

เซลล์แสงอาทิตย์กับสีย้อมไวแสงจากพืชในประเทศไทย Solar Cells and Dye-sensitizer from Thai plants

พีรกิตต์ คมสัน¹

บทนำ

การใช้พลังงานเป็นปัญหาของคนทั่วโลก ที่มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและการเกิดภัยธรรมชาติในยุคปัจจุบัน นักวิทยาศาสตร์จึงแสวงหาแหล่งพลังงานที่ยั่งยืนและก่อปัญหาน้อยลง เช่น ชีวมวล น้ำ ลม ความร้อนใต้พิภพ และแสงแดด (Zervos et al., 2004) แสงแดดเป็นแหล่งพลังงานที่ได้รับความนิยม สามารถเปลี่ยนให้อยู่ในรูปพลังงานไฟฟ้าได้โดยอุปกรณ์ที่เรียกว่า เซลล์แสงอาทิตย์ (Solar cells) ซึ่งเมื่อถูกกล่าวถึงมักหมายถึงชนิดที่มีธาตุซิลิคอนเป็นองค์ประกอบหลัก ซึ่งปัจจุบันมีการนำมาผลิตไฟฟ้าในโรงเรียนตำรวจตระเวนชายแดนในพื้นที่ห่างไกลการคมนาคม

เซลล์แสงอาทิตย์ยังใช้สนองความต้องการของสังคมได้น้อย เพราะปัญหาหลักคือค่าใช้จ่ายและระยะเวลาในการผลิต มีความสงสัยในความไม่คุ้มทุน เช่น ข้อกล่าวหาว่าพลังงานที่ใช้ในการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์สิ้นเปลืองมากกว่าพลังงานไฟฟ้าที่เซลล์แสงอาทิตย์จะผลิตได้ ข้อจำกัดของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสารกึ่งตัวนำทำให้นักวิทยาศาสตร์สนใจที่จะพัฒนาอุปกรณ์ที่เปลี่ยนแสงเป็นพลังงานไฟฟ้าอีกชนิดหนึ่งคือเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง (Dye-sensitized solar cells) ซึ่งว่ากันว่ามีความคุ้มค่า (O'Regan and Grätzel, 1991) ผลิตง่ายกว่า และเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมมากกว่าเซลล์

แสงอาทิตย์แบบดั้งเดิม

บทความนี้จะกล่าวถึงเรื่องที่เกี่ยวข้องกับเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงที่อยู่ระหว่างการพัฒนาในด้านสีย้อมไวแสง ซึ่งเป็นองค์ประกอบที่ทำให้มีราคาแพง ทำให้เมื่อผนวกกับปัญหาการเสื่อมสภาพจึงไม่คุ้มค่าในการใช้งาน และเสนอความคิดเห็นเรื่องความพยายามที่จะตามหาสีย้อมไวแสงที่เหมาะสมกว่าเดิมจากข้อได้เปรียบในความหลากหลายของพรรณไม้ในประเทศไทย

แหล่งผลิตไฟฟ้าสำหรับท้องถิ่นได้อย่างไร

ก่อนอื่นเราควรพิจารณาประโยชน์ของแหล่งผลิตไฟฟ้าขนาดเล็กที่สามารถนำไปใช้ในท้องถิ่น เช่น เซลล์แสงอาทิตย์ ถ้าการพัฒนาประสบความสำเร็จประโยชน์ที่อาจเกิดขึ้นมีดังนี้

1. ลดค่าใช้จ่ายและพลังงานที่สูญเสียในการขนส่งกระแสไฟฟ้าระยะไกลของประเทศไทย
2. ลดการก่อสร้างโรงผลิตไฟฟ้าขนาดใหญ่ (ทำให้คนในท้องถิ่นยังคงมีไฟฟ้าใช้หากศูนย์รวมการผลิตไฟฟ้าเกิดภัยธรรมชาติหรือภัยสงคราม)
3. ลดการจ่ายค่าไฟฟ้าเพราะมีแหล่งพลังงานใกล้ตัว (คนในท้องถิ่นได้ประโยชน์)
4. ลดการปล่อยมลพิษ เช่น ไนโตรเจน ไดออกไซด์ ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ และสารปรอท จาก

¹ ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย กรุงเทพมหานคร
e-mail: peerakitk@hotmail.com

การผลิตไฟฟ้า เพื่อความปลอดภัยของสิ่งมีชีวิต แหล่งยาและอาหารจากความหลากหลายทางชีวภาพ ลดปัญหาการขาดแคลนน้ำ ชะลอระดับน้ำทะเลที่กำลังกลืนพื้นที่ชายฝั่ง

5. สนับสนุนเศรษฐกิจแบบพึ่งตนเองได้ ไม่รวมศูนย์อยู่ในเมืองใหญ่

เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง

เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดนี้มีองค์ประกอบที่ทำหน้าที่ต่างกันเป็นชั้นๆ จึงเปลี่ยนแสงเป็นไฟฟ้าได้ เซลล์อย่างง่ายสำหรับการสาธิตประกอบด้วย

1. กระจกใสที่นำไฟฟ้าได้ มาจากกระจกโปร่งใสที่เคลือบฟิล์มของดีบุก (IV) ออกไซด์ที่ผ่านการโด๊ป (doped SnO_2) หรือสารในกลุ่มออกไซด์ที่นำไฟฟ้าได้ (transparent conducting oxide, TCO) เพื่อส่งผ่านอิเล็กตรอน

2. ฟิล์มไทเทเนียม (IV) ออกไซด์ (TiO_2) ที่มีรูพรุน ในรูปผลึกระดับนาโน แบบอะนาเทส (anatase) ซึ่งเป็นวัสดุที่เสถียร ราคาถูก ใช้ในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดนี้ได้ดีมาก และไม่เป็นพิษ (TiO_2 ได้รับการยอมรับให้ผสมในยาสีฟัน น้ำตาลไอซิ่ง และลูกกวาด) อาจผสมวัสดุอื่น ชั้นนี้อาจมีพื้นที่ผิวมากก็ยิ่งดี เพราะความพรุนทำให้ยึดเกาะสีย้อมไวแสงได้มาก ฟิล์ม TiO_2

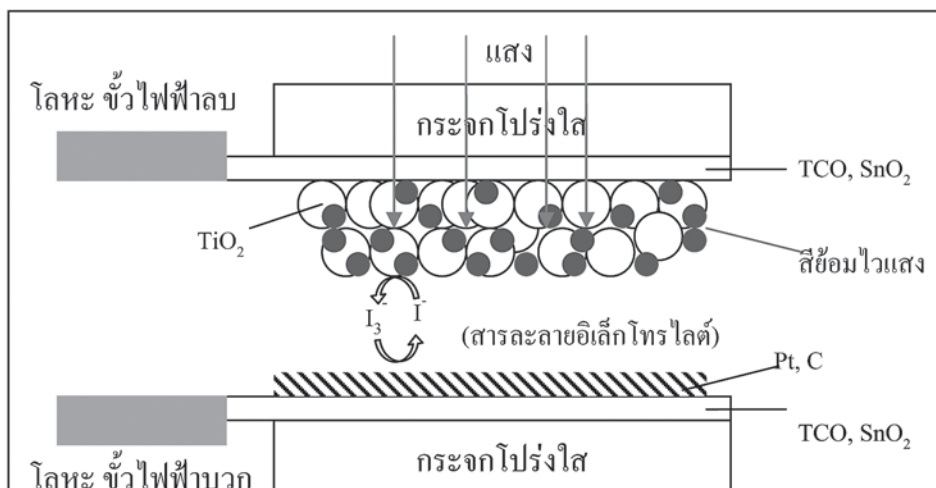
นี้ใช้เคลือบได้กระจกนำไฟฟ้าด้านที่สัมผัสแสง

3. สีย้อมไวแสง (sensitizing dye) ที่จะดูดกลืนแสงที่จะมากระทบ ประกอบด้วยโมเลกุลที่ปล่อยอิเล็กตรอนพลังงานสูงออกมาเมื่อกระทบพลังงานแสง

4. สารละลายอิเล็กโทรไลต์ ช่วยส่งผ่านอิเล็กตรอน อาจเป็นของเหลว เจล หรืออยู่ในรูปแบบอื่นตามแต่จะพัฒนาขึ้นมา สารละลายอิเล็กโทรไลต์เหลวที่นิยมใช้กันนั้นประกอบด้วยตัวทำละลายอินทรีย์เกลือไอโอไดค์ และไอโอดีน

5. ชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาบนกระจกนำไฟฟ้าด้านล่างที่จะรับอิเล็กตรอนจากวงจรภายนอกมาส่งให้สารละลายอิเล็กโทรไลต์ เพื่อส่งอิเล็กตรอนคืนให้สีย้อมไวแสง วัสดุที่ใช้อาจเป็นฟิล์มแกรไฟต์หรือแพลทินัม (Dyesol, 2007)

เมื่อแสงส่องผ่านมากระทบสีย้อมไวแสง อิเล็กตรอนในโมเลกุลสีย้อมไวแสงที่ถูกกระตุ้นไปที่ระดับพลังงานสูงก็จะส่งกระแสไฟฟ้าชั่วขณะผ่านผลึก TiO_2 ที่สีย้อมไวแสงนั้นเคลือบอยู่ แล้วเคลื่อนไปสู่ขั้วไฟฟ้า ขั้วไฟฟ้าได้แผ่นกระจกด้านที่รับแสงจึงให้กระแสชั่วขณะ เมื่อกระแสผ่านวงจรไฟฟ้าภายนอก แล้วเคลื่อนผ่านเข้ามาบนกระจกนำไฟฟ้าด้านล่าง อุปกรณ์ข้อ 5 ก็จะช่วยส่งอิเล็กตรอนผ่านสารละลายอิเล็กโทรไลต์ และกลับสู่สีย้อมไวแสง ดังรูปที่ 1 (Grätzel, 2003)



รูปที่ 1 โครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง

ปัจจุบันวัสดุที่ใช้อาจเปลี่ยนไป องค์ประกอบแต่ละส่วนสามารถเลือกใช้หรือแยกพัฒนาเพื่อปรับปรุงคุณภาพให้ดีขึ้น ให้หาง่ายและช่วยลดต้นทุน มากขึ้นได้ นักวิจัยเชื่อว่าการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดนี้ ไม่จำเป็นต้องมาจากโรงงานอุตสาหกรรมขนาดใหญ่ เบ็ดเสร็จเหมือนเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสารกึ่งตัวนำ และเชื่อว่าถ้าพัฒนาถึงระดับหนึ่ง ประชาชนจะหาซื้อวัตถุดิบมาประกอบใช้เองได้อย่างง่าย เพราะอุปกรณ์ราคาไม่แพง แต่ยังมีปัญหาในการประยุกต์ เพราะยังเป็นที่สงสัยว่าอุปกรณ์เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงจะเสื่อมสภาพเมื่อใช้ไม่นาน และต้องใช้สีย้อมไวแสงที่มีราคาแพงเกินไป

ในทางทฤษฎี Ferber et al. (1998) ได้เสนอแบบจำลองทางไฟฟ้าแบบหนึ่งของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดนี้ ส่วน Greijer et al. (2000) ศึกษาผลทางสิ่งแวดล้อมของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดนี้และเสนอว่า นี่น่าจะเป็นแหล่งผลิตไฟฟ้าทางเลือกที่ยั่งยืน แต่มีสิ่งที่จะต้องทำให้ดีขึ้น คือ ประสิทธิภาพ (efficiency) การผลิตที่ใช้พลังงานต่ำกว่านี้ และวัสดุที่ใช้ควรจะนำกลับมาใช้ใหม่ได้

ปัจจุบันมีเซลล์แสงอาทิตย์อีกแบบหนึ่งที่ท้าทายต่อการนำไปใช้ Miyasaka and Murakami (2004) รายงานอุปกรณ์ลักษณะคล้ายกันนี้ แต่เป็นรูปแบบที่ซับซ้อนขึ้น เก็บประจุไฟฟ้าในตัวเองได้ เรียกว่า “photo-capacitor” ซึ่งใช้งานได้แม้ไม่ค่อยมีแสงแดด และปล่อยกระแสไฟฟ้าได้ในที่มืด

สีย้อมไวแสง กับเรื่องน้ำเค็ม

สีย้อมไวแสงเป็นองค์ประกอบที่จะดูดกลืนแสงเพื่อเปลี่ยนเป็นพลังงานไฟฟ้ามีตัวอย่างในธรรมชาติคือ คลอโรฟิลล์ ซึ่ง Tennekone and Divigalpitiya (1981) นำมาทำเซลล์แสงอาทิตย์

สีย้อมไวแสงที่เหมาะสมในการใช้งานควรมีคุณสมบัติเบื้องต้น คือ เป็นโมเลกุลที่ดูดกลืนแสงได้มาก เป็นช่วงกว้าง ในช่วงความยาวคลื่นที่มีแสงตกลงมามาก (เช่น ถ้ามีพันธะคู่สลับเดี่ยวหรือเป็นอะโรเมติก ก็จะดี

เพราะสามารถดูดกลืนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าแล้วส่งอิเล็กตรอนผ่านพันธะไพ และยังมีความเสถียรเมื่อเกิดประจุบวกในกระบวนการ) มีคุณสมบัติในการถ่ายโอนอิเล็กตรอน ควรจะยึดเกาะบนผลึก TiO_2 ได้ดี (เช่น การมีหมู่กรดอินทรีย์ เป็นต้น) มีความคงทน คือ ไม่สลายตัวเมื่อใช้งานไปนานๆ สีย้อมไวแสงที่มีคุณสมบัติพอมักเป็นสารเชิงซ้อนของรูทีเนียม ซึ่งให้ประสิทธิภาพสูงแต่ราคาแพง เช่น $\text{Ru}(2,2'\text{-bipyridine-4,4'-dicarboxylic acid})_2(\text{NCS})_2$ หรือนิยมเรียกว่า N3 (Nazeeruddin, 1993) ซึ่งถูกใช้อย่างกว้างขวางเพราะให้ประสิทธิภาพสูง

ค่าใช้จ่ายในการผลิตสีย้อมไวแสงที่มาจากสารสังเคราะห์ทางเคมี ทำให้นักวิทยาศาสตร์บางกลุ่มค้นหาสีย้อมไวแสงที่ไม่ต้องใช้ธาตุรูทีเนียม และค้นหาแหล่งสีย้อมไวแสงจากธรรมชาติ ซึ่งนอกจากจะดูดกลืนแสงได้กว้างและมากแล้ว ข้อจำกัดเรื่องทรัพยากรและความยุ่งยากยังน้อยกว่าสารสังเคราะห์ทางเคมีอีกด้วย

นอกจากนี้ ในด้านสิ่งแวดล้อม สารเคมีสังเคราะห์จำนวนมากรวมทั้งสีย้อม ล้วนเป็นสารที่ก่ออันตรายต่อชีวิตได้ (ปัจจุบันประเทศในยุโรปห้ามนำเข้าสิ่งของที่ย้อมด้วยสีย้อม (azo dyes) ที่สามารถแตกตัวให้สารก่อมะเร็ง) มลพิษจากกระบวนการผลิตสีย้อมและน้ำทิ้งอาจทำให้ดินและน้ำเสีย การกำจัดสีย้อมใช้จ่ายสูง ในขณะที่การใช้สีย้อมจากพืชมีผลดี คือ เมื่อการผลิตพึ่งพาเทคโนโลยีขนาดใหญ่ขึ้นน้อยลง สังคมก็จะพึ่งตนเองได้อย่างยั่งยืนมากขึ้น หากโรงงานถูกทำลายแล้วเครื่องมือการผลิตสำเร็จรูปมีน้อยลง เราก็ยังมีภูมิปัญญาที่นำวัตถุดิบในธรรมชาติมาแปรรูปใช้ได้มากขึ้น

สีย้อมไวแสงสังเคราะห์หลายชนิดมีสมบัติการถ่ายโอนอิเล็กตรอนดีเพราะเป็นสารเชิงซ้อนของไอออนโลหะรูทีเนียม สารสกัดจากพืชก็อาจนำมาปรับปรุงได้ด้วยการเกิดสารเชิงซ้อนกับธาตุเหล็ก ซึ่งเป็นโลหะทรานซิชันหมู่เดียวกับรูทีเนียม ที่มีข้อดีคือ สารประกอบของเหล็กราคาไม่แพง ในวงการย้อมผ้าเรารู้กันว่า ไอออนเหล็ก Fe^{2+} เป็นตัวช่วยให้เกิดการยึดเกาะที่糸เข้มมัด

นำพิจารณาว่า อาจเป็นไปได้ว่ามีพืชบางชนิดที่มีรงควัตถุที่มีคุณสมบัติเหมาะสม ประเทศไทยน่าจะได้เปรียบในความหลากหลายของรงควัตถุ เพราะมีความหลากหลายทางชีวภาพ

รายงานการทดลองใช้สีข้อมไวแสงจากพืช

ความคิดที่จะใช้รงควัตถุจากพืชมาเป็นสีข้อมไวแสงสำหรับเซลล์แสงอาทิตย์นั้น ในประเทศไทยยังไม่ค่อยมีงานวิจัยที่จริงจัง และความคิดที่จะทำมักจะถูกคัดค้านจากนักวิชาการในเมืองใหญ่ แต่ในต่างประเทศนั้นมีรายงานการวิจัยหลายเรื่องที่ใช้สีข้อมไวแสงจากพืชโดยตรง นิยมสกัดสีข้อมจากดอกและผลของต้นไม้

ในประเทศจีน Hao et al. (2006) รายงานว่าได้นำ ข้าวเหนียวดำ (black rice) ดอกปาริฉัตร ดอก *Rosa xanthina*, พริก และสาหร่ายทะเล มาสกัดด้วยอัลกอฮอล์แล้วทำให้สีข้อมบริสุทธิ์ขึ้นด้วยโครมาโทกราฟี นำสีข้อมมาทดลองทำเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีข้อมไวแสง ได้ผลว่าสีข้อมจากข้าวเหนียวดำดีที่สุด เนื่องจากข้าวเหนียวดำมีแอนโทไซยานิน (anthocyanin) ซึ่งยึดเกาะฟิล์ม TiO_2 ได้ดี

แอนโทไซยานิน ซึ่งพบได้ง่ายในดอกไม้และผลไม้ที่มีสีเข้ม และคงทนในสภาพกรด ได้รับความสนใจมากกว่ารงควัตถุในธรรมชาติชนิดอื่น สมบัติในการยึดเกาะอนุภาค TiO_2 เกิดจากหมู่ไฮดรอกซิลในโมเลกุล งานวิจัยที่ใช้ส่วนของพืชที่มีสารในกลุ่มแอนโทไซยานินมาเป็นสีข้อมไวแสง เช่น Sirimanne et al. (2006) ใช้รงควัตถุจากผลทับทิม Dai and Rabani (2001) ใช้รงควัตถุจากผลทับทิมในตัวอย่างที่เป็นน้ำ Garcia et al. (2003a) ใช้รงควัตถุในลูกหว่า (*Eugenia jambolana* Lam) โดยสกัดจากน้ำผลไม้สด Polo et al. (2006) ศึกษาการใช้แอนโทไซยานินสีม่วงน้ำเงินจาก jaboticaba (*Myrtus cauliflora* Mart) และ calafate (*Berberies buxifolia* Lam) ส่วน Kumara et al. (2006) รายงานสีข้อมไวแสงที่สกัดจากใบชิโซ (shiso) และ Garcia et al. (2003b) ศึกษาส่วนสกัดสดจากผล chaste

tree (*Solanum americanum*, Mill.), mulberry (*Morus alba*, L.) และ cabbage-palm (*Euterpe oleracea*, Mart) มาใช้เป็นสีข้อมไวแสง เปรียบเทียบกับสารประกอบของรูทีเนียม และเสนอว่า การใช้สีข้อมไวแสงจากผลไม้ทั้งสาม เป็นทางเลือกในการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ที่รวดเร็วกว่า ง่ายกว่า และเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมมากกว่าสีข้อมสังเคราะห์ แต่ต้องรอการศึกษาความเสถียรในการใช้งาน ผลการวิจัยได้ทำให้นักวิจัยกลุ่มหนึ่งกล้าที่จะค้นหาสีข้อมไวแสงจากธรรมชาติในประเทศบราซิล ซึ่งอุดมด้วยความหลากหลายทางชีวภาพต่อไป (Polo et al., 2004)

Amao et al. (2004) รายงานการนำอนุพันธ์ของคลอโรฟิลล์ที่ผ่านการไฮโดรไลซ์ให้หมู่กรดอินทรีย์ซึ่งจับยึด TiO_2 ได้ดี มาใช้เป็นสีข้อมไวแสงในเซลล์แสงอาทิตย์ ส่วน Yamazaki et al. (2007) ใช้สารในกลุ่มแคโรทีนอยด์ (carotenoids) เป็นสีข้อมไวแสง

Tennakone et al. (1998a) รายงานการใช้สีข้อมไวแสงพวกแทนนินและสารประกอบฟีนอลิก ได้ผลที่น่าสนใจ มีรายงานว่าสารกลุ่มนี้ (ซึ่งพบในชาดำ) มีคุณสมบัติที่ดีเมื่อยึดเกาะบน TiO_2 เพราะเกิดสารเชิงซ้อนกับไอออนไทเทเนียม (Tennakone et al., 1996)

Tennakone et al. (1998b) รายงานการใช้รงควัตถุซานทาลิน (santalin) ที่แยกจากไม้จันทน์แดง (*Pterocarpus santalinus*) เป็นสีข้อมไวแสงในเซลล์แบบของแข็ง ทดสอบได้กระแสไฟฟ้าและความต่างศักย์ที่สูงในระดับที่น่าพอใจ และซานทาลินที่เคลือบบน TiO_2 ระดับนาโนมีความเสถียรสูง เพราะเกิดสารเชิงซ้อนที่แข็งแรงกับ TiO_2

ในประเทศไทย Wongcharee et al. (2007) รายงานการศึกษาเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีข้อมไวแสงที่ใช้สารสกัดจากกระเจี๊ยบ และดอกอัญชัน ได้ผลว่ากระเจี๊ยบให้ประสิทธิภาพดีกว่าดอกอัญชันและสารผสมแตกต่างจากผลการทดลองของ จักรพงษ์ ศรีแก้วเลิศ และคณะ ที่กล่าวว่าอัญชันให้กำลังไฟฟ้าดีที่สุด รองลงมาคือ กระเจี๊ยบ ใบยอ และใบอ่อนสัก (กระทรวงพลังงาน, 2550)

พืชที่ให้สีในประเทศไทย

พืชเป็นแหล่งสารอินทรีย์ที่หลากหลาย คนไทยมีภูมิปัญญาการทำสีผสมอาหารและสีย้อมผ้าจากพืชมากมาย ตัวอย่างสีผสมอาหารจากพืช เช่น กลีบเลี้ยงกระเจี๊ยบ (*Hibiscus sabdariffa* L.) ให้สีแดง ดอกแก่คำฝอย (*Carthamus tinctorius* L.) ให้สีเหลือง เมล็ดคำแสด (*Bixa orellana* L.) ให้สีส้ม ใบเตยสด (*Pandanus* ssp.) ให้สีเขียว แก่นไม้ฝาง (*Caesalpinia sappan* L.) ให้สีชมพูเข้ม ดอกอัญชันสด (*Clitoria ternatea* L.) ให้สีม่วง ตัวอย่างสีย้อมผ้าจากพืช เช่น แก่นขนุน (*Artocarpus heterophyllus* Lam.) ให้สีเหลือง เปลือกต้นสมอ (*Terminalia chebula* Retz.) ให้สีดำ เปลือกต้นนุ่น (*Ceiba pentandra* (L.) Gaertn.) ให้สีชมพูเป็นต้น (สำนักงานคณะกรรมการอาหารและยา, 2540)

แก่นไม้ของต้นฝาง (*Caesalpinia sappan* L.) เมื่อแช่น้ำร้อนจะให้สีแดงอย่างรวดเร็ว ใช้น้ำยาอูทัย มีวิธสกัดสีคือ สับให้เป็นชิ้นเล็กๆ นำไปต้มและแช่น้ำทิ้งไว้เป็นสัปดาห์ มีรงควัตถุชนิดหนึ่งคือ บราซิลิน (brazilin) ซึ่งเป็นโมเลกุลที่มีหมู่ฟังก์ชันที่จับยึด TiO_2 ได้ดี เนื้อในฝักถั่ว หรือ ราชพฤกษ์ (*Cassia fistula* Linn.) ละลายน้ำให้สีเข้มได้ โดยเฉพาะในน้ำร้อนจะให้สีเข้มได้ดีมาก สารชนิดหนึ่งที่ทำให้มีสีคือกรดฟิสทูลิก (fistulic acid) (Bahorun, 2005)

พืชที่มีแอนโทไซยานินสูงมากชนิดหนึ่งคือ มันเสา (*Dioscorea alata* L.) ชนิดที่มีหัวสีม่วง รากสีชมพู ผู้เขียนเคยเห็นการผ่าหัวมันเสานขนาดใหญ่ที่ขุดจากจังหวัดระยอง เนื้อในมียางสีม่วงเข้มปริมาณมาก มันเสาเป็นพืชที่มีหลายแห่งทั่วโลก บางประเทศใช้ผลิตไอศกรีมและขนมหวาน ในประเทศไทยก็ขึ้นทั่วไป ภาคเหนือเรียกว่า มันเสียม ภาคใต้เรียกว่า มันทุ เมื่อปลูกใช้เวลา 6-12 สัปดาห์จึงเริ่มเกิดหัว (มีจำนวนโครโมโซม $2n = 20, 30, 40, \dots, 80$)

พืชที่มีแอนโทไซยานินเสถียรเป็นพิเศษถึงกับมีสิทธิบัตรที่สกัดรงควัตถุมาใช้สำหรับอาหารและเครื่องสำอางรูป คือ ก้ามปูหลอด (*Tradescantia zebrina*

Hort. ex Bosse.) ไม่ประดับคลุมดินแปลกตาในวงศ์ผักปลาน (Commelinaceae) ซึ่งมีสารแอนโทไซยานินที่มีความเสถียรเป็นพิเศษ (Brouillard, 1981 และ Teh and Francis, 1988) เจริญเติบโตง่าย มีสรรพคุณทางสมุนไพรเล็กน้อย มีสิทธิบัตรที่นำแอนโทไซยานินที่มีความเสถียรเป็นพิเศษจากพืชในวงศ์ผักปลานหลายชนิดมาสกัดใช้เป็นรงควัตถุสำหรับอาหารและเครื่องสำอาง (Hidekazu, 1986)

รงควัตถุชนิดหนึ่งที่ผู้เขียนคิดว่าทำหายต่อการนำมาทำเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดนี้คือ “คราม” (indigo) ซึ่งเป็นรงควัตถุในทางเคมียีนส์ ผ้ามืดห้อม และผลิตภัณฑ์มากมาย มักเป็นพืชในสกุล *Indigofera* ซึ่งมีหลากหลายในประเทศไทย แต่คนไทยนิยมใช้ต้นคราม (*Indigofera tinctoria* Linn.) และ ห้อม (*Baphicacanthus cusia* Brem.) สำหรับการย้อมผ้า ได้เป็นเจดสีตั้งแต่เขียวเข้มไปจนถึงม่วง (ต่างจากสีครามสังเคราะห์จากอุตสาหกรรมที่ทำได้เพียงสีเขียว) มีขบวนการย้อมผ้าเรียกว่า “หม้อมห้อม” ในภูมิปัญญาพื้นเมืองในหลายชนเผ่า ลักษณะที่น่าสนใจของการย้อมสีครามก็คือ เมื่อเค็ดใบครามผสมน้ำ น้ำนั้นยังไม่มีสี แต่เมื่อนำผ้าจุ่มในน้ำแล้วยกขึ้นมาให้ถูกอากาศ ผ้านั้นจะมีสีครามติดในเนื้อผ้า โดยที่สีครามไม่ละลายน้ำ เนื่องจากพืชในกลุ่มนี้มีสารพวกที่เรียกว่า อินดิแคน (indican) ซึ่งละลายน้ำได้ แต่เมื่อมีการทำปฏิกิริยากับอากาศจะเปลี่ยนเป็นสาร “คราม” (indigo) ซึ่งไม่ละลายน้ำ นี่จึงเป็นสมบัติพิเศษที่อาจเป็นไปได้ว่าการใช้สีครามจากพืชจะยึดเกาะบน TiO_2 อย่างที่การใช้สีสังเคราะห์ไม่อาจทำได้

แหล่งรงควัตถุอื่นๆ ได้แก่ สารสีด่างจากเปลือกมะพร้าวเผา ที่ใช้ทำขนมเปียกปูน ละลายน้ำเป็นสีด่างกรองได้ หัวหอมมีรงควัตถุบางชนิดซึ่งโครงสร้างโมเลกุลน่าสนใจเช่นกัน เปลือกหุ้มเมล็ดกาแฟ (*Coffea* ssp.) มีสารประกอบฟีนอลิก ผลสุกของกมลา (*Mallotus philippensis* (Lamk) Muell.Arg.) มี รือทเทลอรีน (rottlerin) ซึ่งโมเลกุลมีหมู่ฟีนอลอยู่หลายตำแหน่งอยู่เกือบร้อยละ 11

คำแสด (*Bixa orellana* L.) ซึ่งมีมากทางภาคเหนือ มีรงควัตถุชื่อ บิซิน (bixin) ซึ่งเป็นแคโรทีนอยด์ที่มีหมู่กรดอินทรีย์ ในเยื่อหุ้มเมล็ด จึงใช้ผลิตรงควัตถุโดยนำเมล็ดมาแช่น้ำ กรองเอาน้ำทิ้งไว้ระยะหนึ่งจะมีผงสีส้มตกตะกอน ใช้ในการย้อมผ้าและแต่งสีอาหาร

แก่นไม้ขนุนมีสารโมริน (morin) ซึ่งโครงสร้างโมเลกุลน่าสนใจ ดอกทองกวาว (*Butea monosperma* (Lam.) Taubert) มีสารบิวทีน (butin) ดอกกรรณิการิ (*Nyctanthes arbortristis* L.) มีรงควัตถุชื่อ นิกแทนทิน (nyctanthin) ดอกคำฝอยมีสารคาร์ตามิน (carthamin) ขมิ้นชัน (*Curcuma longa* L.) ซึ่งเป็นสมุนไพรประจำบ้านเพราะมีฤทธิ์ทางเภสัชมาก มีสารกลุ่มเคอร์คิวมิน (curcumin) เปลือกมะม่วง (*Mangifera* spp.) ให้สีเหลือง ใช้ย้อมผ้าและงานจักสาน ประดู่บ้าน (*Pterocarpus indicus* Willd.) มีสารซานทาลิน เปลือกและผลมะม่วงหิมพานต์ (*Anacardium occidentale*) ให้สีดำ ลำต้นขมิ้นเครือ (*Arcangelisia flava* (L.) Merr.) มีสารเบอร์เบอรีน (berberine)

พืชที่ให้สีย้อมที่เป็นที่รู้จักได้แก่ สะเดา (*Azadirachta indica* A. Juss. var. *siamensis* Val.) ตะแบก (*Lagerstroemia floribunda* Jack.) กระถินบ้าน (*Leucaena* spp.) เปลือกนนทรี (*Peltophorum pterocarpum* (DC.) K. Heyne) เปลือกโกกงาง (*Rhizophora* spp.) รากยอบ้าน (*Morinda citrifolia* L.) ขางจากเปลือกคันรง (*Garcinia hanburyi* Hook.f.) ใบตัวแดง (*Cratogeomys formosum* (Jack) Dyer ssp.) ผลมะเกลือ (*Diospyros mollis* Griff.) ผลสมอพิเภก (*Terminalia bellerica* (Gaertn.) Roxb.) ตะโก (*Diospyros rhodocalyx* Kurz.), มะพลับ (*Diospyros malabarica* (Desr.) Kostel), ยูคาลิปตัส (*Eucalyptus* spp.) ตะแบก (*Lagerstroemia floribunda* Jack.) มะขาม (*Tamarindus indica* L.) ฝรั่ง (*Psidium guajava* L.) สาบเสือ (*Eupatorium odoratum* L.) สีเสียดเหนือ (*Acacia catechu* (L.f.) Willd.) หนูกวาง (*Terminalia catappa* L.) เทียนดอก (*Impatiens balsamina* L.) เทียนกิ่ง (*Lawsonia inermis* L.) พุดซ้อน เสม็ดขนุน (*Syzygium* spp.) พลองกินลูก

(*Memecylon ovatum* Sm.) (เล็มเมนส์, 2544)

บนคอกแม่สะลอง ชนกลุ่มน้อยเผ่าเย้า อาข่า และลีซอ มีชีวิตที่เกี่ยวกับพืชนานาพรรณ นอกจากจะใช้สีครามย้อมผ้าจากห้อมและพืชสกุล *Indigofera* แล้ว ยังใช้หัวว่านหอมแดง (*Eleutherine americana* Merr.) ย้อมเปลือกไข่ให้เป็นสีแดง เปลือกต้นเก็ด (*Dalbergia toliacen*) ใช้ย้อมผ้า เปลือกต้นผ้า (*Callicarpa arborea* Roxb.) ให้สีแดง (ชูศรี และ ปรีทรรณ ไตรสนธิ, 2542)

ยังมีพืชอีกมากมายตามท้องถิ่นต่างๆ ที่ยังไม่เป็นที่รู้จัก บางทีสีย้อมไวแสงที่น่าสนใจอาจจะอยู่ในวัชพืชใกล้ตัวที่คิดไม่ถึงก็เป็นได้

การทดสอบเบื้องต้น

วิธีสังเกตอย่างหนึ่งเกี่ยวกับพืชที่ให้รงควัตถุคือ ชิ้นส่วนพืชบางชนิดละลายน้ำร้อนหรือตัวทำละลายแล้ว ให้สีละลายออกมาได้ทันที เช่น ไม้ฝางแดง ดอกคำฝอย ผลสมอทะเล พริกไทยดำ เปลือกมังคุด ฯลฯ แต่เมื่อนำมาย้อมสี TiO_2 อาจให้สีที่ต่างออกไป บางครั้งสารละลายชิ้นส่วนพืชไม่ค่อยมีสี แต่สามารถย้อมสีได้ ผู้เขียนลองแช่กระจกที่เคลือบ SnO_2 เคลือบ TiO_2 ที่มีรูพรุน (ได้จากนักวิจัยในสำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ) ในน้ำดอกอัญชัน ประมาณสองชั่วโมงเกิดการย้อมสีเป็นสีเหลือง แต่ถ้าเปลี่ยนตัวทำละลายเป็นเอทานอลจะได้สีน้ำเงิน

ผู้เขียนได้นำชิ้นส่วนพืชกว่าสิบชนิดมาทดลองย้อมสีบนแผ่นกระจกดังกล่าว เพื่อสำรวจพืชที่มีความเป็นไปได้ที่จะใช้เป็นสีย้อมไวแสง ได้ผลการทดลองจากการประมาณด้วยสายตาว่า ชิ้นส่วนพืชที่ย้อมให้ TiO_2 มีสีเข้มได้เมื่อนำไปเป็นตัวทำละลายได้แก่ เปลือกไม้มะพลับ พงดอกคำฝอย เปลือกเงาะสด เปลือกมังคุดสด กลีบดอกบัวแห้ง และแก่นไม้ฝางแดง สำหรับแก่นไม้ฝางแดงแม้จะให้สีชมพูเข้มได้อย่างรวดเร็วง่ายดาย แต่ถูกฟอกสีได้จนหมดภายในเวลาไม่กี่ชั่วโมงเมื่อโดนแสงแดดโดยตรง เช่นเดียวกับขมิ้นชัน เปลือกไม้มะพลับย้อมสีได้เข้มกว่าพงดอกคำฝอยเล็กน้อย สีย้อมจากพงดอกคำฝอยก็ถูกฟอกสีได้

ส่วนสีส้มจากเปลือกมะพลับคงทนกว่าพืชชนิดอื่น การย้อมสีจากน้ำที่แช่เปลือกไม้มะพลับถ้าแช่ไว้ 4 ชั่วโมง จะได้สีเข้มกว่าที่แช่ไว้ 2 ชั่วโมง

ชิ้นส่วนพืชอีกสามชนิดที่น่าสนใจ คือ กลีบดอกบัวแห้ง เปลือกเงาะสด และเปลือกมังคุดสด ซึ่งได้ข้อมูลจากการทดลองโดยนำชิ้นส่วนพืชแช่น้ำร้อน นำกระจกดังกล่าวแช่ไว้หนึ่งคืน ได้สีเข้มค่อนข้างชัดเจน เปลือกมังคุดให้สีสำหรับการฟอกสีเมื่อโดนแสงแดดนั้น ยังไม่ได้ทำการทดลอง

ยังมีพืชที่ให้สีย้อมไวแสงได้มากมายที่ยังไม่เคยมีการทดลองประกอบเซลล์แสงอาทิตย์ ชิ้นส่วนพืชนั้นอาจหาได้จากพืชสดในท้องถิ่น ตลาด ร้านขายสมุนไพร หรือสวนรุกขชาติต่างๆ

ข้อจำกัดและทางแก้

อุปสรรคที่สำคัญของเซลล์แสงอาทิตย์คือการเสื่อมสภาพ เนื่องจากอนุภาค TiO_2 ทำความสะอาดตัวเองได้เมื่อได้รับรังสีอัลตราไวโอเลต สารอินทรีย์ที่ยึดเกาะจึงเสื่อมสลายระหว่างการใช้งาน ดังที่ Vautier et al. (2001) รายงานการเร่งการสลายตัวของสีกครามในกระบวนการที่มีอนุภาค TiO_2 และรังสีอัลตราไวโอเลตเพื่อใช้ขจัดน้ำเสียในอุตสาหกรรมเกี่ยวกับการย้อมสี Sommeling et al. (2004) รายงานการทดสอบความเสถียรในระยะยาว และกล่าวว่า การพัฒนาในด้านความเสถียรมีอิทธิพลอย่างแรงต่อการใช้ในทางพาณิชย์ งานวิจัยที่น่าสนใจ คือ Zhang et al. (2007) รายงานปัญหาการเสื่อมสภาพรวดเร็วของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดนี้ในรูปของแข็ง ซึ่งจะไม่เกิดขึ้นเมื่อกรองรังสีอัลตราไวโอเลตออกไป และได้แก้ไขปัญหาคด้วยการเคลือบขี้ไฟฟ้า TiO_2 ที่มีรูพรุนด้วยชั้นบางเป็นพิเศษของแมกนีเซียมออกไซด์ ซึ่งสามารถป้องกันปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยแสงของ TiO_2 ได้

จากการทดลองให้มีหมู่กรดอินทรีย์ในโมเลกุลสีย้อมไวแสง มีการเสนอว่า การยึดเกาะของหมู่กรดอินทรีย์ในโมเลกุลสีย้อมไวแสงบนอนุภาค TiO_2 มีอิทธิพลต่อความเสถียรมาก (Kang et al, 2000)

Tributsch (2004) ก็วิเคราะห์ว่าเรื่องการยึดเกาะบนพื้นผิวมีอิทธิพลต่อการเสื่อมสภาพ

วิธีแก้การเสื่อมสภาพอีกทางหนึ่งคือ ทำให้สีย้อมไวแสงเกิดสารเชิงซ้อนกับโลหะ เกียรติภูมิ รอดพันธ์ (2549) นำสีจากลูกหว่า (*Syzygium cumini* (Linn.) Skeets) และขมิ้นชัน (*Curcuma longa* Linn.) มาใช้เป็นสีย้อมไวแสง ได้ค่าการดูดกลืนแสงของสาร สกัตรควัตถุในช่วง 300-600 nm และปรับปรุงความเสถียรและประสิทธิภาพของสารสักรัศธรรมชาติดังกล่าว โดยทำให้เกิดสารเชิงซ้อนของโมเลกุลสีย้อมกับไอออนของโลหะ เช่น เหล็ก ทองแดง และสังกะสี

การเสื่อมสภาพเป็นจุดอ่อนที่ใหญ่ ถ้าสามารถทำให้เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดนี้ใช้งานเป็นเวลานานพอในระยะยาวได้ ก็จะทำนายต่อการพัฒนาให้เป็นแหล่งผลิตไฟฟ้าของชาวโลก

สีย้อมไวแสงพอลิเมอร์สังเคราะห์

นอกจากสีย้อมไวแสงจากพืช สีย้อมไวแสงอีกกลุ่มหนึ่งที่นำลองศึกษาเป็นแนวทาง คือ สารอินทรีย์ที่ดูดกลืนแสงได้มากเป็นพิเศษ เช่น พอลิเมอร์นำไฟฟ้า (conducting polymer) ซึ่งมีพันธะคู่สลับเดี่ยวตลอดแนวของโมเลกุลซึ่งเป็นสายยาว หรือโพลิโกลเมอร์ (รงควัตถุเมลานินที่ทำให้เส้นผมและผิวหนังคนมีสีเข้ม ก็เป็นพอลิเมอร์นำไฟฟ้า มีจุลินทรีย์หลายชนิดผลิตเมลานินได้)

ผู้เขียนเคยมีความตั้งใจจะใช้สีย้อมไวแสงสังเคราะห์ในกลุ่มพอลิไทโอฟิน (polythiophene) ที่ปรับปรุงหมู่ฟังก์ชันให้ยึดเกาะบน TiO_2 ได้ดี โดยออกแบบให้มีหมู่กรดอินทรีย์และให้ส่วนที่เป็นพันธะคู่สลับเดี่ยวอยู่ชิดกับส่วนที่ยึดเกาะ TiO_2 มากที่สุด แนวความคิดนี้มีคนรายงานผลงานวิจัยมาก่อนแล้ว แต่ยังมีข้อบกพร่องที่ไม่ตรงกับแนวคิดของผู้เขียน กล่าวคือ Liu et al. (2004) นำพอลิเมอร์นำไฟฟ้ามาใช้เป็นสีย้อมไวแสง แต่ยังไม่มีการยึดเกาะบน TiO_2 ที่ดีพอ เพราะเป็นการใช้ฟิล์มพอลิไทโอฟินเคลือบเป็นแผ่นบนชั้น TiO_2 และยังไม่ได้ประสิทธิภาพที่น่าสนใจ ส่วน

Yanagida et al. (2004) แม้จะใช้พอลิเมอร์นำไฟฟ้าที่ละลายในตัวทำละลายได้มาใช้เป็นสีย้อมไวแสง แต่ผู้เขียนสังเกตว่าพันธะคู่บนหมู่กรดอินทรีย์ที่ยึดเกาะกับ TiO_2 นั้นไม่เชื่อมต่อกับพันธะไพอตามแนวพันธะคู่สลับเดี่ยว ทำให้การส่งผ่านอิเล็กตรอนระหว่างสีย้อมไวแสงกับชั้น TiO_2 ไม่ค่อยดีเท่าที่ควร

แนวความคิดของผู้เขียนข้างต้นนั้น ได้รับข้อโต้แย้งว่า พอลิเมอร์มีโมเลกุลยาว อาจมีความหนืดสูงไม่สามารถแทรกตัวเข้าไปยึดเกาะกับ TiO_2 ควรแก้ไขโดยเปลี่ยนแทนที่จะทำจากรูปของพอลิเมอร์ เป็นโอลิโกเมอร์ที่มีความยาวต่างๆ ดังนั้น ผู้เขียนได้เคยวางแผนการทดลองที่จะประกอบเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้สีย้อมไวแสงเป็นพอลิเมอร์หรือโอลิโกเมอร์ของ thiophene-3-carboxylic acid ซึ่งน่าจะให้คุณสมบัติตามที่ต้องการ แต่งานวิจัยนี้มีเหตุให้ต้องเลิกทำไปเสียก่อนระหว่างงานเคมีอินทรีย์สังเคราะห์ (ความล่าช้าที่เกิดขึ้นมาจากความผิดพลาด คือ ได้เลือกสังเคราะห์มอนอเมอร์ผ่าน 3-cyanothiophene ซึ่งเป็นของเหลวที่ระเหยไปหมดระหว่างการแยกสาร)

แต่สิ่งที่น่าสนใจในการค้นหาสีย้อมไวแสงถ้าทำสำเร็จก็คือ พอลิเมอร์ของ thiophene-3-carboxylic acid อาจนำมาใช้ในการประกอบอุปกรณ์ระดับชาวบ้านได้ถ้าไม่เป็นพิษ เพราะละลายน้ำได้ (Kim et al., 1999 และ Englebienne and Weiland, 1996) อย่างไรก็ตาม เซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้สารอินทรีย์กลุ่มนี้มีหลายรูปแบบที่อยู่ระหว่างการศึกษาในวงการวิจัย

การใช้เป็นสื่อการเรียนรู้วิทยาศาสตร์

เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงมาจากอุปกรณ์ที่ประกอบได้ง่ายและมีสีสันทำทาบความอยากรู้อยากเห็น จึงสามารถใช้เป็นของเล่นที่ให้ความสนุกสนาน กระตุ้นความคิดและความรู้สำหรับนักเรียนชั้นมัธยมหรือระดับที่โตกว่าได้ นักเรียนสามารถนำส่วนของพีชชนิดต่างๆ ที่มีสีสันมาสกัดน้ำสีหรือละลายรงควัตถุสำหรับใช้เป็นสีย้อมไวแสงได้อย่างง่าย เพียงจุ่มแผ่นกระจกนำไฟฟ้าที่เคลือบ TiO_2 ลงในสารละลายสีนั้น

ซึ่งอาจสกัดจากพืชผัก มาประกอบเป็นเซลล์แสงอาทิตย์ผลิตไฟฟ้าและทดสอบประสิทธิภาพเปรียบเทียบกับ การประกอบที่ง่ายแต่มีหลักการสามารถทำให้เยาวชนมีแรงบันดาลใจที่ดีได้ นอกจากนี้ นักวิจัยยังได้แรงคโลจากการทดลองดังกล่าวที่จะช่วยกันคิดแบ่งหน้าที่พัฒนาองค์ประกอบต่างๆ ของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง

คำถามที่ว่า เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดนี้จะพัฒนาให้มีความเหมาะสมพอที่จะเป็นแหล่งพลังงานของสังคมได้หรือไม่ เป็นคำถามที่สำคัญ แต่สิ่งที่สำคัญไม่แพ้กัน คือ การเรียนรู้ และการปลูกฝังให้เยาวชนและนักวิจัยมีใจรักที่จะคิดค้นงานวิจัยที่มีประโยชน์ต่อสังคมและสิ่งแวดล้อม

บทสรุป

ประเทศไทยมีแหล่งสีย้อมไวแสงจากพืชที่นำทำการทดลองใช้ในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงตั้งแต่ในกลุ่มแอนโทไซยานิน จนถึงรงควัตถุที่หลากหลายจากพืชที่ยังไม่เป็นที่รู้จักขณะเดียวกันก็ต้องหาทางป้องกันการเสื่อมสภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดนี้ งานทั้งสองส่วนเป็นความหวังสำหรับแหล่งผลิตไฟฟ้าที่อาจเป็นไปได้ เพื่อวิถีชีวิตที่ยั่งยืนและส่งผลดีต่อสิ่งแวดล้อม

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ โครงการพัฒนาอัจฉริยภาพทางวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีสำหรับเด็กและเยาวชน ของสำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ และนายชัยยุทธ แซ่ก้ง สำหรับโอกาสในการเรียนรู้ของผู้เขียน

ผลบุญที่เกิดขึ้นจากการเขียนบทความนี้ จึงมีแต่ผู้มีส่วนร่วมในการค้นคว้าวิจัยในเรื่องที่กล่าวมาทุกเรื่อง และผู้มีส่วนช่วยเหลือทุกคน

เอกสารอ้างอิง

- กระทรวงพลังงาน. การประกวดโครงการ Solar Challenge (อ้างเมื่อ 16 กรกฎาคม 2550) ทางเว็บไซต์ <http://www.energy.go.th/th/childrenCornerProject.asp>.
- เกียรติภูมิ รอดพันธ์. (2549). บทคัดย่องานประชุมวิชาการวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี (อ้างเมื่อ 12 มีนาคม 2550) ทางเว็บไซต์ http://www.ipst.ac.th/dpst/meeting49s/abstract/P_CHE.pdf หน้า 3.
- ชูศรี ไตรสนธิ และ ปรีทรรศน์ ไตรสนธิ (2542). การศึกษาพฤกษศาสตร์พื้นบ้านของชนกลุ่มน้อยเผ่าต่างๆ บนดอยแม่สะลอง. ภาควิชาชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- สำนักงานคณะกรรมการการสาธารณสุขมูลฐาน. (2540). ผักพื้นบ้าน ความหมายและภูมิปัญญาของสามัญชนไทย. กรุงเทพฯ. สถาบันการแพทย์แผนไทย กรมการแพทย์ กระทรวงสาธารณสุข
- อาร์.เอช.เอ็ม.เจ. เล็มเมนส์. (2544). พืชที่ให้สีธรรมชาติและแทนนิน. กรุงเทพฯ: สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย.
- Amao, Y., Yamada, Y. and Aoki, K. (2004). *J. Photochem. Photobiol. A: Chemistry*. 164: 47-51.
- Bahorun, T., Neergheen, V.S. and Aruoma, O.I. (2005). *African Journal of Biotechnology*. 4(13): 1530-1540.
- Brouillard, R. (1981). *Phytochemistry*. 20: 143-145.
- Dai, Q. and Rabani, J. (2001). *Chem. Commun*. 20: 2142-2143.
- Dyesol company. (Accessed 2 June 2007) <http://www.dyesol.com>.
- Englebienne, P. and Weiland, M. (1996). *J. Immunological Methods*. 191: 159-170.
- Ferber, J., Stangl, R. and Luther, J. (1998). *Solar Energy Material and Solar Cells*. 53: 29-54.
- Garcia, C.G., Polo, A.S. and Iha, N.Y.M. (2003a). *An. Acad. Bras. Ciênc*. 75(2).
- Garcia, C.G., Polo, A.S. and Iha, N.Y.M. (2003b). *J. Photochem. Photobiol. A: Chemistry*. 160: 87-91.
- Grätzel, M. (2003). "Dye-sensitized solar cells" *J. Photochem. Photobiol. C: Photochem. Rev*. 4: 145.
- Greijer, H., Karlson, L., Lindquist, S. and Hagfeldt, A. (2000). *Renewable Energy*. 23(1): 27-39.
- Hao, S., Wu, J., Huang, Y. and Lin, J. (2006). *Sol. Energy*. 80: 209-214.
- Hidekazu, I. (1986). Patent. JP61085476.
- Kang, T., Chun, K., Hong, J.S., Moon, S. and Kim, K. (2000). *J. Electrochem. Soc*. 147(8): 3049-3053.
- Kim, B., Chen, L., Gong, J.P. and Osada, Y. (1999). *Macromolecules*. 32: 3964-3969.
- Kumara, G.R.A., Kaneko, S., Okuya, M., Onwona-Agyeman, B., Konno, A. and Tennakone, K. (2006). *Solar Energy Materials and Solar Cells*. 90(9): 1220-1226.
- Liu, J., Kadnikova, E.N., Liu, Y., McGehee, M.D. and Frechet, J.M.J. (2004). *J. Am. Chem. Soc*. 126: 9486-9487.
- Miyasaka, T. and Murakami, T.N. (2004). *Applied Physics Letters*. 85(17): 3932-3934.
- Nazeeruddin, M.K., Kay, A., Rodicio, I., Humphry-Baker, R., Mueller, E., Liska, P., Vlachopoulos, N. and Graetzel, M. (1993). *J. Am. Chem. Soc*. 115(14): 6382-6390.
- O'Regan, B. and Grätzel, M. (1991). *Nature*. 353: 737-740.

- Polo, A.S., Itokazu, M.K. and Iha, N.Y.M. (2004). Coordination Chemistry Reviews. 248: 1343-1361.
- Polo, A.S. and Iha, N.Y.M. (2006). Solar Energy Materials and Solar Cells. 90(13): 1936-1944.
- Sirimanne, P.M., Senevirathna, M.K.I., Premalal, E.V.A., Pitigala, P.K.D.D.P., Sivakumar, V. and Tennakone, K. (2006). J. Photochem. Photobiol. A: Chemistry. 177: 324-327.
- Sommeling, P.M., Speth, M., Smit, H.J.P., Bakker, N.J. and Kroon, J.M. (2004). J. Photochem. Photobiol. A: Chemistry. 164: 137-144.
- Teh, L.S. and Francis, F.J. (1988). Journal of Food Science. 53(5): 1580-1.
- Tennekone, K. and Divigalpitiya, W.M.R. (1981). Japanese J. Applied Physics. 20: 299-300.
- Tennakone, K., Kumara, G.R.R.A., Kumarasinghe, A.R., Sirimanne, P.M. and Wijayantha, K.G.U. (1996). J. Photochem. Photobiol. A: Chemistry. 94: 217-220.
- Tennakone, K., Kumara, G.R.R.A., Wijayantha, K.G.U., Kottegoda, I.R.M., Perera, V.P.S. and Aponso, G.M.L.P. (1998a). Semicond. Sci. Technol. 13: 134-138.
- Tennakone, K., Kumara, G.R.R.A., Kottegoda, I.R.M., Perera, V.P.S. and Weerasundara, P.S.R.S. (1998b). J. Photochem. Photobiol. A: Chemistry. 117: 137-142.
- Tributsch, H. (2004). Coordination Chemistry Reviews. 248: 1511-1530.
- Vautier, M., Guillard, C. and Herrmann, J.M. (2001). J. Catalysis. 201: 46-59.
- Wongcharee, K., Meeyoo, V. and Chavadej, S. (2007). Solar Energy Materials and Solar Cells. 91(7): 566-571.
- Yamazaki, E., Murayama, M., Nishikawa, N., Hashimoto, N., Shoyama, M. and Kurita, O. (2007). Solar Energy. 81(4): 512-516.
- Yanagida, S., Senadeera, G. K. R., Nakamura, K., Kitamura, T. and Wada, Y. (2004). J. Photochem. Photobiol. A: Chem. 166: 75-80.
- Zervos, A., Lins, C. and Schafer, O. (2004). Tomorrow's world 50% renewables scenario for 2040. Renewable Energy World. 7(4): 238-245.
- Zhang, X., Taguchi, T., Wang, H., Meng, Q., Sato, O. and Fujishima, A. (2007). Research on Chemical Intermediates. 33(1-2): 5-11.

