การทำความสะอาดโดยตัวเร่งปฏิกิริยาทางแสงด้วยไททาเนียมไดออกไซด์

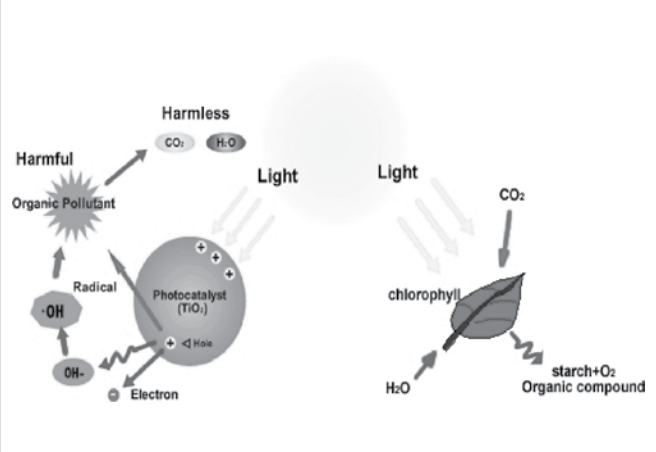
สรรค์ จิตรใคร่ครวญ

สินค้าและผลิตภัณฑ์ที่ใช้ในชีวิตประจำวันของเราหลาย ๆ ชนิด เช่น เครื่องปรับอากาศ ตู้เย็น เครื่องซักผ้า เสื้อผ้า แผ่นกระเบื้องเซรามิคปูพื้น/ผนัง สีทาบ้าน ที่ผู้ผลิตสินค้าได้มีการพัฒนาคุณสมบัติโดยการติดตั้งส่วนประกอบพิเศษให้สามารถทำความสะอาดหรือฆ่าเชื้อโรคได้เมื่อของเหลวหรืออากาศที่มีมลพิษและจุลินทรีย์ไหลผ่านหรือสัมผัสกับพื้นผิวของส่วนประกอบพิเศษนั้น

ไททาเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) เป็นสารกึ่งตัวนำ (Semiconductor) ประเภท N-type ที่มีคุณสมบัติฆ่าเชื้อโรคในรูปอนุภาคนาโนโดยกระบวนการใช้แสงอัลตราไวโอเลต (แสงยูวี) ฉายลงไปยังไททาเนียมไดออกไซด์จะเกิดปฏิกิริยาโฟโตคาตาลิติก (photocatalytic) ที่สามารถใช้กำจัดสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ที่ปนเปื้อนในน้ำหรืออากาศที่สัมผัสกับพื้นผิวของไททาเนียมไดออกไซด์ที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง (photocatalyst) ได้

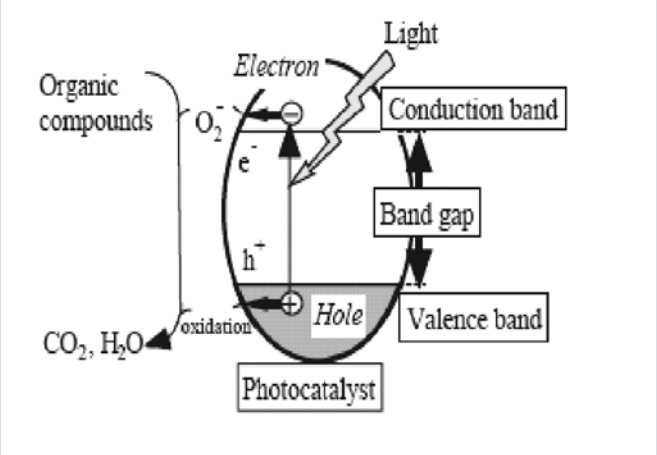
คำว่า โฟโตคาตาลิสต์ (photocatalyst) เป็นคำที่ประกอบด้วย 2 ส่วน คือ “โฟโต (photo)” ที่ใช้นำหน้าคำที่แสงมาเกี่ยวข้องด้วย และ “คาตาลิสต์ (catalyst)” ที่เป็นกระบวนการที่อนุภาคของสารมีส่วนร่วมในการทำให้เกิดอัตราการเปลี่ยนแปลงทางเคมีโดยที่ตัวเองไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงเมื่อสิ้นสุดกระบวนการ และเรียกสารที่เพิ่มอัตราการเกิดปฏิกิริยาทางเคมีโดยการลดพลังงานกระตุ้น (the activation energy) ว่าสารเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง (photocatalyst)

การเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงคือปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจากการใช้แสงไปกระตุ้นสสารที่เปลี่ยนแปลงอัตราการเกิดปฏิกิริยาทางเคมีโดยที่ไม่เกี่ยวข้องกับตัวมันเอง



ภาพที่ 1 การเปรียบเทียบโฟโตคาตาลิสต์กับโคลโรฟิล

โคลโรฟิลของพืชเป็นสารเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง (photocatalyst) ในธรรมชาติแบบหนึ่ง ความแตกต่างระหว่างโคลโรฟิลกับนาโนโฟโตคาตาลิสต์ที่มนุษย์ประดิษฐ์ขึ้นซึ่งในที่นี้จะเป็นไททาเนียมไดออกไซด์ กล่าวคือ โคลโรฟิลจะจับแสงอาทิตย์ไปเปลี่ยนน้ำและคาร์บอนไดออกไซด์เป็นออกซิเจนและกลูโคส แต่การฉายแสงอุลตราไวโอเลต (แสงยูวี) จากดวงอาทิตย์หรือจากหลอดฟลูออเรสเซนต์ไปยังไททาเนียมไดออกไซด์จะทำให้เกิดอนุมูลไฮดรอกซิล (hydroxyl radical) ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (hydrogen peroxide) และประจุลบของซุปเปอร์ออกไซด์ (superoxide anions) ซึ่งสารตระกูลออกซิเจนที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาเหล่านี้สามารถทำลายโครงสร้างและยับยั้งชีวเคมีของแบคทีเรียและเซลล์ที่ติดเชื้อไวรัส การเกิดอนุมูลไฮดรอกซิลและโมเลกุลของออกซิเจนจะทำให้สารประกอบอินทรีย์ถูกทำเป็นออกไซด์จนในที่สุดจะกลายเป็นคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ รวมทั้งจะเข้าไปทำปฏิกิริยาออกซิเดชันสลายก๊าซพิษต่าง ๆ และสารก่อมะเร็ง เช่น acetaldehyde, benzene, formaldehyde



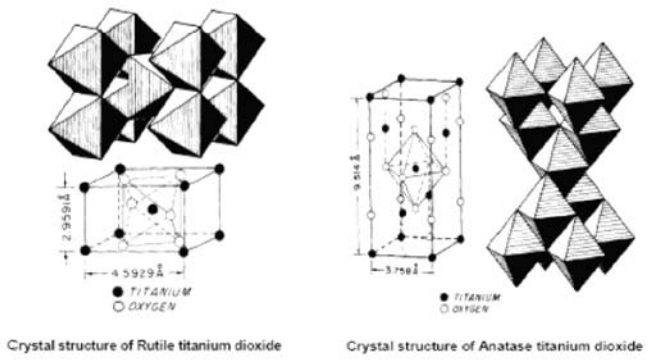
ภาพที่ 2 กลไกของการเกิดกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส (mechanism of photocatalysis)

สารกึ่งตัวนำจะมีแถบพลังงานที่น่าสนใจอยู่สองแถบ คือ แถบวาเลนซ์ (valence band) และแถบการนำไฟฟ้า (conduction band) แถบพลังงานทั้งสองนี้จะถูกแยกจากกันโดยมีแถบช่องว่างพลังงาน (band gap) ซึ่งมีความกว้าง Eg กั้นอยู่

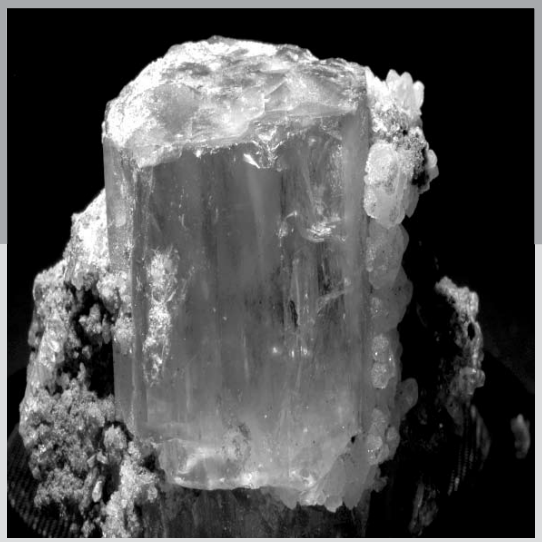
กระบวนการโฟโตคะตะไลซิสในเอเควียสเฟส (aqueous phase) คือ กระบวนการการโฟโตออกซิเดชัน (photooxidation) ของอนุภาคสารกึ่งตัวนำที่ถูกอนุภาคของแสง (photo) ซึ่งมีพลังงานเท่ากับหรือสูงกว่าช่องว่างพลังงาน Eg ตกกระทบผิวหน้าอนุภาคสารกึ่งตัวนำ ทำให้อิเล็กตรอนถูกกระตุ้น เปลี่ยนที่อยู่จากแถบวาเลนซ์ไปยังแถบการนำไฟฟ้า ทำให้เกิดสภาวะขาดอิเล็กตรอนที่แถบวาเลนซ์ เรียกว่า โฮล (hole) แทนด้วยสัญลักษณ์ h+vb ส่วนอิเล็กตรอนที่ถูกกระตุ้นไปอยู่ในแถบการนำไฟฟ้าแทนด้วยสัญลักษณ์ e-cb ซึ่ง h+vb และ e-cb สามารถที่จะกลับมาอยู่ในสภาวะเดิมอีกได้ เรียกว่า รีคอมบิเนชั่น (recombination) ซึ่งเป็นปัญหาที่สำคัญของกระบวนการโฟโตออกซิเดชัน และที่ผิวหน้าระหว่างของแข็งและของเหลว (solid-liquid interface) อิเล็กตรอนสามารถที่จะเคลื่อนย้ายจากแถบการนำไฟฟ้าไปสู่ตัวรับอิเล็กตรอน (acceptor) ในสารละลาย เรียกว่า รีดักชัน (reduction) หรืออิเล็กตรอนจากผู้ให้ (donor) ในสารละลายไปสู่โฮลในแถบวาเลนซ์ เรียกว่า ออกซิเดชัน (oxidation) ซึ่งโฮลที่เกิดขึ้นในแถบวาเลนซ์เป็นตัวรับอิเล็กตรอนที่ดี (strong oxidation)

ไททาเนียมไดออกไซด์ ที่เป็นสารเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง (photocatalyst) มีรูปแบบโครงสร้างผลึกแอคทีฟ 2 แบบ คือ anatase และ rutile โดยทั่วไปนิยมใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีส่วนผสมระหว่าง anatase และ rutile ประมาณ 4:1 หรือ 3:1 โดยมีค่าเฉลี่ยของเส้นผ่าศูนย์กลางของอนุภาคประมาณ 30 นาเมตร และมีพื้นที่ผิว 50 ตารางเมตร/กรัม

ตามธรรมชาติในตัวสารเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง (photocatalyst) เองไม่สามารถดูดจับสารอินทรีย์ แบคทีเรีย เชื้อรา ฯลฯ ที่อยู่ในน้ำหรืออากาศ ยกเว้นว่าสิ่งเหล่านั้นจะมาเกาะติดที่ผิวหน้าของสารเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง (photocatalyst) และจะไม่สามารถทำงานได้ถ้าปราศจากแสง จึงได้มีการพัฒนาประยุกต์ใช้สารประกอบผลึกอะพาไทต์ (apatite) มาแก้ข้อด้อยดังกล่าว

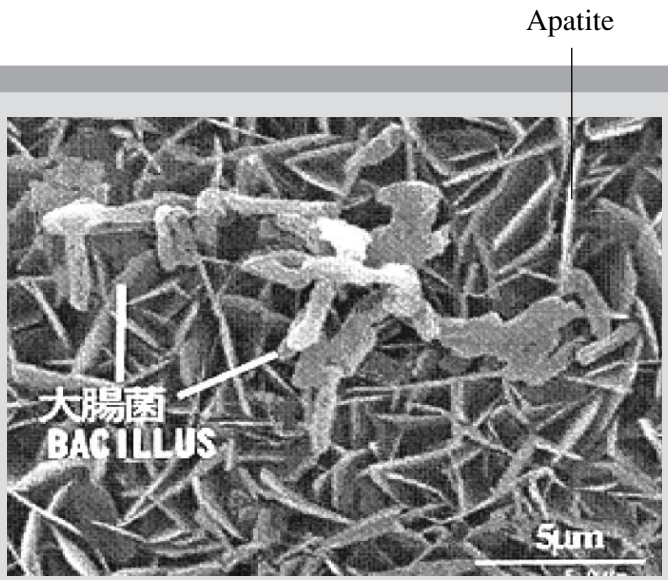


ภาพที่ 3 โครงสร้างผลึกของไททาเนียมไซด์แบบรูไทล์และแบบอนาเทส



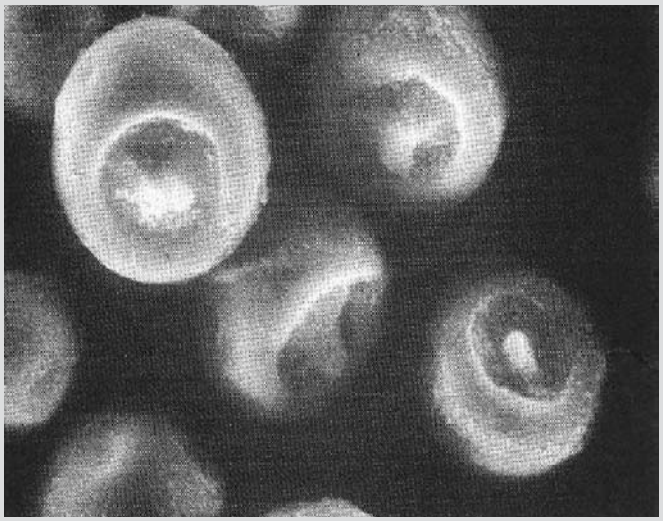
ภาพที่ 4 ผลึกแร่อะพาไทต์

ภาพที่ 5 ภาพถ่ายแสดงการดูดจับแบคทีเรียโดยอะพาไทต์

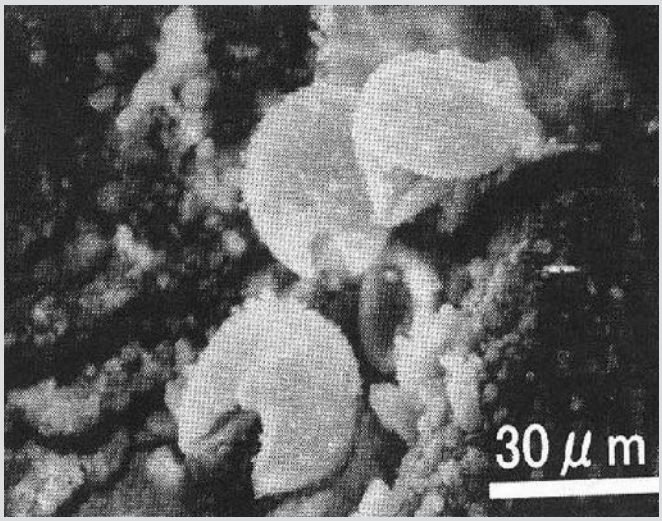


อะพาไทต์เป็นแร่ที่มีสูตรทางเคมี $Ca_5(PO_4)_3(F,Cl,OH)$ มีโครงสร้างผลึกแบบเฮ็กซะโกนอล (hexagonal) ลักษณะแท่งสั้นๆ หรือแบนแต่หนา ปกติหัวและท้ายจะเป็นรูปพีระมิด ปลายตัดคล้ายรูปเข็ม มีความสามารถในการดูดจับที่ดี เมื่อทำงานร่วมกับสารเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงไททาเนียมไดออกไซด์ โดยอะพาไทต์จะดูดจับสิ่งต่างๆ ไว้ เช่น ไวรัส แอมโมเนีย ไนโตรเจนออกไซด์ อัลดีไฮด์ อย่างสม่ำเสมอตลอดเวลาจากนั้นไททาเนียมไดออกไซด์ก็จะทำการย่อยสลายเมื่อได้รับแสงแดดหรือแสงจากหลอดฟลูออเรสเซนต์

ปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส ได้แก่ ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ความเข้มข้นของอนุภาคไททาเนียมไดออกไซด์ อุณหภูมิ ปริมาณออกซิเจนละลาย (dissolved oxygen) และความเข้มของแสง (light intensity)



(ก) ก่อนการฉายแสง



(ข) ภายหลังการฉายแสง

ภาพที่ 6 แสดงกระบวนการสลายเรณูดอกไม้ที่ถูกดูดจับไว้

ในการสร้างระบบการให้พื้นผิวฆ่าเชื้อโรคหรือทำความสะอาดตัวเองด้วยพื้นฐานของอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ ที่เป็นไปได้ทางหนึ่งคือการติดอนุภาคนาโนไปบนพื้นผิวโดยตรงหรือใช้กระบวนการ sol-gel สร้างชั้นอนุภาคบาง ๆ ลงบนพื้นผิวของวัสดุหรือผลิตภัณฑ์ที่ต้องการ

ภาพที่ 7 เครื่องแก้วที่ถูกเคลือบด้วยฟิล์มใส ไททาเนียมไดออกไซด์

ภาพที่ 8 ดอกไม้ที่ถูกเคลือบด้วยสาร ไททาเนียมไดออกไซด์เหลว

ปัจจุบันมีการปรับปรุงประสิทธิภาพของสารเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงไททาเนียมไดออกไซด์ให้สูงขึ้น โดยการปรับแต่งพื้นผิวด้วยอะตอมของธาตุชนิดต่าง ๆ เช่น คาร์บอน, ไนโตรเจนและซัลเฟอร์ เป็นต้น ให้สามารถถูกกระตุ้นด้วยแสงในช่วงตาคนมองเห็นได้ (visible light) นอกจากนี้ยังนำไททาเนียมไดออกไซด์มาดูดซับด้วยไอออนของโลหะทรานสิชัน เช่น Fe^{3+}, Cr^{3+} และ V^{3+} เป็นต้น ซึ่งไอออนเหล่านี้จะสามารถเพิ่มการถ่ายเทอิเล็กตรอนของไททาเนียมไดออกไซด์ให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้นได้

สินค้าที่ผลิตออกมาจำหน่ายในเชิงพาณิชย์มีทั้งในรูปของวัสดุตกแต่งอาคาร ของใช้ภายในอาคารบ้านเรือน ของเด็กเล่น ที่สามารถกำจัดแบคทีเรีย ยีสต์ เชื้อราและไวรัสบางชนิด ทำความสะอาดมลพิษในน้ำและอากาศ ขจัดสารพิษในควันบุหรี่โดยตัววัสดุหรือผลิตภัณฑ์เอง

เอกสารอ้างอิง

Fujitsu Laboratory LTD. Environment clean-up(purification)technology by photocatalyst titanium apatite. [Online] [cite dated 26 February 2009] Available from Internet: **http://jp.fujitsu.com/group/labs/downloads/en/business/activities/activities-3/fujitsu-labs-envtech-003-en.pdf**.

Gillam, E; King, R.M. Gillam. **The M.&E. handbook Series: college physics V.2.** [n.p.] : Macdonald & Evans Ltd, (1971) p 215-218.

National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST), Apatite/TiO_2 Photocatalyst for air purification and antibacterial/antimold/antifouling. [Online] [cite dated 26 February 2009] Available from Internet: **http://www.aist.go.jp/aist_e/event/ev20033047/paint.html**

ชวิศร์ กรัณย์เมธากุล. การปรับแต่งผิวหน้าของไททาเนียมไดออกไซด์เพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพในกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต **สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า พระนครเหนือ**, 2549, หน้า 6-13.