การพัฒนาชุดกิจกรรมการเรียนรู้ภาคสนามเรื่องการประดิษฐ์เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงสู่การเชื่อมโยงการศึกษาพลังงานสีเขียว

วรนันธ์ เหล็กเพชร[1*] สุวิมล พิบูลย์[2] ธัญจิรา บุญพิชญาภา[1]
สุชาดา บุญนิยม[1] ชวัลวิทย์ คุ้มทรัพย์[1] และจิรรัช เพลิดพริ้ง[1]

[1]สาขาวิชาวิทยาศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี และ [2]สาขาวิชาเทคนิคศึกษา คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ ศูนย์นนทบุรี นนทบุรี 11000
[*]E-mail: woranan.l@rmutsb.ac.th

รับบทความ: 12 มิถุนายน 2564 แก้ไขบทความ: 9 ตุลาคม 2564 ยอมรับตีพิมพ์: 31 ตุลาคม 2564

บทคัดย่อ

การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อ 1) พัฒนาชุดกิจกรรมการเรียนรู้ภาคสนามการประดิษฐ์เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงอย่างง่าย 2) เปรียบเทียบผลสัมฤทธิ์ทางการเรียนของนักศึกษาและ 3) ประเมินความพึงพอใจของนักศึกษาต่อการจัดกิจกรรมการเรียนรู้ภาคสนาม กลุ่มที่ศึกษาเป็นนักศึกษาระดับประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นปีที่ 3 จำนวน 42 คน ที่เรียนวิชาพลังงานและสิ่งแวดล้อมของวิทยาลัยเทคนิคในจังหวัดนนทบุรี เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัยประกอบด้วย เอกสารประกอบการเรียนรู้เชิงปฏิบัติการที่ออกแบบและพัฒนาโดยใช้วัสดุที่หาได้ในท้องถิ่นและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม ชุดกิจกรรมการเรียนรู้ภาคสนาม แบบทดสอบวัดผลสัมฤทธิ์ทางการเรียนและแบบสอบถามความพึงพอใจของผู้เรียน การวิเคราะห์ข้อมูลใช้ค่าเฉลี่ยเลขคณิต ($\bar{X}$) ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD) ร้อยละ (%) ของคะแนนความก้าวหน้าและค่าดัชนีประสิทธิผล (EI) ผลการวิจัยพบว่า 1) ต้นแบบของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงได้รับการพัฒนาจนสามารถใช้เป็นชุดกิจกรรมการเรียนรู้ภาคสนามได้ การศึกษาภาคสนามพบว่านักศึกษามากกว่าร้อยละ 80 สามารถประดิษฐ์เซลล์ชนิดนี้ได้สำเร็จภายในเวลา 1.5 ชั่วโมง 2) นักศึกษามีผลสัมฤทธิ์ทางการเรียนรู้ภาคสนามหลังเรียนเท่ากับร้อยละ 77.85 ซึ่งสูงกว่าก่อนเรียนเท่ากับร้อยละ 48.55 ($p < 0.05$) โดยคะแนนเฉลี่ยหลังเรียนสูงกว่าเกณฑ์ที่กำหนดไว้ร้อยละ 60 มีค่าดัชนีประสิทธิผลเท่ากับ 0.57 แสดงว่าผู้เรียนมีความก้าวหน้าในการเรียนร้อยละ 57 3) นักศึกษามีความพึงพอใจต่อการจัดกิจกรรมการเรียนรู้ภาคสนามอยู่ในระดับดีมาก ($\bar{X}$=4.57, SD=0.11) สรุปได้ว่าการจัดกิจกรรมการเรียนรู้ภาคสนามด้วยการประดิษฐ์เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงสามารถพัฒนาผลสัมฤทธิ์ทางการเรียน สร้างความตระหนักถึงปัญหาของสิ่งแวดล้อมและการใช้พลังงาน รวมทั้งความพึงพอใจของผู้เรียนได้

คำสำคัญ: กิจกรรมการเรียนรู้ภาคสนาม เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง การศึกษาพลังงานสีเขียว

Development of Field Learning Activity Packages on Dye–Sensitized Solar Cells Fabrication to Connect Green Energy Education

Woranan Lekphet[1*], Suwimol Pibool[2], Thanjira Boonpichayapha[1], Suchada Boonniyom[1], Chawanwit Kumsapaya[1] and Jirarach Plirdpring[1]

[1]Program Study of Science, Faculty of Science and Technology, and [2]Program Study of Technical Education, Faculty of Industrial Education, Rajamangala University of Technology Suvarnabhumi, Nonthaburi Campus, Nonthaburi, 11000, Thailand

[*]E-mail: woranan.l@rmutsb.ac.th

Received: 12 June 2021 Revised: 9 October 2021 Accepted: 31 October 2021

Abstract

The purposes of this research were: 1) to develop a series of simple field learning activities for the fabrication of dye–sensitized solar cells (DSSCs), 2) to compare student's learning achievement, and 3) to assess the satisfaction of students who learned the field learning activities. The study group consisted of 42 third–year vocational certificate students who enrolled in a course of energy and environment at a technical college in Nonthaburi. The research tools were the manual on fabricating DSSCs which was designed and developed by using locally available and environmentally friendly materials, the field learning activities packages, the learning achievement tests, and the student satisfaction questionnaires. The data was analyzed by using mean ($\bar{X}$), standard deviation (SD), percentage of achievement score (%), and effectiveness index (EI). The results revealed as follows: 1) The DSSCs prototype was a development that could be used as a set of field learning activities. Field studies have shown that more than 80% of students successfully fabricated this type of cell in 1.5 hours. 2) The average learning achievement score of students after field learning activities (77.85%) was significantly higher than that before the field learning activity (48.55%) ($p < 0.05$), which was higher than the set criteria of 60%. The effectiveness index was 0.57, which indicated that the learners had progressed in their studies by 57%, and 3) The students' satisfaction toward the field learning activities was at the highest level ($\bar{X} = 4.57$, SD= 0.11). It implied that the development of field learning activities for the fabrication of DSSCs can improve students' academic achievement. It also raises awareness on environmental issues and energy consumption, including enhancing the satisfaction of the learners.

Keywords: Field learning activity, Dye–sensitized solar cells, Green energy education

บทนำ

ความท้าทายของระบบการศึกษาไทยในศตวรรษที่ 21 ไม่ใช่เพียงแค่การมอบโอกาสทางการศึกษาอย่างเสมอภาคทุกกลุ่มผู้เรียนเท่านั้น แต่จำเป็นต้องมีการส่งเสริมคุณค่าทางการศึกษาให้ผู้เรียนมีความสุข และมีประสิทธิภาพมากพอที่จะนำความรู้ไปใช้ได้จริงในชีวิตประจำวันด้วย (Thanalertsomboon, 2020) ผู้เรียนทุกกลุ่มในสังคมยุคปัจจุบันที่มีความเจริญก้าวหน้าทางด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี รวมทั้งการสื่อสารที่ไร้พรมแดนนั้นต้องการมากกว่าการเรียนรู้ทางวิชาการแบบดั้งเดิมในชั้นเรียน นอกจากนี้ผู้เรียนยังต้องมีการพัฒนา 3 ทักษะที่สำคัญในการใช้ชีวิตและการทำงานในอนาคตให้ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ได้แก่ 1) ทักษะการเรียนรู้และนวัตกรรม 2) ทักษะสารสนเทศ สื่อ เทคโนโลยี และ 3) ทักษะการใช้ชีวิตและอาชีพ ผู้วิจัยพบว่าทักษะด้านการเรียนรู้และนวัตกรรมยังสามารถแบ่งออกได้อีก 3 ด้านด้วยกันคือ ด้านความคิดสร้างสรรค์และการใส่ใจในนวัตกรรม ด้านการคิดเชิงวิพากษ์และการแก้ปัญหา และด้านการสื่อสารและความร่วมมือ (Tangwancharoen and Rungwachira, 2021) ซึ่งกระบวนการสร้างทักษะทั้งสามด้านนี้จำเป็นต้องปลูกฝังกันอย่างจริงจังเพื่อรับมือกับปัญหาที่มีความซับซ้อนมากยิ่งขึ้นตามบริบทของโลกที่กำลังเปลี่ยนแปลงไปอย่างรวดเร็วในปัจจุบัน เช่น การแสวงหาน้ำดื่มที่บริสุทธิ์ การคิดค้นยารักษาโรคภัยไข้เจ็บต่าง ๆ และการสำรวจแหล่งพลังงานทางเลือกที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม (Kolb *et al.*, 2005; World Economic Forum, 2016) ซึ่งการส่งเสริมให้ผู้เรียนได้ฝึกใช้ความคิดสร้างสรรค์ (creative thinking) และลงมือปฏิบัติด้วยกระบวนการแก้ปัญหา (problem solving) ทางวิทยาศาสตร์อาจนำไปสู่การค้นพบสิ่งใหม่ ๆ หรือนวัตกรรมใหม่เพื่อเรียนรู้และดูแลสิ่งแวดล้อม (environmental literacy) ได้

กิจกรรมการเรียนรู้ภาคสนาม (field learning activity) เป็นสิ่งที่จำเป็นอย่างยิ่งในทุกระดับการศึกษา และกำลังเป็นประเด็นที่ได้รับความสนใจมากขึ้นในหลาย ๆ สถาบันการศึกษาทั่วโลก โดยเฉพาะอย่างยิ่งการจัดกิจกรรมการศึกษาพลังงานสีเขียว (green energy education) ด้วยชุดการสอนจากเซลล์แสงอาทิตย์ (solar cell) หรือเซลล์โฟโทโวลทาอิก (photovoltaic cell) ซึ่งเป็นอุปกรณ์ไฟฟ้าที่ทำจากสารกึ่งตัวนำ เช่น ผลึกซิลิคอน (Si) และแกลเลียมอาร์เซไนด์ (GaAs) ที่สามารถแปลงพลังงานแสงอาทิตย์ให้เป็นกระแสไฟฟ้าได้โดยตรง ผู้สอนส่วนใหญ่ใช้สาธิตและเป็นต้นแบบสำหรับกิจกรรมการเรียนรู้ภาคสนาม เนื่องจากผู้เรียนสามารถจดจำและมองเห็นภาพได้ง่ายที่สุดในชีวิตประจำวัน และเพื่อสร้างความตระหนักเกี่ยวกับการใช้พลังงานอย่างยั่งยืน เช่น นวัตกรรมการประดิษฐ์เรือต้นแบบพลังงานแสงอาทิตย์เพื่อตรวจสอบคุณภาพน้ำและเก็บขยะบนผิวน้ำแบบอัตโนมัติ โดยใช้ระบบเฝ้าระวังและรายงานผลได้ในระยะไกลผ่านระบบออนไลน์ของนักเรียนในระดับมัธยมศึกษา (Meechai *et al.*, 2017) เครื่องสูบน้ำพลังงานแสงอาทิตย์ที่ถูกออกแบบเชิงวิศวกรรมจากกระบวนการเรียนรู้แบบสะเต็มศึกษาของนักศึกษาในระดับปริญญาตรีชั้นปีที่ 4 (Prasertsang *et al.*, 2018) แต่ในกระบวนการผลิตเซลล์ต้องใช้เทคโนโลยีและพลังงานสูงมาก แผงเซลล์จึงยังมีราคาสูงและส่วนใหญ่จะเป็นผลิตภัณฑ์สำเร็จรูปและเป็นเพียงให้ผู้เรียนได้ฝึกประกอบติดตั้งให้เข้ากับระบบขับเคลื่อนทั้งหลาย จึงยังไม่เหมาะสมที่จะนำใช้ใน

การเรียนการสอนเพื่อให้เกิดเป็นแนวคิดและเรียนรู้ถึงกลไกการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์ได้อย่างลึกซึ้ง เซลล์แสงอาทิตย์อีกประเภทหนึ่งที่มีประสิทธิภาพในการแปลงพลังงานสูงและกำลังเป็นที่สนใจของนักวิทยาศาสตร์คือ เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอรอฟสไกต์ (perovskite solar cells) ซึ่งมีองค์ประกอบที่สำคัญเป็นสารตะกั่วอินทรีย์หรือมีส่วนผสมของดีบุกเฮไลด์เป็นชั้นที่เก็บเกี่ยวพลังงานแสง (Cherrette *et al*., 2018; Patwardhan *et al*., 2015;) อย่างไรก็ตามเทคนิคและวิธีการประดิษฐ์เซลล์ชนิดนี้ยังซับซ้อนเกินไปและเป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม

เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง (dye–sensitized solar cells: DSSCs) เป็นเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดหนึ่งที่ได้รับความสนใจอย่างมากในปัจจุบัน เนื่องจากมีต้นทุนในการผลิตต่ำ สามารถประดิษฐ์ได้ด้วยตนเอง และมีประสิทธิภาพในการแปลงพลังงาน (power conversion efficiency: PCE) ได้ดีพอสมควร อีกทั้งยังมีความยืดหยุ่นและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมด้วย (O'Regan *et al*., 1991) จึงเหมาะที่จะนำมาพัฒนาและสร้างเป็นชุดกิจกรรมการเรียนรู้ภาคสนามในสถานศึกษา มีการศึกษาวิจัยในระดับนานาชาติจำนวนมาก พยายามพัฒนาและเชื่อมโยงถึงการศึกษาพลังงานสีเขียวที่ต้องอาศัยหลักการทางวิทยาศาสตร์ทั้งหลาย เช่น เคมี ฟิสิกส์ หรือชีววิทยา ให้เข้าถึงเทคโนโลยีและนวัตกรรมทางพลังงานในทุกระดับการศึกษาหรือแม้แต่ในภาคอุตสาหกรรม มีนักวิจัยหลายท่านรายงานการใช้งาน DSSCs ด้านการศึกษาพลังงานในสถานศึกษา เช่น การนำสารสกัดจากผลไม้ แบล็กเบอร์รี ราสป์เบอร์รี ทับทิม บีทรูท องุ่น ลูกคำแสด มาใช้เป็นสีย้อมไวแสงเพื่อจัดเป็นชุดกิจกรรมการในห้องปฏิบัติการวิทยาศาสตร์ของนักศึกษาชั้นปีที่ 1 ผลการศึกษาพบว่านักศึกษามีความเข้าใจแนวคิดพื้นฐานของเซลล์แสงอาทิตย์ดีขึ้น สามารถประกอบเซลล์ได้เสร็จภายในเวลา 1 ชั่วโมง และมีความสนใจในการเรียนวิทยาศาสตร์มากขึ้น (Aguilar *et al*., 2014; McKone *et al*., 2014) การใช้สารผลิตภัณฑ์ในครัวเรือนที่อ่อนโยนและไม่เป็นอันตราย เช่น ยาสีฟัน ครีมกันแดด พืชผัก พัฒนาเป็นชุดกิจกรรมการสอน DSSCs อย่างง่ายและมีราคาไม่แพง สำหรับนักเรียนระดับมัธยมศึกษาชั้นปีที่ 6 และนักศึกษาระดับปริญญาตรีชั้นปีที่ 3 การเตรียมและการทดสอบเซลล์แสงอาทิตย์นี้แสดงให้เห็นถึงการแปลงพลังงานแสงอาทิตย์ให้เป็นพลังงานไฟฟ้าได้ในเวลา 2–3 ชั่วโมง (Smith *et al*., 2013) การออกแบบและพัฒนาต้นแบบชุดการสอน DSSCs จากวัสดุและอุปกรณ์ที่มีอยู่ในบ้าน เช่น เตารีดไฟฟ้า ลวด ถุงพลาสติกร้อนใส่อาหาร จนสามารถใช้งานขับเคลื่อนมอเตอร์พัดลมขนาดเล็กได้ภายใต้แหล่งกำเนิดแสงชนิดต่าง ๆ จากการศึกษาภาคสนามพบว่านักเรียนทั้งระดับมัธยมศึกษาตอนต้นและตอนปลายสามารถผลิตชุดการสอนในชั้นเรียนได้สำเร็จภายในเวลา 2.5 ชั่วโมง และนักเรียนมากกว่าร้อยละ 80 ประสบความสำเร็จในการสร้าง DSSCs เพื่อเก็บเกี่ยวแสงและนำมาขับเคลื่อนมอเตอร์พัดลมขนาดเล็กของเขาได้ (Chien *et al*., 2018) แต่แนวทางในการประดิษฐ์ DSSCs ด้วยมือนั้น ปริมาณกระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นมักไม่เพียงพอในการใช้ประโยชน์ให้เป็นแหล่งจ่ายไฟที่มีประสิทธิภาพ จึงใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ (microcontroller) ขนาดเล็กเพื่อควบคุมการเปิดปิดสวิตซ์ของแหล่งจ่ายไฟ (power supply) โดยใช้ DSSCs ป้อนพลังงานให้แก่ไมโครคอนโทรลเลอร์นั้น จึงทำให้ประสิทธิภาพของ

เซลล์ดีขึ้นและเป็นการกระตุ้นความอยากรู้อยากเห็นของนักศึกษาได้เป็นอย่างดีเมื่อหลอดไฟสว่าง (Encio *et al*., 2018)

จากการปฏิรูปการศึกษาในหลายประเทศได้ให้ความสำคัญกับการพัฒนาทักษะกระบวนการทางวิทยาศาสตร์และเพิ่มทักษะความชำนาญในการปฏิบัติของผู้เรียนมากยิ่งขึ้น สภาเศรษฐกิจโลก (WEF) ระบุว่ากระบวนการเรียนรู้ในศตวรรษที่ 21 เป็นยุคแห่งการพัฒนาต่อยอดคิดค้น และการจัดหาผลิตภัณฑ์เพื่อให้คุณภาพชีวิตดีขึ้น การจัดกิจกรรมในกระบวนการเรียนรู้ควรยึดหลักการเรียนรู้จากสิ่งใกล้ตัวที่ผู้เรียนรู้จักและคุ้นเคย ได้แก่ แหล่งเรียนรู้ทั้งด้านกายภาพ ชีวภาพและวิถีชุมชนเป็นสถานการณ์กระตุ้นเพื่อให้เกิดคำถามอยากรู้ พร้อมคาดเดาคำตอบ โดยเน้นการจัดการเรียนรู้แบบโครงงานเป็นฐาน (project–based learning) เพื่อให้ผู้เรียนเกิดแรงบันดาลใจในการคิดค้นและออกแบบผลิตภัณฑ์ตามความถนัดและความสนใจของผู้เรียน (World Economic Forum, 2016) ดังนั้นคณะผู้วิจัยเห็นว่าการพัฒนากระบวนการประดิษฐ์เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงจากวัสดุและอุปกรณ์ที่หาง่ายในบ้านเรือนหรือในท้องถิ่นจนสามารถประยุกต์ใช้เป็นต้นแบบของชุดกิจกรรมการเรียนรู้ภาคสนามสู่การศึกษาพลังงานสีเขียวในสถานศึกษานั้นเป็นสิ่งจำเป็น โดยเฉพาะอย่างยิ่งในสถาบันอาชีวศึกษาซึ่งเน้นกลุ่มผู้เรียนในการฝึกทักษะเชิงปฏิบัติในการใช้เครื่องมือ เครื่องวัดและการสร้างแบบจำลองต่าง ๆ พบว่ามีสถาบันอาชีวศึกษาหลายแห่งของไทยมีการจัดการเรียนการสอนในรายวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม พลังงานและสิ่งแวดล้อม ดังนั้นการบูรณาการองค์ความรู้ทางด้านวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม ผ่านกิจกรรมการเรียนรู้ภาคสนามนี้จะสามารถพัฒนาทักษะที่จำเป็น และสร้างแรงบันดาลใจให้กับผู้เรียนจนนำไปสู่การสร้างสรรค์นวัตกรรมวัสดุและสิ่งประดิษฐ์ทางพลังงานทั้งในระดับชุมชนและสามารถต่อยอดไปสู่ภาคอุตสาหกรรมได้ในอนาคต

วิธีดำเนินการวิจัย

กลุ่มที่ศึกษา คือ นักศึกษาระดับประกาศนียบัตรวิชาชีพ ชั้นปีที่ 3 จำนวน 2 ห้องเรียนที่ลงทะเบียนเรียนรายวิชาพลังงานและสิ่งแวดล้อม (รหัสวิชา 2001–0008) ภาคเรียนที่ 2 ปีการศึกษา 2562 ของวิทยาลัยเทคนิคในจังหวัดนนทบุรี จำนวน 42 คน ได้มาโดยวิธีการเลือกแบบเจาะจง (purposive sampling)

เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย ประกอบด้วย 1) เอกสารประกอบการเรียนรู้เชิงปฏิบัติการภาคสนามเรื่อง การประดิษฐ์เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงสู่การเชื่อมโยงการศึกษาพลังงานสีเขียว ดำเนินการหาคุณภาพของเอกสารโดยใช้ผู้เชี่ยวชาญ 3 ท่าน ประเมินคุณภาพของเครื่องมือ 3 ด้าน ได้แก่ 1) ด้านรายละเอียดของเนื้อหา 2) ด้านกิจกรรมการเรียนรู้ภาคสนาม 3) ด้านการวัดและการประเมินผล โดยใช้การประเมินคุณภาพของเอกสาร 5 ระดับ ตามมาตรวัดของลิเคิร์ท (Likert rating scale) จากนั้นนำค่าเฉลี่ยมาเทียบกับเกณฑ์ของ Best *et al*. (2003) เพื่อแปลความหมายตามลำดับคะแนน พบว่าคุณภาพของเอกสารประกอบการเรียนฉบับนี้มีความเหมาะสมอยู่ในระดับมากและมากที่สุด โดยภาพรวมในทุกด้านของการประเมินมีความเหมาะสมอยู่ในระดับมากที่สุด จึงนำเอกสารประกอบการเรียนนี้ไปใช้ได้ 2) ชุดกิจกรรมการเรียนรู้ภาคสนามสำ-

หรับการประดิษฐ์เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงภายใต้เงื่อนไขที่แตกต่างกัน ประกอบด้วย ชุดเครื่องแก้ว สารเคมี อุปกรณ์การวัด และวัสดุที่หาได้ในท้องถิ่นหรือในครัวเรือน เช่น ครีมกันแดด ดินสอดำ เบตาดีน แผ่นฟิล์มพลาสติกใสที่ใช้แล้ว เส้นใยนาโนเซลลูโลสจากหน่อกะลา และผงดอกไม้แห้งชนิดต่าง ๆ ที่ผู้วิจัยได้พัฒนาและจัดเตรียมก่อนเริ่มดำเนินกิจกรรม 3) แบบทดสอบวัดผลสัมฤทธิ์ทางการเรียนเรื่อง การประดิษฐ์เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงสู่การเชื่อมโยงการศึกษาพลังงานสีเขียวก่อนและหลังดำเนินกิจกรรมภาคสนามจำนวน 20 ข้อ ๆ ละ 1 คะแนน เป็นข้อสอบแบบปรนัย ชนิดเลือกคำตอบ 4 ตัวเลือก หาคุณภาพของแบบทดสอบโดยใช้ผู้เชี่ยวชาญ 3 ท่าน ประเมินความสอดคล้องของแต่ละรายการประเมิน (index of item–objective congruence: IOC) พบว่าทุกข้อคำถามมีค่า IOC อยู่ระหว่าง 0.67–1.00 แสดงว่าข้อสอบทุกข้อมีความสอดคล้องกับประเด็นรายการประเมิน และเมื่อนำแบบทดสอบวัดผลสัมฤทธิ์ทางการเรียนที่ได้ปรับปรุงแล้วไปทดลองใช้ (try out) กับกลุ่มที่ศึกษาจำนวน 20 คน เพื่อวิเคราะห์หาคุณภาพของแบบทดสอบ พบว่ามีค่าความยากง่าย (p) 0.25–0.78 มีค่าอำนาจจำแนก (r) 0.25–0.69 แสดงให้เห็นว่าแบบทดสอบฉบับนี้มีค่าความยากง่ายอยู่ในช่วงที่เหมาะสม และมีค่าอำนาจจำแนกอยู่ในเกณฑ์พอใช้ถึงดีมาก (Hlumbensa, 2018) และมีค่าความเชื่อมั่นเท่ากับ 0.74 ตามวิธีของครอนบัค (Cronbach's alpha) จึงสามารถนำแบบทดสอบนี้ไปใช้วัดผลสัมฤทธิ์ทางการเรียนได้ 4) แบบสอบถามความพึงพอใจของผู้เรียน ประกอบด้วย 5 ด้าน ได้แก่ ด้านเนื้อหา ด้านสื่อการเรียนรู้ วัสดุอุปกรณ์และสารเคมี ด้านผู้สอน ด้านการจัดกิจกรรมภาคสนาม และด้านการวัดและการประเมินผล ที่ผ่านการประเมิน IOC จากผู้เชี่ยวชาญ 3 ท่าน พบว่ามีค่า IOC 0.67–1.00 จึงสามารถใช้เป็นแบบสอบถามความพึงพอใจกับนักศึกษาได้

การจัดกิจกรรมและการเก็บรวบรวมข้อมูล มีขั้นตอนดังนี้ 1) ผู้วิจัยแจ้งวัตถุประสงค์ของการจัดกิจกรรมให้กับนักศึกษากลุ่มตัวอย่าง ใช้เวลา 10 นาที 2) นักศึกษาทำแบบทดสอบก่อนการทำกิจกรรมภาคสนาม (pretest) โดยใช้แบบทดสอบวัดผลสัมฤทธิ์ทางการเรียนที่ผ่านการหาคุณภาพแล้ว ใช้เวลาทดสอบ 20 นาที 3) ผู้วิจัยนำเสนอเพื่อให้เห็นภาพรวมของกลไกการเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์ให้เป็นพลังงานไฟฟ้า องค์ประกอบที่สำคัญของ DSSCs ขั้นตอนการประดิษฐ์ DSSCs และการหาค่า PCE ของเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยโปรแกรมนำเสนอใช้เวลา 20 นาที 4) แบ่งนักศึกษากลุ่มละ 3–4 คน และมีทีมผู้ช่วยผู้วิจัย 2–3 คน เป็นพี่เลี้ยงช่วยให้คำแนะนำการใช้เครื่องมือและอุปกรณ์ต่าง ๆ และตลอดจนแก้ปัญหาหากเกิดอุบัติเหตุหรือข้อผิดพลาดระหว่างทำกิจกรรม ใช้เวลาทำกิจกรรม 1 ชั่วโมง 30 นาที 5) นักศึกษาทำแบบทดสอบหลังการทำกิจกรรมภาคสนาม (posttest) ใช้เวลาทดสอบ 20 นาที และ 6) นักศึกษาทำแบบสอบถามความพึงพอใจที่มีต่อการจัดกิจกรรมการเรียนรู้ภาคสนาม ใช้เวลา 10 นาที

สถิติที่ใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูล ได้แก่ ค่าเฉลี่ยเลขคณิต ($\bar{X}$) ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD) ร้อยละของคะแนนความก้าวหน้าและค่าดัชนีประสิทธิผล (effectiveness index: EI) ของการจัดกิจกรรมการเรียนรู้ภาคสนามผ่านนวัตกรรมการประดิษฐ์เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง

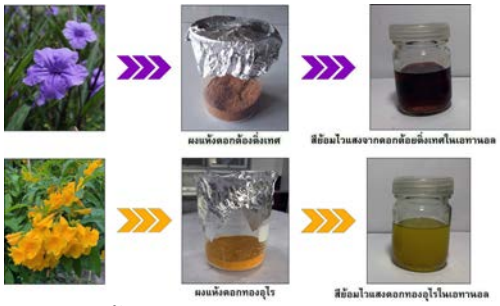
ขั้นตอนการพัฒนาการประดิษฐ์เซลล์แสง

อาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง การวิจัยนี้เป็นการวิจัยและพัฒนา (research and development) เพื่อประดิษฐ์เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง โดยเลือกใช้วัสดุที่หาได้ในชีวิตประจำวันและใช้วิธีการประดิษฐ์ที่ไม่ซับซ้อน เซลล์ต้นแบบที่ได้จะเป็นเซลล์เดี่ยว (individual cell) ที่มีประสิทธิภาพ จากนั้นจึงเลือกเงื่อนไขที่เหมาะสมที่สุดก่อนที่จะนำมาจัดเป็นชุดกิจกรรมการเรียนรู้ภาคสนามให้กับนักศึกษาต่อไป การประดิษฐ์ DSSCs มีรายละเอียดทั้งหมด 6 ขั้นตอนดังนี้

1) ขั้วไฟฟ้าแอโนด นำแผ่นกระจกที่นำไฟฟ้าได้ (fluorine–doped tin oxide: FTO, 5.0× 5.0 cm, 8 Ω/cm^2, Solaronix) จำนวน 2 แผ่น ทำความสะอาดด้วยสำลีพันปลายไม้ที่ชุบเอทานอลเล็กน้อย ผึ่งลมให้แห้ง จากนั้นเคลือบครีมกันแดดลงบนแผ่นกระจกด้านที่นำไฟฟ้าด้วยวิธีการเคลือบด้วยมือ (doctor blade method) จากนั้นนำไปวางบนเตาไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 200°C เป็นเวลา 2 นาที เพื่อทำให้ฟิล์มแห้ง ขนาดพื้นที่ใช้งาน (working area) ของฟิล์มเท่ากับ 12.25 cm^2 (ครีมกันแดดมีส่วนผสมหลักเป็นไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) และซิงค์ออกไซด์ (ZnO) เป็นสารกึ่งตัวนำออกไซด์สีขาว ผู้วิจัยเตรียมครีมกันแดดนี้ให้บริสุทธิ์ไว้ก่อนหน้านี้โดยการเผาในถ้วยครูซิเบิล ที่อุณหภูมิ 500°C เป็นเวลา 120 นาที)

2) ขั้วไฟฟ้าแคโทด นำแผ่นเทฟลอน (Teflon) ที่เจาะเป็นช่องสี่เหลี่ยมตรงกลาง ขนาด 3.5×3.5 cm วางลงบนแผ่น FTO อีกแผ่นหนึ่งให้พอดีกัน ใช้ดินสอดำ 2B (คาร์บอนแกรไฟต์) ระบายลงบนกระจกด้านที่นำไฟฟ้าภายในกรอบสี่เหลี่ยมจนเต็มทั้งช่องให้เรียบและสม่ำเสมอ

3) สีย้อมไวแสงจากธรรมชาติ ชั่งผงแห้งของดอกต้อยติ่งเทศ (*Ruellia squarrosa* Cufod) และชั่งผงแห้งของดอกทองอุไร (*Tecoma stans* Kunth) อย่างละ 1.0 กรัม ลงในถุงซิปล็อค เติมเอทานอลร้อยละ 99.9 ปริมาตร 15 cm^3 เพื่อสกัดสีย้อมไวแสงจากผงดอกไม้แต่ละชนิด ประมาณ 5 นาที กรองสารละลายสีย้อมไวแสงด้วยกระดาษกรองลงในจานเพาะเชื้อ (Petri dish) หรือชั่งผงแห้งของดอกต้อยติ่งเทศและดอกทองอุไรผสมกันอย่างละ 0.5 กรัม เพื่อสกัดสีย้อมไวแสงแบบผสมด้วยวิธีการสกัดเช่นเดิม (ภาพที่ 1)



ภาพที่ 1 ขั้นตอนการสกัดสีย้อมไวแสงจากดอกต้อยติ่งเทศและดอกทองอุไร

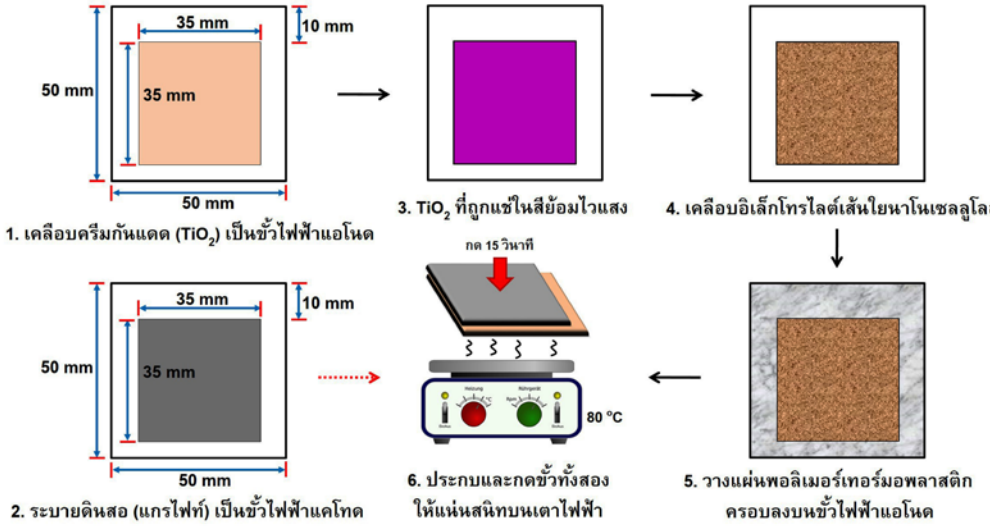
4) กระบวนการแช่สีย้อม นำแผ่นกระจก FTO ที่เคลือบด้วย TiO_2 ในข้อ 1) วางลงในจานเพาะเชื้อที่มีสารละลายสีย้อมไวแสงเข้มข้นอยู่แล้ว ใช้หลอดหยดดูดสีย้อมไวแสงที่อยู่ในจานเพาะเชื้อนั้นหยดลงบนชั้นฟิล์มจนท่วมแล้วปิดฝาจานเพาะเชื้อ แช่สีย้อม (soaking the dye) ที่อุณหภูมิห้อง นาน 10 นาที

5) สารอิเล็กโทรไลต์ ชั่งเส้นใยนาโนเซลลูโลสจากหน่อกะลา (*Alpinia nigra* Burrt) 0.5 กรัม ใส่ในบีกเกอร์ ขนาด 50 cm^3 หยดเบตาดีน 15 หยด ผสมให้เข้ากัน อุ่นของผสมนี้เล็กน้อยเป็นเวลา 2–3 นาที จนของผสมมีลักษณะคล้ายแป้งเปียก (ภาพที่ 2) จากนั้นนำมาเคลือบทับลงบนชั้นฟิล์ม TiO_2 ที่ย้อมสีไวแสงไว้แล้ว โดยให้ตำแหน่งฟิล์มทั้งสองทับกันสนิทพอดี จะได้ชั้นฟิล์ม

อิเล็กโทรไลต์นาโนเซลลูโลสที่เคลือบอยู่บนชั้นฟิล์มของ TiO_2 สำหรับอีกเงื่อนไขหนึ่งใช้หลอดหยดดูดสารละลายไอโอโดไลต์ (Iodolyte HI–30) เข้มข้น 30 mM ลงบนชั้นฟิล์ม TiO_2 ที่ย้อมสีไวแสงแล้วให้ทั่วแผ่นฟิล์ม 3–4 หยด จากนั้นดำเนินการต่อในขั้นตอนที่ 6

ภาพที่ 2 ลักษณะของผงเส้นใยนาโนเซลลูโลสจากหน่อกะลา (ซ้าย) และสารอิเล็กโทรไลต์นาโนเซลลูโลส (ขวา)

6) การผนึกเซลล์ นำแผ่นถุงร้อน (พอลิเมอร์เทอร์มอพลาสติก) ที่เจาะเป็นช่องสี่เหลี่ยมตรงกลางลักษณะเช่นเดียวกับแผ่นเทฟลอนวางครอบลงบนขั้วไฟฟ้าแอโนด (ช่องว่างของถุงร้อนต้องครอบชั้นฟิล์ม TiO_2 พอดี) จากนั้นนำขั้วไฟฟ้าทั้งสองมาประกบกัน โดยให้กรอบพื้นที่ของดินสอดำอยู่ตำแหน่งตรงกับกรอบพื้นที่ของฟิล์ม TiO_2 ลักษณะนี้ทำให้ขอบกระจก FTO ทั้งสองขั้วเหลื่อมกันเล็กน้อยเพื่อสะดวกในการวัดค่าทางไฟฟ้าของเซลล์ จากนั้นนำมาวางและกดเบา ๆ บนเตาไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 80°C เป็นเวลา 15 วินาที เพื่อให้แผ่นถุงร้อนหลอมเป็นกาว สรุปภาพรวมขั้นตอนการประดิษฐ์ DSSCs ดังในภาพที่ 3



ภาพที่ 3 ขั้นตอนโดยรวมของการประดิษฐ์เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง

การศึกษาประสิทธิภาพการแปลงพลังงานของ DSSCs

วัดค่าทางไฟฟ้าและนำมาคำนวณร้อยละประสิทธิภาพการแปลงพลังงาน (PCE%) DSSCs ที่ประดิษฐ์ได้ โดยมีตัวแปรหลักที่ใช้ในการคำนวณ 3 ค่า ได้แก่ 1) กระแสไฟฟ้าลัดวงจร (short–circuit current: I_{SC}) โดยทั่วไปรายงานเป็นความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าลัดวงจร (J_{SC}) โดยที่ $J_{SC} = I_{SC}$/พื้นที่ใช้งานของเซลล์ 2) แรงดันไฟฟ้าวงจรเปิด (open-circuit voltage: V_{OC}) และฟิลล์แฟก-

เตอร์ (fill factor: FF) ดังในสมการที่ (1) และ (2)

$$FF = \frac{I_M \times V_M}{I_{SC} \times V_{OC}} \times 100 \quad \text{- - - (1)}$$

$$PCE(\%) = \frac{J_{SC} \times V_{OC} \times FF}{P_{input}} \times 100 \quad \text{- - - (2)}$$

เมื่อ I_M และ V_M คือ ค่ากระแสและแรงดันไฟฟ้าที่ได้จากกราฟเส้นโค้ง I–V เมื่อปรับความต้านทานภายในเซลล์ให้เปลี่ยนแปลงไป สำหรับแหล่งกำเนิดแสง (P_{input}) กำหนดเงื่อนไขไว้ 3 ชนิด คือ 1) แสงจากหลอดไฟแฮโลเจน (50 W, Philips) 2) แสงจากหลอดฟลูออเรสเซนต์ขนาดเล็ก (36 W, Philips) ซึ่งมีกำลังความสว่าง (lumen) อยู่ที่ 1,000 และ 2,160 lm ตามลำดับ และกำหนดระยะห่างจากแหล่งกำเนิดแสงกับเซลล์ 20 cm และ 3) แสงจากดวงอาทิตย์ การวัดประสิทธิภาพการแปลงพลังงานของเซลล์แต่ละเงื่อนไขวัด 2 ครั้งเพื่อหาค่าเฉลี่ย ผลสำเร็จของการประดิษฐ์เซลล์แสงอาทิตย์เงื่อนไขที่ดีที่สุดนำมาทดสอบความทนทานภายใต้แหล่งกำเนิดแสงที่เหมาะสมเป็นเวลา 28 วัน

ผลการวิจัยและอภิปรายผล

ผลการวิจัยและการอภิปรายผลที่ได้จากการพัฒนาต้นแบบ DSSCs ก่อนนำมาใช้จัดเป็นชุดกิจกรรมการเรียนรู้ภาคสนาม นำเสนอทั้งหมด 4 ประเด็นดังต่อไปนี้

1) ผลของสีย้อมไวแสงที่มีต่อประสิทธิภาพการแปลงพลังงานของเซลล์

การพัฒนาต้นแบบของ DSSCs ผู้วิจัยจำเป็นต้องเปลี่ยนสีย้อมไวแสงจากสารสังเคราะห์เชิงซ้อนรูทิเนียม (N719) ที่ใช้กันในงานวิจัยทั่วไปซึ่งมีราคาแพงมากเป็นสีย้อมไวแสงจากธรรมชาติ ในงานวิจัยนี้ใช้สารสกัดจากผงแห้งของดอกต้อยติ่งเทศ ดอกทองอุไร และผงแห้งของดอกไม้ทั้งสองชนิดผสมกันในอัตราส่วน 1:1 โดยน้ำหนัก ผลการวิจัยพบว่าค่า V_{OC} ของเซลล์มีค่าเท่ากับ 0.498 0.454 และ 0.543 V ตามลำดับ และค่า I_{SC} มีค่าเท่ากับ 12.495 9.065 และ 31.56 mA ตามลำดับ ซึ่งมีค่าร้อยละ PCE อยู่ระหว่างร้อยละ 0.23–0.95 (ตาราง 1) ภายใต้แสงจากหลอดไฟแฮโลเจนและใช้สารอิเล็กโทรไลต์เป็นไอโอไดด์ (Iodolyte HI–30)

จากผลการศึกษาพบว่าการใช้เทคนิคสีย้อมไวแสงธรรมชาติผสม (co–natural dye sensitizer) สามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการแปลงพลังงานของเซลล์มากยิ่งขึ้นเนื่องจากโมเลกุลแอนโทไซยานิน (anthocyanin) จากดอกต้อยติ่งเทศและแคโรทีน (carotene) จากดอกทองอุไรที่ถูกดูดซับบน TiO_2 สามารถเพิ่มย่านสเปกตรัมการดูดกลืนแสงที่กว้างขึ้น (panchromatic absorption) ซึ่งเป็นพื้นฐานของการเลียนแบบธรรมชาตินั่นเอง (Cole *et al*., 2019)

2) ผลของอิเล็กโทรไลต์ที่มีต่อประสิทธิภาพการแปลงพลังงานของเซลล์

เมื่อใช้สารอิเล็กโทรไลต์ทางการค้า (Iodolyte HI–30) ภายใต้แสงจากหลอดแฮโลเจนและใช้สารสกัดสีย้อมไวแสงจากผงดอกต้อยติ่งเทศผสมกับผงดอกทองอุไรในอัตราส่วน 1:1 โดยน้ำหนัก พบว่ามีค่า PCE เท่ากับร้อยละ 0.95 ในขณะที่ใช้ฟิล์มอิเล็กโทรไลต์นาโนเซลลูโลสที่สกัดได้จากเยื่อของหน่อกะลาผสมกับเบตาดีนมีค่า PCE เท่ากับร้อยละ 1.86 ซึ่งมีค่าสูงกว่าการใช้อิเล็กโทรไลต์ที่เป็นสารละลายถึงร้อยละ 95 (ตาราง 2) ด้วยองค์ประกอบหลักของเบตาดีนที่มีสารโพวิโดน–ไอโอดีนซึ่งเป็นสารเติมแต่งเฮเทอโรไซคลิกของไนโตรเจน สามารถเกิดโครงสร้างเชิงซ้อนที่เหมาะสมกับ

ตาราง 1 ประสิทธิภาพการแปลงพลังงานของ DSSCs เฉลี่ยที่ประดิษฐ์ได้จากสีย้อมไวแสงที่แตกต่างกัน

สีย้อมไวแสง	V_{OC} (V)	I_{SC} (mA)	J_{SC} (mA/cm^2)	FF	PCE (%)
N719	0.670	100.08	8.170	0.680	3.72
ดอกต้อยติ่งเทศแห้ง	0.498	12.495	1.020	0.645	0.33
ดอกทองอุไรแห้ง	0.454	9.065	0.740	0.671	0.23
ดอกต้อยติ่งเทศแห้ง:ดอกทองอุไรแห้ง (1:1 wt)	0.543	31.560	2.576	0.680	0.95

ตาราง 2 ประสิทธิภาพการแปลงพลังงานของเซลล์ DSSCs เฉลี่ยที่เตรียมได้จากอิเล็กโทรไลต์ที่แตกต่างกัน

สารอิเล็กโทรไลต์	V_{OC} (V)	I_{SC} (mA)	J_{SC} (mA/cm^2)	FF	PCE(%)
Iodolyte HI-30	0.543	31.560	2.576	0.680	0.95
ฟิล์มอิเล็กโทรไลต์นาโนเซลลูโลส	0.670	49.920	4.075	0.683	1.86

ระบบอิเล็กโทรไลต์ I^-/I_3^- และเมื่อนำมาประยุกต์ใช้กับ DSSCs สามารถเพิ่มค่า V_{OC} ให้แก่เซลล์ได้ (Chalkias *et al*., 2018) ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิจัยนี้ (ΔV_{OC} = 0.127 V) ดังนั้นการใช้ฟิล์มอิเล็กโทรไลต์นาโนเซลลูโลสจึงเป็นวิธีการเพิ่มประสิทธิภาพให้แก่เซลล์ สะดวกในการประดิษฐ์ ลดต้นทุนการใช้สารเคมี และเป็นการนำเศษวัสดุเหลือใช้จากท้องถิ่นมาสร้างคุณค่าทางพลังงานได้ จึงเหมาะสำหรับใช้เป็นต้นแบบในการเรียนการสอนและสร้างแรงบันดาลใจให้กับผู้เรียนได้

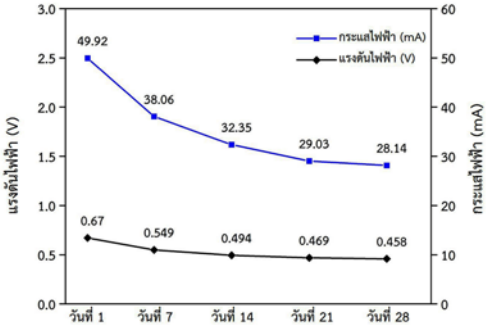
3) ผลของแหล่งกำเนิดแสงและความทนทานของ DSSCs

จากการศึกษาผลของแหล่งกำเนิดแสงชนิดต่าง ๆ ที่ป้อนให้แก่เซลล์เมื่อใช้สีย้อมไวแสงเป็นสารสกัดจากผงดอกต้อยติ่งเทศผสมกับผงดอกทองอุไรในอัตราส่วน 1:1 โดยน้ำหนัก และเลือกใช้ระบบอิเล็กโทรไลต์เป็นชนิดฟิล์มอิเล็กโทรไลต์นาโนเซลลูโลสเพื่อลดปัญหาการระเหยของสารละลายอิเล็กโทรไลต์อันเนื่องมาจากการปิดผนึกเซลล์ที่ไม่สมบูรณ์ ซึ่งจะส่งผลต่อกระบวนการย้อนกลับของปฏิกิริยารีดอกซ์กับสีย้อมไวแสง (Dong *et al*., 2013) จากการศึกษาพบว่าในวันแรกเซลล์มีค่า V_{OC} และ I_{SC} สูงสุด (0.670 V และ 49.920 mA ตามลำดับ) เมื่อใช้หลอดแฮโลเจนเป็นแหล่งกำเนิดแสง สำหรับแสงจากหลอดฟลูออเรสเซนต์และจากดวงอาทิตย์เซลล์มีค่า 0.602 V 32.03 mA และ 0.579 V 8.344 mA ตามลำดับ (ตาราง 3) ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Chien *et al*. (2018) ที่ศึกษาผลของแหล่งกำเนิดแสงจากหลอดไฟแฮโลเจนที่ให้ประสิทธิภาพสูงกว่าหลอดอื่น ๆ เช่น หลอดทังสเตน หลอดฟลูออเรสเซนต์

ตาราง 3 ผลของแหล่งกำเนิดแสงที่แตกต่างกันต่อค่าตัวแปรทางไฟฟ้าของเซลล์ (วันที่ 1)

แหล่งกำเนิดแสง	V_{OC} (V)	I_{SC} (mA)
หลอดแฮโลเจน (50 W)	0.670	49.920
หลอดฟลูออเรสเซนต์ (36 W)	0.602	32.03
แสงจากดวงอาทิตย์	0.579	8.344

ผลการทดสอบความทนทานของเซลล์เป็นเวลา 28 วัน ภายใต้แสงจากหลอดไฟแฮโลเจน พบว่าเมื่อเวลาผ่านไปประสิทธิภาพการแปลงพลังงานของ DSSCs มีค่าลดลงอย่างต่อเนื่อง (ภาพที่ 4) ซึ่งเป็นข้อจำกัดหนึ่งของสารอิเล็กโทรไลต์ทางชีวภาพชนิดกึ่งของแข็ง (quasi solid bio–electrolyte) ที่มีความหนืดสูงจึงไม่สามารถประสานหรือซึมผ่านเข้าไปในรูพรุนของขั้วไฟฟ้า (TiO_2) ที่ถูกเคลือบอยู่กับฟิล์มอิเล็กโทรไลต์นาโนเซลลูโลส ซึ่งต่างจากสารอิเล็กโทรไลต์เหลวที่มีค่าการนำไฟฟ้าสูงตราบเท่าที่อิเล็กโทรไลต์นั้นไม่ระเหย (Dong *et al*., 2013; Singh *et al*., 2016) อีกประการหนึ่งคือ DSSCs ที่ผลิตได้จากสีย้อมตามธรรมชาติส่วนใหญ่จะมีประสิทธิภาพอยู่เพียงร้อยละ 1–2 เท่านั้น เนื่องจากโมเลกุลของสีย้อมจะสลายตัวด้วยแสงและความร้อนได้ง่าย โมเลกุลจึงมีเสถียรภาพต่ำ (Richhariya *et al*., 2017) อย่างไรก็ตามต้นแบบ DSSCs ที่พัฒนานี้ยังพอรักษาเสถียรภาพทางพลังงานและมีความเหมาะสมในฐานะที่เป็นอุปกรณ์ช่วยสอน



ภาพที่ 4 การทดสอบความทนทานของ DSSCs จากแหล่งกำเนิดแสงหลอดแฮโลเจน (50 W) เป็นเวลา 28 วัน

5) ผลการศึกษาด้วยชุดกิจกรรมการเรียนรู้ DSSCs ภาคสนาม

ภาพที่ 5 แสดงการจัดกิจกรรมการเรียนรู้ภาคสนามและผลงานของนักศึกษาที่ประดิษฐ์ DSSCs ได้สำเร็จ พบว่า นักศึกษามากกว่าร้อยละ 80 สามารถประดิษฐ์เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงได้สำเร็จภายในเวลา 1.5 ชั่วโมง และมีนักศึกษาจำนวนหนึ่งที่ไม่สามารถประดิษฐ์เซลล์ชนิดนี้ให้สำเร็จทันเวลา เนื่องจากในขั้นตอนการเคลือบครีมกันแดดลงบนแผ่นกระจก FTO ที่ใช้แรงในการกดด้วยมือเบาเกินไปและไม่สม่ำเสมอ จึงทำให้ชั้นฟิล์มของ TiO_2 บางเกินไปจึงหลุดลอกได้ง่ายในขณะแช่สีย้อม ดังนั้นในขั้นตอนนี้จึงควรดำเนินการเคลือบซ้ำ 2 ครั้ง และใช้แรงกดเพิ่มขึ้นก่อนการนำไปทำให้แห้งต่อไป

การศึกษาผลสัมฤทธิ์ทางการเรียน (ตาราง 4) พบว่านักศึกษามีคะแนนเฉลี่ยหลังเรียนเท่ากับ 15.57 คะแนน (SD=1.47) คิดเป็นร้อยละ 77.85 ซึ่งสูงกว่าคะแนนเฉลี่ยก่อนเรียนที่เท่ากับ 9.71 คะแนน (SD=1.99) คิดเป็นร้อยละ 48.55 ซึ่งคะแนนเฉลี่ยหลังเรียนมีค่าสูงกว่าเกณฑ์ที่กำหนดไว้ คือ ไม่น้อยกว่าร้อยละ 60 และพบว่าผลสัมฤทธิ์ทางการเรียนโดยใช้ชุดกิจกรรมการเรียนรู้ DSSCs ภาคสนามหลังเรียนสูงกว่าก่อนเรียนที่ระดับ 0.05 (t = 26.04) เมื่อพิจารณาจากคะแนนความก้าวหน้าพบว่านักศึกษาได้คะแนนเพิ่มขึ้นทุกคนตั้งแต่ +3 ถึง +9 โดยทั่วไปเกณฑ์ที่ใช้แปลผลความก้าวหน้ากำหนดไว้ที่ร้อยละ 20–25 ขึ้นไป (Ritcharoon, 2006) ในงานวิจัยนี้ได้กำหนดเกณฑ์ไว้ที่ร้อยละ 25 ดังนั้นคะแนนความก้าวหน้าที่ผ่านเกณฑ์การประเมินจึงมีค่าเท่ากับ (25×20)/100 = 5.0 คะแนน พบว่ามีนักศึกษาที่ได้คะแนนความก้าวหน้าผ่านเกณฑ์มีจำนวน 34 คน คิดเป็นร้อยละ 80.95 และไม่ผ่านเกณฑ์มีจำนวน 8 คน คิดเป็นร้อยละ 19.05 โดยภาพรวมนัก-

ภาพที่ 5 (ก) ชุดกิจกรรมการเรียนภาคสนาม (ข–ง) ขณะดำเนินกิจกรรมการเรียนรู้ภาคสนาม (จ) DSSCs ที่นักศึกษาประดิษฐ์ได้สำเร็จ และ (ฉ) การวัดประสิทธิภาพการแปลงพลังงานของเซลล์

ตาราง 4 ผลการศึกษาผลสัมฤทธิ์ทางการเรียนด้วยชุดกิจกรรมการเรียนรู้ DSSCs ภาคสนาม

รายการ	ก่อนเรียน (20 คะแนน)		หลังเรียน (20 คะแนน)		คะแนนความก้าวหน้า	ร้อยละคะแนนความก้าวหน้า
	คะแนน	ร้อยละ	คะแนน	ร้อยละ		
คะแนนสูงสุด	14	70.00	19	95.00	9.0	45.00
คะแนนต่ำสุด	6	30.00	13	65.00	3.0	15.00
ค่าเฉลี่ย	9.71	48.55	15.57	77.85	5.86	29.30
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	1.99	9.96	1.47	7.34	1.46	7.29

ศึกษามีคะแนนความก้าวหน้าเฉลี่ยเท่ากับ 5.86 และร้อยละคะแนนความก้าวหน้าเฉลี่ยอยู่ที่ 29.30 ซึ่งสอดคล้องกับค่าดัชนีประสิทธิผล (EI) มีค่าเท่ากับ 0.57 แสดงว่านักศึกษามีความก้าวหน้าในการเรียนผ่านนวัตกรรมการศึกษานี้ร้อยละ 57 (Asanok, 2018) สรุปได้ว่าการจัดกิจกรรมการเรียนรู้ภาคสนามส่งผลให้นักศึกษามีพัฒนาการด้านผลสัมฤทธิ์ทางการเรียนดีขึ้นทุกคน จากการวิจัยนี้จะเป็นไปตามทฤษฎีสนามของเลวิน (Lewin's field theory) ที่กล่าวว่า การเรียนรู้เกิดจากการจัดกระบวนการรับรู้และกระบวนการคิดเพื่อแก้ไขปัญหา โดยนำหลักวิทยาศาสตร์มาใช้เพื่ออธิบายพฤติกรรมของผู้เรียน การให้ผู้เรียนร่วมมือกันทำกิจกรรมกลุ่มเพื่อให้มีการปรับตัวเข้าหากัน เกิดความสามัคคีจนสามารถเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมให้เป็นพลังเชิงบวก (life space) และเป็นแรงผลักดันเชิงกลุ่มที่จะช่วยกันทำงานจนสำเร็จได้ (Burnes and Cooke, 2013) นอกจากนี้ยังสอดคล้องกับรายงานของ Leary *et al*. (1996) และ Orion *et al*. (1994) ที่ศึกษาการจัดกิจกรรมการเรียนรู้รายวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อมผ่านกระบวนการเรียนรู้ภาคสนาม (field learning process) ซึ่งพบว่าผู้เรียนมีผลสัมฤทธิ์ทางการเรียนสูงขึ้น ผู้เรียนให้ความสนใจและมีความกระตือรือร้นในการเรียนมากขึ้น มีบรรยากาศแห่งการเรียนรู้ดีขึ้น และสามารถกระตุ้นให้เกิดกระบวนการเรียนรู้ควบคู่กับการพัฒนาทักษะกระบวนการทางวิทยาศาสตร์ทั้งในตนเองและในระดับกลุ่มได้

ในแง่ของการพัฒนาทักษะกระบวนการทางวิทยาศาสตร์ พบว่า การจัดการเรียนรู้ภาค

สนามนี้สามารถเสริมสร้างประสบการณ์และเพิ่มทักษะการเรียนรู้ทางวิทยาศาสตร์พื้นฐานหลายประการ เช่น ทักษะการตั้งสมมติฐานก่อนการประดิษฐ์เซลล์แสงอาทิตย์ว่ากลไกการเลียนแบบธรรมชาติจากพืชสามารถผลิตพลังงานได้ ทักษะการสังเกตการเปลี่ยนแปลงของสสารทั้งหลายในขณะดำเนินกิจกรรม ทักษะการชั่ง การตวง และการวัด ทักษะการลงความเห็นในใบรายงานผลและการอภิปรายหน้าชั้นเรียน รวมทั้งทักษะการคำนวณเพื่อหาประสิทธิภาพการแปลงพลังงานของเซลล์ เป็นต้น นอกจากนี้ผู้วิจัยได้ประยุกต์การจัดกิจกรรมการเรียนรู้ภาคสนามโดยเน้นให้มีการส่งเสริมทักษะที่จำเป็นในศตวรรษที่ 21 อีกด้วย โดยเฉพาะทักษะการเรียนรู้และสร้างนวัตกรรม เช่น เปิดโอกาสให้นักศึกษาเลือกแบบการประดิษฐ์เซลล์แสงอาทิตย์ตามจินตนาการและความคิดสร้างสรรค์เพื่อให้เกิดเป็นนวัตกรรมของตนเอง ฝึกให้นักศึกษาร่วมมือทำกิจกรรมเป็นกลุ่ม วิเคราะห์และแก้ไขปัญหาร่วมกัน โดยผู้วิจัยมีหน้าที่ควบคุมและให้ข้อเสนอแนะอย่างเป็นระบบ สอดคล้องกับแนวคิดของ Partnership for 21st Century Skill ที่ครอบคลุม 4C คือ การคิดเชิงวิพากษ์ (critical thinking) การสื่อสาร (communication) การทำงานร่วมกัน (collaboration) และการคิดสร้างสรรค์ (creativity) ดังนั้นอาจกล่าวได้ว่าการจัดกิจกรรมการเรียนรู้ภาคสนามมีความสำคัญอย่างมากในการพัฒนาทักษะกระบวนการทางวิทยาศาสตร์และยังส่งเสริมการพัฒนาทักษะที่จำเป็นในศตวรรษที่ 21 เพื่อยกระดับคุณภาพการศึกษาด้วย (ACTE, 2010)

ผลการประเมินความพึงพอใจของนักศึกษาที่มีต่อการจัดกิจกรรมด้วยชุด DSSCs (ตาราง 5) พบว่า โดยภาพรวมทุกประเด็นนักศึกษามีความพึงพอใจต่อการจัดกิจกรรมในระดับมากที่สุด ($\bar{X}$=4.57, SD=0.11) ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้ 1) ด้านเนื้อหา โดยภาพรวมนักศึกษามีความพึงพอใจอยู่ในระดับมาก ($\bar{X}$=4.47, SD=0.20) โดยมีความพึงพอใจในระดับมากต่อประเด็นย่อยที่ว่าเนื้อหามีความสอดคล้องและตรงกับความต้องการของผู้เรียน มีการแสดงเนื้อหาที่ชัดเจน เข้าใจง่ายและสามารถนำไปปฏิบัติได้จริง มีการอ้างอิงแหล่งที่มาของข้อมูลที่น่าเชื่อถือ และมีความพึงพอใจอยู่ในระดับมากที่สุดต่อประเด็นย่อยคือเนื้อหามีความน่าสนใจ ทันสมัย มีการบูรณาการความรู้ทางวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อมเข้าด้วยกัน 2) ด้านผู้สอน โดยภาพรวมนักศึกษามีความพึงพอใจอยู่ในระดับมากที่สุด ($\bar{X}$= 4.81, SD=0.16) โดยมีความพึงพอใจในระดับมากที่สุดในประเด็นย่อยคือ ผู้สอนมีความรู้และประสบการณ์ในเนื้อหาที่สอนเป็นอย่างดี นำเสนอเนื้อหาและกิจกรรมได้อย่างชัดเจน หลากหลายและเน้นผู้เรียนเป็นสำคัญ สร้างบรรยากาศการเรียนรู้และการทำกิจกรรมอย่างสร้างสรรค์ เป็นกันเอง ผู้สอนให้คำปรึกษา ช่วยเหลือ และรับฟังความคิดเห็นอย่างเหมาะสม ตลอดจนส่งเสริมให้ผู้เรียนมีกระบวนการคิด วิเคราะห์ แก้ปัญหาและทำงานกันเป็นทีม สอดคล้องกับงานวิจัยของ Saengkaew *et al*. (2011) ที่นำชุดกิจกรรมการเรียนรู้เรื่องพลังงานของกลุ่มสาระการเรียนรู้ทางวิทยาศาสตร์มาจัดเป็นปฏิบัติการกลุ่ม ซึ่งจำเป็นต้องกระตุ้นและเอาใจใส่ผู้เรียนอย่างใกล้ชิดเพื่อเสริมแรงทางบวกให้แก่ผู้เรียนให้มีคุณลักษณะที่พึงประสงค์และสามารถนำไปแก้ปัญหาในชีวิตประจำวันได้ 3) ด้านกิจกรรมการเรียนรู้ภาคสนาม โดยภาพรวมนักศึกษามีความพึงพอใจอยู่ในระดับมากที่สุด ($\bar{X}$=4.58, SD=0.31) โดยมีความพึงพอ-

ตาราง 5 ผลการประเมินความพึงพอใจของผู้เรียนที่มีต่อการจัดกิจกรรมการเรียนรู้ภาคสนาม

ประเด็นการประเมิน	ค่าเฉลี่ย ($\bar{X}$)	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD)	ระดับความพึงพอใจ
1) ด้านเนื้อหา	4.47	0.20	มาก
2) ด้านผู้สอน	4.81	0.16	มากที่สุด
3) ด้านการจัดกิจกรรมภาคสนาม	4.58	0.31	มากที่สุด
4) ด้านสื่อและอุปกรณ์การเรียนรู้	4.56	0.27	มากที่สุด
5) ด้านการวัดและการประเมินผล	4.46	0.27	มาก
โดยภาพรวม	4.57	0.11	มากที่สุด

ใจอยู่ในระดับมากที่สุดในประเด็นย่อยคือ เป็นกิจกรรมที่ทำได้สะดวก ไม่ยุ่งยาก รู้สึกสนุก ตื่นเต้น และภาคภูมิใจกับการประดิษฐ์เซลล์แสงอาทิตย์ที่ผลิตขึ้นได้เอง เป็นกิจกรรมที่สามารถสร้างเป็นนวัตกรรมวัสดุใช้เป็นแนวทางแก้ไขปัญหาสิ่งแวดล้อมได้ 4) ด้านสื่อและอุปกรณ์การเรียนรู้ โดยภาพรวมนักศึกษามีความพึงพอใจอยู่ในระดับมากที่สุด ($\bar{X}$=4.56, SD=0.27) โดยมีความพึงพอใจอยู่ในระดับมากที่สุดต่อประเด็นย่อยคือ สื่อนำเสนอและเอกสารเชิงปฏิบัติการมีความชัดเจน เข้าใจง่าย มีข้อมูลที่จำเป็นครบถ้วน สามารถใช้เป็นคู่มือศึกษาได้ด้วยตนเอง อุปกรณ์และสารเคมีสามารถใช้งานได้ดี หาได้ในครัวเรือนหรือในท้องถิ่น 5) ด้านการวัดและการประเมินผล โดยภาพรวมนักศึกษามีความพึงพอใจอยู่ในระดับมาก ($\bar{X}$=4.46, SD=0.27) โดยมีความพึงพอใจอยู่ในระดับมากต่อประเด็นย่อยคือ แบบทดสอบวัดผลสัมฤทธิ์ทางการเรียน ตารางผลการทดสอบประสิทธิภาพของเซลล์มีความชัดเจน เข้าใจง่าย และมีความพึงพอใจอยู่ในระดับมากที่สุดคือ ผู้เรียนมีความสนใจ ชอบเรียนรู้วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อมผ่านกิจกรรมการเรียนรู้ภาคสนามและเป็นกิจกรรมที่มีประโยชน์สามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้ในอนาคต จะเห็นได้ว่าการจัดกิจกรรมการเรียนรู้โดยใช้ชุดกิจกรรมทางวิทยาศาสตร์เป็นกระบวนการจัดการเรียนการสอนที่ส่งเสริมการเรียนรู้ การแสวงหาคำตอบและการสร้างเสริมประสบการณ์ด้วยการลงมือปฏิบัติด้วยตนเอง วิธีการสอนนี้ยังช่วยให้ผู้เรียนพัฒนาทักษะกระบวนการทางวิทยาศาสตร์ การแก้ไขปัญหาจากสถานการณ์ที่เกิดขึ้นในปัจจุบัน และเป็นการสร้างบรรยากาศแห่งการเรียนรู้ร่วมกัน (Aubrecht *et al*., 2015; Chotchadet, 2020)

สรุปผลการวิจัย

การศึกษาครั้งนี้ได้นำเสนอการออกแบบและพัฒนากระบวนการประดิษฐ์เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงที่เรียบง่ายโดยใช้วัสดุและอุปกรณ์ที่มีอยู่ในชีวิตประจำวันและไม่เป็นอันตราย จนสามารถนำมาใช้เป็นต้นแบบในการจัดกิจกรรมการเรียนรู้ภาคสนามสำหรับนักศึกษาในระดับประกาศนียบัตรวิชาชีพได้ องค์ประกอบหลักที่มีการพัฒนาได้คือการใช้ผงไทเทเนียมไดออกไซด์จากครีมกันแดดซึ่งใช้ทำเป็นขั้วไฟฟ้าแอโนด ไส้ดินสอดำใช้ทำเป็นขั้วไฟฟ้าแคโทด สารสกัดจากดอกต้อยติ่งเทศและดอกทองอุไรถูกใช้เป็นสีย้อมไวแสง และนำเยื่อของหน่อกะลาพัฒนามาเป็นฟิล์มอิเล็กโทรไลต์นาโนเซลลูโลส จากผลการวิจัยตามเงื่อนไขต่าง ๆ เช่น แหล่งกำเนิดแสง ส่วนผสมของสีย้อมไวแสง และสารอิเล็กโทรไลต์

นำมาบูรณาการเพื่อเสนอเป็นชุดกิจกรรมการเรียนรู้ภาคสนามจากแนวคิดทางวิทยาศาสตร์สู่การสร้างสรรค์เป็นนวัตกรรมพลังงานได้อย่างเหมาะสม การศึกษาภาคสนามพบว่านักศึกษามากกว่าร้อยละ 80 สามารถประดิษฐ์เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดนี้ได้สำเร็จภายในเวลา 1.5 ชั่วโมง แสดงให้เห็นว่าชุดกิจกรรมการเรียนรู้นี้มีประสิทธิภาพสามารถใช้เป็นชุดการสอนในสถานศึกษาได้ โดยมีผลสัมฤทธิ์ทางการเรียนรู้ภาคสนามหลังเรียนสูงกว่าก่อนเรียน ผลการสำรวจความพึงพอใจของนักศึกษาโดยรวมต่อการจัดกิจกรรมการเรียนรู้ภาคสนามอยู่ในระดับดีมาก นักศึกษาได้มีโอกาสสัมผัสกับประสบการณ์ของเทคโนโลยีเซลล์แสงอาทิตย์ผ่านการลงมือปฏิบัติซึ่งถือเป็นการสร้างทักษะที่จำเป็นในศตวรรษที่ 21 เป็นการสร้างแรงบันดาลใจและจุดประกายความ คิดในการพัฒนาและการศึกษาพลังงานสีเขียวเพื่อความยั่งยืนในกลุ่มผู้เรียนสายวิชาชีพได้

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณคณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ ที่ให้โอกาสในการทำวิจัยครั้งนี้ ขอขอบคุณ Prof. Dr.Chao Chin Su แห่งสถาบันวัสดุอินทรีย์และพอลิเมอร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีแห่งชาติไทเป ประเทศไต้หวัน ที่มีส่วนช่วยให้คำปรึกษาในการออกแบบงานวิจัยและวิเคราะห์ข้อมูล ขอขอบคุณ ผศ.ดร.ราชศักดิ์ ศักดานุภาพ ภาควิชาเทคโนโลยีระบบการผลิต วิทยาลัยนวัตกรรมการผลิตขั้นสูง สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความอนุเคราะห์บริการด้านงานวิเคราะห์ด้วยเครื่องมือขั้นสูงจนทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จสมบูรณ์ และขอขอบคุณผู้บริหารและคณาจารย์ของวิทยาลัยเทคนิคในจังหวัดนนทบุรีเป็นอย่างสูงที่ให้ความอนุเคราะห์และอำนวยความสะดวกในการดำเนินงานวิจัยในสถานศึกษาจนสำเร็จสมบูรณ์

เอกสารอ้างอิง

Aguilar, M., Lusth, J. C., Dunlap, S., McCallum, D., and Burkett, S.L. (2014). A kit–based approach to preparing undergraduate students for research. **2014 IEEE Frontiers in Education Conference (FIE) Proceedings** (pp.1–4). Madrid, Spain.

Asanok, M. (2018). Development, efficiency and effectiveness of innovation for self–learning model. **Journal of Educational Technology and Communications, Faculty of Education Mahasarakham University** 1(2): 9–18.

Association for Career and Technical Education (ACTE). (2010). **Up to the Challenge: The Role of Career and Technical Education and 21st Century Skills in College and Career Readiness**. Retrieved from https://files.eric.ed.gov/fulltext/ED519335.pdf, October 9, 2021.

Aubrecht, K. B., Padwa, L., Shen, X., and Bazargan, G. (2015). Development and implementation of a series of laboratory field trips for advanced high school students to connect chemistry to sustainability. **Journal of Chemical Education** 92(4): 631–637.

Best, J. W., and Kahn, J. V. (2003). **Reseach**

in Education. 9th ed. Boston: Allyn and Bacon.

Burnes, B., and Cooke, B. (2013). Kurt Lewin's field theory: A review and re–evaluation. **International Journal of Management Reviews** 15(4): 408–425.

Chalkias, D. A., Giannopoulos, D. I., Kollia, E., Petala, A., Kostopoulos, V., and Papanicolaou, G. C. (2018). Preparation of polyvinyl pyrrolidone–based polymer electrolytes and their application by *in–situ* gelation in dye–sensitized solar cells. **Electrochimica Acta** 271: 632–640.

Cherrette, V. L., Hutcherson. C. J., Barnett, J. L., and So, M. C. (2018). Fabrication and characterization of perovskite solar cells: An integrated laboratory experience. **Journal of Chemical Education** 95(4): 631–635.

Chien, S.–I., Su. C., Chou, C.–C., and Li, W.–R. (2010). Visual observation and practical application of dye sensitized solar cells in high school energy education. **Journal of Chemical Education** 95(7): 1167–1172.

Chotchadet, J. (2020). A learning experience by using science activity sets to develop basic science process skills for kindergarten students of the 3rd year. **Journal of Educational Technology and Communications, Faculty of Education Mahasarakham University** 3(7): 153–164. (in Thai)

Cole, J. M., Pepe, G., Al Bahri, O. K., and Cooper. C. B. (2019). Cosensitization in dye–sensitized solar cells. **Chemical Reviews** 119: 7279–7327.

Dong, R.–X., Shen, S.–Y., Chen, H.–W., Wang, C.–C., Shih, P.–T., Liu, C.–T., Vittal, R., Lin, J.–J., and Ho, K.–C. (2013). A novel polymer gel electrolyte for highly efficient dye–sensitized solar cells. **Journal of Materials Chemistry A** 1(29): 8471–8478.

Enciso, P., Luzuriaga, L., and Botasini, S. (2018). Using an open–source microcontroller and a dye–sensitized solar cell to guide students from basic principles to a practical application. **Journal of Chemical Education** 95(7): 1173–1178.

Hlumbensa, P. (2018). **Educational Measurement and Assessment**. Bangkok: Sahamitpattanakranpim. (in Thai)

Kent, M., Gilbertson, D. D., and Hunt, C. O. (1997). Fieldwork in geography teaching: A critical review of the literature and approaches. **Journal of Geography in Higher Education** 21(3): 313–332.

Kolb, A. Y., and Kolb, D. A. (2005). Learning styles and learning spaces: Enhancing experiential learning in higher education. **Academy of Management Learning and Education** 4(2): 193–212.

Leary, R. F. (1996). Field trip tips. **Science and Children** 34: 27–29.

McKone, J. R., Ardo, S., Blakemore, J. D., Bracher, P. J., Dempsey, J. L., Darnton, T. V.,

Hansen, M. C., Harman, W. H., Rose, M. J., Walter, M. G., Dasgupta, S., Winkler, J. R., and Gray, H. B. (2014). The solar army: A case study in outreach based on solar photoelectrochemistry. **Reviews in Advanced Sciences and Engineering** 3: 288–303.

Meechai, P., Maharsakphitak, P., Yodruk, N., Parnthong, S, and Jamsawang, J. (2017). Remote water quality monitoring system in Khlong Bang Phut and Chao Phraya river Nonthaburi Province. **Proceedings: Thailand Junior Water Prize 2016**. Nonthaburi: Suankularmwittayalai Nonthaburi School.

O'Regan, B., and Grätzel, M. (1991). A low–cost, high– efficiency solar cell based on dye–sensitized colloidal TiO_2 films. **Nature** 353(6346): 737–740.

Orion, N., and Hofstein, A. (1994). Factors that influence learning during a scientific field trip in a natural environment. **Journal of Research in Science Teaching** 31(10): 1097–1119.

Patwardhan, S., Cao, D. H., Hatch, S., Farha, O. K., Hupp, J. T., Kanatzidis, M. G., and Schatz, G. C. (2015). Introducing perovskite solar cells to undergraduates. **The Journal of Physical Chemistry Letters** 6(2): 251–255.

Prasertsang, P., and Kanasri, T. (2018). Studying the solar water pump using integration of learning process with STEM education. **Udon Thani Rajabhat University Journal of Sciences and Technology** 6(1): 63–81. (in Thai)

Richhariya, G., Kumar, A., Tekasakul, P., Gupta, B. (2017). Natural dyes for dye sensitized solar cell: A Review. **Renewable Sustainable Energy Reviews** 69: 705–718.

Ritcharoon, P. (2006). **Research to Develop Learning in Classroom Action Research**. 5th ed. Bangkok: Chulalongkorn University. (in Thai)

Saengkaew, P., Thummarat, P., and Rodkaew, B. (2011). Development of the cooperative learning activity packages entitled "energy" in scientific learning substance for Mattayom Suksa 1. **Journal of Curriculum and Instruction Sakon Nakhon Rajabhat University** 6: 25–33. (in Thai)

Singh, R., Polu, A. R., Bhattacharya, B., Rhee, H.–W., Varlikli, C., and Singh, P. K. (2016). Perspectives for solid biopolymer electrolytes in dye sensitized solar cell and battery application. **Renewable and Sustainable Energy Reviews** 65: 1098–1117.

Smith, Y. R., Crone. E., and Subramanian, V. (Ravi). (2013). A simple photocell to demonstrate solar energy using benign household ingredients. **Journal of Chemical Education** 90(10): 1358–1361.

Tangwancharoen, S., and Rungwachira. O. (2021). Management of learning in modern

world to enhance the characteristics of the new generation. **Journal of UBRU Educational Review** 1(1): 91–100.

Thanalertsomboon, P. (2020). **The 101 World: Positive Learning**. Retrieved from https://www.the101.world/positive-learning-finland, June 10, 2021. (in Thai)

World Economic Forum. (2016). **New Vision for Education: Fostering Social and Emotional Learning through Technology**. Switzerland: Author.