



แม่พิมพ์เซรามิก/แก้วที่ทำความสะอาดตัวเองได้สำหรับผลิตภัณฑ์ยางแบบจุ่ม
Self Cleaning Ceramic/Glass Formers for Dipped Rubber Products

มาหามะสุไฮมี มะแซ
Mahamasuhaimi Masae

วิทยานิพนธ์นี้สำหรับการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมวัสดุ
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

A Thesis Submitted in Fulfillment of the Requirements for the Degree of
Doctor of Engineering in Materials Engineering
Prince of Songkla University

2554

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

ชื่อวิทยานิพนธ์ แม่พิมพ์เซรามิก/แก้วที่ทำความสะอาดตัวเองได้สำหรับผลิตภัณฑ์ยางแบบจุ่ม
ผู้เขียน นายมาหามะสุโฮมิ มะแซ
สาขาวิชา วิศวกรรมวัสดุ

คณะกรรมการที่ปรึกษา

.....ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.เล็ก สีคง)

.....กรรมการ
(รองศาสตราจารย์กัลยาณี คุปตานนท์)

.....กรรมการ
(ดร.วิรัช ทวีปรีดา)

.....กรรมการ
(Prof.Dr.Fumio Saito)

คณะกรรมการสอบ

.....ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุฤกษ์ คงทอง)

.....กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.เล็ก สีคง)

.....กรรมการ
(รองศาสตราจารย์กัลยาณี คุปตานนท์)

.....กรรมการ
(ดร.วิรัช ทวีปรีดา)

.....กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุธรรม นิยมवास)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยรับ
การศึกษา ตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมวัสดุ

.....
(ศาสตราจารย์ ดร.อมรรัตน์ พงศ์ดารา)
คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

ชื่อวิทยานิพนธ์ แม่พิมพ์เซรามิก/แก้วที่ทำความสะอาดตัวเองได้สำหรับผลิตภัณฑ์ยางแบบจุ่ม
ผู้เขียน นายมาหามะสุโฮมี มะแซ
สาขาวิชา วิศวกรรมวัสดุ
ปีการศึกษา 2554

บทคัดย่อ

จุดประสงค์ของการศึกษานี้คือการพัฒนาผิวเคลือบแม่พิมพ์เซรามิก/แก้วที่ทำความสะอาดตัวเองได้สำหรับการนำไปใช้การจุ่มผลิตภัณฑ์ยาง โดยใช้สมบัติของปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกของไทเทเนียมไดออกไซด์ ได้ศึกษาอิทธิพลของสารได้ปได้แก่ นิกเกิล โบรอน และไนโตรเจน อุณหภูมิในการสังเคราะห์ 400, 500 และ 600°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง โดยการเตรียมฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ระดับผลึกนาโนด้วยวิธี โซล-เจล เคลือบบนวัสดุฐานที่เป็นแก้วและเซรามิก ศึกษาโครงสร้างของฟิล์มด้วย XRD วิเคราะห์ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของฟิล์มด้วย AFM และ SEM วิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีและโครงสร้างผลึกด้วยเทคนิค EDS, XPS, FT-IR และ FT-RAMAN Spectroscopy ศึกษาประสิทธิภาพของปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกในการย่อยสลายเมทิลีนบลูภายใต้รังสียูวีและแสงฟลูออเรสเซนซ์ ศึกษาสมบัติความเปียกน้ำวิเคราะห์ด้วยการวัดมุมสัมผัสของหยดน้ำที่หยดบนพื้นผิวชิ้นงานภายใต้รังสียูวีและบรรยากาศห้อง จากผลการทดลอง พบว่า การได้ป็นิกเกิลส่งผลต่อการเปลี่ยนเฟส ขนาดผลึกและแถบช่องพลังงาน ซึ่งขนาดผลึกของอะนาเทสจะมีขนาดเล็ก (15-22 นาโนเมตร) เมื่อได้ปปริมาณนิกเกิลในช่วง 1-3 เปอร์เซ็นต์โมล และจะมีขนาดผลึกที่ใหญ่ขึ้น (20-36 นาโนเมตร) เมื่อได้ปปริมาณนิกเกิลที่มากกว่า 3 เปอร์เซ็นต์โมล จากผลการทดลอง ประสิทธิภาพของปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกที่ดีที่สุดของฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ได้ปด้วยนิกเกิล โบรอนและ ไนโตรเจน พบว่าไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีตัวได้ปสองชนิด (3Ni/B/TiO_2) จะมีประสิทธิภาพดีกว่าตัวได้ปสามชนิด (4Ni/B/N/TiO_2) เนื่องจากมีขนาดผลึกเล็กกว่า สำหรับฟิล์มที่มีสมบัติการเปียกน้ำที่ดีที่สุดได้แก่ 2Ni/B/TiO_2 และ 3Ni/B/N/TiO_2 ซึ่งอุณหภูมิที่ใช้สังเคราะห์ฟิล์มช่วง 400-600°C ทำให้เกิดเฟสอะนาเทสเพียงอย่างเดียวและพบว่าอุณหภูมิที่เหมาะสมคือ 400°C

จากการศึกษาสมบัติการยึดเกาะของฟิล์มยางบนผิวเคลือบที่สังเคราะห์ โดยการศึกษามุมสัมผัสของหยดน้ำยางบนผิวเคลือบ พบว่าน้ำยางเกาะผิวเคลือบแม่พิมพ์ที่สังเคราะห์ได้ดีกว่าผิวแม่พิมพ์ที่ไม่ได้เคลือบ ดังนั้น จึงสามารถเพิ่มสมบัติเชิงกลของฟิล์มยาง (การต้านทานแรงดึง) ให้สูงขึ้นได้อย่างมีนัยสำคัญ (จาก 24 MPa เป็น 29 MPa) เนื่องจากฟิล์มยางที่ได้จากแม่พิมพ์ที่

เคลือบมีความสม่ำเสมอและมีรอยตำหนิน้อยจากผลของ AFM นอกจากนั้นผิวฟิล์มยางที่เตรียมยังเรียกว่าเดิม ในการศึกษาความคงทนของฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ที่สังเคราะห์ทดสอบโดยแม่พิมพ์ที่เคลือบมาใช้ซ้ำในการจุ่มน้ำยางเป็นจำนวน 30 ครั้ง พบว่าฟิล์มที่เคลือบมีเสถียรภาพโดยสามารถผลิตฟิล์มยางที่มีสมบัติการต้านแรงดึงคงที่

ในการทดสอบสมบัติการทำความสะอาดได้ง่ายหรือทำความสะอาดตัวเองได้นำแม่พิมพ์ที่ได้จุ่มน้ำยางและลอกฟิล์มยางออกแล้ว มาล้างด้วยระบบต่างๆปรากฏว่า แม่พิมพ์ที่เคลือบสารโฟโตแคตะลิสต์สามารถทำความสะอาดได้ง่ายและไม่จำเป็นต้องใช้สารช่วยจับตัวของน้ำยาง เนื่องจากผิวเคลือบแม่พิมพ์มีสมบัติจับน้ำยางดีขึ้น ซึ่งมีส่วนช่วยเพิ่มความเรียบของผิวและความแข็งแรงของฟิล์มยาง

Thesis Title Self-cleaning ceramic/glass formers for dipped rubber products

Author Mr. Mahamasuhaimee Masae

Major Program Materials Engineering

Academic Year 2011

Abstract

The objective of this study is to develop the self-cleaning coating film on ceramic/glass formers surface for dipped rubber products. Photocatalytic reaction and hydrophilic property of TiO₂ composite films were investigated. The Nickel (Ni) Boron (B) and Nitrogen (N) doped TiO₂ composite films were prepared by sol-gel and coated on glass and ceramic substrates by dipping methods. These composite thin films were calcined at the temperatures of 400, 500 and 600°C for 1 h. Phase formation of TiO₂ was characterized by X-ray diffraction (XRD). Morphology of TiO₂ composite films were observed by using atomic force microscopy (AFM) and scanning electron microscopy (SEM). The chemical composition and purity of the prepared films were analyzed by energy dispersive X-ray spectroscopy (EDX), X-ray photo electron spectroscopy (XPS), fourier transform infrared spectroscopy (FTIR) and fourier transform Raman spectroscopy (FT-Raman). The photoactivity of synthesized films was performed by means of degradation of methylene blue dye solution under UV and visible light irradiations. The hydrophilic property was measured in terms of a contact angle of water droplet on the films with and without the activation of UV irradiation. It was found that Ni doping seems to affect on TiO₂ phase, crystallinity of the anatase phase, crystallite size of the composite films and band gap energy of the catalysts, resulting in their photocatalytic reaction and hydrophilic property. The crystallinity of anatase increased with an increase in Ni content varied from 1-3 %mol but decreased (15-22 nm) with an increase (20-36 nm) in Ni content above 3 %mol. It was found that 3Ni/B/TiO₂ and 4Ni/B/N/TiO₂ film synthesized respectively from co-doped and tri-doped, having highest crystallinity and smallest crystallite size shows the highest of photocatalytic reaction while 2Ni/B/TiO₂ and 3Ni/B/N/TiO₂ film synthesized respectively from co-doped and tri-doped provides

the most hydrophilic effect. Only anatase phase was found at the calcination temperature ranges of 400-600°C and the optimum temperature is 400°C.

Contact angles of NR rubber latex droplets on coated films were also studied. It was found that coated former can improve more wet-ability than uncoated former. Therefore, this leads to enhancement of tensile strength of vulcanized NR natural rubber latex films (from 24 MPa to 29 MPa). The use of TiO₂ composite coatings rendered the latex surfaces to be much smoother. The stability of TiO₂ composite films adhere to former surface investigated in terms of the NR film tensile strength obtained from repetitive dip cycles was not found to be affected even after thirty dip cycles.

Self-cleaning test of formers was performed by washing them with different washing treatment processes. It was found that former coated with a photocatalyst can easily be cleaned and no coagulant required since TiO₂ composite coating film can improve the hydrophilicity of the former surface, leading to the enhancement of smoothness and stable tensile strength of vulcanized NR rubber latex film.

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	(3)
กิตติกรรมประกาศ	(7)
สารบัญ	(8)
รายการตาราง	(11)
รายการตารางภาคผนวก	(13)
รายการรูป	(16)
สัญลักษณ์และตัวย่อ	(22)
บทที่	
1. บทนำ	1
1.1 บทนำต้นเรื่อง	1
1.2 ทฤษฎีและหลักการ	10
1.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	21
1.4 วัตถุประสงค์ของโครงการ	41
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	42
1.6 ขอบเขตของการวิจัย	42
2. วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีวิจัย	44
2.1 วิธีการดำเนินการวิจัย	43
2.2 ขั้นตอนการวิจัย	43
2.3 การตรวจสอบคุณลักษณะสารเคลือบโฟโตแคตะลิสต์ และฟิล์มบาง	48
2.4 การทดสอบปฏิกิริยาของฟิล์มในการย่อยสลายสีของเมทิลีนบลู	50
2.5 การวัดมุมสัมผัสของหยดน้ำบนกระจกที่เคลือบด้วยฟิล์มบาง	53

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3. ผลและการอภิปรายผล	55
3.1 การสังเคราะห์และการตรวจคุณลักษณะ	55
3.1.1 การสังเคราะห์ฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์	55
3.1.2 การทดสอบปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกของฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์	57
3.2 การทดสอบสมบัติของฟิล์ม	58
3.2.1 การสังเคราะห์ฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ได้ปนิกเกิลและโบรอน (Ni/B/TiO ₂)	58
3.2.2 การสังเคราะห์ฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ได้ปนิกเกิลโบรอนและไนโตรเจน(Ni/B/N/TiO ₂)	70
3.2.3 ผลการวิเคราะห์ด้วย FTIR, FT-RAMAN, EDX และ XPS	84
3.2.4 ลักษณะพื้นผิวของฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ที่วิเคราะห์จาก SEM และ AFM	94
3.2.5 ผลการทดสอบความแข็งแรงของการยึดติด (Adhesion test) ของฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์	98
3.3 การประยุกต์ใช้ฟิล์ม เตรียมฟิล์มยาง และทดสอบสมบัติการทำความสะอาดแม่พิมพ์	99
3.3.1 มุมสัมผัสของหยดน้ำยางบนฟิล์มที่ได้จากแม่พิมพ์เคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์	99
3.3.2 ลักษณะพื้นผิวของฟิล์มยางที่ได้จากแม่พิมพ์เคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์	100
3.3.3 ผลการทดสอบสมบัติทางกายภาพของฟิล์มยางที่ได้จากแม่พิมพ์เคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์	104
3.3.4 ผลการทดสอบแรงดึงของฟิล์มยางที่ได้จากแม่พิมพ์เคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์	106

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.3.5 ผลการทำความสะอาดตัวเองของแม่พิมพ์	109
4. บทสรุปและข้อเสนอแนะ	110
4.1 สรุปผล	110
4.2 ข้อเสนอแนะ	111
บรรณานุกรม	112
ภาคผนวก	119
ภาคผนวก ก	120
ภาคผนวก ข	127
ภาคผนวก ค	134
การตีพิมพ์เผยแพร่ผลงาน	137
ประวัติผู้เขียน	148

รายการตาราง

ตาราง		หน้า
1.1	ความหนาของถุงมือยางตามมาตรฐานต่างๆ	6
1.2	ตัวอย่างน้ำยางที่ผสมสารเคมีเพื่อใช้ในการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ต่างๆ	7
1.3	ลักษณะของไนโตรเจนที่เข้าไปในแลททิซของ TiO_2 (Asahi et al., 2007)	25
1.4	แสดงค่า Band gap energy ของเซมิคอนดักเตอร์ชนิดต่างๆ	29
2.1	สูตรน้ำยางที่ใช้ในการจุ่ม	47
3.1	ขนาดผลึกและปริมาณเฟสของฟิล์ม TiO_2 เคลือบแม่พิมพ์เผาที่อุณหภูมิต่างๆ	57
3.2	ขนาดผลึกของฟิล์ม TiO_2 เผาที่อุณหภูมิต่างๆ	60
3.3	เปรียบเทียบค่าช่องว่างแถบพลังงาน (Band gap energy) ของผง Ni/B/T ที่อุณหภูมิเผา 400, 500 และ 600 °C	67
3.4	ค่ามุมสัมผัสเมื่อทดสอบด้วยหยดน้ำ ของฟิล์มที่อุณหภูมิเผาต่างๆ ที่เวลา 25 นาที	70
3.5	ขนาดผลึกของฟิล์ม Ni/B/N/T เผาที่อุณหภูมิต่างๆ	72
3.6	ค่าช่องว่างแถบพลังงาน (Band gap energy) ของผง Ni/B/N/T ที่ อุณหภูมิเผา 400, 500 และ 600 °C	80
3.7	ค่ามุมสัมผัสเมื่อทดสอบด้วยหยดน้ำของฟิล์มที่ อุณหภูมิเผาต่างๆ ที่เวลา 15 นาที	83
3.8	ปริมาณธาตุที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วย EDX	90
3.9	คำอธิบายสัญลักษณ์จากรูปที่ 3.29 ข และช่วงพลังงานที่พบที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วย XPS	91
3.10	ปริมาณธาตุที่พบจากการวิเคราะห์ด้วย XPS	94
3.11	ความขรุขระและความหนาของชั้นฟิล์มสังเคราะห์ด้วยอุณหภูมิ 400 °C วิเคราะห์ด้วย AFM	98
3.12	แรงดึงที่ทำให้แม่พิมพ์กระจกแตกเนื่องจากการยึดเกาะของฟิล์มด้วยอุณหภูมิ 400 °C วิเคราะห์ด้วยหลักการ (Pull of test)	99
3.13	ค่ามุมสัมผัสของหยดน้ำยางที่หยดบนแม่พิมพ์ที่เวลาต่างๆ กัน	99

รายการตาราง (ต่อ)

ตาราง		หน้า
3.14	ค่าความขรุขระของฟิล์มยางที่วิเคราะห์ด้วย AFM ที่อุณหภูมิในการอบยางต่างๆ กัน	101
3.15	วิเคราะห์หาปริมาณธาตุต่างๆ ที่มีในฟิล์มยางเปรียบเทียบกับฟิล์มที่เคลือบกับไม่เคลือบสารแคตะลิสต์	103
3.16	การบวมตัวและปริมาณโครงสร้างร่างแหที่เกิดในยางเปรียบเทียบกับฟิล์มที่เคลือบกับไม่เคลือบสารแคตะลิสต์	103
3.17	ความหนาของฟิล์มยางที่ตัดเป็นรูปดัมเบลที่ได้จากแม่พิมพ์ลักษณะต่างๆ	105
3.18	การทดสอบการรั่วไหลโดยการบรรจุน้ำในฟิล์มยางที่ได้จากแม่พิมพ์ลักษณะต่างๆ โดยการทำชิ้นงานตัวอย่างละ 30 ครั้ง	105
3.19	ผลการล้างแม่พิมพ์แก้วและเซรามิกในลักษณะต่างกัน	109

รายการตารางภาคผนวก

ตาราง ภาคผนวก		หน้า
ก-1	ความเข้มข้นของสารละลายเมทิลีนบลูเมื่อได้รับแสงยูวีเป็นเวลาต่างๆ ของฟิล์ม (Ni/B/TiO ₂) เมื่อเผาที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส	121
ก-2	ความเข้มข้นของสารละลายเมทิลีนบลูเมื่อได้รับแสงยูวีเป็นเวลาต่างๆ ของฟิล์ม (Ni/B/TiO ₂) เมื่อเผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส	121
ก-3	ความเข้มข้นของสารละลายเมทิลีนบลูเมื่อได้รับแสงยูวีเป็นเวลาต่างๆ ของฟิล์ม (Ni/B/TiO ₂) เมื่อเผาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส	122
ก-4	เปอร์เซ็นต์การย่อยสลายสีเมทิลีนบลูของฟิล์ม (Ni/B/TiO ₂) โดยเผาที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส ที่เวลารับแสงยูวี 6 ชั่วโมง เมื่อทดสอบซ้ำ	122
ก-5	ความเข้มข้นของสารละลายเมทิลีนบลูเมื่อได้รับแสงยูวีเป็นเวลาต่างๆ ของฟิล์ม (Ni/B/N/TiO ₂) เมื่อเผาที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส	123
ก-6	ความเข้มข้นของสารละลายเมทิลีนบลูเมื่อได้รับแสงยูวีเป็นเวลาต่างๆ ของฟิล์ม (Ni/B/N/TiO ₂) เมื่อเผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส	123
ก-7	ความเข้มข้นของสารละลายเมทิลีนบลูเมื่อได้รับแสงยูวีเป็นเวลาต่างๆ ของฟิล์ม (Ni/B/N/TiO ₂) เมื่อเผาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส	124
ก-8	เปอร์เซ็นต์การย่อยสลายสีเมทิลีนบลูของฟิล์ม (Ni/B/N/TiO ₂) โดยเผาที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส ที่เวลารับแสงยูวี 6 ชั่วโมง เมื่อทดสอบซ้ำ	124
ก-9	ความเข้มข้นของสารละลายเมทิลีนบลูเมื่อได้รับแสงฟลูออเรสเซนซ์เป็นเวลาต่างๆ ของฟิล์ม (Ni/B/TiO ₂) เมื่อเผาที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส	125
ก-10	ความเข้มข้นของสารละลายเมทิลีนบลูเมื่อได้รับแสงฟลูออเรสเซนซ์เป็นเวลาต่างๆ ของฟิล์ม (Ni/B/N/TiO ₂) เมื่อเผาที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส	125
ก-11	เปอร์เซ็นต์การย่อยสลายสีเมทิลีนบลูของฟิล์ม (Ni/B/TiO ₂) โดยเผาที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส ที่เวลารับแสงฟลูออเรสเซนซ์ 6 ชั่วโมง เมื่อ	126

ทดสอบซ้ำ

รายการตารางภาคผนวก (ต่อ)

ตาราง ภาคผนวก		หน้า
ก-12	เปอร์เซ็นต์การย่อยสลายสีเมทิลีนบลูของฟิล์ม (Ni/B/N/TiO ₂) โดยเผาที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส ที่เวลารับแสงฟลูออเรสเซนซ์ 6 ชั่วโมง เมื่อทดสอบซ้ำ	126
ข-1	ตารางแสดงค่ามุมสัมผัสของหยดน้ำที่หยดลงบนแผ่นฟิล์มที่เคลือบด้วยสารแคตะลิสต์ เมื่อเผาที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เมื่อหยดน้ำภายใต้บรรยากาศฉายแสงยูวี	128
ข-2	ตารางแสดงค่ามุมสัมผัสของหยดน้ำที่หยดลงบนแผ่นฟิล์มที่เคลือบด้วยสารแคตะลิสต์ เมื่อเผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เมื่อหยดน้ำภายใต้บรรยากาศฉายแสงยูวี	129
ข-3	ตารางแสดงค่ามุมสัมผัสของหยดน้ำที่หยดลงบนแผ่นฟิล์มที่เคลือบด้วยสารแคตะลิสต์ เมื่อเผาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส เมื่อหยดน้ำภายใต้บรรยากาศฉายแสงยูวี	130
ข-4	ตารางแสดงค่ามุมสัมผัสของหยดน้ำที่หยดลงบนแผ่นฟิล์มที่เคลือบด้วยสารแคตะลิสต์ เมื่อเผาที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เมื่อหยดน้ำภายใต้บรรยากาศปกติ	131
ข-5	ตารางแสดงค่ามุมสัมผัสของหยดน้ำที่หยดลงบนแผ่นฟิล์มที่เคลือบด้วยสารแคตะลิสต์ เมื่อเผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เมื่อหยดน้ำภายใต้บรรยากาศปกติ	132
ข-6	ตารางแสดงค่ามุมสัมผัสของหยดน้ำที่หยดลงบนแผ่นฟิล์มที่เคลือบด้วยสารแคตะลิสต์ เมื่อเผาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส เมื่อหยดน้ำภายใต้บรรยากาศปกติ	133

รายการตารางภาคผนวก (ต่อ)

ตาราง		หน้า
ภาคผนวก		
ก-1	การวิเคราะห์ค่าการทนแรงดึงของฟิล์มยางที่ฉายแสงยูวีที่ 5 และ 10 นาทีของแม่พิมพ์ที่เคลือบด้วยสารแคตะลิสต์คือ ไทเทเนียมไดออกไซด์ (Pure TiO ₂), 3Ni/B/TiO ₂ และ 4Ni/B/N/TiO ₂	135
ก-2	การวิเคราะห์ค่าการทนแรงดึงของฟิล์มยางที่ฉายแสงฟลูออเรสเซนซ์ที่ 5 และ 10 นาที ของแม่พิมพ์ที่เคลือบด้วยสารแคตะลิสต์คือ ไทเทเนียมไดออกไซด์ (Pure TiO ₂), 3Ni/B/TiO ₂ และ 4Ni/B/N/TiO ₂	136

รายการรูป

รูปที่	หน้า	
1.1	สถิติการส่งออกถุงมือยางและถุงยางอนามัยของไทย	4
1.2	กระบวนการผลิตถุงมือยาง	5
1.3	กระบวนการผลิตถุงยางอนามัย	5
1.4	ก) แม่พิมพ์ถุงมือยางที่เป็นเซรามิก ข) แม่พิมพ์ถุงยางอนามัยที่เป็นแก้ว	8
1.5	การนำแคตะลิสต์ไปใช้ในการเคลือบผลิตภัณฑ์ในการทำความสะอาดตัวเอง	10
1.6	โครงสร้างผลึกของเฟสไทเทเนียมไดออกไซด์ (ก) รูไทล์ (ข) อะนาเทส (ค) บรูไคต์	13
1.7	กลไกการเกิดปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติก (Photocatalytic) ของไทเทเนียมไดออกไซด์	14
1.8	ความยาวคลื่นของแสง Visible	15
1.9	ความยาวคลื่น ความถี่ และพลังงานของแสงต่างๆ	15
1.10	การเปลี่ยนสถานะจากโซลเป็นเจล	17
1.11	กระบวนการ โซล-เจล	19
1.12	ตัวอย่างผลิตภัณฑ์แก้วเคลือบจากกระบวนการ โซล-เจล	20
1.13	กลไกการจุ่มชิ้นงานขึ้นมาจากสารละลาย	21
1.14	กลไกการเพิ่มปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกของ TiO_2 โดยการเติมด้วยแลนทานัมและไนโตรเจน	22
1.15	กลไกการเคลื่อนที่ของประจุ ในคอมพอสิตฟิล์ม $\text{SnO}_2/\text{TiO}_2$	23
1.16	กลไกการเคลื่อนที่ของประจุในคอมพอสิตฟิล์ม N/TiO_2	24
1.17	แบบจำลองการเข้าไปของไนโตรเจน (a) การเข้าของ N แบบแทนที่ (b) การเข้าของ N แบบแทรก (c) การเข้าของ NO แบบแทนที่ (d) การเข้าของ NO_2 แบบแทนที่ (e) การเข้าของ NO แบบแทรก	25

รายการรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
1.18	แบบจำลองการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นของเฟสอะนาเทสและรูไทล์ (ก) แบบจำลองแบบเก่าของไทเทเนียมไดออกไซด์ (Degussa P25) และมีรูไทล์ทำหน้าที่เป็นElectron sink (ข) แบบจำลองของ (Hurum et al., 2003) เกี่ยวกับเฟสรูไทล์	32
1.19	การจัดโครงสร้างการจับยึดบนพื้นผิวไทเทเนียมไดออกไซด์ในขณะมีความเป็นไฮโดรฟิลิก	37
1.20	มุมสัมผัสของของแข็งตามสมการ Young: $\cos\theta = (\gamma_{sv} - \gamma_{sl})/\gamma_{lv}$ เมื่อ γ คือ แรงดึงผิวระหว่างทั้งสามเฟส	38
1.21	กลไกการทำความสะอาดด้วยตัวเองของฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์	39
1.22	กลไกการดูดซับน้ำบนพื้นผิว TiO_2/SiO_2 ตามทฤษฎีของ Lewis	40
2.1	แผนผังแสดงขั้นตอนการเตรียมสารเคลือบและการดำเนินการวิจัย	44
2.2	การจุ่มแม่พิมพ์ด้วยความเร็ว 300 มิลลิเมตรต่อนาที	46
2.3	แม่พิมพ์ที่ใช้ในการทดลอง ก) แม่พิมพ์หลอดแก้วและเซรามิกและแผ่นกระจก ข) แม่พิมพ์มือ	46
2.4	อบฟิล์มยางในเตาอบ	48
2.5	เครื่องทดสอบการติดแน่นของฟิล์ม	50
2.6	ฟิล์มยางที่ตัดเป็นรูปดัมเบล	50
2.7	สูตรโครงสร้างของเมทิลีนบลู	51
2.8	Spectrum การดูดกลืนแสงของเมทิลีนบลูที่ความเข้มข้น $(0.5 \times 10^{-5}) - (3 \times 10^{-5})$ โมลาร์	51
2.9	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายเมทิลีนบลู $(0.5 \times 10^{-5}) - (3 \times 10^{-5})$ โมลาร์ กับค่า Absorbance ที่ได้จากเครื่อง UV-VIS spectrophotometer	52
2.10	มุมสัมผัสที่เกิดขึ้นระหว่างของเหลวกับของแข็ง	53

รายการรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
2.11	เปรียบเทียบขนาดของมุมสัมผัสของสมบัติความเป็นไฮโดรฟิลิกและสมบัติไฮโดรโฟบิก ของพื้นผิวฟิล์ม	54
3.1	ลักษณะฟิล์มเคลือบแม่พิมพ์กำลังขยาย 50 เท่า ด้าน A) ฟิล์มเคลือบ B) แม่พิมพ์กระจก	55
3.2	ภาพถ่าย SEM แสดงลักษณะพื้นผิวของฟิล์ม TiO_2 ที่อุณหภูมิ 600°C ที่กำลังขยาย ก) 10,000 ข) 20,000 เท่า เมื่อด้าน A และ B เป็นด้านแม่พิมพ์และผิวเคลือบตามลำดับ	56
3.3	ผลการวิเคราะห์ XRD ของฟิล์มที่เคลือบด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เผาอุณหภูมิ 400, 500 และ 600°C	56
3.4	ความสัมพันธ์ของอุณหภูมิกับอัตราการย่อยสลายสีของเมทิลีนบลูเมื่อได้รับแสงยูวี 6 ชั่วโมง	57
3.5	XRD ของฟิล์ม Ni/B/T เผาที่ ก) 400°C ข) 500°C และ ค) 600°C	59
3.6	ความสัมพันธ์อัตราส่วน C/C_0 ของเมทิลีนบลูโดยฟิล์ม Ni/B/T ภายใต้การรับแสงยูวีที่เวลาต่างกัน โดยฟิล์มเคลือบเผาที่อุณหภูมิ ก) 400°C ข) 500°C ค) 600°C	61
3.7	เปอร์เซ็นต์การสลายของเมทิลีนบลูโดยฟิล์ม Ni/B/T ภายใต้การรับแสงยูวีที่เวลา 6 ชั่วโมงเผาที่อุณหภูมิ 400, 500 และ 600°C	63
3.8	การสลายของเมทิลีนบลูที่ทำซ้ำ 7 ครั้ง ของฟิล์ม Ni/B/T เผาที่อุณหภูมิ 400°C ภายใต้การรับรังสียูวี	63
3.9	ความสัมพันธ์อัตราส่วน C/C_0 ของเมทิลีนบลูโดยฟิล์ม Ni/B/T ภายใต้การรับแสงฟลูออเรสเซนซ์ที่เวลาต่างกัน โดยฟิล์มเคลือบเผาที่อุณหภูมิ 400°C	64
3.10	การสลายของเมทิลีนบลูที่ทำซ้ำ 7 ครั้ง ของฟิล์ม Ni/B/T เผาที่อุณหภูมิ 400°C ภายใต้การรับแสงฟลูออเรสเซนซ์	64

รายการรูป(ต่อ)

รูปที่		หน้า
3.11	การดูดกลืนสเปกตราของผง Ni/B/T ก) 400 °C ข) 500 °C ค) 600 °C	66
3.12	มุมสัมผัสของหยดน้ำบนฟิล์ม Ni/B/T ที่ผ่านการส่องรังสียูวีเมื่อฟิล์มเผาที่ ก) 400 °C ข) 500 °C ค) 600 °C	68
3.13	มุมสัมผัสของหยดน้ำบนฟิล์ม Ni/B/T ที่บรรยากาศปกติเมื่อฟิล์มเผาที่ ก) 400 °C ข) 500 °C ค) 600 °C	69
3.14	ลักษณะรูปมุมสัมผัสของหยดน้ำบนฟิล์ม Ni/B/T ที่บรรยากาศปกติเมื่อฟิล์มเผาที่ 400 °C	70
3.15	XRD ของฟิล์ม Ni/B/N/T เผาที่ ก) 400 °C ข) 500 °C ค) 600 °C	71
3.16	ความสัมพัทธ์อัตราส่วน C/C ₀ ของเมทิลีนบลูโดยฟิล์ม Ni/B/N/T ภายใต้การรับรังสียูวีที่เวลาต่างกันโดยฟิล์มเคลือบเผาที่อุณหภูมิ ก) 400 °C ข) 500 °C ค) 600 °C	75
3.17	เปอร์เซ็นต์การสลายของเมทิลีนบลูโดยฟิล์ม Ni/B/N/T ภายใต้การรับรังสียูวีที่เวลา 6 ชั่วโมงเผาที่อุณหภูมิ 400, 500 และ 600 °C	76
3.18	การสลายของเมทิลีนบลูที่ทำซ้ำ 7 ครั้ง ของฟิล์ม Ni/B/N/T เผาที่อุณหภูมิ 400 °C ภายใต้การรับรังสียูวี	76
3.19	ความสัมพัทธ์อัตราส่วน C/C ₀ ของเมทิลีนบลูโดยฟิล์ม Ni/B/N/T ภายใต้การรับแสงฟลูออเรสเซนซ์ที่เวลาต่างกันโดยฟิล์มเคลือบเผาที่อุณหภูมิ 400 °C	77
3.20	การสลายของเมทิลีนบลูที่ทำซ้ำ 7 ครั้ง ของฟิล์ม Ni/B/N/T เผาที่อุณหภูมิ 400 °C ภายใต้การรับแสงฟลูออเรสเซนซ์	77
3.21	การดูดกลืนสเปกตราของผง Ni/B/N/T ก) 400 °C ข) 500 °C ค) 600 °C	79
3.22	มุมสัมผัสของหยดน้ำบนฟิล์ม Ni/B/N/T ที่ผ่านการส่องรังสียูวีเมื่อฟิล์มเผาที่ ก) 400 °C ข) 500 °C ค) 600 °C	81
3.23	มุมสัมผัสของหยดน้ำบนฟิล์ม Ni/B/N/T ที่บรรยากาศปกติเมื่อฟิล์มเผาที่ ก) 400 °C ข) 500 °C ค) 600 °C	82

รายการรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
3.24	ลักษณะของมุมสัมผัสของหยดน้ำบนฟิล์ม Ni/B/N/T ที่บรรยากาศห้องเมื่อฟิล์มเผาที่ 400°C	83
3.25	ผลการวิเคราะห์ด้วย FTIR ของผง Ni/B/T เผาที่อุณหภูมิ 400°C โดยที่รูป ก) การเปรียบเทียบทุกผลการวิเคราะห์ ข) ภาพขยายจากรูป ก	85
3.26	ผลการวิเคราะห์ด้วย FTIR ของผง Ni/B/N/T เผาที่อุณหภูมิ 400°C โดยที่รูป ก) การเปรียบเทียบทุกผลการวิเคราะห์ ข) ภาพขยายจากรูป ก	86
3.27	ผลการวิเคราะห์ด้วย FT-RAMAN ของผงไทเทเนียมไดออกไซด์เปรียบเทียบกับที่เผาต่างอุณหภูมิโดยที่รูป ก) ทุกผลการวิเคราะห์ ข) ภาพขยายผลการวิเคราะห์ที่เป็นเส้นสีดำ จากรูป ก	87
3.28	ผลการวิเคราะห์ด้วย FT-RAMAN ของผงไทเทเนียมไดออกไซด์โดยที่รูป ก) เปรียบเทียบที่อุณหภูมิเดียวกันที่ RAMAN Shift 200-1000 cm^{-1} ข) ภาพขยายจากรูป ก ที่ RAMAN Shift 600-900 cm^{-1}	88
3.29	ผลการวิเคราะห์ด้วย EDX ของผงไทเทเนียมไดออกไซด์โดยที่ ก) Ni/B/T ข) Ni/B/N/T	89
3.30	ผลการวิเคราะห์ด้วย XPS ของผงไทเทเนียมไดออกไซด์	91
3.31	ผลการวิเคราะห์ด้วย XPS ของผงไทเทเนียมไดออกไซด์โดยที่แถบช่วงพลังงานที่พบโบรอน ก) 180-200 eV ข) 527-535 eV	92
3.32	ผลการวิเคราะห์ด้วย XPS ของผงไทเทเนียมไดออกไซด์โดยที่แถบช่วงพลังงานที่พบ ก) ไนโตรเจน และ ข) นิกเกิล	93
3.33	ภาพถ่าย SEM แสดงลักษณะพื้นผิวของฟิล์มที่อุณหภูมิเผา 400 °C ก) TiO_2 ข) 2Ni/B/TiO_2 และ ค) 3Ni/B/TiO_2	95
3.34	ภาพถ่าย SEM แสดงลักษณะพื้นผิวของฟิล์ม TiO_2 ที่อุณหภูมิเผาที่ 400 °C ก) TiO_2 ข) 3Ni/B/N/TiO_2 และ ค) 4Ni/B/N/TiO_2	96

รายการรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
3.35	ภาพถ่าย AFM แสดงลักษณะพื้นผิวของฟิล์มเผาที่อุณหภูมิ 400 °C (ก) 2Ni/B/TiO ₂ (ข) 3Ni/B/TiO ₂	97
3.36	ภาพถ่าย AFM แสดงลักษณะพื้นผิวฟิล์มเผาที่อุณหภูมิ 400 °C (ก) 3Ni/B/N/TiO ₂ (ข) 4Ni/B/N/TiO ₂	97
3.37	ภาพถ่ายแสดงหยดน้ำข้างบนผิวแม่พิมพ์ที่ผ่านการเคลือบสารแคตะไลติก	100
3.38	ภาพถ่ายฟิล์มยางที่ใช้แม่พิมพ์ลักษณะต่างกันอบยงที่อุณหภูมิ 120 °C	101
3.39	ภาพถ่ายฟิล์มยางด้วย AFM ที่ใช้แม่พิมพ์ลักษณะต่างกันอบยงที่อุณหภูมิต่างๆ กัน	102
3.40	ภาพถ่าย SEM ของฟิล์มยางที่ได้จากแม่พิมพ์เคลือบสารแคตะไลสต์กำลังขยาย ก) 5,000 เท่า ข) 10,000 เท่า	104
3.41	ผลการทดสอบแรงดึงที่ภาวะต่างๆ เมื่อ ก) แม่พิมพ์แก้ว ข) แม่พิมพ์เซรามิก	106
3.42	ผลการทดสอบแรงดึงที่มีการใช้แม่พิมพ์แบบต่างๆ ซ้ำกันหลายๆ ครั้ง เมื่อ ก) แม่พิมพ์แก้ว ข) แม่พิมพ์เซรามิก	107

บทที่ 1

บทนำ

1.1 บทนำสั้นเรื่อง

ผลิตภัณฑ์ถุ้งมือยางและถุ้งยางอนามัยถือเป็นอุตสาหกรรมที่สร้างรายได้แก่ประเทศไทยทำให้การส่งออกมีแนวโน้มขยายตัวเพิ่มขึ้นตามอุปสงค์ในตลาดโลก (รูปที่ 1.1) ปัจจุบันอุตสาหกรรมถุ้งมือยางและถุ้งยางอนามัยของไทยเป็นอุตสาหกรรมที่มีความสำคัญ ซึ่งถุ้งมือยางสามารถสร้างรายได้จากการส่งออกได้ปีละหลายล้านบาท โดยไทยมีฐานะเป็นผู้ผลิตและส่งออกถุ้งมือยางอันดับสองของโลกรองจากมาเลเซีย และเป็นผู้ผลิตและส่งออกถุ้งยางอนามัยอันดับหนึ่งของโลกสำหรับอินเดียเป็นผู้ผลิตและส่งออกถุ้งยางอนามัยอันดับสองของโลก โดยมูลค่าการส่งออกถุ้งยางอนามัยของไทยปีละมากกว่า 1,500 ล้านบาท ปัจจุบันมีผู้ประกอบการภายในประเทศไทยในอุตสาหกรรมถุ้งมือยางและถุ้งยางอนามัยเป็นจำนวนทั้งสิ้น 65 และ 12 รายตามลำดับ (ที่มา:กรมโรงงานและ <http://www.fda.moph.go.th>)

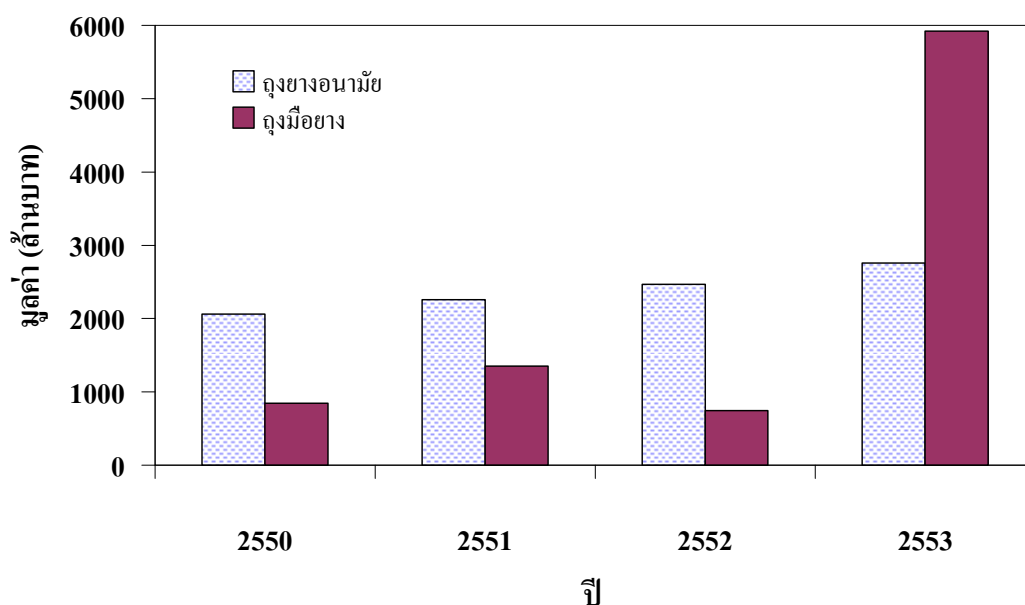
กระบวนการผลิตถุ้งมือยาง(รูปที่ 1.2) และถุ้งยางอนามัย (รูปที่ 1.3) ขั้นตอนการผลิตจะขึ้นกับลักษณะของผลิตภัณฑ์ จากกระบวนการผลิตถุ้งมือยางและถุ้งยางอนามัย โดยทั่วไปจะเริ่มจากการทำความสะอาดแบบขั้นรูปหรือโมลด์ (Former) ซึ่งแบบขั้นรูปสำหรับถุ้งมือยางและถุ้งยางอนามัยจะเป็นเซรามิกและแก้วตามลำดับ(รูปที่ 1.4) จะเห็นว่ากระบวนการทำความสะอาดมีหลายขั้นตอน ได้แก่การทำความสะอาดด้วยสารเคมีได้แก่ กรดซัลฟิวริก (H_2SO_4) กรดไนตริก (HNO_3) โซดาไฟ (NaOH) และโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) หรือเป็นขั้นตอนการล้าง (Washing) การชะละลาย (Leaching) ซึ่งน้ำที่ใช้ควรมีอุณหภูมิประมาณ 60–70°C เพื่อนำเอาสารเคมีพวกตะกอนของโปรตีนคราบของแคลเซียมคาร์บอเนตที่ติดค้างอยู่บนผิวแบบขั้นรูปออกไป ซึ่งการทำความสะอาดแบบขั้นรูปจะสูญเสียพลังงานไปกับกระบวนการล้างและการชะละลาย โดยมีการใช้พลังงานมากเกินความต้องการสูงถึงร้อยละ 75 – 90 (พรณะและคณะ, 2545) ซึ่งมีตัวอย่างขั้นตอนและวิธีการผลิตถุ้งมือแพทย์ กระบวนการผลิตถุ้งมือแพทย์เป็นการผลิตแบบต่อเนื่อง โดยมีการควบคุมดูแลเครื่องจักรอย่างสม่ำเสมอด้วยความรอบคอบเพราะถ้าเกิดปัญหาเพียงจุดเดียวก็ทำให้ผลิตภัณฑ์เกิดความเสียหายหรือใช้การไม่ได้ทั้งกระบวนการผลิตเลยโดยมีอุปกรณ์ที่สำคัญดังนี้

1. ถังน้ำกรด (Acid tank) เป็นถังสแตนเลส สำหรับกรดไนตริก ค่า pH ประมาณ 1-4 เป็นการกำจัดแคลเซียมคาร์บอเนตที่ตกค้างอยู่ที่แม่พิมพ์เพราะถ้าแม่พิมพ์มีคราบแคลเซียมคาร์บอเนต ติดอยู่มาก ความสามารถในการเกาะติดของน้ำยางกับแม่พิมพ์ลดลง ทำให้เกิดปัญหาเร็วได้ง่าย และความหนาวางของถุงมือไม่สม่ำเสมอ
2. ถังสารละลายด่าง (Tank) เป็นถังใส่สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ค่า pH ประมาณ 10-12 ทำหน้าที่ลดความเป็นกรดที่เกาะติดผิวของแม่พิมพ์ เพื่อป้องกันสารช่วยจับตัวสภาพเป็นกรด
3. แปรงขัด (Brush) แปรงขัดมีลักษณะเป็นล้อหมุน แบ่งแยกออกเป็นสองข้างโดยทั้งสองข้างมีขนแปรงทำด้วยพลาสติกหมุนขัดแม่พิมพ์ตลอดเวลาเพื่อขจัดสิ่งสกปรกออกจากแม่พิมพ์ให้สะอาดยิ่งขึ้น
4. ถังน้ำเปล่า (Washing tank 2) ในถังน้ำเปล่า มีหน้าที่ชะล้างคราบน้ำกรด ด่าง ที่ตกค้างอยู่บนแม่พิมพ์
5. ถังน้ำเปล่า (Washing tank 3) เป็นถังน้ำเปล่าที่ใช้ทำความสะอาดแม่พิมพ์เป็นครั้งสุดท้าย ทำหน้าที่ชะล้างคราบกรด ด่างอีกครั้ง และเพื่อป้องกันไม่ให้สิ่งปนเปื้อน เกาะติดแม่พิมพ์ลงสู่ถังสารช่วยในการจับตัว
6. ม่านน้ำตก ม่านน้ำตกทำจากท่อพลาสติกโดยเจาะรูเล็กๆ เพื่อระบายน้ำออกล้างแม่พิมพ์ น้ำที่ไหลออกจะเป็นฝอยน้ำตกลงสู่แม่พิมพ์เพื่อทำหน้าที่ล้างแม่พิมพ์อีกครั้งโดยไม่ให้สิ่งปนเปื้อนเกาะติดแม่พิมพ์ลงสู่ถังสารช่วยในการจับตัว
7. เตาอบ 1 (Oven 1) เป็นเตาอบแม่พิมพ์ ก่อนที่จะจุ่มสารช่วยในการจับตัว ควบคุมอุณหภูมิไว้ประมาณ 60-75 องศาเซลเซียส เพื่ออบให้แม่พิมพ์แห้ง และมีอุณหภูมิที่เหมาะสม เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการเกาะติดและลดปัญหาการเปื่อยของแม่พิมพ์ก่อนที่จะจุ่มสารช่วยในการจับตัว
8. ถังสารช่วยจับตัว (Coagulant tank) เป็นถังสแตนเลสใส่สารช่วยในการจับตัวแม่พิมพ์ของน้ำยาง ประกอบด้วย CaCO_3 หรือ $(\text{CaNO}_3)_2$, Wetting agent และ Surfynol เป็นสารลดฟอง มีการกวนตลอดเวลา อัตราในการกวนสม่ำเสมอ และควบคุมอุณหภูมิประมาณ 55 ± 10 องศาเซลเซียส ถังนี้ทำหน้าที่เป็นตัวช่วยทำให้น้ำยางเกาะติดกับแม่พิมพ์ได้ดี และเพื่อช่วยให้ถุงมือถอดออกจากแม่พิมพ์ได้ง่าย ด้วยระยะเวลาการจุ่มประมาณ 13-16 วินาที
9. เตาอบ 2 (Oven 2) ทำหน้าที่อบให้แม่พิมพ์แห้งพอหมาดๆ ก่อนที่จะจุ่มลงในถังน้ำยาง ควบคุมอุณหภูมิประมาณ 90 ± 10 องศาเซลเซียส ถ้าอุณหภูมิของเตาสูงเกินไป ทำให้แม่พิมพ์ร้อนและแห้งเมื่อจุ่มลงในถังน้ำยางทำให้อุณหภูมิของน้ำยางร้อนเพิ่มขึ้นตามไปด้วย น้ำยาง

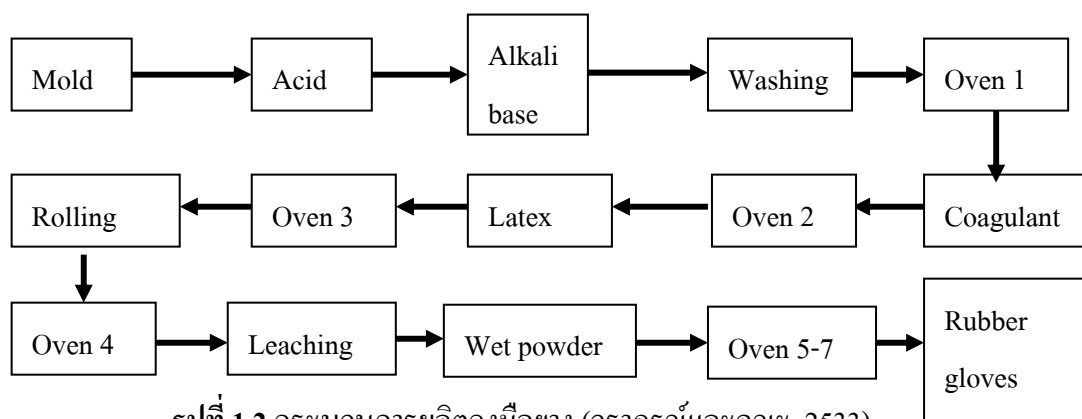
เป็นฝ้าติดที่แม่พิมพ์ทำให้ถุงมือเป็นคราบฝ้าและถ้าหากอุณหภูมิต่ำเกินไปจะทำให้แม่พิมพ์ไม่แห้ง หรือแห้งไม่ทั่วแม่พิมพ์ เมื่อจุ่มลงในถังน้ำยางจะทำให้เกิดปัญหาทางนิ้วมือไม่แห้งง่านิ้วมือเปื่อยได้

10. ถังน้ำยางคอมปาวด์ (Latex compound tank) ทำด้วยสแตนเลสที่ด้านหัวติดใบพัด ถังน้ำยางคอมปาวด์มีการหล่อเย็นตลอดเวลา ควบคุมอุณหภูมิประมาณ 30 ± 10 องศาเซลเซียส มีความเข้มข้น (TSC) 28-33 เปอร์เซ็นต์ เมื่อจุ่มแม่พิมพ์ลงในน้ำยางจะได้ฟิล์มยางเกาะติดแม่พิมพ์ ระยะลึกของการจุ่มให้เลเยอร์ระดับ Coagulant ประมาณ 0.5 เซนติเมตร เพื่อให้ได้ผิวบางสะดวกที่จะม้วนขอบ ระยะเวลาการจุ่มประมาณ 17-23 วินาที ในถังน้ำยางคอมปาวด์จะมีตัวรักษาระดับของน้ำยางและน้ำยางในถังน้ำยางคอมปาวด์จะไหลเวียนตลอดเวลาและความเร็วที่ใช้ในการจุ่มจะต้องพอเหมาะเพื่อป้องกันการเกิดฟอง
11. เตาอบ 3 (Oven 3) ทำหน้าที่อบให้น้ำยางที่เกาะติดแม่พิมพ์แห้งหมาดๆ เป็นเจลลักษณะคงรูปประมาณ 60 เปอร์เซ็นต์ ก่อนที่จะเข้ากระบวนการม้วนขอบควบคุมอุณหภูมิประมาณ 95 ± 10 องศาเซลเซียส ถ้าอุณหภูมิของเตาสูงเกินไปไม่สามารถม้วนขอบได้หรือขอบอาจแตก แต่ถ้าอุณหภูมิต่ำเกินไปจะทำให้ถุงมือไม่แห้งเมื่อทำการม้วนขอบจะทำให้ขอบและ
12. ม้วนขอบ (Beading) ลักษณะเป็นลูกกลิ้งทำด้วยยางสามารถปรับความสั้นยาวของถุงมือได้ โดยการปรับเข้า ออก ของระยะลูกกลิ้งให้เหมาะสม การม้วนขอบจะหมุนออก โดยทำมุมเฉียงเข้าเรื่อยๆ เพื่อให้ม้วนขอบใหญ่ขึ้น โดยที่แม่พิมพ์จะหมุนพร้อมกันไปด้วย การม้วนขอบเป็นการเพิ่มความหนาของยางบริเวณที่ต้องสวมเพื่อความแข็งแรงให้กับถุงมือและให้ถุงมือถอดออกจากแม่พิมพ์ได้ง่าย
13. ถังชะละลาย (Leaching tank 1) เป็นถังน้ำที่ใช้ล้างคราบสิ่งสกปรก สารเคมีและคราบไขมันที่สามารถละลายน้ำได้ออกจากถุงมือ เช่น แคลเซียมคาร์บอเนต ด่าง โปรตีน ให้หลุดออกไปการล้างทำให้ลดการคันในเวลาใช้งานได้ ทำให้สมบัติด้านกายภาพของยางดีขึ้น ลดการเปลี่ยนสีของถุงมือ เมื่อถูกแสงหรือตัดทิ้งไว้ถึงน้ำเปล่าจะเปิดไหลเวียนตลอดเวลา และน้ำจะไหลสวนทางกับการเคลื่อนที่ของแม่พิมพ์ ความสูงของน้ำควรสูงกว่าถุงมือประมาณ 1 นิ้ว ถ้าน้ำต่ำกว่าขอบถุงมือ จะทำให้ถุงมือตก ควบคุมอุณหภูมิประมาณ 65 ± 10 องศาเซลเซียส ความยาวของถังประมาณ 12 เมตร ระยะเวลาการล้างประมาณ 45-47 วินาที น้ำที่ใช้ล้างต้องสะอาดตลอดเวลา
14. ถังน้ำเปล่า (Leaching tank 2) เป็นถังน้ำที่ใช้ล้างคราบสิ่งสกปรกที่หลงเหลือจาก leaching tank 1 ให้หมดไป ซึ่งจะล้าง คราบสารเคมีที่เกาะติดผิวของถุงมือออกอีกครั้ง เพื่อป้องกันการเกิดอันตราย เช่น การระคายเคือง ควบคุมอุณหภูมิประมาณ 50 ± 10 องศาเซลเซียส

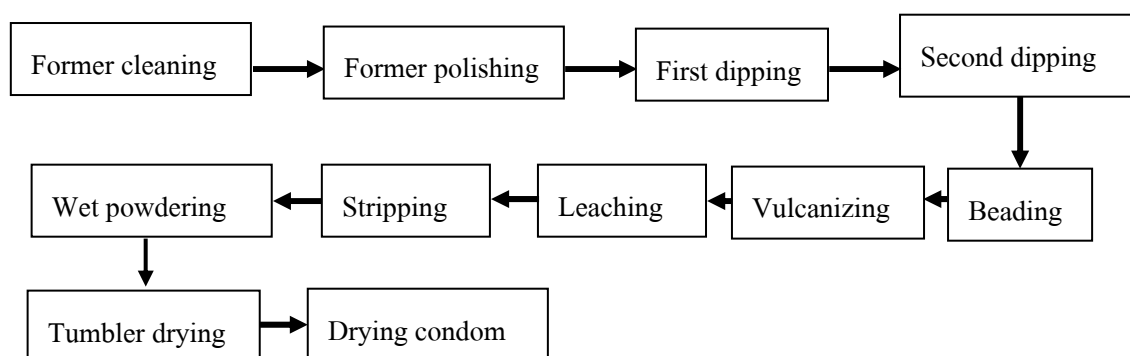
15. ถังน้ำแป้ง (Slurry tank) เป็นสารละลายแป้งเข้มข้น 5-6 เปอร์เซ็นต์ เพื่อป้องกันการติดของ ถุงมือด้านในไม่เหนียวติดกันเวลาถอดออกจากแม่พิมพ์และลดปัญหาความฝืดขณะถอด หรือสวมใส่ ควบคุมระดับน้ำแป้งให้เหมาะสม และต้องเปิดใบกวนตลอดเวลาเพื่อป้องกันการตกตะกอนของแป้ง อุณหภูมิที่ให้อยู่ในช่วง 45 ± 10 องศาเซลเซียส
16. เตาอบ 4 (Oven 4) เป็นเตาอบที่ใช้งานเพื่อทำให้ยางสุกอย่างสมบูรณ์ (Vulcanized) ควบคุม อุณหภูมิประมาณ 110 ± 10 องศาเซลเซียส เวลาในการอบประมาณ 20-30 นาที
17. ถอดถุงมือ (Stripper) เป็นการถอดถุงมือออกจากแม่พิมพ์ หลังจากที่ถุงมือสุกสมบูรณ์ แล้วมีพนักงาน ถอดถุงมือจะต้องตรวจสอบรูรั่วและรอยตำหนิโดยสายตา เพื่อแยกถุงมือที่มี รูรั่ว และรอยตำหนิใส่ในตะกร้าที่กำหนดและใส่ถุงมือที่ไม่มีรูรั่วและรอยตำหนิอีกตะกร้า หนึ่ง
18. การอบถุงมือ เป็นการอบเพื่อวัลคาไนซ์ให้สมบูรณ์ ถุงมือที่ถอดออกจากแม่พิมพ์เป็นถุงมือ ที่วัลคาไนซ์อย่างสมบูรณ์ จึงจำเป็นต้องอบอีกครั้ง เพื่อการวัลคาไนซ์ที่สมบูรณ์ และทำให้ ถุงมือแห้ง โดยพนักงานถอดถุงมือจะเป็นผู้นำถุงมือเข้าอบ โดยจะแยกตามขนาดและตาม เกรดที่พนักงานถอดถุงมือได้ทำการแยกไว้ ควบคุมอุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เวลาในการ อบประมาณ 15 นาที ปล่อยถุงมืออยู่ในตู้อบให้แห้งเวลา 10 นาที อบได้ครั้งละประมาณ 30-40 กิโลกรัม



รูปที่ 1.1 สถิติการส่งออกถุงมือยางและถุงยางอนามัยของไทย (ที่มา: กรมศุลกากร)



รูปที่ 1.2 กระบวนการผลิตถุงมือยาง (วารสารณ์และคณะ, 2533)



รูปที่ 1.3 กระบวนการผลิตถุงยางอนามัย (ที่มา:<http://www.smile-condoms.com>: 12/07/2551)

ปัจจุบันมีผลิตภัณฑ์ยางหลายชนิดที่ผลิตขึ้นโดยการจุ่มแบบพิมพ์ ตัวอย่างที่สำคัญ ได้แก่ ถุงยางอนามัย ถุงมือยาง หัวนม ลูกโป่ง เป็นต้น หลักการในการจุ่มก็มีด้วยกัน 3 วิธี ใหญ่ๆ ด้วยกันคือ

1. การจุ่มแม่พิมพ์โดยตรง (Straight dipping) คือ การใช้แม่พิมพ์จุ่มลงในน้ำยางคอมปาวด์ที่เตรียมไว้
2. การจุ่มแม่พิมพ์โดยใช้สารช่วยจับตัว (Coagulant dipping) คือ การใช้แม่พิมพ์จุ่มลงในสารที่เรียกว่า Coagulant ก่อนจากนั้นค่อยจุ่มลงในน้ำยางคอมปาวด์
3. การจุ่มแม่พิมพ์แบบร้อน (Heat sensitive dipping) คือ การทำให้แม่พิมพ์ให้ร้อนก่อนแล้วจุ่มลงในน้ำยางคอมปาวด์ที่ผสมไว้

โดยปกติการจุ่มน้ำยางโดยตรงจะได้แผ่นยางหนาประมาณ 0.04-0.05 มิลลิเมตร ต่อการจุ่มหนึ่งครั้ง ในมาตรฐานของผลิตภัณฑ์ทั่วไป จึงกำหนดความหนาของผลิตภัณฑ์ยาง (ตารางที่ 1.1) ดังนั้นในการทำผลิตภัณฑ์น้ำยางต่างๆ ดังกล่าว ถ้าทำการจุ่มน้ำยางโดยตรงอย่างน้อยที่สุดก็ต้องจุ่มถึง 2 ครั้ง แต่ในผลิตภัณฑ์ถุงมือการแพทย์ก็ต้องจุ่มถึง 4 ครั้ง เป็นต้น การจุ่มหลายๆ ครั้งนี้เป็น การเพิ่มขึ้นตอนในการผลิต ทำให้ค่าใช้จ่ายในการผลิตสูงขึ้น ยิ่งกรณีของการผลิตถุงมือที่ใช้ในงานบ้าน และถุงมือที่ใช้ในโรงงานอุตสาหกรรมก็ต้องจุ่มเพิ่มมากขึ้นๆ ไปอีก

ตารางที่ 1.1 ความหนาของถุงมือยางตามมาตรฐานต่างๆ (เอกสารปฏิบัติการเทคโนโลยียาง มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์)

ชื่อผลิตภัณฑ์	ความหนา (มิลลิเมตร)	หมายเลขมาตรฐาน
ถุงยางอนามัย	ไม่เกิน 0.08	B.S. 3704:1979
ถุงมือตรวจ	ไม่น้อยกว่า 0.08	ASTM D 3578
ถุงมือผ่าตัด	ไม่น้อยกว่า 0.10	ASTM D 3577
ถุงมือผ่าตัด	ไม่น้อยกว่า 0.10	B.S. 4005:1984
	ไม่น้อยกว่า 0.30	
ถุงมือผ่าตัด	0.24+0.06	IS 4148:1967
ถุงมือแพทย์	0.20+0.03	มอก. 538-2527

การลดขั้นตอนในการผลิตในการจุ่มให้สั้นลงครั้งลงไป ทำได้โดยการใช้สารจับตัว เข้าช่วยในกระบวนการจุ่มนี้วิธีการคือ นำแม่พิมพ์จุ่มที่สะอาดมาจุ่มลงในสารละลายจับตัว แล้วยกขึ้นแล้วนำไปจุ่มลงในน้ำยางตามระยะเวลาที่กำหนดไว้ยังจุ่มนาน น้ำยางก็ยิ่งจับตัวบนแม่พิมพ์หนาขึ้นตามแล้วจึงยกแม่พิมพ์ออกไปจากน้ำยาง สารช่วยจับตัวมีหลายประเภทดังนี้

- ก) สารละลายเกลือแคลเซียม ได้แก่ แคลเซียมไนเตรต และแคลเซียมคลอไรด์ เป็นต้น สารละลายนี้จะต้องทำให้แห้งหมาดๆ ก่อนที่จะจุ่มลงในน้ำยางบางครั้งเราเรียกว่า สารจับตัวนี้ว่า Dry coagulant สารจับตัวที่ใช้เป็นตัวยาละลายจะทำให้ตัวทำละลายระเหยได้อย่างรวดเร็ว โดยไม่ต้องอุ่นแม่พิมพ์
- ข) สารละลายกรดอ่อน ได้แก่ กรดอะซิติก และกรดฟอร์มิก เป็นต้น ในกรณีนี้จะนำแม่พิมพ์ที่มีน้ำกรดเคลือบยังเปียกๆ อยู่ไปจุ่มลงในน้ำยางการใช้สารละลายกรดที่กำลังเปียกนี้ ทำให้มีชื่อเรียกสารจับตัว ประเภทนี้ว่า Wet coagulant การใช้กรดอ่อนเป็นสารจับตัวนี้ จะต้องนำแม่พิมพ์ไปจุ่มลงในน้ำยางขณะที่น้ำกรดเคลือบยังเปียกๆ อยู่ ถ้าตั้งทิ้งไว้นานจนเกินไป น้ำกรดจะระเหยออกไปหมดทำให้ไม่ได้ขนาดตามความต้องการ
- ค) สารละลาย Cyclohexylamine acetate (CHA) สารประกอบอะมีนที่มีความเป็นด่างสูง เพื่อที่จะให้ความหนายางที่ได้ลดลงไม่มากเกินไป สารประกอบอะมีนที่มีค่าความเป็นด่างสูง คือ Cyclohexylamine

ตารางที่ 1.2 ตัวอย่างน้ำยางที่ผสมสารเคมีเพื่อใช้ในการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ต่างๆ (เอกสารประกอบการเรียนผลิตภัณฑ์ยางมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี)

อัตราส่วนผสม	ส่วน โดย น้ำหนักเปียก (ส่วน)		ส่วนโดยน้ำหนักแห้ง (kg)
	ลูกโป่ง	ถุงมือแพทย์	ถุงยางอนามัยของบริษัทชัวร์เท็ก
60% น้ำยางธรรมชาติ	167.0	167.0	440.0
10% โปแตสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH)	3.0	2.0	5.0
50% Oil	10.0	-	-
50% กำมะถัน	2.0	3.0	-
50% ZDC ¹	1.5	1.8	-
50% สารป้องกันออกซิเดชั่น	1.0	2.0	-
50% ซิงค์ออกไซด์ (ZnO)	1.5	2.0	-
Colour	ใส่ตามต้องการ	2.0	-
50% ZMBT ²	-	0.2	-
20% โปแตสเซียมโอเลต	-	3.0	-
น้ำกลั่น	-	30.0	80.0
10% แอมโมเนียมลอรเรต	-	-	3.0
อีมูวิน-โอจี (Emuwin-OG)	-	-	0.3
อิมแลนค์-ดับบลิว (Emuland-w)	-	-	0.3
Dispersion	-	-	21.64

¹ ZDC (Zinc Diethyl Dithiocarbamate) ² ZMBT (Zinc mercaptobenzothiazole)

ตัวอย่างสูตรในการผสมน้ำยางกับสารเคมีต่าง (ตาราง 1.2) สำหรับการผลิตลูกโป่งต้องหมักน้ำยางไว้ 3 วันก่อนที่จะจุ่ม และอบที่อุณหภูมิ 110°C เป็นเวลา 20-50 นาที แต่สำหรับผลิตถุงมือน้ำยางผสมสารเคมีนี้ควรหมักไว้เป็นเวลา 1 วัน ก่อนนำมาใช้เมื่อจุ่มแล้วอบที่อุณหภูมิ 110°C เป็นเวลา 15 นาที

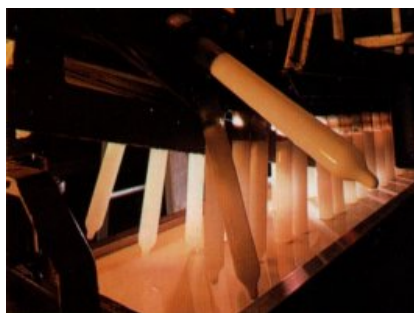
จากกระบวนการผลิตจะเห็นได้ว่าขั้นตอนของการทำความสะอาดแบบขึ้นรูปมีอยู่หลายครั้ง

และเสียค่าใช้จ่ายสูง ดังนั้นถ้าได้เคลือบผิวแม่พิมพ์ด้วยวัสดุนาโนที่มีสมบัติโฟโตแคตะลิสต์จะสามารถทำความสะอาดผิวได้ง่าย ก็จะลดการใช้กรด-ด่าง หรือไม่ใช้กรด-ด่าง ในกระบวนการเลย เป็นการลดปัญหาสิ่งแวดล้อมและลดขั้นตอนในการผลิตได้ ในขั้นตอนก่อนนํานํายางจะนำแบบขึ้นรูปไปจุ่มสารช่วยจับตัวเพื่อนํานํายางเกาะผิวแบบขึ้นรูปดี เนื่องจากสภาพผิวของแบบขึ้นรูปมีสภาพไม่ค่อยชอบน้ำหรือมีสมบัติเป็นไฮโดรโฟบิก แต่เมื่อลอกเอาถุงมือยางออกแล้วจะต้องทำความสะอาดคราบเหล่านี้บนแบบขึ้นรูปก่อนนำไปใช้ใหม่ด้วย การเคลือบแบบขึ้นรูปด้วยวัสดุนาโนที่มีสมบัติโฟโตแคตะลิสต์ที่เหมาะสมจะทำให้ผิวมีสมบัติชอบน้ำหรือไฮโดรฟิลิก หรือซูเปอร์ไฮโดรฟิลิก ซึ่งจะเป็นการลดใช้สารช่วยจับตัวลงหรือไม่ใช้เลยได้ อันจะเป็นการลดค่าใช้จ่ายลงได้อีกทางหนึ่ง

ในการวิจัยครั้งนี้ ได้มุ่งเน้นการสังเคราะห์สารเคลือบที่มีประสิทธิภาพต่อการทำความสะอาดตัวเองได้โดยศึกษาเลือกสารที่เหมาะสมที่ทำให้ผิวเคลือบมีสมบัติไฮโดรฟิลิกหรือซูเปอร์ไฮโดรฟิลิก เลือกกระบวนการเคลือบที่เหมาะสมกับแบบขึ้นรูป ศึกษาถึงรายละเอียดของตัวพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการเคลือบ ตลอดจนพัฒนาระบบการกระตุ้นด้วยแสงที่ก่อนมาอยู่ในช่วงแสงที่มองเห็นด้วยตาเปล่ามากขึ้น ตลอดจนการศึกษาสมบัติการใช้งานจริงเช่นสมบัติการทำความสะอาดตัวเอง สมบัติการดูดซับน้ำยาง และอื่นๆ ในการเพิ่มประสิทธิภาพของสารเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์มีหลายวิธีได้แก่การใช้สารโด๊ป (Dopant) เทคนิคการเคลือบ การควบคุมเฟสต่างๆที่เกิดขึ้นในระดับนาโนเมตร และการกระตุ้นด้วยแสงที่มีความยาวคลื่นที่เหมาะสม เป็นต้น



ก)



ข)

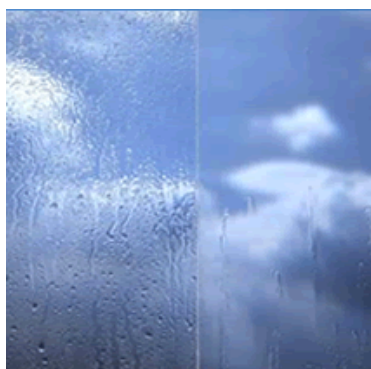
รูปที่ 1.4 ก) แม่พิมพ์ถุงมือยางที่เป็นเซรามิก ข) แม่พิมพ์ถุงยางอนามัยที่เป็นแก้ว ที่มา:

(<http://www.warisantegas.com: 5/06/2551>)

ปัจจุบันปัญหาการทำมาความสะอาดพื้นผิวผลิตภัณฑ์ เช่น กระจก ซึ่งมีบทบาทสำคัญอย่างมากในชีวิตประจำวัน โดยเฉพาะเป็นส่วนประกอบที่สำคัญของอาคารบ้านเรือน ส่วนประกอบในรถยนต์ กระจกนิรภัย สิ่งก่อสร้าง อาคารสำนักงานขนาดใหญ่ นิยมก่อสร้างด้วยกระจกมากขึ้น

และสิ่งที่จะต้องคำนึงถึงตามมา คือ การทำความสะอาด โดยเฉพาะในบริเวณที่มีฝุ่นละอองมาก หรือ เขม่าควันที่มาจากรถยนต์ นอกจากนี้ยังมีคราบสกปรกที่มาจากน้ำมันจากมือที่จับต้องผิวกระจก หากทิ้งไว้เป็นเวลานานสิ่งสกปรกดังกล่าว จะติดแน่นผิวกระจกกำจัดออกได้ยากขึ้น คุณเหมือนมีสาร บางอย่างมาเคลือบอยู่ ทำให้ดูหมอง ไม่ใสสะอาด สำหรับปัญหาการทำความสะอาดนอกจากจะเกิดขึ้นกับกระจกแล้ว เครื่องสุขภัณฑ์ต่างๆที่มีใช้ในบ้านเรือน การทำความสะอาดเสื้อผ้าหรืออื่นๆ เป็นต้น ปัญหาที่กล่าวมาเหล่านี้ปัจจุบันมีวิธีการทำความสะอาดได้ด้วยน้ำยาทำความสะอาด กำจัดพวก คราบน้ำมัน แต่ข้อเสียของการใช้น้ำยาทำความสะอาด คือผู้ใช้อาจแพ้ฝุ่นละอองของน้ำยาทำความสะอาดได้ และยิ่งการทำความสะอาดอาคารขนาดใหญ่ คงต้องเสียค่าใช้จ่ายไม่น้อยในการทำความสะอาดแต่ละครั้ง แต่ปัจจุบันนี้ได้มีนวัตกรรมใหม่ คือการทำให้ผลิตภัณฑ์สามารถทำความสะอาดได้ด้วยตัวเอง หรือทำความสะอาดได้ง่าย ไม่สิ้นเปลืองแรงงาน เวลา และค่าใช้จ่ายในการทำความสะอาด กระบวนการที่ว่านั้นก็ คือ การเคลือบผิวผลิตภัณฑ์ด้วยสารเคลือบที่มีสมบัติโฟโตแคตะไลติก (Photocatalytic) และ สมบัติไฮโดรฟิลิก (Hydrophilicity) ซึ่งก็คือ ไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO₂) โดยปกติไทเทเนียมไดออกไซด์ที่บริสุทธิ์นิยมใช้กันมากในอุตสาหกรรมผลิตสีขาว กระจกชาย ไทเทเนียมไดออกไซด์มีความเสถียร ไม่เกิดปฏิกิริยาเคมี และเป็นสารไม่มีพิษ หรือก่ออันตรายต่อสิ่งมีชีวิต ผลจากสมบัติโฟโตแคตะไลติกของไทเทเนียมไดออกไซด์ สามารถทำลายและสลาย สารอินทรีย์ (Organic compounds) หรือสารอนินทรีย์ (Inorganic compounds) บางชนิดได้ ซึ่งได้แก่ สารที่ก่อให้เกิดมลภาวะสารพิษ ที่มีอยู่ในน้ำ อากาศ หรือในดิน ตลอดจนสามารถฆ่าแบคทีเรีย ไวรัส ที่เกาะอยู่บนผิวได้ โดยไม่ปล่อยสารพิษหรืออันตรายจากปฏิกิริยา และมีการนำ TiO₂ เคลือบบนหลอดฟลูออเรสเซนต์เพื่อใช้ในการฟอกอากาศเสียให้เป็นอากาศดี (Wang, U.S. Patent No.0206813, 2004) ในขณะที่มีงานวิจัยที่มีการจดสิทธิบัตรทางด้านนี้ เช่น นำ TiO₂ เป็นแคตะลิสต์ในการสลายสารพิษที่อยู่ในอากาศ ได้แก่ NO₂, NO, NO_x (Hubbell. et al., U.S. Patent No.0159309, 2005) และ บำบัดน้ำเสียโดยกำจัดสาร Hydrocarbons, Phenols, Chloroaromatic ส่วนสมบัติพื้นผิวของไทเทเนียมไดออกไซด์ ภายใต้แสงที่เรียกว่าไฮโดรฟิลิก หมายถึง ชอบน้ำ ส่งผลให้หยดน้ำที่เกาะบนพื้นผิวไม่สามารถคงรูปเป็นหยดน้ำอยู่ได้ แต่จะแผ่กระจายเป็นฟิล์มบางๆ คลุมผิวอย่างสม่ำเสมอ ทำให้กระจกไม่เป็นฝ้าฉ่ำ ดังแสดงในรูปที่ 1.5 ซึ่งปกติพื้นผิวของกระจกเมื่อมีความชื้นในอากาศมาสัมผัสจะเกิดเป็นหยดน้ำเล็กๆ มาเกาะได้ง่ายทำให้เกิดเป็นฝ้าขุ่นมัว กระจกที่เคลือบผิวด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ ที่มีสมบัติไฮโดรฟิลิก ดังกล่าวก็สามารถแก้ปัญหานี้ได้ จากสมบัติทั้งสองดังกล่าวข้างต้น ช่วยให้การทำความสะอาดผลิตภัณฑ์ต่างๆ ทำได้ง่ายขึ้นและมีประสิทธิภาพ โดยทำให้สิ่งสกปรก สารอินทรีย์ต่างๆ จะถูกทำลายเมื่อได้รับแสงแดดด้วยกลไกโฟโตแคตะไลติก และในขณะเดียวกันด้วยสมบัติไฮโดรฟิลิก

ดังนั้นในงานวิจัยนี้ได้เลือกศึกษาผิวที่เป็นไฮโดรฟิลิกในการทำความสะอาดผิวตัวเอง (Self – cleaning) และมุ่งพัฒนาสารเคลือบผิวที่มีไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นส่วนประกอบ โดยเติมสารบางชนิดเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพด้านโฟโตแคตะไลติก และไฮโดรฟิลิก ซึ่งทำให้ประสิทธิภาพการทำความสะอาดแบบขึ้นรูปยางได้ง่าย สะดวก และนอกจากนั้นข้อดีอีกประการหนึ่งคืออาจช่วยเพิ่มสมบัติการเกาะของน้ำยางด้วย ซึ่งลดการใช้สารช่วยจับตัวหรือไม่ใช้เลย



รูปที่ 1.5 การนำแคตะลิสต์ไปใช้ในการเคลือบผลิตภัณฑ์ในการทำความสะอาดตัวเอง

(ที่มา:<http://www.self-cleaning-glass.com>; <http://www.bfrich.com/sunclean.html>;

9/06/2554)

1.2 ทฤษฎีและหลักการ

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาสมบัติของตัวแปรสำคัญที่ส่งผลต่อสมบัติการเป็นโฟโตแคตะลิสต์ (Photocatalyst) และสมบัติการทำความสะอาดตัวเอง (Self-cleaning) ของสารเคลือบที่สังเคราะห์และการนำแบบขึ้นรูปที่พัฒนาขึ้นไปประยุกต์ใช้เตรียมฟิล์มยางด้วยวิธีการจุ่ม ตลอดจน

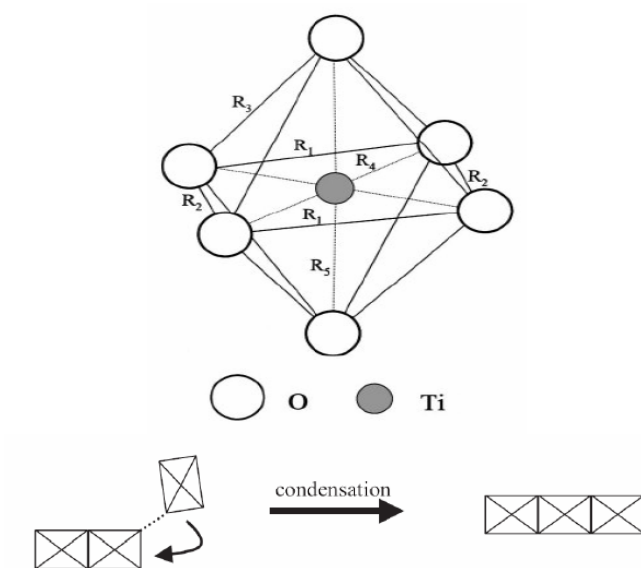
การศึกษาเรื่องสมบัติการล้างทำความสะอาดแบบขึ้น ดังนั้นในรายละเอียดที่ศึกษาจะกล่าวถึงหัวข้อสำคัญที่เกี่ยวข้องดังนี้

1.2.1 สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2)

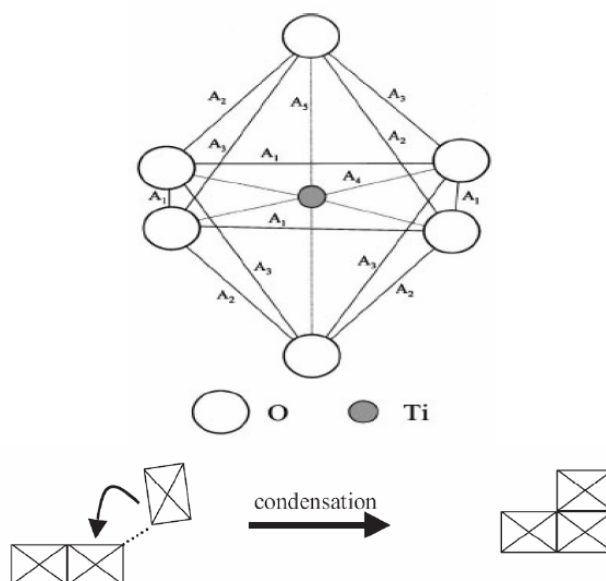
ไทเทเนียมไดออกไซด์หรือไทเทเนีย เป็นสารประกอบออกไซด์ของโลหะไทเทเนียมซึ่งอยู่ในกลุ่มโลหะทรานซิชัน ไทเทเนียมไดออกไซด์ได้รับความสนใจเป็นอย่างมากในการนำมาประยุกต์สำหรับการใช้งานด้านต่างๆ เนื่องจากมีความเสถียรต่อสารเคมี ไม่มีความเป็นพิษ ราคาไม่แพงมาก และสมบัติพิเศษที่เป็นประโยชน์ที่ดีอีกหลายอย่าง โดยเฉพาะอย่างยิ่งไทเทเนียมไดออกไซด์ ถูกนำมาใช้อย่างกว้างขวางในด้านการเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานรูปอื่น เช่น เปลี่ยนเป็นพลังงานไฟฟ้าในเซลล์แสงอาทิตย์ (Solar cell) และเปลี่ยนเป็นพลังงานเคมีในกระบวนการเร่งปฏิกิริยาแบบใช้แสง (Photocatalysis) เป็นต้น เนื่องจากไทเทเนียมมีค่าดัชนีการหักเหของแสงสูง จึงถูกนำมาใช้เป็นสารเคลือบป้องกันการสะท้อนของแสงในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิกอน (Silicon solar cell) และในอุปกรณ์ทางการมองเห็นชนิดแผ่นบาง (Thin film optical device) หลายชนิด ไทเทเนียมไดออกไซด์ยังถูกนำมาใช้เป็นตัวตรวจสอบก๊าซ (Gas sensor) เนื่องจากมีค่าการนำไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงไปได้ตามองค์ประกอบของก๊าซที่สภาวะบรรยากาศ เช่น สามารถใช้ตรวจสอบก๊าซออกซิเจน คาร์บอนมอนอกไซด์ และมีเทน เป็นต้น นอกจากนี้การที่ไทเทเนียมไดออกไซด์สามารถเข้ากับร่างกายมนุษย์ได้ จึงถูกนำมาใช้เป็นวัสดุทางชีวภาพ เช่น กระดูกเทียม เป็นต้น นอกจากนี้ไทเทเนียมไดออกไซด์จะมีประสิทธิภาพสูงในกระบวนการเร่งปฏิกิริยาแบบใช้แสงแล้ว ยังสามารถนำมาใช้ในกระบวนการเร่งปฏิกิริยาแบบปกติ (ไม่ใช้แสง) ได้ดีอีกด้วย โดยสามารถใช้เป็นทั้งตัวเพิ่มความสามารถในการทำปฏิกิริยา (Promoter) และตัวรองรับ (Support) ซึ่งกระบวนการที่ใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ในการเร่งปฏิกิริยา เช่น การกำจัดสารประกอบออกไซด์ของไนโตรเจน (NO_x) การกำจัดสารประกอบสารอินทรีย์ระเหยง่าย (เช่น ไดออกซินและสารประกอบคลอรีน) การผลิตไฮโดรเจนด้วยปฏิกิริยา Gas shift reaction กระบวนการ Fischer-Tropsch และการกำจัดสารประกอบซัลเฟอร์ เป็นต้น คุณสมบัติทางด้านสารกึ่งตัวนำของไทเทเนียมไดออกไซด์สำหรับปฏิกิริยาแบบใช้แสงร่วมเนื่องจากไทเทเนียมมีตำแหน่งที่ว่างของออกซิเจนในโครงสร้างผลึก ไทเทเนียจึงจัดได้ว่าเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (n-type semiconductor) ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบใช้แสงร่วมที่เป็นสารกึ่งตัวนำนั้นจะมีความสามารถในการดูดซับสารตั้งต้นในการเกิดปฏิกิริยา 2 ชนิดไปพร้อมๆกัน ซึ่งสามารถก่อให้เกิดทั้งปฏิกิริยาออกซิเดชันและรีดักชัน โดยการกระตุ้นด้วยการดูดกลืนโฟตอนที่ มีพลังงานเท่ากับหรือมากกว่าค่าแถบช่องว่างพลังงาน (Band gap energy) ความสามารถของสารกึ่งตัวนำที่จะถ่ายโอนอิเล็กตรอนไปยังสารตั้งต้น ในการเกิดปฏิกิริยาที่ถูกดูดซับไว้นั้นขึ้นอยู่กับตำแหน่งของแถบช่องว่างพลังงานของสารกึ่งตัวนำและ

ตำแหน่งของพลังงานในการเกิดปฏิกิริยารีดอกซ์ (Redox) ของสารที่ถูกดูดซับ โดยปกติแล้วระดับของพลังงานที่ต่ำที่สุดของแถบการนำ (Conduction band) จะเป็นระดับของพลังงานที่ทำให้เกิดปฏิกิริยารีดักชันด้วยอิเล็กตรอนที่ถูกกระตุ้น (Excited electron) ในทางกลับกันระดับของพลังงานที่สูงที่สุดของแถบเวเลนซ์ (Valence band) จะเป็นระดับพลังงานที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยหลุมประจุบวก (Hole) ที่เหลืออยู่หลังจากที่อิเล็กตรอนถูกกระตุ้นไปแล้ว

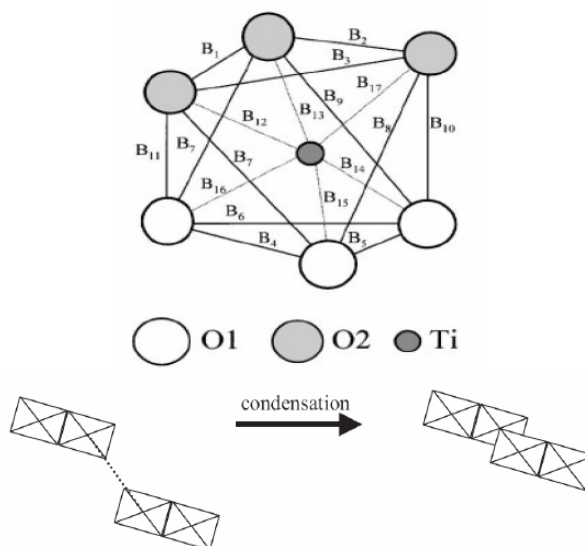
(ก) รูไทล์



(ข) อะนาทาส



(ค) บรูคไคต์



รูปที่ 1.6 โครงสร้างผลึกของเฟสไทเทเนียมไดออกไซด์ (ก) รูไทล์ (ข) อะนาเทส (ค) บรูคไคต์
(ที่มา: Radhika Bhave, 2007)

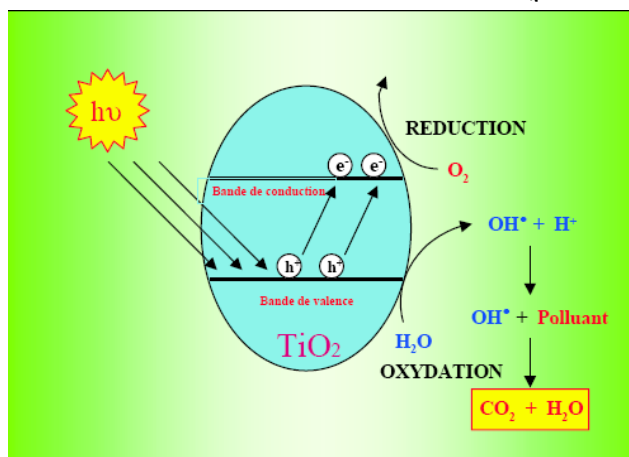
ไทเทเนียมไดออกไซด์มีโครงสร้าง 3 แบบแสดงดังรูปที่ 1.6 คือ รูไทล์ ซึ่งมีโครงสร้างผลึกแบบเตตระโกนาล อะนาเทส มีโครงสร้างผลึกแบบ เตตระโกนาล และบรูคไคต์ มีโครงสร้างผลึกแบบออร์โทโรมบิก อะนาเทสมีแถบช่องว่างพลังงาน 3.22 eV ซึ่งมากกว่ารูไทล์ (3.02 eV) อะนาเทสจึงมีสมบัติเป็นโฟโตแคตะลิสต์ที่สูงกว่ารูไทล์ อิเล็กตรอนที่ถูกกระตุ้นของผลึก รูไทล์จะกลับมารวมตัวกับหลุมประจุบวกเร็วมากและเร็วกว่ากรณีของอะนาเทส จึงทำให้ปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกเกิดขึ้นในช่วงเวลาสั้นๆ และมีประสิทธิภาพต่ำ นอกจากนี้ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่อยู่ในรูปเฟสอะนาเทสมีความเป็นผลึกสูงและพื้นที่ผิวมากที่สุด เมื่อเทียบกับเฟสอื่นๆ (Yang et al., 2002) ซึ่งสมบัติเหล่านี้ส่งผลต่อการเป็นโฟโตแคตะลิสต์ของไทเทเนียมไดออกไซด์คืออัตราส่วนพื้นที่ผิวสำหรับการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนและหลุมประจุบวก จะให้ผลปฏิกิริยามากขึ้นเมื่อใช้วัสดุที่มีสมบัติเป็น สารกึ่งตัวนำเป็นคู่กัน เช่นในระบบของ $\text{TiO}_2/\text{SnO}_2$ จากการศึกษาของ Yang และคณะ(2002) พบว่าระบบของ $\text{TiO}_2/\text{SnO}_2$ เป็นตัวโฟโตแคตะลิสต์ที่ดีเนื่องจาก High quantum yield สูง ความแตกต่างของแถบการนำใน TiO_2 และ SnO_2 ส่งผลให้มีการแยกของ Photoinduce e^- - hole pair และยังพบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณของ SnO_2 ให้มากขึ้นทำให้เฟส อะนาเทส เสถียรขึ้น ซึ่ง SnO_2 จะไปป้องกันการรวมตัวกลับกันอีกครั้งระหว่างอิเล็กตรอนและหลุมประจุบวกที่ทำให้ยับยั้งการเกิดปฏิกิริยา ซึ่งในที่สุดก็ส่งผลต่อปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกที่ดีขึ้นด้วย

1.2.2 ปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติก (Photocatalytic effect)

ปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกถูกค้นพบโดย Fujishima เมื่อปี ค.ศ.1967 เป็นปฏิกิริยาที่เกิดจากการกระตุ้นด้วยแสง โดยส่วนใหญ่วัสดุที่เป็นโฟโตแคตะลิสต์ จะเป็นวัสดุที่อยู่ในกลุ่มของเซมิคอนดักเตอร์ หลักการเกิดปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกเมื่อวัสดุโฟโตแคตะลิสต์ถูกกระตุ้นด้วยแสงจะดูดซับพลังงานเท่ากับหรือมากกว่าแถบช่องว่างพลังงาน ทำให้อิเล็กตรอนในแถบเวเลนซ์ถูกกระตุ้นสู่ในแถบการนำทำให้ในแถบเวเลนซ์เกิดหลุมประจุบวกขึ้น เมื่อสัมผัสกับความชื้นหรือน้ำจะก่อให้เกิดไฮดรอกซิลเรดิคัล ($\text{OH}\cdot$) และซูเปอร์ออกไซด์ เรดิคัลแอนไอออน (O_2^-) ดังแสดงในสมการ (1.1) - (1.3) โดยในที่นี้ใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นโฟโตแคตะลิสต์



ไฮดรอกซิลเรดิคัลและซูเปอร์ออกไซด์เรดิคัลแอนไอออนเป็นตัวออกซิไดซ์ที่ดีสามารถเกิดปฏิกิริยากับสารอินทรีย์ทำให้เกิดการสลายตัวได้ กลไกการเกิดปฏิกิริยาแสดงดังรูปที่ 1.7



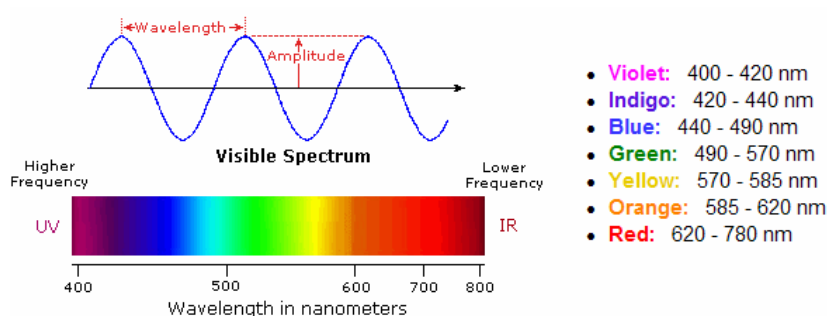
รูปที่ 1.7 กลไกการเกิดปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติก (Photocatalytic) ของไทเทเนียมไดออกไซด์
(ที่มา: <http://www.enpc.fr/cereve/HomePages/thevenot/www-jes-2002/Aitali-Paper-2002.pdf> :

9/06/2554)

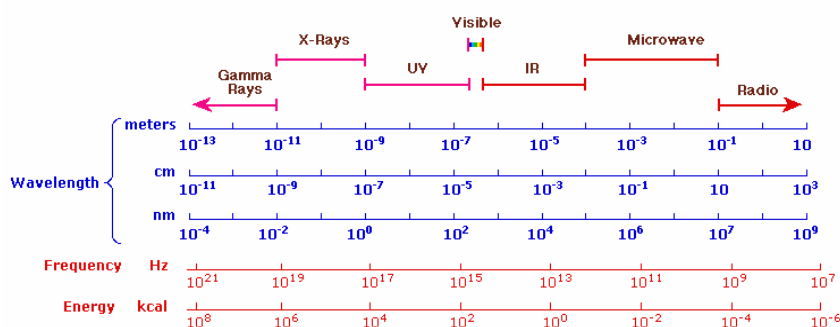
คำว่า Photocatalysis คือ ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจากการใช้แสง และตัวแคตะลิสเป็นตัวกระตุ้นให้เกิดปฏิกิริยา โดยเป็นปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นกับอะตอมหรือโมเลกุลที่ถูกฉายด้วยแสงในช่วงอัลตราไวโอเล็ต (Ultraviolet) หรือในช่วงที่เห็นได้ด้วยตาเปล่า (Visible) (รูปที่ 1.8 และ 1.9) เป็นแสงที่มีความยาวคลื่น (Wavelength) ระหว่าง 800 nm ถึง 200 nm ซึ่งเป็นช่วงความยาวคลื่นที่เหมาะสมที่

จะเข้าไปกระตุ้น การทำงานของตัวแคตะลิสต์ โดยจะต้องมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับช่องว่างแถบพลังงาน (Band gap energy) ภายในตัวแคตะลิสต์จึงจะทำให้เกิดกระบวนการโฟโตแคตะไลติกขึ้น (กันยาพรและคณะ,2545)

หลักการการทำงานของกระบวนการโฟโตแคตะไลติกออกซิเดชันคือ การให้พลังงานแสงมากกว่าค่าแถบช่องว่างพลังงาน (Energy band gap) ซึ่งเป็นเป็นค่าของความแตกต่างระหว่างพลังงานของแถบนำไฟฟ้า (Conduction band) กับแถบเวเลนซ์ (Valence band)



รูปที่ 1.8 ความยาวคลื่นของแสง Visible



รูปที่ 1.9 ความยาวคลื่น ความถี่ และพลังงานของแสงต่างๆ

(ที่มา: <http://www.cem.msu.edu/~reusch/VirtualText/Spectrpy/UV-Vis/spectrum.htm>; 23/08/2551)

ไทเทเนียมไดออกไซด์ ถูกใช้เป็น โฟโตแคตะลิสต์ (Photocatalyst) อย่างแพร่หลาย เพราะไทเทเนียมไดออกไซด์ไม่เป็นพิษ มีสมบัติทางเคมีที่เสถียรและมีประสิทธิภาพของปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกสูง มีสมบัติเป็นตัวออกซิไดซ์อย่างรุนแรง ในขณะที่ผิวของไทเทเนียมไดออกไซด์ยังมีสมบัติชอบน้ำ (Hydrophilicity) สูงด้วย มุมสัมผัสระหว่างน้ำกับผิวฟิล์มที่เคลือบด้วยสารไทเทเนียมไดออกไซด์มีค่า 0° ภายใต้การกระตุ้นด้วยแสงยูวี ซึ่งปรากฏการณ์นี้สามารถอธิบายได้โดยการเปลี่ยนโครงสร้างในผิวของไทเทเนียมไดออกไซด์ เมื่อไทเทเนียมไดออกไซด์ถูกกระตุ้นด้วยแสง อิเล็กตรอนที่อยู่ในแถบเวเลนซ์หลุด เกิดหลุมประจุบวกขึ้นซึ่งหลุมประจุบวกจะตอบสนอง

ต่อผิวของออกซิเจนอะตอมและเกิดหมู่ไฮดรอกซิล จากปรากฏการณ์นี้จึงมีการนำไปใช้งานทางด้านต่างๆ เช่น การทำความสะอาดตัวเองของกระเบื้องหรือการป้องกันจากหมอกจับกระจกรถยนต์คอนกรีต (Kanai N. et al., 2004; Hubbell et al., U.S. Patent 0159309, 2005)

การศึกษาประสิทธิภาพโฟโตแคตะลิซิสของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เป็นเฟสอะนาเทส เป็นไปอย่างกว้างขวาง มีการใช้ตัวเติมลงไปไนไทเทเนียมไดออกไซด์เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการเป็นโฟโตแคตะลิซิสของไทเทเนียมไดออกไซด์ ซึ่งเป็นการศึกษาที่เน้นใช้ทางด้านสิ่งแวดล้อมและการทำความสะอาดตัวเอง นอกจากนี้มีการนำไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นแคตะลิสต์ในปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกไปศึกษาการทำลายเชื้อโรคและกำจัดเซลล์มะเร็ง ซึ่งเป็นโรคที่มีอัตราการตายของคนมาเป็นอันดับต้นๆ (Blake et al., 1999) รูปแบบของโฟโตแคตะลิสต์ที่เตรียมขึ้นเพื่อนำไปใช้งานอาจอยู่ในรูปผงหรือเป็นฟิล์มบางเคลือบบนวัสดุที่ต้องการทดสอบก็ได้

สมบัติทางพื้นผิวของไทเทเนียมไดออกไซด์ภายใต้แสงที่เรียกว่าชอบน้ำ ส่งผลให้หยดน้ำที่เกาะบนพื้นผิวไม่สามารถคงเป็นรูปหยดน้ำได้ แต่จะแผ่กระจายเป็นฟิล์มบางๆปกคลุมผิวอย่างสม่ำเสมอคล้ายกระจกบางใสทำให้กระจกไม่เป็นฝ้าขาว เนื่องจากมุมสัมผัสระหว่างหยดน้ำกับพื้นผิวกระจกที่เคลือบด้วยฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์มีค่าต่ำมากจนกระทั่งเป็นศูนย์ (Superhydrophilicity) เมื่ออยู่ภายใต้แสงเป็นเวลานาน พื้นผิวของกระจกเมื่อมีความชื้นในอากาศมาสัมผัสก็จะเกิดเป็นหยดน้ำเล็กๆ มากมายมาเกาะได้ง่ายทำให้เกิดเป็นฝ้าขุ่นขาว เนื่องจากมุมสัมผัสระหว่างหยดน้ำกับผิวกระจกมีค่าอยู่ที่ประมาณ 20-30 องศา (พรนภา, 2005) หยดน้ำบนพื้นผิวจึงคงสภาพเป็นหยด กระจกที่ถูกเคลือบผิวด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ ที่มีสมบัติชอบน้ำดังกล่าวกระจกจะใสและไม่มีฝ้า หรือที่เรียกว่า Anti-fogging glass ดังแสดงในรูปที่ 1.5 ให้เห็นอย่างชัดเจน

จากสมบัติดังกล่าวข้างต้น ช่วยให้การทำความสะอาดด้วยตัวเองของพื้นผิวที่เคลือบด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์มีประสิทธิภาพ โดยทำให้สิ่งสกปรก สารอินทรีย์ต่างๆ ไม่ว่าจะเป็นฝุ่นละออง เขม่าควัน คราบน้ำมันที่เกาะที่ผิวของกระจกที่เคลือบด้วยฟิล์มของไทเทเนียมไดออกไซด์กันอย่างหลวมๆ ซึ่งจะถูกกำจัดออกได้เองเมื่อมีการสัมผัสกับแสงแดดด้วยกลไกของปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกและในขณะเดียวกันด้วยสมบัติชอบน้ำ ทำให้หยดน้ำถูกทำลายกลายเป็นแผ่นฟิล์มของน้ำบางๆ ซึ่งจะชะล้างสิ่งสกปรกที่ถูกทำลายเหล่านั้นหลุดออกไปได้ง่าย เนื่องจากน้ำที่ปกคลุมผิวนั้นเป็นแผ่นฟิล์มที่บางจึงช่วยทำให้กระจกนั้นแห้งได้อย่างรวดเร็วโดยไม่ทิ้งรอยหรือคราบสิ่งสกปรกให้เห็นเหมือนกระจกปกติ

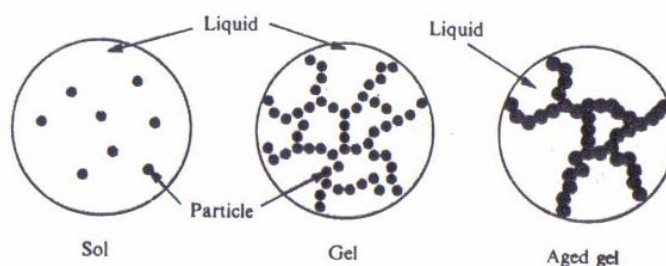
นอกจากนี้กลไกการทำความสะอาดด้วยตัวเองนี้สามารถเกิดขึ้นได้เองและทำงานได้เป็นอย่างดีเมื่อมีฝนตก โดยฝนจะช่วยให้การชะล้างมีประสิทธิภาพไม่ต้องทำความสะอาดซ้ำ ในกรณีที่อากาศแห้งก็สามารถทำความสะอาดได้ง่ายโดยการฉีดพ่นน้ำธรรมดาสิ่งสกปรกก็หลุดได้ง่าย

1.2.3 กระบวนการ โซล - เจล (Brinker and Scherer, 1990; เล็ก สีคง, 2547)

กระบวนการผลิตด้วยวิธีโซล-เจล เป็นกระบวนการที่มีประโยชน์หลายอย่างในการผลิตเซรามิกแก้ว และ โดยเฉพาะวัสดุที่ต้องการความบริสุทธิ์สูงซึ่งงานวิจัยนี้ได้เลือกกระบวนการโซล-เจลเนื่องจากกระบวนการนี้มีข้อดีหลายอย่างดังนี้

- ทำให้เกิดพันธะบางๆระหว่างวัสดุฐาน (Substrate) กับตัวสารเคลือบ
- สามารถเคลือบให้มีความหนาเพื่อป้องกันการกัดกร่อนได้
- สามารถเคลือบได้ทั้งวัสดุที่มีรูปร่างง่าย ๆ และที่มีรูปร่างซับซ้อน
- ทำได้ง่าย ราคาถูก และเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพในการเคลือบสูง
- มีความบริสุทธิ์สูง
- ความเป็นเนื้อเดียวกัน
- เตรียมได้ด้วยอุณหภูมิต่ำ

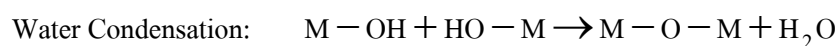
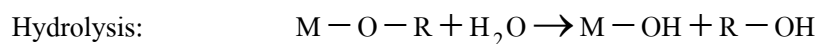
โดยทั่วไปกระบวนการโซล-เจล เป็นกระบวนการเปลี่ยนสถานะจากของเหลวที่เรียกว่า “โซล” ซึ่งส่วนมากอยู่ในรูปของสารแขวนลอยที่มีขนาดอนุภาคประมาณ 0.1-1 ไมครอน เป็นของแข็งที่เรียกว่า “เจล” ดังในรูปที่ 1.10

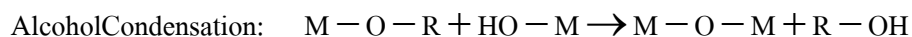


รูปที่ 1.10 การเปลี่ยนสถานะจากโซลเป็นเจล

(ที่มา: <http://phys.suwan.ac.kr/jgyoon/lab/solgel.html> : 11/01/05 ; Brinker and Scherer, 1990)

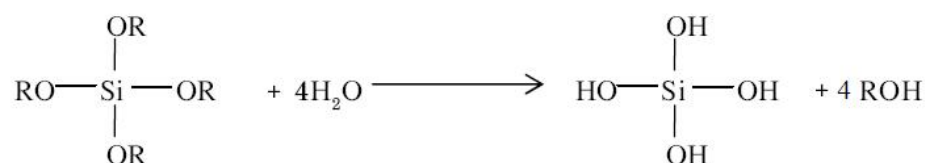
ปฏิกิริยาในกระบวนการโซล-เจล มี 3 ปฏิกิริยา คือ ไฮโดรไลซิส (Hydrolysis) การควบแน่นเป็นน้ำ (Water condensation) และการควบแน่นเป็นแอลกอฮอล์ (Alcohol condensation) ดังสมการข้างล่าง มีปัจจัยสำคัญที่มีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาได้แก่ pH ตัวเร่งปฏิกิริยา อัตราส่วนโมลของน้ำกับโลหะ และอุณหภูมิ ดังนั้นการควบคุมปัจจัยเหล่านี้ ในภาวะที่ต่างกันทำให้โซลและเจลที่ได้มีสมบัติและโครงสร้างต่างกัน



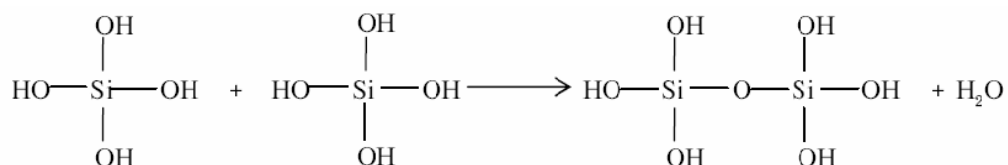


เมื่อ M แทนโลหะ ได้แก่ Si, Zr, Ti, Al, Sn, Ce และ OR แทนกลุ่มอัลคอกซิล (Alkoxy group)

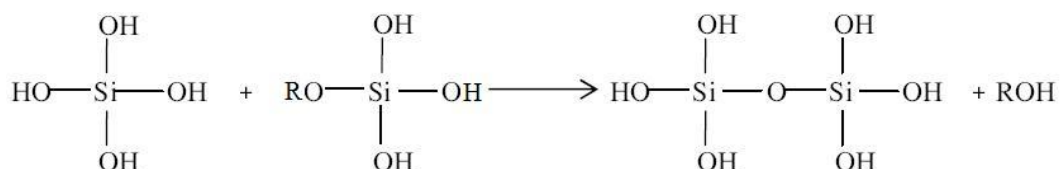
ขั้นตอนแรกของการทำโซล - เจล คือผสมสารตั้งต้น (Precursor) กับน้ำสารตั้งต้นที่นิยมใช้ในกระบวนการโซล - เจล เป็นสารประกอบโลหะและกึ่งโลหะบางชนิดที่ไวต่อการเกิดปฏิกิริยา เช่น Metal alkoxide เป็นสารตั้งต้นที่ได้รับความนิยมสูง เนื่องจากทำปฏิกิริยากับน้ำได้ดี เช่น Tetramethoxysilane (TMOS) และ Tetraethoxysilane (TEOS) ส่วนอัลคอกไซด์ (Alkoxide) ชนิดอื่น เช่น อะลูมินาต (Aluminate) ไทเทเนต (Titanate) และบอไรเรต (Borate) มีใช้กันแพร่หลาย และมักใช้ร่วมกับ TEOS เช่น $Si(OR)_4$ ซึ่ง R คือ CH_3 (TMOS) C_2H_5 (TEOS) หรือ C_3H_7 จะเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสกับน้ำดังสมการ



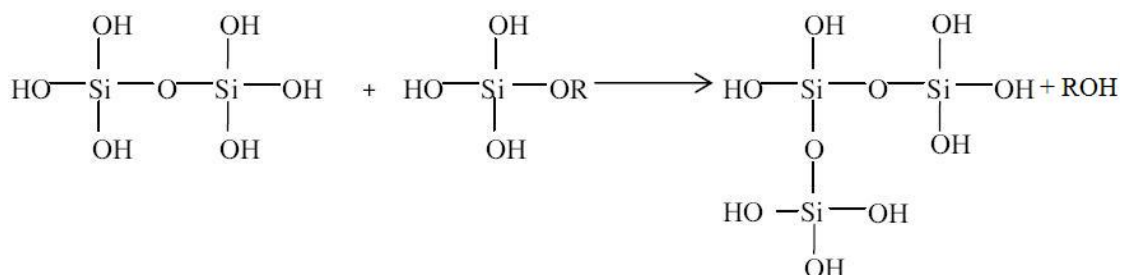
และในขณะเดียวกันก็จะเกิดปฏิกิริยาควมน้ำในน้ำ



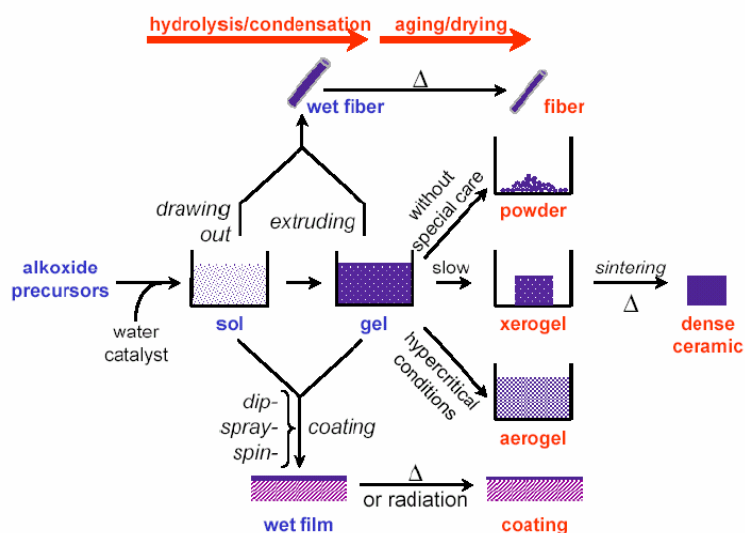
หรือ การควมน้ำเป็นแอลกอฮอล์



สารประกอบที่เกิดขึ้นจะเกิดปฏิกิริยาควมน้ำต่อไปจนกลายเป็นโครงตาข่ายซิลิกา (Silica network) อยู่ในภาวะที่เรียกว่า เจล จึงเรียกปฏิกิริยาดังกล่าวนี้ว่า พอลิคอนเดนชันเซชัน



ในกระบวนการผลิตทั้งจากภาวะที่เป็น โซล หรือ เจล เมื่อเข้าสู่ภาวะทำให้แห้งจะ ได้ผลิตภัณฑ์ในรูปแบบต่างๆ เช่น เส้นใย(Fiber) แอโรเจล (Aerogel) ซีโรเจล (Xerogel) ผง (Powder) และ ฟิล์มเคลือบ (Coating film) เป็นวัสดุพิเศษสำหรับอุตสาหกรรมอื่นๆ ต่อไป (รูปที่ 1.11)



รูปที่ 1.11 กระบวนการโซล-เจล

(ที่มา: <http://phys.suwon.ac.kr/~jgyoon/lab/solgel.html> :11/01/2548)

วิธี โซล-เจล ประกอบด้วย การเตรียมสารละลายเนื้อเดียวกัน เปลี่ยนสารละลายเป็น โซล สำหรับ TEOS ปฏิกริยาจะเริ่มด้วยการไฮโดรไลซิสกลุ่ม Alkoxyyl หนึ่งหรือมากกว่าของ โมเลกุล TEOS ในการผลิตจะใช้น้ำและแอลกอฮอล์ 2 โมเลกุลประกอบด้วย OH- group จะถูกพอลิ เมอร์ไรซ์โดยกำจัดน้ำออก ทำให้เกิดการฟอร์มตัวด้วยพันธะ Si – O – Si และเมื่อต่อกับกลุ่มอื่นก็จะ ได้เป็นพันธะ Si – O – Si – O – Si การซ้ำกระบวนการทำให้ได้โมเลกุลเป็นเส้นยาวหรืออนุภาคเป็น 3 มิติที่โมเลกุลเส้นตรงและอนุภาคละเอียดประกอบด้วยพันธะซ้ำๆกัน ดังแสดงในรูปที่ 1.11

การนำเทคโนโลยีโซล-เจล มาใช้ประโยชน์สามารถทำได้หลายรูปแบบ เช่น ผง ละเอียด ฟิล์มบาง เส้นใย และวัสดุก้อน ซึ่งเป็นสารตั้งต้นในการผลิตผลิตภัณฑ์ต่างๆ เช่น แก้ว (รูปที่

1.12) สารเคลือบป้องกันการสึกกร่อน การสะท้อนแสงและการเกาะติดผิวของน้ำ เป็นต้น เทคโนโลยีโซล-เจลจะเป็นประโยชน์อย่างยิ่งในการผลิตสารและวัสดุที่มีสมบัติเฉพาะตัวหรือต้องการความบริสุทธิ์สูง หรือแม้แต่การผลิตสารหรือวัสดุทดแทนการใช้แร่ หรือทรัพยากรธรรมชาติหายาก และมีอยู่จำกัด ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการโซล-เจลจะมีความบริสุทธิ์สูง เนื่องจากเป็นการเตรียมสารหรือวัสดุในระดับโมเลกุลสามารถกำหนดสมบัติต่างๆ ที่ต้องการได้ง่าย นับเป็นประโยชน์ต่ออุตสาหกรรมหลายประเภท เช่น อุตสาหกรรมเคมี เทคโนโลยีพลังงาน อุตสาหกรรมรถยนต์ และอุตสาหกรรมเซรามิก เป็นต้น การนำเทคโนโลยีโซล-เจลมาใช้ประโยชน์ในเชิงอุตสาหกรรม ยังต้องศึกษาในรายละเอียดเกี่ยวกับภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมและลักษณะและสมบัติของสารหรือวัสดุที่ต้องการ ซึ่งมีความแตกต่างกันในแต่ละผลิตภัณฑ์ อย่างไรก็ตามแนวโน้มการนำเทคโนโลยีดังกล่าวมาใช้ในเชิงพาณิชย์มีความเป็นไปได้สูง เนื่องจากกระบวนการโซล-เจลเป็นเทคโนโลยีการผลิตที่ทำได้ที่อุณหภูมิห้อง สามารถทำได้ตั้งแต่ระดับห้องปฏิบัติการจนถึงระดับอุตสาหกรรม ซึ่งสามารถสนองตอบความต้องการของผู้บริโภคได้จริง



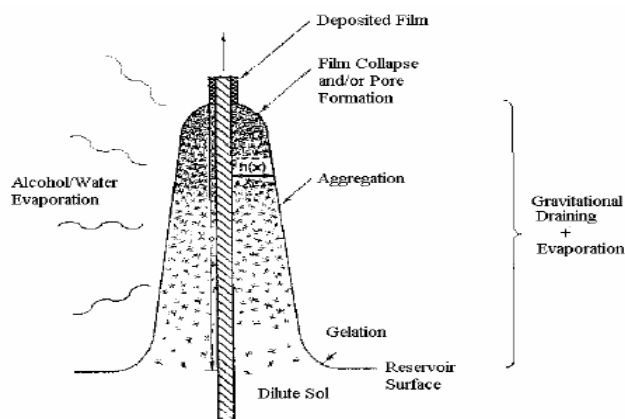
รูปที่ 1.12 ตัวอย่างผลิตภัณฑ์แก้วเคลือบจากกระบวนการ โซล-เจล
(ที่มา: <http://www.sgpinc.com/materials.htm> :9/06/2554)

1.2.4 การเคลือบผลิตภัณฑ์เซรามิกและแก้ว

ผลิตภัณฑ์เซรามิกอาจจะเคลือบหรือไม่เคลือบก็ได้ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับการใช้งาน ผลิตภัณฑ์เซรามิกที่ไม่เคลือบมีความสามารถในการดูดซึมน้ำได้ดีและถูกกัดกร่อนจากสารเคมีได้ง่าย การเคลือบจะมีลักษณะเป็นแก้วบางฉาบติดอยู่ที่ผิวผลิตภัณฑ์ทำให้ผลิตภัณฑ์มีความแข็งแรงทนต่อการกัดกร่อนได้ดี ป้องกันไม่ให้สกปรกง่ายและสะดวกในการทำมาความสะอาด วิธี Sol - Gel เป็นการเคลือบเซรามิกที่นิยมกันมากเนื่องจากมีต้นทุนต่ำ อุณหภูมิในการเคลือบต่ำ และสามารถเคลือบรูปร่างที่ซับซ้อนได้ แต่มีข้อเสียคือมีการหดตัวสูง กระบวนการโซล-เจลเริ่มจาก Sol หรือ คอลลอยด์ เมื่อเกิดการเชื่อมโยงพันธะทางเคมีและตัวทำละลายถูกระเหยออกไป Sol ก็จะกลายเป็น

Gel ที่มีความหนืดมากขึ้น และเมื่อให้ความร้อนแก่ โซล-เจล จะแข็งตัวเป็นฟิล์มมีความหนาน้อยกว่า 1 ไมครอน การเคลือบมีหลายวิธีด้วยกันคือ การเคลือบโดยการจุ่ม (Dip) การเคลือบโดยการหมุน (Spin) และการเคลือบโดยการพ่น (Spray) ความหนาของเคลือบโดยการจุ่ม ขึ้นอยู่กับความหนืดของโซล-เจล และความเร็วในการยกขึ้นจาก Sol - Gel สารตั้งต้นของ Sol - Gel คือ Metal alkoxides ($M(OR)_z$) เมื่อ M คือ โลหะที่มีเลขอะตอม z ส่วน OR คือหมู่อัลคิล Metal alkoxides สามารถเตรียมได้ 2 วิธีคือ ปฏิกิริยาระหว่างโลหะกับแอลกอฮอล์ และปฏิกิริยาโลหะคลอไรด์

กรรมวิธีในการเคลือบมีความหลากหลาย เช่น การจุ่ม การพ่น CVD เป็นต้น ซึ่งการเลือกวิธีการจุ่มแบบพิมพ์ลงในสารละลายที่เป็นสารละลาย แล้วค่อยๆดึงแบบพิมพ์ขึ้นและทำให้สารละลายเกาะบนแบบพิมพ์จนแห้ง (รูปที่ 1.13) การกระทำเช่นนี้อาจจะทำซ้ำกันหลายๆครั้งเพื่อให้มีความหนาของฟิล์มตามต้องการ ความเร็วของการจุ่มแบบพิมพ์ลงในสารละลายไม่ค่อยเป็นปัญหาสำคัญมากนัก แต่จะสำคัญในขณะที่แบบพิมพ์สัมผัสกับผิวของสารละลาย โดยที่จะต้องควบคุมให้ความเร็วในขณะนั้นอย่าให้สูง เพื่อป้องกันการเกิดฟองอากาศบนแบบพิมพ์ได้



รูปที่ 1.13 กลไกการจุ่มขึ้นงานขึ้นมาจากสารละลาย

(C.J. Brinker and A.J. Hurd, 1994)

1.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

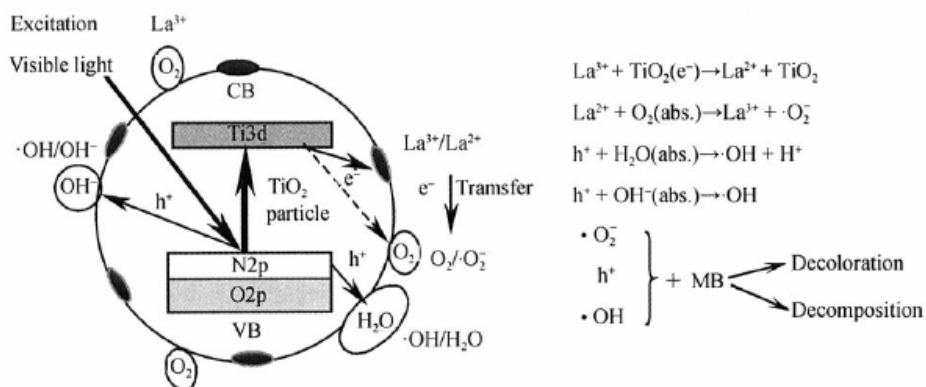
1.3.1 การเพิ่มประสิทธิภาพของปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกของไทเทเนียมไดออกไซด์

ก) การเติมด้วยโลหะหรือโลหะ

การเพิ่มประสิทธิภาพปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกให้กับไทเทเนียมไดออกไซด์ โดยการเติมด้วยโลหะและอโลหะเป็นวิธีที่มีการศึกษากันอย่างแพร่หลาย กลไกการเพิ่มประสิทธิภาพ

ของการเติมโลหะและอโลหะมีได้อธิบายไว้หลายๆโมเดลด้วยกัน แตกต่างกันไปตามชนิดของตัวเติม

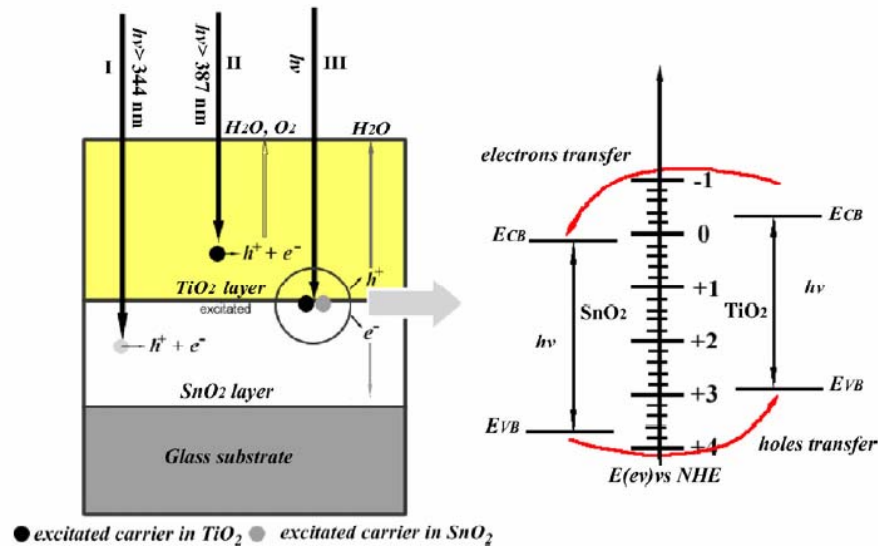
Liu และคณะ (2007) ศึกษากลไกการเพิ่มประสิทธิภาพของปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกของไทเทเนียมไดออกไซด์ ที่เติมด้วยไนโตรเจน (N) และแลนทานัมร่วมกับไนโตรเจน (La, N) พบว่าโครงสร้างเฟสที่เกิดขึ้นเมื่อเผาที่อุณหภูมิ 650 °C ของไทเทเนียมไดออกไซด์ เติม แลนทานัมร่วมกับไนโตรเจน คือ เฟสอะนาเทส และเกิดเฟสผสมระหว่างอะนาเทสกับรูไทล์ เมื่อ ไทเทเนียมไดออกไซด์เติมด้วยไนโตรเจน ประสิทธิภาพปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกของไทเทเนียมไดออกไซด์ เติมด้วยแลนทานัมร่วมกับไนโตรเจน ให้ผลสูงกว่าไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เติมด้วยไนโตรเจน เนื่องจากขนาดผลึกของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เติมด้วยแลนทานัมร่วมกับไนโตรเจนเล็กกว่า ทำให้มีพื้นที่ผิวสูงกว่าไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เติมด้วยไนโตรเจน การเติมด้วยแลนทานัมร่วมกับไนโตรเจนมีกลไกการเพิ่มปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติก ดังในรูปที่ 1.14



รูปที่ 1.14 กลไกการเพิ่มปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกของ TiO₂ โดยการเติมด้วยแลนทานัมและไนโตรเจน (Liu et al., 2007)

Hou และคณะ (2007) อธิบายกลไกการเติม SnO₂ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกใน TiO₂ ซึ่งแถบช่องว่างพลังงานของ SnO₂ เท่ากับ 3.8 eV และ TiO₂ (อะนาเทส) เท่ากับ 3.2 eV (Sayilkan et al., 2007) กว้างกว่า TiO₂ ดังนั้นตำแหน่งแถบการนำของ SnO₂ มีค่าต่ำกว่า TiO₂ แสดงดังในรูปที่ 1.15 เมื่ออิเล็กตรอนถูกกระตุ้นด้วยพลังงานจากแสงยูวีที่มากพอ อิเล็กตรอนจะหลุดจากแถบเวเลนซ์ไปยังแถบการนำของ TiO₂ ทำให้อิเล็กตรอนในแถบการนำสามารถเคลื่อนที่ไปยังแถบการนำของ SnO₂ ซึ่งมีพลังงานน้อยกว่าได้และจะถูกกักเก็บไว้ที่ผิวของ SnO₂ ทำให้ลดระยะเวลาในการกลับมารวมตัวของอิเล็กตรอนและหลุมประจุบวกใน TiO₂ มีผลให้

หลุมประจุบวกที่เกิดบนผิวของ TiO_2 สามารถเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน และทำให้ประสิทธิภาพสูงขึ้น

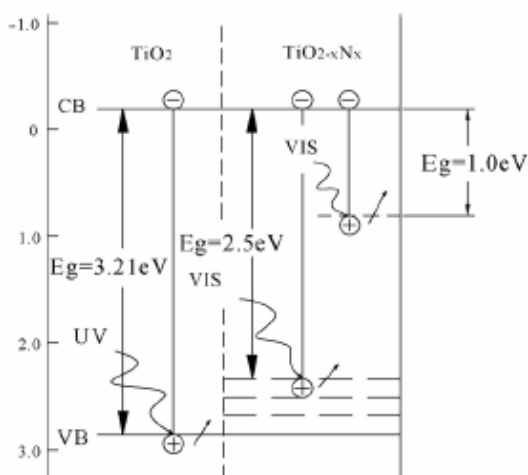


รูปที่ 1.15 กลไกการเคลื่อนที่ของประจุ ในคอมพอสิตฟิล์ม $\text{SnO}_2/\text{TiO}_2$ (Hou et al., 2007)

นอกจากนี้ ไนโตรเจนก็เป็นอีกสารหนึ่งที่มีการได้กับ TiO_2 ที่เป็นผง โดยการใช้ไทเทเนียม (IV) เตตระไฮดรอกไซด์ 10 ml ผสมกับน้ำ 200 ml และเขย่าอย่างรวดเร็ว และทำให้แห้งที่ 60°C จะได้ผงสีขาว แล้วนำไปจุ่มใน hydrazine hydrate (80%) 12 ชั่วโมง แล้วนำไปกรองทำให้แห้งที่ 110°C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ผลการทดสอบจะให้ความยาวคลื่นอยู่ในช่วง 400-550 nm. (Danzhen et al., 2007) การสังเคราะห์ TiO_2 ที่ได้ป ด้วยไนโตรเจนซึ่งสังเคราะห์ด้วยวิธีปฏิกิริยาเคมีเชิงกล (Mechano chemical reaction) โดยมีสารตั้งต้นคือ ไทเทเนีย P25 (Degussa), ยูเรีย, แอมโมเนียมคาร์บอเนต และ Hexamethylenetetramine (HMT, $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{N}_4$) ผสมแล้วนำไปผ่านท่อที่มีไนโตรเจนเหลวแล้วนำไปเผาที่อุณหภูมิ 400°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง (Shu et al., 2008) และไนโตรเจนได้กับ TiO_2 โดยได้ป ร่วมกับนิกเกิล (Xin et al., 2008) หรือ NiFe_2O_4 และซิลิกา (Shihong et al., 2007) จะทำให้เกิดปฏิกิริยา Photocatalyst ที่มีความยาวคลื่นอยู่ในช่วง Visible และสลาย Formaldehyde ดีกว่า TiO_2 บริสุทธิ์ นอกจากนี้ TiO_2 ที่ได้ป ด้วยไนโตรเจนสารเคมีที่ใช้ในการสังเคราะห์ที่ใช้วิธีโซล-เจล ได้แก่ เตตระบิวทิลไทเทเนต (0.05 mol Ti) ml 17 ml เอทิลแอลกอฮอล์ 40 ml เป็นสารละลาย A เอทิลแอลกอฮอล์ 40 ml glacial acetic (CH_3COOH) 10 ml น้ำ 5 ml และเป็นสารละลาย B แล้วเติมแอมโมเนียแปรผัน 2 mol% (1 ml), 4, 6, 8 และ 10 mol% นำไปกวน 0.5 ชั่วโมง แล้วบ่มแล้วบดเป็นผงเผาที่ 400°C 2 ชั่วโมง เป็นการได้ป ไนโตรเจนใน TiO_2 ทำให้ขนาดผลึกโตกว่า TiO_2 บริสุทธิ์ นำไปทดสอบการสลายเมทิลีนบลู (MO) ผลของการได้ปด้วย 2 mol%

สลายดีที่สุด แต่หากเพิ่มอัตราส่วนของไนโตรเจนในช่วง 4-10 mol% ปฏิริยาทางแสงจะด้อยลง การได้ปไนโตรเจนทำให้ไนโตรเจนไปแทนที่ออกซิเจนบางส่วนซึ่งเกิดจากออกซิเจนวาแคนซีและ Ti^{3+} เมื่ออิเล็กตรอนและหลุมถูกกระตุ้นด้วยแสงสิ่งแปลกลอมบนพื้นผิวก็จะถ่วงการรวมตัวกันของหลุมและอิเล็กตรอนทำให้ปฏิริยาดีขึ้น เมื่อมีการได้ปจะทำการกีดขวางของพื้นผิวมากขึ้นส่งผลให้บริเวณการจับตัวแคบลงทำให้ปฏิริยาดีขึ้น (Qin et al., 2007) สารเคมีที่ใช้ในการสังเคราะห์ที่ใช้วิธี โซล-เจล ได้แก่ ไทเทเนียมเตตระโบรไมด์ไททานต 5 ml ผสมกับแอนไฮดรัสแอลกอฮอล์ 95 ml แล้วผสมด้วยแอมโมเนียมคลอไรด์ (NH_4Cl) หลังจากนั้นควบคุมค่า pH ในช่วงระหว่าง 2-5 นำไปบ่มแล้วอบที่ 70 °C แล้วนำไปเผาที่ 300, 400, 500, 600 และ 700°C ปรากฏว่าที่ 600°C ปฏิริยาเกิดดีที่สุดและดีกว่า TiO_2 บริสุทธิ์ (Chin et al., 2007) ยังมีงานวิจัยในการสังเคราะห์ด้วยวิธี โซล-เจล ที่ใช้สารเคมีต่างๆ ได้แก่ ไทเทเนียมไนไตรด์ (Zhongbiao et al., 2008) ไทเทเนียมคลอไรด์ผสมกับไฮดรอกซีไฮเดรตและน้ำควบคุม pH ให้ได้ 5.5 แล้วนำไปบ่ม 24 ชั่วโมง แล้วนำไปเผาที่ 400 และ 500°C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ปรากฏว่าที่ 500°C ปฏิริยาเกิดดีที่สุด (Hongqi et al., 2008)

นอกจากนี้ยังมีการอธิบายผลที่ได้จากการทดลองด้วยกระบวนการไนไตรดิ้ง (Nitriding) ถ้าไนโตรเจนเข้าไปแทนที่ออกซิเจน ก็จะเกิดออกซิเจนวาแคนซีในแลททิซของ TiO_2 ทำให้ TiO_2 ที่ได้ปด้วยไนโตรเจนมีช่องว่างแถบพลังงานแคบลง (รูปที่ 1.16) ทำให้เกิดปฏิริยาได้ง่ายขึ้น (Zhao et al., 2008)



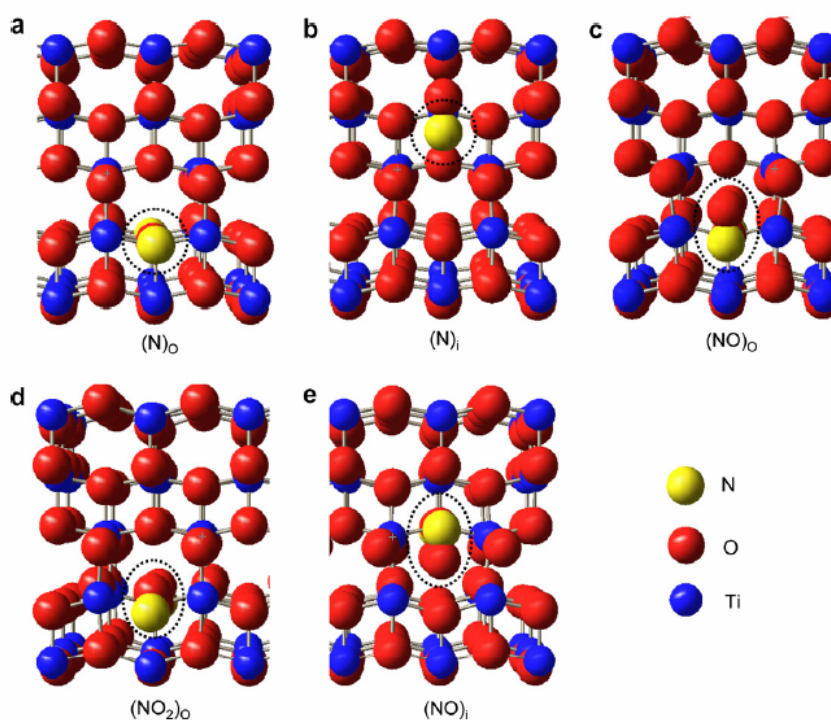
รูปที่ 1.16 กลไกการเคลื่อนที่ของประจุในคอมพอสิตฟิล์ม N/TiO_2 (Zhao et al., 2008)

การได้ปไนโตรเจนที่มีการใช้แก๊สไนโตรเจนและ NH_3 ในการสังเคราะห์ในครั้งนี้ ยังมีการศึกษาผลการวิเคราะห์ด้วย XPS และศึกษาผลกลไกและเทอร์โมไดนามิกส์แล้วได้สร้างแบบจำลองของการเข้าไปอยู่ของไนโตรเจนใน TiO_2 แบบต่างๆ (รูปที่ 1.17) (Asahi et al., 2007) ซึ่ง

ได้แสดงถึงโครงสร้างอะตอมที่ไปจับตัวแบบต่างๆ และแสดงถึงช่วงพลังงานที่สามารถวิเคราะห์ได้ (ตารางที่ 1.3)

ตารางที่ 1.3 ลักษณะของไนโตรเจนที่เข้าไปในแลตทิซของ TiO_2 (Asahi et al., 2007)

ไนโตรเจนที่พบ	แถบพลังงาน (eV)	ค่าความคลาดเคลื่อน (eV)
$(\text{N})_o$	395.70	0.17
$(\text{N})_i$	397.66	0.11
$(\text{NO})_o$	398.10	0.12
$(\text{NO}_2)_o$	399.81	0.03
$(\text{NO})_i$	399.85	0.10



รูปที่ 1.17 แบบจำลองการเข้าไปของไนโตรเจน (a) การเข้าของ N แบบแทนที่ (b) การเข้าของ N แบบแทรก (c) การเข้าของ NO แบบแทนที่ (d) การเข้าของ NO_2 แบบแทนที่ (e) การเข้าของ NO แบบแทรก (Asahi et al., 2007)

Lee และคณะ (2002) ศึกษาปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลซิส (Photocatalysis) และสมบัติชอบน้ำ (Hydrophilicity) ของฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เติมด้วย Al และ W ทำให้ระบบของฟิล์ม

ที่เติม ด้วย W จะแสดงปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกดีที่สุดและฟิล์มที่เติม ด้วย Al แสดงประสิทธิภาพของปฏิกิริยาดีกว่าไทเทเนียมไดออกไซด์บริสุทธิ์

ศึกษาผลของการเคลือบของ TiO_2 บนคาร์บอน (active carbon) (Li et al., 2005) เพื่อเพิ่มปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติก เติมด้วย Zinc ferrite (TiO_2 (ZnFe_2O_4)) (Cheng et al., 2004) เตรียมจากวิธี โซล-เจล และใช้อุณหภูมิในเผา 400 °C, 500 °C และ 600 °C ทดสอบสลายตัว Methyl orange (MO) พบว่าที่ 400 °C ผง TiO_2 (ZnFe_2O_4) จะแสดงปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกได้ดีกว่าเผาที่อุณหภูมิอื่นๆ และมีขนาดผลึกใหญ่ขึ้น พื้นที่ผิวลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ประจุที่ผิว (Surface charge) โดยพื้นที่ผิวส่งผลถึงการดูดซับ MO บน TiO_2 (ZnFe_2O_4) ที่เป็นแคตะลิสต์ ดังนั้นที่อุณหภูมิ 400 °C TiO_2 (ZnFe_2O_4) จะแสดงถึงการเกิดปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกได้ดีที่สุด

Bakardjieval และคณะ (2004) ได้ศึกษาการสลายตัวของ 4-chlophenol โดยกระบวนการกระตุ้นด้วยแสง ซึ่งใช้อุณหภูมิ TiO_2 แบบอะนาเทสเปรียบเทียบกับอนุภาคในระดับนาโนของ $\text{TiO}_2/\text{Fe}_2\text{O}_3$, TiO_2/ZnO และ $\text{TiO}_2/\text{ZrO}_2$ ที่เตรียมด้วยวิธี Homogeneous precipitation โดยเตรียมได้จาก TiOSO_4 ด้วยวิธี Hydrolysis วิเคราะห์โครงสร้าง และพื้นที่ผิวของตัวโฟโตแคตะลิสต์จากการวิเคราะห์ผล พบว่าที่ 1 % Zr^{4+} จะสลาย 4-chlophenol ด้วยประสิทธิภาพสูงสุดเมื่อเทียบกับ $\text{TiO}_2/\text{Fe}_2\text{O}_3$, TiO_2/ZnO และไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2)

นอกจากนี้ยังมีการศึกษาไททาเนียมไดออกไซด์ที่ผสมด้วยวานาเดียมด้วยวิธีโซล-เจลพบเฟสของอนาเทสหลังจากเผาที่อุณหภูมิ 400°C ซึ่งสารตั้งต้นประกอบด้วย ไทเทเนียมผสมกับกรดอะซิติก บิวทานอล วานาดีลอะซิเตลอะซิโตน แล้วสังเคราะห์เป็นผง (Jeffry and Chih-Hsien., 2004) ซึ่งการได้ป ด้วยนาโนซิลิกอนบนแผ่นแก้วซึ่งฟิล์มที่ได้ใช้วิธี Hot wire CVD (HWCVD) ที่มีความหนาของฟิล์มอยู่ที่ 100 และ 120 nm. (Chun et al., 2006) SrTiO_2 ที่ได้ป ร่วมกับแลนทานัมและไนโตรเจน ซึ่งสังเคราะห์ด้วยวิธีปฏิกิริยาเคมีเชิงกล (Mechano chemical reaction) โดยใช้วัตถุดิบ SrTiO_3 , Urea และ La_2O_3 และได้ปด้วยไนโตรเจนด้วยการให้แก๊ส NH_3 ที่ 600°C โดยใช้ 0.2 mol% La_2O_3 , 22 mol% Urea และ 77.8 mol% SrTiO_3 (Jinshu et al., 2005) การเตรียมสารละลาย $\text{Ti}(\text{SO}_4)_2$ 20wt% ผสมโดยปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส ผสมกับ 28% NH_3 และให้ค่า pH เท่ากับ 7 หลังจากนั้นนำไปเผาที่ 400°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง (Ihara et al., 2003) รวมทั้งไททาเนียมไดออกไซด์ที่ ได้ป ร่วมกับ F-N ด้วยวิธี โซล-เจล-solvothermal ซึ่งมีสารตั้งต้นได้แก่ 20 ml Tetrabutyl titanate, 10 ml เอทานอล, 5 ml กรดอะซิติก ผสมและเขย่ากัน 30 นาที เป็นสารละลาย A สำหรับสารละลาย B เป็นการผสมกันของ 0.15 ml แอมโมเนียมฟลูออไรด์ 3 ml กรดไนตริก 80 ml เอทานอล กวนสารละลาย B นาน 10 นาที นำสารละลาย B หยดลงในสารละลาย A และเขย่าอย่างรวดเร็วเมื่อผสมกันแล้วนำไปวางบนท่อเทฟลอนแล้วใส่ในเตา Autoclave ที่อุณหภูมิ 140°C เป็นเวลา 10 ชั่วโมง แล้วนำไปทดสอบ Rhodamine

B และ *p*-Chlorophenol (Dong-Gen et al., 2005) นอกจากนี้การสังเคราะห์รูไทล์ไทเทเนียมด้วยวิธี Low-temperature dissolution reprecipitation (LTDRP) โดยใช้เจล TiO_2 เติมอย่างช้าๆ 0.125-0.25 mol ของ ไทเทเนียม (IV) เตตระไฮดรอกไซด์ ในน้ำ 1000 cm^3 แล้วเติมกรดไฮโดรคลอริก หลังจากนั้นกวนที่อุณหภูมิห้อง 4 ชั่วโมง(Shu et al., 2008) TiO_2 ที่ได้ไป กับ ZnO ที่เตรียมจาก 3.4 ml n-butyl titanate, 18 ml anhydrate ethanol, Zinc, Polyglycol, กรดซิตริก และน้ำ เตรียมเป็น Sol แล้วนำไปบ่มที่อุณหภูมิห้อง 24 ชั่วโมง หลังจากนั้นนำไปอบแห้งที่ 80°C 48 ชั่วโมง เพิ่มความร้อนจนถึง 200°C 1 ชั่วโมง แล้วนำไปละลายใน Methyl orange 0.1g/l ได้ดีกว่า TiO_2 บริสุทธิ์(Shijun et al., 2004) TiO_2 ที่ได้ไป กับ ZnFe_2O_3 ที่เป็นผงโดยเตรียมจาก Zinc nitrate, Ferric nitrate และกรดซิตริก 1:2:2.5 โมลาร์ โดยวิธี โซล-เจลแล้วนำไปเผาที่ 400, 500 และ 600°C เพื่อให้ได้ผงที่ละเอียดเพื่อไปละลาย Methyl orange ได้ดีกว่า TiO_2 บริสุทธิ์ (Ping et al., 2008)

ข) การลดช่องว่างพลังงาน

การเพิ่มประสิทธิภาพของปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติก สามารถทำได้ด้วยวิธีเติมการโลหะหรือ ไอออนโลหะ และอโลหะ ลงไปในไทเทเนียมไดออกไซด์เพื่อลดช่องว่างพลังงานซึ่งผลการได้ไปทำให้เกิดปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติก ที่กระตุ้นด้วยความยาวคลื่นอยู่ในช่วง Visible เมื่อนำผงตัวเร่งดังกล่าว 0.05 กรัม ละลายในคริสตัลไวโอเลตและเมทิลีนบลู ปรากฏว่าละลายได้ดีกว่า TiO_2 บริสุทธิ์ (Jeffrey and Chih-Hsien., 2004) สำหรับนาโนซิลิกอน (nc-si) ซึ่งมีสมบัติชอบน้ำ(Super hydrophilic)วัดค่ามุมสัมผัสใกล้ 0° อีกทั้งยังเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีความยาวคลื่นอยู่ในช่วง 400-700 nm. (Chun et al., 2006) ผลที่ได้จากการได้ไป ร่วมของแลนทานัมและไนโตรเจนทำให้เกิดความยาวคลื่นอยู่ในช่วง Visible(Jinshu et al., 2005) ไททานเนียมไดออกไซด์ที่ได้ไปพร้อมกับ F-N และ S-N ก่อให้เกิดปฏิกิริยา Photocatalyst ที่มีความยาวคลื่นอยู่ในช่วง Visible มากถึง 420 nm. โดยมีสารตั้งต้นได้แก่ TiCl_4 , TTIP และ Thiourea การได้ไปพร้อมกับ F-N และ S-N จะทำให้เกิดแก๊สในกระบวนการสังเคราะห์ซึ่งไม่เกิดผลดีมากนัก สำหรับการละลาย Methyl orange ได้ถึง 87.8% (Yi et al., 2008) การสังเคราะห์ TiO_2 จาก Titanium tetrafluoride (TiF_4) ละลายในน้ำ 0.04 M หลังจากกวน 1 ชั่วโมง ปรับค่า pH โดยการเติม NH_4OH ให้อยู่ในช่วง 1.68-2.40 แล้วเคลือบบน Polyelectrolyte เป็นชั้นๆ วัดค่ามุมสัมผัสมีค่าต่ำกว่า 5° ซึ่งมีสมบัติชอบน้ำ (Yosuke et al., 2008) ช่วงมุมที่ 0-40 องศา และนำไปทดสอบปฏิกิริยาทางแสงของตัวเร่งที่เผาที่ 973 K จะทำปฏิกิริยาได้ดีกว่า(Moon et al., 1998) ทั้งนี้ยังมีการเพิ่มประสิทธิภาพด้วยการเคลือบบนชั้นงานที่เป็นแก้วเกิดเป็นฟิล์มบาง ทำให้เกิดปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติก ที่มีความยาวคลื่นอยู่ในช่วง Visible (Ihara et al., 2003) เคลือบ TiO_2 กับอะลูมินา (Al_2O_3) ลงบน PET (Polyethylene terephthalate) โดยวิธี Sputtering system และมีการทดสอบการสลายตัวของ Rhodamine B ซึ่งชั้นงานที่เคลือบด้วย TiO_2 มีสมบัติ

Photocatalyst ได้ดีกว่าชั้นที่ไม่เคลือบ(Awitor et al., 2008) การสังเคราะห์ ZnFe₂O₃ เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติก โดยวิธี โซล-เจล เคลือบบนฐานแก้วโดยการหมุน (Spin coating) และมีความสมบัติในการทำปฏิกิริยาในช่วงแสงที่มองเห็นด้วยตาเปล่า โดยเตรียมจาก Zn(CH₃COO)₂ และ Fe(NO₃)₃ ในอัตราส่วน 1:2 โมลาร์(Jianxun et al., 2004) การเคลือบพลวง (Sb) ได้กับคืบูกด้วยวิธีการสเปรย์ด้วยเครื่องอะทอร์ไมเซอร์เคลือบบนแก้วขนาด 75X25X1.35 mm³ ซึ่งมีความหนาของฟิล์มอยู่ในช่วง 612-640 nm. (Ravichandran and Philominathan., 2008) โทเทเนียมซัลเฟตแอมโมเนียและโซเดียมไฮดรอกไซด์ ยูเรีย และเอทานอลผสมกัน แล้วนำไปอบที่ 80°C 12 ชั่วโมง แล้วนำไปเผาที่ 400°C (Fan et al., 2008) แม้กระทั่งการนำผงโทเทเนียมไดออกไซด์เกรด P25 (Degussa) 0.8 กรัม ยูเรีย 1.2 กรัม ผสมด้วยเอทิลไกลคอล 40 ml แล้วได้ป ด้วยบรรยากาศแอมโมเนีย (Feng et al., 2008) โทเทเนียม (IV) ไอโซโพรพอกไซด์ ดีไฮเดรตเอทานอล และกรดไฮโดรคลอริก แล้วได้ป ด้วยแก๊สแอมโมเนีย(Soon et al., 2006) นอกจากนี้วิธี โซล-เจล แล้วยังมีวิธีการสังเคราะห์ที่ใช้วิธีการฝัง (Implantation) ซึ่งได้ป ในโตรเจนบนฐานฟิล์ม TiO₂ (Hong et al., 2007) การสังเคราะห์ที่ใช้วิธีการ Chemical vapor decomposition (CVD) ซึ่งได้ป ในโตรเจนบนฐานฟิล์ม TiO₂ (Yates et al., 2006)

การเตรียม TiO₂ ได้ป นิกเกิดโดยใช้ นิกเกิดคลอไรด์เป็นสารตั้งต้น โดยมีอัตราส่วนโดยอะตอม 1:24 แล้วทำการเผาที่อุณหภูมิต่างๆ ได้แก่ 25, 500, 700, 800, 900, 1000, 1100 และ 1200 °C แล้ววิเคราะห์ด้วย XPS จะเห็นพีค XPS ของ NiO ที่ชัดเจนที่พลังงาน 855 eV และจะมีพีคชัดเจนยิ่งขึ้นเมื่ออุณหภูมิในการเผาที่สูง ซึ่งได้วิเคราะห์ด้วย AFM แล้วเห็นขนาดอนุภาคของนิกเกิดที่เป็นเนื้อเดียวกัน (Homogeneous) แล้วได้ทำการวัดค่ามุมสัมผัสมีค่า 0 ° ซึ่งส่งผลให้เห็นว่ามีความชอบน้ำแสดงถึงการทำความสะอาดได้ง่ายและสามารถทำความสะอาดตัวเองได้ด้วย (Kisand et al., 2010)

อีกทั้งยังมีการศึกษาการเตรียม TiO₂ ได้ป ด้วยนิกเกิดซึ่งสารตั้งต้นของนิกเกิดคือนิกเกิดคลอไรด์ด้วยวิธี polyol ก็คือการใช้แก๊สไนโตรเจนพ่นผสมด้วย เมื่ออนุภาคของนิกเกิดเข้าไปใน TiO₂ ถูกกระตุ้นด้วยแสงทำให้เกิดปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติก (1.4) ไอออนของ Ni²⁺ รับอิเล็กตรอนจากปฏิกิริยาดังกล่าวเป็นไปตามปฏิกิริยา (1.5) ไอออน Ni⁺ ทำปฏิกิริยากับออกซิเจนบนพื้นผิวของ TiO₂ และออกซิไดซ์ Ni²⁺ กลายเป็นซูเปอร์ออกซิเจน (1.6) แล้วพื้นผิวของ TiO₂ ที่มีไอออน Ti⁴⁺ (1.7) ก็จะทำปฏิกิริยากับ Ni⁺ กลายเป็น Ti³⁺ ซึ่ง Ti³⁺ นี้ก็ทำปฏิกิริยากับออกซิเจนบนพื้นผิวของ TiO₂ กลายเป็นซูเปอร์ออกซิเจนอีก (1.8) (Tseng et al., 2009)





การเตรียม TiO_2 ที่ได้ไปพร้อมกับโบรอน, นิกเกิลและซีเรียม โดยวิธี Sol -gel โดยมีสารตั้งต้นได้แก่ 0.062g H_3BO_3 , 0.29g $\text{Ni}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ และ 0.43g $\text{Ce}(\text{NO}_3)_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ แล้วผสมกันในน้ำที่ปราศจากประจุ (deionized) 10 ml, 8 ml กรดซिटริก, 30 ml เอทานอล และ 34 g Tetrabutyl titanate ผลการทดสอบคือ TiO_2 ที่ได้ไป ร่วมกับโบรอน, นิกเกิลและซีเรียม (BCeNiTiO_2), TiO_2 ที่ได้ไป ร่วมกับโบรอนและนิกเกิล (BNiTiO_2), TiO_2 ที่ได้ไป ร่วมกับโบรอนและซีเรียม (BCeTiO_2), TiO_2 ที่ได้ไปร่วมกับโบรอน (BTiO_2), TiO_2 ที่ได้ไป ร่วมกับนิกเกิล (NiTiO_2), TiO_2 ที่ได้ไป ร่วมกับซีเรียม (CeTiO_2) และ TiO_2 บริสุทธิ์จะมีการสลายฟีนอลได้ดีกว่าตามลำดับ (Xin et al., 2008) ทั้งนี้ยังมีงานวิจัยอื่นๆ ที่แสดงถึงค่าแถบพลังงานที่มีการเติมโลหะหรืออโลหะ (ตารางที่ 1.4)

ตารางที่ 1.4 แสดงค่า Band gap energy ของเซมิคอนดักเตอร์ชนิดต่างๆ

(^aRajeshwar and Ibanez, 1995 ; ^bHoffman., et al.,1995.;^cLinsebigler , Lu and Yates,1995.)

เซมิคอนดักเตอร์	Band gap energy (eV)
TiO_2 (anatase) ^a	3.20
TiO_2 (rutile) ^a	3.02
WO_3 ^b	2.80
SrTiO_3 ^b	3.20
Fe_2O_3	3.10
ZnO ^b	3.20
ZnS ^b	3.60
GaAs ^c	1.40
GaP ^c	2.25
CdSe ^c	1.70
CdS ^c	2.50
SiC ^c	3.00

ค) การควบคุมการเปลี่ยนเฟส

Harizonov และคณะ (2001) ทำการศึกษาระบบของ TiO_2/MnO ที่เตรียมด้วยวิธีโซล-เจลโดยใช้ไทเทเนียมเอทอกไซด์ (Titanium ethoxide) และ แมงกานีสไนเตรต (Manganese nitrate) เป็นสารตั้งต้น ซีโรเจล (Xerogel) ที่ได้ทำให้แห้ง ที่ $80\text{ }^\circ\text{C}$ และ เผา ด้วยอุณหภูมิ $560\text{ }^\circ\text{C}$ ในอากาศ 1 ชั่วโมง พบว่าวิธีโซล-เจลสามารถเตรียมไทเทเนียมไดออกไซด์ในระดับนาโนได้อย่างมีประสิทธิภาพและ MnO จะมีผลต่อการลดอุณหภูมิของการเปลี่ยนแปลงจากเฟส อะนาทาส ไปเป็นเฟสรูไทล์และส่งผลต่อประสิทธิภาพโฟโตแคตะลิสต์ด้วย

Wang และคณะ(2005) ศึกษาประสิทธิภาพของปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกของ $\text{ZnO}/\text{TiO}_2/\text{SnO}_2$ ในอัตราส่วนของ $\text{ZnO} : \text{TiO}_2 : \text{SnO}_2$ คือ 4 : 1 : 1 และเผาที่อุณหภูมิ $200 - 1300\text{ }^\circ\text{C}$ ศึกษาการสลาย MO ในปฏิกิริยากระตุ้นด้วยแสงโดยใช้ $\text{ZnO}/\text{TiO}_2/\text{SnO}_2$ ในรูปผงเป็นตัวแคตะลิสต์เติมใน MO และกระตุ้นด้วยแสงยูวี (Hg lamp) โดยมีความเข้มแสง $2.9 \times 10^4\text{ }\mu\text{W}/\text{cm}^2$ ที่เวลาการรับแสงแตกต่างกัน พบว่า เมื่อเพิ่มอุณหภูมิเผาถึง $700 - 900\text{ }^\circ\text{C}$ จะเกิดเฟสของ ZnO และ TiO_2 และฟอร์มตัวเกิดเป็น Zn_2TiO_4 (ลูกบาศก์) ขึ้น เฟสอะนาทาสของ TiO_2 จะเปลี่ยนเป็นเฟสรูไทล์เมื่ออุณหภูมิสูงถึง $1000 - 1100\text{ }^\circ\text{C}$ ซึ่งสูงกว่าอุณหภูมิของการเปลี่ยนเฟสในภาวะเป็น TiO_2 บริสุทธิ์ ($800 - 900\text{ }^\circ\text{C}$) เกิดเฟสใหม่ขึ้นด้วยที่ $1100\text{ }^\circ\text{C}$ คือ Zn_2SnO_4 (ลูกบาศก์) และเกิด $\text{Zn}_2\text{Ti}_{0.5}\text{Sn}_{0.5}\text{O}_4$ ที่ $1300\text{ }^\circ\text{C}$ พื้นที่ผิวของตัวอย่างจะมีค่าลดลงเมื่อเพิ่มอุณหภูมิ เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงขนาดของอนุภาคที่เกิดขึ้นเนื่องจากการอบผนึก

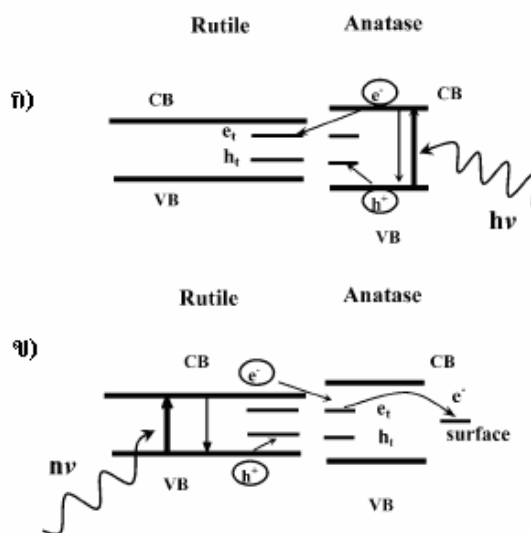
Kang และคณะ (2005) ได้ศึกษาการกำจัดสาร Methyl orange ในของเหลวด้วย V/TiO_2 ที่สังเคราะห์ได้ด้วยวิธีโซล – เจล กำหนดให้อัตราส่วนของ V (1.0 5.0 10.0 wt%)/ TiO_2 โดยผสม TTIP (99.95%) กับ V_2O_5 (99.99%) กำหนดให้ค่า pH เท่ากับ 1 นำไปกลั่นให้ไอระเหยออกที่ $80\text{ }^\circ\text{C}$ เป็นเวลา 6 ชั่วโมง TiO_2 และ V/TiO_2 จะเกิดเฟสอะนาทาสขึ้นเมื่อนำไปเผาที่ $500\text{ }^\circ\text{C}$ เป็นเวลา 3 ชั่วโมง นำผง V/TiO_2 ทดสอบการสลายตัวของ Methyl orange ความเข้มข้น 20 - 100 ppm โดยใช้ผง V/TiO_2 0.1, 0.5 และ 1.0 กรัม ละลายในสารละลาย 1000 มิลลิลิตร แล้วกระตุ้นด้วยแสงจากหลอดยูวี ด้วยความยาวคลื่นเท่ากับ 254 nm จากการศึกษาพบว่า V/TiO_2 ที่เผาด้วยอุณหภูมิ $500\text{ }^\circ\text{C}$ เป็นเวลา 3 ชั่วโมงเกิดเฟสอะนาทาสและรูไทล์ ผสมกันและมีขนาดอนุภาคเท่ากับ 70 nm พื้นที่ผิว $15.0\text{ m}^2/\text{g}$ จะมีพื้นที่ผิวมากกว่า TiO_2 บริสุทธิ์ ซึ่งมีค่าเพียง $7.0\text{ m}^2/\text{g}$ เมื่อเพิ่มปริมาณวานาเดียมขนาดของอนุภาคและปริมาตรของช่องว่างจะมีค่ามากขึ้นด้วย และจากผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง XRD วานาเดียมจะเข้าไปแทนที่ไทเทเนียมไอออนจนกระทั่งวานาเดียมมีปริมาณ 5.0 wt% V/TiO_2 จะมีสมบัติที่ชอบน้ำมากกว่า และสามารถสลาย Methyl orange ได้ดีกว่า TiO_2 บริสุทธิ์

Li และคณะ (2005) ศึกษาผลของการเคลือบของ TiO_2 บนคาร์บอน (Active carbon) เพื่อเพิ่มปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติก โดยใช้ Tetrabutylorthotitanate ($\text{Ti}(\text{OC}_4\text{H}_9)_4$) เตรียมโดยวิธีโซล-เจล แล้วนำไปเคลือบบนคาร์บอนทดสอบปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกโดยสลายตัว Rhodamine B พบว่าที่อุณหภูมิ 450°C เกิดเฉพาะเฟสอะนาเทสขึ้น จนกระทั่งที่ 550°C อะนาเทสจะเปลี่ยนเป็น รูไทล์ทั้งหมด สำหรับ TiO_2 บริสุทธิ์ ที่ 450°C และ 550°C จะเกิดเฟสรูไทล์มากกว่า TiO_2/AC และขนาดผลึกของ TiO_2 ใหญ่กว่า TiO_2/AC โดยอัตราการเพิ่มขนาดของผลึกเร็วกว่า TiO_2/AC

นอกจากนี้ยังมีการนำอนุภาคของ $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ ซึ่งเตรียมโดยวิธีไมโครอิมัลชัน (Microemulsion) (Lee et al., 2003) ใช้ Titanium tetraisopropoxide (TTIP) เป็นสารตั้งต้นทำปฏิกิริยากับน้ำใน Sodium bis(2-ethylhexyl)sulfosuccinate (AOT) ได้อนุภาคของ TiO_2 และอนุภาคของ $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ เตรียมได้จากเตตระเอทิลออร์โทซิลิเกต ที่มีซิลิกอนเป็นองค์ประกอบ พบว่า เฟสรูไทล์ มีผลต่อปฏิกิริยาน้อยกว่าเฟสอะนาเทสที่อุณหภูมิ 800°C โครงสร้างที่เป็นอะมอร์ฟัสของซิลิกาทำให้อนุภาค TiO_2 (Anatase) มีความเสถียรที่อุณหภูมิสูง และยับยั้งการเปลี่ยนเป็นเฟสรูไทล์ ขนาดผลึกมีขนาดเล็กลงและพื้นที่ผิวจะเพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มปริมาณซิลิกา อนุภาค $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ มีสมบัติเป็นตัวโฟโตแคตะลิสต์มากกว่า TiO_2 ที่บริสุทธิ์และที่ $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2 = 90/10$ จะแสดงสมบัติเป็นโฟโตแคตะลิสต์ที่ดีที่สุด

การเพิ่มประสิทธิภาพของไทเทเนียมไดออกไซด์อีกวิธีหนึ่ง ก็คือ การสังเคราะห์ให้อยู่ในรูปของเฟสผสม ระหว่างเฟสอะนาเทสและรูไทล์ ในอัตราส่วนที่เหมาะสม เช่นผงไทเทเนียมไดออกไซด์ Degussa P25 ซึ่งเป็นที่นิยมใช้กันทั่วไป โดยมีอัตราส่วนผสมระหว่างอะนาเทสต่อรูไทล์ เท่ากับ 75 : 25 ซึ่งผลิตโดยวิธีไฮโดรไลซิส Tetra-isopropyl-orthotitanate ต่อด้วยวิธีการทำให้ชิ้นงานแน่นขึ้น (Densification) ภายใต้ความดัน 1500 - 4000 kPa (Zhao et al., 2007) จากเดิมเรารู้ว่าเฟสอะนาเทสของไทเทเนียมไดออกไซด์จะไวต่อปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกได้ดีที่สุด แต่จากการศึกษาและทดลองจากงานวิจัยหลายๆชิ้น พบว่าเฟสผสมสามารถเกิดปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกได้สูงเช่นกันกลไกการเกิดปฏิกิริยาของเฟสผสม อาจเกิดจากเมื่ออิเล็กตรอนของเฟสอะนาเทสถูกกระตุ้นด้วยพลังงาน ทำให้มีระดับพลังงานสูงขึ้นจนข้ามช่องว่างไปสู่แถบการนำไฟฟ้า แต่มีโอกาสที่จะกลับมารวมตัวกับหลุมประจุบวกได้อีก แต่เมื่อมีเฟสรูไทล์อยู่ด้วย รูไทล์จะทำหน้าที่เป็นตัวจับอิเล็กตรอนไว้ (Electron sink) (Hurum et al., 2003) สามารถป้องกันไม่ให้อิเล็กตรอนกลับมารวมตัวกับหลุมประจุบวกได้เร็ว ซึ่งแสดงกลไกดังในรูปที่ 1.18 ก หรืออาจพิจารณาอีกตามรูปที่ 1.18 ข โดยเมื่อเฟสผสมถูกกระตุ้นด้วยพลังงาน อิเล็กตรอนในแถบเวเลนซ์ของรูไทล์จะถูกกระตุ้นได้ง่ายกว่า เนื่องจากมีช่องว่างแถบพลังงานเท่ากับ 3.02 eV ซึ่งน้อยกว่าอะนาเทส (3.20 eV) แต่อิเล็กตรอน

ที่ถูกกระตุ้นไปสู่แถบการนำไฟฟ้าแล้วกลับมารวมกับหลุมประจุบวกในแถบเวเลนซ์ได้อย่างรวดเร็ว
อย่างไรก็ตามเมื่อมีเฟสอะนาเทสผสมอยู่ด้วย อะนาเทสจะทำหน้าที่กักอิเล็กตรอนไว้ และในที่สุด
อิเล็กตรอนปรากฏตัวทำให้เกิดปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกได้



รูปที่ 1.18 แบบจำลองการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นของเฟสอะนาเทสและรูไทล์

(ก) แบบจำลองแบบเก่าของไทเทเนียมไดออกไซด์ (Degussa P25) และมีรูไทล์ทำหน้าที่
เป็น Electron sink (ข) แบบจำลองของ (Hurum et al., 2003) เกี่ยวกับเฟสรูไทล์

ง) การขัดขวางการเติบโตของเกรน

Wang และคณะ (2004) ทำการเติมไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วย Zr^{4+} (Zirconium ions) เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการเป็นแคตะลิสต์ โดยใช้ $ZrOCl_2$, $Ti(OC_4H_9)_4$ เป็นสารตั้งต้นในการสังเคราะห์ด้วยวิธีโซล-เจล โดยการปรับค่าปริมาณ Zr^{4+} ในสูตรทางเคมีของ $Ti_{1-x}Zr_xO_2$ ต่างๆกัน ดังนี้ 0, 0.02, 0.04, 0.06, 0.08, 0.10 และ 0.12 พบว่า TiO_2 ที่เติมด้วย Zr^{4+} มีประสิทธิภาพสูงกว่า TiO_2 บริสุทธิ์ และพบว่า $Ti_{0.94}Zr_{0.06}O_2$ ให้ประสิทธิภาพของปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกดีที่สุดที่สุด เพราะการเติม Zr^{4+} ทำให้ขนาดของผลึกเล็กลง ในขณะที่พื้นที่ผิวมากขึ้นซึ่งเป็นผลดีต่อการเกิดปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกได้มากขึ้น

ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ได้ไป ด้วยโบรอนซึ่งสารเคมีที่ใช้ในการสังเคราะห์ด้วยวิธีโซล-เจล ได้แก่ ไทเทเนียม (IV) เอทออกไซด์ 25 กรัม กรดบอริกไตรเอทิลเอสเทอร์ (C_2H_5O)₃16 กรัม เอทานอล 12.6 กรัม 2,4-pentanedione (PTN) 21.9 กรัม ผสมกันแล้วเทน้ำลงไป 7.9 กรัม ตั้งที่อุณหภูมิห้อง 2 สัปดาห์ เมื่อเป็นเจลนำไปอบแล้วเผาที่ 673-1173 K ตามลำดับ (Moon et al., 1998)

สารเคมีที่ใช้ในการสังเคราะห์ที่ใช้วิธี โซล-เจล ได้แก่ ไทเทเนียม (IV) ไอโซโพรพอกไซด์ 10 cm³ กรดบอริกไตรเอทิลเอสเตออร์ (0.2, 0.4, 1 และ 2 ml คิดเป็น 0.5, 1, 5 และ 10%B ตามลำดับ) กรดบอริก (H₃BO₃)(0.073 และ 1.46 กรัมคิดเป็น 0.5 และ 10%B ตามลำดับ) ไอโซโพรพานอล 3.74 ml และน้ำ 2.35 ml นำไปกวน 1 ชั่วโมง แล้วนำไปอบที่ 800 °C 96 ชั่วโมง แล้วนำไปเผาที่ 450 °C 1 ชั่วโมง 15 °C/นาที่ สารเคมีที่ใช้ในการสังเคราะห์ที่ใช้วิธีการบด ได้แก่ ไทเทเนียมผงเกรด ST-01 3กรัม บดในมอตอร์กับกรดบอริก 0.084และ 1.69 กรัม กรดบอริกไตรเอทิลเอสเตออร์ 0.23 และ 4.7 ml แล้วนำไปอบที่ 800 °C 24 ชั่วโมง แล้วนำไปเผาที่ 450 °C นำไปทดสอบด้วย XRD จะพบเฟสของอนาเทสและโบรอนไดรอกไซด์ในช่วงมุม 0-20 องศา และนำไปทดสอบด้วย XPS จะพบว่ามีส่วนของ C และ B อยู่ด้วย ซึ่งกลไกการได้โบรอนลงไปสรุปได้คือ 1. โบรอนไปแทนที่ไทเทเนียม 2. โบรอนไปแทรกไทเทเนียม 3. อะตอมของโบรอนแทนที่อะตอมโบรอน ซึ่งการเติมกรดบอริกไตรเอทิลเอสเตออร์ กับกรดบอริกจะทำให้เกิดการเกิดใหม่และการเติบโต (Grain growth) ของอนาเทสและรูไทล์แต่เติมกรดบอริกไตรเอทิลเอสเตออร์จะทำให้เกิดปฏิกิริยาทางแสงได้ดีกว่าการเติมกรดบอริก แต่ B-TiO₂ เมื่อเทียบกับ TiO₂ บริสุทธิ์ทำปฏิกิริยาทางแสงไม่ค่อยดีนัก ในทางกลับกันถ้ามี คาร์บอนและโบรอนที่อยู่ในกลุ่ม Ti-O-B จะเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาได้ดีแต่การได้โบรอนในปริมาณที่มากกว่า 10% จะทำให้เกิด B₂O₃ มากกว่าเฟสอนาเทสขึ้นด้วย (Zaleska et al., 2008)

เพื่อประสิทธิภาพในการทำปฏิกิริยาก็มีงานวิจัยที่ได้ประมวลระหว่างไนโตรเจนและโบรอนสารเคมีที่ใช้ในการสังเคราะห์ที่ใช้วิธี โซล-เจล ได้แก่ ไทเทเนียมเตตระโบรไมด์ ออกไซด์ 17 ml ผสมกับแอนไฮดริสเอทานอล 40 ml แล้วกวนเป็นสารละลาย A กรดบอริก 18 กรัม ยูเรีย CO(NH)₂ 12.5 ml น้ำ 40 ml แอนไฮดริสเอทานอล 40 ml และ glacial acetic (CH₃COOH) 20 ml เป็นสารละลาย B เติสารละลาย A ลงในสารละลาย B กวนอย่างรวดเร็วเป็นเวลา 3 ชั่วโมง แล้วบ่ม 72 ชั่วโมง แล้วนำไปอบที่ 100 °C แล้วนำไปเผาที่ 300, 350, 400, 450 และ 500°C 2 ชั่วโมง แล้วนำไปทดสอบ FTIR เพื่อทราบพันธะ N-Ti-O โบรอนมีผลต่อการเลื่อนไปทาง Visible เพียงเล็กน้อยเท่านั้นส่วนใหญ่จะเป็นผลของไนโตรเจนมากกว่าและที่อุณหภูมิเผาที่ 350 °C จะอยู่ในช่วง Visible ที่สุดเนื่องจากการเพิ่มอุณหภูมิทำให้ขนาดผลึกโตขึ้นและทำให้การเกิดปฏิกิริยาด้อยลง เมื่อเปรียบเทียบผลของการได้ด้วยไนโตรเจนกับการได้พร้อมโบรอนและไนโตรเจน แลททิซพารามิเตอร์ของ N-TiO₂จะสูงกว่า TiO₂เนื่องจากรัศมี N³⁻ (171pm) ใหญ่กว่ารัศมี O²⁻ (132 pm) ทำให้ O²⁻ ไปแทนที่ในแลททิซของ TiO₂ ขยายตัวขึ้น สำหรับแลททิซพารามิเตอร์ของ B-N-TiO₂เล็กกว่าเมื่อเทียบกับ TiO₂ และ N-TiO₂เนื่องจากรัศมี B³⁺ (23 pm) เล็กกว่ารัศมี Ti⁴⁺ (64 pm) ทำให้ B³⁺ ไปแทนที่ในแลททิซของ TiO₂ การที่ B³⁺ ได้ไปในแลททิซ TiO₂ ทำให้แลททิซพารามิเตอร์ของ B-N-

TiO₂ ลดลงทำให้ B³⁺ ทำให้ไอเล็กตรอนขาดแล้วไอเล็กตรอนก็ต้องไปจับกับ N³⁻ ในระบบผลึก การที่ขนาดผลึกของ B-N-TiO₂ ที่มีขนาดเล็กกว่าทำให้พื้นผิวของกลุ่มไฮดรอกซิลเพิ่มขึ้นการได้ไปโบรอนทำให้ถ่วงการรวมตัวของไอเล็กตรอนกับหลุมนั่นเอง (Yuxiang et al., 2008) ยังมีสารตั้งต้นที่ใช้ในการสังเคราะห์ด้วยวิธี โซล-เจล ได้แก่ โทเทเนียมเตตระโบรไมด์ ออกไซด์ (0.02 mol) 50 ml ผสมกับกรดบอริกเขย่าอย่างรวดเร็ว แล้วบ่ม 12 ชั่วโมง แล้วนำไปอบที่ 100 °C 8 ชั่วโมง แล้วนำไปเผาที่ 400, 500, 600, 700 และ 800°C 1 ชั่วโมง แล้วตัวแปรที่กำหนดอีกคือ อัตราส่วนของอะตอม B ต่อ Ti ให้สัญลักษณ์เป็น R_B เป็นการได้ไปโบรอนใน TiO₂ แล้วนำไปทดสอบ XRD จะเริ่มพบเฟสของอนาเทส B₂O₃ และรูไทล์ที่อุณหภูมิ 400, 700 และ 800°C ตามลำดับ จะได้ว่า R_B ในช่วง 1-5 ปริมาณของรูไทล์จะเพิ่มขึ้น และอนาเทสจะลดลง R_B = 5 การเปลี่ยนโครงสร้างจาก อนาเทสเป็นรูไทล์จะช้าเนื่องจากมีสิ่งแปลกปลอมบนพื้นผิว (Surface defects) ซึ่งสิ่งแปลกปลอมนี้คือออกซิเจนวาแคนซีซึ่งจะทำให้เกิดการเกิดใหม่ (Nucleation sites) ในทางกลับกันการเปลี่ยนโครงสร้างจะรวมถึงการเชื่อมและการหดตัวของโครงสร้างของออกซิเจนการเคลื่อนของออกซิเจนไอออนสันนิษฐานว่าสามารถลดพลังงานความเครียด เนื่องจากรัศมี B³⁺ (0.023nm.) เล็กกว่ารัศมี Ti⁴⁺ (0.064 nm.) ทำให้โบรอนออกไซด์สามารถหลุดออกจากผิวหรือขอบเกรนรวมทั้งแมทริกซ์ของ TiO₂ ได้ง่าย ดังนั้นการเพิ่มโบรอน R_B = 10 ส่งผลให้เพิ่มปริมาณ B₂O₃ และการเพิ่มอุณหภูมิจะทำให้โบรอนไอออนแยกโครงสร้างอนาเทสฟอร์มเป็น B₂O₃ บนพื้นผิว TiO₂ เนื่องจากการแพร่ระหว่างอนุภาคนาเทสกับพื้นผิวการเกิดใหม่ (Surface nucleation sites) ของรูไทล์เป็นการเปลี่ยนโครงสร้างจากอนาเทสเป็นรูไทล์และการเพิ่มโบรอนและอุณหภูมิยังส่งผลให้แลททิซพารามิเตอร์เปลี่ยนด้วย สูตร R_B ≤ 5 ไอออน Ti³⁺ จะฟอร์มบนผิวและชั้นของอนาเทสซึ่งก่อให้เกิดการแยกตัวระหว่างไอเล็กตรอนกับหลุมไอเล็กตรอนและทำให้การรวมตัวกันระหว่างไอเล็กตรอนกับหลุมไอเล็กตรอนช้าลง หาก R_B > 5 พันธะของ Ti³⁺ -O-B จะสร้างชั้นหรือแมทริกซ์ของอนาเทสก่อให้เกิดการรวมตัวกันระหว่างไอเล็กตรอนกับหลุมไอเล็กตรอนเร็วขึ้น (Daimei et al., 2006) รวมถึงสารตั้งต้นที่ใช้ในการสังเคราะห์ด้วยวิธี โซล-เจล ได้แก่ เตตระโทเทเนต (0.1 mol) 34 กรัม เอทานอล 80 ml เป็นสารละลาย A กรดบอริก แอมโมเนียมฟลูออไรด์ เอทานอล 80 ml น้ำ 20 ml และ glacial acetic (CH₃COOH) 15 ml เป็นสารละลาย B นำไปกวน 1 ชั่วโมง แล้วบ่ม 48 ชั่วโมง แล้วนำไปอบที่ 100 °C 10 ชั่วโมง แล้วนำไปเผาที่ 400, 500 และ 600 °C 2 ชั่วโมง เป็นการได้ไปร่วมระหว่างไนโตรเจนและโบรอนใน TiO₂ แล้วนำไปทดสอบ XRD จะพบเฟสของอนาเทสที่เด่นชัดในช่วงมุม 25.3 องศา และไนโตรเจนและโบรอนจะมีค่าแถบพลังงานที่ 399.5 eV และ 191.5 eV ตามลำดับ นำตัวเร่งนี้ 0.05 กรัมไปทดสอบการทำลายของฟีนอล 50 mg/L จะทำปฏิกิริยาได้ดีกว่า TiO₂ บริสุทธิ์ ซึ่งการได้ไปร่วมระหว่างไนโตรเจนและโบรอนทำให้ค่าแถบช่องว่างพลังงานที่แคบสามารถทำปฏิกิริยาค้ำแสงได้ดีและทำปฏิกิริยาในช่วงแสงที่มองด้วยตาเปล่าได้

อุณหภูมิการเผาที่ 600 °C จะทำปฏิกิริยาได้ดีที่สุด (Ling et al., 2008) อีกทั้งยังมีการเตรียม TiO₂ โดยการได้ปด้วยโบรอนโดยวิธีการฝังตัวของไอออน (Ion implantation) แล้วมีการวิเคราะห์ด้วย XPS ของ TiO₂ โดยได้อธิบายกลไกของการเข้าไปของโบรอนอะตอมว่า ไอออนของ Ti³⁺ ในแลททิซของ TiO₂ เป็นไปตามปฏิกิริยาดังนี้



เมื่อ Ov เป็น ออกซิเจนวาแคนซี โบรอนอะตอมเข้าไปแทนที่ (Substitutional) ในไทเทเนียมแล้วเกิดออกซิเจนวาแคนซี หรือการที่โบรอนเข้าไปลดไอออนของไทเทเนียมแล้วมีออกซิเจนวาแคนซี เป็นไปตามปฏิกิริยา (1.9) และ (1.10) การที่โบรอนเข้าไปแบบแทรก (Interstitial) เพื่อเกิดการสมดุลเนื่องจากโบรอนต้องการทำให้เกิดปฏิกิริยารีดักชัน (Partial reduction) ของอะตอมไทเทเนียม จาก Ti⁴⁺ เป็น Ti³⁺ แล้วอะตอมของโบรอนได้เข้าไปแบบแทรกในแลททิซของไทเทเนียมไดออกไซด์ เป็นไปตามปฏิกิริยา (1.11) (Masahashi et al., 2008)

1.3.2 การประยุกต์ใช้งานไทเทเนียมไดออกไซด์ในด้านต่างๆ

การประยุกต์ใช้งานไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ใช้ในงานด้านต่างๆ เช่นทางด้านสิ่งแวดล้อม เช่น บำบัดน้ำเสีย อากาศเสีย (Kim et al., 2004) การฆ่าเชื้อโรค (Zheng et al., 2007) และด้านอื่นๆอีกหลายด้านกำลังได้รับการศึกษาและนำไปประยุกต์ใช้งานกันอย่างแพร่หลายดังนี้

การทำความสะอาดตัวเอง (Self - cleaning)

มีการศึกษาประสิทธิภาพกระบวนการโฟโตแคตะไลติกเปรียบเทียบความสามารถในการ Self-cleaning ของฟิล์มที่สังเคราะห์ขึ้น โดยเตรียมฟิล์มด้วยวิธี Sol - Gel เปรียบเทียบกับฟิล์มที่สังเคราะห์ด้วยวิธี Chemical vapor deposition (CVD) (Mellott et al., 2005) ที่มีจำหน่ายโดยทั่วไป 2 ชนิด คือ A และ B จากการศึกษาขนาดอนุภาคด้วย XRD โดยใช้ Scherer equation อนุภาคมีขนาด 7 nm และ 13 nm ส่วนอนุภาคของไทเทเนียมไดออกไซด์จากการสังเคราะห์เท่ากับ 10 nm และจากการวัดความขรุขระของพื้นผิวฟิล์มด้วย AFM พบว่าฟิล์ม A มีค่าความขรุขระ 0.5 nm และฟิล์ม B มีค่าความขรุขระ 3 nm ส่วนฟิล์มสังเคราะห์ความขรุขระมีค่า 0.8 nm และเฟสไทเทเนียมไดออกไซด์ของตัวอย่างทั้งหมดเป็นแบบ อะนาทาส ซึ่งอัตราปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกเพิ่มขึ้นตามความขรุขระพื้นผิวที่เพิ่มขึ้น และนอกจากนี้ปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกเพิ่มขึ้นตามขนาดอนุภาคของไทเทเนียมไดออกไซด์ ที่เพิ่มขึ้นด้วยเช่นกันแต่ทั้งนี้ขนาดอนุภาคอาจมีผลส่วนทางกัน พบว่าการ

ย่อยสลายไทรคลอโรเอททิลีนด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เป็นอะนาเทส อัตราการย่อยสลายลดลงเมื่อเพิ่มขนาดอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์แต่ขนาดอนุภาค จะใหญ่กว่าการทดลองในครั้งนี้

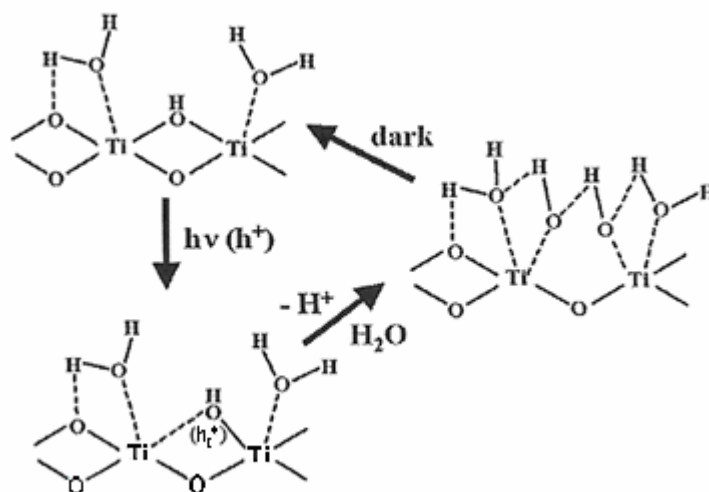
การเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์โฟโตแคตะลิสบนแผ่นเทปลอนพูน (PTS) ทำให้มีความเป็นไฮโดรโฟบิกสูงด้วยวิธี Ion assisted deposition (IAD) และศึกษาประสิทธิภาพการ Self-cleaning (Yamashita et al., 2003) ซึ่งเมื่อเคลือบด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ พื้นผิววัสดุดังกล่าวจะมีความเป็นไฮโดรโฟบิกสูง มีการประยุกต์นำไปใช้เคลือบบนสายไฟฟ้าเพื่อป้องกันการจับตัวของหิมะ และการเคลือบบนเทปลอนจะเป็นการเคลือบโดยกระบวนการแห้ง เนื่องจากหากเคลือบด้วยวิธีทางเคมีซึ่งเป็นกระบวนการเปียกจะทำได้ยากมาก ฟิล์มของไทเทเนียมไดออกไซด์จะอยู่ในรูปอะนาเทสและการศึกษาการย่อยสลายสารละลายจำพวกอินทรีย์ เช่น 2-โพรพานอล ฟีนอล และไทรคลอโรเอททิลีน ผลสุดท้ายได้ CO_2 , H_2O และ HCl และจากการศึกษาหยดน้ำบนพื้นผิวมุมสัมผัสบน PTS มีค่าสูงมาก แสดงว่า PTS มีความเป็นไฮโดรโฟบิกสูง ซึ่งการเติมไทเทเนียมไดออกไซด์เข้าไปจะทำให้มุมสัมผัสลดลง แต่ยังคงมีค่าสูงเนื่องจากความเป็นไฮโดรโฟบิก แต่เมื่อเพิ่มไทเทเนียมไดออกไซด์มากขึ้น มุมสัมผัสก็จะมีค่าลดลง (3×10^{-2} wt % as TiO_2) แต่หากเติมไทเทเนียมไดออกไซด์เล็กน้อย (6.0×10^{-4} wt %) มุมสัมผัสจะมีค่ามากขึ้นทำให้พื้นผิวมีความเป็นไฮโดรโฟบิกสูงขึ้น เมื่อพื้นผิวจับสิ่งสกปรกบนผิวชิ้นงาน มุมสัมผัสของน้ำจะลดลง แต่เมื่อได้รับพลังงานแสงหยดน้ำดังกล่าวสกปรกติดไว้ และมุมสัมผัสเพิ่มขึ้น ผิวของชิ้นงานจะมีความเป็นไฮโดรโฟบิกสูงขึ้น เนื่องจากการย่อยสลายด้วยแสง

สมบัติไฮโดรโฟบิกและไฮโดรฟิลิกของฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์

ความเป็นไฮโดรฟิลิก (ชอบน้ำ) ของไทเทเนียมไดออกไซด์ถูกค้นพบโดยบังเอิญในปี 1995 พบว่าฟิล์มผสมด้วยซิลิกามีสมบัติไฮโดรฟิลิกสูงโดยมุมสัมผัสของน้ำประมาณ 0 องศา หลังจากให้รังสียูวี พบว่ารังสียูวีช่วยเพิ่มให้เกิดไฮโดรฟิลิกสูงซึ่งเป็นสมบัติทางธรรมชาติของผิวไทเทเนียมไดออกไซด์ กลไกของกระบวนการดังกล่าว เป็นผลจากพื้นฐานของการสร้างพื้นผิวหมู่ไฮดรอกซิลขึ้นมาใหม่ภายใต้รังสียูวี แสดงดังรูปที่ 1.19

สมบัติไฮโดรโฟบิกหรือสมบัติไม่ชอบน้ำและสมบัติไฮโดรฟิลิกหรือสมบัติชอบน้ำ การอธิบายสมบัติทั้งสองนี้ อธิบายได้โดยสมการของ Young ที่บอกถึงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดึงผิวของของแข็ง ของเหลวและไอ สมบัติทั้งสองบ่งบอกด้วยมุมสัมผัส (Contact angle) ระหว่างหยดน้ำกับอากาศ และของแข็ง (รูปที่ 1.20) มุมสัมผัส คือ มุม θ วัสดุที่มีสมบัติไฮโดรฟิลิกถูกนำมาใช้งานหลายๆด้าน เช่น การทำความสะอาดพื้นผิวได้ง่ายขึ้นในปี 2001 สมบัติไฮโดรฟิลิกและกระบวนการ Photocatalytic self-cleaning glazing กำลังได้รับความนิยมในแถบตลาดยุโรปมีผลิตภัณฑ์ที่มีเคลือบด้วยชั้นของไทเทเนียมไดออกไซด์ เมื่อได้รับรังสียูวี ไทเทเนียมไดออกไซด์จะทำ

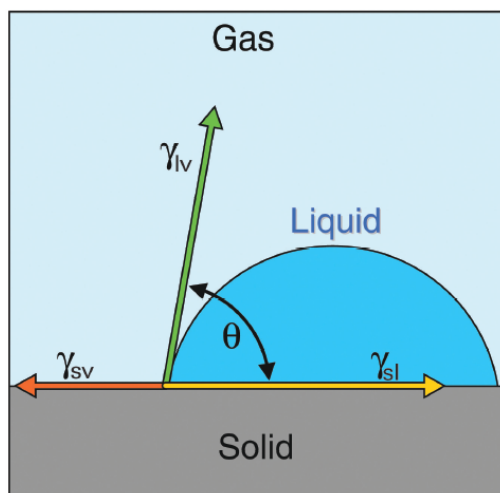
ปฏิกิริยากับออกซิเจนและ โมเลกุลของน้ำที่อยู่ในชั้นบรรยากาศ ทำให้เกิดไฮดรอกซิลเรดิคอล และสามารถสลายสารอินทรีย์ หรือดูดซับสารพิษไว้ที่ผิวเพื่อกำจัดออกไป



รูปที่ 1.19 การจัดโครงสร้างการจับยึดบนพื้นผิวไทเทเนียมไดออกไซด์ในขณะมีความเป็นไฮโดรฟิลิก (Fujishima and Zhang, 2005)

อิเล็กตรอนจากการกระตุ้นของแสงจับ โมเลกุลของออกซิเจน ขณะที่หลุมประจุบวก กระจายออกไปยังผิวของไทเทเนียมไดออกไซด์ซึ่งจะไปจับกับแลตทิซอะตอมออกซิเจน จากนั้นหลุมประจุบวกจับด้วยพันธะอ่อนๆ ระหว่างอะตอม Ti กับแลตทิซออกซิเจนส่วนตัวอื่นๆจะจับกับ โมเลกุลของน้ำรวมตัวเป็นหมู่ไฮดรอกซิลใหม่ ซึ่งในภาวะไม่มีแสงหมู่ไฮดรอกซิลจะถูกดูดซับจากพื้นผิวทำให้เกิดเป็น H₂O₂ หรือ H₂O + O₂

ความเป็นไฮโดรฟิลิกช่วยให้เกิดกระบวนการ Self-cleaning บนไทเทเนียมไดออกไซด์และถูกนำไปใช้ในเชิงอุตสาหกรรมมีความหลากหลายมากขึ้น เช่น การนำไปทำโครงสร้างด้านนอกอาคาร การนำไปใช้ทางถนน



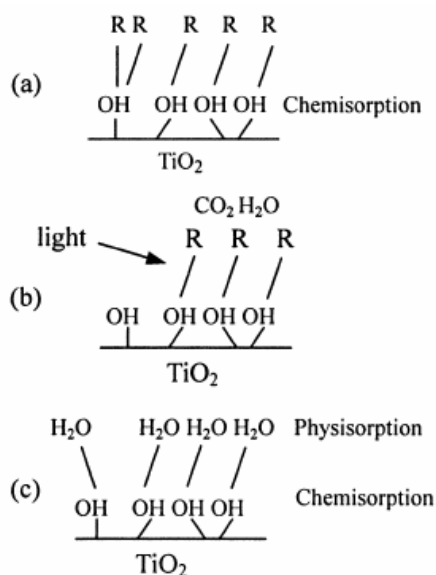
รูปที่ 1.20 มุมสัมผัสของของแข็งตามสมการ Young: $\cos\theta = (\gamma_{sv} - \gamma_{sl})/\gamma_{lv}$ เมื่อ γ คือ แรงตึงผิวระหว่างทั้งสามเฟส (Gould, 2003)

การศึกษาโฟโตแคตะลิซิสของกระจก Pilkington Activ™ โดย Mill, Andrew และคณะ นำตัวอย่างเคลือบด้วยวิธี APCVD เคลือบด้วย $\text{SiO}_2/\text{TiO}_2$ ซึ่งจากการทดสอบมุมสัมผัสจะลดลงเมื่อเวลาการให้รังสียูวีเพิ่มขึ้น

ปฏิกิริยาโฟโตคะไลติกและความเป็นไฮโดรฟิลิก เมื่อถูกแสงของฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์บนกระจก (Watanabe et al., 1999) ได้ศึกษาการป้องกันการเกิดฝ้าบนกระจก หรือ Self-cleaning ซึ่งปัจจุบันมีการประยุกต์ใช้อย่างกว้างขวาง เช่น การเคลือบบนพอลิเมอร์ โลหะและเซรามิก โดยเฉพาะสมบัติไฮโดรฟิลิกของผิวไทเทเนียมไดออกไซด์ เมื่อเคลือบบนพื้นผิววัสดุจะกลายเป็นพื้นผิว Self-cleaning โดยโครงสร้างไทเทเนียมไดออกไซด์ เป็นแบบอะนาเทส มุมสัมผัสลดลงเมื่อมีการให้รังสียูวี พบว่าเมื่อให้แสงเป็นเวลา 3 ชั่วโมงพื้นผิวจะมีความเป็นไฮโดรฟิลิก และมุมสัมผัสของผิวเท่ากับศูนย์ และเมื่อมุมสัมผัสต่ำกว่า 5 องศา พื้นผิวจะสามารถป้องกันการเกิดฝ้าได้ซึ่งทำให้กระจกใสขึ้น โดยทั่วไปมุมสัมผัสจะเท่ากับศูนย์เมื่อเกิดปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกสมบูรณ์หลังได้รับรังสียูวีเพียงพอ

สมบัติการชอบน้ำ (Hydrophilic) ของฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์หรือการทำให้ง่ายต่อการทำความสะอาด (Self cleaning) ซึ่งกลไกการทำงานคือจะมีชั้นของการดูดซับทางเคมี (Chemisorption) ซึ่งจะมีน้ำ H_2O บนพื้นผิวฟิล์มเนื่องจากสมบัติการชอบน้ำ ชั้นของการดูดซับทางเคมีจะมีการดูดซับน้ำด้วยแรงวันเดอร์วาลและพันธะไฮโดรเจน ซึ่งจะทำให้สิ่งสกปรกต่างๆที่ติดบนพื้นผิวหลุดง่ายเมื่อหยดน้ำแผ่กระจายบนผิวไทเทเนียมไดออกไซด์ หากมีการส่องแสงแล้วเกิดปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกจะทำให้การแตกตัวของน้ำ คาร์บอนไดออกไซด์หรือสารไฮโดรคาร์บอน (รูปที่ 1.21) ซึ่งจากงานวิจัย ได้อธิบายตามทฤษฎีของ Lewis ว่าไทเทเนียมที่มีการได้ปด้วยซัลฟิดจะมีแคโทไอออนลิแกนด์ของ Ti-Si จะไปจับกับไฮดรอกซิลเรดิคัล OH^- และมีการดูด

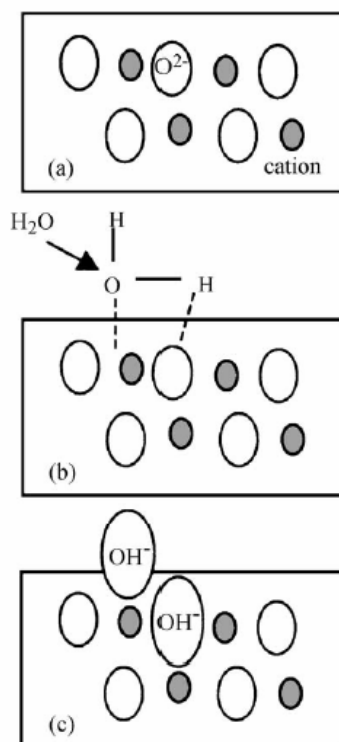
ชั้นน้ำโมเลกุลของน้ำ H_2O และโมเลกุลของ O^{2+} หากมีการได้ปฏิกิริยาเป็นการถ่ายที่ H^+ ที่จะดูดซับน้ำเข้าด้วยกัน (Guan, 2005) (รูปที่ 1.22)



รูปที่ 1.21 กลไกการทำความสะอาดด้วยตัวเองของฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ (Guan, 2005)

นอกจากนี้มีการศึกษาพบว่าความสัมพันธ์ระหว่างปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกและความเป็นไฮโดรฟิลิกของผิวเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์เมื่อเติมซัลฟาลงไป (Guan, 2005) ทดลองโดยใช้กระจกเคลือบด้วยฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ พบว่าความเป็นไฮโดรฟิลิกจะสัมพันธ์กับปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติก โดยพื้นผิวของไทเทเนียมไดออกไซด์มีความเป็นไฮโดรฟิลิกสูงขึ้นเมื่อเติมด้วยซัลฟาเข้าไปและส่งผลให้ความเป็นโฟโตแคตะลิสต์สูงขึ้นด้วย เนื่องจากซัลฟาที่เติมเข้าไปทำให้ปริมาณของหมู่ไฮดรอกซิลสูงขึ้น ไฮดรอกซิลจะเป็นตัวที่ช่วยในการดูดซับได้ดี นอกจากนี้ความเป็นไฮโดรฟิลิกและความเป็นโฟโตแคตะลิสต์เพิ่มขึ้นเมื่อมีการให้รังสียูวี ทำให้ประสิทธิภาพในการทำความสะอาดตัวเองสูงขึ้นด้วย สมบัติไฮโดรฟิลิกจะทำให้หยดน้ำบนพื้นผิวและหากหยดน้ำยังคงเป็นหยดน้ำทรงกลมบนพื้นผิวแสดงว่าพื้นผิวดังกล่าวมีความเป็นไฮโดรโฟบิก

วิธีการเพิ่มสมบัติไฮโดรฟิลิกโดยวิธีการการ ด้ปดีบุกออกไซด์ในปริมาณ 0-30 เปอร์เซ็นต์โมล ด้วยวิธีโซล-เจล แล้วทำการเคลือบผิวกระจกด้วยวิธีการจุ่มที่อัตราเร็ว 3 มิลลิเมตรต่อวินาทีแล้วทำการเผาที่อุณหภูมิ 150-650 องศาเซลเซียส แล้วทำการเคลือบที่มีการแปรผันชั้นเคลือบตั้งแต่ 1-9 ชั้น ความหนาของชั้นเคลือบอยู่ในช่วง 160-180 นาโนเมตร



รูปที่ 1.22 กลไกการดูดซับน้ำบนพื้นผิว $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ ตามทฤษฎีของ Lewis (Guan, 2005)

ปรากฏว่าที่ 1, 3 และ 5 เปอร์เซ็นต์โมล เผาที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส และจำนวนชั้นเคลือบที่ 3, 5 และ 7 ชั้นเคลือบมีค่ามุมสัมผัสของหยดน้ำเป็นศูนย์กลางนาน 30 นาที และมีการย่อยสลายเมทิลีนออเรนจ์ของไทเทเนียมไดออกไซด์และไทเทเนียมไดออกไซด์ได้ปีติภูมิค่า 44.35 และ 58.33 เปอร์เซ็นต์ การที่ค่ามุมสัมผัสเป็นศูนย์กลางนั้นเนื่องจากการเคลือบที่ปริมาณจำนวนชั้นที่เหมาะสมทำให้เกิดไฮดรอกซิลสูง (Qingju et al., 2002) อีกทั้งยังมีการใช้ในโอเบียม (Nb_2O_5) โด๊ปไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยวิธี Sputtering ด้วยการให้แก๊สอาร์กอนและออกซิเจน 80 และ 20 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ซึ่งเคลือบบนผิวชิ้นงานหนา 100 นาโนเมตร และทำการทดสอบการหยดน้ำบนผิวเคลือบด้วยการหยดน้ำ 10 ไมโครลิตร ปรากฏว่าตอนเริ่มหยดน้ำค่ามุมสัมผัสมีค่า 92 องศา แต่เมื่อเวลาผ่านไป 10 นาทีของการฉายแสงยูวีค่ามุมสัมผัสมีค่า 61 องศา (Suchea et al., 2007) และยังมีงานวิจัยที่กล่าวถึงการเติมโพลีเอทิลีนไกลคอล (PEG) ในไทเทเนียมไดออกไซด์เพื่อให้มีความพรุนโดยใช้ PEG 2000 ที่ปริมาณมากกว่า 0.02 โมลาร์ ทำให้เกิดความพรุนได้เป็นอย่างดีและทำให้มีสมบัติการชอบน้ำด้วยเนื่องจากมีปริมาณไฮดรอกซิลสูง (Weixin et al., 2010)

Ming และคณะ (2008) ได้ทำการศึกษาพื้นผิวของยางธรรมชาติจากการเคลือบผิวด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ ซึ่งทำการเตรียมชิ้นงานยางเป็นฐานแล้วทำการเคลือบด้วยชั้นซิลิกาด้วยวิธีซีวีดี (CVD) ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียสหลังจากนั้นจึงทำการเคลือบด้วยไทเทเนียมที่เตรียมจาก

การผสมด้วยแอมโมเนียมเฮกซะฟลูออโรไททาเนต (NH_4TiF_6) และกรดบอริก (H_3BO_3) ซึ่งทำการเคลือบด้วยวิธีแอลเฟ็ดดี (Liquid phase deposition) หลังจากทำการขึ้นรูปแล้วทำการทดสอบสมบัติการขบน้ำแล้วปรากฏว่าชิ้นงานยางที่เคลือบด้วยสารดังกล่าวมีความขบน้ำซึ่งมีค่าเข้าใกล้ศูนย์องศาเมื่อเวลาผ่านไป 30 นาที ซึ่งต่างจากชิ้นงานที่ไม่ได้ทำการเคลือบ อีกทั้งยังทำการทดสอบการยืดระยะเวลาของชิ้นงานยางอีกด้วย โดยทำการทดสอบเปอร์เซ็นต์การยืดตัว (Elongation) ได้ผลว่ายางที่ทำการเคลือบมีเปอร์เซ็นต์การยืดตัวที่ 92 เปอร์เซ็นต์ และยางที่ไม่ได้ทำการเคลือบยืดตัว 89 เปอร์เซ็นต์ ที่เวลาผ่านไปสามวัน เมื่อทำการทดสอบในวันที่ 7 การยืดตัวอยู่ที่ 65 และ 70 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ ซึ่งผลของไทเทเนียมไดออกไซด์ช่วยกั้นการแพร่ของออกซิเจนและโอโซนเข้าสู่เนื้อยางเป็นการยืดอายุของยางอีกวิธีหนึ่งด้วย

ในงานวิจัยครั้งนี้ได้ผลิตสารเคลือบแม่พิมพ์ของผลิตภัณฑ์ยางแบบจุ่ม (Dipping) ให้มีสมบัติที่ทำความสะอาดได้ง่ายกว่าเดิมซึ่งช่วยลดค่าใช้จ่ายและขั้นตอนการทำงานของกระบวนการ โดยเลือกใช้ นิกเกิล (Ni) โบรอน (B) และไนโตรเจน (N) เป็นสารตัวเติมเสริมประสิทธิภาพโฟโตแคตะไลติกของไทเทเนียมไดออกไซด์ และได้ศึกษาปัจจัยที่เกี่ยวข้องอันได้แก่ อุณหภูมิในการเผา ปริมาณของสารเติมแต่งชนิดนิกเกิล โบรอนและไนโตรเจน และนำตัวอย่างที่สังเคราะห์ได้ไปทดสอบประสิทธิภาพการเป็นโฟโตแคตะลิสต์ โดยการสลายตัวของเมทิลีนบลู (Methylene blue; MB) ที่ใช้เป็นอินดิเคเตอร์ โดยให้แสงเป็นตัวกระตุ้นให้เกิดปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติก ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติก อีกทั้งยังนำแม่พิมพ์ที่ได้จากการเคลือบไปจุ่มน้ำยางและทดสอบแรงดึงของยาง และศึกษาผลการทำความสะอาดได้ง่ายของแม่พิมพ์ที่ผ่านการเคลือบด้วยแคตะลิสต์ดังกล่าว

1.4 วัตถุประสงค์

1. สังเคราะห์สารเคลือบที่มีประสิทธิภาพต่อการทำความสะอาดตัวเองโดยให้มีสมบัติเป็นไฮโดรฟิลิกหรือซูเปอร์ไฮโดรฟิลิก และสามารถกระตุ้นด้วยแสงที่ค่อนข้างอยู่ในช่วงแสงที่มองเห็นด้วยตาเปล่า
2. ศึกษาปัจจัยและตัวแปรที่มีผลต่อกระบวนการเคลือบบนผิวของเซรามิกและแก้ว
3. ศึกษาสมบัติการใช้งานจริงเช่นสมบัติการทำความสะอาดตัวเองสมบัติการดูดซับน้ำยาง
4. การทำความสะอาดแม่พิมพ์ขึ้นรูปยางโดยใช้วิธีแบบดั้งเดิมและโดยการใช้น้ำอย่างเดียว

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. เป็นแนวทางสร้างระบบบูรณาการเพื่อการพัฒนาและนำไปใช้ประโยชน์ในเชิงพาณิชย์ด้านผลิตถุงมือยางและถุงยางอนามัยในกระบวนการลดขั้นตอนการผลิต
2. ได้สารเคลือบผิวที่มีสมบัติในการทำมาความสะอาดด้วยตัวเองที่ดี
3. ทำให้สมบัติของยางดีขึ้น

1.6 ขอบเขตการวิจัย

1. สังเคราะห์สารเคลือบ TiO_2 ที่มีสารตัวได้ปร่วมด้วยนิกเกิลโบรอนและไนโตรเจน $\text{TiO}_2/\text{B}/\text{Ni}/\text{N}$ โดยวิธีโซล-เจล
2. ศึกษาหาสารเติมที่เพิ่มประสิทธิภาพของไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) ที่สามารถทำความสะอาดตัวเองโดยให้มีสมบัติเป็นไฮโดรฟิลิกหรือซูเปอร์ไฮโดรฟิลิก และสามารถกระตุ้นด้วยแสงที่ก่อนมาอยู่ในช่วงแสงที่มองเห็นด้วยตาเปล่า
3. ศึกษากระบวนการเคลือบชิ้นงานเซรามิกและแก้วด้วยวิธีการจุ่ม (Dip coating)
4. ศึกษาประสิทธิภาพของปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติก สมบัติไฮโดรฟิลิกและตรวจสอบคุณลักษณะของฟิล์มด้วยเครื่องมือ XRD, SEM, AFM, XPS และทดสอบความคงทนของฟิล์มด้วยวิธีการดึง (Pull off test)
5. ศึกษาสมบัติการใช้งานจริงเช่นสมบัติการทำความสะอาดตัวเอง สมบัติการดูดซับน้ำยาง
6. ทดสอบการทำความสะอาดของแม่พิมพ์ขึ้นรูปยาง

บทที่ 2

วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีวิจัย

2.1 วิธีการดำเนินการวิจัย

การวิจัยประกอบด้วยขั้นตอนที่สำคัญ ดังนี้คือ เตรียมสารเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์ และที่มีสารเติม โดยเตรียมในระบบสองสาร และระบบสามสารด้วยวิธีการโซล-เจล ให้ได้ในรูปของสารละลาย นำไปเคลือบกับแม่พิมพ์ตัวอย่างที่เป็นกระจกและเซรามิกด้วยวิธีการจุ่ม (Dip coating) แล้วนำแม่พิมพ์ที่ผ่านการเคลือบเผาที่อุณหภูมิ 400 °C, 500 °C และ 600 °C วิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค โดย XRD, SEM และ AFM ศึกษาประสิทธิภาพการทำปฏิกิริยาของสารที่เคลือบแม่พิมพ์โดยนำไปทดสอบปฏิกิริยาการกระตุ้นด้วยแสง ทดสอบการย่อยสลายสีของ Methylene blue ภายใต้แสงยูวี (Backlight 60 วัตต์) และภายใต้แสงฟลูออเรสเซนส์ความเข้มแสง 0.024 W/cm² ตรวจสอบการย่อยสลายสีโดยวัดความเข้มขึ้นที่เปลี่ยนแปลงไปด้วย UV-VIS Spectrometer นำแม่พิมพ์ที่ผ่านการเคลือบด้วยสารโฟโตแคตะลิสต์ ทดสอบสมบัติการชอบน้ำโดยวัดมุมสัมผัส (Contact angle) ระหว่างน้ำกับผิวฟิล์มภายใต้การกระตุ้นด้วยแสงย่านยูวี และแสงฟลูออเรสเซนส์ อีกทั้งทดสอบประสิทธิภาพการทำความสะอาดตัวเอง (Self-cleaning) โดยนำแม่พิมพ์ที่ผ่านการเคลือบไปจุ่มน้ำยางและทดสอบสมบัติทดสอบแรงดึงของยาง (Tensile test) และนำแม่พิมพ์ที่ผ่านการเคลือบทำความสะอาดในเงื่อนไขต่างๆ (รูปที่ 2.1)

ศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิ ความหนาของชั้นฟิล์ม และปริมาณตัวเติม ที่ส่งผลต่อการเกิดโครงสร้างเฟสของไทเทเนียมไดออกไซด์ ประสิทธิภาพของปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกของฟิล์มบาง การทำความสะอาดตัวเองและสมบัติความเปียกน้ำของฟิล์ม

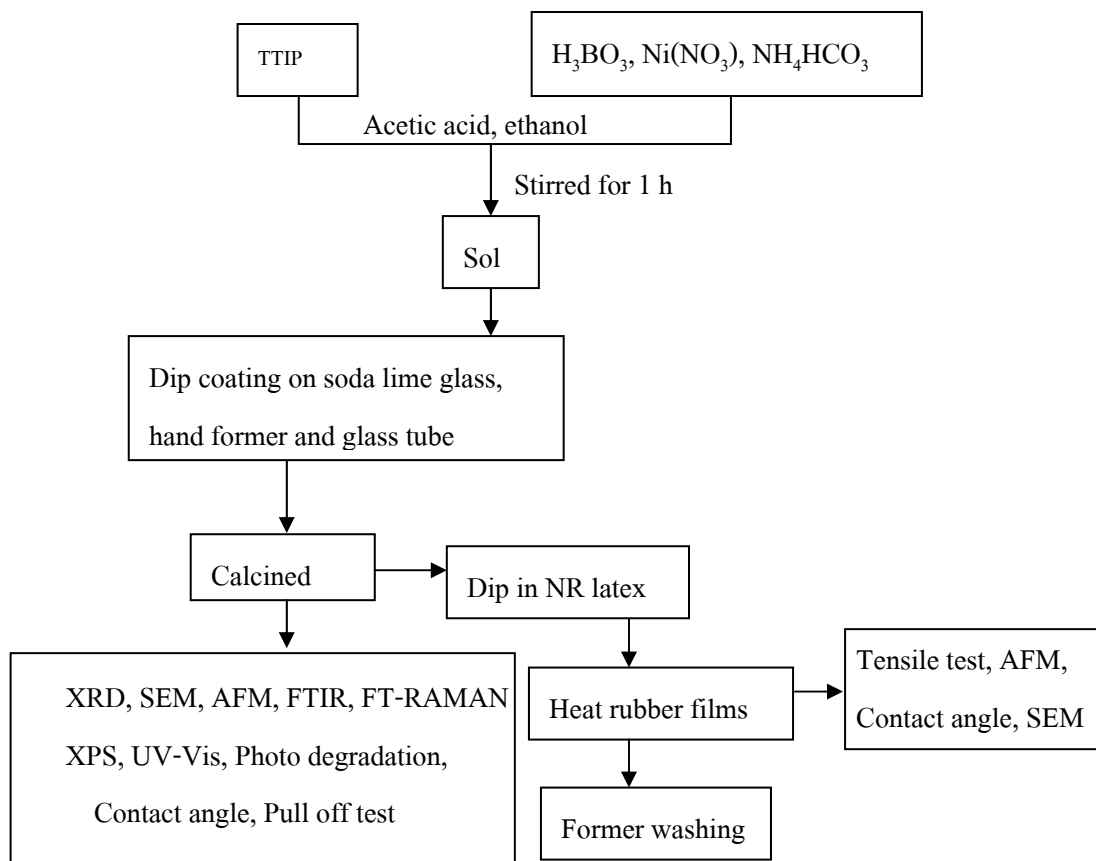
2.2 ขั้นตอนการวิจัย

ประกอบด้วยขั้นตอนรายละเอียดดังต่อไปนี้

2.2.1 กระบวนการเตรียมโซล TiO₂, Ni/B/TiO₂ และ Ni/B/N/TiO₂

ก) การสังเคราะห์โซลไทเทเนียมไดออกไซด์ ใช้ Titanium (IV) isopropoxide (TTIP) ปริมาณ 8.9 มิลลิลิตร เป็นสารตั้งต้นละลายในเอทานอลปริมาตร 143 มิลลิลิตร กวนด้วยความเร็วรอบ 800 รอบต่อนาทีจนครบ 30 นาที และหยดกรดอะซิติก glacial acetic (CH₃COOH) 10 มิลลิลิตร จนกระทั่ง pH ประมาณ 3 กวนสารละลายต่อด้วยเครื่องกวนแท่งแม่เหล็ก (Magnetic bar)

กวนที่อุณหภูมิห้อง จนครบ 1 ชั่วโมง เก็บไว้ที่อุณหภูมิช่วง 3-11 องศาเซลเซียส สัดส่วนของ TTIP:C₂H₅OH เท่ากับ 1:82 อัตราส่วนโดยโมล อ้างอิงจากงานวิจัยของ Qingju Liu และคณะ (2002)



รูปที่ 2.1 แผนผังแสดงขั้นตอนการเตรียมสารเคลือบและการดำเนินการวิจัย

จ) การสังเคราะห์ไฮดรอกไซด์ Ni/B/TiO₂ ใช้ Titanium (IV) isopropoxide (TTIP) ปริมาณ 8.9 มิลลิลิตร ละลายในเอทานอลปริมาตร 143 มิลลิลิตร กวนด้วยความเร็วรอบ 800 รอบต่อนาทีจนครบ 30 นาที และหยดกรดอะซิติก glacial acetic (CH₃COOH) 10 มิลลิลิตร จนกระทั่ง pH ประมาณ 3 ในกรณีนี้ใช้ปริมาณกรดบอริก (H₃BO₃) 5 %mol (Zaleska et al., 2008) และทำการแปรผันปริมาณนิกเกิลไนเตรต Ni(NO₃)₂.6H₂O (1, 2, 3, 4, 6 และ 8 %mol) แสดงในรูปที่ 2.1 กวนสารละลายด้วยเครื่องกวนแท่งแม่เหล็ก (Magnetic bar) กวนที่อุณหภูมิห้อง จนครบ 1 ชั่วโมง เก็บไว้ที่อุณหภูมิช่วง 3-11 องศาเซลเซียส

ค) การสังเคราะห์ไฮดรอกไซด์ Ni/B/N/TiO₂ ใช้ Titanium (IV) isopropoxide (TTIP) ปริมาณ 8.9 มิลลิลิตร ละลายในเอทานอลปริมาตร 143 มิลลิลิตร กวนด้วยความเร็วรอบ 800 รอบต่อนาทีจนครบ 30 นาที และหยดกรดอะซิติก glacial acetic (CH₃COOH) 10 มิลลิลิตร จนกระทั่ง pH

ประมาณ 3 ในกรณีนี้ใช้ปริมาณกรดบอริก (H_3BO_3) 5 %mol (Zaleska et al., 2008) ปริมาณแอมโมเนียมคาร์บอเนต $(NH_4)_2CO_3$ 20 %mol (Qin et al., 2008) แสดงในรูปที่ 2.1และทำการแปรผันปริมาณนิกเกิลไนเตรต $Ni(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$ (3 , 4 , 5 และ 6 %mol) กวนสารละลายด้วยเครื่องกวนแท่งแม่เหล็ก (Magnetic bar) จนครบ 1 ชั่วโมง เก็บไว้ที่อุณหภูมิช่วง 3-11 องศาเซลเซียส

2.2.2 กระบวนการเคลือบแม่พิมพ์ด้วยสารแคตะลิสต์

สารเคลือบที่อยู่ในสถานะโชนหลังจากเตรียมเสร็จ ตั้งทิ้งไว้ให้เกิดปฏิกิริยาโดยสมบูรณ์เป็นเวลาอย่างน้อย 8 ชั่วโมง ในการเคลือบใช้วิธีการจุ่ม ก่อนทำการเคลือบทำความสะอาดกระจกโดยล้างด้วยอ่างอัลตราโซนิกเป็นเวลา 15 นาที เพื่อกำจัดสารที่เคลือบติดอยู่ที่ผิวของกระจกให้หลุดออกไป หลังจากนั้นล้างด้วยน้ำกลั่นอีกครั้ง อบให้แห้งที่อุณหภูมิ $60^\circ C$ เป็นเวลา 30 นาที ทำการเคลือบด้วยการจุ่ม ความเร็วในการจุ่ม ระยะเวลา 300 มิลลิเมตรต่อนาที(รูปที่ 2.2) ทำการเคลือบจำนวน 2 ชั้นเคลือบ ตั้งชิ้นงานทิ้งให้แห้งที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 24 ชั่วโมง นำชิ้นงานเผาภายใต้ภาวะบรรยากาศ ช่วงอุณหภูมิ 400, 500 และ $600^\circ C$ อัตราการเพิ่มของอุณหภูมิ $10^\circ C/$ นาที ทิ้งไว้ ณ อุณหภูมินั้น 1 ชั่วโมง ซึ่งแม่พิมพ์ที่ใช้เป็นวัสดุฐานได้แก่

1. กระจกโซดาไลม์เป็นวัสดุฐาน มีขนาด $20 \times 5 \times 0.3$ เซนติเมตร เป็นวัสดุฐานที่ใช้ศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิและการติดเกาะของชั้นฟิล์มเพื่อให้ได้ซึ่งสูตรและเงื่อนไขที่ดีที่สุด (Optimum condition) เมื่อได้ผลที่ดีที่สุดแล้วทำการเคลือบสารแคตะลิสต์และทำการจุ่มน้ำด้วยแม่พิมพ์ที่เป็นหลอดทดลองชนิดแก้วและแม่พิมพ์มือต่อไป

2. หลอดทดลองชนิดแก้วขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 2.5 เซนติเมตร ยาว 20 เซนติเมตร

3. หลอดเซรามิกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 1.5 เซนติเมตร ยาว 23 เซนติเมตร (รูปที่ 2.3 ก)

4. แม่พิมพ์มือจากบริษัทยูโรเซรามิก (รูปที่ 2.3 ข)



รูปที่ 2.2 การจุ่มแม่พิมพ์ด้วยความเร็ว 300 มิลลิเมตรต่อนาที



ก)

ข)

รูปที่ 2.3 แม่พิมพ์ที่ใช้ในการทดลอง ก) แม่พิมพ์หลอดแก้วและเซรามิกและแผ่นกระจก ข) แม่พิมพ์มือ

การเตรียมน้ำยางคอมปาวด์ใช้น้ำยางชั้นชนิดแอมโมเนียสูงนำมาผสมสารเคมีดังตารางที่ 2.1 และเตรียมน้ำยางคอมปาวด์โดยชั่งน้ำยางชั้นชนิดแอมโมเนียสูงและสารเคมีตามปริมาณที่กำหนด กวนผสมให้สารเคมีเข้ากับน้ำยางประมาณ 16 ชั่วโมงและบ่มทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 1 วันจากนั้นจึงนำไปเตรียมเป็นฟิล์มยาง

2.2.3 การเตรียมฟิล์มยาง

แผ่นฟิล์มยางสามารถเตรียมได้จากการจุ่มแม่พิมพ์ใช้สารช่วยจับตัว (Coagulant) มีดังนี้

1. จุ่มแม่พิมพ์ที่สะอาดลงใน 10% แคลเซียมคลอไรด์เป็นเวลา 20 วินาที ยกแม่พิมพ์ขึ้นด้วยความเร็วสม่ำเสมอ แล้วทำให้สารช่วยจับตัวแห้งพอหมาด
 2. จุ่มแม่พิมพ์ลงในน้ำยารวมสารเคมี (ที่ผ่านการกรองแล้วและไม่มีฟองอากาศ) เป็นเวลา 20 วินาที โดยใช้ความเร็วที่เหมาะสมเพราะการจุ่มเร็วเกินไป ทำให้ผิวหน้าของฟิล์มยางที่ติดแม่พิมพ์ไม่เรียบ ยกพิมพ์ขึ้นจากน้ำยารวมช้าๆ ด้วยความเร็วสม่ำเสมอ ขณะยกขึ้นต้องหมุนแม่พิมพ์เพื่อกระจายน้ำยารวมสุดท้ายให้สม่ำเสมอทำการจุ่มทั้งหมดสามครั้ง
 3. นำแม่พิมพ์ที่มียางเกาะอบที่อุณหภูมิ 120 ± 5 °C เป็นเวลา 15 นาที (รูปที่ 2.4)
 4. เมื่ออบเสร็จนำมาล้างน้ำอีกครั้งเพื่อล้างสารเคมีที่อาจตกค้างอยู่
 5. อบพอแห้ง
 6. ถอดฟิล์มยางออกจากแม่พิมพ์
- หากเตรียมน้ำยางโดยไม่ใช้สารช่วยจับตัว (Coagulant) ให้ลดขั้นตอนข้อที่ 1 โดยเริ่มจากขั้นตอนที่ 2 เป็นต้นไป

2.2.4 กระบวนการเตรียมน้ำยางคอมปาวด์และการเตรียมฟิล์มยาง

ตารางที่ 2.1 สูตรน้ำยางที่ใช้ในการจุ่ม

อัตราส่วนผสม	ส่วน โดยน้ำหนักแห้ง (phr)
60% น้ำยางธรรมชาติ	100
10% โปแตสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH)	0.25
10% โปแตสเซียมโอเลต	0.20
50% กำมะถัน	1.00
50% ZDBC ¹	1.00
50% สารป้องกันออกซิเดชัน Lovinox	0.75
50% ซิงค์ออกไซด์ (ZnO)	0.50

¹ Zinc dibutyl dithiocarbamate

2.2.5 กระบวนการล้างแม่พิมพ์

กระบวนการล้างแม่พิมพ์หลังจากลอกฟิล์มยางออกมีกระบวนการล้าง 4 กระบวนการดังนี้

กระบวนการที่ 1 นำแม่พิมพ์ที่ไม่ได้ทำการเคลือบสารแคตะลิสต์ ล้างด้วย 2 % กรดไนตริก (HNO₃) ต่อด้วยการล้างด้วยด่าง 2 % โปแตสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) หลังจากนั้นนำไป

ล้างน้ำแล้วนำไปจุ่มในสารจับตัว (Coagulant) คือ 10%แคลเซียมคลอไรด์จึงนำแม่พิมพ์ไปจุ่มน้ำยางต่อไป

กระบวนการที่ 2 และ 3 นำแม่พิมพ์ที่ไม่ได้ทำการเคลือบและทำการเคลือบสารแคตะลิสต์ ตามลำดับล้างด้วยน้ำ แล้วจึงนำแม่พิมพ์ไปจุ่มน้ำยางต่อไป

กระบวนการที่ 4 นำแม่พิมพ์ที่เคลือบสารแคตะลิสต์ล้างด้วยน้ำ หลังจากนั้นนำไปวางแม่พิมพ์ที่มีการฉายรังสียูวีและแสงฟลูออเรสเซนซ์นาน 5 และ 10 นาที แล้วจึงนำแม่พิมพ์ไปจุ่มน้ำยางต่อไป



รูปที่ 2.4 อบฟิล์มยางในเตาอบ

2.3 การตรวจสอบคุณลักษณะสารเคลือบโฟโตแคตะลิสต์ และฟิล์มยาง

1) X-ray powder diffractometry (XRD)

เทคนิค XRD ศึกษาโครงสร้างผลึกของเฟส และคำนวณหาขนาดของผลึกของแต่ละเฟสที่เกิดขึ้นบนฟิล์มเคลือบ โดยใช้สมการ Scherer ดังสมการที่ (2.1)

$$t = 0.9\lambda / \beta \cos \theta_B \quad \dots\dots\dots (2.1)$$

- 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)

2) เครื่องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด (SEM)

ตรวจดูโครงสร้างจุลภาคของผง และพื้นผิวฟิล์ม ตรวจสอบธาตุที่เป็นองค์ประกอบของฟิล์มด้วย EDX และวิเคราะห์การกระจายตัวของอนุภาค TiO_2 และสารเติมแต่งที่กระจายอยู่บนฟิล์มด้วยวิธี X-ray mapping ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด (SEM; JEOL JSM-5800LV)

3) Ultraviolet-visible spectrophotometer (UV-VIS)

โดยทำการสแกนที่ความยาวคลื่น 200 - 800 นาโนเมตร และวัดปริมาณความเข้มข้นของสี Methylene blue เมื่อผ่านการทำปฏิกิริยาการกระตุ้นด้วยแสงยูวี (310 - 400 นาโนเมตร) โดยเลือกความยาวคลื่น 664 นาโนเมตร ซึ่งเป็นความยาวคลื่นที่ Methylene blue สามารถดูดกลืนได้

4) Ultraviolet-vis -NIR Spectrometer (UV-Vis-NIR)

โดยทำการสแกนที่ความยาวคลื่น 200 - 800 นาโนเมตร โดยรายงานออกมาในรูปแบบเส้นกราฟแสดงให้เห็นถึงการเลื่อน (shift to visible) ของเส้นกราฟไปในทางช่วงความยาวคลื่นที่แสงมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า ด้วยเครื่องรุ่น Shimadzu ISR-3100 spectrophotometer แล้วนำเส้นกราฟมาคำนวณดังสมการ

$$E_g = 1239.8 / \lambda \quad \dots\dots\dots (2.2)$$

เมื่อ E_g คือ แถบช่วงพลังงาน (eV)

λ คือ ความยาวคลื่น (นาโนเมตร)

5) X-ray photo electron spectroscopy (XPS)

โดยทำการสแกนที่พลังงานอิเล็กตรอน 0 - 1200 อิเล็กตรอนโวลต์ และวัดปริมาณของสารเติมแต่ง ที่เติมลงไปโดยรายงานออกมาในรูปแบบเชิงปริมาณและการจับตัวของสารเติม โดยดูที่พลังงานอิเล็กตรอนว่าสารเติมมีการจับตัวในแลททิซในรูปแบบใด ด้วยเครื่อง Perkin-Elmer PHI 1600 ESCA

6) Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR)

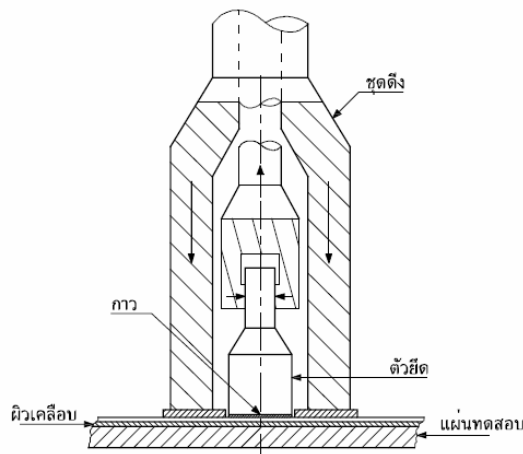
โดยทำการสแกนที่ความยาวคลื่น 500 - 4000 cm^{-1} และวิเคราะห์หามุมฟังก์ชันต่างๆ โดยรายงานออกมาในรูปแบบกราฟ ด้วยเครื่องรุ่น Bruker EQUINOX 55

7) Fourier transform Raman spectroscopy (FT-RAMAN)

โดยทำการสแกนที่ความยาวคลื่น 200 - 3500 cm^{-1} และวิเคราะห์หามุมฟังก์ชันที่โดยรายงานออกมาในรูปแบบกราฟ ด้วยเครื่องรุ่น Spectrum GX

8) Adhesion pulls off test

เป็นการทดสอบการติดแน่นของผิวเคลือบระหว่างแม่พิมพ์กับสารเคลือบแคตะลิสต์โดยทำการดัดตามมาตรฐาน มอก. 285 เล่ม 50-2549 (รูปที่ 2.5) และ ASTM D4541



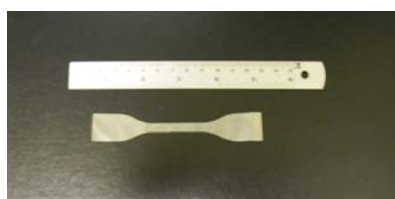
รูปที่ 2.5 เครื่องทดสอบการติดแน่นของฟิล์ม

9) Atomic force microscopy (AFM)

ส่องดูความราบเรียบของพื้นผิวที่เคลือบด้วยสารเคลือบโฟโตแคตะลิสต์ และคำนวณหาขนาดอนุภาคของฟิล์ม และความหนาของชั้นเคลือบ อีกทั้งยังหาความราบเรียบของฟิล์ม ยางที่จุ่มด้วยแม่พิมพ์เคลือบสารเคลือบโฟโตแคตะลิสต์ ด้วยเครื่อง Atomic force microscope (AFM) ยี่ห้อ SEIKO รุ่น SPA 400

10) Tensile test

ทดสอบการรับแรงดึงของฟิล์มยางที่ได้โดยตัดเป็นรูปดัมเบล (รูปที่ 2.6) ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D412 ด้วยเครื่องดึงรุ่น Hounsfeild test Model H 100KS



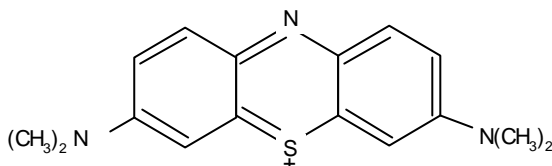
รูปที่ 2.6 ฟิล์มยางที่ตัดเป็นรูปดัมเบล

2.4 การทดสอบปฏิกิริยาของฟิล์มในการย่อยสลายสีของเมทิลีนบลู

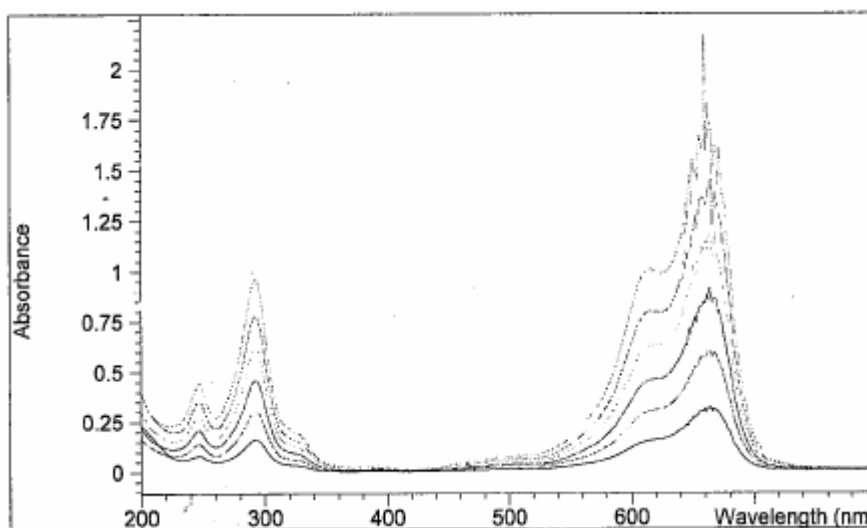
ก) เตรียมสารละลายมาตรฐาน

เตรียมสารละลายมาตรฐาน เพื่อสร้างกราฟมาตรฐานในการนำไปวิเคราะห์ผล โดยเตรียมสารละลายเมทิลีนบลู ที่มีโครงสร้างตามรูปที่ 2.7 ความเข้มข้นช่วง $(0.5 \times 10^{-5}) - (3 \times 10^{-5})$ โมล

ลาร์ วัดการดูดกลืนแสงโดยเทคนิค UV-VIS spectroscopy ความยาวคลื่น 200 - 800 นาโนเมตร และเลือกความยาวคลื่น 664 นาโนเมตร ในการวัด Absorbance ของเมทิลีนบลู (รูปที่ 2.8)



รูปที่ 2.7 สูตร โครงสร้างของเมทิลีนบลู (Fluka catalogue 1997/98:1001)

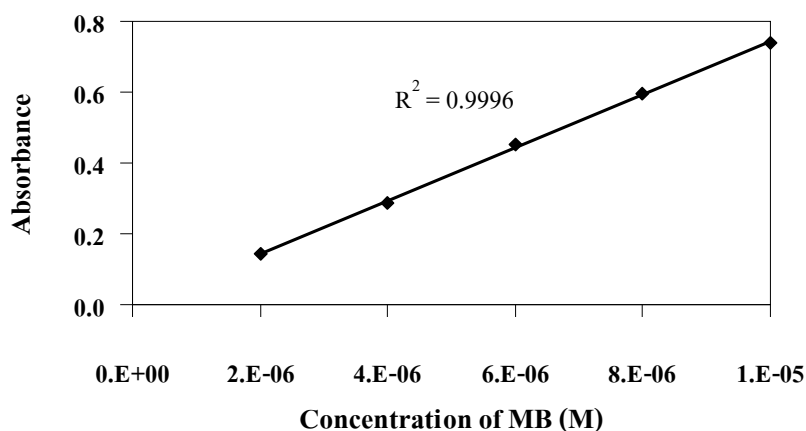


รูปที่ 2.8 Spectrum การดูดกลืนแสงของเมทิลีนบลูที่ความเข้มข้น $(0.5 \times 10^{-5}) - (3 \times 10^{-5})$ โมลาร์

กราฟมาตรฐานของสารละลายเมทิลีนบลู ในช่วง $(0.5 \times 10^{-5}) - (3 \times 10^{-5})$ โมลาร์ แสดงดังในรูปที่ 2.9 ซึ่งเขียนกราฟระหว่าง ความเข้มข้นกับค่า Absorbance มีค่าความถูกต้องของกราฟ $R^2 = 0.99962$ เพื่อนำมาหาค่าความเข้มข้นที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่อได้รับแสงยูวี ที่เวลาต่าง ๆ กัน ทดสอบการสลายสีของเมทิลีนบลู ความเข้มข้นเริ่มต้น 1×10^{-5} โมลาร์ โดย

กำหนดให้

C	แทนด้วยความเข้มข้นเริ่มต้น เท่ากับ 1×10^{-5} โมลาร์
C_0	แทนด้วยความเข้มข้น ณ เวลาทดสอบ (โมลาร์)



รูปที่ 2.9 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายเมทิลีนบลู (0.5×10^{-5}) - (3×10^{-5}) โมลาร์ กับค่า Absorbance ที่ได้จากเครื่อง UV-VIS spectrometer

ข) ปฏิกริยาโฟโตแคตะไลติกในการย่อยสลายสีของเมทิลีนบลู

ชิ้นงานที่นำมาทดสอบปฏิกิริยาการย่อยสลายสีเมทิลีนบลู อยู่ในรูปของฟิล์มบางที่เคลือบบนกระจกโซดาไลม์ ก่อนนำชิ้นงานไปทดสอบ นำชิ้นงานทำความสะอาดด้วยน้ำกลั่น เพื่อกำจัดฝุ่นละอองที่เกาะอยู่ตามผิวหน้าของชิ้นงานออก หลังจากนั้นอบให้แห้งและนำชิ้นงานวางลงในกล่องใส่ตัวอย่างสีเหลี่ยมผืนผ้าซึ่งทำด้วยกระจก ขนาด 25×7 ตารางเซนติเมตรใส่สารละลายเมทิลีนบลู ความเข้มข้น 1×10^{-5} โมลาร์ ปริมาตร 70 มิลลิลิตรลงไปโดยให้สารละลายท่วมชิ้นงาน ใช้รังสียูวีขนาด 60 วัตต์ ที่มีความเข้มแสง 0.024 W/cm^2

การคำนวณหา %Degradation ของเมทิลีนบลู โดยใช้สูตรดังสมการ 2.2

$$\% \text{Degradation} = \frac{(C_0 - C)}{C_0} \times 100 \quad \dots \dots \dots (2.3)$$

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

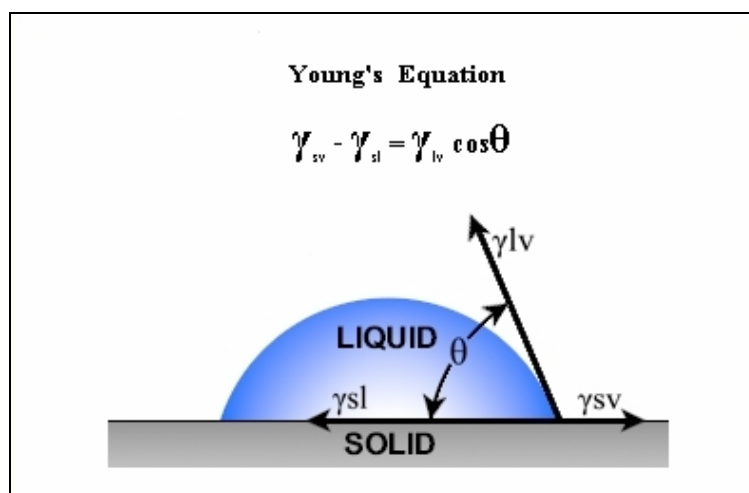
C คือ ความเข้มข้น ณ เวลาทดสอบ (โมลาร์)

โดยความยาวคลื่นย่านยูวี (310 - 400 นาโนเมตร) และภายใต้แสงฟลูออเรสเซนต์ด้วย เป็นเวลา 6 ชั่วโมง สุ่มเก็บตัวอย่างสารละลายเมทิลีนบลู ทุกๆ 1 ชั่วโมง วัดความเข้มข้นที่

เปลี่ยนแปลงไปด้วยเครื่อง Ultraviolet-visible spectrophotometer (UV-VIS) แล้วบันทึกผล เพื่อศึกษาอัตราการลดลงของความเข้มข้นของเมทิลีนบลู เมื่อเวลาเพิ่มขึ้น การทดลองภาวะละ 3 ตัวอย่าง

2.5 การวัดมุมสัมผัสของหยดน้ำบนกระจกที่เคลือบด้วยฟิล์มบาง

การวัดมุมสัมผัสจะแสดงถึงสภาพเปียกน้ำของผิว (Hydrophilic surface) หรือผิวไม่เปียกน้ำ (Hydrophobic) ของผิวเคลือบ โดยมุมสัมผัสมีค่าต่ำแสดงถึงความชอบน้ำของผิวมีมาก ในขณะที่มุมสัมผัสมีค่าสูงแสดงถึงผิวที่ไม่ชอบน้ำมากขึ้นและลักษณะหยดน้ำมีลักษณะเป็นหยดน้ำกลมมากขึ้น ถ้ามุมสัมผัสของหยดน้ำบนกระจกมีค่ามากกว่า 100 องศา ก็จะมีสภาพคล้ายๆ หยดน้ำที่อยู่บนใบบัว หรือเรียกว่า Lotus effect ดังแสดงในรูปที่ 2.10 ขั้นตอนการวัดมุมสัมผัสมีดังนี้

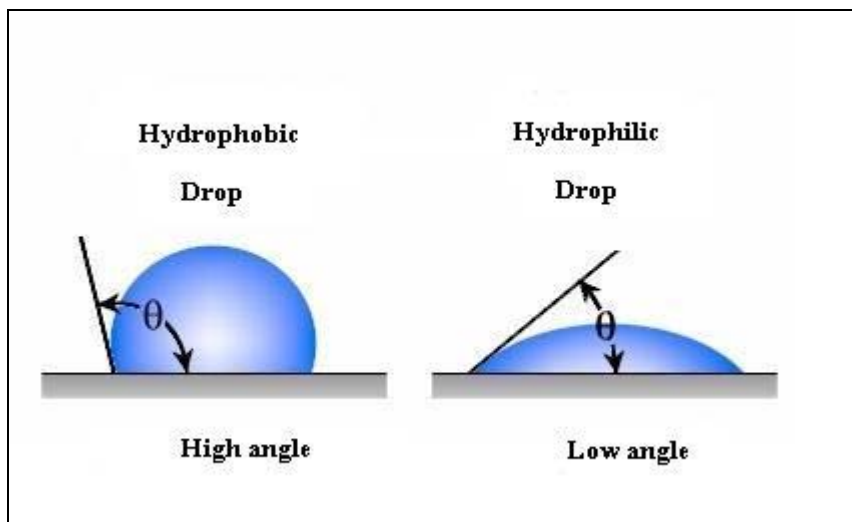


รูปที่ 2.10 มุมสัมผัสที่เกิดขึ้นระหว่างของเหลวกับของแข็ง

(www.ramehart.com/goniometers/contactangle.htm : 12/03/51)

โดย	θ	คือ มุมสัมผัส (องศา)
	γ^{sl}	คือ พลังงานอิสระหน้าสัมผัสระหว่างของแข็งและของเหลว
	γ^{sv}	คือ พลังงานพื้นผิวอิสระของของแข็ง
	γ^{lv}	คือ พลังงานพื้นผิวอิสระของของเหลว

ตัดชิ้นงานให้มีขนาด 2×10 เซนติเมตร ทำความสะอาดล้างด้วยน้ำกลั่นอบให้แห้ง 100 องศาเซลเซียส หลังจากนั้นนำไปวางไว้ในที่มืดเป็นเวลา 24 ชั่วโมงแล้วนำมาทดสอบ โดยการหยดน้ำกลั่นลงบนผิวฟิล์มกระทำภายใต้แสงที่มองเห็น (Visible) และรังสียูวี (จากหลอด Black light ขนาด 60 วัตต์) ซึ่งกระทำภายในกล่องดำทึบ เป็นเวลา 30 นาที วัดมุมสัมผัสหรือมุม θ ดังรูปที่ 2.11 ทุกๆ 5 นาที บันทึกผล โดยใช้เครื่อง Contact angle meter (OCA 15EC)



รูปที่ 2.11 เปรียบเทียบขนาดของมุมสัมผัสของสมบัติความเป็นไฮโดรฟิลิกและสมบัติไฮโดรโฟบิกของพื้นผิวฟิล์ม

บทที่ 3

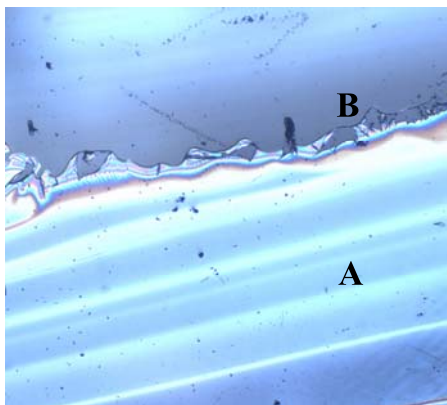
ผลและการอภิปรายผล

จากการทดลองสังเคราะห์สารเคลือบผิวไทเทเนียมไดออกไซด์ในรูปของฟิล์มโดยศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิเผา และปริมาณของสารเติม निकเกิด สำหรับสารเติมโบรอน และไนโตรเจนได้เติมในปริมาณคงที่ เพื่อปรับปรุงให้สมบัติโฟโตแคตะลิสต์ให้มีประสิทธิภาพดีขึ้นแล้ว ยังส่งผลต่อสมบัติการชอบน้ำของฟิล์ม โฟโตแคตะลิสต์ที่เคลือบอยู่บนแม่พิมพ์ ทำให้แม่พิมพ์สามารถทำความสะอาดได้ง่ายขึ้นกว่าแม่พิมพ์โดยทั่วไป แล้วนำแม่พิมพ์ดังกล่าวไปจุ่มน้ำยางและยังทำให้ความต้านทานแรงดึงของยางดีขึ้นด้วย

3.1 การสังเคราะห์และการตรวจจลณลักษณะ

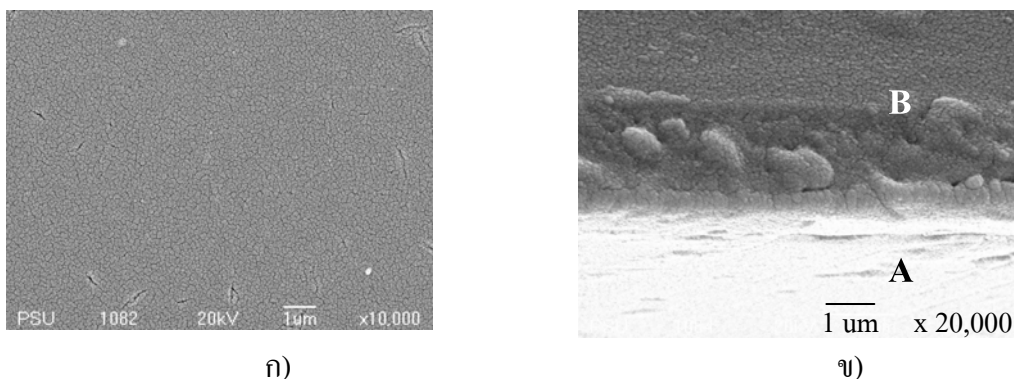
3.1.1 การสังเคราะห์ฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์

การสังเคราะห์ฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์โดยการแปรผันอุณหภูมิที่ใช้เผาคือ 400, 500 และ 600 °C ลักษณะของฟิล์ม มีสีรุ้งสไตติคแม่พิมพ์ (รูปในที่ 3.1 A) เมื่อนำแม่พิมพ์ที่เคลือบลักษณะของฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ส่องด้วย SEM เห็นลักษณะเกรนขนาดเล็กเกาะติดบริเวณแม่พิมพ์ซึ่งเห็นได้อย่างชัดเจน (รูปที่ 3.2) แสดงให้เห็นถึงความสม่ำเสมอของฟิล์มที่เคลือบที่ติดยึดกับแม่พิมพ์เมื่อนำฟิล์มไปวิเคราะห์โครงสร้างเฟสที่เกิดขึ้น จากการวิเคราะห์ผลด้วย XRD พบว่าฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์มีเฟสอะนาเทส (Lee et al., 2003; Zhang et al., 2000) เกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์ที่อุณหภูมิเผาดังกล่าว (รูปที่ 3.3)

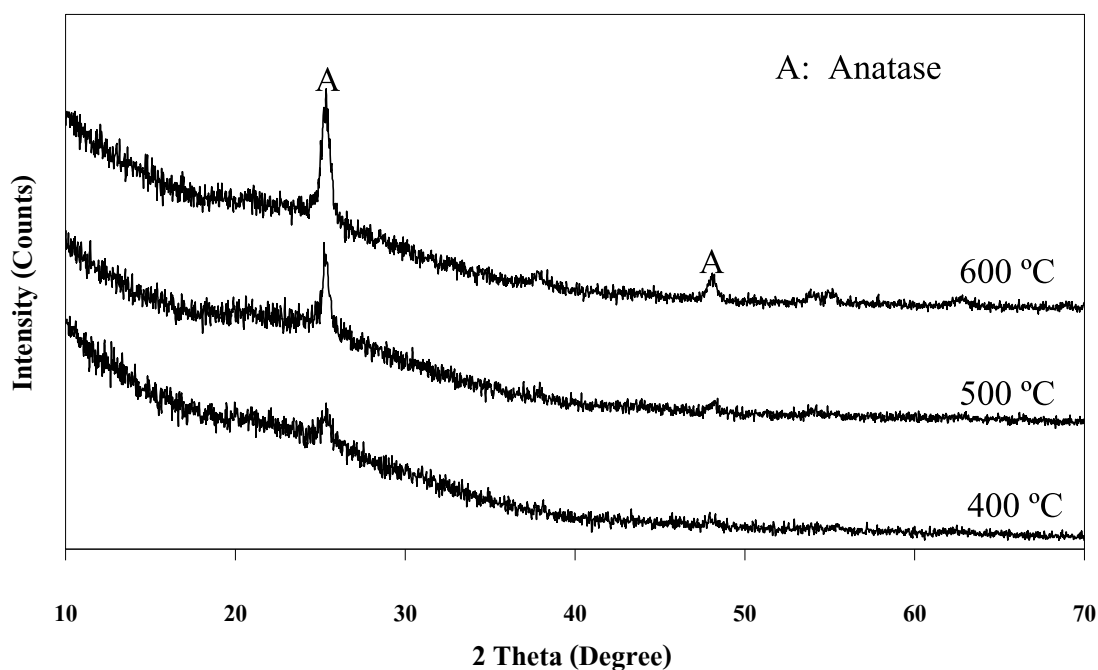


รูปที่ 3.1 ลักษณะฟิล์มเคลือบแม่พิมพ์กำลังขยาย 50 เท่า ด้าน A) ฟิล์มเคลือบ B) แม่พิมพ์กระจก

จากตารางที่ 3.1 แสดงขนาดผลึกของอะนาเทสที่ฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์มีขนาดผลึก 29.72-34.23 นาโนเมตร สังเกตเห็นว่าขนาดผลึกอะนาเทสจะมีขนาดใหญ่ขึ้น เมื่ออุณหภูมิในการเผาเพิ่มขึ้นเพราะมีการเติบโตของเกรน จากอุณหภูมิเผา 400 - 600 °C ขนาดผลึกของเฟสอะนาเทส 34.23 นาโนเมตร



รูปที่ 3.2 ภาพถ่าย SEM แสดงลักษณะพื้นผิวของฟิล์ม TiO_2 ที่อุณหภูมิ 600 °C ที่กำลังขยาย ก) 10,000 ข) 20,000 เท่า เมื่อด้าน A และ B เป็นด้านแม่พิมพ์และผิวเคลือบตามลำดับ



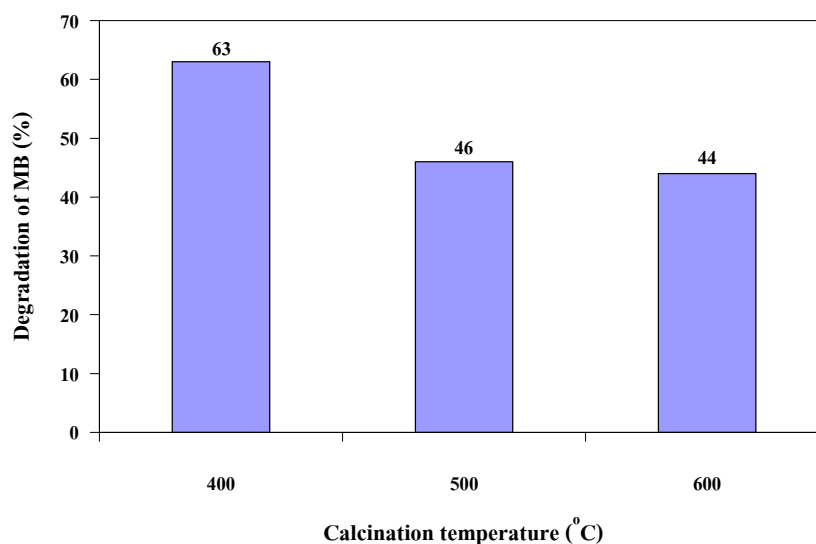
รูปที่ 3.3 ผลการวิเคราะห์ XRD ของฟิล์มที่เคลือบด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เผาอุณหภูมิ 400, 500 และ 600 °C

ตารางที่ 3.1 ขนาดผลึกและปริมาณเฟสของฟิล์ม TiO₂ เคลือบแม่พิมพ์เผาที่อุณหภูมิต่างๆ

TiO ₂	ขนาดผลึก (nm)			ความเป็นผลึกอะนาเทส (%)
	400(°C)	500(°C)	600(°C)	
	29.72	29.90	34.23	100

3.1.2 การทดสอบปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกของฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์

จากการทดสอบการย่อยสลายสีเมทิลีนบลู ของฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ปรากฏว่าที่อุณหภูมิการเผาที่ 400 °C มีประสิทธิภาพสูงกว่าที่ 500 และ 600 °C (รูปที่ 3.4) การย่อยสลายสีเมทิลีนบลู ซึ่งเป็นค่าที่บ่งบอกถึงประสิทธิภาพการเกิดปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกของฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ ผลกราฟจากการทดลอง พบว่าที่อุณหภูมิ 600 °C ให้ประสิทธิภาพการย่อยสลายสีเมทิลีนบลูต่ำสุด เนื่องจากประสิทธิภาพการเกิดปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติก ขึ้นอยู่กับพื้นที่ผิวในการทำปฏิกิริยาของตัวโฟโตแคตะไลติกและเฟสที่เกิดขึ้น (Lee et al., 2003; Zhang et al., 2000) ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีโครงสร้างอะนาเทส จะทำให้เกิดปฏิกิริยาได้ดีกว่าโครงสร้างเฟสอื่นๆ (Huang et al., 2007; Zaleska et al., 2008)



รูปที่ 3.4 ความสัมพันธ์ของอุณหภูมิกับอัตราการย่อยสลายสีของเมทิลีนบลูเมื่อได้รับรังสียูวี 6 ชั่วโมง

ปัจจัยที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนเฟส คือ อุณหภูมิในการเผา โดยทั่วไปโครงสร้างอะนาเทสจะเกิดที่อุณหภูมิ 300 - 600 °C ดังนั้นผลของปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกของฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ที่อุณหภูมิ 400 °C จะสูงกว่าที่ 500 °C และ 600 °C (รูปที่ 3.4) (Wei et al., 2007; Zhongbiao et al., 2008)

จากการทดลองเบื้องต้นจะมีแนวทางการศึกษาของแม่พิมพ์ที่เคลือบด้วยฟิล์มแคตะไลสต์ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ใช้สารได้ปสองตัว คือ นิกเกิล โบรอน (Ni/B) และ นิกเกิล โบรอน ไนโตรเจน (Ni/B/N)

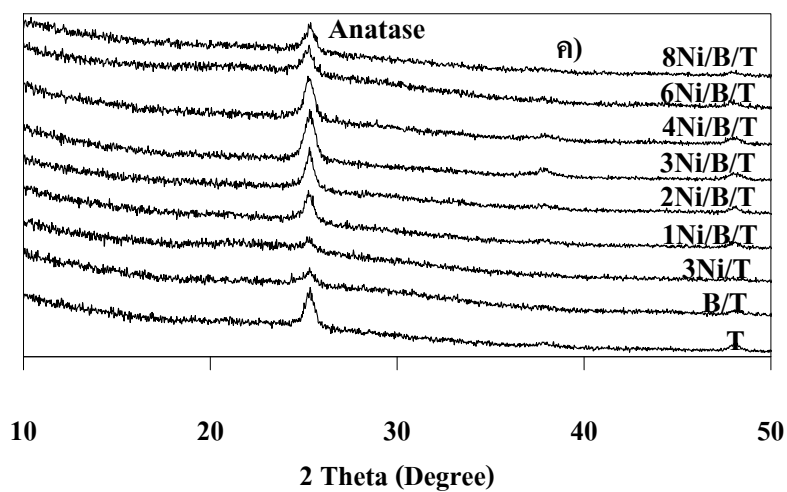
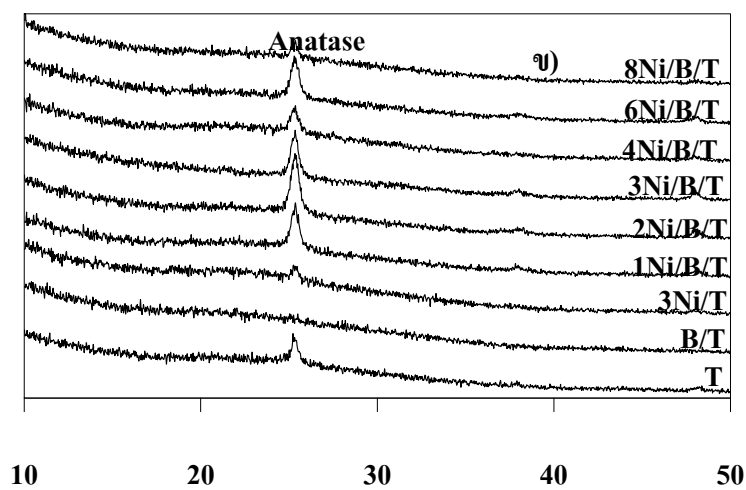
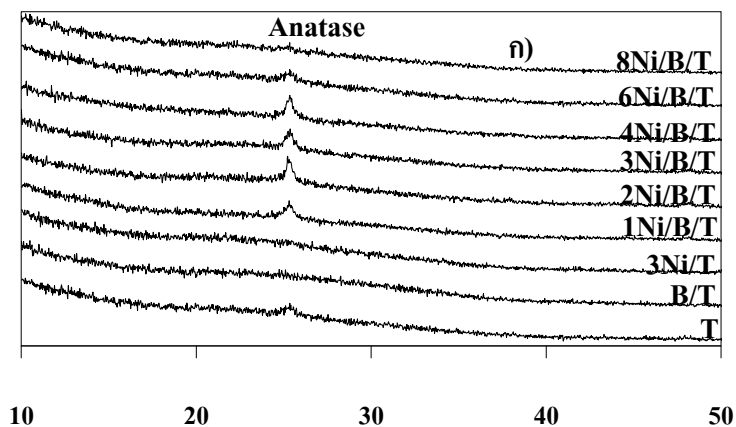
3.2 การทดสอบสมบัติของฟิล์ม

3.2.1 การสังเคราะห์ฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ได้ปนิกเกิลและโบรอน (Ni/B/TiO₂)

ก. ผลการวิเคราะห์ฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วย XRD

จากการศึกษาปริมาณกรดบอริก (H₃BO₃) ที่เติมลงไปจะคงที่ คือ ที่ 5 เปอร์เซ็นต์โมล เป็นปริมาณที่เหมาะสมที่สุดในการเติม (Zaleska et al., 2008) สำหรับปริมาณนิกเกิลไนเตรต Ni(NO₃)₂·6H₂O ที่เติมลงไปจะแปรผันคือ 0, 1, 2, 3, 4, 6 และ 8 เปอร์เซ็นต์โมล เมื่อเติมสารได้ปทั้งโบรอนและนิกเกิลลงในสารเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์เผาที่อุณหภูมิ 400 - 600 °C (รูปที่ 3.5 ก-ค) วิเคราะห์โครงสร้างเฟสของฟิล์มที่เกิดขึ้น จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD (รูปที่ 3.5) ของฟิล์ม TiO₂ เมื่อได้ปโบรอนและนิกเกิลลงไปทำให้เฟสอะนาเทสเสถียรที่อุณหภูมิสูงขึ้น จะเห็นได้ว่าที่อุณหภูมิ 400 °C (รูปที่ 3.5 ก) ที่ได้ปเฉพาะโบรอนและนิกเกิลอย่างเดียวยังไม่เกิดเฟสอะนาเทส และเมื่อได้ปโบรอนเพียงอย่างเดียวเผาที่อุณหภูมิ 500 °C (รูปที่ 3.5 ข) เฟสอะนาเทสก็ยังไม่เกิดขึ้น (ตารางที่ 3.2) แต่หากมีการได้ปสารทั้งสองตัวในสารเคลือบทำให้เกิดเฟสอะนาเทสที่สมบูรณ์และมีขนาดผลึกของเฟสอะนาเทสเล็กกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับ TiO₂ (T) ที่ไม่ได้ได้ปด้วยโบรอนและนิกเกิล ทั้งนี้การได้ปปริมาณของนิกเกิลที่เพิ่มขึ้น 8 เปอร์เซ็นต์โมล จะขัดขวางการเกิดเฟสอะนาเทสได้เช่นกันซึ่งจะทำให้เกิดโครงสร้างอสัณฐาน (Amorphous) (รูปที่ 3.5 ก) (Masahashi et al., 2008, Khan et al., 2008, Tseng et al., 2009, Kisand et al., 2010) ในปริมาณการได้ปนิกเกิลที่ 2-3 เปอร์เซ็นต์โมล ที่อุณหภูมิการเผาที่ 400 °C และเมื่ออุณหภูมิการเผาที่ 500 °C และ 600°C ขนาดผลึกของอะนาเทสจะมีขนาดใหญ่ขึ้นตามลำดับซึ่งจะเห็นได้ชัดจากพีคความสูง (Intensity) จาก XRD

ปริมาณของสารได้ปโบรอนและนิกเกิลมีผลต่อการเกิดโครงสร้างผลึกอะนาเทสของไทเทเนียมไดออกไซด์ XRD spectrum ในรูปที่ 3.5 เปรียบเทียบปริมาณนิกเกิลต่อการเกิดเฟสอะนาเทสของผงไทเทเนียมไดออกไซด์ ที่ $2\theta = 25.50^\circ$ ซึ่งเป็นพีคหลักของเฟสอะนาเทสของ



รูปที่ 3.5 XRD ของฟิล์ม Ni/B/T เฝ้าที่ ก) 400 °C ข) 500 °C และ ค) 600 °C

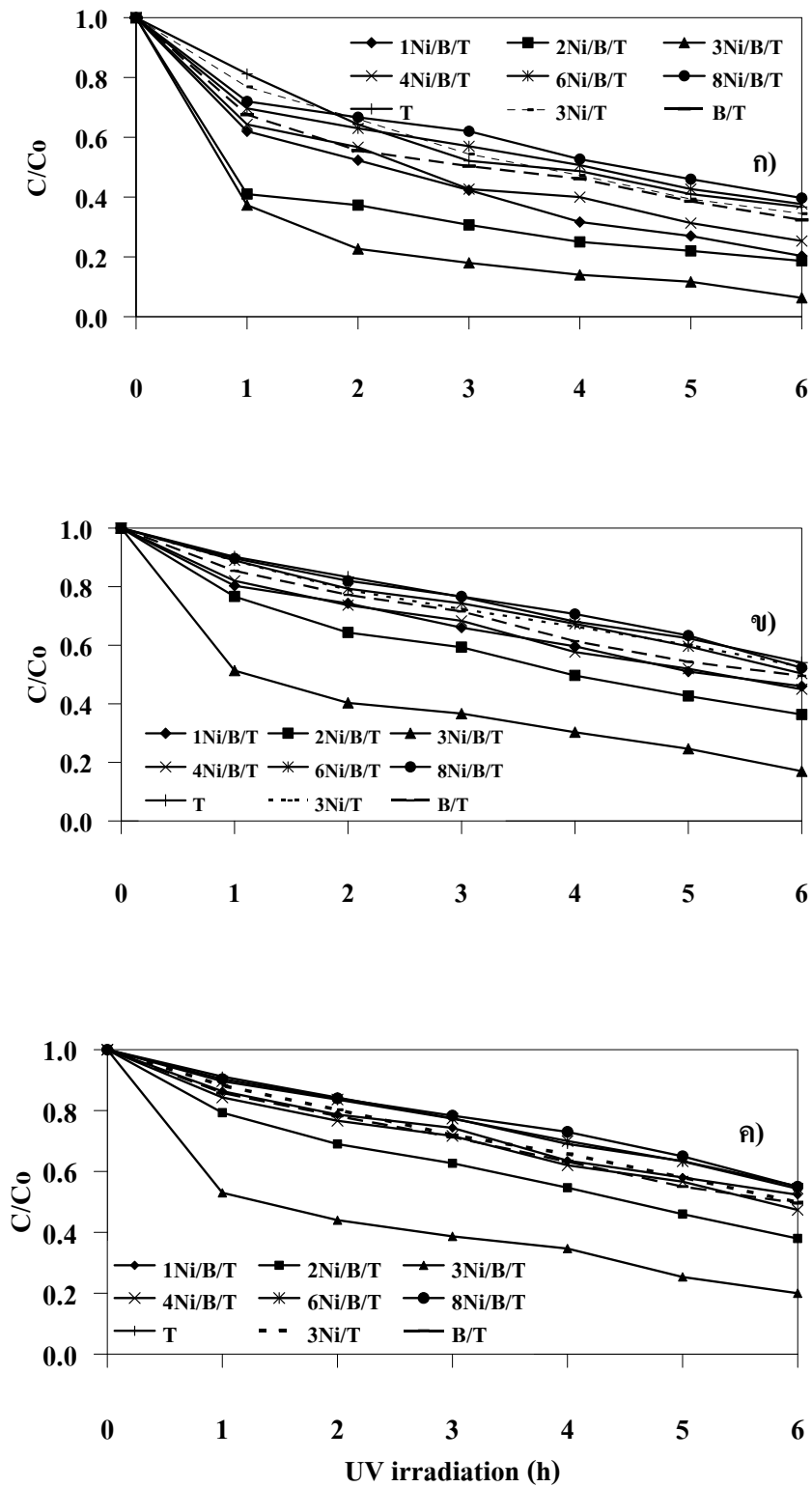
ไทเทเนียมไดออกไซด์ เมื่อเผาที่อุณหภูมิ 400-600 °C และเมื่อปริมาณนิกเกิลเพิ่มขึ้น ความสูงของพีค XRD ในรูปที่ 3.5 จะต่ำลง แสดงว่าเกิดผลึกของเฟสอะนาเทสลดลง

ตารางที่ 3.2 ขนาดผลึกของฟิล์ม TiO₂ เผาที่อุณหภูมิต่างๆ

สารเติม	ขนาดผลึกของอะนาเทส (nm)			ความเป็นผลึกอะนาเทส (%)
	400(°C)	500(°C)	600(°C)	
TiO ₂	29.72	29.90	34.23	100
B/TiO ₂	Amorphous	Amorphous	17.10	100
3Ni/TiO ₂	Amorphous	19.36	22.47	100
1Ni/B/TiO ₂	22.03	23.13	20.26	100
2Ni/B/TiO ₂	17.58	19.83	20.12	100
3Ni/B/TiO ₂	15.16	17.24	19.28	100
4Ni/B/TiO ₂	20.37	23.02	23.48	100
6Ni/B/TiO ₂	19.61	21.34	32.62	100
8Ni/B/TiO ₂	Amorphous	32.49	36.17	100

ข. ปฏิกริยาโฟโตแคตะไลติกของฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์

ในการทดสอบปฏิกริยาโฟโตแคตะไลติกของฟิล์มบางเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์ (T) และมีสารไดป์โดยทำการเผาฟิล์มดังกล่าวในช่วงอุณหภูมิ 400 – 600 °C จากผลการวิเคราะห์ด้วย XRD (รูปที่ 3.5) พบว่าช่วงอุณหภูมินี้จะเกิดโครงสร้างอะนาเทสของฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ทั้งหมด สำหรับฟิล์มที่มีสาร ไดป์โบรอนและนิกเกิลกลายเป็นผลึกของไทเทเนียมไดออกไซด์หรือความเป็นเฟสอะนาเทสที่สมบูรณ์ จากรูปที่ 3.6 แสดงการลดลงของความเข้มข้นของเมทิลีนบลู เมื่อได้รับรังสียูวีกระตุ้นที่เวลาดั้งแต่ 0 - 6 ชั่วโมงโดยทดสอบกับฟิล์มที่มีการไดป์ด้วยโบรอนและนิกเกิลเป็นตัวโฟโตแคตะลิสต์ ความสัมพันธ์ของความเข้มข้น ของสารละลายเมทิลีนบลู มีแนวโน้มลดลงเมื่อเวลาในการรับแสงเพิ่มขึ้น โดยโมเลกุลของเมทิลีนบลูจะถูกสลาย



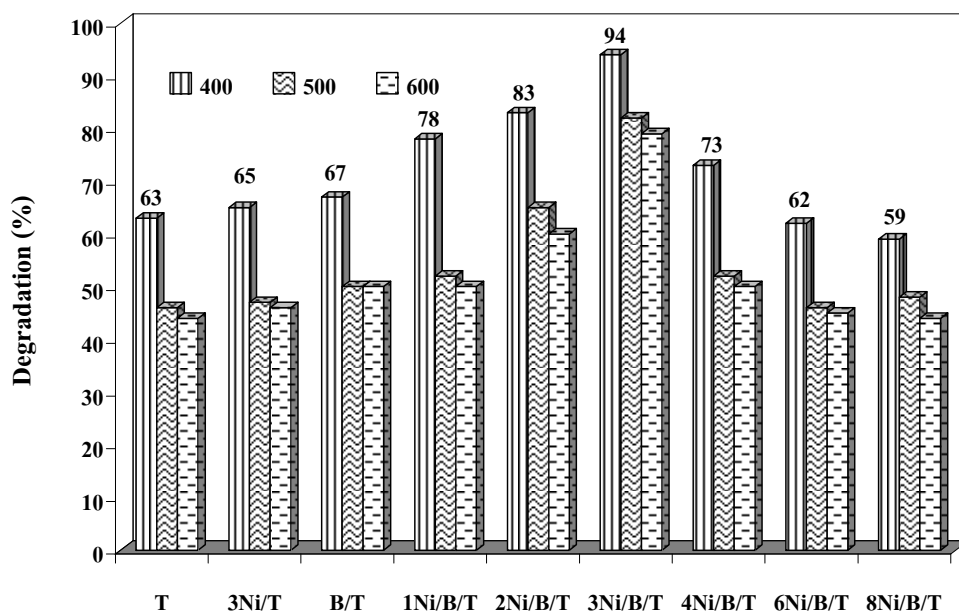
รูปที่ 3.6 ความสัมพันธ์อัตราส่วน C/C_0 ของเมทิลีนบลูโดยฟิล์ม Ni/B/T ภายใต้การรับรังสียูวีที่เวลาต่างกัน โดยฟิล์มเคลือบเผาที่อุณหภูมิ ก) 400 °C ข) 500 °C ค) 600 °C

เมื่อเกิดปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติก หรือปฏิกิริยาที่มีแสงกระตุ้นการทำงานของฟิล์มที่มีการโด๊ปด้วยโบรอนและนิกเกิล (Ni/B/TiO₂) หากพิจารณาจากผล XRD ในสูตรที่เป็นอะมอร์ฟัส ก็จะมีการย่อยสลายเมทิลีนบลู ซึ่งอาจจะเป็นการดูดซับของฟิล์มมากกว่าการย่อยสลาย (Huang et al., 2007; Zaleska et al., 2008)

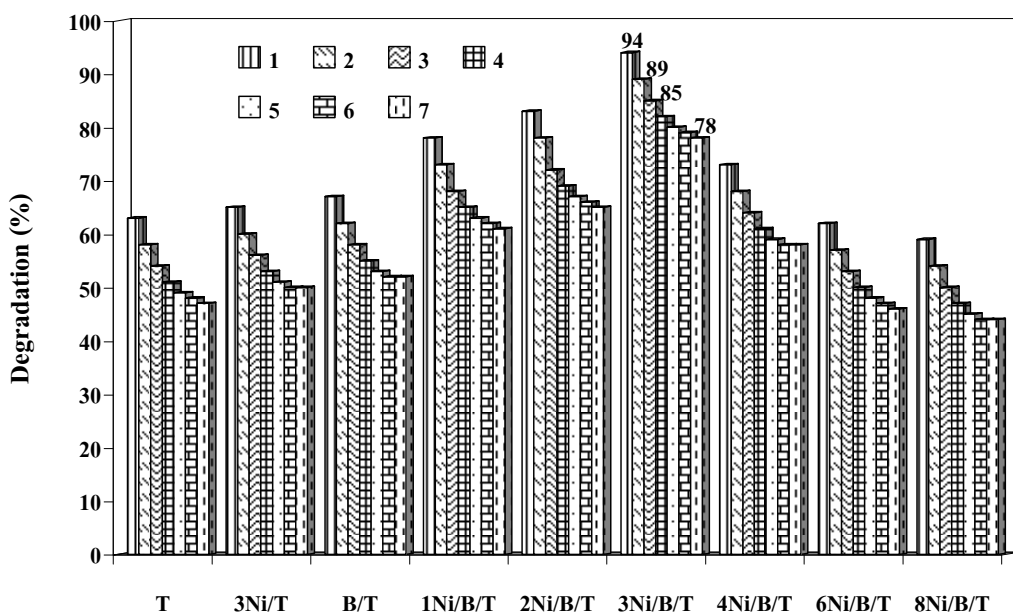
อุณหภูมิเผา 400 °C (รูปที่ 3.6 ก) ให้ผลทางปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกที่ดีกว่า อุณหภูมิเผา 500 (รูปที่ 3.6 ข) และ 600 °C (รูปที่ 3.6 ค) ปริมาณการโด๊ปของนิกเกิลที่ 3 เปอร์เซ็นต์ โมล โดยอัตราการย่อยสลายเมทิลีนบลู สูงที่สุดซึ่งสอดคล้องกับผล XRD ที่ได้กล่าวมาข้างต้น เพราะการโด๊ปนิกเกิลเข้าไปทำให้อยู่ในรูปของ Ni₂O₃ (Sharma et al., 2006, Zhang et al., 2007, Tseng et al., 2009, Huang et al., 2009, Kisand et al., 2010) ทำให้พื้นผิวมีหมู่ Hydroxyl บนพื้นผิว และเกิดปฏิกิริยาการย่อยสลายโมเลกุลของเมทิลีนบลู ได้มากขึ้น (Sharma et al., 2006) และการโด๊ปโบรอนทำให้เกิดปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกดียิ่งขึ้น (Zaleska et al., 2008, Grabowska et al., 2009, Khan et al., 2008, Huang et al., 2009)

พิจารณารูปที่ 3.7 แสดงให้เห็นเปอร์เซ็นต์การย่อยสลายเมทิลีนบลู ที่เวลารับรังสียูวี ผ่านไป 6 ชั่วโมง ฟิล์มที่โด๊ปด้วยโบรอนและนิกเกิลเพียง 3 เปอร์เซ็นต์ โมล ย่อยสลายได้ 94 % รองลงมาคือที่ 2 และ 1 เปอร์เซ็นต์ โมล ตามลำดับ ซึ่งสูงกว่าฟิล์มที่ไม่โด๊ปโบรอนและนิกเกิลและที่โด๊ปสารใดสารหนึ่ง (Zhang et al., 2008) การทำปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกของฟิล์มที่โด๊ปด้วยนิกเกิลต้องใส่ที่ปริมาณเหมาะสมหากมีการเติมในปริมาณที่มากจะทำให้ฟิล์มมีโครงสร้างที่เป็นอะมอร์ฟัส และประสิทธิภาพโฟโตแคตะไลติกต่ำลง สำหรับประสิทธิภาพของปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกที่อุณหภูมิเผาที่ 500 °C และ 600 °C ประสิทธิภาพการย่อยสลายเมทิลีนบลูไม่ได้แตกต่างกันมากนัก

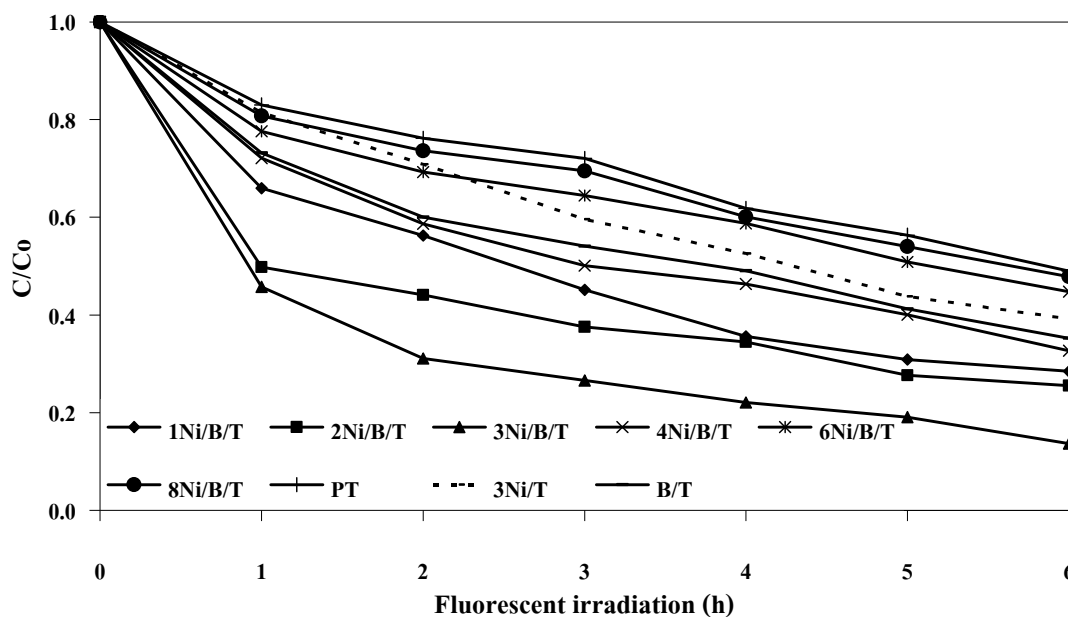
เมื่อทำการทดสอบโดยการนำฟิล์มมาย่อยสลายเมทิลีนบลู ซ้ำกันหลายๆ รอบทุกๆ 6 ชั่วโมงที่เวลารับรังสียูวี ผลปรากฏว่าฟิล์มย่อยสลายเมทิลีนบลูลดลงอยู่ที่ 2-5% (รูปที่ 3.8) และจะค่อยลดลงเรื่อยๆ จนกระทั่งใช้ฟิล์มซ้ำถึง 6-7 ครั้ง (Liuxue et al., 2006) ผลการย่อยสลาย เมทิลีนบลู จึงมีค่าคงที่ หากนำไปทดสอบด้วยการรับแสงฟลูออเรสเซนซ์ผ่านไป 6 ชั่วโมง (รูปที่ 3.9) จะเห็นว่าที่โด๊ปปริมาณของนิกเกิล 3 เปอร์เซ็นต์ โมล จะมีอัตราการย่อยสลาย เมทิลีนบลู ดีที่สุดเช่นกัน และรองลงมา 2 และ 1 เปอร์เซ็นต์ โมล ตามลำดับ (รูปที่ 3.9) เมื่อฟิล์มที่รับแสงฟลูออเรสเซนซ์มี ประสิทธิภาพการย่อยสลายเมทิลีนบลู น้อยกว่าฟิล์มที่รับรังสียูวี อยู่ในช่วง 5-7 % อีกทั้งยังหากนำฟิล์มที่โด๊ปโบรอนและนิกเกิลมาย่อยสลาย เมทิลีนบลู ซ้ำกันทุกๆ 6 ชั่วโมง ภายใต้การรับแสงฟลูออเรสเซนซ์ ประสิทธิภาพการย่อยสลายเมทิลีนบลู ก็จะลดลงเรื่อยๆ และจะคงที่ ที่การย่อยสลายครั้งที่ 6-7 ซึ่งเมื่อเทียบกับการสลายด้วยรังสียูวีจะลดลง 5-7 % เช่นกัน (รูปที่ 3.10)



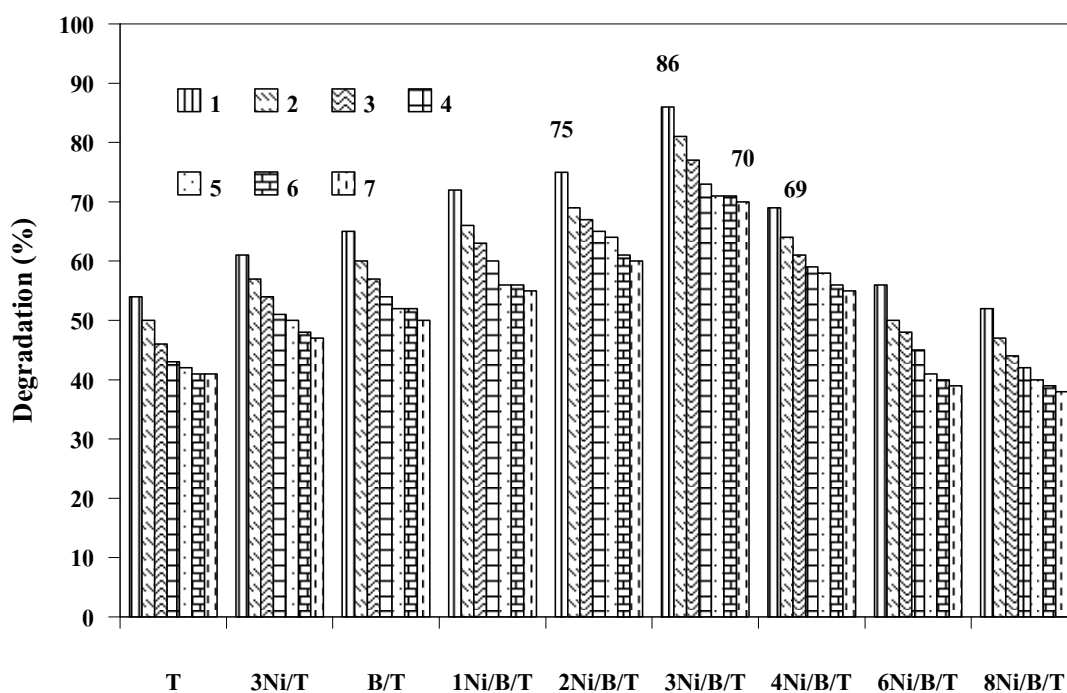
รูปที่ 3.7 เปอร์เซ็นต์การสลายของเมทิลีนบลูโดยฟิล์ม Ni/B/T ภายใต้การรับรังสียูวีเป็นเวลา 6 ชั่วโมง
เผาที่อุณหภูมิ 400, 500 และ 600 °C



รูปที่ 3.8 การสลายของเมทิลีนบลูที่ทำซ้ำ 7 ครั้ง ของฟิล์ม Ni/B/T เผาที่อุณหภูมิ 400 °C ภายใต้การ
รับรังสียูวี



รูปที่ 3.9 ความสัมพันธ์อัตราส่วน C/C_0 ของเมทิลีนบลูโดยฟิล์ม Ni/B/T ภายใต้การรับแสงฟลูออเรสเซนซ์ที่เวลาต่างกัน โดยฟิล์มเคลือบเผาที่อุณหภูมิ 400 °C

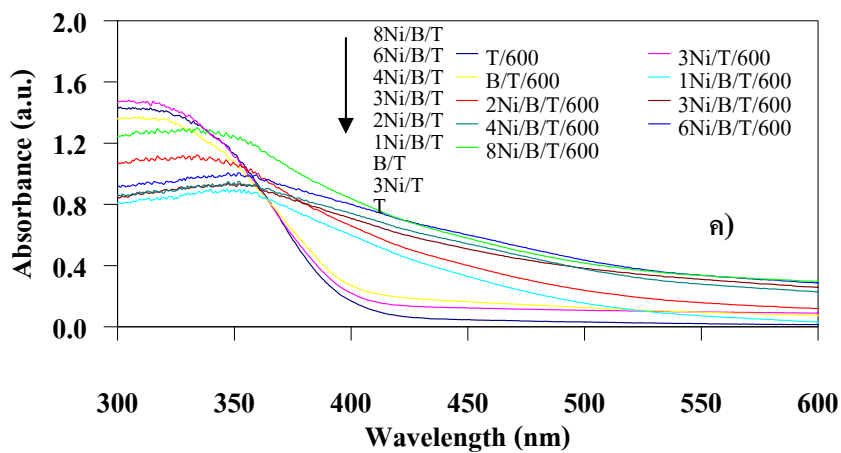
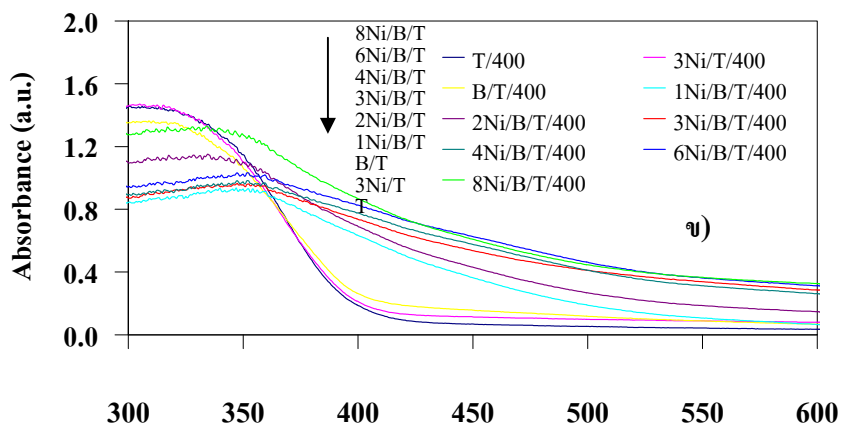
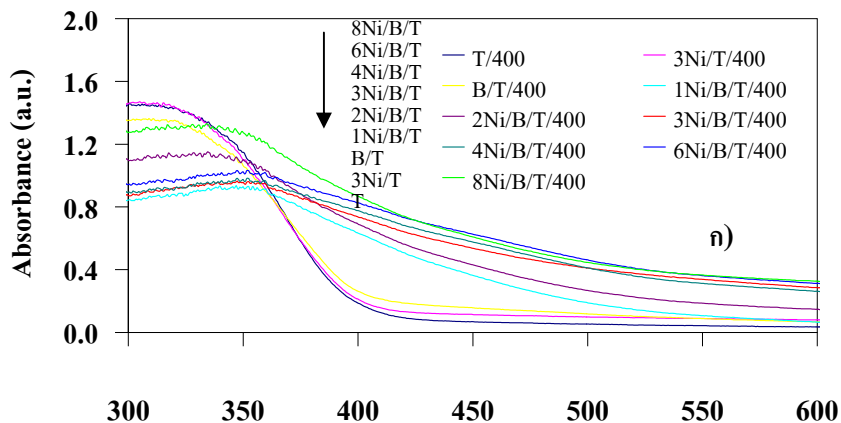


รูปที่ 3.10 การสลายของเมทิลีนบลูที่ทำซ้ำ 7 ครั้ง ของฟิล์ม Ni/B/T เผาที่อุณหภูมิ 400 °C ภายใต้การรับแสงฟลูออเรสเซนซ์

จากผลการทดสอบการย่อยสลายเมทิลีนบลูของแม่พิมพ์ที่เผาที่อุณหภูมิ 400°C สามารถย่อยสลายเมทิลีนบลูได้ดีกว่าที่อุณหภูมิ 500 และ 600°C ทั้งภายใต้รังสียูวีและภายใต้แสงฟลูออเรสเซนซ์ซึ่งภายใต้รังสียูวีมีการย่อยสลายได้ดีกว่าเนื่องจากใช้พลังงานในการกระตุ้นด้วยแสงสูงกว่าแสงฟลูออเรสเซนซ์ หากนำแม่พิมพ์มาทำการทดสอบซ้ำกันผ่านไปทุกๆ 6 ชั่วโมงแล้วจะมีค่าคงที่เมื่อทำการทดสอบเป็นครั้งที่ 7 ทั้งภายใต้รังสียูวีและแสงฟลูออเรสเซนซ์แสดงให้เห็นว่าประสิทธิภาพของแม่พิมพ์สามารถที่จะใช้ซ้ำกันได้และสามารถใช้งานต่อไปได้อีกก็จะมีค่าการย่อยสลายเมทิลีนบลูครั้งที่ซึ่งที่แสงฟลูออเรสเซนซ์ก็สามารถย่อยสลายเมทิลีนบลูได้ แสดงให้เห็นว่าภายใต้แสงที่มองเห็นได้ด้วยตาเปล่านั้นหรือแสงที่ให้พลังงานน้อยก็สามารถที่จะเกิดปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกได้

ค. ผลการวิเคราะห์การเลื่อนไปทางแสงช่วง Visible ของผงไทเทเนียมไดออกไซด์

จากผลการดูดกลืนสเปกตรัม (UV-vis absorption spectra) (รูปที่ 3.11) ของผงไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีสารโด๊ปโบรอนและนิกเกิลมีผลต่อระดับพลังงานการดูดกลืนแม่เหล็กไฟฟ้า โดยแปรผันปริมาณของนิกเกิลที่อุณหภูมิเผา 400°C (รูปที่ 3.11 ก) 500°C (รูปที่ 3.11 ข) และ 600°C (รูปที่ 3.11 ค) พบว่าฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีการโด๊ปโบรอน (Grabowska et al., 2009) และนิกเกิลลงไปมีผลต่อการลดลงของพลังงานที่ถูกดูดกลืนเข้าสู่ช่วง Visible มากขึ้น ที่โด๊ปปริมาณนิกเกิล 1-2 เปอร์เซ็นต์โมล มีการเลื่อนไปสู่ช่วง Visible เพียงเล็กน้อยแต่ที่ปริมาณนิกเกิล 3,4,6 และ 8 เปอร์เซ็นต์โมล มีการเลื่อนไปทาง Visible เห็นได้อย่างชัดเจนเมื่อเปรียบเทียบกับที่ไม่มีการโด๊ปโบรอนและนิกเกิล และที่อุณหภูมิเผา 400, 500 และ 600 °C ผลการทดสอบจะมีความยาวคลื่นอยู่ในช่วง 500-600 nm เมื่อพิจารณาถึงแถบช่วงพลังงาน (ตารางที่ 3.3) จะเห็นได้ว่าค่าแถบพลังงานในการเลื่อนไปสู่ช่วง Visible ที่อุณหภูมิเผา 400 °C จะมีการเลื่อนไปสู่ช่วง Visible มากกว่าที่อุณหภูมิเผาที่ 500 และ 600 °C (Moon et al., 1998) สำหรับค่าแถบพลังงานของ TiO₂ เมื่อเทียบกับที่โด๊ปโบรอนและนิกเกิลมีค่าลดลงจาก 3.02 eV ลดลงเหลือ 2.34 eV ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับงานวิจัยของ (Huang et al., 2009) ที่มีการโด๊ปนิกเกิลและโบรอนที่มีค่าแถบช่วงพลังงานที่มีค่าเท่ากับ 2.25 eV ซึ่งจากการวิเคราะห์ในครั้งนี้แถบช่วงพลังงานจะมีค่าน้อยสุดในช่วงการโด๊ปนิกเกิล 2-4 เปอร์เซ็นต์โมล ซึ่งสอดคล้องกับผลการทำปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกที่รับแสงฟลูออเรสเซนซ์ ซึ่งการทดสอบดังกล่าวทำให้ทราบว่า การโด๊ปนิกเกิลทำให้สามารถเกิดปฏิกิริยาในแสงที่เข้าสู่ช่วง Visible



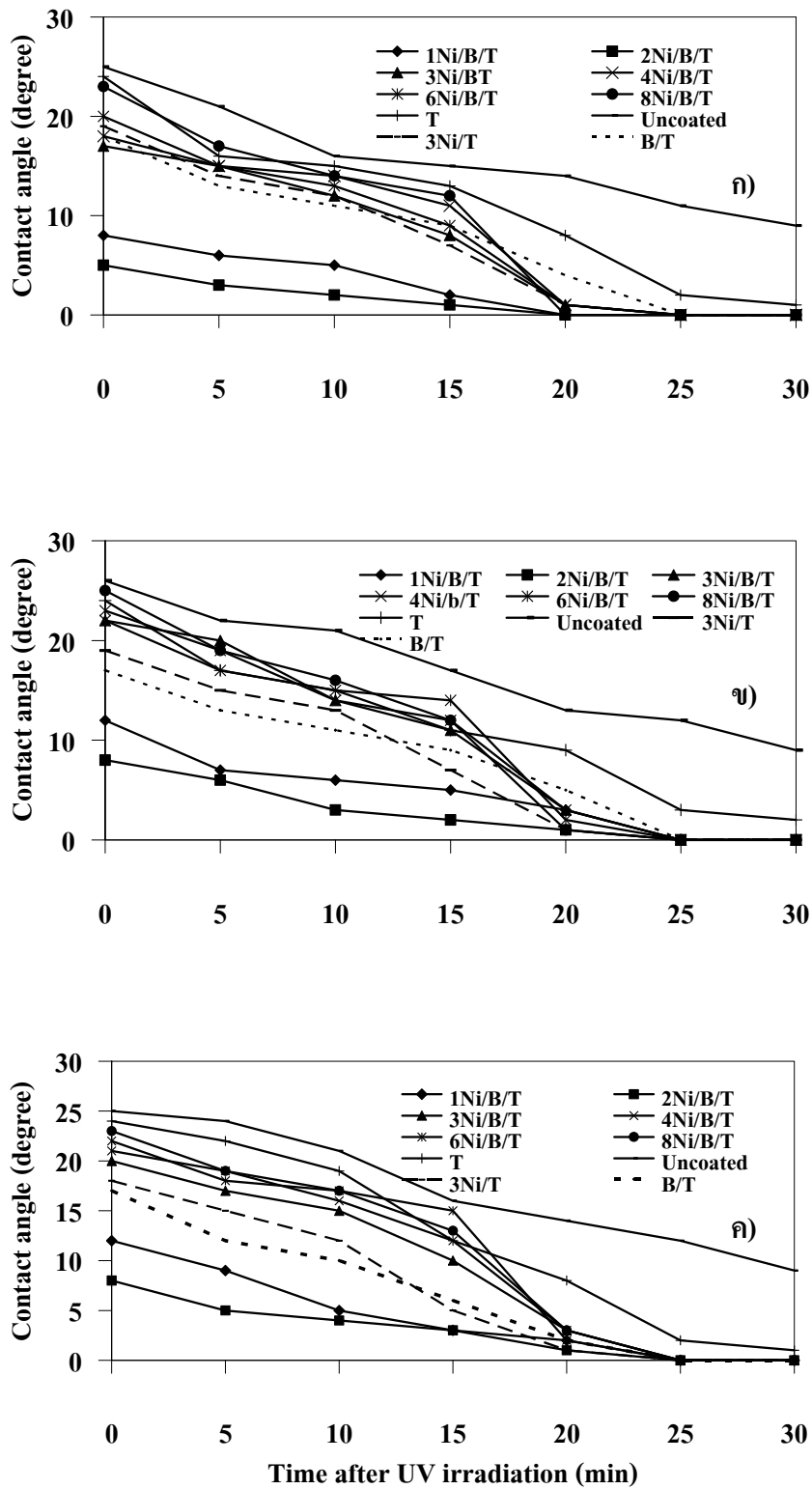
รูปที่ 3.11 การดูดกลืนสเปกตรัมของผง Ni/B/T ก) 400°C ข) 500°C ค) 600°C

ตารางที่ 3.3 เปรียบเทียบค่าช่องว่างแถบพลังงาน (Band gap energy) ของผง Ni/B/T ที่อุณหภูมิเผา 400, 500 และ 600 °C

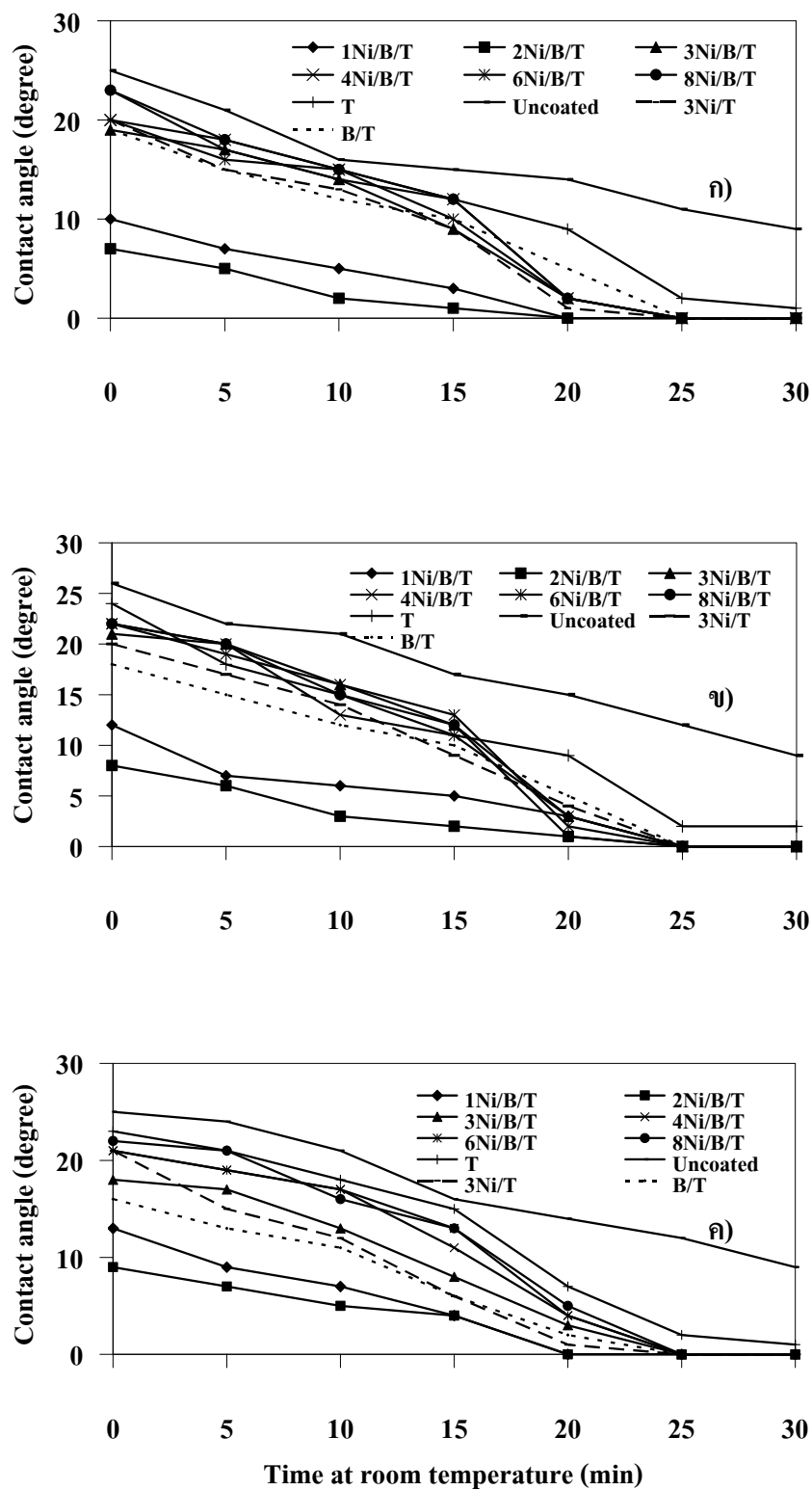
Samples	Band gap energy, E_g (eV)		
	400 °C	500 °C	600 °C
TiO ₂	3.02	3.02	3.02
3Ni/TiO ₂	3.02	3.02	3.02
B/TiO ₂	3.02	3.02	3.00
1Ni/B/TiO ₂	2.48	2.49	2.50
2Ni/B/TiO ₂	2.41	2.42	2.43
3Ni/B/TiO ₂	2.38	2.38	2.39
4Ni/B/TiO ₂	2.43	2.44	2.44
6Ni/B/TiO ₂	2.34	2.36	2.35
8Ni/B/TiO ₂	2.48	2.49	2.49

ง. ผลการวัดมุมสัมผัสของหยดน้ำบนกระจกที่เคลือบด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์เมื่อได้ป็นิกเกิด และโบรอน

มุมสัมผัสที่วัดได้เมื่อได้รับรังสียูวี (รูปที่ 3.12) และที่บรรยากาศปกติ(รูปที่ 3.13) พบว่าเมื่อเวลาเพิ่มขึ้นมุมสัมผัสเริ่มลดลง โดยฟิล์มที่มีการได้ปด้วยนิกเกิดและโบรอนทุกอัตราส่วนมุมสัมผัสมีค่าเข้าเป็น 0° ที่เวลา 25 นาที (Kisand et al., 2010) หากเปรียบเทียบกับฟิล์มที่ไม่ได้ทำการเคลือบและเคลือบด้วยไทเทเนียมเพียงอย่างเดียวที่เวลา 25 นาที ค่ามุมสัมผัสยังไม่เป็น 0° (ตารางที่ 3.4) สำหรับอุณหภูมิเผาที่ 400 °C, 500 °C และ 600 °C ค่ามุมสัมผัสของหยดน้ำมีค่าใกล้เคียงกัน อิทธิพลของปริมาณสารได้ป็นิกเกิดที่ 2 เปอร์เซ็นต์โมล มุมสัมผัสมีค่าน้อยและเข้าใกล้ 0° มากที่สุดและรองลงมาคือ 1 เปอร์เซ็นต์โมล (รูปที่ 3.14) แสดงถึงสมบัติความชอบน้ำ (Hydrophilic) สืบเนื่องมาจากปริมาณออกซิเจนวาแคนซี (Oxygen vacancy) บนพื้นผิวฟิล์มทำให้การแผ่กระจายของหยดน้ำได้ง่ายขึ้น (Sharma et al., 2006) ซึ่งจากผลการทดลองพบว่าภายใต้รังสียูวีและภายใต้บรรยากาศปกติ สมบัติความเปียกน้ำก็สอดคล้องกับผลการดูกลืนสเปกตราที่เข้าสู่ช่วง Visible ที่สามารถเปียกน้ำภายใต้บรรยากาศปกติที่มีแถบชั้นพลังงานที่ต่ำกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับแม่พิมพ์ที่ไม่มีการได้ป









รูปที่ 3.12 มุมสัมผัสของหยดน้ำบนฟิล์ม Ni/B/T ที่ผ่านการส่องรังสียูวีเมื่อฟิล์มเผาที่ ก) 400 °C ข) 500 °C ค) 600 °C



รูปที่ 3.13 มุมสัมผัสของหยดน้ำบนฟิล์ม Ni/B/T ที่บรรยากาศปกติเมื่อฟิล์มเผาที่ ก) 400 °C ข) 500 °C ค) 600 °C

ตารางที่ 3.4 ค่ามุมสัมผัสเมื่อทดสอบด้วยหยดน้ำ ของฟิล์มที่อุณหภูมิเผาต่างๆ ที่เวลา 25 นาที

ชิ้นงาน	มุมสัมผัส (°)					
	400°C		500°C		600°C	
	Without UV	With UV	Without UV	With UV	Without UV	With UV
Uncoated	11	11	12	12	12	12
Pure TiO ₂	2	2	2	2	2	2
3Ni/TiO ₂ , B/TiO ₂ , 1- 8Ni/B/TiO ₂	0	0	0	0	0	0

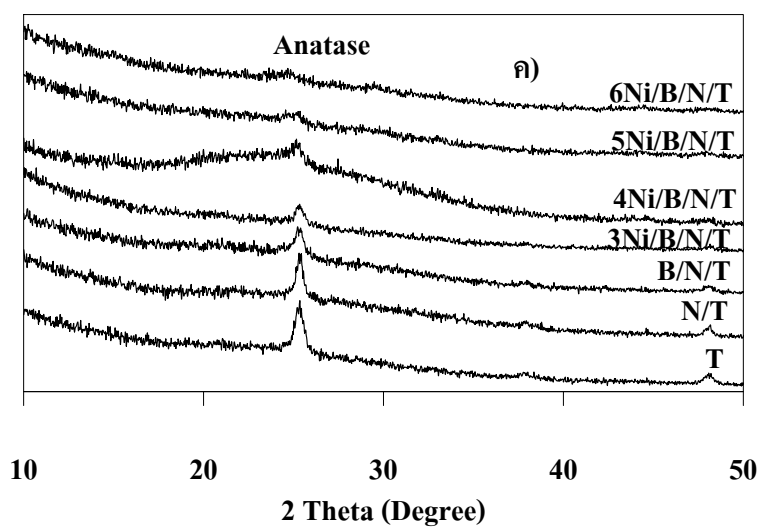
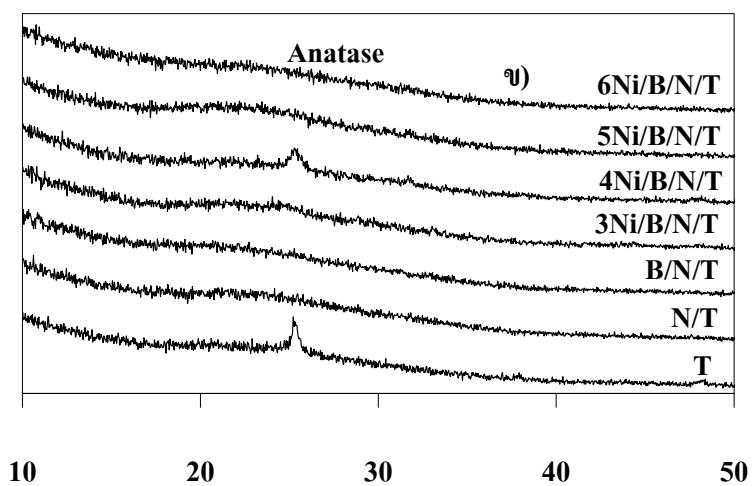
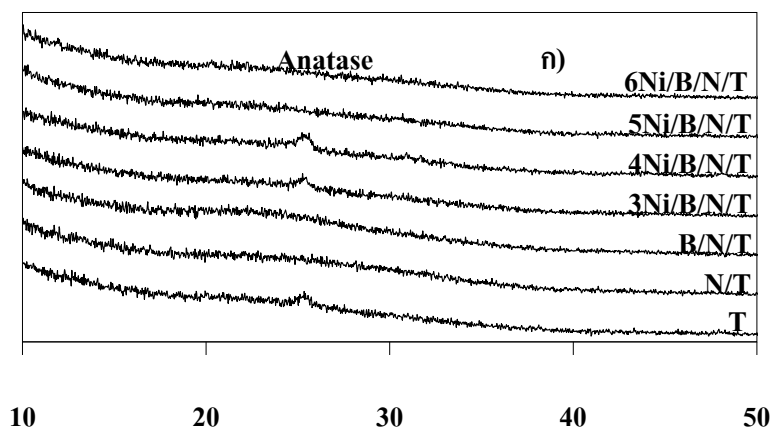
Time (min.)	0	10	25
Pure TiO ₂			
Ni/B/TiO ₂			

รูปที่ 3.14 ลักษณะรูปมุมสัมผัสของหยดน้ำบนฟิล์ม Ni/B/T ที่บรรยากาศปกติเมื่อฟิล์มเผาที่ 400 °C

3.2.2 การสังเคราะห์ฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์โตนิกเกิลโบรอนและไนโตรเจน (Ni/B/N/TiO₂)

ก. ผลการวิเคราะห์ฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วย XRD

จากการศึกษาปริมาณกรดบอริก (H₃BO₃) ที่เติมลงไปจะคงที่ คือ ที่ 5 เปอร์เซ็นต์โมล เป็นปริมาณที่เหมาะสมที่สุดในการเติม (Zaleska et al., 2008) สำหรับปริมาณแอมโมเนียมคาร์บอเนต (NH₄)₂CO₃ 20 เปอร์เซ็นต์โมล เป็นปริมาณที่เหมาะสมที่สุดในการเติม (Qin et al., 2008) นิกเกิลไนเตรต Ni(NO₃)₂.6H₂O ที่เติมลงไปจะแปรผันคือ 3, 4, 5 และ 6 เปอร์เซ็นต์โมล เนื่องจากผลการทดลองที่ผ่านมาข้างต้น เมื่อเติมสารได้ทั้งโบรอนไนโตรเจนและนิกเกิลลงในสารเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์เผาที่อุณหภูมิ 400 - 600 °C (รูปที่ 3.15 ก-ค) วิเคราะห์โครงสร้างเฟสของฟิล์มที่เกิดขึ้น



รูปที่ 3.15 XRD ของฟิล์ม Ni/B/N/T เผาที่ ก) 400 °C ข) 500 °C ค) 600 °C

ตารางที่ 3.5 ขนาดผลึกของฟิล์ม Ni/B/N/T เผาที่อุณหภูมิต่างๆ

สารเติม	ขนาดผลึกของอะนาเทส (nm)			ความเป็นผลึก อะนาเทส (%)
	400(°C)	500(°C)	600(°C)	
TiO ₂	29.72	29.90	34.23	100
N/ TiO ₂	Amorphous	Amorphous	16.46	100
B/N/ TiO ₂	Amorphous	Amorphous	19.52	100
3Ni/B/N/ TiO ₂	15.28	17.58	19.68	100
4Ni/B/N/ TiO ₂	13.70	14.12	16.43	100
5Ni/B/N/ TiO ₂	Amorphous	15.36	18.88	100
6Ni/B/N/ TiO ₂	Amorphous	Amorphous	22.52	100

จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD (รูปที่ 3.15) ของฟิล์ม TiO₂ เมื่อได้ไปโบรอนในไนโตรเจนและนิกเกิลลงไปทำให้เฟสอะนาเทสเสถียรที่อุณหภูมิสูงขึ้นสอดคล้องกับผลการทดลองที่ผ่านมาที่มีการได้ไปโบรอนและนิกเกิล จะเห็นได้ว่าที่อุณหภูมิ 400 °C (รูปที่ 3.15 ก) ที่ได้ไปเฉพาะโบรอน หรือไนโตรเจน หรือนิกเกิลอย่างเดียวยังไม่เกิดเฟสอะนาเทส และเมื่อได้ไปในไนโตรเจนอย่างเดียว หรือได้ไปโบรอนและไนโตรเจนสองตัวเผาที่อุณหภูมิ 500 °C (รูปที่ 3.15 ก-ข) เฟสอะนาเทสก็ยังไม่เกิดขึ้น แต่ในขณะที่อุณหภูมิ 600 °C ได้เกิดเฟสอะนาเทสได้อย่างสมบูรณ์ในทุกกรณีการได้ไป (ตารางที่ 3.5) แต่หากมีการเติมสารได้ไปทั้งโบรอน ไนโตรเจนและนิกเกิลในสารเคลือบทำให้เกิดเฟสอะนาเทสที่สมบูรณ์และมีขนาดผลึกของเฟสอะนาเทสเล็กกว่า (Wu et al., 2008, Li et al., 2008, Huang et al., 2007) เมื่อเปรียบเทียบกับผลของ TiO₂ ที่ไม่ได้ได้ไปด้วยโบรอน ไนโตรเจนและนิกเกิล ดังที่ได้กล่าวมาก่อนหน้านี้แล้ว ทั้งนี้การที่ได้แปรผันปริมาณของนิกเกิลดังกล่าวแล้ว หากมีการได้ไปปริมาณของนิกเกิลที่เพิ่มขึ้นที่ 6 เปอร์เซ็นต์โมล จะทำให้ไปขัดขวางการเกิดเฟสอะนาเทสได้เช่นกันที่อุณหภูมิการเผาที่ 400 °C และ 500 °C ซึ่งจะทำให้เป็นโครงสร้างอสัณฐาน (Amorphous) (รูปที่ 3.15 ก-ข) แต่ที่อุณหภูมิการเผาที่ 600 °C (รูปที่ 3.15 ค) เฟสอะนาเทสเกิดขึ้นซึ่งอิทธิพลของสารได้ไปทั้งโบรอน ไนโตรเจน และนิกเกิลทำให้เกิดเฟสอะนาเทสได้อย่างสมบูรณ์และยังทำให้มีขนาดผลึกอะนาเทสที่เล็กในปริมาณการได้ไปนิกเกิลที่ 3-4 เปอร์เซ็นต์โมล ที่อุณหภูมิการเผาที่ 400 °C และเมื่ออุณหภูมิการเผาที่ 500 °C และ 600 °C ขนาดผลึกของอะนาเทสจะมีขนาดใหญ่ขึ้นตามลำดับซึ่งจะเห็นได้ชัดจากพีคความสูง (Intensity) จาก XRD ปริมาณของสารได้ไปโบรอน ไนโตรเจนและนิกเกิลมีผลต่อการเกิดโครงสร้างผลึกอะนาเทสของไทเทเนียมไดออกไซด์ XRD spectrum ในรูปที่ 3.15 เปรียบเทียบปริมาณนิกเกิลต่อการเกิดเฟสอะนาเทสของผงไทเทเนียม

ไดออกไซด์ ที่ $2\theta = 25.50^\circ$ ซึ่งเป็นพีกหลักของเฟสอะนาเทสของไทเทเนียมไดออกไซด์ เมื่อเผาที่อุณหภูมิ 400-600 °C และเมื่อปริมาณนิกเกิลเพิ่มขึ้นในช่วงที่ 5-6 เปอร์เซ็นต์โมล ความสูงของพีก XRD ในรูปที่ 3.15 จะต่ำลง แสดงว่าเกิดผลึกของเฟสอะนาเทสลดลง

ข. ปฏิริยาโฟโตแคตะไลติกของฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์

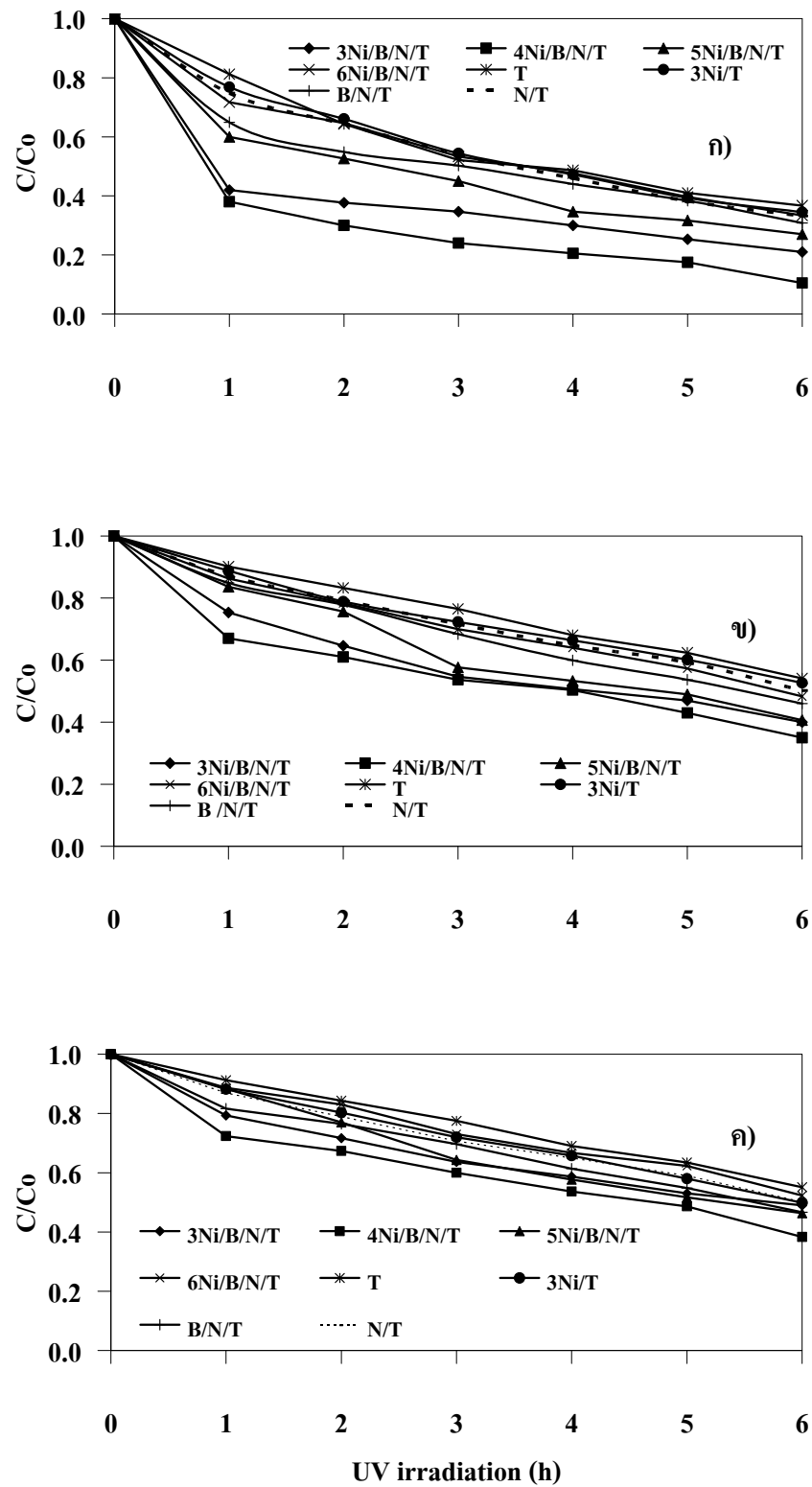
ในการทดสอบปฏิริยาโฟโตแคตะไลติกของฟิล์มบางชนิดไทเทเนียมไดออกไซด์ และมีสารโด๊ปโบรอน ในโตรเจน และนิกเกิลโดยทำการเผาฟิล์มดังกล่าวที่ช่วงอุณหภูมิ 400 – 600 °C จากผลการวิเคราะห์ด้วย XRD (รูปที่ 3.15) พบว่าช่วงอุณหภูมินี้จะเกิดโครงสร้างอะนาเทสของฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ได้ในอัตราการใช้ที่เหมาะสมเท่านั้น สำหรับฟิล์มที่มีสาร โด๊ปโบรอน ในโตรเจนและนิกเกิลความเป็นผลึกของไทเทเนียมไดออกไซด์หรือความเป็นเฟสอะนาเทสที่สมบูรณ์ จากรูปที่ 3.16 แสดงการลดลงของความเข้มข้นของเมทิลีนบลู เมื่อได้รับรังสียูวีกระตุ้นที่เวลาดั้งแต่ 0 - 6 ชั่วโมงโดยทดสอบกับฟิล์มที่มีการโด๊ปด้วยโบรอน ในโตรเจนและนิกเกิลเป็นตัวโฟโตแคตะลิสต์ ความสัมพันธ์ของความเข้มข้น ของสารละลายเมทิลีนบลู มีแนวโน้มลดลงเมื่อเวลาในการรับแสงเพิ่มขึ้น โดยโมเลกุลของเมทิลีนบลู จะถูกสลาย เมื่อเกิดปฏิริยาโฟโตแคตะไลติก หรือปฏิริยาที่มีแสงกระตุ้นการทำงานของฟิล์มที่มีการโด๊ปด้วยโบรอน ในโตรเจนและนิกเกิล (Ni/B/N/TiO_2) หากพิจารณาจากผล XRD ในสูตรที่เป็นอะมอร์ฟัสก็จะมีรอยสลายเมทิลีนบลู ซึ่งอาจจะเป็นการดูดซับของฟิล์มมากกว่าการย่อยสลาย (Huang et al., 2007; Zaleska et al., 2008)

อุณหภูมิเผา 400 °C (รูปที่ 3.16 ก) ให้ผลทางปฏิริยาโฟโตแคตะไลติกที่ดีกว่าอุณหภูมิเผา 500 (รูปที่ 3.16 ข) และ 600 °C (รูปที่ 3.16 ค) การใช้ปริมาณของนิกเกิลที่ 4 เปอร์เซ็นต์โมล โดยอัตราการใช้สลายเมทิลีนบลู สูงที่สุดซึ่งสอดคล้องกับผล XRD ที่ได้กล่าวมาข้างต้น เพราะการโด๊ปนิกเกิลเข้าไปทำให้อยู่ในรูปของ Ni_2O_3 (Zhang et al., 2007, Tseng et al., 2009) ทำให้พื้นผิวมีหมู่ Hydroxyl บนพื้นผิวและเกิดปฏิริยาการย่อยสลายโมเลกุลของเมทิลีนบลู ได้มากขึ้น (Sharma et al., 2006) อีกทั้งยังมีการโด๊ปโบรอน (Zaleska et al., 2008, Grabowska et al., 2009) และในโตรเจนทำให้มีพื้นที่ผิวสูงขึ้น (Qin et al., 2006, Wu et al., 2008, Qin et al., 2008) และการโด๊ปโบรอนทำให้เกิดปฏิริยาโฟโตแคตะไลติกดียิ่งขึ้น ((Zaleska et al., 2008, Grabowska et al., 2009, Khan et al., 2008, Huang et al., 2009) หากพิจารณาจากผล XRD ในสูตรที่เป็นอะมอร์ฟัสก็จะมีรอยสลายเมทิลีนบลู ซึ่งอาจจะเป็นการดูดซับของฟิล์มมากกว่าการย่อยสลาย (Huang et al., 2007)

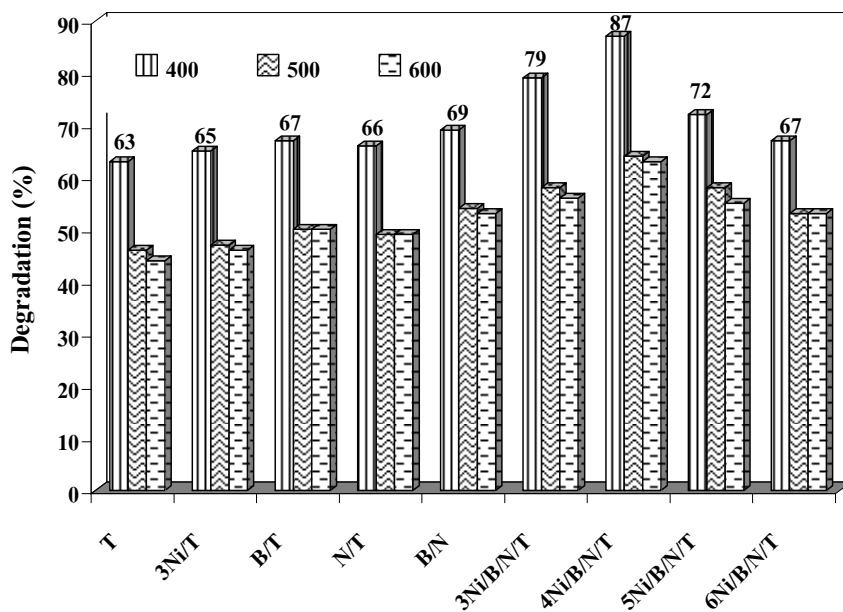
พิจารณารูปที่ 3.17 แสดงให้เห็นเปอร์เซ็นต์การย่อยสลายเมทิลีนบลู ที่เวลารับรังสียูวีผ่านไป 6 ชั่วโมง ฟิล์มที่โด๊ปด้วยโบรอน ในโตรเจนและนิกเกิลเพียง 4 เปอร์เซ็นต์โมล ย่อยสลาย

ได้ 87% รองลงมาคือที่ 3 และ 5 เปอร์เซ็นต์โมล ตามลำดับ ซึ่งลดลงคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ 8 และ 15 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ ซึ่งปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกของฟิล์มที่มีสารไดโพลสามตัวจะมีปฏิกิริยาสูงกว่าฟิล์มที่ไดโพลบรอน หรือไนโตรเจน หรือนิกเกิลและที่ไดโพลสารใดสารหนึ่ง การทำปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกของฟิล์มที่ไดโพลด้วยนิกเกิลต้องใส่ที่ปริมาณเหมาะสมหากมีการเติมในปริมาณที่มากจะทำให้ฟิล์มมีโครงสร้างที่เป็นอะมอร์ฟัส และประสิทธิภาพโฟโตแคตะไลติกต่ำลง เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพโฟโตแคตะไลติกที่อุณหภูมิการเผาที่ 400 °C เทียบกับ 500 °C และ 600 °C ประสิทธิภาพการย่อยสลาย เมทิลีนบลู ที่ 400 °C จะดีกว่าประมาณ 22-25 เปอร์เซ็นต์ (Wu et al., 2008) สำหรับประสิทธิภาพของปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกที่อุณหภูมิเผาที่ 500 °C และ 600 °C ประสิทธิภาพการย่อยสลายเมทิลีนบลู ไม่ได้แตกต่างกันมากนัก

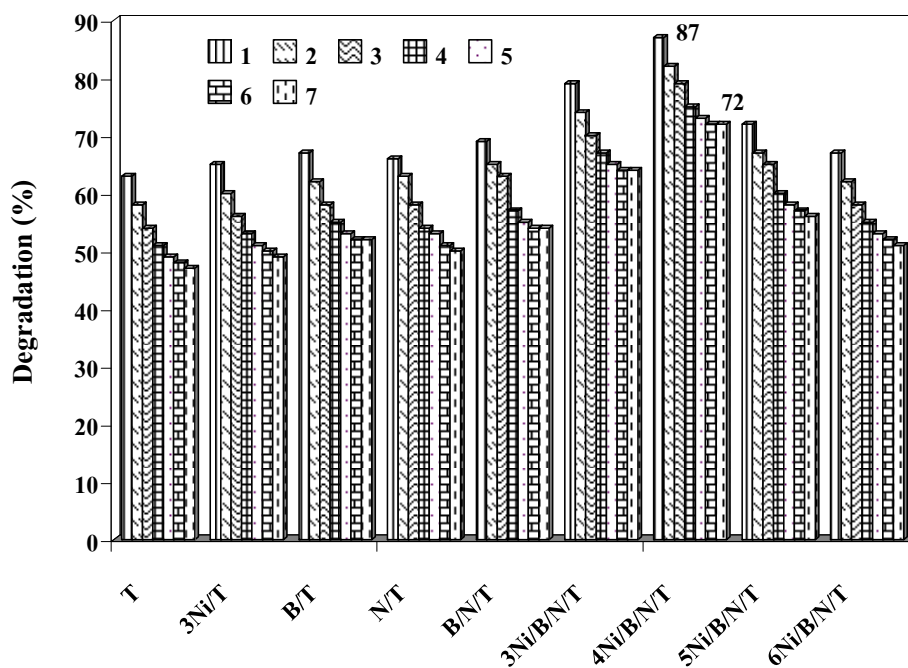
เมื่อทำการทดสอบโดยการนำฟิล์มมาย่อยสลายเมทิลีนบลู ซ้ำกันหลายๆ รอบทุกๆ 6 ชั่วโมงที่เวลา รับรังสียูวี ผลปรากฏว่าฟิล์มย่อยสลายเมทิลีนบลู ลดลงอยู่ที่ 3-5% (รูปที่ 3.18) และจะค่อยลดลงเรื่อยๆ จนกระทั่งใช้ฟิล์มซ้ำถึง 6-7 ครั้ง ผลการย่อยสลาย เมทิลีนบลู จึงมีค่าคงที่ (Liuxue et al., 2006) หากนำไปทดสอบด้วยการรับแสงฟลูออเรสเซนซ์ผ่านไป 6 ชั่วโมง (รูปที่ 3.19) จะเห็นได้ว่าที่ไดโพลปริมาณของนิกเกิล 4 เปอร์เซ็นต์โมล จะมีอัตราการย่อยสลายเมทิลีนบลู ดีที่สุดเช่นกันและรองลงมา 3 และ 5 เปอร์เซ็นต์โมล ตามลำดับ (รูปที่ 3.19) สอดคล้องกับการย่อยสลาย เมทิลีนบลู ภายใต้รังสียูวี เพียงแต่เมื่อฟิล์มที่รับแสงฟลูออเรสเซนซ์มีประสิทธิภาพการย่อยสลายเมทิลีนบลู น้อยกว่าฟิล์มที่รับรังสียูวี อยู่ในช่วง 6-7 % อีกทั้งยังหากนำฟิล์มที่ไดโพลบรอน ไนโตรเจนและนิกเกิลมาย่อยสลายเมทิลีนบลู ซ้ำกันทุกๆ 6 ชั่วโมง ภายใต้การรับแสงฟลูออเรสเซนซ์ประสิทธิภาพการย่อยสลายเมทิลีนบลู ก็จะลดลงเรื่อยๆ และจะคงที่ ที่การย่อยสลายครั้งที่ 6-7 ซึ่งเมื่อเทียบกับการสลายด้วยรังสียูวีจะลดลง 6-7 % เช่นกัน (รูปที่ 3.20) สำหรับที่มีการไดโพลสามตัวทั้งภายใต้รังสียูวีและภายใต้แสงฟลูออเรสเซนซ์ซึ่งภายใต้รังสียูวีมีการย่อยสลายได้ดีกว่าเนื่องจากใช้พลังงานในการกระตุ้นด้วยแสงสูงกว่าแสงฟลูออเรสเซนซ์ หากนำแม่พิมพ์มาทำการทดสอบซ้ำกันผ่านไปทุกๆ 6 ชั่วโมงแล้วจะมีค่าคงที่เมื่อทำการทดสอบเป็นครั้งที่ 7 ทั้งภายใต้รังสียูวีและแสงฟลูออเรสเซนซ์



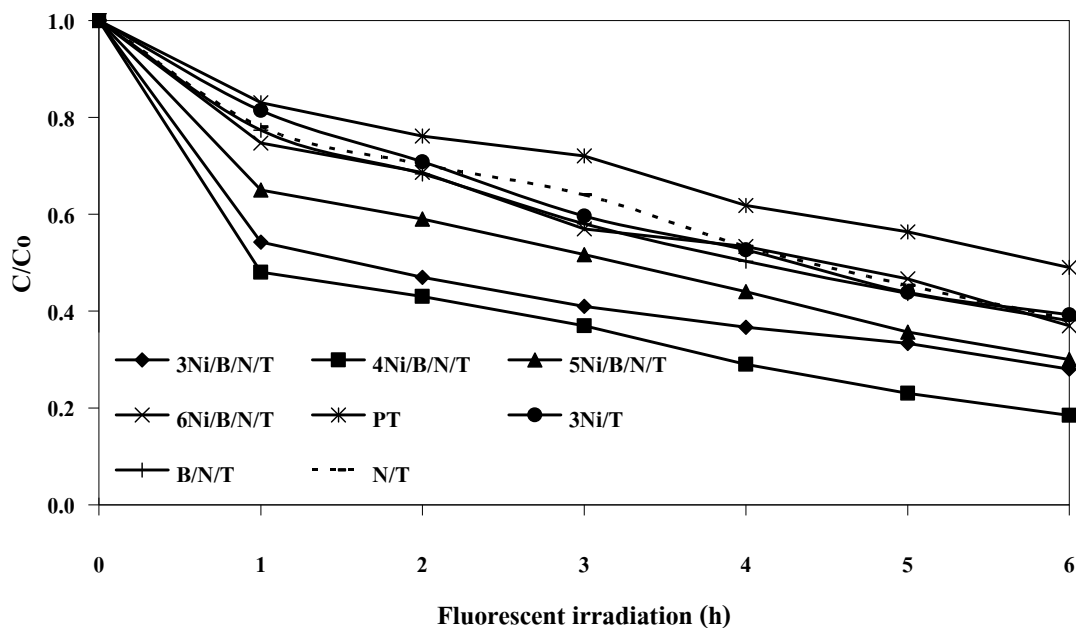
รูปที่ 3.16 ความสัมพันธ์อัตราส่วน C/C_0 ของเมทิลีนบลูโดยฟิล์ม Ni/B/N/T ภายใต้การรับรังสียูวีที่เวลาต่างกัน โดยฟิล์มเคลือบเผาที่อุณหภูมิ ก) 400 °C ข) 500 °C ค) 600 °C



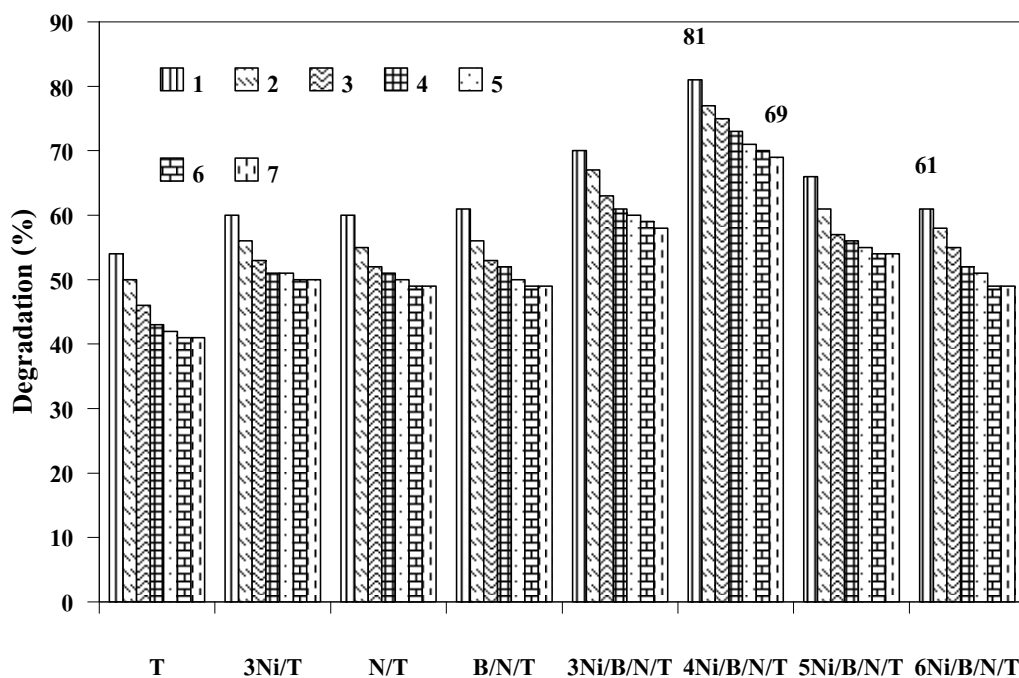
รูปที่ 3.17 เปอร์เซ็นต์การสลายของเมทิลีนบลูโดยฟิล์ม Ni/B/N/T ภายใต้การรับรังสียูวีเป็นเวลา 6 ชั่วโมงเผาที่อุณหภูมิ 400, 500 และ 600 °C



รูปที่ 3.18 การสลายของเมทิลีนบลูที่ทำซ้ำ 7 ครั้ง ของฟิล์ม Ni/B/N/T เผาที่อุณหภูมิ 400 °C ภายใต้การรับรังสียูวี



รูปที่ 3.19 ความสัมพันธ์อัตราส่วน C/C_0 ของเมทิลีนบลูโดยฟิล์ม Ni/B/N/T ภายใต้การรับแสงฟลูออเรสเซนซ์ที่เวลาต่างกันโดยฟิล์มเคลือบเผาที่อุณหภูมิ 400 °C



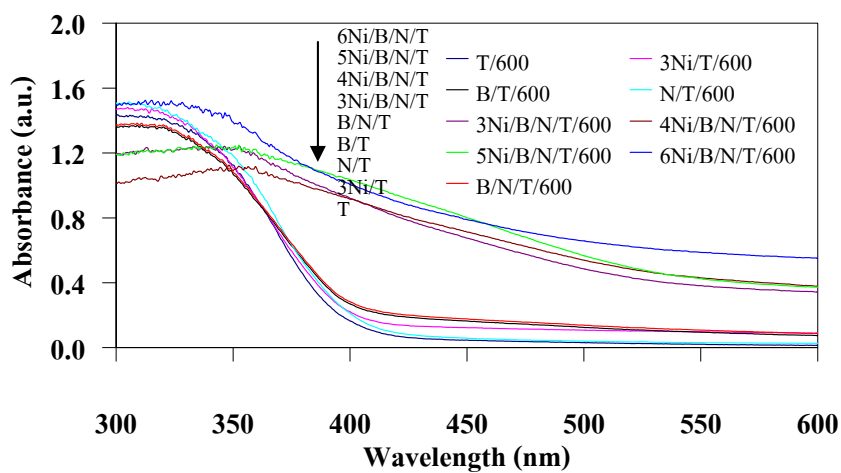
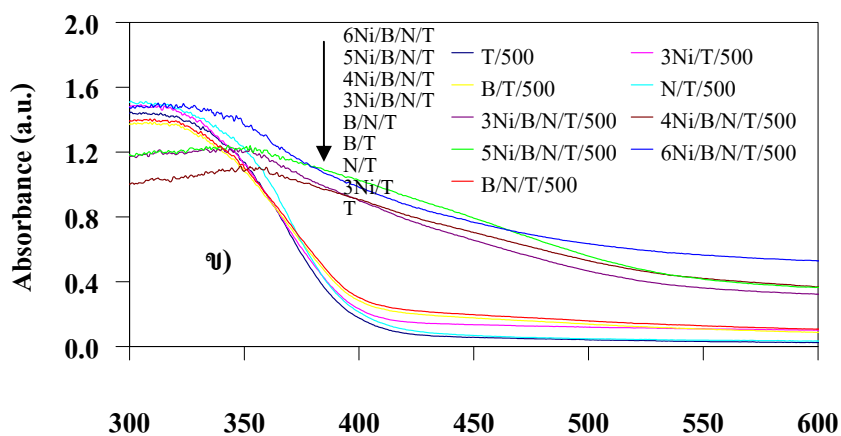
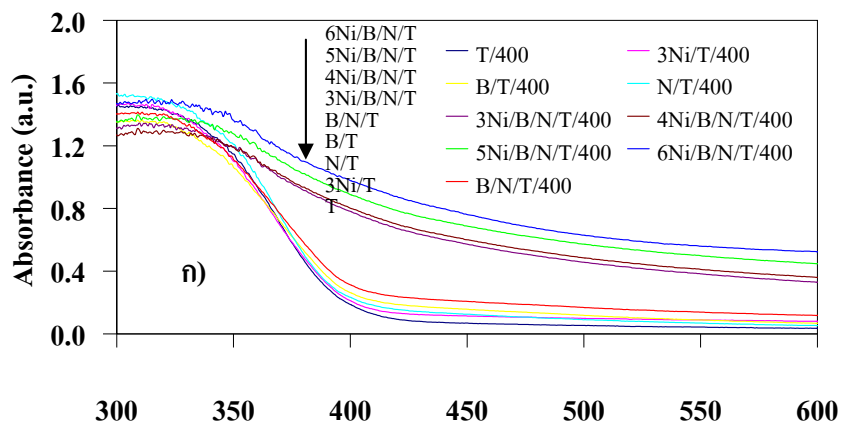
รูปที่ 3.20 การสลายของเมทิลีนบลูที่ทำซ้ำ 7 ครั้ง ของฟิล์ม Ni/B/N/T เผาที่อุณหภูมิ 400 °C ภายใต้การรับแสงฟลูออเรสเซนซ์

แสดงให้เห็นว่าประสิทธิภาพของแม่พิมพ์สามารถใช้ซ้ำกันได้และสามารถใช้งานต่อไปได้อีกก็จะมีค่าการย่อยสลายเมทิลีนบลูคงที่ซึ่งที่แสงฟลูออเรสเซนซ์ก็สามารถย่อยสลายเมทิลีนบลูได้ แสดงให้เห็นว่าภายใต้แสงที่มองเห็นได้ด้วยตาเปล่านั้นหรือแสงที่ให้พลังงานน้อยก็สามารถที่จะเกิดปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกได้

ก. ผลการวิเคราะห์การเลื่อนไปทางแสงช่วง Visible ของผงไทเทเนียมไดออกไซด์

จากผลดูดกลืนสเปกตรัม (UV-vis absorption spectra) (รูปที่ 3.21) ของผงไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีสารโด๊ปโบรอน ในโตรเจนและนิกเกิล โดยแปรผันปริมาณของนิกเกิลที่อุณหภูมิเผา 400 °C (รูปที่ 3.21 ก) 500 °C (รูปที่ 3.21 ข) และ 600 °C (รูปที่ 3.21 ค) พบว่าฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีการโด๊ปโบรอน ในโตรเจนและนิกเกิลลงไปมีผลต่อการเลื่อนไปทางแสงที่มองเห็นได้ด้วยตาเปล่าที่โด๊ปด้วยโบรอนหรือ ในโตรเจนหรือ นิกเกิลมีการเลื่อนไปทางแสงที่มองเห็นได้ด้วยตาเปล่าเพียงเล็กน้อยแต่ที่ปริมาณนิกเกิล 3-6 เปอร์เซ็นต์โมล มีการเลื่อนไปทางแสงที่มองเห็นได้อย่างชัดเจนเมื่อเปรียบเทียบกับที่ไม่มีสารโด๊ปโบรอนในโตรเจนและนิกเกิล และที่อุณหภูมิเผา 400 ,500 และ 600 °C ผลการทดสอบจะมีความยาวคลื่นอยู่ในช่วง 500-600 nm เมื่อพิจารณาถึงแถบช่วงพลังงาน (ตารางที่ 3.6) จะเห็นได้ว่าค่าแถบพลังงานในการเลื่อนไปทางแสงที่มองเห็นได้ด้วยตาเปล่าที่อุณหภูมิเผา 400 °C จะมีการเลื่อนไปทางแสงที่มองเห็นได้ด้วยตาเปล่า (Shift to visible light) มากกว่าที่อุณหภูมิเผาที่ 500 และ 600 °C (Moon et al., 1998 Joung et al., 2006, Wu et al., 2008, Li et al., 2008)) อิทธิพลของการโด๊ปในโตรเจนและโบรอนยังส่งผลให้มีการเลื่อนไปทางแสงที่มองเห็นได้ด้วยตาเปล่า (Ling et al., 2008, Gombac et al., 2007, Li et al., 2008, Dong et al., 2008) ของ TiO₂ เมื่อเทียบกับที่โด๊ปโบรอน ในโตรเจนและนิกเกิลมีค่าลดลงจาก 3.02 eV ลดลงเหลือ 2.33 eV ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับงานวิจัยของ (Huang et al., 2009) ที่มีการโด๊ปนิกเกิลและโบรอนที่มีค่าแถบช่วงพลังงานที่มีค่าเท่ากับ 2.25 eV สำหรับงานวิจัยของ (Yin et al., 2005) โด๊ปในโตรเจนในไทเทเนียมไดออกไซด์มีค่าแถบช่วงพลังงานมีค่าอยู่ในช่วง 2.19-2.30 eV

ซึ่งจากการวิเคราะห์ในครั้งนี้แถบช่วงพลังงานจะมีค่าน้อยสุดในช่วงการโด๊ปนิกเกิล 3-4 เปอร์เซ็นต์โมล ซึ่งสอดคล้องกับผลการทำปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกที่รับแสงฟลูออเรสเซนซ์ ซึ่งการทดสอบดังกล่าวทำให้ทราบว่า การโด๊ปโบรอน ในโตรเจน และนิกเกิลทำให้สามารถเกิดปฏิกิริยาในแสงที่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่าได้



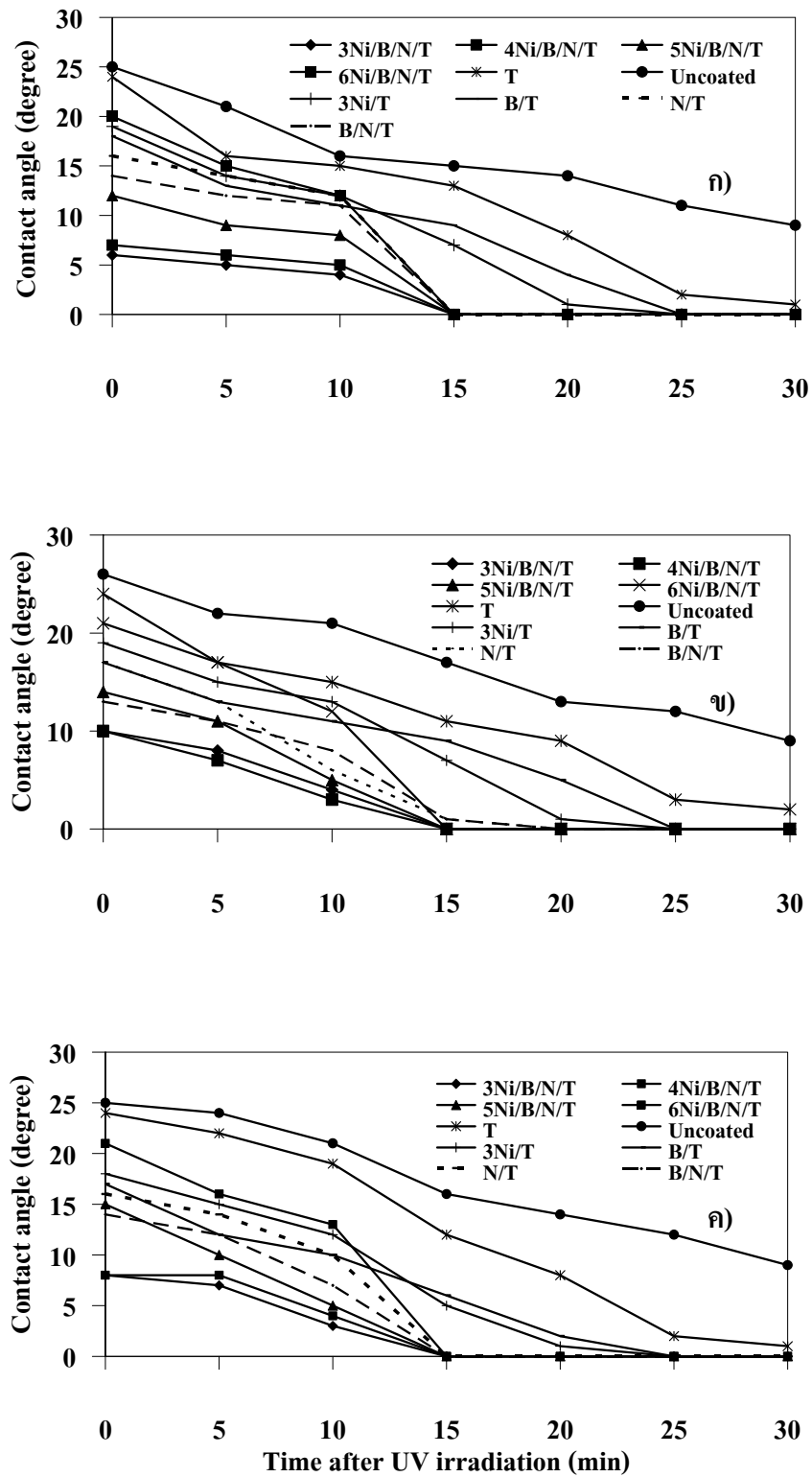
รูปที่ 3.21 การดูดกลืนสเปกตรานของผง Ni/B/N/T ก) 400°C ข) 500°C ค) 600°C

ตารางที่ 3.6 ค่าช่องว่างแถบพลังงาน (Band gap energy) ของผง Ni/B/N/T ที่ อุณหภูมิเผา 400, 500 และ 600 °C

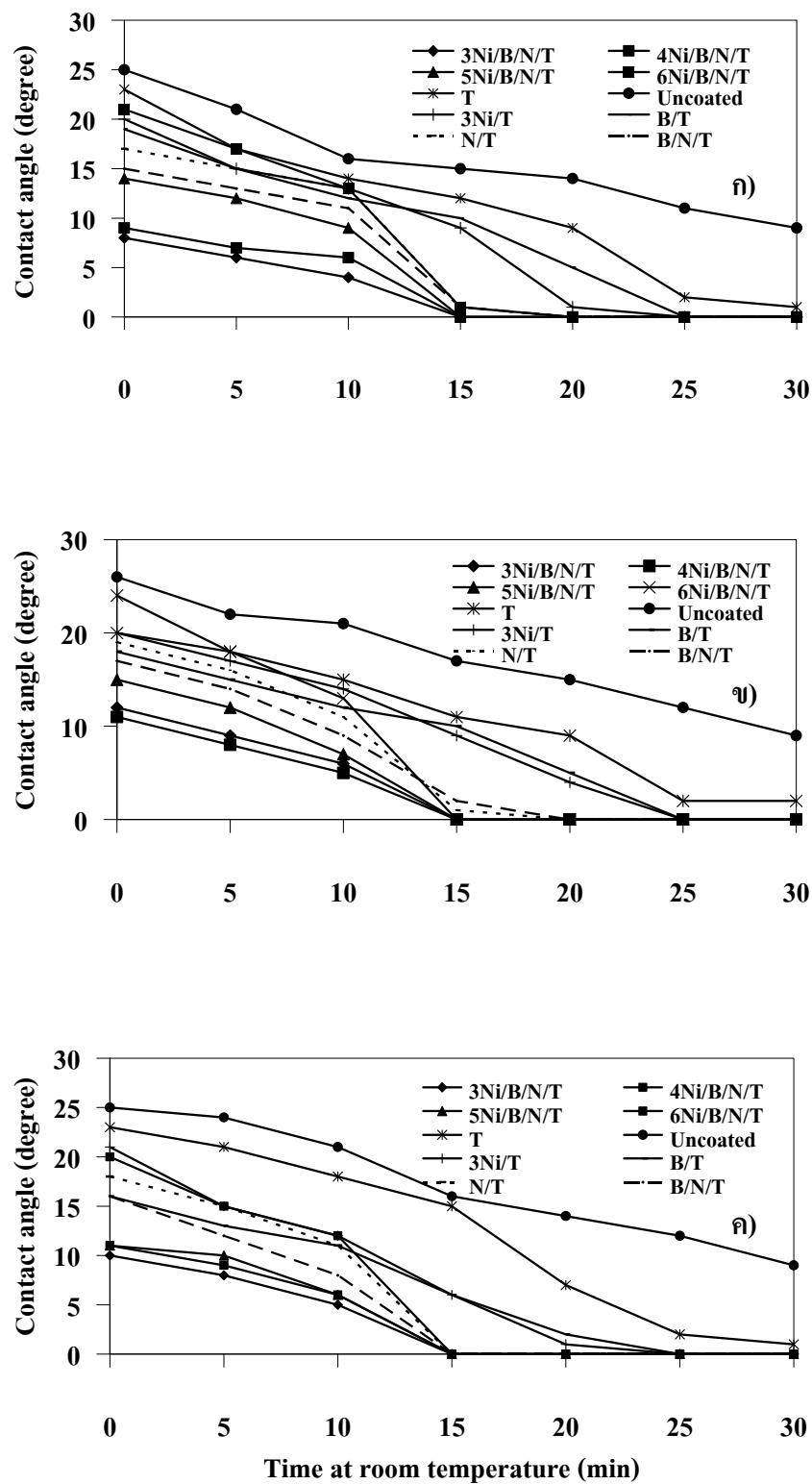
Samples	Band gap energy, E_g (eV)		
	400 °C	500 °C	600 °C
TiO ₂	3.02	3.02	3.02
3Ni/TiO ₂	3.02	3.02	3.02
B/TiO ₂	3.02	3.02	3.00
N/TiO ₂	2.91	2.96	2.98
B/N/TiO ₂	2.88	2.91	2.93
3Ni/B/N/TiO ₂	2.42	2.45	2.40
4Ni/B/N/TiO ₂	2.44	2.40	2.33
5Ni/B/N/TiO ₂	2.40	2.41	2.38
6Ni/B/N/TiO ₂	2.39	2.45	2.47

ง. ผลการวัดมุมสัมผัสของหยดน้ำบนกระจกที่เคลือบด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์เมื่อได้ป็นิกเกิด โบรอน และ ไนโตรเจน

ผลการวัดมุมสัมผัสที่วัดได้เมื่อได้รับรังสียูวี(รูปที่ 3.22) และที่บรรยากาศปกติ(รูปที่ 3.23) พบว่าเมื่อเวลาเพิ่มขึ้นมุมสัมผัสเริ่มลดลง โดยฟิล์มที่มีการได้ปด้วยโบรอน ไนโตรเจน และนิกเกิดทุกอัตราส่วนเริ่มค่าเข้าเป็น 0° ที่เวลา 25 นาที หากเปรียบเทียบกับฟิล์มที่ไม่ได้ทำการเคลือบและเคลือบด้วยไทเทเนียมเพียงอย่างเดียวที่เวลา 25 นาที ค่ามุมสัมผัสยังไม่เป็น 0° (ตารางที่ 3.7) จะเห็นได้ว่าที่มีการได้ปด้วยโบรอน ไนโตรเจนและนิกเกิดทั้งสามตัวได้ปที่ปริมาณนิกเกิดที่ 4-6 เปอร์เซ็นต์โมลค่ามุมสัมผัสของหยดน้ำเท่ากับ 0° ที่เวลา 15 นาที ซึ่งใช้เวลาน้อยกว่าที่มีการได้ปด้วยโบรอนและนิกเกิดดังที่ได้ทำการทดลองมาก่อนหน้านี้แล้ว เนื่องจากอิทธิพลของไนโตรเจนมีผลต่อการเลื่อนไปสู่ช่วง Visible ได้ดีกว่าการได้ปด้วยนิกเกิดและโบรอน (Zhongbiao et al., 2007, Gombac et al., 2007, Jirapat et al., 2009) สำหรับค่ามุมสัมผัสของหยดน้ำที่ภายใต้การรับรังสียูวีและที่บรรยากาศปกติสำหรับอุณหภูมิเผาที่ 400 °C 500 °C และ 600 °C ค่ามุมสัมผัสของหยดน้ำมีค่าใกล้เคียงกัน อิทธิพลของปริมาณสารได้ปนิกเกิดที่ 3 เปอร์เซ็นต์โมล ค่ามุมสัมผัสมีค่าน้อยและเข้าใกล้ 0° มากที่สุดและรองลงมาคือ 4 เปอร์เซ็นต์โมล (รูปที่ 3.24) แสดงถึงสมบัติความชอบน้ำ (Hydrophilic) สืบเนื่องจากปริมาณออกซิเจนวาแคนซี (Oxygen vacancy) บนพื้นผิวฟิล์มทำให้การแผ่กระจายของหยดน้ำได้ง่ายขึ้น (Sharma et al., 2006)



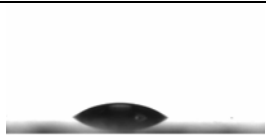
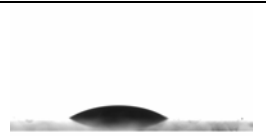



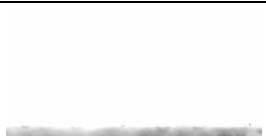


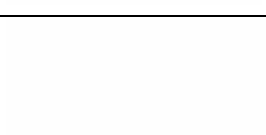
รูปที่ 3.22 มุมสัมผัสของหยดน้ำบนฟิล์ม Ni/B/N/T ที่ผ่านการส่องรังสียูวีเมื่อฟิล์มเผาที่ ก) 400 °C
ข) 500 °C ค) 600 °C



รูปที่ 3.23 มุมสัมผัสของหยดน้ำบนฟิล์ม Ni/B/N/T ที่บรรยากาศปกติเมื่อฟิล์มเผาที่ ก) 400 °C ข) 500 °C ค) 600 °C

ตารางที่ 3.7 ค่ามุมสัมผัสเมื่อทดสอบด้วยหยดน้ำของฟิล์มที่ อุณหภูมิเผาต่างๆ ที่เวลา 15 นาที

ชิ้นงาน	มุมสัมผัส (°)					
	400°C		500°C		600°C	
	Without UV	With UV	Without UV	With UV	Without UV	With UV
Uncoated	15	16	17	17	16	16
Pure TiO ₂	12	13	11	11	15	12
3Ni/TiO ₂	9	7	9	7	6	5
B/TiO ₂	10	9	10	9	6	6
N/TiO ₂ , B/ N/TiO ₂ , 3- 6Ni/B/N/TiO ₂	0	0	0	0	0	0

Samples	Contact angles images at various observed times		
	0 min	10 min	25 min
Pure TiO ₂			
3Ni/B/N/TiO ₂			
4Ni/B/N/TiO ₂			

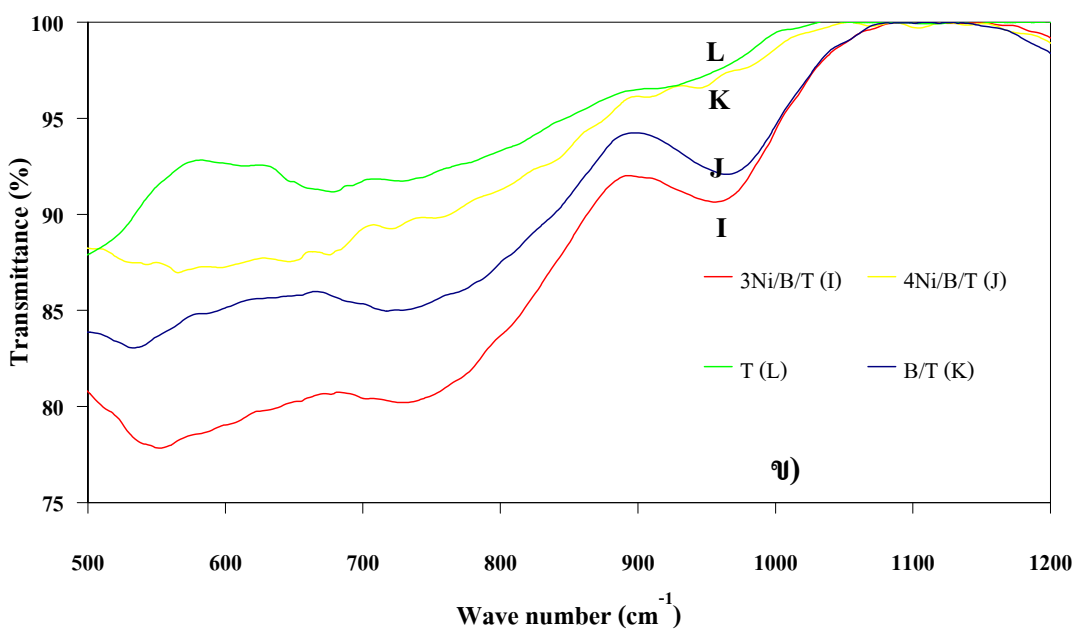
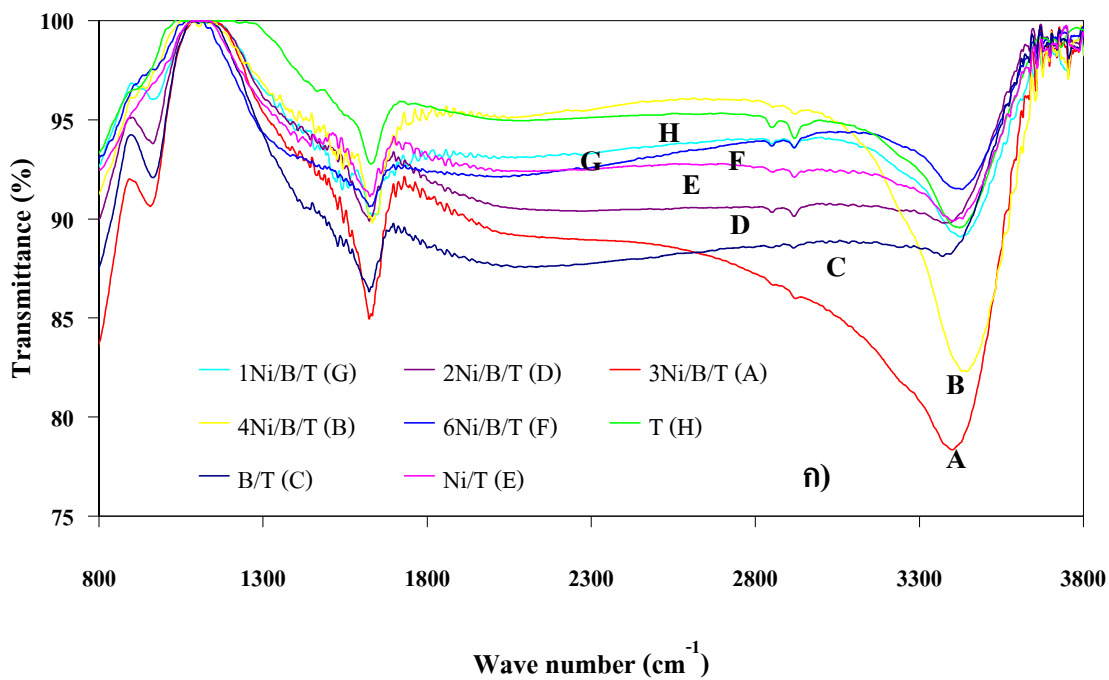
รูปที่ 3.24 ลักษณะของมุมสัมผัสของหยดน้ำบนฟิล์ม Ni/B/N/T ที่บรรยากาศห้องเมื่อฟิล์มเผาที่ 400°C

3.2.3 ผลการวิเคราะห์ด้วย FTIR, FT-RAMAN, EDX และ XPS

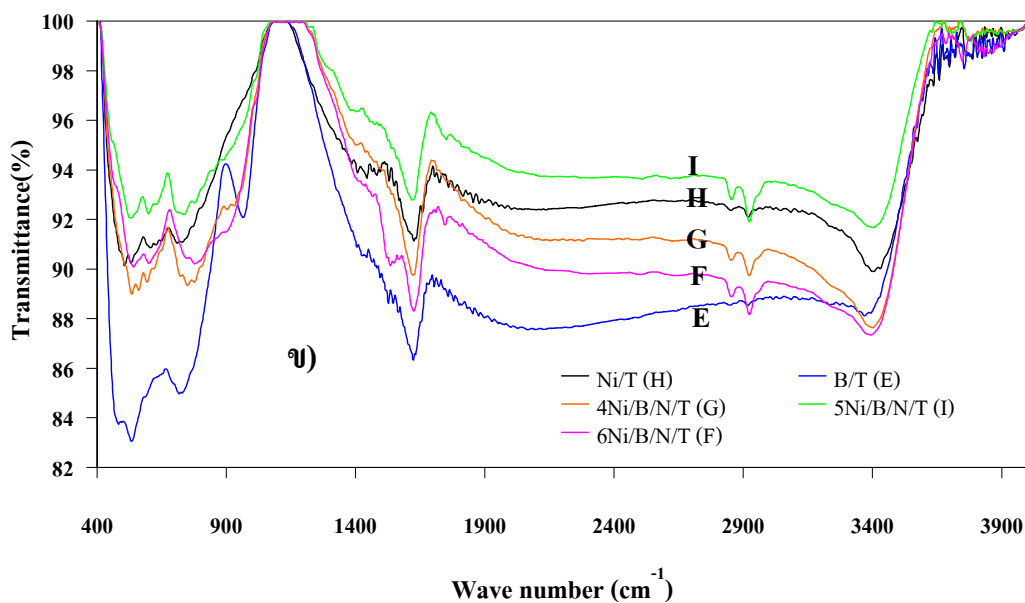
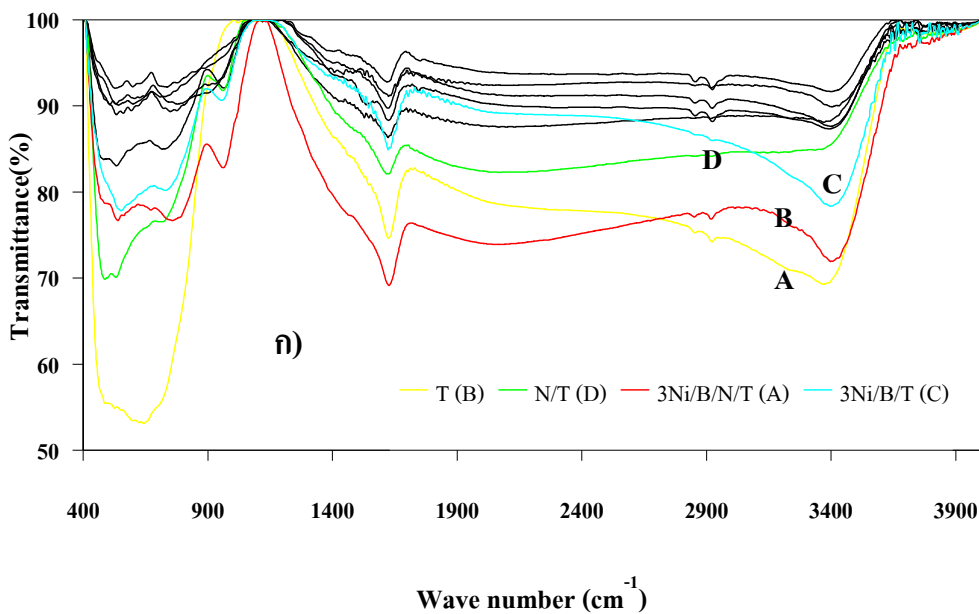
ก. ผลการวิเคราะห์ด้วย FTIR ของผงไทเทเนียมไดออกไซด์เมื่อได้ปฏิกิริยาโบรอนและไนโตรเจน

ผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง FTIR ทำให้โมเลกุลเกิดการดูดกลืนแสงแล้ววัดแสงที่ส่งผ่านออกมาแสดงผลเป็นความสัมพันธ์ของความถี่หรือ Wave Number กับค่าการส่งผ่านของแสง เรียกว่า IR Spectrum ซึ่งลักษณะสเปกตรัมการดูดกลืนแสงของสารแต่ละชนิดจะมีคุณสมบัติเฉพาะ โมเลกุลของสารจึงสามารถดูดกลืนแสงอินฟราเรดได้ที่มีความถี่ต่างกันขึ้นอยู่กับความแข็งแรงของพันธะและน้ำหนักของอะตอมของ Functional Groups ในโมเลกุลนั้น ๆ ซึ่งการสั่นของพันธะในช่วงความยาวคลื่นที่ 1359, 2785, 2831, 2858, 2865, 2925 และ 2964 cm^{-1} (รูปที่ 3.25) เป็นการสั่นของกลุ่มไฮโดรคาร์บอน (CH) สำหรับการสั่นที่ความยาวคลื่น 500 cm^{-1} เป็นการสั่นของเฟสอะนาเทส (Kolinko et al., 2007, Peng et al., 2008) ซึ่งการสั่นของพันธะในช่วงความยาวคลื่นที่ 3200-3600 cm^{-1} (รูปที่ 3.25) เป็นการสั่นของกลุ่มไฮดรอกซิลบนพื้นผิวไทเทเนียมไดออกไซด์ (OH) (Xu et al., 2008, Kang et al., 2008) ในช่วงความยาวคลื่นที่ 3400-3468 cm^{-1} (Ti-OH) ในช่วงความยาวคลื่นที่ 1630-1640 cm^{-1} เป็นการสั่นของกลุ่มไฮดรอกซิล (OH) (Sharma et al., 2006, Li et al., 2006) ในช่วงความยาวคลื่นที่ 600-800 cm^{-1} เป็นการสั่นของกลุ่มบอเรต (B-O-B) ในช่วงความยาวคลื่นที่ 600-1200 cm^{-1} เป็นการสั่นของกลุ่มบอเรต (B-O) หรือ (BO_4) (Silim et al., 2006) (รูปที่ 3.25 ค)

เมื่อพิจารณารูปที่ 3.25 ก จะเห็นได้ว่าเป็นตัวอย่างผงไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ได้ปฏิกิริยาโบรอนและนิกเกิลเทียบกับที่ไม่ได้ได้ปรากฏว่าค่าการส่งผ่านของแสง (Transmittance) (รูปที่ 3.25 ก) A-H มีค่าจากสูงลดลงตามลำดับ สำหรับรูปที่ 3.25 ข ขยายให้เห็นความชัดเจนของตัวอย่างที่ได้ปฏิกิริยาโบรอนและนิกเกิลเทียบกับไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ไม่ได้ได้ปฏิกิริยาจะเห็นได้ว่าที่ความยาวคลื่นประมาณ 900-1000 cm^{-1} จะเห็นถึงความแตกต่างของเส้นกราฟได้อย่างชัดเจน สำหรับรูปที่ 3.26 ก-ข เป็นการเปรียบเทียบผล FT-IR ของผงไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีการได้ปฏิกิริยาโบรอนไนโตรเจนและนิกเกิล ปรากฏว่าค่าการส่งผ่านของแสง (Transmittance) (รูปที่ 3.26 ก-ข) A-I มีค่าจากสูงลดลงตามลำดับ ซึ่งจากหุ้มนักฟังก์ชันที่ได้วิเคราะห์สอดคล้องกับปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกกรรมทั้งผลของมุมสัมผัสของหยดน้ำเนื่องจากมีหุ้มนักของไฮดรอกซิลในผงไทเทเนียมที่ได้ปฏิกิริยาโบรอนและนิกเกิลหรือได้ปฏิกิริยาโบรอนไนโตรเจนหรือนิกเกิล



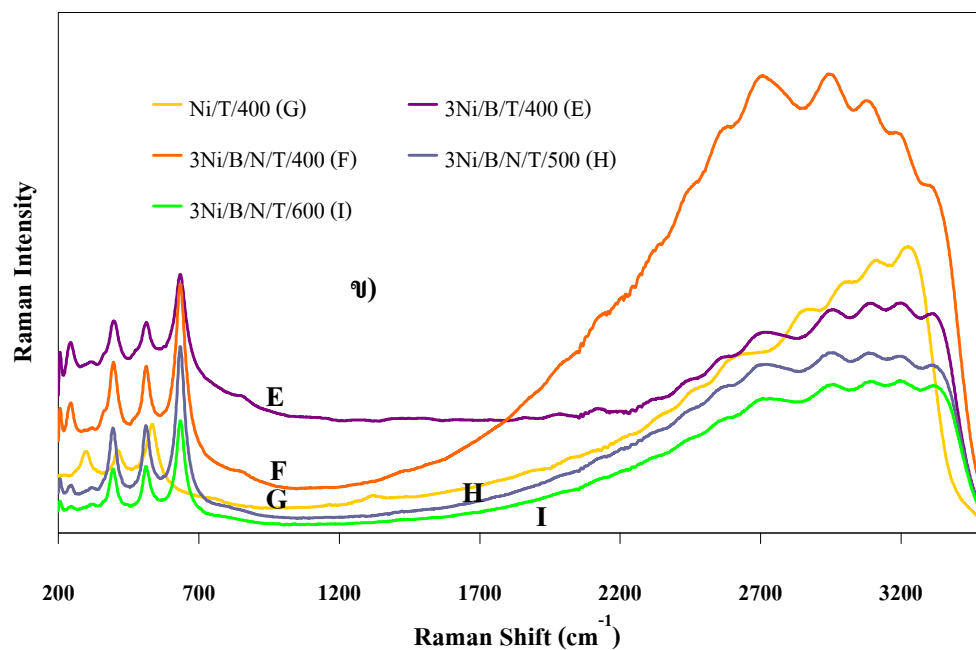
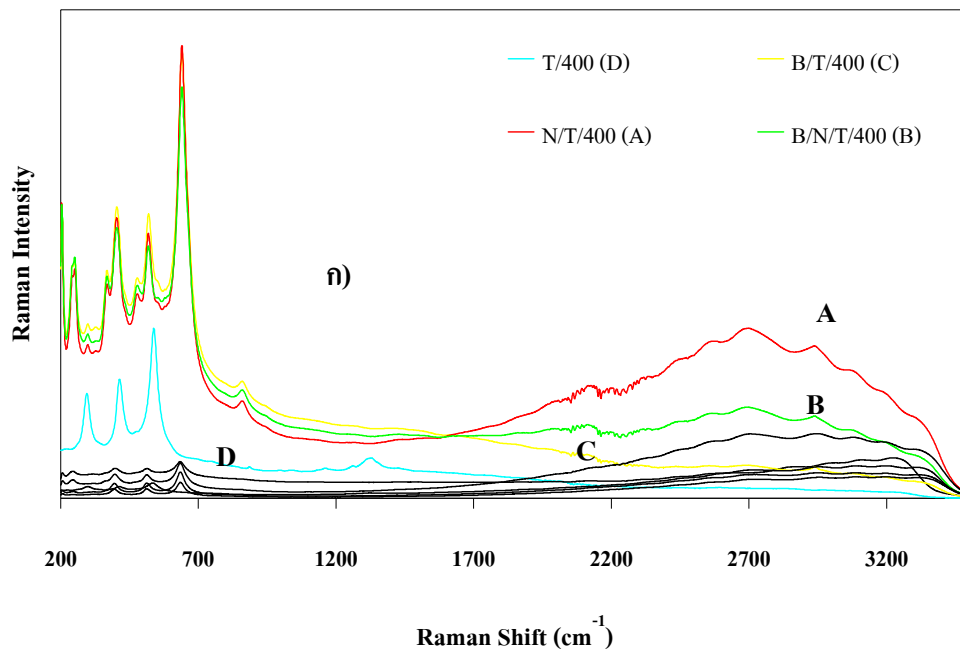
รูปที่ 3.25 ผลการวิเคราะห์ด้วย FTIR ของผง Ni/B/T เฝ้าที่อุณหภูมิ 400°C โดยที่รูป ก) การเปรียบเทียบทุกผลการวิเคราะห์ ข) ภาพขยายจากรูป ก)



รูปที่ 3.26 ผลการวิเคราะห์ด้วย FTIR ของผง Ni/B/N/T เผาที่อุณหภูมิ 400°C โดยที่รูป ก) การเปรียบเทียบทุกผลการวิเคราะห์ ข) ภาพขยายจากรูป ก

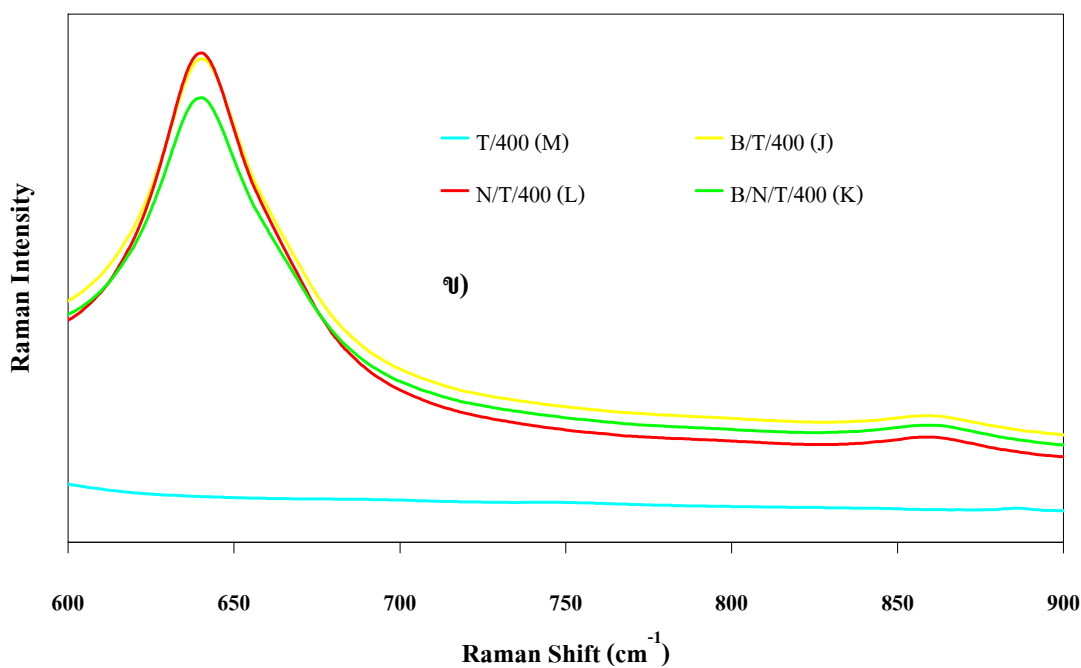
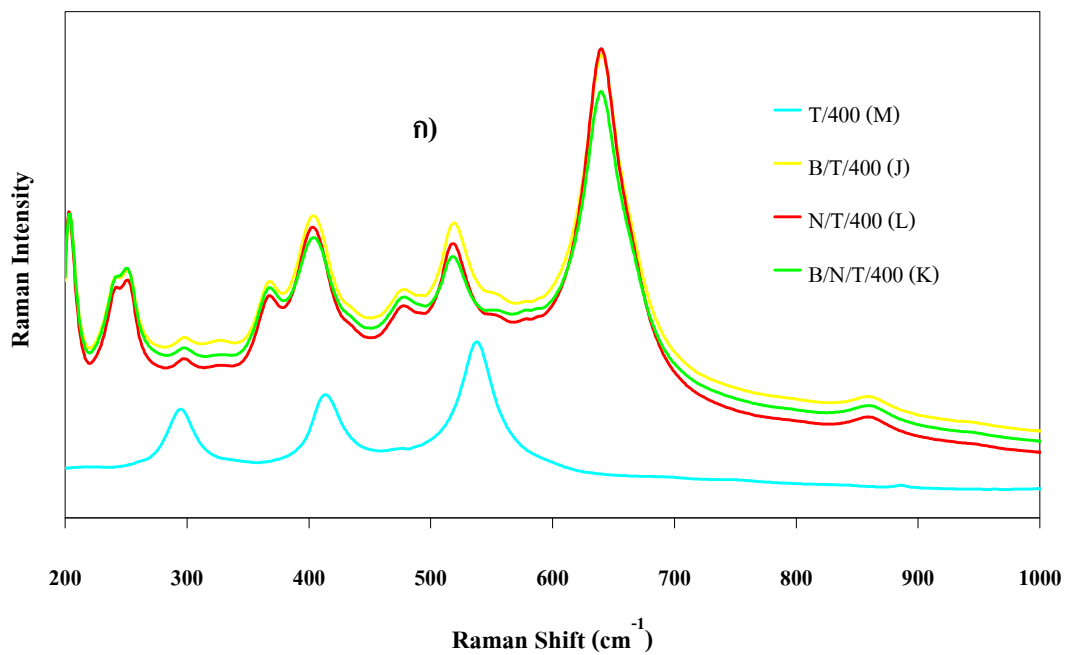
ข. ผลการวิเคราะห์ด้วย FT-RAMAN ของผงไทเทเนียมไดออกไซด์

ผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง FT-RAMAN (รูปที่ 3.27) มีหลักการใกล้เคียงกับการวิเคราะห์ด้วย FT-IR จากผลการวิเคราะห์ด้วย FT-RAMAN การสั่นของพันธะในช่วงความยาว



รูปที่ 3.27 ผลการวิเคราะห์ด้วย FT-RAMAN ของผงไทเทเนียมไดออกไซด์เปรียบเทียบกับที่เผาต่างอุณหภูมิโดยที่รูป ก) ทุกผลการวิเคราะห์ ข) ภาพขยายผลการวิเคราะห์ที่เป็นเส้นสีดำ จากรูป ก

คลื่นที่เห็นเด่นชัดได้แก่ 248, 294, 363, 399, 474, 514, 639 และ 850 cm^{-1} (รูปที่ 3.27 A-C) การสั่นของพันธะในช่วงความยาวคลื่นที่เห็นเด่นชัดได้แก่ 292, 406, 534 และ 1314 cm^{-1} (รูปที่ 3.27 D) ซึ่งการสั่นของพันธะในช่วงความยาวคลื่นที่ 393.3, 399, 513, 519, 636.3 และ 1314 cm^{-1} เป็นความยาว

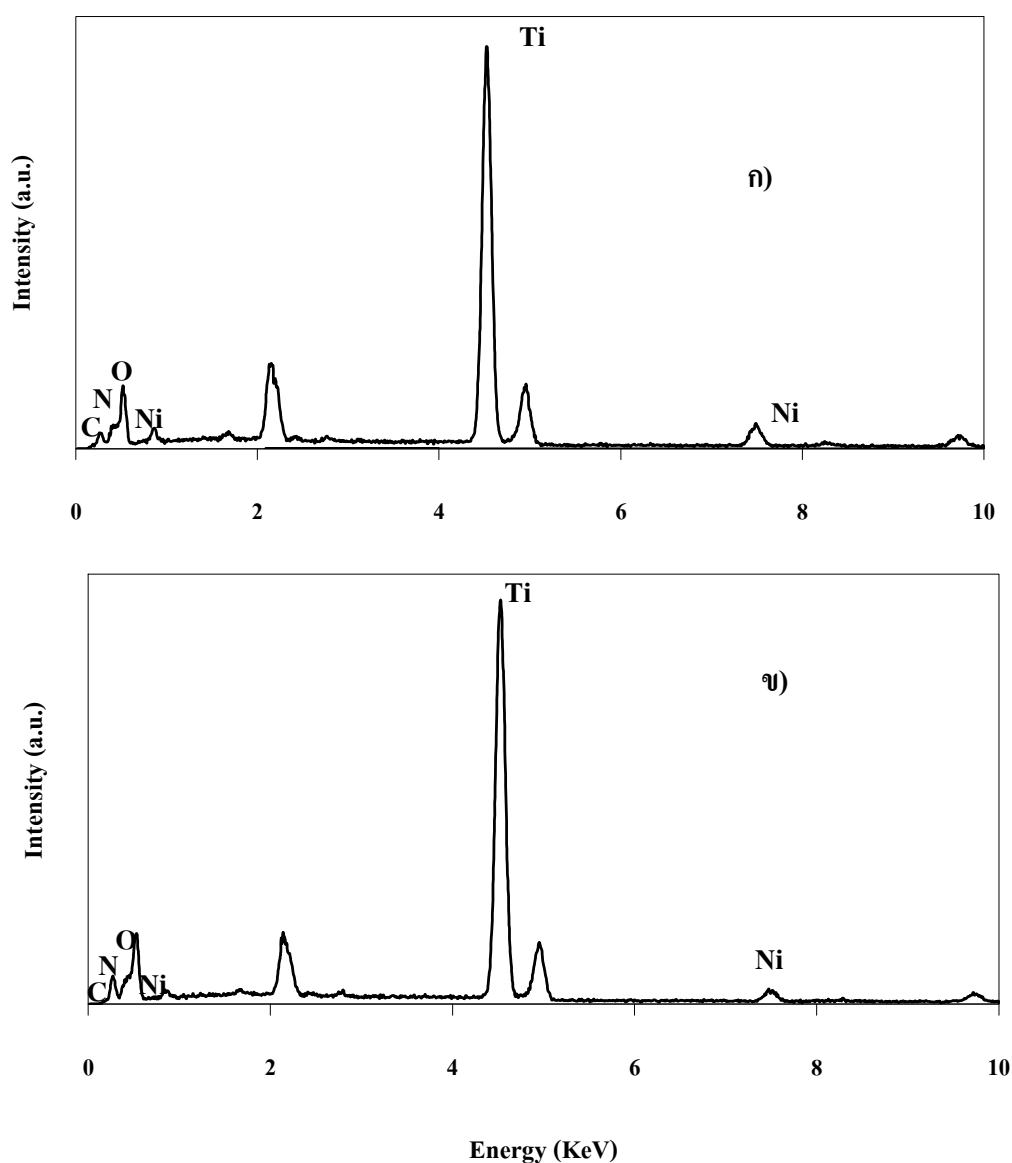


รูปที่ 3.28 ผลการวิเคราะห์ด้วย FT-RAMAN ของพอลิไทเทเนียมไดออกไซด์โดยที่รูป ก) เปรียบเทียบที่อุณหภูมิเดียวกันที่ RAMAN Shift 200-1000 cm^{-1} ข) ภาพขยายจากรูป ก) ที่ RAMAN Shift 600-900 cm^{-1}

คลื่นที่พบอะนาเทสเฟส (Bettinelli et al., 2007, Yates et al., 2006) (รูปที่ 3.28 ก) สำหรับการสั่นของพันธะในช่วงความยาวคลื่นที่ 639 และ 850 cm^{-1} (Gombac et al., 2007) เป็นความยาวคลื่นซึ่งเป็นอิทธิพลของการได้ปด้วยโบรอน (รูปที่ 3.28 ข)

ค. ผลการวิเคราะห์ด้วย EDX ของผงไทเทเนียมไดออกไซด์

ผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง EDX เป็นการวิเคราะห์ผงไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ได้ปด้วยโบรอนและนิกเกิล (รูปที่ 3.29 ก) ผงไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ได้ปด้วยโบรอน ในโตรเจนและนิกเกิล (รูปที่ 3.29 ก-ข)



รูปที่ 3.29 ผลการวิเคราะห์ด้วย EDX ของผงไทเทเนียมไดออกไซด์โดยที่ ก) Ni/B/T ข) Ni/B/N/T

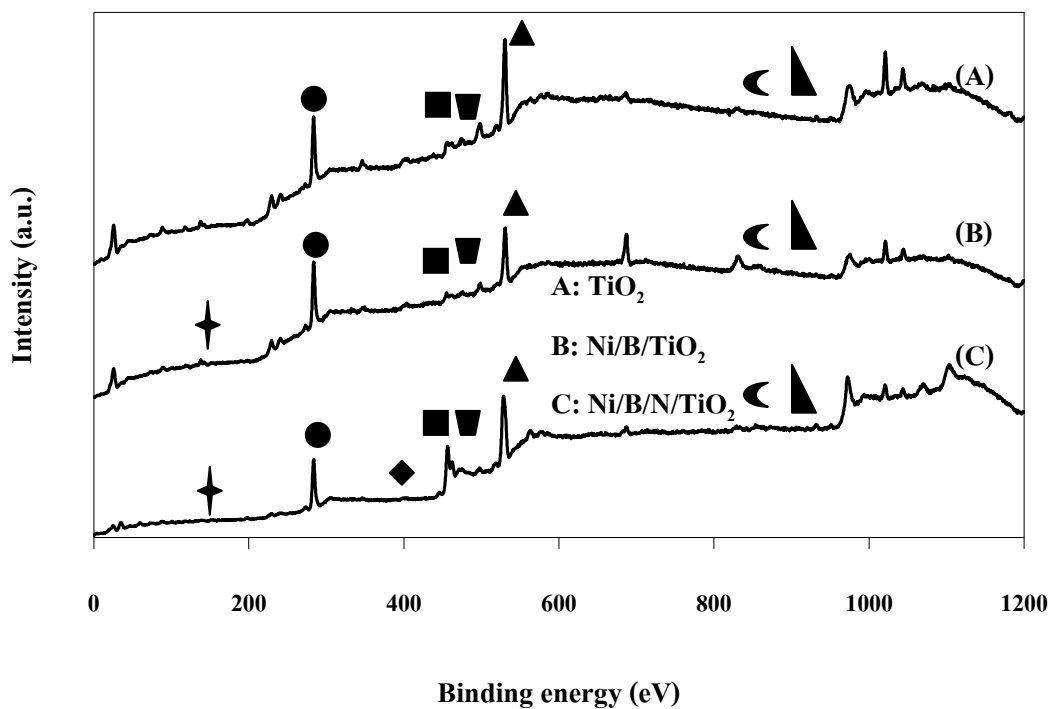
ผลปรากฏว่ามีการพบธาตุ C, O, N, Ti และ Ni ปริมาณธาตุที่คำนวณได้จากเครื่องสามารถวิเคราะห์ได้มีปริมาณธาตุ Ti ในช่วง 53-55% โดยน้ำหนัก มีธาตุนิกเกิลในช่วง 6-8 % โดยน้ำหนัก (ตารางที่ 3.8) ซึ่งการพบธาตุไนโตรเจนในตัวอย่างที่ไม่ได้ได้ไปด้วยไนโตรเจนเนื่องจากสารตั้งต้นของนิกเกิลคือนิกเกิลไนเตรต สำหรับธาตุโบรอนเครื่อง EDX ไม่สามารถวิเคราะห์หาได้เนื่องจากมีการเติมที่น้อยและโบรอนเป็นธาตุเบาด้วย

ตารางที่ 3.8 ปริมาณธาตุที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วย EDX

ปริมาณธาตุ	Ni/B/TiO ₂	Ni/B/N/TiO ₂
	Wt (%)	Wt (%)
C	4.80	7.41
N	5.97	6.19
O	25.00	28.12
Ti	55.55	53.30
Ni	08.68	04.98

ง. ผลการวิเคราะห์ด้วย XPS ของผงไทเทเนียมไดออกไซด์

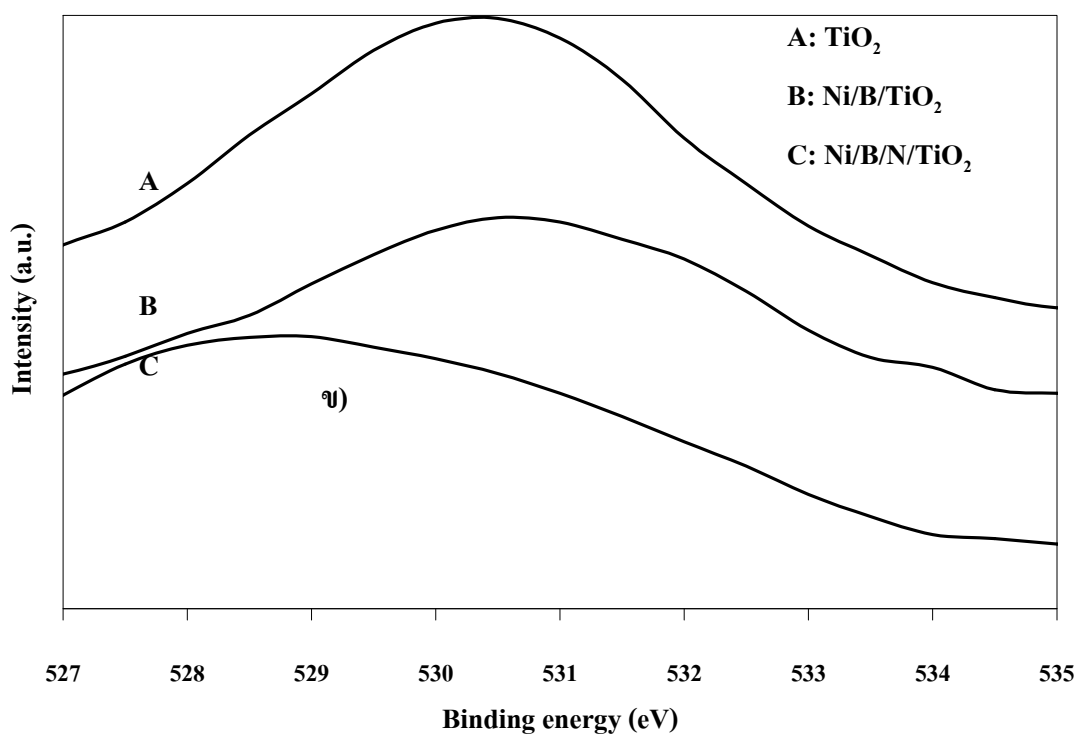
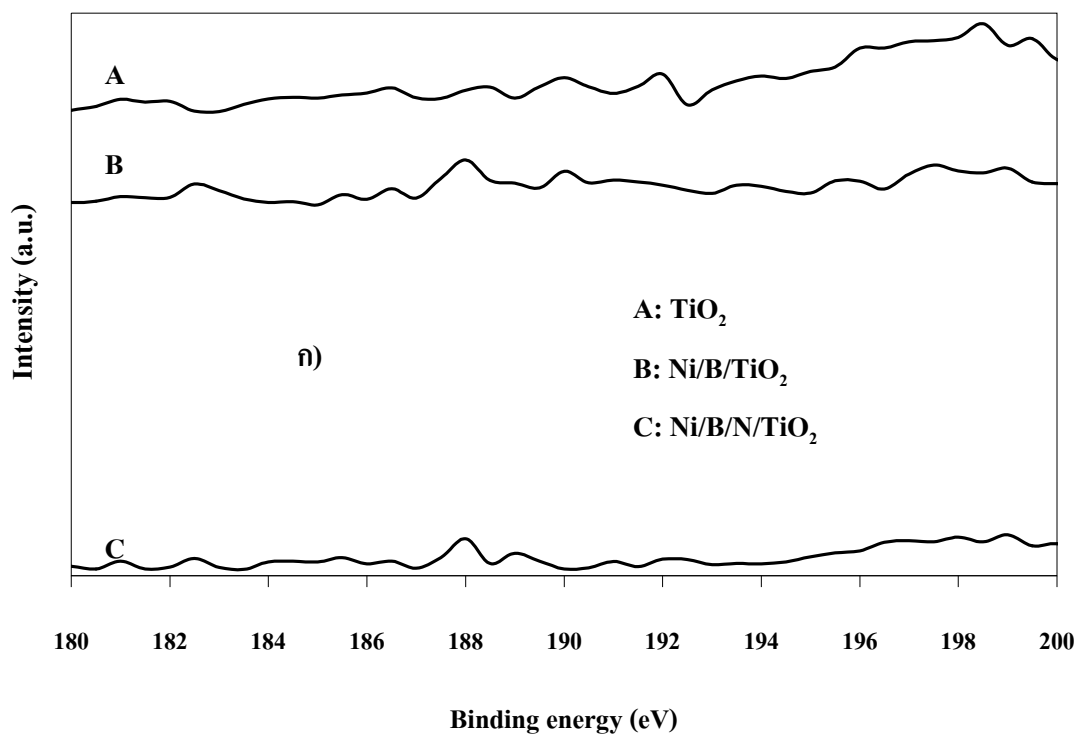
จากผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง XPS เป็นการวิเคราะห์ผงไทเทเนียมไดออกไซด์พบธาตุ C, O และ Ti (รูปที่ 3.30 A) ที่ได้ไปด้วยโบรอนและนิกเกิล (รูปที่ 3.30 B) ที่ได้ไปด้วยโบรอนไนโตรเจนและนิกเกิล (รูปที่ 3.30 C) จะพบว่ามีธาตุต่างๆ ที่ได้อธิบายตามสัญลักษณ์ (ตารางที่ 3.9) จากผลการทดลองวิเคราะห์ที่ได้ดังนี้ สำหรับผงไทเทเนียมไดออกไซด์ ที่ได้ไปด้วยโบรอนและนิกเกิลพบธาตุ C, O, Ti, Ni, และ B ที่ได้ไปด้วยโบรอน ไนโตรเจนและนิกเกิล พบธาตุ C, O, Ti, Ni, N, และ B ซึ่งการวิเคราะห์ได้พบธาตุดังนี้ Ti 2p, Ni 2p, B 1s, N 1s, O 1s และ C 1s ในช่วงพลังงาน 455, 855, 188, 399, 532 และ 284 eV ตามลำดับ ธาตุคาร์บอนที่พบในช่วงแถบพลังงาน 284 eV สืบเนื่องมาจากปริมาณคาร์บอนที่หลงเหลือจากการใช้สารตั้งต้นที่มีองค์ประกอบจากสารไฮโดรคาร์บอนที่เผาไหม้ไม่หมด ธาตุออกซิเจนพบในช่วง 532 eV เป็นพันธะของ Ti-O ในกลุ่มของไฮดรอกซิล สำหรับธาตุไทเทเนียมจะพบ Ti 2p_{3/2} และ Ti 2p_{1/2} ในช่วงพลังงานที่ 455 และ 461 eV แสดงว่ามี Ti⁴⁺ ใน TiO₂ (Joung et al., 2006, Sharma et al., 2006, Dong et al., 2008, Khan et al., 2008, Masahashi et al., 2008)



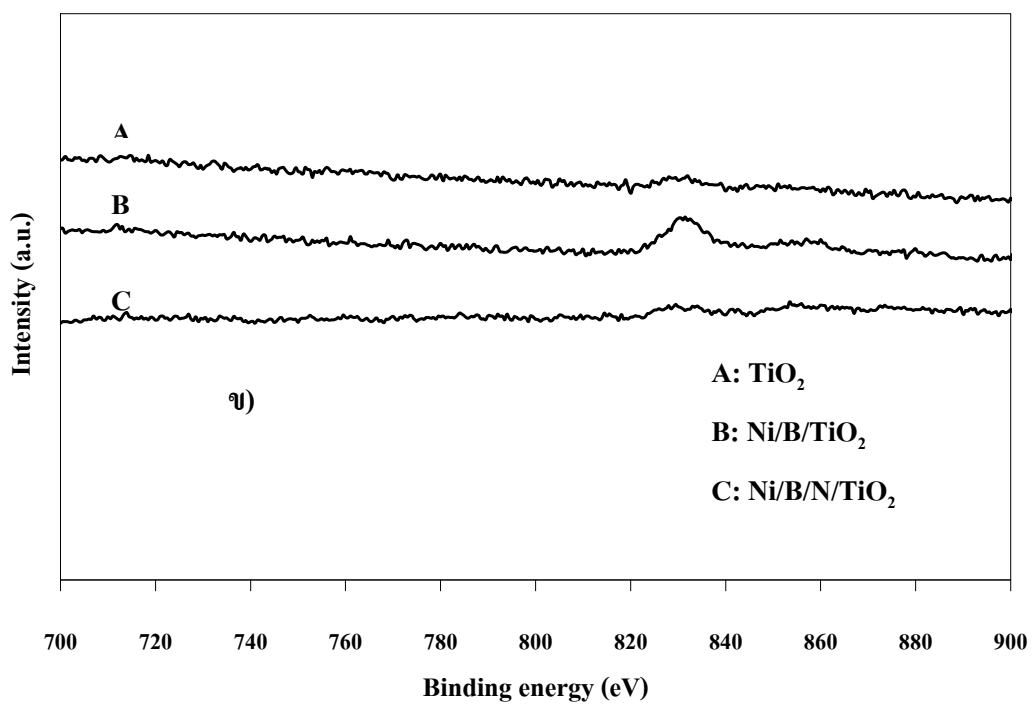
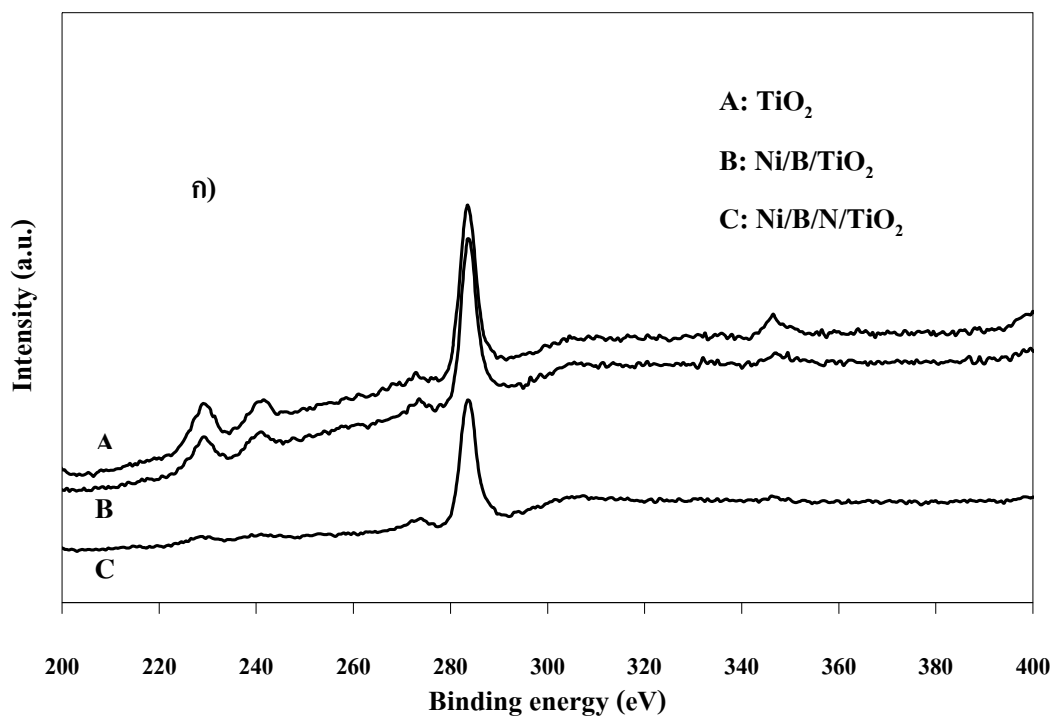
รูปที่ 3.30 ผลการวิเคราะห์ด้วย XPS ของผงไทเทเนียมไดออกไซด์

ตารางที่ 3.9 คำอธิบายสัญลักษณ์จากรูปที่ 3.29 และช่วงพลังงานที่พบธาตุจากการวิเคราะห์ด้วย XPS

สัญลักษณ์	ธาตุที่พบ	ช่วงพลังงานที่พบ (eV)
✦	B1s	188
●	C1s	284
◆	N1s	399
■	Ti2p, Ti2p3/2	455
▼	Ti2p1/2	461
▲	O1s	532
☾	Ni2p, Ni2p3/2	855
▶	Ni2p1/2	872



รูปที่ 3.31 ผลการวิเคราะห์ด้วย XPS ของผงไทเทเนียมไดออกไซด์โดยที่แถบช่วงพลังงานที่พบ
โบรอน ก) 180-200 eV ข) 527-535 eV



รูปที่ 3.32 ผลการวิเคราะห์ด้วย XPS ของผงไทเทเนียมไดออกไซด์โดยที่แถบช่วงพลังงานที่พบ ก) ไนตรเจน และ ข) นิกเกิล

สำหรับธาตุโบรอนที่ทำวิจัยในครั้งนี้พบในช่วงพลังงาน 188 eV (รูปที่ 3.31 ก) ซึ่งมีงานวิจัยมาก่อนหน้านี้ได้กล่าวถึงการได้โบรอนในไทเทเนียมไดออกไซด์ว่าหากพบโบรอนในช่วงพลังงานที่ 193.6 eV โบรอนจะอยู่ในรูป B_2O_3 (B-O) ที่ 193.0 eV โบรอนจะอยู่ในรูป H_3BO_3 (B-O) และ 187.5 eV โบรอนจะอยู่ในรูป TiB_2 (Ti-B) อิทธิพลของโบรอนยังส่งผลให้เส้นกราฟเลื่อนมายังช่วงพลังงานที่ 532 eV เมื่อเทียบกับผงไทเทเนียมไดออกไซด์ (รูปที่ 3.31 ข) ซึ่งเป็นอิทธิพลของไดโบรอนออกไซด์ B_2O_3 (Haoli et al., 2007 Zaleska et al., 2008, Masahashi et al., 2008, Ling et al., 2008) ในส่วนของการวิเคราะห์พบธาตุไนโตรเจนจากการวิจัยในครั้งนี้พบในโตรเจนในช่วงพลังงานที่ 399 eV (รูปที่ 3.32 ก) แสดงให้เห็นว่ามีไนไตรต์ (NO_2) อยู่แบบแทนที่ในไทเทเนียมไดออกไซด์ (Joung et al., 2006, Asahi et al., 2007, Dong et al., 2008, Ananpattarachai et al., 2009) ส่วนธาตุนิกเกิลพบในช่วงพลังงานที่ 855 eV ของ $Ni 2p_{3/2}$ และ 872 eV ของ $Ni 2p_{1/2}$ (รูปที่ 3.32 ข) บ่งชี้ว่ามีปริมาณนิกเกิลออกไซด์ (Ni_2O_3) บนผิวของไทเทเนียมไดออกไซด์ (Sharma et al., 2006, Zhang et al., 2007, Huang et al., 2009, Tseng et al., 2009, Kisand et al., 2010) สำหรับปริมาณธาตุในหน่วยเปอร์เซ็นต์อะตอมที่วิเคราะห์ได้จากเครื่อง XPS (ตารางที่ 3.10)

ตารางที่ 3.10 ปริมาณธาตุที่พบจากการวิเคราะห์ด้วย XPS

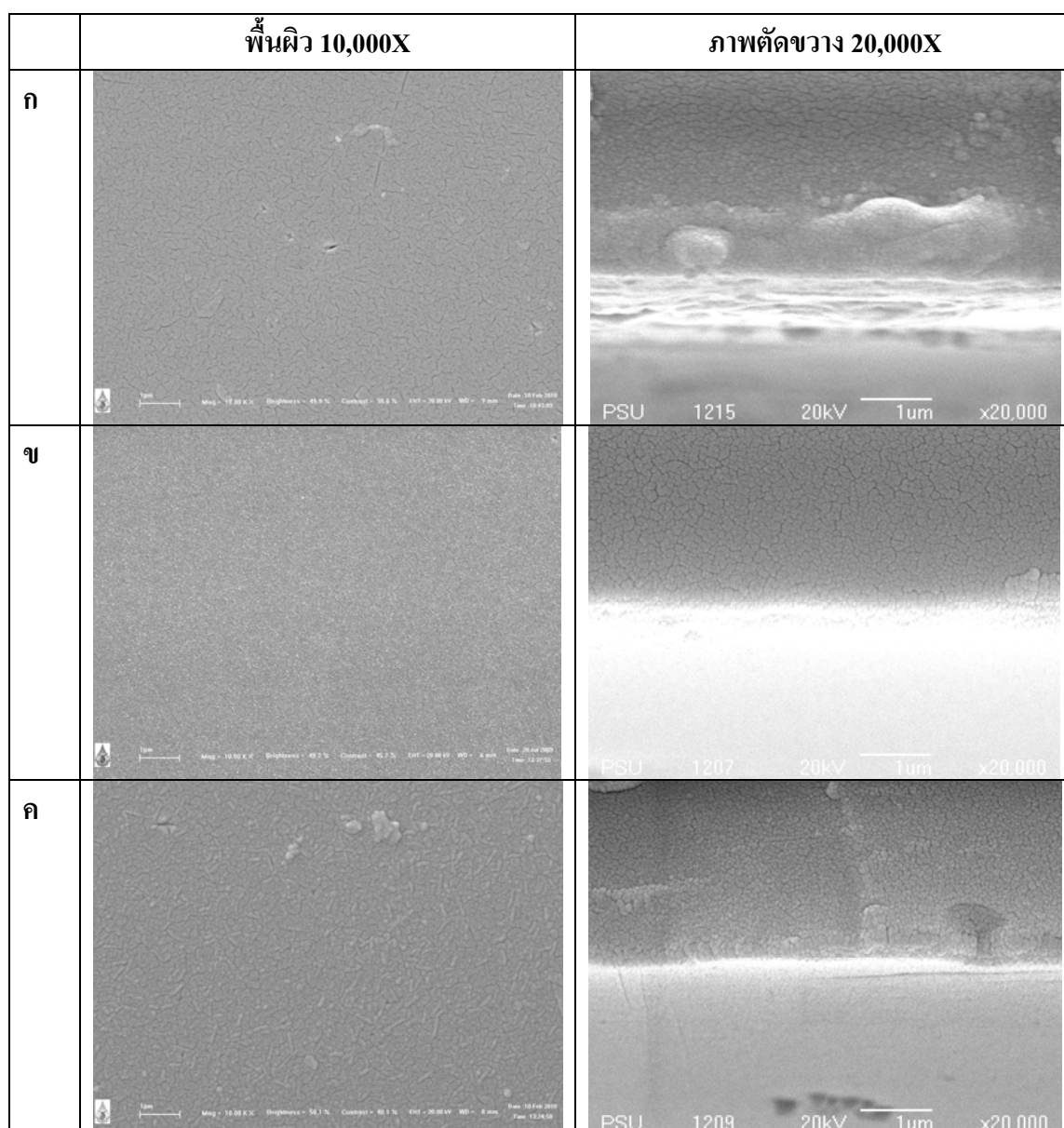
ปริมาณธาตุ	TiO ₂ (At%)	Ni/B/TiO ₂ (At%)	Ni/B/N/TiO ₂ (At%)
O	29.87	24.00	31.28
C	68.28	74.57	55.47
Ti	1.85	1.18	12.85
N	-	-	0.24
Ni	-	0.11	0.04
B	-	0.14	0.12

3.2.4 ลักษณะพื้นผิวของฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ที่วิเคราะห์จาก SEM และ AFM

ก. ลักษณะพื้นผิวของฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ที่วิเคราะห์จาก SEM

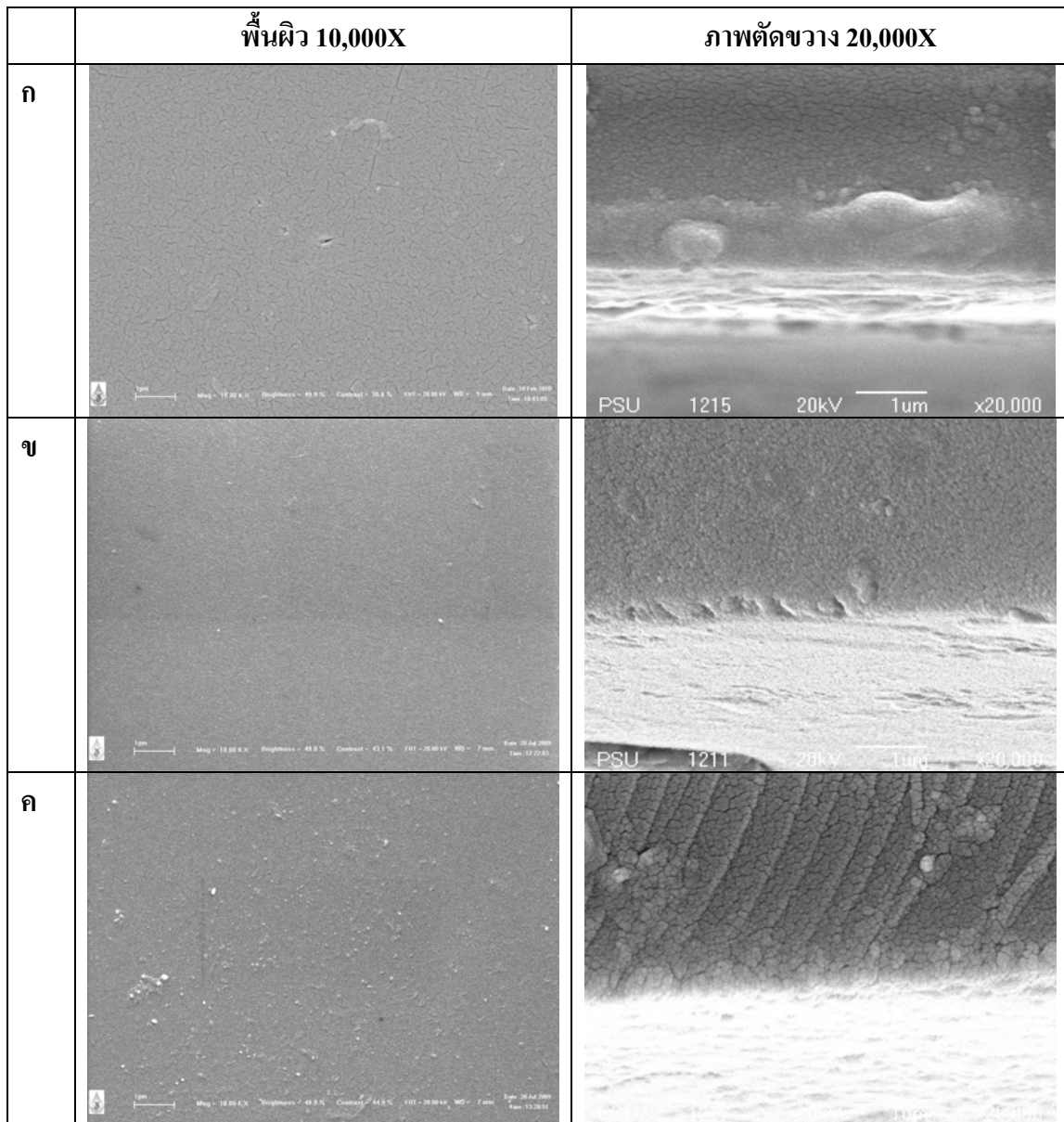
ลักษณะพื้นผิวกระจกที่เคลือบด้วยสารเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์ (รูปที่ 3.33 ก) และที่มีสารได้โบรอนและนิกเกิล (รูปที่ 3.33 ข-ค) พบว่าพื้นผิวมีลักษณะค่อนข้างเรียบและเมื่อดูภาพตัดขวางก็จะเห็นได้ว่าฟิล์มติดที่กระจก (ด้านบนมืด) ส่วน (ด้านล่างสว่าง) เป็นพื้นผิวของกระจก จากภาพ SEM ลักษณะฟิล์มที่ 2 เปอร์เซ็นต์โมล ของนิกเกิล (รูปที่ 3.33 ข) จะมีความเรียบกว่าที่ 3 เปอร์เซ็นต์โมล (รูปที่ 3.33 ค) และที่ไม่มีการได้ด้วยนิกเกิล (รูปที่ 3.33 ก) ซึ่งสอดคล้อง

กับผลการวัดมุมสัมผัสที่ 2 เเปอร์เซ็นต์โมล ของนิกเกิลมีค่ามุมสัมผัสที่น้อยกว่า ในทำนองเดียวกัน ลักษณะพื้นผิวกระจกที่เคลือบด้วยสารเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์ (รูปที่ 3.34 ก) และที่มีสาร โด๊ปโบรอน ในโตรเจนและนิกเกิล (รูปที่ 3.34 ข-ค) ที่ 3 เเปอร์เซ็นต์โมล ของนิกเกิลมีความเรียบกว่าที่ 4 เเปอร์เซ็นต์โมล และที่ไม่มีการโด๊ปโบรอน ในโตรเจน และนิกเกิลซึ่งสอดคล้องกับผลการวัดมุมสัมผัสที่ 3 เเปอร์เซ็นต์โมล ของนิกเกิลมีค่ามุมสัมผัสที่น้อยกว่าเมื่อเทียบกับที่โด๊ปด้วยในโตรเจน



รูปที่ 3.33 ภาพถ่าย SEM แสดงลักษณะพื้นผิวของฟิล์มที่อุณหภูมิเผา 400 °C (ก) TiO₂

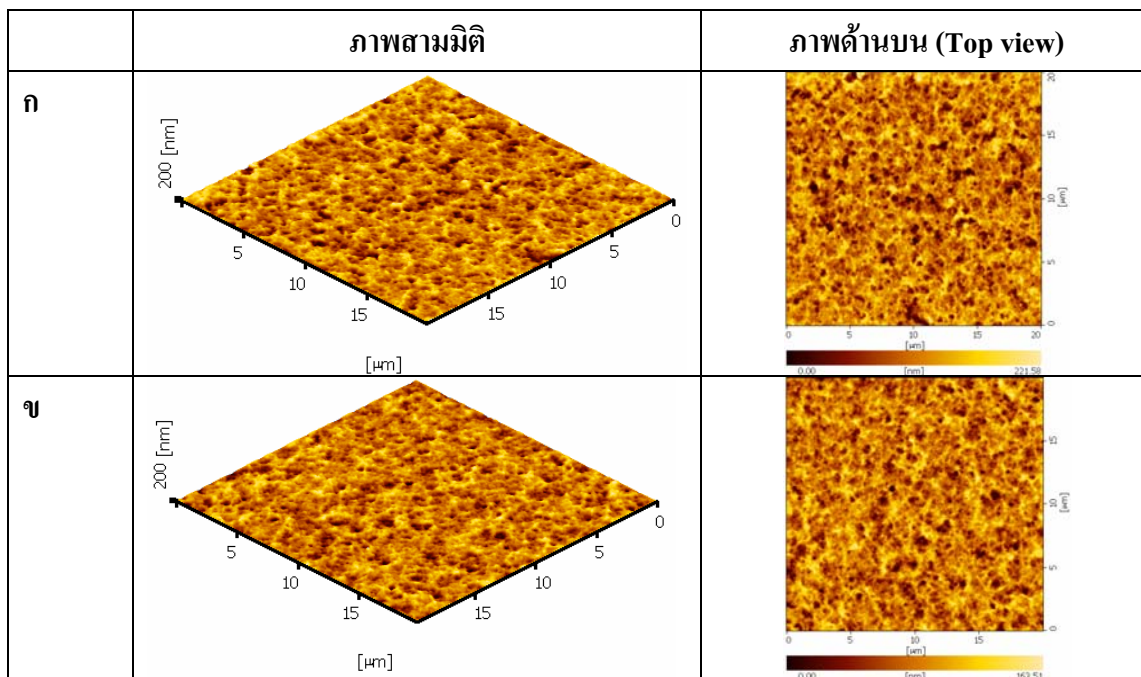
(ข) 2Ni/B/TiO₂ และ (ค) 3Ni/B/TiO₂



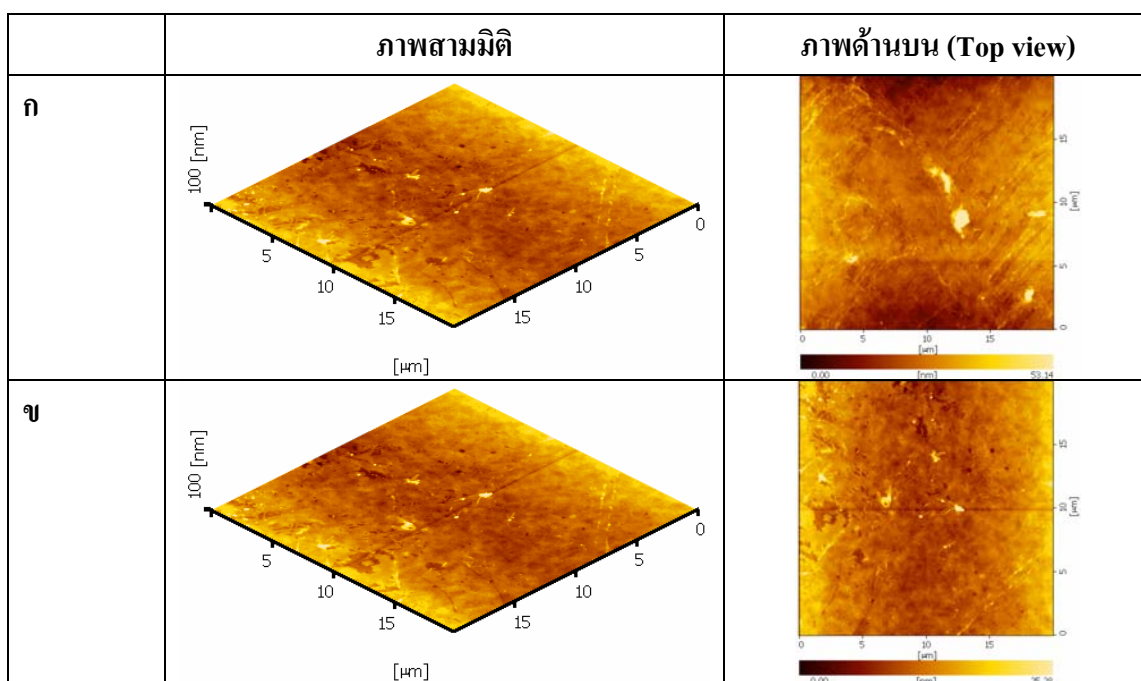
รูปที่ 3.34 ภาพถ่าย SEM แสดงลักษณะพื้นผิวของฟิล์ม TiO_2 ที่อุณหภูมิเผาที่ 400°C (ก) TiO_2
(ข) 3Ni/B/N/TiO_2 และ (ค) 4Ni/B/N/TiO_2

ข. ลักษณะพื้นผิวของฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ที่วิเคราะห์จาก AFM

การวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวของฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ ที่ได้ปด้วยโบรอนและนิกเกิล (Ni/B/TiO_2) (รูปที่ 3.35) และที่ได้ปด้วยโบรอน ไนโตรเจนและนิกเกิล (Ni/B/N/TiO_2) (รูปที่ 3.36) โดยใช้เครื่อง AFM จะเห็นว่าพื้นผิวของฟิล์มค่อนข้างเรียบ โดยมีค่าความขรุขระอยู่ในช่วง 20- 26 นาโนเมตร ซึ่งที่ 2 เปอร์เซ็นต์โมล นิกเกิล จะมีค่าความขรุขระน้อยกว่าที่ 3 เปอร์เซ็นต์โมล นิกเกิล สำหรับฟิล์มที่ได้ปด้วยโบรอนและนิกเกิลความขรุขระสำหรับฟิล์มที่ได้ปด้วยโบรอน



รูปที่ 3.35 ภาพถ่าย AFM แสดงลักษณะพื้นผิวของฟิล์มเผาที่อุณหภูมิ 400 °C (ก) 2Ni/B/TiO₂ (ข)
3Ni/B/TiO₂



รูปที่ 3.36 ภาพถ่าย AFM แสดงลักษณะพื้นผิวฟิล์มเผาที่อุณหภูมิ 400 °C (ก) 3Ni/B/N/TiO₂ (ข)
4Ni/B/N/TiO₂

ไนโตรเจนและนิกเกิลมีความขรุขระอยู่ในช่วง 5-7 นาโนเมตร โดยที่ 3 เปอร์เซ็นต์โมลนิกเกิล จะมีความขรุขระน้อยกว่าที่ 4 เปอร์เซ็นต์โมลนิกเกิล (ตารางที่ 3.11) แต่เมื่อเทียบกับฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ฟิล์มที่มีการโด๊ปจะมีความขรุขระน้อยกว่า ซึ่งจากภาพ AFM เห็นได้ว่าที่มีการโด๊ปโบรอนและนิกเกิล (Ni/B/TiO₂) จะเห็นอนุภาคของฟิล์ม TiO₂ ได้อย่างชัดเจนกว่าที่โด๊ปด้วยโบรอนไนโตรเจนและนิกเกิล (Ni/B/N/TiO₂) ซึ่งจากปรากฏการณ์ดังกล่าว จะมีผลต่อสมบัติไฮโดรฟิลิกของฟิล์ม โดยจะมีค่ามุมสัมผัสลดลงเมื่อผิวฟิล์มโดนกระตุ้นด้วยแสงและทำปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกบนพื้นผิว (Jiang et al., 2002; Sharma et al., 2006) ของไทเทเนียมที่มีการโด๊ปสารดังกล่าวและค่ามุมสัมผัสสอดคล้องกับขนาดอนุภาคและขนาดผลึกที่ได้วิเคราะห์จาก XRD ด้วยเช่นกัน

ตารางที่ 3.11 ความขรุขระและความหนาของชั้นฟิล์มสังเคราะห์ด้วยอุณหภูมิ 400 °C วิเคราะห์ด้วย AFM

Sample	ความขรุขระของชั้นฟิล์ม (nm)	ความหนาของชั้นฟิล์ม (nm)
TiO ₂	63.63	120.56
2Ni/B/TiO ₂	20.26	125.83
3Ni/B/TiO ₂	25.73	124.49
3Ni/B/N/TiO ₂	5.12	119.32
4Ni/B/N/TiO ₂	6.86	121.20

3.2.5 ผลการทดสอบความแข็งแรงของการยึดติด (Adhesion test) ของฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์

ผลการทดสอบการยึดติดของฟิล์มโดยใช้หลักการ (Pull off test) จากการทดสอบปรากฏว่าฟิล์มที่ติดแม่พิมพ์สามารถรับแรงดึงอยู่ในช่วง 267-280 นิวตัน (ตารางที่ 3.12) ซึ่งจากการทดลองฟิล์มสามารถทนแรงดึงได้สูงเนื่องจากการารทดลองด้วยยึดกับฟิล์มสามารถเกาะติดฟิล์มโดยไม่มีหลุด

ตารางที่ 3.12 แรงดึงที่ทำให้แม่พิมพ์กระจกแตกเนื่องจากการยึดเกาะของฟิล์มด้วยอุณหภูมิ 400 °C วิเคราะห์ด้วยหลักการ (Pull of test)

Sample	แรงดึงที่ทำให้แม่พิมพ์กระจกแตก	
	(N)	(MPa)
TiO ₂	267	1.05
2Ni/B/TiO ₂	276	1.08
3Ni/B/TiO ₂	280	1.10
3Ni/B/N/TiO ₂	265	1.04
4Ni/B/N/TiO ₂	268	1.05





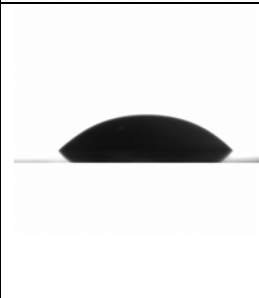
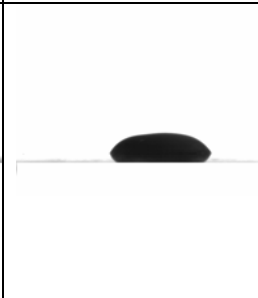
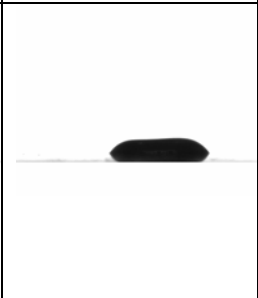
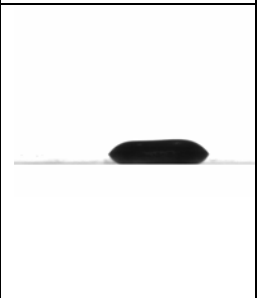
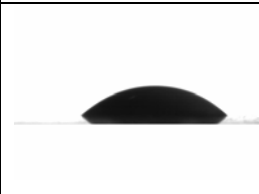
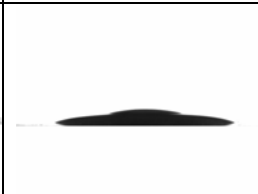


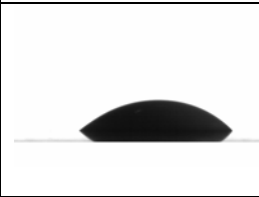
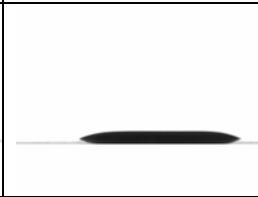
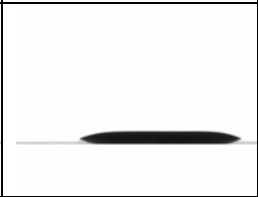

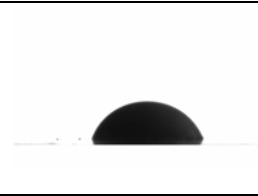
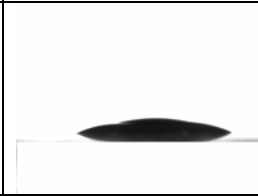

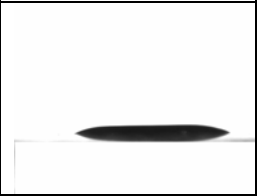
3.3 การประยุกต์ใช้ฟิล์ม เตรีียมฟิล์มยาง และทดสอบสมบัติการทำความสะอาดแม่พิมพ์

3.3.1 มุมสัมผัสของหยดน้ำยางบนฟิล์มที่ได้จากแม่พิมพ์เคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์

ผลการวัดมุมสัมผัสของหยดน้ำยางที่หยดลงบนแม่พิมพ์ที่เคลือบและไม่ได้เคลือบสารแคตะไลติก (ตารางที่ 3.13) เมื่อเริ่มหยดน้ำยางมุมสัมผัสที่ 0 นาทีจะมีค่ามากที่สุดและหยดน้ำยางจะแผ่กระจาย (รูปที่ 3.37) เมื่อเวลาผ่านไป ซึ่งค่าของมุมสัมผัสของแม่พิมพ์ที่ไม่ได้เคลือบแล้วทำการจุ่มสารจับตัวหยดน้ำยางจะมีค่ามุมสัมผัสสูงที่สุด อยู่ที่ 66 องศาที่ 0 นาที เมื่อเวลาผ่านไป 15 นาทีมุมสัมผัสอยู่ที่ 31 องศา เมื่อเปรียบเทียบกับแม่พิมพ์ที่เคลือบด้วยสารแคตะไลติกแล้วจะมีค่ามุมสัมผัสของหยดน้ำยางน้อยกว่าและเมื่อเวลาผ่านไป 15 นาที มุมสัมผัสของหยดน้ำยางที่แม่พิมพ์เคลือบกับไทเทเนียมไดออกไซด์และได้ปด้วยโบรอนและนิกเกิลหรือได้ปด้วยโบรอน ไนโตรเจน และนิกเกิลค่ามุมสัมผัสของหยดน้ำยางมีค่าใกล้เคียงกันซึ่งสอดคล้องกับค่ามุมสัมผัสของน้ำที่ได้ทำการทดลองมาก่อนหน้านี้

ตารางที่ 3.13 ค่ามุมสัมผัสของหยดน้ำยางที่หยดบนแม่พิมพ์ที่เวลาต่างๆ กัน

แม่พิมพ์แบบต่างๆ	0 นาที	5 นาที	10 นาที	15 นาที
Uncoated	48	18	10	11
Uncoated + coagulant	66	50	44	31
Pure TiO ₂	43	20	12	7
3Ni/B/TiO ₂	42	19	13	5
4Ni/B/N/TiO ₂	52	22	12	6

แม่พิมพ์แบบต่างๆ	0 นาที	5 นาที	10 นาที	15 นาที
Uncoated				
Uncoated with coagulant				
Pure TiO ₂				
3Ni/B/TiO ₂				
4Ni/B/N/TiO ₂				

รูปที่ 3.37 ภาพถ่ายแสดงหยดน้ำยางบนผิวแม่พิมพ์ที่ผ่านการเคลือบสารแคตะไลติก

3.3.2 ลักษณะพื้นผิวของฟิล์มยางที่ได้จากแม่พิมพ์เคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์

ซึ่งเมื่อสังเกตเห็นด้วยตาเปล่าของฟิล์มยางจะเห็นได้ว่าแม่พิมพ์ที่ไม่เคลือบแล้วใช้สารช่วยจับตัวและแม่พิมพ์ที่ไม่มีการเคลือบสารแคตะไลสต์จะมีฟองอากาศเล็กๆ อยู่ในฟิล์มยางเมื่อเปรียบเทียบกับแม่พิมพ์ที่เคลือบสารแคตะไลสต์อาจจะเกิดจากมีสารช่วยจับตัวขัดขวางการไหลของน้ำยาง (รูปที่ 3.38) เมื่อนำฟิล์มยางที่ได้จากการจุ่มมาถ่ายภาพ AFM เพื่อดูลักษณะของพื้นผิวที่อุณหภูมิการอบชิ้นงานที่อุณหภูมิห้อง 60°C และ 120°C (รูปที่ 3.39) จะเห็นลักษณะพื้นผิวของฟิล์ม

ยางที่ติดเกาะแม่พิมพ์มีลักษณะคล้ายๆ กัน เนื้อยางมีการเรียงตัวอย่างหนาแน่น แต่เมื่อได้พิจารณาความขรุขระของฟิล์มยางที่อบที่ 120 °C ความขรุขระของฟิล์มยางที่ได้จากแม่พิมพ์เคลือบด้วยสารแคตะลิสต์ที่มีการได้ไปโบรอนและนิกเกิลจะมีความขรุขระน้อยที่สุดอยู่ที่ 45 นาโนเมตร และฟิล์มยางที่ได้จากแม่พิมพ์ที่ไม่เคลือบแล้วใช้สารจับตัวมีความขรุขระสูงสุดอยู่ที่ 166 นาโนเมตร (ตารางที่ 3.14)

ตารางที่ 3.14 ค่าความขรุขระของฟิล์มยางที่วิเคราะห์ด้วย AFM ที่อุณหภูมิในการอบยางต่างๆ กัน

ลักษณะแม่พิมพ์	ความขรุขระของฟิล์มยาง (นาโนเมตร)		
	อุณหภูมิห้อง	60°C	120 °C
Uncoated+Coagulant	40	48	166
Uncoated	54	66	65
Pure TiO ₂	53	62	49
3Ni/B/TiO ₂	62	66	45
4Ni/B/N/TiO ₂	53	51	70



รูปที่ 3.38 ภาพถ่ายฟิล์มยางที่ใช้แม่พิมพ์ลักษณะต่างกันอบยางที่อุณหภูมิ 120 °C

	อุณหภูมิห้อง	60°C	120 °C
Uncoated+Coagulant			
Uncoated			
Pure TiO₂			
3Ni/B/TiO₂			
4Ni/B/N/TiO₂			

รูปที่ 3.39 ภาพถ่ายฟิล์มบางด้วย AFM ที่ใช้แม่พิมพ์ลักษณะต่างกันอบยวที่อุณหภูมิต่างๆ กัน

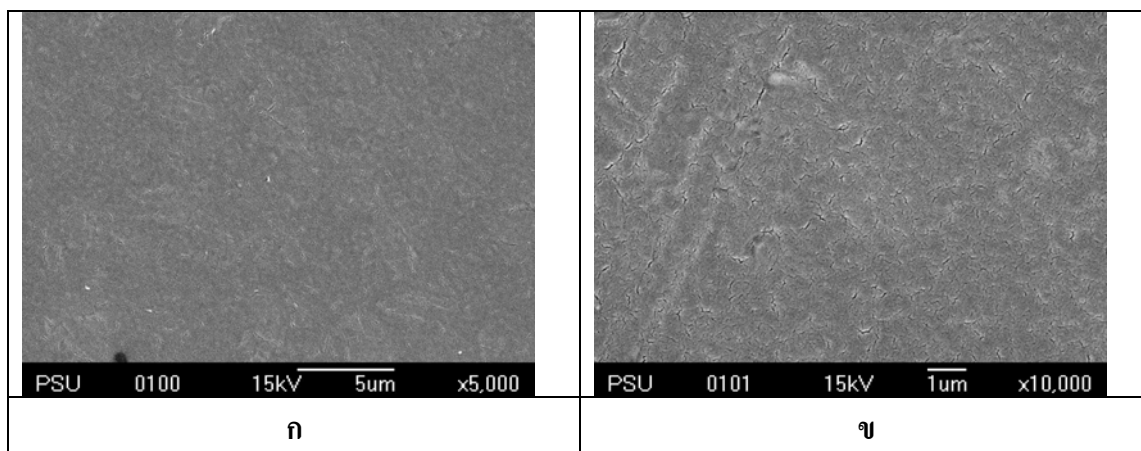
เมื่อนำฟิล์มยางที่ได้ไปวิเคราะห์หาปริมาณคาร์บอน ไฮโดรเจน และซัลเฟอร์ พบว่าฟิล์มยางที่ได้จากแม่พิมพ์ที่เคลือบด้วยสารแคตะลิสต์จะมีปริมาณคาร์บอน ไฮโดรเจน และซัลเฟอร์สูงกว่าฟิล์มยางที่ได้จากแม่พิมพ์ไม่ได้เคลือบ (ตารางที่ 3.15) ธาตุเหล่านี้เป็นองค์ประกอบหลักของน้ำยางและสารเคมีในการเตรียมน้ำยาง ซึ่งเมื่อนำฟิล์มยางไปทำการทดสอบการบวมตัว (Swelling) โดยการแช่ในสารละลายโทลูอีน ได้ผลว่าฟิล์มยางที่ได้จากแม่พิมพ์ที่เคลือบสารแคตะลิสต์มีการบวมตัวที่น้อยกว่าเมื่อเทียบกับฟิล์มยางที่ได้จากแม่พิมพ์ไม่ได้เคลือบเมื่อเวลาผ่านไป 48 ชั่วโมง (ตารางที่ 3.16) ซึ่งแสดงให้เห็นว่าแม่พิมพ์ที่เคลือบสารแคตะลิสต์เมื่อจุ่มน้ำยางแล้วไปอบทำให้เกิดโครงสร้างร่างแหที่เกิดในยาง (Crosslink) ได้ดีซึ่งสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์หาปริมาณธาตุในฟิล์มยาง ภาพถ่าย SEM ของฟิล์มยางที่ได้จากแม่พิมพ์เคลือบด้วยสารไทเทเนียมไดโบรอนและนิกเกิลจะมีลักษณะเรียบและมีการจัดเรียงตัวที่หนาแน่น (รูปที่ 3.40)

ตารางที่ 3.15 วิเคราะห์หาปริมาณธาตุต่างๆ ที่มีในฟิล์มยางเปรียบเทียบกับฟิล์มที่เคลือบกับไม่เคลือบสารแคตะลิสต์

ธาตุ	เปอร์เซ็นต์ธาตุ	
	Uncoated	Coated
คาร์บอน	83.69	84.79
ไฮโดรเจน	11.54	11.72
ซัลเฟอร์	0.90	0.95
อื่นๆ	3.87	2.54

ตารางที่ 3.16 การบวมตัวและปริมาณ โครงสร้างร่างแหที่เกิดในยางเปรียบเทียบกับฟิล์มที่เคลือบกับไม่เคลือบสารแคตะลิสต์

ลักษณะแม่พิมพ์	Swelling (%)			Crosslink density		
	12 h	24 h	48 h	12 h	24 h	48 h
Uncoated	5.2	8.4	11.3	0.19	0.12	0.09
Coated	1.3	2.7	2.9	0.77	0.37	0.34



รูปที่ 3.40 ภาพถ่าย SEM ของฟิล์มยางที่ได้จากแม่พิมพ์เคลือบสารแคตะลิสต์กำลังขยาย ก) 5,000 เท่า ข) 10,000 เท่า

3.3.3 ผลการทดสอบสมบัติทางกายภาพของฟิล์มยางที่ได้จากแม่พิมพ์เคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์

การจุ่มน้ำยางโดยตรงโดยไม่มีสารจับตัว (Straight dip) สำหรับแม่พิมพ์แก้วที่ไม่มีการเคลือบสารแคตะลิสต์ความหนาของฟิล์มยางเฉลี่ย 0.080 มิลลิเมตร (ตารางที่ 3.17) ซึ่งเมื่อใช้แม่พิมพ์แก้วที่มีการเคลือบด้วยสารแคตะลิสต์ความหนาของฟิล์มยางเฉลี่ย 0.096-0.097 มิลลิเมตร ซึ่งเมื่อพิจารณาแม่พิมพ์เซรามิกที่ไม่มีการเคลือบสารแคตะลิสต์ความหนาของฟิล์มยางเฉลี่ย 0.087 มิลลิเมตร ซึ่งเมื่อใช้แม่พิมพ์เซรามิกที่มีการเคลือบด้วยสารแคตะลิสต์ความหนาของฟิล์มยางอยู่ในช่วง 0.109-0.112 มิลลิเมตร มีความหนาเพิ่มขึ้นจากแม่พิมพ์แก้วที่มีการเคลือบสารแคตะลิสต์ 24 เปอร์เซ็นต์ จากผลการทดลองแม่พิมพ์ที่ไม่มีการเคลือบแล้วทำการใช้สารช่วยจับตัว (Coagulant dip) จะมีความหนามากที่สุด โดยที่แม่พิมพ์แก้วและแม่พิมพ์เซรามิกความหนาของฟิล์มยางเฉลี่ย 0.205 มิลลิเมตร 0.223 มิลลิเมตร ตามลำดับ ความหนาเพิ่มขึ้นคิดเป็นร้อยละ 46-48 เมื่อเทียบกับฟิล์มยางที่ได้จากแม่พิมพ์ที่เคลือบสารแคตะลิสต์ ซึ่งการใช้แม่พิมพ์เซรามิกมีความหนามากกว่าแม่พิมพ์แก้ว อันเนื่องมาจากแม่พิมพ์เซรามิกมีความพรุนสูงกว่าแม่พิมพ์แก้ว สำหรับการใส่สารไดปโบรอนและนิกเกิล เทียบกับไดปโบรอน ในโตรเจนและนิกเกิล หรือใส่สารไทเทเนียมไดออกไซด์เคลือบแม่พิมพ์ฟิล์มยางมีความหนาใกล้เคียงกัน

ตารางที่ 3.17 ความหนาของฟิล์มยางที่ตัดเป็นรูปดัมเบลที่ได้จากแม่พิมพ์ลักษณะต่างๆ

ตัวอย่างฟิล์มยางที่ได้จากแม่พิมพ์	แม่พิมพ์แก้ว	แม่พิมพ์เซรามิก
	ความหนา (mm)	ความหนา (mm)
Uncoated	0.080	0.087
Uncoated+Coagulant	0.205	0.223
TiO ₂	0.096	0.109
3Ni/B/TiO ₂	0.097	0.110
4Ni/B/N/TiO ₂	0.096	0.112

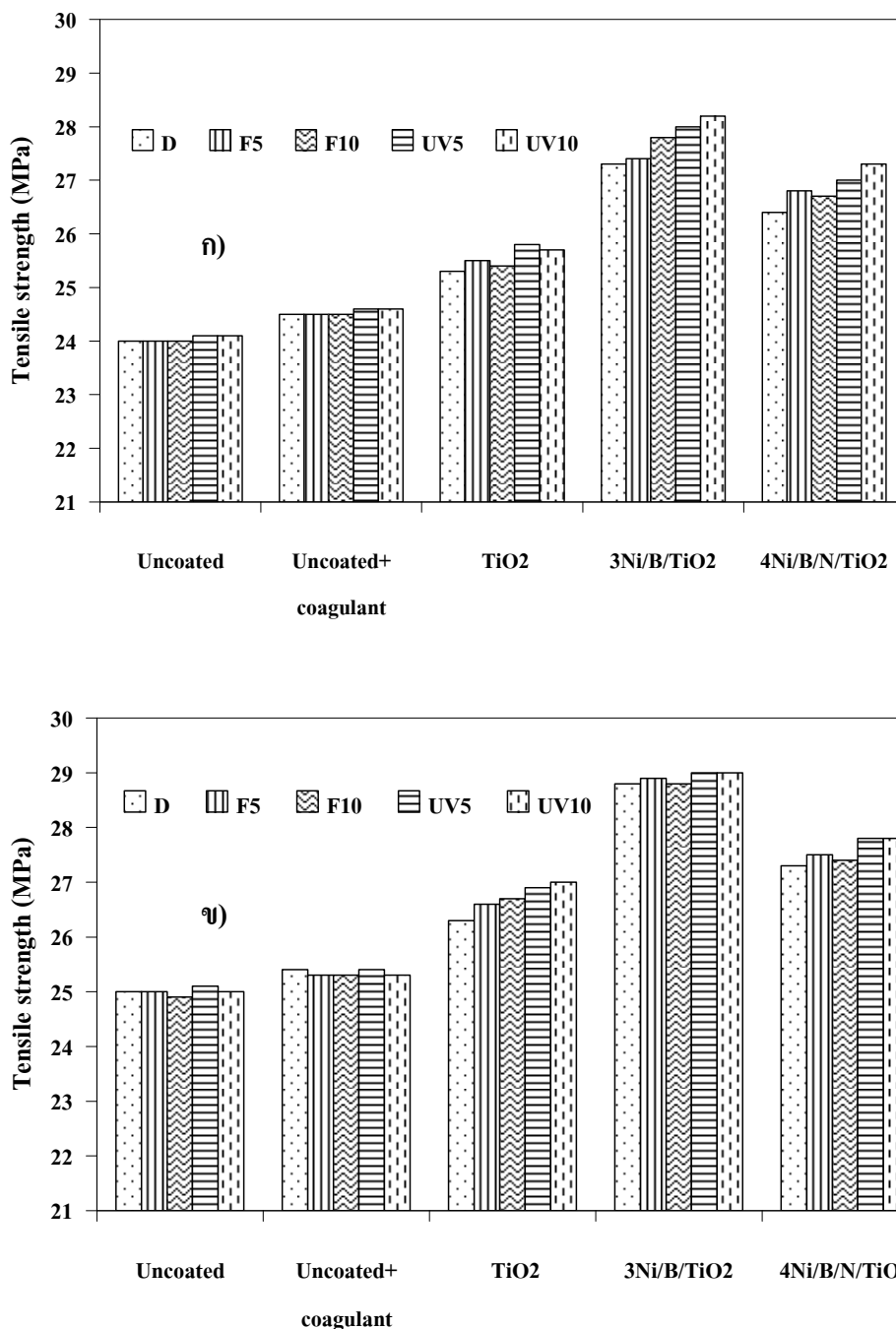
ตารางที่ 3.18 การทดสอบการรั่วไหลโดยการบรรจุน้ำในฟิล์มยางที่ได้จากแม่พิมพ์ลักษณะต่างๆ โดยการทำชิ้นงานตัวอย่างละ 30 ครั้ง

ตัวอย่างฟิล์มยางที่ได้จากแม่พิมพ์	แม่พิมพ์แก้ว		แม่พิมพ์เซรามิก	
	การรั่วไหล	จำนวนครั้งของการรั่ว	การรั่วไหล	จำนวนครั้งของการรั่ว
Uncoated	มีการรั่วไหล	2 ครั้ง	มีการรั่วไหล	2 ครั้ง
Uncoated+Coagulant	มีการรั่วไหล	6 ครั้ง	มีการรั่วไหล	7 ครั้ง
TiO ₂	ไม่มีการรั่วไหล	-	ไม่มีการรั่วไหล	-
3Ni/B/TiO ₂	ไม่มีการรั่วไหล	-	ไม่มีการรั่วไหล	-
4Ni/B/N/TiO ₂	ไม่มีการรั่วไหล	-	ไม่มีการรั่วไหล	-

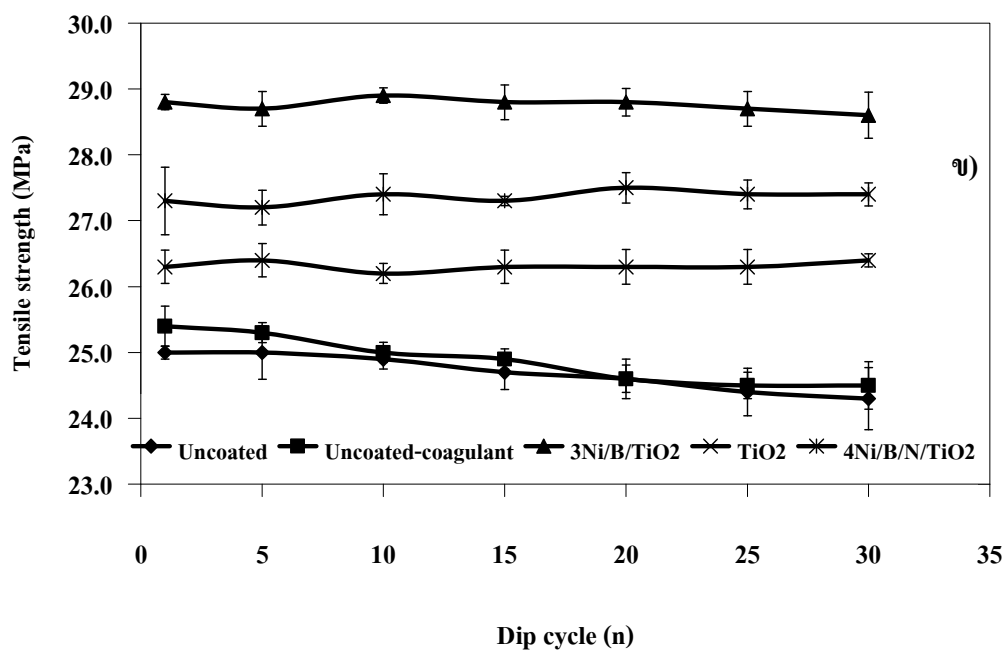
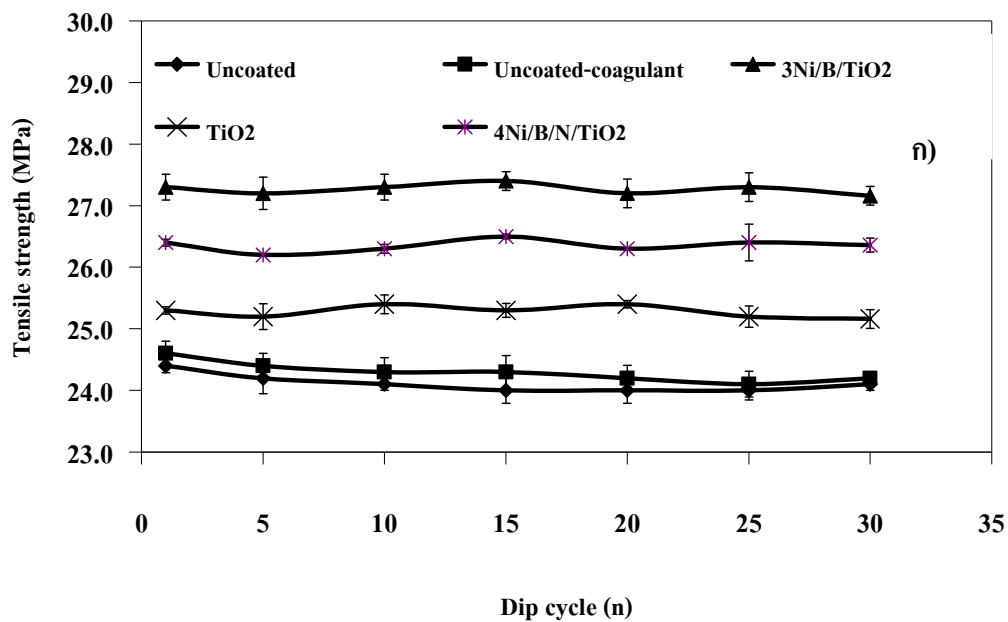
จากผลการทดลองจุ่มน้ำยางโดยใช้แม่พิมพ์แบบต่างๆทำซ้ำกัน 30 ครั้ง แล้วบรรจุน้ำในฟิล์มยางที่ได้จากการจุ่มแล้วดูการรั่วไหลปรากฏว่า แม่พิมพ์แก้วและเซรามิกที่ไม่มีการเคลือบสารแคตะลิสต์มีการรั่วไหล 2 ครั้ง สำหรับแม่พิมพ์แก้วและเซรามิกที่ไม่มีการเคลือบและใช้สารจับตัว การรั่วไหล 6 และ 7 ครั้ง ตามลำดับ (ตารางที่ 3.18) ในส่วนแม่พิมพ์แก้วและเซรามิกที่เคลือบสารแคตะลิสต์ทดสอบการรั่วไหลผลปรากฏว่าไม่มีการรั่วไหล

3.3.4 ผลการทดสอบแรงดึงของฟิล์มยางที่ได้จากแม่พิมพ์เคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์

ผลการทดสอบแรงดึงของฟิล์มยางที่ภาวะต่างๆ ตามกระบวนการที่ได้ทำการทดลองได้แก่ นำแม่พิมพ์จุ่มน้ำยางโดยตรง (D)



รูปที่ 3.41 ผลการทดสอบแรงดึงที่ภาวะต่างๆ เมื่อ ก) แม่พิมพ์แก้ว ข) แม่พิมพ์เซรามิก



รูปที่ 3.42 ผลการทดสอบแรงดึงที่มีการใช้แม่พิมพ์แบบต่างๆ ซ้ำกันหลายๆ ครั้ง เมื่อ ก) แม่พิมพ์แก้ว ข) แม่พิมพ์เซรามิก

นำแม่พิมพ์ล้างน้ำแล้วผ่านแสงฟลูออเรสเซนซ์ที่ 5 นาที และ 10 นาที (F5 และ F10 ตามลำดับ) นำแม่พิมพ์ล้างน้ำแล้วผ่านรังสียูวีที่ 5 นาที และ 10 นาที (UV5 และ UV10 ตามลำดับ) โดยใช้แม่พิมพ์แก้ว (รูปที่ 3.41 ก) โดยใช้แม่พิมพ์เซรามิก (รูปที่ 3.41 ข) จากผลการทดลองของแม่พิมพ์แก้วที่ไม่ได้เคลือบและแม่พิมพ์ไม่ได้เคลือบใช้สารจับตัวสามารถรับแรงดึงอยู่ที่ 24 MPa และ 24.5 MPa ตามลำดับ สำหรับแม่พิมพ์ที่มีการเคลือบด้วยสารแคตะลิสต์ที่โต้ปด้วยโบรอนและนิกเกิลสามารถรับแรงดึงอยู่ในช่วง 27.3-28.2 MPa ส่วนแม่พิมพ์ที่มีการเคลือบด้วยสารแคตะลิสต์ที่โต้ปด้วยโบรอน ในโตรเจนและนิกเกิลและแม่พิมพ์ที่เคลือบด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์สามารถรับแรงดึงอยู่ในช่วง 26.4-27.3 MPa และ 25.3-25.8 MPa ตามลำดับ สำหรับแม่พิมพ์เซรามิกที่ไม่ได้เคลือบและแม่พิมพ์ไม่ได้เคลือบใช้สารจับตัวสามารถรับแรงดึงอยู่ที่ 25 MPa และ 25.4 MPa ตามลำดับ สำหรับแม่พิมพ์ที่มีการเคลือบด้วยสารแคตะลิสต์ที่โต้ปด้วยโบรอนและนิกเกิลสามารถรับแรงดึงอยู่ในช่วง 28.8-29 MPa ส่วนแม่พิมพ์ที่มีการเคลือบด้วยสารแคตะลิสต์ที่โต้ปด้วยโบรอน ในโตรเจนและนิกเกิลและแม่พิมพ์ที่เคลือบด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์สามารถรับแรงดึงอยู่ในช่วง 27.3-27.8 MPa และ 26.3-27.0 MPa ตามลำดับ หากพิจารณาการจุ่มน้ำยาโดยใช้แม่พิมพ์ที่สถานะที่ผ่านรังสียูวีที่ 10 นาที และ 5 นาที จะมีการรับแรงดึงที่คิดว่าที่สถานะที่ผ่านแสงฟลูออเรสเซนซ์สำหรับระยะเวลาในการส่องแสงไม่มีผลแตกต่างกันมากนัก สำหรับผลการรับแรงดึงของแม่พิมพ์ที่มีการเคลือบด้วยสารแคตะลิสต์เทียบกับไม่ได้เคลือบทำการจุ่มน้ำยาโดยใช้แม่พิมพ์ซ้ำกันถึง 30 ครั้ง สำหรับแม่พิมพ์แก้ว (รูปที่ 3.42 ก) ผลการรับแรงดึงของฟิล์มยางโดยใช้แม่พิมพ์ที่เคลือบด้วยโบรอนและนิกเกิลจะมีผลการรับแรงดึงที่ดีที่สุด 27.4 MPa รองลงมาคือแม่พิมพ์ที่เคลือบด้วยโบรอน ในโตรเจนและนิกเกิล 26.3 MPa แม่พิมพ์เคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์ 25.3 MPa แม่พิมพ์ที่ไม่ได้เคลือบใช้สารจับตัว 24.3 MPa และแม่พิมพ์ที่ไม่ได้เคลือบไม่ใช้สารจับตัว 24 MPa ตามลำดับ สำหรับแม่พิมพ์เซรามิก (รูปที่ 3.42 ข) ผลการรับแรงดึงของฟิล์มยางโดยใช้แม่พิมพ์ที่เคลือบด้วยโบรอนและนิกเกิลจะมีผลการรับแรงดึงที่ดีที่สุด 28.8 MPa รองลงมาคือแม่พิมพ์ที่เคลือบด้วยโบรอน ในโตรเจนและนิกเกิล 27.3 MPa แม่พิมพ์เคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์ 26.3 MPa แม่พิมพ์ที่ไม่ได้เคลือบใช้สารจับตัว 25.4 MPa และแม่พิมพ์ที่ไม่ได้เคลือบไม่ใช้สารจับตัว 25 MPa ตามลำดับซึ่งความสามารถรับแรงดึงของฟิล์มยางของแม่พิมพ์เซรามิกจะมีค่ามากกว่าเพียงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับแม่พิมพ์แก้วและเมื่อใช้แม่พิมพ์ซ้ำกันหลายๆครั้งจะเห็นได้ว่าแม่พิมพ์ที่เคลือบสารแคตะลิสต์สามารถรับแรงดึงอยู่ในช่วงที่ยังคงที่หากเปรียบเทียบกับแม่พิมพ์ที่ไม่ได้เคลือบด้วยสารแคตะลิสต์จะพบว่าผลการรับแรงดึงจะเริ่มลดลงเมื่อมีการใช้แม่พิมพ์มากกว่า 20 ครั้งขึ้นไป การที่แรงดึงของฟิล์มยางของแม่พิมพ์ที่เคลือบด้วยสารแคตะลิสต์มีค่าสูงอันสืบเนื่องมาจากความสม่ำเสมอของฟิล์มยางที่เกาะบนแม่พิมพ์และเกิดการเชื่อม โยง (Crosslink) ที่สมบูรณ์ในฟิล์มยาง ดังที่ได้อธิบายมาก่อนหน้านี้

3.3.5 ผลการทำความสะอาดตัวเองของแม่พิมพ์

จากผลการล้างแม่พิมพ์ที่เป็นแก้วและเซรามิกได้ผลสรุป (ตารางที่ 3.19) ซึ่งกระบวนการที่ 1 นำแม่พิมพ์ที่ไม่ได้ทำการเคลือบสารแคตะลิสต์ ล้างด้วยกรดไนตริก (HNO_3) ต่อด้วยการล้างด้วยด่างโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้นของกรดและด่างเท่ากับ 2 % หลังจากนั้นนำไปล้างน้ำแล้วนำไปจุ่มในสารจับตัว (Coagulant) คือแคลเซียมคลอไรด์ความเข้มข้น 10% จึงนำแม่พิมพ์ไปจุ่มน้ำอย่างต่อเนื่อง

ตารางที่ 3.19 ผลการล้างแม่พิมพ์แก้วและเซรามิกในลักษณะต่างกัน

การวิเคราะห์	กระบวนการที่ 1	กระบวนการที่ 2	กระบวนการที่ 3	กระบวนการที่ 4
มองด้วยตาเปล่า	ไม่เห็นรอยคราบ	ไม่เห็นรอยคราบ	ไม่เห็นรอยคราบ	ไม่เห็นรอยคราบ
ส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์	ไม่เห็นรอยคราบ	เห็นรอยคราบเมื่อใช้งานมากกว่า 10 ครั้ง	ไม่เห็นรอยคราบ	ไม่เห็นรอยคราบ

กระบวนการที่ 2 และ 3 นำแม่พิมพ์ที่ไม่ได้ทำการเคลือบและทำการเคลือบสารแคตะลิสต์ ตามลำดับล้างด้วยน้ำ แล้วจึงนำแม่พิมพ์ไปจุ่มน้ำอย่างต่อเนื่อง

กระบวนการที่ 4 นำแม่พิมพ์ที่เคลือบสารแคตะลิสต์ล้างด้วยน้ำ หลังจากนั้นนำไปวางแม่พิมพ์ที่มีการฉายรังสียูวีและแสงฟลูออเรสเซนซ์นาน 5 และ 10 นาที แล้วจึงนำแม่พิมพ์ไปจุ่มน้ำอย่างต่อเนื่อง จะเห็นว่ากระบวนการที่ 2 ที่ใช้งานมากกว่า 10 ครั้งในการจุ่มน้ำสามารถมองเห็นคราบความสกปรกที่ติดกับแม่พิมพ์ ส่วนกระบวนการ 1, 3 และ 4 ไม่เห็นรอยคราบใดๆ บ่งชี้ให้เห็นว่าแม่พิมพ์ที่เคลือบด้วยสารแคตะลิสต์สามารถที่จะทำความสะอาดง่ายกว่าแม่พิมพ์ที่ไม่ได้เคลือบ

บทที่ 4

บทสรุปและข้อเสนอแนะ

4.1 สรุปผล

การวิจัยนี้ได้พัฒนาสารเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์และสารเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ได้ไปด้วยโบรอน ไนโตรเจนและนิกเกิล แล้วทำการเคลือบบนแม่พิมพ์ที่เป็นแก้วและเซรามิก ซึ่งพบว่ามีอิทธิพลต่างๆ ที่มีผลต่อสมบัติของสารเคลือบที่สังเคราะห์ได้ ดังนี้

4.1.1 อิทธิพลของอุณหภูมิ

- อุณหภูมิในการเผาอิทธิพลต่อการเกิดเฟสต่างๆ ของฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ เฟสอะนาเทสเกิดที่อุณหภูมิในช่วง 400 – 600 °C

- อุณหภูมิที่สูงขึ้นส่งผลให้ขนาดผลึกของไทเทเนียมไดออกไซด์ใหญ่ขึ้น

- อุณหภูมิในการเผาฟิล์มที่ 400 °C ให้ผลประสิทธิภาพปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกสูงกว่าที่ 500 °C และ 600 °C

4.1.2 อิทธิพลของสารเติมโบรอน ไนโตรเจน และนิกเกิล

- นิกเกิลที่ได้ปลงไปมีผลต่อการเกิดโครงสร้างผลึกของเฟสอะนาเทสในไทเทเนียมไดออกไซด์ เมื่อเพิ่มปริมาณของนิกเกิลมีผลในการยับยั้งไม่ให้เกิดเฟสอะนาเทสที่อุณหภูมิ 400 °C ได้

- ขนาดผลึกของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ได้ไปด้วยโบรอน ไนโตรเจน และนิกเกิลมีขนาดเล็กลง เมื่อเทียบกับขนาดผลึกของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ไม่มีการได้ปลงนั้นสารได้ปลงดังกล่าวสามารถยับยั้งการโตของขนาดผลึกในไทเทเนียมไดออกไซด์ได้

- ฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีการได้ไปด้วยโบรอนและนิกเกิล (Ni/B/TiO₂) ให้ประสิทธิภาพปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกได้ดีกว่าฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีการได้ไปด้วยโบรอน ไนโตรเจนและนิกเกิล (Ni/B/N/TiO₂) โดยที่ฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีการได้ไปด้วยโบรอนและนิกเกิล (Ni/B/TiO₂) ให้ประสิทธิภาพปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกได้ดีที่สุดที่มีการได้ป็นิกเกิล 3 เปอร์เซ็นต์โมล สามารถย่อยสลายสีเมทิลีนบลูได้ถึง 94 % เมื่อทดสอบที่ 6 ชั่วโมง และปริมาณการได้ป็นิกเกิล 2 เปอร์เซ็นต์โมล จะมีค่ามุมสัมผัสที่น้อยที่สุดโดยมีมุมสัมผัส 0° ที่เวลาผ่านไป 20 นาที เมื่อได้รับการกระตุ้นด้วยรังสียูวีและที่บรรยากาศปกติ ในส่วนฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีการได้ไปด้วยโบรอน ไนโตรเจนและนิกเกิล (Ni/B/N/TiO₂) ให้ประสิทธิภาพปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติก

ได้ดีที่สุดที่มีการได้ปนิกเกิด 4 เปอร์เซ็นต์โมล สามารถย่อยสลายสีเมทิลีนบลูได้ถึง 87 % เมื่อทดสอบที่ 6 ชั่วโมง และปริมาณการได้ปนิกเกิด 3 เปอร์เซ็นต์โมล จะมีค่ามุมสัมผัสที่น้อยที่สุดโดยมีมุมสัมผัส 0° ที่เวลาผ่านไป 15 นาทีเมื่อได้รับการกระตุ้นด้วยรังสียูวีและที่บรรยากาศปกติ สารได้ที่เป็นนิกเกิดและไนโตรเจนสามารถปรับปรุงสมบัติไฮโดรฟิลิกหรือทำให้พื้นผิวชอบน้ำมากขึ้น และทำให้พื้นผิวมีสมบัติซูเปอร์ไฮโดรฟิลิกซึ่งช่วยให้พื้นผิวมีสมบัติทำความสะอาดได้ง่าย (Self-cleaning)

4.1.3 อิทธิพลของแม่พิมพ์ที่เคลือบด้วยสารแคตะลิสต์ต่อฟิล์มยางที่ได้

ลักษณะฟิล์มยางที่ได้จากแม่พิมพ์ที่เคลือบด้วยฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ได้ปด้วยโบรอนและนิกเกิด (Ni/B/TiO_2) และที่ได้ปด้วยโบรอน ไนโตรเจนและนิกเกิด (Ni/B/N/TiO_2) ลักษณะฟิล์มยางมีลักษณะที่เรียกว่าแม่พิมพ์ที่ไม่ได้เคลือบและแม่พิมพ์ที่ไม่ได้เคลือบใช้สารช่วยจับตัว อีกทั้งยังส่งผลให้ฟิล์มยางสามารถทนต่อแรงดึงที่สูงกว่าแม่พิมพ์ที่ไม่ได้เคลือบ เนื่องจากแม่พิมพ์ที่มีการเคลือบด้วยสารแคตะลิสต์สามารถให้ยางเกิดการ Crosslink ได้ดีกว่าแม่พิมพ์ที่ไม่ได้ทำการเคลือบ สำหรับสารเคลือบที่ได้ปนิกเกิด 2-3 เปอร์เซ็นต์โมล Ni/B/TiO_2 เป็นสูตรที่เหมาะสมสำหรับการนำไปใช้งานด้านทำความสะอาดด้วยตัวเองของแม่พิมพ์ต่อไป

4.1.4 อิทธิพลของแม่พิมพ์ที่เคลือบด้วยสารแคตะลิสต์ต่อการทำความสะอาดตัวเอง

แม่พิมพ์แก้วและเซรามิกที่เคลือบด้วยฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ได้ปด้วยโบรอนและนิกเกิด (Ni/B/TiO_2) รวมทั้งฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ได้ปด้วยโบรอน ไนโตรเจนและนิกเกิด (Ni/B/N/TiO_2) สามารถทำความสะอาดได้ง่ายกว่าแม่พิมพ์ที่ไม่ได้ทำการเคลือบจากการทดลองการจุ่มน้ำยางแล้วทำความสะอาดแม่พิมพ์ ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับการใช้กรดใช้ด่างในการล้างแบบดั้งเดิม

4.2 ข้อเสนอแนะ

การเคลือบแม่พิมพ์เพื่อให้ง่ายต่อการทำความสะอาดในการวิจัยนี้เพื่อนำไปประยุกต์ใช้ในโรงงานผลิตผลิตภัณฑ์ยางแบบจุ่มเช่น ถังมือยาง ถังยางอนามัย เป็นต้น และลดขั้นตอนการผลิตในส่วนการใช้สารช่วยจับตัว (Coagulant) ได้ ทั้งนี้หากมีการวิจัยในอนาคตก็สามารถนำสารเติมตัวอื่นที่สามารถมาได้ในสารไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีสมบัติที่ง่ายต่อการทำความสะอาดได้เช่นกัน และควรศึกษาด้วยยางไนไตรด์ด้วยอีกทั้งควรทดสอบการซึมผ่านของฟิล์มยางที่ได้ด้วยมาตรฐานตามที่กำหนด

บรรณานุกรม

- จิรวิทย์ จำปา ลัดดาวัลย์ ชูแก้ว.ผลิตภัณฑ์ยาง 1. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลวิทยาเขต นครศรีธรรมราช
- ธรรมนุญ ศรีทะวงศ์. 2550. 'ไททานี:ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบใช้แสงร่วม.วิทยาลัยปิโตรเลียมและปิโตรเคมี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. <http://www.vcharkarn.com/varticle/27809>. (สืบค้นเมื่อ 7 สิงหาคม 2552).
- พรณะ เตียงพานิช นัศรแก้ว สมเจริญวัฒนา เกี้ยวลี พลุกษาทร และชูชาติ บารมี. 2545.การลดการใช้พลังงานในกระบวนการผลิตถุงมือยาง. ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ถ.พญาไท กรุงเทพฯ 10330
- เล็ก สีคง. *วัสดุวิศวกรรมและอุตสาหกรรม*. หน่วยโสตทัศนศึกษา. คณะวิศวกรรมศาสตร์. มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์. สงขลา. 2547.
- วารกรณ์ ขจรไชยกุล พลชิต บัวแก้ว และภัทรา กานตศิลป์. *น้ำยางข้นและการผลิตถุงมือยาง*. เอกสารประกอบวิชาการผลิตภัณฑ์ยาง. สถาบันวิจัยยางกรมวิชาการเกษตร. ฉบับที่ 3, 2533.
- เอกสารปฏิบัติการเทคโนโลยียางมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
- C.J. Brinker and A.J. Hurd, *J. Phys.*III (Fr.) 4, 1231 (1994)
- Radhika, B. Synthesis and photocatalysis study of brookite phase titanium dioxide nanoparticle. A thesis presented to the graduate school of Clemson university. **2007**
- Asahi, R.; Morikawa, T. Nitrogen complex species and its chemical nature in TiO₂ for visible-light sensitized photocatalysis. *Chemical Physics*. **2007**, 339, 57–63.
- Awitor, K.O.; Rivaton, A. J.; Gardette, L.; Down, A.J.; Johnson, M.B. Photo-protection and photocatalytic activity of crystalline anatase titanium dioxide sputter-coated on polymer films *Thin Solid Films*. **2008**, 516, 2286–2291.
- Chabas, A.; Lombardo, T.; Cachier, H.; Pertuisot, M.H.; Oikonomou, K.; Falcone, R.; Verita', M.; Geotti-Bianchin, F. Behaviour of self-cleaning glass in urban atmosphere

- Building and Environment. **2008**, 43, 2124-2131.
- Chen, D.; Yang, D.; Wang, Q.; Jiang, Z. Effects of Boron Doping on Photocatalytic Activity and Microstructure of Titanium Dioxide Nanoparticles. *Applied Chemistry*. **2006**, 45, 4110-4116.
- Cheng, P.; Li, W.; Zhou, T.; Jin, Y.; Gu M. Physical and photocatalytic properties of zinc ferrite doped titania under visible light irradiation. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*. **2004**, 168, 97-101.
- Dong, F.; Zhao, W.; Wu, Z.; Guo, S. Band structure and visible light photocatalytic activity of multi-type nitrogen doped TiO₂ nanoparticles prepared by thermal decomposition. *Journal of Hazardous Materials*. **2008**
- Gombac, V.; De Rogatis, L.; Gasparotto, A.; Vicario, G.; Montini, T.; Barreca, D.; Balducci, G., Fornasiero, P.; Tondello, E.; Graziani M. TiO₂ nanopowders doped with boron and nitrogen for photocatalytic applications. *Chemical Physics*. **2007**, 339, 111-123.
- Grabowska, E.; Zaleska, A.; Sobczak, J.W.; Gazda, M.; Hupka, J. Boron-doped TiO₂: Characteristics and photoactivity under visible light. *Procedia Chemistry*. **2009**, 1, 1553-1559.
- Huan, Y.; Xuxu, Z.; Zhongyi, Y.; Feng, T.; Beibei, F.; Keshan, H. Preparation of Nitrogen-doped TiO₂ Nanoparticle Catalyst and Its Catalytic Activity under Visible Light. *Chin. J. Chem. Eng.*, **2007** 15(6) 802-807.
- Huang, Y.; Ho, W.; Ai, Z.; Song, X.; Zhang, L.; Lee, S. Aerosol-assisted flow synthesis of B-doped, Ni-doped and B-Ni-codoped TiO₂ solid and hollow microspheres for photocatalytic removal of NO. *Applied Catalysis B: Environmental*. **2009**, 89, 398-405.
- Huang, D.; Liao, S.; Liu, J.; Dang, Z.; Petrik, L. Preparation of visible-light responsive N-F-codoped TiO₂ photocatalyst by a sol-gel-solvothermal method. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*. **2006**, 184, 282-288.
- Hwang, K.S.; Jeong J.H.; Ahn, J.H.; Kim, B.H. Hydrophilic/hydrophobic conversion of Ni-doped TiO₂ thin films on glass substrates. *Ceramics International*. **2006**, 32, 935-937.

- Ihara, T.; Miyoshi, M.; Iriyama, Y.; Matsumoto, O.; Sugihara, S. Visible-light-active titanium oxide photocatalyst realized by an oxygen-deficient structure and by nitrogen doping. *Applied Catalysis B: Environmental*. **2003**, 42, 403–409.
- Jeffrey, C.S.W.; Chih, H.C. A visible-light response vanadium-doped titania nanocatalyst by sol–gel method. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*. **2004**, 163, 509–515.
- Joung, S.K.; Amemiya, T.; Murabayashi, M.; Itoh, K. Relation between photocatalytic activity and preparation conditions for nitrogen-doped visible light-driven TiO₂ photocatalysts. *Applied Catalysis A: General*. **2006**, 312, 20–26.
- Khana, R.; Kima, S.W.; Kima, T.J.; Nam, C.M. Comparative study of the photocatalytic performance of boron–iron Co-doped and boron-doped TiO₂ nanoparticles. *Materials Chemistry and Physics*. **2008**, 112, 167–172.
- Kisand, V.; Joost, U.; Reedo, V.; Parna, R.; Tatte, T.; Shulga, J.; Saar, A.; Matisen, L.; Kikas, A.; Kinka, I. Influence of the heating temperature on the properties of nickel doped TiO₂ films prepared by sol–gel method. *Applied Surface Science*. **2010**, 256, 4538–4542.
- Li, Y.; Ma, G.; Peng, S.; Lu, G.; Li, S. Boron and nitrogen co-doped titania with enhanced visible-light photocatalytic activity for hydrogen evolution. *Applied Surface Science*. **2008**, 254, 6831–6836.
- Li, D.; Huang, H.; Chen, X.; Chen, Z.; Li, W.; Ye, D.; Fu, X. New synthesis of excellent visible-light TiO₂N_x photocatalyst using a very simple method. *Journal of Solid State Chemistry*. **2007**, 180, 2630–2634.
- Liao, S.; Donggen, H.; Yu, D.; Su, Y.; Yuan, G. Preparation and characterization of ZnO/TiO₂, SO₄²⁻/ZnO/TiO₂ photocatalyst and their photocatalysis. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*. **2004**, 168, 7–13.
- Lin, C.Y.; Fang, Y.K.; Kuo, C.H.; Chen, S.F.; Lin, C.S.; Chou, T.H.; Lee, Y.H.; Lin, J.C.; Hwang, S.B. Design and fabrication of a TiO₂ nano-silicon composite visible light photocatalyst. *Applied Surface Science*. **2006**, 253, 898–903.
- Ling, Q.; Sun, J.; Zhou, Q. Preparation and characterization of visible-light-driven titania

- photocatalyst co-doped with boron and nitrogen. *Applied Surface Science*. **2008**, 254, 3236–3241.
- Masahashi, N.; Oku, M. Superhydrophilicity and XPS study of boron-doped TiO₂. *Applied Surface Science*. **2008**, 254, 7056–7060.
- Ming, J.; Xintong, Z.; Alexei, V.; Takafumi, N.; Taketoshi, Murakami.; Akira, F. Surface modification of natural rubber by TiO₂ film. *Surface & Coatings Technology*. **2008**, 202, 1364–1370.
- Moon, S.C.; Mametsuka, H.; Suzuki, E.; Nakahara, Y. Characterization of titanium-boron binary oxides and their photocatalytic activity for stoichiometric decomposition of water. *Catalysis Today*. **1998**, 45, 79-84.
- Peng, F.; Cai, L.; Yu, H.; Wang, H.; Yang, J. Synthesis and characterization of substitutional and interstitial nitrogen-doped titanium dioxides with visible light photocatalytic activity. *Journal of Solid State Chemistry*. **2008**, 181, 130–136.
- Qin, H.; Gu, G.B., Liu, S. Preparation of nitrogen-doped titania and its photocatalytic activity. *Rare metal*. **2007**, 26 (3), 254-262.
- Qin, H.L.; Gu, G.B.; Liu, S. Preparation of nitrogen-doped titania with visible-light activity and its application. *C. R. Chimie*. **2008**, 11, 95-100.
- Qingju, L.; Xinghui, W.; Baoling, W.; Qiang, L. Preparation and super-hydrophilic properties of TiO₂/SnO₂ composite films. *Materials Research Bulletin*. **2002**, 37, 2255-2262.
- Qiu, J.; Wang, C.; Gu, M. Photocatalytic properties and optical absorption of zinc ferrite nanometer films. *Materials Science and Engineering B*. **2004**, 112, 1–4.
- Sharma, S.D.; Singh, D.; Saini, K.K.; Kant, C.; Sharma, V.; Jain, S.C.; Sharma, C.P. Sol–gel-derived super-hydrophilic nickel doped TiO₂ film as active photo-catalyst. *Applied Catalysis A: General* **2006**, 314, 40–46.
- Shen, H.; Mi, L.; Xu, P.; Shen, W.; Wang, P.N. Visible-light photocatalysis of nitrogen-doped TiO₂ nanoparticulate films prepared by low-energy ion implantation. *Applied Surface Science*. **2007**, 253, 7024–7028.

- Suchea, M.; Christoulakis, S.; Tudose, I.V.; Vernardou, D.; Lygeraki, M.I.; Anastasiadis, S.H.; Kitsopoulos, T.; Kiriakidis, G. Pure and Nb₂O₅-doped TiO₂ amorphous thin films grown by dc magnetron sputtering at room temperature: Surface and photo-induced hydrophilic conversion studies. *Materials Science and Engineering B*. **2007**, 144, 54–59.
- Sun, H.; Bai, Y.; Jin, W.; Xu, N. Visible-light-driven TiO₂ catalysts doped with low-concentration nitrogen species. *Solar Energy Materials & Solar Cells*. **2008**, 92, 76–83.
- Tseng, H.H.; Wei M.C.; Hsiung, S.F.; Chiou, C.W. Degradation of xylene vapor over Ni-doped TiO₂ photocatalysts prepared by polyol-mediated synthesis. *Chemical Engineering Journal*. **2009**, 150, 160–167.
- Tsuge, Y.; Kim, J.; Sone, Y.; Kuwaki, O.; Shiratori, S. Fabrication of transparent TiO₂ film with high adhesion by using self-assembly methods: Application to super-hydrophilic film. *Thin Solid Films*. **2008**, 516, 2463–2468
- Wei, C.H.; Tang, X.H.; Liang, J.R.; Tan S.Y. Preparation, characterization and photocatalytic activities of boron and cerium-codoped TiO₂. *Journal of Environmental Sciences*. **2007**, 19, 90–96.
- Weixin, H.; Ming, L.; Hong, H.; Junchi, C.; Huanqin, C. Effect of polyethylene glycol on hydrophilic TiO₂ films: Porosity-driven superhydrophilicity. *Surface & Coatings Technology*. **2010**, 204, 3954–3961.
- Wu, Z.; Dong, F.; Zhao, W.; Guo, S. Visible light induced electron transfer process over nitrogen doped TiO₂ nanocrystals prepared by oxidation of titanium nitride. *Journal of Hazardous Materials*. **2008**, 157, 57–63
- Wang, J.; Yin, S.; Komatsua, M.; Sato, T. Lanthanum and nitrogen co-doped SrTiO₃ powders as visible light sensitive photocatalyst. *Journal of the European Ceramic Society*. **2005**, 25, 3207–3212.
- Xie, Y.; Zhao, X. The effects of synthesis temperature on the structure and visible-light-induced catalytic activity of F–N-codoped and S–N-codoped titania. *Journal of Molecular Catalysis A: Chemical*. **2008**, 285, 142–149.

- Xu, S.; Shangguan, W.; Yuan, J.; Chen, M.; Shi, J. Preparations and photocatalytic properties of magnetically separable nitrogen-doped TiO₂ supported on nickel ferrite. *Applied Catalysis B: Environmental*. **2007**,71, 177–184.
- Yates, H.M.; Nolan, M.G.; Sheel, D.W.; Pemble, M.E. The role of nitrogen doping on the development of visible light-induced photocatalytic activity in thin TiO₂ films grown on glass by chemical vapour deposition. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*. **2006**, 179, 213–223.
- Yin, S.; Hasegawa, H.; Maeda, D.; Ishitsuka, M.; Sato, T. Synthesis of visible-light-active nanosize rutile titania photocatalyst by low temperature dissolution–reprecipitation process. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*. **2004**, 163, 1–8.
- Yin, S.; Yamaki, H.; Komatsu, M.; Zhang, Q.; Wang, J.; Tang, Q.; Saito, F.; Sato, T. Synthesis of visible-light reactive TiO_{2-x}N_y photocatalyst by mechanochemical doping. *Solid State Sciences*. **2005**,7, 1479–1485.
- Zaleska, A.; Sobczak, J.W.; Grabowska, Ewelina.; Hupka, J. Preparation and photocatalytic activity of boron-modified TiO₂ under UV and visible light. *Applied Catalysis B: Environmental*. **2008**, 78, 92–100.
- Zhang, X.; Liu, Q. Preparation and characterization of titania photocatalyst co-doped with boron, nickel, and cerium. *Materials Letters*. **2008**, 62, 2589–2592.
- Zhang, X.; Liu, Q. Visible-light-induced degradation of formaldehyde over titania photocatalyst co-doped with nitrogen and nickel. *Applied Surface Science*. **2008**,254, 4780–4785.
- Zhao, L.; Jiang, Q.; Lian, J. Visible-light photocatalytic activity of nitrogen-doped TiO₂ thin film prepared by pulsed laser deposition. *Applied Surface Science*. **2008**, 254, 4620–4625.
- <http://www.cem.msu.edu/~reusch/VirtualText/Spectrpy/UV-Vis/spectrum.htm>, retrieved 23 August 2008
- <http://phys.suwan.ac.kr/jgyoon/lab/solgel.html> : retrieve 11 January 2009
- <http://phys.suwon.ac.kr/~jgyoon/lab/solgel.html> : retrieve 11 January 2009
- <http://www.fda.moph.go.th>, retrieved 12 june 2009

<http://www.smile-condoms.com>, retrieved 12 July 2009

<http://www.warisantegas.com>, retrieved 5 June 2009

<http://www.self-cleaning-glass.com>; <http://www.bfrich.com/sunclean.html>, retrieved 9 June 2011

<http://www.sgpinc.com/materials.htm>, retrieved 9 June 2011

<http://www.enpc.fr/cereve/HomePages/thevenot/www-jes-2002/Aitali-Paper-2002.pdf>, retrieved 9

June 2011

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก
การทดสอบการย่อยสลายเมทิลีนบลู

ภาคผนวก ก. ตารางแสดงค่าความเข้มข้นเฉลี่ยของสารละลายเมทิลีนบลูที่รับแสงยูวีในเวลาต่างๆ ความเข้มข้นของสารละลายเมทิลีนบลูเริ่มต้น (C_0) เท่ากับ 1×10^{-5} โมลาร์ และความเข้มข้นของสารละลายเมทิลีนบลูที่ได้รับแสงยูวี (C)

ตารางภาคผนวก ก-1 ความเข้มข้นของสารละลายเมทิลีนบลูเมื่อได้รับแสงยูวีเป็นเวลาต่างๆ ของฟิล์ม (Ni/B/TiO_2) เมื่อเผาที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส

ชนิดของฟิล์ม	C/C_0					
	1 ชั่วโมง	2 ชั่วโมง	3 ชั่วโมง	4 ชั่วโมง	5 ชั่วโมง	6 ชั่วโมง
TiO_2	0.812	0.643	0.521	0.487	0.410	0.367
B/TiO_2	0.675	0.555	0.503	0.461	0.386	0.323
3Ni/TiO_2	0.768	0.660	0.543	0.472	0.393	0.344
1Ni/B/TiO_2	0.620	0.523	0.423	0.316	0.270	0.203
2Ni/B/TiO_2	0.410	0.373	0.306	0.250	0.220	0.186
3Ni/B/TiO_2	0.373	0.226	0.180	0.140	0.116	0.063
4Ni/B/TiO_2	0.643	0.566	0.426	0.400	0.313	0.253
6Ni/B/TiO_2	0.696	0.630	0.570	0.506	0.426	0.376
8Ni/B/TiO_2	0.720	0.666	0.620	0.526	0.460	0.396

ตารางภาคผนวก ก-2 ความเข้มข้นของสารละลายเมทิลีนบลูเมื่อได้รับแสงยูวีเป็นเวลาต่างๆ ของฟิล์ม (Ni/B/TiO_2) เมื่อเผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส

ชนิดของฟิล์ม	C/C_0					
	1 ชั่วโมง	2 ชั่วโมง	3 ชั่วโมง	4 ชั่วโมง	5 ชั่วโมง	6 ชั่วโมง
TiO_2	0.902	0.833	0.765	0.680	0.624	0.540
B/TiO_2	0.854	0.772	0.715	0.613	0.543	0.495
3Ni/TiO_2	0.887	0.788	0.723	0.663	0.601	0.526
1Ni/B/TiO_2	0.803	0.743	0.660	0.596	0.510	0.460
2Ni/B/TiO_2	0.766	0.643	0.593	0.496	0.426	0.363
3Ni/B/TiO_2	0.513	0.403	0.366	0.303	0.246	0.170
4Ni/B/TiO_2	0.820	0.736	0.683	0.576	0.50	0.450
6Ni/B/TiO_2	0.890	0.793	0.743	0.673	0.596	0.503
8Ni/B/TiO_2	0.896	0.820	0.766	0.706	0.633	0.523

ตารางภาคผนวก ก-3 ความเข้มข้นของสารละลายเมทิลีนบลูเมื่อได้รับแสงยูวีเป็นเวลาต่างๆ ของฟิล์ม (Ni/B/TiO₂) เมื่อเผาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส

ชนิดของฟิล์ม	C/C ₀					
	1 ชั่วโมง	2 ชั่วโมง	3 ชั่วโมง	4 ชั่วโมง	5 ชั่วโมง	6 ชั่วโมง
TiO ₂	0.912	0.843	0.775	0.690	0.634	0.550
B/TiO ₂	0.857	0.782	0.712	0.632	0.550	0.495
3Ni/TiO ₂	0.882	0.802	0.719	0.657	0.579	0.498
1Ni/B/TiO ₂	0.835	0.773	0.688	0.623	0.534	0.493
2Ni/B/TiO ₂	0.766	0.643	0.593	0.496	0.426	0.363
3Ni/B/TiO ₂	0.513	0.403	0.366	0.303	0.246	0.170
4Ni/B/TiO ₂	0.820	0.736	0.683	0.576	0.520	0.450
6Ni/B/TiO ₂	0.890	0.793	0.743	0.673	0.596	0.503
8Ni/B/TiO ₂	0.896	0.820	0.766	0.706	0.633	0.523

ตารางภาคผนวก ก-4 เปอร์เซ็นต์การย่อยสลายสีเมทิลีนบลูของฟิล์ม (Ni/B/TiO₂) โดยเผาที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส ที่เวลารับแสงยูวี 6 ชั่วโมง เมื่อทดสอบซ้ำ

ชนิดของฟิล์ม	C/C ₀						
	1 รอบ	2 รอบ	3 รอบ	4 รอบ	5 รอบ	6 รอบ	7 รอบ
TiO ₂	63	58	54	51	49	48	47
B/TiO ₂	65	60	56	53	51	50	50
3Ni/TiO ₂	67	62	58	55	53	52	52
1Ni/B/TiO ₂	78	73	68	65	63	62	61
2Ni/B/TiO ₂	83	78	72	69	67	66	65
3Ni/B/TiO ₂	94	89	85	82	80	79	78
4Ni/B/TiO ₂	73	68	64	61	59	58	58
6Ni/B/TiO ₂	62	57	53	50	48	47	46
8Ni/B/TiO ₂	59	54	50	47	45	44	44

ตารางภาคผนวก ก-5 ความเข้มข้นของสารละลายเมทิลีนบลูเมื่อได้รับแสงยูวีเป็นเวลาต่างๆ ของฟิล์ม (Ni/B/N/TiO₂) เมื่อเผาที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส

ชนิดของฟิล์ม	C/C ₀					
	1 ชั่วโมง	2 ชั่วโมง	3 ชั่วโมง	4 ชั่วโมง	5 ชั่วโมง	6 ชั่วโมง
TiO ₂	0.812	0.643	0.521	0.487	0.410	0.367
N/ TiO ₂	0.747	0.642	0.538	0.459	0.382	0.331
B/N/ TiO ₂	0.649	0.548	0.502	0.440	0.383	0.308
3Ni/B/N/ TiO ₂	0.420	0.376	0.346	0.300	0.253	0.210
4Ni/B/N/ TiO ₂	0.380	0.300	0.240	0.205	0.175	0.105
5Ni/B/N/ TiO ₂	0.600	0.526	0.450	0.346	0.316	0.270
6Ni/B/N/ TiO ₂	0.716	0.646	0.533	0.476	0.396	0.333

ตารางภาคผนวก ก-6 ความเข้มข้นของสารละลายเมทิลีนบลูเมื่อได้รับแสงยูวีเป็นเวลาต่างๆ ของฟิล์ม (Ni/B/N/TiO₂) เมื่อเผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส

ชนิดของฟิล์ม	C/C ₀					
	1 ชั่วโมง	2 ชั่วโมง	3 ชั่วโมง	4 ชั่วโมง	5 ชั่วโมง	6 ชั่วโมง
TiO ₂	0.902	0.833	0.765	0.680	0.624	0.540
N/ TiO ₂	0.870	0.793	0.716	0.647	0.592	0.501
B/N/ TiO ₂	0.848	0.778	0.683	0.599	0.536	0.459
3Ni/B/N/ TiO ₂	0.753	0.646	0.546	0.506	0.470	0.400
4Ni/B/N/ TiO ₂	0.670	0.61	0.536667	0.503	0.430	0.350
5Ni/B/N/ TiO ₂	0.836	0.756	0.576	0.533	0.490	0.406
6Ni/B/N/ TiO ₂	0.863	0.783	0.700	0.640	0.573	0.483

ตารางภาคผนวก ก-7 ความเข้มข้นของสารละลายเมทิลีนบลูเมื่อได้รับแสงยูวีเป็นเวลาต่างๆ ของฟิล์ม (Ni/B/N/TiO₂) เมื่อเผาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส

ชนิดของฟิล์ม	C/C ₀					
	1 ชั่วโมง	2 ชั่วโมง	3 ชั่วโมง	4 ชั่วโมง	5 ชั่วโมง	6 ชั่วโมง
TiO ₂	0.912	0.843	0.775	0.690	0.634	0.550
N/ TiO ₂	0.868	0.789	0.706	0.649	0.590	0.501
B/N/ TiO ₂	0.815	0.765	0.696	0.613	0.548	0.466
3Ni/B/N/ TiO ₂	0.777	0.668	0.567	0.526	0.490	0.434
4Ni/B/N/ TiO ₂	0.670	0.610	0.536	0.503	0.430	0.350
5Ni/B/N/ TiO ₂	0.836	0.726	0.576	0.533	0.490	0.430
6Ni/B/N/ TiO ₂	0.863	0.783	0.700	0.640	0.573	0.483

ตารางภาคผนวก ก-8 เปอร์เซ็นต์การย่อยสลายสีเมทิลีนบลูของฟิล์ม (Ni/B/N/TiO₂) โดยเผาที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส ที่เวลารับแสงยูวี 6 ชั่วโมง เมื่อทดสอบซ้ำ

ชนิดของฟิล์ม	C/C ₀						
	1 รอบ	2 รอบ	3 รอบ	4 รอบ	5 รอบ	6 รอบ	7 รอบ
TiO ₂	63	58	54	51	49	48	47
N/ TiO ₂	66	63	58	54	53	51	50
B/N/ TiO ₂	69	65	63	57	55	54	54
3Ni/B/N/ TiO ₂	79	74	70	67	65	64	64
4Ni/B/N/ TiO ₂	87	82	79	75	73	72	72
5Ni/B/N/ TiO ₂	72	67	65	60	58	57	56
6Ni/B/N/ TiO ₂	67	62	58	55	53	52	51

ภาคผนวก ก. 9 ตารางแสดงความเข้มข้นเฉลี่ยของสารละลายเมทิลีนบลูที่รับแสงฟลูออเรสเซนซ์ในเวลาต่างๆ ความเข้มข้นของสารละลายเมทิลีนบลูเริ่มต้น (C_0) เท่ากับ 1×10^{-5} โมลาร์ และความเข้มข้นของสารละลายเมทิลีนบลูที่ได้รับแสงฟลูออเรสเซนซ์ (C)

ตารางภาคผนวก ก-9 ความเข้มข้นของสารละลายเมทิลีนบลูเมื่อได้รับแสงฟลูออเรสเซนซ์เป็นเวลาต่างๆ ของฟิล์ม (Ni/B/TiO_2) เมื่อเผาที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส

ชนิดของฟิล์ม	C/C_0					
	1 ชั่วโมง	2 ชั่วโมง	3 ชั่วโมง	4 ชั่วโมง	5 ชั่วโมง	6 ชั่วโมง
TiO_2	0.830	0.761	0.720	0.618	0.563	0.489
B/TiO_2	0.732	0.600	0.540	0.490	0.412	0.352
3Ni/TiO_2	0.814	0.708	0.595	0.526	0.438	0.392
1Ni/B/TiO_2	0.659	0.562	0.451	0.355	0.309	0.284
2Ni/B/TiO_2	0.498	0.441	0.375	0.344	0.276	0.255
3Ni/B/TiO_2	0.457	0.311	0.266	0.220	0.190	0.136
4Ni/B/TiO_2	0.721	0.586	0.501	0.463	0.400	0.327
6Ni/B/TiO_2	0.776	0.692	0.644	0.587	0.508	0.447
8Ni/B/TiO_2	0.807	0.736	0.694	0.600	0.540	0.478

ตารางภาคผนวก ก-10 ความเข้มข้นของสารละลายเมทิลีนบลูเมื่อได้รับแสงฟลูออเรสเซนซ์เป็นเวลาต่างๆ ของฟิล์ม (Ni/B/N/TiO_2) เมื่อเผาที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส

ชนิดของฟิล์ม	C/C_0					
	1 ชั่วโมง	2 ชั่วโมง	3 ชั่วโมง	4 ชั่วโมง	5 ชั่วโมง	6 ชั่วโมง
TiO_2	0.902	0.833	0.765	0.680	0.624	0.540
N/TiO_2	0.780	0.703	0.640	0.533	0.453	0.383
B/N/TiO_2	0.773	0.683	0.580	0.503	0.436	0.380
3Ni/B/N/TiO_2	0.542	0.470	0.410	0.366	0.330	0.280
4Ni/B/N/TiO_2	0.480	0.430	0.370	0.290	0.230	0.185
5Ni/B/N/TiO_2	0.650	0.590	0.516	0.440	0.356	0.30
6Ni/B/N/TiO_2	0.746	0.686	0.570	0.533	0.466	0.370

ตารางภาคผนวก ก-11 เปรี่เซ็นต์การย่อยสลายสีเมทิลีนบลูของฟิล์ม (Ni/B/TiO₂) โดยเผาที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส ที่เวลารับแสงฟลูออเรสเซนส์ 6 ชั่วโมง เมื่อทดสอบซ้ำ

ชนิดของฟิล์ม	C/C ₀						
	1 รอบ	2 รอบ	3 รอบ	4 รอบ	5 รอบ	6 รอบ	7 รอบ
TiO ₂	54	50	46	43	42	41	41
B/TiO ₂	61	57	54	51	50	48	47
3Ni/TiO ₂	65	60	57	54	52	52	50
1Ni/B/TiO ₂	72	66	63	60	56	56	55
2Ni/B/TiO ₂	75	69	67	65	64	61	60
3Ni/B/TiO ₂	86	81	77	73	71	71	70
4Ni/B/TiO ₂	69	64	61	59	58	56	55
6Ni/B/TiO ₂	56	50	48	45	41	40	39
8Ni/B/TiO ₂	52	47	44	42	40	39	38

ตารางภาคผนวก ก-12 เปรี่เซ็นต์การย่อยสลายสีเมทิลีนบลูของฟิล์ม (Ni/B/N/TiO₂) โดยเผาที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส ที่เวลารับแสงฟลูออเรสเซนส์ 6 ชั่วโมง เมื่อทดสอบซ้ำ

ชนิดของฟิล์ม	C/C ₀						
	1 รอบ	2 รอบ	3 รอบ	4 รอบ	5 รอบ	6 รอบ	7 รอบ
TiO ₂	63	58	54	51	49	48	47
N/ TiO ₂	60	55	52	51	50	49	49
B/N/ TiO ₂	61	56	53	52	50	49	49
3Ni/B/N/ TiO ₂	70	67	63	61	60	59	58
4Ni/B/N/ TiO ₂	81	77	75	73	71	70	69
5Ni/B/N/ TiO ₂	66	61	57	56	55	54	54
6Ni/B/N/ TiO ₂	61	58	55	52	51	49	49

ภาคผนวก ข
คำมุลัมผัสของหยดน้ำ

ภาคผนวก ข. ตารางแสดงค่ามุมสัมผัสของหยดน้ำที่หยดลงบนแผ่นฟิล์มที่เคลือบด้วยสารแคตะไลติก ด้วยเครื่อง Contact angle meter โดยมีการหยดน้ำในปริมาตร 5 ไมโครลิตร ตารางภาคผนวก ข-1 ตารางแสดงค่ามุมสัมผัสของหยดน้ำที่หยดลงบนแผ่นฟิล์มที่เคลือบด้วยสารแคตะลิสต์ เมื่อเผาที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เมื่อหยดน้ำภายใต้บรรยากาศแสงยูวี

ชนิดของฟิล์ม	ค่ามุมสัมผัส (°)						
	0 นาที	5 นาที	10 นาที	15 นาที	20 นาที	25 นาที	30 นาที
Uncoated	25	21	16	16	14	11	9
TiO ₂	24	16	15	13	8	2	1
B/TiO ₂	18	13	11	9	4	0	0
3Ni/TiO ₂	19	14	12	7	1	0	0
N/TiO ₂	16	14	12	0	0	0	0
B/N/TiO ₂	14	12	11	0	0	0	0
1Ni/B/TiO ₂	8	6	5	2	0	0	0
2Ni/B/TiO ₂	5	3	2	1	0	0	0
3Ni/B/TiO ₂	17	15	12	8	1	0	0
4Ni/B/TiO ₂	18	15	14	11	1	0	0
6Ni/B/TiO ₂	20	15	13	9	1	0	0
8Ni/B/TiO ₂	23	17	14	12	0	0	0
3Ni/B/N/TiO ₂	6	5	4	0	0	0	0
4Ni/B/N/TiO ₂	7	6	5	0	0	0	0
5Ni/B/N/TiO ₂	12	9	8	0	0	0	0
6Ni/B/N/TiO ₂	20	15	12	0	0	0	0

ตารางภาคผนวก ข-2 ตารางแสดงค่ามุมสัมผัสของหยดน้ำที่หยดลงบนแผ่นฟิล์มที่เคลือบด้วยสาร
แต่ละลิสต์ เมื่อเผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เมื่อหยดน้ำภายใต้บรรยากาศฉายแสงยูวี

ชนิดของฟิล์ม	ค่ามุมสัมผัส (°)						
	0 นาที	5 นาที	10 นาที	15 นาที	20 นาที	25 นาที	30 นาที
Uncoated	26	22	21	17	13	12	9
TiO ₂	24	17	15	11	9	2	2
B/TiO ₂	17	13	11	9	5	0	0
3Ni/TiO ₂	19	15	13	7	1	0	0
N/TiO ₂	17	13	6	1	0	0	0
B/N/TiO ₂	13	11	8	1	0	0	0
1Ni/B/TiO ₂	12	7	6	5	3	0	0
2Ni/B/TiO ₂	8	6	3	2	1	0	0
3Ni/B/TiO ₂	22	20	14	11	3	0	0
4Ni/B/TiO ₂	23	19	14	12	3	0	0
6Ni/B/TiO ₂	22	17	15	14	2	0	0
8Ni/B/TiO ₂	25	19	16	12	1	0	0
3Ni/B/N/TiO ₂	10	8	4	0	0	0	0
4Ni/B/N/TiO ₂	10	7	3	0	0	0	0
5Ni/B/N/TiO ₂	14	11	5	0	0	0	0
6Ni/B/N/TiO ₂	21	17	12	0	0	0	0

ตารางภาคผนวก ข-3 ตารางแสดงค่ามุมสัมผัสของหยดน้ำที่หยดลงบนแผ่นฟิล์มที่เคลือบด้วยสาร
แต่ละลิสต์ เมื่อเผาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส เมื่อหยดน้ำภายใต้บรรยากาศแสงยูวี

ชนิดของฟิล์ม	ค่ามุมสัมผัส (°)						
	0 นาที	5 นาที	10 นาที	15 นาที	20 นาที	25 นาที	30 นาที
Uncoated	25	24	21	16	14	12	9
TiO ₂	24	22	19	12	8	2	1
B/TiO ₂	17	12	10	6	2	0	0
3Ni/TiO ₂	18	15	12	5	1	0	0
N/TiO ₂	16	14	10	0	0	0	0
B/N/TiO ₂	14	12	7	0	0	0	0
1Ni/B/TiO ₂	10	8	5	3	0	0	0
2Ni/B/TiO ₂	6	5	4	3	0	0	0
3Ni/B/TiO ₂	20	17	15	10	3	0	0
4Ni/B/TiO ₂	21	19	16	12	3	0	0
6Ni/B/TiO ₂	22	18	17	15	2	0	0
8Ni/B/TiO ₂	23	19	17	13	3	0	0
3Ni/B/N/TiO ₂	8	7	3	0	0	0	0
4Ni/B/N/TiO ₂	8	8	4	0	0	0	0
5Ni/B/N/TiO ₂	15	10	5	0	0	0	0
6Ni/B/N/TiO ₂	21	16	13	0	0	0	0

ตารางภาคผนวก ข-4 ตารางแสดงค่ามุมสัมผัสของหยดน้ำที่หยดลงบนแผ่นฟิล์มที่เคลือบด้วยสาร
แต่ละลิสต์ เมื่อเผาที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เมื่อหยดน้ำภายใต้บรรยากาศปกติ

ชนิดของฟิล์ม	ค่ามุมสัมผัส (°)						
	0 นาที	5 นาที	10 นาที	15 นาที	20 นาที	25 นาที	30 นาที
Uncoated	25	21	16	15	14	11	9
TiO ₂	23	17	14	12	9	2	1
B/TiO ₂	19	15	12	10	5	0	0
3Ni/TiO ₂	20	15	13	9	1	0	0
N/TiO ₂	17	15	13	1	0	0	0
B/N/TiO ₂	15	13	11	1	0	0	0
1Ni/B/TiO ₂	10	7	5	3	0	0	0
2Ni/B/TiO ₂	7	5	2	1	0	0	0
3Ni/B/TiO ₂	19	17	14	9	2	0	0
4Ni/B/TiO ₂	20	18	15	12	2	0	0
6Ni/B/TiO ₂	20	16	15	10	2	0	0
8Ni/B/TiO ₂	23	18	15	12	2	0	0
3Ni/B/N/TiO ₂	8	6	4	0	0	0	0
4Ni/B/N/TiO ₂	9	7	6	0	0	0	0
5Ni/B/N/TiO ₂	14	12	9	0	0	0	0
6Ni/B/N/TiO ₂	21	17	13	1	0	0	0

ตารางภาคผนวก ข-5 ตารางแสดงค่ามุมสัมผัสของหยดน้ำที่หยดลงบนแผ่นฟิล์มที่เคลือบด้วยสาร
แต่ละลิสต์ เมื่อเผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เมื่อหยดน้ำภายใต้บรรยากาศปกติ

ชนิดของฟิล์ม	ค่ามุมสัมผัส (°)						
	0 นาที	5 นาที	10 นาที	15 นาที	20 นาที	25 นาที	30 นาที
Uncoated	26	22	21	17	15	12	9
TiO ₂	24	18	15	11	9	2	2
B/TiO ₂	18	15	12	10	5	0	0
3Ni/TiO ₂	20	17	14	9	4	0	0
N/TiO ₂	19	16	11	1	0	0	0
B/N/TiO ₂	17	14	9	2	0	0	0
1Ni/B/TiO ₂	12	7	6	5	3	0	0
2Ni/B/TiO ₂	8	6	3	2	1	0	0
3Ni/B/TiO ₂	21	20	16	12	3	0	0
4Ni/B/TiO ₂	22	20	13	11	3	0	0
6Ni/B/TiO ₂	22	19	16	13	2	0	0
8Ni/B/TiO ₂	22	20	15	12	1	0	0
3Ni/B/N/TiO ₂	12	9	6	0	0	0	0
4Ni/B/N/TiO ₂	11	8	5	0	0	0	0
5Ni/B/N/TiO ₂	15	12	7	0	0	0	0
6Ni/B/N/TiO ₂	20	18	13	0	0	0	0

ตารางภาคผนวก ข-6 ตารางแสดงค่ามุมสัมผัสของหยดน้ำที่หยดลงบนแผ่นฟิล์มที่เคลือบด้วยสาร
แต่ละลิสต์ เมื่อเผาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส เมื่อหยดน้ำภายใต้บรรยากาศปกติ

ชนิดของฟิล์ม	ค่ามุมสัมผัส (°)						
	0 นาที	5 นาที	10 นาที	15 นาที	20 นาที	25 นาที	30 นาที
Uncoated	25	24	21	16	14	12	9
TiO ₂	23	21	18	15	7	2	1
B/TiO ₂	16	13	11	6	2	0	0
3Ni/TiO ₂	21	15	12	6	1	0	0
N/TiO ₂	18	15	11	0	0	0	0
B/N/TiO ₂	16	12	8	0	0	0	0
1Ni/B/TiO ₂	13	9	7	4	0	0	0
2Ni/B/TiO ₂	9	7	5	4	0	0	0
3Ni/B/TiO ₂	18	17	13	8	3	0	0
4Ni/B/TiO ₂	21	19	17	11	4	0	0
6Ni/B/TiO ₂	21	19	17	13	4	0	0
8Ni/B/TiO ₂	22	21	16	13	5	0	0
3Ni/B/N/TiO ₂	10	8	5	0	0	0	0
4Ni/B/N/TiO ₂	11	9	6	0	0	0	0
5Ni/B/N/TiO ₂	11	10	6	0	0	0	0
6Ni/B/N/TiO ₂	20	15	12	0	0	0	0

ภาคผนวก ค
ผลการวิเคราะห์เชิงสถิติ (ANOVA)

การใช้ฟังก์ชัน MS-Excel วิเคราะห์ Two-Factor ANOVA

ผลการวิเคราะห์ ANOVA (Analysis of variance) เมื่อค่า P ที่คำนวณได้ (ในตารางจะเป็น P-value) น้อยกว่า 0.05 สามารถสรุปได้ว่า ปัจจัยที่ศึกษาส่งผลให้ค่าการวิเคราะห์ที่ได้มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ

1. การวิเคราะห์ข้อมูลการทนแรงดึงของฟิล์มยางที่แม่พิมพ์มีการฉายแสงยูวีหลังจากผ่านการล้างน้ำซึ่งฉายแสงยูวีที่ 5 และ 10 นาที ของแม่พิมพ์ที่เคลือบด้วยสารแคตะลิสต์คือ ไทเทเนียมไดออกไซด์ (Pure TiO₂), 3Ni/B/TiO₂ และ 4Ni/B/N/TiO₂

ตารางภาคผนวก ค-1 การวิเคราะห์ค่าการทนแรงดึงของฟิล์มยางที่ฉายแสงยูวีที่ 5 และ 10 นาที ของแม่พิมพ์ที่เคลือบด้วยสารแคตะลิสต์คือ ไทเทเนียมไดออกไซด์ (Pure TiO₂), 3Ni/B/TiO₂ และ 4Ni/B/N/TiO₂

Source of Variation	SS	df	MS	F	P-value	F crit
Pure TiO ₂	16.87111	2	8.435556	389.3333	1.22E-11	3.885294
3Ni/B/TiO ₂	0.435556	1	0.435556	20.10256	0.000748	4.747225
4Ni/B/N/TiO ₂	0.071111	2	0.035556	1.641026	0.234422	3.885294
Within	0.26	12	0.021667			
Total	17.63778	17				

2. การวิเคราะห์ข้อมูลการทนแรงดึงของฟิล์มยางที่แม่พิมพ์มีการฉายแสงฟลูออเรสเซนซ์หลังจากผ่านการล้างน้ำซึ่งฉายแสงฟลูออเรสเซนซ์ที่ 5 และ 10 นาที ของแม่พิมพ์ที่เคลือบด้วยสารแคตะลิสต์คือ ไทเทเนียมไดออกไซด์ (Pure TiO₂), 3Ni/B/TiO₂ และ 4Ni/B/N/TiO₂

ตารางภาคผนวก ค-2 การวิเคราะห์ค่าการทนแรงดึงของฟิล์มยางที่ฉายแสงฟลูออเรสเซนซ์ที่ 5 และ 10 นาที ของแม่พิมพ์ที่เคลือบด้วยสารแคตะลิสต์คือ ไทเทเนียมไดออกไซด์ (Pure TiO₂), 3Ni/B/TiO₂ และ 4Ni/B/N/TiO₂

Source of Variation	SS	df	MS	F	P-value	F crit
Pure TiO ₂	15.39	2	7.695	1154.25	1.91E-14	3.885294
3Ni/B/TiO ₂	0.093889	1	0.093889	14.08333	0.002757	4.747225
4Ni/B/N/TiO ₂	0.081111	2	0.040556	6.083333	0.014989	3.885294
Within	0.08	12	0.006667			
Total	15.645	17				

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ สกุล นายมาหามะสุโฮมี มะแซ

รหัสประจำตัวนักศึกษา 5110130015

วุฒิการศึกษา

วุฒิ	ชื่อสถาบัน	ปีที่สำเร็จการศึกษา
วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมวัสดุ)	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์	2548
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมวัสดุ)	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์	2550

ทุนการศึกษา (ที่ได้รับในระหว่างการศึกษา)

- โครงการทุนศึกษีก้นกฐิณะวิศวกรรมศาสตร์ประจำปี 2551-2552
- ศูนย์เครือข่ายความเป็นเลิศด้านนาโนเทคโนโลยีภาคใต้ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

(NANOTEC Center of Excellence at Prince of Songkla University) ประจำปี 2551-2552

- โครงการทุนบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ประจำปี 2551
- ทุนโครงการพัฒนาอาจารย์และบุคลากรสำหรับสถาบันอุดมศึกษาในเขตพัฒนาเฉพาะกิจ

จังหวัดชายแดนใต้ประจำปี 2552

การตีพิมพ์เผยแพร่ผลงาน

- เล็ก สีคง, กัลยาณี คุปตานนท์, วิรัช ทวีปรีดา และ มาหามะสุโฮมี มะแซ “สารเคลือบแม่พิมพ์ไทเทเนียมไดออกไซด์และกรรมวิธีเคลือบสารเคลือบนี้” คำขอรับสิทธิบัตรหมายเลข 1101000103, 18 พ.ค. 2554

- เล็ก สีคง, กัลยาณี คุปตานนท์, วิรัช ทวีปรีดา และ มาหามะสุโฮมี มะแซ “กรรมวิธีการผลิตฟิล์มขางด้วยแม่พิมพ์ที่เคลือบด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์สำหรับผลิตภัณฑ์ขางแบบจุ่ม” อนุสิทธิบัตรหมายเลข 1103000475, 10 พ.ค. 2554

- Lek Sikong, Mahamasuhaimi Masae, Kalayanee Kooptarnond and Wirat Tawiprida. “The effect of B and Ni co-doped TiO₂ film coated on glass substrate” 4th International conference on recent advances in materials minerals & environment and 2nd Asian symposium on materials &

processing (RAMM&ASMP 2009), Bayview Beach Resort Batu ferringhi, Penang, Malaysia, 1-3 June, 2009.

- Lek Sikong, Mahamasuhaimi Masae, Kalayanee Kooptarnond and Wirat Tawiprida. "Influence of Ni doping on photoactivity and hydrophilicity of TiO_2 composite film" 10th International seminar on environment & architecture, and 1st international conference on engineering, environment, economic, safety & health (10th SENVAR& 1st CONVEESH 2009), Gran Puri Hotel, Sulawesi island, Indonesia, 26-27 October, 2009.

- Mahamasuhaimi Masae, Lek Sikong, Kalayanee Kooptarnond, Wirat Tawiprida and Fumio Saito "Photoactivity and hydrophilicity of B and Ni co-doped TiO_2 films" 2010 International Conference on Advances in Materials and Manufacturing Processes (ICAMMP 2010), Best Western Shenzhen Felicity Hotel, Shenzhen, China, 6-8 November, 2010.

- Mahamasuhaimi Masae, Lek Sikong, Kalayanee Kooptarnond, Wirat Tawiprida and Fumio Saito "Photoactivity and hydrophilicity of B and Ni co-doped TiO_2 films" *Advanced Materials Research* Vols. 148-149 (2011) pp 1473-1479.