Go Back

ประสิทธิภาพเซลล์พลังงานแสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง ของท่อนาโน-อนุภาคนาโนจากแร่ลูโคซีนของไทย

Dye-Sensitized Solar Cells Efficiency of Nanotubes-Nanoparticles from Thai Leucoexene Mineral

ธนกร วิรุพห์มงคล [1], พิสุทธิ์ เจริญรัตน์ [2], ณัฐพร โทณานนท์ [2], สรพงษ์ ภวสุปรีย์ [1,*]
[1] ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุและโลหการ, คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี, คลองหก, ปทุมธานี 12110, ประเทศไทย
[2] ภาควิชาวิศวกรรมเคมี, คณะวิศวกรรมศาสตร์
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ 10330, ประเทศไทย
E-mail address: sorapongp@yahoo.com *

บทคัดย่อ

ปัจจุบันวัสดุไททาเนตและไททาเนียมไดออกไซด์มีประยุกต์ใช้งานทางด้านพลังงานและสิ่งแวดล้อม เช่น วัสดุกึ่งตัวนำในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง วัสดุบำบัดน้ำเสีย วัสดุตัวเร่งปฏิกิริยา อุปกรณ์ตรวจสอบก๊าซ และอื่นๆ ในงานวิจัยนี้ท่อนาโน-อนุภาคนาโนถูกสังเคราะห์ขึ้นผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลโดยการผสมแร่ลูโคซีนลงในโซเดียมไฮดร็อกไซด์ที่มีความเข้มข้น 10 โมล่าร์ ที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง รูปร่าง ขนาด โครงสร้างผลึก พื้นที่ผิวจำเพาะ ของวัสดุนาโนที่เตรียมได้ ถูกวิเคราะห์โดยใช้ กล้องจุลทรรศน์อิเล็คตรอนแบบส่องกราด (SEM) กล้องจุลทรรศน์อิเล็คตรอนแบบส่องผ่าน (TEM) เอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรกชัน (XRD) และเครื่องวัดพื้นที่ผิวจำเพาะด้วยเทคนิค Brunauer-Emmett-Teller (BET) จากการศึกษาพบว่าท่อนาโนมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกประมาณ 8 - 10 นาโนเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางภายในประมาณ 3 - 4 นาโนเมตร และมีขนาดของอนุภาคประมาณ 20-50 นาโนเมตร ค่าพื้นที่ผิวจำเพาะ (BET surface area) และปริมาตรรูพรุนประมาณ 144.79 ตร.ม./กรัม และ 1.0335 ลบ.ซม./กรัม ตามลำดับ ซึ่งวิธีการเตรียมนี้เป็นวิธีการเตรียมที่ไม่ยุ่งยากสำหรับวัสดุท่อนาโนจากวัสดุราคาถูก ด้วยชุดถังปฏิกรณ์ที่ออกแบบและผลิตขึ้นเองในประเทศ และนำวัสดุท่อนาโนที่เตรียมได้ไปทดลองประยุกต์ใช้ในเซลล์พลังงานแสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง โดยเมื่อผสมวัสดุท่อนาโนไททาเนตจากแร่ลูโคซีนกับไททาเนียมไดออกไซด์เชิงพาณิชย์(P25)จะให้ประสิทธิภาพ 3.16%

คำสำคัญ : ท่อนาโน; ไฮโดรเทอร์มัล; ไททาเนต; ไททาเนียมไดออกไซด์

Abstract

Titanate and TiO_2 have been widely used for energy and environment applications such as a semiconductor in dye-sensitized solar cell, water treatment materials, catalysts, gas sensors, and so on. In this study, titanate nanotubes were synthesized via hydrothermal method from Leucoxene in 10M NaOH at 105 ^{o}C for 24 h. The shape, size, crystalline structures and specific surface areas of the prepared nanotubes were characterized by Scanning electron microscopy (SEM), Transmission electron microscopy (TEM), X-ray diffraction (XRD), and Brunauer-Emmett-Teller (BET) surface area measurements. The prepared titanate nanotubes had an average outer diameter of around 8–10 nm and the inner diameter around 3–4 nm, and particles size around 20-50 nm. The BET surface area and pore volume of the prepared titanate nanotubes were about 144.79 m^2/g and 1.0335 cm^3/g, respectively. This preparation method provides a simple route to fabricate nanotubes from low-cost material using autoclave unit (Thai made). The prepared nanotubes could be applied in dye-sensitized solar cell, which had the solar conversion efficiency up to 3.16% when combined commercial nanoparticles TiO_2 (P25) with the prepared titanate nanotubes from Leucoxene mineral.

Keywords : Nanotubes; Hydrothermal; Titanate; TiO_2

POS11

Go Back

1. บทนำ

ในช่วงหลายปีที่ผ่านมานี้ การเตรียมวัสดุขนาดนาโนจากไททาเนียมไดออกไซด์และไททาเนตนั้นได้รับความสนใจอย่างหลากหลาย อันเนื่องมาจากการที่ตัวมันมีสมบัติพิเศษในหลายๆด้าน อีกทั้งยังนำไปประยุกต์ใช้ในงานด้านต่างๆได้อย่างมากมาย อาทิเช่น วัสดุกึ่งตัวนำในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง วัสดุบำบัดน้ำเสีย วัสดุตัวเร่งปฏิกิริยา อุปกรณ์ตรวจสอบก๊าซ เป็นต้น[1-2] ยิ่งไปกว่านั้น จากการค้นพบคาร์บอนที่มีโครงสร้างระดับนาโน[3]นั้นเป็นอีกหนึ่งปัจจัยสำคัญที่ทำให้บรรดานักวิจัยหันมาสนใจการวิจัยพัฒนาวัสดุที่มีโครงสร้างระดับนาโน ดังนั้นการค้นคว้าวิจัยไททาเนียมไดออกไซด์และไททาเนตระดับนาโน[4-8]จึงแพร่หลายขึ้นมา เพราะจากสมบัติพิเศษ คือ การมีพื้นที่ผิวสูง ความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออน และความสามารถในการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง[1-3,9-11] จึงทำให้เป็นที่ดึงดูดและสนใจของนักวิจัยในการศึกษาและพัฒนา โดยในปัจจุบันมีกระบวนการสังเคราะห์ไททาเนียมไดออกไซด์ระดับนาโนหลายวิธี เช่น วิธีโซล-เจล วิธีอิเล็คโตรเดโพซิชั่น และวิธีไฮโดรเทอร์มัล[12] เป็นต้น

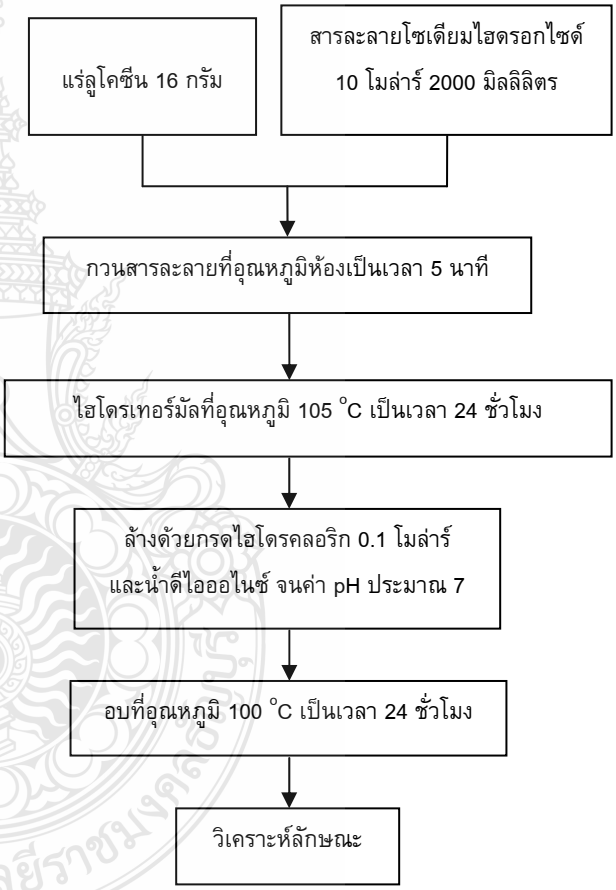
ในงานวิจัยนี้เป็นงานวิจัยแรกที่นำเอาแร่ลูโคซีนซึ่งหาได้ง่ายในประเทศและมีราคาถูกมาสังเคราะห์เป็นท่อนาโน-อนุภาคนาโนด้วยวิธีการไฮโดรเทอร์มัลในสารละลายอัลคาไลน์โดยใช้ชุดถังปฏิกรณ์ที่ออกแบบและสร้างขึ้นเอง ซึ่งจะเป็นทางเลือกใหม่ในการนำวัสดุราคาถูกมาสังเคราะห์เพื่อนำไปใช้งานในด้านต่างๆได้อย่างหลากหลายในอนาคต

2. วิธีการทดลอง

2.1 การสังเคราะห์

รูปที่ 1 รูปชุดถังปฏิกรณ์

แร่ลูโคซีนขนาด 16 กรัม จะถูกผสมลงในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้น 10 โมล่าร์ ปริมาณ 2000 มิลลิลิตร จากนั้นสารละลายจะถูกนำไปกวนที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 5 นาที หลังจากกวนสารเสร็จแล้วจึงนำสารละลายไปใส่ในชุดถังปฏิกรณ์ ที่ทำด้วยสแตนเลสที่เคลือบด้วยเทฟลอนอยู่ภายในที่ออกแบบและสร้างขึ้นเอง ณ ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุและโลหการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ดังรูปที่ 1 และนำไปให้ความร้อนที่อุณหภูมิประมาณ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง พร้อมทั้งกวนสารอยู่ตลอดเวลา หลังจากสังเคราะห์เสร็จสิ้นแล้วจึงนำสารออกมาปล่อยทิ้งไว้ให้เย็นลงที่อุณหภูมิห้อง แล้วนำสารไปล้างกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 0.1 โมล่าร์และน้ำปราศจากไอออน (น้ำดีไอออไนซ์) กระทั่งมีค่าความเป็นกรด-ด่างประมาณ 7 หรือเป็นกลาง แล้วจึงนำสารไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 แผนภาพแสดงขั้นตอนการเตรียมท่อนาโนจากแร่ลูโคซีน

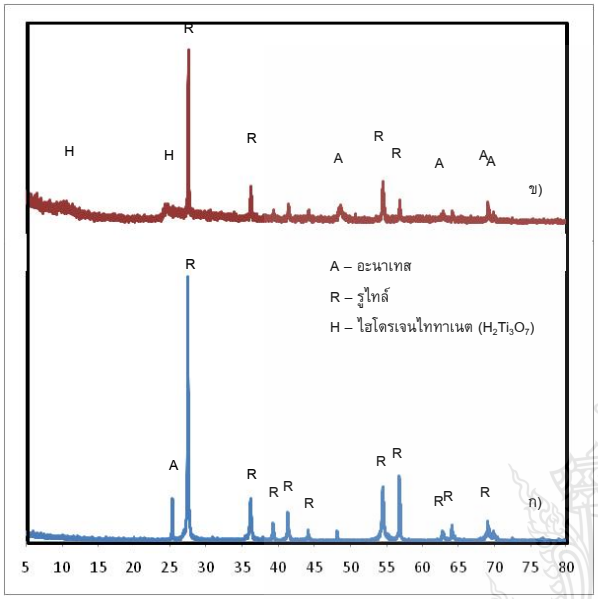
2.2 การวิเคราะห์ลักษณะ

โครงร่างผลึกและเฟสของตัวอย่างจะถูกวิเคราะห์ด้วยเครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรกชัน (XRD) (X'Pert PRO MPD model pw3040/60, PANalytical) ลักษณะรูปร่างและขนาดของวัสดุที่เตรียมได้นั้นจะถูกนำไปวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็คตรอนแบบส่องกราด (SEM) (JSM-5800LV, JEOL) และกล้องจุลทรรศน์อิเล็คตรอนแบบส่องผ่าน

(TEM) (JEM-2100, JEOL) สำหรับพื้นที่ผิวและลักษณะของรูพรุนของตัวอย่างนั้นจะถูกวิเคราะห์โดยเครื่องวัดพื้นที่ผิวด้วยวิธี The Brunauer-Emmett-Teller (BET) (BELSORP-Mini, Rubotherm)

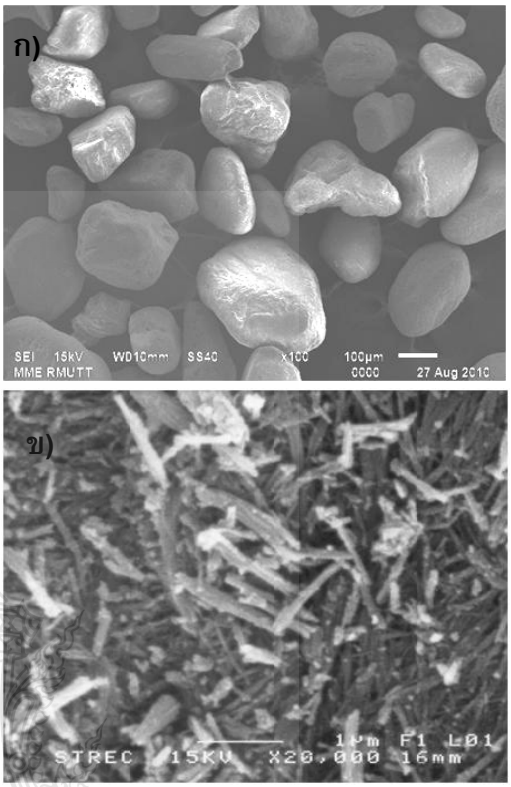
3. ผลและวิเคราะห์ผลการทดลอง

3.1 สมบัติของท่อนาโนที่เตรียมได้

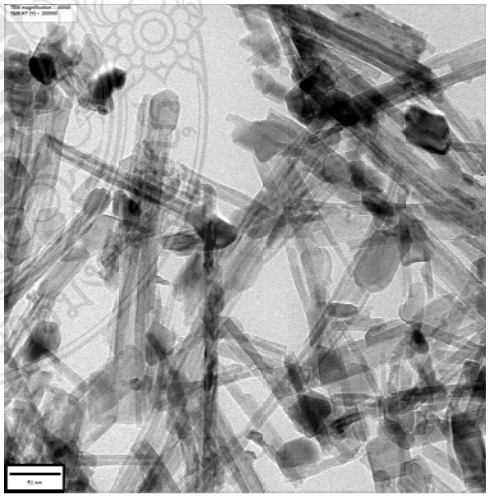


รูปที่ 3 กราฟจากเครื่อง XRD ของแร่ลูโคซีน ก). ก่อนสังเคราะห์ และ ข). สังเคราะห์ที่ 105 °C เวลา 24 ชั่วโมง

รูปที่ 3 ก) แสดงกราฟวิเคราะห์ด้วยเครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรกชัน (XRD) พบว่าแร่ลูโคซีนซึ่งเป็นสารตั้งต้นจะแสดงลักษณะโครงร่างผลึกส่วนใหญ่แบบรูไทล์ ส่วนแร่ลูโคซีนที่สังเคราะห์แล้วที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมงพบว่าจะเกิดโครงร่างผลึกของไททาเนตขึ้นมา ซึ่งกระบวนการเกิดของท่อนาโนไททาเนตนั้นเกิดจากการทำปฏิกิริยาเคมี จากนั้นโครงร่างผลึกของไททาเนียนั้นเกิดการแตกสลายของพันธะ Ti-O ทำให้รูปร่างโครงสร้างของไททาเนียเกิดความไม่แน่นอนหรือที่เรียกว่า “อสัณฐาน” (amorphous) แล้วจึงเกิดการสร้างพันธะขึ้นใหม่เป็น Ti-O-Na หรือ Ti-OH ในระหว่างการสังเคราะห์ด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ และการเกิดท่อนาโนไททาเนตนั้นจะเกิดขึ้นหลังจากการล้างด้วยกรดและน้ำ โดยการเกิดท่อนาโนนั้นจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและเวลาในการสังเคราะห์ อันที่จริงท่อนาโนนั้นประกอบด้วยชั้นของไททาเนตซึ่งขึ้นอยู่กับสภาวะในการสังเคราะห์และการหลงเหลือของโซเดียม โดยผลิตภัณฑ์ที่ได้อาจก่อเกิดขึ้นในรูปของ $H_2Ti_3O_7$ และ $Na_xH_{2-x}Ti_3O_7$ ซึ่งเป็นไปได้ทั้ง 2 กรณี[4] ซึ่งกรดที่นำมาล้างนั้นมีบทบาทสำคัญต่อการหลงของไอออนโซเดียม ยิ่งใช้กรดที่มีค่าความเป็นกรดด่างสูง จำนวนไอออนโซเดียมที่หลงเหลือก็จะลดน้อยลงไปตามลำดับ และจากผลการทดลองที่นำมาวิเคราะห์ด้วยเครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรกชัน (XRD) จะเห็นได้ว่ากราฟที่ได้นั้นแสดงให้เห็นถึงโครงสร้างผลึกของไฮโดรเจนไททาเนต($H_2Ti_3O_7$) และรูไทล์ หลังจากการสังเคราะห์ ดังรูปที่ 3 ข)



รูปที่ 4 ภาพถ่าย SEM ของแร่ลูโคซีน ก). ก่อนสังเคราะห์, ข). หลังสังเคราะห์ที่ 105 °C เวลา 24 ชั่วโมง



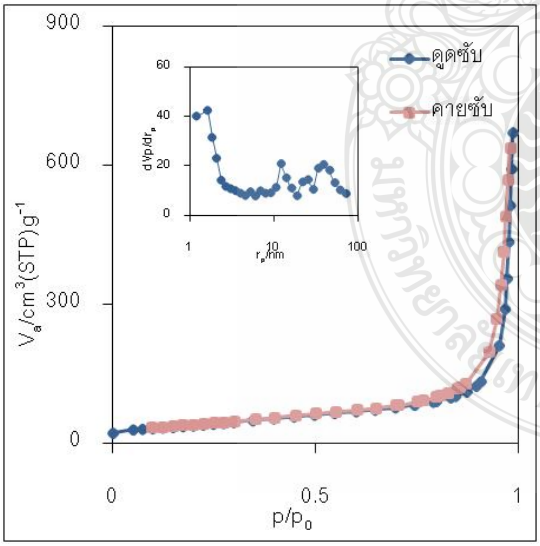
รูปที่ 5 แสดงภาพถ่าย TEM ของวัสดุนาโนที่เตรียมได้

สำหรับในรูปที่ 4 และ 5 นั้นได้แสดงถึงภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็คตรอนแบบส่องกราด (SEM) และกล้องจุลทรรศน์อิเล็คตรอนแบบส่องผ่าน (TEM) ตามลำดับ โดยที่รูปที่ 4 ก). เป็นภาพถ่ายของแร่ลูโคซีนก่อนการสังเคราะห์ ซึ่งมีลักษณะเป็นทรงกลม

ขนาดใหญ่ แต่เมื่อนำไปทำการสังเคราะห์ด้วยวิธีการไฮโดรเทอร์มัลที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง พบว่าตัวอย่างที่เตรียมขึ้นมานั้นมีรูปร่างเป็นแท่งกลวง โดยมีเส้นผ่านศูนย์กลางด้านในและด้านนอกประมาณ 4-6 และ 8-10 นาโนเมตร ตามลำดับ และมีขนาดของอนุภาคประมาณ 20-50 นาโนเมตร ดังรูปที่ 4 ข). และ 5 ซึ่งปัจจุบันลักษณะโครงสร้างแบบท่อนาโนหรืออนุภาคแท่งนาโน-อนุภาคนาโนสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง [6]

รูปที่ 6 แสดงไอโซเทอร์มการดูดซับ-คายซับของสารตัวอย่างที่สังเคราะห์ด้วยวิธีไฮโดรเทอร์มัลที่อุณหภูมิ 105 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง โดยที่สารที่ตัวอย่างที่เตรียมได้นั้นมีขนาดของรูพรุนส่วนใหญ่อยู่ที่ประมาณ 3-5 นาโนเมตร สำหรับพื้นที่ผิวจำเพาะที่วัดด้วยเทคนิค BET และปริมาตรของรูพรุนนั้นวัดได้ประมาณ 144.79 ตร.ม./กรัม และ 1.0335 ลบ.ซม./กรัม ตามลำดับ นอกจากนี้วงรอบฮีสเทอรีซีสของสารตัวอย่างที่เตรียมได้นี้แสดงลักษณะของรูพรุนแบบเมโซพอร์ (2-50 นาโนเมตร)

สำหรับพื้นที่ผิวจำเพาะของท่อนาโนไททาเนตที่วัดออกมาได้นั้น พบว่ามีค่ามากกว่าสารตั้งต้น(แร่ลูโคซีน)หลายเท่าตัวเลยทีเดียว ในขณะที่ไททาเนียเชิงพาณิชย์อย่าง P25 มีพื้นที่ผิวจำเพาะอยู่ที่ประมาณ 50 ตร.ม./กรัม ดังตารางที่ 1 ซึ่งด้วยเหตุนี้จึงทำให้วัสดุนาโนนี้น่าจะนำไปประยุกต์ใช้ในงานด้านต่างๆได้ เช่น วัสดุกึ่งตัวนำในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง วัสดุตัวเร่งปฏิกิริยา อุปกรณ์ตรวจสอบก๊าซ และอื่นๆ

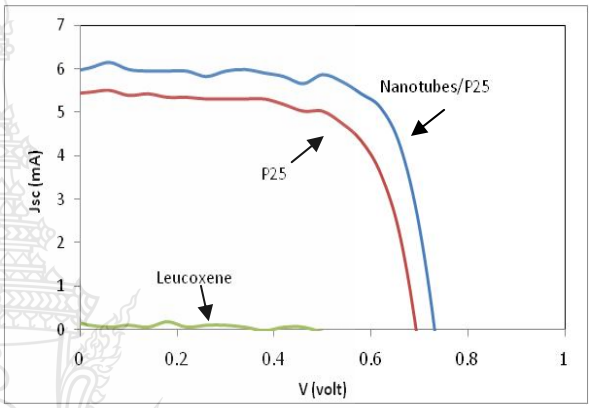


รูปที่ 6 กราฟแสดงไอโซเทอร์มการดูดซับคายซับก๊าซไนโตรเจนของ-วัสดุท่อนาโนไททาเนตจากแร่ลูโคซีน

ตารางที่ 1 แสดงพื้นที่ผิวจำเพาะของสาร (BET surface area)

สารตัวอย่าง	พื้นที่ผิวจำเพาะ (ตร.ม./กรัม)
แร่ลูโคซีน (สารตั้งต้น)	~ 0
ท่อนาโนไททาเนตจากแร่ลูโคซีน	144.79
ไททาเนียเชิงพาณิชย์ (P25)	~ 50

3.2 ประสิทธิภาพเซลล์พลังงานแสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง (Dye-sensitized Solar Cell, DSSCs)



รูปที่ 2 กราฟ I-V curve ของสารตัวอย่างที่นำไปใช้ประกอบขั้วอิเล็กโทรด

หลังจากนำวัสดุท่อนาโน-อนุภาคนาโนที่ได้จากการสังเคราะห์จากแร่ลูโคซีนที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมงมาประยุกต์ใช้เป็นสารกึ่งตัวนำในเซลล์พลังงานแสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง (Dye-sensitized Solar Cell, DSSCs) แล้วพบว่า เมื่อใช้ท่อนาโน-อนุภาคนาโนเป็นขั้วอิเล็กโทรดด้วยการให้อุณหภูมิที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง แล้วจะให้ประสิทธิภาพของ DSSCs ที่ 3.16 % เมื่อทำการผสมวัสดุที่เตรียมได้กับไททาเนียมไดออกไซด์เชิงพาณิชย์(P25) ซึ่งให้ค่าประสิทธิภาพมากกว่าเซลล์ที่ใช้ไททาเนียมไดออกไซด์เชิงพาณิชย์(P25)หรือเซลล์ที่ใช้สารตั้งต้น(แร่ลูโคซีน)เป็นขั้วอิเล็กโทรด ที่ให้ประสิทธิภาพประมาณ 2.56 % และ 0.04 % ตามลำดับ ดังรูปที่ 2 และตารางที่ 2 อาจจะเป็นผลเนื่องมาจากวัสดุท่อนาโน-อนุภาคนาโนนั้นมีผลต่อการกระเจิงแสงและการเดินทางของอิเล็กตรอน [13-14] ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยก่อนหน้านี้ [15]

ตารางที่ 2 ค่าทางไฟฟ้าของเซลล์พลังงานแสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงที่ใช้สารตัวอย่างเป็นส่วนประกอบ

สารตัวอย่าง	V_{oc} (Volt)	J_{sc} (mA/cm^2)	FF	ประสิทธิภาพ η (%)
แร่ลูโคซีน	0.45	0.14	0.59	0.04
ท่อนาโน-อนุภาคนาโน/P25	0.74	6.01	0.71	3.16
P25	0.68	5.43	0.69	2.56

4. สรุปผลการทดลอง

จากผลการทดลองสรุปได้ว่า ท่อนาโน-อนุภาคนาโนสามารถสังเคราะห์จากแร่ลูโคซีนได้โดยผ่านวิธีไฮโดรเทอร์มัลที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง โดยสามารถยืนยันได้จากภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็คตรอนแบบส่องกราด(SEM) และส่องผ่าน (TEM) ซึ่งตัวอย่างที่สังเคราะห์ได้นั้นมีพื้นที่ผิวจำเพาะเพิ่มขึ้นหลายเท่าตัว และเมื่อนำวัสดุท่อนาโน-อนุภาคนาโนไปประยุกต์ใช้เป็นสารกึ่งตัวนำในเซลล์พลังงานแสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงสามารถให้ประสิทธิภาพ 3.16 % เมื่อทำการผสมวัสดุที่เตรียมได้กับไททาเนียมไดออกไซด์เชิงพาณิชย์(P25) ทั้งนี้วัสดุนาโนที่เตรียมขึ้นได้นี้เตรียมจากวัสดุตั้งต้นที่มีราคาถูกและหาซื้อได้ง่ายในประเทศโดยวิธีที่ไม่ซับซ้อนยุ่งยากด้วยชุดถังปฏิกรณ์ที่ออกแบบและผลิตในประเทศ

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจาก ศูนย์นาโนเทคโนโลยีแห่งชาติ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช) รหัสโครงการ P-10-10794

เอกสารอ้างอิง

[1] M. Grätzel. (2003). “Dye-sensitized solar cells”, Journal of Photochemistry and Photobiology C: Photochemistry Reviews, Vol. 4, pp. 145-153.

[2] M. Grätzel. (2001). “Photoelectrochemical cells”, Nature, Vol. 414, pp. 338-344.

[3] Y. Guo, N.H. Lee, H.J. Oh, C. R. Yoon, K.S. Park, W.H. Lee, Y. Li, H.G. Lee, K.S. Lee and S.J. Kim. (2008). “Preparation of titanate nanotube thin film using hydrothermal method”, Thin Solid Films, Vol. 516 Issue. 23, pp. 8363-8371.

[4] T. Kasuga. (2006). “Formation of titanium oxide nanotubes using chemical treatments and their characteristic properties”, Thin Solid Films, Vol. 496, pp. 141-145.

[5] S. Ngamsinlapasathian, S. Sakulkhaemaruethai, S. Pavasupree, A. Kitiyanan, T. Sreethawong, Y. Suzuki and S. Yoshikawa. (2004). “Highly efficient dye-sensitized solar cell using nanocrystalline titania containing nanotube structure”, Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry, Vol. 164, pp. 145-151.

[6] S. Pavasupree, S. Ngamsinlapasathian, M. Nakajima, Y. Suzuki and S. Yoshikawa. (2006). “Synthesis, characterization, photocatalytic activity and dye-sensitized solar cell performance of nanorods/nanoparticles TiO_2 with mesoporous structure”, Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry, Vol. 184, pp. 163-169.

[7] S. Pavasupree, J. Jitputti, S. Ngamsinlapasathian and S. Yoshikawa. (2008). “Hydrothermal synthesis, characterization, photocatalytic activity and dye-sensitized solar cell performance of mesoporous anatase TiO_2 nanopowders”, Materials Research Bulletin, Vol. 43, pp. 149-157.

[8] S. Pavasupree, S. Ngamsinlapasathian, Y. Suzuki and S. Yoshikawa. (2007). “Preparation and characterization of high surface area nanosheet titania with mesoporous structure”, Materials Letters, Vol. 61, pp. 2973-2977.

[9] S. Iijima. (1991). “Helical microtubules of graphitic carbon”, Nature, Vol. 354, pp. 56-58.

[10] H.H. Ou and S.L. Lo. (2007). “Review of titania nanotubes synthesized via the hydrothermal treatment: Fabrication, modification, and application”, Separation and Purification Technology, Vol. 58, pp. 179-191.

[11] Y.Q. Wang, X.J. Yu and D.Z. Sun. (2007). “Synthesis, characterization, and photocatalytic activity of TiO"2"-"xN"x nanocatalyst”, Journal of Hazardous Materials, Vol. 144, pp. 328-333.

[12] K. Byrappa and T. Adschiri. (2007). “Hydrothermal technology for nanotechnology”, Progress in Crystal Growth and Characterization of Materials, Vol. 53, pp. 117-166.

[13] Y. Suzuki, S. Ngamsinlapasathian, R. Yoshida and S. Yoshikawa. (2006). “Partially Nanowire-Structured TiO_2

Electrode for Dye-Sensitized Solar Cells", Central European Journal of Chemistry, Vol. 4, pp. 476-488.

[14] S. Uchida, R. Chiba, M. Tomiha, N. Masaki and M. Shirai. (2002). "Application of titania nanotubes to a dye-sensitized solar cell", Electrochemistry, Vol. 70, pp. 418-420.

[15] S. Chuangchote, T. Sagawa and S. Yoshikawa. (2008). "High Efficient Dye-sensitized Solar Cell Using TiO_2 Nanoparticles/Nanofibers as Photoelectrode", Proceeding ASEAN COST+3: New Energy Forum for Systauble Environment (NEFSE) and The 6th Eco-Energy and Materials Science and Engineering Symposium, Vol. 6, pp. 47-49.

Sorapong Pavasupree received B.Eng. (1994-1998) from Rajamangala University of Technology Thanyaburi, M.Energy Sci., D.Energy Sci. and Post-doctoral (Nanoscience and Nanotechnology, JSPS) from Kyoto University (2001-2007). His current research focuses on nanotechnology, nano-materials for energy applications, and low-cost nano-materials.