
258
259     ' mv = 1 is cw
260     ' mv = 2 is ccw
261
262     For iM = 1 To 4
263
264     If iM = 1 Then
265     Bi = 8
266     End If
267     If iM = 2 Then
268     Bi = 4
269     End If
270     If iM = 3 Then
271     Bi = 2
272     End If
273     If iM = 4 Then
274     Bi = 1
275     End If
276
277     ' input value to digital out
278     DOut(cardNo) = Bi
279
280     For i = 0 To TotalCard - 1
281     'Write output value
282     W_8133_DO i, DOut(i)
283     Next
284     Sleep (mt)
285     Next
286     End Sub
287
288     -----
289
290
291     Private Sub DLEDMeter1_LinkClose()
292
293     End Sub
294     -----
295     Private Sub Command8_Click()
296     Dim ij As Long
297     ij = Str(Count0(cardNo))

```

```

298 D7Segment2.Value = ij
299 End Sub
300 -----
301 Private Sub Command9_Click()
302 Command9.Enabled = False
303
304 Dim i As Integer
305 Dim ii As Integer
306 Dim iii As Integer
307 Dim iiii As Integer
308
309 iii = Text2.Text
310 iiii = Text3.Text
311
312 Dim iM As Integer
313 Dim Bi As Byte
314
315
316
317 ' mv = 1 is cw
318 ' mv = 2 is ccw
319 For ii = 1 To iii
320 For iM = 1 To 4
321
322 If iM = 1 Then
323 Bi = 1
324 End If
325 If iM = 2 Then
326 Bi = 2
327 End If
328 If iM = 3 Then
329 Bi = 4
330 End If
331 If iM = 4 Then
332 Bi = 8
333 End If
334
335 ' input value to digital out
336 DOut(cardNo) = Bi
337
338 For i = 0 To TotalCard - 1
339 'Write output value
340 W_8133_DO i, DOut(i)
341 Next
342 Sleep (iiii)
343 Next
344 Command9.Caption = ii
345 Next
346 Command9.Caption = "Test Digital output"
347 Command9.Enabled = True
348
349 DBoolean2.Value = 0

```



```

350
351
352 End Sub
353 -----
354 Private Sub DBoolean4_ButtonClick(ByVal ButtonNo As Integer,
355 ByVal State As Integer)
356 End Sub
357 -----
358 Private Sub Frame11_DragDrop(Source As Control, X As Single, Y As Single)
359
360 End Sub
361 -----
362 Private Sub Frame13_DragDrop(Source As Control, X As Single, Y As Single)
363
364 End Sub
365 -----
366 Private Sub T_Cnt1_Change()
367
368 End Sub
369 -----
370 Private Sub T_Idx1_Change()
371
372 End Sub
373 -----
374 Private Sub Timer1_Timer()
375 Dim i As Integer
376 Dim TestBit As Integer
377 Dim Sts As Integer
378
379
380 'Display each conter's value for one card
381 T_Cnt1.Text = Str(Count0(cardNo))
382 T_Cnt2.Text = Str(Count1(cardNo))
383 T_Cnt3.Text = Str(Count2(cardNo))
384
385 'Read this card's status register
386 W_8133_Read_Status cardNo, Sts
387
388 ' If we setup latch function,read this value and put it in array
389 If IdxLatch(cardNo) = True Then
390 W_8133_Read_Index cardNo, 1, Idx0(cardNo)
391 W_8133_Read_Index cardNo, 2, Idx1(cardNo)
392 W_8133_Read_Index cardNo, 3, Idx2(cardNo)
393
394 'display latch status from status register IDL3~IDL`
395 DBoolean3.Value = (Sts And 112) / 16
396 End If
397
398
399 ' Display Latch value for each counter
400 T_Idx1.Text = "0x" + Hex(Idx0(cardNo))

```

```

401     T_Idx2.Text = "0x" + Hex(Idx1(cardNo))
402     T_Idx3.Text = "0x" + Hex(Idx2(cardNo))
403
404     ' Store user input button value
405     DOut(cardNo) = DBoolean2.Value
406
407     'tuta digital output test
408     DBoolean4 = DOut(cardNo)
409
410
411     For i = 0 To TotalCard - 1
412         'Read Input value
413         W_8133_DI i, DIn(i)
414         'Write output value
415         W_8133_DO i, DOut(i)
416     Next
417
418     ' Diplay Input value on the green light
419     DBoolean1.Value = DIn(cardNo)
420
421 End Sub
422 -----
423 Private Sub Form_Activate()
424     Label4.Caption = "Current Select Card : " + Str(cardNo)
425 End Sub
426 -----
427 Private Sub C_Reset_Click()
428     ' Reset Button clicked
429     Dim i As Integer
430
431     For i = 0 To TotalCard
432         Count0(i) = 0
433         Count1(i) = 0
434         Count2(i) = 0
435     Next
436
437     ResetOn0 = True
438     ResetOn1 = True
439     ResetOn2 = True
440     ResetOn3 = True
441
442     W_8133_Software_Reset cardNo
443
444     W_8133_Set_Int0Perd cardNo, Int0
445     W_8133_Set_Int1Perd cardNo, Int1(cardNo)
446     W_8133_ModeSelect cardNo, Mode(cardNo)
447
448     W_8133_CLR_IdxLah cardNo, 1
449     W_8133_CLR_IdxLah cardNo, 2
450     W_8133_CLR_IdxLah cardNo, 3
451
452 End Sub

```



ภาคผนวก ข

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## โปรแกรมที่ใช้คำนวณการสะท้อนแสงจากเฮลิโอสแตทไปยังตัวรับส่วนกลาง

โปรแกรมคำนวณนี้เขียนขึ้นโดย Matlab 7.0.1 สามารถแทนความผิดพลาดที่เกิดขึ้นในระบบส่งกำลังลงไปในตัวแปร AstartERROR สำหรับความผิดพลาดในแกนอัลติจูด และ AzstartERROR สำหรับความผิดพลาดในแกนอะซิมูท โดยผลที่ได้จากการทดลองจะเก็บไว้ในตัวแปร X และ Z ซึ่งเป็นตำแหน่งที่แสงสะท้อนไปยังตัวรับส่วนกลาง

โปรแกรมที่ใช้การคำนวณการสะท้อนแสง

```

1 clear
2 AstartERROR=0.01; %error degree
3 AzstartERROR=0.01;%error degree
4
5 calculationDAY=365; %Day that you want to calculate 1 - 356 day*****
6
7 sst=4;%calculate every (1/sst) hour
8
9
10 iC=1;% count
11 %-----error-----
12     sinErrorAl=0.1;
13     sinErrorAz=sinErrorAl;
14     for i=1:20000
15
16         initialDrive=360/20000*i;
17         canDriveAl(i,1)=AstartERROR*(rand()*2-1)+initialDrive;
18         canDriveAz(i,1)=AstartERROR*(rand()*2-1)+initialDrive;
19         initialDEG(i,1)=initialDrive;
20     end
21 %-----error END-----
22
23
24 length1=2; %screen length
25 length3=8; %screen high
26
27
28
29 HelioX=15; %L screen to heliostat
30 HelioY=-25; %L screen to heliostat
31 HelioZ=0; %L screen to heliostat
32
33 Xp=-HelioX; %L heliostat to screen
34 Yp=-HelioY; %L heliostat to screen
35 Zp=length3; %L heliostat to screen
36
37 for dn=1:calculationDAY; %What date is it?
38     dn ; %show day
39
40

```

```

41 for ST=8*sst:16*sst ; %What time is it?
42     ST=ST/sst;%time/sst
43
44 D=23.5*sin((360/365)*(dn+284)*pi/180)*pi/180;
45 H=15*(12-ST)*pi/180;
46 la=-15*pi/180;
47 A1=asin(cos(la)*cos(D)*cos(H)+sin(la)*sin(D));
48     if H>=0
49         A2=real(acos((sin(A1)*sin(la)-sin(D))/(cos(A1)*cos(la))));
50     else A2=real(-acos((sin(A1)*sin(la)-sin(D))/(cos(A1)*cos(la))));
51     end
52 Nsun=[cos(A1)*sin(A2) cos(A1)*cos(A2) sin(A1)];
53 NsunX=Nsun(1,1);
54 NsunY=Nsun(1,2);
55 NsunZ=Nsun(1,3);
56
57 npoint=[Xp,Yp,Zp];
58 npointUNIT=sqrt(Xp^2+Yp^2+Zp^2);
59 Npoint=(npoint/npointUNIT);
60
61 nhelio=Nsun+Npoint;
62 nhelioX=nhelio(1,1);
63 nhelioY=nhelio(1,2);
64 nhelioZ=nhelio(1,3);
65 nhelioUNIT=sqrt(nhelioX^2+nhelioY^2+nhelioZ^2);
66 Nhelio = nhelio/nhelioUNIT;
67 NhelioX=Nhelio(1,1);
68 NhelioY=Nhelio(1,2);
69 NhelioZ=Nhelio(1,3);
70
71 AlHelio=asin(Nhelio(1,3));
72     if Nhelio(1,1)>=0
73
74         AzHelio=acos(Nhelio(1,2)/cos(AlHelio));
75     else AzHelio=-acos(Nhelio(1,2)/cos(AlHelio));
76     end
77 Aldeg=AlHelio*180/pi();
78 Azdeg=AzHelio*180/pi();
79
80 %-----start error-----
81
82
83 %-----1-----
84 if Aldeg<0
85     Aldeg=360+aldeg;
86 end
87
88 if Azdeg<0
89     Azdeg=360+Azdeg;
90 end
91 %-----1 end-----
92

```

```

93
94 %----2-----
95 searchMINdrive=abs(initialDEG-Aldeg);
96 [MINy,MINi]=min(searchMINdrive);
97 ERRORdriveAl=canDriveAl(MINi,1)-Aldeg;
98
99 searchMINdrive=abs(initialDEG-Azdeg);
100 [MINy,MINi]=min(searchMINdrive);
101 ERRORdriveAz=canDriveAz(MINi,1)-Azdeg;
102 %----2 end-----
103
104
105 %----3-----
106 AlHelioE=(Aldeg+ERRORdriveAl)*pi/180;
107 AzHelioE=(Azdeg+ERRORdriveAz)*pi/180;
108
109 NHelioE=[cos(AlHelioE)*sin(AzHelioE) cos(AlHelioE)*cos(AzHelioE) sin
110 (AlHelioE)];
111 NHelioEX=NHelioE(1,1);
112 NHelioEY=NHelioE(1,2);
113 NHelioEZ=NHelioE(1,3);
114
115 NpointNew=2*dot(Nsun,NHelioE)*NHelioE-Nsun;
116 NpointNewX=NpointNew(1,1);
117 NpointNewY=NpointNew(1,2);
118 NpointNewZ=NpointNew(1,3);
119 %----3 end-----
120
121 factor3=abs(HelioX/NpointNewX); %screen 90deg with X axis
122 Xscreen(iC,1)=NpointNewX*factor3+HelioX;
123 Yscreen(iC,1)=NpointNewY*factor3+HelioY;
124 Zscreen(iC,1)=NpointNewZ*factor3+HelioZ;
125
126 factor3y=abs(HelioY/NpointNewY);%screen 90deg with Y axis
127 YXscreen(iC,1)=NpointNewX*factor3y+HelioX;
128 YYscreen(iC,1)=NpointNewY*factor3y+HelioY;
129 YZscreen(iC,1)=NpointNewZ*factor3y+HelioZ;
130
131 iC=iC+1;
132 %-----end error-----
133
134
135
136 end
137 end
138
139 len2=length1/2;
140 len3=length3-len2;
141 len4=length3+len2;
142 X1=[0,0,0,0,0];
143 Y1=[-len2,-len2,len2,len2,-len2];

```

```

144 Z1=[len3,len4,len4,len3,len3];
145
146
147 %-----start plot-----
148 figure(1); scatter ( Yscreen, Zscreen,'y', 'DisplayName', 'Xscreen,
149 Yscreen, Zscreen');%plot data
150 hold on
151 grid on
152 plot(Y1,Z1,'LineWidth',4); %plot screen
153 plot(0,length3,'o','MarkerSize',2,'LineWidth',5)
154 set(gca,'DataAspectRatio',[1 1 1],'PlotBoxAspectRatio',[1 1 1]);
155
156 figure(2); scatter ( YXscreen, YZscreen,'y', 'DisplayName', 'Xscreen,
157 Yscreen, Zscreen');%plot data
158 hold on
159 grid on
160 plot(Y1,Z1,'LineWidth',4); %plot screen
161 plot(0,length3,'o','MarkerSize',2,'LineWidth',5)
162 set(gca,'DataAspectRatio',[1 1 1],'PlotBoxAspectRatio',[1 1 1]);
163 %----END plot screen-----
164
165 %----stand----
166 figure(3);
167 hold on
168 grid on
169 plot(HelioX,HelioY,'gs','MarkerSize',10,'LineWidth',2);
170 plot3(X1,Y1,Z1,'LineWidth',4);
171 plot3(0,0,length3,'o','MarkerSize',2,'LineWidth',2)
172 %-----leg screen-----
173 X2=[0,0];
174 Y2=[0,0];
175 Z2=[0,len3];
176 plot3(X2,Y2,Z2,'LineWidth',4);
177 %-----end leg screen -----
178
179 %-----cycle-----
180 for i2=1:6
181     cyc1=i2*5;
182     t = 0:pi/100:2*pi;
183     X4 = cos(t)*cyc1;
184     Y4 = sin(t)*cyc1;
185     plot3(X4,Y4,t*0,'k');
186     end
187 %-----end-cycle-----
188
189
190 %-----START line
191 %factor1
192 factor1=30;
193 plot3(NsunX*factor1+HelioX,NsunY*factor1+HelioY,NsunZ*factor1+HelioZ,

```

```

'ro','MarkerSize',5,'LineWidth',10)
194 xline1=[NsunX*factor1+HelioX HelioX 0];
195 yline1=[NsunY*factor1+HelioY HelioY 0];
196 zline1=[NsunZ*factor1+HelioZ HelioZ length3];
197 plot3(xline1,yline1,zline1);
198 %factor2
199 factor2=30;
plot3(NhelioX*factor2+HelioX,NhelioY*factor2+HelioY,NhelioZ*factor2+
200 HelioZ,'go','MarkerSize',2,'LineWidth',2)
201 xline2=[NhelioX*factor2+HelioX HelioX ];
202 yline2=[NhelioY*factor2+HelioY HelioY ];
203 zline2=[NhelioZ*factor2+HelioZ HelioZ ];
204 plot3(xline2,yline2,zline2,'g','LineWidth',2);
205 %factor3
206 factor3=abs(HelioX/NpointNewX);
plot3(NpointNewX*factor3+HelioX,NpointNewY*factor3+HelioY,
207 NpointNewZ*factor3+HelioZ,'ro','MarkerSize',2,'LineWidth',2)
208 xline3=[NpointNewX*factor3+HelioX HelioX ];
209 yline3=[NpointNewY*factor3+HelioY HelioY ];
210 zline3=[NpointNewZ*factor3+HelioZ HelioZ ];
211 plot3(xline3,yline3,zline3,'r','LineWidth',2);
212 %-----END line
213
214
215
216
217 xlim([-30 30]);
218 ylim([-30 30]);
219 zlim([0 30]);
220
221
222 set(gca,'DataAspectRatio',[1 1 1],'PlotBoxAspectRatio',[1 1 1]);
223 x=YXscreen;
224 z=YZscreen;

```



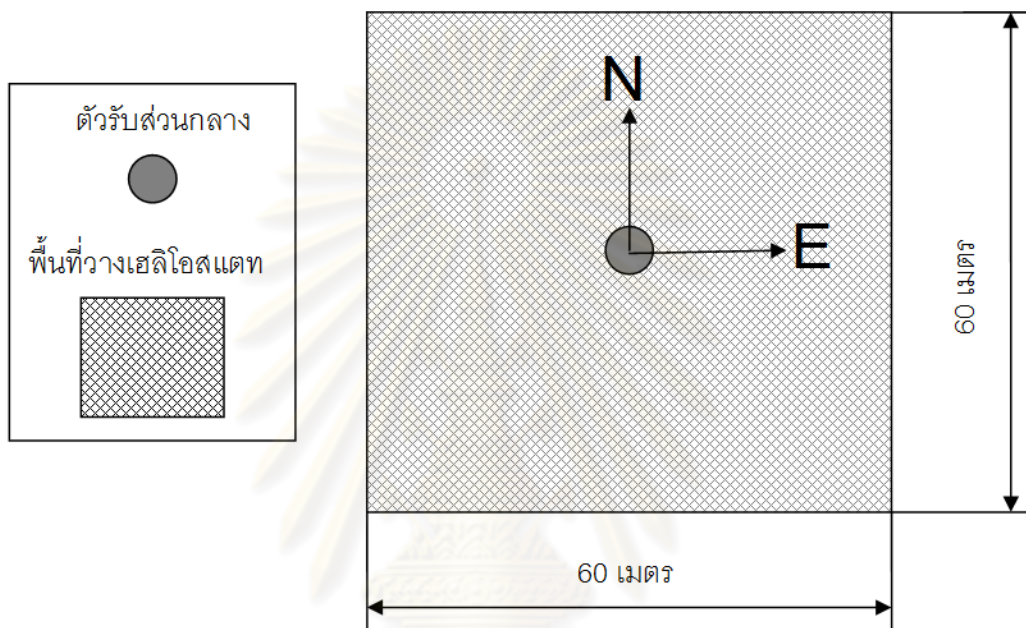


ภาคผนวก ค

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

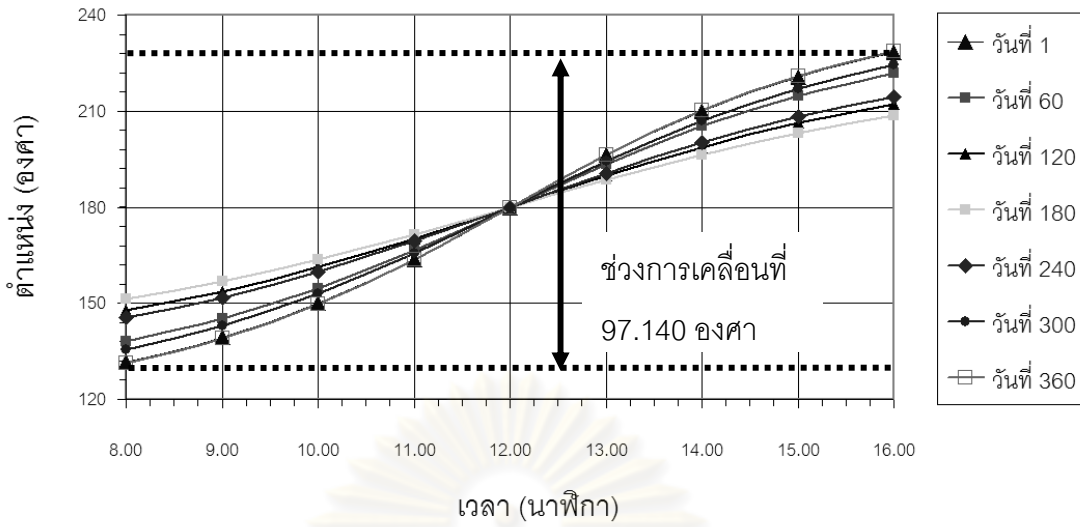
## โปรแกรมที่ใช้คำนวณการเคลื่อนที่ของเฮลิโอสแตทในแกนอะซิมูทและอัลติจูด

กำหนดให้พื้นที่วางเฮลิโอสแตทรอบๆตัวรับส่วนกลางมีขนาด 60 เมตร x 60 เมตร ดังรูปที่ ค.1 ตัวรับส่วนกลางมีความสูงจากพื้นดิน 8 เมตร ค่าละติจูดของตำแหน่งตัวรับส่วนกลางคือ 15 องศา (ละติจูดของประเทศไทย) โดยมีขอบเขตการคำนวณเริ่มเมื่อเวลา 8.00 น. ถึง 16.00 น. ได้ผลการจำลองช่วงการเคลื่อนที่ของมุมอะซิมูทดังรูปที่ 3.10 และมุมอัลติจูดดังรูปที่ 3.11 ในบทที่ 3

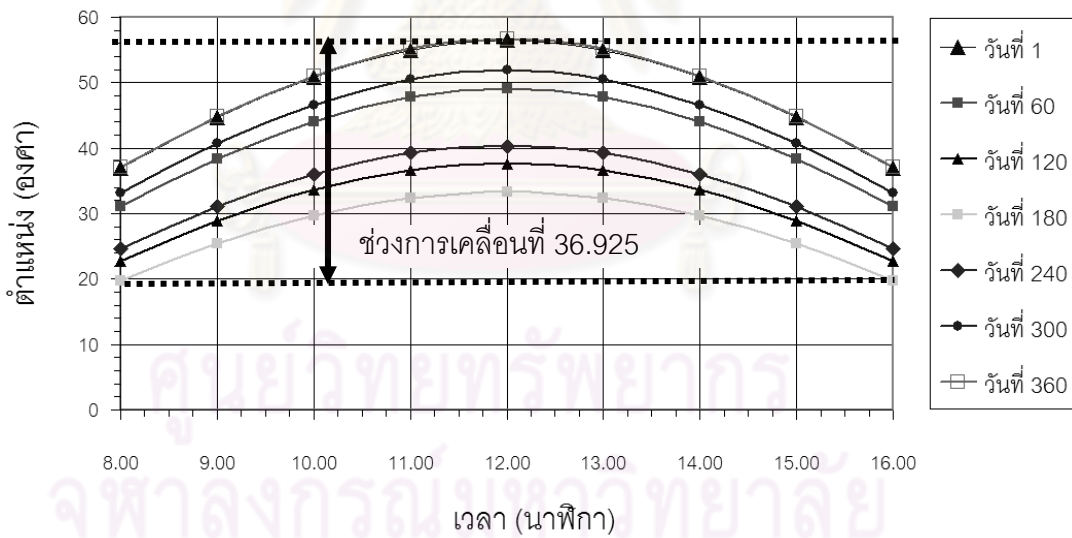


รูปที่ ค.1 พื้นที่วางเฮลิโอสแตทรอบตัวรับส่วนกลาง

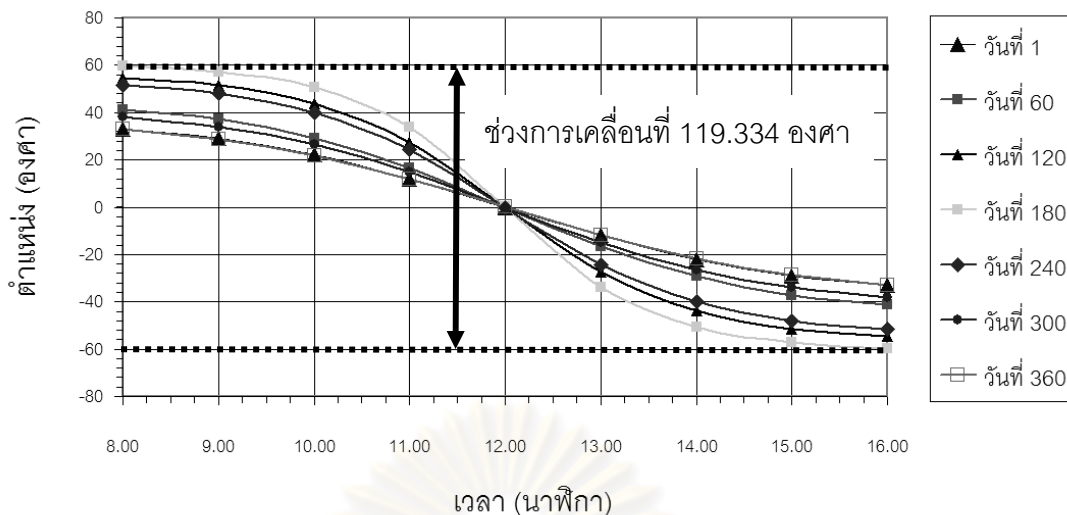
เมื่อพิจารณาดังรูปที่ 3.10 และ 3.11 จะเห็นได้ว่าช่วงการเคลื่อนที่ในทิศตะวันตกและตะวันออกมีลักษณะเหมือนกัน แต่การเคลื่อนที่ในทิศเหนือและทิศใต้มีลักษณะแตกต่างกัน จึงทำการพิจารณาการเคลื่อนที่ของเฮลิโอสแตทในแกนอะซิมูทและอัลติจูดเมื่อเฮลิโอสแตทวาง ณ ตำแหน่งทิศเหนือและทิศใต้ ห่างจากตัวรับส่วนกลาง 30 เมตร เพื่อเปรียบเทียบลักษณะการเคลื่อนที่ ซึ่งเมื่อวางเฮลิโอสแตทในทิศเหนือได้ช่วงการเคลื่อนที่มุมอะซิมูทดังรูปที่ ค.2 และมุมอัลติจูดดังรูปที่ ค.3 เมื่อวางเฮลิโอสแตทในทิศใต้ได้ช่วงการเคลื่อนที่มุมอะซิมูทดังรูปที่ ค.4 และมุมอัลติจูดดังรูปที่ ค.5 จะเห็นได้ว่าลักษณะการเคลื่อนที่นั้นมีความแตกต่างกันทั้งในแกนอะซิมูทและอัลติจูด ส่งผลให้ช่วงในการเคลื่อนที่แตกต่างกันไปด้วย โดยการวางเฮลิโอสแตทในทิศเหนือมีช่วงการเคลื่อนที่ทั้งในแกนอะซิมูทและแกนอัลติจูดน้อยกว่าการวางเฮลิโอสแตทในทิศใต้



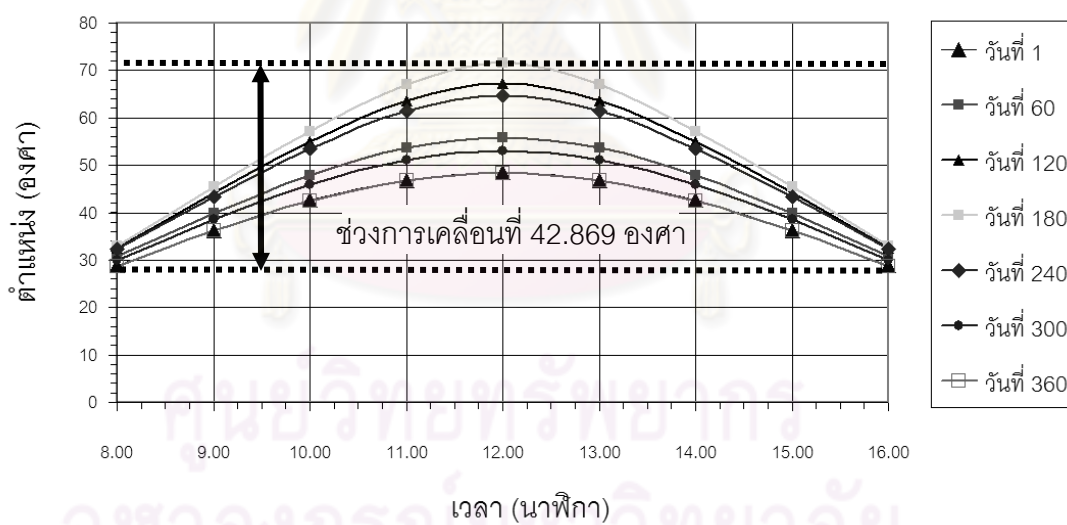
รูปที่ ค.2 มุมการเคลื่อนที่ของเฮลิโอสแตทในแกนอะซิมูทเมื่อวางเฮลิโอสแตท ณ ทิศเหนือห่างจากตัวรับส่วนกลาง 30 เมตร



รูปที่ ค.3 มุมการเคลื่อนที่ของเฮลิโอสแตทในแกนอัลติจูดเมื่อวางเฮลิโอสแตท ณ ทิศเหนือห่างจากตัวรับส่วนกลาง 30 เมตร



รูปที่ ค.4 มุมการเคลื่อนที่ของเฮลิโอสแตทในแกนอะซิมูตเมื่อวางเฮลิโอสแตท ณ ทิศใต้ห่างจากตัวรับส่วนกลาง 30 เมตร



รูปที่ ค.5 มุมการเคลื่อนที่ของเฮลิโอสแตทในแกนอัลติจูดเมื่อวางเฮลิโอสแตท ณ ทิศใต้ห่างจากตัวรับส่วนกลาง 30 เมตร

โปรแกรมคำนวณหาช่วงการเคลื่อนที่ของมุมอะซิมูตและอัลติจูดในรอบ 1 ปี

- 1 clear
- 2 dayss=[1:100]\*3;
- 3 calculationDAY=length(dayss); %Day that you want to calculate 1 - 365 day\*\*\*\*\*

```

4
5  sst=1;%calculate every (1/sst) hour
6
7
8
9  length3=8; %screen high
10
11
12  HelioZ=0;   %L screen to heliostat
13
14  pixelHeliostat=500; %resolution max altitude azimuth (60 up)
15
16
17  %-----
18  iC=1;% count
19  iC2=1;
20  iC3=1;
21  iCday=1;
22  maximumPix=pixelHeliostat+1;
23
24  for ix=1:pixelHeliostat/2+1
25      for iy = 1:maximumPix
26          minusHelio=pixelHeliostat/60;
27
28          HelioX=-30+(ix/minusHelio-1/minusHelio);
29          HelioY=30-(iy/minusHelio-1/minusHelio);
30
31          Xp=-HelioX;   %L heliostat to screen
32          Yp=-HelioY;   %L heliostat to screen
33          Zp=length3;   %L heliostat to screen
34
35          for iDN=1:calculationDAY; %What date is it?
36              dn=dayss(1,iDN);   %show day
37
38
39          for ST=8*sst:16*sst ; %What time is it?
40              ST=ST/sst;%time/sst
41
42              D=23.5*sin((360/365)*(dn+284)*pi/180)*pi/180;
43              H=15*(12-ST)*pi/180;
44              la=-15*pi/180;
45              A1=asin(cos(la)*cos(D)*cos(H)+sin(la)*sin(D));
46              if H>=0
47                  A2=real(acos((sin(A1)*sin(la)-sin(D))/(cos(A1)*cos(la))));
48              else A2=real(-acos((sin(A1)*sin(la)-sin(D))/(cos(A1)*cos(la))));
49              end
50              Nsun=[cos(A1)*sin(A2) cos(A1)*cos(A2) sin(A1)];
51              NsunX=Nsun(1,1);
52              NsunY=Nsun(1,2);
53              NsunZ=Nsun(1,3);
54
55              npoint=[Xp,Yp,Zp];

```

```

56  npointUNIT=sqrt(Xp^2+Yp^2+Zp^2);
57  Npoint=(npoint/npointUNIT);
58
59  nhelio=Nsun+Npoint;
60  nhelioX=nhelio(1,1);
61  nhelioY=nhelio(1,2);
62  nhelioZ=nhelio(1,3);
63  nhelioUNIT=sqrt(nhelioX^2+nhelioY^2+nhelioZ^2);
64  Nhelio = nhelio/nhelioUNIT;
65  NhelioX=Nhelio(1,1);
66  NhelioY=Nhelio(1,2);
67  NhelioZ=Nhelio(1,3);
68
69  AlHelio=asin(Nhelio(1,3));
70  if Nhelio(1,1)>=0
71
72      AzHelio=acos(Nhelio(1,2)/cos(AlHelio));
73  else
74      AzHelio=-acos(Nhelio(1,2)/cos(AlHelio));
75  end
76  DegAltitude(iC,1)=AlHelio*180/pi();
77
78
79
80  DegAzimuth(iC,1)=AzHelio*180/pi();
81  iC=iC+1;
82  end
83  %-----end per DAY-----
84  iC=1;
85
86  DegAzimuth=DegAzimuth*1000;
87  DegAzimuth=real(DegAzimuth);
88  DegAzimuth=DegAzimuth/1000;
89  maxAz=max(DegAzimuth);
90  minAz=min(DegAzimuth);
91  deltaAz=maxAz-minAz;
92
93  %-----Adjust 360 deg start-----*****
94  if deltaAz>=180
95      opendeg=1; %1 --open  0--close
96  else
97      opendeg=0;
98  end
99
100  if opendeg==1
101  iAZ=length(DegAzimuth);
102  for iii=1:iAZ
103      if DegAzimuth(iii,1)<=0;
104          DegAzimuth(iii,1)=360+DegAzimuth(iii,1);
105      end
106  end
107  end

```

```

108          %---max start
109          MaxAzimuth(iCday,1)=max(DegAzimuth)-min(DegAzimuth);
110          MaxAltitude(iCday,1)=max(DegAltitude)-min(DegAltitude);
111          iCday=iCday+1;
112          %---max end
113
114
115          %-----Adjust 360 deg END-----*****
116          for iii=1:length(DegAltitude)
117              MoveAltitude(iC3,1)=DegAltitude(iii,1);
118              MoveAzimuth(iC3,1)=DegAzimuth(iii,1);
119              iC3=iC3+1;
120          end
121
122
123          iC2=iC2+1;
124          end
125
126          %-----end per Year-----
127
128          MaxAzimuthInYear=max(MoveAzimuth)-min(MoveAzimuth);
129          if MaxAzimuthInYear>=360;
130              MaxAzimuthInYear=360;
131          end
132
133
134          MaxAltitudeInYear=max(MoveAltitude)-min(MoveAltitude);
135
136          AreaAzimuth(iy,ix)=MaxAzimuthInYear;
137          AreaAzimuth(iy,pixelHeliostat+2-ix)=MaxAzimuthInYear;
138
139          AreaAltitude(iy,ix)=MaxAltitudeInYear;
140          AreaAltitude(iy,pixelHeliostat+2-ix)=MaxAltitudeInYear;
141
142          iC=1;% count
143          iC2=1;
144          iC3=1;
145          iCday=1;
146
147          end
148          ix
149          end
150
151          imagesc (AreaAltitude)
152          figure
153          imagesc (AreaAzimuth)

```



ภาคผนวก ง

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



## การลดความผิดพลาดที่เกิดขึ้นจากระบบส่งกำลังของเฮลิโอสแตท

### Transmission Error Compensation for Heliostats

สุรียา อุ่นจิตติ, สมชาย เกียรติกมลชัย, ชนัตต์ รัตนสุมาวงศ์ และ ศุภวุฒิ จันทรานูวัฒน์\*  
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เขตปทุมวัน กรุงเทพฯ 10330

\*อีเมลล์ supavut.c@chula.ac.th

#### บทคัดย่อ

ในปัจจุบันพลังงานแสงอาทิตย์นับเป็นพลังงานทางเลือกใหม่ที่กำลังได้รับความนิยม วิธีการหนึ่งที่เป็นที่สนใจคือการเปลี่ยนพลังงานแสงไปเป็นพลังงานความร้อนโดยใช้เตาเผาสุริยะอุณหภูมิสูง ระบบนี้ใช้การรวมแสงเพื่อให้เกิดปริมาณความร้อนเพียงพอด้วยกระจกสะท้อนแสงอาทิตย์จำนวนมากที่สามารถเคลื่อนที่ตามดวงอาทิตย์ที่เรียกว่าเฮลิโอสแตท (Heliostat) ซึ่งจะต้องมีระบบขับเคลื่อนที่มีความแม่นยำสูง งานวิจัยนี้มีเป้าหมายในการลดราคาของระบบโดยการใช้ระบบควบคุมการขับเคลื่อนแบบเปิด โดยใช้สเตปเปอร์มอเตอร์เพราะไม่ต้องมีอุปกรณ์ตรวจวัดตำแหน่งที่แม้จะให้ความแม่นยำสูงก็มีราคาสูงด้วย ดังนั้นเพื่อคงความแม่นยำไว้ต้องมีวิธีการลดความผิดพลาดที่เกิดขึ้นจากระบบขับเคลื่อนของเฮลิโอสแตทนี้ ซึ่งวิธีที่ใช้ได้แก่ วิธีการวัดเพื่อจดจำความผิดพลาดที่เกิดขึ้นจริงและวิธีการประมาณค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้น โดยจะนำความผิดพลาดดังกล่าวไปใช้ในการชดเชยการขับเคลื่อนภายในระบบเปิดให้มีความแม่นยำเพิ่มมากขึ้น ผลการทดลองจากวิธีการการลดความผิดพลาดในการขับเคลื่อนทั้ง 2 วิธีนั้น วิธีการจดจำความผิดพลาดที่เกิดขึ้นจริงสามารถลดความผิดพลาดสูงสุดได้จาก 0.176 องศา เหลือเพียง 0.0263 องศา หรือลดลงถึง 6.7 เท่า แต่วิธีนี้แก้ไขวิธีนี้ ต้องใช้หน่วยความจำมากเนื่องมาจากต้องจดจำความผิดพลาดที่เกิดขึ้นจริงทุกตำแหน่งของการส่งกำลัง ในขณะที่วิธีการประมาณค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นด้วยสมการโพลีโนเมียลอันดับที่ 6 นั้นลดความผิดพลาดสูงสุดเหลือ 0.126° หรือคิดเป็น 1.4 เท่าจากค่าเดิม แต่การแก้ด้วยวิธีนี้ใช้หน่วยความจำน้อยกว่ามากเพราะใช้เพียง 1 สมการตัวแปรในการแทนความผิดพลาดที่เกิดขึ้นทุกตำแหน่งของการส่งกำลัง วิธีนี้เหมาะกับระบบที่มีความผิดพลาดที่เกิดจากพื้นเพียงน้อยกว่าความผิดพลาดที่เกิดจากจุดหมุนเยื้องศูนย์กลาง

#### Abstract

Solar energy has long been considered an ultimate solution to our energy needs. Solar furnace is a possible way to convert solar energy into thermal energy. To obtain high power and temperature, the system usually employs a single central receiver and a large number of heliostats. The heliostats must be

designed to achieve a high degree of targeting accuracy. To reduce cost of heliostats, open-loop positioning system based on stepping motor and gearing are used. Although, accurate but costly encoders are not used in the open-loop system, in accuracy of the system may be recovered. Two methods were proposed. In the first method, all transmission errors were recorded and used to compensate the input command of the stepper during actual positioning. With this method, transmission error can be reduced from 0.176 degree maximum to only 0.0263 degree or 6.7 times in reduction. However, large amount of onboard memory is required to store the data. On the other hand, the second method used a 6<sup>th</sup> order polynomial to represent the data compactly. As a result, the error can be reduced to 0.126 degree maximum which equals to 1.4 times reduction. The second method may be desirable if errors from gear tooth are small compared to eccentricity of the gear.

#### 1. บทนำ

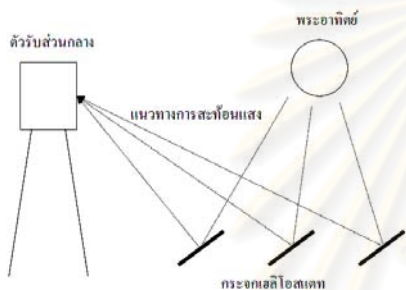
การสร้างเตาเผาสุริยะอุณหภูมิสูงนั้น ปัจจัยที่มีผลต่อการสร้างและออกแบบคือ ปริมาณพลังงานที่ต้องการ และ อุณหภูมิที่ต้องการ การรวมแสงเพื่อให้เกิดปริมาณความร้อนเพียงพอต่อความต้องการนั้น จะต้องใช้กระจกสะท้อนแสงอาทิตย์ที่สามารถเคลื่อนที่ตามดวงอาทิตย์ได้ หรือเรียกว่า เฮลิโอสแตท (Heliostat) โดยกระจกนี้จะทำหน้าที่สะท้อนแสงไปยัง ระบบตัวรับส่วนกลาง (Central receiver) เพื่อรวบรวมพลังงาน โดยในปัจจุบันสามารถรวบรวมแสงให้ได้พลังงานในระดับเมกกะวัตต์ จากโครงการ Solar one และ Solar two ของกระทรวงพลังงานสหรัฐอเมริกา ดังรูปที่ 1.1

ระบบตัวรับส่วนกลางเป็นระบบที่มีขนาดใหญ่ โดยจะมีพื้นที่รับแสงมากและรวมแสงโดยการใช้เฮลิโอสแตทจำนวนมาก ในการสะท้อนแสงไปยังจุดรวมแสงที่จุดเดียวกันดังรูปที่ 1.2 เนื่องจากเฮลิโอสแตทกับตัวรับส่วนกลางอาจมีระยะห่างกันมาก 30 เมตรหรือมากกว่า ดังนั้นตัวเฮลิโอสแตทเอง จะต้องมีการขับเคลื่อนที่มีความแม่นยำในการเคลื่อนที่มาก ไม่เช่นนั้นแล้วแสงสะท้อนจากดวงอาทิตย์ที่ตกกระทบไป

ยังตัวรับแสง จะมีความคลาดเคลื่อนเกิดขึ้นมาก ยกตัวอย่างเช่น หากเฮลิโอสแตทอยู่ห่างจากตัวรับแสงส่วนกลาง 30 เมตร โดยระบบขับเคลื่อนมีความผิดพลาดเกิดขึ้นเพียง 0.1 องศา จะส่งผลให้แสงที่ตกกระทบไปยังตัวรับส่วนกลางมีความผิดพลาดถึง 5.2 เซนติเมตร



รูปที่ 1.1 ระบบรวมแสงอาทิตย์ของโครงการ Solar one



รูปที่ 1.2 แนวทางการสะท้อนแสงของระบบแบบตัวรับส่วนกลาง

โดยทั่วไปเฮลิโอสแตทจะใช้ระบบควบคุมแบบปิด (Closed-loop control system) ซึ่งจะมีอุปกรณ์ตรวจวัดมุมการหมุน หรือไม่มีอุปกรณ์ตรวจวัดตำแหน่งดวงอาทิตย์ [1] โดยจะทำหน้าที่ในการส่งสัญญาณย้อนกลับเพื่อใช้ในการควบคุมการเคลื่อนที่ของเฮลิโอสแตทให้อยู่ในตำแหน่งที่ต้องการอย่างแม่นยำ เป็นเหตุให้เฮลิโอสแตทแต่ละตัวมีราคาสูง แนวคิดใหม่ในการควบคุมเฮลิโอสแตทคือการใช้ระบบควบคุมแบบเปิดซึ่งข้อดีคือมีราคาถูก งานวิจัยนี้ได้นำเสนองานเกี่ยวกับ วิธีการลดความผิดพลาดที่เกิดขึ้นจากระบบขับเคลื่อนของเฮลิโอสแตทแบบเปิด โดยจะเริ่มศึกษาจากแบบจำลองความผิดพลาดที่เกิดขึ้นจากระบบขับเคลื่อนเฮลิโอสแตท ตลอดจนความผิดพลาดที่เกิดขึ้นจริงและวิธีการลดความผิดพลาดดังกล่าว เพื่อนำไปใช้ในการออกแบบ, สร้างและควบคุมระบบขับเคลื่อนเฮลิโอสแตทให้มีความแม่นยำเพิ่มขึ้น โดยที่ไม่จำเป็นต้องใช้ระบบขับเคลื่อนราคาแพงที่มีความแม่นยำสูง

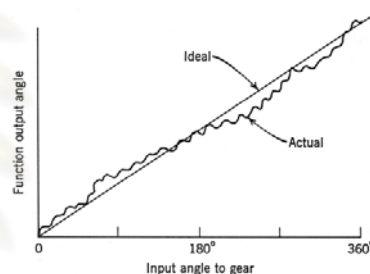
2. ทฤษฎีความคลาดเคลื่อนของเกียร์

ค่าความคลาดเคลื่อนในการส่งกำลังของเกียร์เป็นค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นโดยไม่สามารถหลีกเลี่ยงได้ โดยเป็นผลมาจากความคลาดเคลื่อนจากระยะห่างระหว่างฟันที่ขบกัน (backlash error) และตำแหน่งการเคลื่อนที่ผิดพลาด (position error) โดย backlash เป็นค่าความผิดพลาดของการเคลื่อนที่เนื่องจากการหมุนกลับทิศทาง เมื่อนำเฟืองมาประกอบเข้าด้วยกันส่งผลให้มีระยะห่างระหว่างฟันเกิดขึ้น ช่องว่างนี้จะเรียกว่า backlash ส่วน position error เกิดขึ้นเมื่อการส่ง

กำลังมีความผิดพลาดทั้งในส่วนของตำแหน่งและการเคลื่อนที่ ถึงแม้ว่าค่าความผิดพลาดทั้ง 2 แบบจะไม่สามารถแยกออกจากกันได้อย่างเด็ดขาด แต่ก็ยังมีความแตกต่างกัน และเกิดขึ้นจากสาเหตุที่แตกต่างกัน ในบทความนี้จะไม่คิดค่าความผิดพลาดที่เกิดจาก backlash โดยให้การส่งกำลังของเกียร์เป็นไปในทิศทางเดียวและใส่แรงบิดไว้เพื่อไม่ให้เกิดความผิดพลาดนี้จึงจะแสดงให้เห็นจากผลการทดลอง

2.1 ตำแหน่งการเคลื่อนที่ผิดพลาด (position error)

ความผิดพลาดส่วนนี้ประกอบไปด้วยสองส่วนด้วยกันได้แก่ความผิดพลาดที่เกิดขึ้นระหว่างฟัน (tooth-to-tooth composite error,  $E_{tt}$ ) และความผิดพลาดที่เกิดขึ้นจากจุดหมุนเยื้องศูนย์กลาง (Runout position error,  $e$ ) ความผิดพลาดทั้งสองส่วนนี้สามารถมองให้อยู่ในรูปผลรวมของความผิดพลาด TCE (total composite error,  $E_{tc}$ ) โดยจะส่งผลให้เกิดความผิดพลาดในการเคลื่อนที่ของเกียร์ดังรูปที่ 2.1 ซึ่งความผิดพลาดแต่ละส่วนมีรายละเอียดดังต่อไปนี้



รูปที่ 2.1 ความคลาดเคลื่อนของเกียร์เทียบกับอุดมคติ [2]

2.2 ความผิดพลาดที่เกิดขึ้นระหว่างฟัน TTCE (tooth-to-tooth composite error)

ความผิดพลาดนี้เป็นผลรวมของความผิดพลาดที่เกิดขึ้นจากการผลิตซึ่งทำให้รูปร่างของฟันเกียร์ไม่ได้มาตรฐาน ตำแหน่งของฟันไม่ได้มาตรฐาน ความหนาของฟันไม่ได้มาตรฐาน ซึ่งความผิดพลาดนี้จะมีค่าไม่แน่นอนในแต่ละฟันของเกียร์จะทำให้ค่าความผิดพลาดไม่เท่ากัน โดยความผิดพลาดส่วนนี้แทนด้วย สัญลักษณ์  $E_{tt}$  ซึ่งสามารถหาค่าประมาณได้จากตารางที่ 2.1 [2] ตารางดังกล่าวจะแสดงความผิดพลาดของเกียร์เกรดต่างๆ โดยเกียร์เกรดยิ่งสูง ความละเอียดและราคาก็ยิ่งสูงตามไปด้วย

ความผิดพลาดที่เกิดขึ้นระหว่างฟัน (TTCE) นี้สามารถประมาณค่าให้อยู่ในรูปของ Sine Wave ได้ โดยพิจารณาให้อยู่ในรูปของฟังก์ชันได้จากการสมการ

$${}_aE_{tt} = (E_{tt}/R) \sin(\theta n) \tag{2.1}$$

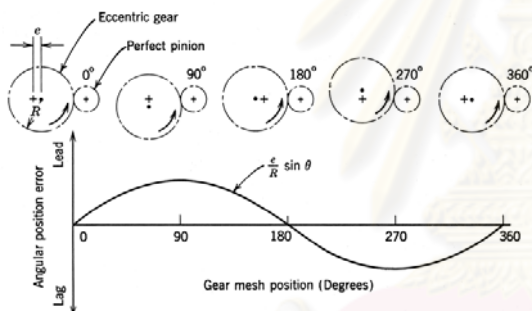
โดย  ${}_aE_{tt}$  = ความผิดพลาดที่เกิดขึ้นระหว่างฟันในฟังก์ชันมุม (องศา),  $E_{tt}$  = ความผิดพลาดที่เกิดขึ้นระหว่างฟัน (นิ้ว) หาได้จากตาราง 2.1,  $R$  = รัศมี pitch ของเกียร์ (นิ้ว),  $\theta$  = มุมที่หมุนไปของเกียร์ (องศา)  $n$  = จำนวนฟันของเกียร์

ตารางที่ 2.1 ความผิดพลาดของเกียร์บางเกรดตามมาตรฐานของ AGMA (American Gear Manufacturers Association) [2]

AGMA Quality No.	Number of Teeth and Pitch Diameter	Tooth-to-Tooth Composite (error)	Total Composite (Error)
5	Over 20 teeth, over 4in	0.0027	0.0072
6	Over 20 teeth, over 4in	0.0019	0.0052
7	Over 20 teeth, over 4in	0.0014	0.0037
8	Over 20 teeth, over 4in	0.0010	0.0027
...	...	...	...

**2.3 ความผิดพลาดที่เกิดขึ้นจากจุดหมุนเยื้องศูนย์กลาง (Runout position error)**

ในการสร้างเกียร์ จุดหมุนจริงๆของเกียร์จะมีความคลาดเคลื่อนเล็กน้อยซึ่งเป็นผลทำให้เกิดมุมการเคลื่อนที่ที่ผิดพลาดไป ซึ่งตำแหน่งของการหมุนของเกียร์ส่งผลให้ ความผิดพลาดที่เกิดขึ้นมีลักษณะดังรูปที่ 2.2 โดย  $e$  คือความคลาดเคลื่อนในการหมุนเยื้องศูนย์กลาง



รูปที่ 2.2 การวางตัวและความผิดพลาดจากจุดหมุนเยื้องศูนย์กลาง [2]

จากสมการ  $E_{tc} = E_{tt} + e$  (2.2)

สามารถหาค่า  $e$  ได้จาก  $e = E_{tc} - E_{tt}$  (2.3)

โดยค่า  $E_{tc}$  และ  $E_{tt}$  สามารถหาได้จากตาราง 2.1 และสามารถคำนวณความผิดพลาดที่เกิดขึ้นจากจุดหมุนเยื้องศูนย์กลางให้อยู่ในพิกัด มุมได้จากสมการ

$aE_p = (e/R) \sin(\theta)$  (2.4)

โดย  $aE_p$  = ความผิดพลาดที่เกิดขึ้นจากจุดหมุนเยื้องศูนย์กลาง (องศา),  $E_{tt}$  = ความผิดพลาดที่เกิดจากจุดหมุนเยื้องศูนย์กลาง(นิ้ว),  $R$  = รัศมี pitch ของเกียร์ (นิ้ว),  $\theta$  = มุมที่หมุนไปของเกียร์ (องศา)

เราสามารถหาความผิดพลาดรวม (TCE) ที่เกิดขึ้นในการเคลื่อนที่ของเกียร์ให้อยู่ในพิกัดของมุมได้จากสมการ

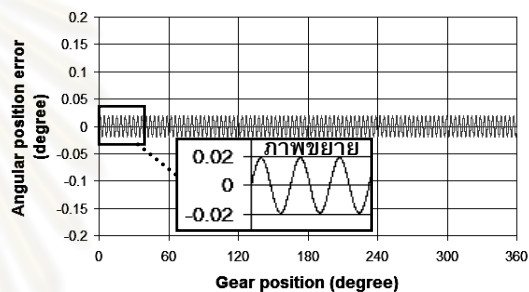
$aE_{tc} = aE_{tt} + aE_p$  (2.5)

โดย  $aE_{tc}$  = ความผิดพลาดรวมที่เกิดขึ้น (องศา),  $aE_{tt}$  = ความผิดพลาดที่เกิดขึ้นระหว่างฟัน (องศา),  $aE_p$  = ความผิดพลาดที่เกิดขึ้นจากจุดหมุนเยื้องศูนย์กลาง (องศา)

**3. การจำลองความผิดพลาดที่เกิดขึ้นในเฟือง**

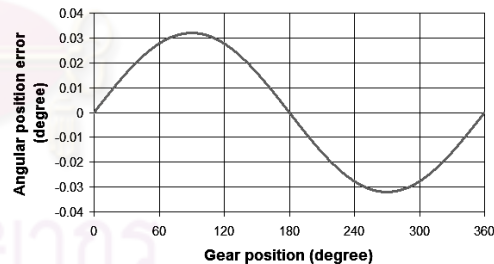
จากสมการที่กล่าวมาเราสามารถจำลองความผิดพลาดที่เกิดขึ้นได้ สมมุติเกียร์มีจำนวนฟันเท่ากับ 100 ฟัน และมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางพิตซ์ 8 นิ้ว ใช้เกียร์ AGMA เบอร์ 5 จากตาราง 4.1 ค่า  $E_{tt} = 0.0027$  นิ้ว,  $E_p = 0.0072$  นิ้ว จากนั้นจะทำการซึ่งสามารถคำนวณหาความผิดพลาดที่เกิดขึ้นโดยรูปที่ 3.1 แสดงความผิดพลาดที่เกิดขึ้นระหว่างฟัน (TTCE) ซึ่งอยู่ในช่วง  $\pm 0.019^\circ$  โดยจะเป็น sine wave 100 ลูกเท่ากับจำนวนฟันเฟือง รูปที่3.2 แสดงความผิดพลาดที่เกิดขึ้นจากจุดหมุนเยื้องศูนย์กลาง (runout error) ซึ่งอยู่ในช่วง  $\pm 0.032^\circ$  รูปที่3.3 แสดงความผิดพลาดรวมที่เกิดขึ้น (TCE) ซึ่งอยู่ในช่วง  $\pm 0.051^\circ$  ความผิดพลาดรวม (TCE) แสดงดังรูปที่3.4 เมื่อเทียบกับการเคลื่อนที่ในอุดมคติที่ไม่เกิดความผิดพลาด ในรูปความผิดพลาดรวมที่เกิดขึ้น (TCE) ถูกขยาย 500เท่าเพื่อให้เห็นผลต่างชัดเจน

**Tooth-to-tooth position error (TTCE)**



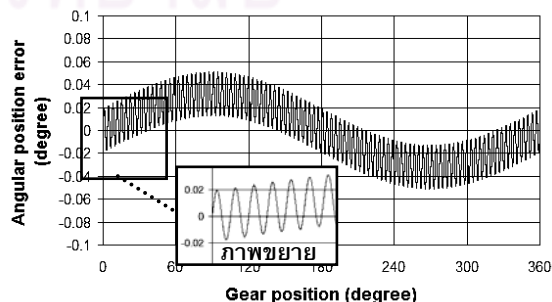
รูปที่ 3.1 การจำลองความผิดพลาดที่เกิดขึ้นระหว่างฟัน (TTCE)

**Runout position error**

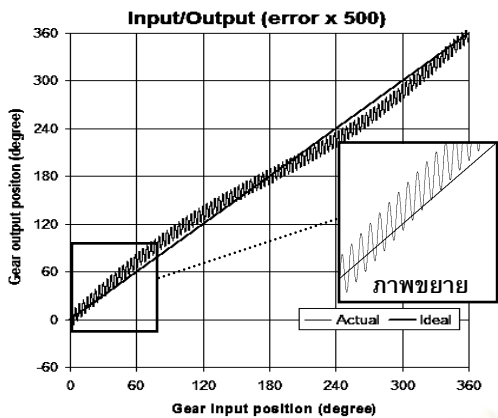


รูปที่3.2 ความผิดพลาดที่เกิดขึ้นจากจุดหมุนเยื้องศูนย์กลาง (runout error)

**Total composite error (TCE)**



รูปที่3.3 ความผิดพลาดรวมที่เกิดขึ้น (TCE)



รูปที่ 3.4 การจำลองการเคลื่อนที่จริงของเกียร์เทียบกับการเคลื่อนที่ในอุดมคติ โดยความผิดพลาดรวมที่เกิดขึ้น (TCE) 500 เท่า

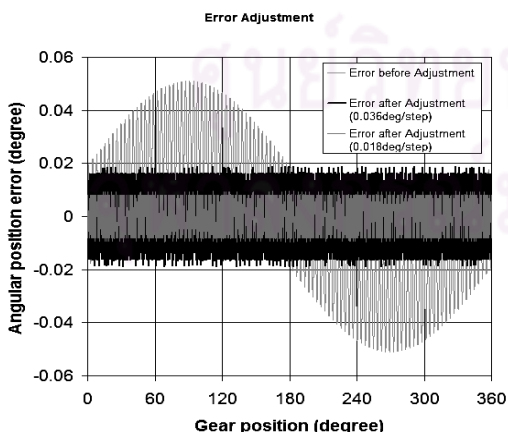
4. การแก้ไขความผิดพลาดที่เกิดขึ้นในเฟือง

เราทำการแก้ไขความผิดพลาด โดยการทำการจดจำความผิดพลาดที่เกิดขึ้นไว้ก่อน แล้วเวลาขับเคลื่อนเกียร์นำเอาความผิดพลาดที่จดจำไว้มาพิจารณาด้วย [6] เพื่อบังคับไปที่ตำแหน่งที่เมื่อชดเชยความผิดพลาดแล้วจะได้ตำแหน่งที่ต้องการดังแสดงในรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 วิธีการลดความผิดพลาดที่เกิดขึ้นในเกียร์ [3]

ผลที่ได้จากการแก้ไขความผิดพลาดด้วยวิธีนี้โดยกำหนดให้ระบบขับเคลื่อนเกียร์เป็นการขับเคลื่อนแบบลำดับขั้น มีความละเอียด 10,000 และ 20,000 ค่าต่อการหมุนเกียร์ 1 รอบ หรือมีความละเอียดในการขับเคลื่อนแต่ละลำดับขั้นมีค่า 0.036 องศา และ 0.018 องศาตามลำดับแสดงดังรูปที่ 4.2



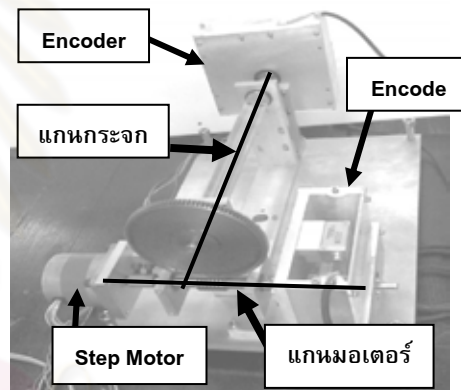
รูปที่ 4.2 ผลการจำลองความผิดพลาดหลังจากแก้ไขแล้ว

จากผลเห็นได้ว่า ความผิดพลาดลดลงจากเดิมอยู่ที่  $\pm 0.051^\circ$  เหลือเพียง  $\pm 0.019^\circ$  หรือ 2.684 เท่า จากค่าเดิมสำหรับการขับเคลื่อนทีละ 0.036 องศา และเหลือ  $\pm 0.008^\circ$  หรือ 6.357 เท่าจากค่าเดิม เมื่อทำการ

ขับเคลื่อนทีละ 0.018 องศา จะเห็นได้ว่าระบบขับเคลื่อนที่มีความละเอียดยิ่งสูงยิ่งสามารถลดความผิดพลาดได้มากขึ้น ทั้งนี้ระบบขับเคลื่อนต้องมีความละเอียดมากกว่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นจึงจะสามารถแก้ไขความผิดพลาดที่เกิดขึ้นด้วยวิธีนี้ได้

5. การทดลอง

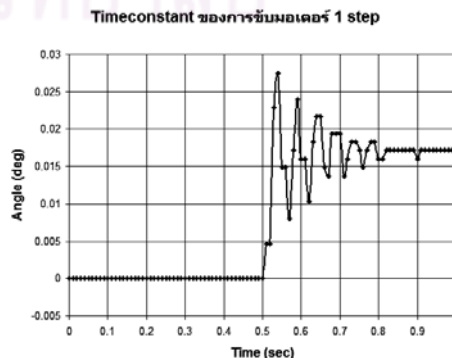
ในการทดลองใช้เฟืองหอนอัตราทด 1: 100 ต่อเข้ากับแกนกระจกโดยตัวเฟืองมี 100 ฟัน ซึ่งติดระบบวัดมุม (encoder) ตรงแกนกระจกและติดกับแกนมอเตอร์โดยมอเตอร์มีความละเอียดในการหมุน 200step/rev ดังรูป 5.1 ซึ่งจะทำให้มีความละเอียดในการขับเคลื่อน 20,000 step ต่อการหมุนของแกนกระจก 1 รอบ การขับเคลื่อนใช้การหมุนกระจกไปทางเดียวและมีตุ้มน้ำหนัก 200g ถ่วงไว้ผ่านมู่เล่  $\phi$  2cm เพื่อป้องกันไม่ให้เกิด backlash ส่วน encoder มีความละเอียดอยู่ที่ 314,880 ค่าต่อการหมุน 1 รอบ หรือมีความละเอียดมากกว่าระบบขับเคลื่อน 15.7 เท่า ซึ่งก่อนเริ่มการทดสอบทุกครั้งจะทำการหาค่า Index จาก encoder ทั้ง 2 ตัวก่อน เพื่อให้การทดสอบทุกครั้งเริ่มจากตำแหน่งที่ฟันคู่เดียวกันชนกัน



รูปที่ 5.1 ระบบที่ใช้ในการทดสอบความผิดพลาดของเฟืองตัวหอน

5.1 Settling-time ของมอเตอร์

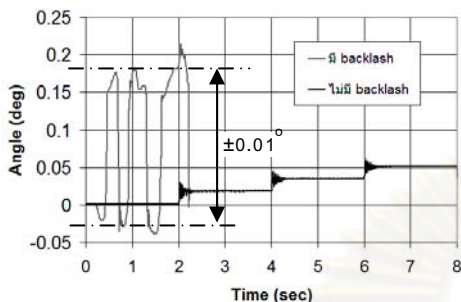
ค่า settling time ของมอเตอร์นั้นมีความจำเป็นมากเพื่อให้ทราบว่าต้องใช้เวลารอเท่าใด เพื่อให้ค่าที่อ่านได้จาก encoder ถึงจะนิ่งในการขับเคลื่อนไป 1 step มอเตอร์ที่ใช้มีความละเอียด 200step/rev หรือหมุน 1.8 deg/Step โดยต่อผ่านเฟืองตัวหอนอัตราทด 1:100 ผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 5.2 โดยมี setting time ประมาณ 0.4 sec



รูปที่ 5.2 มุมองศาที่ได้จากการเคลื่อนที่มอเตอร์ 1 step

5.2 การทดสอบ Backlash ที่เกิดขึ้นในระบบ

ในการทดลองนี้จะทำการขับเคลื่อนมอเตอร์ 1 step ทุกๆ 2 วินาที โดยจะทำการทดลอง 2 รอบ ซึ่งรอบแรกนั้นใน 2 วินาทีแรกจะทำการขับเคลื่อนกระบอกเพื่อให้เกิด backlash หลังจากนั้นจะทำการปล่อยแกนกระบอกให้ตุ้มถ่วงดึงแกนกระบอกไว้ ส่วนรอบที่ 2 จะปล่อยให้ตุ้มถ่วงดึงแกนกระบอกไว้ตลอด โดยผลที่ได้แสดงในรูปที่ 5.3

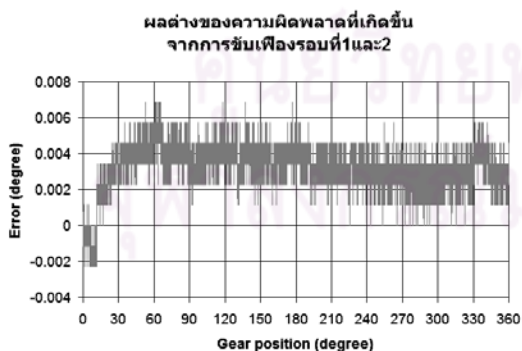


รูปที่ 5.3 ผลทดสอบ backlash ที่เกิดขึ้น

จากรูปจะเห็นได้ว่าช่วง 0-2.2วินาทีแรกมูจะมีแกว่งตัวเป็นผลจากการเกิด backlash แต่หลังจากนั้นผลจาก backlash จะหายไปเนื่องมาจากน้ำหนักของตุ้มถ่วงดึงแกนกระบอกไว้ จากการทดลองสามารถวัด backlash ได้ประมาณ  $\pm 0.01^\circ$

5.3 การทดสอบความผิดพลาดที่เกิดขึ้น ณ ตำแหน่งต่างๆ ของเฟืองว่าคงที่หรือไม่

การทดสอบเป็นการหมุนเฟืองตัวหนอนไปแล้วกลับ 2 รอบเพื่อดูผลต่างของความผิดพลาดที่เกิดขึ้น เพื่อพิจารณาว่าความผิดพลาดที่เกิดจากการส่งกำลังด้วยเฟืองตัวหนอนนั้นคงที่ ณ ตำแหน่งต่างๆ หรือไม่ รูปที่ 5.4 แสดงให้เห็นว่าความแตกต่างที่เกิดขึ้นมีค่าอยู่ในช่วง -0.0022 ถึง 0.0065 องศา ซึ่งยอมรับได้ เพราะการขับเคลื่อน 1 Step จะทำให้เกิดมุมที่กระบอกหมุนไป 0.018 องศา เพราะความผิดพลาดส่วนนี้คิดเป็น 36% ของการขับเคลื่อน 1 step

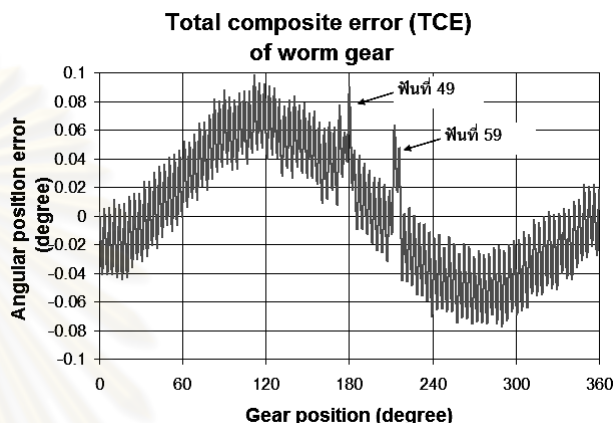


รูปที่ 5.4 ผลต่างของความผิดพลาดที่เกิดขึ้นจากการขับเคลื่อนเฟืองรอบที่ 2 รอบ

5.4 การวัดความผิดพลาดที่เกิดขึ้นจากการส่งกำลังด้วยเฟืองตัวหนอน

จากการทดลองเก็บค่าความผิดพลาดแสดงในรูปที่ 5.5 ซึ่งความผิดพลาดอยู่ในช่วง -0.07751 องศา ถึง 0.09871 องศา โดยลักษณะความ

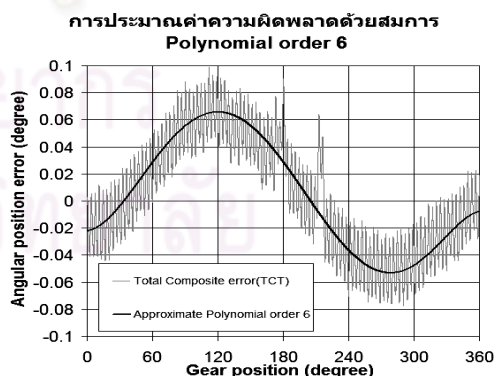
ผิดพลาดที่วัดได้นั้นจะเป็น sine wave ลูกเล็กๆ จำนวน 100 ลูกคลื่นเท่ากับจำนวนฟันเฟืองตัวหนอนพอดี ซึ่งเป็นผลจากความผิดพลาดที่เกิดขึ้นระหว่างฟัน (TTCE) โดย sine wave ลูกเล็กๆ นี้จะซ้อนบน sine wave ลูกใหญ่อีกที ซึ่ง sine wave ลูกใหญ่เกิดจากความผิดพลาดจากจุดหมุนเยื้องศูนย์กลาง (runout error) โดย sinewave ลูกเล็กลูกที่ 49 ตรงตำแหน่งเฟืองตัวหนอนที่ 180 องศา และ sinewave ลูกที่ 59 ตรงตำแหน่งเฟืองตัวหนอนที่ 212 องศา นั้นจะมีค่าความผิดพลาดกระโดดออกมาจากค่าอื่นอย่างเห็นได้ชัด ซึ่งน่าจะเป็นผลมาจากความผิดพลาดจากฟันเฟืองตัวหนอน ณ ตำแหน่งฟันที่ 49 และ 59 ตามลำดับ



รูปที่ 5.5 ความผิดพลาดรวมในการส่งกำลังด้วยเฟืองตัวหนอน

5.5 การลดความผิดพลาดที่เกิดจากการส่งกำลังด้วยเฟืองตัวหนอนโดยใช้การประมาณความผิดพลาดที่เกิดขึ้นด้วยสมการ Polynomial Order 6

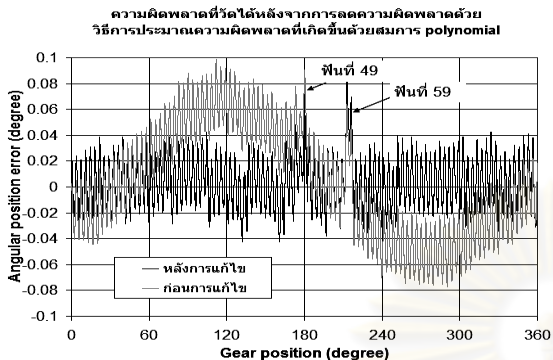
จากความผิดพลาดที่วัดได้เพื่อให้การประมาณมีค่าที่ใกล้เคียงที่สุด จึงนำข้อมูลดังกล่าวมาจำลองด้วยสมการโพลีโนเมียลอันดับที่ 6 [4] ดังรูปที่ 5.6 เพื่อใช้ในการจำลองความผิดพลาดที่เกิดขึ้นในการส่งกำลังทั้งหมดให้อยู่ในรูปสมการเพียงสมการเดียว



รูปที่ 5.6 สมการโพลีโนเมียลจากความผิดพลาดที่วัดได้

วิธีการลดความผิดพลาดที่เกิดขึ้นนั้น สามารถทำได้โดยนำผลที่ได้จากสมการโพลีโนเมียลมาพิจารณาหาตำแหน่งในการขับเคลื่อนที่ทำให้เกิดความผิดพลาดน้อยที่สุด โดยหลังจากทดลองขับเคลื่อนเฟืองแล้ววัดความผิดพลาดที่เกิดขึ้นได้ดัง รูปที่ 5.7 ซึ่งความผิดพลาดที่แก้ได้ด้วยวิธีนี้คือความผิดพลาดที่เกิดจากจุดหมุนเยื้องศูนย์กลางนั้น โดยความ

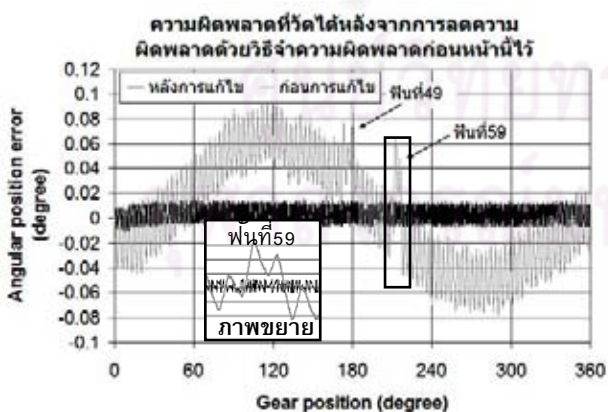
ผิดพลาดที่เกิดขึ้นระหว่างฟันไม่สามารถแก้ได้ด้วยวิธีนี้ ซึ่งดูได้จากตำแหน่งเฟืองตัวหนอน ณ มุม 212° จะเห็นค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นที่ฟันซี่ที่ 59 ได้อย่างชัดเจน โดยความผิดพลาดที่วัดได้นั้นอยู่ในช่วง -0.04230° ถึง 0.08345° นั่นคือหลังจากการแก้ไขความผิดพลาดด้วยวิธีนี้แล้วมีความแม่นยำเพิ่มขึ้นจากเดิมเพียง 1.4 เท่า



รูปที่ 5.7 ความผิดพลาดหลังจากการแก้ไขด้วยสมการโพลีโนเมียล

**5.6 การลดความผิดพลาดที่เกิดจากการส่งกำลังด้วยเฟืองตัวหนอนโดยใช้การจำความผิดพลาดที่เกิดขึ้น**

วิธีการนี้ใช้การบันทึกความผิดพลาดที่เกิดขึ้นทุกตำแหน่งการหมุนในการส่งกำลังด้วยเฟืองตัวหนอน จากนั้นนำข้อมูลดังกล่าวมาใช้เพื่อใช้อ้างอิงในการขับเคลื่อนให้มีความถูกต้องมากขึ้น โดยจะนำความผิดพลาดที่เกิดขึ้นมา พิจารณาหาจุดที่สามารถขับเคลื่อนไปยังตำแหน่งที่ต้องการโดยให้มีความผิดพลาดน้อยที่สุด ซึ่งหลังจากการขับเฟืองตัวหนอนสามารถวัดความผิดพลาดที่เกิดขึ้นได้ดังรูปที่ 5.8 ซึ่งวิธีนี้จะสามารถลดได้ทั้งความผิดพลาดจากที่เกิดจากจุดหมุนเยื้องศูนย์กลางและความผิดพลาดที่เกิดขึ้นระหว่างฟัน โดยดูได้จากตำแหน่งฟันซี่ที่ 59 ความผิดพลาด ณ ตำแหน่งนี้จะไม่กระโดดเหมือนวิธีที่ผ่านมา ซึ่งความผิดพลาดที่เกิดขึ้นหลังจากแก้ไขด้วยวิธีนี้เหลือเพียง -0.01143° ถึง 0.01486° หรือมีความแม่นยำเพิ่มขึ้นจากเดิมถึง 6.7 เท่า



รูปที่ 5.8 ความผิดพลาดหลังจากการแก้ไขด้วยการจำความผิดพลาด

**6.สรุป**

ในการทดลองนี้เราสามารถแก้ไขความผิดพลาดที่เกิดขึ้นได้ 2 วิธี คือ 1. วิธีการจำความผิดพลาดไว้ทุกจุดและ 2. วิธีการประมาณ

ความผิดพลาดที่เกิดขึ้นด้วยสมการโพลีโนเมียล ซึ่งสามารถดูความผิดพลาดที่วัดได้จากตารางที่ 6.1 โดยวิธีการจำความผิดพลาดไว้ทุกจุดจะมีความแม่นยำมากกว่า เพราะสามารถแก้ความผิดพลาดที่เกิดจากจุดหมุนเยื้องศูนย์กลาง (Runout error) และความผิดพลาดที่เกิดขึ้นระหว่างฟัน (TTCE) ได้ ในขณะที่วิธีการประมาณความผิดพลาดที่เกิดขึ้นด้วยสมการโพลีโนเมียลแก้ได้เฉพาะความผิดพลาดที่เกิดจากจุดหมุนเยื้องศูนย์กลางเท่านั้น ซึ่งในการทดลองนี้มีความผิดพลาดที่เกิดขึ้นระหว่างฟันซี่ที่ 49 และ 59 มาก ทำให้ความผิดพลาดที่แก้ไขโดยวิธีนี้มีความแม่นยำเพิ่มขึ้นเพียง 1.4 เท่า น้อยกว่าวิธีการจำความผิดพลาดไว้ทุกจุดที่สามารถเพิ่มความแม่นยำได้ถึง 6.7 เท่า อย่างไรก็ตาม ในระบบที่มีความผิดพลาดที่เกิดจากฟันน้อยกว่าความผิดพลาดที่เกิดจากจุดหมุนเยื้องศูนย์กลาง วิธีการประมาณความผิดพลาดที่เกิดขึ้นด้วยสมการโพลีโนเมียล นี้มีความเหมาะสมในการใช้งานมากกว่าเพราะสามารถละทิ้งการแก้ไขความผิดพลาดที่เกิดจากฟันได้ และในการใช้งานจริงวิธีนี้มีความสะดวกกว่าเพราะเราสามารถแทนความผิดพลาดทั้งหมดที่เกิดขึ้นจากการส่งกำลังด้วยสมการเพียงสมการเดียวที่มี 6 ตัวแปร ซึ่งสามารถประหยัดหน่วยความจำของระบบควบคุมการขับเคลื่อนแอลิโอสแตทได้ เพราะในการสร้างเตาเผาสุริยะอุณหภูมิสูงจริง ๆ นั้นต้องใช้แอลิโอสแตทหลายพันตัว อีกทั้งแอลิโอสแตท 1 ตัวจำเป็นต้องใช้ระบบขับเคลื่อน 2 ชุดในการหมุนกระจกติดตามพระอาทิตย์ ในขณะที่วิธีการจำความผิดพลาดไว้ทุกจุดต้องทำการบันทึกความผิดพลาดที่เกิดขึ้นไว้ถึง 20,000 ค่า ต่อชุดขับเคลื่อนเพียงชุดเดียว

ตารางที่ 6.1 แสดงความผิดพลาดที่วัดได้จากการทดลอง

	ค่าเดิมก่อนการแก้ไข	แก้ด้วยการประมาณค่าความผิดพลาด	แก้ด้วยการจำความผิดพลาดทุกตำแหน่ง
Maximum	0.1762°	0.126°	0.0263°
Average Absolute	0.0362°	0.0161°	0.00500°
RMS	0.0425°	0.0193°	0.00605°
ความแม่นยำ (คิดเป็นจำนวนเท่า)	1 (Max.)	1.4	6.7
	1 (Avg.)	2.3	7.2
	1 (RMS)	2.2	7

**เอกสารอ้างอิง**

- Baheti, R.S., Scott, P.F., "Design of self-calibrating controllers of heliostats in a solar power plant", IEEE Transactions on Automatic Control, AC-25(6):1091-1097, December 1980
- George W. Michalec, Precision Gearing: Theory and Practice, New York: John Wiley & Sons, 1996
- วิบูลย์ แสงวีระพันธุ์ศิริ, "การควบคุมระบบพลศาสตร์", พิมพ์ครั้งที่ 2, กรุงเทพมหานคร จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2548
- ปราโมทย์ เตชะอำไพ, "ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขในงานวิศวกรรม", พิมพ์ครั้งที่ 4, กรุงเทพมหานคร จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2546, หน้า 142 - 147

## ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายสุรียา คู่่นจิตติ เกิดเมื่อวันที่ 19 กันยายน พ.ศ. 2525 อำเภอเมือง จังหวัดเชียงใหม่ เป็นบุตรของนายยงยุทธ คู่่นจิตติ และนางอมราวดี คู่่นจิตติ สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิตเกียรตินิยมอันดับสอง สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี เมื่อปีการศึกษา 2547 และได้เข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิตในปีการศึกษาถัดมา ณ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยระหว่างการศึกษาชั้นนี้ได้เข้าร่วมเป็นผู้ช่วยนักวิจัยโครงการศึกษา ออกแบบ และสร้างต้นแบบเตาเผาสุริยะอุณหภูมิสูงของโครงการของกรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน



ศูนย์วิทยพัทธยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย