



รายงานผลการวิจัย

เรื่อง การเตรียมและสมบัติการเร่งปฏิกิริยาดำเนินแสงของวัสดุผสม Cu-TiO₂/MWCNT
Preparation and photocatalytic properties of Cu-TiO₂/MWCNT
composites

ได้รับการจัดสรรงบประมาณวิจัย ประจำปีงบประมาณ 2558
จำนวน 273,000 บาท

หัวหน้าโครงการ นางสาวสุภาพร ดาวทอง

งานวิจัยเสร็จสิ้นสมบูรณ์

21/สิงหาคม/2559

กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยการเตรียมและสมบัติการเร่งปฏิกิริยาดำเนินการด้วยแสงของวัสดุผสม Cu-TiO₂/MWCNT (Preparation and photocatalytic properties of Cu-TiO₂/MWCNT composites) ได้สำเร็จลุล่วง โดยได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากสำนักวิจัยและส่งเสริมวิชาการการเกษตร มหาวิทยาลัยแม่โจ้ ประจำปีงบประมาณ 2558 ผู้วิจัยขอขอบคุณ ภาควิชาฟิสิกส์และวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ และ สาขาวิชาเคมีและสาขาวิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยแม่โจ้ที่อนุเคราะห์สถานที่ เครื่องมือและอุปกรณ์บางอย่างที่ใช้ในการดำเนินการวิจัยให้เสร็จสิ้นสมบูรณ์

ผู้วิจัย

สารบัญ

	หน้า
สารบัญตาราง	จ
สารบัญภาพ	ฉ
บทคัดย่อ	1
Abstract	2
1. คำนำ	3
1.1 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย	5
1.2 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	5
2. การตรวจเอกสาร	7
2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย	7
2.2 ทบทวนวรรณกรรม	42
3. อุปกรณ์และวิธีวิจัย	44
3.1 อุปกรณ์และ สารเคมี	44
3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือ	44
3.3 เครื่องมือวิเคราะห์	45
3.4 วิธีการวิจัย	45
4. ผลการวิจัย	47
4.1 ผลการเตรียมท่อนาโนคาร์บอนแบบเดิมหมู่ฟังก์ชัน	48
4.2 ผลการเตรียมท่อนาโนคาร์บอนผสมอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์	54
4.3 ผลการเตรียมท่อนาโนคาร์บอนผสมอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์เจือคอปเปอร์	61
5. วิเคราะห์ผลการวิจัย	64

6. สรุปผลการวิจัย	66
เอกสารอ้างอิง	67
ภาคผนวก	70

สารบัญตาราง

	หน้า
ตาราง 2.1 การประยุกต์ใช้กระบวนการโฟโตแคตตะไลติกในการบำบัด	18
ตาราง 2.2 มวลสารที่สามารถบำบัดด้วยกระบวนการโฟโตแคตตะไลติก	19
ตาราง 2.3 การเลือกสมบัติของสารกึ่งตัวนำ	20
ตาราง 2.4 แสดงสมบัติทั่วไปของไทเทเนียมไดออกไซด์	23
ตาราง 2.5 แสดงสมบัติทั่วไปของทองแดง	23
ตาราง 2.6 ปริมาณทองแดงที่พบในฟิล์ม TiO_2 เปรียบเทียบเชิงพื้นที่ (CM^2) และร้อยละปริมาณอะตอมของธาตุคอปเปอร์	42
ตาราง 4.1 สันฐานวิทยาของท่อนาโนคาร์บอนแบบไม่เต็มและแบบเต็มหมู่ฟังก์ชัน	49
ตาราง 4.2 ตัวอย่างทดสอบการกระจายตัว	52

สารบัญภาพ

	หน้า
ภาพที่ 2. 1 ท่อนาโนคาร์บอนที่พบโดย NEC FULLERENES หรือบั๊กกีบอลคาร์บอน ที่โครงสร้างเป็นรูปลูกบอล	8
ภาพที่ 2. 2 ท่อนาโนคาร์บอนมี 2 แบบ (A) SWCNT และ (B) MWCNT	9
ภาพที่ 2. 3 กระบวนการที่เกิดขึ้นที่ผิวของสารกึ่งตัวนำ (Semiconductor; SC) ดูดซับโฟตอน จากแสง UV ที่มีพลังงานมากกว่าหรือเท่ากับ แถบพลังงาน ($H_V \geq E_{BG}$) ทำให้เกิด อิเล็กตรอนในแถบวาเลนซ์และโฮลในแถบตัวนำ ทำให้เป็นคู่อิเล็กตรอน-โฮล (e^-h^+) สามารถกระจายไปบริเวณผิวของสารกึ่งตัวนำ (A) เป็นการรวมตัวกันของ คู่อิเล็กตรอน-โฮล (B) กระบวนการรวมตัว ที่บริเวณผิว (C) ตัวรับ อิเล็กตรอน A ที่มาดูดซับบนผิวในปฏิกิริยารีดักชัน (D) ตัวให้ อิเล็กตรอน D ที่มาเกาะติดผิว ในปฏิกิริยาออกซิเดชัน ที่บริเวณโฮล	16
ภาพที่ 2. 4 ผังแสดงการเกิดอนุมูลอิสระไฮดรอกซิลจากระบบโฟโตแคตะไลติก ใช้ TiO_2 ช่วยทางเคมีอิเล็กตรอน	17
ภาพที่ 2.5 ค่าพลังงานที่ขอบบนล่างของแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำ	20
ภาพที่ 2.6 ผังแถบพลังงานของอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ พร้อมความสามารถ ขอการรีดออกซ์	21
ภาพที่ 2.7 แร่ผลึก (A) รูไทล์ (B) อนาเทส และ (C) ผงไทเทเนียมไดออกไซด์	22
ภาพที่ 2.8 แสดงความยาวคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า	27
ภาพที่ 2.9 การดูดกลืนแสงตามกฎของแลมเบิร์ต (Lambert's Law)	28
ภาพที่ 2.10 องค์ประกอบที่สำคัญของเครื่องวัดการดูดกลืนแสงแบบ Single Beam	29
ภาพที่ 2.11 องค์ประกอบที่สำคัญของเครื่องวัดการดูดกลืนแสงแบบ Double Beam	30
ภาพที่ 2.12 ภาพแบบการสั่นของพันธะในหมู่เมทิลีน	31
ภาพที่ 2.13 อินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์แบบธรรมดา	32
ภาพที่ 2.14 Michelson Interferometer ใน FT-IR สเปกโตรมิเตอร์	33
ภาพที่ 2.15 แผ่นโซเดียมคลอไรด์และตัวยึด	34

ภาพที่ 2.16 Minipress สำหรับเตรียม KBr Disc	34
ภาพที่ 2.17 การเตรียมสารตัวอย่างของเหลวโดยเตรียมเป็น Thin-Film	35
ภาพที่ 2.18 เซลล์สารละลายสำหรับสารตัวอย่างของเหลว	35
ภาพที่ 2.19 สเปกตรัมของ Carbon Tetrachloride	36
ภาพที่ 2.20 IR สเปกตรัมของ Carbon Disulfide	36
ภาพที่ 2.21 IR สเปกตรัมของ Chloroform	36
ภาพที่ 2.22 กล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด	38
ภาพที่ 2.23 ส่วนประกอบของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	39
ภาพที่ 2.24 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน	40
ภาพที่ 2.25 ส่วนประกอบของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน	41
ภาพที่ 2.26 ตัวอย่างอนุภาคนาโนของไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO ₂) ที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน	41
ภาพที่ 4.1 SEM ของท่อนาโนคาร์บอนแบบ (ก) ไม่เติมหมู่ฟังก์ชัน และแบบเติมหมู่ฟังก์ชันด้วย (ข) 10% H ₂ O ₂ (ค) 20% H ₂ O ₂ และ (ง) 30% H ₂ O ₂	48
ภาพที่ 4.2 สเปกตรัม FT-IR ของท่อนาโนคาร์บอนแบบ (ก) ไม่เติมหมู่ฟังก์ชัน และแบบเติมหมู่ฟังก์ชันด้วย H ₂ O ₂ (ข) 10% V/V (ค) 20% V/V และ (ง) 30% V/V	50
ภาพที่ 4.3 ทดสอบการกระจายตัวของท่อนาโนคาร์บอนในเอทานอลทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง	53
ภาพที่ 4.4 TEM ของท่อนาโนคาร์บอนแบบเติมหมู่ฟังก์ชัน MWCNT-30	54
ภาพที่ 4.5 SEM ของไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO ₂)	55
ภาพที่ 4.6 TEM ของอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO ₂)	56
ภาพที่ 4.7 รามานสเปกตรัมของไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO ₂)	57
ภาพที่ 4.8 สันฐานวิทยาจากกล้อง SEM ของ TiO ₂ /MWCNT อัตราส่วน (ก) 1:1 (ข) 5:1 (ค) 10:1 (ง) 15:1 และ (จ) 20:1	58
ภาพที่ 4.9 รามานสเปกตรัมของ (15:1) TiO ₂ /MWCNT	59
ภาพที่ 4.10 แสดงความสัมพันธ์ C _T /CO ของเมททิลลิ้นบลูภายใต้การฉายรังสีด้วย TiO ₂ /MWCNT ในอัตราส่วน 1:1 5:1 10:1 15:1 และ 20:1	60

ภาพที่ 4.11 SEM ของ Cu-TiO₂/MWCNT (ก) 1% W/W (ข) 3% W/W (ค) 5% W/W

และ (ง) 7% W/W

62

ภาพที่ 4.12 แสดงความสัมพันธ์ C_T/C_0 ของเมทิลลินบลูภายใต้การฉายรังสียูวี

ด้วยตัวอย่าง 1.0, 3.0, 5.0 และ 7.0% Cu-TiO₂/MWCNT คอมโพสิต

63

ภาพที่ 5.1 แสดงการเกาะของอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์บนผนังท่อนาโนคาร์บอน

(a) การเกาะของอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นแบบสุ่ม,

(b) เป็นลักษณะการเกาะของอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์อย่างเป็นระเบียบและ

(c) เป็นลักษณะของท่อนาโนคาร์บอนพันอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์

ที่มีขนาดใหญ่

65

การเตรียมและสมบัติการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงของวัสดุผสม Cu-TiO₂/MWCNT

Preparation and photocatalytic properties of Cu-TiO₂/MWCNT composites

สุภาพร ดาวทอง

Suphaporn Daothong

สาขาวิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยแม่โจ้ จ.เชียงใหม่ 50290

บทคัดย่อ

TiO₂/MWCNT นาโนคอมโพสิตถูกเตรียมด้วยเทคนิคไฮโดรลิซิส ในการสังเคราะห์เริ่มต้นโดยการทำความสะอาดและเติมหมู่ฟังก์ชันให้กับท่อนาโนคาร์บอนโดยใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (10, 20 และ 30 %v/v) จากนั้นเลือก MWCNT ที่เติมหมู่ฟังก์ชันมากระจายตัวในไทเทเนียมเตตระคลอไรด์ในน้ำที่มีอัตราส่วนโดยมวลของ TiO₄ : MWCNT เป็น 1:1, 5:1, 10:1, 15:1 และ 20:1 นำตัวอย่างไปวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (TEM) รามานสเปกโตรสโกปี (Raman spectroscopy) และวัดการดูดกลืนแสง (UV-vis) การทดสอบ TiO₂/MWCNT นอกจากนั้นความสามารถในการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงถูกทดสอบโดยการย่อยสลายของเมทิลลิโนบลู (MB, C₁₆H₁₈N₃S·Cl·3H₂O) ภายใต้รังสียูวี (UV-A, 356 nm) พบว่าอัตราส่วนที่เหมาะสมที่สุดในการย่อยสลายคือ 15:1

นอกจากนี้ Cu-TiO₂/MWCNT นาโนคอมโพสิตถูกเตรียมด้วยเทคนิคไฮโดรลิซิส โดยใช้ CuCl₂ เป็นสารตั้งต้น ในปริมาณที่ต่างกันตั้งแต่ 1.0 ถึง 7.0 wt% โดย TiO₂/MWCNT (15:1) นาโนคอมโพสิตถูกนำไปวิเคราะห์หาลักษณะเฉพาะโดย SEM TEM รามานสเปกโตรสโกปี และวัดการดูดกลืนแสง (UV-vis) ประสิทธิภาพตัวเร่งปฏิกิริยาคอมโพสิตถูกวัดโดยการย่อยสลายด้วยแสงของเมทิลลิโนบลู พบว่า 5.0 wt% Cu-TiO₂/MWCNT แสดงประสิทธิภาพการย่อยสลายเมทิลลิโนบลูได้สูงสุด ซึ่งกลไกในการย่อยสลายจากตัวเร่งปฏิกิริยาทางแสง Cu-TiO₂ และท่อนาโนคาร์บอนเป็นตัวส่งอิเล็กตรอนในระหว่างการดูดซับโมเลกุลของเมทิลลิโนบลู

คำสำคัญ ท่อนาโนคาร์บอน ปฏิกิริยาย่อยสลายด้วยแสง อนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ คอมโพสิต

Abstract

TiO₂/MWCNT composites were prepared by using the hydrolysis technique. In a typical synthesis, MWCNTs were firstly purified and functionalized the surface of carbon nanotubes by a mixture of concentrated hydrogen peroxide (10, 20 and 30 %v/v). Then, a given number of functionalized MWCNTs were dispersed in TiCl₄ aqueous solution with different concentrations. The composites were obtained with the TiCl₄: MWCNT mass ratios of 1:1, 5:1, 10:1, 15:1 and 20:1. The samples were characterized by Scanning Electron Microscopy (SEM), Transmission Electron Microscopy (TEM), Raman spectroscopy and UV-vis absorption spectroscopy. Furthermore, the photocatalytic activity of TiO₂/MWCNT composites was tested by using methylene blue (MB, C₁₆H₁₈N₃S·Cl·3H₂O) degradation in aqueous solution under UV irradiation (UV-A, 356 nm). It was found that the optimized condition of the degradation efficiency was 15:1.

In addition, Cu-TiO₂/MWCNT composites were prepared using hydrolysis technique *via* the CuCl₂ precursor. The CuCl₂ concentration was varied from 1.0-7.0 wt% with TiO₂/MWCNT (15:1). The composites were characterized by SEM, TEM, Raman spectroscopy and UV-vis absorption spectroscopy. The catalytic efficiency of the composites was evaluated by the photodegradation of methylene blue. The maximum degradation efficiency was found in a condition used 5.0 %wt Cu-TiO₂/MWCNTs under UV irradiation. The decomposition mechanism of the MB solution could be attributed to the combination effects between Cu-TiO₂ photocatalyst and the electro-assistance of the CNTs, with the conductive of CNT network facilitating the electron transfer between the adsorbed MB molecules.

Keyword: Carbon nanotubes, Photocatalytic reaction, Titanium dioxide particles,
Composites

1. คำนำ

ปัจจุบันเป็นยุคแห่งการแข่งขันทางด้านเศรษฐกิจ นานาประเทศต่างให้ความสำคัญทางด้านการผลิตและการส่งออก จึงมีการเติบโตของภาคอุตสาหกรรมและการเกษตรเป็นอย่างมาก โดยใช้เครื่องจักรและสารเคมีจำนวนมากในการผลิตเพื่อให้เพียงพอต่อความต้องการของตลาด จากการผลิตจำนวนมาก ย่อมหลีกเลี่ยงไม่ได้ที่จะทำให้เกิดของเสียในกระบวนการผลิต ซึ่งสร้างมลพิษทางน้ำและอากาศในปริมาณจำนวนมาก เช่นกัน ของเสียจากภาคอุตสาหกรรม ภาคเกษตรกรรมและแหล่งอื่นๆ เป็นปัญหาสำคัญที่มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม สุขภาพอนามัย เป็นอย่างมาก ดังนั้นการควบคุม การจัดการ การกำจัดและการบำบัดที่ถูกวิธีจึงเป็นเรื่องสำคัญต่อการลดและแก้ไขปัญหามลพิษดังกล่าวได้

ประเทศไทยเป็นประเทศหนึ่งที่มีความสำคัญในด้านการพัฒนาเศรษฐกิจ การค้า การส่งออก ซึ่งตามแผนแม่บทการพัฒนาอุตสาหกรรมไทย พ.ศ. 2555-2574 กระทรวงอุตสาหกรรม กำหนดทิศทางการพัฒนาอุตสาหกรรมนำร่องของประเทศไทย ได้แก่ อุตสาหกรรมอาหาร อุตสาหกรรมยานยนต์และชิ้นส่วนยานยนต์ อุตสาหกรรมสิ่งทอและเครื่องนุ่งห่ม อุตสาหกรรมยาง อุตสาหกรรมอัญมณีและเครื่องประดับ เป็นต้น จากแผนดังกล่าว ทำให้มีการส่งเสริม ผลักดันให้มีการผลิตสูงขึ้น ทั้งทางด้านอุตสาหกรรมและการเกษตรซึ่งย่อมมีการใช้วัตถุดิบและสารเคมีจำนวนมาก เบื้องหลังของการผลิตในปริมาณมากย่อมหลีกเลี่ยงไม่ได้ที่จะได้ของเสียหรือกากจากกระบวนการผลิตมากเช่นกัน หากทิ้งสู่แหล่งน้ำโดยตรง สร้างมลพิษทางน้ำ และเกิดการเน่าเสียตามมาเป็นมลพิษทางอากาศ ผลเสียเหล่านี้กระทบต่อสิ่งแวดล้อมและสิ่งมีชีวิต ไม่ว่าจะเป็น การเติบโตของพืช สุขภาพ อนามัยของสัตว์และมนุษย์ เป็นสะสมและเพาะพันธุ์เชื้อโรค ดังนั้นภาคการผลิตจึงไม่ควรละเลยในส่วนของการจัดการ ควบคุม บำบัดและกำจัดของเสีย

อุตสาหกรรมสิ่งทอและเครื่องนุ่งห่ม เป็นอุตสาหกรรมหนึ่งที่ถูกบรรจุอยู่ในแผนแม่บทการพัฒนาอุตสาหกรรมไทย สิ่งทอของประเทศไทยได้รับการยอมรับด้านความประณีตและสวยงาม สร้างรายได้ให้กับประเทศไทยในอันดับต้นๆ มีการนำผลิตผลทางการเกษตรมาใช้เป็นวัตถุดิบ เช่น ป่าน ปอ ลิ้นจี่ ใยสับปะรด ใยมะพร้าว ฝ้าย นุ่น สรรพารายณ์

เป็นต้น ซึ่งจำเป็นต้องทำการฟอก ย้อม พิมพ์และตกแต่งสำเร็จ เป็นอุตสาหกรรมที่มีการใช้สีย้อมและสารเคมีในแต่ละกระบวนการในปริมาณสูง ทำให้มีสี สารเคมีส่วนเกินเหลืออยู่ในน้ำทิ้งในปริมาณที่สูง และปล่อยน้ำเสียที่มีย้อมปนเปื้อนลงสู่ธรรมชาติ ทำให้เกิดปัญหาน้ำเสีย กระทบต่อชุมชนเป็นบริเวณกว้าง ระบบนิเวศน์เสียหาย สิ่งมีชีวิตรวมถึงมนุษย์ได้รับอันตรายจากการใช้น้ำเพื่อดำรงชีวิต เกิดมลพิษทางอากาศ เป็นต้น วัตถุประสงค์และสารเคมีที่ใช้ในกระบวนการอุตสาหกรรมและการเกษตรมีมากมาย การวิจัยนี้ ใช้เมทิลลีนบลู (Methylenblue) เป็นตัวแทนของสารหลายๆชนิดที่ใช้ในภาคอุตสาหกรรม เพื่อหาวิธีกำจัดเมทิลลีนบลูไม่ให้มีการปนเปื้อนในสิ่งแวดล้อม โดยเมทิลลีนบลูเป็นสีพื้นฐานที่ละลายน้ำได้ดีมีโครงสร้างเป็นแคทไอออนในส่วนประกอบที่ให้สีฟ้าเมื่อมีการปนเปื้อนและสะสมในน้ำก่อให้เกิดน้ำสกปรกเหม็นเน่าขึ้น การบำบัดน้ำเสียนั้นมีด้วยกันหลายวิธี เช่น การดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ การตกตะกอนด้วยสารเคมี การออกซิไดซ์ด้วยโอโซน เป็นต้น เพื่อช่วยลดปริมาณน้ำเน่าเสียได้โดยไม่ก่อให้เกิดอันตรายต่อสิ่งแวดล้อม

การศึกษาหาแนวทางที่เหมาะสมต่อการแก้ไขปัญหาน้ำเสียเพื่อไม่ให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม การดำรงชีวิตของทั้งคน พืชและสัตว์ จึงเป็นสิ่งจำเป็นอย่างยิ่ง การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง (Photocatalytic) เป็นแนวทางหนึ่งที่น่าสนใจอย่างมากในการจัดการบำบัดและกำจัดน้ำเสีย ซึ่งตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงสามารถการย่อยสลายสารปนเปื้อนและฆ่าเชื้อโรคได้

ปัจจุบันนาโนเทคโนโลยีเป็นที่ยอมรับและเข้ามามีบทบาท ในชีวิตประจำวันมากขึ้น ทั้งยา เครื่องสำอาง นวัตกรรมต่างๆ จึงมีการค้นคว้า วิจัยศาสตร์ทางนาโนเพิ่มขึ้นมา เนื่องจากวัสดุในระดับนาโน (10^{-9} เมตร) เมื่อพิจารณาด้านพื้นที่ผิวจำเพาะ ซึ่งช่วยเพิ่มอัตราการทำปฏิกิริยาได้อย่างมาก(พื้นที่ผิวต่อปริมาตรเพิ่มขึ้น) ดังนั้น การใช้นาโนเทคโนโลยีเข้าร่วมในการบำบัดและกำจัดสิ่งปนเปื้อน จะเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพการปรับปรุงคุณภาพน้ำให้ดียิ่งขึ้น

งานวิจัยนี้ให้ความสำคัญเพิ่มประสิทธิภาพของไทเทเนียมไดออกไซด์เจือด้วยคอปเปอร์ซึ่งเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงตามหลักการเทคโนโลยีนาโน คือ อนุภาคขนาดเล็กในระดับนาโนทำให้มีพื้นที่ผิวในการทำปฏิกิริยามาก นอกจากนี้อาศัยสมบัติการเป็นตัวดูดซับสารของท่อนาโนคาร์บอนเพื่อช่วยกำจัดสารปนเปื้อนและการส่งผ่านอิเล็กตรอนของตัวเร่ง

ปฏิกิริยาดำยแสง เพื่อใช้ย่อยสลายเมททิลีนบลู (Methylenblue) ซึ่งเป็นตัวแทนของสิ่งปนเปื้อน

1.1 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

- การให้ความสำคัญต่อสิ่งแวดล้อมทางด้านบำบัดน้ำ โดยอาศัยสารที่มีสมบัติเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาดำยแสงคือไทเทเนียมไดออกไซด์เจือด้วยคอปเปอร์และผสมท่อนาโนคาร์บอน เพื่อการย่อยสลายสารปนเปื้อน โดยให้เมททิลีนบลูเป็นตัวแทนของสารปนเปื้อนในน้ำ จุดประสงค์ดังนี้
- เพื่อศึกษาการสังเคราะห์สารไทเทเนียมไดออกไซด์เจือด้วยคอปเปอร์ผสมท่อนาโนคาร์บอนเพื่อใช้เป็นตัวย่อยสลายเมททิลีนบลู
- เพื่อศึกษากระบวนการย่อยสลายเมททิลีนบลูโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาดำยแสงของสารไทเทเนียมไดออกไซด์เจือด้วยคอปเปอร์ผสมท่อนาโนคาร์บอน
- เพื่อศึกษาประสิทธิภาพของสารไทเทเนียมไดออกไซด์เจือด้วยคอปเปอร์ผสมท่อนาโนคาร์บอนในย่อยสลายเมททิลีนบลู

1.2 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- ด้านวิชาการ

การเผยแพร่ในวารสารระดับนานาชาติ ในฐานข้อมูล ISI หรือ ระดับชาติ หรือนำเสนอในการประชุมระดับชาติหรือระดับนานาชาติ ซึ่งนักวิจัยจากสถาบันต่างๆ ทั้งในและนอกประเทศสามารถนำความรู้จากงานวิจัยนี้มาปรับปรุงหรือพัฒนา ประยุกต์ใช้ในด้านอื่นๆ ได้
- ด้านเศรษฐกิจ/พาณิชย์

มาตรการควบคุมมลพิษจากโรงงานอุตสาหกรรมถูกควบคุมด้วยมาตรฐาน ISO 14001 เป็นระบบการจัดการสิ่งแวดล้อม ก่อให้เกิดการบำบัดมลพิษ โดยงานวิจัยด้านกระบวนการย่อยสลายด้วยแสงนี้จะเป็นแนวทางหรือทางเลือกในการกำจัดมลพิษอย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งการแก้ไขและบำบัดน้ำเสียหรือมลพิษต่างๆ ส่งผลดีต่อองค์กรทั้งทางตรงคือ ลดปัญหาสิ่งแวดล้อม และทางอ้อม ในการเป็นที่ยอมรับเสริมสร้างภาพลักษณ์ที่ดีเพิ่มโอกาสทางธุรกิจและลดปัญหาการค้าระหว่างประเทศในเรื่องการตั้งเงื่อนไขเรื่องสารพิษ

ในสินค้าหรือสิ่งแวดล้อมได้ การค้าการลงทุนเป็นไปอย่างราบรื่น คล่องตัว ผู้บริโภคสามารถใช้สินค้าด้วยความมั่นใจว่าจะไม่มีส่วนในการทำลายสิ่งแวดล้อม นอกจากนี้ยังสร้างความเชื่อมั่นให้แก่ผู้เข้าร่วมธุรกิจทำให้บริษัทหรือหน่วยงานนั้นเติบโต รวมถึงสภาพแวดล้อมที่ดี สะอาด ย่อมส่งเสริมและนำดึงดูดต่อการท่องเที่ยวซึ่งเป็นธุรกิจหนึ่งที่ทำรายได้ให้ประเทศเป็นอย่างมาก

นอกจากนี้หากงานวิจัยเป็นที่ยอมรับและถูกนำไปต่อยอดในเชิงธุรกิจ จะช่วยสร้างสินค้าในการรักษาสภาพแวดล้อมขึ้นมาในตลาดอีกด้วย

- ด้านสังคมและชุมชน

การวิจัยทางด้านนาโนเทคโนโลยี ทำให้สามารถนำโรงการวิจัยนี้ไปประยุกต์ในการบำบัดน้ำเสียจากสารเคมีอื่นๆ ได้ ซึ่งจากพื้นฐานทางด้านนาโนเทคโนโลยีและสมบัติของตัวย่อยสลายด้วยแสง (Photocatalytic) ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการบำบัดน้ำที่มีการปนเปื้อน ในภาคอุตสาหกรรม เกษตรกรรม ชุมชนและภาคครัวเรือน การใช้วิธีที่มีประสิทธิภาพ ย่อมลดปัญหาการสะสมของเชื้อโรค สารพิษและสารเคมีที่จะปนเปื้อนลงสิ่งแวดล้อม เป็นการส่งเสริมอนามัยให้คนในชุมชนมีการใช้ชีวิตที่ปลอดภัย สุขภาพอนามัยสมบูรณ์แข็งแรง ซึ่งประชาชนที่มีสุขภาพดีจะเป็นแรงและกำลังสำคัญต่อการพัฒนาชาติบ้านเมืองต่อไป

2. การตรวจเอกสาร

2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย

2.1.1 ประเภทของวัสดุนาโน [1]

วัสดุนาโนคือวัสดุที่มีโครงสร้างด้านใดด้านหนึ่งน้อยกว่าหรือเท่ากับ 100 นาโนเมตร สำหรับวัสดุที่มีโครงสร้าง 2 มิติที่อยู่ในระดับนาโนอาจจะเป็นเพียงชั้นฟิล์มบางๆ ชั้นเคลือบผิว วัสดุนาโนที่มีโครงสร้างทั้ง 2 ด้านอยู่ในระดับนาโนได้แก่ เส้นลวดนาโน (Nanowires) และท่อนาโน (Nanotubes) แต่ถ้ามีโครงสร้าง 0 มิติอยู่ในระดับนาโนได้แก่ อนุภาคนาโน (Nanoparticles) เช่น ควอนตัมดอท (Quantum Dot) และนาโนคริสตัล (Nano Crystalline) เป็นต้น

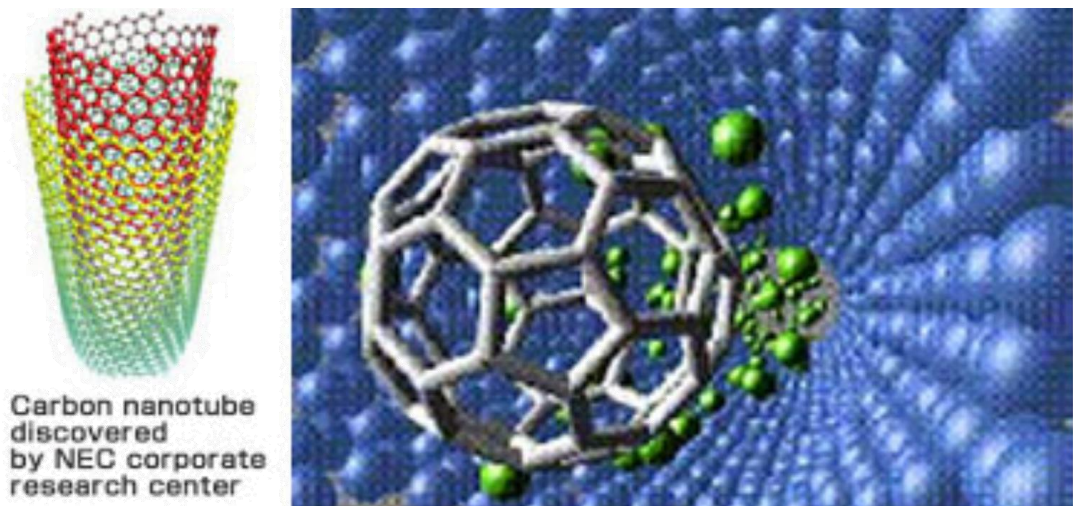
1) วัสดุนาโนแบบหนึ่งมิติ (One-dimensional)

การผลิตแผ่นฟิล์มบางชั้นเคลือบผิวและพื้นผิวต่างๆ ในอุตสาหกรรมผลิตภัณฑ์อิเล็กทรอนิกส์โดยเฉพาะอย่างยิ่งในการผลิตแผงวงจรไฟฟ้าซึ่งต้องการแผงวงจรที่บางมาก และการผลิตเซลล์เชื้อเพลิง (Fuel Cell) ที่ต้องการคุณสมบัติของวัสดุนาโนที่มีความไวต่อตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเฉพาะเจาะจง การเคลือบผิวแบบบางในระดับนาโนพบได้ในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์แบบ Optoelectronic กระจกทำความสะอาดตัวเองได้ (Self-Cleaning Window) ซึ่งเป็นการเคลือบพื้นผิวกระจกด้วยสารที่ไม่ชอบน้ำ (Water Repellent) ตลอดจนการเคลือบผิววัสดุด้วยสารฆ่าเชื้อจุลินทรีย์ การพัฒนาเสื้อผ้าที่มีอากาศผ่านแต่สามารถกันน้ำและคราบสกปรก การเคลือบเพื่อเพิ่มความทนทานต่อการขีดข่วนของพื้นผิว การเคลือบผิวเพื่อเพิ่มการเกาะติด (Adhesion) และป้องกันการสูญเสียพลังงาน เป็นต้น

2) วัสดุนาโนสองมิติ (Two-dimensional.)

วัสดุนาโนที่อยู่ในกลุ่มนี้ได้แก่ผลิตภัณฑ์นาโนอิเล็กทรอนิกส์ที่เป็นที่รู้จักกันอย่างแพร่หลายอย่างเช่น ท่อนาโนคาร์บอน, เส้นลวดนาโน เป็นต้น ท่อนาโนคาร์บอนประดิษฐ์ขึ้นโดยนักฟิสิกส์ชาวญี่ปุ่นชื่อ Sumio Iijima ในปี พ.ศ. 2534 ภายหลังการค้นพบฟูลเลอร์รีน (Fullerene) 6 ปี ท่อนาโนคาร์บอนประกอบด้วยอะตอมของคาร์บอนที่ก่อรูปขึ้นมาเป็นโครงสร้างที่มีลักษณะคล้ายท่อ ส่วนฟูลเลอร์รีนคือโมเลกุลที่มีโครงสร้างประกอบไปด้วยอะตอมของคาร์บอนเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบและมีโครงสร้างอยู่กึ่งกลางระหว่างโครงสร้างของเพชรและแกรไฟต์ในตระกูลของคาร์บอน โครงสร้างของฟูลเลอร์รีนมีลักษณะเป็นลูกบอล แสดงดังภาพที่ 2. 1 เหมือนกรงปิครูปทรงกลมอันประกอบไปด้วยอะตอมของคาร์บอนจำนวน 60 อะตอม จึงเรียกอีกชื่อว่า C_{60} และเมื่อตัดแปลงโมเลกุลที่ค้นพบนั้นให้ขยายยาวออกไปเป็นโครงสร้างที่เป็นท่อเรียวยาวเล็กมีเส้นผ่านศูนย์กลางเพียง

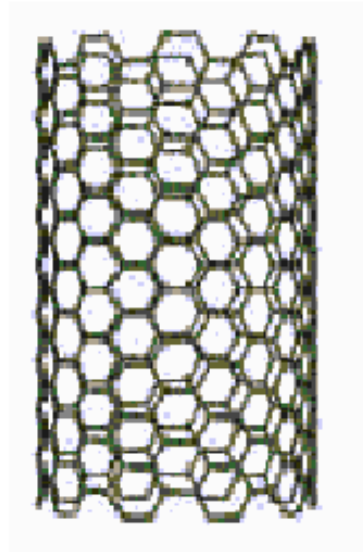
ไม่กี่นาโนเมตรได้สำเร็จจึงเรียกว่าท่อนาโนคาร์บอนหรือ $C_{1,000,000}$ ท่อนาโนคาร์บอนมีลักษณะเหมือนแผ่นกราฟิตที่มีวนตัวจนเกิดเป็นท่อจึงมีแถบการนำไฟฟ้า (Conduction Band) ที่สามารถนำอิเล็กตรอนได้ดี ในปัจจุบันท่อนาโนคาร์บอนสามารถนำมาทำเป็นสายไฟระดับโมเลกุลได้



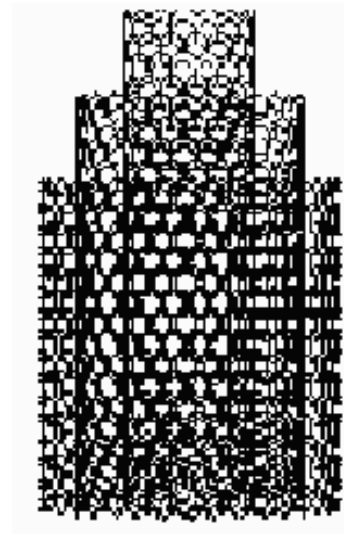
ภาพที่ 2. 1 ท่อนาโนคาร์บอนที่พบโดย NEC Fullerenes หรือบัลล์บอลคาร์บอนที่โครงสร้างเป็นรูปลูกบอล [1]

ท่อนาโนคาร์บอนมีความแข็งแรงในขณะที่น้ำหนักเบาและมีความยืดหยุ่นเป็นพิเศษ มีคุณสมบัติที่แข็งแรงและเหนียวกว่าเหล็กและสามารถนำไฟฟ้าหรือกลายเป็นฉนวน (ไม่นำไฟฟ้า) ก็ได้ขึ้นอยู่กับวิธีการออกแบบทิศทางการจัดเรียงตัวของอะตอมคาร์บอน ดังนั้นจึงสามารถนำมาประยุกต์ใช้ได้อย่างกว้างขวาง เช่น ใช้เป็นสายไฟจิ๋วในเครื่องใช้ไฟฟ้า ใช้ทำเส้นลวดนาโน และตัวนำไฟฟ้าในขนาดนาโน (Nano Scale Transistors) ใช้ทอเป็นเส้นใยที่มีความละเอียดสูงและทนทานกว่าไทเทเนียมหรือใช้ผลิตแบตเตอรี่ที่มีอายุการใช้งานนานนับสิบปี เป็นต้น

ท่อนาโนคาร์บอนมี 2 แบบ แสดงดังภาพที่ 2. 2 คือ ท่อนาโนแบบผนังชั้นเดียว (Single-walled Carbon Nanotubes; SWCNT) และท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังหลายชั้น (Multi-walled Carbon Nanotubes; MWCNT) แต่ละแบบมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางไม่กี่นาโนเมตรและความยาวตั้งแต่ระดับไมโครเมตรไปจนถึงระดับเซนติเมตร



(a) SWCNT



(b) MWCNT

ภาพที่ 2. 2 ท่อนาโนคาร์บอนมี 2 แบบ (a) SWCNT และ (b) MWCNT [1]

การผลิตท่อนาโนคาร์บอนในทางอุตสาหกรรม ยังประสบความยุ่งยาก เนื่องจากการที่ผลิตภัณฑ์ท่อนาโนคาร์บอนที่ผลิตได้มีรูปร่าง ขนาด สมบัติทางไฟฟ้า เส้นผ่านศูนย์กลางที่มีลักษณะแตกต่างกันอยู่ผสมปนกัน ทำให้ยากในการแยกท่อนาโนคาร์บอนว่าแต่ละชนิดออกจากกัน ต่อมาทางทีมวิจัยจาก Northwestern University มลรัฐอิลลินอยส์ สหรัฐอเมริกา ได้ประสบความสำเร็จในการออกแบบอุปกรณ์เพื่อจำแนกแยกท่อนาโนคาร์บอนชนิดต่างๆ จากกัน ซึ่งจะสามารถจัดอุปสรรคในการผลิตท่อนาโนคาร์บอนในระดับอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ที่ต้องใช้สารเติมแต่ง (Additive) ที่มีราคาแพงหรือมีข้อเสียอื่นๆ ที่จำกัดความมีประสิทธิภาพในการนำไปใช้แยกท่อนาโนคาร์บอนในระดับอุตสาหกรรม

วิธีการใหม่ที่ทีมวิจัยใช้ได้แก่ การผสมสารลดแรงตึงผิว (Surfactants) เข้ากับท่อนาโนคาร์บอนที่ผสมปนเปกันหลายขนาด สารลดแรงตึงผิวจะทำให้ท่อนาโนสามารถกระจายตัวในน้ำได้ จากนั้นนักวิจัยจะนำส่วนผสมดังกล่าวใส่ในหลอดทดลองที่มีสารประกอบของไอโอดีนเป็นชั้นๆ โดยความเข้มข้นของไอโอดีนและความหนาแน่นของสารละลายเพิ่มขึ้นตามความลึกของหลอดทดลอง จากนั้นนำหลอดทดลองดังกล่าวไปปั่นเป็นเวลาหลายชั่วโมงด้วยอัตราหลายหมื่นรอบต่อนาที ความแตกต่างในคุณสมบัติแรงลอยตัว (Buoyancy) จะแยกท่อนาโนคาร์บอนขนาดต่างๆ เป็นแถบในแนวนอน (Horizontal Bands) และโครงสร้างของท่อนาโนคาร์บอนจะทำให้แต่ละแถบมีสีที่แตกต่างกัน วิธีใหม่นี้จะมีความแม่นยำสูงสามารถแยกท่อนาโนทิวที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางแตกต่างกันเพียง 200–

300 นาโนเมตร (10^{-6} เมตร) ได้ท่อนาโนที่มีคุณสมบัติเป็นโลหะ (Metallic) และที่เป็นสารกึ่งตัวนำ (Semiconductor) จะแยกจากกันเนื่องจากมีแรงดึงดูดกับโมเลกุลของสารลดแรงตึงผิว (Surfactants) ที่แตกต่างกันทำให้สามารถนำท่อนาโนคาร์บอนที่มีคุณสมบัติต่างกันไปใช้ประโยชน์ได้

เส้นลวดนาโน เป็นการรวมตัวกันของอนุภาคนาโนต่างๆ (Self-Assembly) เช่น จาก Silicon, Gallium Nitride, Indium Phosphide เป็นต้น มีคุณสมบัติในการเก็บข้อมูลสูง จึงมีการนำมาใช้ประยุกต์ใช้ในระบบจัดเก็บข้อมูล โดยที่นักวิจัยสถาบันของ Massachusetts Institute of Technology สามารถสร้างเส้นลวดนาโน จากวัสดุโคบอลต์ออกไซด์และทองซึ่งสามารถนำมาใช้เป็นขั้วไฟฟ้า (Electrode) สำหรับลิเทียมไอออนแบตเตอรี่ซึ่งจะเป็นแหล่งพลังงานแบตเตอรี่ที่บางและยืดหยุ่นได้ โดยนักวิจัยใช้ประโยชน์จากไวรัสที่เรียกว่า M13 ซึ่งมีขนาดความยาว 880 นาโนเมตร กว้าง 6 นาโนเมตร และหุ้มห่อด้วยโปรตีนที่เหมือนกันสองสามพันตัว ทีมนักวิจัยสามารถนำไวรัสไปสร้างเส้นลวดนาโนจากวัสดุต่างๆ ชนิดเพื่อใช้ประโยชน์เป็นอิเล็กโทรดในแบตเตอรี่ นักวิจัยออกแบบให้ผิวของไวรัสมีขั้วบวกลูกครึ่ง (Hybrid Anode) ที่ทำจากโคบอลต์และทองซึ่งมีประสิทธิภาพการเก็บพลังงานมากกว่าขั้วโคบอลต์ออกไซด์เพิ่มขึ้น 30 เปอร์เซ็นต์ กลยุทธ์ที่ใช้การออกแบบให้ไวรัสจับโลหะชนิดต่างๆ ได้นั้น เป็นงานวิจัยที่มหัศจรรย์นำไปสู่การออกแบบที่สลับซับซ้อนมากขึ้นของวัสดุผสม (Composite Material) ซึ่งมีคุณสมบัติที่นักวิทยาศาสตร์ต้องการ

3) วัสดุนาโนแบบศูนย์มิติ (Zero-dimensional)

อนุภาคนาโนของสารหนึ่งๆ เมื่อถูกออกแบบให้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กกว่า 100 นาโนเมตรจะทำให้เกิดคุณสมบัติใหม่ๆหรือเพิ่มระดับความสามารถจากเดิม อย่างเช่น ไทเทเนียมไดออกไซด์ และซิงค์ไดออกไซด์ ซึ่งสามารถมองเห็นได้ถ้าอยู่ในระดับอนุภาคนาโนแต่ยังคงมีคุณสมบัติในการดูดซึมและสะท้อนแสงแดดได้อยู่จึงถูกนำมาใช้ทำครีมกันแดด หรือสารเคมีอื่นๆในระดับอนุภาคนาโนสามารถนำมาทำสีทาบ้านหรือสีเคลือบรถยนต์รวมถึงเป็นส่วนประกอบในเสื้อผ้าเครื่องนุ่งห่ม สินค้าเครื่องสำอางที่ประกอบไปด้วยอนุภาคนาโนที่สามารถแทรกซึมเข้าไปในชั้นผิวหนังได้ลึกมากขึ้นก็ถูกนำมาใช้ทำครีมเพื่อต่อต้านริ้วรอย เช่น Plenitude Revita-Lift ของ L'Oreal Paris ใช้เทคนิคในการบรรจุวิตามินไวในแคปซูลขนาดเล็กมากที่ทำหน้าที่เป็นเหมือนฟองน้ำเก็บกักครีมไว้และจะปล่อยออกมาเมื่อชั้นแคปซูลภายนอกละลายภายใต้ผิวหนัง

นอกจากการประดิษฐ์อนุภาคนาโนขึ้นจากสารเคมีเดิมที่มีอยู่แล้ว ยังมีการประกอบอนุภาคนาโนเข้ากับสิ่งอื่นๆ เช่น การสร้างวัสดุนาโนผสมเพื่อเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

ในอุตสาหกรรม การพัฒนาฟิล์มพลาสติกนาโนคอมโพสิตที่มีความสามารถในการสกัดกั้น การผ่านของก๊าซบางชนิดและไอน้ำเพื่อใช้ทำบรรจุภัณฑ์เพื่อยืดอายุความสดของผักและ ผลไม้และเพิ่มมูลค่าการส่งออก การผลิตบรรจุภัณฑ์หรือเครื่องมือทางการแพทย์เพื่อใช้ฆ่า เชื้อแบคทีเรีย ไวรัส หรือทำให้ไม่เปียกน้ำ เป็นต้น

ควอนตัมดอทเป็นอนุภาคนาโนที่ใช้ในวงการนาโนอิเล็กทรอนิกส์ (Nano electronics) และวงการพลังงานเพื่อทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพและประสิทธิภาพสูง เช่น การพัฒนาระบบไฟฟ้าเครื่องกลขนาดนาโนการผลิตโซลาเซลล์ (Solar Cell) การ พัฒนานาโนชิปให้มีขนาดเล็กลงและมีประสิทธิภาพสูงทำให้คอมพิวเตอร์ทำงานได้ รวดเร็ว มีอายุการใช้งานยาวนาน ใช้พลังงานน้อยลง ทำให้ผลิตภัณฑ์อิเล็กทรอนิกส์มีขนาด เล็กลงพกพาได้สะดวกหรืออาจฝังเข้าไปในร่างกายได้รวมถึงมีความฉลาดสามารถรับ ข้อมูลและปรับเปลี่ยนโครงสร้าง ตลอดจนจำลองตัวเองขึ้นมาใหม่ได้ เป็นต้น ตลอดจนใช้ ในการตรวจสอบลักษณะของอนุภาคนาโนในสารเคมี (Fluorescent Biological Labels) หรือเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาต่างๆ อย่าง Crystalline Quantum dots ส่วนวัสดุนาโนคริสตัลก็จะ ถูกนำมาใช้ทำจอแสดงผล (Displays) และแบตเตอรี่ เป็นต้น

2.1.2 ไทเทเนียมไดออกไซด์ [2]

ไทเทเนียมไดออกไซด์จะเป็นผงสีขาว มวลโมเลกุลเท่ากับ 79.9 เป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติ เป็นสารกึ่งตัวนำ (Semiconductor) ประเภท N-type ซึ่งมีโครงสร้างผลึกที่แตกต่างกัน 3 รูปแบบ คือ อนาเทส (Anatase) รูไทล์ (Rutile) และบรูคไคท์ (Brookite) โครงสร้างผลึกที่ แตกต่างกันนั้น ส่งผลให้โครงสร้างผลึกแต่ละโครงสร้างมีคุณสมบัติที่แตกต่างกัน เมื่อ พิจารณาทางด้านเทอร์โมไดนามิกส์พบว่าพลังงานอิสระของการเกิดที่ภาวะมาตรฐาน สำหรับไทเทเนียมไดออกไซด์ ที่มีโครงสร้างแบบรูไทล์ที่มีค่า -889.5 กิโลจูลต่อโมล อีกทั้ง ค่าความหนาแน่นของไทเทเนียมไดออกไซด์ ที่มีโครงสร้างผลึกแบบอนาเทสนั้น มีค่า เท่ากับ 3.894 กรัมต่อลูกบาศก์เมตร ในขณะที่ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีโครงสร้างผลึก แบบรูไทล์นั้นมีค่าความหนาแน่นเท่ากับ 4.250 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร แถบช่องว่าง พลังงานของโครงสร้างผลึกแบบอนาเทส มีค่าเท่ากับ 3.23 อิเล็กตรอนโวลต์ ในขณะที่รู ไทล์มีค่าเท่ากับ 3.02 อิเล็กตรอนโวลต์ จึงทำให้ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีโครงสร้างผลึก แบบอนาเทส มีความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยาสูงกว่าไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีโครงสร้าง ผลึกแบบรูไทล์ เนื่องจากจะเกิดการรวมตัวใหม่ของ e^- และ h^+ ได้ง่าย ส่งผลทำให้ ความสามารถในการดูดซับโฟตอนต่ำกว่าโครงสร้างผลึกแบบอนาเทสและโครงสร้างผลึกแบบ บรูคไคท์ การทำให้บริสุทธิ์นั้นทำได้ยากจึงไม่นิยมนำมาใช้

ปัจจุบันการประยุกต์ใช้นิยมนำไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีโครงสร้างผลึกแบบ อนุนาทอส และรูไทล์มาใช้เพราะมีคุณสมบัติฆ่าเชื้อโรคในรูปของอนุภาคนาโน โดยกระบวนการใช้แสงอัลตราไวโอเลต (Ultraviolet, UV) ขยายลงไปยังไทเทเนียมไดออกไซด์จะเกิดปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติก (Photocatalytic) ที่สามารถใช้กำจัดสารอินทรีย์และสารอินทรีย์ที่ปะปนอยู่ในน้ำหรืออยู่ในอากาศได้ ที่สัมผัสกับพื้นผิวของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงได้

โฟโตแคตะไลซิส ประกอบด้วย 2 ส่วน คือ “โฟโต (Photo)” ที่ใช้น้ำหนักที่แสงมาเกี่ยวข้องด้วย และ “แคตะไลซิส (Catalyst)” เป็นกระบวนการที่อนุภาคของสารมีส่วนร่วมในการทำให้เกิดอัตราการเปลี่ยนแปลงทางเคมี โดยที่ตัวเองไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงหรือสลายหลังจากสิ้นสุดกระบวนการ และเรียกสารที่เพิ่มอัตราการเกิดปฏิกิริยาทางเคมีโดยการลดพลังงานกระตุ้น (The Activation Energy) ว่า “สารเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง” ในกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงจึงเป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจากการใช้แสงไปกระตุ้นสารที่เปลี่ยนแปลงอัตราการเกิดปฏิกิริยาทางเคมีโดยที่ไม่เกี่ยวข้องกันตัวเอง ปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการโฟโตแคตะไลติก ได้แก่ ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ความเข้มข้นตัวเร่งปฏิกิริยา อุณหภูมิ ปริมาณออกซิเจนละลาย (Dissolved Oxygen) และความเข้มของแสง (Light Intensity)

การฉายแสงอัลตราไวโอเลต จากดวงอาทิตย์หรือจากหลอดฟลูออเรสเซนต์ไปที่ไทเทเนียมไดออกไซด์จะทำให้เกิดอนุมูลไฮดรอกซิล (Hydroxyl Radical) ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (Hydrogen peroxide) และประจุลบของซูเปอร์ออกไซด์ (Superoxide Anions) ซึ่งสารตระกูลออกซิเจนที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาเหล่านี้สามารถทำลายโครงสร้างและยับยั้งชีวเคมีของแบคทีเรียและเซลล์ที่ติดเชื้อไวรัส การเกิดอนุมูลไฮดรอกซิลและโมเลกุลของออกซิเจน จะทำให้จำพวกสารประกอบอินทรีย์ถูกทำเป็นออกไซด์จนในที่สุดจะกลายเป็นคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ แล้วเข้าไปทำปฏิกิริยาออกซิเดชันสลายก๊าซพิษต่างๆ และสารก่อมะเร็ง เช่น Acetaldehyde, Benzene, Formaldehyde เป็นต้น

ปัจจุบันมีการปรับปรุงประสิทธิภาพของสารเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงของไทเทเนียมไดออกไซด์ให้สูงขึ้น โดยการปรับแต่งพื้นผิวด้วยอะตอมของธาตุชนิดต่างๆ เช่น คาร์บอน, ไนโตรเจน ซัลเฟอร์ เป็นต้น ให้สามารถถูกกระตุ้นด้วยแสงในช่วงตาคนมองเห็นได้ (Visible Light) นอกจากนี้ยังนำไทเทเนียมไดออกไซด์มาดูดซับด้วยไอออนของโลหะทรานสิชัน เช่น Fe^{3+} , Cr^{3+} และ V^{3+} เป็นต้นซึ่งไอออนเหล่านี้จะสามารถเพิ่มการถ่ายเทอิเล็กตรอนของไทเทเนียมไดออกไซด์ให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้นได้

● ประโยชน์ของอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ [3]

(1) ความสามารถในการต้านแบคทีเรีย

ไทเทเนียมไดออกไซด์มีผลในการกำจัดแบคทีเรียได้แล้วยังช่วยในการย่อยสลายซากได้ เพราะไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เป็นสารเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงนั้น มีประสิทธิภาพสูงกว่าสารต้านแบคทีเรียชนิดอื่น ๆ เนื่องจากปฏิกิริยาจะทำงานเมื่อมีเซลล์แบคทีเรียสัมผัสกับพื้นผิว หรือเมื่อแบคทีเรียแพร่กระจายไปบนพื้นผิว นอกจากนี้สารพิษที่เกิดจากการตายเซลล์ก็จะถูกทำลายจากการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง และที่สำคัญไทเทเนียมไดออกไซด์จะไม่เกิดการเสื่อมประสิทธิภาพหลังจากที่ทำลายเชื้อแบคทีเรีย ทำให้มีประสิทธิภาพการใช้งานที่ยาวนาน

(2) ด้านการกำจัดกลิ่น

อนุภาคไฮดรอกซีที่เกิดจากไทเทเนียมไดออกไซด์สามารถกำจัดโมเลกุลของสารอินทรีย์ ที่ระเหยอยู่ในอากาศ (Volatile Organic Compounds หรือ VOCs) อันเป็นสาเหตุของกลิ่นไม่พึงประสงค์ โดยการทำลายพันธะระหว่างโมเลกุลของสารเหล่านั้น ด้วยวิธีการนี้จะทำให้สารอินทรีย์ที่ระเหยอยู่ในอากาศแตกออกเป็นโมเลกุลเดี่ยว จึงไม่สามารถทำอันตราย หรือส่งผลต่อร่างกายมนุษย์ได้ แล้วยังมีประสิทธิภาพในการฟอกอากาศให้สะอาด โดยการกำจัดโมเลกุลของสารที่ทำให้เกิดกลิ่นไม่พึงประสงค์เช่น กลิ่นบูหรี กลิ่นยาสูบ สารประเภท ฟอรั่มอดีไฮด์ ไนโตรเจนไดออกไซด์ ยูรีน กลิ่นอุจจาระ น้ำมันเชื้อเพลิง และจำพวกสารประกอบไฮโดรคาร์บอนอีกหลายชนิดในอากาศ ไทเทเนียมไดออกไซด์สามารถทำให้อากาศสะอาดจาก ควั่น เกสรดอกไม้ แบคทีเรีย และไวรัส รวมถึงก๊าซอันตราย ด้วยคุณสมบัติของการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง

(3) ความสามารถในการฟอกอากาศ

ด้วยปฏิกิริยาทางแสงจะสามารถกำจัดสารที่ก่อให้เกิดมลภาวะทางอากาศได้ เช่น สารประกอบไนโตรเจนออกไซด์ ควั่นบูหรี รวมถึงสารระเหยต่างๆ ที่ออกมาจากอาคาร นอกจากนี้ยังช่วยป้องกันเขม่า และคราบดำต่าง ๆ ที่จะเกาะผนัง รวมถึงช่วยกำจัดสารประเภทที่ทำลายชั้นบรรยากาศ เช่น ก๊าซคลอโรฟลูออโรคาร์บอน (CFC) และก๊าซเรือนกระจกประเภทอื่น รวมถึงก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์ และซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ทั้งทางตรงและทางอ้อมเมื่อได้รับการกระตุ้นด้วยแสง

(4) สามารถป้องกันการเกิดหยดน้ำและคราบต่างๆ รวมทั้งทำให้เกิดสมบัติการทำความสะอาดตัวเอง

สมบัติในการทำความสะอาดตัวเอง โดยเมื่อถูกกระตุ้นด้วยแสง จะสลายสารประกอบไฮโดรคาร์บอน รวมทั้งฝุ่นผงต่างๆ ที่เกาะติดอยู่กับผนัง และจะถูกชะล้างออกจากผนังอย่างง่ายได้ตอนล้างหรือฝนตกลงมา ทำให้ผนังตึกสะอาดและใหม่อยู่เสมอ

(5) ความสามารถในการทำน้ำสะอาด

ตัวเร่งปฏิกิริยาร่วมกับ รังสีอัลตราไวโอเลต สามารถกำจัดสารอินทรีย์ที่ก่อมลภาวะให้กลายเป็นสารที่ไม่เป็นอันตรายได้ เช่น ทำให้กลายเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และน้ำ รวมถึงมีคุณสมบัติในการต้านแบคทีเรีย เทคโนโลยีนี้มีประสิทธิภาพสูงในการกำจัดสารอินทรีย์อันตราย และช่วยฆ่าแบคทีเรียหลายชนิดรวมถึงไวรัส

2.1.3 กระบวนการโฟโตแคตตาไลติก [4]

เมื่อสารกึ่งตัวนำได้รับพลังงานกระตุ้นหรือพลังงานโฟตอน (Photon Energy) ทำให้อิเล็กตรอนอิสระในแถบพลังงานชั้นวาเลนซ์ (Valence Band; VB) มีพลังงานมากขึ้น ทำให้สามารถข้ามแถบพลังงาน (Band Gap) ไปยังแถบพลังงานชั้นตัวนำ (Conduction Band; CB) ทำให้แถบวาเลนซ์เกิดโฮลที่เป็นบวก (Hole; h^+) เมื่อมีการคลายพลังงานของอิเล็กตรอนที่มีการถูกกระตุ้นจะทำให้โฮลอิเล็กตรอนและโฮลกลับมารวมตัวกันอีกครั้ง โดยรวมทั้งหมดเรียกปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นนี้ว่า “ปฏิกิริยาการใช้แสง” (Photoreactions) โดยจะใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalysts) ในการทำปฏิกิริยาในกระบวนการ

พลังงานโฟตอน สามารถคำนวณได้ด้วยสมการ (2. 1)

$$\mathcal{E} = h\nu = \frac{hc}{\lambda} \quad (2.1)$$

h คือ ค่าคงที่ของพลังค์ (Planck) มีค่า 4.135×10^{-15} eV.s

ν คือ ความถี่ (cm^{-1})

λ คือ ค่าความยาวคลื่น (nm)

c คือ ค่าความเร็วแสงมีค่าเท่ากับ 3×10^8 m/s

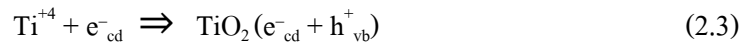
กรณีตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) มีค่าแถบพลังงาน 3.2 eV ทำให้มีความยาวคลื่นของโฟตอนมีค่าแถบพลังงานเท่ากับแถบพลังงานของไทเทเนียมคือ

$$\lambda = \frac{hc}{\mathcal{E}} \quad (2.2)$$

$$\lambda = \frac{(4.136 \times 10^{-15} \text{ eV.s}) \times (3 \times 10^8 \text{ m/s})}{3.2 \text{ eV}}$$

$$= 0.388 \times 10^{-6} \text{ m หรือ } 0.388 \text{ } \mu\text{m}$$

กระบวนการโฟโตแคตะไลติกประกอบด้วยการปล่อยอิเล็กตรอนจากแถบวาเลนซ์ไปยังแถบนำไฟฟ้า ของสารกึ่งตัวนำ และการสร้างโฮล ในแถบวาเลนซ์ เพราะว่ารังสีอัลตราไวโอเลต (UV) มีพลังงานเท่ากับหรือมากกว่าแถบพลังงาน (Band gap > 3.2 eV) กระบวนการนี้จึงสามารถถูกใช้ในการทำลายมลสารได้อย่างมีประสิทธิภาพ สำหรับปรากฏการณ์ของกระบวนการที่เกิดขึ้นจากการที่มีการส่องแสงลงบนสารกึ่งตัวนำทำให้เกิดค่าอิเล็กตรอนโฮล (e^-h^+) ดังแสดงในสมการที่ 2.3 โดยประจุที่เกิดขึ้นนี้มีผลทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน และรีดักชันในสารละลายในความสามารถที่เหมาะสมของปฏิกิริยารีดอกซ์

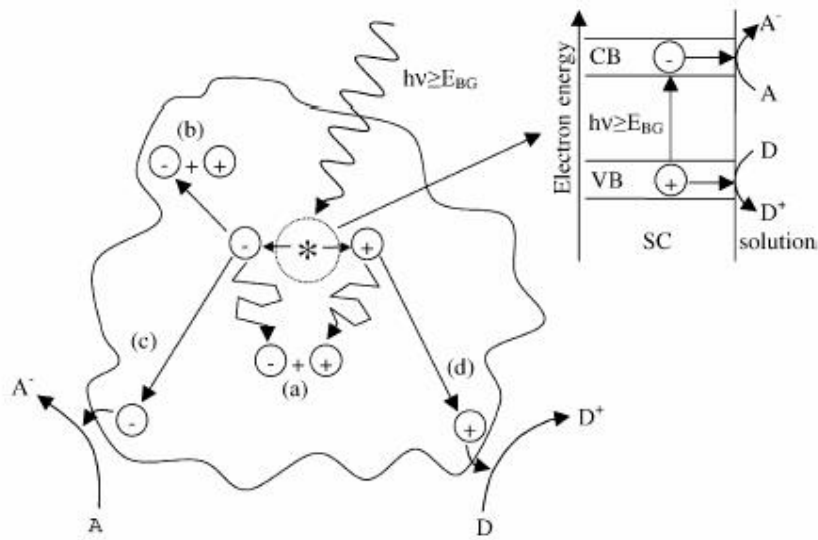


อิเล็กตรอน (e^-_{cb}) สามารถลดอะตอมที่ผิวของไทเทเนียมดังแสดงในสมการ 2.4 หรือออกซิเจนที่สัมผัส หรืออิเล็กตรอนทั่วไปที่อยู่รอบๆ ไทเทเนียม (Electron scavenger) ในกรณีเบื้องต้นอะตอมของไทเทเนียมสามารถถูกออกซิไดซ์กลับคืนได้ด้วย โฮล (h^+_{vb}) ดังแสดงในสมการ 2.5 ซึ่งเสมือนการรวมตัวกลับเป็นสู่สภาพเดิม



สมการต่อไปนี้เป็นสมการที่แสดงถึงการเกิดของอนุมูลอิสระ ($\bullet\text{OH}$) ที่มีผลต่อปฏิกิริยาที่พื้นผิวของสารกึ่งตัวนำ และเข้าทำปฏิกิริยาออกซิเดชันโดยตรงต่อมลสาร (R) ดังแสดงในสมการ 2.6 ถึง 2.8





ภาพที่ 2.3 กระบวนการที่เกิดขึ้นที่ผิวของสารกึ่งตัวนำ (Semiconductor; SC) ดูดซับโฟตอนจากแสง UV ที่มีพลังงานมากกว่าหรือเท่ากับ แถบพลังงาน ($h\nu \geq E_{BG}$) ทำให้เกิดอิเล็กตรอนในแถบวาเลนซ์และโฮลในแถบตัวนำ ทำให้เป็นคู่อิเล็กตรอน-โฮล (e^-h^+) สามารถกระจายไปบริเวณผิวของสารกึ่งตัวนำ (a) เป็นการรวมตัวกันของคู่อิเล็กตรอน-โฮล (b) กระบวนการรวมตัว ที่บริเวณผิว (c) ตัวรับ อิเล็กตรอน A ที่มาดูดซับบนผิวในปฏิกิริยารีดักชัน (d) ตัวให้อิเล็กตรอน D ที่มาเกาะติดผิวในปฏิกิริยาออกซิเดชัน ที่บริเวณโฮล [4]

อิเล็กตรอนถูกปล่อยออกมาทำปฏิกิริยากับตัวรับอิเล็กตรอน เช่น ออกซิเจนดูดซับ หรือ ถูกละลายในน้ำ อนุมูลอิสระ $\cdot OH$ อาจจะเปลี่ยนไปเป็น H_2O_2 จากไอออนของอนุมูลอิสระออกซิเจน ($O_2^{\cdot -}$) โดยที่ออกซิเจนเป็นตัวที่เข้าแย่งรับอิเล็กตรอนจากอนุภาคสารกึ่งตัวนำ ดังสมการ 2.9



ดังนั้น อิเล็กตรอน และโฮลจะมารวมตัวกันโดยปราศจากผู้ให้อิเล็กตรอนหรือผู้รับ ดังแสดงในสมการ 2.10 และปรากฏการณ์แสดงในภาพที่ 2.3

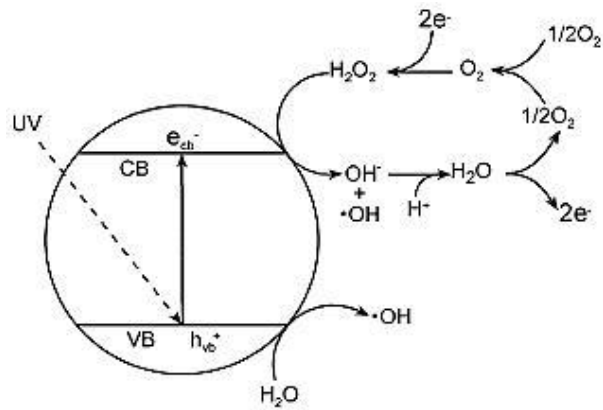


H_2O_2 สามารถเกิดได้จากการทำปฏิกิริยาของ $O_2^{\cdot -}$ ดังสมการ 2.11-2.14

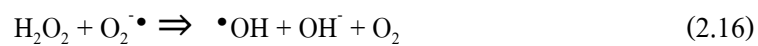




การสลายตัวของ H_2O_2 เพื่อเข้าทำปฏิกิริยาทำให้ได้อนุมูลอิสระ $\cdot\text{OH}$ และ มีการหมุนเวียน ในการเข้าทำปฏิกิริยากับตัวเร่งปฏิกิริยาดังที่แสดงในภาพที่ 2. 4 และสมการ 2.15-2.17



ภาพที่ 2. 4 ผังแสดงการเกิดอนุมูลอิสระไฮดรอกซิลจากระบบโฟโตแคตะไลติกใช้ TiO_2 ช่วยทางเคมีอิเล็กตรอน [4]



ตาราง 2.1 การประยุกต์ใช้กระบวนการโฟโตแคตะไลติกในการบำบัด [5]

มลสารในสภาวะตัวกลาง	การประยุกต์ใช้
น้ำ	การลดกลิ่น การฆ่าเชื้อโรค การย่อยสลายสารปราบศัตรูพืช กำจัดมลสารอินทรีย์ ย่อยสลายมลสารอินทรีย์ กำจัดสารตรงผิว นำโลหะกลับมาใช้ใหม่ ย่อยสลายสี สารระเหยอินทรีย์
อากาศ	ออกซิเดชันออกไซด์ของไนโตรเจน ลดกลิ่นภายในอาคาร ฆ่าเชื้อโรคในอากาศ
ดิน	บำบัดสารฆ่าแมลงในพื้นที่เกษตร ลดกลิ่นในพื้นที่เลี้ยงสัตว์

ตาราง 2. 2 มลสารที่สามารถบำบัดด้วยกระบวนการโฟโตแคตตาไลติก [6]

ประเภทของมลสาร	มลสารตัวอย่าง
มลสารอินทรีย์	Benzene, Toluene, Ethylbenzene, Xylene, Phenols, Trichloroethylene, halogenated hydrocarbon, polychlorinated biphenyls (PCBs), Dichlorodiphenyltrichloroethane (DDT), dioxins, alkanes, aliphatic alcohols, aliphatic carboxylic acids, alkenes, phenols, aromatic carboxylic acids, simple aromatics, halogenated alkanes, alkenes
มลสารอนินทรีย์	Cyanide, Hydrogen sulfide, Mercury, Cadmium, Chromium (Cr^{6+}), Sulfite, Manganese, Lead, Zinc, Copper, Arsenic, Gold (Au^{3+})
เชื้อโรค	Escherichia coli, Lactobacillus acidophilus, Saccharomyces cerevisiae, Fecal coliforms

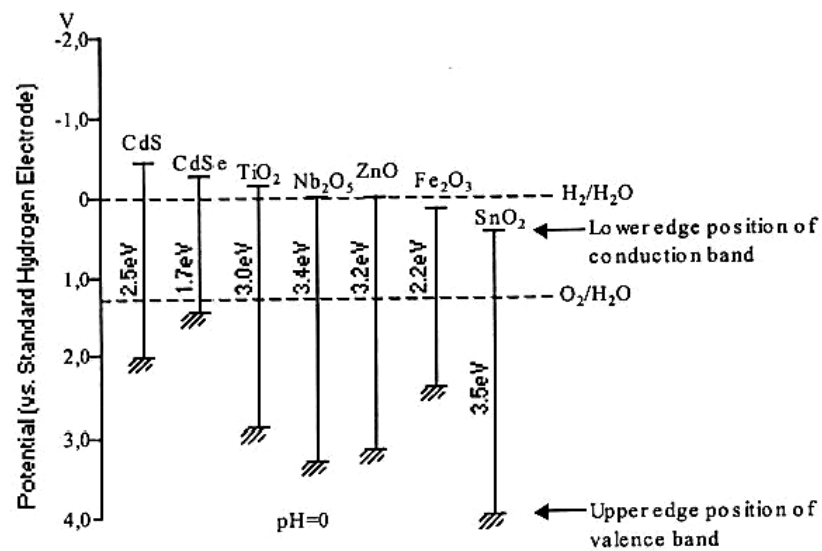
การประยุกต์ใช้กระบวนการทางโฟโตแคตตาไลติกเพื่อรีดักชัน Cr^{6+} เป็น Cr^{3+} การรีดักชัน ด้วยกระบวนการทางโฟโตแคตตาไลติก Cr^{6+} ค่า pH มีผลต่อปฏิกิริยา ส่วนมากมีประสิทธิภาพที่ pH 2 และ ให้ผลิตภัณฑ์เป็น Cr^{3+} เมื่อปรับค่า pH ให้มากกว่า 5 เกิดการตกตะกอน อัตราการรีดักชันของ Cr^{6+} มีผลต่อสารอินทรีย์ที่เข้ามาทำปฏิกิริยา โดยปฏิกิริยาออกซิเดชันซึ่งเป็นการเพิ่มอัตราการรีดักชันมากขึ้น

● ชนิดและภาพแบบของสารกึ่งตัวนำที่ใช้ในกระบวนการโฟโตแคตตาไลติก

สารกึ่งตัวนำที่สามารถนำมาใช้ในงานบำบัดมลพิษโดยกระบวนการโฟโตแคตตาไลติกมาหลายชนิด เช่น TiO_2 , ZnO , WO_3 , Fe_2O_3 , SrTiO_3 , CdS , MoS_2 , ZnS , ZnTe และ CdSe เป็นต้น แสดงในดังตาราง 2. 3 การเลือกสมบัติของสารกึ่งตัวนำ [6] ในแถวสุดท้ายจะแสดงถึงช่วงคลื่นของพลังงานแสงที่ต้องการไปกระตุ้นต่อสารกึ่งตัวนำนั้นๆ

ตาราง 2.3 การเลือกสมบัติของสารกึ่งตัวนำ [6]

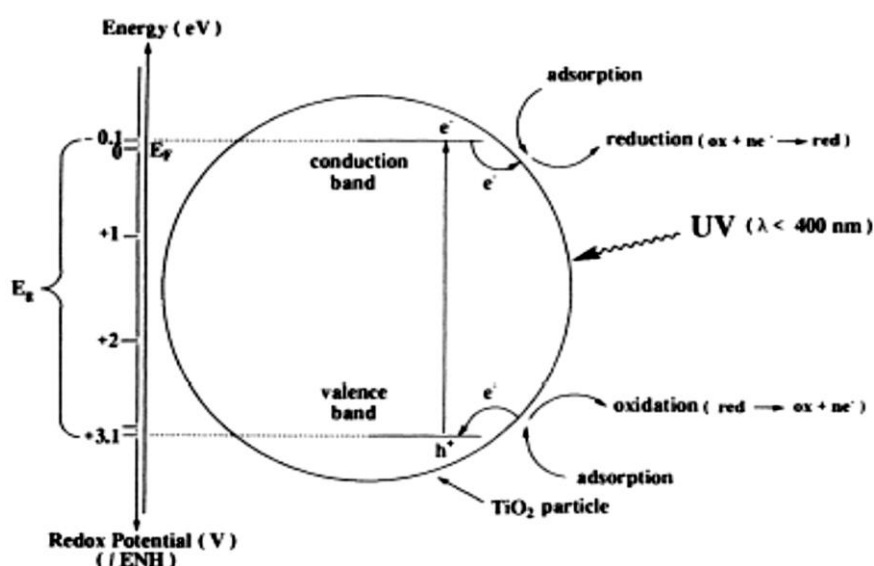
วัสดุ	แถบพลังงาน (eV)	ช่วงความยาวคลื่นที่มีผลต่อแถบพลังงาน (nm)
BaTiO ₃	3.3	375
CdO	2.1	590
CdS	2.5	497
CdSe	1.7	730
GaAs	2.2	565
ZnS	1.4	887
GaP	2.3	540
SnO ₂	3.9	318
SrTiO ₃	3.7	336
TiO ₂	3.2	390
WO ₃	2.8	443
ZnO	3.2	390
Fe ₂ O ₃	3.4	365



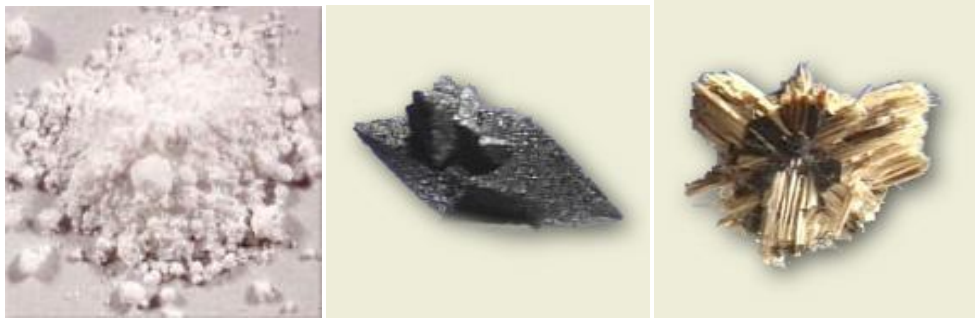
ภาพที่ 2.5 ค่าพลังงานที่ขอบบนล่างของแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำ [6]

ความสามารถของสารกึ่งตัวนำภายใต้ของการก่อให้เกิดการถ่ายโอนอิเล็กตรอนจากการดูดซับของอนุภาคที่ถูกควบคุมโดยตำแหน่งของแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำและความสามารถของปฏิกิริยารีดอกซ์ (Redox potentials) ของตัวเร่งปฏิกิริยา ระดับศักยภาพของสารตัวรับอิเล็กตรอนต้องการอิเล็กตรอนจากแถบตัวนำ ส่วนระดับศักยภาพของสารตัวให้อิเล็กตรอนต้องการจากตำแหน่งของแถบวาเลนซ์ ที่ต้องให้อิเล็กตรอนให้กับโฮล ที่ว่างอยู่ ขอบของแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำหลากหลายตัวดังแสดงในภาพที่ 2.5 ค่าพลังงานที่ขอบบนล่างของแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำ [6] เมื่อตัวเร่งปฏิกิริยาสารกึ่งตัวนำถูกฉายแสงด้วยพลังงานโฟตอนเท่ากับหรือมากกว่าแถบพลังงานแบนแก๊ป โดยพลังงานที่ดูดซับทำให้เกิดคู่ $e^- h^+$ ให้อิเล็กตรอนอิสระที่แถบตัวนำ และเกิดโฮลที่แถบวาเลนซ์ ดังแสดงในภาพที่ 2.6

สารกึ่งตัวนำที่ใช้บำบัดน้ำไปสู่การใช้เป็นอิเล็กโทรด (แอโนด) ในรูปของสารผสม Ti(III)/ Ti(IV)Nb(V)/ Nb(IV) ผสมกับออกไซด์ของโลหะเคลือบด้วยไทเทเนียมที่เป็นแท่งหรือแผ่น สารกึ่งตัวนำ แอโนดคู่กับคาร์บอนเคลือบแคโทดในเซลล์อิเล็กโทรเคมี ในระบบอิเล็กโทรไลซิสให้อนุมูลอิสระไฮดรอกซิลที่ขั้วแอโนดจากไฮดรอกไซด์ออกซิเดชันและไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ขั้วแคโทดจากออกซิเจนรีดักชันอนุมูลอิสระของไฮดรอกซิลและไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์สามารถใช้ในปฏิกิริยาออกซิเดชันในการย่อยสลายมลสารในสิ่งแวดล้อมได้เป็นอย่างดีมีประสิทธิภาพสูง



ภาพที่ 2.6 พังแถบพลังงานของอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ พร้อมความสามารถของการรีดอกซ์ [6]



(a) ผงไทเทเนียมไดออกไซด์ (b) อนาเทส (c) รูไทล์

ภาพที่ 2. 7 แร่ผลึก (a) รูไทล์ (b) อนาเทส และ (c) ผงไทเทเนียมไดออกไซด์ [10]

ไททาเนียมไดออกไซด์ จะมีผลึกแบบอนาเทส หรือ รูไทล์ ในธรรมชาติดังแสดงในภาพที่ 2. 7 ใช้ในอุตสาหกรรมสีทำบ้าน กระบวนการทำความสะอาดพื้นผิวไทเทเนียมไดออกไซด์มีคุณสมบัติที่ดี ทำให้นิยมใช้กัน คือ Degussa P25 (ประกอบด้วย Anatase 70% และ Rutile 30%) มีสีขาวสว่างทึบ มีเสถียรภาพต่อสารเคมีซึ่งเป็นจุดเด่นของ TiO_2 สำหรับงานโฟโตแคตตาไลซิสแล้วใช้ TiO_2 เป็นตัวเร่ง สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้

ตาราง 2. 4 แสดงสมบัติทั่วไปของไทเทเนียมไดออกไซด์ [11]

สมบัติ	ไทเทเนียมไดออกไซด์
สูตรโมเลกุล	TiO ₂
น้ำหนักโมเลกุล	79.9 กรัม/โมล
ลักษณะและสี	ของแข็งสีขาว
จุดเดือด	2500 องศาเซลเซียส
จุดหลอมเหลว	1830 องศาเซลเซียส
ความหนาแน่น: - เฟสอนาเทส	2.49 ซม ³
- เฟสรูไทล์	1.903 ซม ³
ดัชนีหักเห: - เฟสอนาเทส	3.84
- เฟสรูไทล์	4.26
ค่าช่องว่างระดับพลังงาน	
- เฟสอนาเทส	3.23 อิเล็กตรอนโวลต์
- เฟสรูไทล์	3.02 อิเล็กตรอนโวลต์

ตาราง 2. 5 แสดงสมบัติทั่วไปของทองแดง [12]

สมบัติ	ทองแดง
สูตรโมเลกุล	Cu
น้ำหนักโมเลกุล	63.546 กรัม/โมล
ลักษณะและสี	ของแข็ง สีแดง
จุดเดือด	2562 องศาเซลเซียส
จุดหลอมเหลว	1084 องศาเซลเซียส
ความหนาแน่น	8.96 ซม ³
ค่าช่องว่างระดับพลังงาน	2.0 อิเล็กตรอนโวลต์

2.1.4 การสังเคราะห์อนุภาคนาโน

● ปฏิกิริยาไฮโดรลิซิสของเกลือ (Hydrolysis of Salts) [9]

ไฮโดรลิซิสของเกลือ หมายถึง ปฏิกิริยาระหว่างเกลือกับน้ำ เกลือเป็นอิเล็กโทรไลต์แก่ เมื่อเกลือละลายในน้ำ เกลือจะแตกตัวออกเป็นไอออนบวกและไอออนลบทั้งหมด ดังนั้น สมบัติของสารละลายของเกลือ จึงขึ้นอยู่กับไอออนบวกและไอออนลบในสารละลายนั้น ไอออนบางตัวสามารถทำปฏิกิริยากับน้ำและให้ H^+ หรือ OH^- ได้ ปฏิกิริยานี้จึงเรียกว่า “ปฏิกิริยาไฮโดรลิซิส” การพิจารณาว่าไอออนลบใดจะเกิดไฮโดรลิซิสหรือไม่ นั้นมีหลักพิจารณาดังนี้

(1) ไอออนลบของกรดแก่ เช่น Cl^- , Br^- , I^- , NO_3^- และ ClO_4^- จะไม่ทำปฏิกิริยากับน้ำ ดังนั้น จะไม่มีผลต่อค่าความเป็นกรด-เบสของสารละลาย

(2) ไอออนลบของกรดอ่อน เช่น CH_3COO^- , ClO^- , CN^- และ CO_3^{2-} สามารถรับโปรตอนจากน้ำเกิดปฏิกิริยาไฮโดรลิซิสได้ สารละลายที่เป็นเบส เช่น ปฏิกิริยาของ CH_3COO^- กับน้ำตามสมการ 2.18



การพิจารณาว่าไอออนบวกใดจะเกิดปฏิกิริยาไฮโดรลิซิสหรือไม่ มีหลักพิจารณาดังนี้

- ไอออนบวกของโลหะหมู่ IA หรือ IIA (ยกเว้น Be) ได้แก่ Li^+ , Na^+ , K^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} และ Ba^{2+} จะไม่เกิดปฏิกิริยาไฮโดรลิซิส รวมทั้งไอออนบวกของเบสแก่ทั้งหมด

- แอมโมเนียมไอออนของเกลือแอมโมเนียมจะเกิดปฏิกิริยาไฮโดรลิซิสและทำให้สารละลายเป็นกรด

● การไฮโดรลิซิสของเกลือที่เกิดจากกรดแก่และเบสแก่

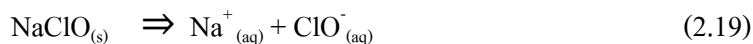
เกลือประเภทนี้เมื่อละลายในน้ำจะไม่เกิดปฏิกิริยาไฮโดรลิซิสกับน้ำ เพราะ ไอออนบวกที่มาจากเบสแก่ และ ไอออนลบที่มาจากกรดแก่ ต่างไม่ทำปฏิกิริยากับน้ำ เช่น $NaCl$ เมื่อละลายน้ำได้ Na^+ และ Cl^- ทั้ง Na^+ ซึ่งมาจากเบสแก่ และ Cl^- ซึ่งมาจากกรดแก่ HCl จะไม่ทำปฏิกิริยากับน้ำ ไม่มีผลต่อค่า pH ของสารละลาย จึงเป็นกลาง คือมี $[H_3O^+]$ และ $[OH^-]$ ที่แตกตัวจากน้ำมีปริมาณเท่ากัน pH ของสารละลายเท่ากับ 7

● การไฮโดรลิซิสของเกลือที่เกิดจากกรดอ่อนกับเบสแก่

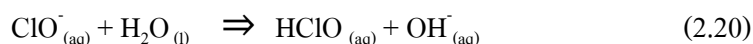
เกลือประเภทนี้เมื่อละลายน้ำจะได้ไอออนลบที่มาจากกรดอ่อนที่มีสมบัติเป็นคู่เบสที่แรงพอสมควร ไอออนลบที่เกิดขึ้นจะเกิดปฏิกิริยาไฮโดรลิซิสกับน้ำได้ OH^-

• สารละลายแสดงสมบัติความเป็นเบส

ตัวอย่างเช่น NaClO เมื่อละลายน้ำจะให้ Na^+ และ ClO^- ดังสมการ 2.19



ClO^- จะเกิดปฏิกิริยาไฮโดรลิซิส โดยรับโปรตอนจากน้ำได้เป็น HClO และ OH^- ดังสมการ 2.20



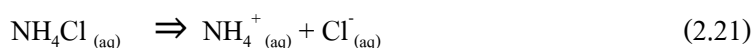
การไฮโดรลิซิสของ $\text{ClO}^-_{(aq)}$ จะได้ OH^- ไอออน จึงแสดงสมบัติเป็นเบส pH มีค่ามากกว่า 7

• การไฮโดรลิซิสของเกลือที่เกิดจากกรดแก่กับเบสอ่อน

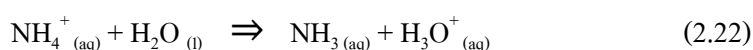
เกลือประเภทนี้เมื่อละลายน้ำจะให้ไอออนบวกที่มาจากเบสที่เป็นคู่กรด ที่มีความแรงพอสมควร ไอออนบวกนี้จะเกิดปฏิกิริยาไฮโดรลิซิสกับน้ำให้ H_3O^+ ทำให้สารละลายแสดงสมบัติเป็นกรด ส่วนไอออนลบซึ่งมาจากกรดแก่ ไม่เกิดปฏิกิริยาไฮโดรลิซิส ตัวอย่างเช่น

NH_4Cl ซึ่งเกิดจากกรดแก่ HCl กับเบสอ่อน NH_3

NH_4Cl แยกตัวในน้ำได้ NH_4^+ และ Cl^- ทั้งหมด



Cl^- ไม่เกิดการไฮโดรลิซิส แต่ NH_4^+ เกิดไฮโดรลิซิส โดย NH_4^+ จะให้โปรตอนกับ H_2O ได้เป็น $\text{NH}_3_{(aq)}$ และ $\text{H}_3\text{O}^+_{(aq)}$ ดังสมการ 2.22

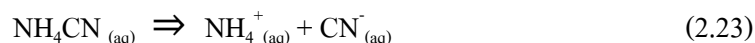


จะเห็นได้ว่าผลจากการไฮโดรลิซิสของ NH_4Cl จะได้ H_3O^+ ดังนั้นสารละลายของเกลือ NH_4Cl จึงแสดงสมบัติเป็นกรด pH ของสารละลายมีค่าน้อยกว่า 7

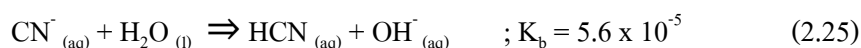
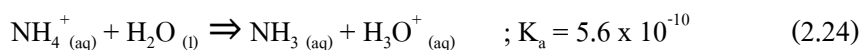
• การไฮโดรลิซิสของเกลือที่เกิดจากกรดอ่อนและเบสอ่อน

เกลือประเภทนี้เมื่อละลายน้ำได้ไอออนบวกและไอออนลบ ซึ่งไอออนทั้งสองนี้สามารถเกิดปฏิกิริยาไฮโดรลิซิสได้ทั้งคู่ ไอออนบวกของเกลือจะเกิดปฏิกิริยาไฮโดรลิซิสได้ H_3O^+ ส่วนไอออนลบได้ OH^- ดังนั้นความเป็นกรด-เบสของสารละลายจึงขึ้นอยู่กับว่า ไอออนบวกหรือไอออนลบเกิดปฏิกิริยาการไฮโดรลิซิสได้ดีกว่ากัน โดยพิจารณาจากค่าคงที่การแตกตัวของคู่เบส (K_b) (ไอออนลบ) หรือค่าคงที่การแตกตัวของคู่กรด K_a

(ไอออนบวก) ตัวอย่างเช่น เกลือ NH_4CN ที่เกิดจากกรดอ่อน HCN และเบสอ่อน NH_4OH โดย NH_4OH แยกตัวในน้ำให้ NH_4^+ และ CN^- ดังสมการ 2.23



NH_4^+ และ CN^- เกิดปฏิกิริยาไฮโดรลิซิสดังสมการ



K_a คือค่าคงที่การแตกตัวของกรดและ K_b ค่าคงที่การแตกตัวของคู่เบส ค่า $K_b > K_a$ ดังนั้นแสดงว่า CN^- เกิดปฏิกิริยาไฮโดรลิซิสให้ OH^- ได้ดีกว่า NH_4^+ ดังนั้น $[\text{OH}^-] > [\text{H}_3\text{O}^+]$ สารละลายของเกลือ NH_4CN จึงแสดงสมบัติเป็นเบส pH มีค่ามากกว่า

2.1.5 เครื่องมือและหลักการวิเคราะห์

● เครื่องวัดการดูดกลืนแสงช่วงยูวี (Ultraviolet–Visible Spectroscopy; UV-vis) [10]

เทคนิค UV-vis เป็นการวัดการดูดกลืนแสงของแสงช่วงความยาวคลื่น 400-800 nm ปัจจุบันถูกนำมาใช้อย่างกว้างขวางในห้องปฏิบัติการเพื่อหาปริมาณสารอนินทรีย์ในตัวอย่าง เช่น ในไตรท์ แอมโมเนีย ฯลฯ โดยวัดการดูดกลืนแสงของสารประกอบที่มีสีเทียบกับสารละลายมาตรฐาน

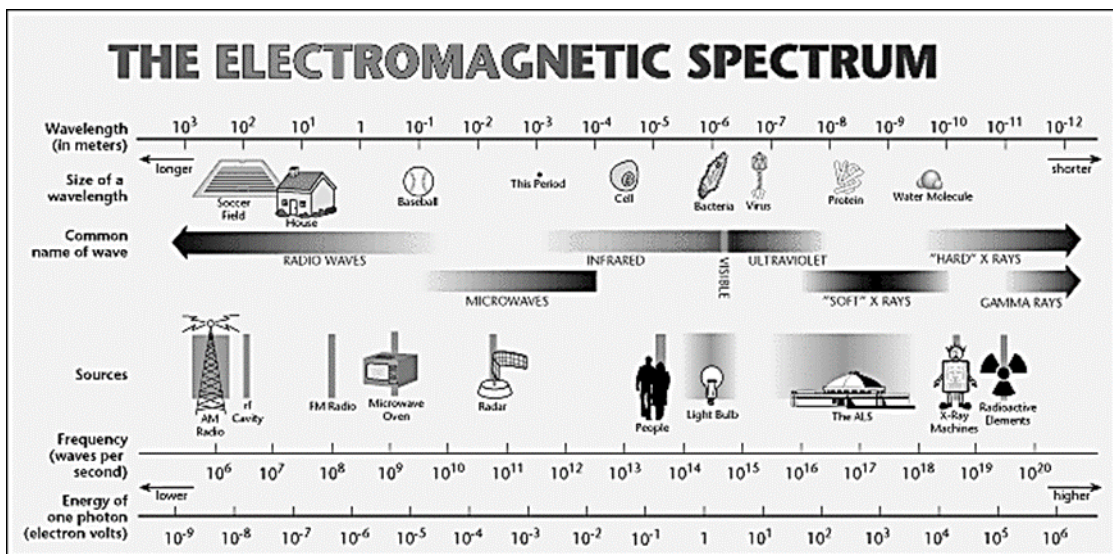
แสงเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Wave) แสงมีความเร็วในสุญญากาศเท่ากับผลคูณของความยาวคลื่น และความถี่ แต่ความเร็วในการเดินทางจะเปลี่ยนไปเมื่อเดินทางผ่านตัวกลางอื่นๆ โดยมีความเร็วในการเดินทางเท่ากับ $2.9979 \times 10^{16} \text{ cm/s/n}$ (n = ดรรชนีหักเหของตัวกลาง, Refractive Index) แสงต่างชนิดกันจะมีความยาวคลื่นต่างกัน และเคลื่อนที่ด้วยความเร็วแตกต่างกันความเข้มของแสงนิยมนวัดในหน่วยกำลังเทียน (Candle Power) หรือ ลูเมน (Lumen) ปริมาณแสงแปรผันโดยตรงกับความเข้ม (Intensity) ของแสง ดังนั้นการวัดความเข้มของแสงจึงเป็นการวัดปริมาณแสงทางอ้อมความยาวคลื่น แสงนิยมนแทนด้วยอักษรกรีกคือ (แลมบ์ดา, Lambda) แสงแต่ละช่วงความยาวคลื่นถูกกำหนดให้มีชื่อเรียกต่างกันตามข้อกำหนดของ The Joint Committee on Nomenclature in Applied Spectroscopy ดังนี้

แสงที่มองเห็น (Visible Light) เป็นแสงสีขาวที่เกิดจากการรวมกันของแสงสีต่างๆ มีสีหลักอยู่ 7 สี คือ สีม่วง สีคราม สีน้ำเงิน สีเขียว สีเหลือง สีแสด และสีแดง มีความยาวคลื่นตั้งแต่ 400-700 nm เมื่อแสงสีขาวตกกระทบวัตถุแล้วทำให้มองเห็นวัตถุเป็นสีใดแสดงว่า

วัตถุดูดกลืนแสงสีอื่นหมดแต่สะท้อนแสงสีที่ตามองเห็นออกมา แต่ถ้าวัตถุนั้นๆ ดูดกลืนแสงทุกสีไว้ได้หมดจะมองเห็นวัตถุเป็นสีดำ

แสงอัลตราไวโอเลต (Ultraviolet light) มีความยาวคลื่นตั้งแต่ 210-380 nm เป็นแสงที่มีคุณสมบัติในการทำให้อิเล็กทรอนิกส์ของอะตอมเกิดการส่งผ่าน (Electronic Transmission) เมื่อร่างกายถูกแสงนี้เป็นเวลานานอาจเกิดอันตราย เช่น ผิวหนังไหม้เกรียม เชื้อบรูคตาถูกทำลาย และอาจทำให้เกิดเป็นมะเร็งของผิวหนังได้ เนื่องจากแสงอัลตราไวโอเลตทำให้ไทมีนเบส (Thymine base) ในนิวคลีอิกของเซลล์รวมตัวกัน

แสงอินฟราเรด (Infrared Light) เป็นแสงที่มองไม่เห็นด้วยตาเปล่า สามารถทำให้โมเลกุลของวัตถุต่างๆ เกิดการสั่นสะเทือนอย่างรุนแรงจนเกิดความร้อนขึ้นมาก เนื่องจากวัตถุส่วนใหญ่ดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่นในช่วง 3,000-100,000 nm ได้ดี แสดงถึง **Error! Reference source not found.** จึงนิยมใช้รังสีอินฟราเรดในการทำให้วัตถุต่างๆ แห้ง เพราะมีประสิทธิภาพในการทำให้แห้งสูงกว่าการใช้ความร้อนแบบธรรมดา

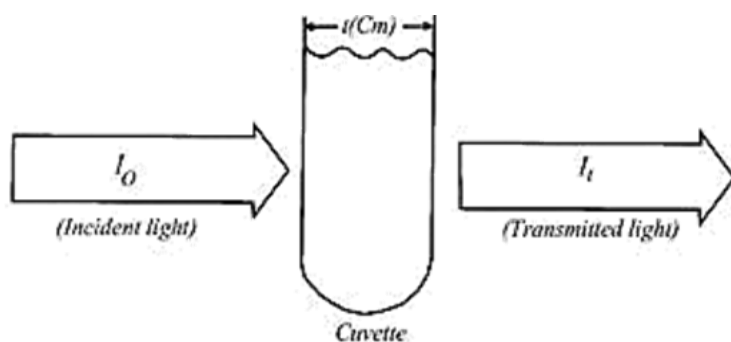


ภาพที่ 2. 8 แสดงความยาวคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า [10]

กฎแห่งการดูดกลืนแสง

(1) กฎของแลมเบิร์ต (ค.ศ.1760) กล่าวว่า แสงที่ถูกดูดกลืนเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความหนาของตัวกลางที่แสงผ่าน

$$I_t = I_0 \times 10^{-kt} \quad (2.26)$$



ภาพที่ 2. 9 การดูดกลืนแสงตามกฎของแลมเบิร์ต (Lambert's law) [10]

(2) กฎของเบียร์ (Beer's Law) กฎของเบียร์ (ค.ศ.1852) กล่าวว่าแสงที่ถูกดูดกลืนเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเข้มข้นของสารในของเหลว ซึ่งเมื่อคำนวณเช่นเดียวกับกฎของแลมเบิร์ต จะได้สมการ

$$I_t = I_0 \times 10^{-kc} \quad (2.27)$$

เมื่อรวมกฎทั้งสองเข้าด้วยกัน (Beer-Lambert's Law) โดยการบวกสมการ 2.27 และสมการ 2.28 จะได้สมการใหม่ดังนี้

$$I_t = I_0 \times 10^{-act} \quad (2.28)$$

แต่แสงส่องผ่าน (Transmittance, T) มีค่าเท่ากับ I_t/I_0 และแสงที่ถูกดูดกลืน (Absorbance, A หรือ Optical Density, OD) มีค่าเท่ากับ $\log(I_0/I_t)$ ดังนั้น

$$A = \epsilon ct \quad (2.29)$$

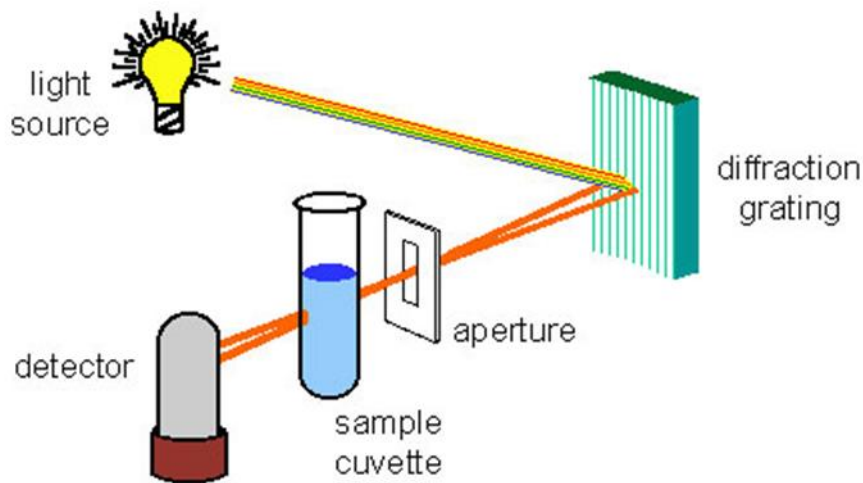
หรือ $A = -\log T \quad (2.30)$

A	คือ	ค่าการดูดกลืนแสงของสาร (Absorbance)
ϵ	คือ	สมบัติจำเพาะของสารที่ดูดกลืนและวัดที่ความยาวค่าหนึ่ง เรียกว่า Molar absorptivity ($L \text{ mol}^{-1} \text{ cm}^{-1}$)
c	คือ	ความเข้มข้นเป็น โมล/ลิตร หรือ โมลาร์ (M)
I_0	คือ	ความเข้มของแสงก่อนถูกดูดซับ
I_t	คือ	ความเข้มของแสงหลังถูกดูดซับ
%T	คือ	$I_t/I_0 \times 100$

- ชนิดของเครื่องวัดการดูดกลืนแสง

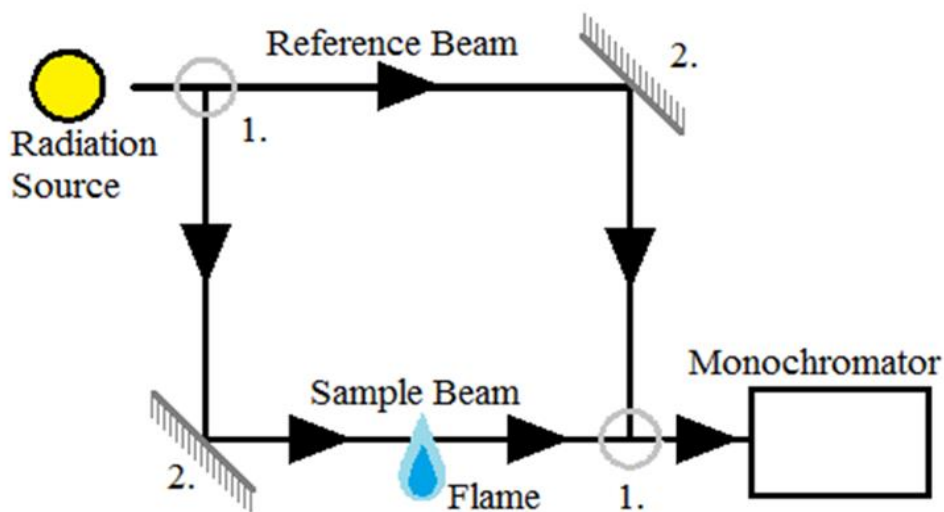
(1) ชนิดลำแสงเดี่ยว (Single Beam Type) ใช้ลำแสงลำเดียวกันสำหรับวัดสารอ้างอิง (Reference หรือ Blank) และสารตัวอย่างการวัดความเข้มแสงกระทำโดยปรับ 0 %T แล้ว

ปรับ $A=0$ หรือ $100\%T$ (เมื่อแสงที่ผ่านเข้าไปในตัวอย่างไม่ถูกดูดกลืนไว้ และผ่านออกมา 100%) ด้วยสารอ้างอิง หลังจากนั้นวัดค่าของสารตัวอย่างโดยปรับ A หรือ $\%T$ ($A=1$ เมื่อแสงผ่านออกมาเพียง 10% และ $A=2$ ถ้าแสงผ่านออกมาน้อยมากเพียง 1%) ชนิดลำแสงเดี่ยว มีข้อดีตรงที่มีองค์ประกอบน้อย และมีแสงผ่านไปยังสารตัวอย่างมากกว่าแบบอื่นๆ แต่มีข้อเสียตรงที่มีเสถียรภาพในการอ่านค่าต่ำและค่าเปลี่ยนแปลงได้ง่าย นอกจากนี้ยังไม่สามารถกวาด (Scan) การดูดกลืนของแสงต่างๆ อย่างต่อเนื่องได้ ดังภาพที่ 2. 10



ภาพที่ 2. 10 องค์ประกอบที่สำคัญของเครื่องวัดการดูดกลืนแสงแบบ Single Beam [10]

(2) ชนิดลำแสงคู่ (Double Beam Type) วัดความเข้มของแสงโดยการสะท้อนแสงที่ผ่านออกมาจากตัวแยกแสงให้ผ่านสารอ้างอิงและสารตัวอย่างสลับกัน ทำให้ความเข้มแสงที่ผ่านตัวอย่างลดลงครึ่งหนึ่ง วงจรจะขยายสัญญาณที่ได้จากการเปรียบเทียบสัญญาณที่ได้รับจากสารตัวอย่างกับสารอ้างอิงอยู่ตลอดเวลา ดังนั้นจึงมีเสถียรภาพในการวัดความเข้มของแสงดีมาก แต่เครื่องวัดชนิดนี้มีองค์ประกอบซับซ้อน เนื่องจากใช้ตัวไวแสงอันเดียวจึงต้องมีวงจรเลือกวัดสัญญาณและใช้หลอดไฟฟ้ากำเนิดแสงมีกำลังส่องสว่างสูง จึงทำให้มีราคาแพงกว่าเครื่องมือชนิดลำแสงเดี่ยว ดังภาพที่ 2. 11



ภาพที่ 2. 11 องค์ประกอบที่สำคัญของเครื่องวัดการดูดกลืนแสงแบบ Double Beam [10]

- เครื่องวัดการดูดกลืนแสงของสารในช่วงอินฟราเรด (Fourier Transform Infrared Spectroscopy; FT-IR) [11]

อินฟราเรดให้ข้อมูลที่รวดเร็วและมีประสิทธิภาพในการหาหมู่ฟังก์ชันในโมเลกุลของสารประกอบอินทรีย์ ย่านอินฟราเรดในสเปกตรัมของรังสีแม่เหล็กไฟฟ้าที่ให้ประโยชน์มากที่สุดต่อนักเคมีอินทรีย์คือ ย่านความถี่ระหว่าง $400\text{--}650\text{ cm}^{-1}$ (cm^{-1} เป็นหน่วยของจำนวนคลื่นต่อวินาที หรือเรียกว่า เลขคลื่น) และความยาวคลื่นระหว่าง $2.5\text{--}15\text{ }\mu\text{m}$ ($1\text{ }\mu\text{m} = 10^{-6}\text{ m}$) สมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ความยาวคลื่นและเลขคลื่น คือ

$$\text{ความยาวคลื่น } (\mu\text{m}) = \frac{1000}{\text{เลขคลื่น}} \quad (2.31)$$

อินฟราเรดสเปกตรัม เป็นการพลอตระหว่างความถี่ (เลขคลื่น, cm^{-1}) หรือความยาวคลื่น, μm) และ Transmittance (T) เป็นอัตราส่วนระหว่างความเข้มของรังสีที่ผ่านสารตัวอย่าง (Transmitted radiation, I) และ ความเข้มของรังสีที่ตกกระทบสารตัวอย่าง

สมการ 2.31 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มของรังสีที่ผ่านสารตัวอย่างและความเข้มของรังสีที่ตกกระทบสารตัวอย่าง คือ

$$\text{Transmittance} = \frac{I}{I_0} \quad (2.32)$$

I = ความเข้มของรังสีที่ผ่านตัวกลาง

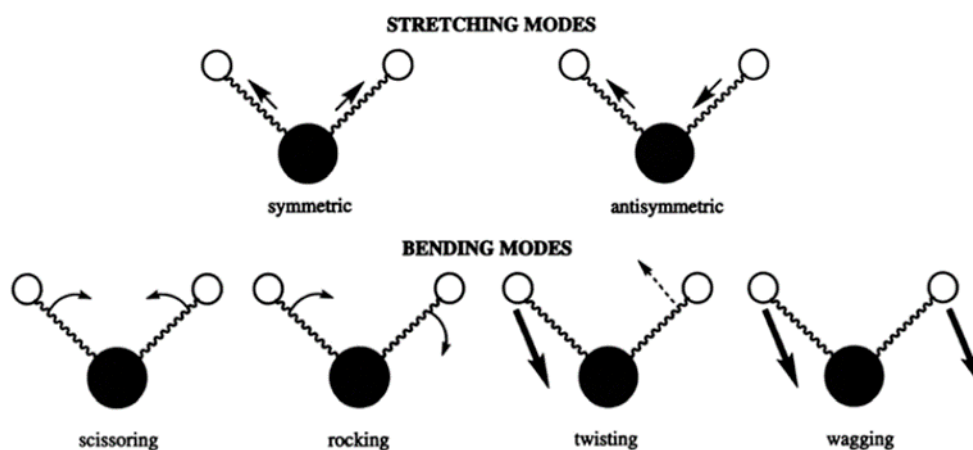
I_0 = ความเข้มของรังสีที่ตกกระทบตัวกลาง

% Transmittance = 100 T

การดูดกลืนรังสีอินฟราเรดตรงกับพลังงานในช่วง 2-10 กิโลแคลอรีต่อโมลพลังงานของรังสีแม่เหล็กไฟฟ้าในย่านนี้ก่อให้เกิดการสั่นแบบยืด (Stretching) และแบบงอ (Bending) ของพันธะในโมเลกุลของสาร การดูดกลืนรังสีอินฟราเรดเป็นขบวนการควันไทส์ (Quantized) กล่าวคือ การที่สารจะดูดกลืนรังสีอินฟราเรดนั้น ความถี่ของรังสีที่ถูกดูดกลืนจะต้องตรงกับค่าของการสั่นของพันธะนั้น

นอกจากนี้ การสั่นของพันธะทุกประเภทในโมเลกุลมิได้ให้ฟิสิกใน IR สเปกตรัมเสมอไป การสั่นของพันธะที่ก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงไดโพลโมเมนต์ (Dipole Moment) เท่านั้นที่จะมีฟิสิกปรากฏใน IR สเปกตรัม ตัวอย่างเช่น การสั่นของพันธะ C=C ใน RCH=CHR ไม่มีฟิสิกใน IR สเปกตรัม ส่วนการสั่นของ C=O ในสารประกอบคาร์บอนิลเกิดฟิสิกที่มีความเข้มสูงใน IR สเปกตรัม

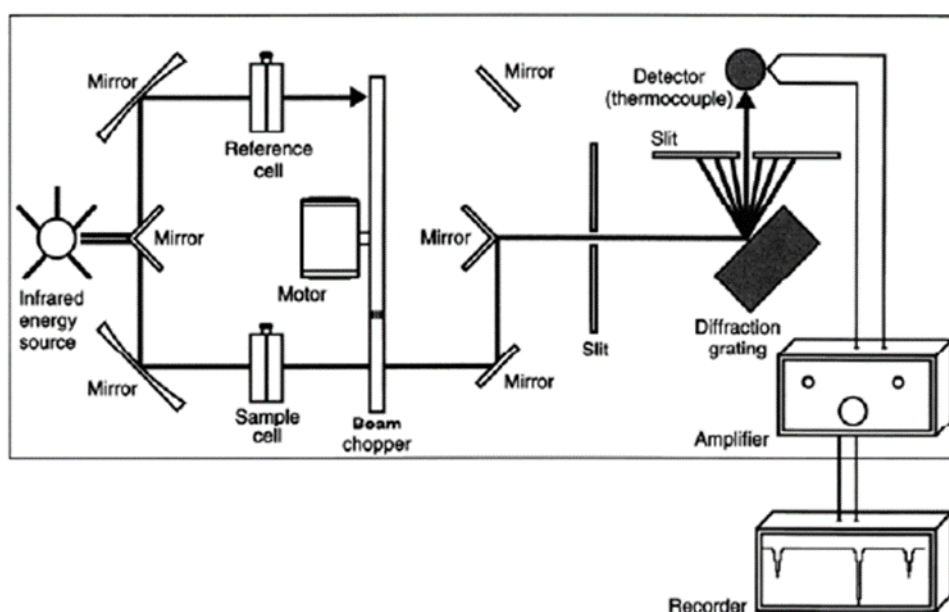
โดยทั่วไปแถบที่เกิดใน IR สเปกตรัม เกิดจากการสั่นแบบพื้นฐาน ได้แก่ การยืดและการงอ ยังมีแถบที่มีความเข้มต่ำเกิดที่ความถี่ 2 เท่า 3 เท่า หรือ 4 เท่าของความถี่แบบพื้นฐาน แถบเหล่านี้ เรียกว่า Overtone ซึ่งเกิดเมื่อความถี่พื้นฐานมีความเข้มสูง บางครั้งอาจมีแถบเกิดที่ความถี่ที่เป็นผลบวกหรือผลต่างของความถี่แบบพื้นฐาน แถบเหล่านี้เรียกว่า Combination Bands ถ้า Overtone หรือ Combination Bands เกิดใกล้กับแถบพื้นฐาน ผลก็คือ ทำให้ความเข้มของแถบพื้นฐานลดลง แต่ไปเพิ่มความเข้มของ Overtone และ Combination Bands ปรากฏการณ์นี้ คือ เกิด Fermi resonance และฟิสิกทั้งคู่บางครั้งเรียกว่า Fermi Doublet ภาพที่ 2. 12 แสดงการสั่นแบบพื้นฐานของหมู่ CH_2



ภาพที่ 2. 12 ภาพแบบการสั่นของพันธะในหมู่เมทิลีน [11]

(1) IR สเปกโตรมิเตอร์แบบธรรมดา

IR สเปกโตรมิเตอร์แบบธรรมดาประกอบด้วยแหล่งกำเนิดรังสีเป็น Nernst Glower (แหล่งกำเนิดรังสี ซึ่งทำด้วยออกไซด์ของพวกธาตุแรร์เอิร์ท (rare earth oxides)) ซึ่งเป็นสารผสมของออกไซด์ของ Zirconium, Yttrium และ Thorium จะถูกเผาด้วยไฟฟ้าแรงสูงและให้ กำเนิดรังสี IR รังสี IR จะถูกแยกออกเป็นลำรังสีสองลำโดยการสะท้อนด้วยกระจก ลำรังสีลำหนึ่ง จะผ่านเซลล์ของสารตัวอย่าง อีกลำหนึ่งเรียกว่า ลำรังสีอ้างอิงซึ่งจะผ่านเซลล์สารอ้างอิง ลำรังสีที่ผ่านสารตัวอย่างและลำรังสีอ้างอิงจะวิ่งไปยัง Beam Chopper ซึ่งเป็นเลี้ยวกระจกเงาที่หมุนได้



ภาพที่ 2. 13 อินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์แบบธรรมดา [11]

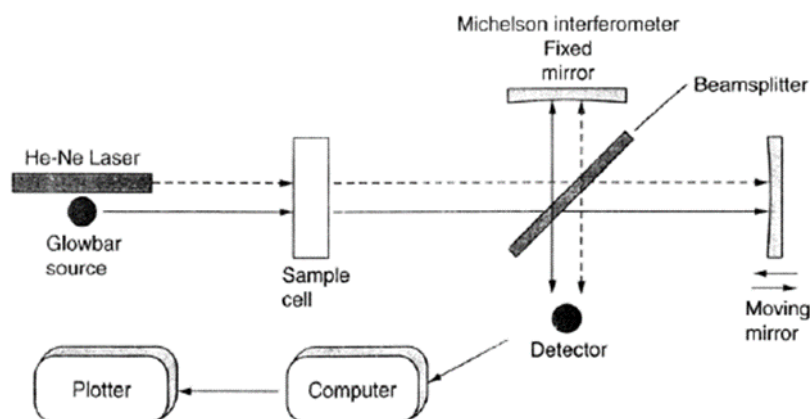
(2) FT-IR สเปกโตรมิเตอร์

หัวใจของ FT-IR สเปกโตรมิเตอร์ เป็น Michelson Interferometer ดังแสดงในภาพที่ 2. 13 ใน FT-IR สเปกโตรมิเตอร์ รังสี IR จากแหล่งกำเนิด Globar ผ่านสารตัวอย่าง และต่อไปยัง Beam splitter (อุปกรณ์แยกลำรังสี) ซึ่งจะแยกลำรังสีที่ผ่านสารตัวอย่างแล้วกึ่งหนึ่งไป ยังกระจกที่หมุนได้ (Moving mirror) และสะท้อนลำรังสีอีกกึ่งหนึ่งไปยังกระจกที่ยึดกับที่ ทั้งลำรังสีที่สะท้อนและที่ผ่านสารตัวอย่าง (Transmitted beam) จะถูกสะท้อนกลับไปที่ Beam Splitter

IR สเปกโตรมิเตอร์แบบเดิมบันทึกทีละเลขคลื่นในแต่ละครั้ง แต่ FT-IR สเปกโตรมิเตอร์ เก็บข้อมูลเลขคลื่นทั้งหมดในครั้งเดียวและเนื่องจากมีจุดข้อมูล (Data

points) มาก จึงต้องมี คอมพิวเตอร์เป็นส่วนประกอบสำคัญใน FT-IR สเปกโตรมิเตอร์เพื่อวิเคราะห์ข้อมูล He-Ne laser เป็นตัวเปล่งแสงสีแดง (6328 nm) ซึ่งเป็นความยาวคลื่นมาตรฐานอ้างอิงสำหรับความถี่ ที่บันทึกใน IR สเปกตรัม

FT-IR มีข้อดีหลายข้อ ข้อแรกคือ มีค่าสัญญาณต่อคลื่นรบกวน (Signal-to-noise) สูง ช่วยให้สัญญาณชัดเจน และเนื่องจากสเปกตรัมทั้งหมดถูกส่องกราด (ภายในช่วงเวลาสั้นไม่เกิน 1 s) การส่องกราดหลายครั้งจึงสามารถทำได้รวดเร็วและนำข้อมูลมารวมกัน สัญญาณจากพิกแพทช์ เป็นบวก และมักเกิดที่ความถี่เดียวกันเวลาส่องกราด ส่วนพิกของสัญญาณรบกวน เป็นทั้งบวกและลบและเกิดที่เลขคลื่นแบบสุ่ม ทำให้สัญญาณของพิกแพทช์ ถูกขจัดหลายๆ ครั้งแต่สัญญาณของคลื่นรบกวนถูกหักล้างออกไป ดังนั้น เราจึงได้ IR สเปกตรัมที่ชัดเจนและใช้สาร ตัวอย่างเพียงเล็กน้อย (1 มิลลิกรัมหรือน้อยกว่า) ได้และได้สเปกตรัมที่มีคุณภาพดีพอๆ กับใช้สารตัวอย่างขนาด 10 มิลลิกรัม ข้อได้เปรียบอีกข้อหนึ่งคือจะให้ความถี่ที่ถูกต้องแม่นยำเพราะ เทียบมาตรฐานจากพิกของ He-Ne laser



ภาพที่ 2. 14 Michelson Interferometer ใน FT-IR สเปกโตรมิเตอร์ [11]

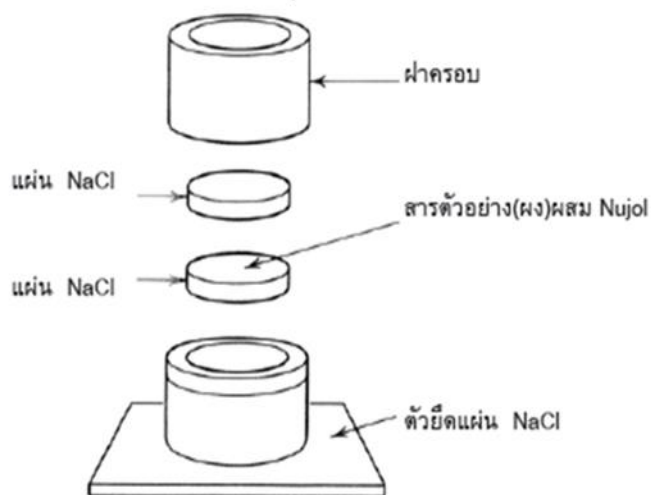
(3) การเตรียมสารตัวอย่าง

การเตรียมสารตัวอย่างเพื่อบันทึกสเปกตรัมขึ้นกับว่าสภาวะทางกายภาพของสารตัวอย่าง วิธีการเตรียมสารตัวอย่างที่เป็นของแข็งและของเหลวมีหลายวิธีและมีอุปกรณ์ที่ใช้แตกต่างกัน

(3.1) สารตัวอย่างของแข็ง

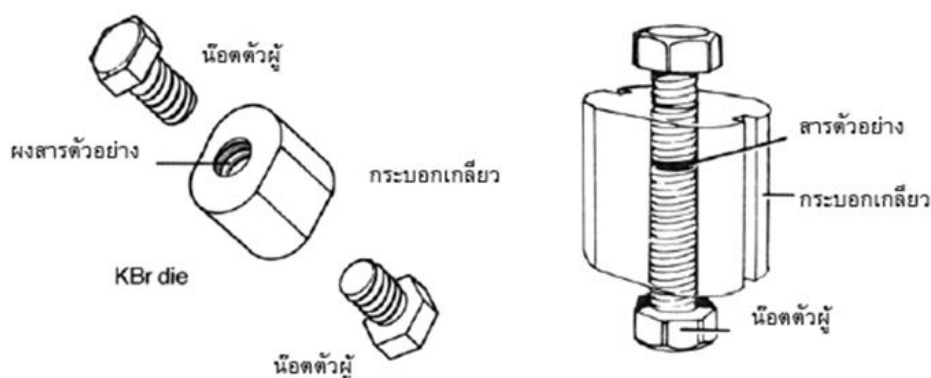
(1) เตรียมเป็น Nujol mull โดยหยด nujol (mineral oil) ในสารตัวอย่าง 2-3 มิลลิกรัมผสมเข้ากันแล้วทำบนแผ่น NaCl เซลล์ แล้วประกบด้วยแผ่น NaCl อีกแผ่นหนึ่งใส่ในตัวยึด (ภาพที่ 2. 15) Nujol ดูดกลืนรังสี IR ในย่านเดียวกับการยืดและการงอของ C-H ในสารประกอบอัลเคน ถ้าต้องการดูแถบของหมู่ CH_3 และ CH_2 ในย่านนี้ควรใช้น้ำมัน

ชนิดอื่น เช่น Hexachloro-butadiene หรือ Chlorofluorocarbon Oil หรือเตรียมสารตัวอย่างโดยใช้วิธีอื่น แผ่น NaCl หลังใช้แล้วควรใช้ที่ขูด CH_2Cl_2 เช็ดให้สะอาดและจับเฉพาะขอบนำไปเก็บใน Desicator เนื่องจาก NaCl ดูดความชื้นง่าย



ภาพที่ 2. 15 แผ่นโซเดียมคลอไรด์และตัวยึด [11]

(2) เตรียมเป็น KBr Disc โดยบดสารตัวอย่างของแข็งบริสุทธิ์ (1-2 มิลลิกรัม) รวมกับผง KBr (100 มิลลิกรัม) นำเข้าเครื่องอัด Minipress (ภาพที่ 2. 15) จนได้แผ่นกลมแบนใสคล้ายแก้ว ทั้งสารตัวอย่างและ KBr ควรผ่านการอบให้แห้งก่อนบดรวมกัน หลังจากอัดเป็นแผ่นแบนแล้วนำแผ่น KBr disc ใส่ที่ยึดพิเศษแล้ววางบนลำรังสี IR และหลังการวัดควรเก็บในที่เก็บความชื้นจะสามารถนำมาวัดสเปกตรัมซ้ำได้อีก



ภาพที่ 2. 16 Minipress สำหรับเตรียม KBr Disc [11]

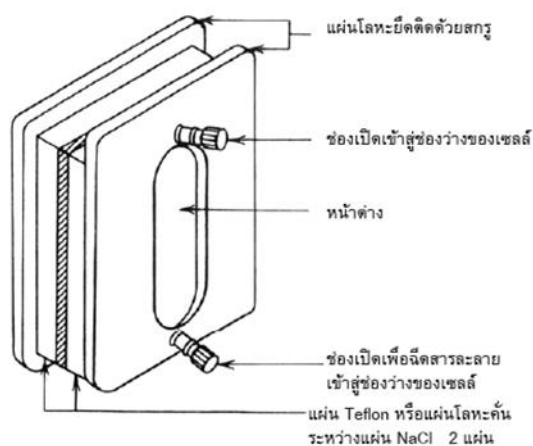
(3.2) สารตัวอย่างของเหลว

(1) หยดของเหลวบริสุทธิ์บนแผ่น NaCl แล้วประกบด้วยแผ่น NaCl อีกแผ่น ให้ความกระจายเป็นฟิล์มบางระหว่างแผ่น NaCl ทั้งสอง นำไปใส่ที่ขี้ด (ภาพที่ 2. 157)



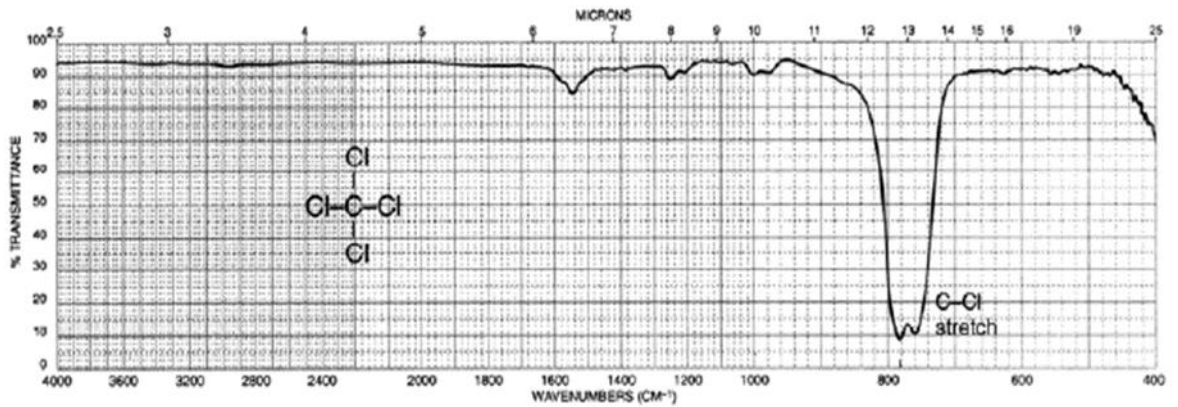
ภาพที่ 2. 17 การเตรียมสารตัวอย่างของเหลวโดยเตรียมเป็น Thin-Film [11]

(2) สารตัวอย่างของแข็งและของเหลวสามารถเตรียมเป็นสารละลายของ CCl_4 , CHCl_3 , CS_2 (5- 10% โดยน้ำหนัก) ใส่สารละลายในเซลล์สารละลาย (Solution Cell) ระวังไม่ให้เกิดฟองอากาศ ภายใน วิธีที่ดีที่สุดคือ ฉีดสารละลายเข้าเซลล์สารละลายโดยใช้ไซริงค์ (Syringe) (ภาพที่ 2. 15)

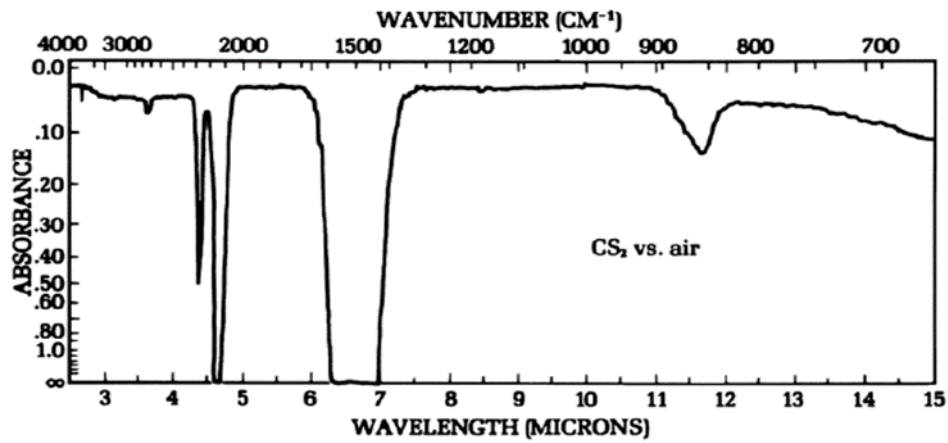


ภาพที่ 2. 18 เซลล์สารละลายสำหรับสารตัวอย่างของเหลว [11]

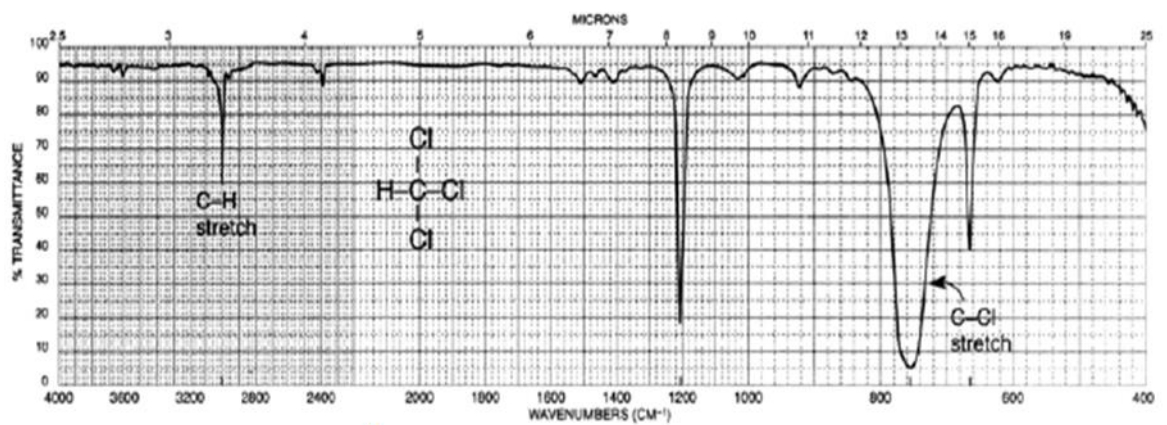
ตัวทำละลายแต่ละชนิดมีแถบเด่นในบางช่วงของสเปกตรัม นอกจากนี้ตัวทำละลายเหล่านี้ล้วนมีพิษร้ายแรงจึงต้องใช้ความระมัดระวังในการจับต้องห้ามสูดดม



ภาพที่ 2. 19 สเปกตรัมของ Carbon Tetrachloride [11]



ภาพที่ 2. 20 IR สเปกตรัมของ Carbon Disulfide [11]



ภาพที่ 2. 21 IR สเปกตรัมของ Chloroform [11]

● เครื่องรามานสเปกโตรสโคปี (Raman Spectroscopy) [12]

Raman Scattering เกิดขึ้นได้โดยใช้ลำแสงโมโนโครมาติกที่มีความเข้มสูง เช่น ลำแสงเลเซอร์ (Laser Beam) ผ่านเข้าไปยังตัวกลางโปร่งแสง แสงส่วนใหญ่จะผ่านทะลุไปได้ แต่จะมีแสงส่วนน้อยบางส่วนเกิดการกระเจิงไปทุกทิศทางด้วยการชนแบบยืดหยุ่น (Elastic Collision) แต่มีการชนส่วนน้อยอีกส่วนหนึ่งคือ การชนแบบไม่ยืดหยุ่น (Inelastic Scattering) ซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงความถี่ไปเล็กน้อย เรียกว่าการกระเจิงแบบรามาน

เมื่อกล่าวถึงปรากฏการณ์ของการเกิดกระเจิง ในกระบวนการกระเจิงนั้น สิ่งที่สำคัญที่จะต้องเน้นคือ การดูดกลืนแสงหรือโฟตอนเริ่มต้น และการให้อิมพัลส์ของการกระเจิงแบบไม่ยืดหยุ่น เป็นกระบวนการเกิดอย่างต่อเนื่อง ประสิทธิภาพของการเกิดอันตรกิริยานี้ขึ้นอยู่กับอิเล็กตรอนในโมเลกุลถูกรบกวน หรือ Distorted ได้ง่ายเพียงใด คุณสมบัติอันนี้เรียกว่า Polarizability ถ้า Polarizability ของโมเลกุลเปลี่ยนไปในระหว่างการสั่นของโมเลกุล จะมีผลต่อการเกิด Raman Shifted ของโฟตอนจากการเกิดอันตรกิริยาหรือโฟตอนเริ่มต้นด้วยพลังงาน $h\nu$

ดังนั้น โมเลกุลที่ทำให้แสงโมโนโครมาติกเกิดการกระเจิงแล้วเกิด Raman Shifted Lines ได้ โมเลกุลนั้นจะต้องเกิดการสั่นแล้วทำให้ Polarizability ของสารนั้นเปลี่ยนไป

องค์ประกอบของเครื่องรามานสเปกโตรมิเตอร์

ส่วนประกอบที่สำคัญของเครื่องรามานสเปกโตรมิเตอร์คือ ต้องมีเครื่องที่สามารถวัดแสงที่กระเจิงได้ ซึ่งโดยปกติแล้วเป็นแสงที่มีน้อย ดังนั้นจึงจำเป็นต้องหาแหล่งกำเนิดแสงที่ให้ความเข้มสูงๆ ใดๆก็ตาม เครื่องรามานสเปกโตรมิเตอร์ก็ประกอบด้วยอุปกรณ์หลัก 3 ส่วน คือ

- (1) แหล่งกำเนิดแสงที่ให้ความเข้มสูง
- (2) ระบบใส่สารตัวอย่าง (sample illumination system)
- (3) เครื่องสเปกโตรมิเตอร์ที่เหมาะสม

- การวิเคราะห์ห่ออนุภาคนาโนด้วยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope; SEM) [13]

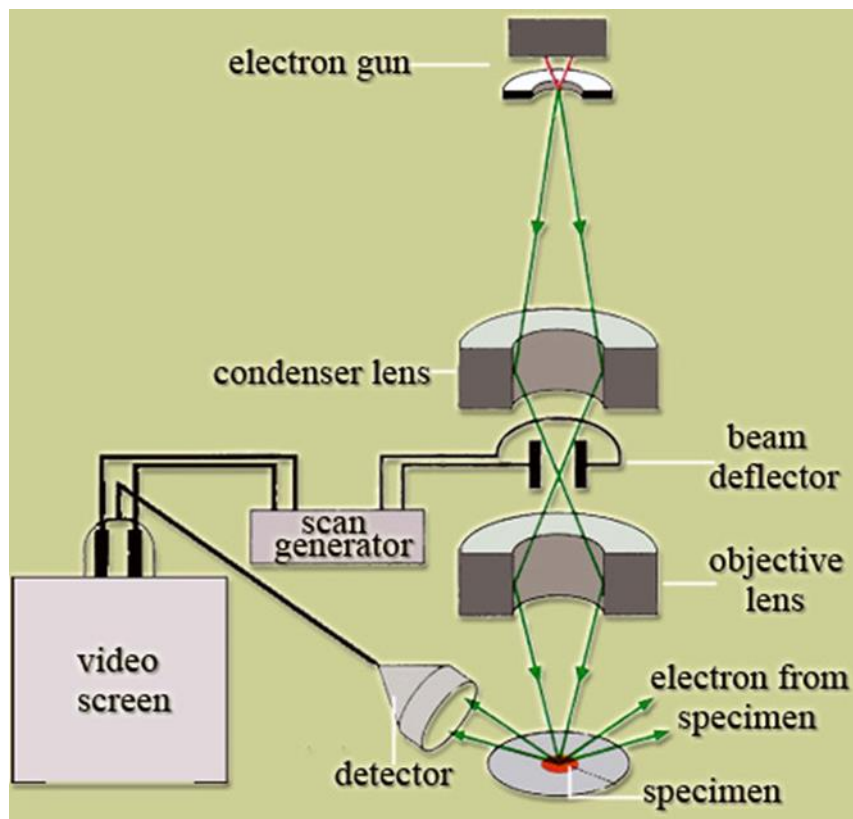
เป็นกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนที่มีกำลังขยายสูงสุดประมาณ 10 nm การสร้างภาพทำได้โดยการตรวจวัดอิเล็กตรอนที่สะท้อนจากพื้นผิวหน้าของ ตัวอย่างที่ทำการสำรวจ ซึ่งภาพที่ได้จากเครื่องนี้จะเป็นภาพลักษณะของ 3 มิติ ดังนั้นเครื่อง จึงถูกนำมาใช้ในการศึกษาสัณฐานและรายละเอียดของลักษณะพื้นผิวของตัวอย่าง เช่น ลักษณะพื้นผิวด้านนอกของเนื้อเยื่อและเซลล์ หน้าตัดของโลหะและวัสดุ เป็นต้น



ภาพที่ 2. 22 กล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด [13]

2.3.4.1 หลักการทำงาน

ประกอบด้วยแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนซึ่งทำหน้าที่ผลิตอิเล็กตรอนเพื่อป้อนให้กับระบบ โดยกลุ่มอิเล็กตรอนที่ได้จากแหล่งกำเนิดจะถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้า จากนั้นกลุ่มอิเล็กตรอนจะผ่านเลนส์รวบรวมรังสี (Condenser Lens) เพื่อทำให้กลุ่มอิเล็กตรอนกลายเป็นลำอิเล็กตรอน ซึ่งสามารถปรับให้ขนาดของลำอิเล็กตรอนใหญ่หรือเล็กได้ตามต้องการ หากต้องการภาพที่มีความคมชัดจะปรับให้ลำอิเล็กตรอนมีขนาดเล็ก หลังจากนั้นลำอิเล็กตรอนจะถูกปรับระยะโฟกัสโดยเลนส์ใกล้วัตถุ (Objective Lens) ลงไปบนผิวชิ้นงานที่ต้องการศึกษา หลังจากลำอิเล็กตรอนถูกกราดลงบนชิ้นงานจะทำให้เกิดอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (Secondary Electron) ขึ้น ซึ่งสัญญาณจากอิเล็กตรอนทุติยภูมินี้จะถูกบันทึกและแปลงไปเป็นสัญญาณทางอิเล็กทรอนิกส์และ ถูกนำไปสร้างเป็นภาพบนจอโทรทัศน์ต่อไป และสามารถบันทึกภาพจากหน้าจอโทรทัศน์



ภาพที่ 2. 23 ส่วนประกอบของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด [13]

- กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน

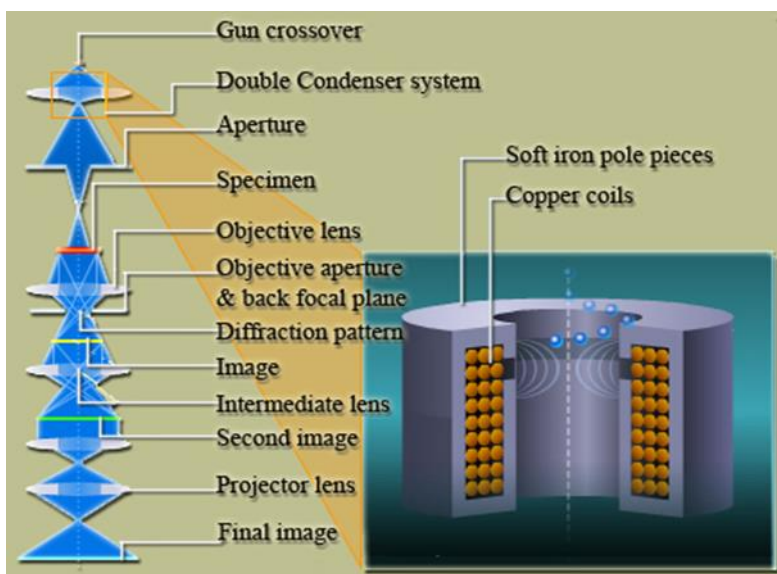
(Transmission Electron Microscope; TEM) [13]

เป็นกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนที่ใช้ศึกษาตัวอย่างชนิดบาง ซึ่งเตรียมขึ้นโดยวิธีพิเศษเพื่อให้ลำอนุภาคอิเล็กตรอนผ่านทะลุได้ การสร้างภาพจากกล้องประเภทนี้จะทำได้โดยการตรวจวัดอิเล็กตรอนที่ทะลุผ่านตัวอย่างนั่นเอง เครื่องเหมาะสำหรับศึกษารายละเอียดขององค์ประกอบภายในของตัวอย่าง เช่น องค์ประกอบภายในเซลล์ ลักษณะของเยื่อหุ้มเซลล์ ผนังเซลล์ เป็นต้น ซึ่งจะให้รายละเอียดสูงกว่ากล้องจุลทรรศน์ชนิดอื่นๆ เนื่องจากมีกำลังขยายและประสิทธิภาพในการแจกแจงรายละเอียดสูงมาก (กำลังขยายสูงสุดประมาณ 0.1 nm)

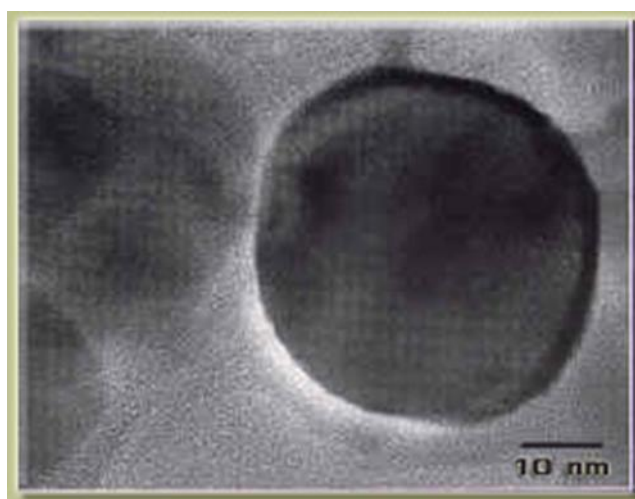


ภาพที่ 2. 24 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน [22]

ประกอบด้วยแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนซึ่งทำหน้าที่ผลิตอิเล็กตรอนเพื่อป้อนให้กับระบบ โดยกลุ่มอิเล็กตรอนที่ได้จากแหล่งกำเนิดจะถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้า จากนั้นกลุ่มอิเล็กตรอนจะผ่านเลนส์รวบรวมรังสี (Condenser lens) เพื่อทำให้กลุ่มอิเล็กตรอนกลายเป็นลำอิเล็กตรอน ซึ่งสามารถปรับให้ขนาดของลำอิเล็กตรอนใหญ่หรือเล็กได้ตามต้องการ จากนั้นลำอิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ผ่านตัวอย่างที่จะศึกษา (Specimen) ไป ซึ่งตัวอย่างที่จะศึกษาจะต้องมีลักษณะที่แบนและบางมาก (บ่อยครั้งที่พบว่าอยู่ในช่วงระหว่าง 1-100 nm) จากนั้นจะเกิดการกระเจิงอนุภาคขึ้นเมื่ออิเล็กตรอนทะลุผ่านตัวอย่างไป และอิเล็กตรอนที่ทะลุผ่านตัวอย่างนี้ก็จะถูกปรับโฟกัสของภาพโดยเลนส์ใกล้วัตถุ (Objective lens) ซึ่งเป็นเลนส์ที่ทำหน้าที่ขยายภาพให้ได้รายละเอียดมากที่สุดจากนั้นจะได้รับการขยายด้วยเลนส์ทอดภาพไปสู่จอรับ (Projector lens) และปรับโฟกัสของลำอนุภาคอิเล็กตรอนให้ยาวพอดีที่จะปรากฏบนฉากเรืองแสง สุดท้ายจะเกิดการสร้างภาพขึ้นมาได้



ภาพที่ 2. 25 ส่วนประกอบของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน [13]



ภาพที่ 2. 26 ตัวอย่างอนุภาคนาโนของไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) ที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน [13]

2.2 ทบทวนวรรณกรรม

ใน ค.ศ. 2004 Wenjie Zhang และคณะ [14] ได้ทำการศึกษาทดลองให้อนุภาคทองแดงเจือไทเทเนียมฟิล์มออกไซด์ถูกเตรียมขึ้นโดยวิธี dc magnetron sputtering ใช้ไทเทเนียม (ความบริสุทธิ์ 9.99%) และทองแดง (ความบริสุทธิ์ 99.9%) เป็นทาร์เกต (Target) โดยปริมาณทองแดงที่พบในฟิล์ม TiO_2 เปรียบเทียบเชิงพื้นที่ (cm^2) ร้อยละปริมาณอะตอมของธาตุคอปเปอร์พบว่ามีค่าดังตาราง 2.6

ตาราง 2. 6 ปริมาณทองแดงที่พบในฟิล์ม TiO_2 เปรียบเทียบเชิงพื้นที่ (cm^2) และร้อยละปริมาณอะตอมของธาตุคอปเปอร์

ร้อยละปริมาณอะตอมของธาตุคอปเปอร์	คอปเปอร์ผสมไทเทเนียม
1500	65.97
750	52.78
375	38.39
180	33.37
138	15.17
102	4.53
60	1.96
30	1.45

นำตัวอย่างไปวิเคราะห์ด้วยเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน (XRD) กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด เครื่องวิเคราะห์ผิววัสดุ และเครื่องวัดการดูดกลืนแสง หลังการวิเคราะห์พบว่าการเจือทองแดงในปริมาณร้อยละโดยอะตอม 1.45 แสดงประสิทธิภาพทางด้านโฟโตแคตตาไลติกสูงสุดในการย่อยสลายเมธิลลอร์เรนจ์

ใน ค.ศ. 2005 Arana และคณะ [15] ได้ทำการศึกษาปฏิกิริยาโฟโตแคตตาไลติกโดยใช้ Cu-TiO_2 และไทเทเนียมไดออกไซด์บริสุทธิ์ ในการย่อยสลายสารประกอบ dihydroxybenzenes 3 ชนิด ได้แก่ hydroquinone, catechol และ resorcinol ทดลองด้วยการนำตัวอย่างจุ่มในสารประกอบทั้งสามที่มีปริมาณ 400 ml. วิเคราะห์ด้วยเทคนิคการศึกษาการสั่นของอะตอมซึ่งอยู่ในย่านความถี่ของรังสีอินฟราเรด

ใน ค.ศ. 2008 Xin และคณะ [16] ได้ทำการศึกษาทดลอง Cu-TiO₂ ถูกเตรียมขึ้นโดยวิธี โซลเจล ในการเจือทองแดงใช้ปริมาณ 0.00, 0.02, 0.04, 0.06, 0.08, 0.10, 0.15, 0.20, 0.40, 0.60, 0.80, 1.00 and 3.00 mol% นำตัวอย่างไปวิเคราะห์ด้วยเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรกชันเครื่องวิเคราะห์ผิววัสดุ และ DRS จากการทดลองพบว่าการเจือทองแดงในปริมาณ 0.06 mol% แสดงประสิทธิภาพทางด้านโฟโตแคตตะไลติกสูงสุดในการย่อยสลาย rhodamine B (RHB)

ใน ค.ศ. 2010 Karunakaran และคณะ [17] ได้ทำการศึกษาทดลอง 2% ในการเจือทองแดงให้กับไทเทเนียมไดออกไซด์ ถูกเตรียมด้วยวิธีระเหยแออมโมเนียด้วยการเหนี่ยวนำนำตัวอย่างไปวิเคราะห์ด้วยเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด เครื่องวัดการดูดกลืนแสง จากการทดลองพบว่า 2% ในการเจือทองแดงให้กับไทเทเนียมไดออกไซด์มีประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อโรค อีโคไล แต่เมื่อนำไปทดสอบในการย่อยสลาย Sunset Yellow Rhodamine B และ เมทิลีน บลู พบว่ามีประสิทธิภาพน้อยกว่า ไทเทเนียมไดออกไซด์บริสุทธิ์

ใน ค.ศ. 2011 Vahid และคณะ [18] ได้ทำการเตรียม TiO₂/MWCNT โดยวิธีสะสมเฟสของเหลว (Liquid Phase Deposition Method) โดยใช้ไทเทเนตเตตระบิวทิล (Titana tetrabutyl) เป็นสารตั้งต้น นำตัวอย่างไปวิเคราะห์ด้วยเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด และเครื่องวัดการดูดกลืนแสงของ TiO₂/MWCNT โดยแสดงประสิทธิภาพทางด้านโฟโตแคตตะไลติกต่อการย่อยสลายเมทิลีนบลู

ใน ค.ศ. 2012 Lihong และคณะ [19] ได้ทำการเตรียม TiO₂/MWCNT โดยวิธีโซลเจล ตัวอย่างทดสอบนำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรก เครื่องวัดการดูดกลืนแสง และเครื่องเอกซเรย์โฟโตอิเล็กตรอนไมโครสโกปี นำตัวอย่างไปทดสอบสมบัติทางแสงพบว่าเมื่อเพิ่มอัตราส่วนน้ำหนักของท่อนาโนคาร์บอนที่ 20% ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพให้กับปฏิกิริยาทางแสงสูงขึ้น

3. อุปกรณ์และวิธีวิจัย

3.1 อุปกรณ์และ สารเคมี

- สารเคมี
- (1) กรดไนตริก (HNO_3)
 - (2) กรดซัลฟิวริก (H_2SO_4)
 - (3) ไททานเนียมเตตระคลอไรด์ (TiCl_4)
 - (4) แอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (NH_4OH)
 - (5) คอปเปอร์คลอไรด์ (CuCl_2)
 - (6) เมทิลลีนบลู ($\text{C}_{16}\text{H}_{18}\text{N}_3\text{SCl}$)
 - (7) ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2)
 - (8) เอทานอล ($\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$)
 - (9) น้ำปราศจากไอออน (Deionized Water)

3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือ

- (1) ปีกเกอร์ (Beaker)
- (2) ขวดรูปชมพู่ (Erlenmeyer flask)
- (3) กระบอกตวง (Cylinder)
- (4) เทอร์โมมิเตอร์ (Thermometer)
- (5) แมกเนติกบาร์ (Magnetic bar)
- (6) เครื่องให้ความร้อนแบบปั่นกวน (Stirrer Hotplate)
- (7) ชุดขาค้างและแคลมป์จับ
- (8) กระจกกรอง
- (9) กระจกนาฬิกา
- (10) ซ้อนตักสาร
- (11) แท่งคนสาร
- (12) เครื่องให้ความร้อน (Hot plate)
- (13) หลอดหยด
- (14) บีกเกอร์สุญญากาศ

- (15) โกร่งบดสาร
- (16) เครื่องอัลตราโซนิก ยี่ห้อ CREST ULTRASONIC รุ่น 1100HT
- (17) เตาอบ ยี่ห้อ BINDER รุ่น ED 53
- (18) เตาเผา (Calcination Over)

3.3 เครื่องมือวิเคราะห์

- (1) กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) พร้อมติดตั้งเครื่องวิเคราะห์รังสีเอ็กซ์แบบกระจายพลังงาน (EDS) รุ่น JSM-6335F
- (2) กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (TEM) ยี่ห้อ Jeo รุ่น TECNAI 20
- (3) เครื่องวัดการดูดกลืนแสง (UV-Vis) ยี่ห้อ Hitachi รุ่น U-2900
- (4) เครื่องรามาโนสเปกโตรสโคปี รุ่น T64000
- (5) เครื่องวัดการดูดกลืนแสงของสารในช่วงอินฟราเรด (FT-IR) รุ่น Perkin Elmer

3.4 วิธีการวิจัย

3.4.1 ขั้นตอนการเตรียมนานาโนคาร์บอนโดยการเติมหมู่ฟังก์ชัน

การเตรียมนานาโนคาร์บอนแบบเติมหมู่ฟังก์ชัน โดยใช้กรดไนตริก 3 โมลาร์ และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ความเข้มข้น 10, 20 และ 30 %v/v เพื่อให้เกิดหมู่ฟังก์ชัน

- (1) ชั่งน้ำหนักนาโนคาร์บอนจำนวน 0.3 กรัม
- (2) เติมกรดไนตริก 3.0 โมลาร์ จำนวน 70 มิลลิลิตร
- (3) ปั่นบนเครื่องให้ความร้อนแบบปั่นกวนที่อุณหภูมิ 60 °C เป็นเวลา 15 นาที
- (4) เข้าต้นด้วยเครื่องอัลตราโซนิก เป็นเวลา 2 ชั่วโมง
- (5) ทำการกรองด้วยกระดาษกรอง แล้วล้างด้วยน้ำปราศจากไอออน
- (6) เติมกรดไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 70 มิลลิลิตรที่ความเข้มข้น 10, 20 และ 30%v/v
- (7) ทำตามขั้นตอน (3) – (5)
- (8) อบที่อุณหภูมิ 80 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง
- (9) วิเคราะห์ด้วย SEM, TEM และ FT-IR
- (10) การทดสอบการกระจายตัวของตัวอย่าง

- ชั่งท่อนาโนคาร์บอน 1.0 มิลลิกรัม ใส่ในขวดแก้ว
- เอทานอลปริมาณ 4.3 มิลลิลิตร ใส่ในขวดแก้ว
- ทำการสั่นด้วยเครื่องอัลตราโซนิก เป็นเวลา 10 นาที
- วางไว้ที่อุณหภูมิห้อง 24 ชั่วโมง
- สังเกตและบันทึกผลการทดลอง

3.4.2 ขั้นตอนการเตรียมท่อนาโนคาร์บอนผสมอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO₂/MWCNT)

TiO₂/MWCNT เตรียมโดยวิธีไฮโดรลิซิส โดยใช้ท่อนาโนคาร์บอนแบบเติมหมู่ฟังก์ชัน (MWCNT-30), กรดซัลฟิวริกเข้มข้น 10% (aq), ไทเทเนียมเตรทอะคลอไรด์ แอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ และน้ำปราศจากไอออน

- (1) ชั่งท่อนาโนคาร์บอน ผสมกับ 10% H₂SO₄
- (2) สั่นด้วยเครื่องอัลตราโซนิกเป็นเวลา 30 นาที
- (3) เติมไทเทเนียมเตรทอะคลอไรด์ ในอัตราส่วน 1:1, 5:1, 10:1, 15:1 และ 20:1 แล้วคนด้วยเครื่องให้ความร้อนแบบปั่นกวนที่อุณหภูมิ 0 °C เป็นเวลา 30 นาที
- (4) คนด้วยเครื่องให้ความร้อนแบบปั่นกวน ใช้อุณหภูมิ 85 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง
- (5) ปรับ pH เท่ากับ 7 ด้วย แอมโมเนียมไฮดรอกไซด์
- (6) คนด้วยเครื่องให้ความร้อนแบบปั่นกวนให้เกิดเจลเป็นเวลา 12 ชั่วโมง
- (7) ทำการกรองด้วยกระดาษกรองและล้างด้วยน้ำปราศจากไอออน
- (8) อบที่อุณหภูมิ 80 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง
- (9) บดแล้วนำไปเผาที่อุณหภูมิ 400 °C
- (10) วิเคราะห์ด้วย SEM, TEM, Raman Spectroscopy และ UV-vis

3.4.3 ขั้นตอนการย่อยสลายเมทิลลินบลูด้วยโฟโตแคตะไลติกแล้วตรวจสอบด้วยเครื่องวัดการดูดกลืนแสง (UV-vis)

ทดสอบการย่อยสลายเมทิลลินบลูด้วยแสงหลอด UV ขนาด 30 วัตต์ ความยาวคลื่น 250 – 390 nm โดยใช้ความเข้มข้นเมทิลลินบลูเริ่มต้น 3×10^{-5} โมลาร์ แล้วทำการวัดปริมาณเมทิลลินบลูที่เหลืออยู่ด้วยเครื่องวัดการดูดกลืนแสง (UV-vis spectrophotometer)

- (1) เตรียมสารละลายเมทิลลินบลูที่มีความเข้มข้น 3×10^{-5} โมลาร์
- (2) เติมคอมโพสิต (แคตะลิสต์) ที่ได้จากการเตรียม 10.0 มิลลิกรัม

- (3) คนด้วยแท่งคนแม่เหล็กในที่มีด 1 ชั่วโมง แล้วทำการวัดค่าการดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่น 250 – 390 nm ก่อน ฉายรังสียูวี (C_0)
- (4) เก็บตัวอย่างหลังจากการฉายรังสียูวีโดยวัดค่าการดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่น 250 – 390 nm หลังได้รับรังสียูวี (C_t) ที่ 10, 20, 30, 40, 50 และ 60 นาที
- (5) เก็บตัวอย่างหลังจากการฉายรังสี จำนวนหาอัตราส่วนการย่อยสลายของเมทิลลิโนบลู ตามสมการ 3.1

$$\text{สัดส่วนการย่อยสลายของเมทิลลิโนบลู} = \frac{C_t}{C_0} \quad (3.1)$$

โดย C_0 คือ ค่าการดูดกลืนแสงก่อนฉายรังสียูวี
 C_t คือ ค่าการดูดกลืนแสงหลังฉายรังสียูวี

4. ผลการวิจัย

การเตรียมท่อนาโนคาร์บอนแบบเดิมหมู่ฟังก์ชัน โดยวิเคราะห์ลักษณะพื้นฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM), ลักษณะอนุภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (TEM), การวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันของท่อนาโนคาร์บอนด้วยเครื่องวัดการดูดกลืนแสงของสารในช่วงอินฟราเรด (FT-IR) และทดสอบการกระจายตัวในเอทานอล ในขั้นตอนนี้เพื่อหาคุณสมบัติของท่อนาโนคาร์บอนแบบเดิมหมู่ฟังก์ชันที่ดีที่สุด

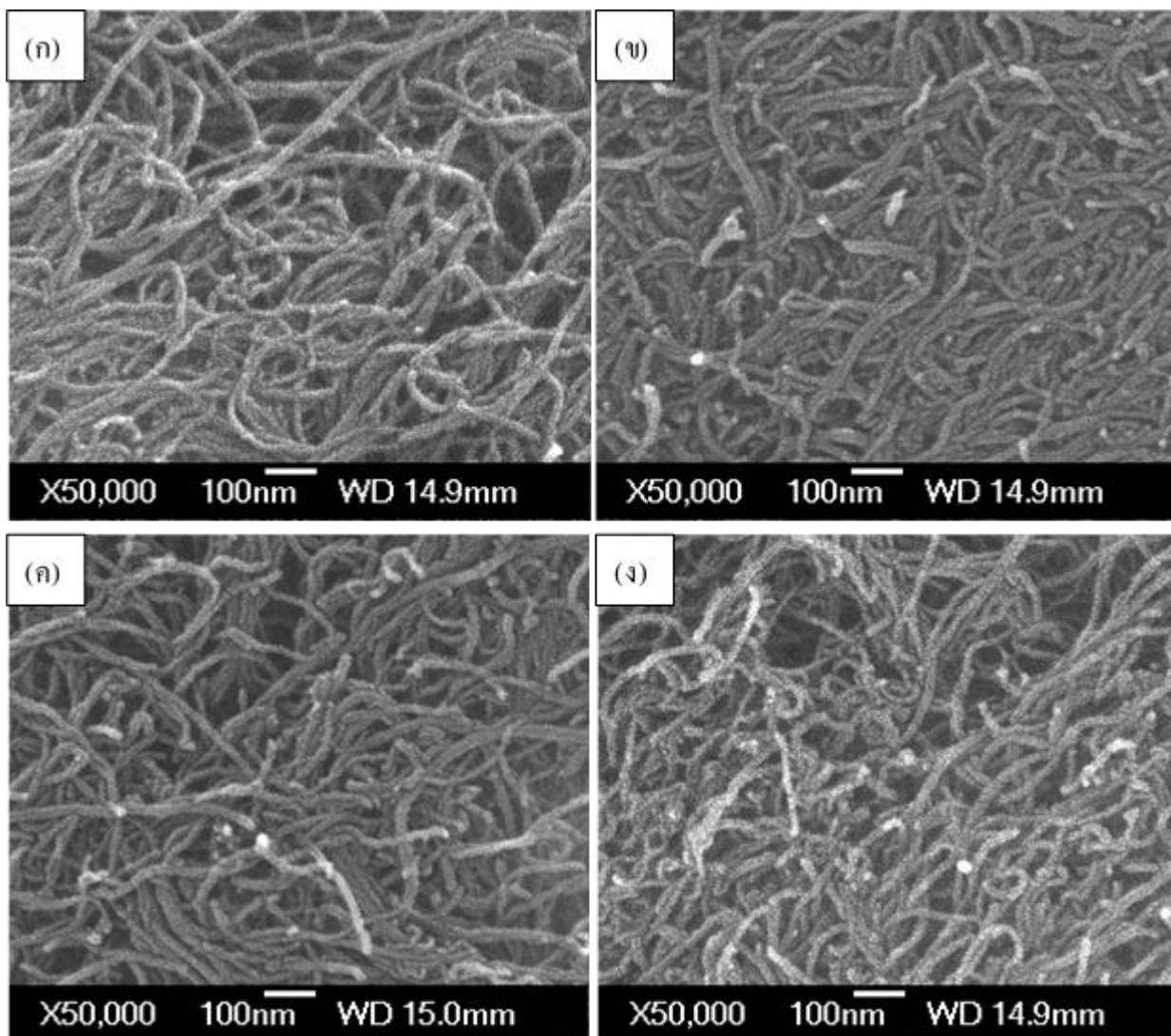
ผลการเตรียมท่อนาโนคาร์บอนผสมอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ ($\text{TiO}_2/\text{MWCNT}$) โดยในขั้นตอนนี้มีจุดประสงค์เพื่อให้อนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์เกาะบนผนังของท่อนาโนคาร์บอนแบบเดิมหมู่ฟังก์ชัน ($\text{TiO}_2/\text{MWCNT}$) โดยวิเคราะห์ลักษณะพื้นฐานวิทยาด้วย SEM, ลักษณะอนุภาคด้วย TEM, วิเคราะห์โครงสร้างด้วยเครื่องรามานสเปกโตรสโกปี (Raman Spectroscopy) และทดสอบการย่อยสลายเมทิลลิโนบลูด้วย UV-Vis

ผลการเตรียมท่อนาโนคาร์บอนแบบเดิมหมู่ฟังก์ชันผสมอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์และคอปเปอร์ ($\text{Cu-TiO}_2/\text{MWCNT}$) โดยวิเคราะห์ลักษณะพื้นฐานวิทยาด้วย SEM, ลักษณะอนุภาคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน TEM, วิเคราะห์ด้วย Raman Spectroscopy และทดสอบการย่อยสลายเมทิลลิโนบลูด้วย UV-Vis

4.1 ผลการเตรียมท่อนาโนคาร์บอนแบบเต็มหมู่ฟังก์ชัน

4.1.1 ผลการวิเคราะห์สัณฐานวิทยาของท่อนาโนคาร์บอนแบบไม่เต็มและเต็มหมู่ฟังก์ชันด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด SEM

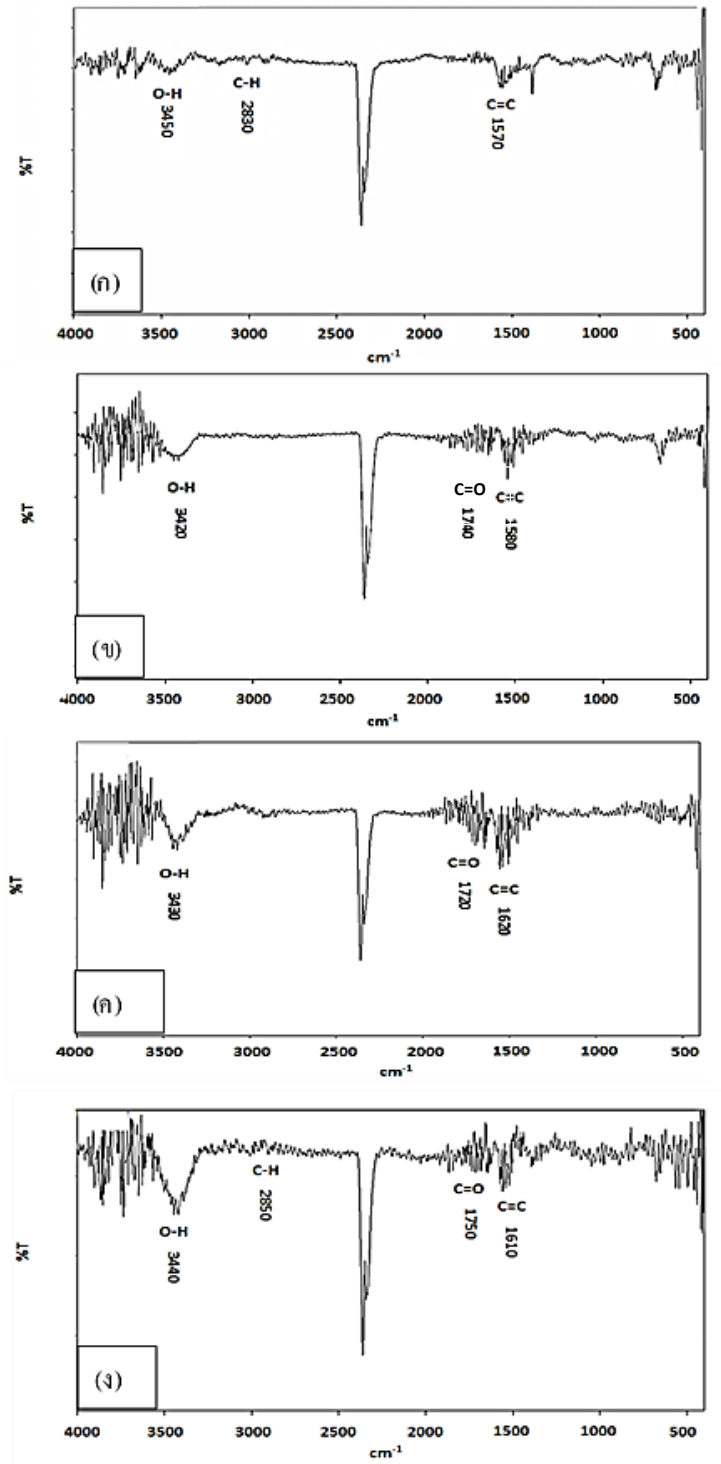
การวิเคราะห์สัณฐานวิทยาของท่อนาโนคาร์บอนแบบไม่เต็มและเต็มหมู่ฟังก์ชันแสดงดังภาพที่ 4. 1 พบว่า



ภาพที่ 4. 1 SEM ของท่อนาโนคาร์บอนแบบ (ก) ไม่เต็มหมู่ฟังก์ชัน และแบบเต็มหมู่ฟังก์ชันด้วย (ข) 10% H_2O_2 (ค) 20% H_2O_2 และ (ง) 30% H_2O_2

4.1.2 การวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันด้วย FT-IR

จากการตรวจสอบหาหมู่ฟังก์ชันของท่อนาโนคาร์บอนแบบไม่เติมและเติมหมู่ฟังก์ชันแสดงในภาพที่ 4. 2



ภาพที่ 4. 2 สเปกตรัม FT-IR ของท่อนาโนคาร์บอนแบบ (ก) ไม่เติมหมู่ฟังก์ชัน และแบบเติมหมู่ฟังก์ชันด้วย H_2O_2 (ข) 10% v/v (ค) 20% v/v และ (ง) 30% v/v

หมู่ฟังก์ชันของท่อนาโนคาร์บอนแบบไม่เต็มแสดงในภาพที่ 4. 2(ก) พบว่า

- ที่ความถี่ช่วง $3350-3550\text{ cm}^{-1}$ เป็น O-H แสดงถึงหมู่ฟังก์ชันไฮดรอกซิล (OH)
- ที่ความถี่ 1570 cm^{-1} เป็น C=C ของหมู่อัลคีน

การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของท่อนาโนคาร์บอนแบบเต็มหมู่ฟังก์ชันด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ความเข้มข้น 10% แสดงในภาพที่ 4. 2(ข) พบว่า

- ความถี่ช่วง $3350-3570\text{ cm}^{-1}$ เป็น O-H โดยแสดงถึงหมู่ฟังก์ชันไฮดรอกซิล (OH)
- ความถี่ 1580 cm^{-1} เป็น C=C ของหมู่อัลคีน
- ที่ความถี่ 1740 cm^{-1} เป็น C=O ของหมู่สารประกอบคาร์บอนิล

การตรวจสอบหมู่ฟังก์ชันของท่อนาโนคาร์บอนแบบไม่เต็มหมู่ฟังก์ชันด้วยเปอร์ออกไซด์ที่ความเข้มข้น 20% แสดงในภาพที่ 4. 2 (ค) พบว่า

- ความถี่ช่วง $3300-3550\text{ cm}^{-1}$ เป็น O-H โดยแสดงถึงหมู่ฟังก์ชันไฮดรอกซิล (OH)
- ความถี่ 1620 cm^{-1} เป็น C=C ของหมู่อัลคีน
- ความถี่ 1720 cm^{-1} เป็น C=O ของหมู่สารประกอบคาร์บอนิล

การตรวจสอบหมู่ฟังก์ชันของท่อนาโนคาร์บอนแบบเต็มหมู่ฟังก์ชันที่ด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ความเข้มข้น 30% แสดงในภาพที่ 4. 2 (ง) พบว่า

- ที่ความถี่ช่วง $3320-3550\text{ cm}^{-1}$ เป็น O-H โดยแสดงถึงหมู่ฟังก์ชันไฮดรอกซิล (OH)
- ที่ความถี่ 1610 cm^{-1} เป็น C=C ของหมู่อัลคีน
- ที่ความถี่ 1750 cm^{-1} เป็น C=O ของหมู่สารประกอบคาร์บอนิล

4.1.3 การกระจายตัวของท่อนาโนคาร์บอนในเอทานอล

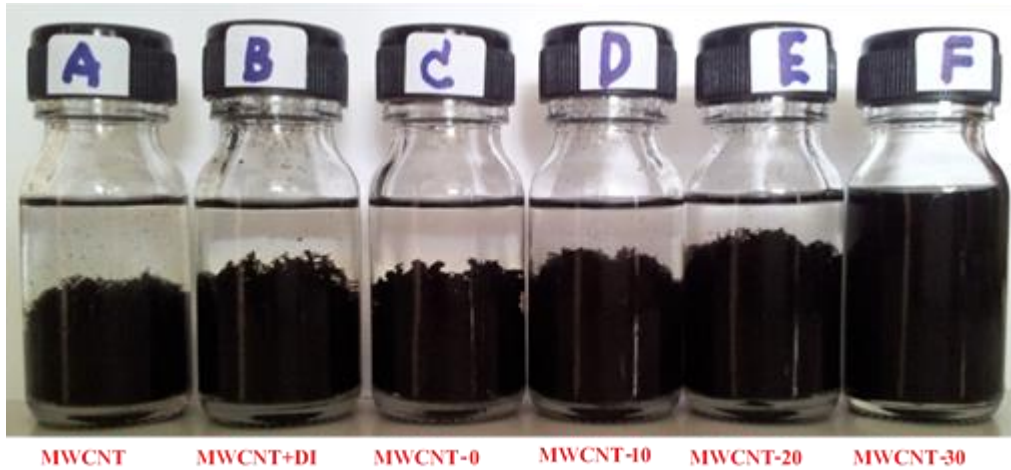
การทดสอบการกระจายตัวของท่อนาโนคาร์บอนในเอทานอล พบว่าก่อนนำไป ลั่นด้วยเครื่องอัลตราโซนิก ท่อนาโนคาร์บอน มีการจับกันเป็นก้อนเล็กๆ หลังทำการลั่น พบว่ามีการกระจายตัวอย่างรวดเร็ว เห็นได้ชัดว่าเอทานอลเปลี่ยนเป็นสีดำ การกระจายตัวของท่อนาโนคาร์บอน ใช้เวลาในการลั่นทั้งหมด 10 นาที การกระจายตัวของตัวอย่าง จาก ตาราง 4.2 แสดง พบว่าตัวอย่าง A-B ยังมีบางส่วนที่ยังจับกันเป็นก้อนเล็กๆ อยู่ ส่วน ตัวอย่าง C-F มีการกระจายตัวที่ดีสังเกตได้จากเอทานอลผสมกับท่อนาโนคาร์บอนแบบเดิม หมู่ฟังก์ชัน มีลักษณะเป็นเนื้อเดียวกันไม่มีเศษของท่อนาโนคาร์บอนเกาะอยู่ ทำการสังเกต การกระจายตัวเมื่อเวลาผ่านไป 1 ชั่วโมง พบว่า ท่อนาโนคาร์บอนแบบไม่เติมหมู่ฟังก์ชัน เริ่มมีการตกตะกอนที่ 30 นาทีแรก โดยลักษณะตะกอนจะเป็นแผ่นเล็กๆ ส่วนท่อนาโน คาร์บอนแบบเติมหมู่ฟังก์ชันยังคงไม่เปลี่ยนแปลง หลังจากนั้นทิ้งไว้เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แสดงดังภาพที่ 4.3

ตาราง 4.2 ตัวอย่างทดสอบการกระจายตัว

ตัวอย่าง	รายละเอียด
A	no treatment
B	CNT+DI
C	MWCNT-0
D	MWCNT-10
E	MWCNT-20
F	MWCNT-30

โดยท่อนาโนคาร์บอนแบบเติมหมู่ฟังก์ชันของไนตริก 3.0 M และไฮโดรเจนเปอร์ ออกไซด์ความเข้มข้นที่ 10 และ 20% v/v มีการตกตะกอนขึ้น ตัวอย่าง F ที่มีความเข้มข้น ของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ 30% v/v พบว่ามีการกระจายได้ดีและไม่พบการกลับมา รวมตัวกัน เพราะในการเตรียมท่อนาโนคาร์บอนแบบเติมหมู่ฟังก์ชัน โดยกระบวนการ ออกซิเดชันแบบเปียก เป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพในการปรับปรุงท่อนาโนคาร์บอน คือการ กำจัดออกไซด์ของคาร์บอน ช่วยในการกระตุ้นพื้นที่ผิวของท่อนาโนคาร์บอนได้ในเวลา เดียวกัน [22] ทำให้บริเวณผนังประกอบด้วยหมู่ฟังก์ชันของออกซิเจน ได้แก่ หมู่ OH, C=O และ COOH ซึ่งหมู่ฟังก์ชันเหล่านี้ช่วยให้ท่อนาโนคาร์บอนแสดงสมบัติทางเคมีที่ดี

นอกจากนี้ยังช่วยเพิ่มสมบัติการกระจายตัวในสารละลายที่มีน้ำเป็นองค์ประกอบ รวมถึงสารละลายอินทรีย์ให้กับท่อนาโนคาร์บอน



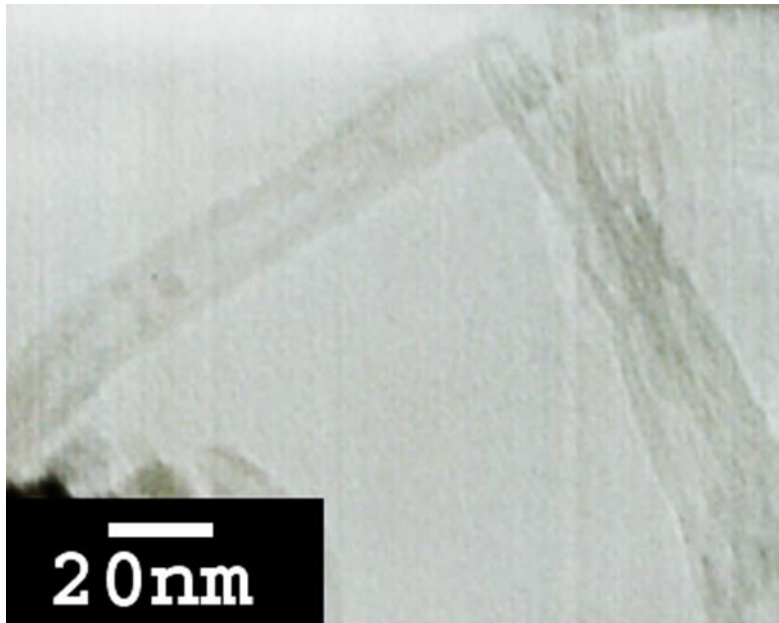
ภาพที่ 4.3 ทดสอบการกระจายตัวของท่อนาโนคาร์บอนในเอทานอลทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง

จากการกระจายตัวของท่อนาโนคาร์บอนแบบไม่เติมและเติมหมู่ฟังก์ชัน พบว่า MWCNT-30 แสดงผลที่ดีที่สุด และผลจาก FT-IR แสดงถึงหมู่ฟังก์ชันที่ช่วยให้ท่อนาโนคาร์บอนที่ช่วยในการกระจายตัวในเอทานอล ทำให้ MWCNT-30 มีความเหมาะสมที่จะนำไปศึกษาต่อไป

4.1.4 การวิเคราะห์ลักษณะท่อนาโนคาร์บอนแบบเติมหมู่ฟังก์ชัน MWCNT-30

โดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (TEM)

ท่อนาโนคาร์บอนที่ได้รับการเติมหมู่ฟังก์ชัน ตามภาพที่ 4.4 มีลักษณะเป็นท่อกดง แบบผนังหลายชั้น เมื่อวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อนาโนคาร์บอนมีค่าน้อยกว่า 20 นาโนเมตร ซึ่งในผลของ SEM ใช้ในส่วนของการศึกษาลักษณะภายนอกได้แต่ไม่สามารถมองเห็นลักษณะภายในของท่อนาโนคาร์บอนได้ และการวิเคราะห์ด้วย TEM ช่วยยืนยันว่าท่อนาโนคาร์บอนไม่มีความเสียหายจากการเตรียมใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่มีความเข้มข้นสูง



ภาพที่ 4. 4 TEM ของท่อนาโนคาร์บอนแบบเติมหมู่ฟังก์ชัน MWCNT-30

4.2 ผลการเตรียมท่อนาโนคาร์บอนผสมอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์

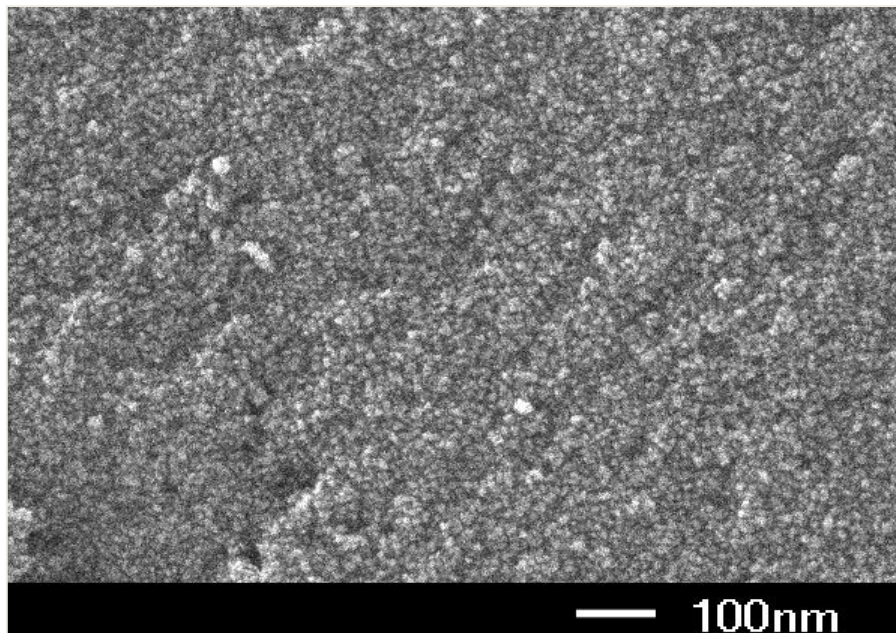
(TiO_2 /MWCNT)

4.2.1 อนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2)

4.2.1.1 การวิเคราะห์สัณฐานวิทยาของอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ |

(TiO_2) โดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)

อนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์สังเคราะห์โดยวิธีไฮโดรลิซิส [23] โดยใช้ไทเทเนียมเตตระคลอไรด์ เป็นสารตั้งต้น และใช้กรดซัลฟิวริกในการลดขนาดอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ เมื่อทำการอบที่อุณหภูมิ $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ จะได้ผงไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นสีเหลือง แล้วนำไปผ่านกระบวนการเผาที่อุณหภูมิ $400\text{ }^{\circ}\text{C}$ จะได้เป็นผงสีขาว อนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ขนาดเล็กในระดับนาโนเมตร จับกันเป็นก้อนเล็กๆ ดังภาพที่



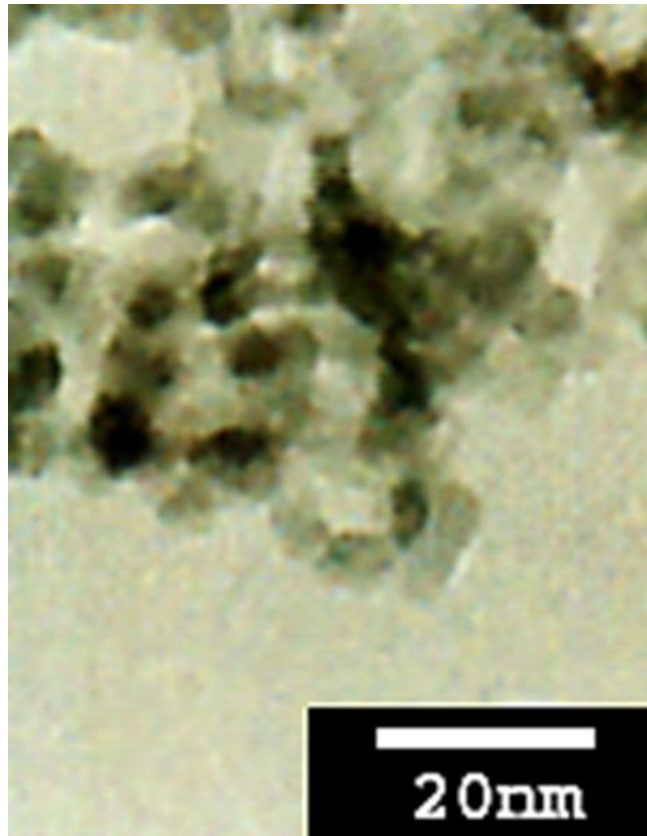
ภาพที่ 4.5 SEM ของไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO₂)

4.2.1.2 การวิเคราะห์ลักษณะอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO₂) โดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (TEM)

อนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์สังเคราะห์โดยวิธีไฮโดรลิซิส โดยใช้ไทเทเนียมเตตระคลอไรด์ เป็นสารตั้งต้น และใช้กรดซัลฟิวริกในการลดขนาดอนุภาคนาโนไทเทเนียมได-ออกไซด์ เมื่อทำการอบที่อุณหภูมิ 80 °C จะได้ผงไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นสีเหลือง แล้วนำไปผ่านกระบวนการเผาที่อุณหภูมิ 400 °C จากภาพที่ 4. 6 จะเห็นได้ว่า

- ลักษณะ อนุภาคนาโนขนาดเล็ก ค่อนข้างกลม
- ขนาดเฉลี่ย น้อยกว่า 5 นาโนเมตร

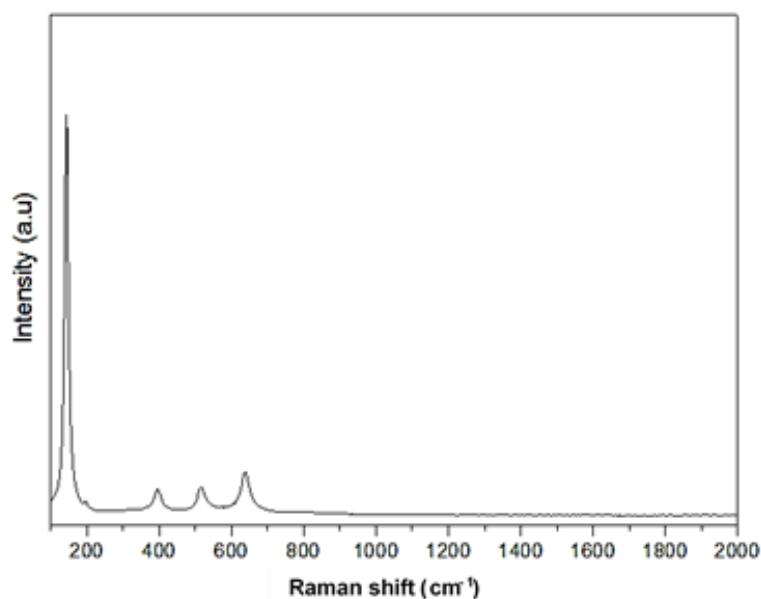
อนุภาคที่มีขนาดเล็กเกิดจากการที่กรดซัลฟิวริกเป็นตัวลดขนาดอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ [24] ซึ่งเป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวในการทำปฏิกิริยากับอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ได้ดียิ่งขึ้น



ภาพที่ 4. 6 TEM ของอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2)

4.2.1.3 วิเคราะห์โดย Raman spectroscopy

การศึกษาโครงสร้างของอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ จากภาพที่ 4. 7 แสดงสเปกตรัมของเฟสอนาเทสอย่างชัดเจนที่ตำแหน่ง $143, 395, 512$ และ 638 cm^{-1} [25] แสดงว่าในการเตรียมอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ไม่มีสารอินทรีย์อื่นเจือปนอยู่ในตัวอย่าง



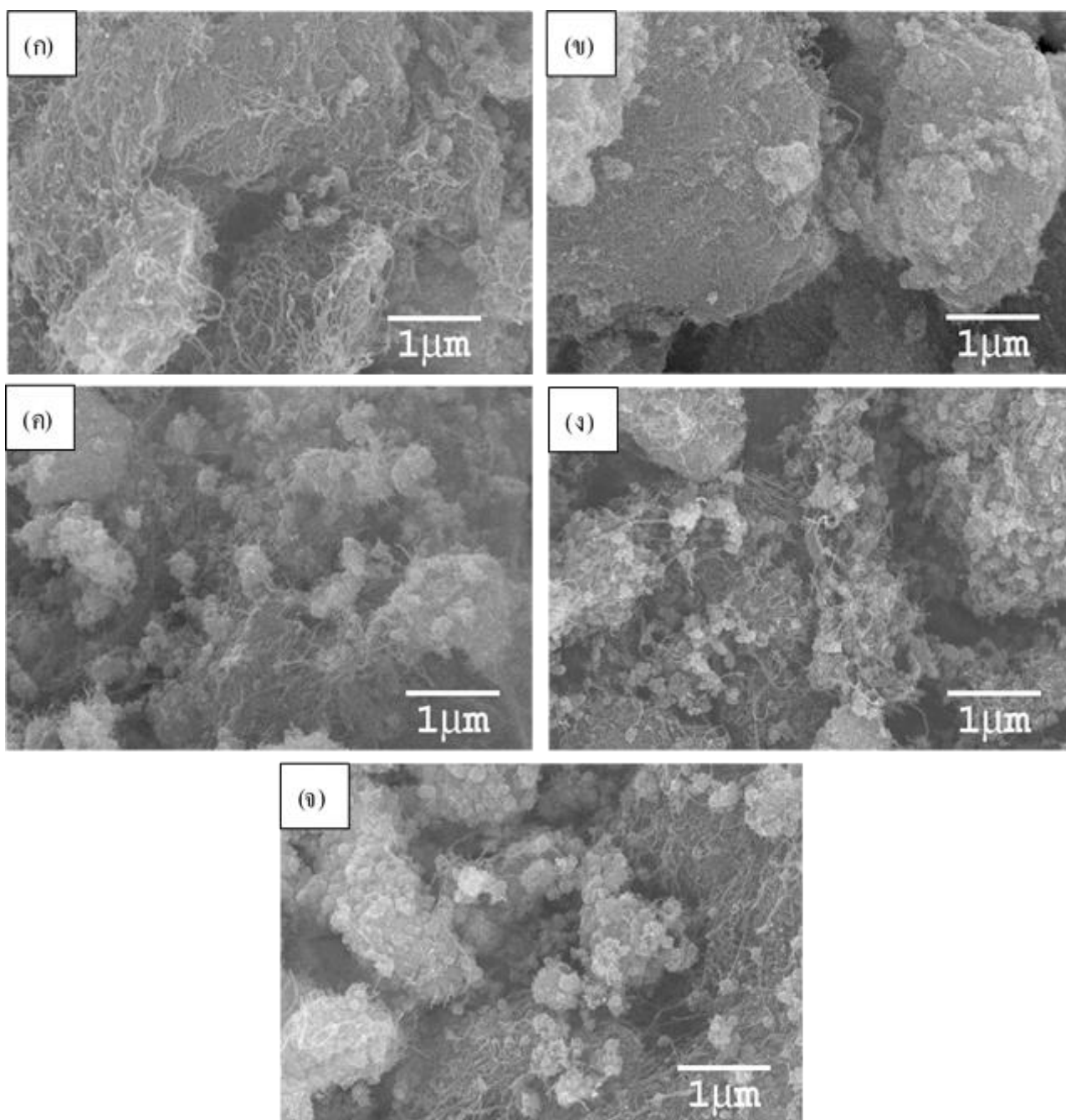
ภาพที่ 4. 7 รามานสเปกตรัมของไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2)

4.2.2 ท่อนาโนคาร์บอนผสมอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ ($\text{TiO}_2/\text{MWCNT}$)

4.2.2.1 การวิเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนผสมอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์

($\text{TiO}_2/\text{MWCNT}$) โดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด SEM

จากการวิเคราะห์ในข้อ 4.1 พบว่าท่อนาโนคาร์บอนแบบเติมหมู่ฟังก์ชัน โดยใช้กรดไนตริก 3.0 M และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 30% v/v ทำให้ท่อนาโนคาร์บอนมีประสิทธิภาพในการกระจายตัวดีที่สุด ทำให้อนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์สามารถเกาะบนผิวของท่อนาโนคาร์บอนได้ โดยกำหนดอัตราส่วนของอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ผสมท่อนาโนคาร์บอนดังนี้ 1:1, 5:1, 10:1, 15:1 และ 20:1 เตรียมโดยวิธีไฮโดรลิซิสโดยใช้ท่อนาโนคาร์บอนแบบเติมหมู่ฟังก์ชันผสมไทเทเนียมเตรตะคลอไรด์และ 10% กรดซัลฟิวริก ทำการกรองด้วยน้ำดีไอ จากนั้นอบให้แห้งที่ 80°C และขั้นตอนสุดท้ายผ่านกระบวนการเผาที่ 400°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ตัวอย่างถูกวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) แสดงดังภาพที่ 4. 8

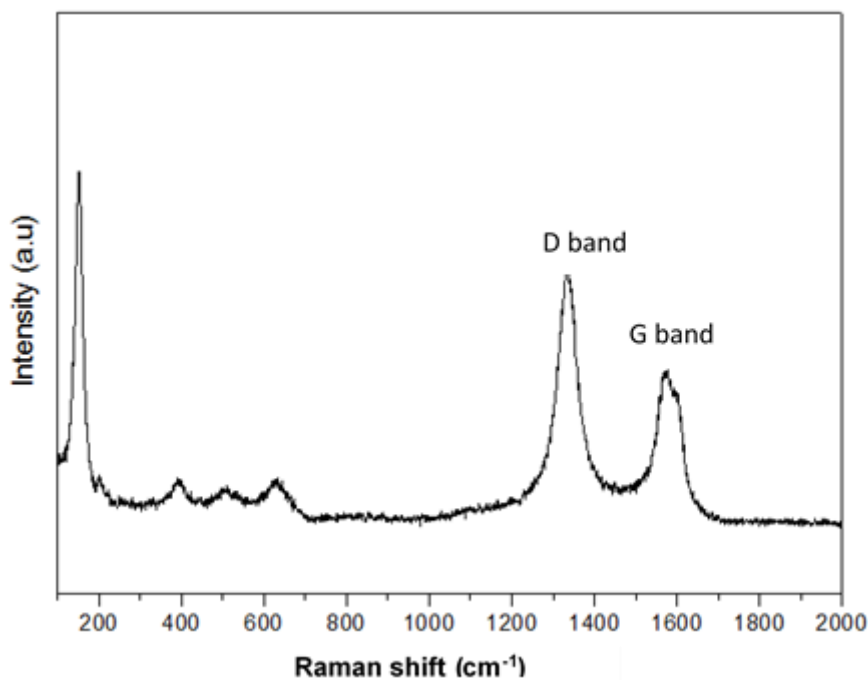


ภาพที่ 4. 8 สัณฐานวิทยาจากกล้อง SEM ของ $\text{TiO}_2/\text{MWCNT}$ อัตราส่วน (ก) 1:1 (ข) 5:1
(ค) 10:1 (ง) 15:1 และ (จ) 20:1

จากภาพที่ 4.8 (ก) – (จ) พบว่าโดยรวมท่อนาโนคาร์บอนจะมีอนุภาคของไทเทเนียมไดออกไซด์เกาะกันเป็นเม็ดเล็กๆ บริเวณผนังของท่อนาโนคาร์บอนในปริมาณเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ เมื่อเพิ่มปริมาณของ TiO_2 ขึ้น อนุภาคนาโน TiO_2 ค่อนข้างเกาะกันเองเป็นกลุ่มใหญ่ขึ้น

4.2.2.2 การวิเคราะห์โครงสร้างของ $\text{TiO}_2/\text{MWCNT}$ อัตราส่วน 15:1 โดย Raman spectroscopy

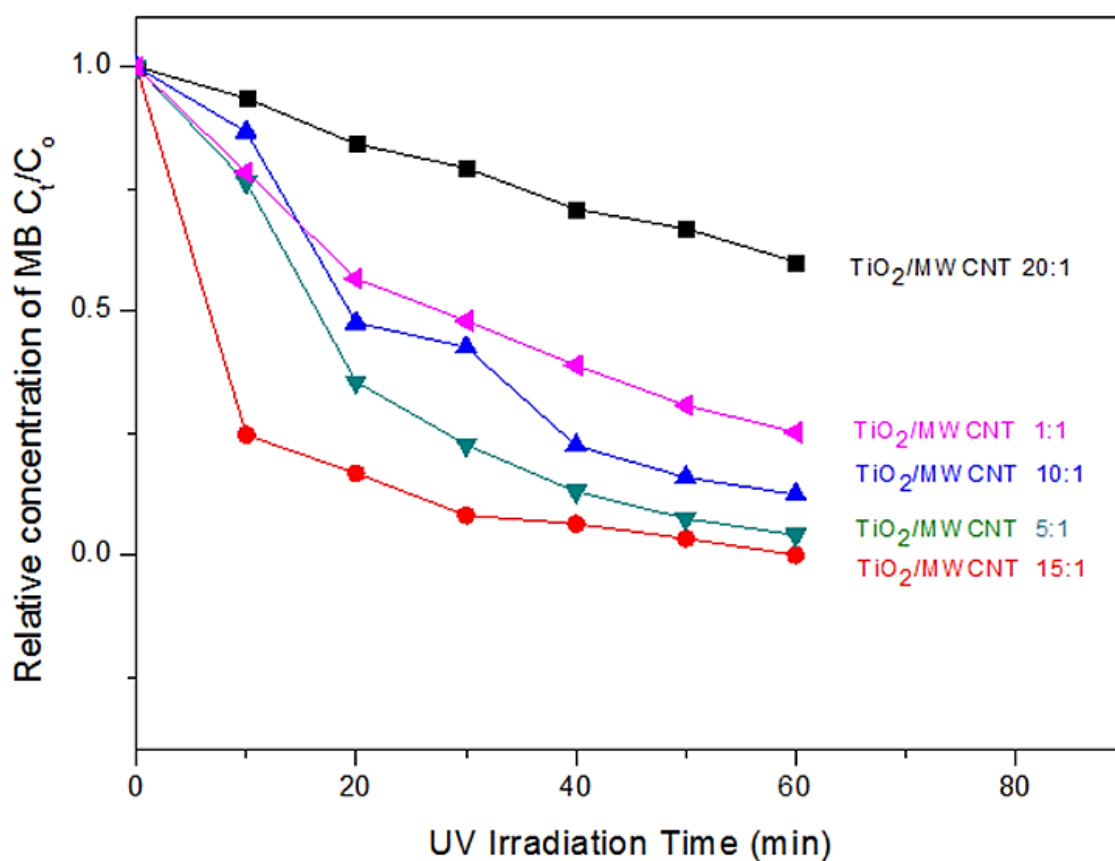
จากภาพที่ 4.9 แสดงสเปกตรัมของไทเทเนียมไดออกไซด์เกาะผนังท่อนาโนคาร์บอนและจะพบพีคของ D band (Disorder Peak) ที่แสดงถึงความถึงความไม่เป็นระเบียบที่เกิดขึ้นในโครงสร้าง ที่ตำแหน่ง 1330 cm^{-1} และ G band (Graphite Peak) ที่แสดงโครงสร้างแบบแกรไฟต์ ที่ตำแหน่ง 1570 cm^{-1} [26-27] และยังคงพบพีคของเฟสอนาเทสที่ตำแหน่ง $143, 395, 512$ และ 638 cm^{-1}



ภาพที่ 4.9 รามานสเปกตรัมของ (15:1) $\text{TiO}_2/\text{MWCNT}$

4.2.2.3 การย่อยสลายเมทิลีนบลูด้วยปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกโดยใช้เครื่องวัดการดูดกลืนแสง (UV-vis)

จากการเตรียมตัวอย่างด้วยวิธีไฮโดรลิซิส อัตราส่วนระหว่างไทเทเนียมไดออกไซด์ต่อท่อนาโนคาร์บอนแบบเติมหมู่ฟังก์ชันที่ 1:1, 5:1, 10:1, 15:1 และ 20:1 จากนั้นนำไปทดสอบการย่อยเมทิลีนบลูที่มีความเข้มข้น 3.0×10^{-5} M โดยก่อนการทดสอบการย่อยสลายป้อนในที่มืดเป็นเวลา 1 ชั่วโมงเพื่อให้บริเวณผิวของตัวอย่างผสมกับเมทิลีนบลูอย่างทั่วถึง ซึ่งกำหนดค่าความเข้มข้นเริ่มต้นเป็น “ C_0 ” และเมื่อทำการฉายรังสียูวีจะได้ “ C_t ” ซึ่งเป็นความเข้มข้นของเมทิลีนบลูหลังจากการฉายรังสียูวี ณ เวลาใดๆ ใช้เวลาในการทดสอบการย่อยสลายทั้งหมด 60 นาที โดยในการทดสอบกำหนดเวลาในการวัดความเข้มข้นคือ 10, 20, 30, 40, 50 และ 60 นาที



ภาพที่ 4. 10 แสดงความสัมพันธ์ C_t/C_0 ของเมทิลีนบลูภายใต้การฉายรังสียูวีด้วย $\text{TiO}_2/\text{MWCNT}$ ในอัตราส่วน 1:1 5:1 10:1 15:1 และ 20:1

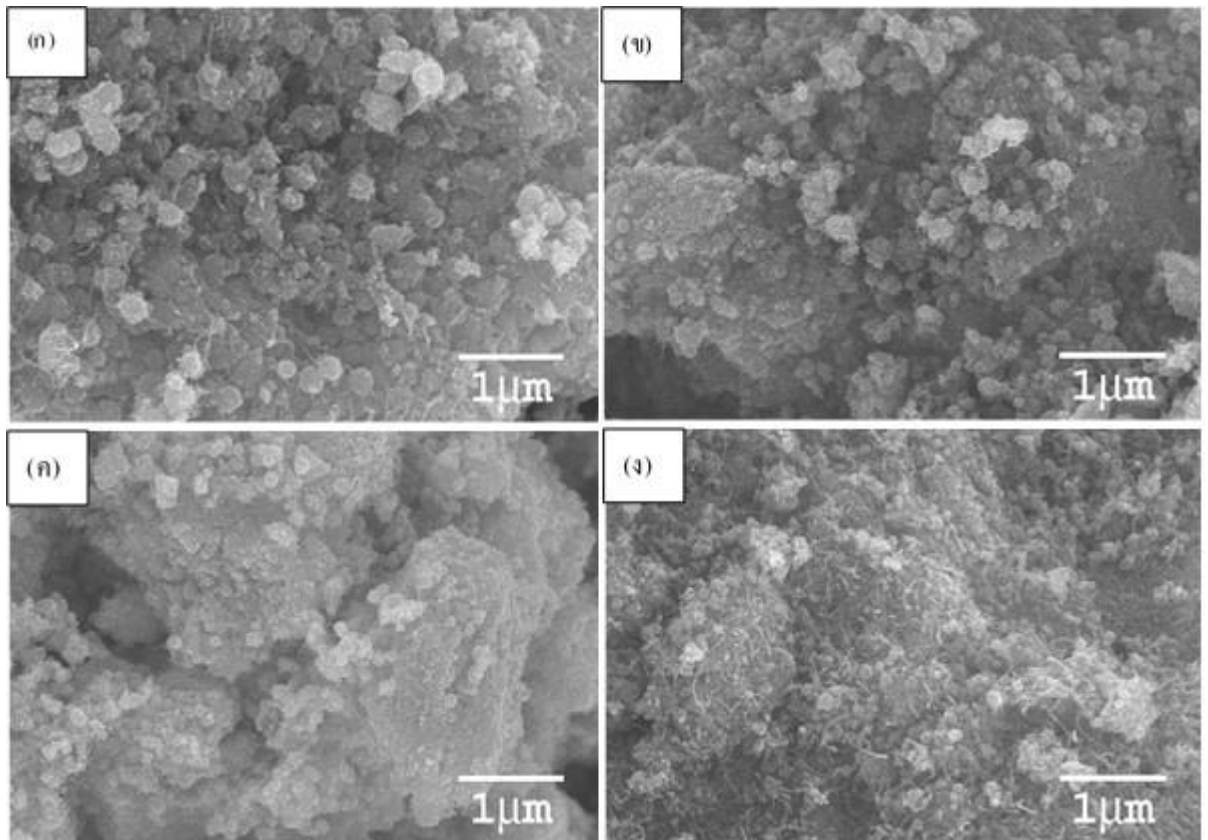
จากภาพที่ 4. 10 เมื่อเวลาผ่านไป 60 นาทีหลังจากการฉายรังสียูวี พบว่าอัตราส่วนระหว่างท่อนาโนคาร์บอนแบบเดิมหมู่ฟังก์ชันต่อไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ 20:1 มีย่อยสลายได้น้อยที่สุดและอัตราส่วนที่ 15:1 แสดงการย่อยสลายเมทิลลิโนบลูได้ดีที่สุด เพราะในการทำปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกในการย่อยสลายเมทิลลิโนบลูในงานวิจัยนี้ จะใช้ท่อนาโนคาร์บอนเพิ่มประสิทธิภาพในการรับอิเล็กตรอนหลังจากการคายพลังงานเมื่อถูกกระตุ้นแล้วนำไปใช้ในการย่อยสลายได้หรือเป็นเหมือนสะพานรับอิเล็กตรอนที่ตกจากชั้นคอนดักชันไปวาเลนซ์ จะทำให้การย่อยสลายได้เร็วขึ้น เพราะมีการป้องกันการเกิดการรวมตัวของอิเล็กตรอนและโฮล เมื่อเปรียบเทียบกับอัตราส่วนที่ 1:1, 5:1 และ 10:1 แสดงผลการย่อยสลายเมทิลลิโนบลูได้ดีกว่าอัตราส่วนที่ 20:1 จากข้อมูลที่ได้อัตราส่วนที่ 15:1 สามารถแสดงผลทดสอบการย่อยสลายเมทิลลิโนบลูได้ดีที่สุด ในงานวิจัยนี้ได้นำไปเจือคอปเปอร์เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้นในหัวข้อต่อไป

4.3 ผลการเตรียมท่อนาโนคาร์บอนผสมอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์เจือคอปเปอร์

(Cu-TiO₂/MWCNT)

4.3.1 การวิเคราะห์พื้นฐานวิทยาท่อนาโนคาร์บอนผสมอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์เจือคอปเปอร์ (Cu-TiO₂/MWCNT) โดย SEM

คอปเปอร์ถูกเจือเข้ากับอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์และผสมกับท่อนาโนคาร์บอนในปริมาณ 1% 3% 5% และ 7% ถูกเตรียมโดยวิธีไฮโดรลิซิสโดยใช้ท่อนาโนคาร์บอนแบบเดิมหมู่ฟังก์ชันผสมไทเทเนียมเตรตะคลอไรด์ 10% กรดซัลฟิวริก โดยเติมคอปเปอร์คลอไรด์หลังจากผสมท่อนาโนคาร์บอนแบบเดิมหมู่ฟังก์ชันกับไทเทเนียมเตรตะคลอไรด์แล้วทำการกรองด้วยน้ำดีไอ จากนั้นอบให้แห้งที่ 80 °C และขั้นตอนสุดท้ายผ่านกระบวนการเผาที่ 400 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จากภาพที่ 4. 11 (ก) – (ง) พบว่า อนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์มีลักษณะเป็นก้อนเล็กๆ เกาะท่อนาโนคาร์บอน การเกาะของอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ยังเหมือนกับการเจือคอปเปอร์ที่ 1%, 3% 5% และ 7% w/w

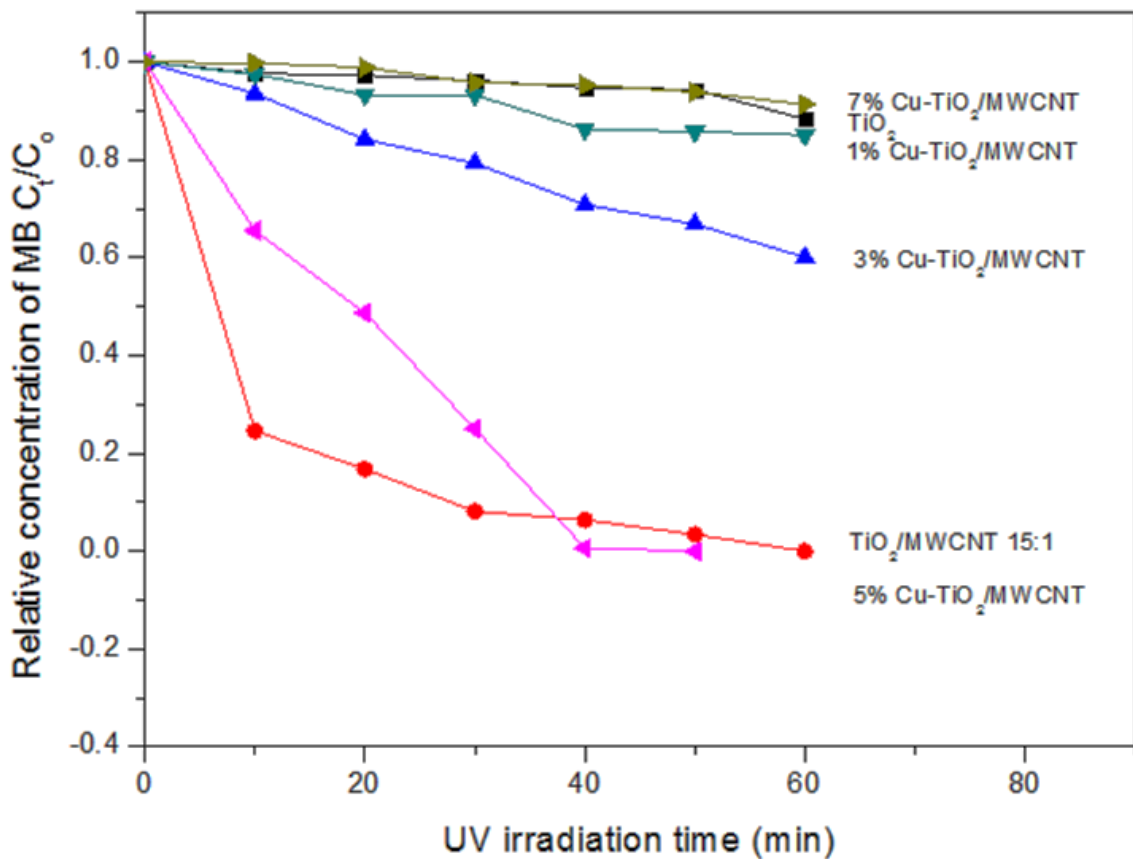


ภาพที่ 4. 11 SEM ของ Cu-TiO₂/MWCNT (ก) 1% w/w (ข) 3% w/w (ค) 5% w/w และ (ง) 7% w/w

4.3.2 การย่อยสลายเมทิลลิบลูด้วยเทคนิค UV-vis

จากการเตรียมตัวอย่างด้วยวิธีไฮโดรลิซิส อัตราส่วนระหว่างท่อนาโนคาร์บอนแบบเต็มหุ้มฟังก์ชันต่ออนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ 15:1 จากนั้นทำการเจือจอปเปอร์ด้วยคอปเปอร์เตรตะคลอไรด์ในปริมาณที่กำหนดคือ 1, 3, 5 และ 7 %w/w จากนั้นนำไปทดสอบการย่อยเมทิลลิบลูที่มีความเข้มข้น 3.0×10^{-5} โมลาร์ โดยก่อนการทดสอบการย่อยสลายทำการปั่นในที่มืดเป็นเวลา 1 ชั่วโมงเพื่อให้บริเวณผิวของตัวอย่างผสมกับเมทิลลิบลูอย่างทั่วถึงซึ่งจะได้ค่าของความเข้มข้นเริ่มต้นเป็น “C₀” และเมื่อทำการฉายรังสียูวีจะได้ “C_t” เป็นความเข้มข้นของเมทิลลิบลูหลังจากการฉายรังสียูวี ใช้เวลาทดสอบการย่อยสลายทั้งหมด 60 นาที กำหนดในการวัดความเข้มข้น 10 20 30 40 50 และ 60 นาที

จากภาพที่ 4.12 หลังจากการฉายรังสียูวี พบว่า คอมโพสิตที่มีการเจือจอปเปอร์ 5%w/w แสดงการย่อยสลายที่เหมาะสมที่สุด



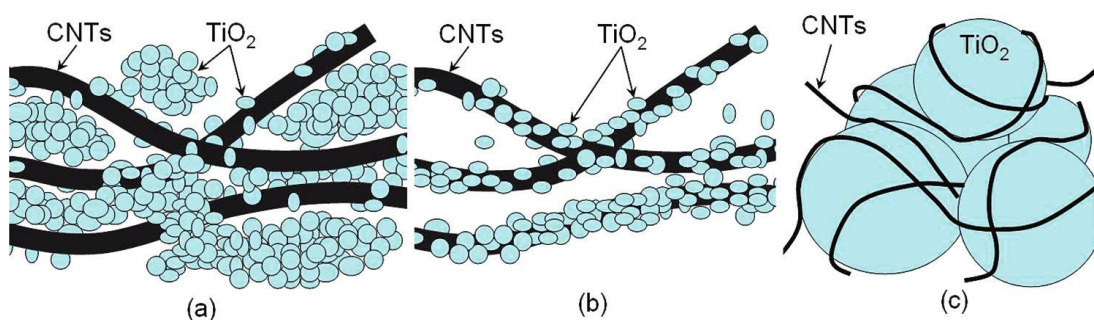
ภาพที่ 4. 12 แสดงความสัมพันธ์ C_t/C_0 ของเมทิลีนบลูภายใต้การฉายรังสีด้วย
ตัวอย่าง 1.0, 3.0, 5.0 และ 7.0% Cu-TiO₂/MWCNT คอมโพสิต

จากภาพที่ 4. 12 การเจือคอปปเปอร์ลงใน TiO₂/MWCNT คอมโพสิต ในปริมาณ 1% และ 3% ทำให้การย่อยสลายลดลง เป็นผลอันเนื่องมาจาก คอปเปอร์ที่เดิมมีการเกาะบริเวณเส้นของท่อนาโนคาร์บอนมากกว่าบริเวณอนุภาค TiO₂ ซึ่งทำให้พื้นที่ผิวการเกิดปฏิกิริยาและพื้นที่การดูดซับสารบนท่อนาโนคาร์บอนลดลง ส่วนการเจือคอปปเปอร์ลงใน TiO₂/MWCNT คอมโพสิตที่ 7%w/w อัตราการย่อยสลายลดลงอย่างมาก เนื่องจากปริมาณที่มากเกินไป นอกจากจะมีการเกาะที่ผิวของท่อนาโนคาร์บอนแล้ว ยังมีการเกาะบน TiO₂ ที่มากด้วย ทำให้เกิดการ recombination ระหว่างอิเล็กตรอนและโฮลสูงด้วย การเกิดปฏิกิริยาย่อยสลายด้วยแสงจึงลดลงอย่างมาก ทำให้ 5%w/w Cu-TiO₂/MWCNT เป็นปริมาณที่เหมาะสมที่สุดต่อการนำไปใช้ย่อยสลายด้วยแสง ซึ่งมีปริมาณที่เหมาะสม ไม่ทำให้เกิดการ recombination ระหว่างอิเล็กตรอนและโฮล

5. วิเคราะห์ผลการวิจัย

การเติมหมู่ฟังก์ชันแบบออกซิเดชันแบบเปียกให้แก่ท่อนาโนคาร์บอน เป็นการปรับปรุงท่อนาโนคาร์บอน คือการกำจัดข้อบกพร่องของคาร์บอน ช่วยในการกระตุ้นพื้นที่ผิวของท่อนาโนคาร์บอนได้ในเวลาเดียวกัน [22] ทำให้บริเวณผนังประกอบด้วยหมู่ฟังก์ชันของออกซิเจน ได้แก่ หมู่ OH, C=O และ COOH ซึ่งหมู่ฟังก์ชันเหล่านี้ช่วยให้ท่อนาโนคาร์บอนแสดงสมบัติทางเคมีที่ดี นอกจากนี้ยังช่วยเพิ่มสมบัติการกระจายตัวในสารละลายที่มีน้ำเป็นองค์ประกอบ รวมถึงสารละลายอินทรีย์ให้กับท่อนาโนคาร์บอน การเติมหมู่ฟังก์ชันให้แก่ท่อนาโนคาร์บอน จะมี C=O ซึ่งจะพบในหมู่คาร์บอกซิลิก (Carboxylic Acid; RCOOH) [21] โดยหมู่คาร์บอกซิลิกเกิดจากการเติมกรดไนตริกและไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ลงไป ทำให้เกิดหมู่ฟังก์ชันดังกล่าวขึ้น โดยเป็นลักษณะการเกาะบริเวณที่ผนังของท่อนาโนคาร์บอน ซึ่งการกระจายตัวที่ดี ไม่เกาะกลุ่ม กระจายตัวได้ดี จะทำให้มีพื้นที่ผิวมาก สามารถทำปฏิกิริยาในของเหลวได้ดีด้วย นอกจากนี้ ผลการวิเคราะห์พื้นฐานให้ผลทางกายภาพของท่อนาโนคาร์บอนของการเติมหมู่ฟังก์ชันทุกความเข้มข้นเหมือนกันกับท่อนาโนคาร์บอนที่ไม่เติมหมู่ฟังก์ชัน ซึ่งแสดงถึงการเติมหมู่ฟังก์ชันที่ไม่ได้ทำลายพื้นผิวท่อนาโนคาร์บอน

เมื่อพิจารณาผลของ SEM พบว่าอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์เกาะกับท่อนาโนคาร์บอนได้ดี และบางส่วนอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์เกาะกันเองเป็นก้อนซึ่งสามารถเปรียบเทียบลักษณะการเกาะได้ดังภาพที่ 5. 1 (a) ลักษณะการเกาะแบบดังกล่าวเกิดขึ้นกับการเจือจางเปอร์เข้าไปในอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์และท่อนาโนคาร์บอนด้วย การเจือจางเปอร์ช่วยขัดขวางหรือลดการจับกันเองของอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์



ภาพที่ 5.1 แสดงการเกาะของอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์บนผนังท่อนาโนคาร์บอน (a) การเกาะของอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นแบบสุ่ม, (b) เป็นลักษณะการเกาะของอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์อย่างเป็นระเบียบและ (c) เป็นลักษณะของท่อนาโนคาร์บอนพันอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีขนาดใหญ่ [28]

การวิเคราะห์ผลการทดสอบการย่อยสลายเมทิลลีนบลูด้วยปฏิกิริยาโฟโตแคตตะไลติกพบว่า อัตราส่วนของ $\text{TiO}_2/\text{MWCNT}$ ที่ 15:1 ให้ประสิทธิภาพการย่อยสลายเมทิลลีนบลูด้วยแสง UV สูง ซึ่งท่อนาโนคาร์บอนเพิ่มประสิทธิภาพในการรับอิเล็กตรอน หลังจากการคายพลังงานเมื่อถูกกระตุ้น แล้วนำไปใช้ในการย่อยสลายได้หรือทำหน้าที่เหมือนสะพานรับอิเล็กตรอนที่ตกจากชั้นคอนดักชันเพื่อป้องกันการเกิดการรวมตัวของอิเล็กตรอนและโฮลของไทเทเนียมไดออกไซด์ จึงทำให้ประสิทธิภาพการย่อยสลายได้เร็วขึ้น [28] ซึ่งการมีปริมาณ TiO_2 น้อยเกินไป คือ อัตรา $\text{TiO}_2:\text{MWCNT}$ เป็น 1:1, 5:1 และ 10:1 จะทำให้ TiO_2 นอกจากนี้ ยังถูก MWCNT บดบังพื้นที่การได้รับแสง UV จึงแสดงสมบัติได้ไม่เต็มประสิทธิภาพที่ควรจะเป็น ในขณะที่เดียวกัน TiO_2 ที่มากเกินไป คือ อัตรา $\text{TiO}_2:\text{MWCNT}$ เป็น 20:1 มีการเกาะกลุ่มเอง จึงส่งผ่านอิเล็กตรอนไปยัง MWCNT ไม่ได้ และเกิดการรวมตัวใหม่ของอิเล็กตรอนและโฮลได้ง่าย

โดยในงานวิจัยทำการเจืออนุภาคคอปเปอร์เพิ่มประสิทธิภาพในการทำปฏิกิริยาของ (15:1) $\text{TiO}_2/\text{MWCNT}$ โดยทำการเตรียม $\text{Cu-TiO}_2/\text{MWCNT}$ โดยใช้ CuCl_4 เป็นสารตั้งต้นของตัวเจือคอปเปอร์ ปฏิกิริยาโฟโตแคตตะไลติกและในอัตราส่วนที่ 5.0%w $\text{Cu-TiO}_2/\text{MWCNT}$ ให้ผลดีที่สุด เนื่องจากการเจือในปริมาณที่เหมาะสม จะช่วยเป็นตัวช่วยลดแถบช่องว่างพลังงานลง อิเล็กตรอนสามารถเคลื่อนที่ไปยังแถบคอนดักชันได้ง่าย ลดพลังงานที่ใช้ในการกระตุ้นลง จึงทำให้ ที่ 5.0%w $\text{Cu-TiO}_2/\text{MWCNT}$ ให้ผลดีที่สุด

6. สรุปผลการวิจัย

ท่อนาโนคาร์บอนแบบเต็มหมู่ฟังก์ชันเตรียมโดยวิธีออกซิเดชันแบบเปียกด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เข้มข้น 10, 20, 30% v/v ในการวิเคราะห์ลักษณะสัณฐานวิทยาพบว่าท่อนาโนหลังทำการเต็มหมู่ฟังก์ชัน มีลักษณะท่อกว้าง เป็นเส้นยาว ผิวท่อนาโนคาร์บอนไม่ได้รับความเสียหายจากไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ และการมีหมู่ฟังก์ชันของ O-H, C=C และ C=O ทำให้มีการกระจายตัวในเอทานอลได้ดี ซึ่ง MWCNT-30 มีการกระจายตัวดีนานที่สุดคือมากกว่า 24 ชั่วโมง

TiO₂/MWCNT เตรียมโดยใช้วิธีไฮโดรไลซิสด้วยใช้ MWCNT-30 และไทเทเนียมเตตระคลอไรด์ ด้วยอัตราส่วน 1:1, 5:1, 10:1, 15:1 และ 20:1 เมื่อผ่านกระบวนการเผาจะได้ TiO₂/MWCNT แล้วทำการวิเคราะห์ลักษณะสัณฐานวิทยาด้วย SEM พบว่าท่อนาโนคาร์บอนอัตราส่วน 15:1 TiO₂/MWCNT ให้การเกาะของอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์บนผนังท่อนาโนคาร์บอนอย่างสม่ำเสมอ ไม่เกาะกันเป็นก้อนขนาดใหญ่ ทำให้มีพื้นที่ผิวสัมผัสมาก ผลจากรามานสเปกโตรสโกปี พบพิคแสดงลักษณะของเฟสอนาเทสของอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ และ D band ที่แสดงว่าไม่เป็นระเบียบในโครงสร้างกับ G band ที่มีโครงสร้างแบบแกรไฟต์ของท่อนาโนคาร์บอน โดยการย่อยสลายเมททิลลิโนบลูด้วยปฏิกิริยาโฟโตแคตตาไลติก พบว่า อัตราส่วน 15:1 TiO₂/MWCNT สามารถย่อยสลายเมททิลลิโนบลูได้ดีที่สุด

Cu-TiO₂/MWCNT เตรียมโดยใช้วิธีไฮโดรไลซิสด้วยใช้ อัตราส่วน 15:1 TiO₂/MWCNT แล้วเติมด้วยคอปเปอร์คลอไรด์ที่ 1.0, 3.0, 5.0, 7.0 %w การวิเคราะห์ลักษณะสัณฐานวิทยาด้วย SEM พบว่าการเกาะของอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์บนผนังท่อนาโนคาร์บอนอย่างสม่ำเสมอและไม่เกาะกันเป็นก้อนขนาดใหญ่ ส่วนการย่อยสลายเมททิลลิโนบลูด้วยปฏิกิริยาโฟโตแคตตาไลติก พบว่า 5% Cu-TiO₂/MWCNT สามารถย่อยสลายเมททิลลิโนบลูได้ดีที่สุด

เอกสารอ้างอิง

- [1] ศุภกร ภู่เกิด . 2554. ประเภทของวัสดุนาโน . เข้าถึงจาก <http://www.ncn.purdue.edu> [1 มกราคม 2558].
- [2] สุพิณ แสงสุข . 2550. ไทเทเนียมไดออกไซด์ . เข้าถึงจาก <http://www.mintec.umn.edu> [1 มกราคม 2558].
- [3] เวพุรีย์ ทองคำ . 2554. ประโยชน์ของอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ . เข้าถึงจาก <http://dcool.igetweb.com> [1 มกราคม 2558].
- [4] Mills A. and Lee S.K., A web-based overview of semiconductor photochemistry-based current commercial applications. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*. 2002, 152, 233-247.
- [5] Herrmann, J.M. Heterogeneous photocatalysis: fundamentals and applications to the removal of various types of aqueous pollutions. *Catalysis Today*, 1999, 53: 115-129.
- [6] Benedix, R., Dehn F., Quaas J. and Orgass M., Application of titanium dioxide photocatalysis to create self-cleaning building materials. *Lacer*, 2000, 5, 167.
- [7] สมบัติไทเทเนียมไดออกไซด์ . เข้าถึงจาก <http://www.chemtrack.org>. [1 มกราคม 2558].
- [8] สมบัติคอปเปอร์ . เข้าถึงจาก <http://www.chemtrack.org>. [1 มกราคม 2558].
- [9] Copper (Cu) ทองแดง . เข้าถึงจาก <http://web.ku.ac.th>. [20 มกราคม 2558].
- [10] เครื่องวัดการดูดกลืนแสงช่วงยูวี เข้าถึงจาก <http://www.rmutphysics.com>. [20 มกราคม 2558].
- [11] เครื่องวัดการดูดกลืนแสงของสารในช่วงอินฟราเรด เข้าถึงจาก <http://www.aquatoyou.com>. [5 มีนาคม 2556].
- [12] เครื่องรามานสเปกโตรสโคปี เข้าถึงจาก <http://www.aquatoyou.com> [20 เมษายน 2556].
- [13] กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน . เข้าถึงจาก <http://www.atom.rmutphysics.com> [1 มกราคม 2558].

- [14] Wenjie Z., Ying L., Sheng Z. and Fuhai W., Copper doping in titanium oxide catalyst film prepared by dc reactive magnetron sputtering, *Catalysis Today*, 2004, 93-95 589-594.
- [15] Arana J., Fernández C., Rodríguez O., González D., Herrera J., Melián A. and Pérez J. Peña. Role of Cu in the Cu-TiO₂ photocatalytic degradation of dihydroxybenzenes. *Catalysis Today*, 2005, 101, 3–4, 261–266.
- [16] Baifu X., Peng W., Dandan D., Jia L., Zhiyu R., Honggang F, Effect of surface species on Cu-TiO₂ photocatalytic activity, *Applied Surface Science*, 2008, 254, 9, 2569–2574
- [17] karunakaran C., Abiramasundari G., Gomathisankar P., Manikandan G. and Anandi V., Cu-TiO₂ nanoparticle for photocatalytic disinfection of bacteria under visible light, *Journal of Colloid and Interface Science*, 2010, 352, 68-74.
- [18] Lihong T., Liqun Y., Kejian D. and Ling Z., TiO₂ /carbon nanotube hybrid nanostructures: solvothermal synthesis and their visible light photocatalytic activity, *Journal of solid state Chemistry*, 2011, 184, 1465-1471.
- [19] Vahid V., Sayed S. M., Postam M., Sirius Z. and Bandar A., Novel antibifouling nanofiltration polyethersulfone membrane fabricated from embedding TiO₂ coated multiwalled carbonnanotube, *Separation and Purification Technology*, 2012, 90, 69-82.
- [20] Aviles F., Cauich-Rodriguez J.V., Moo-Tah V., May-Pat A. and Vargas-Coronado R., Evaluation of mild acid oxidation treatments for MWCNT functionalization, *Carbon*, 2009, 47, 2970-2975.
- [21] Hou P. X., Liu C. and Cheng H.M., Purification of carbon nanotubes. *Carbon*, 2008; 46, 200-325.
- [22] Chiang Y.-C., Chiang Y. C., Lin W. H. and Chang Y., The influence of treatment duration on multi-walled carbon nanotubes functionalized by H₂SO₄/HNO₃ oxidation, *Applied Surface Science*, 2011, 257, 2401–2410.
- [23] Yang Z., Yue H., Yan L., Han Z., Shaowen Z., Liangti Q., Gaoquan S. and Liming D., Super-long aligned TiO₂/carbon nanotube arrays, *Nanotechnology*, 2010, 21, 505-702.

- [24] Sang H. J., Young-B. P. and Kwan H. Y., Modified multi-walled carbon nanotube-filled PET composite. *Composites Science and Technology*, 2010, 67, 3434-3441.
- [25] Singjai P., Changsarn S. and Thongtem S. Electrical resistivity of bulk multiwalled carbon nanotubes synthesized by an infusion chemical vapor deposition method., *Materials Science and Engineering*, 2011, 443, 42-46.
- [26] Shyu J. Z.; Weber W. H.; Gandhi H. S., Synthesis, characterization, biocidal and veridical properties of metal oxide nanoparticles., *The Journal of Physical Chemistry*, 1988, 92, 17.
- [27] Reimann K. and Syassen, K., Raman scattering and photoluminescence in Cu_2O under hydrostatic pressure. *Solid State Communication*, 1990, 76, 137.
- [28] Yuanyao G, Shannon C., Richard M. L., and Kimberly A. G. Photoreactive TiO_2 /carbon nanotube composites: synthesis and reactivity. *Environmental Science & Technology*, 2008, 42, 4952–4957.

ภาคผนวก

- ภาคผนวก ก การนำเสนอผลงานวิชาการ

- ภาคผนวก ก การนำเสนอผลงานวิชาการ

การประชุมวิชาการระดับชาติวิทยาศาสตร์วิจัย ครั้งที่ 6
The 7th Science Research Conference 30 – 31 มีนาคม 2558 มหาวิทยาลัยนเรศวร

Proceedings The 7th National Science Research Conference, 30-31 March 2015, Naresuan University.

การเตรียมวัสดุผสมของท่อนาโนคาร์บอนและไทเทเนียมไดออกไซด์สำหรับประยุกต์
ทางด้านโฟโตคะตะไลติก

Preparation of carbon nanotubes and titanium dioxide nanotubes composite for
photocatalytic application

อริสรา ปิ่นญาติ¹ และ สุภาพร ดาวทอง^{1*}

Arisara Pinyat¹ and Supharn Daothong^{1}*

¹สาขาวิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยแม่โจ้

บทคัดย่อ

บทความนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในกระบวนการโฟโตคะตะไลติก จากการเตรียมท่อนาโนคาร์บอนแบบเติมหมู่ฟังก์ชันโดยวิธีออกซิเดชันทางเคมี (Chemical oxidation) และไทเทเนียมไดออกไซด์ ในอัตราส่วน 1:1, 1:5 และ 1:10 วิเคราะห์ด้วยเครื่อง SEM และ FT-IR พบว่า อัตราส่วนที่ 1:5 อนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์เกาะบนผิวของท่อนาโนคาร์บอนเป็นก้อนขนาดเล็ก กระจายตัวกันแบบสุ่ม และวิเคราะห์การย่อยสลายเมทิลีนบลูด้วยปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติก โดยใช้เครื่องวัดการดูดกลืนแสง (UV-Vis) ก่อนและหลังได้รับรังสียูวี ที่ 10 ถึง 60 นาที พบว่า ที่อัตราส่วน 1:5 มีการย่อยสลายเมทิลีนบลูได้มากที่สุด

คำสำคัญ : ท่อนาโนคาร์บอน, อนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์, ปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติก

ABSTRACT

This article is intended to increase the photocatalytic efficiency. The preparation of functionalized carbon nanotubes composite filled by chemical oxidation method. The ratio of carbon nanotubes and titanium dioxide composites were 1:1, 1:5 and 1:10. The photocatalyst samples were characterized by SEM, the ratio of 5:1 nanoparticle titanium dioxide forming on the surface of carbon nanotubes with capture. into small cubes consistently dispersed particles. Titanium dioxide nanoparticles on carbon nanotubes. And analyze the degradation of methylene blue by reaction photochemical using the measured absorbance (UV-Vis) before and after exposure to UV radiation at 10 - 60 minutes showed that the optimized condition of 5: 1 is the degradation of methylene blue as possible.

Keywords : Carbon nanotubes, titanium dioxide particles, photocatalytic reaction.

* Corresponding author; e-mail address: sd.daothong@gmail.com