



ระบบติดตามดวงอาทิตย์
สำหรับแผงเซลล์แสงอาทิตย์

ยธธนา กุลวิทิศ

สถาบันวิจัยและพัฒนาของคณะวิศวกรรมศาสตร์

คณะวิศวกรรมศาสตร์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

กรุงเทพฯ ๑

จท
วท 15
002304

มิถุนายน 2527



ระบบติดตามดวงอาทิตย์
สำหรับแผงเซลล์แสงอาทิตย์

ยทธนา

กุลวิทิศ

มิถุนายน 2527

ระบบติดตามดวงอาทิตย์สำหรับแผงเซลล์แสงอาทิตย์
(A Sun Tracking System for Flat Plate Solar Cells)

โดย

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ยุทธนา กุลวิทิต
(Dr. Youthana Kulvitit)

วุฒิ วศ.บ (จุฬา, เกียรตินิยม)

Paris, France

โครงการวิจัยเลขที่ 77-ERD-2525

ทุนส่งเสริมการวิจัยวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันวิจัยและพัฒนาของคณะวิศวกรรมศาสตร์

คณะวิศวกรรมศาสตร์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

กรุงเทพฯ

กรกฎาคม 2527



สถาบันจัดการ
และพัฒนาทรัพยากร

ระบบติดตามดวงอาทิตย์สำหรับแผง เซลล์แสงอาทิตย์

- ชื่อโครงการวิจัย : ระบบติดตามดวงอาทิตย์สำหรับแผง เซลล์แสงอาทิตย์
- ผู้วิจัย : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ยุทธนา กุลวิฑิต
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
โทร. 2525001 ต่อ 186
- แหล่งทุนวิจัย : ทุนส่งเสริมการวิจัยวิศวกรรมศาสตร์ ประจำปี 2526
- งบประมาณ : 35,000 บาท
- เวลาทำวิจัย : 1 ปี

| | | | | |
|---------------------------------|-------|----|----------|------|
| ส่งรายงานความก้าวหน้าครั้งที่ 1 | เมื่อ | 29 | เมษายน | 2526 |
| ส่งรายงานความก้าวหน้าครั้งที่ 2 | เมื่อ | 16 | กันยายน | 2526 |
| ส่งรายงานความก้าวหน้าครั้งที่ 3 | เมื่อ | 30 | ธันวาคม | 2526 |
| ส่งรายงานฉบับสมบูรณ์ | เมื่อ | 20 | มิถุนายน | 2527 |



สารบัญ

| | หน้า |
|--|------|
| กิตติกรรมประกาศ | I |
| บทคัดย่อ | II |
| 1. บทนำ | 1 |
| 2. ทฤษฎีพื้นฐาน | 2 |
| 2.1 ระบบควบคุมการติดตามดวงอาทิตย์แบบวงรอบปิด | 2 |
| 2.1.1 หลักการของระบบ | 2 |
| 2.1.2 โครงสร้างของระบบ | 2 |
| 2.1.3 ข้อดีข้อเสียของระบบ | 6 |
| 2.2 ระบบควบคุมการติดตามดวงอาทิตย์แบบวงรอบเปิด | 7 |
| 2.2.1 หลักการของระบบ | 7 |
| 2.2.2 โครงสร้างของระบบ | 7 |
| 2.2.3 ข้อดีข้อเสียของระบบ | 9 |
| 2.3 การศึกษาทางโคจรของดวงอาทิตย์ | 10 |
| 2.3.1 ทางโคจรของโลกรอบดวงอาทิตย์ | 10 |
| 2.3.2 เวลาชนิดต่าง ๆ และสมการของเวลา | 12 |
| 2.3.3 ทางโคจรของดวงอาทิตย์เทียบกับผู้สังเกตบนโลก | 13 |
| 3. ระบบควบคุมการติดตามดวงอาทิตย์สำหรับเซลล์แสงอาทิตย์แบบแผงราบ | 29 |
| 3.1 เหตุผลในการใช้ระบบติดตามดวงอาทิตย์สำหรับเซลล์แบบแผงราบ | 29 |
| 3.2 แนวความคิดในการเลือกระบบ | 32 |
| 4. โครงสร้างของระบบควบคุมการติดตามดวงอาทิตย์ที่สร้างขึ้น | 38 |
| 4.1 วงจรควบคุม | 38 |
| 4.2 ระบบขับน้ำแผงเซลล์ | 41 |
| 4.3 แหล่งจ่ายกำลังงานของระบบ | 44 |
| 4.4 โครงสร้างรองรับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ | 44 |
| 5. ผลการทดลอง | 47 |
| 5.1 เงื่อนไขในการทดลอง | 47 |

สารบัญ (ต่อ)

| | หน้า |
|--|------|
| 5.1.1 เงื่อนไขในการติดตามดวงอาทิตย์ | 47 |
| 5.1.2 เงื่อนไขในการวัดปริมาณแสงที่ได้รับ | 48 |
| 5.2 ผลการทดลอง | 48 |
| 5.2.1 คลาดเคลื่อนในการติดตามดวงอาทิตย์ | 48 |
| 5.2.2 การเพิ่มขึ้นของพลังงานเมื่อมีการติดตามดวงอาทิตย์ | 54 |
| 6. สรุป | 76 |
| เอกสารอ้างอิง | 78 |

ตารางประกอบ

| | | |
|------------|--|----|
| ตารางที่ 1 | ค่าคงที่ของสมการเวลา | 13 |
| ตารางที่ 2 | แสดงการเปลี่ยนแปลงของความเข้มของแสงอาทิตย์กับมุมที่ดวงอาทิตย์ทำกับแนว ตั้งฉากของระนาบขนาน | 29 |
| ตารางที่ 3 | อัตราส่วนของพลังงานแสงในฤดูกาลต่าง ๆ | 75 |

รูปประกอบ

| | | |
|-----------|--|----|
| รูปที่ 1 | บล็อกไดอะแกรมของระบบควบคุมการติดตามดวงอาทิตย์แบบวงรอบปิด | 2 |
| รูปที่ 2 | การเปรียบเทียบทิศทางโดยการบังให้เกิดเงา | 3 |
| รูปที่ 3 | บล็อกไดอะแกรมของระบบควบคุมการติดตามดวงอาทิตย์แบบวงรอบเปิด | 7 |
| รูปที่ 4 | ทางโคจรของโลกรอบดวงอาทิตย์แสดงตำแหน่งอิควินอกซ์และโซลสติส | 10 |
| รูปที่ 5 | แสดงมุมการหมุนของโลกรอบตัวเอง เพื่อให้ผู้สังเกตบนโลกมองเห็นดวงอาทิตย์ ณ ตำแหน่งสูงสุดในท้องฟ้า (ก) เมื่อโลกโคจรรอบดวงอาทิตย์ (ข) ถ้าโลกไม่โคจร รอบดวงอาทิตย์ | 11 |
| รูปที่ 6 | แสดงการบ่ายเพียงของเวลาที่ดวงอาทิตย์อยู่ ณ ตำแหน่งสูงสุดในท้องฟ้าจากเวลา เที่ยงตามเวลามาตรฐานเป็นวินาที | 12 |
| รูปที่ 7 | ทรงกลมของท้องฟ้าแสดงส่วนประกอบต่าง ๆ | 14 |
| รูปที่ 8 | ทรงกลมของท้องฟ้าแสดงมุมต่าง ๆ ที่ใช้กำหนดตำแหน่งของดวงอาทิตย์ | 15 |
| รูปที่ 9 | แสดงทางโคจรของดวงอาทิตย์รอบโลกเนื่องจากการหมุนของทรงกลมของท้องฟ้า รอบโลกในทิศทางตามเข็มนาฬิกา (CW) | 17 |
| รูปที่ 10 | ทางโคจรของดวงอาทิตย์เทียบกับผู้สังเกตบนโลก ก, ข เมื่อผู้สังเกตอยู่ที่อิควีเตอร์ ค, ง เมื่อผู้สังเกตอยู่ที่ละติจูด ϕ° เหนือ เมื่อโลกอยู่ที่อิควินอกซ์และโซลสติส ... | 18 |
| รูปที่ 11 | แสดงทางโคจรของดวงอาทิตย์เทียบกับผู้สังเกตที่อิควีเตอร์ในรูป ก และเทียบกับ ผู้สังเกตที่ละติจูด ϕ° เหนือในรูป ข | 19 |
| รูปที่ 12 | แสดงทางเดินของจุดตัวระหว่างเส้นตั้งฉากของแผงกับทรงกลมท้องฟ้าเมื่อเส้นตั้ง ฉากของแผงเอียงทำมุม $90-\rho$ กับแกนหมุนซึ่งอยู่ในแนวเหนือใต้ของทรงกลมท้อง ฟ้า (ระบบอยู่ที่อิควีเตอร์) | 21 |

| | | |
|-----------|--|----|
| รูปที่ 13 | แสดงทางเดินของจุดตัดระหว่างเส้นตั้งฉากของแผงกับทรงกลมท้องฟ้า เมื่อเส้นตั้งฉากของแผงเอียงทำมุม $90-p$ กับแกนหมุนซึ่งทำมุม ϕ กับแนวเหนือใต้ของทรงกลมท้องฟ้า (ระบบอยู่ที่ละติจูด ϕ° เหนือ) | 22 |
| รูปที่ 14 | ระนาบทางโคจรของดวงอาทิตย์ และโลกซ์ของจุดตัดระหว่างเส้นตั้งฉากของแผงเซลล์กับทรงกลมของท้องฟ้า เมื่อผู้สังเกตอยู่ที่อิเควเตอร์ | 23 |
| | (ก) เมื่อมองตั้งฉากกับระนาบนอน | |
| | (ข) เมื่อมองขนานกับระนาบนอน | |
| | และ เมื่อผู้สังเกตอยู่ที่ละติจูด ϕ° เหนือ | |
| | (ค) เมื่อมองตั้งฉากกับระนาบนอน | |
| | (ง) เมื่อมองขนานกับระนาบนอน | |
| รูปที่ 15 | แสดงมุมต่าง ๆ ที่ใช้กำหนดตำแหน่งของจุดตัดระหว่างแนวตั้งฉากของแผงเซลล์และทรงกลมของท้องฟ้า (p) | 24 |
| รูปที่ 16 | แสดงการเปลี่ยนแปลงของทิศทางของดวงอาทิตย์เทียบกับแกนหมุนที่ขนานกับระนาบนอนและอยู่ในแนวเหนือใต้ (y) และมุมระหว่างระนาบที่เกิดจากแนวของดวงอาทิตย์และแกนหมุน ทำกับระนาบ เมอริเดียนประจำถิ่น (x) เมื่อโลกอยู่ที่ตำแหน่งโซลสติสหน้าหนาว | 26 |
| รูปที่ 17 | แสดงการเปลี่ยนแปลงของทิศทางของดวงอาทิตย์เทียบกับแกนหมุนที่ขนานกับระนาบนอนและอยู่ในแนวเหนือใต้ (y) และมุมระหว่างระนาบที่เกิดจากทิศของดวงอาทิตย์และแกนหมุนของระบบทำกับระนาบ เมอริเดียนประจำถิ่น (x) เมื่อโลกอยู่ที่ตำแหน่งอิควินอกซ์ | 27 |
| รูปที่ 18 | แสดงการเปลี่ยนแปลงของทิศทางของดวงอาทิตย์เทียบกับแกนหมุนที่ขนานกับระนาบนอนและอยู่ในแนวเหนือ-ใต้ (y) และมุมระหว่างระนาบที่เกิดจากแนวของดวงอาทิตย์และแกนหมุนทำกับระนาบ เมอริเดียนประจำถิ่น (x) เมื่อโลกอยู่ที่ตำแหน่งโซลสติสหน้าร้อน | 28 |
| รูปที่ 19 | กราฟเปรียบเทียบพลังงานที่แผงรับแสงอาทิตย์ได้รับในกรณีที่มีการติดตามดวงอาทิตย์แบบแกนเดียวแบบ 2 แกน และแบบติดตั้งอยู่กับที่ | 30 |

| | | |
|-----------|--|----|
| รูปที่ 20 | แสดงความคลาดเคลื่อนในการติดตามดวงอาทิตย์ โดยอาศัยการประมาณสมการการเคลื่อนที่ของดวงอาทิตย์ด้วยสมการเส้นตรง เมื่อโลกอยู่ที่ตำแหน่งโซลสติสหน้าหนาว | 35 |
| รูปที่ 21 | แสดงความคลาดเคลื่อนในการติดตามดวงอาทิตย์ โดยอาศัยการประมาณสมการการเคลื่อนที่ของดวงอาทิตย์ด้วยสมการเส้นตรง เมื่อโลกอยู่ที่ตำแหน่งอิควินอกซ์ | 36 |
| รูปที่ 22 | แสดงความคลาดเคลื่อนในการติดตามดวงอาทิตย์ โดยอาศัยการประมาณสมการการเคลื่อนที่ของดวงอาทิตย์ด้วยสมการเส้นตรง เมื่อโลกอยู่ที่ตำแหน่งโซลสติสหน้าร้อน (ค่ามุม θ_{E-W} เป็นลบแสดงว่าดวงอาทิตย์ทำมุมกับแนวตั้งฉากของระนาบนอนน้อยกว่าแนวตั้งฉากของแผง เซล) | 37 |
| รูปที่ 23 | วงจรรฐานเวลาควบคุมความถี่ที่ใช้ควบคุมการหมุนของแผง เซลในแนวตะวันออก-ตะวันตกและแนวเหนือ-ใต้ | 38 |
| รูปที่ 24 | วงจรควบคุมและขับน้ำมอเตอร์ที่ใช้หมุนแผง เซลแสงอาทิตย์ในแนวตะวันออก-ตะวันตกและแนวเหนือ-ใต้ | 40 |
| รูปที่ 25 | ระบบขับน้ำแผง เซลแสงอาทิตย์ที่หมุนในแนวตะวันออก-ตะวันตก | 42 |
| รูปที่ 26 | ระบบขับน้ำแผง เซลแสงอาทิตย์ที่หมุนในแนวเหนือ-ใต้ | 43 |
| รูปที่ 27 | แสดงส่วนประกอบต่าง ๆ ของโครงสร้างรองรับแผง เซลแสงอาทิตย์ที่สร้างขึ้น . | 45 |
| รูปที่ 28 | ความคลาดเคลื่อนในการติดตามดวงอาทิตย์ในแนวตะวันออก-ตะวันตก ($\Delta\theta_{E-W}$) ในช่วงเวลา 4 วัน ($0 \times A V$) เปรียบเทียบกับผลการคำนวณทางทฤษฎี | 49 |
| รูปที่ 29 | ความคลาดเคลื่อนในการติดตามดวงอาทิตย์ในแนวเหนือ-ใต้ ($\Delta\theta_{N-S}$) ในช่วงเวลา 4 วัน ($0 \times A V$) เปรียบเทียบกับผลการคำนวณทางทฤษฎี ... | 50 |
| รูปที่ 30 | แสดงตำแหน่งของแกนหมุนของระบบติดตามดวงอาทิตย์ เมื่อมีความคลาดเคลื่อนของทิศทางของแกนหมุนเทียบกับแนวเหนือ-ใต้ของท้องถิ่น | 50 |
| รูปที่ 31 | ความคลาดเคลื่อนในการติดตามดวงอาทิตย์ในแนวตะวันออก-ตะวันตก ($\Delta\theta_{E-W}$) ในช่วงเวลา 4 วัน ($0 \times A V$) เปรียบเทียบกับผลการคำนวณทางทฤษฎี ซึ่งคำนึงถึงความแตกต่างของเวลาชนิดต่าง ๆ และความคลาดเคลื่อนของทิศทางของแกนหมุนของระบบ | 52 |

| | | |
|-----------|--|----|
| รูปที่ 32 | ความคลาดเคลื่อนในการติดตามดวงอาทิตย์ในแนวเหนือ-ใต้ ($\Delta\theta_{N-S}$) ในช่วงเวลา 4 วัน ($\circ \times \Delta V$) เปรียบเทียบกับผลการคำนวณทางทฤษฎี ซึ่งคำนึงถึงความแตกต่างของเวลาชนิดต่าง ๆ และความคลาดเคลื่อนของทิศทางของแกนหมุนของระบบ | 52 |
| รูปที่ 33 | ความคลาดเคลื่อนในการติดตามดวงอาทิตย์ ($\Delta\theta$) ในช่วงเวลา 4 วัน ($\circ \times \Delta V$) เปรียบเทียบกับผลการคำนวณทางทฤษฎี ซึ่งคำนึงถึงความแตกต่างของเวลาชนิดต่าง ๆ และความคลาดเคลื่อนของทิศทางของแกนหมุนของระบบ | 53 |
| รูปที่ 34 | ความคลาดเคลื่อนในการติดตามดวงอาทิตย์ในแนวตะวันออก-ตะวันตก ($\Delta\theta_{E-W}$) ในช่วงเวลา 4 วัน ($\circ \times \Delta V$) เปรียบเทียบกับผลการคำนวณทางทฤษฎี ซึ่งคำนึงถึงความแตกต่างของเวลาชนิดต่าง ๆ และความคลาดเคลื่อนของทิศทางของแกนหมุนของระบบ | 54 |
| รูปที่ 35 | ความคลาดเคลื่อนในการติดตามดวงอาทิตย์ในแนวเหนือ-ใต้ ($\Delta\theta_{N-S}$) ในช่วงเวลา 4 วัน ($\circ \times \Delta V$) เปรียบเทียบกับผลการคำนวณทางทฤษฎี ซึ่งคำนึงถึงความแตกต่างของเวลาชนิดต่าง ๆ และความคลาดเคลื่อนของทิศทางของแกนหมุนของระบบ | 55 |
| รูปที่ 36 | ความคลาดเคลื่อนในการติดตามดวงอาทิตย์ ($\Delta\theta$) ในช่วงเวลา 4 วัน ($\circ \times \Delta V$) เปรียบเทียบกับผลการคำนวณทางทฤษฎี ซึ่งคำนึงถึงความแตกต่างของเวลาชนิดต่าง ๆ และความคลาดเคลื่อนของทิศทางของแกนหมุนของระบบ | 56 |
| รูปที่ 37 | ก. กระแสลัดวงจรของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ขนาด 33 วัตต์ ที่เวลาต่าง ๆ กัน | 57 |
| รูปที่ 38 | ก. กระแสลัดวงจรของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ขนาด 33 วัตต์ ที่เวลาต่าง ๆ กัน | 58 |
| รูปที่ 38 | ข. กระแสลัดวงจรของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ขนาด 33 วัตต์ ที่เวลาต่าง ๆ กัน | 59 |
| รูปที่ 39 | ก. กระแสลัดวงจรของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ขนาด 33 วัตต์ ที่เวลาต่าง ๆ กัน | 60 |
| รูปที่ 39 | ข. กระแสลัดวงจรของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ขนาด 33 วัตต์ ที่เวลาต่าง ๆ กัน | 61 |
| รูปที่ 40 | ก. กระแสลัดวงจรของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ขนาด 33 วัตต์ ที่เวลาต่าง ๆ กัน | 62 |
| รูปที่ 40 | ข. กระแสลัดวงจรของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ขนาด 33 วัตต์ ที่เวลาต่าง ๆ กัน | 63 |
| รูปที่ 41 | กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังออกของแผงเซลล์แสงอาทิตย์กับกระแสลัดวงจรของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้ | 64 |

| | | |
|-----------|---|----|
| รูปที่ 42 | พลังงานออกต่อวันของแผงเซลล์ 1 แผง ที่ติดตั้งอยู่กับที่และเอียงทำมุม 14.7 องศา (๑) 37.2 องศา (๕) และแผงเซลล์ซึ่งมีการติดตามดวงอาทิตย์ (๓) เมื่อโลกอยู่ตำแหน่งโซลสติลหน้าหนาว | 65 |
| รูปที่ 43 | ก. กระแสลัดวงจรของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ขนาด 33 วัตต์ ที่เวลาต่าง ๆ กัน เมื่อมีการติดตามดวงอาทิตย์ | 67 |
| รูปที่ 43 | ข. กระแสลัดวงจรของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ขนาด 33 วัตต์ ที่เวลาต่าง ๆ กัน เมื่อติดตั้งแผงอยู่กับที่ทำมุมเอียง 13.7° S | 68 |
| รูปที่ 44 | ก. กระแสลัดวงจรของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ขนาด 33 วัตต์ ที่เวลาต่าง ๆ กัน เมื่อมีการติดตามดวงอาทิตย์ | 69 |
| รูปที่ 44 | ข. กระแสลัดวงจรของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ขนาด 33 วัตต์ ที่เวลาต่าง ๆ กัน เมื่อติดตั้งแผงอยู่กับที่ทำมุมเอียง 13.7° S | 70 |
| รูปที่ 45 | ก. กระแสลัดวงจรของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ขนาด 33 วัตต์ ที่เวลาต่าง ๆ กัน เมื่อมีการติดตามดวงอาทิตย์ | 71 |
| รูปที่ 45 | ข. กระแสลัดวงจรของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ขนาด 33 วัตต์ ที่เวลาต่าง ๆ กัน เมื่อติดตั้งแผงอยู่กับที่ทำมุมเอียง 13.7° S | 72 |
| รูปที่ 46 | ก. กระแสลัดวงจรของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ขนาด 33 วัตต์ ที่เวลาต่าง ๆ กัน เมื่อมีการติดตามดวงอาทิตย์ | 73 |
| รูปที่ 46 | ข. กระแสลัดวงจรของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ขนาด 33 วัตต์ ที่เวลาต่าง ๆ กัน เมื่อติดตั้งแผงอยู่กับที่ทำมุมเอียง 13.7° S | 74 |
| รูปที่ 47 | พลังงานออกต่อวันของแผงเซลล์ 1 แผง ที่ติดตั้งอยู่กับที่และเอียงทำมุม 13.7 องศา (๑) และแผงเซลล์ซึ่งมีการติดตามดวงอาทิตย์ (๓) เมื่อโลกอยู่ที่ตำแหน่งอิควินอกซ์ฤดูใบไม้ผลิ | 75 |

เลขที่ ๑๗
เลขหมู่ ๐๗ 15
เลขทะเบียน ๐๐๒3๐4
วัน,เดือน,ปี ๑๐ มค. ๒๕

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยเกี่ยวกับระบบติดตามดวงอาทิตย์สำหรับแผงเซลล์แสงอาทิตย์นี้ ได้รับเงินสนับสนุนจาก กองทุนส่งเสริมการวิจัยวิศวกรรมศาสตร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ซึ่งผู้วิจัยขอขอบคุณไว้ ณ ที่นี้ นอกจากนี้แล้วผู้วิจัยขอขอบคุณคณาจารย์ และบุคลากรของห้องปฏิบัติการสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ได้ช่วยให้งานนี้สำเร็จลงได้

บทคัดย่อ

ได้มีการศึกษาหลักการของระบบติดตามดวงอาทิตย์ ทางโคจรของดวงอาทิตย์เทียบกับผู้สังเกตบนโลก ณ ตำแหน่งต่าง ๆ ได้มีการทดลองสร้างระบบติดตามดวงอาทิตย์สำหรับเซลล์แสงอาทิตย์แบบแผงราบ โดยใช้ระบบควบคุมแบบวงรอบเปิด และได้ทดลองวัดความคลาดเคลื่อนในการติดตามดวงอาทิตย์เปรียบเทียบกับผลการคำนวณทางทฤษฎี นอกจากนี้ยังได้ทดลองวัดพลังงานออกของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีการติดตามดวงอาทิตย์ เปรียบเทียบกับพลังงานออกของแผงเซลล์ที่ติดตั้งอยู่กับที่ตลอดปี และแบบที่ติดตั้งอยู่กับที่แต่มีการปรับมุมเอียงตามฤดูกาล ในช่วง 2 ช่วง คือ ในช่วงหน้าหนาว และในช่วงเวลาน้ำร้อน ซึ่งพบว่าพลังงานออกของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีการติดตามดวงอาทิตย์จะมีค่าเพิ่มขึ้นจากระบบที่ติดตั้งอยู่กับที่ตลอดปีถึง 41% ในช่วงหน้าหนาว และมีค่าเพิ่มขึ้น 25% ในช่วงหน้าร้อน

Abstract

The principle of sun tracking system and sun trajectory relative to observers on earth have been studied. A sun tracking system for flat plate solar cells using open loop control is constructed. Data on tracking error are taken and compared with data calculated theoretically. Energy outputs of solar panels mounted on the tracking system and those fixed with 13.7° tilt angle were measured. The energy gain is found to be 41% during winter and 25% during summer.



1. บทนำ

การออกแบบระบบเซลล์แสงอาทิตย์ (Photovoltaic system) จะประกอบด้วย การเลือกโครงสร้างที่เหมาะสมของระบบ และการเลือกขนาดของส่วนประกอบต่าง ๆ ให้เหมาะสมกับสภาพของอากาศ และความต้องการของภาระทางไฟฟ้า โดยจะต้องคำนึงถึงราคาต่อหน่วยพลังงาน ความเชื่อถือได้ของระบบ และปัญหาการบำรุงรักษาระบบเป็นหลัก ในช่วง 7-8 ปีที่ผ่านมา เซลล์แสงอาทิตย์ได้รับการพัฒนาให้มีราคาต่อวัตต์ลดลงหลายเท่าตัว แต่อย่างไรก็ดี ปัญหาการใช้เซลล์แสงอาทิตย์ในการผลิตกระแสไฟฟ้าในปัจจุบันก็ยังคงอยู่ที่ราคาของแผงเซลล์แสงอาทิตย์เป็นส่วนใหญ่ จากปัญหาดังกล่าว ทำให้มีการคิดหาวิธีที่จะลดจำนวนเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้ลง เช่น การใช้วิธีการรวมแสงให้มีความเข้มข้น (100-200 เท่า) หรือแบบที่มีความเข้มข้นปานกลาง (20-50 เท่า) ซึ่งในทั้งสองกรณีจะต้องใช้เซลล์แสงอาทิตย์ที่ออกแบบพิเศษให้มีความต้านทานอนุกรมต่ำ และสามารถทำงานได้ที่อุณหภูมิสูง ระบบรวมแสงนี้จะมีความยุ่งยากมากจึงเหมาะสำหรับระบบที่มีขนาดใหญ่เท่านั้น นอกจากจะใช้วิธีรวมแสงแล้ว เราอาจจะใช้วิธีปรับปรุงประสิทธิภาพของระบบ เช่น การปรับปรุงการแมตชิ่งระหว่างเซลล์แสงอาทิตย์กับภาระทางไฟฟ้า เพื่อให้กำลังออกของแผงเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าสูงสุดตลอดเวลา อันเป็นการเพิ่มปริมาณของพลังงานออกของระบบให้มากขึ้น

ได้มีการคำนวณเปรียบเทียบปริมาณของแสงอาทิตย์ที่ตกบนระนาบของตัวรับแสง ในกรณีที่มีการติดตามดวงอาทิตย์แบบ 2 แกน (ตามแนวตะวันออก-ตะวันตก และแนวเหนือ-ใต้) กรณีที่มีการติดตามดวงอาทิตย์แบบแกนเดียว (ตามแนวตะวันออก-ตะวันตก) และกรณีที่ติดตั้งอยู่กับที่ โดยไม่คิดผลของสภาพอากาศของท้องถิ่น พบว่าการใช้ระบบติดตามดวงอาทิตย์แบบ 2 แกน จะได้รับพลังงานเฉลี่ยต่อปีเพิ่มขึ้นจากกรณีที่มีการติดตามดวงอาทิตย์แบบ 1 แกน ประมาณ 5-10% และได้รับพลังงานเพิ่มจากกรณีที่ติดตั้งอยู่กับที่ประมาณ 50% [1] ในกรณีที่เราคิดผลของสภาพอากาศของท้องถิ่น ความแตกต่างของปริมาณของแสงที่ได้รับในทั้งสามกรณีจะลดลง อันเนื่องมาจากการลดลงของปริมาณในแสงที่มาจากดวงอาทิตย์โดยตรง (Direct radiation) สำหรับกรุงเทพฯ นั้น ปริมาณของแสงที่มาจากดวงอาทิตย์โดยตรงเฉลี่ยต่อปี จะมีค่าประมาณครึ่งหนึ่งของปริมาณแสงที่ได้รับทั้งหมด [2] งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ที่จะศึกษาความเป็นไปได้ในการเพิ่มประสิทธิภาพของระบบโดยการหมุนแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบแผงราบตามดวงอาทิตย์ โดยจะศึกษาระบบติดตามดวงอาทิตย์สำหรับ เซลล์แสงอาทิตย์แบบแผงราบและปริมาณที่เพิ่มของพลังงานของระบบจากผลการติดตามดวงอาทิตย์ โดยคำนึงถึงพลังงานที่ต้องใช้ในการหมุนแผงเซลล์แสงอาทิตย์ตามดวงอาทิตย์ด้วย

2. ทฤษฎีพื้นฐาน

2.1 ระบบควบคุมการติดตามดวงอาทิตย์แบบวงรอบปิด

2.1.1 หลักการของระบบ

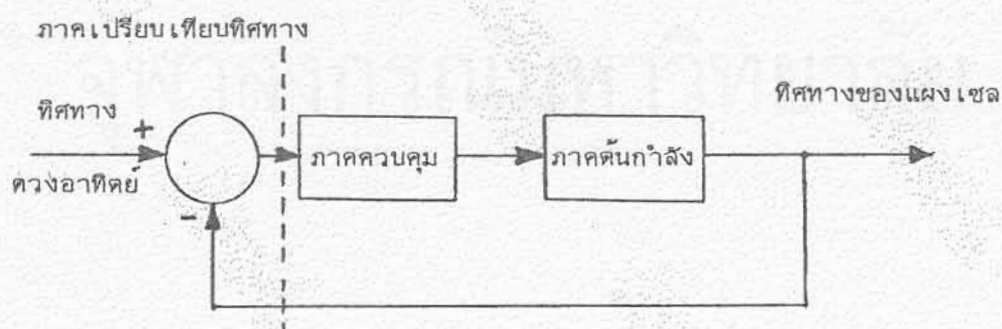
ระบบควบคุมการติดตามดวงอาทิตย์แบบวงรอบปิดนั้น อาจถือได้ว่าเป็นระบบควบคุมตำแหน่งแบบที่มีการป้อนกลับ (Feedback position control system) อย่างหนึ่งซึ่งมีตำแหน่งหรือทิศทางของดวงอาทิตย์เป็นตัวควบคุมตำแหน่งหรือทิศทางของแผง เซลล์แสงอาทิตย์ ระบบนี้จะมีการตรวจจับทิศทางของแผง เซลล์แสงอาทิตย์เพื่อนำมาเปรียบเทียบกับทิศทางจริงของดวงอาทิตย์ตลอดเวลา เมื่อมีความแตกต่างของทิศทางทั้งสองเกิดขึ้น ตัวเปรียบเทียบทิศทางจะส่งสัญญาณออกไปควบคุมให้แผง เซลล์แสงอาทิตย์หมุนไปในทิศทางของดวงอาทิตย์ เพื่อลดความแตกต่างระหว่างทิศทางทั้งสอง ความผิดพลาดในการติดตามดวงอาทิตย์ของระบบนี้จะขึ้นอยู่กับความไวของตัว เปรียบเทียบทิศทางของแผง เซลล์แสงอาทิตย์กับทิศทางจริงของดวงอาทิตย์

2.1.2 โครงสร้างของระบบ

ระบบควบคุมการติดตามดวงอาทิตย์แบบวงรอบปิดจะประกอบด้วยส่วนต่าง ๆ ที่สำคัญ ดังนี้คือ

- ภาคตรวจจับและ เปรียบ เทียบทิศทาง
- ภาคควบคุม
- ภาคต้นกำลังขับเคลื่อนแผง เซลล์

ซึ่งเราอาจจะ เขียน เป็นบล็อกไดอะแกรมได้ดังนี้คือ



รูปที่ 1 บล็อกไดอะแกรมของระบบควบคุมการติดตามดวงอาทิตย์แบบวงรอบปิด

ก) ภาคตรวจจับและเปรียบเทียบทิศทาง

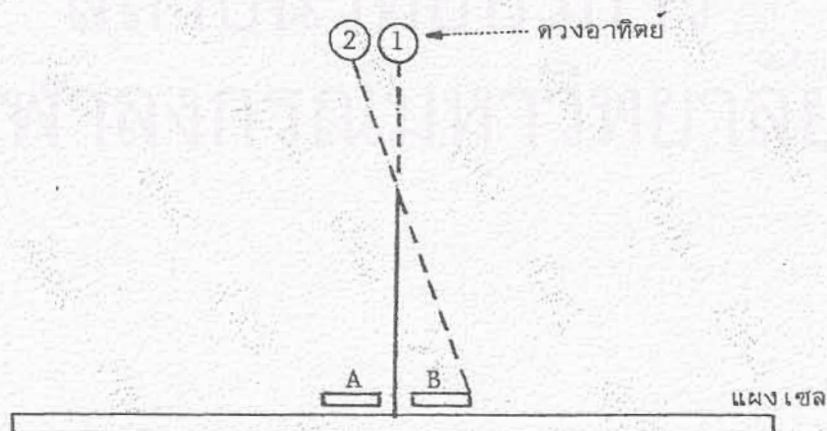
อุปกรณ์ที่ใช้ในการตรวจจับทิศทางของดวงอาทิตย์และแผงเซลล์โดยทั่วไปจะเป็นอุปกรณ์ที่มีความไวต่อแสง (Photosensitive device) เช่น photovoltaic device หรือ photoconductive device เป็นต้น สำหรับการเปรียบเทียบทิศทางจะอาศัยการเปรียบเทียบความเข้มของแสงที่ตกกระทบอุปกรณ์ไวแสงซึ่งทำได้สองวิธีคือ

การวางอุปกรณ์ไวแสงให้มีทิศต่างกัน (Angular sensors)

วิธีการนี้เราจะติดตั้งอุปกรณ์ไวแสงเช่นเซลล์แสงอาทิตย์ขนาดเล็กซึ่งมีลักษณะเหมือนกันให้ทำมุมกันค่าหนึ่งโดยให้ระนาบที่ตั้งฉากกับระนาบของอุปกรณ์ทั้งสองอยู่ในแนวตะวันออกตะวันตก อุปกรณ์ไวแสงทั้งสองจะติดตั้งอยู่กับแผงเซลล์โดยทำมุมกับเส้นตั้งฉากของแผงเซลล์เท่า ๆ กัน เมื่อแผงเซลล์ทำมุมฉากกับแนวทิศทางของดวงอาทิตย์ อุปกรณ์ทั้งสองจะได้รับความเข้มของแสงเท่า ๆ กัน แต่ถ้ามีความคลาดเคลื่อนเกิดขึ้นจะทำให้อุปกรณ์ทั้งสองได้รับความเข้มไม่เท่ากันอันจะเป็นการชี้บ่งให้เห็นว่าดวงอาทิตย์อยู่เยื้องไปทางทิศใดของแนวตั้งฉากของแผงเซลล์ ในกรณีที่ต้องการให้มีการติดตามในแนวเหนือ-ใต้ด้วยเราจะต้องเพิ่มอุปกรณ์ที่มีลักษณะเหมือนกันอีกชุดหนึ่งโดยให้ระนาบที่ตั้งฉากกับระนาบของอุปกรณ์ไวแสงอยู่ในแนวเหนือ-ใต้ การเปรียบเทียบโดยวิธีนี้จะให้ความแม่นยำไม่สูงนัก คือจะมีความคลาดเคลื่อนประมาณ 2-5 องศา

การบังให้เกิดเงา (Shadow sensor)

วิธีการนี้เราจะวางอุปกรณ์ไวแสงซึ่งมีลักษณะเหมือนกันไว้สองข้างของวัสดุทึบแสงซึ่งวางตั้งฉากกับแผงเซลล์ ดังแสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 2 การเปรียบเทียบทิศทางโดยการบังให้เกิดเงา

ในระบบที่มีการติดตามในแนวตะวันออก-ตะวันตก อุปกรณ์ไวแสง A และ B จะวางอยู่ในแนวตะวันออก-ตะวันตก แต่ถ้าต้องการให้มีการติดตามในแนวเหนือ-ใต้ด้วยเราก็ต้องเพิ่มอุปกรณ์ที่มีลักษณะเหมือนกันอีก 1 ชุด แต่จะต้องวางอุปกรณ์ A และ B ให้อยู่ในแนวเหนือ-ใต้ จากในรูปที่ 2 เราจะเห็นได้ว่า ถ้าแผงเซลล์ทำมุมตั้งฉากกับแนวทิศทางของดวงอาทิตย์ตั้งในตำแหน่ง 1 ทั้ง A และ B จะได้รับความเข้มของแสงเท่ากัน แต่ถ้าเกิดมีความคลาดเคลื่อนตั้งในตำแหน่ง 2 เซลล์ B จะถูกบังไม่ให้ได้รับแสง ซึ่งลักษณะเช่นนี้จะเป็นการชี้บอกให้ทราบว่าดวงอาทิตย์อยู่เยื้องไปทางทิศใดของแนวตั้งฉากของแผงเซลล์ การเปรียบเทียบทิศทางโดยวิธีนี้ ความแม่นยำจะขึ้นอยู่กับความยาวของอุปกรณ์ที่ทำให้เกิดเงาโดยความแม่นยำจะสูงขึ้นเมื่อความยาวเพิ่มขึ้น วิธีการนี้อาจจะให้ความแม่นยำได้ถึง 0.1 องศา [3]

ลักษณะสัญญาณออกของตัวเปรียบเทียบทิศทางอาจจะ เป็นสัญญาณขึ้นหรือสัญญาณต่อ เนื่องก็ได้ซึ่งจะแบ่งออกได้เป็น 3 ลักษณะคือ

- สัญญาณศูนย์ เป็นสัญญาณที่แสดงว่าความแตกต่างของทิศทางของแผงเซลล์กับทิศทางของดวงอาทิตย์น้อยกว่าค่าต่ำสุดที่ตัวเปรียบเทียบทิศทางจะสามารถตรวจจับได้
- สัญญาณบวก เป็นสัญญาณที่แสดงว่าตำแหน่งของดวงอาทิตย์อยู่เยื้องไปทางทิศตะวันตกของแนวตั้งฉากของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (หรืออาจจะเป็นตรงกันข้ามก็ได้)
- สัญญาณลบ หมายถึงสัญญาณที่แสดงว่าตำแหน่งของดวงอาทิตย์อยู่เยื้องไปทางทิศตะวันออกของแนวตั้งฉากของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (หรืออาจจะเป็นตรงกันข้ามก็ได้)

ขนาดของสัญญาณออกของตัวเปรียบเทียบทิศทางนั้น นอกจากจะขึ้นอยู่กับความแตกต่างของทิศทางของแผงเซลล์กับทิศทางของดวงอาทิตย์แล้วยังจะขึ้นอยู่กับความเข้มของแสงตรงจากดวงอาทิตย์ (direct radiation) ดังนั้นความแม่นยำของตัวเปรียบเทียบทิศทางจะขึ้นอยู่กับปริมาณของแสงตรงจากดวงอาทิตย์ด้วย สาเหตุนี้นี้จะทำให้อุปกรณ์ตรวจจับและเปรียบเทียบทิศทางของดวงอาทิตย์กับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ไม่สามารถจะทำงานได้ในขณะที่มีเมฆมาบังดวงอาทิตย์ หรืออาจจะมี การหลงทางชั่วขณะได้

ข) ภาคควบคุม

ภาคควบคุมจะทำหน้าที่รับสัญญาณจากตัวเปรียบเทียบทิศทางเพื่อใช้ในการควบคุมให้ตัวต้นกำลังขับเคลื่อนแผงเซลล์แสงอาทิตย์ไปอยู่ในตำแหน่งที่ทำให้ระนาบแผงเซลล์แสงอาทิตย์ตั้งฉากกับทิศทางของดวงอาทิตย์ ภาคควบคุมโดยทั่วไปจะประกอบด้วย



- หน่วยรับสัญญาณ
- หน่วยขยายและปรับปรุงสัญญาณ
- หน่วยขยายกำลัง
- หน่วยควบคุมทิศทาง

หน่วยรับสัญญาณ จะทำหน้าที่รับสัญญาณจากตัวเปรียบเทียบสัญญาณซึ่งอาจจะเป็นสัญญาณชั้น หรือสัญญาณต่อเนื่องก็ได้ขึ้นอยู่กับลักษณะของวงจรเปรียบเทียบที่ใช้ ถ้าเป็นวงจรเปรียบเทียบผลต่างที่มีอัตราขยายต่ำ มักจะให้สัญญาณออกแบบต่อเนื่อง แต่ถ้าเป็นวงจรเปรียบเทียบผลต่างที่มีอัตราขยายสูงและมีการป้อนกลับแบบบวก มักจะให้สัญญาณออกเป็นสัญญาณชั้น

หน่วยขยายและปรับปรุงสัญญาณ อาจจะทำหน้าที่เพียงขยายสัญญาณที่ได้รับเข้ามา หรืออาจจะมีการปรับปรุงสัญญาณ เช่น การชดเชยความถี่เพื่อเพิ่มเสถียรภาพของระบบ หรืออาจจะทำหน้าที่จัดการกับสัญญาณ เพื่อให้เหมาะที่จะใช้ควบคุมระบบต้นกำลัง

หน่วยขยายกำลัง จะทำหน้าที่ขยายทั้งกระแสและแรงดัน เพื่อให้มีกำลังเพียงพอสำหรับการขับนำตัวต้นกำลัง หน่วยขยายกำลังนี้จะได้รับกำลังงานจากแหล่งไฟตรง เช่น แบตเตอรี่ ในกรณีที่ เป็นระบบที่อยู่โดด ๆ แต่ถ้าเป็นระบบที่มีการต่อเข้ากับสายส่งซึ่งระบบเช่นนี้มักจะไม่มีแบตเตอรี่ เราอาจจะต้องใช้กำลังงานสายส่งในตอนที่ไม่มีแสงอาทิตย์ ส่วนในตอนที่มีแสงอาทิตย์ เราก็อาจจะใช้กำลังงานจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ก็ได้

หน่วยควบคุมทิศทาง จะทำหน้าที่ควบคุมทิศทางการขับนำของตัวต้นกำลัง โดยอาศัยข้อมูลจากตัวเปรียบเทียบทิศทาง และเมื่อดวงอาทิตย์ลับขอบฟ้า หน่วยควบคุมทิศทางจะควบคุมให้แผงเซลล์แสงอาทิตย์หมุนกลับไปรอรับแสงอาทิตย์ในตอนเช้าทางทิศตะวันออก โดยระบบจะเริ่มทำงานอีกครั้งเมื่อได้รับแสงอาทิตย์ในวันถัดไป

ค) ตัวต้นกำลังขับเคลื่อนแผงเซลล์

ตัวต้นกำลังขับเคลื่อนแผงเซลล์จะทำหน้าที่ขับเคลื่อนแผงเซลล์แสงอาทิตย์ โดยได้รับการควบคุมจากภาคควบคุม ตัวต้นกำลังจะประกอบด้วย มอเตอร์ไฟฟ้าและเฟืองหรือเกียร์ที่ครอบมอเตอร์ที่ใช้โดยทั่วไปจะเป็นมอเตอร์กระแสตรง เนื่องจากควบคุมความเร็วได้ง่ายและเหมาะสมกับแหล่งพลังงานที่มีอยู่คือ กระแสไฟตรงจากแบตเตอรี่ ส่วนสาเหตุที่ต้องมีเกียร์ที่ครอบก็เพื่อลดความเร็วของมอเตอร์ที่มีค่าสูงไหลลงมา เป็นความเร็วต่ำประมาณ 1 รอบต่อวันและเป็นการเพิ่มแรงบิดในการขับเคลื่อนแผงเซลล์ด้วย

2.1.3 ข้อดีข้อเสียของระบบ

ก) ข้อดีของระบบควบคุมแบบวงรอบเปิด

- มีความแม่นยำสูง
- ไม่ต้องการข้อมูลเกี่ยวกับทางโคจรของดวงอาทิตย์
- สามารถปรับตัวเองได้ตามฤดูกาล
- ระบบสามารถเริ่มต้นได้เองเนื่องจากสามารถตรวจจับตำแหน่งดวงอาทิตย์ได้เอง
- ไม่มีการสะสมความคลาดเคลื่อน

ข) ข้อเสียของระบบควบคุมแบบวงรอบปิด

- ต้องการใช้อุปกรณ์ที่มีความไวต่อแสงที่มีราคาแพง เนื่องจากต้องบรรจุในภาชนะโปร่งแสงที่ต้องปิดมิดชิด เพื่อป้องกันความเสียหายที่อาจจะเกิดจาก อากาศและความชื้น เนื่องจากอุปกรณ์ดังกล่าวต้องอยู่กลางแจ้งตลอดเวลา
- ระบบ 1 ระบบจะต้องใช้ตัวเปรียบเทียบทิศทางและภาคควบคุมอย่างละชุด เราไม่สามารถจะใช้ตัวเปรียบเทียบทิศทางและภาคควบคุมหนึ่งชุดกับชุดของแผง เซลแสงอาทิตย์หลาย ๆ ชุดได้
- จะต้องใช้หม้อเตอร์ที่มีกำลังสูงเนื่องจากการเปลี่ยนตำแหน่งในบางครั้ง อาจจะต้องทำอย่างรวดเร็ว เช่น ในภาวะที่มีเมฆมาก ๆ จะทำให้อุปกรณ์ไวแสงไม่สามารถตรวจจับตำแหน่งดวงอาทิตย์ได้ ระบบจะหยุดอยู่กับที่ และเมื่อเมฆผ่านไป ระบบจะต้องปรับตำแหน่ง เพื่อให้ระนาบของแผงเซลล์ตั้งฉากกับแนวทิศทางของดวงอาทิตย์อย่างรวดเร็ว
- ระบบนี้อาจจะมีการหลงในบางขณะ เช่น ในภาวะที่มีเมฆมาก ซึ่งทำให้ต้องหมุนแผงเซลล์ไป ๆ มา ๆ อันเป็นการสิ้นเปลืองพลังงาน

2.2 ระบบควบคุมการติดตามดวงอาทิตย์แบบวงรอบเปิด

2.2.1 หลักการของระบบ

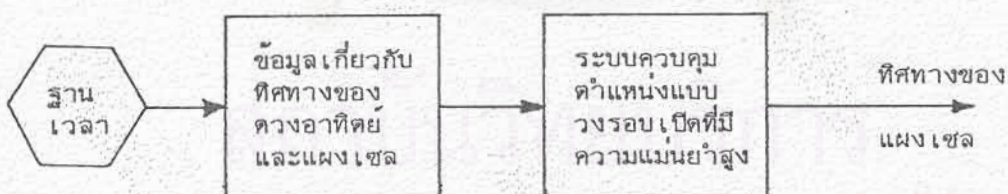
ระบบควบคุมการติดตามดวงอาทิตย์แบบวงรอบเปิดนี้ จะใช้หลักการควบคุมตำแหน่งแบบวงรอบเปิดที่มีความแม่นยำสูง ร่วมกับข้อมูลเกี่ยวกับทิศทางของดวงอาทิตย์และทิศทางของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ในขณะใดขณะหนึ่ง ระบบควบคุมแบบนี้ จะใช้เวลาเป็นเครื่องอ้างอิง กล่าวคือ เราจะต้องรู้ทิศทางของดวงอาทิตย์เทียบกับแกนอ้างอิงของที่ตั้งระบบที่เวลาต่าง ๆ กัน และเราจะต้องรู้ทิศทางของแผงเซลล์เทียบกับแกนอ้างอิงเดียวกันตลอดเวลาด้วย จากข้อมูลของทิศทางทั้งสองเราจะควบคุมให้ทิศทางของแผงเซลล์เลื่อนเข้าหาทิศทางของดวงอาทิตย์เป็นช่วง ๆ ไป

2.2.2 โครงสร้างของระบบ

ระบบควบคุมการติดตามดวงอาทิตย์แบบวงรอบเปิดจะประกอบด้วยส่วนต่าง ๆ ที่สำคัญ ดังนี้คือ

- ฐานเวลา
- แหล่งข้อมูลเกี่ยวกับตำแหน่งของดวงอาทิตย์
- ระบบควบคุมตำแหน่งแบบวงรอบเปิดที่มีความแม่นยำสูง

ซึ่งเราจะเขียนเป็นบล็อกไดอะแกรมได้ดังนี้คือ



รูปที่ 3. บล็อกไดอะแกรมของระบบควบคุมการติดตามดวงอาทิตย์แบบวงรอบเปิด

ก) ฐานเวลา

เนื่องจากตำแหน่งของดวงอาทิตย์จะเปลี่ยนแปลงกับเวลา ดังนั้นการที่เราจะทราบตำแหน่งของดวงอาทิตย์ได้ เราต้องมีข้อมูลของเวลา คือฐานเวลา ความถูกต้องของข้อมูลเกี่ยวกับ

ตำแหน่งของดวงอาทิตย์ จะขึ้นอยู่กับความเที่ยงตรงของฐานเวลา เนื่องจากความคลาดเคลื่อนของเวลาจะมีการสะสมเพิ่มขึ้นเรื่อย ถ้าไม่มีการตั้งใหม่ จะทำให้ความผิดพลาดของข้อมูลสะสมขึ้นด้วย ความผิดพลาดของฐานเวลา 10 ppm จะทำให้ข้อมูลเกี่ยวกับตำแหน่งดวงอาทิตย์ผิดพลาดได้ 1.3 องศาต่อปี

ข) แหล่งข้อมูลเกี่ยวกับตำแหน่งของดวงอาทิตย์

เนื่องจากการโคจรของดวงอาทิตย์มีกฎเกณฑ์ที่ค่อนข้างแน่นอน ดังนั้นเราจึงสามารถคำนวณหาตำแหน่งของดวงอาทิตย์เทียบกับผู้สังเกต ณ จุดใด ๆ บนโลก ในขณะใดขณะหนึ่งได้แน่นอนถึง ± 0.01 องศา [4 5] และเนื่องจากในปัจจุบัน เราสามารถหาฐานเวลาที่มีความเที่ยงตรงสูงได้ง่าย เช่น ฐานเวลาที่ได้จากการสั่นของผลึกควอตซ์ และการคำนวณสมการที่มีความยุ่งยากก็สามารถทำได้อย่างรวดเร็วโดยอาศัยไมโครคอมพิวเตอร์ ดังนั้นเราจะสามารถรู้ตำแหน่งของดวงอาทิตย์ในเวลาจริงได้อย่างรวดเร็วและแน่นอน ได้มีผู้ทดลองทำระบบควบคุมการติดตามดวงอาทิตย์แบบวงรอบเปิด โดยใช้ไมโครคอมพิวเตอร์คำนวณตำแหน่งของดวงอาทิตย์ในเวลาจริง ซึ่งให้ความแม่นยำได้สูงถึง 0.25 องศา [6] สำหรับวิธีการคำนวณตำแหน่งดวงอาทิตย์ไว้ล่วงหน้า จะไม่เป็นที่ยอมรับกัน เนื่องจากจำนวนข้อมูลจะมีมากเกินไป จึงไม่สะดวกเท่าวิธีคำนวณในเวลาจริง แต่ในกรณีที่เราไม่ต้องการความแม่นยำสูงนัก เราอาจจะใช้วิธีการประมาณสมการการเคลื่อนที่ของดวงอาทิตย์ด้วยสมการเส้นตรงซึ่งมีเวลาเป็นตัวแปรอิสระ วิธีนี้จะทำให้สามารถใช้วิธีควบคุมการติดตามดวงอาทิตย์แบบวงรอบเปิดได้โดยไม่ต้องใช้อุปกรณ์ที่มีความยุ่งยาก และราคาแพง อย่างเช่น ไมโครคอมพิวเตอร์

ค) ระบบควบคุมตำแหน่งแบบวงรอบเปิดที่มีความแม่นยำสูง

การควบคุมตำแหน่งแบบวงรอบเปิด และมีความแม่นยำสูง จะทำได้โดยอาศัยการใช้ข้อมูลแบบตัวเลข และการขับเคลื่อนโดยใช้มอเตอร์แบบขั้น (stepping motor) การที่มอเตอร์แบบขั้นนี้มีความแม่นยำสูง เนื่องจากมุมในการหมุนจะมีค่าแน่นอน และขึ้นอยู่กับจำนวนพัลส์ที่วงจรขับมอเตอร์ได้รับ ส่วนการใช้ข้อมูลแบบตัวเลขจะสามารถบันทึกจำนวนพัลส์ที่ใช้ขับเคลื่อนมอเตอร์ได้อย่างถูกต้องไม่ผิดพลาด มุมที่มอเตอร์หมุนต่อพัลส์อาจจะมีค่า 1.8 2 7.5 หรือ 15 องศา แล้วแต่ความต้องการของเรา ถึงแม้มุมในการหมุนของมอเตอร์แบบขั้นจะมีค่ามากกว่า 1 องศา แต่เราก็สามารถควบคุมการเคลื่อนที่ที่น้อยกว่าองศาได้ โดยการใช้เกียร์ทด ซึ่งปรกติเราก็ต้องใช้อยู่แล้ว ทั้งนี้เพราะระบบติดตามดวงอาทิตย์จะหมุนด้วยความเร็ว 360 องศาต่อวันในขณะที่มอเตอร์อาจจะ

หมุนด้วยความเร็วมากกว่า 10 รอบต่อนาที ดังนั้นเราจึงสามารถควบคุมการหมุนที่เป็นมุมน้อยกว่า 0.01 องศา ได้อย่างง่ายดาย ระบบควบคุมตำแหน่งแบบนี้ จะมีความผิดพลาดน้อยมากถ้าหากได้รับข้อมูลคำสั่ง เป็นแบบตัวเลข ความผิดพลาดส่วนใหญ่จะ เกิดจาก เกียร์ที่ใช้ทดรอบ เนื่องจากฟันของ เกียร์จะขบกันไม่สนิท

2.2.3 ข้อดีข้อเสียของระบบ

ก) ข้อดีของระบบควบคุมแบบวงรอบเปิด

- ชุดควบคุมชุดเดียวสามารถใช้ควบคุมระบบติดตามดวงอาทิตย์ได้หลายชุด จึงเหมาะที่จะใช้กับระบบใหญ่ ๆ
- มีความแม่นยำสูง ยกเว้นในกรณีที่เราใช้วิธีการประมาณทางโคจรของดวงอาทิตย์ด้วยสมการเส้นตรง
- มอเตอร์ที่ใช้อาจมีกำลังน้อยกว่ามอเตอร์ที่ใช้กับระบบวงรอบปิด เนื่องจากการเคลื่อนที่จะเป็นไปอย่างสม่ำเสมอ ไม่มีการหยุดนิ่งแม้จะมีเมฆบังดวงอาทิตย์
- ไม่จำเป็นต้องใช้อุปกรณ์ไวแสงในการตรวจจับตำแหน่งของดวงอาทิตย์

ข) ข้อเสียของระบบควบคุมแบบวงรอบเปิด

- วงจรขับเคลื่อนมอเตอร์จะมีความยุ่งยากกว่าวงจรขับเคลื่อนมอเตอร์แบบธรรมดา และมีราคาแพงด้วย
- ถ้าต้องการความแม่นยำสูงจำเป็นต้องใช้การคำนวณตำแหน่งของดวงอาทิตย์ด้วยไมโครคอมพิวเตอร์ ซึ่งมีความยุ่งยากมากกว่าระบบควบคุมแบบวงรอบปิดธรรมดา
- ต้องศึกษาทางโคจรของดวงอาทิตย์ ซึ่งจะเปลี่ยนแปลงตามฤดูกาล
- ต้องใช้ฐานเวลาที่มีความแม่นยำสูง
- มีการสะสมของความคลาดเคลื่อน โดยเฉพาะความคลาดเคลื่อนของฐานเวลา
- ความแม่นยำในการติดตามดวงอาทิตย์ขึ้นอยู่กับความแน่นอนของตำแหน่งและทิศ

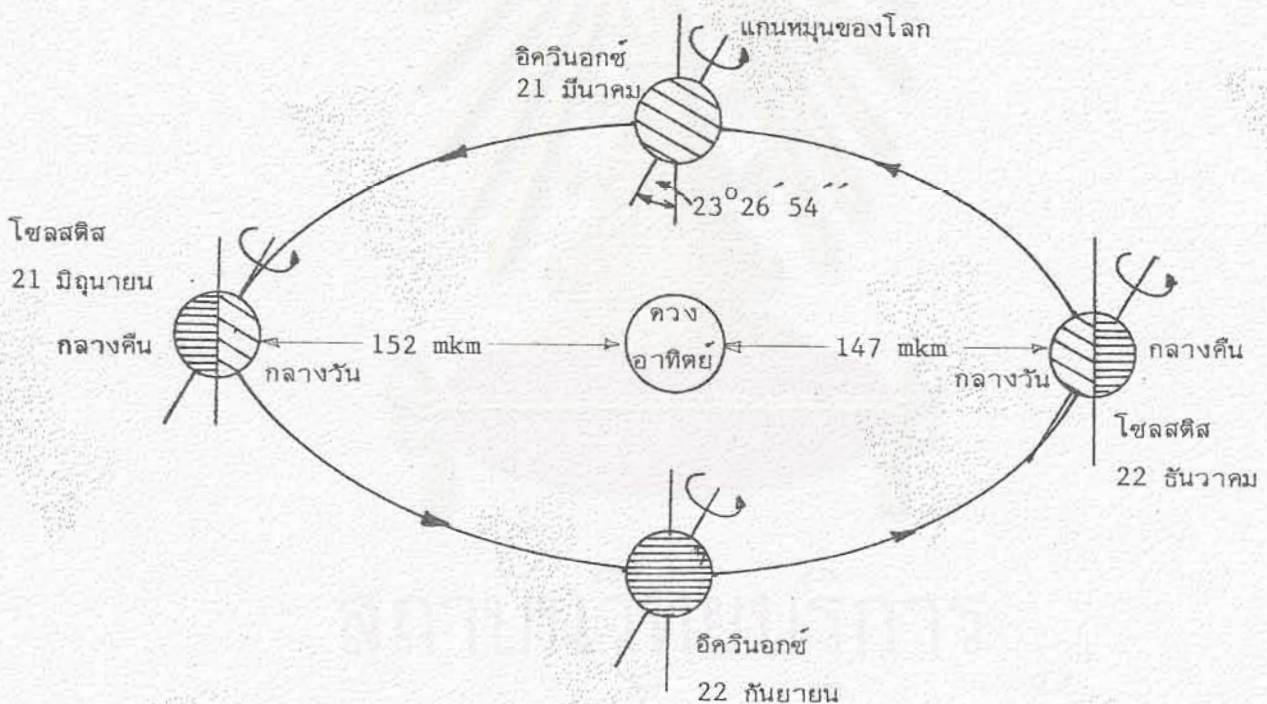
ทางอ้างอิง

2.3 การศึกษาทางโคจรของดวงอาทิตย์

ในการสร้างระบบควบคุมการติดตามดวงอาทิตย์แบบวงรอบเปิด เราจำเป็นต้องมีข้อมูลเกี่ยวกับทางโคจรของดวงอาทิตย์เทียบกับผู้สังเกต ณ ละติจูดต่าง ๆ กันบนโลก อีกทั้งต้องทราบถึงการเปลี่ยนแปลงของทางโคจรของดวงอาทิตย์ตามฤดูกาลด้วย

2.3.1 ทางโคจรของโลกรอบดวงอาทิตย์

เพื่อให้เราสามารถเข้าใจถึงลักษณะการโคจรของดวงอาทิตย์เทียบกับผู้สังเกตบนโลก ก่อนอื่นเราควรที่จะทราบถึงลักษณะการโคจรของโลกรอบดวงอาทิตย์เสียก่อน การโคจรของโลกรอบดวงอาทิตย์จะเป็นวงรีที่ไม่สมมาตรดังแสดงในรูปที่ 1

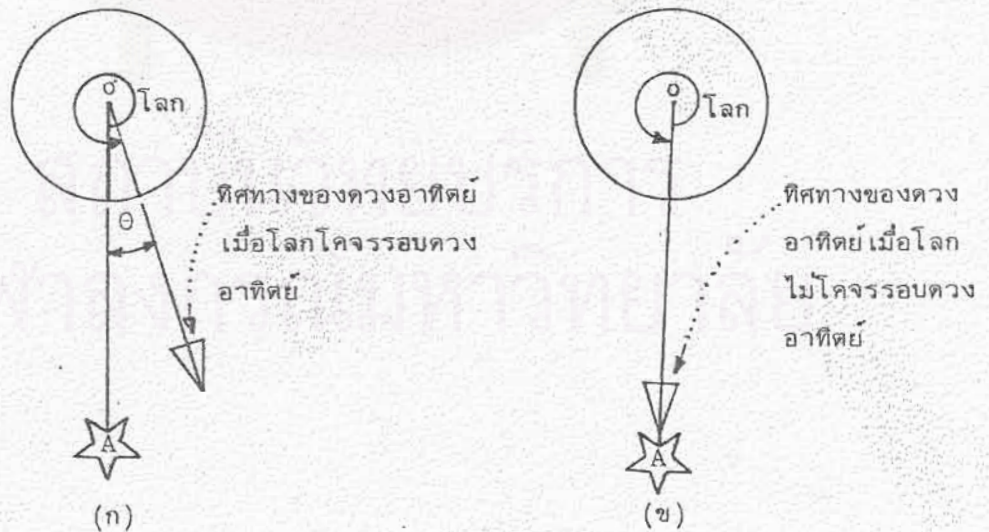


รูปที่ 4 ทางโคจรของโลกรอบดวงอาทิตย์แสดงตำแหน่งอัครวินอกซ์และโซลสตีล

นอกจากทางโคจรของโลกรอบดวงอาทิตย์จะเป็นวงรีในระนาบซึ่งเราเรียกว่า ระนาบอิคลิปติก (Ecliptic plane) แล้ว แกนหมุนของโลกซึ่งเป็นแกนที่ผ่านขั้วเหนือ-ใต้ของโลกยังเอียงทำมุมคงที่เท่ากับ $23^{\circ} 26' 54''$ กับเส้นตั้งฉากของระนาบอิคลิปติกด้วย การที่แกนหมุนของโลกเอียงทำมุมกับระนาบวงโคจรนี้เองที่เป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดฤดูกาลตลอดจนการเปลี่ยนแปลงทาง

โคจรของดวงอาทิตย์เทียบกับผู้สังเกตบนโลกตามฤดูกาล ตำแหน่งของโลกในวงโคจรที่สำคัญมี 4 ตำแหน่งคือ ตำแหน่งอิกวinox (equinox) ซึ่งเป็นตำแหน่งที่โลกอยู่ใกล้ดวงอาทิตย์มากที่สุด เกิดขึ้นในวันที่ 21 มีนาคม และ วันที่ 22 กันยายน ของทุกปี เมื่อโลกอยู่ ณ ตำแหน่งอิกวinox แกนหมุนของโลกจะตั้งฉากกับเส้นที่ลากระหว่างโลกกับดวงอาทิตย์ และช่วงเวลาในตอนกลางวันยาวเท่ากับเวลาในตอนกลางคืน สำหรับตำแหน่งโซลสติส (Solstice) จะเป็นตำแหน่งที่โลกอยู่ห่างจากดวงอาทิตย์มากที่สุด เกิดขึ้นในวันที่ 21 มิถุนายน และ วันที่ 22 ธันวาคม ของทุกปี เมื่อโลกอยู่ ณ ตำแหน่งโซลสติสแกนหมุนของโลกจะอยู่ในระนาบที่ตั้งฉากกับระนาบอิกลิปติก และผ่านแนวที่ลากระหว่างโลกกับดวงอาทิตย์ และช่วงเวลาในตอนกลางวันกับตอนกลางคืนแตกต่างกันมากที่สุด กล่าวคือถ้าโลกอยู่ ณ ตำแหน่งโซลสติสหน้าร้อน คือ วันที่ 21 มิถุนายน ซีกโลกเหนือจะมีเวลากลางวันยาวกว่ากลางคืน และซีกโลกใต้จะมีเวลากลางคืนยาวกว่ากลางวัน แต่เมื่อโลกอยู่ ณ ตำแหน่งโซลสติสหน้าหนาว คือ วันที่ 22 ธันวาคม ซีกโลกเหนือจะมีเวลากลางวันสั้นกว่าเวลากลางคืน และซีกโลกใต้จะมีเวลากลางคืนสั้นกว่ากลางวัน

เนื่องจากในขณะที่โลกหมุนรอบตัวเอง มันจะเคลื่อนที่ไปรอบดวงอาทิตย์ด้วย ดังนั้นการที่ผู้สังเกตบนโลกจะมองเห็นดวงอาทิตย์อยู่ ณ ตำแหน่งสูงสุดในท้องฟ้าสองครั้งติดต่อกัน โลกจะต้องหมุนรอบตัวเองมากกว่า 360° ทั้งนี้เพราะเส้นที่ลากระหว่างโลกกับดวงอาทิตย์จะทำมุมกับแนว OA มากขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 5



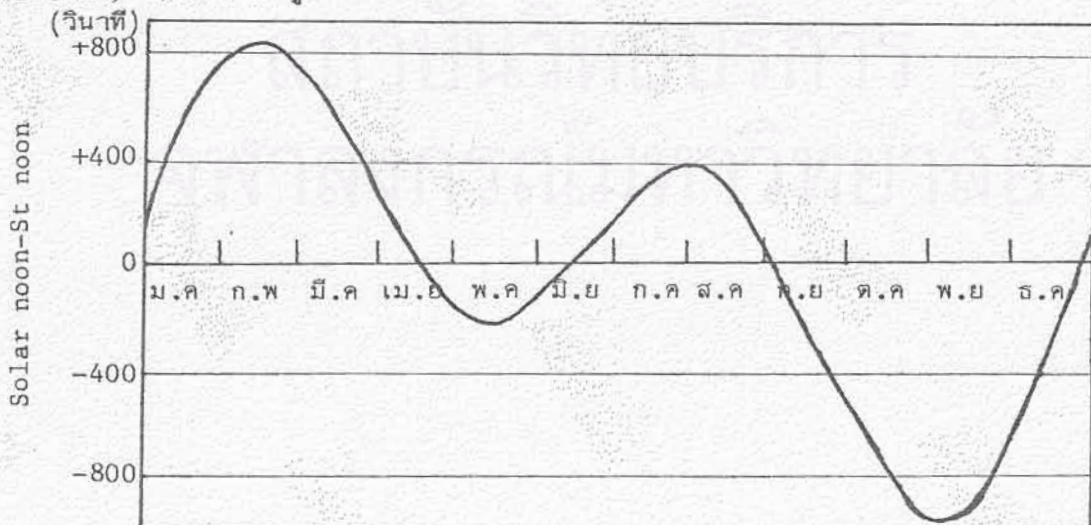
รูปที่ 5 แสดงมุมการหมุนของโลกรอบตัวเอง เพื่อให้ผู้สังเกตบนโลกมองเห็นดวงอาทิตย์ ณ ตำแหน่งสูงสุดในท้องฟ้า (ก) เมื่อโลกโคจรรอบดวงอาทิตย์ (ข) ถ้าโลกไม่โคจรรอบดวงอาทิตย์

2.3.2 เวลาชนิดต่าง ๆ และสมการของเวลา

เวลาที่ใช้วัดการหมุนรอบตัวเองของโลกมีอยู่สองชนิดคือ เวลามาตรฐาน (Standard time) และเวลาซิดเดอรอล (Sideral time) โดยที่ 1 วัน มาตรฐานคือช่วงเวลาที่โลกหมุนรอบตัวเองเพื่อทำให้ผู้สังเกตบนโลกมองเห็นดวงอาทิตย์อยู่ ณ ตำแหน่งสูงสุดในท้องฟ้าสองครั้งติดต่อกัน ส่วนเวลา 1 วัน ซิดเดอรอลคือช่วงเวลาที่โลกหมุนรอบตัวเอง 1 รอบ ซึ่งจะเป็นเวลาที่สั้นกว่าเวลา 1 วัน มาตรฐาน ตามเหตุผลที่ได้แสดงไว้ในรูปที่ 5 และเนื่องจากความแตกต่างนี้ ในเวลา 1 ปี โลกจะหมุนรอบตัวเองมากกว่าจำนวนวันอยู่ 1 รอบ ดังนั้นเราจะหาความสัมพันธ์ระหว่างวันมาตรฐานกับวันซิดเดอรอลได้จากสมการ

$$1 \text{ วัน มาตรฐาน} = 1.0027379 \text{ วัน ซิดเดอรอล} . \quad (1)$$

ถึงแม้โลกจะหมุนรอบตัวเองด้วยความเร็วคงที่ ซึ่งทำให้วันซิดเดอรอลมีค่าคงที่ก็ตาม แต่ช่วงเวลาที่ผู้สังเกตบนโลกมองเห็นดวงอาทิตย์อยู่ ณ ตำแหน่งสูงสุดในท้องฟ้าจะเปลี่ยนไปในแต่ละวัน ทั้งนี้เพราะมุม θ ในรูปที่ 5 จะเปลี่ยนไปในแต่ละวัน เนื่องมาจากการที่วงโคจรของโลกรอบดวงอาทิตย์ไม่เป็นวงกลม ทำให้ความเร็วเชิงมุมของการเคลื่อนที่ของโลกรอบดวงอาทิตย์ไม่คงที่ ส่วนอีกสาเหตุหนึ่งเกิดจากการที่แกนหมุนของโลกเอียงทำมุมกับเส้นตั้งฉากของระนาบอวกาศ ดังนั้นจึงทำให้เกิดมีความแตกต่างของเวลาที่ดวงอาทิตย์อยู่ ณ ตำแหน่งสูงสุดในท้องฟ้ากับเวลาเที่ยงของเวลามาตรฐาน ซึ่งได้จากการเฉลี่ยช่วงเวลาที่ ดวงอาทิตย์อยู่ ณ ตำแหน่งสูงสุดในท้องฟ้าสองครั้งติดต่อกันและมีค่าเท่ากับ 24 ชม. ความแตกต่างนี้จะหาได้จากสมการของเวลา (Equation of time) ดังแสดงในรูปที่ 6



รูปที่ 6 แสดงการบ่ายเบี่ยงของเวลาที่ดวงอาทิตย์อยู่ ณ ตำแหน่งสูงสุดในท้องฟ้าจากเวลาเที่ยงตามเวลามาตรฐานเป็นวินาที [7]

การบ่งเบียง (ΔT) นี้ สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$\Delta T = \sum_{k=0}^5 \left[A_k \cos \left(\frac{2\pi k N}{365.25} \right) + B_k \sin \left(\frac{2\pi k N}{365.25} \right) \right] \quad (2)$$

โดยที่ N มีค่าจาก 1 ถึง 1461 โดยถือเอาวันที่ 1 มกราคม ของปีที่เดือน
กุมภาพันธ์ มี 29 วันเป็น 1 ส่วนสัมประสิทธิ์ A, B จะหาได้จากตารางที่ 1

| k | A_k (ชม.) | B_k (ชม.) |
|-----|--------------------------|--------------------------|
| 0 | -2.0870×10^{-4} | 0 |
| 1 | -9.2869×10^{-3} | $+1.2229 \times 10^{-1}$ |
| 2 | $+5.2258 \times 10^{-2}$ | $+1.5698 \times 10^{-1}$ |
| 3 | $+1.3077 \times 10^{-3}$ | $+5.1602 \times 10^{-3}$ |
| 4 | $+2.1867 \times 10^{-3}$ | $+2.9823 \times 10^{-3}$ |
| 5 | $+1.5100 \times 10^{-4}$ | $+2.3463 \times 10^{-4}$ |

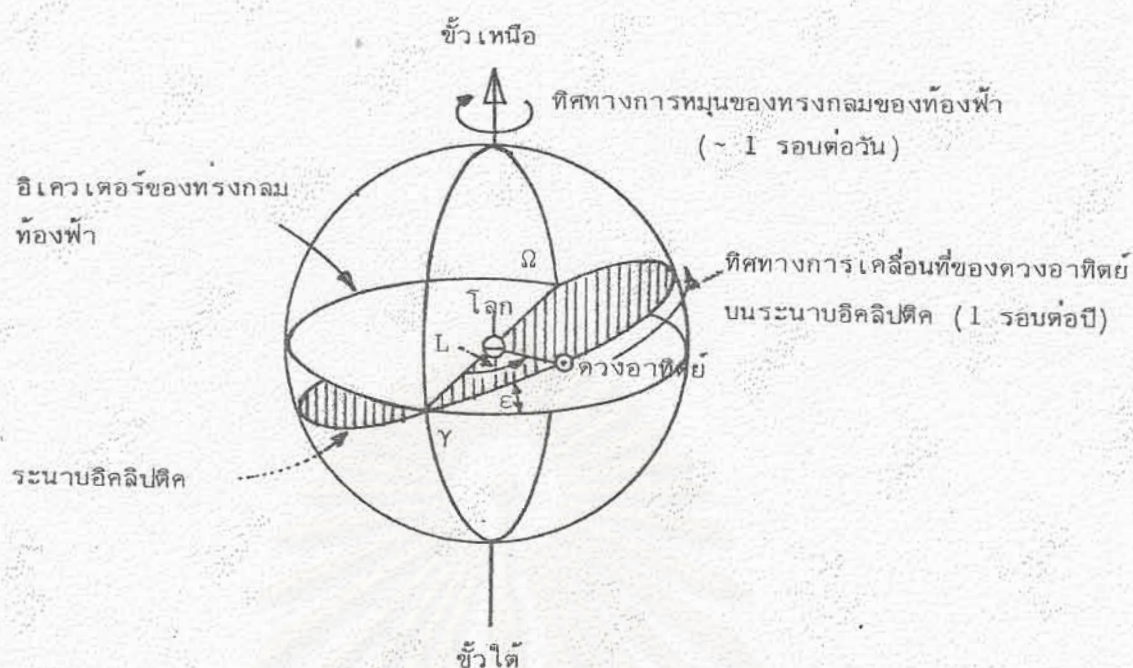
ตารางที่ 1 ค่าคงที่ของสมการเวลา [8]

2.3.3 ทางโคจรของดวงอาทิตย์เทียบกับผู้สังเกตบนโลก

จากลักษณะการหมุนรอบตัวเองของโลกในขณะที่มันเคลื่อนที่ไปรอบดวงอาทิตย์ดังที่กล่าว
แล้ว เราจะนำมาใช้ในการหาทางโคจรของดวงอาทิตย์เทียบกับผู้สังเกตบนโลกในฤดูกาลต่าง ๆ
ได้ เพื่อการนี้เราจะสมมุติทรงกลมที่มีรัศมีเป็นอนันต์เทียบกับขนาดของโลกและมีโลกเป็นจุดศูนย์กลาง
เราจะเรียกทรงกลมนี้ว่าทรงกลมของท้องฟ้า (Celestial sphere) ทรงกลมนี้จะหมุนรอบโลก
ซึ่งหยุดนิ่งอยู่กับที่โดยที่แกนหมุนของทรงกลมของท้องฟ้าจะมีแนวผ่านขั้วโลกเหนือและขั้วโลกใต้ ดัง
แสดงในรูปที่ 7

ทรงกลมของท้องฟ้าจะมีส่วนต่าง ๆ ที่สำคัญดังนี้คือ

- ขั้วเหนือและขั้วใต้ของทรงกลมของท้องฟ้า (Celestial north and south poles) คือจุดบนทรงกลมของท้องฟ้าที่แกนหมุนของทรงกลมผ่าน



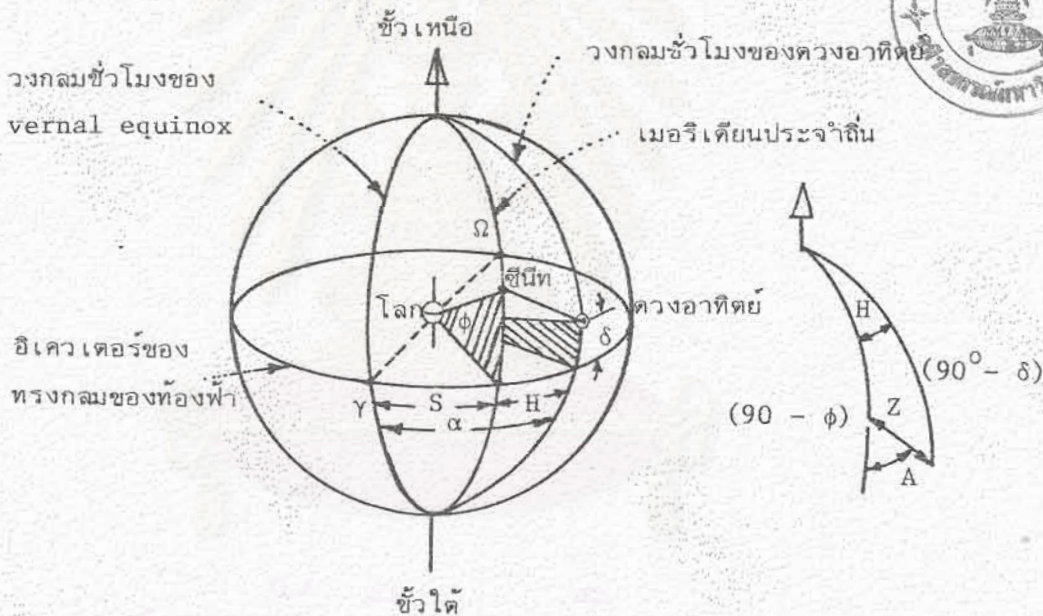
รูปที่ 7 ทรงกลมของท้องฟ้าแสดงส่วนประกอบต่าง ๆ

- อีควาเตอร์ของทรงกลมของท้องฟ้า (Celestial equator) คือแนวบนทรงกลมของท้องฟ้าซึ่งเกิดจากระนาบที่ผ่านแนวอีควาเตอร์ของโลกตัดกับทรงกลมของท้องฟ้า
- ระนาบอิกลิปติก (Ecliptic plane) คือระนาบของทางโคจรของดวงอาทิตย์บนทรงกลมของท้องฟ้า ดวงอาทิตย์จะโคจรบนระนาบนี้ครบ 1 รอบในเวลา 1 ปี ในทิศทางซึ่งตรงข้ามกับทิศทางการหมุนของทรงกลมของท้องฟ้า โดยจะผ่านจุดตัดของระนาบอิกลิปติกกับอีควาเตอร์ของทรงกลมของท้องฟ้าที่จุด γ (Vernal equinox) ในวันที่ 21 มีนาคม และจุด Ω (Autumnal equinox) ในวันที่ 22 กันยายน ของทุกปี ระนาบอิกลิปติกจะทำมุม $23^{\circ} 26' 54''$ กับระนาบที่ผ่านอีควาเตอร์โดยที่แนวที่เกิดจากระนาบทั้งสองตัดกันจะผ่าน γ และ Ω ดังแสดงในรูปที่ 7 การที่ดวงอาทิตย์เคลื่อนที่ตามแนวอิกลิปติกโดยมีโลกหยุดนิ่งอยู่กับที่จะมีผลเหมือนกับการเคลื่อนที่ของโลกรอบดวงอาทิตย์ซึ่งหยุดนิ่งอยู่กับที่ เมื่อดวงอาทิตย์เคลื่อนที่มาอยู่ ณ ตำแหน่ง γ และ Ω จะเป็นตอนที่โลกอยู่ที่ตำแหน่งอิควินอกซ์ในฤดูใบไม้ผลิ (Spring equinox) และอิควินอกซ์ในฤดูใบไม้ร่วง (Autumn equinox) ตามลำดับ และเมื่อดวงอาทิตย์เคลื่อนที่มาอยู่ในตำแหน่งที่ห่างจากอีควาเตอร์ของทรงกลมของท้องฟ้าจะมากที่สุดของซีกเหนือและซีกใต้ของทรงกลมของท้องฟ้า จะเป็นตอนที่โลกอยู่ที่ตำแหน่งโซลสตีสน้ำร้อน (Summer solstice) และโซลสตีสน้ำหนาว (Winter Solstice)

- วงกลมชั่วโมง (Hour circle) คือวงกลมที่เกิดจากระนาบซึ่งผ่านขั้วเหนือ และขั้วใต้ของทรงกลมของท้องฟ้าตัดกับทรงกลมของท้องฟ้า และมีชื่อตามจุดสำคัญ ๆ ที่วงกลมนั้น ผ่าน เช่น วงกลมชั่วโมงของดวงอาทิตย์ คือวงกลมชั่วโมงที่ผ่านตำแหน่งของดวงอาทิตย์

- ซีนิต (Zenith) คือตำแหน่งบนทรงกลมของท้องฟ้าที่เกิดจากเส้นตั้งฉากที่ลากจากระนาบนอน ณ ตำแหน่งผู้สังเกตบนโลกตัดกับทรงกลมของท้องฟ้า เมื่อดวงอาทิตย์เคลื่อนที่มา อยู่ ณ ตำแหน่งซีนิต ดวงอาทิตย์จะอยู่เหนือหัวของผู้สังเกตพอดี

- เมอริเดียนประจำถิ่น (Local celestial meridian) หมายถึงวงกลม ชั่วโมงบนทรงกลมท้องฟ้า ซึ่งผ่านจุดซีนิตของท้องถิ่น



รูปที่ 8 ทรงกลมของท้องฟ้าแสดงมุมต่าง ๆ ที่ใช้กำหนดตำแหน่งของดวงอาทิตย์

การที่ผู้สังเกตบนโลกจะทราบตำแหน่งของดวงอาทิตย์ในขณะใดขณะหนึ่งได้ นอกจากเราจะต้องทราบตำแหน่งของดวงอาทิตย์บนทรงกลมของท้องฟ้าแล้ว เราจะต้องทราบตำแหน่งของทรงกลมของท้องฟ้าเทียบกับผู้สังเกตบนโลกด้วย ตำแหน่งของดวงอาทิตย์บนทรงกลมท้องฟ้าจะถูกกำหนดด้วยลองจิจูดของดวงอาทิตย์ (Longitude of the sun) L ซึ่งเป็นมุมระหว่างแนวที่เชื่อมโลกกับจุด γ และโลกกับดวงอาทิตย์ มุมนี้จะอยู่ในระนาบอีคลิปติกซึ่งเป็นระนาบทางโคจรของดวงอาทิตย์บนทรงกลมของท้องฟ้า มุม L นี้อาจจะเขียนอยู่ในรูปของมุม 2 มุม คือ มุม α

(right ascension) และมุม δ (declination) โดยที่มุม α คือมุมระหว่างวงกลมชั่วโมงของดวงอาทิตย์กับวงกลมชั่วโมงของ vernal equinox ส่วนมุม δ คือมุมที่เกิดจากแนวเชื่อมระหว่างโลกกับดวงอาทิตย์ทำกับอีควาเตอร์ของทรงกลมของท้องฟ้า โดยวัดตามแนววงกลมชั่วโมงของดวงอาทิตย์ ดังแสดงในรูปที่ 8 มุม α และ δ จะคำนวณได้จากมุม L และมุมระหว่างระนาบอีควาเตอร์ทำกับระนาบอีคลิปติก ϵ ซึ่งมีค่าเท่ากับ $23^{\circ} 26' 54''$ ตามสมการ [4]

$$\tan \alpha = \cos \epsilon \tan L \quad (3)$$

$$\sin \delta = \sin \epsilon \sin L \quad (4)$$

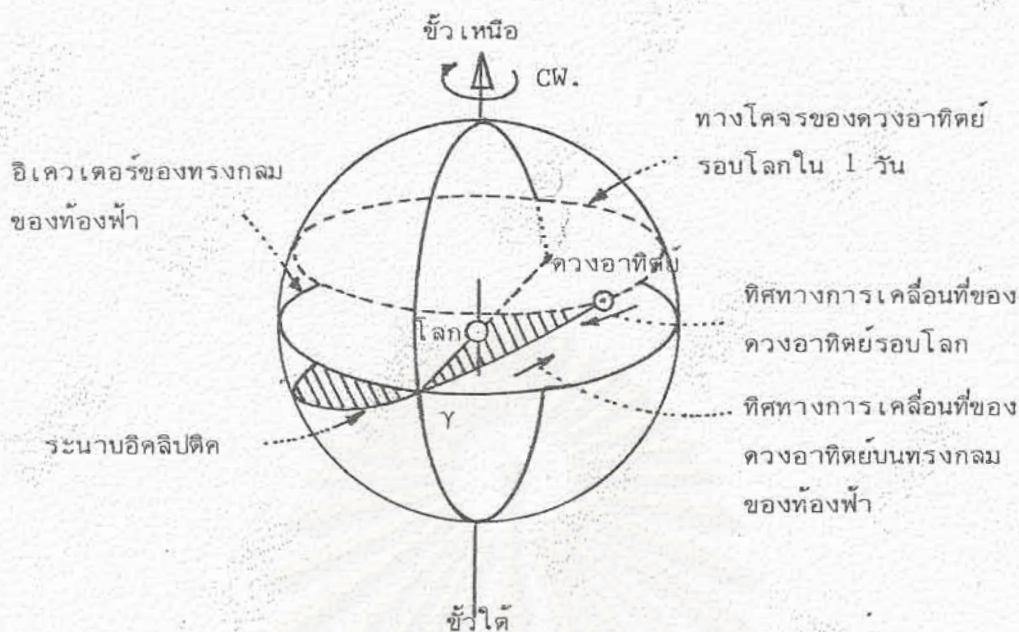
สำหรับการกำหนดตำแหน่งทรงกลมของท้องฟ้าเทียบกับตำแหน่งของผู้สังเกตบนโลก จะกำหนดได้จากมุมระหว่างเมอริเดียนประจำถิ่นกับวงกลมชั่วโมงของ vernal equinox (S) และมุมซึ่งแนวเชื่อมระหว่างโลกกับซีกฟ้าทำกับอีควาเตอร์โดยวัดตามแนวเมอริเดียน (ϕ) ซึ่งเราเรียก ϕ ว่า Local Latitude ดังแสดงในรูปที่ 8 มุม s และ ϕ จะทำให้เราทราบตำแหน่งซีกฟ้าของผู้สังเกตบนทรงกลมของท้องฟ้า จากความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งของดวงอาทิตย์กับตำแหน่งซีกฟ้าของผู้สังเกตทำให้เราทราบตำแหน่งของดวงอาทิตย์เทียบกับผู้สังเกตบนโลกได้ ตำแหน่งของดวงอาทิตย์เทียบกับซีกฟ้าจะกำหนดจากมุมที่รองรับส่วนโค้งบนทรงกลมของท้องฟ้าระหว่างดวงอาทิตย์กับซีกฟ้า ซึ่งเราเรียกว่าระยะทางซีกฟ้า (Zenith distance Z) และมุมระหว่างเมอริเดียนประจำถิ่นกับส่วนโค้งบนทรงกลมของท้องฟ้าระหว่างดวงอาทิตย์กับซีกฟ้า ซึ่งเราเรียกว่ามุมอาซิมุทประจำถิ่น (Local azimuthal angle A) ทั้งมุม Z และ A จะหาได้จากสมการ [4 9]

$$\cos Z = \sin \phi \sin \delta + \cos \phi \cos \delta \cos H \quad (5)$$

$$\sin A = \cos \delta \sin H / \sin Z \quad (6)$$

$$\text{เมื่อ } H = \alpha - s$$

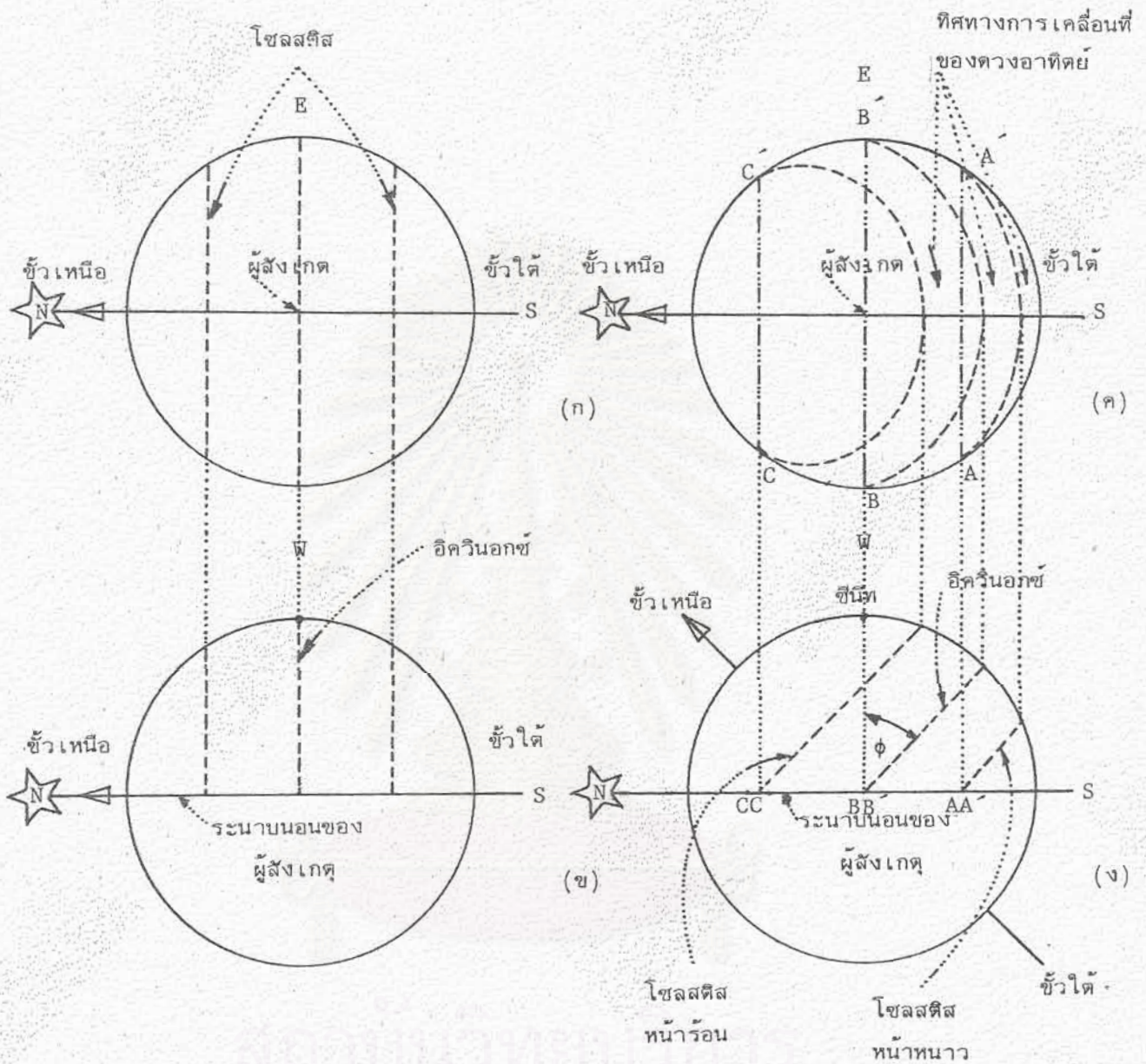
การหาทางโคจรของดวงอาทิตย์ในแต่ละวันจะหาได้จากการเคลื่อนที่ของดวงอาทิตย์รอบโลกเนื่องจากการหมุนของทรงกลมของท้องฟ้ารอบโลก กล่าวคือเนื่องจากการเคลื่อนที่ของดวงอาทิตย์บนทรงกลมท้องฟ้าจะช้ามาก เมื่อเทียบกับการหมุนของทรงกลมของท้องฟ้า ดังนั้นในแต่ละวันเราอาจจะถือได้ว่าตำแหน่งของดวงอาทิตย์บนทรงกลมของท้องฟ้าไม่เปลี่ยนแปลง และเมื่อทรงกลมของท้องฟ้าหมุนไปดวงอาทิตย์จะมีทางโคจรซึ่งเป็นวงกลมในระนาบซึ่งขนานกับระนาบของอีควาเตอร์ ดังแสดงในรูปที่ 9



รูปที่ 9 แสดงทางโคจรของดวงอาทิตย์รอบโลกเนื่องจากการหมุนของทรงกลมของท้องฟ้ารอบโลกในทิศทางตามเข็มนาฬิกา (CW)

จากลักษณะการเคลื่อนที่ของดวงอาทิตย์รอบโลกใน 1 วัน ดังแสดงในรูปที่ 9 เราอาจจะสามารถเขียนลักษณะของทางโคจรของดวงอาทิตย์รอบโลกเมื่อดวงอาทิตย์อยู่ที่ตำแหน่งต่าง ๆ ในระนาบอิกลิปติกได้ ในรูปที่ 10 ก และ 10 ข แสดงทางโคจรของดวงอาทิตย์เทียบกับผู้สังเกตซึ่งอยู่ที่เส้นแวงศูนย์ เมื่อเรามองในทิศทางที่ตั้งฉาก (รูปที่ 10 ก) และขนาน (รูปที่ 10 ข) กับระนาบนอนของผู้สังเกต ในรูปที่ 10 ค และ 10 ง แสดงภาพทางโคจรของดวงอาทิตย์เทียบกับผู้สังเกตซึ่งอยู่ที่ละติจูด ϕ° เหนือ เมื่อเรามองในทิศทางที่ตั้งฉาก (รูปที่ 10 ค) และขนาน (รูปที่ 10 ง) กับระนาบนอนของผู้สังเกตเช่นเดียวกันกับในรูปที่ 10 ก และ 10 ข จากรูปที่ 10 ง จะเห็นว่าระนาบของทางโคจรของดวงอาทิตย์ในฤดูกาลต่าง ๆ จะทำมุมกับแนวซิมิทของผู้สังเกตเท่ากับละติจูดของผู้สังเกต (ϕ) ทุกฤดู และแนวที่เกิดจากระนาบทางโคจรของดวงอาทิตย์ตัดกับระนาบนอนของผู้สังเกตบนโลกจะขนานกับแนวตะวันออก-ตะวันตกของผู้สังเกตทุกฤดูเช่นเดียวกัน แต่แนวตัดนั้นจะเคลื่อนที่อยู่ในแนวเหนือ-ใต้ตามฤดูกาล

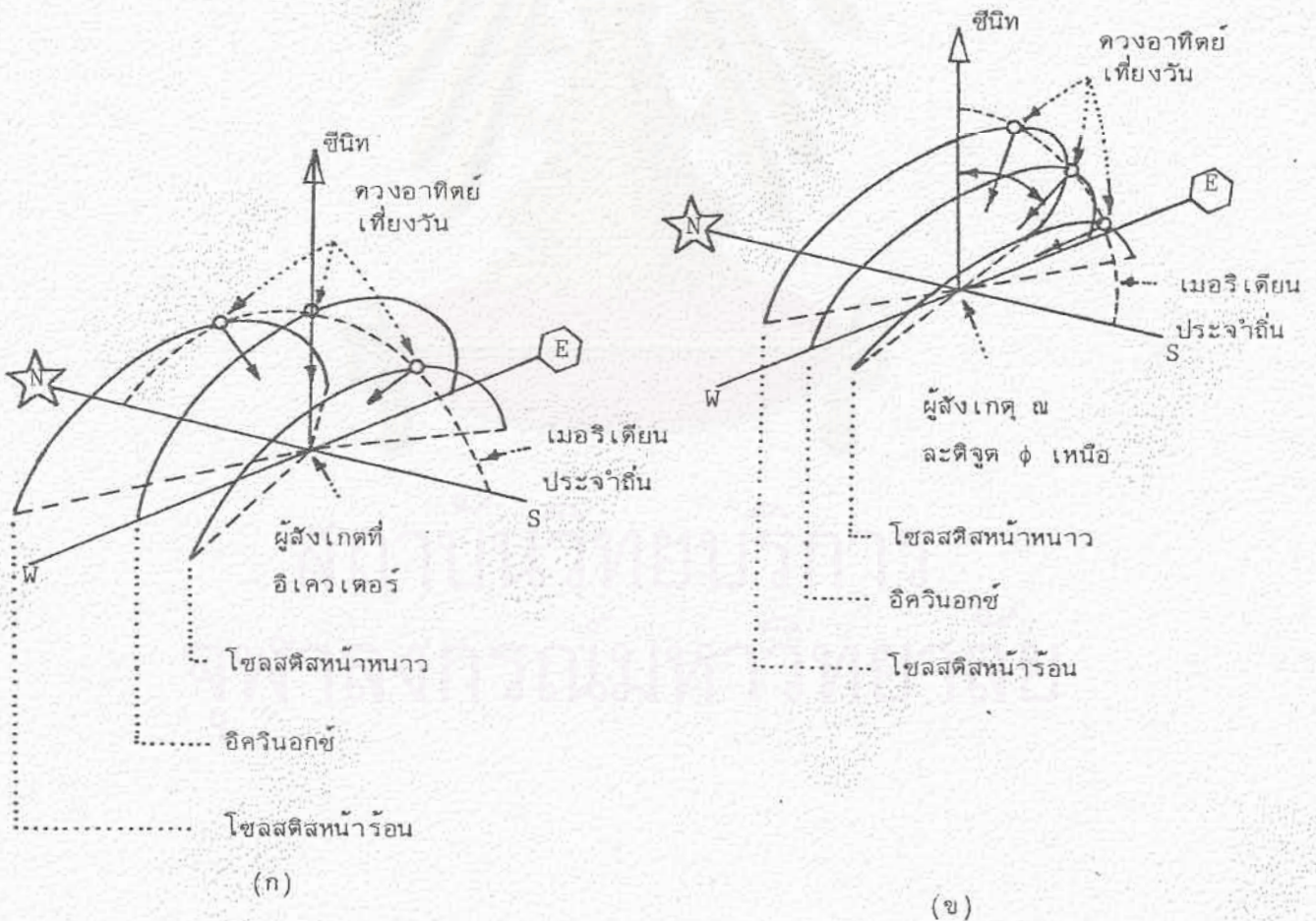
เราทราบว่าโลกหมุนรอบตัวเองด้วยความเร็วคงที่ แต่ถ้าเรากำหนดให้โลกหยุดนิ่งอยู่กับที่ ทรงกลมท้องฟ้าจะหมุนรอบโลกด้วยความเร็วคงที่ด้วย ดังนั้นความเร็วเชิงมุมของดวงอาทิตย์



รูปที่ 10 ทางโคจรของดวงอาทิตย์เทียบกับผู้สังเกตบนโลก ก,ข เมื่อผู้สังเกตอยู่ที่
 อิกเวเตอร์ ค,ง เมื่อผู้สังเกตอยู่ที่ละติจูด ϕ° เหนือ เมื่อโลกอยู่ที่
 อิกวีนอกซ์และไซลิสติส

รอบจุดตัดระหว่างระนาบการเคลื่อนที่ของดวงอาทิตย์กับแนวขั้วเหนือ-ขั้วใต้ของทรงกลม
 ของท้องฟ้าซึ่งผ่านผู้สังเกตบนโลก จะมีค่าคงที่ด้วย จากในรูป 10 ค และ
 10 ง จะเห็นได้ว่า ถ้าผู้สังเกตไม่ได้อยู่ที่อิกเวเตอร์ของโลก ส่วนของวงกลม
 ของทางโคจรของดวงอาทิตย์รอบโลกที่อยู่เหนือระนาบนอนของผู้สังเกต จะมีค่าเปลี่ยน

แปลงตามฤดูกาล กล่าวคือ เมื่อโลกอยู่ ณ ตำแหน่งโซลสติสหน้าร้อน ส่วนของวงกลมของทางโคจรที่อยู่เหนือระนาบนอนของผู้สังเกตจะมีค่ามากที่สุดและมีค่ามากกว่าครึ่งวงกลม เมื่อโลกอยู่ ณ ตำแหน่งอิควินอกซ์ ระนาบนอนจะแบ่งวงกลมของทางโคจรออกเป็นสองส่วนเท่า ๆ กัน และเมื่อโลกอยู่ ณ ตำแหน่งโซลสติสหน้าหนาว ส่วนของวงกลมของทางโคจรที่อยู่เหนือระนาบนอนจะมีค่าน้อยที่สุดและน้อยกว่าครึ่งวงกลม เนื่องจากเมื่อดวงอาทิตย์อยู่เหนือระนาบนอนของผู้สังเกตจะเป็นช่วงของเวลากลางวัน ดังนั้นจะเห็นได้ว่า เมื่อโลกอยู่ ณ ตำแหน่งโซลสติสหน้าร้อน ช่วงเวลากลางวันจะยาวที่สุด และจะลดน้อยลงเรื่อย ๆ เมื่อโลกอยู่ ณ ตำแหน่งอิควินอกซ์เวลากลางวันจะเท่ากับเวลากลางคืน และเมื่อโลกเคลื่อนที่มาอยู่ ณ ตำแหน่งโซลสติสหน้าหนาวช่วงเวลากลางวันจะสั้นที่สุด



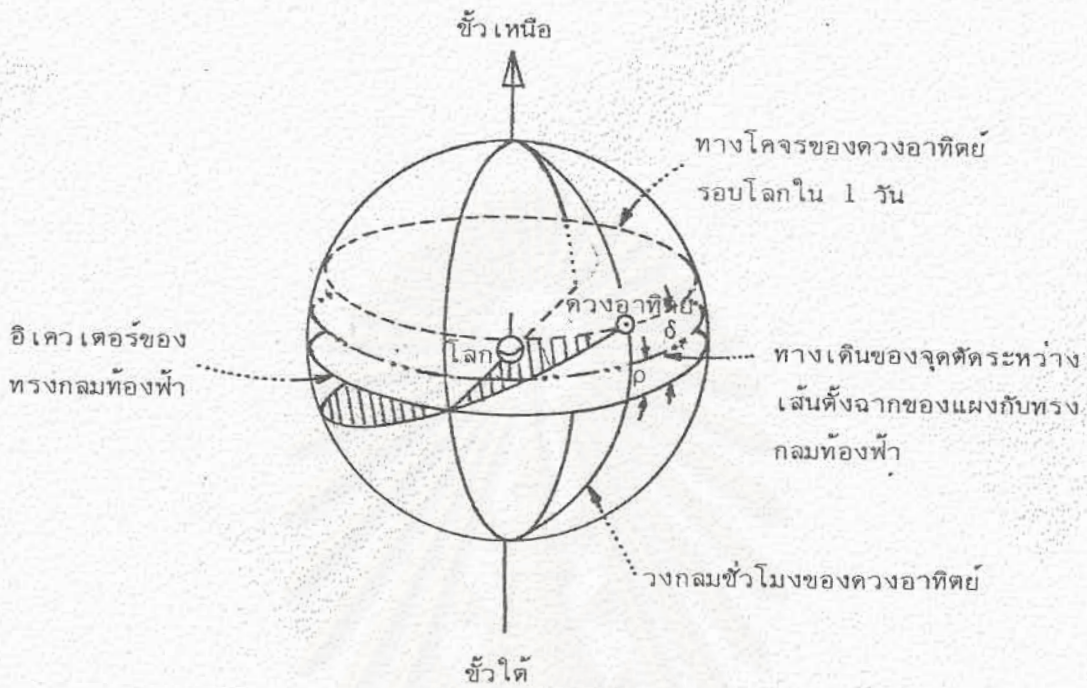
รูปที่ 11 แสดงทางโคจรของดวงอาทิตย์เทียบกับผู้สังเกตที่อิควาเตอร์ในรูป ก และเทียบกับผู้สังเกตที่ละติจูด ϕ° เหนือในรูป ข

ในรูปที่ 11 ก แสดงทางโคจรของดวงอาทิตย์เทียบกับผู้สังเกตบนโลกซึ่งอยู่ที่อีควีเตอร์ เมื่อโลกอยู่ที่ตำแหน่งไซลิสติสและอัครินอกซ์ จะเห็นได้ว่าตำแหน่งของดวงอาทิตย์ตอนเที่ยงวันจะอยู่บนแนว เมอริเดียนประจำถิ่นตลอดทั้งปี แต่ดวงอาทิตย์ตอนเที่ยงวันจะอยู่ที่ซีกเฉพาะในตอนของโลกอยู่ที่ตำแหน่งอัครินอกซ์เท่านั้น คือในตอนที่ดวงอาทิตย์อยู่ที่ตำแหน่ง γ และ Ω บนทรงกลมของท้องฟ้า เมื่อดวงอาทิตย์อยู่ทางซีกเหนือของทรงกลมท้องฟ้า ผู้สังเกตที่อีควีเตอร์จะเห็นดวงอาทิตย์เที่ยงวันเอียงไปทางทิศเหนือ และเมื่อดวงอาทิตย์อยู่ทางซีกใต้ของทรงกลมท้องฟ้า ผู้สังเกตที่อีควีเตอร์จะเห็นดวงอาทิตย์เที่ยงวันเอียงไปทางทิศใต้ โดยที่มุมระหว่างดวงอาทิตย์กับซีกในตอนเที่ยงวันจะมีค่าเท่ากับ δ (declination) (ดังแสดงในรูปที่ 8) ในรูปที่ 11 ข แสดงทางโคจรของดวงอาทิตย์เทียบกับผู้สังเกตบนโลกซึ่งอยู่ที่ละติจูด ϕ° เหนือ จะเห็นได้ว่าตำแหน่งของดวงอาทิตย์ตอนเที่ยงวันจะอยู่บนแนว เมอริเดียนประจำถิ่น เช่นเดียวกับในกรณีที่ผู้สังเกตที่อีควีเตอร์ แต่ดวงอาทิตย์ตอนเที่ยงวันจะไม่อยู่ซีกในตอนที่ดวงอาทิตย์อยู่ที่ตำแหน่ง γ หรือ δ แต่จะเกิดขึ้นในช่วงเวลาที่ดวงอาทิตย์อยู่ค่อนไปทางซีกเหนือของทรงกลมท้องฟ้าเท่ากับมุมของละติจูด (ϕ) และจะเกิดขึ้นได้เฉพาะในกรณีที่ผู้สังเกตอยู่ที่ละติจูดไม่เกิน $23^{\circ} 26' 54''$ เหนือ ถ้าผู้สังเกตอยู่สูงกว่าละติจูด $23^{\circ} 26' 54''$ เหนือ ทางโคจรของดวงอาทิตย์จะอยู่เอียงมาทางทิศใต้ของซีกตลอดปี สำหรับผู้สังเกตที่อยู่ทางซีกโลกใต้ เราก็สามารถคำนวณหาทางโคจรของดวงอาทิตย์ เช่นเดียวกันกับในกรณีที่ผู้สังเกตอยู่ทางซีกโลกเหนือ และจะให้ผลเหมือนกันเพียงแต่จะมีช่วงเวลาแตกต่างกันครึ่งปี

ในกรณีที่เรามีการติดตามดวงอาทิตย์เฉพาะในแนวตะวันออกตะวันตกโดยที่แกนหมุนอยู่ในระนาบนอนและเอียงแฉงให้เส้นตั้งฉากของแฉง ทำมุม $90-\rho$ กับแกนหมุนแล้ว เราสามารถคำนวณหามุมระหว่างแนวตั้งฉากของแฉงกับแนวทิศทางของดวงอาทิตย์ที่เวลาต่าง ๆ กันได้ ในกรณีที่แกนหมุนของแฉงหมุนด้วยความเร็วคงที่

ถ้าระบบดังกล่าวอยู่ที่อีควีเตอร์แกนหมุนของระบบติดตามดวงอาทิตย์จะขนานกับแนวเหนือใต้ของทรงกลมท้องฟ้า และถ้าหากเราให้เส้นตั้งฉากของแฉงทำมุม $90-\rho$ กับแกนหมุนแล้ว จุดตัดระหว่างเส้นตั้งฉากของแฉงกับทรงกลมท้องฟ้าจะอยู่ในระนาบที่ขนานกับระนาบการโคจรของดวงอาทิตย์รอบโลกในแต่ละวัน ดังแสดงในรูปที่ 12 และ 14 ก และ ข

ถ้าเราให้ $\rho = \delta$ จะเห็นได้ว่าทางเดินของจุดตัดระหว่างเส้นตั้งฉากของแฉงกับทรงกลมท้องฟ้าจะทับกับทางโคจรของดวงอาทิตย์รอบโลกใน 1 วัน ดังนั้นถ้าเราให้เส้นตั้งฉากของแฉงอยู่ในแนววงกลมขั้วโอมของดวงอาทิตย์และหมุนไปในทิศทางเดียวกับดวงอาทิตย์ด้วยความ



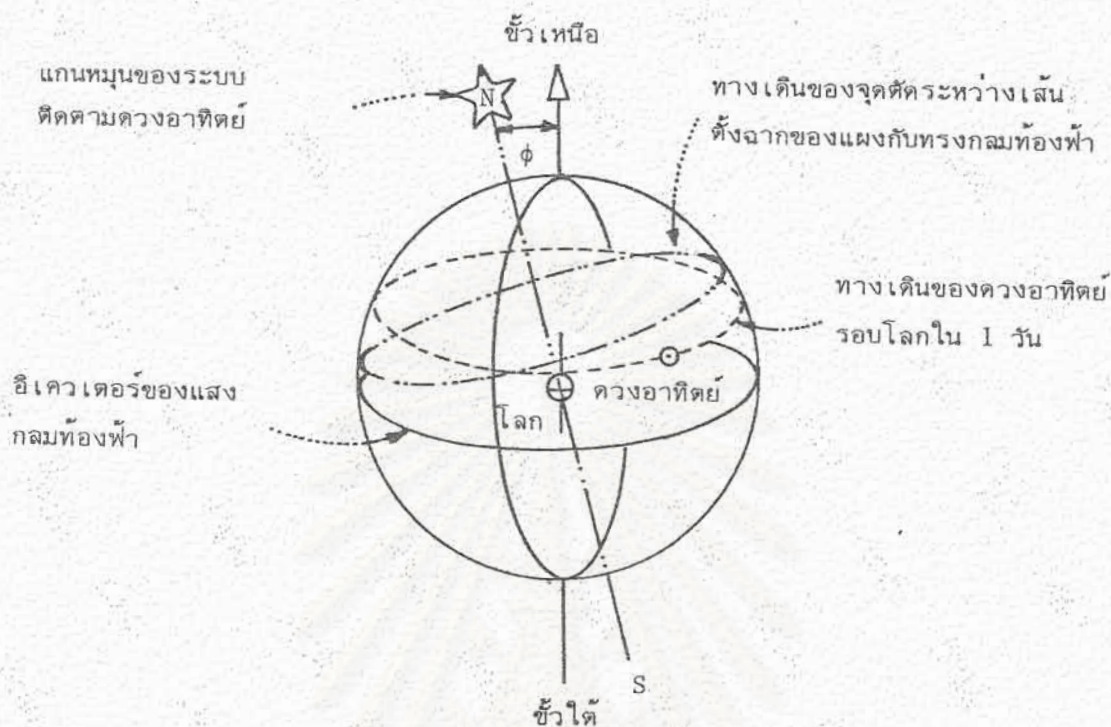
รูปที่ 12 แสดงทางเดินของจุดตัดระหว่างเส้นตั้งฉากของแผงกับทรงกลมท้องฟ้าเมื่อเส้นตั้งฉากของแผงเอียงทำมุม $90-\rho$ กับแกนหมุนซึ่งอยู่ในแนวเหนือใต้ของทรงกลมท้องฟ้า (ระบบอยู่ที่อีควาเตอร์)

เร็วเท่ากัน ตำแหน่งของดวงอาทิตย์จะอยู่ในแนวตั้งฉากกับแผงตลอดเวลา

ในกรณีที่ระบบอยู่ที่ละติจูด ϕ° เหนือ โดยที่แกนหมุนอยู่ในระนาบนอนแล้วแกนหมุนของระบบติดตามดวงอาทิตย์จะทำมุม ϕ กับแนวเหนือใต้ของทรงกลมท้องฟ้า ดังแสดงในรูปที่ 13 และ 14 ง

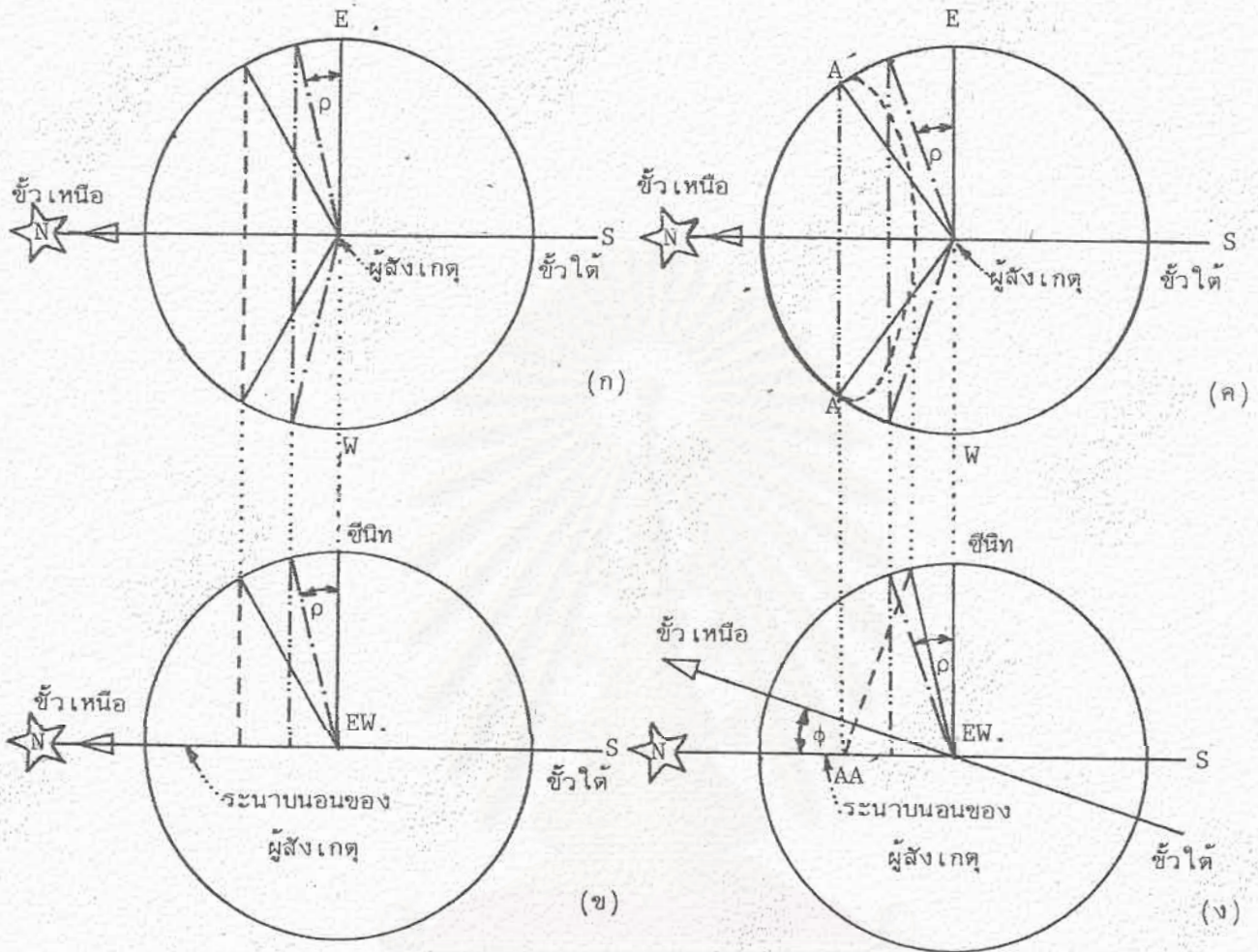
จากรูปที่ 13 และ 14 ง เราจะเห็นได้ว่า ระนาบของจุดตัดระหว่างเส้นตั้งฉากของแผงกับทรงกลมของท้องฟ้าจะไม่ขนานกับระนาบของทางโคจรของดวงอาทิตย์รอบโลก ดังนั้นถ้า ρ มีค่าคงที่ตลอดเวลา เราจะไม่สามารถทำให้ดวงอาทิตย์อยู่ในแนวตั้งฉากของแผงได้ตลอดวัน แต่มุมระหว่างแนวตั้งฉากของแผงกับทิศทางของดวงอาทิตย์จะเปลี่ยนกับเวลา

รูปที่ 14 แสดงทางโคจรของดวงอาทิตย์และโลกัสของจุดตัดระหว่างเส้นตั้งฉากของแผง เซลล์แสงอาทิตย์กับทรงกลมของท้องฟ้า เมื่อแกนหมุนของระบบติดตามดวงอาทิตย์ขนานกับระนาบ



รูปที่ 13 แสดงทางเดินของจุดตัดระหว่างเส้นตั้งฉากของแผงกับทรงกลมท้องฟ้า เมื่อเส้นตั้งฉากของแผงเอียงทำมุม $90-\rho$ กับแกนหมุนซึ่งทำมุม ϕ กับแนวเหนือใต้ของทรงกลมท้องฟ้า (ระบบอยู่ที่ละติจูด ϕ° เหนือ)

ของที่ตั้งระบบ และอยู่ในแนวเหนือใต้ รูปที่ 14 ก และ ข จะเป็นกรณีที่ระบบอยู่ที่อีควาเตอร์ โดยรูปที่ 14 ก เป็นกรณีที่เรามองตั้งฉากกับระนาบของที่ตั้งระบบ และรูปที่ 14 ข เป็นกรณีที่เรามองขนานกับระนาบที่ตั้งระบบ เราจะเห็นได้ว่าระนาบทางโคจรของดวงอาทิตย์และระนาบของโลกทั้งสองของจุดตัดระหว่างเส้นตั้งฉากของแผงเซลล์แสงอาทิตย์กับทรงกลมของท้องฟ้าจะขนานกัน รูปที่ 14 ค และ ง จะเป็นกรณีที่ระบบอยู่ที่ละติจูดที่ ϕ° เหนือ โดยรูปที่ 14 ค จะเป็นกรณีที่เรามองตั้งฉากกับระนาบของที่ตั้งระบบ และรูปที่ 14 ง เป็นกรณีที่เรามองขนานกับระนาบที่ตั้งระบบ เราจะเห็นได้ว่าระนาบทางโคจรของดวงอาทิตย์และระนาบของโลกทั้งสองของจุดตัดระหว่างเส้นตั้งฉากของแผงเซลล์แสงอาทิตย์กับทรงกลมของท้องฟ้าจะทำมุมกันเท่ากับละติจูดของที่ตั้งระบบ ตำแหน่งของจุดตัดระหว่างแนวตั้งฉากของแผงเซลล์แสงอาทิตย์กับทรงกลมของท้องฟ้า



----- ระนาบของทางโคจรของดวงอาทิตย์
 ————— ระนาบของจุดตัดระหว่างเส้นตั้งฉากของแผงเซลล์กับทรงกลมของท้องฟ้า
 แสงอาทิตย์กับทรงกลมของท้องฟ้า

รูปที่ 14 ระนาบทางโคจรของดวงอาทิตย์ และโลกลัษของจุดตัดระหว่างเส้นตั้งฉากของแผง

เซลล์กับทรงกลมของท้องฟ้า เมื่อผู้สังเกตอยู่ที่อีควาเตอร์

(ก) เมื่อมองตั้งฉากกับระนาบนอน

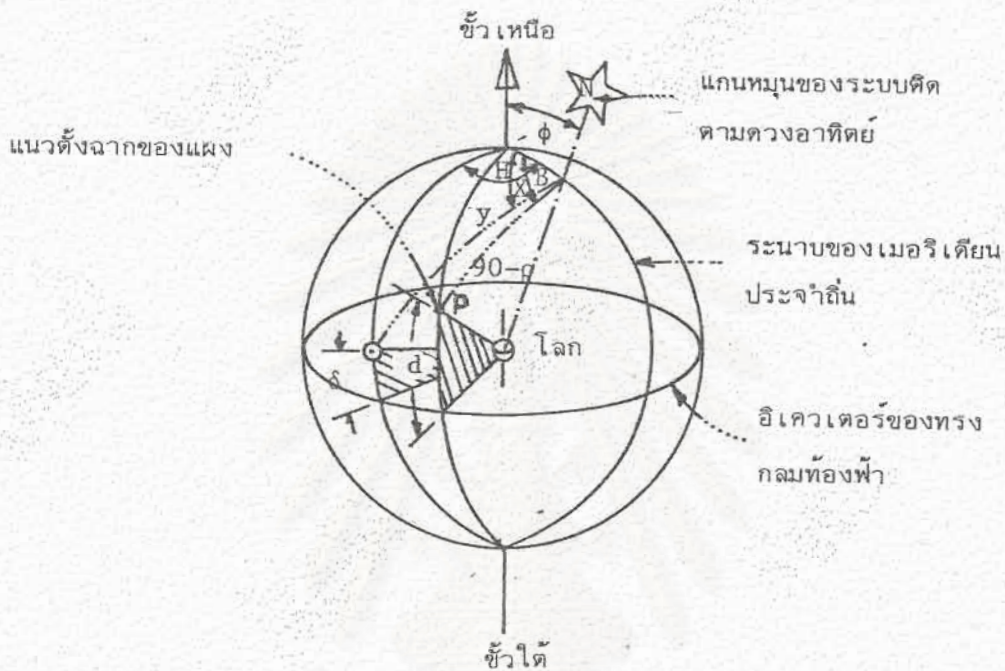
(ข) เมื่อมองขนานกับระนาบนอน

และเมื่อผู้สังเกตอยู่ที่ละติจูด ϕ° เหนือ

(ค) เมื่อมองตั้งฉากกับระนาบนอน

(ง) เมื่อมองขนานกับระนาบนอน

(p) จะถูกกำหนดด้วยมุมระหว่างเส้นตั้งฉากของแผงเซลล์แสงอาทิตย์กับแกนหมุน $(90-p)$ มุมระหว่างระนาบที่เกิดจากแนวตั้งฉากของแผงและแกนหมุนกับระนาบของเมอริเดียนประจำถิ่น (B) และมุม ϕ ดังแสดงในรูปที่ 15



รูปที่ 15 แสดงมุมต่าง ๆ ที่ใช้กำหนดตำแหน่งของจุดติดตั้งระหว่างแนวตั้งฉากของแผงเซลล์และทรงกลมของท้องฟ้า (p)

สำหรับตำแหน่งของดวงอาทิตย์นั้นจะถูกกำหนดด้วยมุม δ (declination) และมุมระหว่างวงกลมชั่วโมงของดวงอาทิตย์กับเมอริเดียนประจำถิ่น (H) ซึ่งจะมีค่าเท่ากับ $180-H$ การกำหนดตำแหน่งของดวงอาทิตย์เทียบกับแกนหมุนของระบบติดตามดวงอาทิตย์ซึ่งเอียงทำมุม ϕ กับแกนหมุนของโลกตามแนวของระนาบเมอริเดียนประจำถิ่นเราจะกำหนดด้วยมุมระหว่างทิศทางของดวงอาทิตย์กับแกนหมุน (y) และมุมระหว่างระนาบที่เกิดจากแนวของดวงอาทิตย์และแกนหมุนของระบบติดตามดวงอาทิตย์ทำกับระนาบเมอริเดียนประจำถิ่น (x) ซึ่งทั้งมุม y และ x จะหาได้จากมุม ϕ , δ และ H โดยอาศัยกฎของโคไซน์นทางตรีโกณมิติของทรงกลม (Cosine rule of spherical trigonometry) [9] ตามสมการ

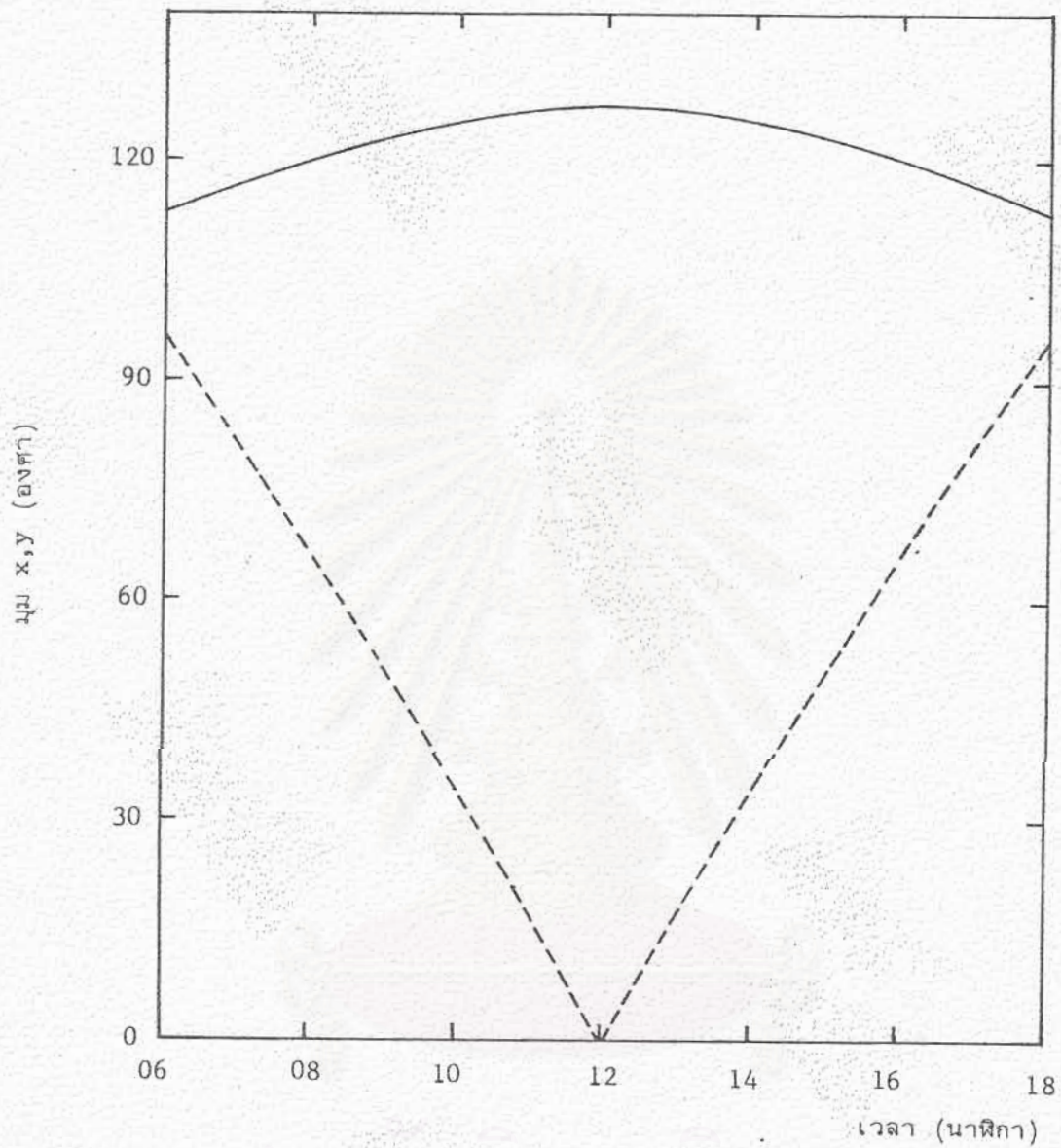
$$\cos y = \cos \phi \sin \delta - \sin \phi \cos \delta \cos H \quad (7)$$

$$\cos x = \frac{\sin \delta - \cos y \cos \phi}{\sin y \sin \phi} \quad (8)$$

เนื่องจาก ϕ จะมีค่าคงที่เท่ากับค่าละติจูดของที่ตั้งระบบส่วน δ จะมีค่าคงที่โดยประมาณในแต่ละวันดังนั้น y และ x จะมีค่าเปลี่ยนแปลงตามมุม H และมุม H จะมีค่าเปลี่ยนแปลงตามเวลามาตรฐาน (standard time) คือมีค่า 90° เมื่อเวลา 6.00 น. และจะลดลง 15 องศาต่อชั่วโมงจนมีค่าเป็นศูนย์ตอนเที่ยงวันและกลับเพิ่มเป็น 90 องศา เมื่อเวลา 18.00 น.

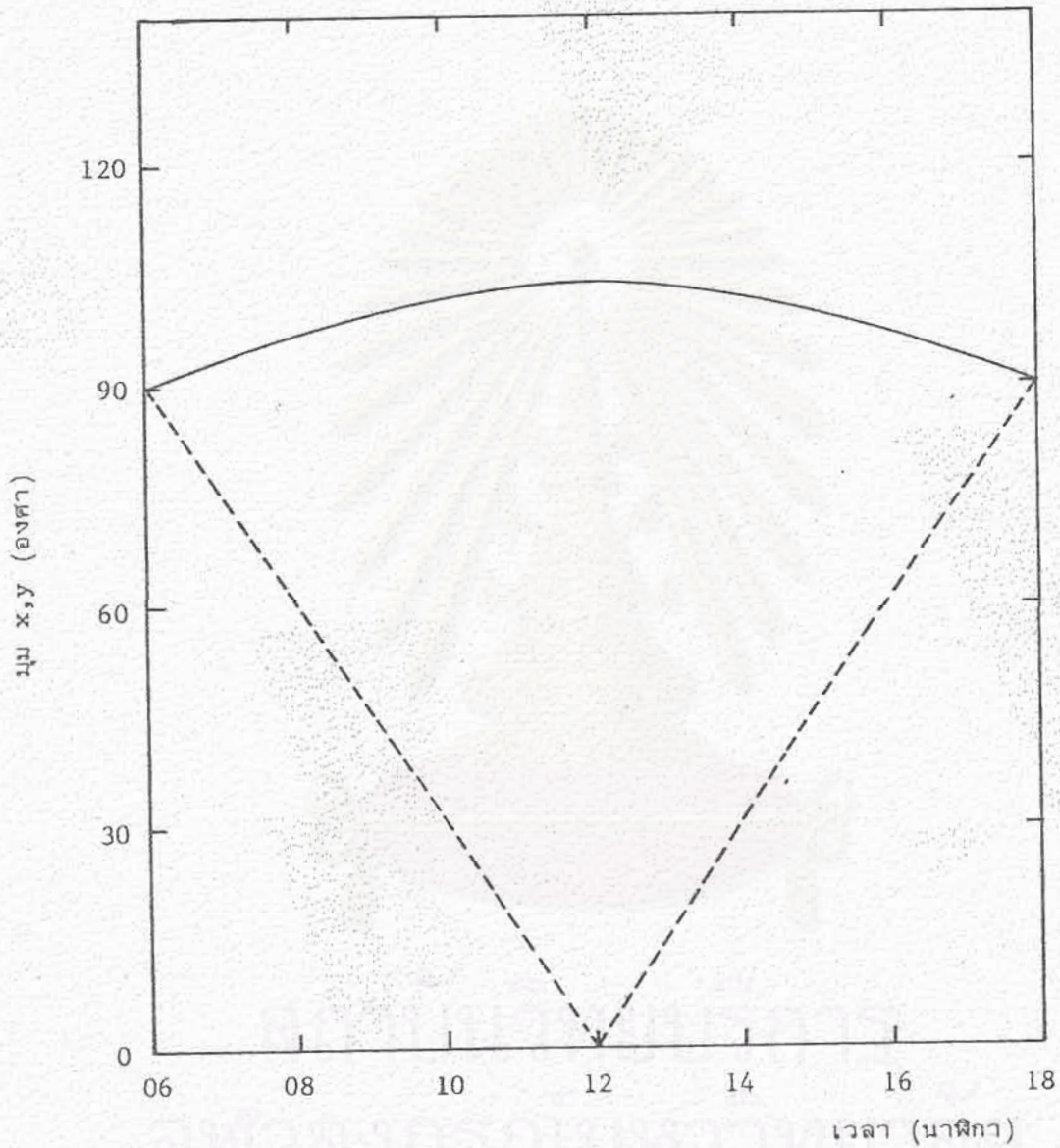
ในกรณีที่เราไม่คิดผลของสมการเวลา (equation of time) ในรูปที่ 16-19 แสดงการเปลี่ยนแปลงของ y และ x กับเวลาดวงอาทิตย์ ในกรณีที่โลกอยู่ที่ตำแหน่งโซลสติสหน้าหนาว ตำแหน่งอิควินอกซ์และตำแหน่งโซลสติสหน้าร้อน สำหรับระบบซึ่งตั้งอยู่ที่ละติจูดที่ 13.7 องศาเหนือ คือที่กรุงเทพฯ





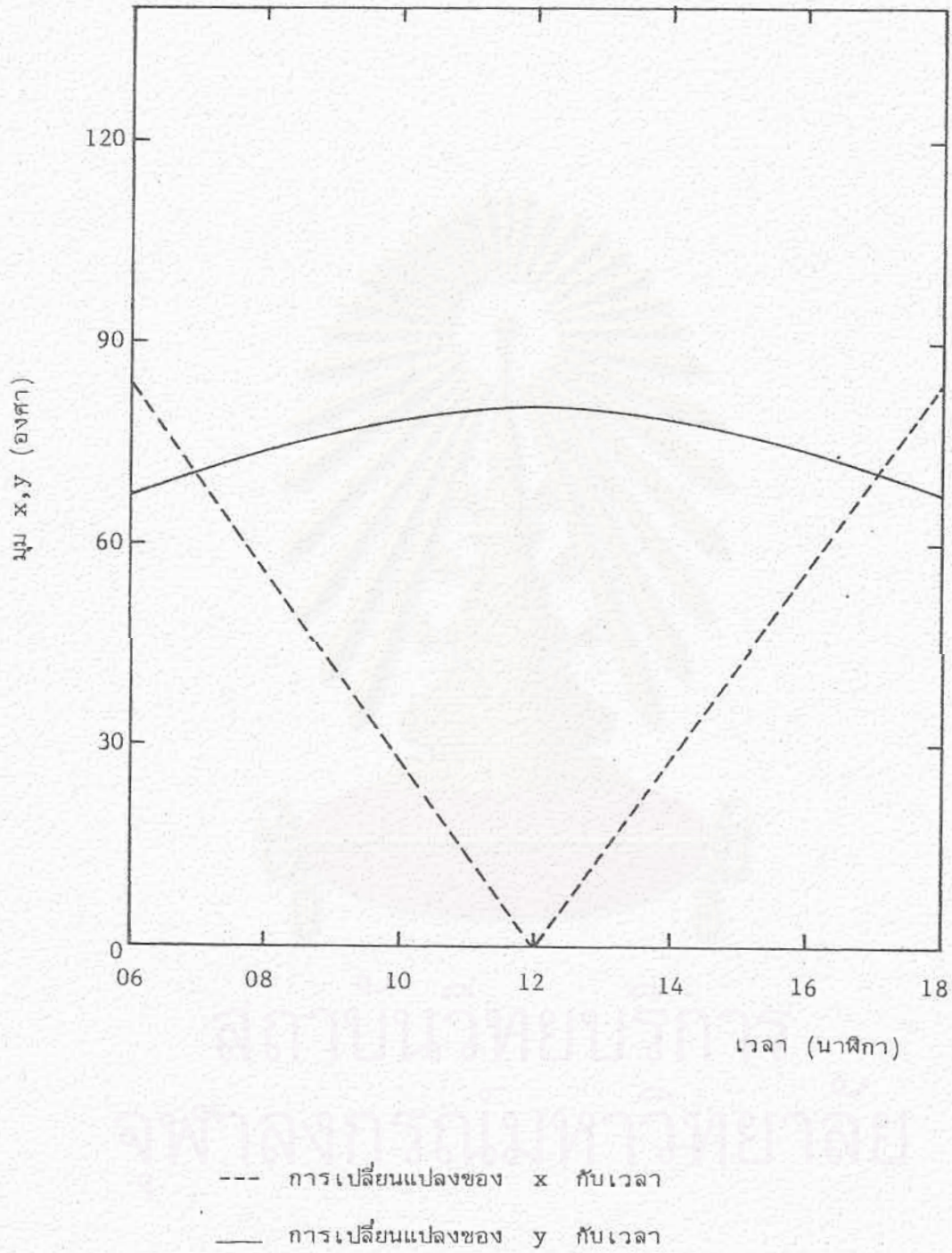
--- การเปลี่ยนแปลงของ x กับเวลา
 — การเปลี่ยนแปลงของ y กับเวลา

รูปที่ 16 แสดงการเปลี่ยนแปลงของทิศทางของดวงอาทิตย์เทียบกับแกนหมุนที่ขนานกับระนาบนอน และอยู่ในแนวเหนือใต้ (y) และมุมระหว่างระนาบที่เกิดจากแนวของดวงอาทิตย์และแกนหมุน ทำกับระนาบเมอริเดียนประจำถิ่น (x) เมื่อโลกอยู่ที่ตำแหน่งโซลสตีลหน้าหนาว



- การเปลี่ยนแปลงของ x กับเวลา
 — การเปลี่ยนแปลงของ y กับเวลา

รูปที่ 17 แสดงการเปลี่ยนแปลงของทิศทางของดวงอาทิตย์เทียบกับแกนหมุนที่ขนานกับระนาบนอน และอยู่ในแนวเหนือใต้ (y) และมุมระหว่างระนาบที่เกิดจากทิศของดวงอาทิตย์และแกนหมุนของระบบทำกับระนาบเมอริเดียนประจำถิ่น (x) เมื่อโลกอยู่ที่ตำแหน่งอิควินอกซ์



รูปที่ 18 แสดงการเปลี่ยนแปลงของทิศทางของดวงอาทิตย์เทียบกับแกนหมุนที่ขนานกับระนาบนอน และอยู่ในแนวเหนือ-ใต้ (y) และมุมระหว่างระนาบที่เกิดจากแนวของดวงอาทิตย์และแกนหมุนทำกับระนาบเมอริเดียนประจำถิ่น (x) เมื่อโลกอยู่ที่ตำแหน่งไซลส์ติสหน้าร้อน

3. ระบบควบคุมการติดตามดวงอาทิตย์สำหรับแผง เซลล์แสงอาทิตย์แบบแผงราบ

3.1 เหตุผลในการใช้ระบบติดตามดวงอาทิตย์สำหรับเซลล์แบบแผงราบ

ในการใช้แผง เซลล์แสงอาทิตย์แบบแผงราบ ปรกติแล้วเราจะติดตั้งแผง เซลล์แสงอาทิตย์ อยู่กับที่ และให้ระนาบของแผง เซลล์เอียงทำมุมกับระนาบนอนในแนวเหนือ-ใต้ ใกล้เคียงกับค่าละติจูด ของสถานที่ตั้ง [10] โดยเอียงไปทางทิศใต้สำหรับสถานที่ซึ่งอยู่ในซีกโลกเหนือ และเอียงไปทาง เหนือสำหรับสถานที่ซึ่งอยู่ในซีกโลกใต้ การติดตั้งแผง เซลล์แสงอาทิตย์อยู่กับที่จะทำได้ง่าย ราคาถูก และต้องการการบำรุงรักษาน้อย แต่พลังงานที่แผง เซลล์แสงอาทิตย์ได้รับจะลดย่างมากในช่วงเช้า และช่วงบ่าย อันเนื่องมาจากสาเหตุสองประการคือ

ก) เมื่อแสงอาทิตย์ผ่านบรรยากาศของโลก จะมีบางส่วนที่ถูกดูดกลืน บางส่วนจะ มีการสะท้อนและกระจายไปทำให้ความเข้มของแสงอาทิตย์ที่มาถึงผิวโลกลดลง อัตราการลดลงจะ เพิ่มขึ้นกับระยะทางที่ผ่านบรรยากาศของโลก เมื่อดวงอาทิตย์เอียงทำมุมกับแนวตั้งฉากของระนาบ นอนมากขึ้น จะทำให้ระยะทางของบรรยากาศที่แสงต้องเดินทางผ่านมีค่าเพิ่มขึ้น ในตารางที่ 2 แสดงการเปลี่ยนแปลงของความเข้มของแสงอาทิตย์ (I เป็น kw/m^2) กับมุมที่ดวงอาทิตย์ทำกับ เส้นตั้งฉากของระนาบนอน (θ เป็นองศา) [11]

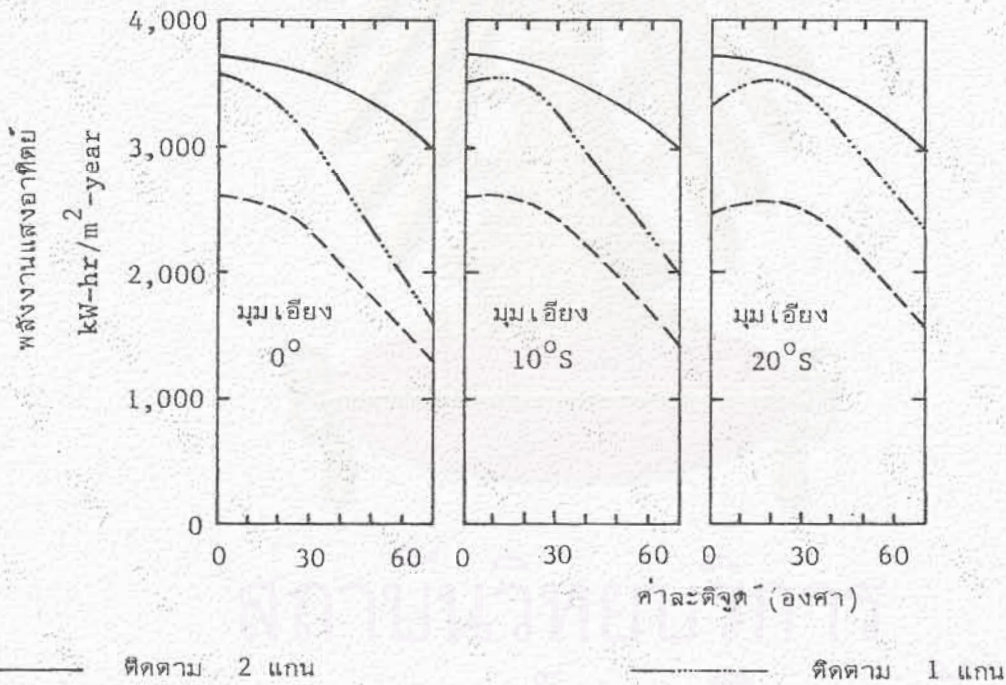
| | | | | | | | | |
|----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| θ | 0 | 10 | 20 | 30 | 40 | 45 | 50 | 55 |
| I | 1.07 | 1.06 | 1.05 | 1.03 | 0.993 | 0.968 | 0.939 | 0.903 |
| θ | 60 | 70 | 75 | 80 | 85 | 87 | 88 | |
| I | 0.855 | 0.717 | 0.603 | 0.451 | 0.233 | 0.142 | 0.095 | |

ตารางที่ 2 แสดงการเปลี่ยนแปลงของความเข้มของแสงอาทิตย์ กับมุมที่ดวงอาทิตย์ทำกับแนว ตั้งฉากของระนาบนอน

เนื่องจากมุม θ จะเปลี่ยนแปลงกับเวลาทุกวัน โดยจะมีค่าน้อยตอนเที่ยง ๆ และ จะมีค่ามากช่วงเช้า และบ่ายทำให้ความเข้มของแสงอาทิตย์ลดลงในช่วงเช้าและบ่าย การลดลง ของความเข้มของแสงอาทิตย์เนื่องจากผลของบรรยากาศนี้ เราไม่สามารถจะแก้ไขได้

ข) สาเหตุของการลดลงของความเข้มของแสงอาทิตย์บนแผง เซลแสงอาทิตย์อีกอย่างหนึ่ง เกิดจากการที่ดวงอาทิตย์เอียงทำมุมกับแนวตั้งฉากของแผง เซลแสงอาทิตย์ ตามกฎของโคไซน์ (cosine law) การลดลงของแสงอาทิตย์แบบนี้ เราสามารถแก้ไขได้ โดยใช้ระบบควบคุมการติดตามดวงอาทิตย์ เพื่อให้ระนาบของแผง เซลตั้งฉากกับทิศทางของดวงอาทิตย์

ได้มีการคำนวณเปรียบเทียบปริมาณแสงอาทิตย์ที่ตกบนระนาบของตัวรับแสง ในกรณีที่มีการติดตามดวงอาทิตย์แบบ 2 แกน กรณีที่มีการติดตามแบบแกนเดียว (ในแนวตะวันออก-ตะวันตก) และแบบติดตั้งอยู่กับที่ โดยมีมุมเอียงของแผง เซลคงที่สำหรับค่าต่าง ๆ กัน การคำนวณนั้นจะไม่คิดผลของสภาพอากาศของท้องถิ่น ดังแสดงในรูปที่ 19 ซึ่งเป็นกรณีที่มีมุมเอียงของแผงมีค่า 0, 10 และ 20 องศาได้ [1] จะเห็นได้ว่าการหมุนแผง เซลตามดวงอาทิตย์ จะทำให้ได้รับพลังงานเฉลี่ยต่อปีเพิ่มขึ้นจากกรณีติดตั้งแผง เซลอยู่กับที่ (โดยมีมุมเอียง ของแผง เซลเท่ากับค่าละติจูด) มากกว่า 40%



รูปที่ 19 กราฟเปรียบเทียบพลังงานที่แผงรับแสงอาทิตย์ได้รับในกรณีที่มีการติดตามดวงอาทิตย์แบบแกนเดียวแบบ 2 แกน และแบบติดตั้งอยู่กับที่

ในกรณีที่เราคิดถึงผลของสภาพอากาศของท้องถิ่น จะทำให้ความแตกต่างของปริมาณแสงที่ได้รับในกรณีที่มีการติดตามดวงอาทิตย์ และแบบติดตั้งอยู่กับที่ลดลง ทั้งนี้เพราะปริมาณแสงตรง (direct radiation) จะลดลง เนื่องจากผลของเมฆ และความแตกต่างจะลดลงอีก

ถ้าเราคิดรวมผลของพลังงานที่ใช้กับระบบติดตามดวงอาทิตย์ด้วย แต่อย่างไรก็ดี ได้มีการแสดงให้เห็นถึงข้อดีในการใช้ระบบติดตามดวงอาทิตย์สำหรับเซลล์แบบแผงราบ [12] และได้มีการใช้ระบบติดตามดวงอาทิตย์สำหรับเซลล์แบบแผงราบขนาดใหญ่ (1 เมกะวัตต์) แล้ว [13]

3.2 แนวความคิดในการเลือกระบบ

ในการเลือกระบบติดตามดวงอาทิตย์สำหรับ เซลล์แสงอาทิตย์แบบแผงราบ เราจะต้องคำนึงถึงความเหมาะสมดังนี้คือ

- ระบบควบคุมที่ใช้ควรจะใช้พลังงานน้อย เพื่อจะได้นำพลังงานที่ได้เพิ่มจากการใช้ระบบติดตามดวงอาทิตย์ไปใช้ประโยชน์มากที่สุด ซึ่งจะเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพของระบบ
- ระบบที่ใช้ควรจะเป็นระบบที่ง่ายและต้องการบำรุงรักษาน้อย โดยเฉพาะระบบที่มีขนาดเล็กและอยู่ห่างไกล ซึ่งการบำรุงรักษาจะทำได้ยาก
- ระบบที่ใช้ไม่มีความจำเป็นต้องมีความแม่นยำมากนัก ทั้งนี้เพราะการลดลงของปริมาณแสงที่แผงเซลล์แสงอาทิตย์ได้รับจะมีค่าน้อยเมื่อดวงอาทิตย์ทำมุมน้อย ๆ กับแนวตั้งฉากของแผงเซลล์ ยกตัวอย่างเช่น ถ้าดวงอาทิตย์ทำมุม 15 องศา กับแนวตั้งฉากของแผง ปริมาณแสงที่มาจากดวงอาทิตย์โดยตรง (direct radiation) จะลดลงประมาณ 4.4% เท่านั้น แต่เนื่องจากปริมาณแสงตรงจากดวงอาทิตย์ในประเทศไทยจะมีค่าเฉลี่ยประมาณ 50% ของปริมาณแสงอาทิตย์ทั้งหมด [2] ดังนั้นการลดลงของปริมาณแสงเนื่องจากความผิดพลาดในการติดตามดวงอาทิตย์ 15 องศา จะทำให้ปริมาณของแสงลดลงน้อยกว่า 2% เท่านั้น

จากการศึกษาลักษณะทางโคจรของดวงอาทิตย์ในหัวข้อ 2.3 เราจะเห็นได้จากรูปที่ 16 ถึง 18 ว่า การเปลี่ยนแปลงของมุม x และ y กับเวลาจะมีลักษณะใกล้เคียงกับการเปลี่ยนแปลงแบบเส้นตรง ซึ่งเป็นเครื่องบ่งชี้ให้เห็นว่า เราอาจจะใช้วิธีการติดตามดวงอาทิตย์แบบวงรอบเปิด ที่ใช้ข้อมูลเกี่ยวกับตำแหน่งดวงอาทิตย์โดยวิธีการประมาณการเคลื่อนที่ของดวงอาทิตย์ด้วยสมการเส้นตรงซึ่งมีเวลาเป็นตัวแปรอิสระ เพื่อให้ทราบถึงความคลาดเคลื่อนในการติดตามดวงอาทิตย์โดยวิธีการประมาณดังกล่าว เราได้ทำการคำนวณหาความคลาดเคลื่อนในการติดตามดวงอาทิตย์ ($\Delta\theta$) ซึ่งก็คือมุมระหว่างทิศทางของดวงอาทิตย์กับทิศทางของแนวตั้งฉากของแผงเซลล์โดยใช้สมการ

$$\cos\Delta\theta = \sin \delta \sin d + \cos \delta \cos d \cos (H-C) \quad (9)$$

เมื่อ

δ = มุมระหว่างดวงอาทิตย์กับอีควีเตอร์ของทรงกลมของท้องฟ้า

d = มุมระหว่างจุด p กับอีควีเตอร์ของทรงกลมของท้องฟ้า

H = มุมระหว่างวงกลมชั่วโมงของดวงอาทิตย์กับ เมอริเดียนประจำถิ่น

C = มุมระหว่างวงกลมชั่วโมงของจุด p กับ เมอริเดียนประจำถิ่น

สำหรับความคลาดเคลื่อนในแนวเหนือ-ใต้ ($\Delta\theta_{N-S}$) จะคำนวณโดยประมาณจากสมการ

$$\Delta\theta_{N-S} = 90 - (y + \rho) \quad (10)$$

ส่วนความคลาดเคลื่อนในแนวตะวันออก-ตะวันตก ($\Delta\theta_{E-W}$) จะคำนวณโดยประมาณได้จากสมการ

$$\cos \Delta\theta_{E-W} = \sin^2 \rho + \cos^2 \rho \cos (X - B) \quad (11)$$

เมื่อ

ρ = มุมระหว่างแนวตั้งฉากของแผงกับระนาบตั้งฉากของแกนหมุนของระบบ

B = มุมระหว่างระนาบที่เกิดจากแนวตั้งฉากของแผงและแกนหมุนของระบบ
ทำกับระนาบของวงกลมชั่วโมงที่ผ่านแกนหมุนของระบบ

X = มุมระหว่างระนาบที่เกิดจากทิศของดวงอาทิตย์และแกนหมุนของระบบ
ทำกับระนาบของวงกลมชั่วโมงที่ผ่านแกนหมุนของระบบ

$\Delta\theta_{E-W}$ จะมีเครื่องหมายตามเครื่องหมายของ $(X - B)$

รูปที่ 20-22 แสดงค่าความคลาดเคลื่อน $\Delta\theta$, $\Delta\theta_{N-S}$ และ $\Delta\theta_{E-W}$ ในกรณีของโลก
อยู่ที่ตำแหน่งโซลสติสหน้าหนาว ตำแหน่งอิควินอกซ์ และตำแหน่งโซลสติสหน้าร้อน สำหรับระบบซึ่ง
ตั้งอยู่ที่ละติจูดที่ 13.7 องศาเหนือ คือกรุงเทพฯ โดยมีเงื่อนไขในการตั้งระบบดังนี้

1. แกนหมุนของระบบขนานกับระนาบนอนของที่ตั้งระบบ และอยู่ในแนวเหนือ-ใต้
2. แกนหมุนที่ใช้ติดตามดวงอาทิตย์ในแนวตะวันออก-ตะวันตกจะหมุนด้วยความเร็ว
คงที่เท่ากับ 15 องศาต่อชั่วโมง ส่วนการติดตามในแนวเหนือ-ใต้จะเป็นการปรับ
มุมเอียงของแผงให้เท่ากับมุมเอียงของดวงอาทิตย์เฉพาะตอนเที่ยงเท่านั้น
3. วงกลมชั่วโมงของดวงอาทิตย์และวงกลมชั่วโมงของจุด p ผ่านซีกนิตพร้อมกัน
4. เมื่อวงกลมชั่วโมงของดวงอาทิตย์และวงกลมชั่วโมงของจุด p ผ่านซีกนิต ดวง
อาทิตย์จะอยู่ในแนวตั้งฉากของแผง กล่าวคือ ตำแหน่งของจุด p กับตำแหน่ง
ของดวงอาทิตย์จะทับกันพอดี

จากกราฟในรูป 20-22 แสดงให้เห็นว่า ความคลาดเคลื่อนในการติดตามดวงอาทิตย์
โดยวิธีการประมาณสมการของการเคลื่อนที่ของดวงอาทิตย์ด้วยสมการเส้นตรง จะมีค่าสูงสุดประมาณ
15 องศา แต่เนื่องจากความคลาดเคลื่อนดังกล่าวเกิดขึ้นเฉพาะตอนเช้าและเย็น ซึ่งมีปริมาณแสง
น้อย ดังนั้นความคลาดเคลื่อนดังกล่าวจึงไม่มีความสำคัญมากนัก ส่วนในช่วงเวลา 9 นาฬิกาถึง

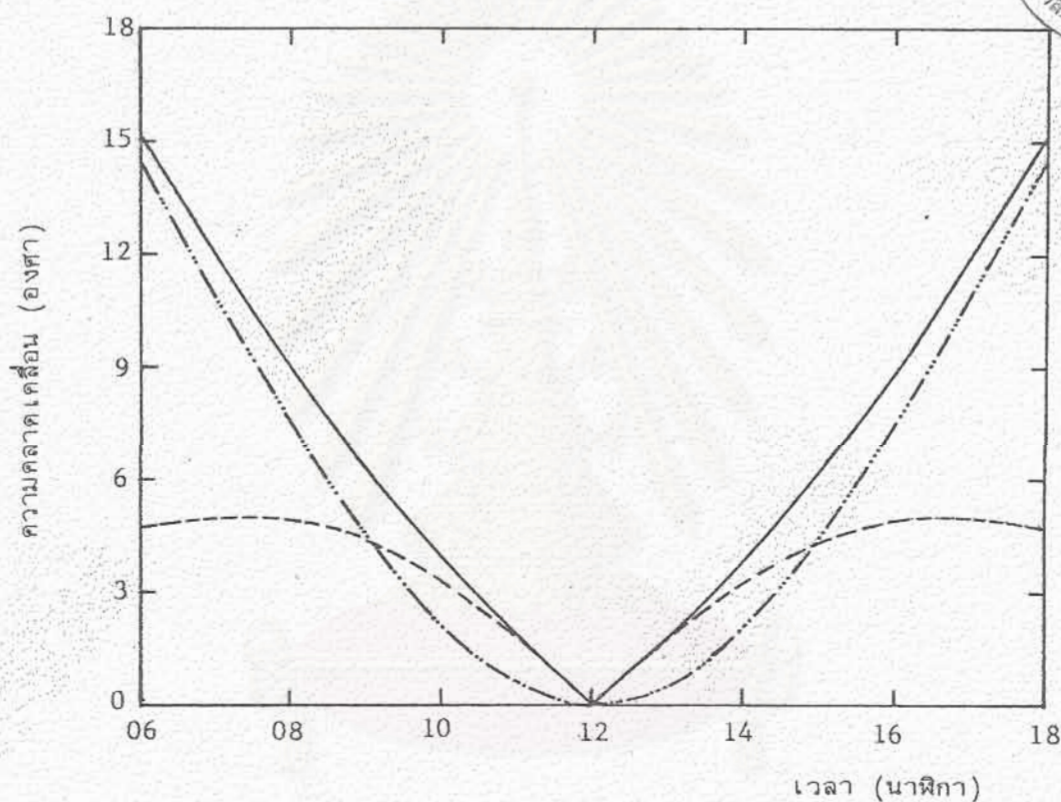
15 นาฬิกา ความคลาดเคลื่อนสูงสุดจะมีค่าไม่เกิน 5 องศา ซึ่งนับว่าน้อยมากสำหรับเซลล์แสงอาทิตย์แบบแผงราบ จากข้อมูลดังกล่าวมานี้จะเห็นได้ว่า ระบบติดตามดวงอาทิตย์ที่ใช้ข้อมูลเกี่ยวกับตำแหน่งดวงอาทิตย์โดยวิธีการประมาณสมการของการเคลื่อนที่ของดวงอาทิตย์ด้วยสมการเส้นตรง น่าจะมีความเหมาะสมสำหรับเซลล์แบบแผงราบ โดยเฉพาะกรณีที่เป็นระบบขนาดเล็ก ทั้งนี้เพราะภาคควบคุมของระบบนี้จะใช้กำลังงานไฟฟ้าน้อยกว่าภาคควบคุมที่ใช้ไมโครคอมพิวเตอร์มาก พลังงานที่ใช้ส่วนใหญ่จะใช้ในการขับเคลื่อนแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ระบบที่ใช้การควบคุมอย่างง่าย ๆ นี้ จะทำให้เราทราบปริมาณของพลังงานที่ได้รับเพิ่มขึ้นจากการใช้ระบบติดตามดวงอาทิตย์ หลังจากที่ได้หักส่วนของพลังงานที่ได้ใช้ในการติดตามดวงอาทิตย์ออกแล้ว และถ้าหากการศึกษาเบื้องต้นสำหรับประเทศไทยบ่งชี้ให้เห็นว่า การใช้ระบบติดตามดวงอาทิตย์กับเซลล์แสงอาทิตย์แบบแผงราบมีความเหมาะสมแล้ว ถ้าเราต้องการขยายระบบให้ใหญ่ขึ้น เราอาจจะใช้ไมโครคอมพิวเตอร์ในการควบคุมการติดตามดวงอาทิตย์ โดยที่เราจะใช้ภาคควบคุมเพียงชุดเดียวเพื่อควบคุมภาคขับนำของแผงเซลล์แสงอาทิตย์หลายชุดได้ ซึ่งเมื่อระบบใหญ่ขึ้น พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในภาคควบคุมก็จะมีค่าน้อยเมื่อเทียบกับพลังงานที่ได้รับเพิ่มขึ้น

เพื่อให้เป็นไปตามเงื่อนไขทั้ง 4 ข้อ ดังที่ได้กล่าวไว้ในตอนต้น เราจะต้องมีการติดตามดวงอาทิตย์ 2 แกน คือ

ก) การติดตามในแนวตะวันออก-ตะวันตก เพื่อติดตามการเคลื่อนที่ของดวงอาทิตย์ เนื่องจากการหมุนของทรงกลมของท้องฟ้ารอบโลกซึ่งมีความเร็วคงที่ เราจะหมุนแกนของระบบที่อยู่ในแนวเหนือ-ใต้ ด้วยความเร็วคงที่เท่ากับ 15 องศาต่อชั่วโมง ถึงแม้ว่าความเร็วเชิงมุมของระบบติดตามดวงอาทิตย์จะเท่ากับความเร็วในการหมุนของทรงกลมของท้องฟ้ารอบโลกก็ตาม แต่การติดตามในแนวตะวันออก-ตะวันตกนี้ก็ยังคงมีความคลาดเคลื่อน อันเนื่องมาจากแกนหมุนทั้งสองไม่ขนานกัน และอีกอย่างหนึ่งก็เนื่องมาจากสมการเวลา (equation of time) ดังที่กล่าวไว้ในหัวข้อ 2.3.2 ซึ่งทำให้เวลาเที่ยงตามเวลาท้องถิ่นแตกต่างจากเวลาเที่ยงของดวงอาทิตย์

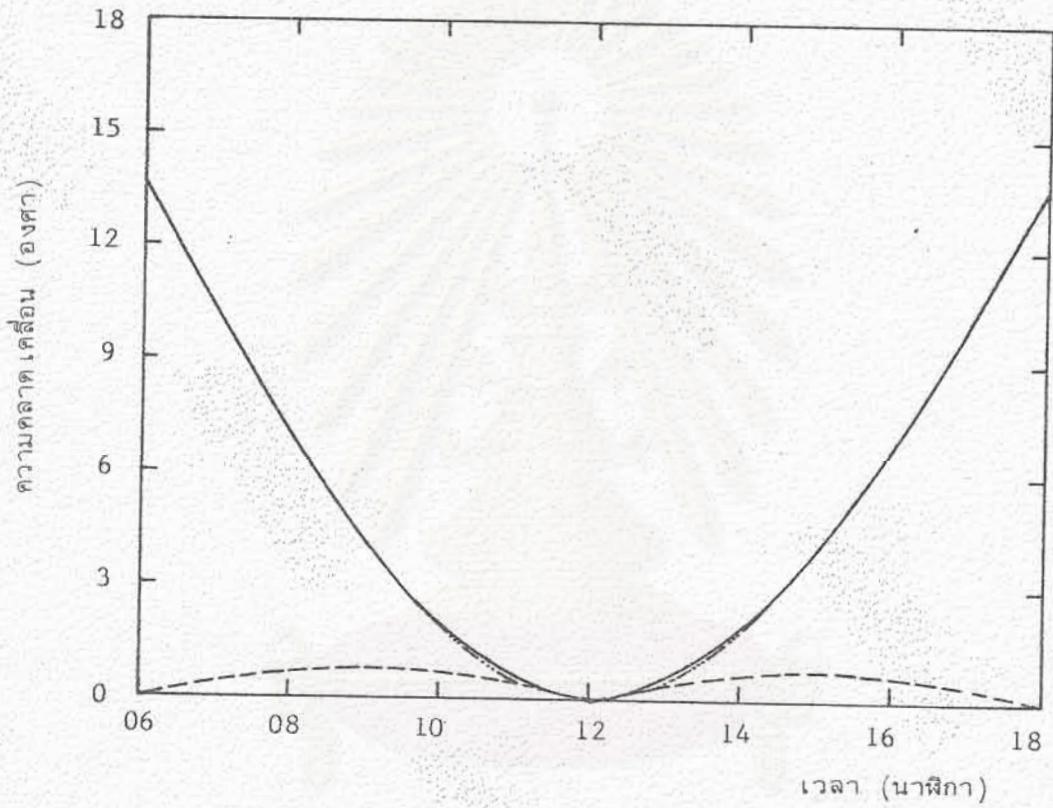
ข) การติดตามในแนวเหนือ-ใต้ เพื่อที่จะให้ความคลาดเคลื่อนในการติดตามดวงอาทิตย์ในแนวเหนือ-ใต้ในตอนเที่ยงวันเป็นศูนย์ เราจะต้องปรับมุม p ของแผงเซลล์เพื่อให้มุมเอียงของแผงเซลล์เทียบกับอีควาเตอร์ของทรงกลมของท้องฟ้า (d) มีค่าเท่ากับมุมเอียงของดวงอาทิตย์เทียบกับอีควาเตอร์ของทรงกลมของท้องฟ้า (δ) (ทั้งนี้เพราะมุม δ ของดวงอาทิตย์จะมีการเปลี่ยนแปลงตามฤดูกาล ดังได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อ 2.3.3) อย่างไรก็ตามการปรับมุม p กับเวลาด้วย

อัตราคงที่จะทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนในการติดตามดวงอาทิตย์ในแนวเหนือ-ใต้ ตอนเที่ยงวัน อันเนื่องมาจากการที่แกนหมุนของระบบไม่ขนานกับแกนหมุนของโลก และอีกสาเหตุหนึ่งเกิดจากความเร็วเชิงมุมของโลกรอบดวงอาทิตย์มีค่าไม่คงที่ ในการติดตามดวงอาทิตย์ในแนวเหนือ-ใต้ เราจะให้การเปลี่ยนแปลงของ d เท่ากับอัตราเปลี่ยนแปลงเฉลี่ยของ δ



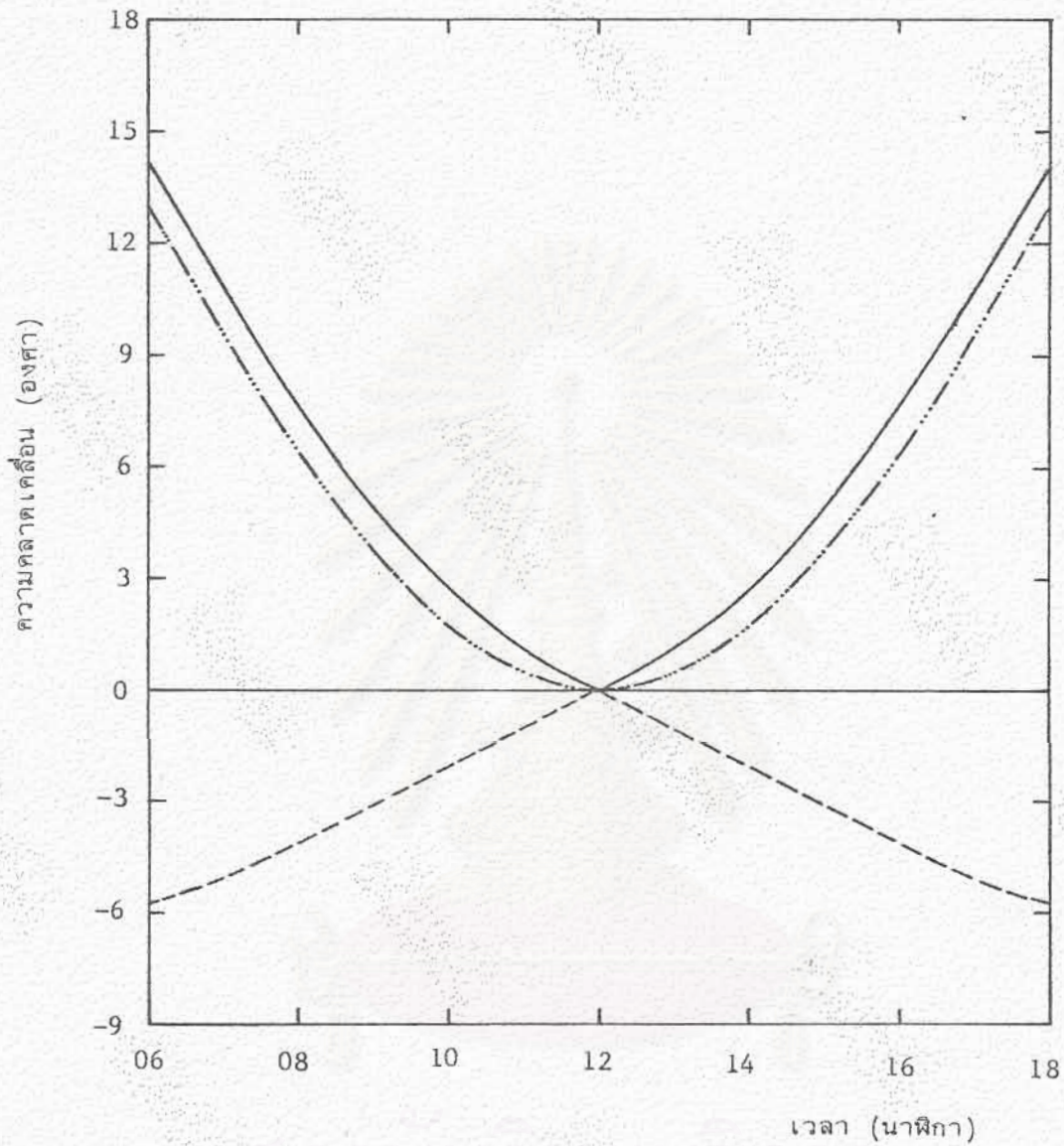
- - - ความคลาดเคลื่อนในแนวตะวันออก-ตะวันตก ($\Delta\theta_{E-W}$)
 - · - ความคลาดเคลื่อนในแนวเหนือ-ใต้ ($\Delta\theta_{N-S}$)
 — ความคลาดเคลื่อนรวม ($\Delta\theta$)

รูปที่ 20 แสดงความคลาดเคลื่อนในการติดตามดวงอาทิตย์ โดยอาศัยการประมาณสมการการเคลื่อนที่ของดวงอาทิตย์ด้วยสมการเส้นตรง เมื่อโลกอยู่ที่ตำแหน่งโพลสติด้านหน้าหนาว



- - - ความคลาดเคลื่อนในแนวตะวันออก-ตะวันตก ($\Delta\theta_{E-W}$)
 . . . ความคลาดเคลื่อนในแนวเหนือ-ใต้ ($\Delta\theta_{N-S}$)
 — ความคลาดเคลื่อนรวม ($\Delta\theta$)

รูปที่ 21 แสดงความคลาดเคลื่อนในการติดตามดวงอาทิตย์ โดยอาศัยการประมาณสมการการเคลื่อนที่ของดวงอาทิตย์ด้วยสมการเส้นตรง เมื่อโลกอยู่ที่ตำแหน่งอิควินอกซ์



- ความคลาดเคลื่อนในแนวตะวันออก-ตะวันตก ($\Delta\theta_{E-W}$)
- · - · ความคลาดเคลื่อนในแนวเหนือ-ใต้ ($\Delta\theta_{N-S}$)
- ความคลาดเคลื่อนรวม ($\Delta\theta$)

รูปที่ 22 แสดงความคลาดเคลื่อนในการติดตามดวงอาทิตย์ โดยอาศัยการประมาณสมการการเคลื่อนที่ของดวงอาทิตย์ด้วยสมการเส้นตรง เมื่อโลกอยู่ที่ตำแหน่งไซลสตีสนาร์อัน (ค่ามุม θ_{E-W} เป็นลบแสดงว่าดวงอาทิตย์ทำมุมกับแนวตั้งฉากของระนาบนอนน้อยกว่าแนวตั้งฉากของแผงเซลล์)

4. โครงสร้างของระบบควบคุมการติดตามดวงอาทิตย์ที่สร้างขึ้น

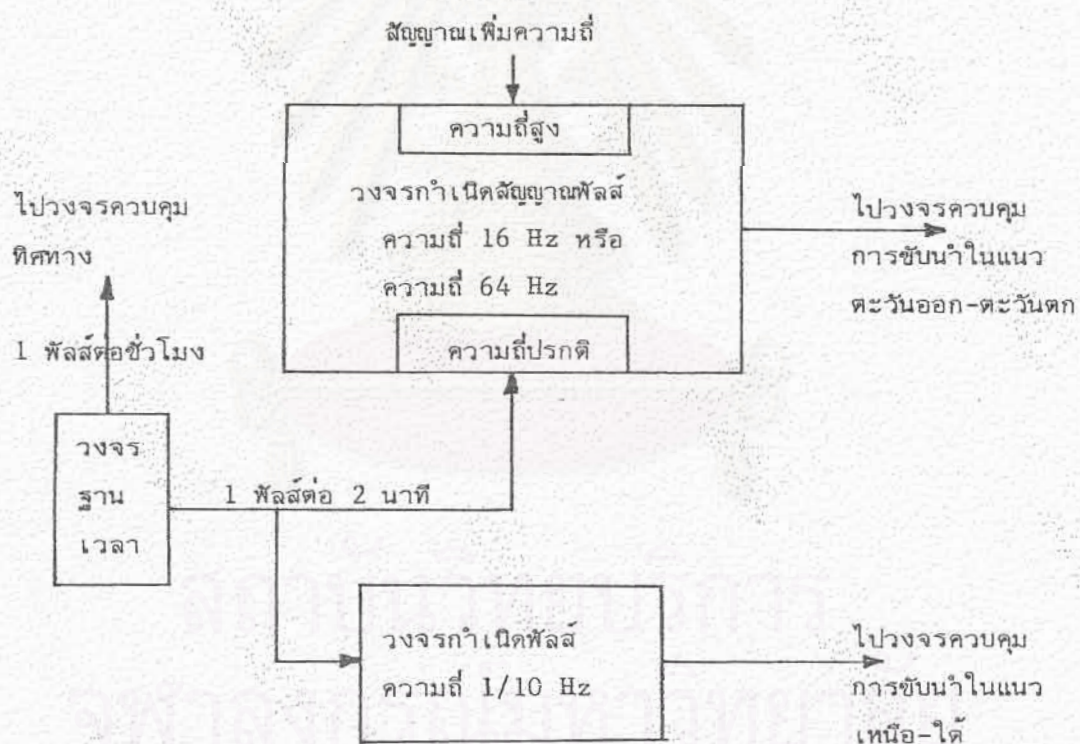
ระบบควบคุมการติดตามดวงอาทิตย์ที่สร้างขึ้น เป็นระบบควบคุมแบบวงรอบเปิด ซึ่งมีส่วนประกอบต่าง ๆ ดังนี้คือ

4.1 วงจรควบคุม

วงจรควบคุมอาจจะแบ่งออกได้เป็น 2 ส่วน ดังนี้คือ

- วงจรฐานเวลาควบคุมความถี่
- วงจรควบคุมและขับน้ำมอเตอร์

4.1.1 วงจรฐานเวลาควบคุมความถี่



รูปที่ 23 วงจรฐานเวลาควบคุมความถี่ที่ใช้ควบคุมการหมุนของแผงเซลล์ในแนวตะวันออก-ตะวันตก และแนวเหนือ-ใต้

วงจรรฐานเวลาควบคุมความถี่ ดังแสดงในบล็อกไดอะแกรมรูปที่ 23 ประกอบด้วย วงจรกำเนิดสัญญาณพัลส์ซึ่งควบคุมความถี่โดยฐานเวลาที่มีความแม่นยำสูง ฐานเวลาที่มีความแม่นยำสูงนี้ได้จากการสั่นของผลึกควอตซ์ที่มีความผิดพลาดประมาณ 2 ppm ซึ่งเมื่อผ่านวงจรหาความถี่แล้วจะให้สัญญาณออกสองอย่างคือ สัญญาณพัลส์ทุก 2 วินาที และสัญญาณพัลส์ทุก 1 ชั่วโมง สัญญาณพัลส์ทุกชั่วโมงจะใช้ในการควบคุมทิศทางของการหมุนของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ส่วนสัญญาณพัลส์ทุก 2 วินาทีจะใช้ในการควบคุมความถี่ของวงจรมอดูเลชันพัลส์ซึ่งจะให้สัญญาณออก 16 พัลส์ต่อวินาที เราจะใช้สัญญาณพัลส์นี้ในการควบคุมการหมุนของแผงเซลล์ในแนวตะวันออก-ตะวันตก สำหรับสัญญาณที่ใช้ควบคุมการหมุนของแผงเซลล์ในแนวเหนือ-ใต้ จะได้จากวงจรมอดูเลชันพัลส์ ซึ่งให้สัญญาณออก 1 พัลส์ทุก ๆ 10 วินาที

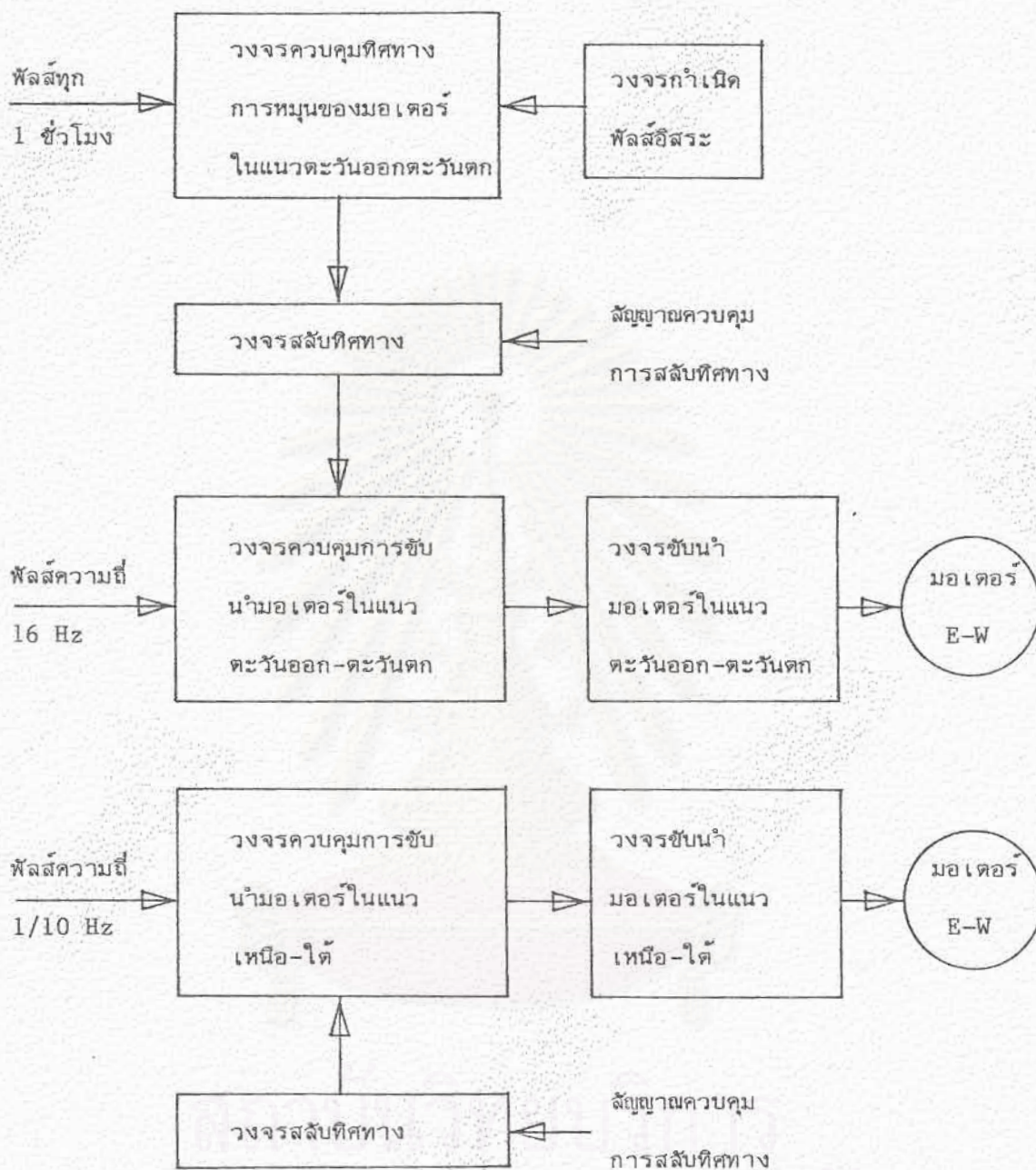
นอกจากความถี่คงที่ที่ใช้ในการควบคุมการหมุนของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ในภาวะปรกติแล้ว เรายังสามารถเพิ่มความถี่ของพัลส์ที่ใช้ในการควบคุมการหมุนของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ในแนวตะวันออก-ตะวันตกขึ้น 4 เท่า เพื่อความสะดวกในการปรับแต่งตำแหน่งของแผงเซลล์แสงอาทิตย์

4.1.2 วงจรควบคุมและขับนำมอเตอร์

วงจรถูกควบคุมและขับนำมอเตอร์ ซึ่งแสดงเป็นบล็อกไดอะแกรมดังแสดงในรูปที่ 24 ประกอบด้วยวงจรต่าง ๆ คือ

ก) วงจรถูกควบคุมการขับนำมอเตอร์ เป็นวงจรแรงสัญญาณซึ่งทำหน้าที่แรงสัญญาณเข้าหนึ่งสัญญาณออกเป็นสัญญาณ 4 สัญญาณ เพื่อให้เหมาะสมในการขับนำมอเตอร์แบบขั้นที่มี 4 ขดลวด ในการขับนำมอเตอร์แบบขั้นนั้น เราจะกระตุ้นทีละ 2 ขด เหลื่อมสลับกัน การเปลี่ยนทิศทางของมอเตอร์แบบนี้จะทำได้โดยการกลับลำดับการกระตุ้นขดลวด ลำดับของสัญญาณออกของวงจรถูกควบคุมการขับนำมอเตอร์นี้ จะถูกควบคุมด้วยสัญญาณจากวงจรถูกควบคุมทิศทางของการหมุนของมอเตอร์ โดยผ่านวงจรสลับทิศทางซึ่งจะควบคุมได้ด้วยสวิตช์มือ วงจรถูกควบคุมการขับนำมอเตอร์จะมีสองชุดคือ ชุดหนึ่งสำหรับควบคุมมอเตอร์ในแนวตะวันออก-ตะวันตก โดยรับสัญญาณพัลส์จากวงจรมอดูเลชันพัลส์ความถี่ 16 Hz วงจรชุดที่ 2 จะควบคุมมอเตอร์ในแนวเหนือ-ใต้ โดยรับสัญญาณพัลส์จากวงจรมอดูเลชันพัลส์ความถี่ 1/10 Hz

ข) วงจรถูกควบคุมทิศทางของการหมุนของมอเตอร์ในแนวตะวันออก-ตะวันตก ทำหน้าที่ควบคุมให้แผงเซลล์แสงอาทิตย์หมุนตามดวงอาทิตย์ จากทิศตะวันออกไปสู่ทิศตะวันตกในช่วงเวลา 06.00 น. ถึง 18.00 น. และหมุนจากทิศตะวันตกสู่ทิศตะวันออกในช่วงเวลา 18.00 น. ถึง 06.00 น. ของวันรุ่งขึ้น การทำงานของวงจรถูกควบคุมทิศทางของการหมุนของมอเตอร์นี้จะถูกควบคุม



รูปที่ 24 วงจรควบคุมและขับนำมอเตอร์ที่ใช้หมุนแผงเซลล์แสงอาทิตย์ในแนวตะวันออก-ตะวันตก
 และแนวเหนือ-ใต้

โดยสัญญาณพัลส์จากวงจรฐานเวลา วงจรนี้จะสามารถรับสัญญาณพัลส์จากวงจรถูกำเนิดพัลส์อิสระ เพื่อใช้ในการตั้งเวลาได้ด้วย

ค) วงจรขับนำมอเตอร์ เป็นวงจรขยายกำลัง 4 ชุด โดยแต่ละชุดจะใช้ในการกระตุ้นขดลวดของมอเตอร์แบบขั้น 1 ขด วงจรขยายกำลังแต่ละชุดจะได้รับการควบคุมจากสัญญาณออก 1 สัญญาณของวงจรควบคุมการขับนำมอเตอร์ โดยผ่านวงจรผ่านสูงเพื่อเป็นการช่วยประหยัดพลังงาน กล่าวคือ วงจรขยายกำลังจะได้รับสัญญาณจากวงจรถูกควบคุมการขับนำเป็นเวลาประมาณ 20 มิลลิวินาที เพื่อกระตุ้นให้มอเตอร์เคลื่อนที่ไป 1 ชั้น จากนั้นก็จะหยุดกระตุ้นเป็นเวลาประมาณ 40 มิลลิวินาที ก่อนที่จะมีการกระตุ้นขดลวดชุดต่อไป สาเหตุที่เราไม่จำเป็นต้องกระตุ้นแบบต่อเนื่องก็เนื่องจากว่า การหมุนของมอเตอร์แบบขั้นจะเกิดขึ้นเฉพาะระหว่างที่มีการเปลี่ยนการกระตุ้นขดลวดเท่านั้น ดังนั้นเราจึงไม่จำเป็นต้องกระตุ้นแบบต่อเนื่อง ยกเว้นในกรณีที่ต้องมี holding torque ระหว่างการเปลี่ยนการกระตุ้น แต่ในกรณีของเรา นี้ เนื่องจากมีการทรอบมาก อีกทั้งยังมีการถ่วงสมดุลย์ของระบบ ดังนั้นความถี่ของเกียร์ก็เพียงพอสำหรับป้องกันการหมุนกลับของแผง การขับนำมอเตอร์แบบกระตุ้นไม่ต่อเนื่องจะทำให้เราสามารถประหยัดพลังงานได้ประมาณ 50-70% เมื่อเทียบกับการกระตุ้นแบบต่อเนื่อง

4.2 ระบบขับนำแผงเซลล์

ระบบขับนำแผงเซลล์ประกอบด้วยมอเตอร์แบบขั้นขนาด 5.3 วัตต์ (12 V, 480 mA, 7.5 degrees/step) และเฟืองทดโดยมีรายละเอียดดังนี้คือ

4.2.1 ระบบขับนำแผงเซลล์ในแนวตะวันออก-ตะวันตก

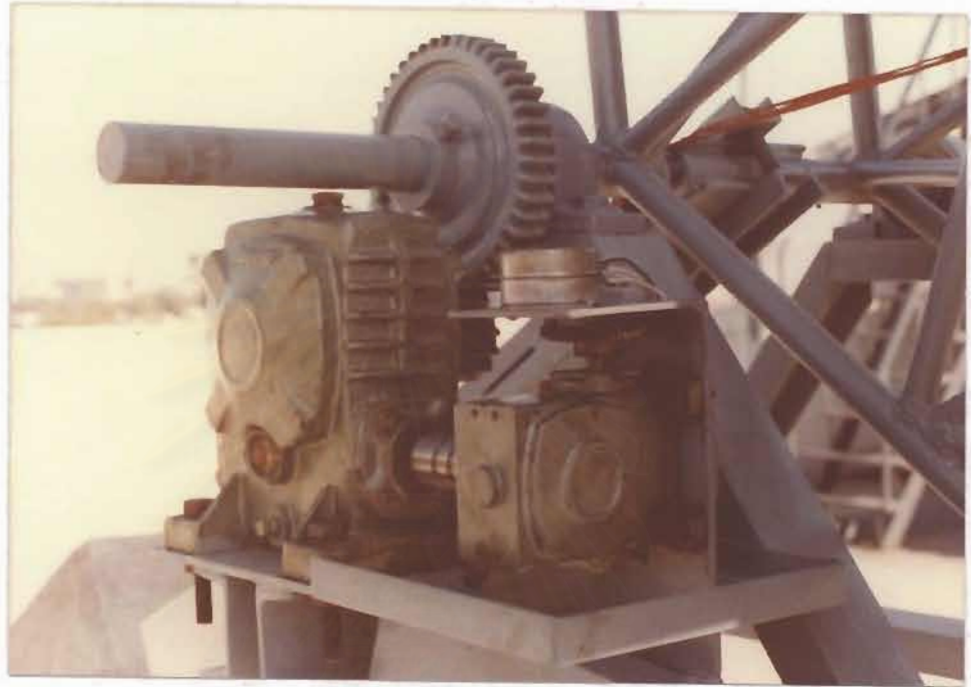
- มอเตอร์แบบขั้นที่ใช้จะให้แรงบิดสูงสุด 0.065 nt-m เมื่อได้รับสัญญาณพัลส์ความถี่ 16 Hz จะมีความเร็ว 120 องศาต่อวินาที

- เฟืองทดทั้งหมดมี 4 ชุด โดยมีอัตราส่วนการทด $\frac{44}{14}$, 60, 30 และ

$\frac{56}{11}$ เฟืองทุดนี้ จะลดรอบการหมุน แต่จะเพิ่มแรงบิดให้กับระบบ

จากความเร็วของมอเตอร์ซึ่งเท่ากับ 120 องศาต่อวินาที เมื่อผ่านเฟืองทดจะทำให้แผงเซลล์แสงอาทิตย์หมุนด้วยความเร็ว 360 องศาต่อวัน ซึ่งหมายความว่า แผงเซลล์แสงอาทิตย์จะหมุนจากทิศตะวันออกไปยังทิศตะวันตกเป็นมุม 180 องศา ในเวลา 12 ชม. คือระหว่างช่วงเวลา 06.00 น. ถึง 18.00 น. และหมุนกลับจากทิศตะวันตกไปยังทิศตะวันออกเป็นมุม 180 องศา ในเวลา 12 ชม. คือระหว่าง 18.00 น. ถึง 06.00น. ของวันรุ่งขึ้น ดังนั้นแผงเซลล์

แสงอาทิตย์จะมาอยู่ ณ ตำแหน่งเดิมเมื่อเวลา 06.00 น. ของทุกวัน



รูปที่ 25 ระบบสูบน้ำแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่หมุนในแนวตะวันออก-ตะวันตก

4.2.2 ระบบสูบน้ำแผงเซลล์ในแนวเหนือ-ใต้

- มอเตอร์แบบซิงโครไนซ์จะมีลักษณะสมบัติเช่นเดียวกับกับมอเตอร์ที่ใช้สูบน้ำแผงเซลล์ในแนวตะวันออก-ตะวันตก แต่จะได้รับสัญญาณพัลส์ความถี่ $1/10$ Hz ซึ่งจะทำให้มีความเร็ว 0.75 องศาต่อวินาที

- เฟืองทดทั้งหมดมี 4 ชุด โดยมีอัตราส่วนการทด $482.5, \frac{76}{25}, 60$ และ $\frac{40}{14}$ เฟืองทดนี้ทำหน้าที่ลดรอบและเพิ่มแรงบิดให้กับระบบเช่นเดียวกัน

จากความเร็วของมอเตอร์ซึ่งเท่ากับ 0.75 องศาต่อวินาที เมื่อผ่านเฟืองทดจะทำให้แผงเซลล์แสงอาทิตย์หมุนด้วยความเร็ว 94 องศาต่อปี เนื่องจากมุมเอียงของตำแหน่งดวงอาทิตย์ตอนเที่ยงวันในระนาบเหนือ-ใต้จะเปลี่ยนแปลง 47 องศาทุกครึ่งปี หรือ 94 องศาต่อปี ดังนั้นถ้าเราควบคุมให้แผงเซลล์แสงอาทิตย์หมุนตามดวงอาทิตย์ในแนวเหนือ-ใต้ด้วยความเร็ว 94 องศาต่อปี โดยมีการเปลี่ยนทิศทางทุกครึ่งปี คือในวันที่ 21 มิถุนายน และวันที่ 22 ธันวาคม

ของทุกปี จะทำให้ตำแหน่งของดวงอาทิตย์เคลื่อนเพียงวันหนึ่งในทางตรงกันข้ามโดยประมาณกับระยะเวลาของแสง
 เซลล์ความมืดเคลื่อนจะเร็วมากขึ้นในตอนเช้ากับบ่าย เนื่องจากแกนหมุนของแสงเซลล์กับแกน
 หมุนของดวงอาทิตย์เทียบกับโลกไม่ขนานกัน ดังโกล์ล่ามาแล้ว รูปที่ 26 แสดงให้เห็นส่วน
 ประกอบต่าง ๆ ของระบบสีน้ำแสงเซลล์แสงอาทิตย์ที่หมุนในแนวเหนือ-ใต้คือ มอเตอร์ขับเคลื่อน
 และเฟืองทด 4 ชุด



รูปที่ 26 ระบบสีน้ำแสงเซลล์แสงอาทิตย์ที่หมุนในแนวเหนือ-ใต้

4.3 แหล่งจ่ายกำลังงานของระบบ

การทำงานของระบบควบคุมที่สร้างขึ้น จะใช้พลังงานจากแหล่งจ่ายไฟตรงสองชุดซึ่งมีขนาดแรงดัน 5 โวลต์ และ 12 โวลต์ แหล่งจ่ายไฟตรง 5 โวลต์ นั้นจะได้จากการลดแรงดันของแหล่งจ่ายไฟตรง 12 โวลต์ เพื่อใช้จ่ายให้กับวงจรกำเนิดสัญญาณพัลส์และวงจรควบคุมทิศทางรถของมอเตอร์ วงจรส่วนนี้จะกินกระแสเล็กน้อย คือไม่เกิน 1% ของกระแสในวงจรควบคุมและขับนำมอเตอร์ สำหรับวงจรควบคุมและขับนำมอเตอร์จะใช้ไฟฟ้ากระแสตรง 12 โวลต์ โดยที่ชุดควบคุมและขับนำมอเตอร์ที่ใช้หมุนแผงเซลล์ในแนวตะวันออก-ตะวันตก จะกินกระแสเฉลี่ย 350 mA ส่วนวงจรควบคุมและขับนำแผงเซลล์ที่หมุนในแนวเหนือ-ใต้ จะกินกระแสเฉลี่ยประมาณ 60 mA จะเห็นได้ว่ากำลังไฟฟ้าที่ใช้ทั้งหมดจะมีค่าประมาณ 5 วัตต์ ดังนั้นพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในระบบจะเท่ากับ 120วัตต์-ชั่วโมงต่อวัน

ไฟฟ้ากระแสตรง 12 โวลต์ที่ใช้ อาจจะได้มาจากแบตเตอรี่ที่ใช้เก็บสะสมพลังงานจากเซลล์แสงอาทิตย์ หรืออาจจะได้มาจากไฟฟ้ากระแสสลับ 220 โวลต์ โดยผ่านหม้อแปลงลดแรงดัน วงจรตัดไฟ และวงจรคงค่าแรงดัน ระบบควบคุมที่สร้างขึ้นจะสามารถใช้ได้ทั้งกับแบตเตอรี่ขนาด 12 โวลต์ และจากแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ 220 โวลต์

4.4 โครงสร้างรองรับแผงเซลล์แสงอาทิตย์

โครงสร้างรองรับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ของระบบควบคุมการติดตามดวงอาทิตย์แบบ 2 แกน จะประกอบด้วยฐานรองรับแกนหมุนเพื่อหมุนแผงเซลล์แสงอาทิตย์ตามดวงอาทิตย์ 2 ชุด คือ

ก) ฐานรองรับแกนหมุนซึ่งตั้งฉากกับระนาบที่ประกอบด้วยแนวเหนือ-ใต้ และจุดซิมิท การหมุนของแกนหมุนนี้จะทำให้แผงเซลล์หมุนตามดวงอาทิตย์ในแนวเหนือ-ใต้ โดยสามารถหมุนได้เป็นมุม ± 70 องศา ซึ่งเพียงพอที่จะทำให้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ทำมุมฉากกับดวงอาทิตย์ในตอนเที่ยงของวันที่ดวงอาทิตย์ค่อนข้างไปทางใต้มากที่สุด สำหรับการติดตั้งระบบในกรุงเทพฯ คือมุม 37.2 องศาได้ ทั้งนี้เพราะกรุงเทพฯตั้งอยู่ที่ละติจูด 13.7 องศาเหนือ ฐานรองรับแกนหมุนนี้จะต้องอยู่บนแกนหมุนซึ่งทำให้แผงเซลล์แสงอาทิตย์หมุนตามดวงอาทิตย์ในแนวตะวันออก-ตะวันตก

ข) ฐานรองรับแกนหมุนซึ่งตั้งฉากกับระนาบที่ประกอบด้วยแนวตะวันออก-ตะวันตก และจุดซิมิท การหมุนของแกนหมุนนี้จะทำให้แผงเซลล์แสงอาทิตย์หมุนตามดวงอาทิตย์ในแนวตะวันออกและตะวันตก โดยสามารถหมุนได้เป็นมุม ± 100 องศา ซึ่งมากกว่าการหมุนของแผงเซลล์ในแนว ตะวันออก-ตะวันตก ซึ่งมีค่าเพียง ± 90 องศา

ค) น้ำหนักถ่วงดุลย์ (counter weight) มีไว้เพื่อทำให้จุดศูนย์กลางของ โครงสร้างอยู่ที่จุดศูนย์กลางเวลา ซึ่งจะเป็นการประหยัดพลังงานที่ใช้ในการหมุนแผงเซลล์ ทั้งนี้เพราะ เมื่อจุดศูนย์กลางของโครงสร้างที่หมุนอยู่ที่จุดหมุนการหมุนแผงเซลล์เพื่อติดตามดวงอาทิตย์จะไม่ทำให้พลังงานศักย์เปลี่ยนแปลง ดังนั้นเราจึงไม่จำเป็นต้องใช้พลังงานในการ เปลี่ยนพลังงานศักย์ของระบบ แต่จะใช้เฉพาะพลังงานเพื่อเอาชนะความเสียดของระบบเท่านั้น ในระบบที่สร้างขึ้นเราได้ใส่น้ำหนักถ่วงดุลย์ไว้ในทั้งสองแกนดังจะ เห็นได้จากรูปที่ 27 ซึ่งแสดงให้เห็นส่วนประกอบต่าง ๆ ของโครงสร้างที่สร้างขึ้น คือ ฐานรองรับแกนหมุน สำหรับการติดตามดวงอาทิตย์ในแนวตะวันออก-ตะวันตก และในแนวเหนือ-ใต้ พร้อมทั้งน้ำหนักถ่วงดุลย์ในทั้งสองแกน



รูปที่ 27 แสดงส่วนประกอบต่าง ๆ ของโครงสร้างรองรับแผงเซลล์ ดวงอาทิตย์ที่สร้างขึ้น



โครงสร้างรองรับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่สร้างขึ้นนี้สามารถรับแผงเซลล์แสงอาทิตย์
ที่ให้กำลังงานออกสูงสุด 33 วัตต์ ที่ความเข้มของแสงขนาด 1000 วัตต์ต่อตารางเมตร
ได้ 6 แผง ซึ่งจะให้กำลังงานออกสูงสุด 198 วัตต์

หลังจากทำโครงสร้างเสร็จปรากฏว่าทิศทางของแกนหมุนในแนวเหนือ-ใต้มีความ
คลาดเคลื่อนประมาณ 3 องศา โดยเอียงไปทางตะวันออกเฉียงเหนือ ซึ่งผลอันนี้ทำให้เกิด
ความคลาดเคลื่อนของผลการทดลองในส่วนที่เกี่ยวกับความคลาดเคลื่อนในการติดตามดวงอาทิตย์
นอกจากนี้แล้วยังมี Backlash เกิดขึ้นระหว่างเฟืองที่ใช้ขับเคลื่อนทั้งสองแกนประมาณ 3
องศา ทำให้ทิศทางของแผงเซลล์ในทั้งสองแกนเปลี่ยนแปลงได้ตามทิศทางของลมประมาณ 3 องศา

5. ผลการทดลอง

จากระบบติดตามดวงอาทิตย์ที่สร้างขึ้น เราได้ทดลองวัดความคลาดเคลื่อนในการติดตามดวงอาทิตย์ และพลังงานออกของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ติดอยู่กับระบบติดตามดวงอาทิตย์ และแผงที่ติดตั้งอยู่กับที่ โดยมีการทดลอง 2 ช่วงเวลาด้วยกัน คือระหว่างวันที่ 20-23 ธันวาคม พ.ศ. 2526 ซึ่งเป็นช่วงเวลาที่โลกอยู่ ณ ตำแหน่งโซลสติสหน้าหนาว (Winter solstice) และระหว่างวันที่ 20-22 มีนาคม 2527 ซึ่งเป็นช่วงเวลาที่โลกอยู่ที่ตำแหน่งอิควินอกซ์ฤดูใบไม้ผลิ (spring equinox) ส่วนช่วงเวลาที่โลกอยู่ ณ ตำแหน่งโซลสติสหน้าร้อน (summer solstice) ซึ่งเป็นตำแหน่งที่สำคัญอีกตำแหน่งหนึ่งนั้นจะไม่มีผลการทดลองในรายงานนี้ เนื่องจากข้อจำกัดทางด้านเวลา

5.1 เงื่อนไขในการทดลอง

5.1.1 เงื่อนไขในการติดตามดวงอาทิตย์

ก. การติดตามดวงอาทิตย์ในแนวตะวันออก-ตะวันตก การติดตามดวงอาทิตย์ในแนวตะวันออก-ตะวันตก เราจะตั้งระบบให้มีความคลาดเคลื่อนในการติดตามดวงอาทิตย์ในแนวตะวันออก-ตะวันตกเป็นศูนย์ ตอนเที่ยงตามเวลาท้องถิ่น (Local time) เนื่องจากเราไม่มีวงจรที่จะปรับให้มีความคลาดเคลื่อนในการติดตามดวงอาทิตย์เป็นศูนย์ ในตอนเที่ยงวันตลอด ดังนั้นความคลาดเคลื่อนในการติดตามดวงอาทิตย์ในตอนเที่ยงวันจะเปลี่ยนไปเรื่อย ๆ ตามผลของสมการเวลา (equation of time)

ข. การติดตามดวงอาทิตย์ในแนวเหนือ-ใต้ ระบบที่สร้างขึ้นนี้ การหมุนในแนวเหนือ-ใต้จะเป็นไปอย่างช้ามากคือประมาณ 0.26 องศาต่อวัน ซึ่งเราอาจถือว่ามีค่าคงที่ในแต่ละวัน ในตอนที่โลกอยู่ ณ ตำแหน่งโซลสติสหน้าหนาว เราจะตั้งให้มีความคลาดเคลื่อนในแนวเหนือ-ใต้เป็นศูนย์ ในตอนเที่ยงของเวลาท้องถิ่น จากเงื่อนไขนี้และเงื่อนไขในข้อ ก. จะทำให้ทิศทางของดวงอาทิตย์อยู่ในแนวตั้งฉากกับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ในเวลาเที่ยงวันตามเวลาท้องถิ่น

เนื่องจากในระหว่างเวลาที่โลกอยู่ที่ตำแหน่งโซลสติสหน้าหนาว และเวลาที่โลกอยู่ที่ตำแหน่งอิควินอกซ์ฤดูใบไม้ผลิ ได้มีการหยุดการทำงานของระบบหลายครั้ง เพื่อการทดลองอย่างอื่นทำให้การทดลองการทำงานของระบบติดตามดวงอาทิตย์ในแนวเหนือ-ใต้ทำงานไม่ต่อเนื่อง ดังนั้นจึงทำให้ไม่มีข้อมูลเกี่ยวกับความคลาดเคลื่อนในแนวเหนือ-ใต้ในตอนเที่ยงวัน และในการทดลองวัดความคลาดเคลื่อนในการติดตามดวงอาทิตย์ในตอนเวลาที่โลกอยู่ ณ ตำแหน่งอิควินอกซ์ฤดูใบไม้ผลิ เรา

ได้ตั้งให้ทิศทางของดวงอาทิตย์ตั้งฉากกับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ในตอนเที่ยงตามเวลาท้องถิ่น เช่นเดียวกัน

5.1.2 เงื่อนไขในการวัดปริมาณแสงที่ได้รับ

เพื่อเป็นการเปรียบเทียบพลังงานที่แผงเซลล์แสงอาทิตย์จะได้รับเพิ่มจากการใช้ระบบติดตามดวงอาทิตย์ที่สร้างขึ้นกับพลังงานของระบบที่ติดตั้งอยู่กับที่ เราได้วัดกระแสลัดวงจรของแผงเซลล์ขนาด 33 วัตต์ จำนวน 3 แผง (ได้ทดลองเปรียบเทียบกระแสลัดวงจรสำหรับความเข้มของแสงที่เท่ากัน เพื่อใช้เป็นข้อมูลในการปรับค่าของกระแสลัดวงจรที่ความเข้มของแสงต่างกัน ให้เหมือนกับการใช้เซลล์แสงอาทิตย์ที่เหมือนกัน สำหรับวัดความเข้มของแสงที่แตกต่างกัน) โดยแผงที่ 1 จะติดกับระบบติดตามดวงอาทิตย์ที่สร้างขึ้น แผงที่ 2 จะติดตั้งอยู่กับที่ทำมุมเอียง 13.7 องศาใต้ เท่ากับค่าละติจูดของกรุงเทพฯ คือ 13.7 องศาเหนือ ส่วนแผงที่ 3 นั้นมีมุมเอียงที่ทำให้ทิศทางของดวงอาทิตย์ตั้งฉากกับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ในตอนเที่ยงตามเวลาท้องถิ่น ซึ่งจะเป็นลักษณะของการใช้แผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบติดตั้งอยู่กับที่โดยมีการปรับมุมตามฤดูกาล ซึ่งในการทดลองนี้ ในตอนที่โลกอยู่ ณ ตำแหน่งโซลสติสหน้าหนาว มุมเอียงของแผงเซลล์จะมีค่า 37.2 องศาใต้ และในตอนที่โลกอยู่ ณ ตำแหน่งอิควินอกซ์ มุมเอียงจะเท่ากับ 13.7 องศาใต้ ซึ่งเท่ากับมุมเอียงของแผงเซลล์ที่ติดตั้งอยู่กับที่ ดังนั้นในการทดลองระหว่างวันที่ 20-22 มีนาคม 2527 เราจึงวัดกระแสลัดวงจรของเซลล์แสงอาทิตย์เพียงสองชุดเท่านั้น

5.2 ผลการทดลอง

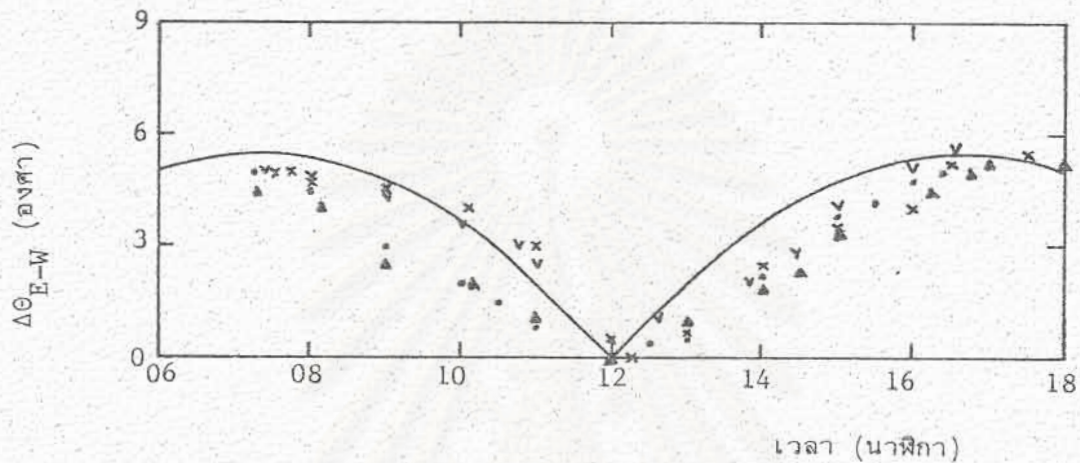
5.2.1 ความคลาดเคลื่อนในการติดตามดวงอาทิตย์

ก. เมื่อโลกอยู่ ณ ตำแหน่งโซลสติสหน้าหนาว

รูปที่ 28 และ 29 แสดงผลการวัดความคลาดเคลื่อนในการติดตามดวงอาทิตย์ ในแนวตะวันออก-ตะวันตก ($\Delta\theta_{E-W}$) และแนวเหนือ-ใต้ ($\Delta\theta_{N-S}$) เปรียบเทียบกับผลการคำนวณทางทฤษฎีในหัวข้อ 2.3.3 เราจะเห็นได้ว่าเป็นความแตกต่างกันค่อนข้างมาก โดยเฉพาะความคลาดเคลื่อนในแนวเหนือ-ใต้ ผลการทดลองบ่งชี้ให้เห็นว่า อัตราการเปลี่ยนแปลงของ $\Delta\theta_{N-S}$ จะมีค่าเป็นศูนย์เมื่อเวลาประมาณ 13.00 น. ซึ่งหมายความว่าวงกลมชั่วโมงของดวงอาทิตย์จะทับกับวงกลมชั่วโมงที่ผ่านแกนหมุนของระบบติดตามดวงอาทิตย์ เมื่อเวลา 13.00 น. ตามเวลาท้องถิ่นแทนที่จะทับกันตอนเวลา 12.00 น. ของเวลาท้องถิ่น ทั้งนี้มีสาเหตุ 2 ประการ คือ

- 1) ในช่วงระหว่างวันที่ 20-23 ธันวาคมนั้น ความแตกต่างระหว่างเวลาเที่ยงของ

ดวงอาทิตย์ และเวลาเที่ยงตามเวลามาตรฐาน ตามสมการของเวลาดังแสดงในรูปที่ 6 จะมีค่าน้อยมาก แต่จะมีความแตกต่างระหว่างเวลาที่ท้องถิ่นกับเวลามาตรฐานของท้องถิ่น 17.6 นาที ทั้งนี้เพราะเวลามาตรฐานของประเทศไทยจะถือตามเส้นลองจิจูดที่ 105 องศา ในขณะที่สถานที่ทดลองจะตั้งอยู่ที่ลองจิจูดที่ 100.6 องศา ซึ่งมีความแตกต่างกัน 4.4 องศา หรือเท่ากับ 17.6 นาที ดังนั้นเวลาที่ดวงอาทิตย์อยู่ที่ซีกินจะเป็นเวลา 12.18 น. แทนที่จะเป็น 12.00 น.

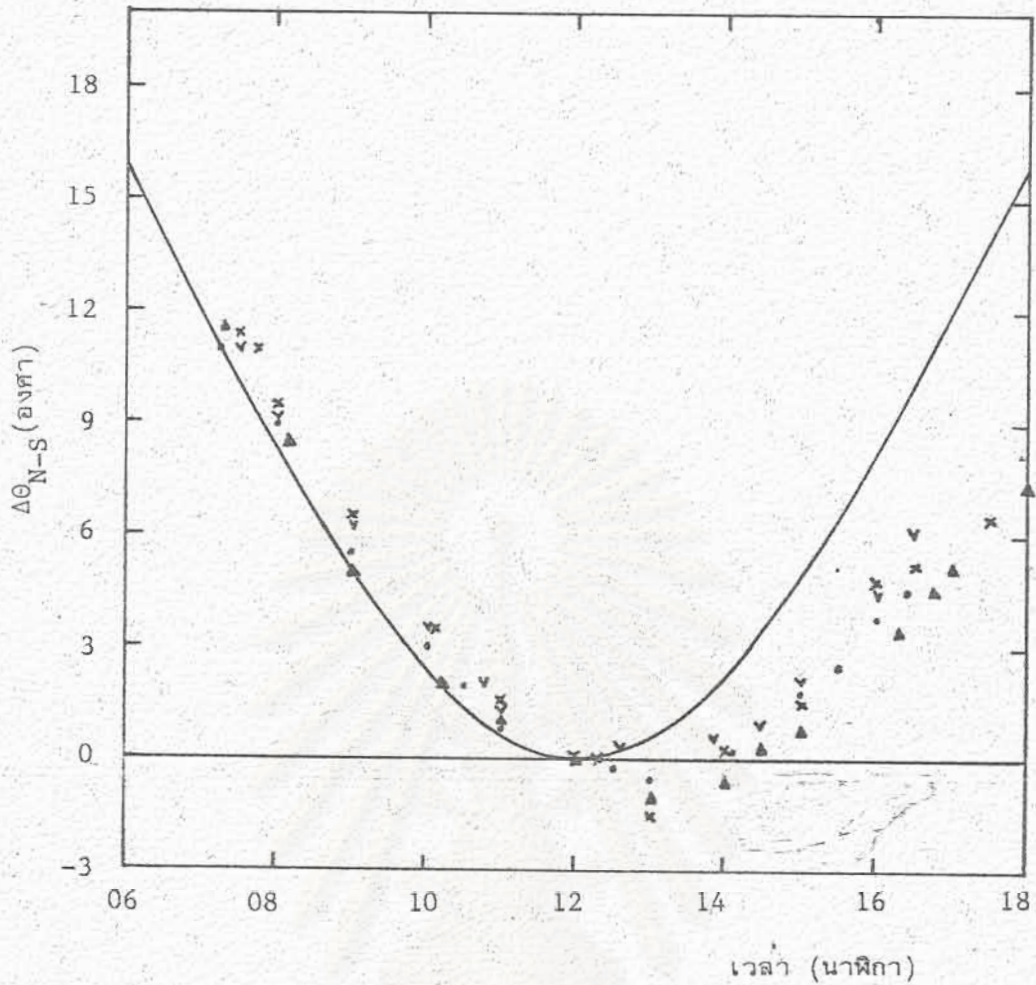


รูปที่ 28 ความคลาดเคลื่อนในการติดตามดวงอาทิตย์ในแนวตะวันออก-ตะวันตก ($\Delta\theta_{E-W}$) ในช่วงเวลา 4 วัน (x v a v) เปรียบเทียบกับผลการคำนวณทางทฤษฎี _____

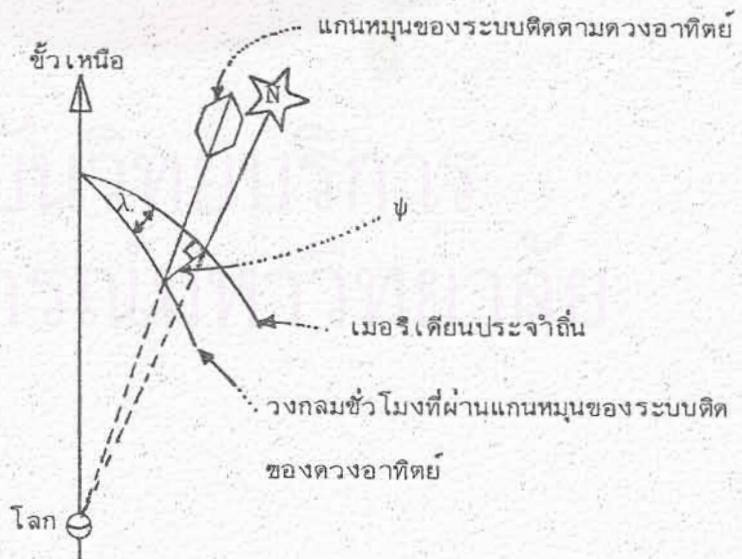
2) เนื่องจากการตั้งแกนหมุนมีความคลาดเคลื่อนประมาณ 3 องศา ดังได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อ 4.4 ความคลาดเคลื่อนนี้จะทำให้แกนหมุนของระบบติดตามดวงอาทิตย์ไม่อยู่ในระนาบของเมริเดียนประจำถิ่น แต่จะอยู่ในวงกลมชั่วโมงที่ห่างออกไปในทิศทางการเคลื่อนที่ของดวงอาทิตย์ ดังแสดงในรูปที่ 30

จากความคลาดเคลื่อนของทิศทางของแกนหมุนของระบบและเหตุผลในข้อ 1 แสดงให้เห็นว่า วงกลมชั่วโมงที่ผ่านแกนหมุนของระบบ จะทำมุมกับเมริเดียนประจำถิ่น (λ ในรูปที่ 30) 10.6 องศา จากการคำนวณพบว่าความคลาดเคลื่อนของทิศทางของแกนหมุน (ψ ในรูปที่ 30) 2.56 องศา สำหรับระบบที่อยู่ ณ ละติจูดที่ 13.7 องศาเหนือ จะทำให้มุม λ มีค่าเท่ากับ 10.6 องศา ซึ่งแสดงให้เห็นว่าความคลาดเคลื่อนของ ψ มีค่าใกล้เคียงกับค่าที่วัดได้

นอกจากความคลาดเคลื่อนเนื่องจากทิศทางของแกนหมุนของระบบ และความแตกต่างระหว่างเวลาที่ท้องถิ่นกับเวลามาตรฐานของท้องถิ่น ดังได้กล่าวมาแล้ว ผลการทดลองในรูปที่ 28



รูปที่ 29 ความคลาดเคลื่อนในการติดตามดวงอาทิตย์ในแนวเหนือ-ใต้ ($\Delta\theta_{N-S}$) ในช่วงเวลา 4 วัน (o x ▲ ▼) เปรียบเทียบกับผลการคำนวณทางทฤษฎี —



รูปที่ 30 แสดงตำแหน่งของแกนหมุนของระบบติดตามดวงอาทิตย์ เมื่อมีความคลาดเคลื่อนของทิศทางของแกนหมุนเทียบกับแนวเหนือ-ใต้ของท้องถิ่น

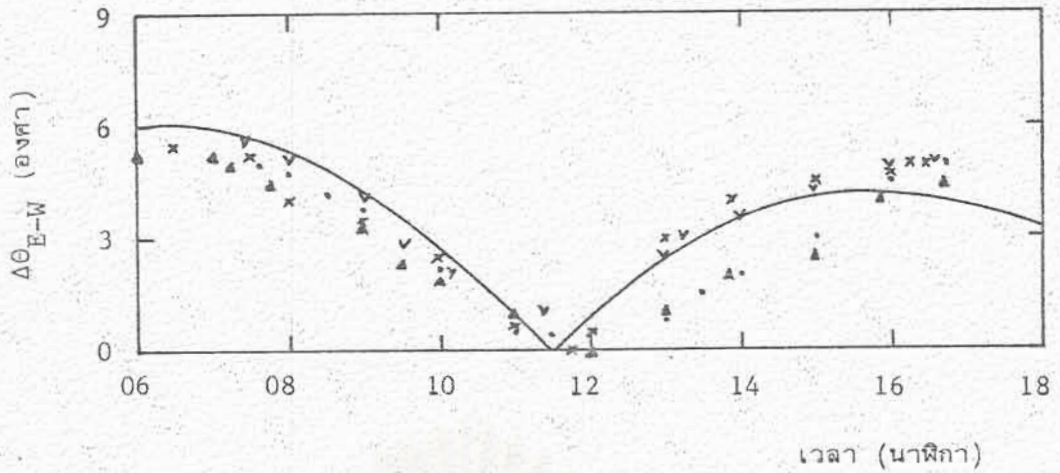
แสดงให้เห็นค่าว่า เวลาที่ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยในแนวตะวันออก-ตะวันตกมีค่าเป็นศูนย์จะเกิดขึ้นเมื่อเวลาประมาณ 12.30 น. ซึ่งความคลาดเคลื่อนนี้จะเกิดจาก backlash ของเฟืองที่ใช้ในการหมุนแกนหมุนของระบบที่อยู่ในแนวเหนือ-ใต้ ซึ่งมีค่าประมาณ 3 องศา

รูปที่ 31-33 แสดงการเปรียบเทียบผลการทดลองของความคลาดเคลื่อนในการติดตามดวงอาทิตย์ $\Delta\theta_{E-W}$, $\Delta\theta_{N-S}$ และ $\Delta\theta$ กับผลการคำนวณที่คำนึงถึงผลของความแตกต่างของเวลาที่ท้องถิ่น กับเวลามาตรฐานของท้องถิ่น ความคลาดเคลื่อนของทิศทางของแกนหมุนของระบบ และความคลาดเคลื่อนของเวลาที่วงกลมชั่วโมงของดวงอาทิตย์เทียบกับวงกลมชั่วโมงที่ผ่านแนวตั้งฉากของแผง จะเห็นได้ผลการทดลองจะมีค่าใกล้เคียงกับผลการคำนวณ จากผลการทดลองและคำนวณแสดงให้เห็นว่า ความคลาดเคลื่อนในการติดตามดวงอาทิตย์ของระบบติดตามดวงอาทิตย์ที่ใช้การประมาณสมการการเคลื่อนที่ของดวงอาทิตย์ด้วยสมการเส้นตรง จะมีค่ามากในช่วงเช้าและบ่าย ซึ่งเป็นช่วงเวลาที่ความเข้มของแสงมีค่าน้อย อย่างไรก็ตามความคลาดเคลื่อนนี้จะมีค่ามากขึ้นสำหรับสถานที่ที่อยู่ ละติจูดสูงขึ้นไป ทั้งนี้เพราะความคลาดเคลื่อนนี้เกิดจากการที่แกนหมุนของระบบติดตามดวงอาทิตย์ และแกนหมุนของโลกไม่ขนานกัน และความคลาดเคลื่อนในการติดตามดวงอาทิตย์โดยวิธีนี้ จะเพิ่มขึ้นตามมุมระหว่างแกนทั้งสอง สำหรับกรุงเทพฯซึ่งอยู่ที่ละติจูดที่ 13.7 องศาเหนือ เราพบว่า ความคลาดเคลื่อนสูงสุดระหว่างเวลา 8.00 ถึง 16.00 จะมีค่าประมาณ 11 องศา ซึ่งทำให้ประมาณแสงตรงที่แผงได้รับลดลง 1.8% แต่การลดลงของปริมาณแสงรวมเฉลี่ยตลอดทั้งวันจะมีค่าน้อยกว่าระบบติดตามดวงอาทิตย์ที่ไม่มีความคลาดเคลื่อนไม่เกิน 1% ทั้งนี้เพราะปริมาณแสงตรงจากดวงอาทิตย์จะมีประมาณครึ่งหนึ่งของปริมาณแสงทั้งหมดที่มายังแผงเซลล์แสงอาทิตย์ นอกจากนี้ความคลาดเคลื่อนในการติดตามดวงอาทิตย์จะลดลงในช่วงใกล้เที่ยง ซึ่งเป็นช่วงที่ความเข้มของแสงอาทิตย์มีค่ามากที่สุด

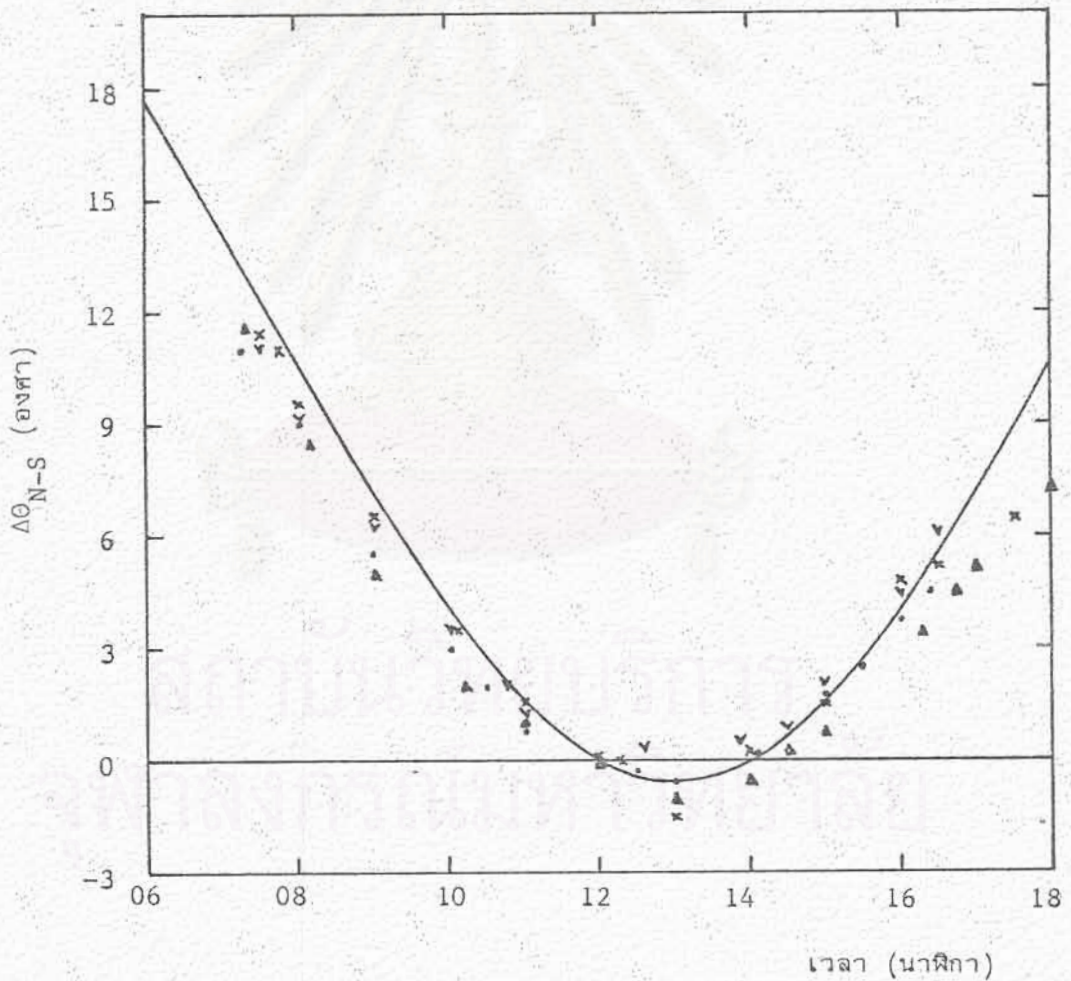
ในการคำนวณตำแหน่งของดวงอาทิตย์ที่ต้องการความแม่นยำสูงนั้น นอกจากจะต้องคำนึงถึงสาเหตุต่าง ๆ ดังได้กล่าวมาแล้ว เราจะต้องคิดถึงสาเหตุอื่น ๆ อีกมาก [14] แต่เนื่องจากความคลาดเคลื่อนเนื่องจากสาเหตุอื่น ๆ ที่ไม่ได้กล่าวถึงนั้นมีค่าน้อย ดังนั้นเราจึงสามารถละเลยได้ สำหรับระบบที่ไม่ต้องการความแม่นยำสูงนัก

ข. เมื่อโลกอยู่ ณ ตำแหน่งอัครินออกซ์ฤดูใบไม้ผลิ

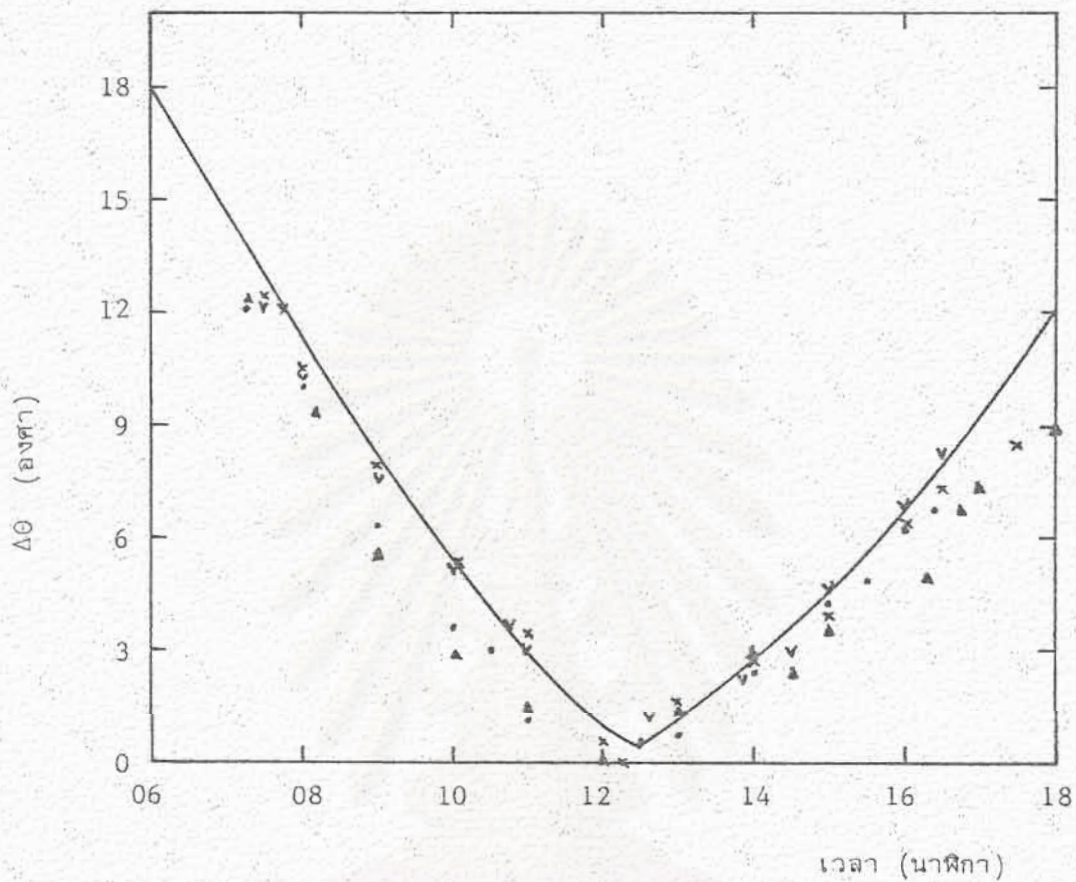
รูปที่ 34-36 แสดงผลการวัดความคลาดเคลื่อนในการติดตามดวงอาทิตย์ ในแนวตะวันออก-ตะวันตก ($\Delta\theta_{E-W}$) แนวเหนือ-ใต้ ($\Delta\theta_{N-S}$) และความคลาดเคลื่อนรวม ($\Delta\theta$)



รูปที่ 31 ความคลาดเคลื่อนในการติดตามดวงอาทิตย์ในแนวตะวันออก-ตะวันตก ($\Delta\theta_{E-W}$) ในช่วงเวลา 4 วัน (* x * v) เปรียบเทียบกับผลการคำนวณทางทฤษฎี ซึ่งคำนึงถึงความแตกต่างของเวลาชนิดต่าง ๆ และความคลาดเคลื่อนของทิศทางของแกนหมุนของระบบ

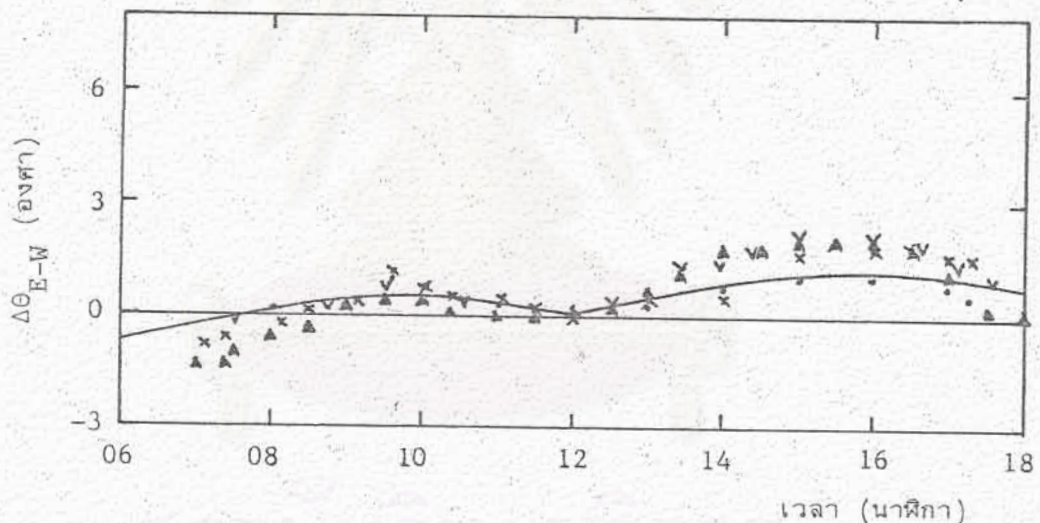


รูปที่ 32 ความคลาดเคลื่อนในการติดตามดวงอาทิตย์ในแนวเหนือ-ใต้ ($\Delta\theta_{N-S}$) ในช่วงเวลา 4 วัน (* x * v) เปรียบเทียบกับผลการคำนวณทางทฤษฎี ซึ่งคำนึงถึงความแตกต่างของเวลาชนิดต่าง ๆ และความคลาดเคลื่อนของทิศทางของแกนหมุนของระบบ



รูปที่ 33 ความคลาดเคลื่อนในการติดตามดวงอาทิตย์ ($\Delta\theta$) ในช่วงเวลา 4 วัน ($\bullet \times \blacktriangle \blacktriangledown$) เปรียบเทียบกับผลการคำนวณทางทฤษฎี ซึ่งคำนึงถึงความแตกต่างของเวลาชนิดต่าง ๆ และความคลาดเคลื่อนของทิศทางของแกนหมุนของระบบ

เปรียบเทียบกับผลการคำนวณทางทฤษฎี ซึ่งคำนึงถึงผลของสมการของเวลา (Equation of time) ความแตกต่างระหว่างเวลาที่อิงกับเวลามาตรฐานของท้องถิ่น และความคลาดเคลื่อนของทิศทางของแกนหมุนของระบบ ซึ่งผลทั้งสองมีค่าใกล้เคียงกัน เราจะเห็นได้ว่า เมื่อโลกอยู่ ณ ตำแหน่งอัครินอกซ์ ความคลาดเคลื่อนในการติดตามดวงอาทิตย์ในแนวตะวันออก-ตะวันตกจะมีค่าน้อยกว่าในตอนที่โลกอยู่ ณ ตำแหน่งโซลลิสต์หน้าหนาวประมาณ 3 เท่า และมีค่าน้อยเมื่อเทียบกับความคลาดเคลื่อนในการติดตามดวงอาทิตย์ในแนวเหนือ-ใต้ ซึ่งยังคงมีค่าใกล้เคียงกับตอนที่โลกอยู่ ณ ตำแหน่งโซลลิสต์หน้าหนาว ความคลาดเคลื่อนในการติดตามดวงอาทิตย์จะมีค่ามากในตอนเช้าและบ่าย เช่นเดียวกับกับตอนที่โลกอยู่ ณ ตำแหน่งโซลลิสต์หน้าหนาว โดยมีความคลาดเคลื่อนสูงสุดในช่วงเวลา 8.00-16.00 น. ประมาณ 10 องศา ซึ่งจะทำให้ปริมาณแสงที่แผงเซลล์แสงอาทิตย์ได้รับเฉลี่ยตลอดวันลดลงจากระบบติดตามดวงอาทิตย์ที่ไม่มีมีความคลาดเคลื่อนไม่เกิน 1% เช่นเดียวกับตอนที่โลกอยู่ ณ ตำแหน่งโซลลิสต์หน้าหนาว

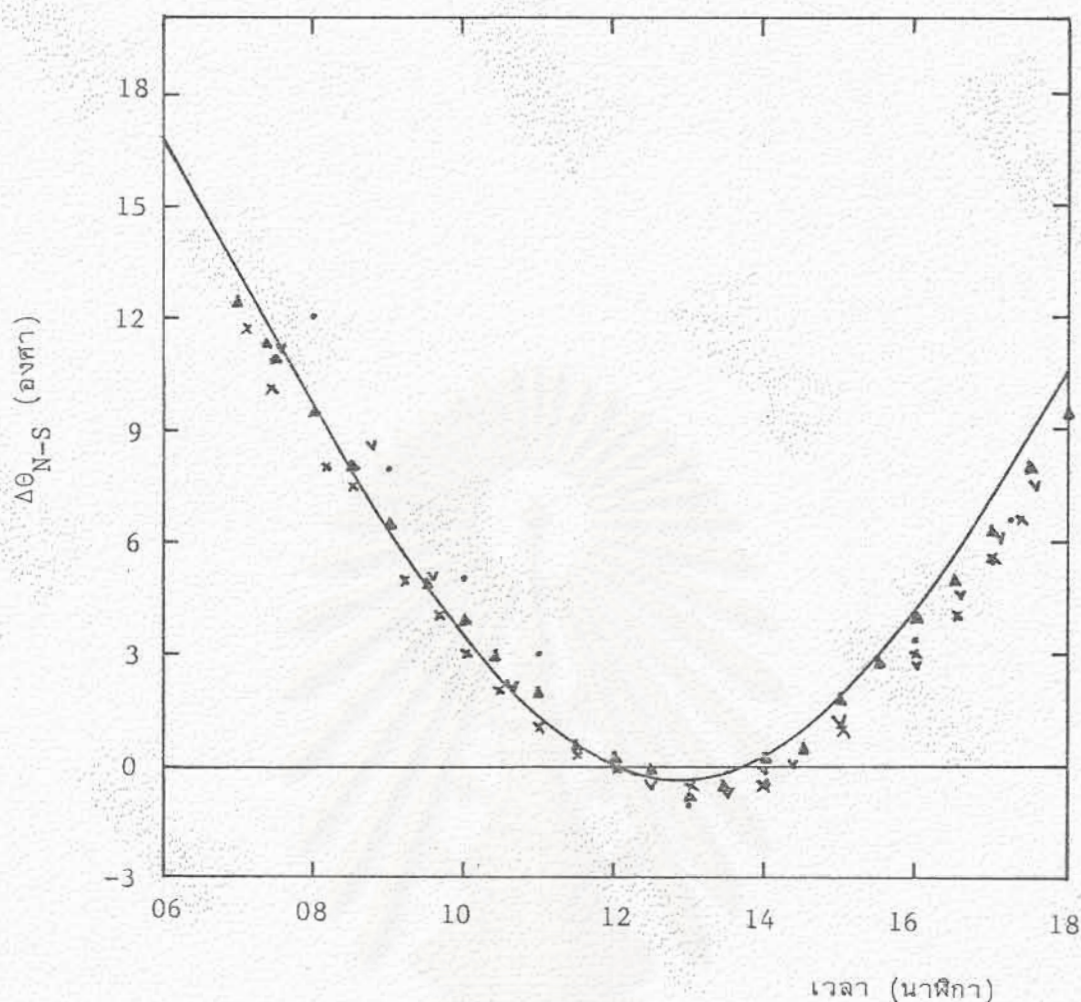


รูปที่ 34 ความคลาดเคลื่อนในการติดตามดวงอาทิตย์ในแนวตะวันออก-ตะวันตก ($\Delta\theta_{E-W}$) ในช่วงเวลา 4 วัน ($\bullet \times \blacktriangle \nabla$) เปรียบเทียบกับผลการคำนวณทางทฤษฎี ซึ่งคำนึงความแตกต่างของเวลาชนิดต่าง ๆ และความคลาดเคลื่อนของทิศทางของแกนหมุนของระบบ

5.2.2 การเพิ่มขึ้นของพลังงานเมื่อมีการติดตามดวงอาทิตย์

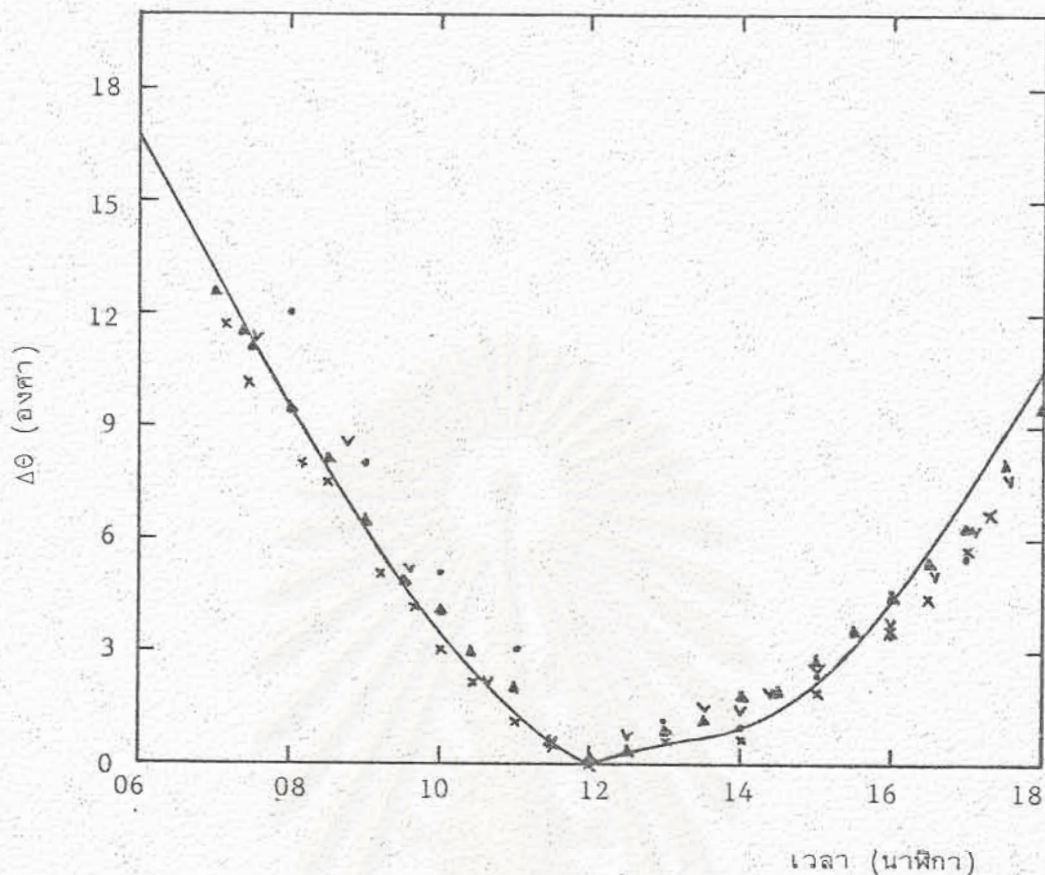
ก. เมื่อโลกอยู่ ณ ตำแหน่งโซลลิสต์หน้าหนาว

รูปที่ 37-40 เป็นผลการวัดกระแสลัดวงจรของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีการติดตามดวงอาทิตย์ และแบบที่ติดตั้งอยู่กับที่ โดยเอียงทำมุม 37.2 และ 13.7 องศาได้ ซึ่งได้ทำการวัดเมื่อวันที่ 20, 21, 22 และ 23 ธันวาคม 2526 จากค่าของกระแสลัดวงจรที่วัด



รูปที่ 35 ความคลาดเคลื่อนในการติดตามดวงอาทิตย์ในแนวเหนือ-ใต้ ($\Delta\theta_{N-S}$) ในช่วงเวลา 4 วัน ($\times \bullet \nabla$) เปรียบเทียบกับผลการคำนวณทางทฤษฎี ซึ่งคำนึงถึงความแตกต่างของเวลาชนิดต่าง ๆ และความคลาดเคลื่อนของทิศทางของแกนหมุนของระบบ

ได้ เราสามารถที่จะคำนวณหาพลังงานออกของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ จากกราฟในรูปที่ 41 ซึ่งเป็นกราฟที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังออกของแผงเซลล์กับกระแสลัดวงจรของแผงเซลล์ เมื่อเราใช้แผงเซลล์ดังกล่าวต่อกับภาระทางไฟฟ้าที่มีแบตเตอรี่ 12 โวลต์ ต่ออยู่ด้วย ซึ่งลักษณะเช่นนี้จะทำให้จุดทำงานของแผงเซลล์มีค่าใกล้เคียงกับจุดทำงานที่แผงเซลล์แสงอาทิตย์จะให้กำลังงานออกได้สูงสุด [15] จากกราฟรูปที่ 37-40 เราได้คำนวณหาพลังงานเป็นวัตต์-ชั่วโมงในแต่ละวันดังได้แสดงไว้ในรูปที่ 42 จากกราฟดังกล่าวเราได้ทำการคำนวณหาพลังงานออกเฉลี่ยต่อวันต่อแผง เพื่อเปรียบเทียบพลังงานของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีการติดตามดวงอาทิตย์กับแผงเซลล์ซึ่งติดตั้งอยู่กับที่ ซึ่งพบว่าพลังงานเฉลี่ยต่อวันของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีการติดตามดวงอาทิตย์มีค่าเท่ากับ 204 วัตต์-ชั่วโมง ในขณะที่พลังงานเฉลี่ยต่อวันของแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบติดตั้งอยู่กับที่

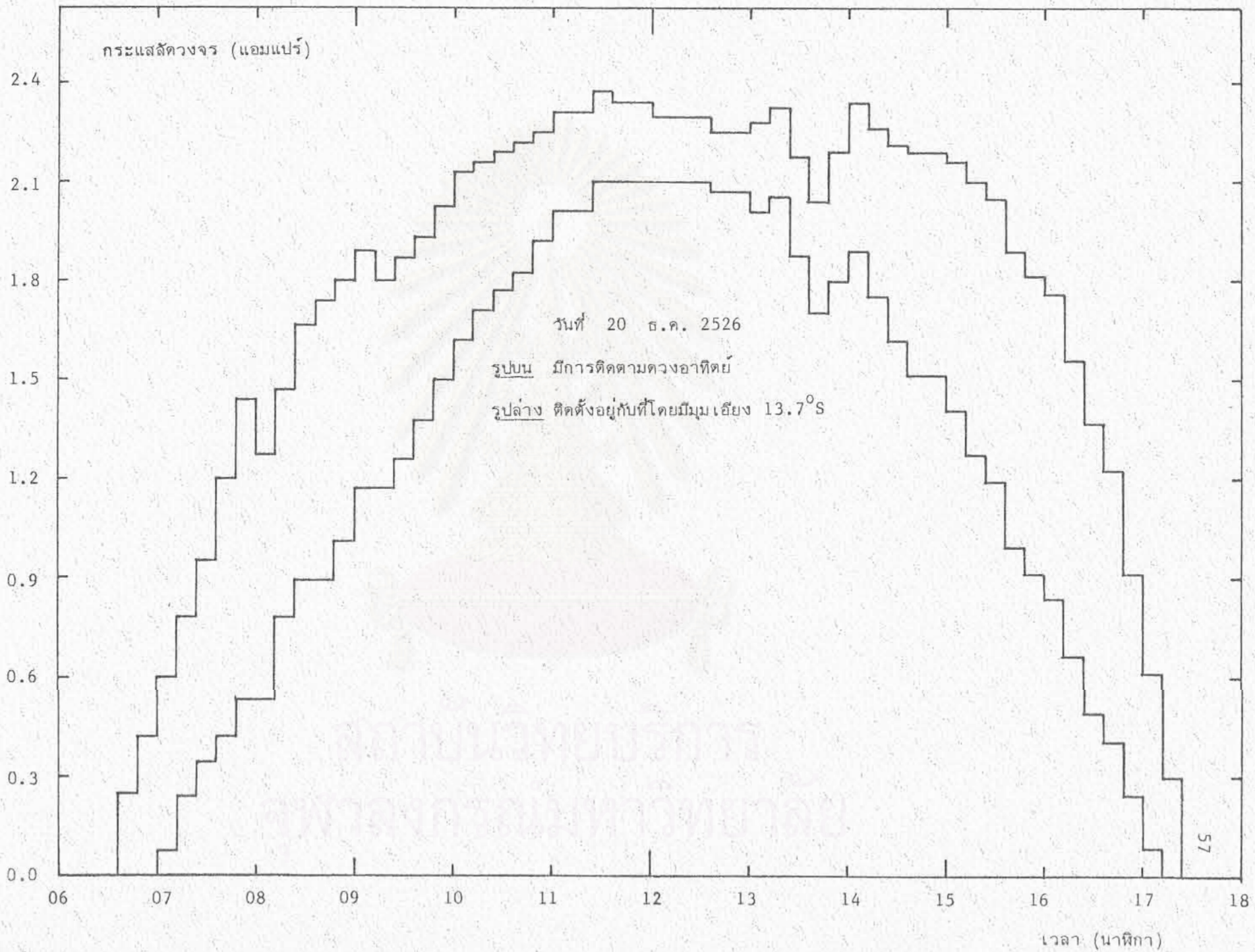


รูปที่ 36 ความคลาดเคลื่อนในการติดตามดวงอาทิตย์ ($\Delta\theta$) ในช่วงเวลา วัน ($\cdot \times \triangle \nabla$) เปรียบเทียบกับผลการคำนวณทางทฤษฎี ซึ่งคำนึงถึงความแตกต่างของเวลาชนิดต่าง ๆ และความคลาดเคลื่อนของทิศทางของแกนหมุนของระบบ

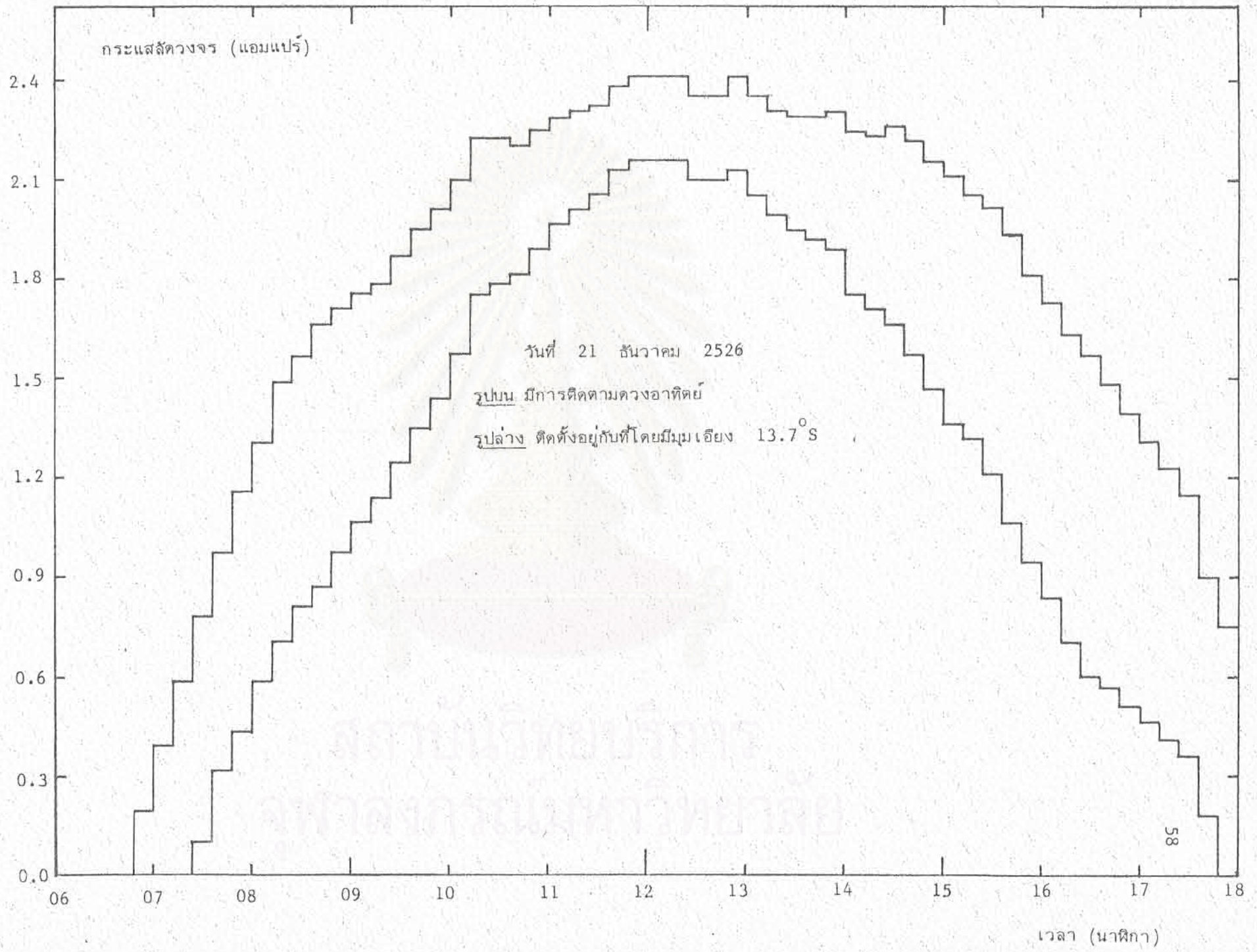
โดยเอียงทำมุม 37.2 องศาได้ มีค่าเท่ากับ 170 วัตต์-ชั่วโมง ส่วนแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ติดตั้งอยู่กับที่และเอียงทำมุม 13.7 องศาได้ จะให้พลังงานออกเฉลี่ยต่อวันเท่ากับ 144 วัตต์-ชั่วโมง เนื่องจากระบบติดตามดวงอาทิตย์ที่สร้างขึ้นสามารถติดตามแผงเซลล์ขนาด 33 วัตต์ ได้ 6 แผง โดยที่ระบบใช้พลังงานในการติดตามดวงอาทิตย์ 120 วัตต์-ชั่วโมงต่อวัน ซึ่งจากข้อมูลดังกล่าวเราจะสามารถคำนวณหาพลังงานออกต่อวันของแผงเซลล์ ซึ่งประกอบด้วยแผงเซลล์แสงอาทิตย์ 6 แผง ได้ดังนี้

| | | |
|---|------|---------------|
| พลังงานออกของแผงเซลล์ที่มีการติดตามดวงอาทิตย์ | 1224 | วัตต์-ชั่วโมง |
| พลังงานออกของแผงเซลล์ที่มีมุมเอียง 37.2° ได้ | 1020 | วัตต์-ชั่วโมง |
| พลังงานออกของแผงเซลล์ที่มีมุมเอียง 13.7° ได้ | 864 | วัตต์-ชั่วโมง |
| พลังงานที่ใช้ในการติดตามดวงอาทิตย์ | 120 | วัตต์-ชั่วโมง |

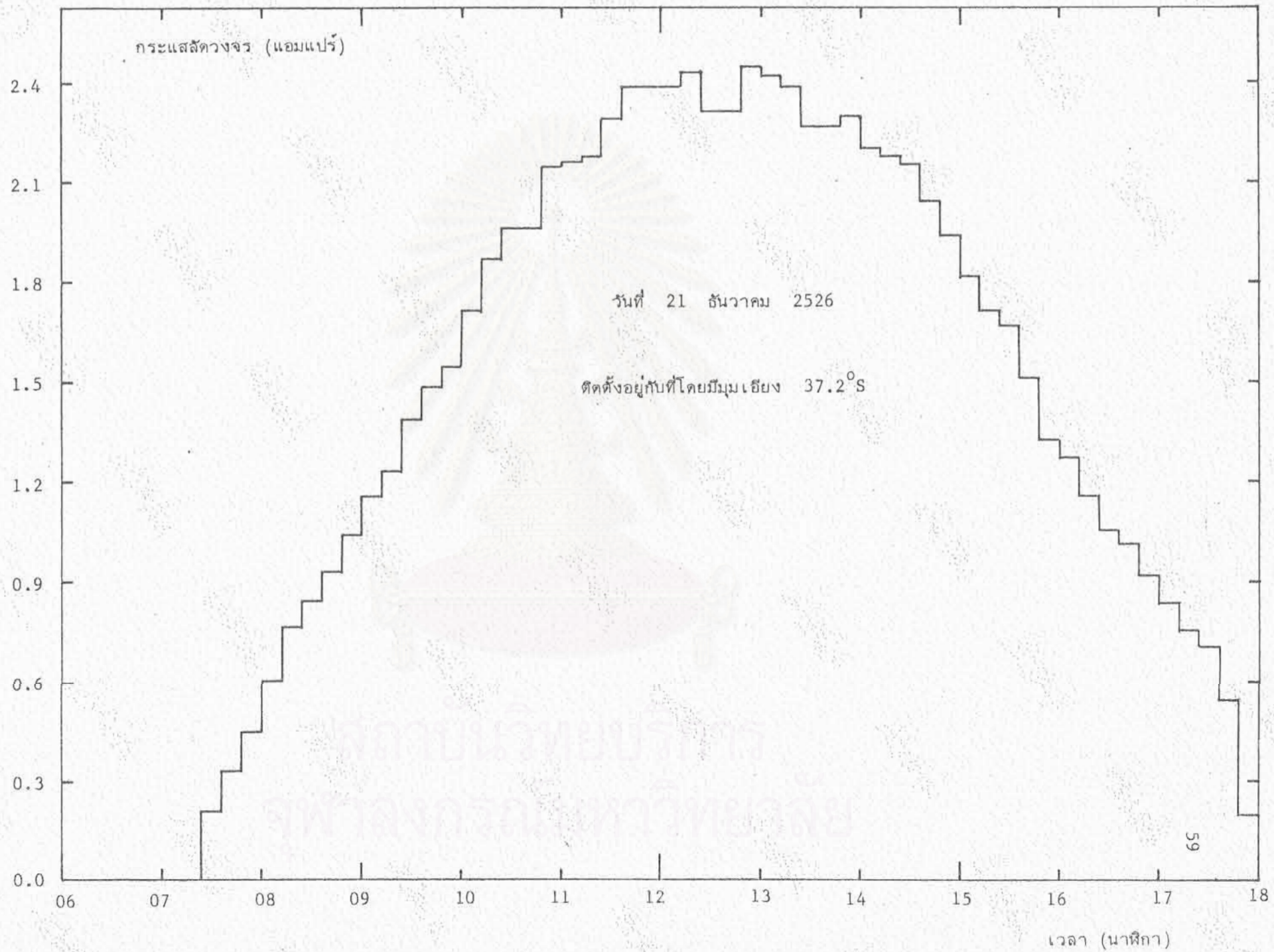
รูปที่ 37 ก. กระแสลัดวงจรของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ขนาด 33 วัตต์ ที่เวลาต่าง ๆ กัน



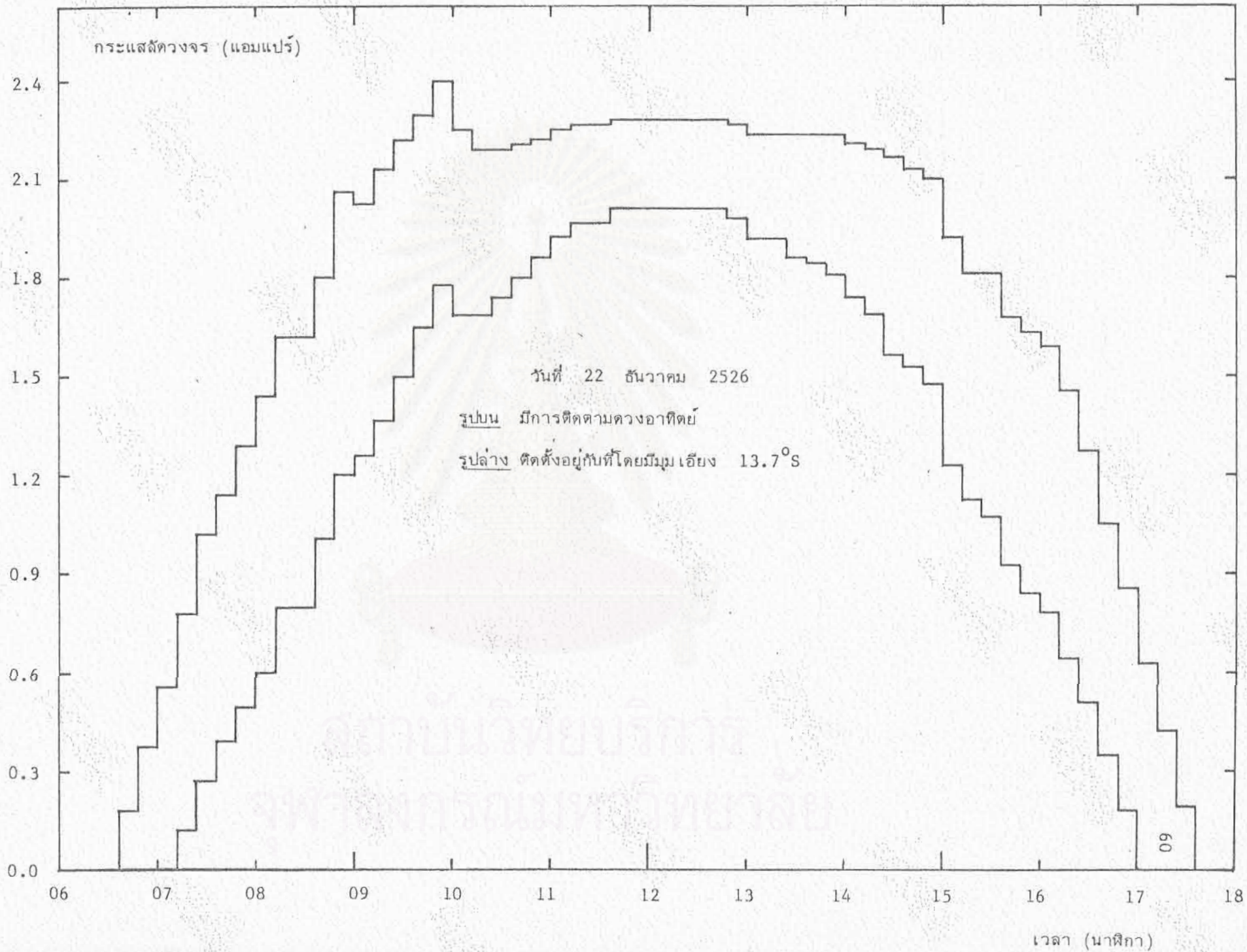
รูปที่ 38 ก. กระแสลัดวงจรของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ขนาด 33 วัตต์ ที่เวลาต่าง ๆ กัน



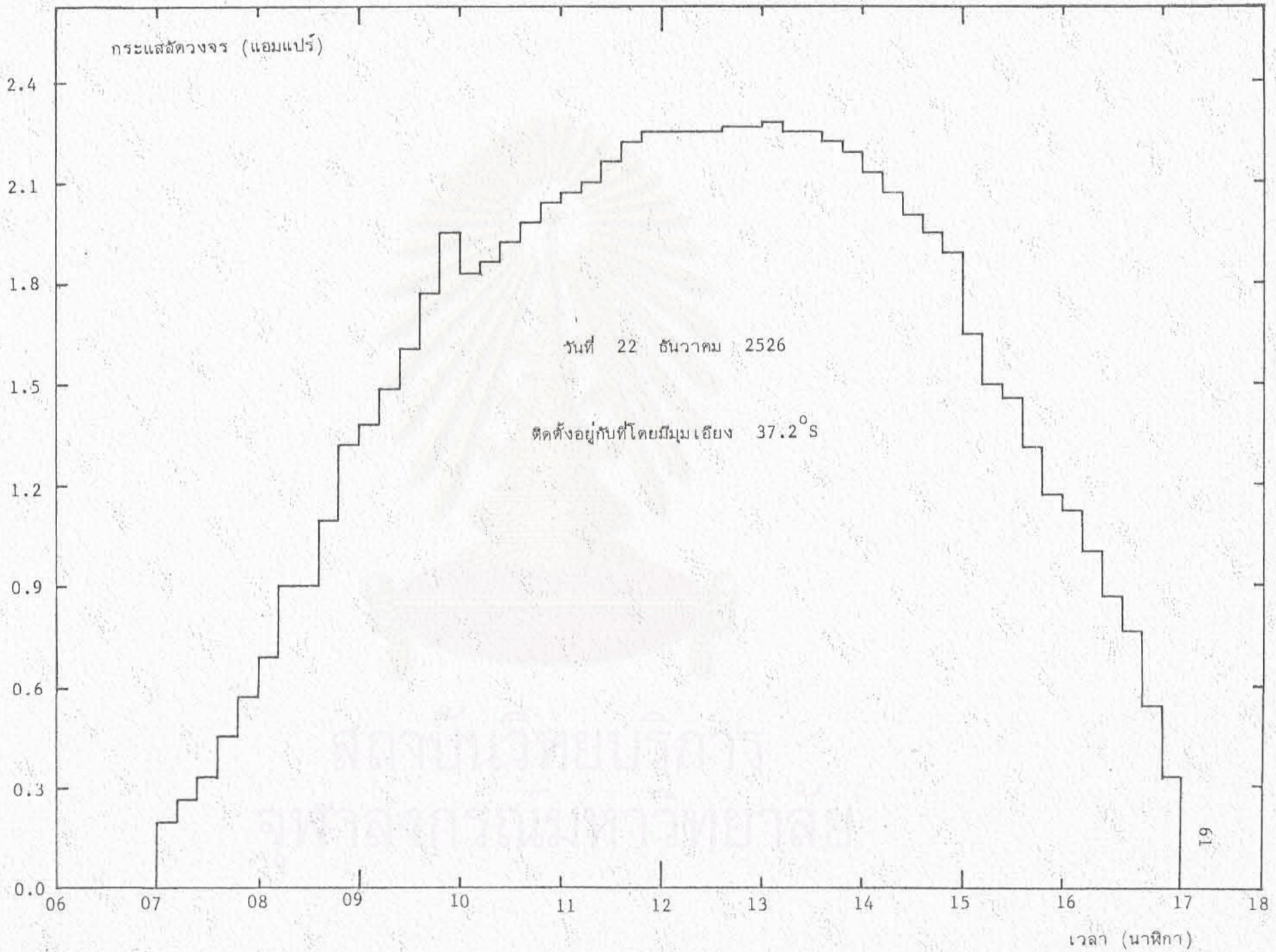
รูปที่ 38 ข. กระแสลัดวงจรของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดขนาด 33 วัตต์ ที่เวลาต่าง ๆ กัน



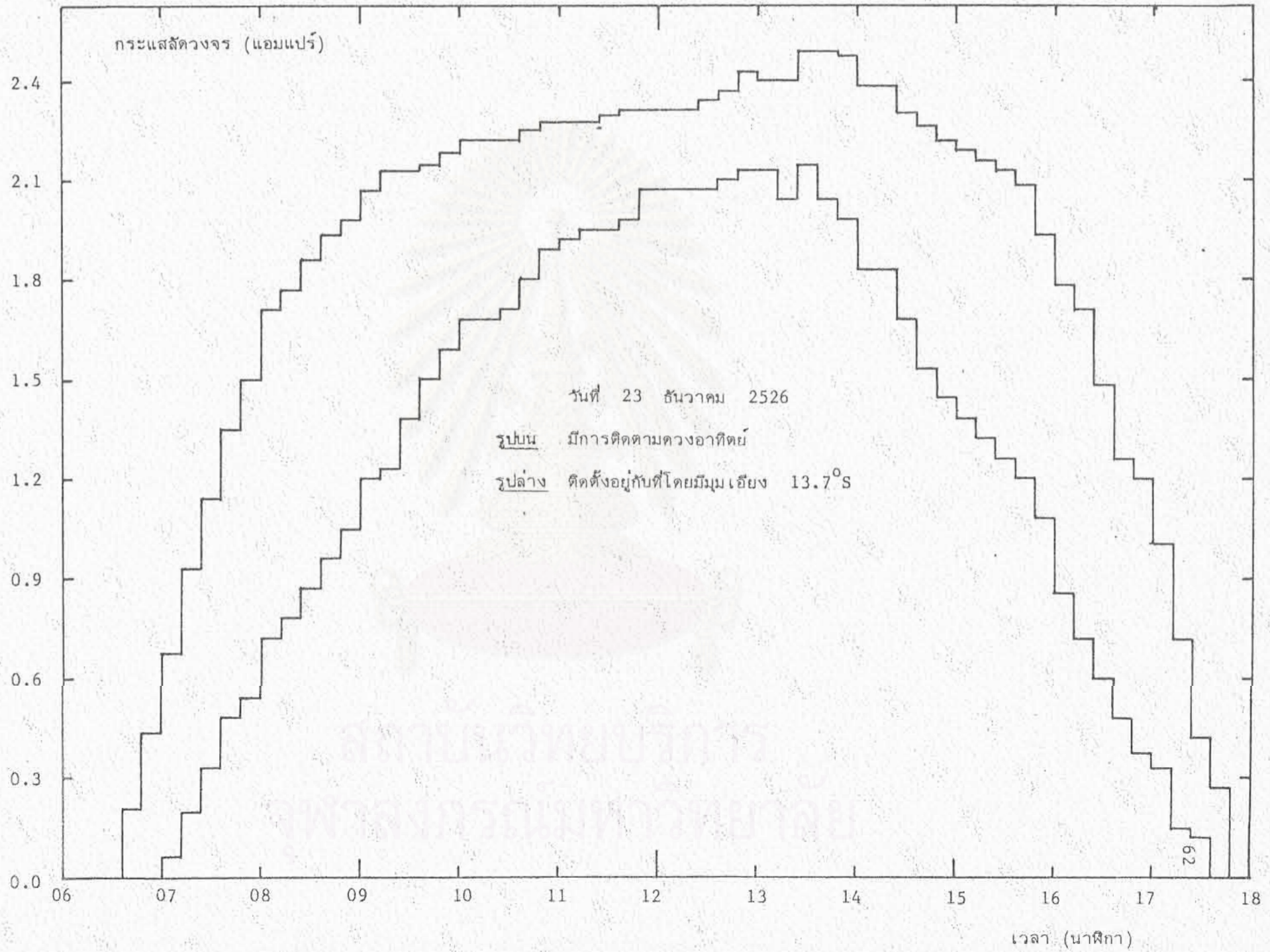
รูปที่ 39 ก. กระแสตัดวงจรของแผงโซลาร์เซลล์ขนาด 33 วัตต์ ที่เวลาต่าง ๆ กัน



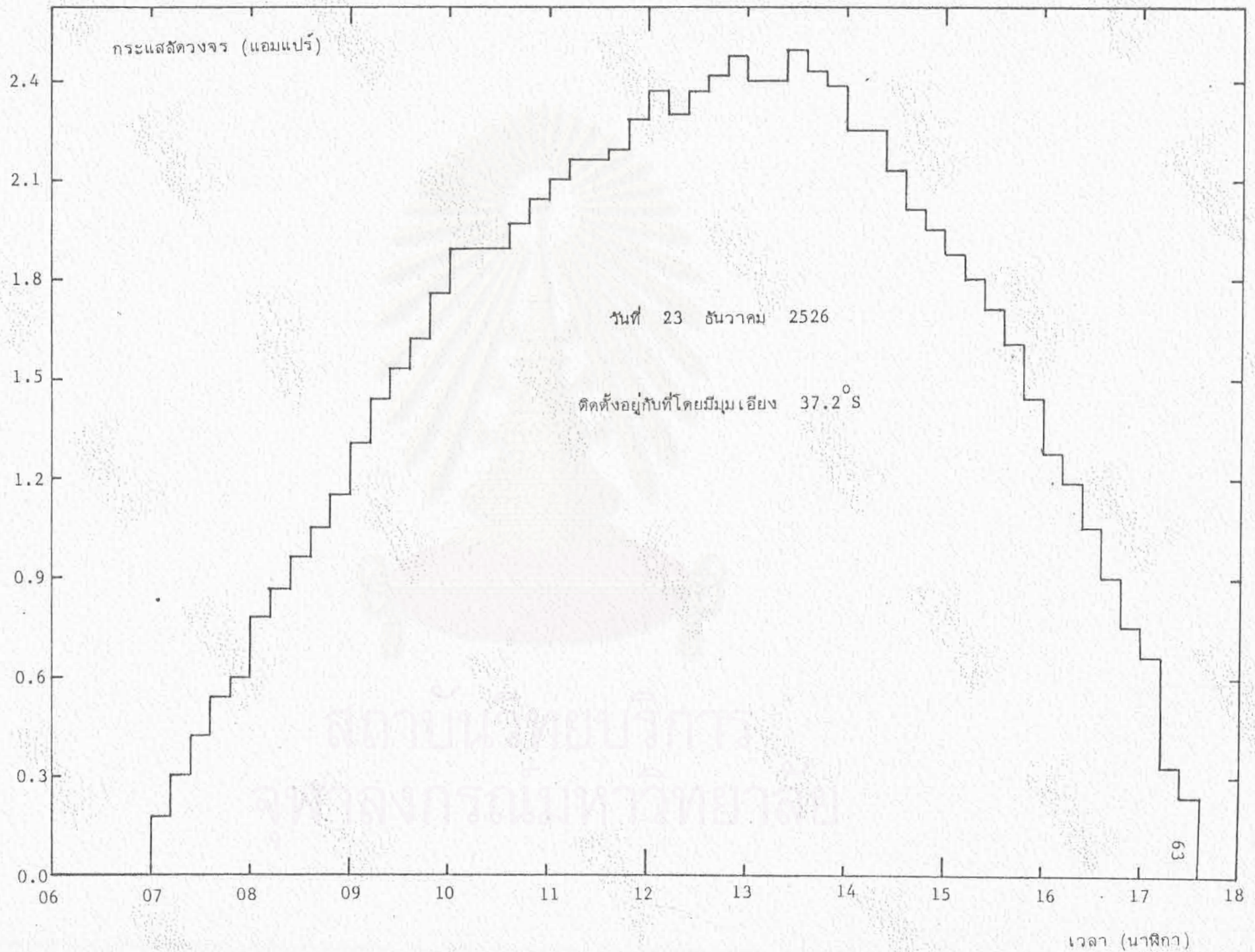
รูปที่ 39 ข. กระแสลัดวงจรของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ขนาด 33 วัตต์ ที่เวลาต่าง ๆ กัน

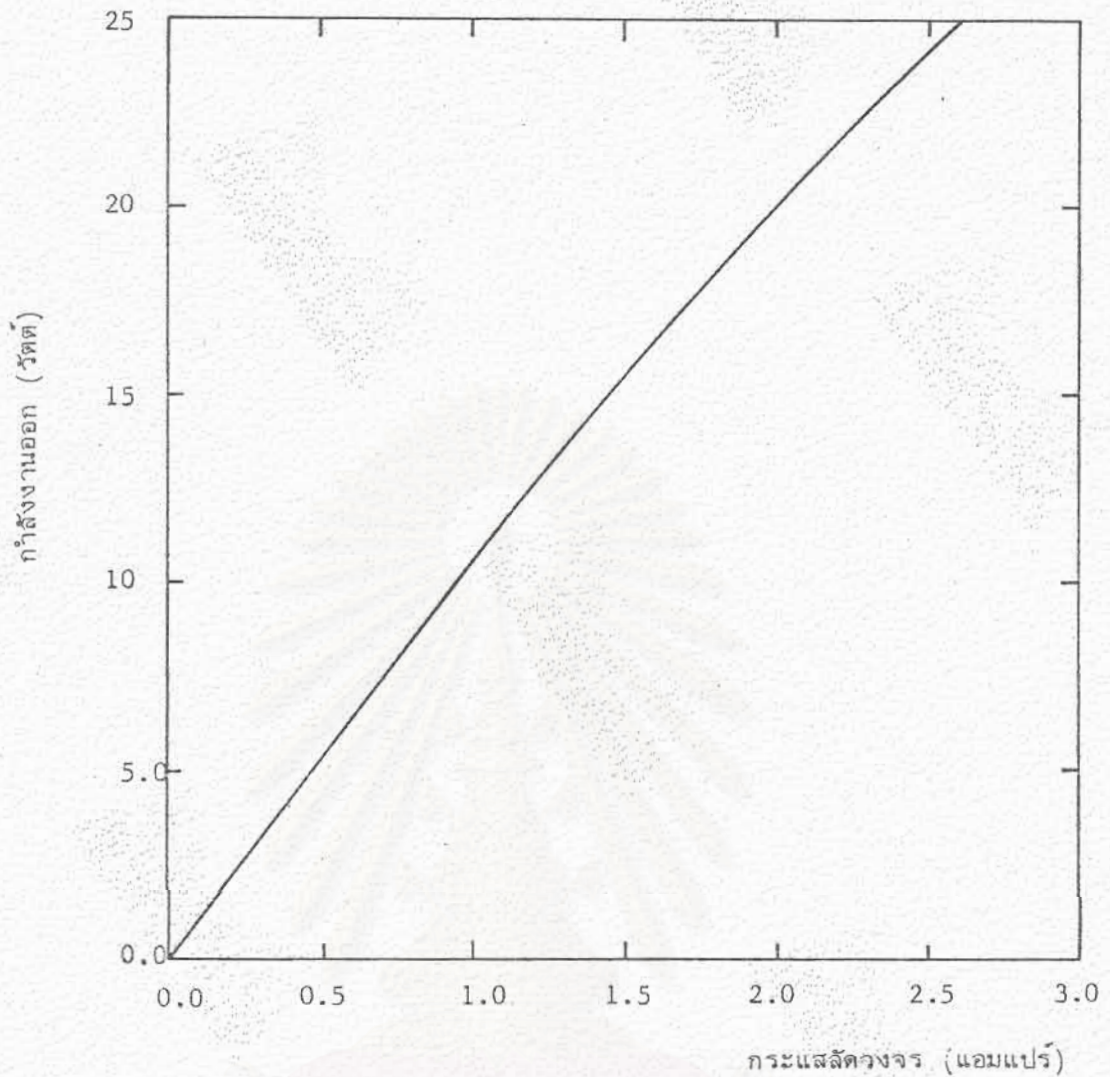


รูปที่ 40 ก. กระแสตรงของแสงอาทิตย์ขนาด 33 วัตต์ ที่เวลาต่าง ๆ กัน



รูปที่ 40 ข. กระแสหลอดวงจรแสงอาทิตย์ขนาด 33 วัตต์ ที่เวลาต่าง ๆ กัน





รูปที่ 41 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังออกของแผงเซลล์แสงอาทิตย์กับกระแสลัดวงจรของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้

- การเปรียบเทียบระหว่างระบบที่มีการติดตามดวงอาทิตย์กับระบบที่ติดตั้งอยู่กับที่ตลอดทั้งปี

$$\begin{aligned} \text{พลังงานออกของแผงเซลล์ที่เพิ่มขึ้น} &= \frac{1224-864}{864} \times 100 \\ &= 41.67 \% \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{พลังงานออกของระบบที่เพิ่มขึ้น} &= \frac{(1224-120)-864}{864} \times 100 \\ &= 27.78 \% \end{aligned}$$

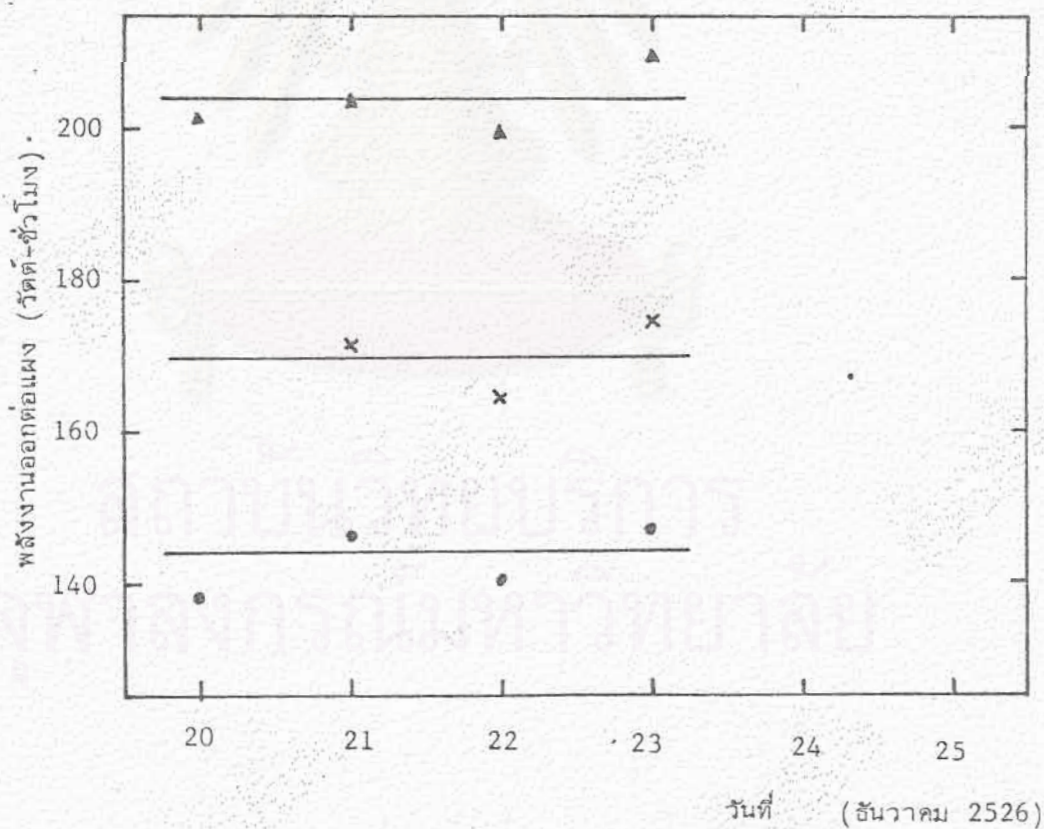
- การเปรียบเทียบระหว่างระบบที่มีการติดตามดวงอาทิตย์กับระบบที่ติดตั้งอยู่กับที่แต่ปรับมุมเอียงตามฤดูกาล

$$\begin{aligned} \text{พลังงานออกแผงเซลล์ที่เพิ่มขึ้น} &= \frac{1224-1020}{1020} \times 100 \\ &= 20\% \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{พลังงานออกของระบบที่เพิ่มขึ้น} &= \frac{(1224-120)-1020}{1020} \times 100 \\ &= 8.24\% \end{aligned}$$

- การเปรียบเทียบระบบที่ติดตั้งอยู่กับที่ตลอดปี กับระบบที่ติดตั้งอยู่กับที่แต่มีการปรับมุมเอียงตามฤดูกาล

$$\begin{aligned} \text{พลังงานออกของระบบที่เพิ่มขึ้น} &= \frac{1020-864}{864} \times 100 \\ &= 18.06\% \end{aligned}$$



รูปที่ 42 พลังงานออกต่อวันของแผงเซลล์ 1 แผง ที่ติดตั้งอยู่กับที่และเอียงทำมุม 14.7 องศา (●) 37.2 องศา (x) และแผงเซลล์ซึ่งมีการติดตามดวงอาทิตย์ (▲) เมื่อโลกอยู่ตำแหน่งโซล-สตีลหน้าหนาว

ข. เมื่อโลกอยู่ ณ ตำแหน่งอิควินอกซ์ฤดูใบไม้ผลิ

รูปที่ 43-46 เป็นผลการวัดกระแสลัดวงจรของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีการติดตามดวงอาทิตย์ และแบบที่ติดตั้งอยู่กับที่โดยเอียงทำมุม 13.7 องศาใต้ ซึ่งได้ทำการวัดเมื่อวันที่ 20, 21, 22 และ 25 มีนาคม 2527 จากกราฟดังกล่าวเราสามารถที่จะคำนวณหาพลังงานออกเฉลี่ยต่อวันต่อแผง โดยวิธีเดียวกับในข้อ ก. ซึ่งปรากฏว่าพลังงานออกเฉลี่ยต่อวันของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีการติดตามดวงอาทิตย์มีค่าเท่ากับ 177.5 วัตต์-ชั่วโมง และพลังงานออกเฉลี่ยต่อวันของแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบติดตั้งอยู่กับที่ซึ่งมีมุมเอียง 13.7 องศาใต้ มีค่าเท่ากับ 141.5 วัตต์-ชั่วโมง

เมื่อระบบติดตามดวงอาทิตย์ที่สร้างขึ้นสามารถติดตามแผงเซลล์ขนาด 33 วัตต์ ได้ 6 แผง ดังนั้น

พลังงานออกของแผงที่มีการติดตามดวงอาทิตย์ 1,065 วัตต์-ชั่วโมง

พลังงานออกของแผงที่ติดตั้งอยู่กับที่ 849 วัตต์-ชั่วโมง

พลังงานที่ใช้ในการติดตามดวงอาทิตย์ 120 วัตต์-ชั่วโมง

$$\therefore \text{พลังงานออกของแผงเซลล์ที่เพิ่มขึ้น} = \frac{1065-849}{849} \times 100$$

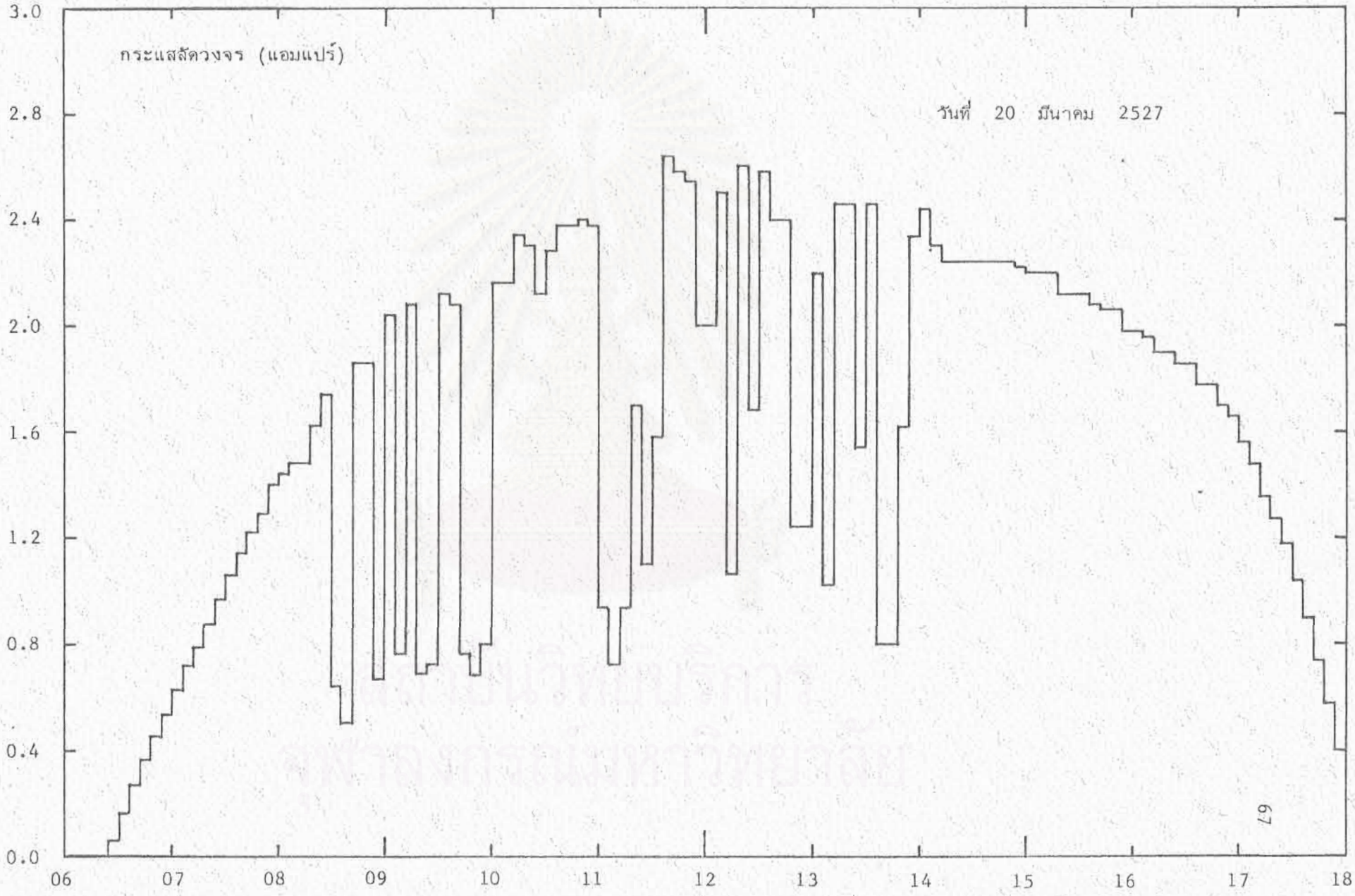
$$= 25.44 \%$$

$$\text{พลังงานออกของระบบที่เพิ่มขึ้น} = \frac{(1065-120)-849}{849} \times 100$$

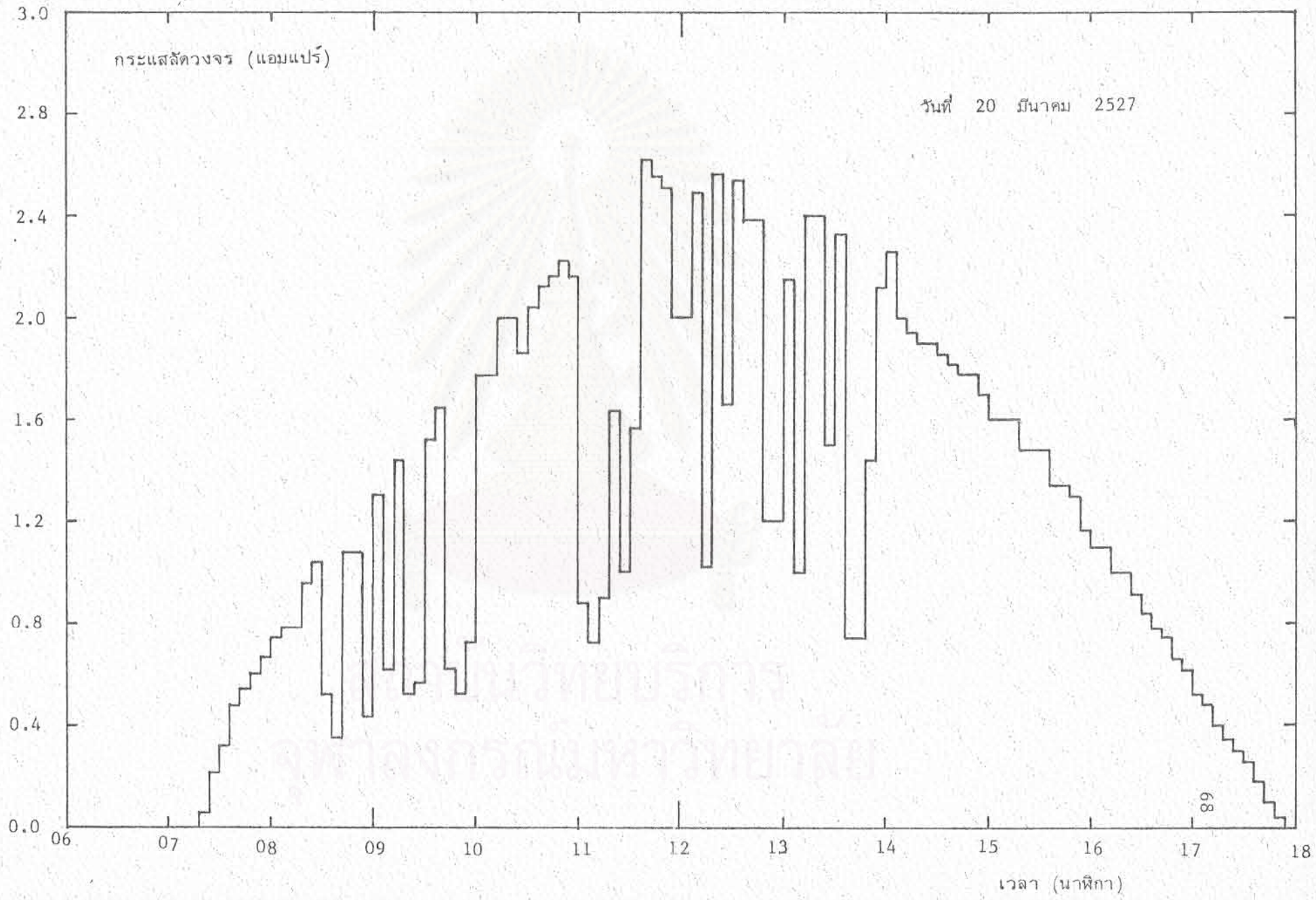
$$= 11.31 \%$$

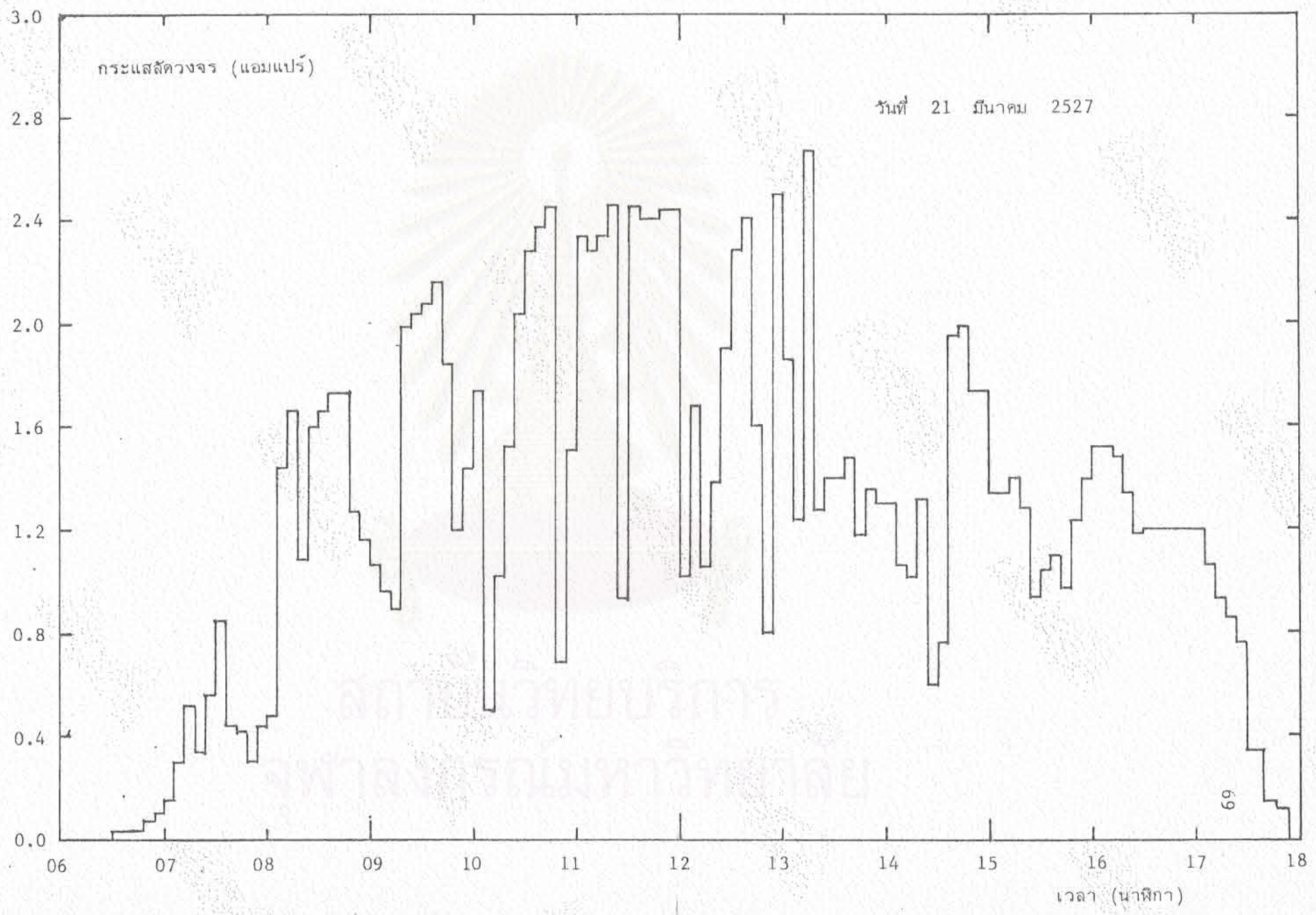
เนื่องจากขาดข้อมูลในช่วงเวลาที่โลกอยู่ ณ ตำแหน่งโซลสติสหน้าร้อน และอิควินอกซ์ฤดูใบไม้ร่วง ทำให้ไม่สามารถคำนวณพลังงานที่จะได้รับเพิ่มขึ้นจากการใช้ระบบติดตามดวงอาทิตย์กับเซลล์แบบแผงราบในช่วงเวลาดังกล่าว แต่อย่างไรก็ตาม ถ้าหากจะพิจารณาจากปริมาณของแสงส่วนต่าง ๆ ดังแสดงในตารางที่ 3 ตามเอกสารอ้างอิง [2] และตำแหน่งของดวงอาทิตย์สัมพันธ์กับทิศทางของแผงเซลล์ที่ติดตั้งอยู่กับที่ จะทำให้พอประมาณได้ว่า การใช้ระบบติดตามดวงอาทิตย์กับเซลล์แสงอาทิตย์แบบแผงรำน่าจะให้พลังงานออกเฉลี่ยต่อวัน สูงกว่าระบบที่ติดตั้งอยู่กับที่โดยไม่มีมุมเอียงตามฤดูกาล เมื่อโลกอยู่ ณ ตำแหน่งโซลสติสหน้าร้อนไม่เกิน 15-20% และเมื่อโลกอยู่ ณ ตำแหน่งอิควินอกซ์ฤดูใบไม้ร่วงไม่เกิน 7-10% และถ้าหากการประมาณนี้ไม่ผิดพลาดมากนักจะทำให้การเพิ่มขึ้นของพลังงานออกของระบบที่มีการติดตามดวงอาทิตย์ เทียบกับระบบที่ติดตั้งอยู่กับที่ตลอดปี มีค่าอยู่ระหว่าง 15-17% แต่ถ้ามีการปรับมุมเอียงของแผงตามฤดูกาลความแตกต่างน่าจะมีค่าอยู่

ผลการติดตามความถี่ของอากาศ
อุณหภูมิ 6 องศาต่าง ๆ ใน
เดือน 33 ปี ค.ศ. 1853-1885
ที่สถานีต่าง ๆ ใน
จังหวัด 43 ปี ค.ศ. 1847

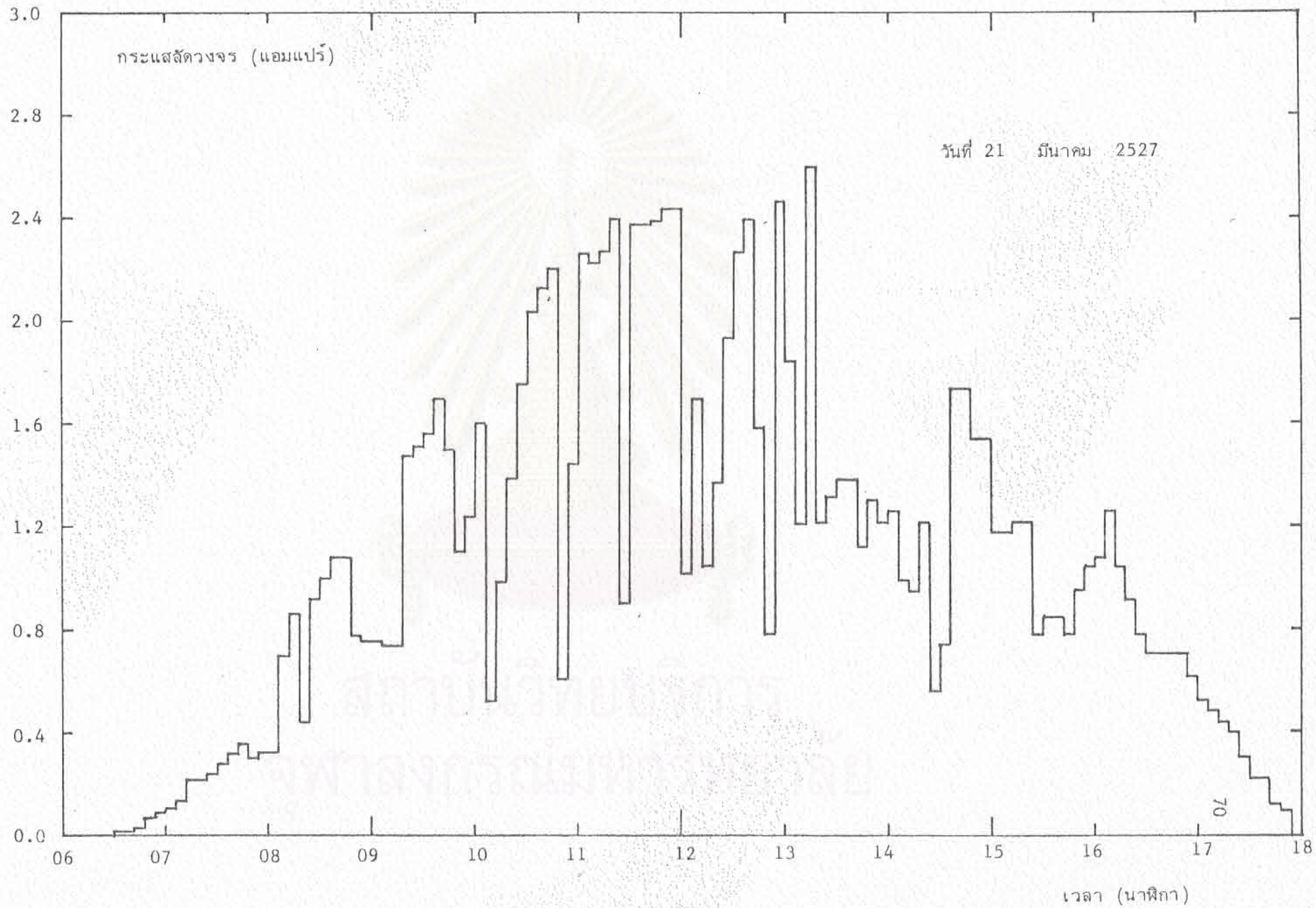


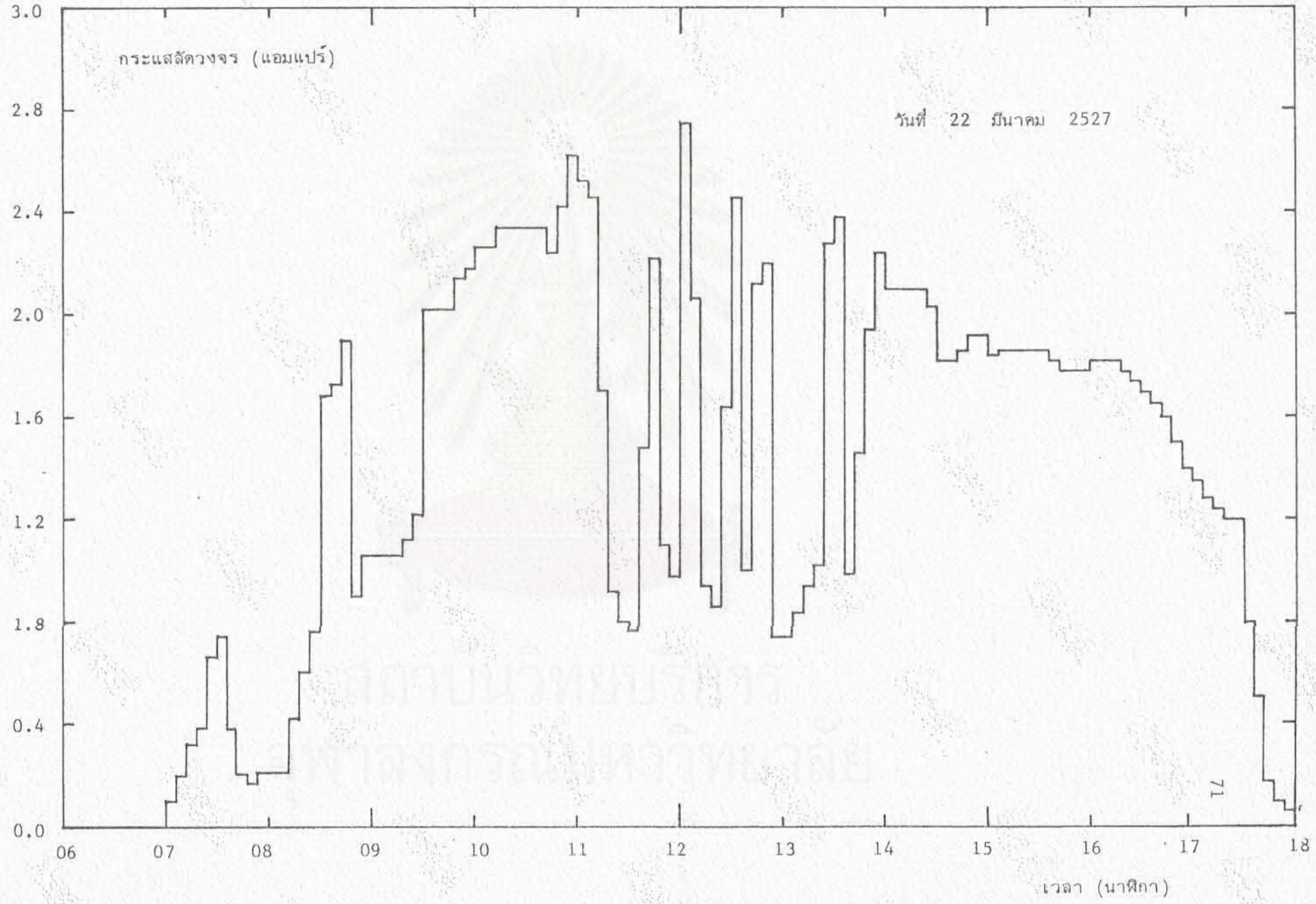
รูปที่ 43 ข. กระแสสว่างจางของแสงเซลล์แสงอาทิตย์ขนาด 33 วัตต์ ที่เวลาต่าง ๆ กับ เมื่อติดตั้งแผง
อยู่กับที่ท่ามเยียง 13.7°S



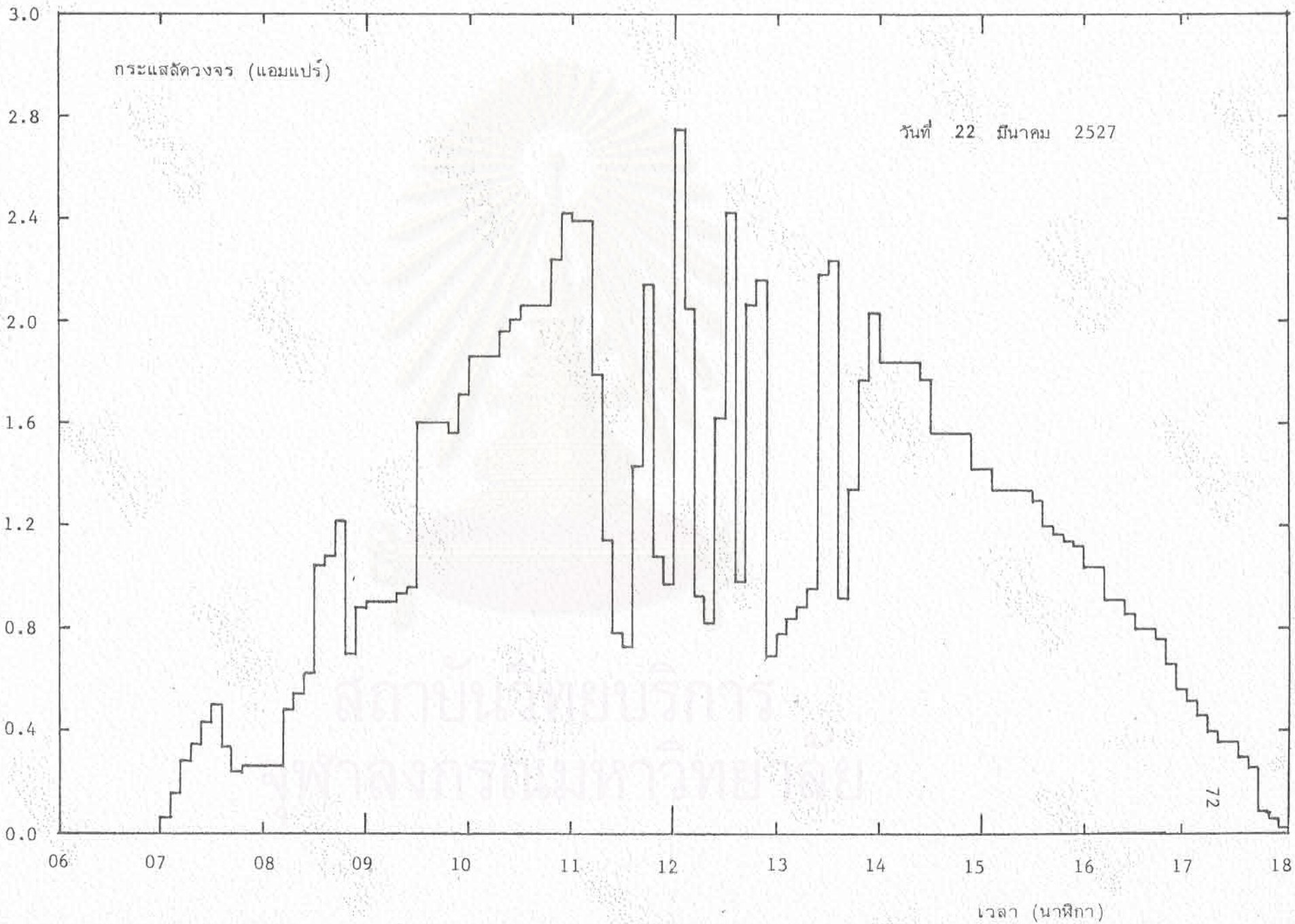


รูปที่ 44 ข. กระแสตัดวงจรของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ขนาด 33 วัตต์ ที่เวลาต่าง ๆ กับ เมื่อติดตั้งแผงอยู่กับที่มุมเอียง 13.7° S

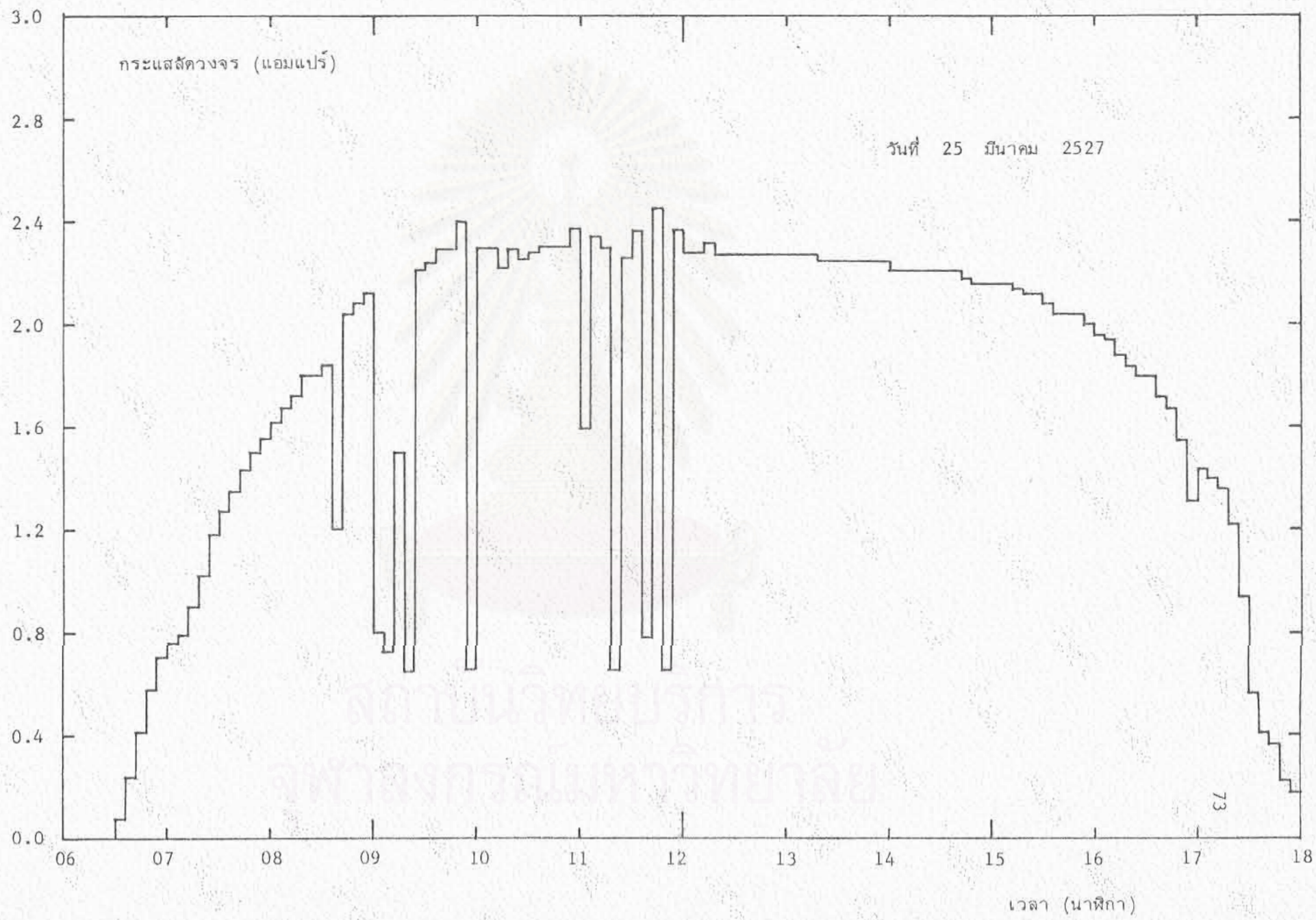




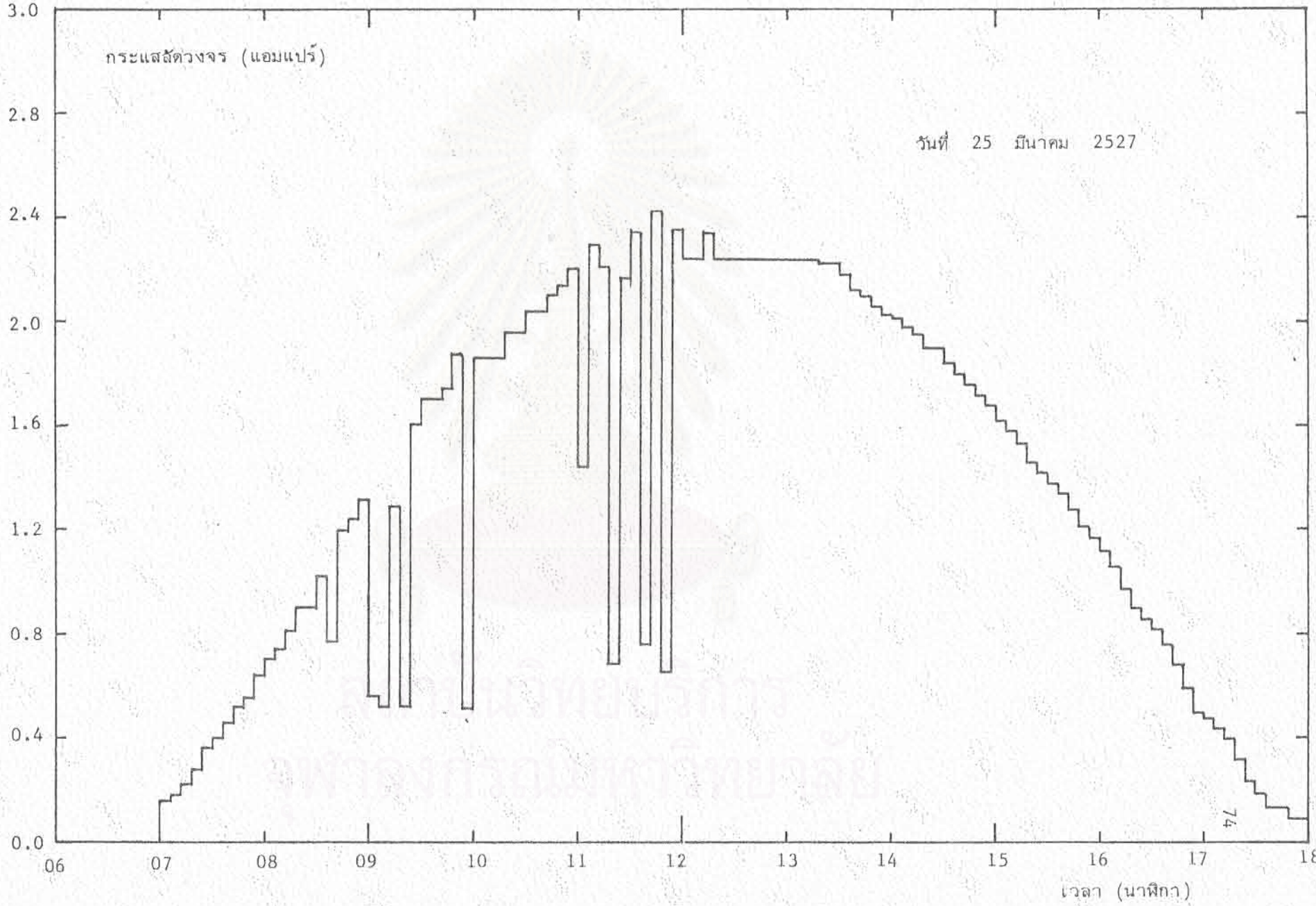
รูปที่ 45 ข. กระแสลัดขวางของแสงแลงเลียงอากาศที่ดอยขาม 33 รัศมี ที่เวลาต่าง ๆ กัน เมื่อติดตั้งแม่อยู่กับที่มุมเอียง 13.7° S



รูปที่ 46 ก. กระแสลัดวงจรของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ขนาด 33 วัตต์ ที่เวลาต่าง ๆ กับ เมื่อมีการติดตามดวงอาทิตย์

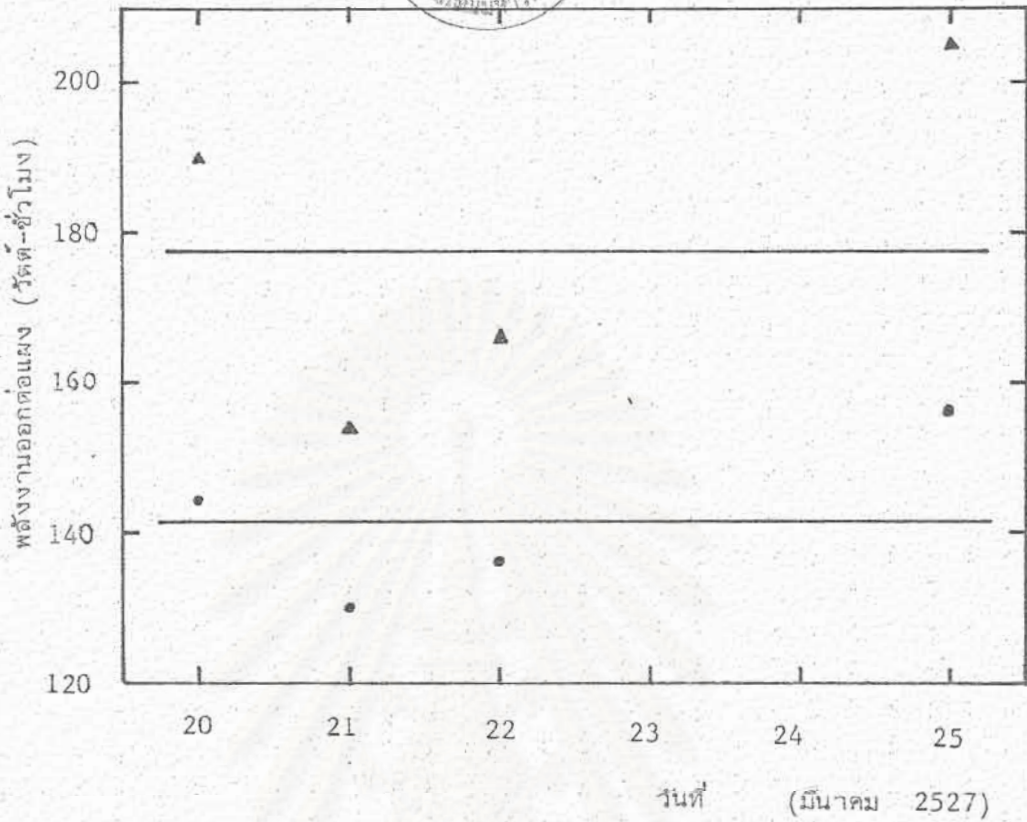


รูปที่ 46 ข. กระแสลัดวงจรของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ขนาด 33 วัตต์ ที่เวลาต่างๆ ๑ กับ เมื่อติดตั้ง
แผงอยู่กับความสูง 13.7๐S





ระหว่าง 7-8%



รูปที่ 47 พลังงานออกต่อวันของแผงเซลล์ 1 แผง ที่ติดตั้งอยู่กับที่และเอียงทำมุม 13.7 องศา (●) และแผงเซลล์ซึ่งมีการติดตามดวงอาทิตย์ (▲) เมื่อโลกอยู่ที่ตำแหน่งอิควินอกซ์ฤดูใบไม้ผลิ

| Radiation season | Direct radiation cal cm ⁻² d ⁻¹ | Diffuse radiation cal cm ⁻² d ⁻¹ | Global radiation cal cm ⁻² d ⁻¹ |
|------------------|--|---|--|
| Winter solstice | 230 | 170 | 400 |
| Spring equinox | 275 | 185 | 460 |
| Summer solstice | 170 | 230 | 400 |
| Autumnal equinox | 160 | 200 | 360 |

ตารางที่ 3 อัตราส่วนของพลังงานแสงในฤดูกาลต่าง ๆ

6. สรุป

1. ความคลาดเคลื่อนในการติดตามดวงอาทิตย์

ระบบติดตามดวงอาทิตย์ที่มีการหมุนแฉกตามดวงอาทิตย์ในแนวตะวันออก-ตะวันตก ด้วยความเร็วเชิงมุมคงที่ และมีการปรับมุมเอียงในแนวเหนือ-ใต้ตามฤดูกาล จะมีความคลาดเคลื่อนมากในตอนเช้าและตอนเย็น ซึ่งความคลาดเคลื่อนนี้เกิดจากการที่แกนหมุนของระบบติดตามดวงอาทิตย์ที่อยู่ในแนวเหนือ-ใต้ และแกนหมุนของโลกไม่ขนานกัน แต่ถ้าเราตั้งแกนหมุนของระบบซึ่งอยู่ในแนวเหนือ-ใต้ให้เอียงทำมุมกับระนาบนอนเท่ากับ 13.7 องศา โดยเอียงไปทางทิศใต้แล้ว จะทำให้แกนหมุนของระบบขนานกับแกนหมุนของโลก ซึ่งจะทำให้ความคลาดเคลื่อนในการติดตามดวงอาทิตย์เนื่องจากแกนหมุนของระบบติดตามดวงอาทิตย์ไม่ขนานกับแกนหมุนของโลกหมดไป แต่จะมีความคลาดเคลื่อนเนื่องจากเหตุผลอื่น ๆ ตามเอกสารอ้างอิง [14] ซึ่งมีค่าไม่เกิน 1 องศา แต่ในทางปฏิบัติอาจมีความคลาดเคลื่อนเนื่องจากการตั้งระบบและความคลาดเคลื่อนเนื่องจาก Backlash ซึ่งสามารถลดลงได้ โดยการติดแกนหมุนของเฟืองทดเข้ากับแกนหมุนของระบบติดตามดวงอาทิตย์โดยตรง

ระบบติดตามดวงอาทิตย์ดังกล่าวข้างต้น เมื่อติดตั้งในกรุงเทพฯ ซึ่งอยู่ที่ละติจูดที่ 13.7 องศาเหนือ นั้น คลาดเคลื่อนสูงสุดในช่วงเวลาระหว่าง 8.00-16.00 น. จะมีค่าประมาณ 11 องศา ความคลาดเคลื่อนจะเพิ่มขึ้นเมื่อแกนหมุนของระบบทำมุมกับแกนหมุนของโลกมากขึ้น ซึ่งจากลักษณะดังกล่าวนี้แสดงให้เห็นว่า ระบบติดตามดวงอาทิตย์ดังกล่าวจะเหมาะสมสำหรับสถานที่ซึ่งอยู่ที่ละติจูดต่ำ ๆ และเป็นระบบที่มีขนาดเล็กเท่านั้น แต่ถ้าเป็นระบบขนาดใหญ่ การลดลงของพลังงาน 1% อาจจะมีค่ามาก ดังนั้นเราควรที่จะใช้การคำนวณตำแหน่งของดวงอาทิตย์ด้วยไมโครคอมพิวเตอร์ และใช้ข้อมูลนี้ในการควบคุมการขับเคลื่อนแผงเซลล์แสงอาทิตย์หลาย ๆ ชุด พร้อม ๆ กัน ซึ่งเป็นการประหยัดพลังงานของหน่วยควบคุมอย่างมาก ส่วนระบบขับเคลื่อนแผงเซลล์แสงอาทิตย์นั้นเราจำเป็นต้องมีสำหรับแผงเซลล์แต่ละชุด

2. การเพิ่มขึ้นของพลังงานออก

ในช่วงหน้าหนาวจะเป็นช่วงเวลาที่มุมเอียงของดวงอาทิตย์เทียบกับแนวตั้งฉากของระนาบนอนของผู้สังเกตบนโลกมีค่ามาก ทำให้แสงอาทิตย์ต้องเดินทางผ่านบรรยากาศของโลกเป็นระยะทางยาวกว่าในช่วงหน้าร้อน ดังนั้นความเข้มสูงสุดของแสงในช่วงหน้าหนาวมีค่าน้อยกว่าความเข้มสูงสุดของแสงในช่วงหน้าร้อน แต่เนื่องจากในช่วงหน้าหนาวท้องฟ้าจะแจ่มใสกว่า

ในช่วงหน้าร้อน ด้วยเหตุนี้ในช่วงหน้าหนาวพลังงานออกเฉลี่ยต่อวันของแผงเซลล์ โดยเฉพาะแผงเซลล์ที่มีการติดตามดวงอาทิตย์ และแผงเซลล์ที่ติดตั้งอยู่กับที่ แต่มีการปรับมุมเอียงตามฤดูกาล จึงมีค่ามากกว่าในช่วงหน้าร้อน สำหรับระบบที่ไม่มีการปรับมุมเอียงของแผงตามฤดูกาลนั้น พลังงานออกเฉลี่ยต่อวันของแผงเซลล์ในช่วงหน้าหนาวจะมีค่ามากกว่าในช่วงหน้าร้อนเล็กน้อย เพราะในช่วงหน้าหนาวแนวตั้งฉากของแผงจะทำมุมกับทิศทางของดวงอาทิตย์มากกว่าในช่วงหน้าร้อน

จากเหตุผลดังกล่าวข้างต้น ทำให้พลังงานออกเฉลี่ยต่อวันของแผงเซลล์ที่มีการติดตามดวงอาทิตย์ มีค่ามากกว่าระบบที่ติดตั้งอยู่กับที่ตลอดปีถึง 41% ในช่วงหน้าหนาวซึ่งเป็นค่าที่ใกล้เคียงกับผลการทดลองในเอกสารอ้างอิง [1] และ [12] ส่วนในช่วงหน้าร้อน การใช้ระบบติดตามดวงอาทิตย์กับเซลล์แบบแผงราบ จะทำให้พลังงานออกของแผงเซลล์เฉลี่ยต่อวันเพิ่มขึ้นจากกรณีที่ติดตั้งแผงเซลล์กับที่ตลอดปีเพียง 25% เท่านั้น ถ้าหากมีการปรับมุมเอียงของแผงเซลล์ที่ติดตั้งอยู่กับที่ให้เหมาะสมตามฤดูกาล จะทำให้ความแตกต่างของพลังงานออกของแผงเซลล์ที่มีการติดตามดวงอาทิตย์ กับแผงเซลล์ที่ติดตั้งอยู่กับที่ลดลง คือมีค่า 20% ในตอนหน้าหนาว และมีค่า 25% ในตอนหน้าร้อน

ในกรณีที่เราคิดถึงพลังงานที่ต้องใช้ในการขับเคลื่อนระบบติดตามดวงอาทิตย์ด้วย จะเห็นได้ว่าสำหรับระบบที่สร้างขึ้น ความแตกต่างระหว่างพลังงานออกของระบบซึ่งมีการติดตามดวงอาทิตย์กับระบบที่ติดตั้งอยู่กับที่จะมีค่าสูงในช่วงหน้าหนาว คือมีค่าประมาณ 27% ส่วนในช่วงหน้าร้อนจะมีค่าเพียงประมาณ 11% เท่านั้น และในกรณีที่มีการปรับมุมเอียงของแผงเซลล์ที่ติดตั้งอยู่กับที่ให้เหมาะสมตามฤดูกาล จะทำให้ความแตกต่างของพลังงานออกของระบบเฉลี่ยมีค่าประมาณ 8% ในช่วงหน้าหนาว และมีค่า 11% ในช่วงหน้าร้อน ซึ่งสอดคล้องกับอัตราส่วนของปริมาณแสงตรงจากดวงอาทิตย์ และแสงอาทิตย์ทั้งหมดที่มายังแผงเซลล์ตามเอกสารอ้างอิง [2]

จากผลการทดลองและการประเมินจากเอกสารอ้างอิงแสดงให้เห็นว่า การใช้ระบบติดตามดวงอาทิตย์กับเซลล์แบบแผงราบที่กรุงเทพฯ จะทำให้ได้รับพลังงานเพิ่มขึ้นประมาณไม่เกิน 20% ซึ่งน้อยกว่าผลการทดลองตามเอกสารอ้างอิง [12] ทั้งนี้อาจจะเป็นเพราะประเทศไทยตั้งอยู่ในเขตร้อนชื้นที่มีเมฆมาก อันเป็นเหตุให้ปริมาณแสงตรงจากดวงอาทิตย์ลดลงมาก

ดังนั้นการใช้ระบบติดตามดวงอาทิตย์กับ เซลล์แบบแผงราบอาจจะไม่เหมาะสมนัก ทั้งนี้เพราะ การที่เราได้รับพลังงานเพิ่มขึ้นน้อย อาจจะไม่คุ้มกับราคาต้นทุนของระบบที่สูงขึ้น เนื่องจาก ราคาของโครงสร้าง และราคาของอุปกรณ์ควบคุมการติดตามดวงอาทิตย์ นอกจากนี้แล้ว การใช้ระบบติดตามดวงอาทิตย์กับ เซลล์แบบแผงราบ จะทำให้ระบบต้องการการบำรุงรักษา มากขึ้น และความเชื่อถือได้ของระบบลดลง

เนื่องจากเราไม่ได้ศึกษาเกี่ยวกับราคาของโครงสร้าง และราคาของอุปกรณ์ ควบคุมการติดตามดวงอาทิตย์ ดังนั้นจึงไม่อาจจะสรุปเกี่ยวกับราคาต่อหน่วยพลังงานที่ได้รับ ซึ่งจะเปลี่ยนแปลงกับขนาดของระบบด้วย

เอกสารอ้างอิง

- [1] R.C. Neville, "Solar Energy Collector Orientation and Tracking Mode". Solar Energy, Vol.20 pp. 7-11,1978.
- [2] R.H.B. Exell, "The Solar Radiation Climate of Thailand", Solar Energy, Vol. 18 pp. 349-354,1976.
- [3] "Sun Tracking" 2nd International Solar Forum Vol. 1 ,12-14 July 1978.
- [4] R. Walraven, "Calculating the Position of the Sun", Solar Energy Vol. 20 pp. 393-397,1978.
- [5] B.J. Wilkinson, "An Improved FORTRAN Program for the Rapid Calculation of the Solar Position", Solar Energy, Vol. 27, pp. 67-68,1981.
- [6] A. Traca-de-Almeida, H. Jesus L. Moura, A. Microcomputer Based Sun Tracking System", Solar World Forum Vol. 4, P 2920, August 1981.
- [7] U.S. Nautical Almanac, The American Ephemeris and Nautical Almanac (1976-1979).
- [8] L.O. Lamm. "A New Analytic Expression for the Equation of Time", Solar Energy, Vol. 26, pp. 465 1981.
- [9] E.B. Penrod. "Solar Load Analysis by Use of Orthographic Projections and Spherical Trigonometry", Solar Energy, Vol. 8, No. 4, pp. 127-133,1964.
- [10] J. Kern and I. Harris, "On the Optimum Tilt of a Solar Collector" Solar Energy, Vol. 17 pp. 97-102,1975.
- [11] A.M. Zarem and D.D. Erway "Introduction to the Utilization of Solar Energy" Mc Graw-Hill, New York 1963.
- [12] C.F. Gay, J. W. Yerk, and J.H. Wilson "Performance Advantages of Two-Axis Tracking for Large Flat-Plate Photovoltaic Energy System" 16th Photovoltaic Specialist Conference 1982. Proceeding, September 1982 pp. 1368.

- [13] R.J. Arnault, E. Berman, C.F. Gay R. Tolbertand, J.W. Yerkes, ARCO Solar Industry "The ASI One Megawatt Photovoltaic Power Plant" Solar World Congress Perth 1983 pp. 365.
- [14] C.L. Pitman, L.L. Vant-Hull "Errors in Locating the Sun and Their Effect on Solar Intensity Pridictions".
- [15] ยุทธนา กุลวิฑิต "การวิเคราะห์ลักษณะการทำงานของระบบเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีแบตเตอรี่เป็นแหล่งเก็บสะสมพลังงาน" การประชุมทางวิชาการวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 6, 17-18 พฤศจิกายน 2526 เล่ม 1, หน้า 20-29.
-