การพัฒนาระบบติดตามการเคลื่อนที่ของดวงอาทิตย์ต้นทุนต่ำ เพื่อการประยุกต์ใช้ในงานพลังงานทดแทน
The development of a low-cost solar tracking system for renewable energy applications

กรธรรม สถิรกุล[1]*, อภิญญา บุญประกอบ[1]
Korntham Sathirakul[1]*, Apinya Boonprakob[1]

บทคัดย่อ

ระบบติดตามการเคลื่อนที่ของดวงอาทิตย์ที่กรมวิทยาศาสตร์บริการได้พัฒนาขึ้น เป็นส่วนประกอบหนึ่งของระบบผลิตกระแสไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ขนาดเล็ก ซึ่งเป็นโครงการวิจัยที่กรมวิทยาศาสตร์บริการได้รับงบประมาณให้ดำเนินการ ปีงบประมาณ 2554 ถึง 2556 เพื่อนำไปใช้ในระดับครัวเรือน หรือชุมชนเล็ก ซึ่งระบบผลิตกระแสไฟฟ้านี้ใช้หลักการของการรวมแสงอาทิตย์ด้วยจานรูปทรงพาราโบลา ซึ่งจำเป็นต้องมีระบบติดตามการเคลื่อนที่ของดวงอาทิตย์เพื่อให้จานรวมแสงรับรังสีตรงของดวงอาทิตย์และรวมแสงที่จุดโฟกัสได้อย่างแม่นยำ ระบบการติดตามการเคลื่อนที่ของดวงอาทิตย์ที่พัฒนาขึ้นใช้หลักการของคำนวณตำแหน่งของดวงอาทิตย์ด้วยสมการ เพื่อควบคุมการเคลื่อนที่โดยเบื้องต้น และใช้เซนเซอร์วัดความเข้มแสงเพื่อปรับแต่งตำแหน่งละเอียดเพื่อให้สามารถชี้ตำแหน่งของดวงอาทิตย์ได้อย่างแม่นยำ ผิดพลาดไม่เกิน 1 องศา เป้าหมายสำคัญประการหนึ่งในการพัฒนาระบบนี้คือความประหยัด ใช้ต้นทุนในการสร้างที่ต่ำ โดยในโครงการวิจัยนี้ได้ใช้บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ที่ราคาประหยัด อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่สามารถหาได้ในประเทศ ความเรียบง่ายในการออกแบบสร้าง ทำให้ระบบโดยรวมไม่ยุ่งยากซับซ้อน สามารถทำงานได้จริงอย่างมีประสิทธิภาพ แต่ต้นทุนต่ำกว่าเมื่อเทียบกับระบบแบบเดียวกันที่นำเข้ามาจำหน่ายในราคาที่แพงกว่ากันมาก

Abstract

The solar tracking system developed by the Department of Science Service was a part of its small solar energy-to-electric production system being researched and developed under a research funding in 2011 to 2013 fiscal year. The power production system was designed for household use or for small community service. The system was a solar thermal power production system employed a parabolic dish as its solar collector which required a solar tracking system to make it to work. The developed solar tracking system utilized the calculation of solar position equations to primarily control the movement and the position pointing towards the Sun. An array of light concentration sensors were also used for signal feedback control function for fine motion error correction. This resulted in a precise solar tracking system with a precision within 1 degree. Furthermore, beside precision, being low cost was also a main objective for developing such system. A low cost microcontroller board, local electronic components, and simplified design and construction contributed to the solar tracking system that was simple and efficient, but inexpensive compared with relatively highly priced imported systems.

คำสำคัญ : ระบบติดตามดวงอาทิตย์ต้นทุนต่ำ, สมการคำนวณตำแหน่งงดวงอาทิตย์, พลังงานแสงอาทิตย์
Keywords : Low-cost solar tracking system, Equation for calculating sun's positions, Solar energy

[1]กรมวิทยาศาสตร์บริการ
*Corresponding author E-mail address : korntham@dss.go.th

1. บทนำ (Introduction)

จากภาวะต้นทุนพลังงานจากปิโตรเลียมที่สูงขึ้นเรื่อยๆ และการที่ประเทศไทยต้องพึ่งพาการนำเข้าวัตถุดิบปิโตรเลียมเพื่อนำมากลั่นเป็นน้ำมันเชื้อเพลิง ถึงแม้ว่าประเทศไทยจะมีแหล่งก๊าซธรรมชาติ แต่พลังงานจากแหล่งเหล่านี้ก็ลดน้อยลงและมีโอกาสที่จะหมดไป หรืออาจจะมีต้นทุนที่สูงจนไม่คุ้มกับการนำมาใช้ในอนาคต พลังงานทดแทนอื่นๆในรูปของเชื้อเพลิงชีวภาพนั้นก็เป็นพลังงานทดแทนทางเลือกหนึ่ง แต่ในปัจจุบันยังมีกำลังการผลิตที่ไม่เพียงพอต่อความต้องการ และมีต้นทุนที่สูง พลังงานที่ได้จากพลังธรรมชาติ เช่น พลังงานน้ำ พลังงานลม และพลังงานแสงอาทิตย์ เป็นพลังงานทางเลือกที่มีศักยภาพในการนำไปใช้สูง โดยเฉพาะพลังงานแสงอาทิตย์ที่มีอยู่อย่างมาก เหมาะกับประเทศไทย

มีการนำพลังงานแสงอาทิตย์มาใช้ประโยชน์มากมายในปัจจุบัน ไม่ว่าจะเป็นการนำพลังงานแสงอาทิตย์ในรูปของความร้อนมาอบแห้งผลิตผลทางการเกษตร หรือนำความร้อนมาใช้ในการต้มน้ำหรือทำน้ำร้อนเพื่อใช้ในกิจการต่างๆ ทั้งในครัวเรือนและในอุตสาหกรรม ตลอดจนการนำพลังงานแสงอาทิตย์มาใช้ผลิตกระแสไฟฟ้า ซึ่งในการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์นั้นมีด้วยกันอยู่ 2 แนวทาง คือ การนำพลังงานความร้อนจากการร่วมความเข้มแสงอาทิตย์มาแปลงเป็นพลังงานกลโดยใช้เครื่องยนต์สันดาปภายนอก ไม่ว่าจะเป็นเครื่องยนต์กลจักรไอน้ำ หรือ เครื่องยนต์สเตอร์ลิง(1) แล้วแปลงพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้าโดยใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้า และอีกแนวทางหนึ่งคือการใช้โซลาเซลแปลงพลังงานแสงให้เป็นพลังงานไฟฟ้า

เนื่องจากที่ดวงอาทิตย์มีการเคลื่อนที่เปลี่ยนแปลงตำแหน่งเมื่อเทียบกับพื้นโลกอยู่ตลอดเวลา และเส้นทางในการเคลื่อนที่ก็เปลี่ยนแปลงไปทุกวัน ระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์จึงจำเป็นต้องปรับตัวให้สามารถรับแสงอาทิตย์ที่เปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดนี้ ในระบบผลิตกระแสไฟฟ้าด้วยความร้อนจากการรวมแสงรังสีตรง (direct light) ของดวงอาทิตย์จำเป็นอย่างมากที่จะต้องปรับตัวรับแสงให้หันเข้าหาทิศทางของดวงอาทิตย์อยู่ตลอดเวลาเพื่อให้ระบบสามารถทำงานได้ ส่วนในระบบผลิตกระแสไฟฟ้าที่ใช้แผงโซลาเซลอาจจะไม่จำเป็นต้องปรับตัวให้หันเข้าหาทิศทางของแสงอาทิตย์ตรง เพราะโซลาเซลสามารถทำงานได้ด้วยแสงที่กระเจิง (diffused light) แต่ทั้งนี้ หากแผงโซลาเซลหันเข้าหาดวงอาทิตย์ได้ตรง ความเข้มแสงที่ได้รับจะมากขึ้นทำให้สามารถผลิตไฟฟ้าได้มากขึ้นนั้นหมายความว่าประสิทธิภาพของการทำงานของระบบที่เพิ่มขึ้น ในปัจจุบันระบบติดตามการเคลื่อนที่ของดวงอาทิตย์ (solartracking system) ได้รับการพัฒนาเป็นผลิตภัณฑ์ออกจำหน่ายในตลาด แต่มักจะมีราคาที่แพงมากตั้งแต่ระดับราคาหลายหมื่นบาทขึ้นไปจนถึงระดับราคาหลายแสนบาทขึ้นอยู่กับความซับซ้อนของระบบ และความน่าเชื่อถือของบริษัทผู้ผลิต ซึ่งโดยมากระบบติดตามการเคลื่อนที่ของดวงอาทิตย์ที่มีราคาแพงเช่นนี้จะบริษัทผู้ผลิตมักจะจำหน่ายและติดตั้งให้กับลูกค้าที่เป็นผู้ประกอบการผลิตไฟฟ้าที่มีกำลังเงินในการลงทุนที่สูง แต่หากเป็นการใช้งานในระดับครัวเรือน หรือชุมชนที่มีขนาดเล็ก ไม่ใช่ใช้ในเชิงพาณิชย์ การลงทุนในระบบติดตามการเคลื่อนที่ของดวงอาทิตย์ที่มีราคาแพงมากดังกล่าวข้างต้นจะไม่คุ้มค่า ระบบติดตามดวงอาทิตย์ที่มีความแม่นยำที่ดี ใช้พลังงานน้อย และต้นทุนต่ำ เหมาะกับการใช้งานในชุมชนและครัวเรือนจึงได้พัฒนาขึ้น

1.1 การติดตามการเคลื่อนที่ของดวงอาทิตย์

การติดตามการเคลื่อนที่ของดวงอาทิตย์มีแนวทางในการทำอยู่ 2 แนวทางหลัก คือ

1.1.1 การใช้เซนเซอร์ตรวจวัดความเข้มแสงเพื่อค้นหาทิศทางที่มาของแสงอาทิตย์

ในการติดตามการเคลื่อนที่ของดวงอาทิตย์ด้วยวิธีนี้เซนเซอร์ตรวจวัดความเข้มแสงจะวัดค่าความเข้มแสงที่ตกกระทบตั้งฉากกับระนาบของเซนเซอร์ ซึ่งจะแปลงค่าความเข้มแสงเป็นสัญญาณทางไฟฟ้าเข้าวงจรประมวลผลและควบคุมเพื่อสั่งการให้มอเตอร์ขับเคลื่อนระนาบ 2 แกนหมุนไปในทิศทางที่มีค่าความเข้มแสงสูงสุด นั้นก็คือ หันเข้าหาดวงอาทิตย์

นั้นเอง ซึ่งวงจรประมวลผลและควบคุมนี้จะโปรแกรมให้มอเตอร์ขับเคลื่อนเป็นรูปซิกแซก หรือ รูปขดก้นหอย เพื่อเป็นการค้นหาทิศทางของแสง วิธีการติดตามการเคลื่อนที่ของดวงอาทิตย์ด้วยวิธีนี้จะมีข้อเสียตรงที่หาแสงอาทิตย์มีความเข้มน้อย คือ เมื่อมีเมฆบดบังดวงอาทิตย์ไว้ ระบบติดตามการเคลื่อนที่ดวงอาทิตย์นี้จะทำการค้นหาแสงอยู่ตลอดเวลาทำให้ใช้พลังงานไฟฟ้าอย่างสิ้นเปลือง

1.1.2 การใช้สมการคำนวณตำแหน่งดวงอาทิตย์

การใช้สมการคำนวณตำแหน่งดวงอาทิตย์เป็นอีกวิธีหนึ่งในการติดตามการเคลื่อนที่ของดวงอาทิตย์ที่ได้ผลดี และวิธีการไม่ซับซ้อน สมการในการคำนวณตำแหน่งของดวงอาทิตย์นั้นได้มีนักดาราศาสตร์หลายท่านได้คิดค้นไว้ ซึ่งใช้หลักการทางเรขาคณิตและการสังเกตการณ์ทางดาราศาสตร์ในการคิดค้นสมการ หากระบุพิกัดตำแหน่งด้วยจุดตัดบนเส้นรุ้งและ เส้นแวง และวันเดือนปี และเวลาที่แน่นอน สมการจะสามารถคำนวณมุมกวาด (Azimuth angle) และมุมเงย (Altitude angle หรือ Elevation) ของตำแหน่งดวงอาทิตย์ ณ พิกัดตำแหน่งนั้น ในเวลานั้นๆได้อย่างแม่นยำ ดังนี้ การควบคุมมอเตอร์ 2 แกนให้เคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งพิกัด (มุมกวาด,มุมเงย) สามารถทำได้อย่างไม่ซับซ้อนเพราะไม่จำเป็นต้องมีการป้อนสัญญาณควบคุมกลับ (Feedback signal) แต่ความแม่นยำของการติดตามการเคลื่อนที่ของดวงอาทิตย์ด้วยวิธีนี้ขึ้นอยู่กับความแม่นยำในการระบุพิกัดตำแหน่งปัจจุบัน ความแม่นยำในการระบุเวลา และความแม่นยำในการติดตั้งระบบให้ได้ระนาบและตรงทิศทางที่ถูกต้อง (ทิศเหนือเป็นศูนย์องศา) ในโครงการวิจัยนี้ ได้พัฒนาระบบติดตามการเคลื่อนที่ของดวงอาทิตย์โดยใช้หลักการผสมผสานระหว่างทั้ง 2 วิธีที่ได้กล่าวข้างต้น โดยใช้การติดตามดวงอาทิตย์ด้วยสมการเพื่อระบุตำแหน่งโดยเบื้องต้นแล้วใช้เซนเซอร์ตรวจวัดความเข้มแสง เป็นตัวบอกถึงความคลาดเคลื่อนที่ยังมีอยู่แล้วส่งข้อมูลให้วงจรประมวลผลและความคุมสั่งการให้มอเตอร์ขับเคลื่อนปรับตำแหน่งทิศทางให้ชี้ตรงดวงอาทิตย์อย่างแม่นยำ รายละเอียดของระบบติดตามการเคลื่อนที่ของดวงอาทิตย์ที่ได้พัฒนาขึ้นนี้จะได้กล่าวในรายละเอียดในหัวข้อที่ 2

1.2 สมการคำนวณตำแหน่งดวงอาทิตย์

ในการสร้างระบบติดตามการเคลื่อนที่ของดวงอาทิตย์นั้นเพื่อต้องการสะสมพลังงานความร้อนที่ได้จากดวงอาทิตย์ให้มากที่สุด จึงจำเป็นต้องรู้ตำแหน่งการเคลื่อนที่ของดวงอาทิตย์ตลอดเวลาโดยอาศัยหลักการคำนวณตำแหน่งของดวงอาทิตย์จาก National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) [2] เริ่มต้นจาก Hour Angle (ω) คือ มุมระหว่างเส้นเมอริเดียนที่เราสังเกตกับเส้นเมอริเดียนที่ตำแหน่งดวงอาทิตย์ไปทางตะวันออกหรือตะวันตก มีค่าเป็นลบในช่วงเวลาก่อนเที่ยงสุริยะ (Solar Noon) และเป็นบวกหลังเที่ยงสุริยะ โดยมีค่า 15 องศาต่อชั่วโมง หาได้จากสมการที่ (1)

$$\omega = 15(t_s - 12) \quad (1)$$

ω คือ มุมชั่วโมง หน่วยเป็นองศา

t_s คือ เวลาสุริยะ หน่วยเป็นชั่วโมง

Solar Time คือ เวลาที่บอกตำแหน่งของดวงอาทิตย์ซึ่งสัมพันธ์กับตำแหน่งบนพื้นโลก หาได้จากสมการที่ (2)

$$t_s = LCT + \frac{EOT}{60} - LC - D \quad (2)$$

t_s คือ Solar Time หน่วยเป็นชั่วโมง

LCT คือ Local Clock Time เวลาท้องถิ่นคำนวณตาม Time zone หน่วยเป็นชั่วโมง

LC คือ Longitude correction คำนวณได้ตามสมการที่ (3)

$$LC = \frac{(local\ longitude) - (longitude\ of\ standard@\ time\ zone\ meridian)}{15}$$

(3)

D คือ ค่าคงที่ถ้าในท้องถิ่นที่มีผลจาก Daylight saving time ให้มีค่าเป็น 1 แต่ถ้าไม่มีผลให้มีค่าเป็น

EOT คือ Equation Of Time สมการเวลา คำนวณได้ตามสมการที่ (4)

$$EOT = 60 \sum_{k=0}^{5} \left[A_k cos\left(\frac{360\ k\ n}{365.25}\right) + B_k sin\left(\frac{360\ k\ n}{365.25}\right) \right] \quad (4)$$

n คือ จำนวนวันใน 4 ปี (ปีอธิกสุรทิน) *มีค่าตั้งแต่* 1-1461

ฟังก์ชัน cosine และ sine ใช้หน่วยเป็นองศา

ตารางที่ 1 แสดงค่า A_k , B_k ซึ่งเป็นค่าสัมประสิทธิ์ที่ใช้ในสมการที่ (4)

k	A_k (hr)	B_k (hr)
0	2.0870×10^{-4}	0
1	9.2869×10^{-3}	-1.2229×10^{-1}
2	-5.2258×10^{-2}	-1.5698×10^{-1}
3	-1.3077×10^{-3}	-5.1602×10^{-3}
4	-2.1867×10^{-3}	-2.9823×10^{-3}
5	-1.5100×10^{-4}	-2.3463×10^{-4}

Declination Angle (δ) คือ มุมระหว่างแนวลำแสงอาทิตย์เมื่อเที่ยงสุริยะกับระนาบศูนย์สูตร กำหนดให้มีค่าเป็นบวกเมื่อวัดไปทางทิศเหนือ และมีค่าเป็นลบเมื่อวัดไปทางทิศใต้ คำนวณได้จากสมการที่ (5)

$$\delta = \sin^{-1}(0.39795 cos[0.98563(N - 173)]) \quad (5)$$

ตารางที่ 2 แสดงค่า N ซึ่งใช้แปลงค่าวันที่เป็นจำนวนวัน (Date-to-Day Number Conversion)

Month	Day Number, N	Notes
January	d	
February	d + 31	
March	d + 59	Add 1 if leap year
April	d + 90	Add 1 if leap year
May	d + 120	Add 1 if leap year
June	d + 151	Add 1 if leap year
July	d + 181	Add 1 if leap year
August	d + 212	Add 1 if leap year
September	d + 243	Add 1 if leap year
October	d + 273	Add 1 if leap year
November	d + 304	Add 1 if leap year
December	d + 334	Add 1 if leap year

หมายเหตุ

1) d คือ วันที่ในเดือนที่กำลังพิจารณา เช่น วันที่ 13 เมษายน N = 13+90 = 103 เป็นต้น

2) leap year คือ ปีอธิกสุรทิน กล่าวคือเป็นปีที่เดือนกุมภาพันธ์มี 29 วัน เช่น ปี ค.ศ.2000, 2004, 2008 เป็นต้น มีทุกๆ 4 ปี

ฟังก์ชัน cosine และ sine ใช้หน่วยเป็นองศา

Latitude angle ($\emptyset$) คือ ค่าของมุมที่วัดเป็นองศาไปทางเหนือและทางใต้ของเส้นศูนย์สูตร ข้างละ 90 องศา

Altitude angle (α) คือ มุมระหว่างพื้นราบกับแนวลำแสงอาทิตย์ สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (6)

$$\alpha = sin^{-1}(sin\delta sin\emptyset + cos\delta cos\omega cos\emptyset) \quad (6)$$

α คือ Altitude angle (องศา)

δ คือ Declination Angle (องศา)

$\emptyset$ คือ Latitude angle (องศา)

ω คือ Hour Angle (องศา)

Azimuth angle (A) คือ มุมระหว่างระนาบแนวดิ่งของดวงอาทิตย์และระนาบของเมอริเดียนท้องถิ่น โดยกำหนดให้วัดจากทิศใต้ของระนาบแนวดิ่งดวงอาทิตย์ไปทางตะวันตกมีค่าเป็นบวก วัดไปทางตะวันออกมีค่าเป็นลบ และมีค่าเป็นศูนย์ที่ทิศใต้ Azimuth angle มีค่าอยู่ในช่วง -180 องศา ถึง 180 องศา สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (7)

$$A = sin^{-1}\left(\frac{-cos\delta sin\omega}{cos\alpha}\right) \quad (7)$$

โดยมีเงื่อนไขว่าถ้า $cos\omega \geq \left(\frac{tan\delta}{tan\emptyset}\right)$, $A = 180° - A$

$cos\omega < \left(\frac{tan\delta}{tan\emptyset}\right)$, $A = 360° + A$

สุดท้ายเราสามารถบอกตำแหน่งของดวงอาทิตย์ได้จากค่า Altitude angle และ Azimuth angle

2. วิธีการวิจัย (Experimental)

การวิจัยเพื่อพัฒนาสร้างระบบติดตามการเคลื่อนที่ของดวงอาทิตย์ในโครงการพัฒนาระบบผลิตกระแสไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ขนาดเล็กที่กรมวิทยาศาสตร์ได้ดำเนินการนั้นมีขั้นตอนวิธีการในการวิจัยดังนี้

2.1 การออกแบบหลักการทำงานของระบบและการทดลองเพื่อยืนยันหลักการ

จากที่ได้กล่าวมาแล้วโดยเบื้องต้นว่าระบบติดตามการเคลื่อนที่ของดวงอาทิตย์ที่พัฒนาขึ้นนั้นใช้หลักการผสมผสานกันระหว่างวิธีการใช้สมการคำนวณตำแหน่งของดวงอาทิตย์ กับการใช้ข้อมูลจากเซนเซอร์ตรวจวัดความเข้มแสงเพื่อเป็นสัญญาณป้อนกลับเพื่อควบคุมการเคลื่อนที่ชี้ตำแหน่งดวงอาทิตย์ ปัจจัยหลักที่ต้องพิจารณาในการออกแบบหลักการทำงานนี้นั้น คือ ประการแรก ความแม่นยำในการชี้ตำแหน่งของดวงอาทิตย์ในขณะเวลาต่าง ๆที่เหมาะสมกับการใช้งาน ซึ่งสำหรับการรวมแสงอาทิตย์ด้วยจานรูปทรงพาราโบลาเพื่อให้ได้ความร้อนนำไปใช้ในการกำเนิดไฟฟ้านั้นความแม่นยำในระดับไม่เกิน $\pm$ 2 องศาก็เป็นการเพียงพอ และ ประการที่ 2 การประหยัดพลังงานในการทำงานของระบบ(3) ซึ่งแน่นอนว่าหากระบบติดตามการเคลื่อนที่ใช้พลังงานมากเกินไปพลังงานที่ระบบผลิตกระแสไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ที่พัฒนาขึ้นจะมีประสิทธิภาพในการทำงานโดยรวมต่ำ ซึ่งพลังงาน

ที่ระบบติดตามการเคลื่อนที่ของดวงอาทิตย์ใช้โดยมากจะใช้ในการขับเคลื่อนมอเตอร์ 2 แกน การออกแบบให้โครงสร้างของระบบมีขนาดไม่ใหญ่จนเกินไป และการใช้มอเตอร์ที่มีเฟืองทดแบบเฟืองตัวหนอน (Worm Gear) เพื่อให้ไม่ต้องให้กระแสไฟฟ้ากับมอเตอร์ในขณะที่ระบบรับภาระและหยุดนิ่ง โดยเฟืองขับแบบตัวหนอนจะขัดการหมุนของเฟืองตรงไม่ให้หมุนกลับเมื่อรับภาระ

การคำนวณตำแหน่งของดวงอาทิตย์โดยใช้สมการของ NOAA (2) ดังที่ได้กล่าวไว้ในหัวข้อ 1.2 โดยนักวิจัยได้ใช้โปรแกรม Excel คำนวณหามุมกวาดและมุมเงยของตำแหน่งดวงอาทิตย์ ในเวลาต่างๆของวันและตำแหน่งบนพื้นโลกที่ระบุ และนักวิจัยได้ออกแบบสร้างเครื่องมือสำหรับวัดมุมกวาด และมุมเงยของดวงอาทิตย์ ดังแสดงในรูปที่ 1 โดยใช้หลักการของนาฬิกาแดด กล่าวคือใช้อุปกรณ์ที่เป็นแท่งตรงยาวยึดติดตั้งฉากกับระนาบ หากแท่งตรงชี้ตรงกับดวงอาทิตย์พอดีก็จะไม่เกิดเงาดำตกทอดบนระนาบนั้น (เช่นเดียวกับนาฬิกาแดดขณะเวลาเที่ยงวัน) นักวิจัยได้สังเกตตำแหน่งของดวงอาทิตย์และใช้เครื่องมือวัดที่สร้างขึ้นเล็งตำแหน่งไปที่ดวงอาทิตย์เพื่อวัดมุมกวาด และมุมเงย เปรียบเทียบกับค่ามุมที่คำนวณได้ ผลการตรวจสอบความถูกต้องแม่นยำของการคำนวณปรากฏว่าความผิดพลาดไม่เกิน $\pm$ 2 องศา ซึ่งยอมรับได้สำหรับการประยุกต์ใช้งานในด้านการร่วมแสงเพื่อนำพลังงานแสงอาทิตย์มาใช้ ซึ่งต้องการเพียงให้จานพาราโบล่าสามารถรวมแสงอาทิตย์ให้เข้าเป้าจุดโฟกัสที่มีขนาดใหญ่พอสมควร ความคลาดเคลื่อนที่ยังคงอยู่จะปรับแก้โดยการใช้ระบบเซนเซอร์ตรวจวัดความเข้มแสงของแสงอาทิตย์วัดสัญญาณป้อนกลับให้ไมโครคอนโทรลเลอร์สั่งการให้มอเตอร์เคลื่อนที่ชี้ตำแหน่งดวงอาทิตย์ให้ถูกต้องได้

(ก) *(ข)*

รูปที่ 1 แสดงเครื่องมือในการวัดมุมกวาดและมุมเงยตำแหน่งดวงอาทิตย์ เพื่อใช้ในการตรวจสอบความแม่นยำของสมการคำนวณตำแหน่งของดวงอาทิตย์ที่ใช้ในงานวิจัย (ก) คือ อุปกรณ์ชี้ดวงอาทิตย์ และ (ข) คือ แท่นวัดมุมกวาดและมุมเงย

2.2 การสร้างเครื่องต้นแบบที่สามารถทำงานได้จริง

จากหลักการทำงานของระบบที่ได้ออกแบบไว้ดังที่ได้กล่าวไว้ในหัวข้อ 2.1 นักวิจัยได้สร้างเครื่องต้นแบบระบบติดตามการเคลื่อนที่ของดวงอาทิตย์โดยมีรายการอุปกรณ์ที่ใช้ และรายละเอียดในการสร้างดังนี้

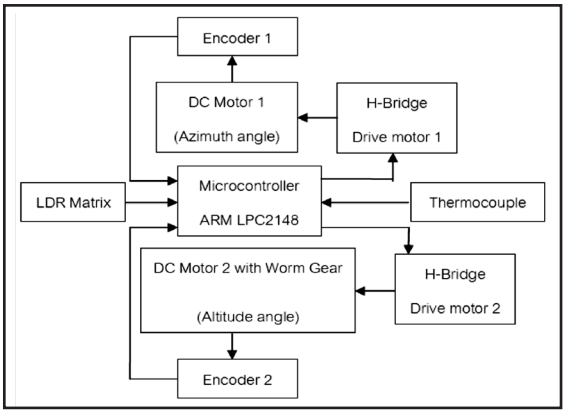
2.2.1 อุปกรณ์ประกอบการสร้างเครื่องต้นแบบ

อุปกรณ์ที่ใช้ในการสร้างเครื่องต้นแบบในงานวิจัยนี้ประกอบด้วยอุปกรณ์ดังนี้

1. DC Servo motor 12V 2 ตัว
2. H-Bridge motor drive 80 A 2 ตัว
3. Rotary encoder 2 ตัว
4. Proximity switch 2 ตัว
5. Microcontroller ARM7 LPC2148 1 ตัว
6. อลูมิเนียมโปรไฟล์ทำโครงสร้างของเครื่อง
7. จานรวมแสงทรงพาราโบล่า 1 อัน
8. Thermocouple 1 อัน
9. เซนเซอร์แสง LDR Matrix 6x6 1 อัน
10. กล่องบันทึกข้อมูลลง Flash drive 1 กล่อง
11. จานรูปทรงพาราโบลา ขนาด Ø 17 นิ้ว 1 จาน

2.2.2 รายละเอียดในการสร้างเครื่องต้นแบบ

หลักการทำงาน คือ ระบบจะทำการคำนวณหาตำแหน่งของดวงอาทิตย์ ณ เวลาจริงโดยใช้สมการที่กล่าวมาข้างต้น ทำให้ได้ค่า Altitude angle และ Azimuth angle จากนั้นนำค่ามุมที่ได้ส่งไปควบคุมการหมุนมอเตอร์ในแต่ละแกนเพื่อให้จานรวมแสงอยู่ในตำแหน่งที่ตรงกับดวงอาทิตย์พอดีซึ่งจะทำให้สามารถสะสมพลังงานความร้อนจากดวงอาทิตย์ได้ดีที่สุด โดยมีภาพรวมการทำงานของระบบดังรูปที่ 2

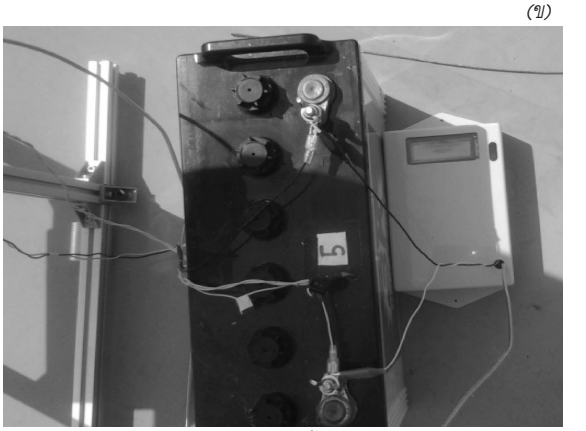


รูปที่ 2 แสดงภาพรวมของการทำงานของระบบติดตามการเคลื่อนที่ของดวงอาทิตย์ที่พัฒนาขึ้น

การทำงานของระบบโดยรวมใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ ARM7 รุ่น LPC2148 (4) เป็นหน่วยประมวลผล ไมโครคอนโทรลเลอร์ ARM7 รุ่น LPC2148 ถูกโปรแกรมให้ทำการคำนวณค่าตำแหน่งของดวงอาทิตย์ใหม่ทุกๆ 1 วินาที และนำค่าที่ได้ส่งไปสั่งให้มอเตอร์ทั้งสองตัวหมุนไปยังตำแหน่งนั้นๆ โดยสามารถควบคุมตำแหน่งการหมุนของมอเตอร์ได้จาก encoder โดยความละเอียดที่ใช้ในการควบคุมมอเตอร์ในมุมกวาด (Azimuth angle) อยู่ที่ 1367 ต่อ 1 องศา ส่วนมุมเงย (Altitude angle) อยู่ที่ 4 ต่อ 1 องศา และมอเตอร์สามารถรู้ถึงตำแหน่งเริ่มต้นได้ด้วย Proximity switch เนื่องจากโครงสร้างของระบบซึ่งใช้ติดตั้งจานรวมแสงมีค่าความผิดพลาดทำให้ตำแหน่งของดวงอาทิตย์ ณ เวลาต่างๆคลาดคลื่นไปจึงได้นำเซนเซอร์แสง LDR Matrix มาติดตั้งเพื่อให้ชดเชยค่าตำแหน่งของดวงอาทิตย์ที่ผิดพลาด โดยบนกล่องเซนเซอร์จะมีการเจาะรูขนาด 3 มิลลิเมตร ที่ตำแหน่งกึ่งกลาง LDR Matrix เซนเซอร์เมื่อแสงส่องผ่านรูรับแสงแล้วค่าเซนเซอร์ที่อ่านได้ไม่ตรงกับค่าเซนเซอร์ 4 ตัวที่อยู่บริเวณรูรับแสงจะทำให้ทราบว่าตำแหน่งของดวงอาทิตย์ในขณะนั้นไม่ตรงกับตำแหน่งดวงอาทิตย์จริงพร้อมทั้งทิศทางจากนั้นหน่วยประมวลผลจะสั่งให้มอเตอร์เคลื่อนที่ไปตรงข้ามกับทิศทางที่อ่านได้จาก LDR Matrix เซนเซอร์จนกว่าแสงที่รอดผ่านรูรับแสงจะตรงกับตำแหน่งกึ่งกลาง LDR Matrix เซนเซอร์ เพื่อเพิ่มความแม่นยำในการติดตามตำแหน่งของดวงอาทิตย์ให้มีประสิทธิภาพสูงสุด จากนั้น Thermocouple ซึ่งติดตั้งอยู่ที่บริเวณจุดโฟกัสของจานรวมแสงจะทำการอ่านค่าอุณหภูมิที่ได้ส่งผ่านกล่องบันทึกข้อมูลมาเก็บไว้ยัง Flash drive ซึ่งทำให้สะดวกในการนำข้อมูลที่ได้มาวิเคราะห์ต่อไป รูปที่ 3 แสดงเครื่องต้นแบบที่ได้สร้างขึ้น

(ก)

(ข)



รูปที่ 3 แสดงเครื่องต้นแบบที่ได้พัฒนาขึ้น (ก) และ (ข) คือ กล่องบันทึกข้อมูลเพื่อการวิเคราะห์ผลการทำงานของเครื่อง

3. ผลและการวิจารณ์ (Results and Discussion)

3.1 การประเมินผลการทำงานของเครื่องต้นแบบ

นักวิจัยได้ทดสอบการทำงานจริงของเครื่องต้นแบบโดยมีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินความแม่นยำของการทำงานในสภาพการใช้งานจริง และผลการรวมแสงอาทิตย์ว่าสามารถให้พลังงานความร้อนที่ระดับอุณหภูมิสูงเพียงใด นักวิจัยได้ติดตั้งเครื่องต้นแบบระบบติดตามการเคลื่อนที่ของดวงอาทิตย์ที่มีจานรวมแสงเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 17 นิ้ว และเทอร์โมคัปเปิลพร้อมกล่องบันทึกข้อมูลไว้กลางแจ้ง ตั้งโปรแกรมให้ทำงานระหว่างเวลา 9.00 น. ถึงเวลา 16.00 น. สภาพอากาศในช่วงวันที่ทดสอบเป็นช่วงต้นปีซึ่งเป็นฤดูหนาว ท้องฟ้าโปร่งมีเมฆบาง กระจายอยู่บางส่วน อุณหภูมิอากาศเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 28 - 30 ˚C และมีลมพัดเป็นบางเวลา เก็บข้อมูลเป็นเวลาเกินกว่า 1 สัปดาห์ จากการสังเกตการรวมแสงของจานรวมแสงที่ติดตั้งอยู่บนระบบติดตามการเคลื่อนที่ของดวงอาทิตย์ ซึ่งจุดโฟกัสรวมแสงส่องไปที่ปลายเทอร์โมคัปเปิลเพื่อวัดระดับอุณหภูมิ ณ ที่จุดนี้จะสามารถสังเกตเห็นแสงสว่างจ้าอยู่ตลอดเวลาที่ทำการทดสอบ แสดงให้เห็นถึงความแม่นยำที่เหมาะสมของระบบ และจากการวัดระดับอุณหภูมิที่จุดโฟกัสรวมแสงอ่านค่าได้จากเทอร์โมคัปเปิลนั้น ได้ระดับอุณหภูมิสูงสุดอยู่ที่ประมาณ 300 ˚C หรือระดับอุณหภูมิเฉลี่ยอยู่ที่ราว 200 ˚C ระดับอุณหภูมิเช่นนี้ หากจะนำไปใช้ในการต้มน้ำเพื่อขับเคลื่อนกลจักรไอน้ำ หรือใช้กับกังหันไอน้ำก็สามารถใช้งานได้เป็นอย่างดี แต่หากจะนำมาใช้กับเครื่องยนต์สเตอร์ลิงแล้วระดับของอุณหภูมิควรจะต้องสูงกว่านี้คือควรสูงกว่า 400 ˚C เพื่อให้ได้การทำงานของเครื่องยนต์ที่มีประสิทธิภาพ (1) รูปที่ 4 และ 5 แสดงกราฟข้อมูลตัวอย่างที่บันทึกระหว่างการทดสอบการทำงานของเครื่องต้นแบบและจากการทดสอบเครื่องต้นแบบนี้ นักวิจัยมีข้อสังเกตที่ควรบันทึกไว้ดังนี้

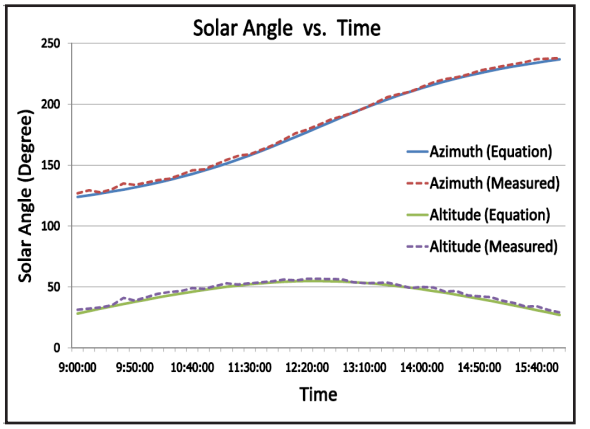
1. การใช้ระบบติดตามการเคลื่อนที่ของดวงอาทิตย์โดยใช้สมการคำนวณตำแหน่งของดวงอาทิตย์ (2) แต่เพียงอย่างเดียว เพื่อประยุกต์ใช้ในงานรวมแสงอาทิตย์เพื่อเอาพลังงานความร้อนไปใช้นั้นก็เพียงพอเหมาะสมแล้ว จากผลการทดลองดังรูปกราฟที่ 4 (ก) แสดงให้เห็นถึงค่ามุมที่คำนวณได้จากสมการเปรียบเทียบกับค่ามุมที่ได้จากการวัดด้วยเครื่องมือวัดมุมตำแหน่งดวงอาทิตย์ พบว่าค่าความผิดพลาดสูงสุดอยู่ที่ 1.83 องศา ซึ่งความผิดพลาดขนาดนี้อาจไม่จำเป็นต้องใช้เซนเซอร์วัดความเข้มแสงและระบบความคุมแบบสัญญาณป้อนกลับเลยก็ได้ แต่ทั้งนี้ต้องมั่นใจว่า การสร้างเครื่องติดตามการเคลื่อนที่ของดวงอาทิตย์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในส่วนของแกนมอเตอร์ทั้งสองที่ขับเคลื่อนจานรวมแสงต้องตั้งฉากกันดี การติดตั้งเครื่องบนพื้นที่ใช้งานที่ตั้งแนวทิศทางของแกนอ้างอิงให้ตรงกับทิศเหนือจริง การปรับตั้งเครื่องให้ได้ระนาบจริง และการกำหนดค่าพิกัดตำแหน่งสถานที่ตั้ง รวมถึงค่าวันเดือนปีและเวลาที่ถูกต้องแม่นยำ หากเกิดความคลาดเคลื่อนในเงื่อนไขที่กล่าวมาแล้วนี้ จะส่งผลถึงความแม่นยำของระบบที่ลดน้อยลง

2. ระดับอุณหภูมิที่บันทึกได้มีความแปรปรวนมาก โดยทั้งนี้เกิดขึ้นจากสภาพอากาศโดยรอบของปลายเทอร์โมคัปเปิลซึ่งเปิดสู่อากาศ หากมีลมพัดมาแรงจะเกิดการถ่ายเทความร้อนแบบการพาความร้อนทำให้ระดับอุณหภูมิลดลงอย่างมาก นอกจากนี้ที่จะรับพลังงานความร้อนที่จุดโฟกัสรวมแสงในขณะการทดสอบนี้ไม่ได้มีวัสดุหรืออุปกรณ์ในการกักเก็บความร้อนไว้ ดังนี้หากมีการถ่ายเทความร้อนออกไป ระดับอุณหภูมิจึงลดลงได้อย่างรวดเร็ว จากข้อสังเกตนี้นักวิจัยจะใช้เป็นข้อมูลในการออกแบบปรับปรุงระบบใหม่ให้มีส่วนที่รับและเก็บกักความร้อน รวมถึงเกาะบังลมเพื่อไม่ให้เกิดการถ่ายเทความร้อนจนทำให้ระดับอุณหภูมิลดลงจนไม่สามารถนำความร้อนไปใช้ประโยชน์ได้

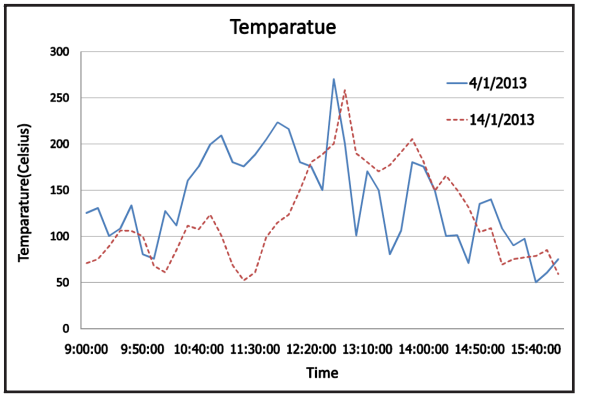
3. การโปรแกรมสั่งการให้ไมโครคอนโทรลเลอร์ทุกๆ 1 วินาทีอาจจะเป็นการคำนวณที่ถี่มากเกินไป เพราะเมื่อนักวิจัยสังเกตการขยับตัวของจานที่หันติดตามดวงอาทิตย์ การขยับตัวเล็กน้อยที่สังเกตได้จะใช้เวลาเกินกว่า 1 วินาทีมาก นั้นหมายความว่าเราสามารถลด

ความถี่ของการคำนวณลงได้มาก ซึ่งจะทำให้เราประหยัดเวลาในการทำงานของไมโครคอนโทรลเลอร์ลงได้ นั้นก็หมายความถึงการประหยัดพลังงานจากแบตเตอรี่ลงได้ ความถี่ในการคำนวณตำแหน่งดวงอาทิตย์ควรเหมาะสมกับความละเอียดของเอนโคดเดอร์ของมอเตอร์ด้วย

(ก)



(ข)



รูปที่ 4 กราฟ (ก) เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างมุมกวาดและมุมเงยที่คำนวณได้จากสมการกับมุมกวาดกับมุมเงยที่วัดได้จากเครื่องมือวัดกราฟ (ข) ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลาของวันที่ 4/1/2013 และ 14/1/2013

3.2 ต้นทุนการสร้างระบบติดตามการเคลื่อนที่ของดวงอาทิตย์

หากเราพิจารณาต้นทุนในการสร้างเครื่องต้นแบบระบบติดตามการเคลื่อนที่ของดวงอาทิตย์ (3) ที่กรมวิทยาศาสตร์บริการได้พัฒนาขึ้นนี้ โดยคิดจากค่าอุปกรณ์ที่ประกอบขึ้นเป็นระบบ โดยไม่รวมค่าจานรวมแสง เทอร์โมคัปเปิล และกล่องบันทึกข้อมูล ตามที่แจกแจงในตารางที่ 3 จะสามารถคำนวณต้นทุนได้เป็น 7,550 บาท ซึ่งถือว่าเป็นราคาที่ถูกมากเมื่อเปรียบเทียบกับราคาของระบบติดตามการเคลื่อนที่ของดวงอาทิตย์ที่นำเข้ามาขายในประเทศที่มีระดับราคาหลายหมื่นจนถึงแสนบาทซึ่งอาจจะมีความแม่นยำที่ดีกว่า (ความผิดพลาดน้อยกว่า $\pm$0.5 องศา) แต่เกินความจำเป็นในการใช้งาน และหากจะลดต้นทุนให้ต่ำลงกว่านี้ เราอาจจะใช้โพเทนชิโอมิเตอร์ (Potentiometer) เป็นตัววัดตำแหน่งหมุนของมอเตอร์แทนเอนโคดเดอร์ได้ และหากออกแบบวงจรและลายแผ่น PCB ของบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ใหม่ที่ลดเอาส่วนวงจรอิเลคทรอนิกส์ที่ไม่ได้ใช้งานออก (ในการวิจัยนักวิจัยใช้บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์แบบอเนกประสงค์) ก็จะทำให้แผงวงจรมีขนาดกะทัดรัดขึ้นและราคาถูกลงไปได้อีก

ตารางที่ 3 ราคาระบบติดตามดวงอาทิตย์ราคาประหยัด

รายการ	จำนวน	ราคา/ชิ้น (บาท)	ราคารวม (บาท)
DC motor 12V 30W	2	450	900
Rotary Encoder	2	1800	3600
H-Bridge Motor drive	1	650	650
Proximity switch	2	350	700
Microcontroller	1	1200	1200
LDR Matrix sensor	1	500	500
			7550

4. สรุป (Conclusion)

ระบบติดตามการเคลื่อนที่ของดวงอาทิตย์ที่กรมวิทยาศาสตร์บริการได้วิจัยพัฒนาขึ้นมีความแม่นยำอยู่ในระดับที่ดี คือไม่เกิน 2 องศา ซึ่งเหมาะกับการใช้งานในด้านการนำพลังงานแสงอาทิตย์มาใช้เป็นประโยชน์ ไม่ว่าจะด้วยวิธีการรวมแสงอาทิตย์เพื่อให้ได้เป็นพลังงานความร้อนไปใช้งาน หรือกระทั้งการเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตกระแสไฟฟ้าด้วยแผงโซลาเซลและด้วยต้นทุนที่ต่ำกว่าระบบที่นำเข้าจากต่างประเทศและความเรียบง่ายของระบบ จึงเหมาะสมกับการใช้งานในครัวเรือน หรือชุมชนเล็กที่ไม่จำเป็นต้องลงทุนในระบบที่มีความซับซ้อนและราคาแพง

5. เอกสารอ้างอิง

(1) Andy Ross "Making Stirling Engines", Model Engineer, January 10th, 2011

(2) William B. Stine and Michael Geyer "Power From The Sun" , http://www.power-fromthesun.net

(3) Artin Der Minassians and Seth R. Sanders "Stirling Engines for Distributed Low-Cost Solar-Thermal-Electric Power Generation" Journal of Solar Energy Engineering, February 2011, Vol.133

(4) Philips Semiconductors "LPC213x User Manual" , http://www.semiconductors.philips.com