การประยุกต์ใช้ท่อนาโนไททาเนียในการพัฒนาเซลล์พลังงานแสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง

Application of TiO_2 nanotubes for dye-sensitized solar cells

สรพงษ์ ภวสุปรีย์ *

ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุและโลหการ, คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี, คลองหก, ปทุมธานี 12110, ประเทศไทย

*E-mail address: sorapongp@yahoo.com **

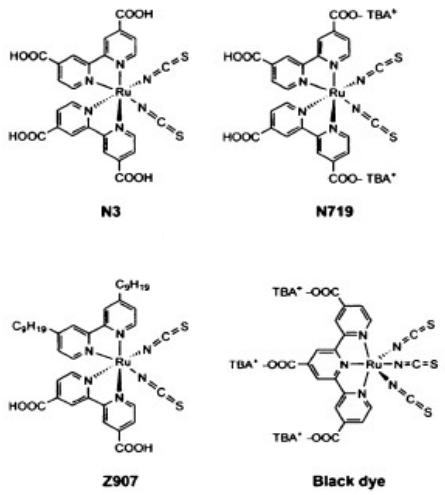
1. บทนำ

การใช้พลังงานในปัจจุบันนั้นนับว่าเป็นหนึ่งในปัจจัยสำคัญทั้งในภาคอุตสาหกรรมและครัวเรือน เช่น เป็นแหล่งพลังงานในการผลิต เป็นเชื้อเพลิงขับเคลื่อน เป็นเชื้อเพลิงหุงต้ม เป็นต้น แต่เนื่องจากการขยายตัวของประชากรโลกในปัจจุบันที่เพิ่มสูงขึ้นทุกวัน ทำให้ความต้องการในการใช้พลังงานต่างๆนั้นจึงสูงตามไปด้วย แต่จากความเป็นจริงที่ว่าแหล่งพลังงานที่ใช้อยู่ในปัจจุบันนั้นเมื่อเปรียบเทียบกับความต้องการของประชากรโลกแล้วมีไม่เพียงพอต่อความต้องการ และพลังงานส่วนมากที่นำมาใช้ก็เป็นพลังงานจากแหล่งธรรมชาติ ซึ่งเมื่อใช้หมดไปแล้วพลังงานบางชนิดอาจจะต้องใช้เวลาในการก่อเกิดขึ้นมาใหม่เป็นเวลานานพอสมควร ดังนั้นนักวิชาการและนักวิจัยหลายท่านจึงมีความคิดที่จะนำพลังงานที่ไม่มีวันหมดหรือมีมากพอต่อความต้องการของประชากรโลกมาใช้เป็นพลังงานทดแทน ซึ่งหนึ่งในแหล่งพลังงานเหล่านั้นก็คือ พลังงานจากแสงอาทิตย์

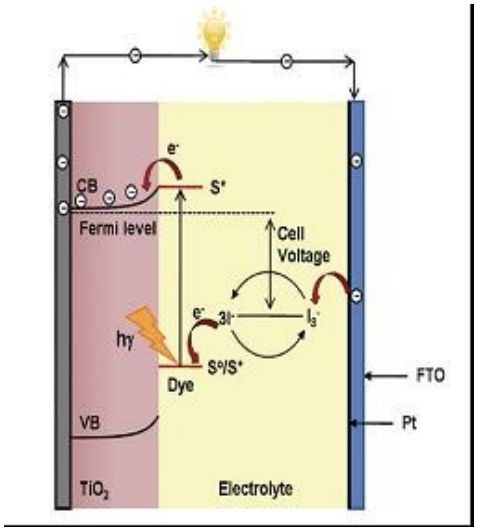
โดยตลอดช่วงหลายสิบปีที่ผ่านมานี้ มีการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับการใช้พลังงานทดแทนจากแสงอาทิตย์มากมาย โดยสิ่งประดิษฐ์ที่ใช้พลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานทดแทนมีชื่อเรียกว่า เซลล์พลังงานแสงอาทิตย์ หรืออาจเรียกว่าโฟโต้โวลตาอิกเซลล์ วิวัฒนาการของการวิจัยและพัฒนาเซลล์พลังงานแสงอาทิตย์นั้นมีการดำเนินการมาอย่างต่อเนื่องตลอดหลายสิบปีที่ผ่านมา ซึ่งหนึ่งในนั้นก็คือ เซลล์พลังงานแสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง

2. เซลล์พลังงานแสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง

เซลล์พลังงานแสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงเป็นหนึ่งในหลากหลายชนิดของเซลล์พลังงานแสงอาทิตย์ที่ถูกวิจัยและพัฒนาขึ้นมา ซึ่งมีหลักการโดยรวมที่คล้ายกัน คือ การเปลี่ยนพลังงานที่ได้รับจากแสงอาทิตย์ให้กลายเป็นพลังงานทางไฟฟ้า เซลล์พลังงานแสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงถูกคิดค้นขึ้นมาในช่วงปีคริสตศักราช 1991 โดยศาสตรจารย์ ดร. ไมเคิ่ล แกรทเซล (Prof. Dr. Michael Grätzel)และทีมวิจัยของเขา(B. O'Regan and M. Gratzel, 1991) หลักการทั่วไปของเซลล์ประเภทนี้จริงๆแล้วก็ไม่ได้แตกต่างกับกระบวนการสังเคราะห์แสงของพืช โดยมีการรับแสงอาทิตย์ที่ฝั่งโฟโต้อิเล็คโทรดซึ่งมีโลหะออกไซด์เคลือบอยู่บนกระจกนำไฟฟ้าและถูกย้อมด้วยสีย้อมไวแสงซึ่งโดยทั่วไปแล้วเป็นสารประกอบรูเทเนี่ยม(Ru) (รูปที่ 1) อีกชั้นหนึ่ง จากนั้นสีย้อมที่ได้รับแสงจะถูกกระตุ้นให้เกิดอิเล็คตรอนอิสระหลุดออกมา ซึ่งจะถูกส่งผ่านกระจกนำไฟฟ้าฝั่งโฟโต้อิเล็คโทรดไปยังกระจกนำไฟฟ้าฝั่งเคาท์เตอร์อิเล็คโทรดซึ่งเคลือบด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา และอิเล็คตรอนอิสระนี้จะถูกนำไปทดแทนอิเล็คตรอนในสารละลายอิเล็คโทรไลท์ที่นำไปชดเชยอิเล็คตรอนในสีย้อม สิ้นสุดเป็นวงจรทางไฟฟ้าและเป็นกระบวนการเช่นนี้วนรอบไปเรื่อยๆ(M. Grätzel, 2003) (M. Grätzel, 2001) (R.W. Miles et al., 2005) (P. Roy et al., 2010) ดังรูปที่ 2, 3 และ 4

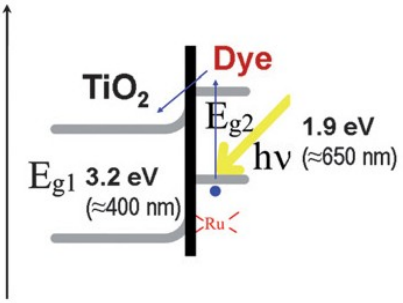


รูปที่ 1 แสดงสารประกอบรูเทเนี่ยมที่ใช้เป็นสีย้อมไวแสง(P. Roy et al., 2010)



รูปที่ 2 แผนภาพแสดงหลักการทำงานของเซลล์พลังงานแสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง (P. Roy et al., 2010)

จากหลักการข้างต้นจะเห็นได้ว่าเซลล์พลังงานแสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงนั้นมีหลักการทำงานที่ค่อนข้างเรียบง่ายและไม่ยุ่งยาก อีกทั้งเซลล์ชนิดนี้ยังมีข้อดีอีก เช่น สามารถประกอบได้โดยง่าย และมีน้ำหนักเบาเคลื่อนย้ายได้สะดวก เป็นต้น ด้วยเหตุนี้จึงทำให้นักวิจัยหันมาศึกษาและพัฒนาเซลล์ชนิดนี้กันอย่างกว้างขวาง แต่ยังมีข้อเสียอยู่บ้าง คือ เซลล์ชนิดนี้ยังให้ประสิทธิภาพที่ไม่ดีเท่าที่ควร ซึ่งในบทความนี้จะกล่าวถึงการพัฒนาส่วนประกอบหลักที่สำคัญ คือ อิเล็คโทรด (electrode)



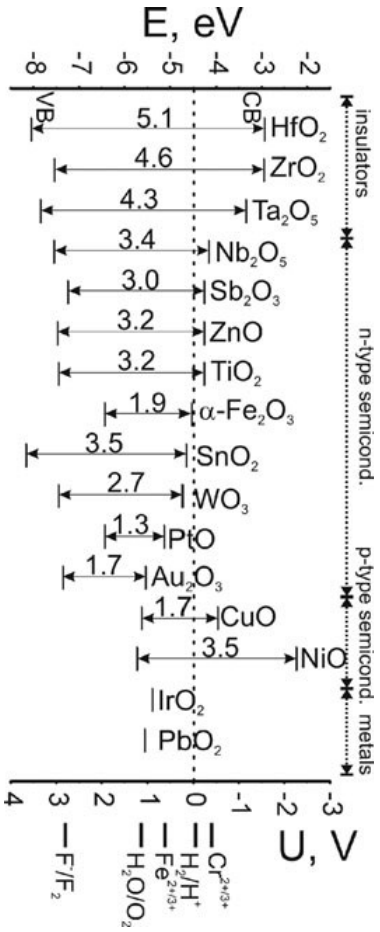
รูปที่ 3 แผนภาพแสดงการกระตุ้นอิเล็คตรอนอิสระ
บนสีย้อมหลังจากการรับแสง(P. Roy et al., 2010)

รูปที่ 4 ตัวอย่างเซลล์พลังงานแสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงจากห้องทดลองต่างๆ
(http://kuroppe.tagen.tohoku.ac.jp/~dsc/modules/AISIN/DSC00307s.jpg http://kuroppe.tagen.tohoku.ac.jp/~dsc/modules/AISIN/leaf_s.jpg
http://kuroppe.tagen.tohoku.ac.jp/~dsc/modules/SAMSUNG/004.jpg)

3. ไททาเนียมไดออกไซด์

วัสดุอิเล็คโทรด(electrode)ที่นิยมนำมาใช้ในเซลล์พลังงานแสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง คือ สารกึ่งตัวนำ ซึ่งโดยส่วนใหญ่เป็นวัสดุโลหะออกไซด์ และโลหะออกไซด์ที่นำมาประยุกต์ใช้ในเซลล์พลังงานแสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงแล้วให้ประสิทธิภาพสูง คือ ไททาเนียมไดออกไซด์(TiO_2)

ไททาเนียมไดออกไซด์หรือที่เรียกกันว่า “ไททาเนีย” นั้นเป็นหนึ่งในสารประกอบโลหะออกไซด์ที่นิยมนำมาใช้เป็นส่วนประกอบของเซลล์พลังงานแสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง เนื่องจาก ไททาเนียนั้นมีช่องว่างระหว่างแถบพลังงาน(band gap energy) ที่กว้างพอเมื่อเทียบกับสารประกอบโลหะออกไซด์ตัวอื่น คือ มีช่องว่างระหว่างแถบพลังงานนั้นอยู่ที่ประมาณ 3.2 อิเล็คตรอนโวลท์(eV) ดังรูปที่ 3 ซึ่งจะเห็นได้ว่าช่องว่างระหว่างแถบพลังงานของไททาเนียนั้นกว้างและครอบคลุมสารละลายอิเล็คโทรไลท์ชนิดต่างๆ และจะสังเกตุได้ว่ามีอีกสารประกอบโลหะออกไซด์ชนิดหนึ่งที่มีแถบพลังงานใกล้เคียงกับไททาเนีย นั่นคือ ซิงค์ออกไซด์(ZnO) ซึ่งก็มีช่องว่างระหว่างแถบพลังงานประมาณ 3.2 eV เช่นเดียวกัน จึงทำให้ซิงค์ออกไซด์เป็นอีกหนึ่งทางเลือกที่นำมาเป็นส่วนประกอบของเซลล์ชนิดนี้เช่นกัน

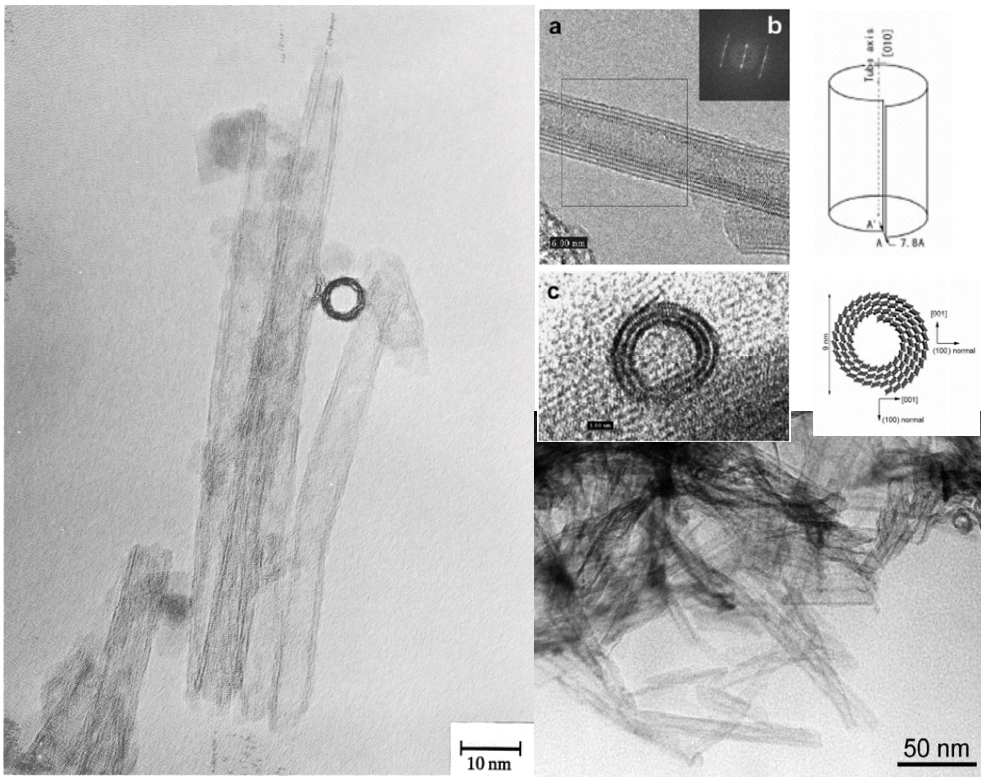


รูปที่ 3 แสดงตำแหน่งแถบพลังงานของสารประกอบชนิดต่างๆ(S.V.N.T. Kuchibhatla et al., 2007)

4. ท่อนาโนไททาเนีย

จากความสำเร็จในการสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนในปี 1991 โดยศาสตราจารย์ อิจิม่า(S. Iijima, 1991) ได้เป็นแรงกระตุ้นให้นักวิจัยศึกษาค้นคว้าเพื่อสังเคราะห์วัสดุชนิดอื่นขึ้นมาในรูปแบบต่างๆ ซึ่งต่อมาสารประกอบโลหะออกไซด์ เช่น ไททาเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) หรือวานาเดียมออกไซด์(V_2O_5) เป็นต้น ก็ได้รับความสนใจในวงการวิจัยที่จะนำมาสังเคราะห์เพื่อคิดค้นรูปแบบและรูปร่างใหม่ๆ(J.M. Macak et al., 2007) ตลอดสิบปีที่ผ่านมานั้นได้มีการศึกษาในส่วนของการสังเคราะห์โดยผ่านกระบวนการทางเคมี หรือที่ปัจจุบันนิยมเรียกว่า “ไฮโดรเทอร์มัล” ให้วัสดุนั้นกลายเป็นวัสดุที่มีขนาดนาโนเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการนำมาใช้ในงายต่างๆ ซึ่งข้อดีที่เด่นชัด คือ การที่มีพื้นที่ผิวสัมผัสสูงขึ้นหลายเท่าตัว ในขณะที่กระบวนการสังเคราะห์แบบไฮโดรเทอร์มัลนั้นก็เป็นวิธีการที่ง่าย สะดวก และเสียค่าใชจ่ายไม่มากเมื่อเทียบกับกระบวนการสังเคราะห์ด้วยวิธีอื่น

ในปี 1997 ดร. คาซูกะ และคณะ ได้ประสบความสำเร็จในการสังเคราะห์ท่อนาโนไททาเนีย(T. Kasuga et al., 1997) (T. Kasuga et al., 1998) (T. Kasuga et al., 1999) (T. Kasuga, 2006) โดยวิธีไฮโดรเทอร์มัล ซึ่งต่อมาได้นำท่อนาโนไททาเนียมาประยุกต์ใช้ในวงการเซลล์พลังงานแสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงเนื่องจากมีพื้นที่ผิวจำเพาะสูง ในรูปที่ 4 แสดงภาพถ่ายด้วยกล้องอิเล็คตรอนแบบส่องผ่าน(TEM) ของท่อนาโนจากไททาเนียโดยใช้สารละลายที่มีส่วนผสมของโลหะไททาเนียมหรือผงนาโนไททาเนียเชิงพานิชย์(P25) เป็นสารตั้งต้น ซึ่งสังเคราะห์ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลโดยใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 10 โมล่าร์เป็นสารละลาย ซึ่งหลังจากสังเคราะห์แล้วสามารถเพิ่มพื้นที่ผิวจำเพาะได้ถึง 300-400 ตร.ม./กรัม เลยทีเดียว

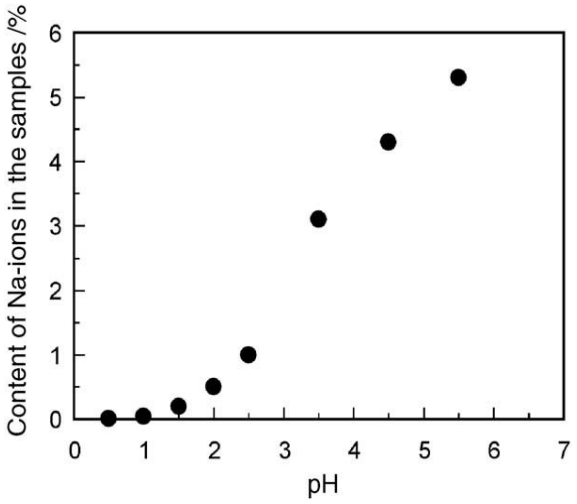


รูปที่ 4 ภาพถ่าย TEM ของท่อนาโนจากสารละลายที่มีส่วนผสมของโลหะไททาเนียมหรือผงนาโนไททาเนียเชิงพานิชย์ (P25)

(T. Kasuga et al., 1997, 1998, 1999, 2006) (Q. Chen et al., 2002)

6. การเกิดท่อนาโน

กระบวนการเกิดของท่อนาโนไททาเนียนั้นเกิดจากการทำปฏิกิริยาเคมีแบบอ่อนๆ จากนั้นโครงร่างผลึกของไททาเนียนั้นเกิดการแตกสลายของพันธะ Ti-O ทำให้รูปร่างโครงสร้างของไททาเนียเกิดความไม่แน่นอนหรือที่เรียกว่า “อสัณฐาน” (amorphous) แล้วจึงเกิดการสร้างพันธะขึ้นใหม่เป็น Ti-O-Na หรือ Ti-OH ในระหว่างการสังเคราะห์ด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ และการเกิดท่อนาโนไททาเนียนั้นจะเกิดขึ้นหลังจากการล้างด้วยกรดและน้ำ(T. Kasuga et al., 1999) ทั้งนี้ตามรายงานการวิจัยได้บอกเอาไว้ว่า เมื่อเริ่มการสังเคราะห์ด้วยการนำสารตั้งต้นไททาเนียที่มีโครงร่างผลึกแบบอะนาเทส (anatase)ใส่ในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์แล้ว การเกิดท่อนาโนหรือเส้นใยนาโนนั้นจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและเวลาในการสังเคราะห์ ทั้งท่อนาโนและเส้นใยนาโนนั้นอันที่จริงแล้วประกอบด้วยชั้นของไททาเนตซึ่งขึ้นอยู่กับสภาวะในการสังเคราะห์และการหลงเหลือของโซเดียม โดยผลิตภัณฑ์ที่ได้อาจก่อเกิดขึ้นในรูปของ $H_2Ti_3O_7$ และ $Na_xH_{2-x}Ti_3O_7$ ซึ่งเป็นไปได้ทั้ง 2 กรณี(T. Kasuga, 2006) ซึ่งกรดที่นำมาล้างนั้นมีบทบาทสำคัญต่อการหลงของไอออนโซเดียม ยิ่งใช้กรดที่มีค่าความเป็นกรดต่างสูง จำนวนไอออนโซเดียมที่หลงเหลือก็จะลดน้อยลงไปตามลำดับ ดังรูปที่ 5 สำหรับขั้นตอนการเกิดท่อนาโนนั้นเริ่มจากการที่โครงร่างผลึกของไททาเนียกลายเป็นโครงร่างอสัณฐานแล้วแผ่ออกเป็นแผ่นจากนั้นเกิดการม้วนตัวกลายเป็นท่อในเวลาต่อมา(S. V. N. T. Kuchibhatla et al., 2007)



รูปที่ 5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเป็นกรด-ด่างที่นำมาล้างกับไอออนของโซเดียมที่เหลือ (T. Kasuga, 2006)

7. ปัจจัยของอิเล็คโทรดTiO_2ที่มีผลต่อประสิทธิภาพของเซลล์พลังงานแสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง

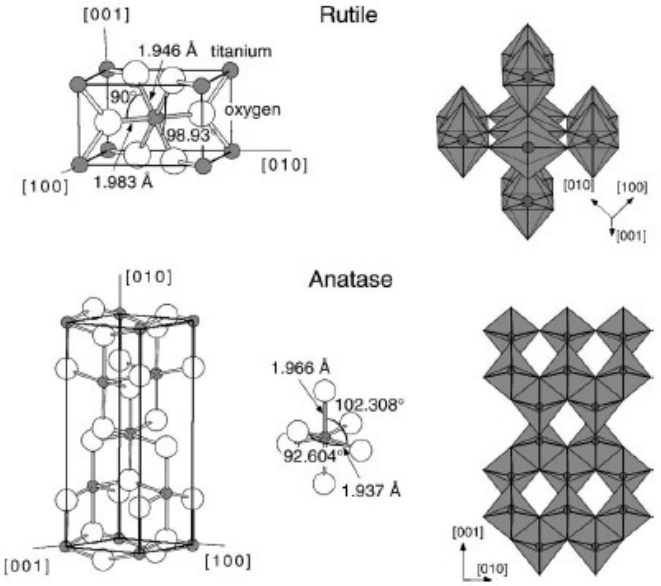
ปัจจุบันมีงานวิจัยมากมายที่ศึกษาถึงตัวแปรของอิเล็คโทรดในการประกอบเซลล์พลังงานแสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงที่มีผลต่อประสิทธิภาพเซลล์ ซึ่งก็มีหลากหลายสาเหตุ โดยจะกล่าวในหัวข้อย่อยถัดต่อจากนี้

7.1 พื้นที่ผิวจำเพาะ

ในการสังเคราะห์วัสดุนาโนไททาเนียนั้นได้มีการศึกษาในเชิงรูปร่าง ลักษณะโครงสร้างต่างๆมากมาย ซึ่งโดยส่วนมากแล้วการสังเคราะห์นาโนไททาเนียเพื่อให้ได้รูปร่างที่แตกต่างกันจะใช้การเปลี่ยนแปลงสภาวะในการสังเคราะห์ เช่น อุณหภูมิ เวลา และความเข้มข้นเป็นต้น ซึ่งผลกระทบของสภาวะเหล่านี้ได้ถูกนำมาศึกษาวิจัย เพื่อให้ได้มาซึ่งรูปร่างหรือโครงสร้างใหม่ๆของวัสดุนาโนไททาเนีย โดยเป้าหมายหลักก็เพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสหรือพื้นที่ผิวจำเพาะให้โมเลกุลสีย้อมนั้นสามารถมาเกาะหรือจับให้ได้มากที่สุด โดยที่แต่ละลักษณะโครงสร้าง รูปร่างนั้นก็จะมีพื้นที่ผิวจำเพาะแตกต่างกัน ซึ่งในงานวิจัยของS. Pavasupree และคณะ(S. Pavasupree et al., 2006) ได้มีการเปรียบเทียบประสิทธภาพของเซลล์พลังงานแสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงของวัสดุนาโนที่มีพื้นที่ผิวจำเพาะต่างกัน ซึ่งผลจากงานวิจัยนี้พบว่าวัสดุที่มีพื้นที่ผิวจำเพาะสูงจะให้ค่าประสิทธิภาพสูงกว่าวัสดุที่มีพื้นที่ผิวจำเพาะต่ำกว่า

7.2 โครงร่างผลึก

ไททาเนียนั้นมีโครงร่างผลึกอยู่ 3 แบบ คือ รูไทล์(Rutile) อะนาเทส(Anatase) และบรูไคท์(Brookite) แต่ที่พบส่วนมากเป็นรูไทล์กับอะนาเทส ซึ่งจะเรียงตัวเป็นแบบเตตระกอนัล(Tetragonal) ดังรูปที่ 6 ซึ่งจะเห็นได้ชัดว่าการจัดเรียงผลึกแบบอะนาเทสนั้นจะส่งผ่านอิเล็คตรอนได้ดีกว่า จึงเป็นเหตุผลที่มาว่าทำไมถึงต้องมีสัดส่วนโครงร่างผลึกแบบอะนาเทสมากกว่ารูไทล์ในการนำมาประกอบเซลล์ ซึ่งมีรายงานวิจัยว่าโครงร่างผลึกแบบอะนาเทสให้ค่าประสิทธิภาพสูงกว่าโครงร่างผลึกแบบรูไทล์เนื่องจากการส่งผ่านอิเล็คตรอนดังกล่าว (N.G.Park et al., 2000)



รูปที่ 6 แสดงโครงร่างผลึกแบบรูไทล์และอะนาเทส
ของไททาเนียมไดออกไซด์ (U. Diebold, 2003)

7.3 ค่าความเป็นกรด-ด่าง

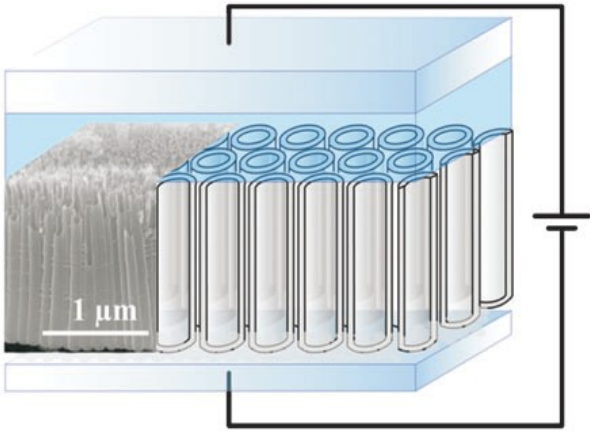
ค่าความเป็นกรด-ด่างในระหว่างขั้นตอนการล้างนั้นมีผลกกระทบต่อพื้นที่ผิวจำเพาะและขนาดรูพรุน รวมไปถึงโครงสร้างของวัสดุท่อนาโนไททาเนีย โดย C. K. Lee และคณะ(C. K. Lee et al., 2008) ได้ทำการศึกษาผลของจำนวนโซเดียมที่หลงเหลือภายหลังการล้างด้วยกรดที่มีค่าความเป็นกรด-ด่างแตกต่างกัน ซึ่งจากผลการศึกษาพบว่าการใช้สารที่มีค่าความเป็นกรด-ด่างสูงนั้น จะพบท่อนาโนเป็นจำนวนมากและมีลักษณะยาว แต่เมื่อค่าความเป็นกรด-ด่างต่ำลงจะพบท่อนาโนทาเนียน้อยลงและมีลักษณะสั้น โดยพบว่าค่าความเป็นกรด-ด่างที่เหมาะสมในการล้างท่อนาโนไททาเนียที่สุด คือ 0.01 นอร์มัล และนอกจากนี้ยังพบว่าเฟสของท่อนาโนไททาเนียที่ตรวจด้วยเครื่องเอ็กซเรย์ดิฟแฟรกชั่นนั้น จะพบเฟสของไททาเนตเมื่อใช้กรดที่มีค่าความเป็นกรด-ด่างสูงในการล้าง ซึ่งจำเป็นต้องล้างท่อนาโนด้วยกรด เนื่องจากในปฏิกิริยานั้นได้มีการใช้สารละลายที่มีความเป็นด่างค่อนข้างสูง ซึ่งอาจส่งผลให้ประจุบวกของสารละลายดังกล่าว(Na^+, K^+, Li^+) นั้นไปจับกับอิเล็คตรอน(e^-)ได้ง่ายขึ้น และด้วยเหตุนี้ก็จะส่งผลโดยตรงให้ประสิทธิภาพของเซลล์พลังงานแสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงลดลง

7.4 อุณหภูมิในการเผา

ในการประกอบเซลล์พลังงานแสงอาทิตย์นั้น การเคลือบฟิล์มของท่อนาโนไททาเนียลงไปบนกระจกในบางวิธีอาจจะต้องทำการเผาเพื่อให้ชั้นฟิล์มของท่อนาโนไททาเนียนั้นติดลงบนกระจกนำไฟฟ้า อุณหภูมิในการเผาจึงเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อประสิทธิภาพของเซลล์พลังงานแสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง ซึ่งในการเผาที่อุณหภูมิสูงนั้นจะส่งผลโดยตรงต่อพื้นที่ผิวจำเพาะและโครงร่างผลึกของท่อนาโนไททาเนีย ซึ่งมีการศึกษาโดย J. Yu และคณะ(J. Yu et al., 2006) เมื่อใช้อุณหภูมิสูงในการเผาสูงจะทำให้ค่าพื้นที่ผิวจำเพาะลดลง และเมื่อเผาโดยใช้อุณหภูมิสูงถึงจุดๆหนึ่งจะทำให้โครงร่างผลึกมีลักษณะเป็นเฟสรูไทล์ซึ่งไม่ส่งผลดีมากนักสำหรับการนำไปใช้ในเซลล์พลังงานแสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงของท่อนาโนไททาเนีย นอกจากนั้นถ้าเผาที่อุณหภูมิสูงจนเกินไปยังอาจจะให้รูปร่าง ลักษณะโครงสร้างของท่อนาโนไททาเนียเปลี่ยนไปหรือสลายไปด้วย(R. Yoshida et al., 2005)

7.5 การเรียงตัวบนกระจกนำไฟฟ้าหรือบนแผ่นโลหะไททาเนียมของท่อนาโนไททาเนีย

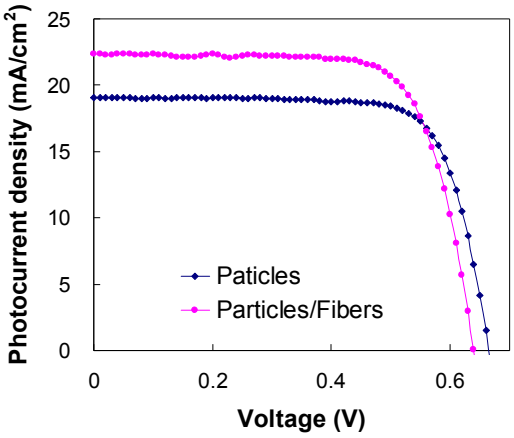
การเรียงตัวของท่อนาโนไททาเนียเป็นอีกหนึ่งสาเหตุสำคัญที่ทำให้ประสิทธิภาพในการนำไปประยุกต์ใช้ในเซลล์พลังงานแสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง ซึ่งปัจจุบันเริ่มมีการศึกษาถึงลักษณะการเรียงตัวของท่อนาโนไททาเนียบนกระจกนำไฟฟ้าหรือบนแผ่นโลหะไททาเนียมกันมากขึ้น เนื่องจากการเคลือบชั้นฟิล์มของท่อนาโนไททาเนียลงบนกระจกนำไฟฟ้านั้นเมื่อนำไปถ่ายภาพตัดขวางจะพบว่าการเรียงตัวของท่อนาโนไททาเนียนั้นเป็นไปอย่างไม่เป็นระเบียบ ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อการเคลื่อนที่ของอิเล็คตรอนส่งผ่านไปยังฝั่งเคาท์เตอร์อิเล็คโทรด(Counter electrode) โดยได้มีการแก้ไขและพัฒนาอยู่หลายวิธี เช่น การนำไททาเนียที่มีลักษะณะเป็นอนุภาคเม็ดนาโนมาผสม การสร้างชั้นฟิล์มที่จัดเรียงเป็นระเบียบของท่อนาโนไททาเนีย(P. Roy et al., 2010) (A. Ghicov and P. Schmuki, 2009) ดังรูปที่ 7 ซึ่งส่งผลให้ประสิทธิภาพของเซลล์พลังงานแสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงดีขึ้น เนื่องจากการส่งผ่านอิเล็คตรอนที่ดีขึ้น



รูปที่ 7 แสดงลักษณะการเรียงตัวที่เป็นระเบียบของชั้นฟิล์มท่อนาโนไททาเนียบนกระจกนำไฟฟ้าหรือบนแผ่นโลหะไททาเนียม(A. Ghicov and P. Schmuki, 2009)

8. โครงสร้างอื่น ๆของไททาเนีย

นอกจากไททาเนียที่มีลักษณะโครงสร้างเป็นท่อนาโนแล้วนอกจากนี้ ยังมีงานศึกษาวิจัยมากมายที่พูดถึงการสังเคราะห์ไททาเนียในรูปแบบต่างๆ เช่น เส้นใยนาโน(nanofibers), แถบนาโน(nanobelts), แท่งนาโน(nanorods), ลวดนาโน(nanowires) และอนุภาคเม็ดนาโน (nanoparticles) เป็นต้น ซึ่งแต่ละโครงสร้างนั้นจะส่งผลต่อการนำไปประยุกต์ใช้ในเซลล์พลังงานแสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง เนื่องจากความแตกต่างทั้งในพื้นที่ผิวจำเพาะ ลักษณะโครงสร้าง รวมทั้งความหนาของชั้นฟิล์มและพื้นที่สัมผัสของไททาเนีย ดังตารางที่ 1 และ 2 นอกจากนี้ยังมีงานวิจัยที่ใช้เทคนิคอิเล็คโทรสปินนิ่ง(Electrospinning)ช่วยสร้างวัสดุเส้นใยนาโน โดยใช้สารตั้งต้นเป็นพอลิเมอร์หรือของเหลวต่างๆพ่นผ่านสนามไฟฟ้า(M. Y. Song et al., 2005) และนอกจากนี้ยังมีงานวิจัยที่นำเอาวัสดุเส้นใยนาโนที่ผลิตขึ้นได้จากเทคนิคนี้ไปผสมกับวัสดุอนุภาคเม็ดนาโนแล้วไปใช้ในเซลล์พลังงานแสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง(S. Chuangchote et al., 2008) (S. Chuangchote et al., 2009) ซึ่งพบว่าให้ประสิทธิภาพดีกว่าเซลล์ที่ใช้วัสดุอนุภาคเม็ดนาโนอย่างเดียว ซึ่งค่าηสูงสุดที่ได้คือ 10.3% ดังรูปที่ 8



รูปที่ 8 กราฟ I-V characterization ของวัสดุเส้นใยนาโน/วัสดุอนุภาคเม็ดนาโน (S. Chuangchote et al., 2008, 2009)

ตารางที่ 1 แสดงค่าพื้นที่ผิวจำเพาะและประสิทธิภาพของเซลล์พลังงานแสงอาทิตย์ในโครงสร้างต่าง ๆ

สารตั้งต้น	รูปร่าง ลักษณะโครงสร้าง	พื้นที่ผิวจำเพาะ (ตร.ม./กรัม)	J_{sc} (มิลลิแอมป์/ตร.ซม.)	V_{oc} (โวลท์)	FF	η (เปอร์เซ็นต์)	อ้างอิง
TiO_2 (ST-01*)	ลวดนาโน	10-20	5.3	0.65	0.62	2.1	[26-27]
TiO_2 (P-25*)	ลวดนาโน+อนุภาคเม็ดนาโน	390	7.1	0.725	0.71	3.66	[28-29]
TiO_2 (อะนาเทส, รูไทล์)	เส้นใยนาโน+อนุภาคเม็ดนาโน	-	11.24	0.77	0.58	5.02	[30-31]
TiO_2 (P-25*)	ท่อนาโน	270	6.26	0.704	0.66	2.9	[32]
TiO_2 (ST-01*)	ท่อนาโน	283	7.3	0.64	0.67	3.1	[27,33-34]
TiO_2 (TiBu**)	แท่งนาโน+อนุภาคเม็ดนาโน	203	13.97	0.73	0.7	7.12	[17]
TiO_2 (TiBu**)	แผ่นบางนาโน	642	16.35	0.703	0.627	7.08	[35]

<u>หมายเหตุ</u> * ไททาเนียเชิงพาณิชย์, ** ไททาเนี่ยม(4)บิวท็อกไซด์ (Titanium(IV) butoxide)

ตารางที่ 2 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ของความหนาชั้นฟิล์มและพื้นที่สัมผัสของไททาเนียในโครงสร้างต่าง ๆกับประสิทธิภาพของเซลล์พลังงานแสงอาทิตย์ (S. Chuangchote et al., 2008)

รูปร่าง ลักษณะโครงสร้าง	ความหนา (ไมครอน)	พื้นที่สัมผัสในเซลล์ (ตร.ซม.)	J_{sc} (มิลลิแอมป์/ตร.ซม.)	V_{oc} (โวลท์)	FF	η (เปอร์เซ็นต์)
อนุภาคเม็ดนาโน	8.4	0.25	14	0.7	0.68	6.69
เส้นใยนาโน+อนุภาคเม็ดนาโน	8.4	0.25	15.9	0.71	0.68	7.1
อนุภาคเม็ดนาโน	15.5	0.25	16.1	0.69	0.67	7.47
เส้นใยนาโน+อนุภาคเม็ดนาโน	15.5	0.25	17.9	0.69	0.66	8.14
อนุภาคเม็ดนาโน	15.5	0.052	18.5	0.67	0.75	9.25
เส้นใยนาโน+อนุภาคเม็ดนาโน	15.5	0.052	22.4	0.64	0.72	10.3

9. สรุป

บทความทางวิชาการฉบับนี้ได้ทบทวนและแนะนำการนำเอาท่อนาโนไททาเนียมาประยุกต์ใช้ในเซลล์พลังงานแสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงซึ่งเป็นอีกหนึ่งวิธีการนำวัสดุขนาดนาโนที่สังเคราะห์ขึ้นมาได้นำมาใช้ในงานทางด้านพลังงาน เพื่อเป็นการทดแทนพลังงานในรูปแบบอื่น ๆที่ลดน้อยลงในโลกปัจจุบัน อีกทั้งยังเป็นวัสดุอุปกรณ์ที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม ซึ่งสามารถนำไปพัฒนาและประยุกต์ใช้ในด้านต่าง ๆได้อีกในอนาคต

เอกสารอ้างอิง

[1] B. O'Regan, M. Gratzel. 1991. **Nature 235.** pp. 737-740.

[2] M. Grätzel. 2003. **Journal of Photochemistry and Photobiology C: Photochemistry Reviews 4.** pp. 145–153.

[3] M. Grätzel. 2001. **NATURE 414.** pp. 338-344.

[4] R.W. Miles, K.M. Hynes, I. Forbes. 2005. **Progress in Crystal Growth and Characterization of Materials 51.** pp. 1-42.

[5] P. Roy, D. Kim, K. Lee, E.Spiecker and P. Schmuki. 2010. **Nanoscale 2.** pp. 45–59.

[6]http://kuroppe.tagen.tohoku.ac.jp/~dsc/modules/AISIN/DSC00307s.jpg

[7]http://kuroppe.tagen.tohoku.ac.jp/~dsc/modules/AISIN/leaf_s.jpg

[8]http://kuroppe.tagen.tohoku.ac.jp/~dsc/modules/SAMSUNG/004.jpg

[9]S. V. N. T. Kuchibhatla, A. S. Karakoti, D. Bera, S. Seal.2007. **Progress in Materials Science 52.** pp. 699-913.

[10] Iijima, S. 1991. **Nature.** pp. 354-356.

[11] J.M. Macak, H. Tsuchiya, A. Ghicov, K. Yasuda, R. Hahn, S. Bauer, P. Schmuki. 2007. **Current Opinion in Solid State and Materials Science 11.** pp. 3–18.

[12] T. Kasuga, M. Hiramatu, M. Hirano, A. Hoson, K. Oyamada 1997. **Journal of Materials Research 12.** pp. 607.

[13] T. Kasuga, M. Hiramatu, A. Hoson, T. Sekino, K. Niihara. 1998. **Langmuir 14.** pp. 3160.

[14] T. Kasuga, M. Hiramatu, A. Hoson, T. Sekino, K. Niihara. 1999. **Advanced Materials 11.** pp. 1307.

[15] T. Kasuga. 2006. **Thin Solid Films 496.** pp. 141-145.

[16] Q. Chen, G. H. Du, S. Zhan, L.M. Peng. 2002**. Acta Chrystallographica Section B 58.** pp. 587.

[17] S. Pavasupree, S. Ngamsinlapasathian, M. Nakajima, Y. Suzuki, S. Yoshikawa. 2006. **Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry 184.** pp. 163-169.

[18] N.G.Park, J.Van De Lagemaat, and A.J.Frank. 2000. **J. Phys. Chem. B 104.** pp. 8989.

[19] U. Diebold. 2003. **Surface Science Reports 48.** pp. 53-229.

[20] C. K. Lee, C. C. Wang, L. C. Juang, M. D. Lyu, S. H. Hung, S. S. Liu. 2008. **Colloids and Surfaces A: Physicochem. Eng. Aspects 317.** pp. 164-173.

[21] J. Yu, H. Yu, B. Cheng, C. Trapalis. 2006. **Journal of Molecular Catalysis A: Chemical 249.** pp. 135-142.

[22] A. Ghicov and P. Schmuki. 2009. **Chemistry Communications.** pp. 2791-2808.

[23] M. Y. Song, D. K. Kim, S. M. Jo, D. Y. Kim. 2005. **Synth. Met. 153.** pp. 77-80.

[24] S. Chuangchote, H. Sagawa, S. Yoshikawa. 2008. **Applied Physics Letters 93.** pp. 033310/1-3.

[25] S. Chuangchote, H. Sagawa, S. Yoshikawa. 2009. **ACS Appl. Mater. Interfaces 1 (5).** pp. 1140-1143.

[26] R. Yoshida, Y. Suzuki, S. Yoshikawa. 2005. **Journal of Solid State Chemistry 178.** pp. 2179-2185.

[27] R. Yoshida. 2005. **Graduate School of Energy Science, Kyoto University.**

[28] S. Uchida, Y. Sanehira, R. Chiba, M. Tomiha, N. Masaki, M. Shirai. 2003. **Hydrothermal Reation and Techniques, World Scientific.** pp. 513-516.

[29] http://kuroppe.tagen.tohoku.ac.jp/~dsc/cell.html

[30] M. Y. Song, D. K. Kim, S. M. Jo, D. Y. Kim. 2005. **Synthetic Metal 153.** pp. 77-80.

[31] M. Y. Song, D. K. Kim, S. M. Jo, D. Y. Kim. 2004. **Nanotechnology 15.** pp. 1861-1865.

[32] S. Uchida, R. Chiba, M. Tomiha, N. Masaki, M. Shirai. 2002. **Electrochemistry 70.** pp. 418-420.

[33] Y. Suzuki, S. Yoshikawa. 2004. **Journal of Materials Research 19.** pp. 982-985.

[34] R. Yoshida, Y. Suzuki, S. Yoshikawa. 2005. **Materials Chemistry and Physics 91.** pp. 409-416.

[35] S. Pavasupree, S.Ngamsinlapasathian, Y. Suzuki, S. Yoshikawa. 2006. **Journal of Nanoscience and Nanotechnology 6.** pp. 3685-3692.