



รายงานการวิจัย

การพัฒนาสารไทเทเนียมไดออกไซด์เคลือบบนวัสดุกันกระแทกเพื่อยืดอายุ
การเก็บรักษามะม่วงน้ำดอกไม้หลังการเก็บเกี่ยว

**Development of TiO_2 Coat on Cushioning Material for Mango
Postharvest Technology**

บุษบากร คงเรือง และคณะ

สาขาเทคโนโลยีการผลิต คณะเทคโนโลยีการเกษตรและเทคโนโลยีอุตสาหกรรม
มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบูรณ์

ประจำปีงบประมาณ 2558

รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

การพัฒนาสารไทเทเนียมไดออกไซด์เคลือบบนวัสดุกันกระแทกเพื่อยืดอายุ
การเก็บรักษามะม่วงน้ำดอกไม้หลังการเก็บเกี่ยว

Development of TiO_2 Coat on Cushioning Material for Mango
Postharvest Technology

บุษบากร คงเรือง	สาขาเทคโนโลยีการผลิต คณะเทคโนโลยีการเกษตรและเทคโนโลยีอุตสาหกรรม
ศักดิ์ศิริชัย ศรีสวัสดิ์	สาขาเทคโนโลยีการผลิต คณะเทคโนโลยีการเกษตรและเทคโนโลยีอุตสาหกรรม
ธนภัทร มะณีแสง	สาขาเทคโนโลยีการผลิต คณะเทคโนโลยีการเกษตรและเทคโนโลยีอุตสาหกรรม

ชื่อวิทยานิพนธ์	การพัฒนาสารไทเทเนียมไดออกไซด์เคลือบบนวัสดุกันกระแทกเพื่อยืดอายุการเก็บรักษามะม่วงน้ำดอกไม้หลังการเก็บเกี่ยว
ผู้วิจัย	นางสาวนุชบากร คงเรือง
ผู้ร่วมวิจัย/ที่ปรึกษา	ว่าที่ ร.ต. ศักดิ์ศิริชัย ศรีสวัสดิ์ นายธนภัทร มณีแสง
สาขาวิชา	เทคโนโลยีการผลิต มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบูรณ์ 2559

บทคัดย่อ

การพัฒนาสารเคลือบชนิดไทเทเนียมไดออกไซด์ $\text{TiO}_2/3\text{SnO}_2/0.5 \text{ Fe}^{3+}$ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกและสมบัติการในการยืดอายุการเก็บรักษามะม่วงน้ำดอกไม้สีทองหลังการเก็บเกี่ยว สารเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์ถูกผลิตด้วยวิธีโซล-เจล และเคลือบลงบนวัสดุกันกระแทกโดยวิธีการสเปรย์ ผลการวิเคราะห์เฟสของผง $\text{TiO}_2/3\text{SnO}_2/0.5 \text{ Fe}^{3+}$ พบว่าเฟสอะนาเทสเกิดขึ้นที่ $300 - 500^\circ\text{C}$ และที่อุณหภูมิ 600°C เกิดเฟสผสมระหว่างเฟสอะนาเทสและเฟสรูไทล์ จากการทดสอบประสิทธิภาพปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติก ของตัวอย่างที่สังเคราะห์ด้วยอุณหภูมิการเผาที่ 400°C และเวลาในการรับรังสียูวี 4 ชั่วโมง พบว่าผง $\text{TiO}_2/3\text{SnO}_2/0.5 \text{ Fe}^{3+}$ สามารถย่อยสลายเมทิลีนบลูได้ 98.7% เมื่อเทียบกับผงไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ไม่มีสารโด๊ปที่มีค่าเท่ากับ 65.7% เมื่อนำฟิล์มที่เคลือบด้วยผง $\text{TiO}_2/3\text{SnO}_2/0.5 \text{ Fe}^{3+}$ ที่ 5%w/v มาทำการทดสอบการยืดอายุการเก็บรักษามะม่วงน้ำดอกไม้สีทองหลังการเก็บเกี่ยว และเก็บไว้ที่อุณหภูมิ 11°C ภายใต้แสงฟลูออเรสเซนต์ 10 วัตต์ซึ่งอยู่ห่างจากตัวอย่างทดสอบ 40 เซนติเมตร เก็บข้อมูลและบันทึกรายละเอียดของตัวอย่างทุกๆ วัน เป็นเวลาทั้งสิ้น 14 วัน วัสดุกันกระแทกที่ผ่านการเคลือบสามารถชะลอการเน่าเสียและช่วยลดอัตราการหายใจของมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองได้ อายุการเก็บรักษามะม่วงน้ำดอกไม้สีทองเพิ่มขึ้นจาก 6 วัน เป็น 14 วันหรือคิดเป็นเวลาที่ยืดอายุได้เพิ่มขึ้นประมาณ 2 เท่า เมื่อเทียบกับวัสดุกันกระแทกที่ไม่ได้เคลือบ

คำสำคัญ : ไทเทเนียมไดออกไซด์, โฟโตแคตะไลติก, วัสดุกันกระแทก

Title	Development of TiO ₂ Coat on Cushioning Material for Mango Postharvest Technology
Author	Budsabagorn Kongreong
Co-Researcher	Saksirichai Srisawad Thanapat Maneesaeng
Branch	Production Tcehnology Phetchabun Rajabhat University 2016

Abstract

The development of coating materials of TiO₂ by doping with SnO₂ and Fe³⁺ to improve the photocatalytic efficiency and prolonging mango postharvest. TiO₂ powders were prepared by sol-gel method and coated on cushioning material using spray coating. For TiO₂ powders, they were found that anatase phase appeared at the temperature range of 300 – 500 °C and mixed phases of anatase and rutile exist together at 600 °C. In addition, the testing of photocatalytic reaction of calcined at temperature of 400 °C were done by means of methylene blue degradation under UV irradiation for 4 hours. It was found that TiO₂/3SnO₂/0.5Fe³⁺ could degrade methylene blue by 98.7% as compared to the pure TiO₂ which was 65.7%. The microbial disinfection test was also done for 5%w/v as coating by TiO₂/3SnO₂/0.5Fe³⁺ slurry spray on cushioning materials. Furthermore, study the use of prepared cushioning materials for prolonging mango life was done by wrapping mango with cushioning materials and keeping them at a constant temperature of 11°C under fluorescent lamp of 10 which was located 40 cm far from samples. The samples were observed during 14 days and the data was recorded in every 6 days – period. It was found that the TiO₂/3SnO₂/0.5Fe³⁺ cushioning materials can reduce damage and respiration rate of mango, resulting in the extension of fresh mango life from 6 days to be 14 days or about 2 times longer than that of uncoated cushioning materials.

Keywords : TiO₂, Photocatalytic, Cushioning Material

กิตติกรรมประกาศ

รายงานการวิจัยฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยคำแนะนำต่าง ๆ จากคณาจารย์ในมหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบูรณ์ และความร่วมมือช่วยเหลืออย่างดียิ่งจากบุคคลหลายฝ่าย ที่สละเวลาให้คำแนะนำ คำปรึกษา รวมถึงข้อเสนอแนะต่าง ๆ อันเป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่อการดำเนินการวิจัยในครั้งนี้

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ คณะเทคโนโลยีการเกษตรและเทคโนโลยีอุตสาหกรรม สาขาวิชาเทคโนโลยีการผลิต เป็นอย่างสูง ที่ได้ให้ความกรุณา ให้คำปรึกษาแนะนำ ให้แก่ผู้วิจัย จึงขอขอบพระคุณ สถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบูรณ์ที่ได้ให้ทุนอุดหนุนการวิจัยครั้งนี้มา ณ ที่นี้ด้วย

นางสาวบุษบากร คงเรือง

1 มีนาคม 2559

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญรูป.....	ซ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	3
1.3 วิธีการดำเนินการวิจัย.....	4
1.4 ขอบเขตการศึกษา.....	4
1.6 ประโยชน์ของการวิจัย.....	4
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	6
2.1 วัสดุวิจัย.....	6
2.2 กระบวนการวิจัยที่ใช้ในงานวิจัย.....	10
2.3 การทบทวนวรรณกรรม/สารสนเทศที่เกี่ยวข้อง.....	15
บทที่ 3 วิธีการดำเนินการวิจัย.....	19
3.1 วัสดุอุปกรณ์และวิธีการวิจัย.....	19
3.2 กระบวนการสังเคราะห์ผงไทเทเนียมไดออกไซด์.....	19
3.3 การทดสอบปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกในการย่อยสลายสารละลายเมทิลีนบลู.....	25
3.5 กระบวนการเคลื่อนวัสดุกันกระแทก.....	25
3.6 กระบวนการทดสอบการยืดอายุมะม่วงน้ำดอกไม้สีทอง.....	25
3.7 การตรวจสอบคุณลักษณะของผง และวัสดุกันกระแทกที่เคลือบด้วยผง.....	26

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 ผลการวิจัย	29
4.1 อิทธิพลของอุณหภูมิ.....	29
4.2 อิทธิพลของสารได๊ป.....	30
4.3 ผลการเคลือบผง $\text{TiO}_2/3\text{SnO}_2/0.5\text{Fe}^{3+}$ บนวัสดุกันกระแทก.....	34
4.4 ผลการทดสอบการยืดอายุมะม่วงน้ำดอกไม้ด้วยวัสดุกันกระแทก	34
บทที่ 5 สรุปผล อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ.....	38
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	38
5.1 อภิปรายผล	38
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	38
บรรณานุกรม.....	39
ภาคผนวก.....	45
ภาคผนวก ก (ชื่อเรื่องของภาคผนวก ก).....	46
ภาคผนวก ข (ชื่อเรื่องของภาคผนวก ข).....	49
ประวัติคณะผู้วิจัย	50

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
4.1 ขนาดผลึกและปริมาณเฟสของผง TiO_2 เพาที่อุณหภูมิต่างๆ	30
4.2 ขนาดอนุภาคและพื้นที่ผิวของผง $\text{TiO}_2/3\text{SnO}_2/0.5\text{Fe}^3$	31
4.3 ขนาดผลึกและปริมาณเฟสของผง $\text{TiO}_2/3\text{SnO}_2/0.5\text{Fe}^3$	31
4.4 เปอร์เซ็นต์การย่อยสลายสีเมทิลีนบลู (MB)	21
ก.1 ข้อมูลการวิเคราะห์ที่ได้จากเครื่อง XRD	46
ก.2 ข้อมูลการวิเคราะห์ที่ได้จากเครื่อง XRD ของผง	46
ก.3 ข้อมูลการวิเคราะห์ที่ได้จากเครื่อง XRD ของผงที่อุณหภูมิ 600 °C	46
ข ความเข้มข้นของสารละลายเมทิลีนบลูที่รับรังสียูวีในเวลาต่างๆ	49

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 การประยุกต์ใช้งานไทเทเนียม	6
2.2 โครงสร้างผลึกของไทเทเนียม: (a) อะนาเทส, (b) รูไทล์, และ (c) บรูไคต์.....	6
2.3 กระบวนการที่เกิดขึ้นเมื่อสารกึ่งตัวนำไทเทเนียมถูกกระตุ้นด้วยแสง	8
2.4 แสดงขั้นตอนการเกิด sol-gel.....	10
2.5 ตัวอย่างวัสดุป้องกันการสั่นกระแทก	11
2.6 ตัวอย่างวัสดุป้องกันการสั่นกระแทกโดยมีลักษณะเป็นกระดาษที่ย่อยเป็นพิเศษ	13
3.1 การเตรียมผง TiO_2 ด้วยวิธีโซล-เจล.....	20
3.2 การเตรียมผง $\text{TiO}_2/\text{SnO}_2/0.5\text{Fe}^{3+}$ ด้วยวิธีโซล-เจล	21
3.3 โครงสร้างของเมทิลีนบลู.....	22
3.4 Spectrum การดูดกลืนแสงของเมทิลีนบลู.....	22
3.5 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายเมทิลีนบลู (0.5×10^{-5}) - (3×10^{-5}) โมลาร์ กับค่า Absorbance ที่ได้จากเครื่อง UV-VIS spectrophotometer	23
3.6 การทดสอบการยืดยาวของมะม่วงน้ำดอกไม้สีทอง	25
3.7 ขั้นตอนการเตรียมการเคลือบพื้นผิววัสดุกันกระแทกด้วย $\text{TiO}_2/\text{SnO}_2/0.5\text{Fe}^{3+}$	27
4.1 ผงไทเทเนียมไดออกไซด์เมื่อเผาที่ 300, 400, 500 และ 600 °C	29
4.2 ภาพถ่าย SEM ของผงไทเทเนียมไดออกไซด์ ที่ได้ปด้วย $3\text{SnO}_2/0.5\text{Fe}^{3+}$ เผาที่อุณหภูมิ 400 °C.....	30
4.3 ภาพจาก SEM ของวัสดุกันกระแทกที่เคลือบด้วยผง $\text{TiO}_2/3\text{SnO}_2/0.5\text{Fe}^{3+}$	34
4.4 ผลการทดสอบการยืดยาวของมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองด้วยวัสดุกันกระแทก ที่เคลือบด้วย slurry ของผง $\text{TiO}_2/3\text{SnO}_2/0.5\text{Fe}^{3+}$ และวัสดุกันกระแทกที่ไม่ ได้เคลือบ แสดงให้เห็นลักษณะการเปลี่ยนแปลงของข้าวโพดที่เวลาต่างๆ	35

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ผักและผลไม้ เป็นสินค้าเกษตรที่สำคัญของประเทศไทย ทั้งในแง่การบริโภคภายในประเทศ และการส่งออก สำหรับ ในแง่การส่งออก ผัก ผลไม้ สามารถทำรายได้ให้แก่ประเทศปีหนึ่งหลาย พันล้านบาทและยังมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นทุกปี ข้อมูลการส่งออกผักและผลไม้ของกรมศุลกากร ผักและผลไม้ที่มีการส่งออกมากได้แก่ หน่อไม้ฝรั่ง ข้าวโพดฝักอ่อน มะเขือเทศ ถั่วฝักยาว ต้นหอม มะม่วง ลำไย ลิ้นจี่ ทุเรียน กล้วยหอม และกล้วยไข่ เป็นต้น ตลาดที่มีการส่งออกมากได้แก่ ฮังการี สิงคโปร์ ญี่ปุ่น ยุโรป และตะวันออกกลาง เป็นต้น (ที่มา : กรมศุลกากร, 2557) ปัญหาสำคัญที่ มักประสบในการส่งออกคือ พบการสูญเสียโดยเฉลี่ยสูงถึง ร้อยละ 25 ทั้งนี้เนื่องจาก ผักและผลไม้ เป็นสินค้าที่บอบช้ำ และเน่าเสียได้ง่าย สาเหตุที่ทำให้เกิดการเน่าเสียหลังการเก็บเกี่ยวของผลไม้และ ผักสด เนื่องมาจากโครงสร้างของผักและผลไม้ประกอบด้วยผนังเซลล์ที่มีเพคติน (Pectin) ซึ่งเป็นสารเชื่อมระหว่างช่องว่าง เรียกว่า มิดเดิล ลามเลลา (Middle lamella) โครงสร้างทางเคมีของเพคตินเป็นสารประเภทเมทิลเอสเทอร์ของกรดกาแลกทูโรนิก และสารประกอบเพคตินอื่น ๆ สารเหล่านี้ถูกย่อยสลายได้ด้วยเอนไซม์เพคตินเอส (Pectinase) ซึ่งมีหลายชนิด พบว่าแบคทีเรียบางชนิด เช่น *Erwinia carotovora*, *Pseudomonas*, *Bacillus*, *Escherichia coli* และ *Clostridium* สามารถสร้างเอนไซม์เพคตินเอสได้ และสามารถเจริญได้ดีในผักสด เนื่องจากผักสดมีความเป็นกรด-ด่างที่เหมาะสมกับการเจริญของแบคทีเรียที่สร้างเอนไซม์เพคตินเอสได้ นอกจากนี้ แบคทีเรียที่ไม่สร้างเอนไซม์เพคตินเอสก็สามารถเข้าทำลายภายในเซลล์ของพืชได้ โดยจะใช้สารอาหารประเภทคาร์โบไฮเดรตที่มีขนาดโมเลกุลเล็กๆ ไม่ซับซ้อนก่อน ทำให้เกิดการหมักขึ้น และการเจริญของราในผักและผลไม้สด โดยทั่วไปจะทำให้เนื้อเยื่อของพืชแตกสลาย และเกิดการเน่าเปื่อยขึ้น การสลายตัวของเนื้อเยื่อดังกล่าวเกิดจากการสลายของเยื่อชั้นใน มิดเดิล ลามเลลา ผนังเซลล์และ โปรโตพลาสซึม โดยเกิดจากเอนไซม์ต่าง ๆ ที่มาจากเชื้อรา เช่น ทรานเซลลิเมเนส (Transeliminase) และเอสเทอเรส (Esterase) จะเข้าไปทำลายเพคติน ซึ่งเป็นส่วนประกอบสำคัญของลามเลลา เซลลูโลส เอนไซม์ทั้ง 2 นี้ มีหน้าที่ในการทำลายผนังเซลล์ของผักและผลไม้ ส่วนเอนไซม์โปรติเนส แอมเลส และเอนไซม์ย่อยสลายคาร์โบไฮเดรตประเภทต่าง ๆ จะเข้าไปทำลายในส่วน of โปรโตพลาสซึม สำหรับเชื้อราที่ทำให้เกิดการเน่าเสียในผักและผลไม้สดได้แก่ *Collectrichum*, *Cladosporium*

และ *Fusarium* และยีสต์ *Rhodotorula* ที่สามารถเจริญได้ดีที่อุณหภูมิต่ำ เนื่องจากผักสดยังมีสารประกอบไนโตรเจน เกือบแร่ และวิตามินต่างๆในปริมาณที่เพียงพอที่เชื้อต่างๆสามารถเจริญอย่างรวดเร็ว ดังนั้นผักสดจึงเกิดการเน่าเสียจากเชื้อเหล่านี้ได้มากกว่าจุลินทรีย์ชนิดอื่นๆเพราะเชื้อราและแบคทีเรียทำให้มีการสูญเสียน้ำเพิ่มขึ้นและอัตราการหายใจเพิ่มขึ้น เชื้อจุลินทรีย์แพร่พันธุ์ด้วยการเพิ่มเซลล์อย่างรวดเร็ว และเข้าไปในผลิตภัณฑ์พืชโดยผ่านทางแผลหรือรูเปิดตามธรรมชาติ ปกติผลผลิตจะปนเปื้อนเชื้อจากการสัมผัสกับน้ำที่มีเชื้ออยู่หรือสัมผัสกับดินซึ่งเชื้ออาศัยอยู่ (<http://cyberlab.lh1.ku.ac.th>, 2557)

สารเคมีบางชนิดที่ใช้ป้องกันกำจัดการเน่าเสียหลังการเก็บเกี่ยว ของผลไม้สด เช่น ใช้โรอะเบนดาโซล (Thiabendazole) หรือเบนโนมิล (Benomyl) โดยการแช่จุ่มหรือฉีดพ่นกล้วย ใช้โซเดียมคาร์บอเนต บอแรกซ์ (Sodium carbonate borax) โซเดียม โอ ฟีนิลฟีนเต (Sodium O-phenylphenate) โรอะเบนดาโซล (Thiabendazole) หรือเบนโนมิล (Benomyl) ใช้กับส้ม ในลักษณะจี้พ่นเคลือบส้มและใช้ไดฟีนิล (Diphenyl) เคลือบกระดาษ สำหรับห่อผลส้มแต่ละผล ใช้โซเดียม โอ ฟีนิลฟีนเต (Sodium O-phenylphenate) และซาลิไซลิลานิลได์ (Salicylanilide) สำหรับสับปะรด และใช้เบนโนมิล (Benomyl) สำหรับมะม่วงเป็นต้น ซึ่งสารเคมีเหล่านี้ล้วนแต่เป็นอันตรายต่อผู้บริโภคและสิ่งแวดล้อม

ในปัจจุบันได้มีการนำสารสังเคราะห์จากไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) มาใช้ในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียหลายชนิดไม่ว่าจะเป็นทางการแพทย์ ทางเกษตร อุตสาหกรรม เช่น การบำบัดน้ำเสีย และมีบางงานวิจัยได้นำไทเทเนียมไดออกไซด์มาผลิตเป็นฟิล์มบางเพื่อใช้ในการบรรจุภัณฑ์ผักผลไม้เพื่อลดอัตราการหายใจของผักผลไม้หลังการเก็บเกี่ยว การนำเทคนิคโฟโตแคตะไลซิสมาใช้ในการบำบัดน้ำ อาจเป็นผลจากการศึกษาวิจัยเมื่อ 10 กว่าปีมาแล้ว หลักการพื้นฐานของเทคนิคโฟโตแคตะไลซิสเริ่มจากการที่แสงไปกระตุ้นอิเล็กตรอนที่แถบเวเลนซ์ (Valence- band) ของอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ ที่เป็นสารประกอบกึ่งตัวนำ ซึ่งแวนดอลอยอยู่ในน้ำที่มีสิ่งเจือปนหลุดออกจากตำแหน่งส่งผลให้คู่อิเล็กตรอนที่หลุดไป และโฮล (Hole) ซึ่งเป็นช่องว่างที่ไม่มีอิเล็กตรอนและมีประจุบวกสามารถสร้างพลังงานความร้อนกลับมารวมตัวกัน หรือทำปฏิกิริยากับสิ่งแวดล้อมภายนอก โดยที่โฮลจะมีปฏิกิริยากับน้ำและหมู่ไฮดรอกซิล (OH^-) เพื่อทำให้เกิดไฮดรอกซิลเรดิคัล (Hydroxyl radical) ซึ่งเป็นตัวออกซิไดส์ที่แรงสามารถไปทำให้โมเลกุลของสารอินทรีย์ที่ละลายอยู่แตกตัวออกกลายเป็นน้ำและคาร์บอนไดออกไซด์

สารเคมีบางชนิดที่ใช้ป้องกันกำจัดการเน่าเสียหลังการเก็บเกี่ยว ของผลไม้สด เช่น ใช้โรอะเบนดาโซล (Thiabendazole) หรือเบนโนมิล (Benomyl) โดยการแช่จุ่มหรือฉีดพ่นกล้วย ใช้โซเดียมคาร์บอเนต บอแรกซ์ (Sodium carbonate borax) โซเดียม โอ ฟีนิลฟีนเต (Sodium O-

phenylphenate) ไธอะเบนดาโซล (Thiabendazole) หรือเบนโนมิล (Benomyl) ใช้กับส้ม ในลักษณะฉีดเคลือบส้มและใช้ไดฟีนีล (Diphenyl) เคลือบกระดาษ สำหรับห่อผลส้มแต่ละผล ใช้โซเดียม โอ ฟีนีลฟีนเนต (Sodium O-phenylphenate) และซาลิซิลลานิลได์ (Salicylanilide) สำหรับสับปะรด และใช้เบนโนมิล (Benomyl) สำหรับมะม่วงเป็นต้น ซึ่งสารเคมีเหล่านี้ล้วนแต่เป็นอันตรายต่อผู้บริโภคและสิ่งแวดล้อม

ในปัจจุบันได้มีการนำสารสังเคราะห์จากไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) มาใช้ในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียหลายชนิดไม่ว่าจะเป็นทางการแพทย์ การเกษตร อุตสาหกรรม เช่น การบำบัดน้ำเสีย และมีบางงานวิจัยได้นำไทเทเนียมไดออกไซด์มาผลิตเป็นฟิล์มบางเพื่อใช้ในการบรรจุภัณฑ์ผักผลไม้เพื่อลดอัตราการหายใจของผักผลไม้หลังการเก็บเกี่ยว การนำเทคนิคโฟโตแคตะไลซิสมาใช้ในการบำบัดน้ำ อาจเป็นผลจากการศึกษาวิจัยเมื่อ 10 กว่าปีมาแล้ว หลักการพื้นฐานของเทคนิคโฟโตแคตะไลซิสเริ่มจากการที่แสงไปกระตุ้นอิเล็กตรอนที่แถบเวเลนซ์ (Valence- band) ของอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ ที่เป็นสารประกอบกึ่งตัวนำ ซึ่งแชนนอนอยู่ภายในน้ำที่มีสิ่งเจือปนหลุดออกจากตำแหน่งส่งผลให้อิเล็กตรอนที่หลุดไป และโฮล (Hole) ซึ่งเป็นช่องว่างที่ไม่มีอิเล็กตรอนและมีประจุบวกสามารถสร้างพลังงานความร้อนกลับมารวมตัวกัน หรือทำปฏิกิริยากับสิ่งแวดล้อมภายนอก โดยที่โฮลจะมีปฏิกิริยากับน้ำและหมู่ไฮดรอกซิล (OH^-) เพื่อทำให้เกิดไฮดรอกซิลเรดิคัล (Hydroxyl radical) ซึ่งเป็นตัวออกซิไดส์ที่แรงสามารถไปทำให้โมเลกุลของสารอินทรีย์ที่ละลายอยู่แตกตัวออกกลายเป็นน้ำและคาร์บอนไดออกไซด์

เนื่องด้วยมหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบูรณ์ได้ทำ MOU กับทาง อบต. ดงมูลเหล็ก โดยมีหัวข้อหลักเป็นมะม่วงน้ำดอกไม้ งานวิจัยนี้จึงประยุกต์ใช้สารเคลือบเพื่อยืดอายุการเก็บรักษามะม่วงน้ำดอกไม้หลังการเก็บเกี่ยว โดยเคลือบบนวัสดุกันกระแทก

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 1.2.1 เพื่อผลิตสารเคลือบผิววัสดุกันกระแทกที่มีคุณสมบัติในการยืดอายุการเก็บรักษามะม่วงน้ำดอกไม้หลังการเก็บเกี่ยว
- 1.2.2 เพื่อศึกษาตัวแปรต่างๆ ที่มีผลต่อเตรียมสารเคลือบ
- 1.2.3 เพื่อศึกษาการเตรียม Slurry ของสารเคลือบบนวัสดุกันกระแทก

1.3 วิธีการดำเนินการวิจัย

- 1.3.1 ทบทวนเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
- 1.3.2 สังเคราะห์ไทเทเนียมไดออกไซด์จากสูตร $\text{TiO}_2/\text{SnO}_2$ ด้วยวิธีโซล-เจล แล้วได้ปดด้วยไอออนของโลหะ (Zn^{2+}) โดยปรับปริมาณไอออนของโลหะ (ตั้งแต่ 0.3-2.0 %mol) นำไปเผาที่

อุณหภูมิ 300, 400, 500 และ 600 องศาเซลเซียส นำผงที่ได้ไปวิเคราะห์เพื่อดูโครงสร้างเฟสด้วยเครื่อง XRD

1.3.3 ศึกษาประสิทธิภาพปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกของสารที่สังเคราะห์ได้ เทียบกับ TiO_2 โดยการย่อยสลายสารละลายเมทิลีนบลู ที่เวลารับแสงต่างๆ (จับเวลาทุกๆ 30 นาที จนครบ 3 ชั่วโมง)

1.3.4 เตรียมสารเคลือบโดยนำผงที่ได้จากขั้นตอนที่ 2 มาแขวนลอยในสารละลายอะคริลิก (Acrylic) แล้วนำมาเคลือบด้วยวิธี Spray coating หรือ Dip-coating บนวัสดุกันกระแทก

1.3.5 ศึกษาคุณสมบัติการยึดอายุมะม่วงน้ำดอกไม้หลังการเก็บเกี่ยว ของวัสดุกันกระแทกที่เคลือบด้วยสารเคลือบที่สังเคราะห์ได้

1.3.6 วิเคราะห์ข้อมูลและสรุปผลการวิจัย

1.4 ขอบเขตการศึกษา

1.4.1 สังเคราะห์ TiO_2 ที่มีเฟสเป็นอะนาเทส หรือเฟสแบบผสมระหว่างเฟสอะนาเทสและรูไทล์ โดยได้ปด้วยไอออนของโลหะ โดยวิธี Sol-gel

1.4.2 ตรวจสอบสารที่สังเคราะห์ได้ด้วยเครื่องมือ SEM, XRD, BET และอื่นๆ

1.4.3 นำ Titaniumdioxide (TiO_2) และ TiO_2 ที่ได้ปด้วยไอออนของโลหะ ที่สังเคราะห์ได้มาทดสอบประสิทธิภาพปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกของสารที่สังเคราะห์โดยใช้เมทิลีนบลู

1.4.4 เตรียม Slurry ของแคตะลิสต์และฟิล์มที่เคลือบด้วยสารที่สังเคราะห์ด้วยวิธี Spary coating

1.4.5 ทดสอบประสิทธิภาพปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกของวัสดุกันกระแทกที่เคลือบด้วยสารที่เตรียมได้ โดยนำไปทดสอบการการยึดอายุหลังการเก็บเกี่ยวของมะม่วงน้ำดอกไม้

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 ทำให้ทราบถึงวิธีการสังเคราะห์ TiO_2 และ TiO_2 ที่ได้ปไอออนของโลหะ (Fe^{3+} หรือ Zn^{2+}) โดยวิธีโซล-เจล (Sol-gel method)

1.5.2 เป็นแนวทางในการผลิตสารเคลือบ TiO_2 เพื่อใช้ทดแทนสารเคมีที่เป็นอันตรายในผักผลไม้หลังการเก็บเกี่ยว

1.5.3 ได้วัสดุกันกระแทกที่สามารถยึดอายุการเก็บรักษามะม่วงน้ำดอกไม้หลังการเก็บเกี่ยว

1.5.4 เป็นแนวทางเพื่อการพัฒนาและนำไปใช้ประโยชน์ในเชิงพาณิชย์ด้านการส่งออกมะม่วงน้ำดอกไม้ และการผลิตเพื่อจำหน่ายและบริโภคในประเทศ

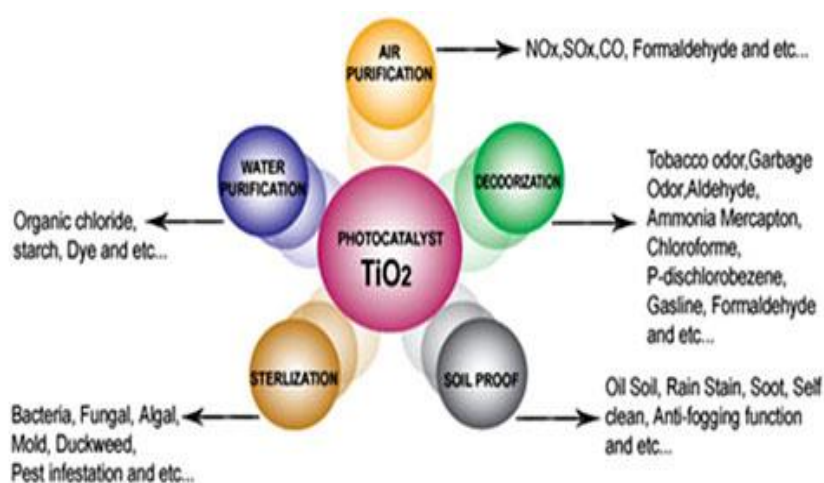
บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ไทเทเนียมไดออกไซด์

ไทเทเนียมหรือไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) เป็นสารประกอบออกไซด์ของโลหะไทเทเนียม ซึ่งอยู่ในกลุ่มโลหะทรานซิชัน ไทเทเนียมได้รับความสนใจเป็นอย่างมากในการนำมาประยุกต์สำหรับการใช้งานด้านต่างๆ เนื่องจากมีความเสถียรต่อสารเคมี, ไม่มีความเป็นพิษ และราคาไม่แพงมาก (รูปที่ 1) โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ไทเทเนียมถูกนำมาใช้อย่างกว้างขวางในด้านการเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานรูปอื่น เช่น เปลี่ยนเป็นพลังงานไฟฟ้าในเซลล์แสงอาทิตย์ (Solar cell) และเปลี่ยนเป็นพลังงานเคมีในกระบวนการเร่งปฏิกิริยาแบบใช้แสงร่วม (Photocatalysis) เป็นต้น เนื่องจากไทเทเนียมมีค่าดัชนีการหักเหของแสงสูงจึงถูกนำมาใช้เป็นสารเคลือบป้องกันการสะท้อนของแสงในเซลล์แสงอาทิตย์ ชนิดซิลิคอน (Silicon solar cell) และในอุปกรณ์ทางการมองเห็น ชนิดแผ่นบาง (Thin film optical device) หลายชนิด ไทเทเนียมยังถูกนำมาใช้เป็นตัวตรวจสอบก๊าซ (Gas sensor) เนื่องจากมีค่าการนำไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงไปได้ตามองค์ประกอบของก๊าซที่สภาวะบรรยากาศ เช่น สามารถใช้ตรวจสอบก๊าซออกซิเจน, คาร์บอนมอนอกไซด์, และมีเทน เป็นต้น นอกจากนี้ เนื่องจากไทเทเนียมสามารถเข้ากับร่างกายมนุษย์ได้ จึงถูกนำมาใช้เป็นวัสดุทางชีวภาพ เช่น กระดูกเทียม เป็นต้น

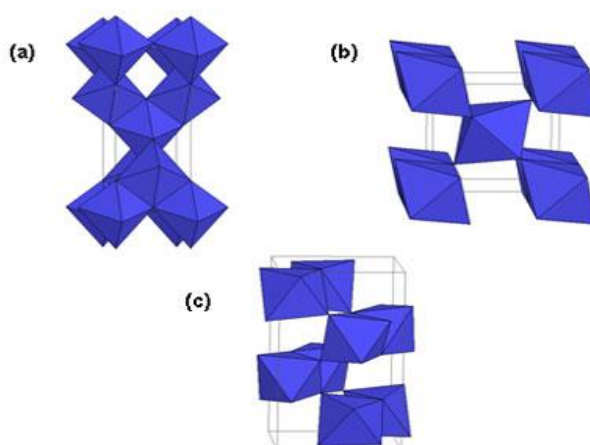
นอกจากไทเทเนียมจะมีประสิทธิภาพสูงในกระบวนการเร่งปฏิกิริยาแบบใช้แสงร่วมแล้ว ยังสามารถนำมาใช้ในกระบวนการเร่งปฏิกิริยาแบบปกติ (ไม่ใช้แสงร่วม) ได้ดีอีกด้วย โดยสามารถใช้เป็นทั้งตัวเพิ่มความสามารถในการทำปฏิกิริยา (Promoter) และตัวรองรับ (Support) ซึ่งกระบวนการที่ใช้ไทเทเนียมในการเร่งปฏิกิริยา เช่น การกำจัดสารประกอบออกไซด์ของไนโตรเจน (NO_x), การกำจัดสารประกอบสารอินทรีย์ระเหยง่าย (เช่น ไดออกซิน, สารประกอบคลอรีน), การผลิตไฮโดรเจนด้วยปฏิกิริยา Gas shift reaction, กระบวนการสังเคราะห์สาร Fischer-Tropsch และการกำจัดสารประกอบซัลเฟอร์ (H_2O , SO_2) เป็นต้น



รูปที่ 2.1 การประยุกต์ใช้งานไทเทเนียม
(ที่มา: <http://www.tekon.com/green/Photocatalyst.html>)

2.1.1 โครงสร้างและสมบัติของผลึกไทเทเนียมพบตามธรรมชาตินั้นมีโครงสร้างผลึก 4 ชนิดหลักคือ

- 2.1.1.1 อะนาเทส (Anatase) มีโครงสร้างผลึกแบบเตตระโกนอล (Tetragonal)
- 2.1.1.2 บรูไคต์ (Brookite) มีโครงสร้างผลึกแบบออร์โธโรมบิก (Orthorhombic)
- 2.1.1.3 รูไทล์ (Rutile) มีโครงสร้างผลึกแบบเตตระโกนอล (Tetragonal)
- 2.1.1.4 ไทเทเนียม (TiO₂(B)) มีโครงสร้างผลึกแบบโมโนคลินิก (Monoclinic)



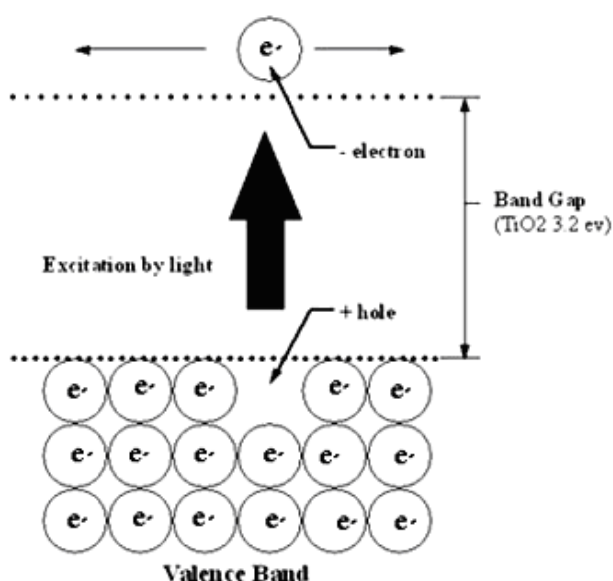
รูปที่ 2.2 โครงสร้างผลึกของไทเทเนียม: (a) อะนาเทส, (b) รูไทล์, และ (c) บรูไคต์
(ที่มา: <http://ruby.colorado.edu/~smyth/min/tio2.html>)

โครงสร้างผลึกอะนาเทส, รูไทล์, และบรูไคต์ สามารถแสดงได้ในรูปของ TiO_2 ที่เป็นประมิติดฐานสี่เหลี่ยมสองอันประกบกันหรือออกตะฮีดรอล (Octahedral) โดยโครงสร้างผลึกทั้ง 3 ชนิดนี้มีความแตกต่างกันเนื่องมาจากการบิดตัวของแต่ละออกตะฮีดรอลที่เรียงต่อกันและจากรูปแบบการเรียงตัวของออกตะฮีดรอล โดยโครงสร้างผลึกอะนาเทสเกิดมาจากการเรียงตัวต่อกันโดยใช้ส่วนของยอดของแต่ละออกตะฮีดรอล ในขณะที่โครงสร้างผลึกรูไทล์เกิดมาจากการเรียงตัวต่อกันโดยใช้ส่วนของขอบของแต่ละออกตะฮีดรอล และโครงสร้างผลึกบรูไคต์เกิดมาจากการเรียงตัวต่อกันโดยใช้ทั้งส่วนของยอดและส่วนของขอบของแต่ละออกตะฮีดรอล (รูปที่ 2)

ถึงแม้ว่าโครงสร้างผลึกของไทเทเนียมมีอยู่หลายชนิดตามที่ได้กล่าวมาแล้ว แต่อะนาเทสและรูไทล์เป็นโครงสร้างผลึกที่พบเป็นส่วนใหญ่โดยปกติแล้วโครงสร้างผลึกอะนาเทสสามารถเปลี่ยนโครงสร้างเป็นโครงสร้างผลึกรูไทล์ได้ที่อุณหภูมิมากกว่า 600 องศาเซลเซียส (ดร.ธรรมบุญ ศรีทะวงศ์) นับจนถึงปัจจุบันได้มีการศึกษาเกี่ยวกับการเปลี่ยนโครงสร้างผลึกจากอะนาเทสเป็นรูไทล์เป็นอย่างมาก เนื่องจากโครงสร้างผลึกของไทเทเนียมเป็นตัวแปรที่สำคัญมากตัวแปรหนึ่งที่จะกำหนดประสิทธิภาพในการประยุกต์ใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาแบบใช้แสงร่วม, ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบปกติ (ไม่ใช้แสงร่วม), หรือเซรามิกที่ใช้ทำเยื่อแผ่นบาง (Membrane) โดยนอกจากอุณหภูมิแล้ว ยังมีอีกหลายปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อการเปลี่ยนโครงสร้างผลึกดังกล่าวได้แก่ ความดัน, ปริมาณของผลึก, ความไม่สมบูรณ์ของผลึก, และขนาดของผลึกในการประยุกต์ใช้ไทเทเนียมในกระบวนการเร่งปฏิกิริยาแบบใช้แสงร่วม โครงสร้างผลึกทั้งอะนาเทสและรูไทล์เป็นที่นิยมนำมาศึกษากันโดยทั่วไปสำหรับปฏิกิริยาแบบใช้แสงร่วมโดยปกติแล้ว โครงสร้างผลึกอะนาเทสให้ประสิทธิภาพในการเร่งปฏิกิริยาสูงกว่าโครงสร้างผลึกรูไทล์ แต่อย่างไรก็ตามในบางปฏิกิริยา โครงสร้างผลึกรูไทล์หรือโครงสร้างผลึกผสมระหว่างอะนาเทสและรูไทล์ (เช่น อะนาเทส 70-75% และรูไทล์ 30-25%) มีรายงานว่าให้ประสิทธิภาพในการเร่งปฏิกิริยาสูงกว่าโครงสร้างผลึกอะนาเทสโดยมีตัวแปรหลายตัวแปรที่ส่งผลกระทบต่อการประสิทธิภาพในการเร่งปฏิกิริยาของแต่ละโครงสร้างผลึกของไทเทเนียม ได้แก่ พื้นที่ผิว, การกระจายตัวของรูพรุน, ขนาดของอนุภาคผลึก, และที่สำคัญมากคือ วิธีการที่ใช้ในการสังเคราะห์ผลึกไทเทเนียม (ดร.ธรรมบุญ ศรีทะวงศ์)

2.1.2 ลักษณะของสารกึ่งตัวนำชนิดไทเทเนียมสำหรับปฏิกิริยาแบบใช้แสงร่วม เนื่องจากไทเทเนียมมีตำแหน่งที่ว่างของออกซิเจนในโครงสร้างผลึก ไทเทเนียมจึงจัดได้ว่าเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (n-type semiconductor) ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบใช้แสงร่วมที่เป็นสารกึ่งตัวนำนั้นจะมีความสามารถในการดูดซับสารตั้งต้นในการเกิดปฏิกิริยา 2 ชนิดไปพร้อมๆ กัน ซึ่งสามารถก่อให้เกิดทั้งปฏิกิริยาออกซิเดชันและรีดักชัน (Oxidation and reduction reactions) โดยการกระตุ้นด้วยการดูดกลืนโฟตอนที่มิพลังงานเท่ากับหรือมากกว่าค่าแถบช่องว่างพลังงาน (Band gap energy) ความสามารถของสารกึ่ง

ตัวนำที่จะถ่ายโอนอิเล็กตรอนไปยังสารตั้งต้นในการเกิดปฏิกิริยาที่ถูกดูดซับไว้นั้นขึ้นอยู่กับตำแหน่งของแถบช่องว่างพลังงานของสารกึ่งตัวนำและตำแหน่งของศักย์พลังงานในการเกิดรีดอกซ์ (Redox) ของสารที่ถูกดูดซับ โดยปกติแล้วระดับของพลังงานที่ต่ำที่สุดของแถบคอนดักชัน (Conduction band) จะเป็นระดับของศักย์พลังงานที่ทำให้เกิดปฏิกิริยารีดักชันด้วยอิเล็กตรอนที่ถูกกระตุ้น (Excited electron) ในทางกลับกัน ระดับของพลังงานที่สูงที่สุดของแถบวาเลนซ์ (Valence band) จะเป็นระดับศักย์พลังงานที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยโฮล (Hole) ที่เหลืออยู่หลังจากที่อิเล็กตรอนถูกกระตุ้นไปแล้ว(รูปที่3)



รูปที่ 2.3 กระบวนการที่เกิดขึ้นเมื่อสารกึ่งตัวนำไทเทเนียมถูกกระตุ้นด้วยแสง
(ที่มา: <http://www.novapure.com/DesktopDefault.aspx?tabid=71&showlogin=1>)

สารกึ่งตัวนำแตกต่างจากโลหะ คือ มีความไม่ต่อเนื่องของระดับพลังงาน ทำให้เกิดเป็นช่องว่างของระดับพลังงาน ซึ่งส่งผลให้เกิดการแยกจากกันของอิเล็กตรอนและโฮลหลังจากที่ถูกกระตุ้นด้วยแสง ทำให้ทั้งอิเล็กตรอนและโฮลมีระยะเวลาเพียงพอในการเคลื่อนที่ผ่านไปยังพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาและก่อให้เกิดปฏิกิริยาในที่สุด ความแตกต่างของโครงสร้างผลึกของไทเทเนียมชนิดอะนาเทสและรูไทล์ทำให้เกิดความแตกต่างของความหนาแน่นและโครงสร้างทางอิเล็กทรอนิกส์ ส่งผลให้มีค่าแถบช่องว่างพลังงานแตกต่างกันคือ 3.20 eV สำหรับโครงสร้างผลึกอะนาเทส และ 3.02 eV สำหรับโครงสร้างผลึกรูไทล์ ดังนั้นจึงทำให้ความสามารถในการดูดกลืนแสงเริ่มเกิดขึ้นในช่วงความยาวคลื่นของแสงที่แตกต่างกัน โดยโครงสร้างผลึกอะนาเทสสามารถ

ดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่นต่ำกว่า 384 นาโนเมตร ในขณะที่โครงสร้างผลึกไทล์สามารถดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่นต่ำกว่า 410 นาโนเมตร ซึ่งส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพในการเกิดปฏิกิริยาแบบใช้แสงร่วม (ดร.ธรรมนุญ ศรีทะวงศ์)

2.2 โฟโตแคตตาไลซิส (Photocatalysis)

กระบวนการโฟโตแคตตาไลซิส คือ ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจากการใช้แสงและตัวแคตตาไลซิสเป็นตัวกระตุ้นให้เกิดปฏิกิริยา โดยเป็นปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นกับอะตอมหรือโมเลกุลที่ถูกฉายด้วยแสงในช่วงอัลตราไวโอเลต(Ultraviolet) หรือในช่วงที่เห็นได้ด้วยตาเปล่า (Visible) เป็นแสงที่มีความยาวคลื่น (Wavelength) ระหว่าง 800 nm ถึง 200 nm เป็นแสงในช่วงความยาวคลื่นที่เหมาะสมที่จะเข้าไปกระตุ้นการทำงานของตัวแคตตาไลสต์ โดยจะต้องมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับแถบช่องว่างพลังงานภายในตัวแคตตาไลสต์จึงจะทำให้เกิดกระบวนการโฟโตแคตตาไลซิสขึ้นสารกึ่งตัวนำที่นิยมนำมาใช้ในกระบวนการชนิดหนึ่ง คือ ไทเทเนียมไดออกไซด์ เนื่องจากมีราคาไม่แพงไม่เป็นพิษ ความสามารถในการละลายต่ำ ความเสถียรสูง ทนทานต่อการกัดกร่อน และยังเกิดปฏิกิริยาได้รวดเร็ว เพราะไทเทเนียมไดออกไซด์มีแถบช่องว่างพลังงานประมาณ 3.2 eV ซึ่งมากกว่าสารกึ่งตัวนำส่วนมาก ซึ่งพลังงานแสงที่ใช้ได้จะอยู่ในช่วงความยาวคลื่นช่วงแสงยูวี หรืออยู่ในช่วง 400 ถึง 200 นาโนเมตร ในแสงอาทิตย์ที่ส่องมาถึงพื้นโลกมีแสงยูวีน้อยกว่า 1% ทำให้ต้องมีการศึกษาถึงการนำพลังงานแสงอาทิตย์มาใช้กับระบบให้มากยิ่งขึ้น

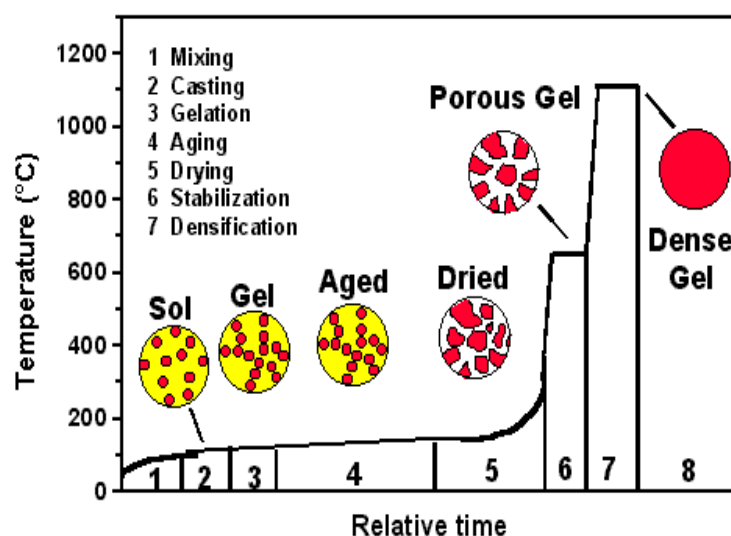
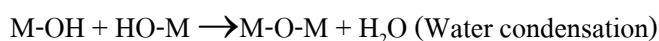
2.2.1 กลไกการเกิดปฏิกิริยา (Reaction Mechanism)

การเกิดปฏิกิริยาโฟโตแคตตาไลซิสภายในสารกึ่งตัวนำเกิดได้จากภายในสารกึ่งตัวนำจะประกอบด้วยแถบวาเลนซ์ และแถบคอนดักชัน โดยมีแถบช่องว่างพลังงาน ขึ้นอยู่ระหว่างแถบทั้งสอง เมื่อสารกึ่งตัวนำหนึ่งได้รับพลังงานแสงที่มากกว่า แถบช่องว่างพลังงานอิเล็กตรอนในสารกึ่งตัวนำจะถูกกระตุ้นให้เคลื่อนที่จาก แถบวาเลนซ์ ไปยังแถบคอนดักชัน แสดงดังรูปที่ 3 ทำให้เกิดเป็นโฮลขึ้นที่วาเลนซ์แบนด์ ลักษณะเช่นนี้เรียกว่าเกิดเป็นคู่อิเล็กตรอน-โฮล (e^-/h^+ pairs) การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนจะเกิดสองแบบ คือ อิเล็กตรอนเคลื่อนที่จากแถบคอนดักชันไปยังตัวรับอิเล็กตรอนในสารละลาย (เกิดเป็นปฏิกิริยารีดักชัน) หรืออิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่จากตัวให้อิเล็กตรอนในสารละลายไปยังโฮลในแถบวาเลนซ์ (เกิดเป็นปฏิกิริยาออกซิเดชัน)

2.2.2 กระบวนการผลิต TiO₂ Sol-gel

กระบวนการเตรียมวัสดุเซรามิกหรือวัสดุพลาสมา โดยปกติแล้ว Sol-gel มีกระบวนการเปลี่ยนแปลงเฟสจากของเหลวหรือที่เรียกว่า Sol ไปเป็นเฟสของแข็งหรือ Gel วัสดุที่ใช้เตรียม Sol มักเป็น Inorganic metal salts หรือ Metal organic compounds เช่น Metal alkoxides ส่วนในการวิจัย

ครั้งนี้ใช้ TiCl_4 แล้ว Sol จะเกิดปฏิกิริยา Hydrolysis กับ Polymerization กลายเป็น Gel ดังปฏิกิริยาที่แสดงไว้ และขั้นตอนการเกิด Sol-gel ดังภาพที่ 4 โดยข้อดีของวิธี Sol-gel ดังนี้



รูปที่ 2.4 แสดงขั้นตอนการเกิด sol-gel

(ที่มา <http://optoweb.fis.uniroma2.it/opto/solgel/>)

2.2.2.1 ในการขึ้นรูปด้วยการเคลือบได้ฟิล์มที่บางตามต้องการและสามารถเคลือบไปบนวัสดุที่เป็นโลหะได้

2.2.2.2 สามารถเคลือบหนาเพื่องานด้านป้องกันการกัดกร่อนได้

2.2.2.3 ผลิตภัณฑ์มีความบริสุทธิ์สูง

2.2.2.4 นำขึ้นรูปง่ายในขณะที่อยู่ในขั้นตอนของการเป็น Gel

2.2.2.5 สามารถเตรียมที่อุณหภูมิต่ำและอบผนึกได้ที่อุณหภูมิโดยทั่วไปประมาณ

200-600 องศาเซลเซียส (www.ceramics.mmat.ubc.ca)

2.3 การพัฒนาโครงสร้างบรรจุภัณฑ์

วัสดุกันกระแทกการออกแบบวัสดุป้องกันการสั่นกระแทกและการปิดกล่องการออกแบบพัฒนาบรรจุภัณฑ์เพื่อป้องกันอันตรายทางกายภาพ แนวทางการออกแบบที่เสียค่าใช้จ่ายน้อยและสามารถปกป้องสินค้าได้ดี คือ การเลือกใช้วัสดุกันการสั่นกระแทก (Cushioning Materials) ภายในบรรจุภัณฑ์ขนส่งในทุกสภาวะการขนส่ง ผลผลิตกันจะเผชิญกับการตกกระแทกและการสั่นสะเทือนในรูปแบบต่างกัน บรรจุภัณฑ์ที่มีผลิตภัณฑ์อยู่ภายในอาจจะมีการตกหล่นในระหว่างการเคลื่อนย้ายไม่ว่าใช้แรงงานคนหรือเครื่องมือในการขนย้าย โอกาสที่บรรจุภัณฑ์จะตกหล่นระหว่างการเคลื่อนย้ายโดยใช้แรงงานมีมากกว่า ส่วนโอกาสและความบ่อยครั้งที่จะเกิดขึ้นกับบรรจุภัณฑ์ที่มีน้ำหนักเบามากกว่าบรรจุภัณฑ์ที่มีน้ำหนักมาก สำหรับการเคลื่อนย้ายโดยใช้เครื่องมือ เช่น รถยก โอกาสในการตกกระแทกจะมีน้อย แต่เมื่อบรรจุภัณฑ์นั้นเกิดตกหล่น ความสูงในการตกอาจจะสูงถึง 1.5 เมตร

2.3.1 วัตถุประสงค์ของการใช้วัสดุป้องกันการสั่นกระแทก

คือ การป้องกันผลิตภัณฑ์จากความเสียหาย อันมีสาเหตุมาจากการตกกระแทกและการสั่นสะเทือนระหว่างการขนส่งและการเคลื่อนย้าย ซึ่งวัสดุป้องกันการสั่นกระแทกที่จะทำหน้าที่ป้องกันความเสียหายนั้นจะต้องทำหน้าที่ขึ้นพื้นฐาน ดังนี้

2.3.1.1 สามารถรับแรงกระแทกและป้องกันส่งผ่านแรงกระแทกไปยังผลิตภัณฑ์ ตัวอย่างเช่น แผ่นกระดาษลูกฟูกที่รองไว้ใต้กล่องของอาหารขบเคี้ยวหรือผลไม้สด

2.3.1.2 ปกป้องผลิตภัณฑ์จากการเคลื่อนไหวภายในตัวบรรจุภัณฑ์ ตัวอย่างเช่น ใส์กล่องในกล่องเบียร์หรือกล่องน้ำปลา



รูปที่ 2.5 ตัวอย่างวัสดุป้องกันการสั่นกระแทก

2.3.1.3 ปัจจัยในการเลือกสารกันการสั่นกระแทก มีดังนี้มีวัสดุและวิธีการต่างๆ หลายประเภทที่สามารถนำมาเป็นวัสดุป้องกันการสั่นกระแทก งานของผู้พัฒนาบรรจุหีบห่อคือการ เลือกวัสดุป้องกันการสั่นกระแทกที่สามารถป้องกันสินค้าจากความเสียหายได้อย่างเพียงพอด้วย ต้นทุนที่เหมาะสม เพื่อที่จะเลือกสารกันการสั่นกระแทกได้ถูกต้อง

2.3.1.4 รูปทรง ขนาด และน้ำหนักของผลิตภัณฑ์

2.3.1.5 ความเปราะของผลิตภัณฑ์ในแง่ของการตกกระแทกและการสั่นสะเทือน ประเภทของการตกกระแทกและอัตราการขยาย (Magnitude) ของการตกกระแทกซึ่งจะมีผลทำให้ ผลิตภัณฑ์เสียหาย

2.3.1.6 การตกกระแทกและการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นในวงจรของกระบวนการขนส่งและจัดจำหน่ายเนื่องจากผลิตภัณฑ์มีการเคลื่อนย้ายตลอดเวลา ตั้งแต่จากโกดังเก็บสินค้า ท่าเรือ โกดัง ผู้ค้าขายส่ง ผู้ค้าขายปลีกจนถึงห้างขายสินค้า

2.3.1.7 คุณสมบัติ ต้นทุน และความสามารถในการจัดหาวัสดุกันการสั่นกระแทกที่เลือกไว้

2.3.1.8 ความต้องการของตลาด เป้าหมายที่เกี่ยวข้องกับการเคลื่อนย้ายของวัสดุกันการสั่นกระแทกที่ใช้แล้ว ตัวอย่างเช่น ในประเทศเยอรมัน วัสดุบรรจุภัณฑ์ทุกชนิดต้องสามารถ หมุนเวียนนำกลับมาใช้ใหม่ได้ ซึ่งแน่นอนทำให้ต้นทุนเพิ่มขึ้น ดังนั้น การเลือกวัสดุกันการสั่นกระแทกที่สามารถหมุนเวียนนำกลับมาใช้ใหม่ได้จะทำให้ผู้ส่งออกสามารถแข่งขันในตลาดได้ มากกว่าที่จะเลือกวัสดุกันการสั่นกระแทกที่ยากหรือลำบากต่อการหมุนเวียนนำกลับมาใช้ใหม่

หัวใจสำคัญในการเลือกวัสดุกันการสั่นกระแทก คือ เมื่อเกิดการสั่นสะเทือนและการกระแทกตามที่ได้ประเมินอันตรายไว้แล้ว จะไม่มีการกระแทกจนกระทั่งถึงพื้นข้างล่างที่เรียกว่า Bottom Out เพราะการกระแทกถูกผิวข้างล่างจะทำให้สินค้าเสียหาย การหลีกเลี่ยงเหตุการณ์ Bottom Out จำต้องเลือกวัสดุกันการสั่นกระแทกที่มีความหนาแน่น ความหนา และพื้นผิวที่รองรับสินค้าได้พอเหมาะ

2.3.2 วัสดุกันการสั่นกระแทกสามารถผลิตจากวัสดุบรรจุภัณฑ์ต่างๆ มากมาย ตัวอย่างวัสดุบรรจุภัณฑ์ที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมอาหารได้แก่

2.3.2.1 กระดาษลูกฟูก สำหรับกระดาษลูกฟูกแบบ 3 ชั้น นิยมใช้เป็นแผ่นรองหรือแผ่นแยก และแผ่นกั้นหรือใส่กล่อง เพื่อที่จะเก็บหรือยึดผลิตภัณฑ์ให้อยู่กับที่ในบรรจุภัณฑ์ สำหรับกระดาษลูกฟูกแบบ 2 ชั้น นิยมใช้เป็นกระดาษห่อ แต่กระดาษมีความสามารถในการรับแรงกระแทกจำกัดเนื่องจากไม่สามารถคืนตัวกลับสู่สภาพเดิมหลังจากมีการกระแทกและเปื่อยง่ายเมื่อดูดซึมความชื้นแล้ว อย่างไรก็ตามกระดาษลูกฟูกเป็นบรรจุภัณฑ์ที่ง่ายต่อการหมุนเวียนนำกลับมาใช้ใหม่

และมีราคาถูกจึงทำให้เป็นที่ยอมรับกันอย่างแพร่หลายตัวอย่างการใช้กระดาษลูกฟูกเป็นวัสดุกันกระแทก ได้แก่ การใช้กระดาษลูกฟูกเป็นแผ่นกัน เพื่อป้องกันบรรจุภัณฑ์แก้วกระแทกกันหรือใช้ป้องกันผลิตภัณฑ์ด้วยการปูพื้นหรือฟากกล่องก่อนปิด

2.3.2.2 กระดาษกราฟที่ส่วนมากจะใช้กระดาษรีไซเคิลมาเป็นกระดาษห่อ กระดาษกราฟที่จะมีความสามารถในการดูดซับแรงกระแทกจำกัด แต่มีข้อดีคือไม่ไวต่อความชื้นเหมือนกระดาษลูกฟูก วัสดุกันกระแทกที่ทำจากกระดาษง่ายต่อการรีไซเคิล และได้รับการพัฒนาให้เป็นคู่แข่งกับพลาสติกฟองอากาศ (Air Bubble Film) และ โฟมชนิดต่างๆ เพื่อสิ่งแวดล้อมที่ดีขึ้น

2.3.2.3 เยื่อกระดาษขึ้นรูป คุณสมบัติของเยื่อกระดาษขึ้นรูปคือ มีน้ำหนักเบาและไม่คืนตัวแต่สามารถขึ้นรูปตามต้องการได้ ความสามารถในการดูดซับแรงกระแทกมีจำกัด และมีความไวต่อความชื้นพอสมควรถ้าไม่ได้ผ่านกรรมวิธีการผลิตเพิ่มเติม เยื่อกระดาษขึ้นรูปจะป้องกันผลิตภัณฑ์ไม่ให้เคลื่อนตัวภายในบรรจุภัณฑ์ และสามารถทำจากกระดาษรีไซเคิลซึ่งเป็นที่นิยมใช้ แต่มีข้อจำกัดที่ว่า ห้ามบรรจุอาหารเนื่องจากทำจากกระดาษรีไซเคิล ยกเว้นจะมีการเคลือบ



รูปที่ 2.6 ตัวอย่างวัสดุป้องกันการสั่นกระแทกโดยมีลักษณะเป็นเยื่อกระดาษขึ้นรูป

2.3.2.4 พลาสติกฟองอากาศ (Air Bubble Film) ทำจากฟิล์ม Polyethylene 2 ชั้น และประกบกันเพื่อให้เกิดฟองอากาศเล็กๆ ระหว่างชั้น ส่วนใหญ่จะวางรองในกล่องผลไม้สด พลาสติกฟองอากาศมีคุณสมบัติเหนียว สะอาดและไม่เกิดสนิม ไม่ดูดซับความชื้น จึงเหมาะสมที่จะใช้เป็นวัสดุกันกระแทกสำหรับผลิตภัณฑ์ที่ต้องการป้องกันการตกกระแทกมากกว่าที่จะป้องกันการสั่นสะเทือน

2.3.2.5 กระดาษที่ข่อยเป็นเศษ (Shredded Paper) มีราคาถูกและหาง่าย แต่มีข้อด้อยคือ มีคุณสมบัติในการเป็นวัสดุกันกระแทกที่เลว เพราะกระดาษพวกนี้จะดูดซับความชื้นและไม่ถูกสุขอนามัย ในประเทศอุตสาหกรรม กระดาษที่บดข่อยเป็นเศษโดยเฉพาะที่เป็นพวกกระดาษหนังสือพิมพ์ไม่ได้รับการยอมรับในปัจจุบัน ประเทศอุตสาหกรรมนิยมใช้วัสดุกันกระแทกประเภท

พลาสติก แต่ก็กำลังเผชิญกับการแข่งขันของวัสดุกันกระแทกประเภทกระดาษ เนื่องจากกระแสรักย สิ่งแวดล้อมที่ความรุนแรงขึ้น



รูปที่ 2.7 ตัวอย่างวัสดุป้องกันการสั่นกระแทกโดยมีลักษณะเป็นกระดาษที่ข่อยเป็นเศษ

2.4 การทบทวนวรรณกรรม/สารสนเทศ (information) ที่เกี่ยวข้อง

Titanium dioxide (TiO_2) มีสมบัติทางเคมีที่ดีหลายอย่างเช่น มีความต้านทานการกัดกร่อนสูง เช่น จากสารจำพวกกรด ก๊าซคลอรีนหรือจำพวกเกลือ ไม่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม และราคาถูก ด้วยสมบัติเหล่านี้ TiO_2 จึงถูกนำมาประยุกต์ใช้งานด้านต่างๆมากมาย (Fujishima. et al, 2000) เช่นการนำ TiO_2 มาประยุกต์ใช้เป็นสารยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย อย่างการสังเคราะห์ TiO_2 กับ AgNO_3 ที่แขวนลอยอยู่ในน้ำโดยวิธี Chemical reduction method เพื่อต้องการให้เป็นเป็น Ag/TiO_2 แล้วนำมาทดลองยับยั้งหรือฆ่าแบคทีเรีย *Escherichia coli* ผลคือ TiO_2 สามารถยับยั้งแบคทีเรียได้ดีแต่ Ag/TiO_2 ก็สามารถยับยั้งได้ดีกว่าที่มี TiO_2 อย่างเดียวถึง 50%

วิธีการเตรียมอนุภาคหรือฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ระดับนาโนเตรียมได้หลายวิธีได้แก่วิธี Hydrothermal, CVD (Chemical vapor deposition), PVD (Physical deposition), EPD (Electrophoresis deposition) และวิธีโซล-เจล การเตรียมไทเทเนียมไดออกไซด์โดยวิธีโซล-เจลเป็นวิธีที่ง่ายและราคาไม่แพง ซึ่งเตรียมจากปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (Hydrolysis) และปฏิกิริยาควบแน่น (Condensation reaction) ของไทเทเนียมไดออกไซด์โปรพอกไซด์ บิส (เพนเทนไดโอเนต) และ 1,3-โปรเพนไดออล โดยเผาที่อุณหภูมิต่างๆ คือ 400 , 500 , 600, 700 และ 800 องศาเซลเซียส เพื่อควบคุมเฟสและขนาดอนุภาคของสารสังเคราะห์ เพราะอุณหภูมิในการเผามีผลต่อโครงสร้างของผลึกและพื้นที่ผิวของไทเทเนียมไดออกไซด์ ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส อนุภาคของไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นเฟสอะนาเทสเท่านั้น เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นสูงถึง 700 องศาเซลเซียส โครงสร้างของผลึกของไทเทเนียมไดออกไซด์จะเปลี่ยนเป็นเฟสรูไทล์เกือบทั้งหมด ส่วนการ

สังเคราะห์ Nanocrystalline titanium dioxide (TiO_2) ที่อุณหภูมิต่ำ ($180\text{--}240^\circ\text{C}$) โดยการเติมสารละลายเพื่อลดแรงตึงผิวในกรณีที่ใช้ Titanium iso-propoxide เป็นการใส่สารตั้งต้น ต่ออัตราส่วนน้ำหนักสารละลายใช้ในการสังเคราะห์อนุภาค TiO_2 อัตราส่วนน้ำหนักดังนี้คือ 15/100, 25/100 และ 35/100 ฟิล์มตกตะกอนโดยใช้วิธี Spray deposition สมบัติเป็นผลึกระดับนาโนและมีลักษณะพรุนหลังจากการทำอบผึ่ง การเตรียม อนุภาคระดับนาโน และฟิล์มสามารถใช้เป็น Gas sensing ใช้งานทางด้านชีววิทยา และ Photo-electrodes เพื่อทำ Dye-sensitized solar cell (Rao และ Dutta, 2007)

การใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์อาจจะอยู่ในรูปของอนุภาคหรือฟิล์ม เช่น การผลิตโครงสร้างระดับนาโนของฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์อาจใช้เทคนิคการเคลือบเป็นชั้นๆ ได้มีการศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพปฏิกิริยา ของโครงสร้างนาโนของฟิล์มไทเทเนียมที่โด๊ปด้วยเงิน (silver) โดยผลิตฟิล์มในโครงสร้าง การศึกษาจะสร้าง Silver –modified nano-structured TiO_2 thin film โดยใช้เทคนิค Layer-by-layer dip-coating(LLDC) โดยเรียก TiO_2 sol-gel ว่า T และเรียก Ag-modified sol-gel ว่า A ซึ่งมีโครงสร้างของฟิล์มไทเทเนียมมีลำดับชั้นในการเคลือบ 4 แบบ คือ TT (เป็นไทเทเนียมทั้งหมด) TA (ชั้นล่างเป็น TiO_2 ของผิวเป็น Ag-modified) AT (ชั้นล่างเป็น Ag-modified ชั้นผิวเป็น TiO_2) AA (เป็นไทเทเนียมแบบ Ag-modified ทั้งหมด) ผลของ Photocatalytic activity ตรวจวัดได้จาก Photocatalytic degradation process ของ Methyl orange ผลของปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติก (Zheng. et al, 2007) ฟิล์มอาจถูกเคลือบไปบนวัสดุต่างๆ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติก เช่น เคลือบบน Active carbon (Youji Li. et al, 2005) Glass bead และเหล็กกล้าไร้สนิม (Balasubramanian. et al, 2005) Silicon wafer (Duminica. et al, 2004) แก้ว (Zhang and Xu, 2004) Ti foil (Keshmiri and Troczynski, 2003) เป็นต้น

สิ่งหนึ่งที่ทำให้ปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกมีประสิทธิภาพลดลง คือ การรวมตัวกันของอิเล็กตรอนและหลุมของอิเล็กตรอนในไทเทเนียมไดออกไซด์อย่างรวดเร็วหลังจากการกระตุ้นด้วยรังสียูวีหรือด้วยแสง ดังนั้นเพื่อลดปัญหาดังกล่าว จึงได้มีการโด๊ปด้วยไอออนของโลหะบางชนิดลงไปในไทเทเนียมไดออกไซด์ เพื่อเป็นตัวดักอิเล็กตรอนที่ถูกกระตุ้นแล้วไม่ให้กลับมารวมตัวกับหลุมอิเล็กตรอน ซึ่งจะเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพของปฏิกิริยาได้ ไอออนของโลหะที่โด๊ปลงไป ได้แก่ Cu^{2+} , Pt^{4+} , V^{4+} , W^{4+} , Ce^{4+} , Na^{4+} , La^{4+} และ Ag^+ เป็นต้น แต่สารดังกล่าวมีราคาแพง จึงได้มีการศึกษาโดยใช้สารที่ถูกกว่า เช่น Fe^{3+} , Zn^{2+} , C, S หรือ N

ผลจากปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกสามารถนำไปฆ่าเชื้อแบคทีเรียหรือเชื้อราได้ เช่น การศึกษาปฏิกิริยาต่อต้านแบคทีเรีย *Escherichia coli* K-12 ของ Fe^{3+} -doped nanostructured TiO_2 thin films ที่เคลือบบนกระจก Soda-lime-silica ซึ่งเตรียมจากวิธี Sol-gel ความเข้มข้นสูงสุดของ Iron ion

(ประมาณ 0.5%mol) หลังฉายรังสี 120 นาที่ สามารถฆ่าเชื้อจุลินทรีย์ได้ถึง 95% เนื่องจากทำให้ Cell wall เกิดความเสียหาย (Zhang. et al, 2007) นักวิจัยบางท่านได้ทำการศึกษา Antifungal activity ของปฏิกิริยา TiO_2 photocatalysis ในรูปของ TiO_2 powder และ TiO_2 coated บนฟิล์มพลาสติกที่ต่อต้าน *Penicillium expansum* ของผลไม้ ปฏิกิริยา TiO_2 photocatalysis ลดการเจริญเติบโตของ Fungal pathogen ซึ่งพบว่าความสามารถของปฏิกิริยา TiO_2 photocatalysis ในการยับยั้งการเจริญเติบโตของ *Penicillium expansum* ขึ้นอยู่กับปริมาณ TiO_2 powder ที่เพิ่มลงไป ทั้ง TiO_2 powder TiO_2 coated film สามารถชะลอการเน่าของผลไม้ไม่มี Tomato fruit rot หลังจากเก็บรักษาได้ 1 สัปดาห์ ในทำนองเดียวกันฟิล์ม TiO_2 สามารถลด brown lesion และ *Penicillium rot* ในมะนาว (Maneerat and Hayata, 2006) เมื่อปฏิกิริยา TiO_2 photocatalytic สามารถยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อราซึ่งเป็นสาเหตุของการเน่าเสียของผักและผลไม้ จึงได้มีการทดลองศึกษา โดยนำผง TiO_2 (P25 degussa) *Escherichia coli* K-12 โดยใช้ Malondialdehyde (MDA) เป็นดัชนีชี้วัดความสามารถในการฆ่าเชื้อ *Escherichia coli* K-12 โดยใช้ความเข้มข้นที่ 1.1 to 2.4 mmol/ mg ผลปรากฏว่าเมื่อทำการฉายแสงไปประมาณ 30 นาที่ที่สามารถที่ฆ่าเชื้อ *Escherichia coli* K-12 ได้ถึงประมาณ 77-93% (Maness. et al, 1999)

หลังจากนั้นไม่กี่ปีก็ได้มีการพัฒนาโดยใช้ผง TiO_2 (P25 degussa) แล้วเติม Ag ลงไป มาทำการฆ่าเชื้อ *Escherichia coli* ภายใต้การฉายแสงด้วยหลอดฟลูออเรสเซนต์ ผลปรากฏว่าสามารถเพิ่มประสิทธิภาพของปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกได้ และเมื่อใช้เวลามากขึ้นประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อโรคก็จะเพิ่มขึ้นเช่นกัน (Kim. et al , 2005) Photocatalysis ถูกนำไปประยุกต์ใช้ในเทคโนโลยีการบำบัดน้ำเสีย การฟอกอากาศและพื้นผิวที่ทำความสะอาดตัวเอง เช่น ใช้ในโรงพยาบาลหรือขั้นตอนการเตรียมอาหาร (Evans and Sheel, 2007) นอกจากนั้นยังมีการศึกษา Photocatalytic bactericidal effect of TiO_2 thin film โดยใช้ Sol-gel method พบว่ากลไกการฆ่าเชื้อโรคที่สำคัญมาจากปฏิกิริยาของ $\text{OH}^\cdot$ radical (Benabbou. et al, 2007) ยังมีนักวิจัยได้ศึกษาปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกเพื่อฆ่าเชื้อโรคต่างๆเช่น *Giardia intestinalis* และ *Acanthamoeba castellanii* cysts ในน้ำ (Sokmen. et al. 2008), Coliform bacterian เชื้อราและยีสต์ (Koids and Nonami, 2007), *Escherichia coli* (Rana. et al, 2006), *Legionella pneumophila* (Dadjour. et al, 2006), *Agriaelural pathogenic fungi*: fusarium species (Pal. et al, 2007), *Fusarium species* (Sichel. et al, 2007)

จากงานวิจัยก่อนหน้าของข้าพเจ้าได้ทำการสังเคราะห์ $\text{TiO}_2/\text{SnO}_2$ ที่ได้ปด้วย Fe^{3+} นำไปทดสอบประสิทธิภาพการยับยั้งเชื้อราที่เป็นสาเหตุของโรคเน่าในผักและผลไม้ แล้วได้ผลการทดลองโดยสารที่สังเคราะห์ได้สามารถยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อรา และเชื้อแบคทีเรียได้ดี และนำไปเคลือบบนฟิล์มบางเพื่อทดสอบประสิทธิภาพการฆ่าเชื้อแบคทีเรียและเชื้อรา (Lek Sikong,

Budsabakorn Kongreong, Duangporn Kantachote and Weerawan Sutthisripok “Photocatalytic Activity and Antibacterial Behavior of Fe^{3+} -Doped $\text{TiO}_2/\text{SnO}_2$ Nanoparticles” Energy Research Journal 1 (2) : 120-125, 2010, ISSN 1949-0151.) (Lek Sikong, Budsabakorn Kongreong, Duangporn Kantachote and Weerawan Sutthisripok “Inactivation of *Salmonella Typhi* using Fe^{3+} Doped $\text{TiO}_2/3\text{SnO}_2$ Photocatalytic powders and films” Journal of Nano Research Vol. 12 (2010) pp 89-97.) ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงทำการสังเคราะห์ TiO_2 และ TiO_2 ที่ได้ไปไอออนของโลหะ (Fe^{3+} หรือ Zn^{2+}) ด้วยวิธี sol-gel ศึกษาประสิทธิภาพของปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกจากผลิตภัณฑ์ที่สังเคราะห์ได้ แล้วนำมาประยุกต์ใช้โดยเคลือบบนวัสดุกันกระแทก เพื่อทดสอบประสิทธิภาพการยืดอายุการเก็บรักษามะม่วงน้ำดอกไม้หลังการเก็บเกี่ยว

บทที่ 3

วิธีการวิจัย

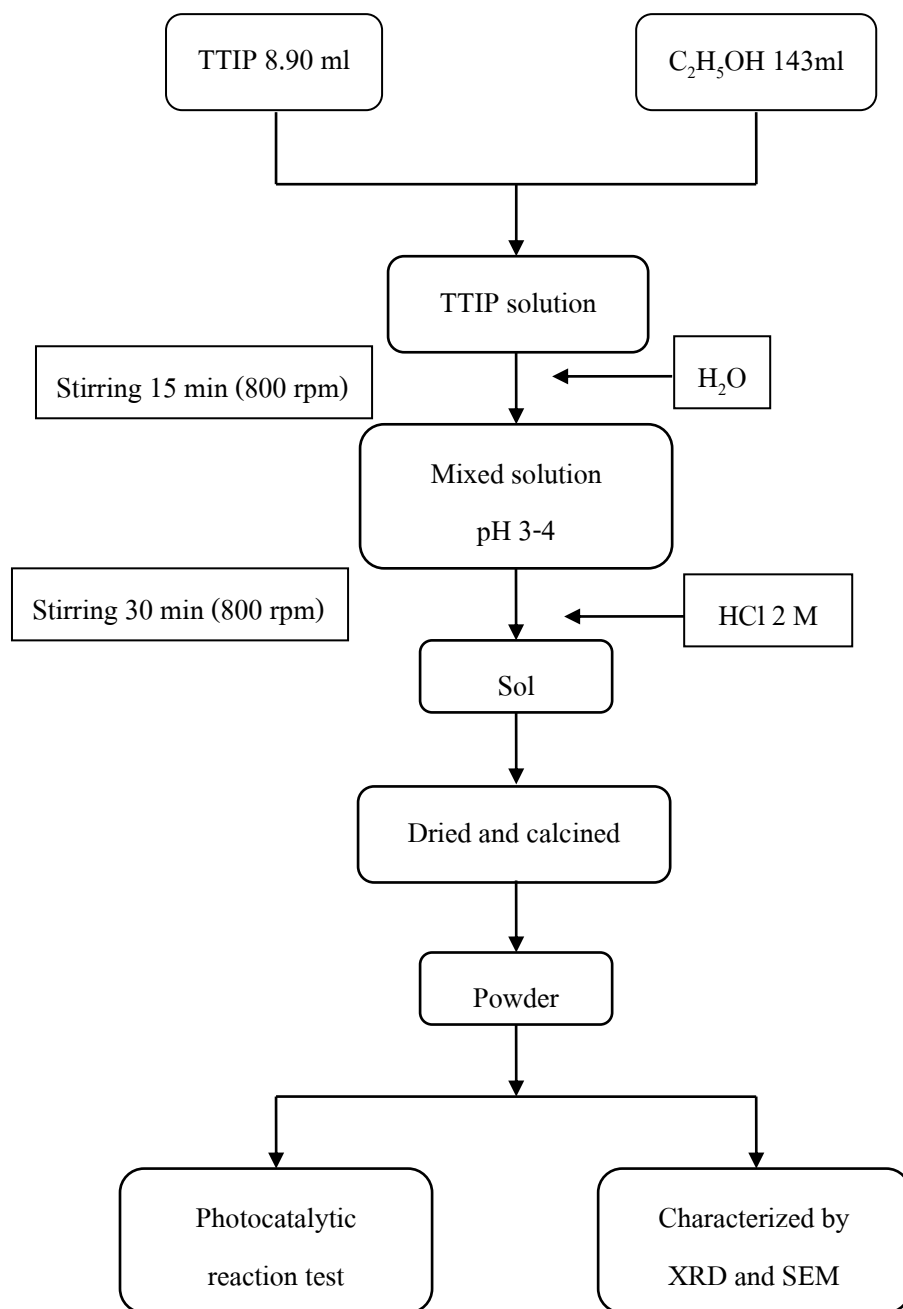
3.1 วัสดุอุปกรณ์และวิธีการวิจัย

การศึกษาแบ่งเป็น 5 ขั้นตอน ขั้นตอนที่ 1 สังเคราะห์และเตรียมสารเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์ และสารเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีสารโด๊ป ด้วยวิธีการโซล-เจล นำเจลที่ได้จากการสังเคราะห์ไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 105 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง หลังจากนั้นนำผงที่ได้เผาที่อุณหภูมิ 300, 400, 500 และ 600 °C นำผงที่ได้ไปวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค โดยวิธี XRD, SEM และ TEM ขั้นตอนที่ 2 ศึกษาประสิทธิภาพการทำปฏิกิริยาของสารที่สังเคราะห์ได้จากขั้นตอนที่ 1 โดยนำผงที่ได้ไปทดสอบการย่อยสลายสีของเมทิลีนบลู ภายใต้รังสียูวี (Back light 50 วัตต์) ความเข้มแสง 3.89 mW/cm² ตรวจสอบการย่อยสลายสีโดยวัดความเข้มขึ้นที่เปลี่ยนแปลงไปด้วย UV-Visible Spectrometer และนำผงไปทดสอบปฏิกิริยาการฆ่าเชื้อแบคทีเรียและเชื้อราที่ทำให้ผักและผลไม้เน่าเสีย ขั้นตอนที่ 3 ศึกษาวิธีการเคลือบและตัวแปรที่มีผลต่อการเคลือบฟิล์มบางด้วยวิธีสเปรย์ ขั้นตอนที่ 4 ศึกษาผลโฟโตแคตะลิซิสของฟิล์มที่เคลือบ ด้วยการทดสอบการฆ่าเชื้อแบคทีเรียและเชื้อราที่ทำให้ผักและผลไม้เน่าเสีย สำหรับขั้นตอนที่ 5 ศึกษาและประยุกต์ใช้ฟิล์มบางที่เคลือบด้วยการนำไปห่อข้าวโพดฝักอ่อนเพื่อยืดอายุ

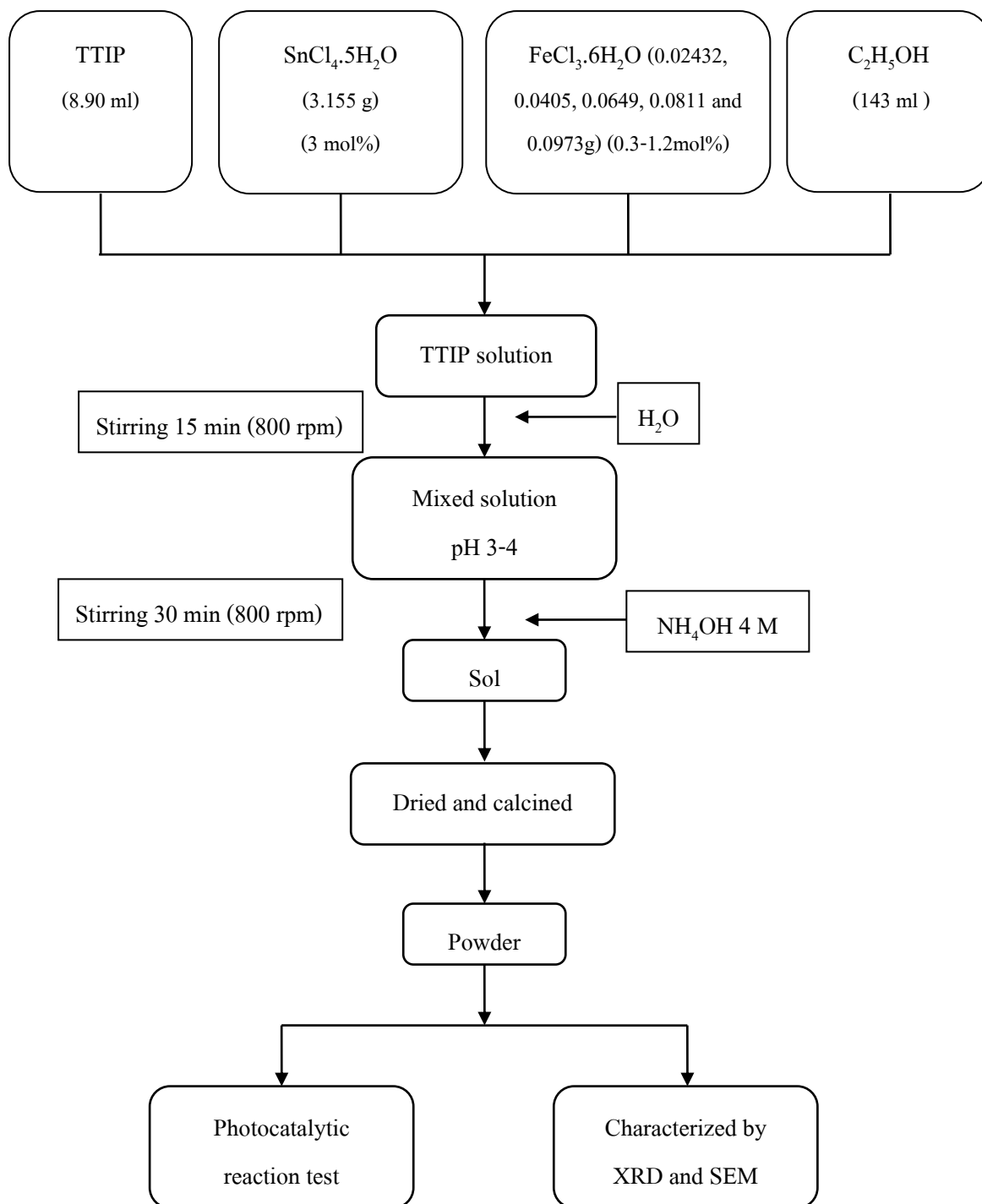
3.2 กระบวนการสังเคราะห์ผงไทเทเนียมไดออกไซด์

3.2.1 การสังเคราะห์ผงไทเทเนียมไดออกไซด์ ใช้ Titanium (IV) isopropoxide (TTIP) ปริมาณ 8.9 มิลลิลิตร เป็นสารตั้งต้นละลายในเอทานอลปริมาตร 143 มิลลิลิตร กวนด้วยความเร็ว 800 รอบต่อนาทีจนครบ 30 นาที และหยดกรดไฮโดรคลอริก 2 โมลาร์ ลงไปจนกระทั่ง pH เท่ากับ 3.5 กวนสารละลายต่อด้วยเครื่องกวนแท่งแม่เหล็ก (Magnetic stirrer) จนครบ 30 นาที ได้ปั่นน้ำกลั่น ปริมาตร 1.62 มิลลิลิตรลงไป กวนที่อุณหภูมิห้อง 30 นาที จนครบ 1 ชั่วโมง เก็บไว้ที่อุณหภูมิห้อง จนกระทั่งเป็นเจล สกัดส่วนโดยโมลของ TTIP:C₂H₅OH:H₂O เท่ากับ 1:82:3 อัตราส่วนโดยโมล อ้างอิงจากงานวิจัยของ Qingju Liu และคณะ (2002) นำเจลอบที่อุณหภูมิ 105 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เเผาภายใต้สภาวะบรรยากาศด้วยเตาเผาอุณหภูมิต่ำ LINDBERG/BLUE ที่อุณหภูมิ 300, 400, 500 และ 600 °C อัตราการเพิ่มของอุณหภูมิ 10 องศาต่อนาที ควบคุมความร้อน ณ อุณหภูมิสูงสุดที่ต้องการเป็นเวลา 2 ชั่วโมง จะได้ผงไทเทเนียมไดออกไซด์ ขั้นตอนการสังเคราะห์แสดงดังรูปที่ 3.1

3.2.2 การสังเคราะห์ผง $\text{TiO}_2/3\text{SnO}_2/0.5\text{Fe}_3+$ ใช้ Titanium (IV) isopropoxide (TTIP) ปริมาณ 8.9 มิลลิลิตร เป็นสารตั้งต้นละลายในเอทานอลปริมาตร 143 มิลลิลิตร หลังจากนั้นได้ป 3mol% ของ Tin (IV) chloride pentahydrate ($\text{SnCl}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$) (98% บริษัท Fluka Sigma-Aldrich) และ Iron (III) Chloride กวนด้วยความเร็ว 800 รอบต่อนาทีด้วยเครื่องกวนแม่เหล็ก เมื่อกวนครบ 15 นาทีได้น้ำก้นปริมาตร 1.62 มิลลิลิตรลงไป กวนต่อจนครบ 30 นาที หยดสารละลายแอมโมเนีย 4 โมลาร์ ลงไปปรับ pH ให้ได้ประมาณ 3-4 กวนต่อด้วยความเร็ว 800 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิห้อง จนครบ 1 ชั่วโมง เก็บไว้ที่อุณหภูมิห้องจนกระทั่งเป็นเจล สัดส่วนของ TTIP: $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$: H_2O เท่ากับ 1:82:3 อัตราส่วนโดยโมล อ้างอิงจากงานวิจัยของ Qingju Liu และคณะ (2002) ขั้นตอนการสังเคราะห์แสดงดังรูปที่ 3.6 นำเจลอบที่อุณหภูมิ 105 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เปรายได้สภาวะบรรยากาศด้วยเตาเผาอุณหภูมิต่ำ LINDBERG/BLUE ที่อุณหภูมิ 300, 400, 500 และ 600 °C อัตราการเพิ่มของอุณหภูมิ 10 องศาต่อนาที ควบคุมความร้อน ณ อุณหภูมิสูงสุดที่ต้องการเป็นเวลา 2 ชั่วโมง จะได้ผง $\text{TiO}_2/\text{SnO}_2/0.5\text{Fe}_3+$ ขั้นตอนการสังเคราะห์แสดงดังรูปที่ 3.2 จะได้ชิ้นงานเพื่อนำไปทดสอบต่อไป



รูปที่ 3.1 การเตรียมผง TiO_2 ด้วยวิธีโซล-เจล

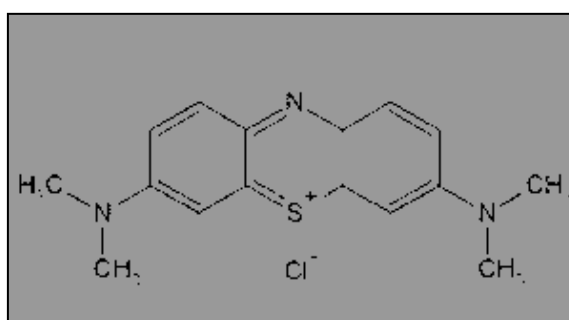


รูปที่ 3.2 การเตรียมผง $\text{TiO}_2/\text{SnO}_2/0.5\text{Fe}^{3+}$ ด้วยวิธีโซล-เจล

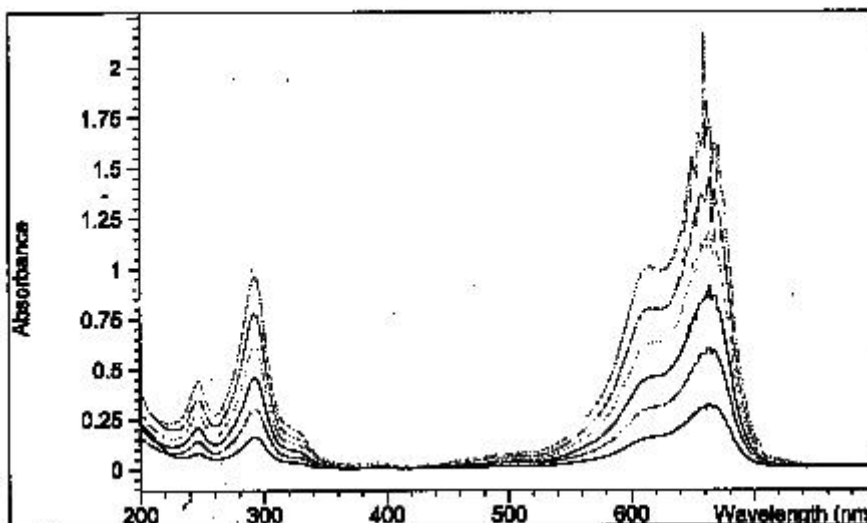
3.3 ทดสอบปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกในการย่อยสลายสีของเมทิลีนบลูด้วยผงที่สังเคราะห์ได้

3.3.1 การเตรียมสารละลายมาตรฐาน

สารละลายมาตรฐาน เพื่อสร้างกราฟมาตรฐานในการนำไปวิเคราะห์ผลโดยเตรียมสารละลายเมทิลีนบลูที่มีโครงสร้างตาม รูปที่ 3.3 ความเข้มข้นอยู่ในช่วง (0.5×10^{-5}) ถึง (3×10^{-5}) โมลาร์ วัดการดูดกลืนแสงโดย Ultraviolet-visible spectrophotometry ช่วงความยาวคลื่น 200 - 800 นาโนเมตร และเลือกความยาวคลื่น 664 นาโนเมตร ในการวัด Absorbance ของเมทิลีนบลู แสดงดังรูปที่ 3.4

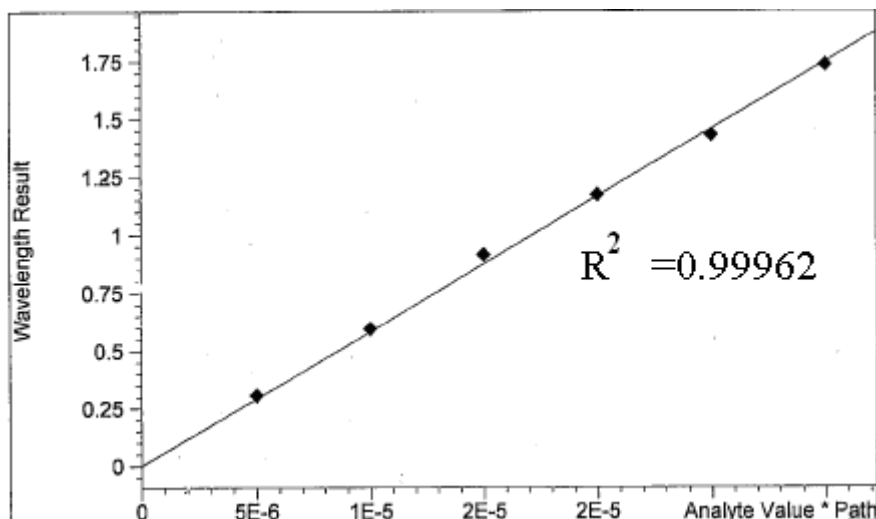


รูปที่ 3.3 โครงสร้างของเมทิลีนบลู (Methylene blue) (www.nilesbio.com : 27/03/51)



รูปที่ 3.4 Spectrum การดูดกลืนแสงของเมทิลีนบลูที่ความเข้มข้น $(0.5 - 3) \times 10^{-5}$ โมลาร์

กราฟมาตรฐานของสารละลายเมทิลีนบลูในช่วง $(0.5 - 3) \times 10^{-5}$ โมลาร์ แสดงดังในรูปที่ 3.5 ซึ่งเขียนกราฟระหว่าง ความเข้มข้น กับค่า Absorbance มีค่าความถูกต้องของกราฟ $R^2 = 0.99962$ เพื่อนำมาหาค่าความเข้มข้นที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่อได้รับแสงยูวี ที่เวลาต่างๆกัน



รูปที่ 3.5 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายเมทิลีนบลู $(0.5 \times 10^{-5}) - (3 \times 10^{-5})$ โมลาร์ กับค่า Absorbance ที่ได้จากเครื่อง UV-VIS spectrophotometer

3.3.2 ปฏิริยาโฟโตแคตะไลติกในการย่อยสลายสีของเมทิลีนบลู

ชิ้นงานที่นำมาทดสอบปฏิริยาโฟโตแคตะไลติก ในการย่อยสลายสีของเมทิลีนบลู อยู่ในรูปของผง ในการทดสอบใช้ผง 0.0375 g ต่อสารละลาย เมทิลีนบลู ความเข้มข้น 1×10^{-5} โมลาร์ 10 มิลลิตร นำผงและสารละลายเมทิลีนบลูใส่ในหลอดทดลอง แล้วนำไปวางในตู้เพื่อรับแสงยูวีขนาด 110 วัตต์ที่มีความเข้มแสง 3.89 mW/cm^2 โดยความยาวคลื่นย่านยูวี (310-400 นาโนเมตร) เป็นเวลา 1, 2, 3 และ 4 ชั่วโมง วัดความเข้มข้นของสารละลายที่เปลี่ยนแปลงด้วยเครื่อง UV-Vis แล้วบันทึกผล เพื่อศึกษาอัตราการลดลงของความเข้มข้นของเมทิลีนบลู เมื่อเวลาเพิ่มขึ้น การทดลองภาวะละ 3 ตัวอย่าง

การคำนวณหา %Degradation ของเมทิลีนบลูโดยใช้สูตรดังสมการที่ (3.1)

$$\% \text{Degradation} = \frac{(C_0 - C)}{C_0} \times 100 \% \quad \dots\dots\dots (3.1)$$

เมื่อ C_0 คือ ความเข้มข้นเริ่มต้น เท่ากับ 1×10^{-5} โมลาร์

C คือ ความเข้มข้น ณ เวลาทดสอบ (โมลาร์)

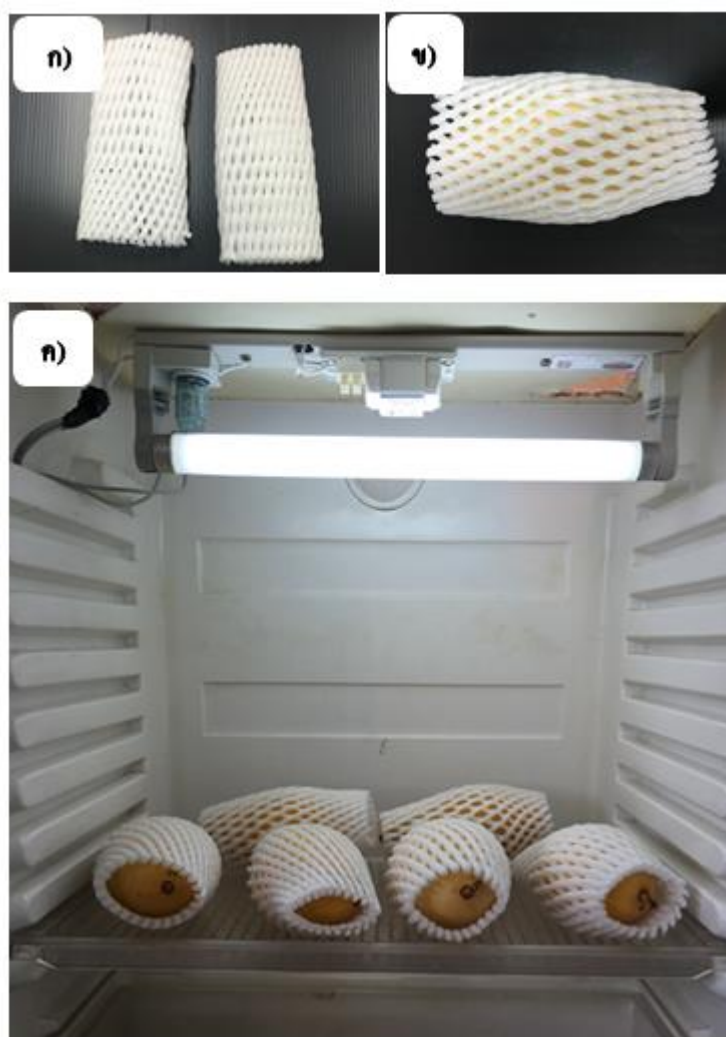
3.4 กระบวนการเคลือบวัสดุกันกระแทก

ในการเคลือบวัสดุกันกระแทกใช้วิธีการเคลือบแบบสเปรย์ หรือ ที่รู้จักกันในชื่อการเคลือบแบบสเปรย์ละออง วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ ได้แก่ ผง $\text{TiO}_2/\text{SnO}_2/0.5\text{Fe}^{3+}$ เอทิลแอลกอฮอล์ 95% ($\text{C}_2\text{H}_6\text{O}$) วัสดุกันกระแทก (โฟมตาข่ายห่อมะม่วง) สีรองพื้นพลาสติก (Polypropylene primer) กระป๋องหรือขวดและหัวสเปรย์ ขั้นตอนในการเคลือบเริ่มด้วยการนำผงผสมกับเอทิลแอลกอฮอล์ 100 มิลลิลิตร โดยใช้ผงที่ปริมาณต่างๆ (1%w/v, 5%w/v และ 10%w/v) นำไปหมุนเหวี่ยงที่ความเร็ว 1,000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 10 นาที จากนั้นนำไปใส่ขวดสเปรย์ ขั้นตอนการสเปรย์ ก่อนการสเปรย์ลงบนวัสดุกันกระแทกต้องทำการสเปรย์พอลิโพรพิลีนไพรเมอร์ลงไปก่อนเพื่อเพิ่มสมบัติการยึดติดของวัสดุกันกระแทก จากนั้นสเปรย์สารผสมระหว่างผงผสมและเอทิลแอลกอฮอล์ ทำการสเปรย์ลงบนวัสดุกันกระแทกจำนวน 2 ชั้น ระยะห่างระหว่างวัสดุกันกระแทกกับหัวสเปรย์เท่ากับ 30 เซนติเมตร แล้ววางทิ้งไว้ให้แห้งที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 10-15 นาที

การคำนวณหาสัดส่วนผง $\text{TiO}_2/\text{SnO}_2/0.5\text{Fe}^{3+}$ แสดงขั้นตอนการเตรียมวัสดุกันกระแทกที่เคลือบด้วย $\text{TiO}_2/\text{SnO}_2/0.5\text{Fe}^{3+}$ ต่อปริมาณเอทิลแอลกอฮอล์โดยคำนวณแบบ 1%w/v คือ ในสารละลาย 100 มิลลิลิตร มีผงอยู่ 1 กรัม ถ้า 5%w/v แสดงว่าในสารละลาย 100 มิลลิลิตร มีผงอยู่ 5 กรัม และ ถ้า 10%w/v แสดงว่าในสารละลาย 100 มิลลิลิตร มีผงอยู่ 10 กรัม

3.5 กระบวนการทดสอบการยืดอายุมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองด้วยวัสดุกันกระแทกที่เคลือบด้วยผงที่สังเคราะห์ได้

เริ่มด้วยการนำวัสดุกันกระแทกที่เคลือบด้วย slurry ของ $\text{TiO}_2/3\text{SnO}_2/0.5\text{Fe}^{3+}$ และวัสดุกันกระแทกที่ไม่เคลือบมาห่อหุ้มมะม่วงน้ำดอกไม้สีทอง และให้วัสดุกันกระแทกที่ไม่เคลือบเป็นชุดควบคุม จากนั้นนำไปวางในตู้เย็นที่มีหลอดฟลูออเรสเซนต์ 10 วัตต์ โดยระยะห่างระหว่างข้าวโพดและหลอดเท่ากับ 40 เซนติเมตร และควบคุมอุณหภูมิของตู้เย็นให้อยู่ที่ 11°C (รูปที่ 3.6) ทำการทดลองภาวะทดลองครั้งละ 4 ตัวอย่าง สังเกตการเปลี่ยนแปลงของมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองทุกๆ 2 วัน



รูปที่ 3.6 การทดสอบการยืดอายุมะม่วงน้ำดอกไม้สีทอง โดยรูป ก) เป็นวัสดุกันกระแทกที่ผ่านการเคลือบแล้ว ข) เป็นมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองที่ห่อด้วยวัสดุกันกระแทกที่เคลือบด้วยสารที่สังเคราะห์ได้ และ ค) แสดงสถานะที่ใช้ในการทดลอง

3.6 การตรวจสอบคุณลักษณะของผง และวัสดุกันกระแทกที่เคลือบด้วยผง

3.6.1 –X-ray powder diffractometry (XRD)

เทคนิค XRD ศึกษาโครงสร้างผลึกของเฟส และคำนวณหาขนาดของผลึกของแต่ละเฟสที่เกิดขึ้นในผงที่สังเคราะห์โดยใช้สมการ Scherer ดังสมการที่ (3.2)

$$t = \frac{0.9\lambda}{\beta \cos \theta} \quad \dots\dots\dots (3.2)$$

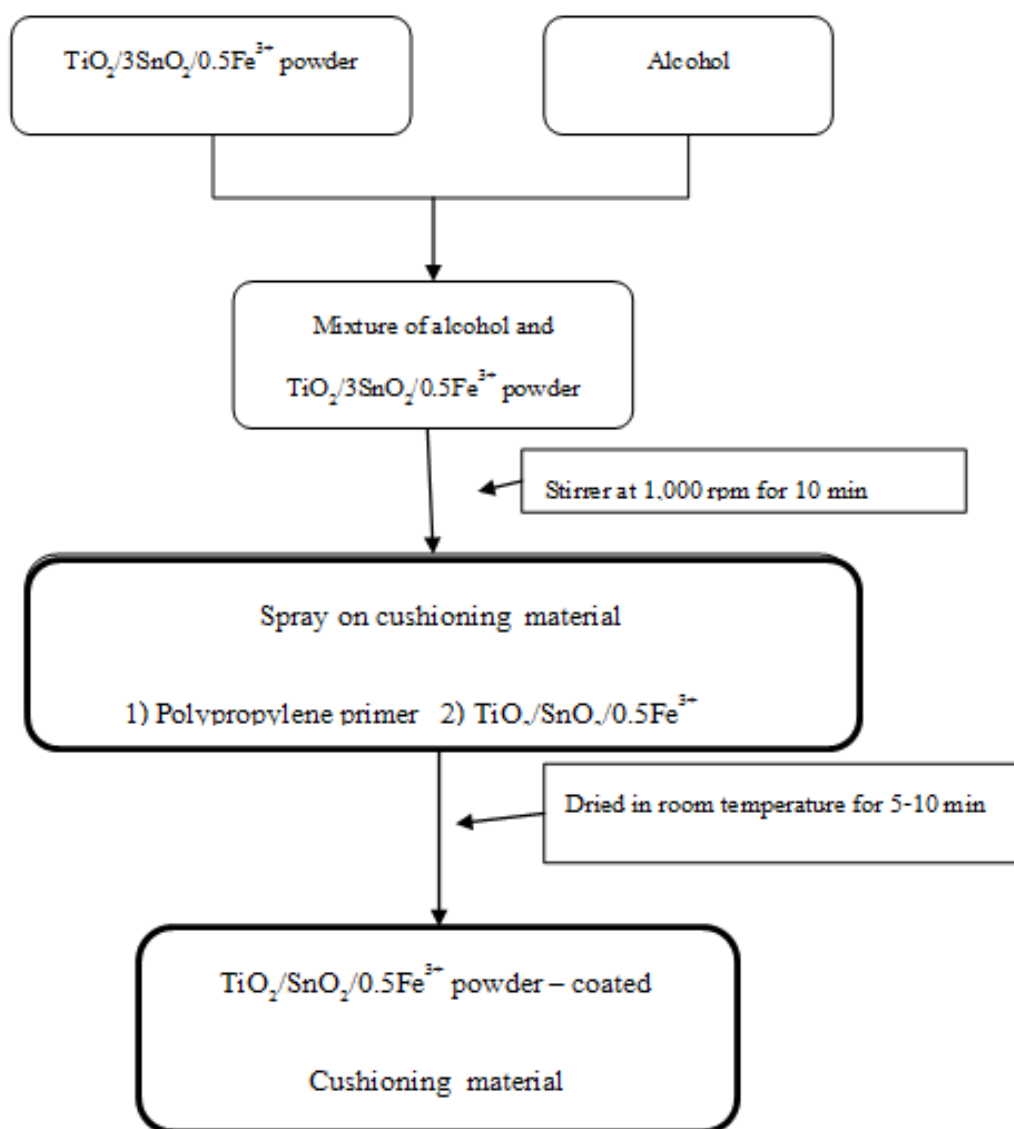
เมื่อ	t	คือ ขนาดของผลึก (นาโนเมตร)
	λ	คือ ความยาวคลื่นของรังสีเอ็กซ์ ($\text{CuK}\alpha = 0.15406$ นาโนเมตร)
	β	คือ Line width at half maximum height (เรเดียน)
	θ	คือ มุมสะท้อน (องศา)

3.6.2 เครื่องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด (SEM)

ตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของผงที่สังเคราะห์ และพื้นผิวของวัสดุกันกระแทกที่เคลือบด้วยผงที่สังเคราะห์ได้ ที่ความหนาของพื้นผิวของวัสดุกันกระแทกที่เคลือบ 1 และ 2 ชั้น และวิเคราะห์การกระจายตัวของอนุภาค TiO_2 และสารเติมที่กระจายอยู่บนพื้นผิวของวัสดุกันกระแทก ด้วยวิธี X-ray mapping ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด (SEM; JEOL JSM-5800LV)

3.6.3 Ultraviolet-ฟลูออเรสเซนซ์ spectrophotometer (UV-VIS)

โดยทำการสแกนที่ความยาวคลื่น 200 - 800 นาโนเมตร และวัดปริมาณความเข้มข้นสีเมทิลินบลูผ่านการทำปฏิกิริยาการกระตุ้นด้วยแสงยูวี (310 - 400 นาโนเมตร) โดยเลือกความยาวคลื่น 664 นาโนเมตร ซึ่งเป็นความยาวคลื่นที่เมทิลินบลูสามารถดูดกลืนได้



รูปที่ 3.7 ขั้นตอนการเตรียมการเคลือบพื้นผิววัสดุกันกระแทกด้วย $\text{TiO}_2/\text{SnO}_2/0.5\text{Fe}^{3+}$ slurry

บทที่ 4

ผลการวิจัย

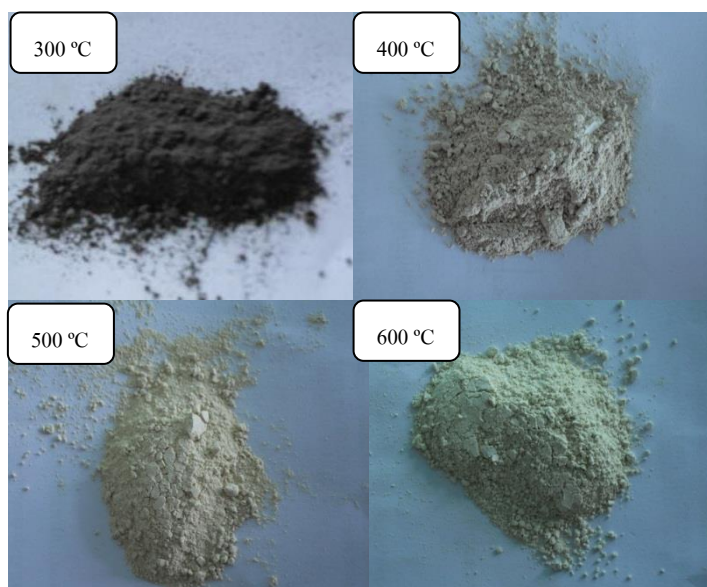
จากการทดลองสังเคราะห์สารเคลือบผิวไทเทเนียมไดออกไซด์ ในรูปของผงและ Slurry โดยศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิการเผา ความหนาของชั้นการเคลือบบนวัสดุกันกระแทก และปริมาณของผงไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ผสมใน slurry เพื่อปรับปรุงให้สมบัติโฟโตแคตะลิสต์ที่ดีขึ้น โฟโตแคตะลิสต์ที่เคลือบอยู่บนวัสดุกันกระแทกโฟมตาข่าย และนำวัสดุกันกระแทกไปห่อหุ้มมะม่วง น้ำดอกไม้สีทองทำให้ยืดอายุได้นานกว่าวัสดุกันกระแทกที่ไม่ผ่านการเคลือบ

4.1 อิทธิพลของอุณหภูมิ

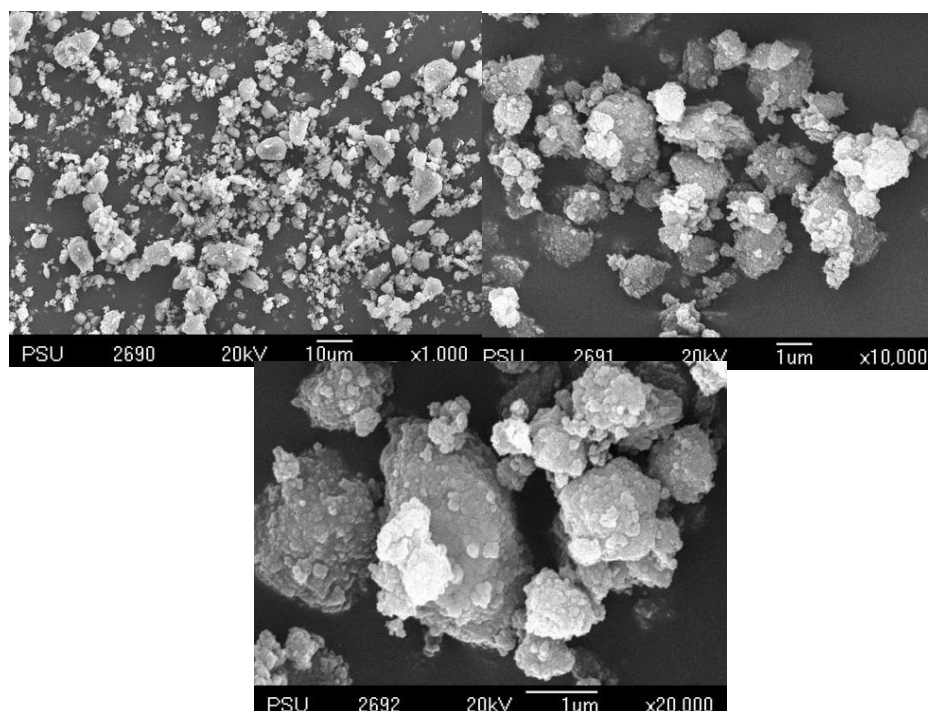
4.1.1 อิทธิพลของอุณหภูมิต่อการเปลี่ยนเฟสของผงไทเทเนียมไดออกไซด์ การสังเคราะห์ผงไทเทเนียมไดออกไซด์ โดยการแปรผันอุณหภูมิที่ใช้เผาตั้งแต่ 300 – 600 °C หลังจากนำผงมาบดด้วยครกบดสารจะได้ผงลักษณะละเอียดเหมือนแป้งลักษณะของผงมีสีเทาถึงสีเหลือง ดังรูปที่ 4.1 พบว่าเมื่อนำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง SEM พบว่าผงมีลักษณะค่อนข้างกลมจับตัวกันเป็นก้อน ดังรูปที่ 4.2 เมื่อนำผงไปวิเคราะห์โครงสร้างเฟสที่เกิดขึ้น ด้วย XRD พบว่าผงไทเทเนียมไดออกไซด์มีเฟสอะนาเทสเกิดขึ้นที่อุณหภูมิ 300 -500 °C เมื่ออุณหภูมิในการเผาเพิ่มขึ้นถึง 600 °C ทำให้ความเป็นผลึกของอะนาเทสสูงขึ้น สำหรับผง $\text{TiO}_2/3\text{SnO}_2/0.5\text{Fe}^{3+}$ อุณหภูมิการเผาที่สูงขึ้นมีผลต่อความเป็นผลึกของเฟสอะนาเทสสูงขึ้นเช่นกัน และเริ่มเกิดเฟสรูไทล์ที่ตำแหน่ง 2θ เท่ากับ 27 °

4.1.2 อิทธิพลของอุณหภูมิต่อขนาดอนุภาคสังเคราะห์ผงไทเทเนียมไดออกไซด์ โดยการแปรผันอุณหภูมิที่ใช้การสังเคราะห์ตั้งแต่ 300 - 600 °C และบดด้วยครกบดสารได้ผงลักษณะละเอียดแล้วส่งวิเคราะห์หาขนาดอนุภาคด้วยเครื่อง Particle size analyzer ทำให้ทราบว่าเมื่อเผาผงผสมที่อุณหภูมิ 400 °C ทำให้ได้ผงไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีขนาดอนุภาคเล็กที่สุด และการเผาผงที่อุณหภูมิ 300 °C ทำให้ได้ผงที่มีขนาดใหญ่กว่าการเผาที่อุณหภูมิอื่นๆ ซึ่งผงมีขนาดอนุภาคอยู่ในระดับไมโครเมตร แต่เมื่อพิจารณาขนาดผลึกที่คำนวณจากพีคที่วิเคราะห์ด้วยเครื่อง XRD โดยใช้สูตรของ Sherrer พบว่าขนาดผลึกของอะนาเทสที่สังเคราะห์ได้มีขนาด 8.27, 33.10, 23.64 และ 33.10 nm เมื่ออุณหภูมิการเผาเป็น 300, 400, 500 และ 600 °C ตามลำดับ (ตารางที่ 4.1) ซึ่งแสดงว่าอนุภาคที่ได้จากการสังเคราะห์จับตัวกันเป็นก้อนเช่นเดียวกับผลที่ได้จากการสังเคราะห์ $\text{TiO}_2/3\text{SnO}_2/0.5\text{Fe}^{3+}$ สูตร

ต่างๆใน และตารางที่ 4.2 พบว่าผลของอุณหภูมิการเผาต่อขนาดผลึกไม่ชัดเจนและขนาดผลึกที่ได้อยู่ในช่วง 14-25 nm จากตารางที่ 4.2 และจากการส่งวิเคราะห์ด้วยเครื่อง SEM แล้วทำให้เห็นว่าผงมีลักษณะจับกันเป็นก้อน ทำให้ไม่ทราบขนาดที่แน่นอนจึงต้องวิเคราะห์สูตรที่มีขนาดอนุภาคเล็กที่สุดจากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Particle size analyzer อีกครั้งหนึ่งด้วยเครื่อง Zeta potential analyzer, Model Zeta PALS, Brookhaven ทำให้ทราบขนาดอนุภาคของ $\text{TiO}_2/3\text{SnO}_2/0.5\text{Fe}^{3+}$ ที่แน่นอนคือ 191 nm และส่งวิเคราะห์หาพื้นที่ผิวด้วยเครื่อง BET Surface Area มีพื้นที่ผิว 117.16 ตารางเมตรต่อกรัมเมื่อเผาที่อุณหภูมิ 400 °C โดยขนาดผลึกที่แท้จริงมีขนาดเล็ก 20 nm ซึ่งมีค่าสอดคล้องกับผลจากการคำนวณพีค XRD



รูปที่ 4.1 ผงไทเทเนียมไดออกไซด์เมื่อเผาที่ 300, 400, 500 และ 600 °C



รูปที่ 4.2 ภาพถ่าย SEM ของผงไทเทเนียมไดออกไซด์ ที่ได้ปด้วย $3\text{SnO}_2/0.5\text{Fe}^{3+}$ เผาที่อุณหภูมิ 400°C

ตารางที่ 4.1 ขนาดผลึกและปริมาณเฟสของผง TiO_2 เผาที่อุณหภูมิต่างๆ

อุณหภูมิ ($^\circ\text{C}$)	ขนาดผลึก (nm)		ปริมาณเฟส (%)	
	อะนาเทส	รูไทล์	อะนาเทส	รูไทล์
300	8.27	-	100	0
400	33.10	-	100	0
500	23.64	-	100	0
600	33.10	-	100	0

ตารางที่ 4.2 ขนาดอนุภาคและพื้นที่ผิวของผง $\text{TiO}_2/3\text{SnO}_2/0.5\text{Fe}^{3+}$ เผาที่อุณหภูมิต่างๆ วิเคราะห์ด้วยเครื่อง BET Surface Area

อุณหภูมิ ($^{\circ}\text{C}$)	ขนาดอนุภาค (μm)	พื้นที่ผิวจำเพาะ (m^2/g)
300	23.59	0.82
400	12.01	1.64
500	15.29	1.41
600	13.29	1.4

ตารางที่ 4.3 ขนาดผลึกและปริมาณเฟสของผง $\text{TiO}_2/3\text{SnO}_2/0.5\text{Fe}^{3+}$ เผาที่อุณหภูมิต่างๆ

อุณหภูมิ ($^{\circ}\text{C}$)	ขนาดผลึก (nm)		ปริมาณเฟส (%)	
	อะนาเทส	รูไทล์	อะนาเทส	รูไทล์
300	23.68	-	100	-
400	16.53	-	100	-
500	15.04	-	100	-
600	20.69	41.48	98.32	1.68

จากผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD สามารถนำมาคำนวณหาร้อยละของ อะนาเทสและรูไทล์ (ตารางที่ 4.1) ได้ดังสมการที่ 4.1, 4.2 และ 4.3 (Sheng et al., 2006)

$$W_a = k_a A_a / (k_a A_a + A_r + k_b A_b) \quad (4.1)$$

$$W_r = A_r / (k_a A_a + A_r + k_b A_b) \quad (4.2)$$

$$W_b = k_b A_b / (k_a A_a + A_r + k_b A_b) \quad (4.3)$$

เมื่อ W_a , W_r และ W_b คือ สัดส่วนน้ำหนักของเฟสอะนาเทส รูไทล์ และบรูกไคต์ ตามลำดับ A_a , A_r และ A_b คือ ความเข้มของฟลักอะนาเทส (101) ฟลักรูไทล์ (110) และฟลักบรูกไคต์ (121) ตามลำดับ ส่วนสัมประสิทธิ์ k_a และ k_b มีค่าเท่ากับ 0.886 และ 2.721 ตามลำดับ

ตารางที่ 4.4 เปอร์เซ็นต์การย่อยสลายสีเมทิลีนบลู (MB) โดยผง TiO_2 และ $\text{TiO}_2/3\text{SnO}_2$ ใต้ 0.5Fe^{3+} ที่เวลาบ่มรังสียูวี 4 ชั่วโมง อุณหภูมิสังเคราะห์ 400°C

Sample	% Degradation of MB
TiO_2	65.7
$\text{TiO}_2/3\text{SnO}_2/0.5\text{Fe}^{3+}$	98.7

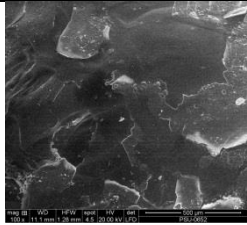
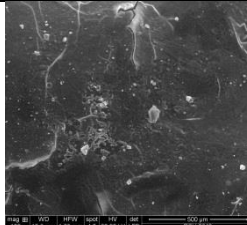
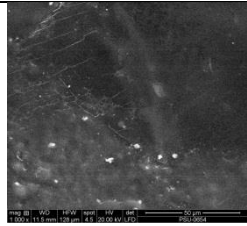
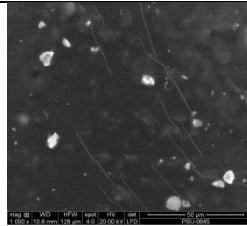
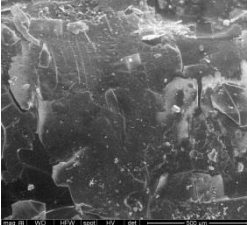
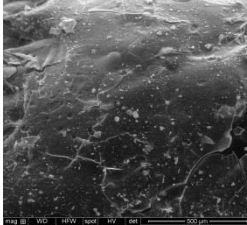
จากการศึกษาที่ผ่านมาทำให้ทราบว่าผง $\text{TiO}_2/3\text{SnO}_2/0.5\text{Fe}^{3+}$ สามารถย่อยสลายเมทิลีนบลูได้ดีที่สุด จึงนำผงสูตรนี้มาประยุกต์ใช้ทางด้านบรรจุภัณฑ์ผักและผลไม้ โดยนำผงซึ่งมีลักษณะค่อนข้างกลมเกาะตัวกันเป็นก้อนมาทำให้แขวนลอยในเอทิลแอลกอฮอล์ในอัตราส่วน 1%w/v, 5%w/v และ 10%w/v เพื่อหาสัดส่วนที่เหมาะสมในการเคลือบวัสดุกันกระแทก โดยนำวัสดุกันกระแทกที่เคลือบแล้วไปตรวจลักษณะพื้นผิว และความสม่ำเสมอของผงที่กระจายตัวบนวัสดุกันกระแทกด้วยเครื่อง SEM ดังแสดงในรูปที่ 4.3 ผลที่ได้คือ เมื่อใช้ผง $\text{TiO}_2/3\text{SnO}_2/0.5\text{Fe}^{3+}$ ในสัดส่วน 1%w/v เคลือบลงวัสดุกันกระแทก ทำให้ได้ผงกระจายตัวบนพื้นผิววัสดุกันกระแทก แบบเบาบางมากทั้งการเคลือบแบบชั้นเดียวและ 2 ชั้น ดังรูปที่ 4.3 ก) และ เมื่อใช้ผง $\text{TiO}_2/3\text{SnO}_2/0.5\text{Fe}^{3+}$ ในสัดส่วน 5%w/v เคลือบลงบนวัสดุกันกระแทก ด้วยความหนา 1 ชั้นทำให้ได้ผงกระจายตัวบนพื้นผิววัสดุกันกระแทกอย่างสม่ำเสมอ แต่ปริมาณของผงน้อยเกินไป และเมื่อทำการเคลือบทับลงไปอีกชั้นเป็น 2 ชั้นในการเคลือบทำให้ได้พื้นผิววัสดุกันกระแทก ที่มีผงกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ และมีปริมาณผงที่เหมาะสมดังรูปที่ 4.3 ข) ส่วนการเคลือบโดยใช้ผง $\text{TiO}_2/3\text{SnO}_2/0.5\text{Fe}^{3+}$ ในสัดส่วน 10%w/v เคลือบลงบนวัสดุกันกระแทก ด้วยความหนา 1 ชั้นและ 2 ชั้น ทำให้ได้พื้นผิววัสดุกันกระแทก มีผงเกาะตัวกันเป็นก้อนๆในลักษณะที่ซ้อนทับกันดังรูปที่ 4.3 ค) ซึ่งทำให้สิ้นเปลืองผง

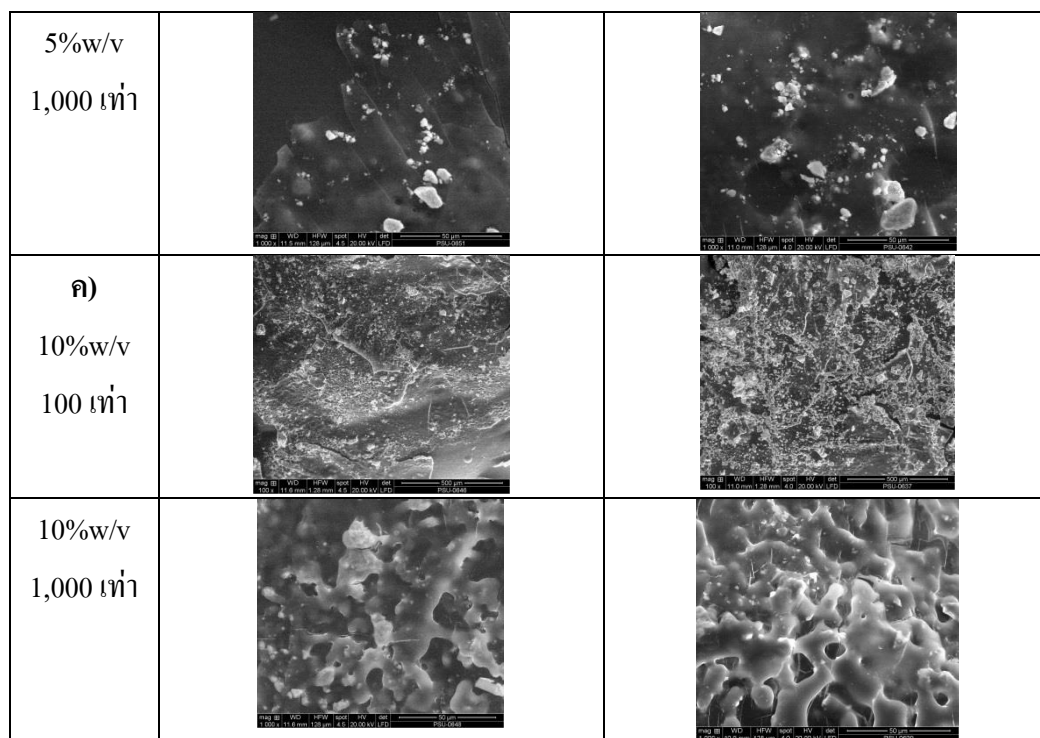
4.2 ผลการเคลือบผง $\text{TiO}_2/3\text{SnO}_2/0.5\text{Fe}^{3+}$ บนวัสดุกันกระแทกด้วยวิธีสเปรย์

จากผลการทดสอบการเคลือบ $\text{TiO}_2/3\text{SnO}_2/0.5\text{Fe}^{3+}$ slurry เคลือบบนวัสดุกันกระแทก โดยนำผงซึ่งมีลักษณะค่อนข้างกลมเกาะตัวกันเป็นก้อนมาทำให้แขวนลอยในเอทิลแอลกอฮอล์ในอัตราส่วน 1%w/v, 5%w/v และ 10%w/v เพื่อหาสัดส่วนที่เหมาะสมในการเคลือบวัสดุกันกระแทก บางโดยนำวัสดุกันกระแทกที่เคลือบแล้วไปตรวจลักษณะพื้นผิว และความสม่ำเสมอของผงที่กระจายตัวบนพื้นผิวของวัสดุกันกระแทก บางด้วยเครื่อง SEM ดังแสดงในรูปที่ 4.2 ผลที่ได้คือ เมื่อ

ใช้ผง $\text{TiO}_2/3\text{SnO}_2/0.5\text{Fe}^{3+}$ ในสัดส่วน 1%w/v เคลือบลงบนวัสดุกันกระแทก ทำให้ได้ผงกระจายตัวบนวัสดุกันกระแทก แบบเบาบางมากทั้งการเคลือบแบบชั้นเดียวและ 2 ชั้น ดังรูปที่ 4.2 ก) และเมื่อใช้ผง $\text{TiO}_2/3\text{SnO}_2/0.5\text{Fe}^{3+}$ ในสัดส่วน 5%w/v เคลือบลงบนวัสดุกันกระแทก ด้วยความหนา 1 ชั้นทำให้ได้ผงกระจายตัวบนฟิล์มอย่างสม่ำเสมอ แต่ปริมาณของผงน้อยเกินไป และเมื่อทำการเคลือบทับลงไปอีกชั้นเป็น 2 ชั้นในการเคลือบทำให้ได้วัสดุกันกระแทก ที่มีผงกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอและมีปริมาณผงที่เหมาะสมดังรูปที่ 4.2 ข) ส่วนการเคลือบโดยใช้ผง $\text{TiO}_2/3\text{SnO}_2/0.5\text{Fe}^{3+}$ ในสัดส่วน 10%w/v เคลือบลงบนวัสดุกันกระแทก ด้วยความหนา 1 ชั้นทำให้ได้วัสดุกันกระแทก ที่มีผงกระจายตัวเป็นไม่สม่ำเสมอบางบริเวณหนาแต่บางบริเวณบาง แต่เมื่อเคลือบด้วยความหนา 2 ชั้นจะเห็นได้ว่าผงจะเกาะตัวกันเป็นก้อนๆในลักษณะที่ซ้อนทับกันดังรูปที่ 4.2 ค) ซึ่งทำให้สิ้นเปลืองผง

ตารางที่ 4-5 ผลลัพธ์การทดลองเคลือบผง $\text{TiO}_2/3\text{SnO}_2/0.5\text{Fe}^{3+}$ บนวัสดุกันกระแทกด้วยวิธีสเปรย์

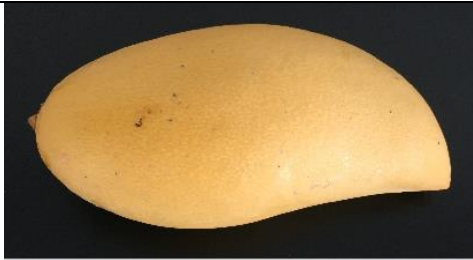
ตัวอย่าง/ กำลังขยาย	จำนวนชั้นความหนาฟิล์ม	
	1ชั้น	2ชั้น
ก) 1%w/v -- 100 เท่า		
1%w/v 1,000 เท่า		
ข) 5%w/v 100 เท่า		



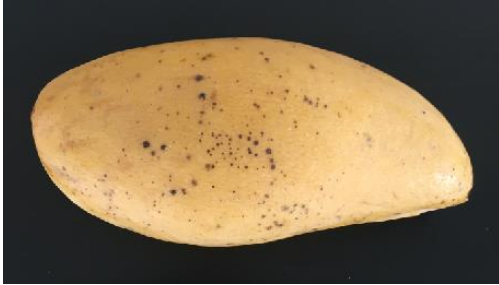
รูปที่ 4.3 ภาพจาก SEM ของวัสดุกันกระแทกที่เคลือบด้วยผง $\text{TiO}_2/3\text{SnO}_2/0.5\text{Fe}^{3+}$

4.3 ผลการทดสอบการยืดอายุของมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองด้วยวัสดุกันกระแทกที่เคลือบด้วยผงที่สังเคราะห์ได้

จากการทดสอบการยืดอายุมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองด้วยวัสดุกันกระแทกที่เคลือบด้วย slurry ของผง $\text{TiO}_2/3\text{SnO}_2/0.5\text{Fe}^{3+}$ และวัสดุกันกระแทกที่ไม่ได้เคลือบ จากการทดลองทำให้พบความแตกต่างได้อย่างชัดเจน คือ มะม่วงน้ำดอกไม้สีทองที่ห่อด้วยวัสดุกันกระแทกที่เคลือบด้วย slurry ของผง $\text{TiO}_2/3\text{SnO}_2/0.5\text{Fe}^{3+}$ สามารถยืดอายุมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองได้นานถึง 13 วันและลักษณะมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองในวันที่ 13 คือ มะม่วงน้ำดอกไม้สีทองที่ห่อด้วยวัสดุกันกระแทกที่เคลือบด้วยผง $\text{TiO}_2/3\text{SnO}_2/0.5\text{Fe}^{3+}$ เริ่มมีลักษณะผิวเหี่ยวเนื่องจากมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองเกิดการสูญเสียน้ำ สำหรับมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองที่ยืดอายุด้วยวัสดุกันกระแทกที่ไม่ได้เคลือบเริ่มมีจุดดำๆ ขึ้นตั้งแต่วันที่ 6 ของการทดลอง และจุดสีน้ำตาลดำเริ่มมีปริมาณมากขึ้นเรื่อยๆ ดังรูปที่ 4.4

จำนวนวัน	ฟิล์มที่ไม่เคลือบ	ฟิล์มที่เคลือบ $\text{TiO}_2/3\text{SnO}_2/0.5\text{Fe}^{3+}$
เริ่ม		
6		
7		
8		
9		

รูปที่ 4.4 ผลการทดสอบการยืดอายุของมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองด้วยวัสดุกันกระแทกที่เคลือบด้วย slurry ของผง $\text{TiO}_2/3\text{SnO}_2/0.5\text{Fe}^{3+}$ และวัสดุกันกระแทกที่ไม่ได้เคลือบ แสดงให้เห็นลักษณะการเปลี่ยนแปลงของข้าวโพดที่เวลาต่างๆ

จำนวนวัน	ฟิล์มที่ไม่เคลือบ	ฟิล์มที่เคลือบ $\text{TiO}_2/3\text{SnO}_2/0.5\text{Fe}^{3+}$
10		
11		
12		
13		

รูปที่ 4.4 (ต่อ) ผลการทดสอบการยืดอายุของมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองด้วยวัสดุกันกระแทกที่เคลือบด้วย slurry ของผง $\text{TiO}_2/3\text{SnO}_2/0.5\text{Fe}^{3+}$ และวัสดุกันกระแทกที่ไม่ได้เคลือบ แสดงให้เห็นลักษณะการเปลี่ยนแปลงของข้าวโพดที่เวลาต่างๆ

บทที่ 5

บทสรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 บทสรุป

การวิจัยนี้ได้พัฒนาสารเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ได้ไปด้วย $3\text{SnO}_2/0.5\text{Fe}^{3+}$ เพื่อยืดอายุมะม่วงน้ำดอกไม้สีทอง ซึ่งพบว่ามีอิทธิพลต่างๆ ที่มีผลต่อสมบัติของสารเคลือบที่ได้จากการสังเคราะห์ ดังนี้

5.1.1 อิทธิพลของอุณหภูมิ

อุณหภูมิในการเผามีอิทธิพลต่อการเกิดเฟสต่างๆ ของฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ เฟสอะนาเทสเกิดที่อุณหภูมิในช่วง $300 - 500\text{ }^{\circ}\text{C}$ และเกิดเฟสผสมระหว่างอะนาเทส และรูไทล์ ที่อุณหภูมิ $600\text{ }^{\circ}\text{C}$

อุณหภูมิในการเผาที่เหมาะสมที่ทำให้ได้ขนาดอนุภาคเฉลี่ยเล็กที่สุด คือ $400\text{ }^{\circ}\text{C}$ และ $600\text{ }^{\circ}\text{C}$

อุณหภูมิในการเผาผงที่ $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ และ $400\text{ }^{\circ}\text{C}$ ให้ผลประสิทธิภาพปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกสูงกว่าที่ $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ และอุณหภูมิ $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ เพราะความเป็นผลึกของเฟสอะนาเทสมีความสมบูรณ์โดยเฉพาะที่ $400\text{ }^{\circ}\text{C}$

5.1.2 ผลของวัสดุกันกระแทกต่อการยืดอายุมะม่วงน้ำดอกไม้สีทอง

ฟิล์มที่เคลือบด้วยผง $\text{TiO}_2/3\text{SnO}_2/0.5\text{Fe}^{3+}$ ภายใต้แสงฟลูออเรสเซนซ์ ความเข้มแสง 10 วัตต์ สามารถยืดอายุมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองได้เพิ่มขึ้นจาก 6 วันเป็น 13 วัน หรือยืดอายุมะม่วงน้ำดอกไม้ได้ประมาณ 2 เท่า เมื่อเทียบกับวัสดุกันกระแทกที่ไม่ได้เคลือบ

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 การเคลือบโซลบนชิ้นงานต้องทำในห้องที่ปิดมิดชิดไม่มีลมพัด เนื่องจากลมทำให้ผิวชิ้นงานที่เคลือบไม่สม่ำเสมอ

5.2.2 ควรจะมีการทดสอบการฆ่าเชื้อราและแบคทีเรียที่เป็นสาเหตุของการเน่าเสียของมะม่วงน้ำดอกไม้ โดยการทดสอบผงที่สังเคราะห์ได้กับเชื้อโดยตรงในห้องทดลองทางจุลชีววิทยา

5.2.3 ในการทดสอบการยืดอายุของผักและผลไม้ ควรจะทำการทดสอบกับผัก และผลไม้ชนิดอื่นด้วย เพื่อสามารถประยุกต์ใช้งานได้กว้างขึ้น

บรรณานุกรม

- เล็ก สีคง. (2547). *วัสดุวิศวกรรมและอุตสาหกรรม*, หน่วยโสตทัศนศึกษา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์, สงขลา.
- Brinker, C.J., and Scherer, G.W. (1990). *Sol-Gel Science - The Physics and Chemistry of Sol-Gel Processing*, Academic Press, New York, pp.
- Yosry, A. Attia. (1993). *Sol-gel Processing and Applications*, New York, pp.
- Benabbou, A.K., Derriche, Z., Felix, C., Lejeune, P., and Guillard, C. (2007). "Photocatalytic inactivation *Escherichia coli* effect of concentration of TiO_2 and microorganism, nature and intensity of UV irradiation." *Applied Catalysis B: Environmental*, 76, 257-263.
- Blake, D.M., Maness, P.C., Huang, Z., Wolfrum, E.J., Huang, J., and Jacoby, W.A. (1999). "Application of the photocatalytic chemistry of titanium dioxide to disinfection and the killing of cancer cells." *Separation and Purification Methods*, 28(1), 1-5.
- Chai, S.Y., Kim, Y.S., and Lee, W.I. (2006). "Photocatalytic property of TiO_2 loaded with SnO_2 nanoparticles." *Journal of Electroceram*, 17, 323-326.
- Chatterjee, S. (2008). "Titania-germanium nanocomposite as a photovoltaic material." *Solar Energy*, 82, 95-99.
- Cheng, P., Li, W., Zhou, T., Jin, Y., and Gu, M. (2004). "Physical and photocatalytic properties of zinc ferrite doped titania under visible light irradiation." *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, 168, 97-101.
- Cho, M., Chung, H., Choi, W., and Yoon, J. (2004). "Linear correlation between inactivation of *E. coli* and OH radical concentration in TiO_2 photocatalytic disinfection." *Water Research*, 38 (4): 1069-1077.
- Dadjour, M.F., Ogino, C., Matsumura, S., and Shimizu, N. (2006). "Disinfection of *Legionella Pneumophila* by ultrasonic treatment with TiO_2 ." *Water Research*, 40, 1137-1142.
- Duangkamon, V., Chamorn, C., and Sadao, M. (2008) "Preparation of well-dispersed TiO_2 slurry for oriented-polypropylene film (OPP) coating" The 2th Thailand Nanotechnology Conference Nanomaterials for Health, Energy and Environment, Phuket Graceland Resort & Spa Patong, Phuket, Thailand, 13th-15th August 2008.

- Duffy, E.F., Touati, F.A.I., Kehoe, S.C., McLoughlin, O.A., Gill, L.W., Gernjak, W., Oller, I., Maldonado, M.I., Malato, S., Cassidy, J., Reed, R.H., and McGuigan, K.G. (2004). Anovel TiO_2 -assisted solar photocatalytic batch-process disinfection reactor for the treatment of biological and chemical contaminants in domestic drinking water in developing countries. *Solar Energy*. 77 (5) ; 649–655.
- Evans, P., and Sheel, D.W. (2007). “Photoactive and antibacterial TiO_2 thin films on stainless steel” *Surface & coatings Technology*, 201, 9319-9324.
- Fujishima, A., Hashimoto, K., and Watanabe, T. (1999). TiO_2 Photocatalysis Fundamentals and Applications. Best Knowledge Center (BKC), Tokyo, Japan.
- Fujishima, A., Rao, T.N., and Tryk, D.A., (2000). Titanium dioxide photocatalysis. *Journal of Photochemistry and Photobiology C: Photochemistry Reviews* 1 (1), 1-21.
- Gopal, K., Shankar, K., Paulose, M., Oommen K. Varghese., and Craig A. Grimes. (2006). “Use of highly-ordered TiO_2 nanotube arrays in dye-sensitized solar cells.” *Nano Letters*, 6(2), 215-218.
- Guan, K., Lu, B., and Yin, Y. (2003). “Enhanced effect and mechanism of SiO_2 addition in super hydrophilic property of TiO_2 films.” *Surface and Coatings Technology*, 173, 219–223.
- Harizanov, O., Ivnova, T., and Harixanova, A. (2001). “Study of sol –gel TiO_2 and TiO_2 - MnO obtained from a poertized solution.” *Material Letter*, 49, 165-171.
- Hong, S. S., Lee, M. S., Park, S. S., and Lee, G. D. (2003). “Synthesis of nanosized $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ particles in the microemulsion and their photocatalytic activity on the decomposition of *p*-nitrophenol.” *Catalysis Today*, 87, 99–105.
- Hou, L.R., Yuan, C.Z., and Peng, Y. (2007). “Synthesis and photocatalytic property of $\text{SnO}_2/\text{TiO}_2$ nanotubes composites.” *Journal of Hazardous Materials*, B139, 310-315.
- Huang, Z., Maness, P.C., Blake, D.M., Wolfrum, E.J., Smolinski, S.L., and Jacoby, W.A., (2000). Bactericidal mode of titanium dioxide photocatalysis. *Journal of Photochemistry and Photobiology. A, Chemistry*. 130 (2–3) : 163–170.
- Hubbell, D.A., and Hubbell, M.C. (2005). “environmental coatings assemblies,” U. S. Patent 0159309, July 21, 2005.

- Kanai, N., Nuida, T., Ueta, K., Hashimoto, K., Watanabe, T., and Ohsaki, H. (2004). "Photocatalytic efficiency of $\text{TiO}_2/\text{SnO}_2$ thin film stacks prepared by DC magnetron sputtering." *Vacuum*, 74, 723-727.
- Kim, K.D., Han, D.N., Lee, J.B., and Kim, H.T. (2005). "Formation and characterization of Ag deposited TiO_2 nanoparticles by chemical reduction method." *Scripta Materialia*, 54, 143-146.
- Kim, S.Y., Chang, T.S., Lee, D.K., and Shin, C.H. (2004). "Photocatalytic decomposition of methylene blue over nanosized titania partical." *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 2, 194-201.
- Koide, S. and Nonami, T. (2007). "Disinfecting efficacy of a plastic covered with photocatalyst for postharvest." *Food Control*, 18, 1-4.
- Kuhn, K.P., Chaberny, I.F., Massholder, K., Stickler, M., Benz, V.W., Sonntag, H.G., and Erdinger, L., (2003). Disinfection of surfaces by photocatalytic oxidation with titanium dioxide and UVA light. *Chemosphere*. 53 (1), 71-77.
- Kwon, C.H., Kim, J. H., Jung, I. S., Shin, H., and Yoon, K.H. (2003). "Preparation and characterization of $\text{TiO}_2\text{-SiO}_2$ nano-composite thin films." *Ceramics International*, 29, 851-856.
- Lee, M., Lee, G.D., and Hong, S.S. (2003). "A sythesis of titanium dioxides prepare by reverse microemulsion method using nonionic surfactanta with different hydrophilic group and their photocatalytic activity." *Industy Engineering chemistry*, 9(4), 412-418.
- Lee, Y.C., Hong, Lee, Y., H.Y., Kim, H., Young, Jung, J., Ko, K.H., Jung, H.S., and Hong, K.S. (2003). "Photocatalysis and hydrophilicity of doped TiO_2 thin films." *Journal of Colloid and Interface Science*, 267, 127-131.
- Lek Sikong, Budsabakorn Kongreong, Duangporn Kantachote and Weerawan Sutthisripok "Photocatalytic Activity and Antibacterial Behavior of Fe^{3+} -Doped $\text{TiO}_2/\text{SnO}_2$ Nanoparticles" *Energy Research Journal* 1 (2) : 120-125, 2010, ISSN 1949-0151.
- Lek Sikong, Budsabakorn Kongreong, Duangporn Kantachote and Weerawan Sutthisripok "Inactivation of *Salmonella Typhi* using Fe^{3+} Doped $\text{TiO}_2/3\text{SnO}_2$ Photocatalytic powders and films" *Journal of Nano Research* Vol. 12 (2010) pp 89-97.

- Li, Y., Li, X., Li, J., and Yin, J. (2005). "TiO₂-coated active carbon composites with increased photocatalytic activity prepared by a properly controlled sol-gel method." *Materials Letters*, 59, 2659–2663.
- Liu, Q., Wu, X., Wang, B., and Liu, Q. (2002). "Preparation and super-hydrophilic properties of TiO₂/SnO₂ composite thin film." *Materials Research Bulletin*, 37, 2255-2262.
- Liu, Z., Zhou, Y., Li, Z., Wang, Y., and Ge, C. (2007). "Enhanced photocatalytic activity of (La, N) co doped TiO₂ by TiCl₄ sol-gel autoigniting synthesis." *Journal of University of Science and Technology Beijing*, 14(6), 552-557.
- Maeda, M., and Yamasaki, S. (2005). "Effect of silica addition on crystallinity and photo-induced hydrophilicity of titania-silica mixed films prepared by sol-gel process." *Thin Solid Films*, 483, 102–106.
- Mao, L., Li, Q., Dang, H., and Zhang, Z. (2005). "Synthesis of nanocrystalline TiO₂ with high photoactivity and large specific surface area by sol-gel method." *Materials Research Bulletin*, 40, 201–208.
- Maness, P.C., Smolinski, S., Blake, D.M., Huang, Z., Wolfrum, E.J., and Jacoby, W.A. (1999). Bactericidal activity of photocatalytic TiO₂ reaction: toward an understanding of its killing mechanism. *Applied Environmental Microbiology*. 65 (9) : 4094–4098.
- Matsunaga, T., Tomoda, R., Nakajima, T., and Wake, H. (1985). Photoelectrochemical sterilization of microbial cells by semiconductor powders. *FEMS Microbiology Letters*. 29: 211-214.
- Misook Kang, M., Choi, D.H., and Choung, S.J. (2005). "Methyl orange removal in a liquid photo system with nanometer sized V/TiO₂ particle." *Industrial and Engineering Chemistry*, 2, 240-247.
- Pal, A., Pehkonen, S.O., Yu, L.E., and Ray, M.B. (2000). "Photocatalytic inactivation of Gram positive and Gram-negatives bacterial using fluorescent light." *Journal of Photochemistry and photobiology A. Chemistry*, 126, 335-341.
- Rao, A.R., and Dutta, V. (2007). "Low-temperature synthesis of TiO₂ nanoparticles and preparation of TiO₂ thin films by spray deposition." *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 91, 1075– 1080.

- Sayılkan, F., Asiltürk, M., Tatar, P., Kiraz, N., Arpac, E., and Sayılkan, H. (2007). "Photocatalytic performance of Sn-doped TiO₂ nanostructured mono and double layer thin films for malachite green dye degradation under UV and vis-lights." *Journal of Hazardous Materials*, 144, 140–146.
- 4 Sheng, Q., Yuan, S., Zhang, J., and Chen, F. (2006). "Synthesis of mesoporous titania with high photocatalytic activity by nanocrystalline particle assembly." *Microporous and Mesoporous Materials*, 177 - 184.
- Sichel, C., Tello, J., de Cara, M., and Fernandez-Ibanez, P. (2007). "Effect of UV solar photocatalytic disinfection of agricultural pathogenic fungi: *Fusarium* species." *Applied Catalysis B: Environmental*, 74, 152-160.
- Sokmen, M., Degerli, S., and Aslan, A. (2008). "Photocatalytic disinfection of *Giardia intestinalis* and *Acanthamoeba castellanii* cysts in water." *Experimental parasitology*, doi:10.1016/j.exppara.12.014.
- Wang, Y.M., Liu, S.W., Lü, M.K., Wang, S.F., Gu, F., Gai, X.Z., Cui, X.P., and Pan, J. (2004). "Preparation and photocatalytic properties of Zr⁴⁺-doped TiO₂ nanocrystals." *Journal of Molecular Catalysis A: Chemical*, 215, 137–142.
- Wang, C., Xu, B.Q., Wang, X., and Zhao, J. 2005. "Preparation and photocatalytic activity of ZnO/TiO₂/SnO₂ mixture." *Journal of Solid State Chemistry*, 178, 3500 -3506.
- Wang, W.H. (2004). (Birch Stewart Kolasch & Birch), "Fluorescent lamp device capable of cleaning air." U.S. Patent 0226813, November 18, 2004.
- Yang, J., Li, D., Wang, X., Yang, X., and Lu, L. (2002). "Rapid synthesis of nanocrystalline TiO₂/SnO₂ binary oxides and their photoinduced decomposition of methyl orange." *Journal of Solid State Chemistry*, 165, 193-198.
- Yanagisawa, K., and Ovenstone, J. (1999). "Crystallization of anatase from amorphous titania using the hydrothermal technique: effects of starting material and temperature." *Journal of Physical Chemistry B*, 103 (37), 7781 -7787.
- Zhang, Q., Gao, L., and Guo J. (2000). "Effects of calcination on the photocatalytic properties of nanosized TiO₂ powders prepared by TiCl₄ hydrolysis." *Applied Catalysis B: Environmental*, 26(9), 207-215.

- Zhou, M., Yu, J., Liu, S., Zhai, P., and Jiang, L. (2007). "Effects of calcination temperatures on photocatalytic activity of $\text{SnO}_2/\text{TiO}_2$ composite films prepared by an EPD method." doi:10.1016/j.jhazmat.2007.11.021.
- Zhao, L., Han, M., and Lian, J. (2007). "Photocatalytic activity of TiO_2 films with mixed anatase and rutile structures prepared by pulsed laser deposition." doi:10.1016/j.tsf.2007.10.102
- Zheng, J., Yu, H., Li, X., and Shang. (2007). "Enhanced photocatalytic activity of TiO_2 nano structured thin film with a silver hierarchical configuration." *Applied Surface Science*, 254, 1630 - 1635.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก. การคำนวณหาขนาดผลึกและปริมาณเฟสของไทเทเนียมไดออกไซด์

ตารางก.1 ข้อมูลการวิเคราะห์ที่ได้จากเครื่อง XRD ของผง $\text{TiO}_2/3\text{SnO}_2/0.5\text{Fe}^{3+}$ ที่อุณหภูมิ 300- 500 °C

อุณหภูมิ (°C)	Pos. [2θ] 2θ	cosθ	FWHM [2θ]	β (เรเดียน)
300	25.4368	0.9885	0.4920	8.587×10^{-3}
400	25.4324	0.9888	0.3444	6.011×10^{-3}
500	25.3207	0.9956	0.5412	9.446×10^{-3}

ตารางก.2 ข้อมูลการวิเคราะห์ที่ได้จากเครื่อง XRD ของผง $\text{TiO}_2/3\text{SnO}_2/0.5\text{Fe}^{3+}$ ที่อุณหภูมิ 600 °C (เฟสอะนาทาส)

Pos. [2θ] 2θ	cosθ	FWHM [2θ]	β (เรเดียน)	Background	Height
25.3323	0.9950	0.3936	6.869×10^{-3}	107.00	1740.48

ตารางก.3 ข้อมูลการวิเคราะห์ที่ได้จากเครื่อง XRD ของผงที่อุณหภูมิ 600 °C (เฟสรูไทล์)

Pos. [2θ] 2θ	cosθ	FWHM [2θ]	β (เรเดียน)	Background	Height
27.3477	0.4469	0.1968	7.799×10^{-3}	98.00	173.86

การคำนวณหาขนาดผลึก (Crystallite size) จาก Scherrer' equation โดยใช้ข้อมูลจากตาราง ก.

$$t = \frac{0.9\lambda}{\beta \cos \theta}$$

- เมื่อ
- t คือ ขนาดของผลึก (nm)
 - λ คือ ความยาวคลื่นของรังสีเอ็กซ์ ($\text{CuK}\alpha = 0.15406 \text{ nm}$)
 - β คือ Line width at half maximum height (เรเดียน)
 - θ คือ มุมสะท้อน (องศา)

ตัวอย่างการคำนวณของขนาดผลึกของผง $\text{TiO}_2/3\text{SnO}_2/0.5\text{Fe}^{3+}$ ที่อุณหภูมิ 600 °C

$$\beta = \frac{\text{FWHM} \times \pi}{180}$$

$$\beta = \frac{0.1968 \times \pi}{180}$$

$$\beta = 7.728 \times 10^{-3} \text{ เรเดียน}$$

$$t = \frac{0.9 \times 0.15406}{7.728 \times 10^{-3} \times 0.9991}$$

$$t = 17.96 \text{ nm}$$

การคำนวณหาร้อยละของเฟสที่เกิดขึ้นจากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD โดยใช้สมการ

$$W_a = k_a A_a / (k_a A_a + A_r + k_b A_b)$$

$$W_r = A_r / (k_a A_a + A_r + k_b A_b)$$

$$W_b = k_b A_b / (k_a A_a + A_r + k_b A_b)$$

เมื่อ	W_a	คือ สัดส่วนน้ำหนักของเฟส อะนาเทส
	W_r	คือสัดส่วนน้ำหนักของเฟส รูไทล์
	W_b	คือสัดส่วนน้ำหนักของเฟส บรูไคต์
	A_a	คือความเข้มของพีคอะนาเทส (101) (หักลบจากค่า background)
	A_r	คือความเข้มของพีครูไทล์ (110) (หักลบจากค่า background)
	A_b	ความเข้มของพีคบรูไคต์ (121)
	k_b	มีค่าเท่ากับ 0.886
	k_a	มีค่าเท่ากับ 2.721

ตัวอย่างการคำนวณหาร้อยละเฟสของผง $\text{TiO}_2/3\text{SnO}_2/0.5\text{Fe}^{3+}$ ที่อุณหภูมิ 600 °C

$$W_a = k_a A_a / (k_a A_a + A_r + k_b A_b)$$

$$W_a = 2.721 \times 1633.48 / (2.721 \times 1633.48 + 75.86)$$

$$W_a = 0.9832$$

$$W_r = A_r / (k_a A_a + A_r + k_b A_b)$$

$$W_r = 75.86 / (2.721 \times 1633.48 + 75.86)$$

$$W_r = 0.0168$$

$$W_{\text{total}} = 0.9832 + 0.0168 = 1$$

Content of anatase = 98.32 %

Content of rutile = 1.68%

ภาคผนวก ข. ตารางแสดงความเข้มข้นเฉลี่ยของสารละลายเมทิลีนบลูที่รับรังสียูวีในเวลาต่างๆ

ความเข้มข้นของสารละลายเมทิลีนบลูเริ่มต้น (C_0) เท่ากับ 1×10^{-5} โมลาร์ และความเข้มข้นของสารละลายเมทิลีนบลูที่เวลาได้รับรังสียูวี (C)

ตาราง ข. ความเข้มข้นของสารละลายเมทิลีนบลูที่รับรังสียูวีในเวลาต่างๆ ของผงไทเทเนียมไดออกไซด์

อุณหภูมิ ($^{\circ}\text{C}$)	ชั่วโมง	ชั่วโมง	ชั่วโมง	4 ชั่วโมง
	$C \times 10^{-5}$ (M)	$C \times 10^{-5}$ (M)	$C \times 10^{-5}$ (M)	$C \times 10^{-5}$ (M)
TiO_2				
300 (C/C_0)	0.742	0.529	0.473	0.414
400 (C/C_0)	0.828	0.761	0.648	0.343
500 (C/C_0)	0.740	0.537	0.418	0.141
600 (C/C_0)	0.633	0.428	0.235	0.107
$\text{TiO}_2/3\text{SnO}_2/0.5\text{Fe}^{3+}$				
300 (C/C_0)	0.675	0.434	0.377	0.272
400 (C/C_0)	0.573	0.305	0.204	0.013
500 (C/C_0)	0.752	0.691	0.557	0.373
600 (C/C_0)	0.821	0.747	0.624	0.412

ประวัติคณะผู้วิจัย

1. ชื่อ-นามสกุล นางสาวบุษบากร คงเรือง
2. หมายเลขบัตรประจำตัวประชาชน 393800075982
3. ตำแหน่งปัจจุบัน พนักงานมหาวิทยาลัย
4. ตำแหน่งทางวิชาการ -
5. หน่วยงานและสถานที่อยู่ที่ติดต่อได้สะดวก
สาขาวิชาเทคโนโลยีการผลิต คณะเทคโนโลยีการเกษตรและเทคโนโลยี
อุตสาหกรรม
มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบูรณ์ อ.เมือง จ. เพชรบูรณ์ 76000
โทรศัพท์ 056-717164, 083-3996938
Email : tao_bud@hotmail.com
6. ประวัติการศึกษา
วศม. (วิศวกรรมวัสดุ)
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
7. สาขาวิชาการที่มีความชำนาญพิเศษ
งานด้านวิศวกรรมวัสดุ วัสดุนาโน โทเทเนียมไดออกไซด์

ประวัติคณะผู้วิจัย

1. ชื่อ-นามสกุล ว่าที่ ร.ต. ศักดิ์ศิริชัย ศรีสวัสดิ์
2. หมายเลขบัตรประจำตัวประชาชน
3. ตำแหน่งปัจจุบัน พนักงานมหาวิทยาลัย
4. ตำแหน่งทางวิชาการ -
5. หน่วยงานและสถานที่อยู่ติดต่อได้สะดวก
สาขาวิชาเทคโนโลยีการผลิต คณะเทคโนโลยีการเกษตรและเทคโนโลยี
อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบูรณ์ จังหวัดเพชรบูรณ์
โทรศัพท์ 056 –717164, 056-717151 ต่อ 1608, 1609
แฟกซ์ 056 –717164 โทรศัพท์ 0-8002-8888-3,
E-mail: Seksunsek@Hotmail.com
6. ประวัติการศึกษา
คอม. (เทคโนโลยีอุตสาหกรรม)
มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม
7. สาขาวิชาการที่มีความชำนาญพิเศษ

