

การออกแบบอัลกอริทึมสำหรับแผงโซลาร์เซลล์เพื่อใช้วัดความเข้มแสงอาทิตย์

เสาวรีย์ อรุณรัตน์วงศ์ และ จัตรชัย ศุภพิทักษ์สกุล

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี อำเภอคลองหลวง จังหวัดปทุมธานี 12110

saowaree_a@mail.rmutt.ac.th, chatchai.s@en.rmutt.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้เสนอการออกแบบอัลกอริทึมสำหรับแผงโซลาร์เซลล์เพื่อวัดความเข้มแสงอาทิตย์ให้มีความคลาดเคลื่อนน้อยลง แผงโซลาร์เซลล์ขนาดเล็กจะถูกออกแบบใช้เป็นเซ็นเซอร์วัดความเข้มแสงอาทิตย์ ซึ่งแรงดันไฟฟ้าที่ได้จากแผงโซลาร์เซลล์ถูกนำมาขยายและบันทึกด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล AVR เบอร์ ATMEGA328 โดยทำการวัดและบันทึกค่าทุก 2 นาที ตั้งแต่พระอาทิตย์ขึ้นจนกระทั่งพระอาทิตย์ตก แล้วนำข้อมูลที่ได้นำมาทำ Curve Fitting กับค่าที่ได้จากไพรานอมิเตอร์มาตรฐานมาทำการฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียมแบบแพร่ค่าย้อนกลับ หลังจากนั้นทำการทดลองโดยนำค่าที่วัดได้จากแผงโซลาร์เซลล์ขนาด 3 โวลต์ และ 5 โวลต์ โดยตรงในวันต่อมาป้อนเป็นอินพุตของโครงข่ายประสาทเทียมที่ฝึกสอนแล้วและนำค่าที่ได้จากเอาต์พุตมาเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการวัดของไพรานอมิเตอร์มาตรฐานของบริษัท Apogee รุ่น SP-110 พบว่ามีค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย 1.13 และ 1.19 เปอร์เซ็นต์ สำหรับแผงโซลาร์เซลล์ขนาด 3 โวลต์ และ 5 โวลต์ ตามลำดับ

คำสำคัญ: แผงโซลาร์เซลล์, Curve Fitting, โครงข่ายประสาทเทียมแบบแพร่ค่าย้อนกลับ, ไพรานอมิเตอร์

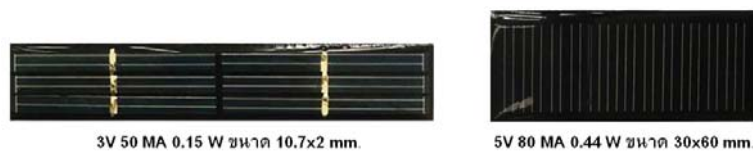
บทนำ

การวัดความเข้มแสงอาทิตย์มีความจำเป็นเพื่อใช้ในการวิจัยและวิเคราะห์ที่เกี่ยวกับการใช้งานแผงโซลาร์เซลล์ ซึ่งเซ็นเซอร์ที่ใช้วัดความเข้มแสงอาทิตย์มีราคาแพง จากการศึกษาข้อมูลและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องจากการสืบค้นงานวิจัย มีหลายงานวิจัยเกี่ยวกับการออกแบบเครื่องวัดความเข้มแสงอาทิตย์ ของเกษม ตรีภาค และคณะ [1] ที่ใช้โฟโตไดโอดเป็นเซ็นเซอร์วัดความเข้มแสงอาทิตย์ จากนั้นนำแรงดันที่วัดคร่อมตัวต้านทานที่ต่อขนานกับโฟโตไดโอด มาขยายแรงดันแล้วนำมาสอบเทียบกับไพรานอมิเตอร์ ยี่ห้อ KIPP & ZONEN รุ่น CMP3, มรกต แสนกุล, และสมชาย กฤตพลวิวัฒน์ [2] ใช้โซลาร์เซลล์เป็นเซ็นเซอร์สำหรับวัดรังสีรวมจากดวงอาทิตย์ ลักษณะการทำงานจะใช้ตัวกระจายแสงแบบทึบเพื่อลดความผิดพลาดโคซายน์ของรังสีดวงอาทิตย์ที่ตกกระทบบนหัววัด และทำการวัดรังสีแสงอาทิตย์โดยวัดจากค่ากระแสไฟฟ้าลัดวงจรและอุณหภูมิของโซลาร์เซลล์ โดยทำการสอบเทียบกับไพรานอมิเตอร์ของบริษัท KIPP & ZONEN รุ่น CM1, Joel Cruz-Colon [3] นำเสนอการออกแบบเครื่องวัดรังสีดวงอาทิตย์แบบต้นทุนต่ำโดยใช้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ ด้วยวิธีการตรวจวัดความเข้มแสงของแรงดันไฟฟ้าเปิดและกระแสไฟฟ้าลัดวงจรของเซลล์แสงอาทิตย์และได้คำนวณหารังสีดวงอาทิตย์เพื่อหาค่าประสิทธิภาพ ซึ่งอุปกรณ์ไพรานอมิเตอร์มีราคาแพงประกอบกับเซลล์แสงอาทิตย์มีราคาที่ถูกกว่า ในงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC16F877A ในการประมวลผลการตรวจวัดค่าความเข้มแสงอาทิตย์ วิทยานิพนธ์ของรัช เกษมสทิพย์ [4] ประยุกต์ใช้โครงข่ายประสาทเทียมเพื่อการพยากรณ์การเปลี่ยนแปลงค่าความเข้ม ของปริมาณรังสีเพื่อศึกษาข้อมูลตลอดจนแนวโน้มของการเปลี่ยนแปลงค่าความเข้มการแผ่รังสีพลังงานแสงอาทิตย์ ซึ่งผลที่ได้สามารถนำมาใช้เป็นแนวทางในการนำไปพิจารณาออกแบบระบบการผลิตกระแสไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์ในอนาคตให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุดในการผลิตกระแสไฟฟ้า และวิทยานิพนธ์ของอนุรักษ เกษมวัฒนากุล [5] ได้ทำการศึกษาค้นสมบัติของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เชิงแสงที่มีจำหน่ายทั่วไป เช่น โฟโตทรานซิสเตอร์, แอลดีอาร์, โฟโตไดโอดชนิดอินฟาเรด, โฟโตไดโอด, และแผงเซลล์แสงอาทิตย์ขนาดเล็ก เพื่อประยุกต์ใช้ทดแทนอุปกรณ์วัดความเข้มแสงอาทิตย์ สรุปผลได้ว่าเซลล์แสงอาทิตย์ให้ผลใกล้เคียงกับไพรานอมิเตอร์ต้นแบบมากที่สุดแต่ยังมีความคลาดเคลื่อนค่อนข้างสูง

จากปัญหาดังกล่าวจึงได้มีแนวคิดในการสร้างชุดวัดความเข้มแสงอาทิตย์ หรือไพรานอร์มิเตอร์ ที่มีราคาถูกและมีความถูกต้องที่สามารถเทียบได้กับไพรานอร์มิเตอร์มาตรฐาน โดยใช้แผงโซลาร์เซลล์ขนาดเล็กมาออกแบบเป็นเซ็นเซอร์วัดความเข้มแสงอาทิตย์และนำเสนออัลกอริทึมที่ใช้เทคนิค Curve Fitting และโครงข่ายประสาทเทียม มาช่วยปรับค่าความเข้มแสงอาทิตย์ให้มีค่าใกล้เคียงกับเซ็นเซอร์วัดความเข้มแสงอาทิตย์มาตรฐาน

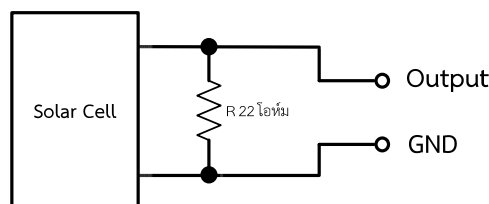
วิธีดำเนินการวิจัย

การวิจัยเริ่มต้นจากการศึกษาคุณสมบัติของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เชิงแสงที่มีจำหน่ายทั่วไป เพื่อประยุกต์ใช้ทดแทนอุปกรณ์วัดความเข้มแสงอาทิตย์ หรือไพรานอร์มิเตอร์ พบว่ามีอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดความเข้มแสงอาทิตย์ที่นิยมนำมาใช้งานเช่น แผงโซลาร์เซลล์, โฟโตทรานซิสเตอร์ และโฟโตไดโอด จากการศึกษาข้อมูลพบว่าแผงโซลาร์เซลล์มีพื้นผิวในการรับแสงเป็นพื้นผิวเรียบ ข้อดีของเซลล์แสงอาทิตย์ในการตรวจจับพลังงานแสงอาทิตย์ คือค่ากระแสลัดวงจรของเซลล์แสงอาทิตย์จะแปรผันตรงกับค่าความเข้มแสงอาทิตย์ ดังนั้นได้เลือกใช้แผงโซลาร์เซลล์ขนาดเล็ก ดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 แผงโซลาร์เซลล์ที่มีแรงดันไฟฟ้าขนาด 3 โวลต์ และ 5 โวลต์ [6]

ดังนั้นจึงเลือกใช้แผงโซลาร์เซลล์ที่มีแรงดันไฟฟ้าขนาด 3 โวลต์ และ 5 โวลต์ เป็นเซ็นเซอร์วัดความเข้มแสงอาทิตย์ โดยนำมาต่อขนานกับตัวต้านทานขนาด 22 โอห์ม เพื่อวัดค่าแรงดันที่ตัวต้านทานตัวนี้ ซึ่งจะมีการเปลี่ยนแปลงตามความเข้มแสงอาทิตย์ ดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 การต่อใช้งานของแผงโซลาร์เซลล์

จากรูปที่ 2 เมื่อแผงโซลาร์เซลล์ได้รับแสงอาทิตย์ ที่ขั้วของแผงโซลาร์เซลล์จะเกิดกระแสไหลผ่าน ดังนั้นเมื่อนำตัวต้านทานมาต่อขนานกระแสไฟฟ้าจะไหลผ่านตัวต้านทานครบวงจรได้ ซึ่งขนาดกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวต้านทานได้จะขึ้นอยู่กับความเข้มแสงอาทิตย์ แล้วจึงนำไปทดสอบโดยให้แสงอาทิตย์ตกกระทบบนที่ตัวแผงโซลาร์เซลล์ จากนั้นวัดค่าแรงดันที่ตกคร่อมตัวต้านทาน ซึ่งแรงดันที่ตกคร่อมตัวต้านทานจะแปรผันกับกระแสไฟฟ้าที่ไหลในวงจรตามกฎของโอห์ม ผลจากการทดลองพบว่าการเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้าที่ตัวต้านทานแปรผันตรงกับพลังงานแสงอาทิตย์ ตั้งแต่ 10 มิลลิโวลต์ จนถึง 250 มิลลิโวลต์ และทำการขยายแรงดันไฟฟ้าให้อยู่ในย่านที่สามารถนำไปใช้งานกับไมโครคอนโทรลเลอร์ได้ โดยใช้วงจรขยายแรงดันที่ใช้ Instrument-Amplifier TL072A และคำนวณอัตราขยายแรงดันด้วยสมการที่ (1)

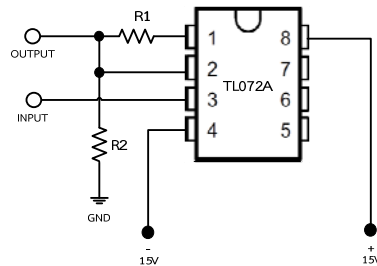
$$A_v = \frac{V_{OUT}}{V_{IN}} = 1 + \frac{R_1}{R_2} \quad (1)$$

สมการที่ 1 A_V คืออัตราขยายแรงดัน V_{OUT} คือแรงดันไฟฟ้าที่ต้องการขยายให้มีค่าเท่ากับ 5 โวลต์ ส่วน V_{IN} คือแรงดันไฟฟ้าก่อนการขยายมีค่าสูงสุดที่ 250 มิลลิโวลต์ ดังนั้นจะได้อัตราขยายแรงดันที่ต่อกับแผงโซลาร์เซลล์เท่ากับ 2 เท่า และอัตราขยายแรงดันที่ต่อกับไพราณอร์มิเตอร์ รุ่น SP-110 เท่ากับ 20 เท่า จากนั้นนำอัตราขยายแรงดันที่ได้คำนวณหาขนาดของตัวต้านทานที่ใช้ต่อในวงจรขยายแรงดันด้วย TL072A โดยสมการที่ (2) และ (3)

$$A_V = 1 + \frac{10\Omega}{R_2} \quad (2)$$

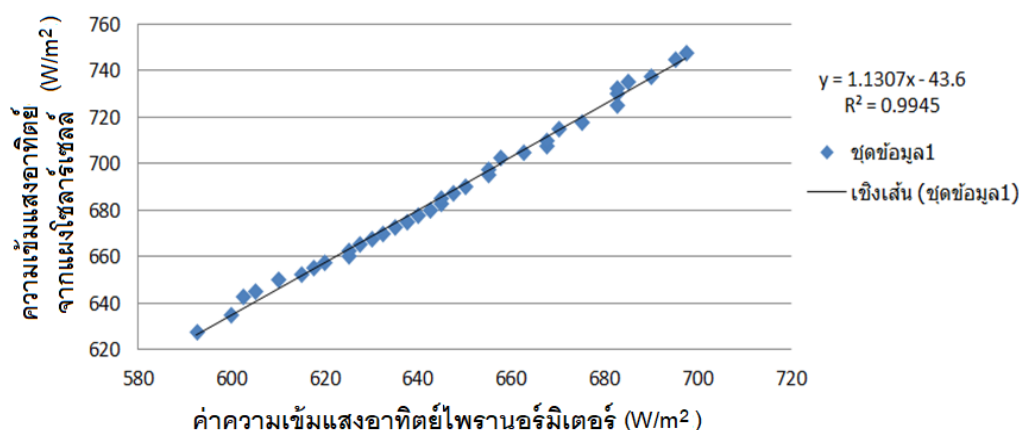
$$A_V = 1 + \frac{470\Omega}{R_2} \quad (3)$$

R_2 คือขนาดตัวต้านทานที่ต้องนำมาต่อในวงจรขยายแรงดัน TL072A เมื่อใช้อัตราขยายแรงดันที่ได้จากสมการที่ (1) มาแทนในสมการที่ 2 จะได้ R_2 เท่ากับ 10 โอห์ม ได้อัตราขยายเท่ากับ 2 เท่า และแทนในสมการที่ 3 จะได้ R_2 เท่ากับ 24 โอห์ม ได้อัตราขยายเท่ากับ 20 เท่า วงจรการต่อ TL072A แสดงดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 วงจรขยายแรงดันไฟฟ้าด้วย TL072A [7]

จากนั้นทำการวัดและบันทึกด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล AVR เบอร์ ATMEGA328 [8] โดยบันทึกค่าทุก 2 นาที ตั้งแต่พระอาทิตย์ขึ้นจนกระทั่งพระอาทิตย์ตก โดยเขียนโปรแกรมควบคุมไมโครคอนโทรลเลอร์วัดความเข้มแสงอาทิตย์ให้รับค่าแรงดันไฟฟ้าจากแผงโซลาร์เซลล์และไพราณอร์มิเตอร์ รุ่น SP-110 แล้วเปลี่ยนค่าแรงดันไฟฟ้าที่อ่านได้เป็นค่าความเข้มแสงอาทิตย์ แล้วนำข้อมูลค่าความเข้มแสงอาทิตย์ที่ได้จากแผงโซลาร์เซลล์และไพราณอร์มิเตอร์มาทำ Curve Fitting เพื่อให้ได้สมการเชิงเส้นแบบถดถอยในแต่ละช่วง [9] กราฟรูปที่ 4 ตัวอย่างสมการที่ได้จากการทำ Curve Fitting ช่วงที่วัดแรงดันไฟฟ้าตั้งแต่ 2.51 - 3.00 V ในส่วนของแกน Y จะเป็นข้อมูลของเครื่องวัดความเข้มแสงอาทิตย์จากแผงโซลาร์เซลล์ และแกน X จะเป็นข้อมูลของไพราณอร์มิเตอร์ ดังนั้นจึงแบ่งช่วงแรงดันไฟฟ้าที่วัดได้ออกเป็น 8 ช่วง แล้วสร้างสมการเชิงเส้นในแต่ละช่วงสรุปได้ดังตารางที่ 1



รูปที่ 4 กราฟค่าความเข้มแสงอาทิตย์ที่ได้จากแผงโซลาร์เซลล์และไพรานอมิเตอร์มาทำ Curve Fitting เพื่อให้ได้สมการ

ตารางที่ 1 สมการเชิงเส้นทั้ง 8 ช่วง

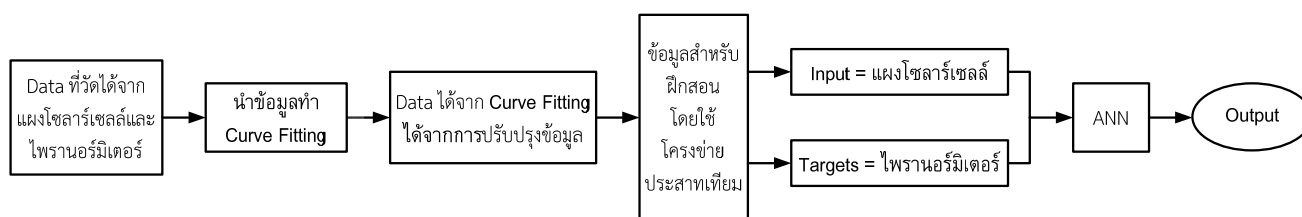
สมการความเข้มแสงอาทิตย์: Y (W/m ²)	แรงดันไฟฟ้าที่วัดได้: X (V)
Y = 1.1033x - 11.441	0 - 0.50
Y = 1.0651x - 6.0627	0.51 - 1.00
Y = 1.0598x - 5.463	1.01 - 1.50
Y = 1.0835x - 13.559	1.51 - 2.00
Y = 1.0639x - 2.3124	2.01 - 2.50
Y = 1.1307x - 43.6	2.51 - 3.00
Y = 1.3248x - 176.8	3.01 - 3.50
Y = 1.2675x - 127.49	3.51 - 4.00

ตัวแปร Y ค่าความเข้มแสงอาทิตย์ มีหน่วยเป็นหน่วยวัตต์ต่อตารางเมตร (W/m²) ส่วนตัวแปร X ค่าแรงดันไฟฟ้าที่อ่านได้จากแผงโซลาร์เซลล์ มีหน่วยเป็นโวลต์ (V)

จากนั้นนำค่าความเข้มแสงอาทิตย์ที่วัดได้จากแผงโซลาร์เซลล์มาแทนค่าตัวแปร X ในสมการเชิงเส้น และเมื่อได้ค่าความเข้มแสงอาทิตย์จากแผงโซลาร์เซลล์และค่าความเข้มแสงอาทิตย์จากไพรานอมิเตอร์แล้วนำไปทำการฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียมโดยใช้ข้อมูลที่ได้จากแผงโซลาร์เซลล์เป็นอินพุต (Input) และข้อมูลของไพรานอมิเตอร์เป็นค่าเป้าหมาย (Target) ในการฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียมแบบแพร่ค่าย้อนกลับ เพื่อปรับค่าความเข้มแสงอาทิตย์จากแผงโซลาร์เซลล์ ให้มีค่าเข้าใกล้ค่าความเข้มแสงอาทิตย์ที่วัดได้จากไพรานอมิเตอร์มาตรฐาน [10] โดยขั้นตอนการเตรียมข้อมูลสำหรับฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียมแสดงดังรูปที่ 5 และจะได้ค่าความเข้มแสงอาทิตย์จากแผงโซลาร์เซลล์ 3 โวลต์ 5 โวลต์ และไพรานอมิเตอร์ แสดงดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ผลจากการวัดค่าความเข้มแสงอาทิตย์

เวลา	ค่าความเข้มแสงอาทิตย์ (W/m^2)			% ความคลาดเคลื่อน	
	ไพราโนมิเตอร์	โซลาร์เซลล์ 3 โวลต์	โซลาร์เซลล์ 5 โวลต์	โซลาร์เซลล์ 3 โวลต์	โซลาร์เซลล์ 5 โวลต์
8:32:01	387.5	355	337.5	8.39	12.90
9:32:00	545	507.5	485	6.88	11.01
10:32:04	590	550	525	6.78	11.02
11:32:03	782.5	705	690	9.90	11.82
12:32:03	520	482.5	465	7.21	10.58
13:32:02	492.5	467.5	445	5.08	9.64
14:32:01	465	435	425	6.45	8.60
15:32:01	292.5	257.5	272.5	11.97	6.84



รูปที่ 5 ขั้นตอนการเตรียมข้อมูลสำหรับฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียม

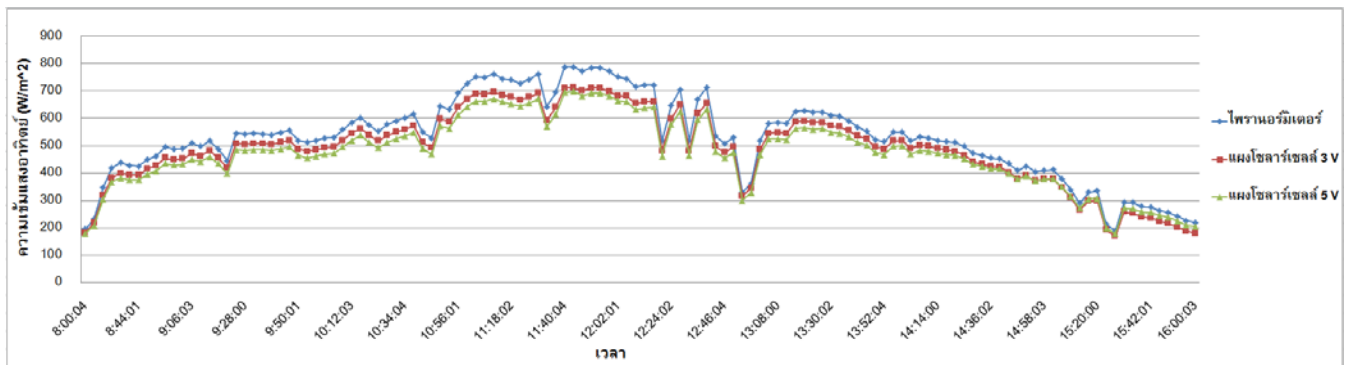
ผลและอภิปรายผล

เมื่อสร้างชุดวัดและบันทึกความเข้มแสงอาทิตย์จากแผงโซลาร์เซลล์ที่ขนาดแรงดันไฟฟ้า 3 โวลต์ และ 5 โวลต์ เสร็จสิ้นจะนำไปวางในระนาบเดียวกันขนานกับพื้นในบริเวณแดดฟ้าดีขณะอุตสาหกรรมและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ วิทยาเขตวังไกลกังวล แล้วเครื่องวัดได้ถูกนำไปทดสอบวัดค่าความเข้มแสงอาทิตย์เทียบกับไพราโนมิเตอร์ รุ่น SP-110 โดยวัดและบันทึกค่าทุก 2 นาที ตั้งแต่พระอาทิตย์ขึ้นจนกระทั่งพระอาทิตย์ตก แสดงดังรูปที่ 6

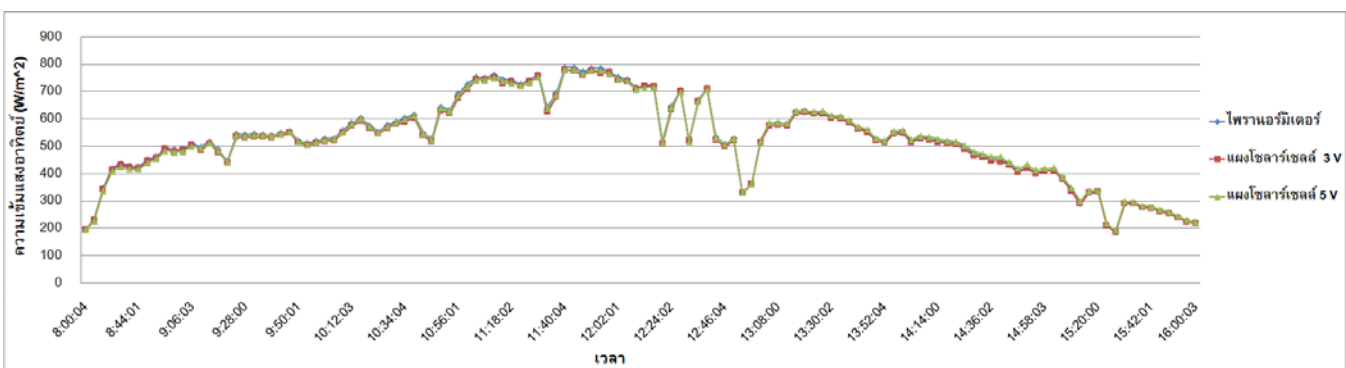


รูปที่ 6 การวัดความเข้มแสงอาทิตย์จากแผงโซลาร์เซลล์ที่มีแรงดันไฟฟ้าขนาด 3 โวลต์ 5 โวลต์ และไพราโนมิเตอร์

จากการทดสอบชุดวัดความเข้มแสงอาทิตย์จากแผงโซลาร์เซลล์ที่มีแรงดันไฟฟ้าขนาด 3 โวลต์ และ 5 โวลต์ เปรียบเทียบกับชุดวัดความเข้มแสงอาทิตย์จากไพรานอร์มิเตอร์ รุ่น SP-110 จะได้ค่าความเข้มแสงอาทิตย์ แสดงดังกราฟรูปที่ 7 หลังจากนั้นนำค่าแรงดันที่วัดได้จากแผงโซลาร์เซลล์ขนาด 3 โวลต์ และ 5 โวลต์ โดยตรงมาป้อนเป็นอินพุตของโครงข่ายประสาทเทียมที่ฝึกสอนแล้ว และนำค่าที่ได้จากเอาต์พุตมาเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการวัดของไพรานอร์มิเตอร์มาตรฐานของบริษัท Apogee รุ่น SP-110 จากการทดลองเก็บผล 10 วัน พบว่ามีค่าใกล้เคียงกัน และมีความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย 1.13 และ 1.19 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับแสดงดังตารางที่ 3 และกราฟรูปที่ 8



รูปที่ 7 กราฟค่าความเข้มแสงอาทิตย์ที่ได้จากแผงโซลาร์เซลล์ 3 โวลต์ และ 5 โวลต์ และไพรานอร์มิเตอร์



รูปที่ 8 กราฟค่าความเข้มแสงอาทิตย์ที่ได้จากแผงโซลาร์เซลล์ 3 โวลต์ และ 5 โวลต์ ที่ได้จากเอาต์พุตของโครงข่ายประสาทเทียม และไพรานอร์มิเตอร์

ตารางที่ 3 ผลจากการวัดความเข้มแสงอาทิตย์เฉลี่ยต่อวันเป็นระยะเวลา 10 วัน

วันที่	ค่าความเข้มแสงอาทิตย์ (W/m^2)			% ความคลาดเคลื่อน	
	ไพรานอมิเตอร์	โซลาร์เซลล์ 3 โวลต์	โซลาร์เซลล์ 5 โวลต์	โซลาร์เซลล์ 3 โวลต์	โซลาร์เซลล์ 5 โวลต์
27-ก.ย.-60	482	477.1	485.8	1.18	1.25
5-ต.ค.-60	354.4	352.9	356.4	1.06	1.12
6-ต.ค.-60	588	584.2	592.9	1.01	1.16
8-ต.ค.-60	532.3	526	530.6	1.18	1.20
13-ต.ค.-60	340.7	339.5	340.9	1.05	1.07
19-ต.ค.-60	463.8	460.4	463.9	1.11	1.17
23-ต.ค.-60	490.5	484.9	486.2	1.17	1.22
28-ต.ค.-60	469.1	465.9	467.2	1.18	1.25
29-ต.ค.-60	412.1	410.3	409.4	1.17	1.23
1-พ.ย.-60	363.8	360.6	359.8	1.17	1.19
		ค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย		1.13	1.19

สรุปผลการวิจัย

จากผลการทดสอบชุดวัดความเข้มแสงอาทิตย์จากแผงโซลาร์เซลล์ที่มีแรงดันไฟฟ้าขนาด 3 โวลต์ และ 5 โวลต์ที่ได้จากอัลกอริทึมที่ออกแบบ เทียบกับไพรานอมิเตอร์ ดังกราฟรูปที่ 8 พบว่าค่าที่วัดได้มีค่าใกล้เคียงกัน โดยมีความคลาดเคลื่อนลดลงเมื่อเทียบกับผลการวัดที่ได้ก่อนทำการปรับค่าด้วยการทำ Curve Fitting และฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียม ซึ่งมีความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยประมาณ 1.13% และ 1.19% สำหรับการใช้แผงโซลาร์เซลล์ขนาด ขนาด 3 โวลต์ และ 5 โวลต์ ตามลำดับ เมื่อนำไปเปรียบเทียบกับผลการทดลองของบทความ [1] ซึ่งใช้โฟโตไดโอดเป็นเซ็นเซอร์วัดความเข้มแสงอาทิตย์ พบว่ามีค่าความคลาดเคลื่อนของชุดวัดความเข้มแสงอาทิตย์จากแผงโซลาร์เซลล์ที่ออกแบบมีค่าความคลาดเคลื่อนน้อยกว่า อย่างไรก็ตามแผงโซลาร์เซลล์มีพื้นผิวในการรับแสงเป็นพื้นผิวเรียบ ต่างโฟโตไดโอดซึ่งมีความโค้งพื้นที่รับแสงถูกออกแบบให้อยู่ด้านบนของอุปกรณ์ ทำให้ผลของการรับแสงทางด้านข้างของอุปกรณ์นั้นให้อาห์พุดมีค่าน้อย และจากการศึษางานวิจัยที่เกี่ยวกับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เชิงแสงที่มีจำหน่ายทั่วไปเพื่อประยุกต์ใช้ทดแทนอุปกรณ์วัดความเข้มแสงอาทิตย์ สรุปผลได้ว่าการใช้แผงโซลาร์เซลล์เป็นเซ็นเซอร์วัดความเข้มแสงอาทิตย์ให้ผลใกล้เคียงกับไพรานอมิเตอร์ต้นแบบมากที่สุด ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าเครื่องวัดความเข้มแสงอาทิตย์ที่ออกแบบนี้สามารถนำไปใช้วัดค่าความเข้มแสงอาทิตย์ได้ มีราคาถูกลง สะดวกกับการใช้งานในภาคสนามและสามารถนำข้อมูลที่ได้ไปใช้ได้ทันที

บรรณานุกรม

- [1] เกษม ตรีภาค, ชยันต์ สิงหาบุตร, สุริยา แซ่ย่าง, อนุชา สุนันตะ และ นพพร พัชรประกิติ. การออกแบบและพัฒนาเครื่องวัดความเข้มแสงอาทิตย์. วิทยานิพนธ์ สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา จังหวัดลำปาง. 2555.
- [2] มรกต แสนกุล และสมชาย กฤตพลวิวัฒน์. การออกแบบเครื่องวัดรังสีดวงอาทิตย์ด้วยโซลาร์เซลล์แบบพกพา. วิทยานิพนธ์ ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร จังหวัดพิษณุโลก. 2555.
- [3] J. Cruz-Colon, L. Martinez-Mitjans and I. Eduardo. Design of a low cost irradiance meter using a photovoltaic panel. IEEE Photovoltaic Specialists Conference. 2012, p. 911-912.
- [4] ธวัช เกษสทิธย์. การประยุกต์ใช้โครงข่ายประสาทเทียมเพื่อพยากรณ์ความเข้มการแผ่รังสีพลังงานแสงอาทิตย์. วิทยานิพนธ์ ภาควิชาครุศาสตร์ไฟฟ้า คณะครุศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ. 2549.

- [5] อนุรักษ์ เกษวัฒนากุล. การประยุกต์ใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์วัดค่าพารามิเตอร์ของเซลล์แสงอาทิตย์. วิทยานิพนธ์ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี. 2553.
- [6] แฟงโซลาร์เซลล์. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก: <http://www.mind-tek.net>. สืบค้น 19 สิงหาคม 2560.
- [7] วรพงศ์ ตั้งศรีรัตน์. ออปแอมป์และการประมวลผลสัญญาณอนาล็อก. กรุงเทพฯ: เม็ดทราย พรินต์ติ้ง, 2545. หน้า 1-91.
- [8] จักรี รัตมีฉาย. ทดลองและใช้งานบอร์ด Arduino Uno R3 ด้วยโปรแกรม NI LabVIEW. ภาควิชาครุศาสตร์อุตสาหกรรม คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี.
- [9] ลัญจกร วุฒิสฤทธิกุลกิจ และคณะ. การใช้งาน MATLAB เบื้องต้น. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 2551.
- [10] มนัส สวรรศิลป์ และ วรรัตน์ ภัทรอมรกุล. คู่มือการใช้งาน MATLAB ฉบับสมบูรณ์. สำนักพิมพ์อินโฟเพรส, จังหวัดนนทบุรี. 2543.