



กรณีศึกษาแหล่งกำเนิดแสงที่ใช้ร่วมกับระบบเซลล์เชื้อเพลิงแบบป้อนกลับขนาดเล็ก

A Case Studying of Light Source Used in Combination
of Small-Sized Regenerative Fuel Cell Systemวสันต์ พลาสัย¹, พลากร พรหมเมศรี¹Wasan Palasai¹, Palakorn Prommet¹

บทคัดย่อ

บทความวิจัยนี้ นำเสนอการศึกษาแหล่งกำเนิดแสงที่ใช้ร่วมกับระบบเซลล์เชื้อเพลิงแบบป้อนกลับขนาดเล็ก โดยทำการเปรียบเทียบแหล่งกำเนิดแสงอาทิตย์จากธรรมชาติ ในช่วงเวลาระหว่าง 13.30 - 17.00 น. กับแหล่งกำเนิดแสงเทียมที่ได้จากหลอดไฟชนิดคอมแพคฟลูออเรสเซนต์ (Compact Fluorescent Lamp; CFLs) ขนาด 13 วัตต์ และหลอดสะท้อนแสงกระจกหน้าชนิดแอลอีดี (Light Emitting Diode Parabolic Aluminized Reflector Lamp) ขนาด 12 วัตต์ ซึ่งทำการทดลองในห้องปิดทึบจำกัดแสง โดยให้พลังงานแสงสว่างไปยังเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกโพลีซิลิกอน (Polycrystalline Silicon Solar Cell) ขนาด 11 วัตต์ 2.5 โวลต์ จำนวน 1 แผง ที่ทำหน้าที่จ่ายแรงดันให้กับระบบแยกน้ำด้วยไฟฟ้า (Electrolyzer) ซึ่งน้ำจะถูกแยกออกเป็นไฮโดรเจน และออกซิเจน แล้วไปเก็บยังกระบอกเก็บเพื่อป้อนกลับเข้าเซลล์เชื้อเพลิงที่ทำหน้าที่ผลิตพลังงานไฟฟ้า จากการศึกษาพบว่า แหล่งกำเนิดแสงอาทิตย์จากธรรมชาติให้ประสิทธิภาพในการแยกน้ำด้วยไฟฟ้าได้ดีกว่าแหล่งกำเนิดแสงเทียมจากหลอดไฟชนิดคอมแพคฟลูออเรสเซนต์ ขนาด 13 วัตต์ คิดเป็น 30 เปอร์เซ็นต์ แต่จะมีประสิทธิภาพการทำงานที่ใกล้เคียงกันกับหลอดสะท้อนแสงกระจกหน้า ขนาด 12 วัตต์ คิดเป็น 70 เปอร์เซ็นต์

คำสำคัญ: เซลล์เชื้อเพลิงแบบป้อนกลับ ระบบแยกน้ำด้วยไฟฟ้า

Abstract

This paper presents a case studying of light source used in combination of small-sized regenerative fuel cell system, by comparing the natural sunlight in the second time period between 13.30 to 17.00 pm, with artificial light sources made up of a compact fluorescent lamp with 13 watt and light emitting diode parabolic aluminized reflector lamp of 12 watt, which was conducted in a room drapes. The light energy to the polycrystalline silicon solar cell with size 2.5 volt 11 watt panel, that acts of voltage to electrolyzer which water is separated, into hydrogen and oxygen to keep the barrel to collect feedback into the fuel cell to generate electricity. The study found that natural sunlight the performance to split water with electricity is a better source of artificial light from lamps, compact fluorescent 13 watt accounted for 30 percent, but there will be a performance similar to a light emitting diode parabolic aluminized reflector lamp of 12 watt accounted 70 percent.

Keywords: Regenerative Fuel Cell, Electrolyzer

¹ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนราธิวาสราชนครินทร์

¹ Faculty of Engineering, Princess of Naradhiwas University



บทนำ

เซลล์เชื้อเพลิง เป็นแหล่งพลังงานอีกรูปแบบหนึ่งที่มีการพัฒนามุ่งถึงการใช้อย่างแพร่หลายในปัจจุบัน โดยเซลล์เชื้อเพลิง คือ อุปกรณ์ที่ทำหน้าที่แปลงผันพลังงานเคมีของเชื้อเพลิง เช่น แก๊สไฮโดรเจน มีเทน เมทานอล แก๊สธรรมชาติ หรือแก๊สจากถ่านหิน ให้เป็นพลังงานไฟฟ้า โดยอาศัยกระบวนการทางไฟฟ้าเคมี โดยต้องมีเชื้อเพลิงไหลเข้าไปในระบบตลอดเวลา ผลที่ได้จากกระบวนการไฟฟ้าเคมีที่ได้จากเซลล์เชื้อเพลิงบางประเภท เช่น เซลล์เชื้อเพลิงแบบเกลือคาร์บอเนตหลอมเหลว (Molten Carbonate Fuel Cell: MCFC) หรือเซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์แข็ง (Solid Oxide Fuel Cell: SOFC) นอกจากนำมาผลิตพลังงานไฟฟ้าได้แล้ว ยังสามารถนำเอาความร้อนที่ผลิตได้เป็นจำนวนมากนั้น นำไปผลิตไอน้ำหรือน้ำร้อนไปผ่านกังหันก๊าซหรือเทคโนโลยีอื่น ๆ เพื่อนำเอาความร้อนกลับมาใช้ใหม่ได้อีกครั้ง ซึ่งเป็นกระบวนการเพิ่มประสิทธิภาพของระบบการผลิตพลังงานไฟฟ้า ข้อดีของเซลล์เชื้อเพลิง คือ มีประสิทธิภาพในการทำงานสูง ไม่ก่อให้เกิดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก และไม่ทำให้เกิดมลพิษต่อสภาพแวดล้อม (Patil, Dubois, Sifer, Bostic, Gardner, Quah & Bolton, 2004; Morita, 2003)

เนื่องจากกระบวนการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงไม่ได้ถูกเผาไหม้ และยังไม่เกิดเสียงดังรบกวนเกิดขึ้น ซึ่งปัจจุบันนักวิจัยทั่วโลกได้ทำการพัฒนาระบบและประยุกต์ใช้งานเซลล์เชื้อเพลิงในด้านต่าง ๆ เพื่อให้สามารถทดแทนแหล่งพลังงานที่กำลังจะหมดไปในอนาคต ด้วยเหตุนี้จึงเป็นที่มาของการศึกษาแหล่งกำเนิดแสงที่ใช้ร่วมกับระบบเซลล์เชื้อเพลิงแบบป้อนกลับขนาดเล็ก โดยทำการเปรียบเทียบแหล่งกำเนิดแสงอาทิตย์จากธรรมชาติ กับแหล่งกำเนิดแสงเทียมที่สร้างขึ้นจากหลอดไฟชนิดคอมแพคฟลูออเรสเซนต์ ขนาด 13 วัตต์ และหลอดสะท้อนแสงกระจกหน้าชนิดแอลอีดี ขนาด 12 วัตต์ ซึ่งทำการทดลองในห้องปิดที่บังแดดแสง โดยให้พลังงานแสงสว่างไปยังเซลล์แสงอาทิตย์ ที่ทำหน้าที่จ่ายแรงดันให้กับระบบแยกน้ำด้วยไฟฟ้า (Electrolyzer) จากการศึกษาพบว่า แหล่งกำเนิดแสงอาทิตย์จากธรรมชาติให้ประสิทธิภาพในการแยกน้ำด้วยไฟฟ้าได้ดีกว่าแหล่งกำเนิดแสงเทียมจากหลอดไฟชนิดคอมแพคฟลูออเรสเซนต์ คิดเป็น 30 เปอร์เซ็นต์ แต่จะมีประสิทธิภาพการทำงานที่ใกล้เคียงกับหลอดสะท้อนแสงกระจกหน้า ขนาด 12 วัตต์ คิดเป็น 70 เปอร์เซ็นต์

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

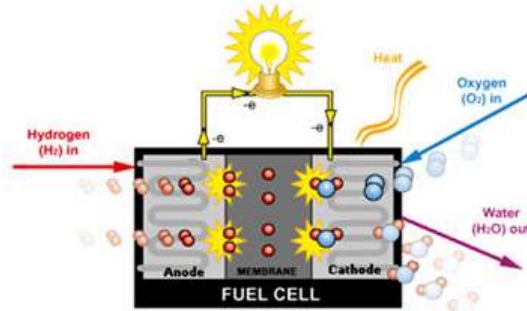
เพื่อศึกษาแหล่งกำเนิดแสงที่ใช้ร่วมกับระบบเซลล์เชื้อเพลิงแบบป้อนกลับขนาดเล็ก ที่ใช้เป็นแหล่งพลังงานร่วมกับเซลล์แสงอาทิตย์ในระบบแยกน้ำด้วยไฟฟ้า (Electrolyzer) ให้ระบบมีประสิทธิภาพการทำงานที่เหมาะสม

ระเบียบวิธีวิจัย

1. หลักการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง

องค์ประกอบหลักที่มีความสำคัญของเซลล์เชื้อเพลิง ได้แก่ ขั้วอิเล็กโทรด (Electrode) ที่ประกอบด้วยขั้วแคโทด (Cathode) และขั้วแอโนด (Anode) ซึ่งขั้วทั้งสองนี้ถูกคั่นด้วยสารพาประจุหรืออิเล็กโทรไลต์ (Electrolyte) การทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงเกิดขึ้นได้เมื่อมีการเติมเชื้อเพลิงโดยทำการป้อนแก๊สไฮโดรเจนเข้าไปที่ขั้วแอโนด และป้อนแก๊สออกซิเจนที่ได้จากอากาศ เข้าไปที่ขั้วแคโทด ดังภาพที่ 1 อะตอมของแก๊สไฮโดรเจน (H_2) จะเข้าสู่เซลล์เชื้อเพลิง จะถูกออกซิไดซ์แตกตัวเป็นโปรตอน (H^+) และถูกปฏิกิริยาทางเคมีดึงอิเล็กตรอน (e^-) ออกมา ทำให้ไฮโดรเจนอะตอมอยู่ในสภาวะไอออนไนซ์ (Ionized) ซึ่งโปรตอนจะเคลื่อนที่ผ่านสารพาประจุไปยังขั้วแคโทด ในขณะที่อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ผ่านวงจรภายนอกเซลล์ไปยังขั้วแคโทด เพื่อรีดิวซ์แก๊สออกซิเจนให้เป็นออกไซด์ไอออน (O^{2-}) พร้อมให้พลังงานไฟฟ้าออกมา โปรตอนเคลื่อนที่มาจากขั้วแอโนดผ่านอิเล็กโทรไลต์จะเกิดการรวมตัวกับออกไซด์ไอออนที่เกิดขึ้นที่ขั้วแคโทดเกิดผลผลิตเป็นน้ำบริสุทธิ์และให้ความร้อนออกมาด้วย โดยทั่วไปเซลล์เชื้อเพลิงหนึ่งเซลล์จะสามารถสร้างแรงดันไฟฟ้าได้เพียงเล็กน้อยประมาณ 1 โวลต์ หรือ 1.16 โวลต์ การนำไปใช้งานจริงจึงต้องมีการต่ออนุกรมหลายๆ เซลล์ เช่น ถ้านำเอาเซลล์เชื้อเพลิงมาอนุกรมกัน (Fuel Cell Stack) 12 เซลล์

ก็จะได้แรงดันไฟฟ้าโดยประมาณ 12 โวลต์ หรืออาจเพิ่มจำนวนของเซลล์เพื่อให้ได้ระดับแรงดันไฟฟ้าตามที่ต้องการ (กิตติธัญญิ ว่องวานนท์, 2556) ซึ่งกระบวนการทางไฟฟ้าเคมีนี้ จะเกิดวงเวียนเช่นนี้เรื่อยไปตราบเท่าที่ยังคงมีการป้อนเชื้อเพลิงและตัวออกซิไดซ์เข้าสู่เซลล์เชื้อเพลิงและจะให้พลังงานไฟฟ้าออกมาอย่างต่อเนื่อง การทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงจึงมีลักษณะคล้ายกับการทำงานของแบตเตอรี่ ต่างกันเพียงแต่เซลล์เชื้อเพลิงไม่สามารถเก็บสะสมพลังงานไว้ได้เหมือนกับแบตเตอรี่



ภาพที่ 1 องค์ประกอบและการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง

2. ชนิดของเซลล์เชื้อเพลิง

เซลล์เชื้อเพลิงสามารถจำแนกได้หลายรูปแบบตามองค์ประกอบพื้นฐานของเซลล์เชื้อเพลิง เช่น อุณหภูมิ ชนิดของเชื้อเพลิง หรือสารพาประจุ แต่ที่นิยมกันมากที่สุด คือ จำแนกด้วยชนิดของสารพาประจุ ซึ่งสามารถแบ่งออกเป็น 6 ชนิด คือ เซลล์เชื้อเพลิงแบบอัลคาไลน์หรือแบบด่าง (Alkaline Fuel Cell: AFC) เซลล์เชื้อเพลิงแบบเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน (Proton Exchange Membrane Fuel Cell: PEMFC) เซลล์เชื้อเพลิงแบบกรดฟอสฟอริก (Phosphoric Acid Fuel Cell: PAFC) เซลล์เชื้อเพลิงแบบเกลือคาร์บอเนตหลอมเหลว (Molten Carbonate Fuel Cell: MCFC) เซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์แข็ง (Solid Oxide Fuel Cell: SOFC) และเซลล์เชื้อเพลิงแบบใช้เมทานอลแอลกอฮอล์โดยตรง (Direct Methanol Fuel Cell: DMFC) โดยนอกเหนือจากการจำแนกชนิดของเซลล์เชื้อเพลิงตามรูปแบบของสารพาประจุทั้ง 6 ชนิด ที่ได้กล่าวมาแล้ว ยังมีรูปแบบของเซลล์เชื้อเพลิงอีกแบบหนึ่งที่ได้มีการพัฒนากระบวนการทำปฏิกิริยาย้อนกลับแบบปิด เรียกเซลล์เชื้อเพลิงแบบนี้ว่า เซลล์เชื้อเพลิงแบบป้อนกลับ (Regenerative Fuel Cell: RFC) เป็นต้น (Wolk, 1999; Rajashekar, 1993; Blomen & Mugerwa, 1993; Ural, Gençoğlu & Gümüş, 2007)

3. แบบจำลองคณิตศาสตร์ของเซลล์เชื้อเพลิง

เซลล์เชื้อเพลิงเป็นอุปกรณ์ที่สามารถแปลงพลังงานในเชื้อเพลิงไปเป็นพลังงานไฟฟ้าได้โดยตรง จากปฏิกิริยาทางไฟฟ้า-เคมี (Electrochemical) โดยอาศัยไฮโดรเจนเป็นเชื้อเพลิงและต้องการออกซิเจนเข้าไปทำปฏิกิริยาออกซิเดชัน ซึ่งอาจเป็นออกซิเจนล้นหรืออากาศอัดเข้าไป ข้อดีของเซลล์เชื้อเพลิง คือ มลพิษเกิดขึ้นน้อยมาก เนื่องจากเชื้อเพลิงภายในเซลล์ไม่ได้ถูกเผาไหม้ ไม่มีเสียงดังรบกวน และมีประสิทธิภาพในการทำงานที่สูง (Al-Badi, Yousef, Al-Aamri, Al-Abdusalam, Al-Shidi, & Al-Harthy, 2014)

3.1 ความสัมพันธ์ปฏิกิริยาไฟฟ้า-เคมี (Electrochemical Equations) สมการทั่วไปที่อธิบายถึงปฏิกิริยาทางเคมีที่เกิดขึ้นภายในของเซลล์เชื้อเพลิง (Wang, Nehrir & Shaw, 2005) สามารถเขียนได้ ดังสมการที่ 1

$$\frac{V}{RT} \frac{d}{dt} P_i = M_i^{\text{in}} - M_i^{\text{out}} - M_i^r \quad (1)$$



โดยที่ V คือ ปริมาณอิเล็กโตรดของเซลล์เชื้อเพลิง

T คือ อุณหภูมิของเซลล์เชื้อเพลิงที่นำมาต่ออนุกรม (Fuel Cell Stack) มีหน่วยเป็นเคลวิน (K)

R คือ ค่าคงที่ของแก๊ส (8.3143 J/mole เคลวิน)

P_i คือ ความดันบางส่วนของสารตั้งต้นแต่ละชนิด(เมื่อ i คือ ไฮโดรเจน (H_2) ออกซิเจน (O_2) และ น้ำ (H_2O))

M_i^{in} คือ อัตราการไหลทางด้านเข้าของสารตั้งต้น (ith)

M_i^{out} คือ อัตราการไหลทางด้านออกของสารตั้งต้น (ith)

M_i^r คือ ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจากอัตราการไหลของสารตั้งต้น (ith)

ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลและกระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นของเซลล์เชื้อเพลิง (I_{fc}) สามารถอธิบายได้ ดังนี้

$$M_i^r = 2K_r I_{fc} \quad (2)$$

เมื่อ K_r คือ ค่าคงที่มีค่าเท่ากับ $1/4F$

ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลทางด้านออกของสารตั้งต้นและความดันบางส่วนของสารตั้งต้นแต่ละชนิด

$$M_i^{out} = K_i P_i \quad (3)$$

แทนค่าสมการที่ 2 และ 3 ลงในสมการที่ 1 จะได้

$$\frac{V}{RT} \frac{d}{dt} P_i = M_i^{in} - K_i P_i - 2K_r I_{fc} \quad (4)$$

$$\frac{V}{RT} \frac{d}{dt} P_i + K_i P_i = M_i^{in} - 2K_r I_{fc} \quad (5)$$

ทำการแปลงลาปลาซของสมการที่ 5 จะได้

$$\left(\frac{V}{K_i RT} S + 1 \right) P_i(S) = \frac{1}{K_i} (M_i^{in} - 2K_r I_{fc}) \quad (6)$$

$$P_i(S) = \frac{1/K_i}{1 + \tau_i S} (M_i^{in} - 2K_r I_{fc}) \quad (7)$$

เมื่อ τ_i คือ ช่วงเวลาคงที่มีค่าเท่ากับ $\frac{V}{K_i RT}$

ค่าความดันของไฮโดรเจน ออกซิเจน และน้ำ พิจารณาจากสมการที่ 8 - 10 ตามลำดับ

ค่าความดันไฮโดรเจน (H_2):

$$P_{H_2}(S) = \frac{1/K_{H_2}}{1 + \tau_{H_2} S} (M_{H_2}^{in} - 2K_r I_{fc}) \quad (8)$$

ค่าความดันออกซิเจน (O_2):

$$P_{O_2}(S) = \frac{1/K_{O_2}}{1 + \tau_{O_2} S} (M_{O_2}^{in} - K_r I_{fc}) \quad (9)$$

ค่าความดันน้ำ (H_2O):

$$P_{H_2O}(S) = \frac{1/K_{H_2O}}{1 + \tau_{H_2O}S} (M_{H_2O}^{in} - 2K_r I_{fc}) \quad (10)$$

3.2 ความสัมพันธ์แรงดันไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิง (Fuel Cell Voltage) สมการทั่วไปที่อธิบายถึงความสัมพันธ์ของแรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง สามารถเขียนได้ดังสมการที่ 11 และ 12

$$V_{out} = N_{cell} V_{cell} \quad (11)$$

$$V_{cell} = E - (V_{ohm} + V_{act} + V_{con}) \quad (12)$$

โดยที่	V_{out}	คือ แรงดันไฟฟ้าด้านนอกของเซลล์เชื้อเพลิงที่นำมาต่ออนุกรม
	V_{cell}	คือ แรงดันไฟฟ้าด้านนอกของเซลล์เชื้อเพลิงแต่ละเซลล์ที่นำมาต่ออนุกรม
	N_{cell}	คือ จำนวนของเซลล์เชื้อเพลิงที่นำมาต่ออนุกรม
	E	คือ ปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีย้อนกลับของเซลล์เชื้อเพลิง
	V_{ohm}	คือ แรงดันไฟฟ้าตกคร่อมค่าความต้านทาน
	V_{act}	คือ ค่าความสูญเสียในขณะทำงานที่เกิดขึ้นของเซลล์เชื้อเพลิง
	V_{con}	คือ ค่าความสูญเสียความเข้มข้นการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง

ซึ่งสามารถอธิบายความสัมพันธ์ตามลำดับ ดังสมการที่ 13-17

$$E = E_0 + \frac{RT}{2F} \ln \left(\frac{P_{H_2} \sqrt{P_{O_2}}}{P_{H_2O}} \right) \quad (13)$$

$$V_{ohm} = R_{ohm} I_{fc} \quad (14)$$

$$V_{act} = \frac{RT}{2F} \ln \left(\frac{I_{fc}}{I_d} \right) \quad (15)$$

$$V_{act} = a_0 + T [a + b \ln I_{fc}] \quad (16)$$

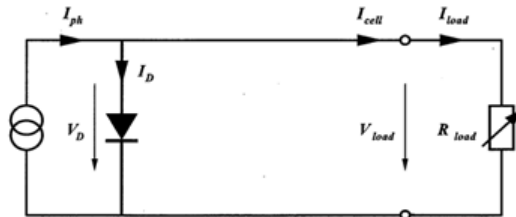
$$V_{con} = \frac{RT}{eF} \ln \left[1 - \frac{I_{fc}}{I_{limit}} \right] \quad (17)$$

4. ทฤษฎีเซลล์แสงอาทิตย์

เซลล์แสงอาทิตย์เป็นอุปกรณ์ทางไฟฟ้าทำจากสารกึ่งตัวนำ ทำหน้าที่เปลี่ยนแปลงพลังงานแสงอาทิตย์ให้เป็นพลังงานไฟฟ้าโดยตรง ซึ่งอาศัยกระบวนการโฟโตโวลตาอิก (Photovoltaic Effect) ซึ่งเกิดจากความต่างศักย์ไฟฟ้าภายในสารกึ่งตัวนำที่มีค่าแตกต่างกันเมื่อได้รับแสงที่มีพลังงานมากพอ จะทำให้เซลล์แสงอาทิตย์สร้างประจุพาหะอิสระให้ผ่านภาระทางไฟฟ้าที่อยู่ โดยจำนวนของประจุพาหะนั้นจะเป็นสัดส่วนกับความเข้มของแสงที่ตกกระทบซึ่งทำให้เกิดกระแสไหลตื้น (Photo Current; I_{ph}) ภายในเซลล์แสงอาทิตย์ (สุพิพัฒน์ พานิชานาคม, 2557) ดังนั้น เซลล์แสงอาทิตย์ในอุดมคตินั้นจึงสามารถเขียนแทนด้วยวงจรสมมูล ดังภาพที่ 2 รอยต่อพี-เอ็น (P-N Junction) นั้นสามารถเขียนแทนด้วยไดโอด และแหล่งจ่ายกระแสซึ่งขึ้นอยู่กับขนาดความเข้มของแสงที่ตกกระทบ ส่วนค่าความต้านทานปรับค่าได้ คือ ไซ้แทนภาระทางไฟฟ้าที่ต่อในวงจร (ชาญณรงค์ น้อยบางยาง และถาวร สุวรรณกิจ, 2556) สามารถเขียนอธิบายได้ ดังสมการที่ 18

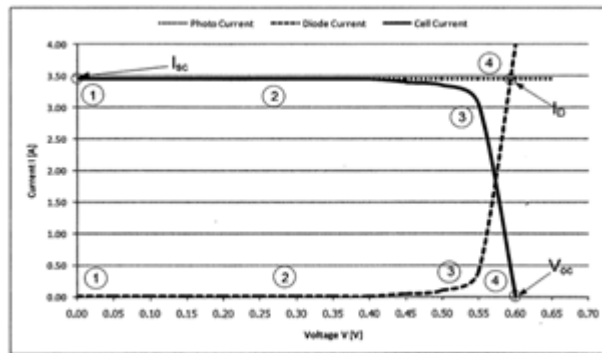


$$I_{cell} = I_{ph} + I_D = I_{ph} + I_0 \left(e^{\frac{qV}{kT}} - 1 \right) \quad (18)$$



ภาพที่ 2 วงจรสมมูลของเซลล์แสงอาทิตย์ในอุดมคติที่ต่ออยู่กับภาระทางไฟฟ้า

ในการทดลองการทำงานจากภาพวงจรที่ 2 พบว่า ลักษณะของเส้นโค้งของกระแสและแรงดัน (I-V) เมื่อมีปริมาณแสงตกกระทบคงที่ จะส่งผลให้เกิดความสัมพันธ์ ดังภาพที่ 3



ภาพที่ 3 การเกิดขึ้นของเส้นโค้งของเซลล์แสงอาทิตย์ที่เกิดจากเส้นโค้งไดโอด

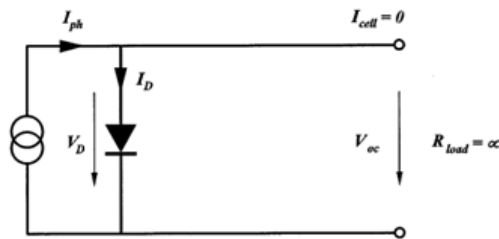
ในการทดลองการทำงานสมมุติให้เมื่อปลายของขั้วต่อโวลต์เกิดการลัดวงจร (Short Circuit) ขึ้น ค่าความต้านทานของภาระทางไฟฟ้ามีค่าเป็นศูนย์ ($R_{load} = 0$) แรงดันด้านนอกและแรงดันด้านที่ตกคร่อมไดโอดมีค่าเท่ากับศูนย์ จากสมการที่ 18 ค่าแรงดันมีค่าเท่ากับศูนย์ ($V = 0$) โดยทำการพิจารณาจากจุดที่ 1 จากภาพที่ 3 ดังนั้น กระแสทั้งหมดที่เกิดขึ้นจากการส่องแสงจะไหลไปยังเอาต์พุต จากนั้น กระแสสูงสุดที่เกิดขึ้นที่ตำแหน่งนี้จะเรียกว่า ค่ากระแสลัดวงจร (Short Circuit Current; I_{SC}) ซึ่งสามารถพิจารณาได้จากสมการที่ 19

$$I_{SC} = I_{cell} = I_{ph} \quad (19)$$

หากค่าความต้านทานของภาระทางไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้นอย่างต่อเนื่อง แรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์จะเพิ่มสูงขึ้น ค่าของกระแสจะมีค่าเท่าเดิม ดังนั้น ค่ากระแสด้านนอกจะสัมพันธ์กับกระแสโฟโต (Photo Current) เมื่อแรงดันของไดโอดเริ่มเพิ่มมากขึ้นหลังจากค่าความต้านทานของภาระทางไฟฟ้าเพิ่มขึ้นแล้ว สัดส่วนที่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วของกระแสโฟโต ทำให้ไดโอดนำกระแสและกระแสไหลผ่านไดโอด กระแสส่วนนี้จะส่งผลทำให้เกิดการสูญเสียกำลังภายในไดโอดเอง ซึ่งจะมีความสัมพันธ์กับพื้นที่ เส้นโค้งของกระแสโฟโตและกระแสเซลล์ เนื่องจากผลรวมของกระแสภาระทางไฟฟ้าและกระแสไดโอดต้องมีค่าเท่ากับค่าคงที่ของกระแสโฟโต ดังนั้น ค่ากระแสด้านนอกจะมีค่าลดลง โดยทำการพิจารณาจากจุดที่ 3 จากภาพที่ 3

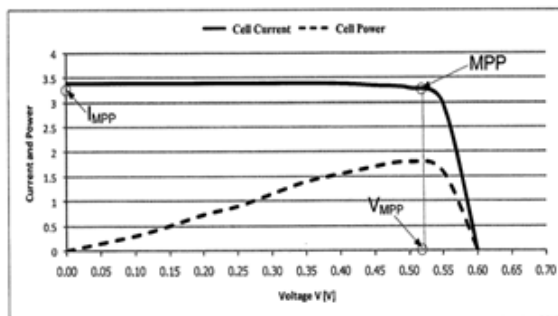
สำหรับภาระทางไฟฟ้าที่มีความต้านทานมากๆ วงจรสมมูลจะอยู่ในลักษณะเปิดวงจร (Open Circuit) ดังภาพที่ 4 กระแสไดโอดมีค่าเท่ากับศูนย์ ($I_{cell} = 0$) ดังนั้น ผลรวมของกระแสไฟที่ไหลผ่านไดโอดภายใน พิจารณาจากจุดที่ 4 จากภาพที่ 3 ขณะเดียวกันเมื่อวงจรสมมูลจะอยู่ในลักษณะเปิดวงจรแรงดันขณะเปิดวงจร (Open Circuit Voltage; V_{oc}) พิจารณาได้จากสมการที่ 20

$$V_{oc} = \frac{kT}{q} \cdot \ln \left(\frac{I_{ph}}{I_0} + 1 \right) \tag{20}$$



ภาพที่ 4 วงจรสมมูลของเซลล์แสงอาทิตย์ขณะเปิดวงจร (Open Circuit)

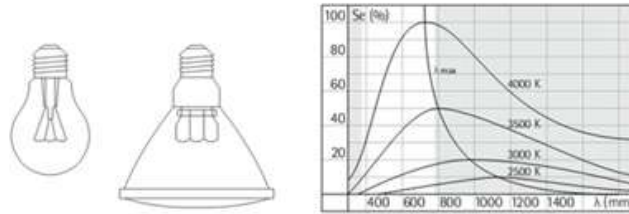
ซึ่งค่าแรงดันที่จากการคำนวณด้วยวงจรมูลในสภาวะเปิดวงจรของซิลิกอนเซลล์ จะมีค่าระหว่าง 0.5 ถึง 0.6 โวลต์ สำหรับอะมอร์ฟัสซิลิกอนเซลล์ จะมีค่าระหว่าง 0.6 ถึง 0.9 โวลต์ จากการทดลองสามารถทำให้เข้าใจความสัมพันธ์ของเส้นโค้งคุณลักษณะของเซลล์แสงอาทิตย์ได้ว่า เหมือนกับกราฟเส้นโค้งที่ตรงข้ามกับคุณลักษณะของไดโอดนั่นเอง เนื่องจากกำลังไฟฟ้าเกิดจากกระแสและแรงดัน ดังนั้น เส้นโค้งของการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ที่สามารถจ่ายได้ ขึ้นอยู่กับระดับของแสงที่ได้รับ และเป็นไปตามกราฟคุณสมบัติของกระแสและแรงดัน (I-V) ที่ตรงข้ามกับไดโอด ดังภาพที่ 5 ซึ่งจะมีจุดที่เกิดพลังงานสูงสุด (Maximum Power Point; MPP)



ภาพที่ 5 เส้นโค้งกำลังไฟฟ้าและจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์

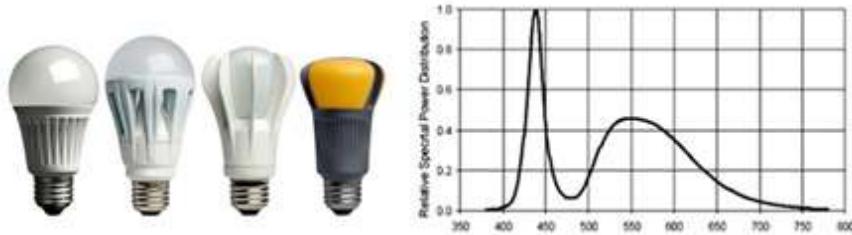
5. หลอดไฟฟ้า

5.1 หลอดอินแคนเดสเซนต์ (Incandescent Lamp) เป็นหลอดที่อาศัยการกำเนิดแสงจากความร้อน โดยการให้กระแสไฟไหลผ่านไส้หลอดที่ทำจากทั้งสแตนจันร้อนแล้วเปล่งแสงออกมาแต่ให้ประสิทธิภาพการส่องสว่างต่ำราว 5 - 12 ลูเมน/วัตต์ ขึ้นอยู่กับวัตต์ของหลอดอายุการใช้งานสั้นคือประมาณ 1,000 ชั่วโมง มีอุณหภูมิสีประมาณ 2,500- 2,700 องศาเคลวิน แต่ให้ดัชนีความถูกต้องของสีถึง 97 เปอร์เซนต์ดังภาพที่ 6



ภาพที่ 6 หลอดอินแคนเดสเซนต์และคุณลักษณะทางสี

5.2 หลอดแอลอีดี (LED Light Lamp) แอลอีดีเป็นไดโอดเปล่งแสง อุปกรณ์สารกึ่งตัวนำชนิดหนึ่ง จัดอยู่ในจำพวกไดโอดที่สามารถเปล่งแสงในช่วงสเปกตรัมแคบเมื่อถูกไบอัสทางไฟฟ้าในทิศทางไปข้างหน้า (Forward Bias) ปกติการเปล่งแสงจะอยู่ในรูปของอิเล็กโตรลูมิเนสเซนส์ สีของแสงที่เปล่งออกมานั้นขึ้นอยู่กับองค์ประกอบทางเคมีของวัสดุสารกึ่งตัวนำที่ใช้และเปล่งแสงได้ใกล้เคียงช่วงอัลตราไวโอเล็ตช่วงแสงที่มองเห็นและช่วงอินฟราเรด ดังภาพที่ 7



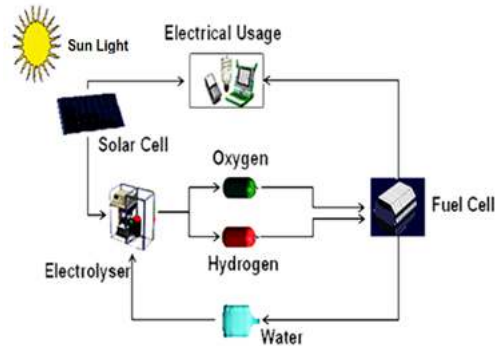
ภาพที่ 7 หลอดแอลอีดีและคุณลักษณะทางสี

ผลการวิจัยและอภิปรายผล

การทดลองการศึกษาแหล่งกำเนิดแสงรูปแบบต่างๆ ที่ใช้ร่วมกับระบบเซลล์เชื้อเพลิงแบบป้อนกลับขนาดเล็ก โดยทำการเปรียบเทียบแหล่งกำเนิดแสงอาทิตย์จากธรรมชาติ ระหว่างช่วงเวลา 13.30-17.00 น. กับแหล่งกำเนิดแสงเทียมที่ได้จากหลอดคอมแพคฟลูออเรสเซนต์ (Compact Fluorescent Lamp; CFLs) ขนาด 13วัตต์ และหลอดสะท้อนแสงกระจกหอนาชนิดแอลอีดี (Light Emitting Diode Parabolic Aluminized Reflector Lamp) ขนาด 12 วัตต์ ซึ่งทำการทดลองในห้องปิดที่บังแดดแสงมีขั้นตอน ดังนี้

6. การทดสอบแหล่งกำเนิดแสงอาทิตย์ร่วมกับเซลล์เชื้อเพลิงแบบป้อนกลับ

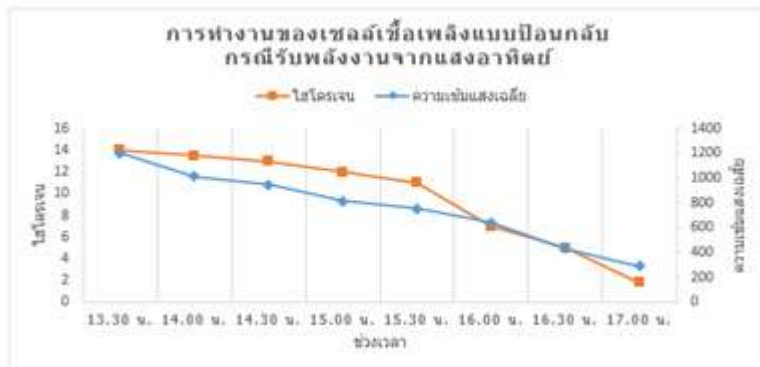
ในการศึกษาแหล่งกำเนิดแสงอาทิตย์จากธรรมชาติ ที่ใช้ร่วมกับระบบเซลล์เชื้อเพลิงแบบป้อนกลับขนาดเล็ก ดังภาพที่ 8 จะทำการทดสอบ ระหว่างช่วงเวลา 13.30 - 17.00 น. โดยในการทดสอบนั้น จะทำการทดสอบเพื่อวัดค่าความเข้มแสง ปริมาณไฮโดรเจน ปริมาณออกซิเจน แรงดันไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ รวมทั้งช่วงเวลาในการใช้งานสำหรับภาระทางไฟฟ้าชนิดมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง ในหลายๆ 20 นาที เพื่อพิจารณาค่าต่างๆ ตามที่กำหนดไว้



ภาพที่ 8 การทดสอบแหล่งกำเนิดแสงอาทิตย์ที่ใช้ร่วมกับระบบเซลล์เชื้อเพลิงแบบป้อนกลับขนาดเล็ก

ตารางที่ 1 พิจารณาการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงแบบป้อนกลับกรณีรับพลังงานจากแหล่งกำเนิดแสงอาทิตย์จากธรรมชาติในช่วงเวลา ระหว่าง 13.30 - 17.00 น.

ครั้งที่	ช่วงเวลา	ความเข้มแสงเฉลี่ย (w/m ²)	ไฮโดรเจน (ml)	ออกซิเจน (ml)	เวลา (min)	แรงดันของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (v)	ใช้งานโพลต์มอเตอร์ (min)
1	13.30	1203.7	14	7.5	20	2.90	5.6
2	14.00	1011.3	13.5	7.5	20	2.90	5.5
3	14.30	945.7	13	6.5	20	2.89	5.31
4	15.00	815.6	12	6.2	20	2.85	5.01
5	15.30	751.2	11	5.4	20	2.84	4.44
6	16.00	643.9	7	3.4	20	2.80	3.03
7	16.30	431.3	5	2.2	20	2.71	2.51
8	17.00	291.3	1.8	0.6	20	2.63	1.30



ภาพที่ 9 อธิบายการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงแบบป้อนกลับโดยเปรียบเทียบช่วงเวลากับค่าความเข้มแสงเฉลี่ยระหว่างการทดลองและการแยกน้ำเพื่อให้ได้ไฮโดรเจน

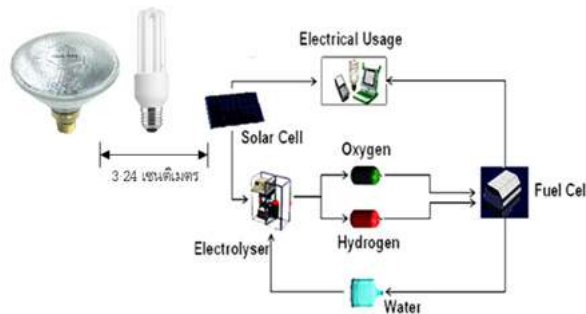


ภาพที่ 10 อธิบายการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงแบบป้อนกลับโดยเปรียบเทียบค่าความเข้มแสงเฉลี่ยระหว่างการทดลองกับการแยกน้ำเพื่อให้ได้ไฮโดรเจน และระยะเวลาในการนำไปใช้กับโพลีเมอร์เซลล์ไฟฟ้ากระแสตรง

จากตารางที่ 1 เป็นผลการทดสอบการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงแบบป้อนกลับ โดยกำหนดช่วงเวลาระหว่าง 13.30 - 17.00 น. ในการทดสอบนั้น จะทำการทดสอบเพื่อวัดค่าความเข้มแสง ปริมาณไฮโดรเจน ปริมาณออกซิเจน แรงดันไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ รวมทั้งช่วงเวลาในการใช้งานสำหรับภาระทางไฟฟ้าชนิดมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงในทุกๆ 20 นาที โดยในรอบการทดสอบแต่ละครั้งจะมีการเติมน้ำเข้าไปในระบบเซลล์เชื้อเพลิงแบบป้อนกลับ จำนวน 26 มิลลิลิตร เพื่อใช้ในการแยกน้ำดังกล่าวให้เป็นไฮโดรเจนและออกซิเจน ซึ่งเป็นผลจากการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง จากภาพที่ 9 และ 10 อธิบายการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงแบบป้อนกลับโดยเปรียบเทียบช่วงเวลา กับค่าความเข้มแสงเฉลี่ย ระหว่างการทดลอง และปริมาณการแยกน้ำเพื่อให้ได้ไฮโดรเจนและการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงแบบป้อนกลับโดยเปรียบเทียบค่าความเข้มแสงเฉลี่ยระหว่างการทดลองกับปริมาณการแยกน้ำเพื่อให้ได้ไฮโดรเจน และนำไปใช้กับโพลีเมอร์เซลล์ไฟฟ้ากระแสตรง

7. การทดสอบแหล่งกำเนิดแสงเทียมร่วมกับเซลล์เชื้อเพลิงแบบป้อนกลับ

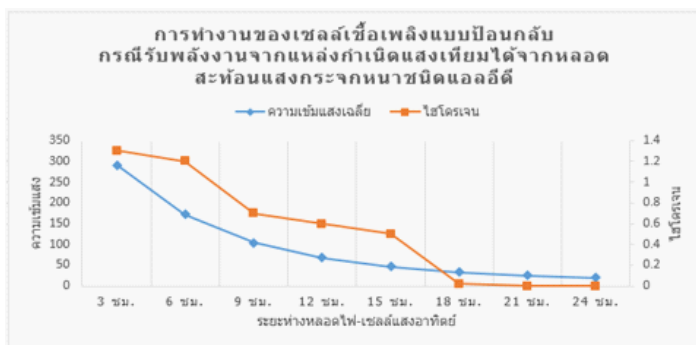
ในการศึกษาแหล่งกำเนิดแสงเทียมที่ได้จากหลอดไฟชนิดคอมแพคฟลูออเรสเซนต์ขนาด 13 วัตต์ และหลอดสะท้อนแสงกระจกนาฬิกาชนิดแอลอีดี ขนาด 12 วัตต์ ที่ใช้ร่วมกับระบบเซลล์เชื้อเพลิงแบบป้อนกลับขนาดเล็ก ดังภาพที่ 11 จะทำการทดสอบ โดยวัดระยะห่างจากโคมไฟที่ระยะ 3- 24 เซนติเมตร ในการทดสอบนั้น จะทำการทดสอบเพื่อวัดค่าความเข้มแสง ปริมาณไฮโดรเจน ปริมาณออกซิเจน แรงดันไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ รวมทั้งช่วงเวลาในการใช้งานสำหรับภาระทางไฟฟ้าชนิดมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง ในทุกๆ 20 นาที เพื่อพิจารณาค่าต่างๆ ตามที่กำหนดไว้



ภาพที่ 11 การทดสอบแหล่งกำเนิดแสงเทียมที่ใช้ร่วมกับระบบเซลล์เชื้อเพลิงแบบป้อนกลับขนาดเล็ก

ตารางที่ 2 การทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงแบบป้อนกลับกรณีรับพลังงานจากแหล่งกำเนิดแสงเทียมที่ได้จากหลอดสะท้อนแสง กระจุกหน้าชนิดแอลอีดี ขนาด 12 วัตต์

ครั้งที่	ระยะทางหลอดไฟ-แผงเซลล์แสงอาทิตย์	ความเข้มแสงเฉลี่ย (w/m^2)	ไฮโดรเจน (ml)	ออกซิเจน (ml)	เวลา (min)	แรงดันของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (v)	ใช้งานโหลดมอเตอร์ (min)
1	3	290.6	1.3	0.5	20	2.71	1.04
2	6	172.3	1.2	0.4	20	2.64	0.49
3	9	104.2	0.7	0.2	20	2.58	0.41
4	12	67.8	0.6	0.1	20	2.52	0.31
5	15	46.2	0.5	0.05	20	2.47	0.26
6	18	33.9	0.02	-	20	2.42	0.07
7	21	25.3	-	-	20	2.37	-
8	24	19.3	-	-	20	2.32	-



ภาพที่ 12 อธิบายการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงแบบป้อนกลับโดยเปรียบเทียบระยะทางของแหล่งกำเนิดแสงเทียมกับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยค่าความเข้มแสงเฉลี่ย ในระหว่างการทดลองกับการแยกน้ำเพื่อให้ได้ไฮโดรเจน

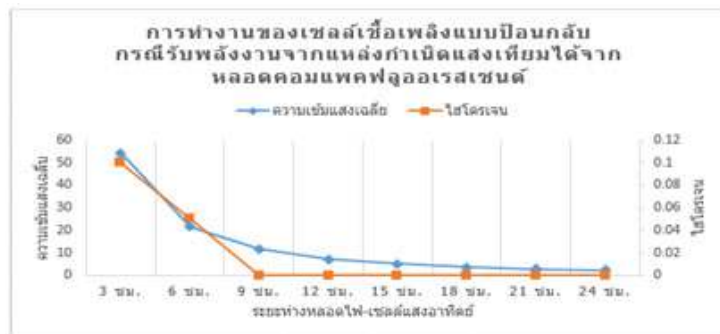


ภาพที่ 13 อธิบายการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงแบบป้อนกลับโดยเปรียบเทียบค่าความเข้มแสงเฉลี่ยระหว่างการทดลองกับการแยกน้ำเพื่อให้ได้ไฮโดรเจน และนำไปใช้กับโหลดมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง



ตารางที่ 3 การทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงแบบป้อนกลับกรณีรับพลังงานจากแหล่งกำเนิดแสงเทียมที่ได้จากหลอดคอมแพคฟลูออเรสเซนต์ ขนาด 13 วัตต์

ครั้งที่	ระยะทางหลอดไฟ-แผงเซลล์แสงอาทิตย์	ความเข้มแสงเฉลี่ย (w/m ²)	ไฮโดรเจน (ml)	ออกซิเจน (ml)	เวลา (min)	แรงดันของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (v)	ใช้งานหลอดมอเตอร์ (min)
1	3	54.3	0.1	-	20	2.5	0.16
2	6	21.6	0.05	-	20	2.4	0.13
3	9	11.6	-	-	20	2.3	0.05
4	12	7.0	-	-	20	2.2	0.01
5	15	5.0	-	-	20	2.1	-
6	18	3.6	-	-	20	2.0	-
7	21	2.8	-	-	20	1.9	-
8	24	2.3	-	-	20	1.8	-



ภาพที่ 14 อธิบายการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงแบบป้อนกลับโดยเปรียบเทียบระยะห่างของแหล่งกำเนิดแสงเทียบกับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ค่าความเข้มแสงเฉลี่ย ในระหว่างการทดลองกับการแยกน้ำเพื่อให้ได้ไฮโดรเจน



ภาพที่ 15 อธิบายการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงแบบป้อนกลับโดยเปรียบเทียบค่าความเข้มแสงเฉลี่ยระหว่างการทดลองกับการแยกน้ำเพื่อให้ได้ไฮโดรเจน และนำไปใช้กับหลอดมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง



จากตารางที่ 2 และ 3 เป็นผลการทดสอบการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงแบบป้อนกลับ โดยใช้แหล่งกำเนิดแสงเทียมที่ได้จากหลอดไฟชนิดคอมแพคฟลูออเรสเซนต์ ขนาด 13 วัตต์ และหลอดสะท้อนแสงกระจกหนาชนิดแอลอีดี ขนาด 12 วัตต์ในการทดสอบนั้น จะกำหนดระยะห่างระหว่างแหล่งกำเนิดแสงกับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ไว้ที่ 3 - 24 เซนติเมตร จะทำการทดสอบเพื่อวัดค่าความเข้มแสง ปริมาณไฮโดรเจน ปริมาณออกซิเจน แรงดันไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ รวมทั้งช่วงเวลาในการใช้งานสำหรับภาระทางไฟฟ้าชนิดมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงในทุกๆ 20 นาที โดยในรอบการทดสอบแต่ละครั้งจะมีการเติมน้ำเข้าไปในระบบเซลล์เชื้อเพลิงแบบป้อนกลับ จำนวน 26 มิลลิลิตร เพื่อใช้ในการแยกน้ำดังกล่าวให้เป็นไฮโดรเจนและออกซิเจนซึ่งเป็นผลจากการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงแบบป้อนกลับ จากภาพที่ 12 และ 13 อธิบายการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงแบบป้อนกลับโดยเปรียบเทียบระยะห่างของแหล่งกำเนิดแสงเทียบกับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยค่าความเข้มแสงเฉลี่ย ในระหว่างการทดลองกับการแยกน้ำเพื่อให้ได้ไฮโดรเจนและการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงแบบป้อนกลับโดยเปรียบเทียบค่าความเข้มแสงเฉลี่ยระหว่างการทดลองกับการแยกน้ำเพื่อให้ได้ไฮโดรเจน และนำไปใช้กับโพลีเมอร์เซลล์ไฟฟ้ากระแสตรง จากภาพที่ 14 และ 15 อธิบายการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงแบบป้อนกลับโดยเปรียบเทียบระยะห่างของแหล่งกำเนิดแสงเทียบกับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ค่าความเข้มแสงเฉลี่ย ในระหว่างการทดลองกับการแยกน้ำเพื่อให้ได้ไฮโดรเจนและการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงแบบป้อนกลับโดยเปรียบเทียบค่าความเข้มแสงเฉลี่ยระหว่างการทดลองกับการแยกน้ำเพื่อให้ได้ไฮโดรเจน และนำไปใช้กับโพลีเมอร์เซลล์ไฟฟ้ากระแสตรงตามลำดับ

สรุป

จากการศึกษาแหล่งกำเนิดแสงที่เข้าร่วมกับระบบเซลล์เชื้อเพลิงแบบป้อนกลับขนาดเล็ก โดยทำการเปรียบเทียบแหล่งกำเนิดแสงอาทิตย์จากธรรมชาติ ในช่วงเวลาระหว่าง 13.30 - 17.00 น. กับแหล่งกำเนิดแสงเทียมที่ได้จากหลอดไฟชนิดคอมแพคฟลูออเรสเซนต์ ขนาด 13 วัตต์ และหลอดสะท้อนแสงกระจกหนาชนิดแอลอีดีขนาด 12 วัตต์ ซึ่งทำการทดลองในห้องปิดที่ปิดบังแสง โดยให้พลังงานแสงสว่างไปยังเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกโพลีซิลิกอน ขนาด 11 วัตต์ 2.5 โวลต์ จำนวน 1 แผง ที่ทำหน้าที่จ่ายแรงดันให้กับระบบแยกน้ำด้วยไฟฟ้า (Electrolyzer) ซึ่งน้ำจะถูกแยกออกเป็นไฮโดรเจน และออกซิเจนแล้วไปเก็บยังกระบอกเก็บเพื่อป้อนกลับเข้าเซลล์เชื้อเพลิงที่ทำหน้าที่ผลิตพลังงานไฟฟ้า พบว่าแหล่งกำเนิดแสงอาทิตย์จากธรรมชาติให้ประสิทธิภาพในการแยกน้ำด้วยไฟฟ้าได้ดีกว่าแหล่งกำเนิดแสงเทียมจากหลอดไฟชนิดคอมแพคฟลูออเรสเซนต์ ขนาด 13 วัตต์ คิดเป็น 30 เปอร์เซ็นต์ แต่จะมีประสิทธิภาพการทำงานที่ใกล้เคียงกันกับหลอดสะท้อนแสงกระจกหนา ขนาด 12 วัตต์ คิดเป็น 70 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งขึ้นอยู่กับระดับความเข้มแสงที่แตกต่างกัน

ข้อเสนอแนะ

การศึกษาการแหล่งกำเนิดแสงที่เข้าร่วมกับระบบเซลล์เชื้อเพลิงแบบป้อนกลับขนาดเล็ก โดยทำการเปรียบเทียบแหล่งกำเนิดแสงอาทิตย์จากธรรมชาติ ในช่วงเวลาระหว่าง 13.30 - 17.00 น. กับแหล่งกำเนิดแสงเทียมที่ได้จากหลอดไฟชนิดคอมแพคฟลูออเรสเซนต์ ขนาด 13 วัตต์ และหลอดสะท้อนแสงกระจกหนาชนิดแอลอีดีขนาด 12 วัตต์หากมีการเพิ่มขนาดกำลังไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้นก็จะสามารถนำมาใช้ทดแทนแหล่งกำเนิดแสงจากธรรมชาติบางส่วนได้



รายการอ้างอิง

- กิตติชนภูมิ ว่องวานนท์. (2556). เซลล์เชื้อเพลิง (Fuel Cell) พลังงานสะอาดจาก H₂. **วารสารกรมอุทการเรือ**, 2556, 165-169.
- ชาญณรงค์ น้อยบางยาง และถาวร สุวรรณกิจ. (2556). การประยุกต์ใช้เซลล์แสงอาทิตย์เป็นแหล่งจ่ายพลังงานให้กับระบบแผงระวี่งและสัญญาณเตือนภัยจากไฟฟ้ารั่วเนื่องจากภาวะน้ำท่วมฉับพลันระบบไร้สาย จังหวัดพระนครศรีอยุธยา. รายงานการวิจัยสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ, 5-9. พระนครศรีอยุธยา: มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนครศรีอยุธยา.
- สุพิพัฒน์ พานิชชนาคม. (2557). ศึกษาแหล่งกำเนิดแสงสำหรับผลิตพลังงานไฟฟ้าโดยเซลล์แสงอาทิตย์. **การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้ามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 6**, 26-28 มีนาคม 2557.
- Al-Badi, A.H., Yousef, H., Al-Aamri, O., Al-Abdusalam, M., Al-Shidi, Y. & Al-Harthy, N. (2014). Performance of a stand-alone Renewable energy system based on hydrogen energy storage. **Communications, Control and Signal Processing (ISCCSP), 2014 6th International Symposium on IEEE conference publications**, 356-359.
- Bloemen, L. J. M. J. & Mugerwa, M. N. (1993). **Fuel Cell Systems**. New York: Plenum Press.
- Morita, K. (2003). Automotive power source in 21st century. **JSAE Review**, 24(1), 3-7.
- Patil, A.S., Dubois, T.G., Sifer, N., Bostic, E., Gardner, K., Quah, M. & Bolton, C. (2004). Portable fuel cell systems for America's army: technology transition to the field. **Journal of power sources**, 136(2), 220-225.
- Rajashekara, K. (1993). History of Electric Vehicles in General Motors. **Proceedings of the 28th annual meeting of the IEEE industry applications conference**, 447-454.
- Ural, Z., Gençoğlu, M.T. & Gümüş, B. (2007). Dynamic Simulation of A PEM Fuel Cell System. **2nd International Hydrogen Energy Congress and Exhibition IHEC 2007** Istanbul Turkey, 13-15 July 2007.
- Wang, C., Nehrir, M.H. & Shaw, S.R. (2005). Dynamic models and model validation for PEM fuel cells using electrical circuits. **IEEE power engineering society general meeting 2005**, 2115.
- Wolk, H. R. (1999). Fuel cells for home and hospitals. **IEEE Spectrum**, 36(5), 45-52.