



การพัฒนาวัสดุนาโนที่ยับยั้งจุลินทรีย์ สำหรับบรรจุภัณฑ์อาหาร



พัชราภรณ์ ผู้อินทร์เที่ยง

วิทยานิพนธ์เสนอบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยนเรศวร
เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา หลักสูตรปรัชญาดุษฎีบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
ปีการศึกษา 2565
ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยนเรศวร

การพัฒนาวัสดุนาโนที่ยับยั้งจุลินทรีย์ สำหรับบรรจุภัณฑ์อาหาร



วิทยานิพนธ์เสนอบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยนเรศวร
เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา หลักสูตรปรัชญาดุษฎีบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

ปีการศึกษา 2565

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยนเรศวร

วิทยานิพนธ์ เรื่อง "การพัฒนาวัสตุนาโนที่ยับยั้งจุลินทรีย์ สำหรับบรรจุภัณฑ์อาหาร"
 ของ พัชราภรณ์ ผู้อินทร์เพียง
 ได้รับการพิจารณาให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
 บริญญาปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์
 (ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.คณางค์ รัตนานิคม)

..... ประธานที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์
 (ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิลาวัลย์ คณิตชัยเดชา)

..... กรรมการที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์
 (รองศาสตราจารย์ ดร.ดวงดาว จันทรเนย)

..... กรรมการผู้ทรงคุณวุฒิภายใน
 (รองศาสตราจารย์ ดร.สมบัติ ชื่นชูกลิ่น)

..... กรรมการผู้ทรงคุณวุฒิภายใน
 (ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปาจรรย์ ทองสนิท)

อนุมัติ

.....
 (รองศาสตราจารย์ ดร.กรรองกาญจน์ ชูทิพย์)
 คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

ชื่อเรื่อง	การพัฒนาวัสดุนาโนที่ยับยั้งจุลินทรีย์ สำหรับบรรจุภัณฑ์อาหาร
ผู้วิจัย	พัชราภรณ์ ผู้อินทร์เที่ยง
ประธานที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิลาวัลย์ คณิตชัยเดชา
กรรมการที่ปรึกษา	รองศาสตราจารย์ ดร.ดวงดาว จันทรินัย
ประเภทสารนิพนธ์	วิทยานิพนธ์ ปริญญาโท วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม, มหาวิทยาลัยนเรศวร, 2565
คำสำคัญ	ไททาเนียมไดออกไซด์, โฟโตคะตะไลซิส, ยับยั้งจุลินทรีย์

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาวัสดุนาโนที่ยับยั้งจุลินทรีย์ สำหรับบรรจุภัณฑ์อาหาร โดยผู้วิจัยเลือกใช้ออกไซด์ของไททาเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) เคลือบเป็นฟิล์มบางบนบรรจุภัณฑ์อาหาร 4 ชนิดที่ทำจากวัสดุพอลิเมอร์ต่าง ๆ ได้แก่ Polyvinyl chloride (PVC), Polystyrene (PS), Poly (vinylidene chloride) (PVDC), และ Polyethylene Terephthalate (PET) การสังเคราะห์ไททาเนียมไดออกไซด์ใช้วิธีโซล-เจล (Sol-Gel method) โดยใช้สารไททาเนียมไอโซโพรพอกไซด์และกรดอะซิติกในอัตราส่วน 1:1.67 w/w% จากนั้นเคลือบเจลไททาเนียมไดออกไซด์บนบรรจุภัณฑ์อาหารด้วยไม้ยางปาด และใช้เทคนิคการเคลือบแบบยูวีเคียวเป็นเวลา 3 ชั่วโมง เพื่อให้เจลไททาเนียมไดออกไซด์แห้งเป็นผลึกติดบนพื้นผิวของบรรจุภัณฑ์อาหารอย่างช้า ๆ ด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ตที่แทนการใช้ความร้อนสูง จากผลการวิเคราะห์สมบัติทางฟิสิกส์และเคมีด้วยเครื่องมือวิเคราะห์ขั้นสูง พบว่า ฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์ที่เคลือบบนบรรจุภัณฑ์ทั้ง 4 ชนิด เป็นโครงร่างผลึกแบบอนาเทส ระดับช่องว่างแถบพลังงาน 3.32 eV และพบธาตุ Ti^{4+} , O^{2-} และ C เป็นองค์ประกอบ โดยพันธะที่เกิดขึ้นเป็นแบบ Ti-O-C ทั้งนี้ วัสดุ PET พบธาตุ Ti และ O มากที่สุด นอกจากนี้บรรจุภัณฑ์อาหารที่เคลือบด้วยฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์ มีมุมสัมผัสน้ำและความชอบน้ำเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาที่ฉายแสงอัลตราไวโอเล็ต ในระหว่างการเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส ฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์ที่เคลือบบนวัสดุพอลิเมอร์มีความคงทนดีแน่นสูง โดยเริ่มตรวจพบการหลุดลอกของฟิล์มบางภายหลังการปั่นเหวี่ยงด้วยความเร็วรอบ 10,000 rpm เป็นเวลา 20 นาทีต่อรอบ จำนวน 15 รอบ และผลการทดสอบประสิทธิภาพในการยับยั้งจุลินทรีย์ *E. coli* และ *S. typhimurium* พบว่า บรรจุภัณฑ์อาหารทั้ง 4 ชนิดที่เคลือบด้วยฟิล์มบางไททาเนียมได-ออกไซด์สามารถยับยั้งจุลินทรีย์ได้ 99% ภายใต้การฉายแสง

อัลตราไวโอเล็ตเอเป็นเวลาตั้งแต่ 30 นาที โดยวัสดุพอลิเมอร์ PET ให้ประสิทธิภาพในการยับยั้ง
จุลินทรีย์ได้สูงสุด และเร็วที่สุด



Title	DEVELOPMENT OF ANTIMICROBIAL NANOMATERIAL FOR FOOD PACKAGING APPLICATIONS
Author	Patcharaporn Phuinthiang
Advisor	Assistant Professor Wilawan Khanitchaidecha, Ph.D.
Co-Advisor	Associate Professor Duangdao Channei, Ph.D.
Academic Paper	Ph.D. Dissertation in Environmental Engineering, Naresuan University, 2022
Keywords	Titanium dioxide, Photocatalysis, antimicrobial

ABSTRACT

This research aims to develop the antimicrobial nanomaterial for food packaging. The titanium dioxide (TiO_2) nanoparticles were used to coat on the surface of four different food packaging materials including Polyvinyl chloride (PVC), Polystyrene (PS), Poly (vinylidene chloride) (PVDC), and Polyethylene Terephthalate (PET). The TiO_2 gel was synthesized by sol-gel method; titanium isopropoxide and acetic acid in a ratio of 1:1.67 w/w%. Then, the TiO_2 gel was coated on food packaging by doctor blade and UV curing techniques for 3 hours. The significant advantage of UV curing technique was that the TiO_2 thin film was slowly formed on the material surface with no high temperature. According to physical and chemical properties analysis of four TiO_2 coated food packaging, the TiO_2 thin film was anatase phase and its band gap energy was 3.32 eV. The elements of Ti^{4+} , O^{2-} and C were observed in the thin film with Ti-O-C bonding, however the PET contained the highest Ti and O compositions. In addition, the contact angle and hydrophilic property of food packaging were enhanced by increasing UV-A irradiation times during photocatalysis process. The persistence of TiO_2 thin film was relatively high; the film peeling off was observed after centrifuging at 10,000 rpm, 20 min/cycle and 15 cycles. Furthermore, the four TiO_2 coated food packaging can inhibit the growth of *E. coli* and *S. typhimurium*, by 99% from 30 min under UV-A irradiation. However, the PET obtained the best antibacterial ability rather than others materials.



ประกาศคุณูปการ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ประสบความสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ด้วยความกรุณา และเมตตาจาก ผศ.ดร.วิลาวัลย์ คณิตชัยเดชา อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และรศ.ดร.ดวงดาว จันทรเนย อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณมา ณ โอกาสนี้

ขอกราบขอบพระคุณ ผศ.ดร.คคนางค์ รัตนานิคม ที่ให้เกียรติเป็นประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ พร้อมทั้งให้คำปรึกษา และช่วยเหลือผู้วิจัยเป็นอย่างยิ่งในด้านจุลินทรีย์ เพื่อให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เสร็จลุล่วงและสมบูรณ์แบบเป็นอย่างดี

ขอกราบขอบพระคุณ รศ.ดร.สมบัติ ชื่นชูกลิ่น และผศ.ดร.ปาจรรย์ ทองสนิทที่ให้เกียรติเป็นกรรมการผู้ทรงคุณวุฒิภายใน และให้คำแนะนำ เพื่อวิทยานิพนธ์เล่มนี้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอกราบขอบพระคุณ รศ.ดร.อุปถัมภ์ นาครักษ์ สำหรับคำปรึกษา คำสอนงานด้านวัสดุศาสตร์ พร้อมทั้งความรู้ คำแนะนำด้านเครื่องมือวิเคราะห์ขั้นสูงต่างๆ

ขอกราบขอบพระคุณมารดาของผู้วิจัย คุณเพ็ญศรี ผู้อินทร์เที่ยง และคุณจะเด็ด สิทธิโสภณ ที่สนับสนุนการศึกษาตั้งแต่เด็กจนปัจจุบัน คอยเป็นกำลังใจกำลังกาย ส่งเสริมเลี้ยงดูผู้วิจัยจนจบจนมีวันนี้

ขอขอบคุณสมาชิกครอบครัวภูมรินทร์ ที่คอยเป็นกำลังใจ และคอยผลักดันการศึกษาของผู้วิจัยเสมอ

ขอขอบคุณคุณวงศธร ศิลปธร สำหรับการเสียสละเวลาคอยดูแลเอาใจใส่ คอยเป็นกำลังใจ ความเสมอต้นเสมอปลายไม่ทำให้ผู้วิจัยต้องเป็นกังวลในเรื่องใด ๆ เสมอมา

ขอขอบคุณเพื่อนร่วมศึกษาระดับปริญญาโท และปริญญาเอก สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม พี่ก้อย พี่แรม น้องเดียร์ น้องTee น้องเค้ก น้องไอซ์ น้องเตย น้องอาย และแก๊งดอกไม้ที่ร่วมเป็นกำลังใจ และฝ่าฟันอุปสรรคต่าง ๆ มาด้วยกัน

เคารพ และระลึกถึงเสมอ ผู้วิจัยไม่เคยลืม คุณไพรัช ผู้อินทร์เที่ยง (บิดา), คุณชิน ภูมรินทร์ (คุณตา) และคุณ Dang Trung Tri Trinh (เพื่อนร่วมทำวิจัย)

ท้ายที่สุด ขอขอบคุณความพยายามของตัวเอง ทั้งในอดีต และปัจจุบัน เธอเก่งมาก ขอให้จงภูมิใจในตัวเองเสมอ

พัชราภรณ์ ผู้อินทร์เที่ยง



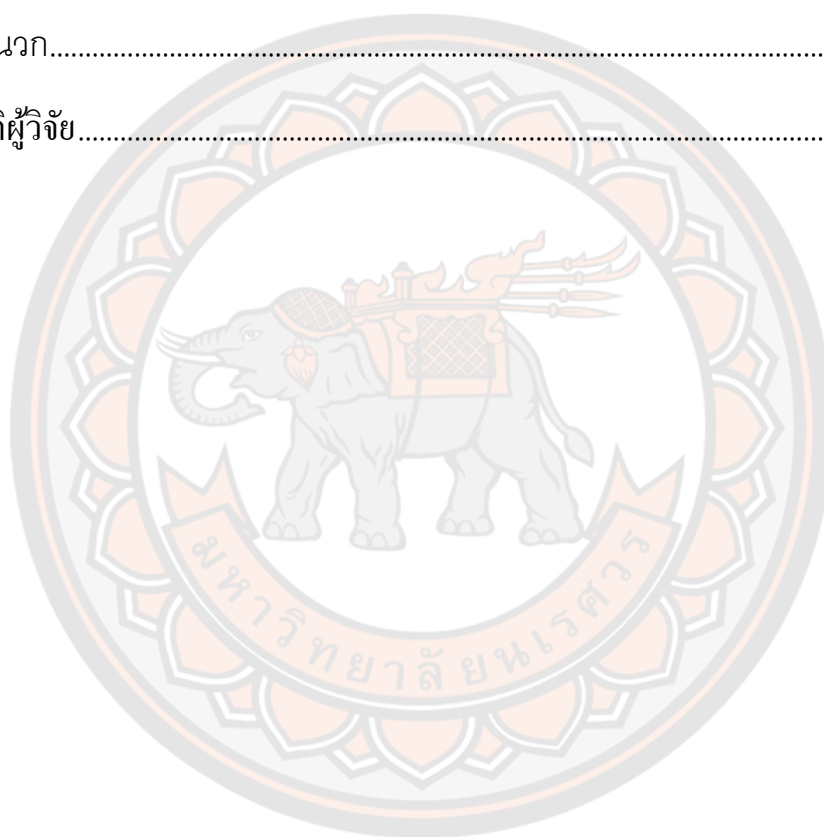
สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
ประกาศศุญปกรณ์.....	ช
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญภาพ.....	ช
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1. ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
2. จุดมุ่งหมายของการวิจัย.....	4
3. ขอบเขตการวิจัย.....	4
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	6
1. นานาเทคโนโลยี.....	6
2. ไททานเนียมไดออกไซด์.....	6
3. กระบวนการโฟโตคะตะไลซิส.....	9
4. การกำจัดจุลินทรีย์ด้วยไททานเนียมไดออกไซด์.....	12
5. การสังเคราะห์ไททานเนียมไดออกไซด์.....	14
6. ทฤษฎีโซล-เจล.....	17
7. เทคนิคการเคลือบ.....	19

8. เทคนิคการเคลือบแบบยูวีเคียว	21
9. จุลินทรีย์	23
10. การวิเคราะห์จุลินทรีย์	28
11. บรรจุภัณฑ์อาหาร.....	29
12. หลักการของเครื่องมือวิเคราะห์ที่ใช้ในงานวิจัย	32
13. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	44
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย	37
ส่วนที่ 1 การสังเคราะห์ไททานเนียมไดออกไซด์ด้วยวิธีโซล-เจล.....	40
ส่วนที่ 2 การเคลือบฟิล์มบางไททานเนียมไดออกไซด์ลงบนบรรจุภัณฑ์อาหาร ด้วย เทคนิคยูวีเคียว	41
ส่วนที่ 3 การศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์และเคมีของฟิล์มบางไททานเนียมไดออกไซด์ ที่เคลือบบนบรรจุภัณฑ์อาหาร	42
ส่วนที่ 4 การทดสอบความคงทนของฟิล์มบางไททานเนียมไดออกไซด์ที่เคลือบบน ผิวของบรรจุภัณฑ์อาหาร	50
ส่วนที่ 5 การทดสอบการยับยั้งจุลินทรีย์ของบรรจุภัณฑ์อาหารที่เคลือบด้วยฟิล์ม บางไททานเนียมไดออกไซด์	51
บทที่ 4 ผลการวิจัย.....	52
1. การสังเคราะห์ไททานเนียมไดออกไซด์.....	52
2. การเคลือบฟิล์มบางไททานเนียมไดออกไซด์ลงบนบรรจุภัณฑ์อาหาร	52
3. ลักษณะสมบัติทางฟิสิกส์ และเคมีของบรรจุภัณฑ์อาหาร.....	54
4. การทดสอบความคงทนของฟิล์มบางที่เคลือบบนบรรจุภัณฑ์อาหาร.....	94

5. การยับยั้งจุลินทรีย์ของบรรจุภัณฑ์อาหารที่เคลือบด้วยฟิล์มบาง.....	96
บทที่ 5 บทสรุป.....	103
1. สรุปผลการวิจัย	103
2. ข้อเสนอแนะ.....	104
บรรณานุกรม	106
ภาคผนวก.....	117
ประวัติผู้วิจัย.....	132



สารบัญตาราง

หน้า

ตาราง 1 คุณสมบัติทางกายภาพของไททาเนียมไดออกไซด์	7
ตาราง 2 คุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของไททาเนียมไดออกไซด์แต่ละเฟส	8
ตาราง 3 ข้อดีและข้อเสียของการสังเคราะห์ไททาเนียมไดออกไซด์ด้วยวิธีต่าง ๆ.....	16
ตาราง 4 ตัวอย่างบรรจุภัณฑ์อาหารที่เลือกใช้	37
ตาราง 5 เครื่องมือที่ใช้วิเคราะห์ในงานวิจัยนี้.....	42
ตาราง 6 พื้นที่ใต้กราฟของธาตุ Ti 2p, O 1s, และ C 1s ของทั้ง 4 ตัวอย่าง	69
ตาราง 7 ตำแหน่งพลังงานยึดเหนี่ยวของ Ti 2p _{3/2} และ Ti 2p _{1/2} ของทั้ง 4 ตัวอย่าง.....	73
ตาราง 8 ตำแหน่งพลังงานยึดเหนี่ยวพันธะ Ti-O และพันธะ O-H ของทั้ง 4 ตัวอย่าง	76
ตาราง 9 ตำแหน่งพลังงานยึดเหนี่ยวพันธะ C-C, พันธะ C-O และพันธะ Ti-O-C ของทั้ง 4 ตัวอย่าง.....	80
ตาราง 10 รายละเอียดตำแหน่งของรามานสเปกตรัมของตัวอย่าง A.....	82
ตาราง 11 รายละเอียดตำแหน่งของรามานสเปกตรัมของตัวอย่าง B	83
ตาราง 12 รายละเอียดตำแหน่งของรามานสเปกตรัมของตัวอย่าง C.....	85
ตาราง 13 รายละเอียดตำแหน่งของรามานสเปกตรัมของตัวอย่าง D.....	87
ตาราง 14 ค่ามุมสัมผัสน้ำของตัวอย่าง A แบบดั้งเดิม และแบบเคลือบฟิล์มบาง	118
ตาราง 15 ค่ามุมสัมผัสน้ำของตัวอย่าง B แบบดั้งเดิม และแบบเคลือบฟิล์มบาง	118
ตาราง 16 ค่ามุมสัมผัสน้ำของตัวอย่าง C แบบดั้งเดิม และแบบเคลือบฟิล์มบาง	119
ตาราง 17 ค่ามุมสัมผัสน้ำของตัวอย่าง D แบบดั้งเดิม และแบบเคลือบฟิล์มบาง	119

ตาราง 18 ค่ามุมสัมพัทธ์น้ำของทั้ง 4 ตัวอย่างที่ระยะเวลาการฉายแสงอัลตราไวโอเลตเอ
ต่าง ๆ 120

ตาราง 19 ค่าการดูดกลืนแสงของไททาเนียมไดออกไซด์ (P25) 121

ตาราง 20 ค่าการดูดกลืนแสงของฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์ที่หลุดออกในแต่ละ
รอบ 121



สารบัญภาพ

	หน้า
ภาพ 1 โครงสร้างผลึกของไททาเนียมไดออกไซด์.....	8
ภาพ 2 ช่องว่างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำแต่ละชนิด	10
ภาพ 3 การเกิดอนุภาคนิวเคลียสไฮดรอกไซด์ของไททาเนียมไดออกไซด์ ในกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส	12
ภาพ 4 กลไกการกำจัดจุลินทรีย์ของไททาเนียมไดออกไซด์	13
ภาพ 5 ภาพถ่าย SEM ของไททาเนียมไดออกไซด์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีการตกตะกอนร่วม	15
ภาพ 6 ภาพถ่าย SEM ของไททาเนียมไดออกไซด์ที่สังเคราะห์ด้วย วิธีโซล-เจล และวิธีไฮโดรเทอร์มอล.....	16
ภาพ 7 กระบวนการโซล-เจลของโลหะออกไซด์ระดับนาโน	18
ภาพ 8 หลักการเคลือบด้วยวิธีทางกายภาพ (ก) วิธีสปัตเตอริง (ข) วิธีระเหยสาร.....	21
ภาพ 9 เทคนิคการเคลือบแบบยูวีเคียวในงาน 3-D printer	22
ภาพ 10 หลักการการเกิดกระบวนการโฟโตพอลิเมอไรเซชัน.....	22
ภาพ 11 โครงสร้างและองค์ประกอบของผนังเซลล์แบคทีเรียแกรมบวกและแกรมลบ..	24
ภาพ 12 ภาพถ่าย SEM ของแบคทีเรีย E. Coli	26
ภาพ 13 แสดงการแบ่งเซลล์ของ E. Coli แบบ Binary fission	26
ภาพ 14 ภาพถ่าย SEM ของแบคทีเรีย S. typhimurium	27
ภาพ 15 การนับจำนวนเชื้อจุลินทรีย์ด้วยวิธี Standard plate count technique.....	28
ภาพ 16 การตรวจหาเชื้อด้วย วิธี OD600.....	29

ภาพ 17 พอลิเมอร์ปิโตรเคมีที่นำมาใช้ผลิตเป็นบรรจุภัณฑ์ต่าง ๆ	30
ภาพ 18 สูตรโครงสร้างของพอลิไวนิลคลอไรด์	31
ภาพ 19 สูตรโครงสร้างของพอลิีสไตรีน	31
ภาพ 20 สูตรโครงสร้างของพอลิไวนิลลิดีนคลอไรด์	32
ภาพ 21 สูตรโครงสร้างของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต	32
ภาพ 22 หลักการทำงานของเครื่อง XRD และเครื่อง XRD ในโหมด GIXRD	33
ภาพ 23 การเกิด Scattering แบบต่าง ๆ	35
ภาพ 24 การเปลี่ยนระดับพลังงานของ Electron ในรูปปรากฏการณ์ต่าง ๆ	35
ภาพ 25 หลักการทำงานของเครื่อง XPS	37
ภาพ 26 การเกิดอันตรกิริยาของสารเคมีกับการแผ่รังสีหรือแสง	37
ภาพ 27 หลักการทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดชนิดฟิลิมิสชัน	41
ภาพ 28 หลักการทำงานของกล้องจุลทรรศน์แ่งอะตอม	42
ภาพ 29 หลักการทำงานของเครื่องวิเคราะห์มุมสัมผัสของของเหลว	43
ภาพ 30 ขนาดมุมสัมผัสของของเหลวที่แสดงพฤติกรรม Hydrophobic และ Hydrophilic	43
ภาพ 31 สรุปกรอบแนวคิดของงานวิจัย	39
ภาพ 32 ขั้นตอนการสังเคราะห์ไททานเนียมไดออกไซด์ด้วยวิธีโซล-เจล	40
ภาพ 33 ขั้นตอนการเคลือบฟิล์มบางไททานเนียมไดออกไซด์บนบรรจุภัณฑ์อาหารด้วย	42
ภาพ 34 เครื่อง X-ray Diffractometer (XRD) ยี่ห้อ Bruker รุ่น D8 Advance	43
ภาพ 35 เครื่อง Raman spectroscopy ยี่ห้อ Horiba รุ่น LabRAM HR Evolution	44

ภาพ 36 เครื่อง X-ray Photoelectron spectroscopy ยี่ห้อ Kratos Analytical รุ่น Axis Ultra DLD.....	45
ภาพ 37 เครื่อง UV-VIS Spectroscopy ยี่ห้อ Mapada รุ่น UV-6100 Spectrophotometer .	46
ภาพ 38 เครื่อง Field Emission Scanning Electron Microscope	47
ภาพ 39 เครื่อง Atomic Force Microscope ยี่ห้อ Park Systems รุ่น XE-120.....	48
ภาพ 40 เครื่อง Contact Angle ยี่ห้อ Dataphysics รุ่น OCA-20	49
ภาพ 41 การวิเคราะห์หุ้มสัมผัสผิวน้ำต่อพื้นผิวของฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์..	49
ภาพ 42 เครื่องปั่นเหวี่ยงความเร็วสูง ยี่ห้อ Scan Speed รุ่น 1248.....	50
ภาพ 43 ขั้นตอนการทดสอบความคงทนของฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์.....	51
ภาพ 44 ขั้นตอนการทดสอบการยับยั้งจุลินทรีย์ของฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์..	53
ภาพ 45 ลักษณะของเจลไททาเนียมไดออกไซด์ที่ได้.....	52
ภาพ 46 บรรจุภัณฑ์อาหารก่อน และหลังเคลือบด้วยฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์.	53
ภาพ 47 ภาพถ่าย FESEM ของตัวอย่าง A.....	55
ภาพ 48 ภาพถ่าย FESEM ของตัวอย่าง B	56
ภาพ 49 ภาพถ่าย FESEM ของตัวอย่าง C.....	57
ภาพ 50 ภาพถ่าย FESEM ของตัวอย่าง D	58
ภาพ 51 ภาพถ่าย FESEM ของฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์ในงานวิจัยอื่น.....	59
ภาพ 52 ภาพถ่าย AFM ของตัวอย่าง A.....	60
ภาพ 53 ภาพถ่าย AFM ของตัวอย่าง B.....	60
ภาพ 54 ภาพถ่าย AFM ของตัวอย่าง C.....	60
ภาพ 55 ภาพถ่าย AFM ของตัวอย่าง D.....	61

ภาพ 56 ผลการวิเคราะห์ GIXRD ของตัวอย่าง A	62
ภาพ 57 ผลการวิเคราะห์ GIXRD ของตัวอย่าง B	63
ภาพ 58 ผลการวิเคราะห์ GIXRD ของตัวอย่าง C	64
ภาพ 59 ผลการวิเคราะห์ GIXRD ของตัวอย่าง D	65
ภาพ 60 เปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ GIXRD ของตัวอย่างทั้ง 4 ชนิด.....	65
ภาพ 61 สเปกตรัม XPS ของพลังงานยึดเหนี่ยวของอะตอมในตัวอย่าง A, B, C, และ D	66
ภาพ 62 เปรียบเทียบสเปกตรัมของไททานเนียม (Ti 2p) ของทั้ง 4 ตัวอย่าง.....	67
ภาพ 63 เปรียบเทียบสเปกตรัม O 1s ของทั้ง 4 ตัวอย่าง.....	68
ภาพ 64 เปรียบเทียบสเปกตรัม C 1s ของทั้ง 4 ตัวอย่าง.....	69
ภาพ 65 สเปกตรัม Ti 2p ของตัวอย่าง A.....	71
ภาพ 66 สเปกตรัม Ti 2p ของตัวอย่าง B.....	71
ภาพ 67 สเปกตรัม Ti 2p ของตัวอย่าง C.....	72
ภาพ 68 สเปกตรัม Ti 2p ของตัวอย่าง D.....	72
ภาพ 69 สเปกตรัม O 1s ของตัวอย่าง A.....	74
ภาพ 70 สเปกตรัม O 1s ของตัวอย่าง B.....	74
ภาพ 71 สเปกตรัม O 1s ของตัวอย่าง C.....	75
ภาพ 72 สเปกตรัม O 1s ของตัวอย่าง D.....	75
ภาพ 73 สเปกตรัม C 1s ของตัวอย่าง A.....	77
ภาพ 74 สเปกตรัม C 1s ของตัวอย่าง B.....	78
ภาพ 75 สเปกตรัม C 1s ของตัวอย่าง C.....	78

ภาพ 76 สเปกตรัม C 1s ของตัวอย่าง D	79
ภาพ 77 สเปกตรัม Raman shift ของตัวอย่าง A.....	81
ภาพ 78 สเปกตรัม Raman shift ของตัวอย่าง B.....	83
ภาพ 79 สเปกตรัม Raman shift ของตัวอย่าง C.....	85
ภาพ 80 สเปกตรัม Raman shift ของตัวอย่าง D.....	87
ภาพ 81 ผลการวิเคราะห์ Raman Spectrometer ของทั้ง 4 ตัวอย่าง.....	88
ภาพ 82 Transmission (%) ที่ความยาวคลื่นต่าง ๆ ของตัวอย่าง A.....	90
ภาพ 83 ค่าช่องว่างพลังงานจากกราฟแบบ Tauc's plot ของตัวอย่าง A.....	91
ภาพ 84 มุมสัมผัสผิวน้ำก่อนและหลังเคลือบด้วยไททาเนียมไดออกไซด์ของทั้ง 4 ตัวอย่าง	92
ภาพ 85 มุมสัมผัสผิวน้ำของทั้ง 4 ตัวอย่างที่ระยะเวลาการฉายแสง อัลตราไวโอเลตเอ ต่าง ๆ	93
ภาพ 86 กราฟมาตรฐานของไททาเนียมไดออกไซด์ (P25).....	94
ภาพ 87 การหลุดของฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์ในแต่ละรอบของการทดลอง.....	95
ภาพ 88 การเปรียบเทียบการหลุดออกของฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์	96
ภาพ 89 กลไกการยับยั้งจุลินทรีย์ของ Reactive Oxygen Species (ROS)	97
ภาพ 90 ประสิทธิภาพการยับยั้งจุลินทรีย์ E. coli ของตัวอย่าง A.....	98
ภาพ 91 ประสิทธิภาพการยับยั้งจุลินทรีย์ E. coli ของตัวอย่าง B.....	99
ภาพ 92 ประสิทธิภาพการยับยั้งจุลินทรีย์ E. coli ของตัวอย่าง C	100
ภาพ 93 ประสิทธิภาพการยับยั้งจุลินทรีย์ E. coli ของตัวอย่าง D	101
ภาพ 94 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการยับยั้งจุลินทรีย์ E. coli ของทั้ง 4 ตัวอย่าง	102

ภาพ 95	จำนวนจุลินทรีย์ E.coli ในวิธี Standard plate count technique	103
ภาพ 96	ประสิทธิภาพการยับยั้งจุลินทรีย์ S. typhimurium ของตัวอย่าง A	105
ภาพ 97	ประสิทธิภาพการยับยั้งจุลินทรีย์ S. typhimurium ของตัวอย่าง B	105
ภาพ 98	ประสิทธิภาพการยับยั้งจุลินทรีย์ S. typhimurium ของตัวอย่าง C	106
ภาพ 99	ประสิทธิภาพการยับยั้งจุลินทรีย์ S. typhimurium ของตัวอย่าง D	107
ภาพ 100	เปรียบเทียบประสิทธิภาพการยับยั้งจุลินทรีย์ S. typhimurium ของทั้ง 4 ตัวอย่าง	108
ภาพ 101	จำนวนจุลินทรีย์ S. typhimurium ในวิธี Standard plate count technique	109
ภาพ 102	การยับยั้งการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ E.coli ของตัวอย่าง A	123
ภาพ 103	การยับยั้งการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ E.coli ของตัวอย่าง B	124
ภาพ 104	การยับยั้งการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ E.coli ของตัวอย่าง C	125
ภาพ 105	การยับยั้งการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ E.coli ของตัวอย่าง D	126
ภาพ 106	การยับยั้งการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ S. typhimurium ของตัวอย่าง A	127
ภาพ 107	การยับยั้งการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ S. typhimurium ของตัวอย่าง B.....	128
ภาพ 108	การยับยั้งการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ S. typhimurium ของตัวอย่าง C.....	129
ภาพ 109	การยับยั้งการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ S. typhimurium ของตัวอย่าง D	130

บทที่ 1

บทนำ

1. ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในอดีตมนุษย์คิดค้นวิธีการเก็บรักษาอาหารเพื่อให้อาหารอยู่ได้ยาวนานและปลอดภัยสำหรับบริโภคในฤดูหนาว จึงได้มีการประยุกต์ใช้วัสดุต่าง ๆ ทั้งจากทางธรรมชาติและสารสังเคราะห์ขึ้น มีการนำวัสดุต่าง ๆ มาปรับใช้และประยุกต์ วิธีการที่ง่ายที่สุดและมีการใช้มาเป็นเวลานาน คือ การตากแดด (Sun Drying) วัตถุดิบอาหารจะถูกนำไปตากแดดเป็นการใช้พลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์โดยธรรมชาติ และในช่วงเวลาต่อมามนุษย์เริ่มมีการพัฒนาทางด้านวิทยาศาสตร์มากขึ้น จึงเริ่มมีการสังเคราะห์วัสดุพอลิเมอร์ และมีการพัฒนาเป็นกล่องบรรจุภัณฑ์สำหรับใส่อาหารแบบสุญญากาศ ถุงซีลสุญญากาศ ฟิล์มบางกนอมอาหาร เป็นต้น ซึ่งทั้งหมดที่กล่าวมานั้น ถูกพัฒนาเพื่อเพิ่มระยะเวลาในการกักเก็บอาหาร และที่สำคัญคือ ป้องกันสิ่งปนเปื้อนจากภายนอกเข้าสู่อาหาร ทำให้เกิดปัญหาต่อระบบการทำงานของร่างกายมนุษย์ได้ เช่น ระบบทางเดินอาหาร ระบบขับถ่าย เป็นต้น โดยสิ่งปนเปื้อนในอาหารที่ส่งผลกระทบต่อมนุษย์ ได้แก่ กลุ่มของแบคทีเรีย ซึ่งแบคทีเรียมักมีทั้งประเภทที่ให้ประโยชน์ต่อร่างกาย เช่น *Lactobacillus* และ *Streptococcus* ใช้ในการถนอมอาหาร และยับยั้งการเกิดของแบคทีเรียชนิดอื่น ๆ ในอาหาร ประเภทของแบคทีเรียที่ก่อให้เกิดโรคกับมนุษย์ เช่น *Escherichia coli* (*E. coli*) และ *Salmonella typhimurium* (*S. typhimurium*) ก่อให้เกิดโรคที่เป็นอันตรายต่อสุขภาพมนุษย์ เช่น โรคท้องร่วง กระเพาะ และลำไส้อักเสบ รวมไปถึงการติดเชื้อในกระแสเลือด เป็นต้น จากข้อมูลมีการพบว่า ประชากรในทวีปทางตะวันออกเฉียงใต้ มีการติดเชื้อ *S. typhimurium* มากถึงประมาณ 23 ล้านราย ซึ่งคิดเฉลี่ยประมาณ 4,000 ราย/100,000 ราย/ปี สาเหตุหลักมาจากความชุกชุมของเชื้อแบคทีเรียในอาหาร เครื่องดื่ม และน้ำ (Majowicz et al., 2010) ปัญหาการติดเชื้อดังกล่าวยังเป็นประเด็นสำคัญสำหรับภาคสาธารณสุขที่ต้องเฝ้าระวังคุณภาพของอาหาร เครื่องดื่ม และน้ำ โดยคุณภาพน้ำดื่มทั่วไปจะทำการฆ่าเชื้อด้วยการเติมสารคลอรีน ดังนั้นคุณภาพของอาหารจึงต้องทำการเฝ้าระวัง และหาแนวทางการแก้ไขปัญหาต่อไป

ปัจจุบันแม้ว่าจะมีการพัฒนาวัสดุบรรจุภัณฑ์สำหรับอาหารที่สามารถป้องกันสิ่งปนเปื้อนจากภายนอกได้บางส่วนแล้ว แต่ในบางครั้งสิ่งปนเปื้อน เช่น จุลินทรีย์ยังคงสามารถเข้าไปสู่อาหารได้ ผู้วิจัยจึงได้คิดค้นพัฒนา โดยใช้วัสดุนาโนที่มีความสามารถในการยับยั้งจุลินทรีย์ สำหรับเคลือบบนบรรจุภัณฑ์อาหาร เพื่อให้บรรจุภัณฑ์อาหารมีความสามารถในการยับยั้งจุลินทรีย์ได้ด้วยตัวเอง (Self-cleaning) ซึ่งวัสดุนาโนที่ผู้วิจัยเลือกใช้ คือ ไททาเนียมไดออกไซด์ (Titanium dioxide, TiO_2) เนื่องจากเป็นวัสดุนาโนที่ไม่เป็นอันตรายต่อสุขภาพของมนุษย์ (Levchuk et al., 2019) สามารถสังเคราะห์ได้ง่าย ราคาถูก และถูกนำมาใช้ในการกำจัดและยับยั้งจุลินทรีย์กันอย่างแพร่หลาย เช่น เคลือบ TiO_2 บนแผ่นกรองอากาศที่ใช้ในระบบฟอกอากาศ หรือผสม TiO_2 ในสีเคลือบผนังภายในอาคาร เป็นต้น

คุณสมบัติของไททาเนียมไดออกไซด์เป็นสารประกอบออกไซด์ของโลหะไททาเนียมอยู่ในกลุ่มโลหะทรานซิชัน เป็นวัสดุนาโนกึ่งตัวนำ (Semiconductor) มีความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส (Photocatalysis) ภายใต้แสงอัลตราไวโอเล็ต จึงได้รับความนิยมนำมาเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst) มีความเสถียรทางเคมีสูง ราคาถูก และเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน-รีดักชันอย่างรุนแรงต่อสารอินทรีย์ และมีความสามารถในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียได้ (AL-Jawad, Taha, & Salim, 2017; Foster, Ditta, Varghese, & Steele, 2011; Long et al., 2014) ไททาเนียมไดออกไซด์เมื่อได้รับพลังงานแสงหรือพลังงานกระตุ้นที่เพียงพอจะเกิดปฏิกิริยาทางเคมี พลังงานนั้นจะไปกระตุ้นอิเล็กตรอนในแถบวาเลนซ์ (Valence band) ให้ไปอยู่ในแถบคอนดักชัน (Conduction band) ทำให้เกิดคู่อิเล็กตรอน (e^-) และโฮล (H^+) อิเล็กตรอนที่ได้จะทำปฏิกิริยารีดักชันกับออกซิเจนในอากาศ เกิดเป็นอนุมูลอิสระซูเปอร์ออกไซด์ ($\cdot\text{O}^-$) ส่วนโฮล (H^+) จะทำปฏิกิริยาออกซิเดชันกับไฮดรอกไซด์ไอออนของน้ำในอากาศ (OH^-) ทำให้เกิดเป็นอนุมูลอิสระไฮดรอกซิล ($\cdot\text{OH}$) ซึ่งอนุมูลอิสระที่ได้ทั้ง 2 ตัวนั้น เป็นตัวรับอิเล็กตรอนที่มีว่องไวในการเกิดปฏิกิริยา ทำให้เกิดการย่อยสลายสารอินทรีย์ต่าง ๆ เกิดเป็นคาร์บอนไดออกไซด์กับน้ำ และยังสามารถในการทำลายผนังเซลล์ของจุลินทรีย์ ทำให้จุลินทรีย์ตายในที่สุด โดยค้นพบว่า ไททาเนียมไดออกไซด์มีประสิทธิภาพในการยับยั้งแบคทีเรียมากกว่าคลอรีนถึง 3 เท่า และมากกว่าไอโชน 1.5 เท่า (บุญยอด, 2554)

ในการสังเคราะห์ไททาเนียมไดออกไซด์ให้เหมาะสมกับการเคลือบบนบรรจุภัณฑ์อาหาร ผู้วิจัยเลือกใช้วิธีโซล-เจล (Sol-Gel method) การสังเคราะห์ด้วยวิธีการนี้ หมายถึง การเปลี่ยนแปลงทางเคมีจากของเหลว “โซล” ไปสู่เฟส “เจล” โดยการกำจัดน้ำออก อนุภาค

ของแข็งเล็ก ๆ จำนวนมากแขวนลอยกันอย่างเสถียร ทำให้เกิดการเกาะตัวเป็นร่างแหแบบไม่เป็นระเบียบ สารละลายเกิดเป็นเจลขึ้น เทคนิคนี้เป็นเทคนิคที่ใช้ต้นทุนต่ำ สังเคราะห์ได้ง่าย และไม่ต้องใช้เครื่องมือที่ซับซ้อน การเคลือบไททาเนียมไดออกไซด์ลงบนบรรจุภัณฑ์อาหารใช้เทคนิคการปาด (Doctor blade) ซึ่งจะก่อให้เกิดฟิล์มไททาเนียมไดออกไซด์บนบรรจุภัณฑ์ที่บาง และมีความหนาที่สม่ำเสมอ

สำหรับเทคนิคการเคลือบไททาเนียมไดออกไซด์ให้ยึดติดบนบรรจุภัณฑ์อาหารนั้น ผู้วิจัยเลือกใช้เทคนิคยูวีเคียว (UV-curing method) เนื่องจากเป็นเทคนิคที่มีประสิทธิภาพในการเคลือบ และใช้ความร้อนไม่สูงมาก โดยอาศัยโฟตอน (Photon) ของแสงอัลตราไวโอเลตซี (UVC) ช่วยจ่ายพลังงาน เพื่อกระตุ้นให้เกิดการแลกเปลี่ยนประจุในกระบวนการโฟโตพอลิเมอไรเซชัน (Photo-Polymerization process) (Anastasio, Maassen, Cardinaels, Peters, & van Breemen, 2018) ทำให้เจลไททาเนียมไดออกไซด์แห้งเป็นผลึกและเกาะติดบนผิวของบรรจุภัณฑ์อาหารอย่างช้า ๆ แทนการใช้พลังงานความร้อนสูง ซึ่งหากทำการเคลือบโดยใช้ความร้อนสูง จะทำให้ส่งผลกระทบต่อ การเปลี่ยนแปลงของรูปร่างบรรจุภัณฑ์อาหารได้

ปัจจุบันมีการใช้ไททาเนียมไดออกไซด์เคลือบบนผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ ด้วยวิธีโซล-เจล เพื่อใช้ในการทำความสะอาดตัวเองหรือยับยั้งจุลินทรีย์ ซึ่งจากผลการวิจัยที่เผยแพร่ก่อนหน้านี้พบว่า มีการนำวัสดุนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ที่เจือด้วยซิลเวอร์ (Ag) ในอัตราส่วน 5% เคลือบลงบนพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต (Polyethylene terephthalate) ทำให้มีความสามารถในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย *E. coli* ได้ เมื่อเวลาผ่านไป 60 นาที และเชื้อแบคทีเรีย *Staphylococcus aureus* (*S. aureus*) เมื่อเวลาผ่านไป 180 นาที (เจริญสุข, 2560)

ด้วยเหตุนี้ ผู้วิจัยจึงมีความสนใจนำวัสดุนาโนไททาเนียมไดออกไซด์มาเคลือบลงบนบรรจุภัณฑ์อาหาร ซึ่งบรรจุภัณฑ์อาหารที่ผู้วิจัยเลือกในงานวิจัยนี้มีทั้งหมด 4 ชนิด ซึ่งเป็นวัสดุพอลิเมอร์ที่รู้จักกันอย่างแพร่หลาย ได้แก่ พลาสติกแข็งแบบใสทำจาก Polyvinyl chloride (PVC), โฟมทำจาก Polystyrene (PS), ฟิล์มบางพลาสติกทำจาก Poly (vinylidene chloride) (PVDC) และกล่องพลาสติกทำจาก Polyethylene Terephthalate (PET) ซึ่งทั้งหมดเป็นตัวแทนของบรรจุภัณฑ์อาหารที่ผลิตจากวัสดุพอลิเมอร์ที่แตกต่างกัน โดยจะทำการเคลือบด้วยวัสดุนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ด้วยวิธีเดียวกันทั้งหมด และการทดสอบการยับยั้งจุลินทรีย์ในงานวิจัยนี้

จะทดสอบกับเชื้อจุลินทรีย์แกรมลบ 2 ชนิด ได้แก่ *E. coli* และ *S. typhimurium* ซึ่งเป็นจุลินทรีย์ที่พบมากในประเทศไทย และเจริญเติบโตได้ในอาหาร

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาและพัฒนาวัสดุนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ที่ได้จากการสังเคราะห์ด้วยวิธีโซล-เจล มาเคลือบลงบนบรรจุภัณฑ์อาหารด้วยเทคนิคยูวีเคียว รวมทั้งทดสอบความคงทนของฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์ที่เคลือบลงบนพื้นผิวของบรรจุภัณฑ์อาหาร เพื่อให้ได้บรรจุภัณฑ์อาหารที่เคลือบไททาเนียมไดออกไซด์ที่คงทน สร้างความมั่นใจให้กับผู้บริโภค และยังคงความสามารถในการยับยั้งการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ สำหรับนำไปประยุกต์ในการถนอมอาหารให้มีอายุยาวนานเพิ่มมากขึ้น หรือเป็นแนวทางในการพัฒนาด้านอื่น ๆ เช่น หน้ากากป้องกันใบหน้า (Face Shield) หรืออุปกรณ์ทางการแพทย์ต่อไปในอนาคต

2. จุดมุ่งหมายของการวิจัย

- 2.1 สังเคราะห์ไททาเนียมไดออกไซด์ด้วยวิธีโซล-เจล เพื่อเคลือบบนบรรจุภัณฑ์อาหาร
- 2.2 เคลือบฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์บนบรรจุภัณฑ์อาหารชนิดต่าง ๆ ด้วยเทคนิคยูวีเคียว
- 2.3 วิเคราะห์สมบัติทางฟิสิกส์และเคมีของฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์ที่เคลือบบนบรรจุภัณฑ์อาหารชนิดต่าง ๆ
- 2.4 วิเคราะห์ความคงทนของฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์ที่เคลือบบนบรรจุภัณฑ์อาหารชนิดต่าง ๆ
- 2.5 วิเคราะห์ความสามารถในการยับยั้งจุลินทรีย์ของบรรจุภัณฑ์อาหารที่เคลือบด้วยฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์

3. ขอบเขตการวิจัย

- 3.1 การสังเคราะห์ไททาเนียมไดออกไซด์จะใช้วิธีโซล-เจล และใช้ไททาเนียมไอโซโพรพอกไซด์และกรดอะซิติกเป็นสารตั้งต้น
- 3.2 บรรจุภัณฑ์อาหารชนิดต่าง ๆ ที่ทำจากวัสดุพอลิเมอร์ต่างชนิดกัน ได้แก่ PVC, PS, PVDC, และ PET นำมาใช้เป็นตัวอย่างในการเคลือบฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์ โดยใช้วิธีเทคนิคปาด (Doctor blade) ร่วมกับเทคนิคยูวีเคียว

3.3 บรรจุภัณฑ์อาหารที่ผ่านการเคลือบด้วยฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์ทำการวิเคราะห์สมบัติทางฟิสิกส์และเคมีด้วยเทคนิคต่าง ๆ ได้แก่ FESEM, AFM, GIXRD, XPS, Raman, UV-vis, และ Contact angle และเปรียบเทียบกับบรรจุภัณฑ์อาหารดั้งเดิมที่ไม่ผ่านการเคลือบฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์

3.4 การทดสอบความคงทนของฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์ที่เคลือบบนบรรจุภัณฑ์อาหาร ใช้วิธีการสังเกตการหลุดออกของฟิล์มบางหลังการปั่นเหวี่ยงความเร็วสูงที่ความเร็ว 10,000 รอบต่อนาทีเป็นเวลา 20 นาที ของ 1 รอบการทดลอง

3.5 จุลินทรีย์แกรมลบ 2 ชนิด ได้แก่ *E. coli* และ *S. typhimurium* ที่มักพบการปนเปื้อนในอาหารและก่อให้เกิดโรคจะใช้ในการทดสอบความสามารถในการยับยั้งจุลินทรีย์ของบรรจุภัณฑ์อาหารที่เคลือบด้วยไททาเนียมไดออกไซด์ และวิเคราะห์ปริมาณจุลินทรีย์ที่เหลืออยู่ด้วยวิธี OD600 และ Standard plate count technique ในห้องปฏิบัติการทางด้านจุลชีววิทยา ณ มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์ จังหวัดกาฬสินธุ์

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1. นาโนเทคโนโลยี

ในโลกปัจจุบันมีการสนใจในเรื่องนาโนศาสตร์ (Nanoscience) และนาโนเทคโนโลยี (Nanotechnology) เป็นอย่างมาก ซึ่งทั่วโลกได้มีการใช้งบประมาณเป็นจำนวนมาก เพื่อทำการศึกษาค้นคว้าวิจัยเกี่ยวกับศาสตร์ของนาโน ประเทศไทยก็เช่นกัน เริ่มมีการสนับสนุนให้ทำการวิจัยในเรื่องนาโนเทคโนโลยีเพิ่มมากขึ้น ซึ่งนาโนเทคโนโลยี คือ การสร้างหรือวิเคราะห์วัสดุอินทรีย์อินทรีย์ที่มีโครงสร้างสสาร 1 ในพันล้าน (1×10^{-9}) โดยผลิตภัณฑ์ทางนาโนเทคโนโลยีส่วนใหญ่จะเป็นพวกฟิล์มชนิดบางที่มีความหนาในระดับนาโนเมตร เช่น OLED (Organic light emitting device) เป็นจอแสดงผลที่ทำจากสารอินทรีย์และสารเคลือบผิวต่าง ๆ โดยเป้าหมายการพัฒนาของนาโนเทคโนโลยี คือ ความสามารถที่จะจัดเรียงอนุภาคต่าง ๆ ได้ตามความต้องการ เพื่อสร้างสสารหรือโครงสร้างของสารแบบใหม่ ๆ ที่ให้คุณสมบัติพิเศษแบบที่อาจไม่เคยมีมาก่อน

เนื่องจากคุณสมบัติของวัสดุนาโนมีพื้นที่ผิวเป็นจำนวนมาก เพราะเป็นวัสดุที่มีขนาดเล็กในระดับนาโน จึงทำให้เป็นวัสดุที่มีความไวต่อการดูดซับถึงแม้จะมีปริมาณที่น้อยก็ตาม และวัสดุนาโนยังมีลักษณะสมบัติที่มีรูปทรงสูง จึงมีความสำคัญในกระบวนการย่อยสลายโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา เช่น การเติมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ในผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ และทำการให้พลังงานกับนาโนไททาเนียมได-ออกไซด์ เพื่อให้เกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส สำหรับการย่อยสลายสารอินทรีย์หรือจุลินทรีย์ เป็นต้น (บุญญะหงษ์ & สมบูรณ์, 2553)

2. ไททาเนียมไดออกไซด์

ไททาเนียมไดออกไซด์เป็นวัสดุนาโนออกไซด์ชนิดหนึ่ง ซึ่งเป็นสารกึ่งตัวนำ มีลักษณะทางกายภาพดังตาราง 1 ซึ่งถูกนำมาใช้ประโยชน์อย่างแพร่หลาย กระบวนการที่นิยมใช้กับไททาเนียมไดออกไซด์ คือ กระบวนการโฟโตคะตะไลซิส เนื่องจากมีเสถียรภาพทางเคมีสูง ไม่ถูกแสงทำลาย ไม่ละลายน้ำ ไม่มีพิษ และยังสามารถนำกลับมาใช้ซ้ำได้ (สีโต, 2546) ไททาเนียมไดออกไซด์มีรูปแบบผลึกที่พบในธรรมชาติ ทั้งหมด 3 แบบ (Ruzycski, Herman, Boatner, & Diebold, 2003) ได้แก่

1) อนาเทส (Anatase) เป็นไททาเนียมไดออกไซด์ที่มีโครงสร้างผลึกแบบเตตระโกนอล (Tetragonal) มีเสถียรภาพมากที่สุดที่อุณหภูมิสูงกว่าผลึกแบบรูไทน์ โครงสร้างผลึกอนาเทส มักนิยมนำมาใช้ในกระบวนการโฟโตคะตะไลติก

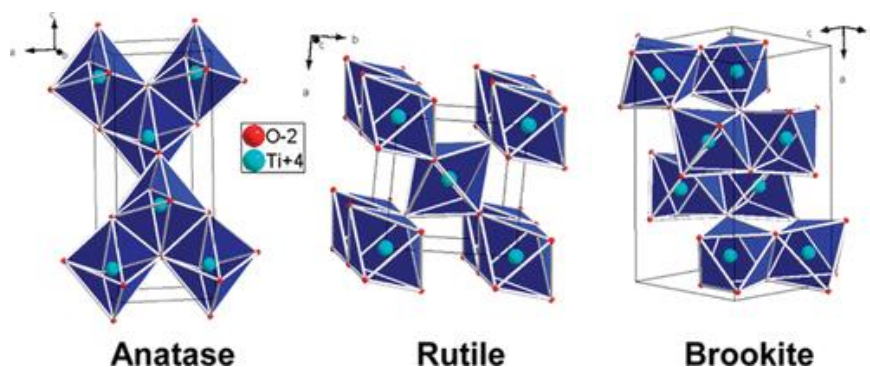
2) รูไทน์ (Rutile) เป็นไททาเนียมไดออกไซด์ที่มีโครงสร้างผลึกแบบเตตระโกนอล มีเสถียรภาพสูงที่สุดที่อุณหภูมิสูง ๆ มักนิยมนำไปใช้ในงานอุตสาหกรรม เช่น อุตสาหกรรมสี อุตสาหกรรมเครื่องสำอาง อุตสาหกรรมอาหาร เป็นต้น

3) บรูคไคน์ (Brookite) เป็นไททาเนียมไดออกไซด์ที่มีโครงสร้างผลึกแบบออร์โธมบิก (Orthorhombic) ซึ่งสามารถพบได้ในแร่เท่านั้น

ตาราง 1 คุณสมบัติทางกายภาพของไททาเนียมไดออกไซด์

สูตรทางเคมี	ไททาเนียมไดออกไซด์
ชื่อที่ใช้เรียก	1. ไททาเนียมไดออกไซด์ (Titanium dioxide) 2. ไททานิกแอนไฮไดรด์ (Titanic anhydride) 3. ไททาเนีย (Titania)
พื้นที่ผิว	50 m ² /g
ขนาดอนุภาคโดยเฉลี่ย	20 nm
ความหนาแน่น	ประมาณ 130 g/L
มวลโมเลกุล	79.9 g/mol
ความถ่วงจำเพาะ	0.7

ที่มา: (สุวรรณฤกษ์, วรวัฒน์กุล, & อนันต์ภักษ์, 2546)



ภาพ 1 โครงสร้างผลึกของไททาเนียมไดออกไซด์

ที่มา: (Ruzycski et al., 2003)

ตาราง 2 คุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของไททาเนียมไดออกไซด์แต่ละเฟส

สมบัติเฉพาะของเฟส	รูไทล์	อนาเทส	รูไทล์
โครงสร้างผลึก	ออร์โธโรมบิก	เตตระโกนอล	เตตระโกนอล
Band gap	-	3.26 eV (380 nm)	3.06 eV (405 nm)
Space group	Pb _{ca}	I ₄₁ /amd,	P ₄₂ /mnm
a (Å), c(Å)	a = 9.166 Å, b = 5.436 Å, c = 5.135 Å	a = 3.7833 Å, b = 9.5090 Å	a = 4.5905 Å, b = 2.9565 Å
Crystal faces	[001]	[100]	[110],[100],[001]
Unit cell volume (Å) ³	257	136.3	62.42
D _x (g/am ³)	4.13	3.89	4.25
Particles size	11-35 nm	<11 nm	>35 nm

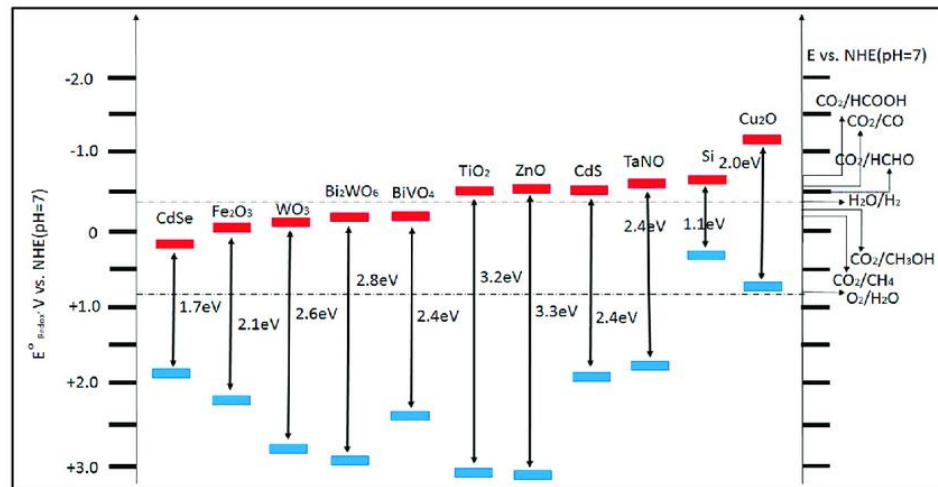
ที่มา: (สุวรรณฤกษ์ et al., 2546)

จากตาราง 2 เนื่องจากโครงสร้างผลึกที่แตกต่างกัน ทำให้ไททาเนียมไดออกไซด์มีคุณสมบัติทางกายภาพและเคมีแตกต่างกันด้วย ซึ่งประสิทธิภาพของไททาเนียมไดออกไซด์นั้น จะขึ้นอยู่กับปริมาณและสัดส่วนของอนาเทสต่อรูไทน์ที่สังเคราะห์ขึ้น ความแตกต่างของระดับช่องว่างแถบพลังงาน (Band gap) เป็นส่วนสำคัญในการเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส ซึ่งผลึกอนาเทสมีระดับช่องว่างแถบพลังงานสูงกว่ารูไทน์ คือเท่ากับ 3.26 และ 3.06 eV ตามลำดับ จึงทำให้ผลึกไททาเนียมไดออกไซด์ ผลึกอนาเทส สามารถดูดกลืนแสงที่พลังงานแสง เท่ากับ 380 nm ซึ่งต่ำกว่าผลึกรูไทน์ รวมถึงการดูดติดผิวของผลึกรูไทน์จะต่ำกว่าผลึกของอนาเทสด้วย

ปัจจุบันมีการนำอนุภาคไททาเนียมไดออกไซด์มาใช้ประโยชน์อย่างกว้างขวาง เช่น ในด้านของภาคอุตสาหกรรม มีการนำมาใช้เพื่อยับยั้งแบคทีเรียให้กับผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ มีการนำไปผสมลงในสีทาผนัง ช่วยทำให้ยับยั้งแบคทีเรียและกำจัดฝุ่นละอองได้ เมื่อสีที่ทาบนผนังได้รับการกระตุ้นด้วยรังสีอัลตราไวโอเล็ตจากแสงอาทิตย์ สามารถช่วยกำจัดฝุ่น และกลิ่นได้ เนื่องจากเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันในกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส ทำให้ได้อนุมูลอิสระไฮดรอกซิลที่มีความสามารถในการกำจัดโมเลกุลของสารอินทรีย์ระเหยง่าย (Volatile Organic Compounds, VOC_s) ซึ่งเป็นต้นเหตุของกลิ่นอันไม่พึงประสงค์ อีกส่วนหนึ่งไททาเนียมไดออกไซด์ยังสามารถช่วยฟอกอากาศได้ เช่น ช่วยในการกำจัดสารประกอบไนโตรเจนออกไซด์ คาร์บอนหรือ หรือช่วยป้องกันควันดำจากเขม่าต่าง ๆ บริเวณผนังบ้านได้ นอกจากนี้ไททาเนียมไดออกไซด์ ยังมีความสามารถในการทำความสะอาดตัวเอง (Self-cleaning) ยกตัวอย่างเช่น ในเชิงอุตสาหกรรม มีการนำไททาเนียมไดออกไซด์ ผสมกับสีทาผนังอาคาร ทำให้ผนังอากาศสะอาด และใหม่อยู่เสมอ

3. กระบวนการโฟโตคะตะไลซิส

กระบวนการโฟโตคะตะไลซิส เป็นกระบวนการที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาทำงานร่วมกับพลังงานแสง ซึ่งเมื่อทำการกระตุ้นตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยพลังงานแสง จะส่งผลทำให้เกิดปฏิกิริยาขึ้น ทั้งนี้ตัวเร่งปฏิกิริยาส่วนใหญ่จะเป็นสารกึ่งตัวนำ พลังงานแสงที่ใช้ในกระบวนการโฟโตคะตะไลซิสจะเป็นแสงจากดวงอาทิตย์ หรือจากแหล่งกำเนิดแสงที่มีช่วงแสงที่เหมาะสมกับตัวเร่งปฏิกิริยานั้น ๆ ตัวเร่งปฏิกิริยาแต่ละตัวมีการรับช่วงแสงที่แตกต่างกัน เนื่องจากช่องว่างแถบพลังงานแตกต่างกัน ดังแสดงในภาพ 2



ภาพ 2 ช่องว่างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำแต่ละชนิด

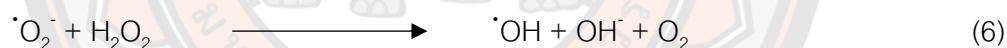
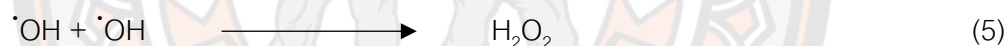
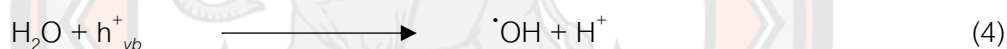
ที่มา: (Abd Elkodous, Hassaan, Ghoneim, & Abdeen, 2018)

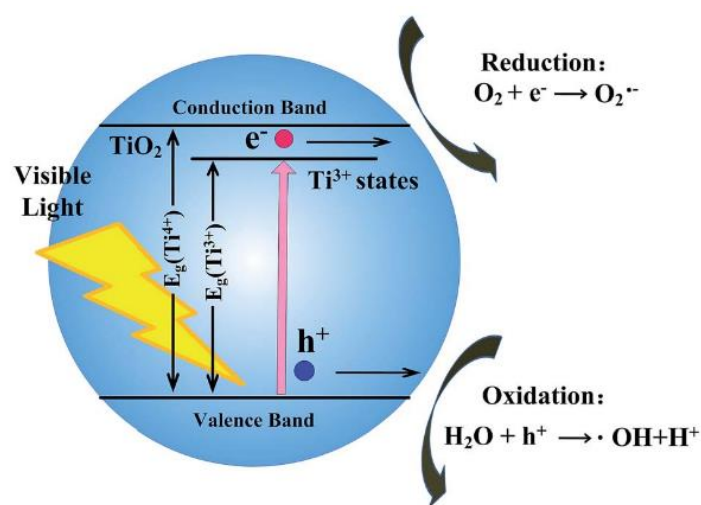
การฉายแสงในกระบวนการโฟโตคะตะไลซิสเป็นการเปลี่ยนพลังงานแสงให้อยู่ในรูปของพลังงานโฟตอน (Photon energy) ซึ่งต้องอาศัยพลังงานโฟตอนที่มากพอที่จะทำให้เกิดปฏิกิริยาได้ โดยพลังงานดังกล่าวนี้ เรียกว่า พลังงานกระตุ้น (Activation energy) ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 1

$$E = hV = hc/\lambda \quad (1)$$

เมื่อ	E	คือ พลังงานควอนตัม (Quantum energy), J
	h	คือ ค่าคงที่ของพลังค์ (Planck's Constant) = 6.625×10^{-34} , J-s
	V	คือ ความถี่ของคลื่นแสง, Hz หรือ s^{-1}
	λ	คือ ความยาวคลื่น, nm
	c	คือ ความเร็วของคลื่นแสง = 2.997×10^8 , m/s

สำหรับตัวเร่งปฏิกิริยาไททาเนียมไดออกไซด์ที่นิยมนำมาใช้ในกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส มีแถบช่องว่างระดับพลังงานที่กว้างประมาณ 3.2 eV ซึ่งจำเป็นต้องมีพลังงานแสงที่มากระตุ้นที่มากกว่าหรือเท่ากับช่องว่างพลังงาน เพื่อที่พลังงานนั้นจะไปกระตุ้นอิเล็กตรอนในแถบวาเลนซ์ให้ไปอยู่ในแถบคอนดักชัน และทำให้เกิดคู่อิเล็กตรอนและโฮล จากนั้นอิเล็กตรอนที่ได้จะไปรวมตัวกับออกซิเจนในอากาศหรือน้ำด้วยปฏิกิริยารีดักชัน เกิดเป็นอนุมูลอิสระซูเปอร์ออกไซด์ ($\cdot\text{O}_2^-$) ส่วนโฮล (H^+) ที่เกิดขึ้น รวมตัวกับไฮดรอกไซด์ไอออนของน้ำในอากาศ (OH^-) ด้วยปฏิกิริยาออกซิเดชัน ทำให้เกิดเป็นอนุมูลอิสระไฮดรอกซิล ($\cdot\text{OH}$) ซึ่งอนุมูลอิสระที่ได้ทั้ง 2 ตัวนั้น เป็นตัวรับอิเล็กตรอนที่มีว่องไวในการเกิดปฏิกิริยา ทำให้เกิดการย่อยสลายสารอินทรีย์ต่าง ๆ เกิดเป็นคาร์บอนไดออกไซด์กับน้ำ ดังแสดงในสมการที่ 2 ถึงสมการที่ 7





ภาพ 3 การเกิดอนุมูลอิสระไฮดรอกซิลของไททาเนียมไดออกไซด์
ในกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส

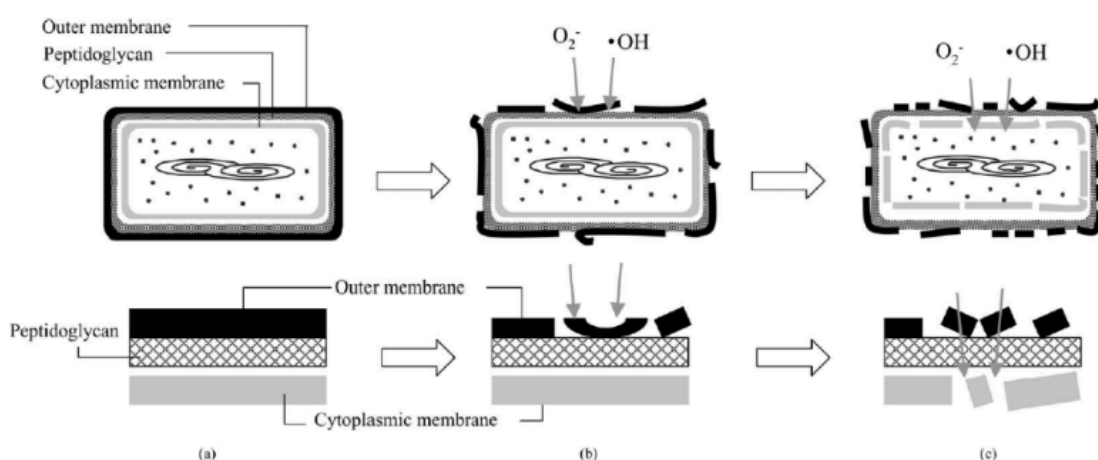
ที่มา: (Huo, Hu, Jiang, & Li, 2014)

4. การกำจัดจุลินทรีย์ด้วยไททาเนียมไดออกไซด์

ไททาเนียมไดออกไซด์ เนื่องจากไม่เป็นอันตรายต่อมนุษย์ แต่มีผลกระทบต่อเซลล์ของสิ่งมีชีวิตขนาดเล็ก เช่น แบคทีเรีย ฟังไจ และไวรัส เป็นต้น ปัจจุบันจึงเริ่มมีการนำไททาเนียมไดออกไซด์มาประยุกต์ใช้งานร่วมกับวัสดุต่าง ๆ นักวิจัยเริ่มคิดค้น พัฒนา และเริ่มศึกษาจากปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส โดยพัฒนาเทคโนโลยีการเคลือบไททาเนียมไดออกไซด์ที่ผิวหน้าของตัวกลางใด ๆ สำหรับประยุกต์ใช้ในการสลาย NO_x, VOC_s (Taoda, 2008) ซึ่งเป็นปัญหามลพิษทางอากาศ และป้องกันอาคาร และหน้าต่างจากมลพิษ (Benedix, Dehn, Quaas, & Orgass, 2000; Cedillo-González, Hernández-López, Ruiz-Valdés, Barbieri, & Siligardi, 2020) ขจัดกลิ่นในวัสดุต่าง ๆ (Soonjee Park et al., 2012; Pichat et al., 2000) และป้องกันเชื้อโรคของอุปกรณ์ทางการแพทย์ในโรงพยาบาล (Chung, Lin, Tsou, Shi, & He, 2008) รวมทั้งเคลือบลงบนผลิตภัณฑ์สิ่งทอ เพื่อช่วยระงับกลิ่นกาย และเชื้อแบคทีเรีย (Noman, Petru, Amor, Yang, & Mansoor, 2020)

ประสิทธิภาพของไททาเนียมไดออกไซด์ในการกำจัดจุลินทรีย์นั้น เกิดจากกระบวนการโฟโตคะตะไลซิสเช่นกัน ซึ่งจากการเกิดอนุมูลอิสระซูเปอร์ออกไซด์ ($\cdot O_2^-$) และอนุมูลอิสระ

ไฮดรอกซิล ($\cdot\text{OH}$) ซึ่งทั้ง 2 อนุมูลอิสระนี้มีความสามารถในการทำลายผนังเซลล์ และเซลล์เมมเบรนของจุลินทรีย์ ทำให้จุลินทรีย์ตาย (Comparelli et al., 2005; Gogniat, Thyssen, Denis, Pulgarin, & Dukan, 2006; György et al., 2006) กระบวนการโฟโตคะตะไลซิสสามารถกำจัดจุลินทรีย์ได้หลากหลายชนิด เช่น แบคทีเรียแกรมบวก แบคทีเรียแกรมลบ สาหร่าย และไวรัส (Matsunaga, Tomoda, Nakajima, Nakamura, & Komine, 1988)



ภาพ 4 กลไกการกำจัดจุลินทรีย์ของไททาเนียมไดออกไซด์

ที่มา: (Sunada, Watanabe, & Hashimoto, 2003)

จากภาพ 4 แสดงประสิทธิภาพของไททาเนียมไดออกไซด์ในการกำจัดจุลินทรีย์ โดยเมื่อไททาเนียมไดออกไซด์ได้รับพลังงานแสงที่เป็นตัวกระตุ้น ทำให้อิเล็กตรอนในแถบวาเลนเคลื่อนที่ไปยังแถบคอนดักชัน และอิเล็กตรอนในแถบคอนดักชันจะทำปฏิกิริยากับออกซิเจน เกิดเป็นอนุมูลอิสระซูเปอร์ออกไซด์ ($\cdot\text{O}_2^-$) และโฮลในแถบวาเลนซึ่งทำปฏิกิริยารับอิเล็กตรอนจากเชื้อแบคทีเรียหรือโมเลกุลของน้ำในอากาศ ทำให้เกิดเป็นอนุมูลอิสระไฮดรอกซิล ($\cdot\text{OH}$) ซึ่งทั้ง 2 อนุมูลอิสระนี้เป็นตัวออกซิไดซ์ที่รุนแรงมาก ซึ่งจะเข้าไปทำปฏิกิริยากับ Peptidoglycan ของผนังเซลล์ชั้นนอก ทำให้เสียหายที่ในการป้องกันเซลล์ของแบคทีเรีย จนท้ายที่สุดผนังเซลล์ชั้นนอกถูกทำลาย นอกจากนี้แล้วยังเข้าไปทำลายสารต่าง ๆ ภายใน Cytoplasmic membrane อีกด้วย ส่งผลให้จุลินทรีย์ไม่เจริญเติบโต และตายในที่สุด (Sunada et al., 2003)

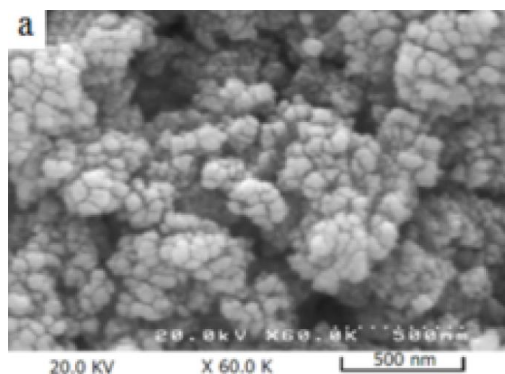
งานวิจัยอื่น ๆ ยังเผยแพร่อีกว่า (Matsunaga et al., 1988) การเกิดการออกซิเดชันในกระบวนการโฟโตคะตะไลซิสนั้น ทำให้เซลล์ของจุลินทรีย์เกิดความเสียหาย แร่ธาตุ ไบรติน และสารพันธุกรรมอื่น ๆ ของจุลินทรีย์เกิดการรั่วไหล และส่งผลทำให้เซลล์ตาย และสำหรับงานวิจัย (Gogniat et al., 2006) แสดงให้เห็นว่ายิ่งเซลล์มีอัตราการดูดซับไททาเนียมไดออกไซด์มากขึ้น ยิ่งทำให้เกิดกระบวนการโฟโตคะตะไลซิสมากขึ้น และสามารถกำจัดจุลินทรีย์ได้ดีมากยิ่งขึ้นเช่นกัน

5. การสังเคราะห์ไททาเนียมไดออกไซด์

การสังเคราะห์ไททาเนียมไดออกไซด์ สามารถสังเคราะห์ได้หลายแบบ แต่ละแบบจะทำให้โครงสร้างผลึกของไททาเนียมไดออกไซด์ที่แตกต่างกัน โดยการสังเคราะห์ไททาเนียมไดออกไซด์นั้นสามารถเตรียมได้ 3 วิธี และมีข้อดีข้อเสียแตกต่างกันไป ดังแสดงในตารางที่ 3

5.1 วิธีการตกตะกอนร่วม

เป็นวิธีการเตรียมไททาเนียมไดออกไซด์ที่เกิดจากการทำปฏิกิริยาระหว่างโพแทสเซียมไทเทนิลออกซาลेटไดไฮเดรต ($K_2[TiO(C_2O_4)_2] \cdot 2H_2O$) กับแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (NH_4OH) โดยการสังเคราะห์จะเรียกว่า ออกซาลेट โดยกรรมวิธีทางความร้อน เช่น การเผา เพื่อให้ได้ออกไซด์เกิดการตกตะกอน (Carp, Huisman, & Reller, 2004) ซึ่งจะใช้ออมโมเนียเป็นตัวทำให้สารตกตะกอน โดยจะตกตะกอนได้อย่างสมบูรณ์ที่พีเอชเท่ากับ 1 หลังจากนั้นจะนำตะกอนที่ได้ไปให้ความร้อนด้วยเตาเผาที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส จะได้ไททาเนียมไดออกไซด์เป็นผงสีขาวละเอียด มีอนุภาคนาโนระดับนาโนเมตร มีโครงสร้างผลึกเป็นแบบอนาเทส แต่หากนำไปให้ความร้อนที่อุณหภูมิสูงกว่า 500 องศาเซลเซียส จะได้เป็นโครงสร้างผลึกแบบรูไทล์



ภาพ 5 ภาพถ่าย SEM ของไททาเนียมไดออกไซด์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีการตกตะกอนร่วม

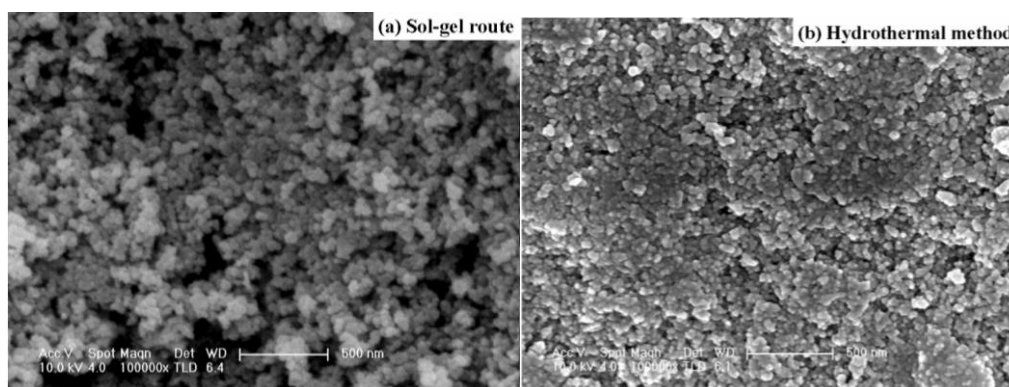
ที่มา: (Koohestania, Alinezhad, & Sadmezhaad, 2015)

5.2 วิธีไฮโดรเทอร์มอล

เป็นวิธีสังเคราะห์ไททาเนียมไดออกไซด์ ด้วยการใช้หม้อแรงดันภายใต้สภาวะควบคุมบรรยากาศ ทั้งความดัน และอุณหภูมิ ซึ่งในการสังเคราะห์จะใช้สารละลายไททาเนียมไอโซโพรพอกไซด์ ($\text{Ti}(\text{OCH}(\text{CH}_3)_2)_4$) ผสมร่วมกับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ซึ่งวิธีนี้จะทำการสังเคราะห์ภายใต้พีเอชเท่ากับ 1 และควบคุมอุณหภูมิระหว่างการสังเคราะห์ให้อยู่ที่ 150 องศาเซลเซียส หลังจากนั้นนำสารละลายที่ได้นั้นเข้าเครื่องไฮโดรเทอร์มอล โดยควบคุมเวลาและอุณหภูมิ ทำยที่สุดจะได้เป็นผงไททาเนียมไดออกไซด์ ซึ่งหลาย ๆ งานวิจัยใช้วิธีนี้ เพื่อเตรียม TiO_2 ในระดับอนุภาคนาโน (Andersson, Österlund, Ljungstroem, & Palmqvist, 2002; Chae et al., 2003)

5.3 วิธีโซล-เจล

เป็นวิธีที่นิยมใช้ในการสังเคราะห์ไททาเนียมไดออกไซด์อย่างแพร่หลาย (Pierre & Pajonk, 2002; Wight & Davis, 2002) โดยนำสารตั้งต้นที่อยู่ในรูปสารละลายไททาเนียมไดออกไซด์ เช่น Titanium tetraisopropoxide (TTiP), Titanium tetrachloride (TiCl_4) เป็นต้น มาทำปฏิกิริยาระดับโมเลกุล เกิดเป็นโมเลกุลขนาดเล็กและกระจายอยู่ในของเหลว หรือเกิดเป็นสายโซ่ของโมเลกุลที่ยาวมาก เรียกว่า โซล (Sol) และหลังจากนั้นจะเกิดปฏิกิริยาขึ้น จนทำให้เกิดความหนืด หรืออยู่ในรูปของเจล (Gel) นำเจลที่ได้ไปทำการระเหย และนำไปให้ความร้อนที่อุณหภูมิสูง ซึ่งในกระบวนการให้ความร้อนนี้ จะเป็นตัวกำหนดโครงสร้างผลึกของไททาเนียมไดออกไซด์ที่สังเคราะห์



ภาพ 6 ภาพถ่าย SEM ของไททาเนียมไดออกไซด์ที่สังเคราะห์ด้วย
วิธีโซล-เจล และวิธีไฮโดรเทอร์มอล

ที่มา: (Vijayalakshmi & Rajendran, 2012)

ตาราง 3 ข้อดีและข้อเสียของการสังเคราะห์ไททาเนียมไดออกไซด์ด้วยวิธีต่าง ๆ

วิธี	ข้อดี	ข้อเสีย
การตกตะกอนร่วม	ได้ผงละเอียดมีอัตราการตกตะกอนต่ำ ในสารละลายที่มีความเข้มข้นเจือจาง	วิธีการทำให้แห้งและการเผา มักทำให้อนุภาคเกาะติดกัน เกิดการรวมกันเป็นก้อนได้ง่าย
ไฮโดรเทอร์มอล	ได้ผงที่ละเอียด สามารถควบคุมขนาดของอนุภาคได้ และไม่จำเป็นต้องเผา	ต้องควบคุมอุณหภูมิ พีเอช และความเข้มข้นของสารที่เข้ามาทำปฏิกิริยาในเครื่องไฮโดรเทอร์มอลที่มีเครื่องควบคุมอัตราการกรวน
โซล-เจล	ได้ผงละเอียดสม่ำเสมอ มีความบริสุทธิ์สูง สามารถควบคุมลักษณะพื้นฐาน และการแจกแจงของอนุภาคได้	สารตั้งต้นมีราคาแพง

ที่มา: (ศรีสิทธิ์, 2556)

6. ทฤษฎีโซล-เจล

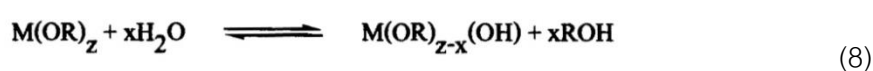
ทฤษฎีโซล-เจล (Sol- Gel) เป็นเทคนิคที่พัฒนา เพื่อใช้ในกระบวนการสังเคราะห์วัสดุ เซรามิก (Pierre & Pajonk, 2002; Wight & Davis, 2002) และเป็นตัวอย่างของการเตรียมโลหะ ออกไซด์ โดยผ่านกระบวนการไฮโดรไลซิส (Hydrolysis) ของสารประกอบอินทรีย์โลหะที่มีความ ว่องไวต่อการทำปฏิกิริยา มักนิยมใช้โลหะแอลคอกไซด์ (Alkoxides) ในสารละลายแอลกอฮอล์ (Alcoholic solution) ผลที่ได้คือ ไฮดรอกไซด์ (Hydroxide) ในกระบวนการเป็นการรวมกลุ่ม โมเลกุลไฮดรอกไซด์ และกำจัดน้ำออก ทำให้เกิดโครงร่างตาข่ายโลหะไฮดรอกไซด์ เมื่อไฮดรอก- ซิดแต่ละชนิดเชื่อมต่อกันเป็นสายยาว ทำให้สารละลายเกิดเป็นเจล กล่าวคือ เกิดการเปลี่ยนจาก โซล (Sol) กลายเป็นเจล (Gel) และยังเป็นเจลที่แน่น มีรูพรุน ซึ่งกระบวนการทั้งหมดผ่านขั้นตอน การทำให้เกิดสารแขวนลอยที่มีขนาดอนุภาคเล็กมาก โดยแรงที่กระทำกับโมเลกุลส่วนใหญ่เป็น แรงแวนเดอร์วาลส์ (Vander Waal's Force)

โซล (Sol) มีลักษณะเป็นคอลลอยด์ของเหลว ที่เกิดจากของแข็งแขวนลอยในของเหลว คอลลอยด์บางชนิด เปลี่ยนสภาพกลับไปกลับมาระหว่างโซลกับเจล ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับสภาวะแวดล้อม ต่าง ๆ เช่น อุณหภูมิ เป็นต้น

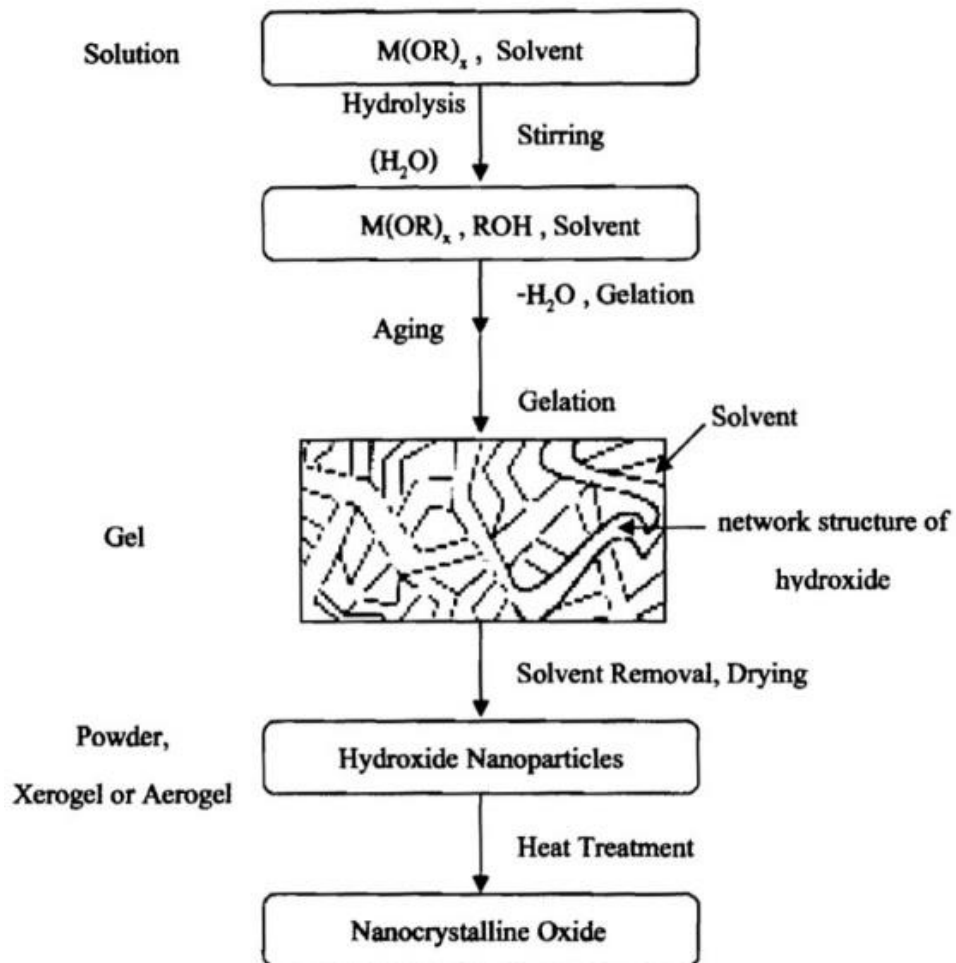
เจล (Gel) มีลักษณะเป็นคอลลอยด์ของแข็ง ที่เกิดจากของแข็งแขวนลอยในของเหลว ซึ่งเป็นโครงร่างตาข่ายเชื่อมโยงกัน 3 มิติของของแข็งที่มีความเป็นรูพรุนกระจายอยู่ทั่วทั้งผิวของ ของเหลว เมื่อผ่านการกำจัดตัวทำละลาย และทำให้แห้งที่สภาวะที่เหมาะสม จะกลายเป็นผงโลหะ ออกไซด์ที่มีคุณสมบัติที่ดี

เนื่องจากกระบวนการโซล-เจล เป็นกระบวนการในระดับนาโนเมตร เกิดปฏิกิริยาระดับนาโน เมตร ดังนั้นวัสดุที่สังเคราะห์ผ่านกระบวนการโซล-เจล จะได้เป็นวัสดุระดับนาโนเมตรเช่นกัน ซึ่ง กระบวนการดังกล่าวแสดงดังภาพ 7

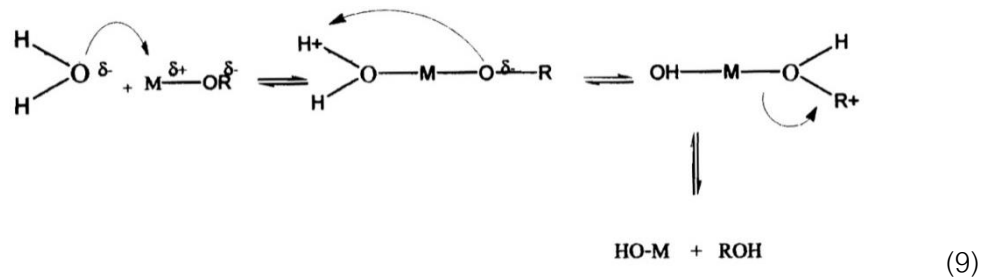
จากภาพ 7 การเกิดไฮโดรไลซิส (Hydrolysis) ของโลหะแอลคอกไซด์ ($M(OR)_z$) เกี่ยวข้อง กับปฏิกิริยาการแทนที่นิวคลีโอฟิลิก (Nucleophilic Substitution) และน้ำ ดังสมการที่ 8



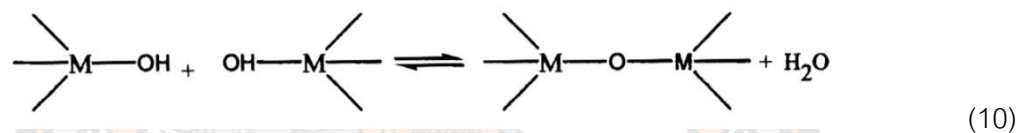
กลไกการเกิดปฏิกิริยา เริ่มจากการเติมประจุลบของ OH^- เข้าที่โลหะที่มีประจุบวก ($\text{M}^{\delta+}$) จากนั้นโปรตอนที่มีประจุบวกถูกย้ายมาที่หมู่แอลคอกซี (Alkoxy) ตามด้วยการกำจัด ROH ออก ดังสมการที่ 9



ภาพ 7 กระบวนการโซล-เจลของโลหะออกไซด์ระดับนาโน



การรวมตัว (Condensation) เกิดขึ้น เมื่อโมเลกุลไฮดรอกไซด์เชื่อมเข้าด้วยกัน ทำให้โมเลกุลของน้ำระเหยออกมา และเจลหรือโครงร่างตาข่ายของไฮดรอกไซด์จะเกิดขึ้นดังสมการที่ 10



การเกิดไฮโดรไลซิส และการรวมตัวกันที่เกิดขึ้น เป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อคุณสมบัติของผลผลิตสุดท้าย การควบคุมการไฮโดรไลซิสอย่างช้า ๆ จะช่วยทำให้ขนาดโมเลกุลของอนุภาคเล็กลง และมีคุณสมบัติเฉพาะตัวมากขึ้น

7. เทคนิคการเคลือบ

เทคนิคการเคลือบไททาเนียมไดออกไซด์บนบรรจุภัณฑ์อาหารนั้น ทำได้หลายวิธี โดยในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยเลือกการเตรียมฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์ด้วยวิธีโซล-เจล ตามหลักการของโซล-เจล ที่กล่าวเบื้องต้น เริ่มจากการเตรียมสารเคลือบให้อยู่ในรูปอะตอม โมเลกุล หรืออนุภาค จากนั้นนำมาเคลือบลงบนวัสดุบรรจุภัณฑ์อาหาร และเมื่อสารเคลือบอยู่บนวัสดุบรรจุภัณฑ์อาหาร จะเกิดการควบแน่น อะตอมของสารเคลือบจับตัวกันเป็นชั้นบาง ๆ เกิดเป็นฟิล์มบางขึ้น โดยฟิล์มบางต้องมีความหนาในระดับ 100 nm ถึงจัดว่าเป็น “ฟิล์มบาง” (Masciaglioli & Zhang, 2003)

เทคนิคการขึ้นรูปฟิล์มบางมีหลายแบบแตกต่างกันไป ขึ้นอยู่กับความต้องการในส่วนขอ ปริมาณสารเคลือบ และคุณภาพของฟิล์มบางที่ต้องการเตรียม โดยเทคนิคที่ใช้ในการขึ้นรูปฟิล์ม บางที่ใช้งานอย่างแพร่หลาย มี 2 วิธี ได้แก่

7.1 วิธีทางเคมี

วิธีทางเคมี (Chemical Techniques) เป็นการเคลือบที่ใช้การแตกตัวของสารเคมีในสภาพที่ เป็นก๊าซ ทำให้เกิดปฏิกิริยาเกิดเป็นสารใหม่ขึ้น และตกตะกอนเคลือบลงบนวัสดุที่ใช้รองรับการ เคลือบที่ต้องการ โดยวิธีที่เป็นที่รู้จัก ได้แก่ วิธีการพ่นสเปรย์ไพโรไลซิส (Spray Pyrolysis) และวิธี CVD (Chemical Vapor Deposition)

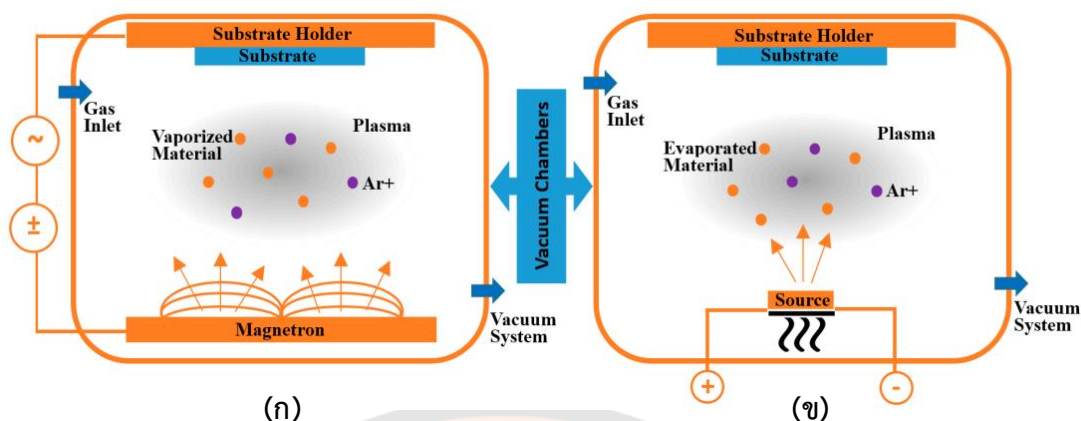
7.2 วิธีทางกายภาพ

วิธีทางกายภาพ (Physical Techniques) เป็นวิธีการที่อาศัยการหลุดออกของอะตอมของ สารเคลือบ แล้วเกิดการฟุ้งกระจายเข้าไปยึดติดกับอะตอมของวัสดุรองรับ ซึ่งการทำให้อะตอม หลุดนั้น หมายถึงการใช้ความร้อน (Thermal), อิเล็กตรอนในการระเหยฟิล์มบาง (Electron Beam Evaporation), วิธีการสปัตเตอริง (Sputtering), ไอออนบีมสปัตเตอริง (Ion Beam Sputtering) และรวมถึงวิธีการใช้แสงเลเซอร์ในการขึ้นรูปฟิล์มบาง (Laser Ablation)

โดยวิธีทางกายภาพนั้น สามารถแบ่งออกเป็น 2 วิธีหลัก ๆ (เยี่ยมพนากิจ, 2547) ได้แก่

1) การเคลือบด้วยวิธีระเหยสาร (T. Lee, Sanzogni, Burn, & Mark, 2020) เป็นการ เคลือบที่อาศัยการรวมตัวเป็นชั้นบาง ๆ ของสารเคลือบ ซึ่งการรวมตัวที่เกิดขึ้นนั้นเกิดจากการ ระเหยของสารเคลือบในระบบสุญญากาศกลายเป็นไอ ลอยลงไปเคลือบบนวัสดุรองรับที่ต้องการ เคลือบ จากนั้นให้อุณหภูมิกับวัสดุรองรับให้เหมาะสม จะเกิดการควบแน่นของสารเคลือบบนวัสดุ รองรับขึ้น และเกิดเป็นชั้นฟิล์มบาง วิธีการนี้มีข้อเสีย คือ แสงยึดเหนี่ยวระหว่างอะตอมของสาร เคลือบและวัสดุรองรับอาจไม่สูงมาก และอาจเกิดการปนเปื้อนขึ้นได้ง่ายในระหว่างการเคลือบ

2) การเคลือบด้วยวิธีสปัตเตอริง (Wasa, Kitabatake, & Adachi, 2004) เป็นวิธีการ ที่อาศัยการรวมตัวเป็นชั้นของสารเคลือบ เกิดเป็นชั้นฟิล์มบางเช่นกัน แต่การเคลือบด้วยวิธีการนี้ เกิดจากอะตอมของสารเคลือบที่เกิดจากกระบวนการสปัตเตอริง ด้งด้วยความเร็วสูง เข้าชนกับ วัสดุรองรับ ทำให้อะตอมของสารเคลือบฝังตัวแน่นบนวัสดุรองรับ วิธีนี้เป็นวิธีที่สารเคลือบยึดเกาะ บนวัสดุรองรับได้ดีกว่าวิธีการระเหยสาร



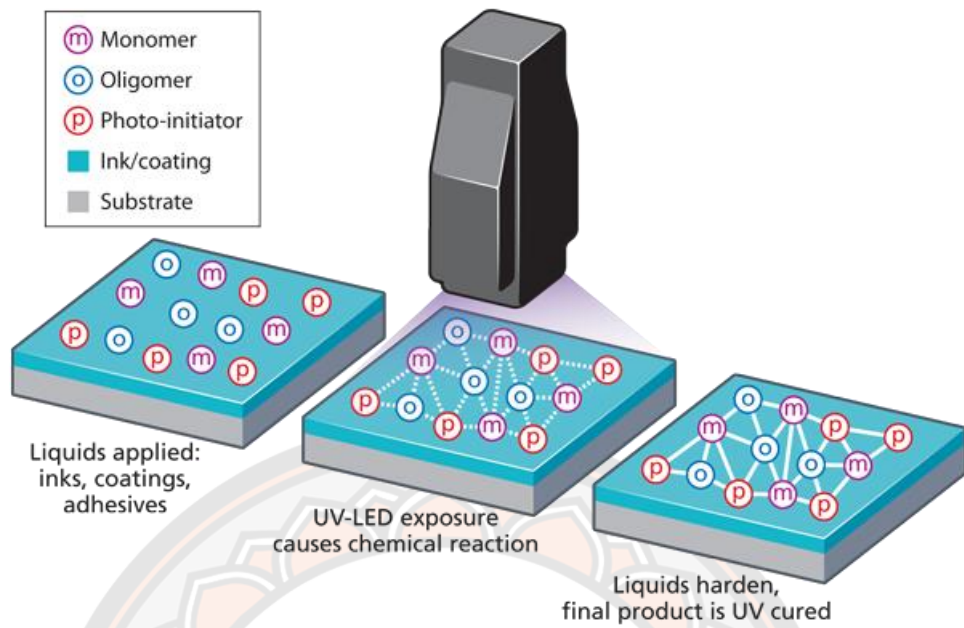
ภาพ 8 หลักการเคลือบด้วยวิธีทางกายภาพ (ก) วิธีสปัตเตอร์ริง (ข) วิธีระเหยสาร

ที่มา: (Baptista, Silva, Porteiro, Míguez, & Pinto, 2018)

8. เทคนิคการเคลือบแบบยูวีเคียว

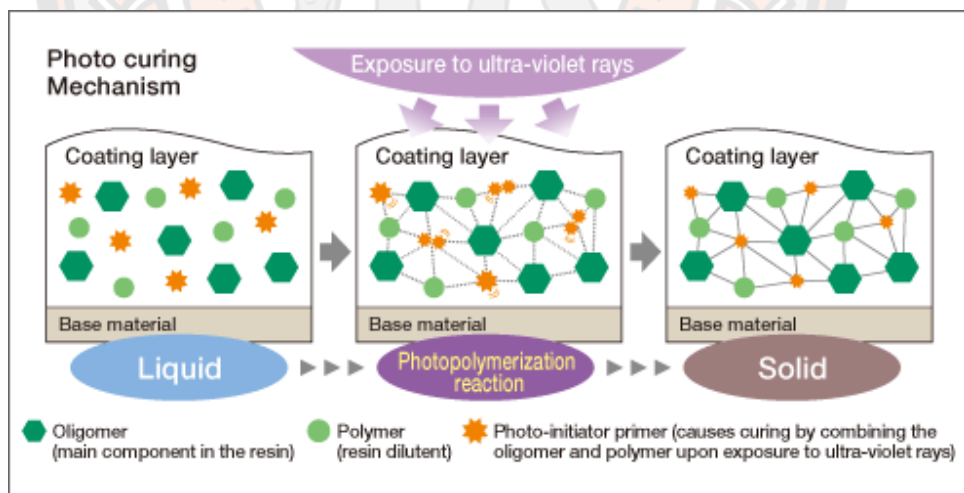
เทคนิคการเคลือบแบบยูวีเคียวเป็นวิธีการเคลือบทางกายภาพ ปกติใช้ในงาน 3-D printer เป็นเทคนิคที่มีประสิทธิภาพในการเคลือบ โดยอาศัยเลเซอร์ของแสงอัลตราไวโอเล็ตช่วยจ่ายพลังงาน เพื่อกระตุ้นกระบวนการโฟโตพอลิเมอไรเซชัน (Photo-Polymerization process) ซึ่งเป็นการเคลือบที่ใช้พลังงานความร้อนที่ไม่สูงมากนัก เพื่อเปลี่ยนสถานะของสารเคลือบจากเจลกลายเป็นของแข็งยึดเกาะติดบนวัสดุรองรับ (Anastasio et al., 2018)

วิธีนี้เป็นวิธีที่ผู้วิจัยเลือกใช้ในการเคลือบ เนื่องจากการเคลือบที่มีราคาต้นทุนต่ำ และใช้ความร้อนที่อุณหภูมิไม่สูงมาก สามารถทำให้ไททานเนียมไดออกไซด์แห้งติดบนผิวของบรรจุภัณฑ์อาหารอย่างช้า ๆ ด้วยรังสีอัลตราไวโอเล็ตซี (UVC) ซึ่งเป็นตัวจ่ายพลังงานกระตุ้นในกระบวนการโฟโตพอลิเมอไรเซชัน



ภาพ 9 เทคนิคการเคลือบแบบยูวีเคียวในงาน 3-D printer

ที่มา: (Gotro, 2016)



ภาพ 10 หลักการการเกิดกระบวนการโฟโตพอลิเมอไรเซชัน

ที่มา: (CORPORATION, 2020)

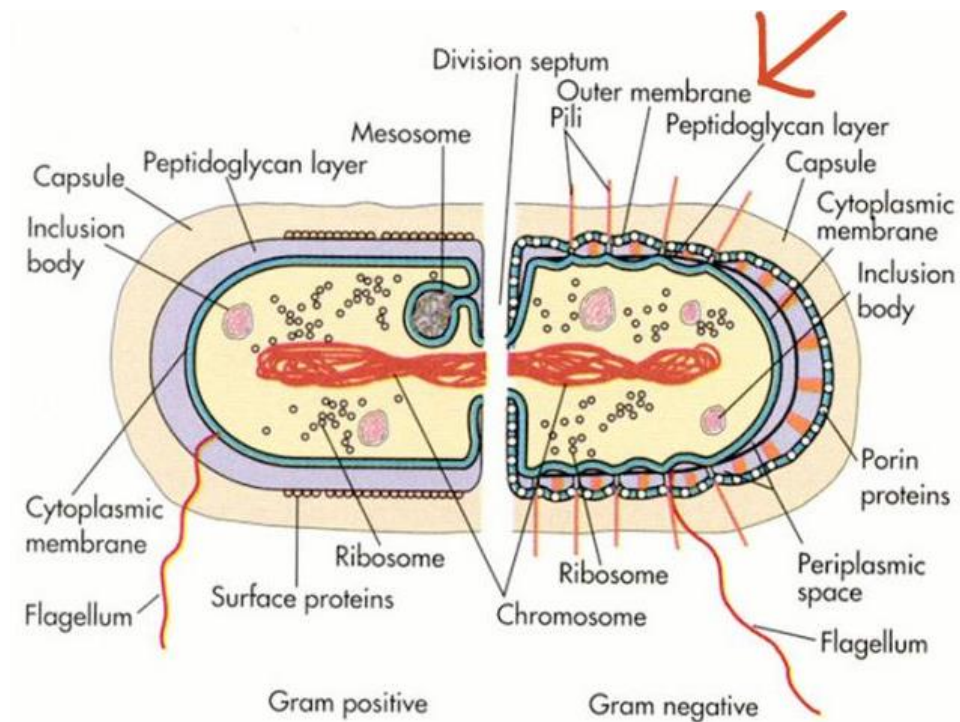
9. จุลินทรีย์

จุลินทรีย์ (Microorganism) เป็นสิ่งมีชีวิตขนาดเล็กที่อาศัยในร่างกายมนุษย์เป็นที่อยู่อาศัย และเป็นแหล่งอาหาร เช่น โพรทोजมูก ผิวน้ำ ทางเดินอาหาร ทางเดินหายใจ เป็นต้น จุลินทรีย์อาจอยู่ในสภาพอิสระไม่เกี่ยวข้องกับร่างกายมนุษย์เลย ไม่ก่อให้เกิดโรค หรือจุลินทรีย์บางชนิดให้ประโยชน์กับร่างกายมนุษย์ได้ เช่น ช่วยในกระบวนการเมตาบอลิซึมของอาหาร ป้องกันร่างกายจากการติดเชื้อของโรคที่มีความรุนแรง และยังสามารถช่วยกระตุ้นภูมิคุ้มกันของร่างกาย ความสัมพันธ์ระหว่างจุลินทรีย์กับมนุษย์เป็นแบบโฮสต์ (Host) มนุษย์จะเป็นโฮสต์ให้กับจุลินทรีย์ที่มีทั้งแบบภาวะเกื้อกูล (Commensal) ซึ่งได้ประโยชน์เพียงฝ่ายเดียว หรือแบบพึ่งพากัน (Mutualism) ที่ได้ประโยชน์ทั้งคู่ จุลินทรีย์ที่เข้ามาอาศัยในร่างกายของมนุษย์ได้ประโยชน์เพียงฝ่ายเดียว และยังสามารถโฮสต์ ส่งผลต่อการทำงานของร่างกายให้ผิดปกติ ก่อให้เกิดโรค ความสัมพันธ์แบบนี้จะเรียกว่า ภาวะปรสิต (Parasitism) จุลินทรีย์ที่ก่อให้เกิดโรค เรียกว่า เชื้อก่อโรค (Pathogens) แต่ทั้งนี้ทั้งนั้นการก่อให้เกิดโรคของเชือนั้น ต้องมีปัจจัยที่ทำให้เชื้อเป็นอันตรายต่อโฮสต์ เช่น ความสามารถในการบุกรุกเข้าสู่เซลล์ การเกาะติดผิวเซลล์ของโฮสต์ เกิดสารพิษ หรือเอนไซม์ ที่ทำให้เชื้อมีความรุนแรงจนสามารถก่อให้เกิดโรคได้ เป็นต้น

9.1 ประเภทของจุลินทรีย์

จุลินทรีย์สามารถแบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม ตามลักษณะของเซลล์ คือ เซลล์โพรคาริโอต (Prokaryotic cell) จะเป็นเซลล์ที่ไม่มีเยื่อหุ้มนิวเคลียส (Nuclear membrane) มีสารพันธุกรรมกระจัดกระจายอยู่ในไซโตพลาสซึม (Cytoplasm) และอีก 1 กลุ่ม คือ เซลล์ยูคาริโอต (Eucaryotic cell) เป็นเซลล์ที่มีเยื่อหุ้มนิวเคลียส สารพันธุกรรม (Genetic material) จะอยู่รวมกลุ่มกันในไซโตพลาสซึม ได้แก่ ฟังไจ โปรโตซัว และสาหร่ายอื่น ๆ ยกเว้นสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงิน (ศรีเป็ล่ง, 2548)

1) แบคทีเรีย (Bacteria) จัดอยู่ในกลุ่มเซลล์โพรคาริโอต ซึ่งเป็นสิ่งมีชีวิตเซลล์เดียวผนังเซลล์ ประกอบด้วยกรดอะมิโน และคาร์โบไฮเดรต นิวเคลียสของแบคทีเรียมีดีเอ็นเอ (DNA) ที่มีลักษณะเป็นวงกลมคู่ชิด ไม่มีผนังห่อหุ้ม แบคทีเรียสามารถแบ่งได้อีกเป็น 2 กลุ่ม คือ แบคทีเรียแกรมบวก (Gram-positive bacteria) และแบคทีเรียแกรมลบ (Gram-negative bacteria) ซึ่งโครงสร้าง และองค์ประกอบของเซลล์แบคทีเรียแกรมบวก และแกรมลบ แสดงดังภาพ 11



ภาพ 11 โครงสร้างและองค์ประกอบของผนังเซลล์แบคทีเรียแกรมบวกและแกรมลบ

ที่มา: (Pertanian, 2008)

2) ฟังไจ (Fungi) หรือเห็ด รา จัดอยู่ในกลุ่มเซลล์ยูคาริโอต มีเยื่อหุ้มเซลล์ และผนังเซลล์ เป็นสารไคตินกับเซลลูโลส ฟังไจสามารถพบได้ทั้งที่เป็นสิ่งมีชีวิตเซลล์เดียว และแบบเส้นใยที่เรียกว่า ไฮฟา (Hypha) แต่หากมีการรวมกลุ่มกัน เรียกว่า ขั้วมรา (Mycelium) ซึ่งลักษณะของเส้นใยแบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ เส้นใยมีผนังกัน (Septate hypha) และเส้นใยไม่มีผนังกัน (Nonseptate hypha or coenocytic hypha) ไม่มีคลอโรพลาสต์ ได้รับสารอาหารจากการย่อยสลายสารอินทรีย์ โดยมีการปล่อยเอนไซม์การย่อยสลายสารอินทรีย์ที่มีขนาดใหญ่ และซับซ้อนให้กลายเป็นโมเลกุลเล็ก ๆ ได้ และดูดซึมเข้าสู่เซลล์ (Saprophyte) เห็ดราบางชนิดมีประโยชน์ทางด้านอุตสาหกรรม เช่น การผลิตกรดอินทรีย์ เป็นต้น

3) สาหร่าย (Algae) เป็นสิ่งมีชีวิตที่อยู่ในกลุ่มยูคาริโอต ส่วนใหญ่จะมีคลอโรพลาสต์เป็นสีเขียว ใช้สำหรับการสังเคราะห์แสง สาหร่ายมีทั้งที่เป็นเซลล์เดียวและอยู่กันเป็นกลุ่ม ๆ สาหร่าย

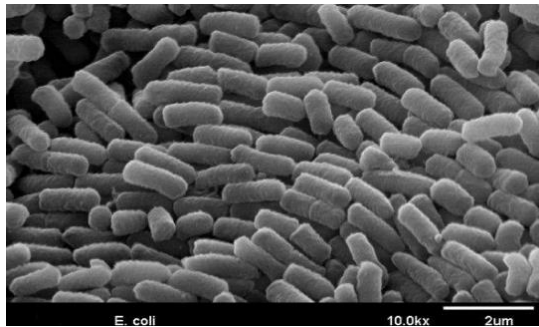
บางชนิดมีประโยชน์ทางด้านเศรษฐกิจ คือ สามารถนำมาทำปุ๋ย อาหาร ยา และขนมหวานบางชนิด

4) โปรโตซัว (Protozoa) เป็นสิ่งมีชีวิตเซลล์เดี่ยวขนาดเล็ก ซึ่งมีความสำคัญมากกับระบบนิเวศ สามารถอาศัยอยู่ได้ในน้ำจืด น้ำเค็ม รวมทั้งบริเวณที่เป็นพื้นที่ชื้น นอกจากนี้ยังมีการค้นพบว่า โปรโตซัวอาศัยอยู่ในร่างกายของสัตว์บกหลายชนิด โปรโตซัวสามารถสร้างอาหารเองได้ ซึ่งส่วนใหญ่จะมีสีเขียวของคลอโรฟิลล์ แต่ก็จะมีโปรโตซัวบางชนิดที่ไม่สามารถสร้างอาหารเองได้ บางครั้งหากมีโปรโตซัวมากเกินไปในน้ำเค็ม จะทำให้เกิดปรากฏการณ์ขึ้นปลาวาฬ (Red tide) ซึ่งก่อให้เกิดอันตรายต่อสัตว์น้ำ

5) ไวรัส (Virus) ถือเป็นจุลินทรีย์ชนิดหนึ่ง ที่สามารถก่อให้เกิดการติดเชื้อ (Infections agents) ทั้งในพืช สัตว์ และมนุษย์ เป็นปรสิตที่อาศัยในสิ่งมีชีวิต ซึ่งสามารถแบ่งแยกออกเป็น 2 ชนิด ได้แก่ ไวรัส (Virus) และไวรอยด์ (Viroid) มีลักษณะแตกต่างจากพวกโพรคาริโอต และยูคาริโอต กล่าวคือ ไวรัสมีโครงสร้างที่ไม่เป็นเซลล์ ไม่มีทั้งเยื่อหุ้มเซลล์ และไซโทพลาซึม มีเพียงอนุภาคเพียงอย่างเดียว

9.2 *Escherichia Coli*

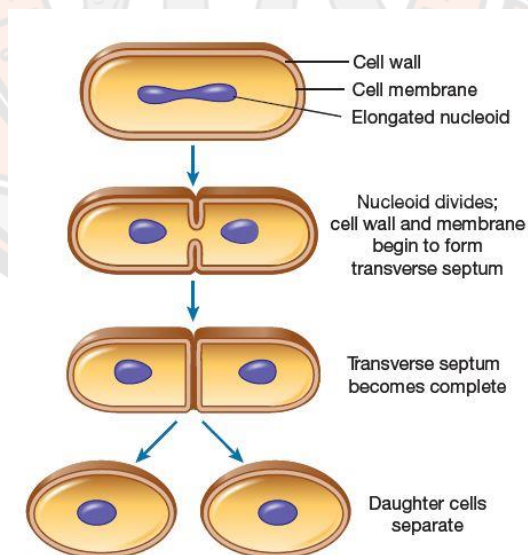
Escherichia Coli (*E. Coli*) เป็นแบคทีเรียแกรมลบ มีรูปร่างลักษณะเป็นแท่ง (Gram-negative bacteria) ขนาด 1-2 μm จัดเป็นพวกที่สามารถเจริญเติบโตได้ทั้งที่มี และไม่มีออกซิเจน (Facultative anaerobic) เคลื่อนที่ได้โดยเพอริทริคัสแฟลกเจลลา (Peritrichous flagella) *E. Coli* แม้ว่าจะสามารถเจริญเติบโตได้ทุกสภาวะ แต่จะสามารถเจริญเติบโตได้ดีในสภาวะที่มีออกซิเจน มักพบได้ในลำไส้ใหญ่ และอุจจาระของมนุษย์ หรือสัตว์เลือดอุ่น ซึ่ง *E. Coli* มีมากกว่า 100 สายพันธุ์ ส่วนใหญ่จะไม่ก่อให้เกิดโรค แต่บางสายพันธุ์จะทำให้เกิดโรคได้ เช่น โรคท้องร่วง ทางเดินปัสสาวะอักเสบ โสติดเป็นพิษ และเยื่อหุ้มสมองอักเสบ เป็นต้น



ภาพ 12 ภาพถ่าย SEM ของแบคทีเรีย *E. Coli*

ที่มา: (Keerthana, 2016)

ที่อยู่อาศัยของ *E. Coli* ส่วนใหญ่เป็นบริเวณห้องน้ำ ได้แก่ พื้นห้องน้ำ สายชำระ ลูกบิดประตู เป็นต้น การเจริญเติบโตของ *E. Coli* จะขยายพันธุ์แบบไม่อาศัยเพศ ใช้การแบ่งเซลล์แบบหนึ่งเซลล์เป็นสองเซลล์ แสดงดังภาพ 13

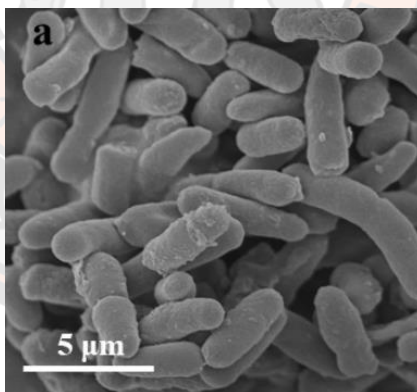


ภาพ 13 แสดงการแบ่งเซลล์ของ *E. Coli* แบบ Binary fission

ที่มา: (Black & Black, 2017)

9.3 *Salmonella typhimurium*

Salmonella typhimurium (*S. typhimurium*) เป็นแบคทีเรียชนิดแกรมลบ มีลักษณะเป็นรูปท่อน สามารถเคลื่อนที่ได้โดยใช้แฟลกเจลลารอบ ๆ เซลล์ เป็นแบคทีเรียที่ต้องใช้ออกซิเจนในการเจริญเติบโต ซึ่งอุณหภูมิที่เหมาะสมในการเจริญเติบโตของ *S. typhimurium* คือประมาณ 37 องศาเซลเซียส เชื้อ *S. typhimurium* สามารถทนความร้อนได้แตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับชนิด สายพันธุ์ และสภาพแวดล้อมในการเติบโต เป็นเชื้อที่สามารถติดต่อได้จากสัตว์สู่คน หรือจากสัตว์สู่สัตว์ ซึ่งมนุษย์ส่วนใหญ่จะได้รับเชื้อ *S. typhimurium* จากการปนเปื้อนมากับน้ำ หรืออาหาร เช่น ไข่กรอก แชนวิช แฮม หรืออาหารอื่น ๆ ที่นิยมเก็บไว้ในอุณหภูมิห้อง นอกจากนี้ยังพบเชื้อ *S. typhimurium* ในอาหารจำพวกเนื้อ เช่น เนื้อไก่ ไช้ นม ปลา อาหารทะเล รวมไปถึงยา และผักสดต่าง ๆ ซึ่งหากอาหารจำพวกนี้ไม่ได้ทำให้สุกก่อนรับประทาน หรือสุกไม่เพียงพอ ก็จะส่งผลทำให้เกิดโรคอาหารเป็นพิษได้ อาการจะเริ่มหลังจากได้รับเชื้อประมาณ 6-48 ชั่วโมง โดยอาการทั่วไป คือ คลื่นไส้ อาเจียน ท้องเดิน ปวดศีรษะ ปวดท้อง อ่อนเพลีย และหากเกิดอาการแทรกซ้อน อาจทำให้เป็นอันตรายถึงชีวิตได้



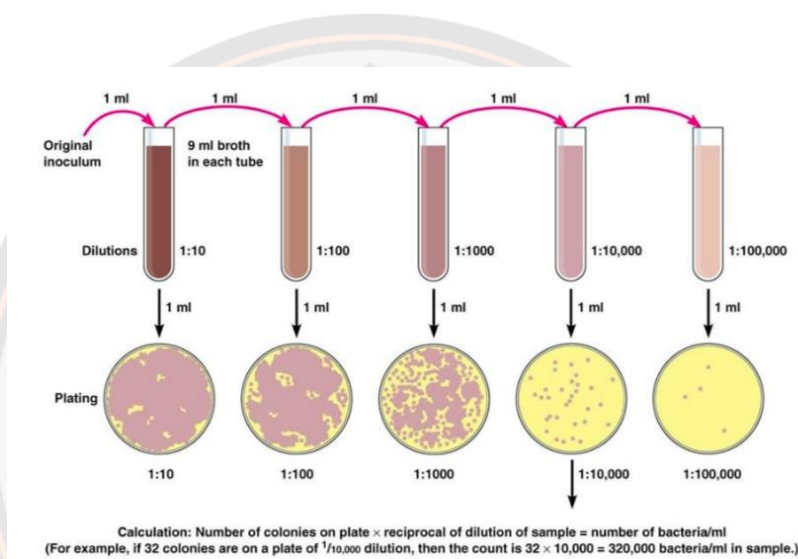
ภาพ 14 ภาพถ่าย SEM ของแบคทีเรีย *S. typhimurium*

ที่มา: (Liu et al., 2022)

10. การวิเคราะห์จุลินทรีย์

สำหรับการตรวจสอบจุลินทรีย์ นิยมใช้วิธีการเพาะเชื้อ ซึ่งวิธีนี้จะแบ่งลักษณะการเลี้ยงเชื้อได้ 2 ประเภทใหญ่ ๆ คือ

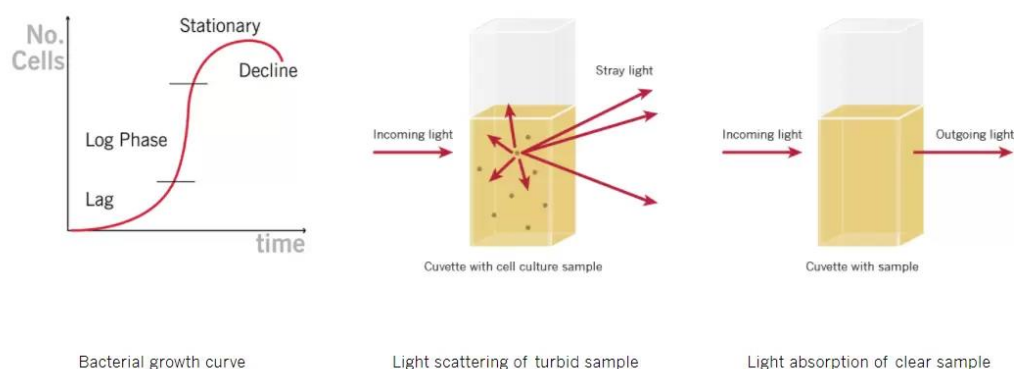
1) การนับจำนวนเชื้อ (Enumeration) เป็นการนับจำนวนเชื้อ เพื่อตรวจสอบว่าในสิ่งที่ทำกรตรวจสอบนั้นมีเชื้ออยู่จำนวนเท่าไร ด้วยการนับจำนวนโคโลนีที่ขึ้นบนจานอาหารเลี้ยงเชื้อ เป็นการตรวจสอบเชิงปริมาณ การตรวจสอบด้วยวิธีนี้ รายงานผลออกมาเป็นตัวเลข โดยมีหน่วยเป็น CFU (Colony forming unit) เช่น วิธี Standard plate count technique



ภาพ 15 การนับจำนวนเชื้อจุลินทรีย์ด้วยวิธี Standard plate count technique

ที่มา: (Tankeshwar, 2022)

2) การตรวจหาเชื้อ (Detection) เป็นการตรวจหาเชื้อจุลินทรีย์ ว่ามีอยู่ในสิ่งที่ตรวจสอบหรือไม่ โดยจะทำการเลี้ยงจุลินทรีย์นั้น ๆ ในอาหารเลี้ยงเชื้อที่เหมาะสม เพื่อให้เชื้อสามารถเพิ่มจำนวนได้มาก ๆ แล้วทำการตรวจสอบว่า ยังตรวจพบเชื่อนั้นหรือไม่ เช่น การตรวจสอบหาเชื้อ *E. Coli* เป็นต้น การตรวจสอบเชื้อจุลินทรีย์แบบนี้ สามารถรายงานผลเพียงแค่พบเชื้อ (Presence) หรือไม่พบเชื้อ (Absence) เท่านั้น เช่น วิธี OD600



ภาพ 16 การตรวจหาเชื้อด้วย วิธี OD600

ที่มา: (Biocat, 2020)

11. บรรจุภัณฑ์อาหาร

ปัจจุบันบรรจุภัณฑ์อาหารถือเป็นองค์ประกอบที่สำคัญอย่างมากในอุตสาหกรรมอาหาร นอกจากจะใช้บรรจุอาหารแล้ว ยังเก็บรักษาคุณภาพของอาหารให้คงอยู่สภาพเดิม บางครั้งยังช่วยเพิ่มมูลค่าของผลิตภัณฑ์ และเพิ่มโอกาสทางการแข่งขันด้านการขายมากขึ้น ซึ่งบรรจุภัณฑ์ส่วนใหญ่เป็นพลาสติก เนื่องจากความก้าวหน้าทางเทคโนโลยีในด้านอุตสาหกรรมพลาสติก โดยในปัจจุบันสามารถผลิตเม็ดพลาสติกได้หลายชนิด และมีคุณสมบัติที่แตกต่างกันไป สามารถเลือกใช้ได้ตามความเหมาะสม และยังมีต้นทุนที่ต่ำ พลาสติกที่ใช้ในบรรจุภัณฑ์มีทั้งรูปแบบที่เป็นแผ่นบาง เรียกว่า “ฟิล์มบางพลาสติก” นิยมนำมาใช้ห่อ หรือใส่อาหาร รวมถึงนำไปขึ้นรูปเป็นภาชนะรูปทรงต่าง ๆ เพื่อบรรจุอาหาร เช่น ขวด กล่อง ถัง เป็นต้น วัสดุที่นำมาผลิตเป็นบรรจุภัณฑ์อาหาร อาจจะเป็นพลาสติกชนิดเดียวกัน หรือใช้ร่วมกับวัสดุอื่น ๆ ได้ เช่น กระดาษ ขึ้นอยู่กับการตัดสินใจเลือกบรรจุภัณฑ์ที่เหมาะสมกับผลิตภัณฑ์ (Quintavalla & Vicini, 2002)

พลาสติกที่นำมาผลิตเป็นบรรจุภัณฑ์อาหาร มาจากพอลิเมอร์ปิโตรเคมี เช่น พอลิเอทิลีน (Polyethylene, PE) พอลิโพรพิลีน (Polypropylene, PP) และพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต (Polyethylene Terephthalate) เพื่อนำมาผลิตเป็นบรรจุภัณฑ์ต่าง ๆ เช่น ถุงร้อน ถุงเย็น ใช้ห่ออาหาร หรือบรรจุอาหารได้ทุกชนิด ใช้ทำถุงบรรจุผัก ผลไม้สด ใช้ทำฟิล์มบางชนิดยืดได้ ห่อหุ้มอาหาร ใช้ในการห่ออาหารสดพร้อมปรุง เนื้อสด เป็นต้น ซึ่งพอลิเมอร์เหล่านี้ย่อยสลายได้ยาก และ

ก่อให้เกิดผลพิษต่อสิ่งแวดล้อมได้ ปัจจุบันจึงมีการนำพอลิเมอร์ชีวภาพมาทดแทน เพื่อลดปัญหาทางสิ่งแวดล้อม และยังเป็น การเพิ่มมูลค่าให้กับผลผลิตทางการเกษตร หรือวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรได้ ย่อยสลายได้ง่ายตามธรรมชาติ และยังเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมอีกด้วย ปัจจุบันอุตสาหกรรมบรรจุภัณฑ์อาหารจึงเริ่มสนใจพอลิเมอร์ทางชีวภาพมากขึ้น (Sarasa, Gracia, & Javierre, 2009)

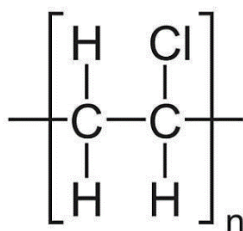
	PACKAGING FILM	 PVC		P4HB PBHH	<ul style="list-style-type: none"> Flexible Good moisture and oxygen barriers Ductile
	PLASTIC BAGS	 LDPE		P(3HB-co-4HB) PBHH	<ul style="list-style-type: none"> Flexible Tough Ductile
	FOOD CONTAINERS	 PP		PHBV	<ul style="list-style-type: none"> Stiff High operating temperature Tough
	DISPOSABLE CUTLERY	 PS		PH3B PHBV	<ul style="list-style-type: none"> Strong Stiff High softening temperature
	MEDICAL SUTURES	 PLA		P(3HB-co-4HB)	<ul style="list-style-type: none"> Biocompatible Resorbable Strong

ภาพ 17 พอลิเมอร์ปิโตรเคมีที่นำมาใช้ผลิตเป็นบรรจุภัณฑ์ต่าง ๆ

ที่มา: (Lingle, 2018)

1) พอลิไวนิลคลอไรด์

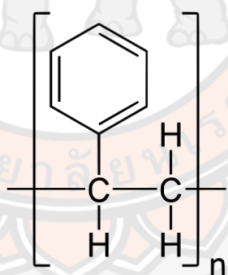
พอลิไวนิลคลอไรด์ (Polyvinyl Chloride, PVC) เป็นพลาสติกที่มีความเป็นผลึกได้ง่าย โครงสร้างทางเคมีของโมเลกุลมีมิติแบบสุ่ม (Atactic) และโครงสร้างยังมีอะตอมของคลอรีนเชื่อมอยู่ระหว่างอะตอมของคาร์บอน ส่งผลทำให้โมเลกุลของพอลิไวนิลคลอไรด์มีแรงดึงดูดระหว่างขั้วสูง มีความหนาแน่นสูง ทำให้มีความยืดหยุ่นที่ดี สามารถป้องกันการซึมผ่านของไขมัน และก๊าซได้เป็นอย่างดี นิยมนำมาขึ้นรูปเป็นท่อน้ำประปา สายยางใส พลาสติกแรปสำหรับห่ออาหาร เป็นต้น (ฉิมกมลทอง, 2554)



ภาพ 18 สูตรโครงสร้างของพอลิไวนิลคลอไรด์

2) พอลิสไตรีน

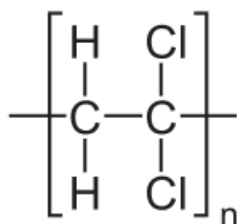
พอลิสไตรีน (Polystyrene, PS) เป็นพลาสติกที่มีน้ำหนักเบา แต่ยังคงจัดให้อยู่ในกลุ่มของพลาสติกชนิดแข็ง มีความสามารถในการขึ้นรูปได้ดี ไม่มีสี ไม่มีกลิ่น สามารถทนต่อสภาวะที่เป็นกรดอ่อน และด่างอ่อนได้ แต่ไม่ทนความร้อน และสารทำละลายอินทรีย์ เช่น น้ำมัน เบนซิน ทินเนอร์ เป็นต้น พอลิสไตรีนนิยมผลิตมาจากเม็ดพลาสติก ชนิดเทอร์โมพลาสติก ที่มีชื่อว่า Polystyrene Bead โดยจะนำมาอัดด้วยก๊าซ (Volatile liquid) และผ่านความร้อน ทำให้เนื้อของเม็ดพลาสติกพองขึ้น เกิดเป็นผลิตภัณฑ์ที่เรียกว่า โฟม (ผลพฤษ, 2549)



ภาพ 19 สูตรโครงสร้างของพอลิสไตรีน

3) พอลิไวนิลิดีนคลอไรด์

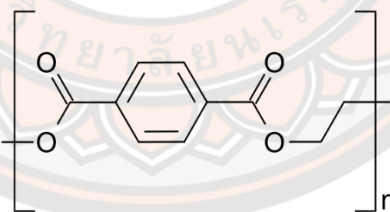
พอลิไวนิลิดีนคลอไรด์ (Polyvinylidene Chloride, PVDC) เป็นพลาสติกที่มีลักษณะบางใส เหนียว มีความยืดหยุ่นสูง และสามารถเกาะติดกับขอบภาชนะได้ดี เนื่องจากมีโครงสร้างโมเลกุลที่สามารถเกิดเป็นผลึกได้ง่าย ผลึกที่เกิดขึ้นเป็นส่วนที่กั้นไม่ให้ก๊าซ หรือไอน้ำต่าง ๆ ผ่านได้ ข้อดีส่วนนี้จึงถูกนำมาประยุกต์ใช้เป็นฟิล์มบาง ป้องกันความชื้นสำหรับอาหารสด เพื่อไม่ให้อากาศหรือแบคทีเรียต่าง ๆ สัมผัสอาหาร สามารถคงสภาพของอาหารได้ยาวนานขึ้น (ปนิทานเต, 2553)



ภาพ 20 สูตรโครงสร้างของพอลิไวนิลคลอไรด์

4) พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต

พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต (Polyethylene terephthalate, PET) เป็นเรซินพลาสติกชนิดหนึ่ง สามารถขึ้นรูปเป็นบรรจุภัณฑ์อาหารได้หลากหลายชนิด เช่น อาหาร เครื่องดื่ม ซึ่งปัจจุบันบรรจุภัณฑ์ที่ผลิตจาก PET ได้รับความนิยมอย่างแพร่หลาย เนื่องจากมีความแข็งแรง ความคงตัวต่อสภาวะที่ใช้บรรจุ ความใส น้ำหนักเบา และปลอดภัยต่อการสัมผัสอาหาร นอกจากนี้ยังสามารถนำมารีไซเคิลได้อีกด้วย พลาสติก PET สามารถกันการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจน และไอน้ำได้ จึงเป็นที่นิยมนำมาทำเป็นบรรจุภัณฑ์ของน้ำดื่ม และเครื่องดื่มต่างๆ



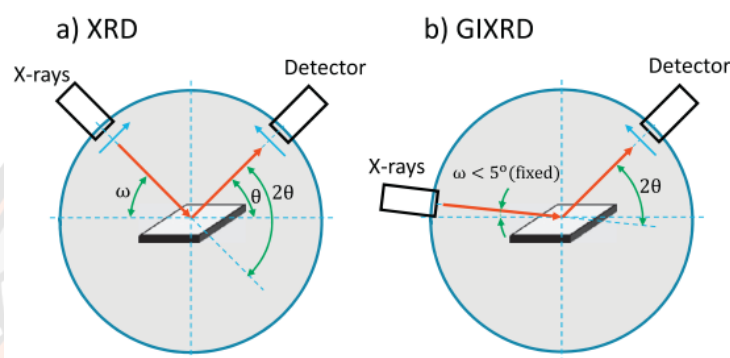
ภาพ 21 สูตรโครงสร้างของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต

12. หลักการของเครื่องมือวิเคราะห์ที่ใช้ในงานวิจัย

ในงานวิจัยนี้ ทำการวิเคราะห์เครื่องมือทั้งหมด 7 เครื่องมือ เพื่อศึกษาคุณสมบัติของบรรจุภัณฑ์อาหารที่เคลือบด้วยฟิล์มบางไททานเนียมไดออกไซด์ รวมทั้งใช้ในการเปรียบเทียบผลระหว่างบรรจุภัณฑ์ที่เคลือบและไม่เคลือบด้วยฟิล์มบางไททานเนียมไดออกไซด์ โดยเครื่องมือทั้งหมด แสดงรายละเอียดดังนี้

12.1 การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray Diffractometer, XRD)

เป็นเครื่องมือวิเคราะห์เชิงปริมาณ และเชิงโครงสร้างของผลึก โดยใช้เทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ โดยเมื่อรังสีเอ็กซ์ตกกระทบที่พื้นผิวผลึกของตัวอย่างทำมุม θ รังสีส่วนที่หนึ่งจะเกิดการกระเจิงออกไป ส่วนรังสีที่สองจะผ่านไปยังชั้นที่ 2 ของอะตอม โดยการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ที่มุมต่าง ๆ จะถูกวิเคราะห์ประมวลผล



ภาพ 22 หลักการทำงานของเครื่อง XRD และเครื่อง XRD ในโหมด GIXRD

ที่มา: (Stabrawa et al., 2019)

จากภาพ 22 เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ สามารถมีได้หลายโหมดแตกต่างกันที่มุมของแหล่งกำเนิดแสง เพื่อให้เหมาะกับตัวอย่างที่ต้องการวิเคราะห์ แหล่งกำเนิดรังสีเอ็กซ์ และเครื่องตรวจจับ (Detector) จะหมุนไปรอบ ๆ ตัวอย่าง มุมที่รังสีแผ่ออกไปยังตัวอย่าง คือ ω และมุมระหว่างตัวอย่างกับรังสีเอ็กซ์ที่เลี้ยวเบน คือ θ ซึ่งเหมือนกับกฎของแบรกก์ (Bragg's law) ในสมการที่ 11

$$n\lambda = 2d \sin\theta \quad (11)$$

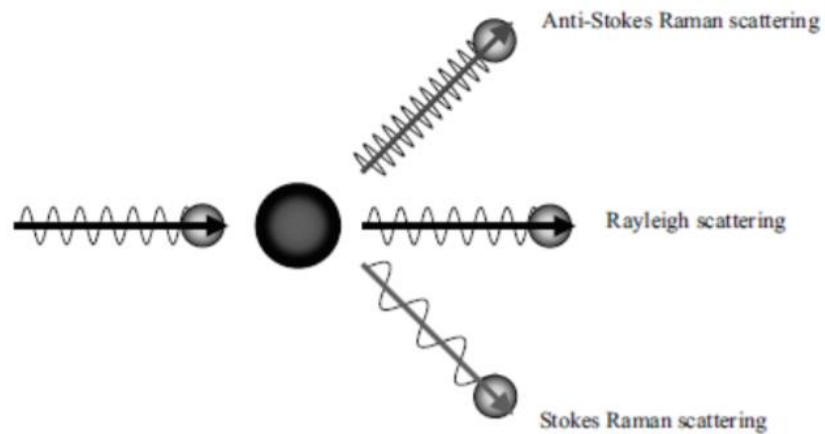
ในโหมดของ grazing incidence X-ray diffraction (GIXRD) แหล่งกำเนิดแสงจะเปลี่ยนมุมตกกระทบ (ω) ซึ่งโดยปกติจะใช้ที่มุมองศาที่ต่ำกว่า 5 ในโหมดนี้แหล่งกำเนิดแสงจะอยู่กับที่ ส่วน

เครื่องตรวจจับจะหมุนไปรอบ ๆ ตัวอย่าง เหมาะสำหรับงานฟิล์มบาง ซึ่งในงานวิจัยนี้ ใช้โหมด GIXRD ในการวิเคราะห์ (Stabrawa et al., 2019)

และเนื่องจากสารแต่ละชนิดมีการเรียงตัวของอะตอม และผลึกที่แตกต่างกัน ผลลัพธ์ที่ได้จึงสามารถบ่งบอกได้ถึงโครงสร้างผลึก ชนิดของผลึก และความเป็นผลึกของสารตัวอย่าง รวมถึงชนิดของสารประกอบสารตัวอย่าง

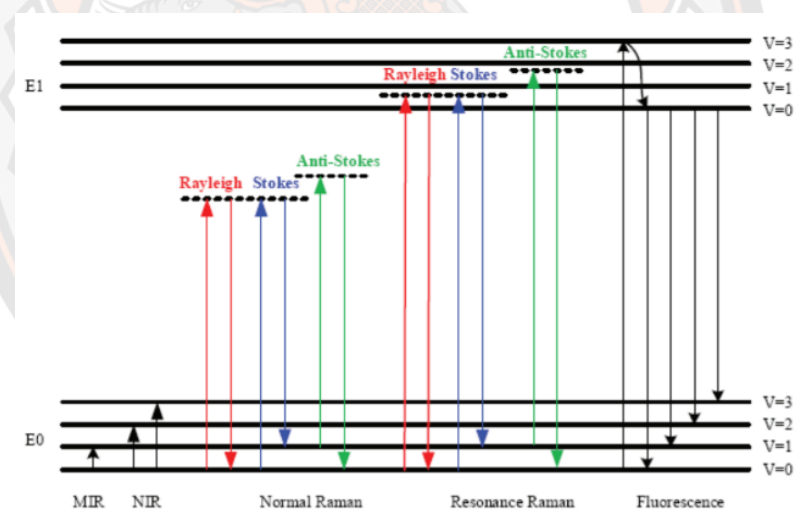
12.2 เทคนิครามานสเปกโตรสโคปี (Raman Spectroscopy)

การวิเคราะห์อาศัยหลักการการกระเจิงของแสงที่เกิดจากอนุภาคแสงเข้าชนโมเลกุลของสาร สมมติให้แสงเลเซอร์ความยาวคลื่นหนึ่งผ่านสารของเหลวที่โปร่งแสง จะมีอนุภาคแสงจำนวนหนึ่งที่ทะลุผ่านไปได้ ขณะที่บางส่วนจะชนเข้ากับโมเลกุลของสาร และเปลี่ยนทิศทาง ในการชนกันนั้น โดยส่วนมากพลังงานของแสงหลังการชนจะไม่เปลี่ยนแปลง เป็นการชนแบบยืดหยุ่น ที่เรียกว่า Rayleigh scattering แต่จะมีอนุภาคแสงส่วนน้อยที่พลังงานหลังการชนเปลี่ยนแปลงไป เนื่องจากมีการแลกเปลี่ยนพลังงานกับโมเลกุลของสาร หรือเรียกว่าเป็นการชนแบบยืดหยุ่น โดยแสงอาจอาจมีความถี่มากขึ้นหรือน้อยลงก็ได้ การเปลี่ยนพลังงาน หลังเกิดการชนนี้เรียกว่า Raman scattering หากอนุภาคแสงเข้าชนโมเลกุลในสภาวะกระตุ้น ความถี่หลังการชนจะเพิ่มขึ้น เรียกว่า Anti-stokes Raman scattering โดยทั่วไปนิยมวัดการเกิด Stokes Raman scattering เนื่องจากสารจะอยู่ในสภาวะพื้น นอกจากนี้สารแต่ละชนิดจะเปลี่ยนความถี่ของแสงได้แตกต่างกัน และยังให้ความเข้มของแสงที่กระเจิงออกมาไม่เท่ากันอีกด้วย จึงสามารถนำวิธีรามานมาใช้ในการศึกษาโครงสร้างของสาร (ชอปีตีพร, 2561)



ภาพ 23 การเกิด Scattering แบบต่าง ๆ

ที่มา: (ชอปีตีพร, 2561)



ภาพ 24 การเปลี่ยนระดับพลังงานของ Electron ในรูปปรากฏการณ์ต่าง ๆ

ที่มา: (ชอปีตีพร, 2561)

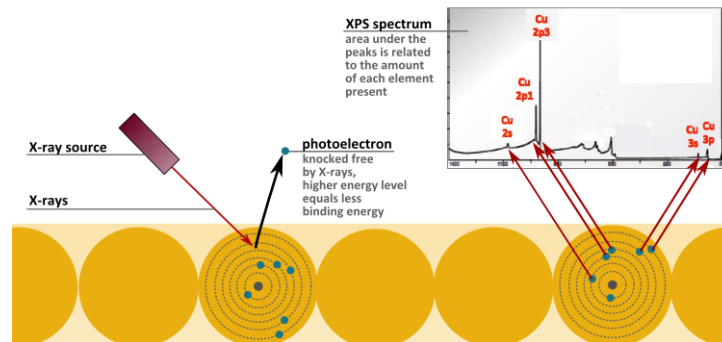
12.3 เทคนิคสเปกโทรสโกปีโฟโตอิเล็กตรอนด้วยรังสีเอ็กซ์ (X-Ray Photoelectron Spectroscopy, XPS)

เป็นเครื่องมือที่วัดคุณสมบัติของสารในระดับพื้นผิว (Surface sensitive) ที่ระดับ 5 – 100 อังสตรอม (Angstroms) เหมาะสำหรับสารตัวอย่างที่มีลักษณะเป็นฟิล์มบาง โดยอาศัยแสงของ soft X-ray เพื่อการกระตุ้นให้เกิดการปล่อยโฟโตอิเล็กทริก ($h\nu$) มีค่าเท่ากับผลรวมของค่าพลังงานจลน์ของโฟโตอิเล็กตรอน (E_k) ค่าพลังงานยึดเหนี่ยวของอิเล็กตรอน (Binding energy, E_b) และค่าพลังงานที่โฟโตอิเล็กตรอนต้องใช้ในการที่จะหลุดออกมาจากผิวของตัวอย่าง หรือเวิร์คฟังก์ชัน (Work Function, ϕ)

$$h\nu = E_k + E_b + \phi \quad (12)$$

ตามสมการที่ 12 ด้วยเทคนิค XPS ค่า $h\nu$ เป็นค่าที่ทราบ และเมื่อมีการเชื่อมต่อทางไฟฟ้าระหว่างสารตัวอย่าง และเครื่องมือวัดค่า คือ ค่าเวิร์คฟังก์ชันของเครื่องมือ ทำหน้าที่วัดพลังงานจลน์ของโฟโตอิเล็กตรอน ซึ่งค่านี้สามารถนำไปคำนวณหาค่าพลังงานยึดเหนี่ยวของชั้นพลังงานอะตอมของแต่ละธาตุได้ ค่าพลังงานดังกล่าวนี้เป็นค่าเฉพาะของอะตอมในแต่ละธาตุ และขึ้นอยู่กับสถานะทางเคมีของอะตอมนั้น ๆ (สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน, 2562)

การวิเคราะห์ดังกล่าวจึงสามารถระบุองค์ประกอบที่มีอยู่ภายในวัสดุได้ หรือระบุองค์ประกอบที่ปกคลุมพื้นผิวของตัวอย่างได้ รวมทั้งสถานะทางเคมีของตัวอย่างได้ เช่น สถานะทางออกซิเดชัน (Oxidation State) หรือพันธะทางเคมีระหว่างอะตอมของธาตุที่เป็นองค์ประกอบ นอกจากนี้ยังสามารถระบุการกระจายตัวของธาตุที่เป็นองค์ประกอบบนพื้นผิว การกระจายตัวของธาตุตัวด้านข้างจากการปรับตำแหน่งของการวัดและการกระจายตัวของธาตุตัวในแนวลึกจากการใช้เทคนิค Depth Profile

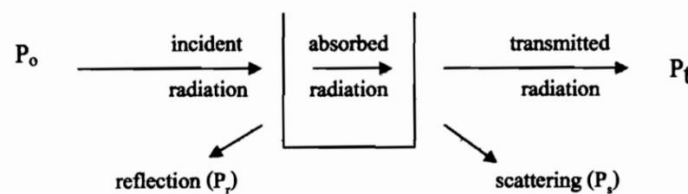


ภาพ 25 หลักการทำงานของเครื่อง XPS

ที่มา: (GmbH, 2000)

12.4 การดูดกลืนแสง (UV-Visible Spectroscopy, UV-Vis)

การดูดกลืนแสง หรือรังสีที่อยู่ในช่วงอัลตราไวโอเล็ต และวิซิเบิล ในช่วงความยาวคลื่นประมาณ 190-800 นาโนเมตร ของสารเคมีนั้น ๆ ได้แก่ สารอินทรีย์ (Organic compound) หรือสารประกอบเชิงซ้อน (Complex compound) หรือสารอนินทรีย์ (Inorganic compound) ทั้งที่มีสีและไม่มีสี สมบัติของสารดังกล่าวนี้ได้ถูกนำมาใช้เป็นวิธีวิเคราะห์ทั้งในเชิงคุณภาพและเชิงปริมาณ เพราะวิธีนี้ให้ความถูกต้องแม่นยำและมีสภาพ่องไวสูง โดยอาจทำการวิเคราะห์อยู่ในรูปของธาตุ หรือโมเลกุล (บุญญะหงส์, 2552)



ภาพ 26 การเกิดอันตรกิริยาของสารเคมีกับการแผ่รังสีหรือแสง

ที่มา: (บุญญะหงส์, 2552)

การให้ลำแสงที่เคลื่อนที่แบบต่อเนื่องกัน (Continuous beam of radiation) ผ่านเข้าสู่ฟิล์มบางชนิดใด พบว่า แสงบางส่วนถูกดูดกลืน บางส่วนเกิดการสะท้อน บางส่วนกระเจิง และบางส่วนทะลุผ่านออกไป แสดงในภาพ 26 ถ้าให้แสงที่ทะลุออกไปนั้น ผ่านเข้าเครื่องกระจายแสง (ปริซึม หรือเกรตติง) จะเห็นว่าสเปกตรัมหายไปส่วนหนึ่ง

ส่วนที่หายไปนั้นเรียกว่า Absorption spectrum พลังงานที่ถูกดูดกลืนไปนั้น จะทำให้โมเลกุลหรืออะตอมเปลี่ยนระดับของพลังงานจากสถานะพื้น (Ground state) ไปยังสถานะกระตุ้น (Excited state)

1) หลักในการหาปริมาณสารจากการวัดปริมาณของแสงที่ถูกดูดกลืน

ในการวัดปริมาณแสงที่ถูกดูดกลืนด้วยสารตัวอย่าง ทำได้โดยให้ลำแสงผ่านเข้าไปในสารตัวอย่าง แล้ววัดปริมาณของแสงที่ทะลุผ่านออกมาเปรียบเทียบกับแสงที่ทะลุออกมา เมื่อไม่มีสารตัวอย่าง พิจารณาถึงการเปลี่ยนแปลงของความเข้มแสง Radiant power ที่เกิดจากการผ่านโมโนโครมาติก (Monochromatic radiation) เข้าไปยังเซลล์ ซึ่งใส่สารที่ไม่มีการดูดกลืนแสง เรียกว่า Blank solution ดังนั้น Radiant power ที่ทะลุออกมาให้เป็น P_0 (เหลืออักษร, 2553)

$$A = \epsilon bc = \log (P_0/P) \quad (13)$$

หรือ

$$-\log T = \epsilon bc \quad (14)$$

เมื่อ	A	คือ แสงที่ถูกดูดกลืน (Absorbance)
	ϵ	คือ โมลาร์แอบซอร์ปติวิตี (Molar absorptivity)
	b	คือ ความกว้างของเซลล์ (cm)
	c	คือ ความเข้มข้นของสารละลาย (mol/L)
	P_0	คือ ความเข้มของแสงก่อนผ่านตัวกลาง
	P	คือ ความเข้มของแสงหลังผ่านตัวกลาง
	T	คือ Transmittance

กรณีความเข้มข้นมีหน่วยเป็น g/L หรือหน่วยอื่น ๆ

$$A = abs \quad (15)$$

เมื่อ ϵ และ a เป็นค่าคงที่ ซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดของสารและความยาวคลื่น

กฎของเบียร์ (Beer's law) หรือกฎของเบียร์แลมเบิร์ต (Beer and Lambert's law) เรียกว่าสั้น ๆ ได้ว่า “ค่าการดูดกลืนคลื่นแสงของสารละลายจะเป็นปฏิภาคโดยตรงกับความเข้มข้นของสาร”

ความสัมพันธ์ของ A และเปอร์เซ็นต์ทรานสมิตแทนซ์

$$P/P_0 = T \quad (16)$$

$$100(P/P_0) = \%T \quad (17)$$

$$\log_{10} (P/P_0) = \log \%T \quad (18)$$

$$2 - A = \log \%T \quad (19)$$

$$A = 2 - \log \%T \quad (20)$$

จากกฎของเบียร์สามารถนำมาใช้ในการวิเคราะห์สารหลายชนิดผสมกัน โดยที่แต่ละชนิดมีคุณสมบัติแตกต่างกัน ค่าการดูดกลืนคลื่นแสงที่วัดได้จะเป็นผลรวมของการดูดกลืนคลื่นแสงของสารแต่ละชนิด

2) การวัดค่าพลังงาน Band Gap Energy

การวัดค่าพลังงาน Band Gap Energy ของไททาเนียมไดออกไซด์ โดยใช้เครื่องวัดการดูดกลืนแสง (UV-Vis spectrophotometer) การวัดช่องว่างแถบพลังงาน มีความสำคัญในอุตสาหกรรมวัสดุกึ่งตัวนำ และวัสดุนาโน แถบช่องว่าง หมายถึงความแตกต่างของพลังงานระหว่างชั้นด้านบนของแถบพลังงานวาเลนซ์ กับชั้นด้านล่างของแถบพลังงานนำไฟฟ้า อิเล็กตรอนสามารถกระโดดจากแถบพลังงานวาเลนซ์ไปยังแถบพลังงานนำไฟฟ้าได้ จำเป็นต้องใช้พลังงานขั้นต่ำที่เฉพาะเจาะจงสำหรับการเปลี่ยนแปลงพลังงานช่องว่าง โดยสามารถหาค่าพลังงานช่องว่างของสารกึ่งตัวนำได้จากสมการที่ 21 (Dharma, Pisal, & Shelton, 2009)

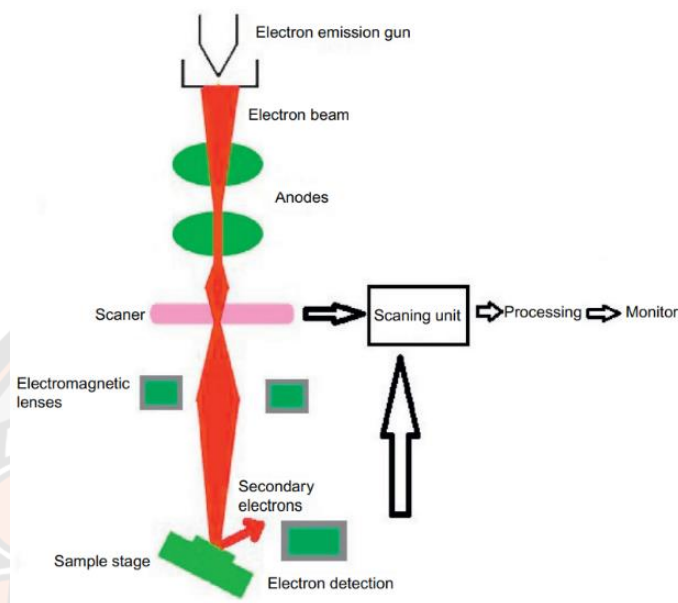
$$E = \frac{hc}{\lambda} \quad (21)$$

โดย	E	คือ ค่าพลังงานช่องว่าง
	h	คือ ค่าคงที่ของพลังค์ (Planks constant) มีค่าเท่ากับ 6.626×10^{-34} (Joules sec)
	c	คือ ความเร็วของแสงในสุญญากาศ ค่าเท่ากับ 3.0×10^8 (Meter/Sec)
	λ	คือ ความยาวคลื่น (Meter) (เมื่อ $1 \text{ eV} = 1.6 \times 10^{-19}$ Joules)

12.5 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดชนิดฟิลิมิสชัน (Field Emission Scanning Electron Microscope, FESEM)

เป็นกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนที่มีกำลังขยายสูงถึงระดับ 1,000,000 เท่า ทำให้สามารถศึกษาโครงสร้างขนาดเล็กในระดับไมโครหรือนาโนได้ เป็นกล้องที่การประยุกต์มาจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) ซึ่งมีความแตกต่างกันที่แหล่งกำเนิดอิเล็กตรอน กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ชนิดนี้จะใช้สนามไฟฟ้าในการเหนี่ยวนำอิเล็กตรอนที่ปลายโลหะแหลมให้หลุดออกมา ซึ่งแบบส่องกราดธรรมดาจะใช้ความร้อน (Thermionic emission) สนามไฟฟ้าในส่วนปลาย มีรัศมีประมาณ 100 นาโนเมตร ซึ่งเรียกว่า Field emission gun ทำให้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ชนิดฟิลิมิสชันให้ภาพที่มี

ความละเอียดสูงกว่าแบบธรรมดา ที่ใช้ความร้อน (Thermionic emission) ในการเหนี่ยวนำอิเล็กตรอน (สีนอเนตร, 2560)



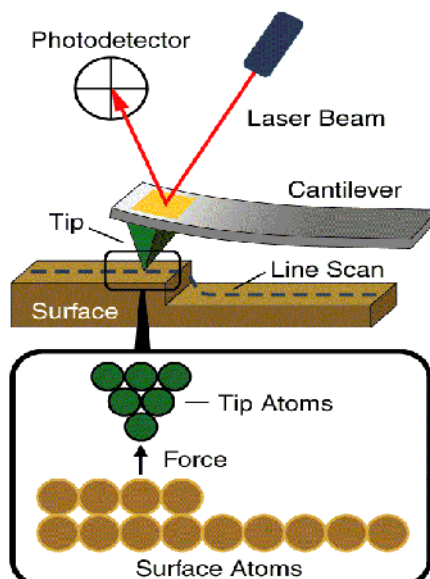
ภาพ 27 หลักการทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดชนิดฟิลิมีสชัน

ที่มา: (Semnani, 2017)

12.6 กล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (Atomic Force Microscope, AFM)

เป็นกล้องจุลทรรศน์ชนิดหัวอ่านแบบส่องกราด (Scanning Probe Microscopes, SPMs) โดยอาศัยหลักการของอันตรกิริยาของแรงระหว่างอะตอม (Atomic Force) ระหว่างหัวเข็มวัดในระดับนาโนเมตรกับพื้นผิวของสาร โดยใช้แสงเลเซอร์จากส่วนปลาย tip ของคานยื่นออกมา ซึ่งมีขนาดระดับอะตอม ที่ส่วนปลาย tip ของคานนั้น จะไปสัมผัสแบบกระดกในทิศทางขึ้น และลงกับพื้นผิวของวัตถุ และเมื่อกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอมลากส่วนปลายผ่านโครงสร้างระดับนาโน แรงปฏิกิริยาที่กระทำในแนวตั้งฉากที่เกิดขึ้น ระหว่างอะตอมของพื้นผิวกับปลาย tip จะดึงคานขึ้น ทำให้คานโก่งงอตัว สามารถตรวจวัดขนาดของแรงเชิงปฏิสัมพันธ์ ระหว่างความสัมพันธ์เชิงตำแหน่งของส่วนปลาย tip และพื้นผิวของวัตถุ ซึ่งจะถูกนำมาแปรสัญญาณร่วมกัน เพื่อนำมาสร้างเป็นภาพพื้นผิวที่เป็นลักษณะเชิงโครงสร้างระดับอะตอม ที่มีกำลังการขยายสูงออกมาเป็นภาพแบบ

2 มิติ หรือ 3 มิติ นอกจากนี้ยังสามารถวัดคุณสมบัติอื่น ๆ ของพื้นผิวของชิ้นงานได้ เช่น ความสูง การดูดกลืนแสง หรือสนามแม่เหล็ก เป็นต้น (Agarwal, Bhatt, Pathan, Patel, & Joshi, 2012)

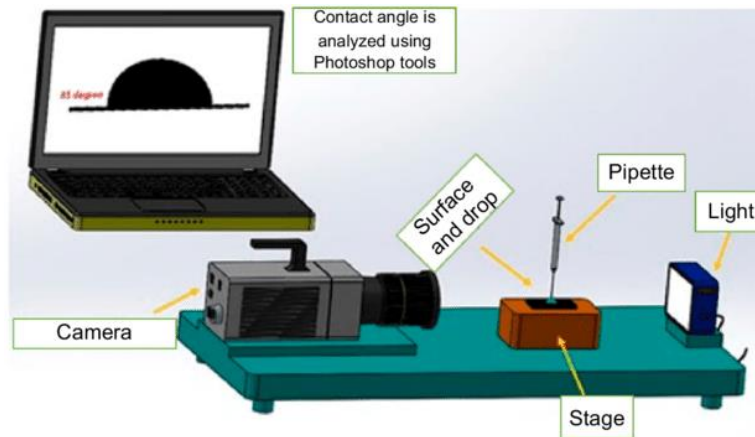


ภาพ 28 หลักการทำงานของกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม

ที่มา: (Agarwal et al., 2012)

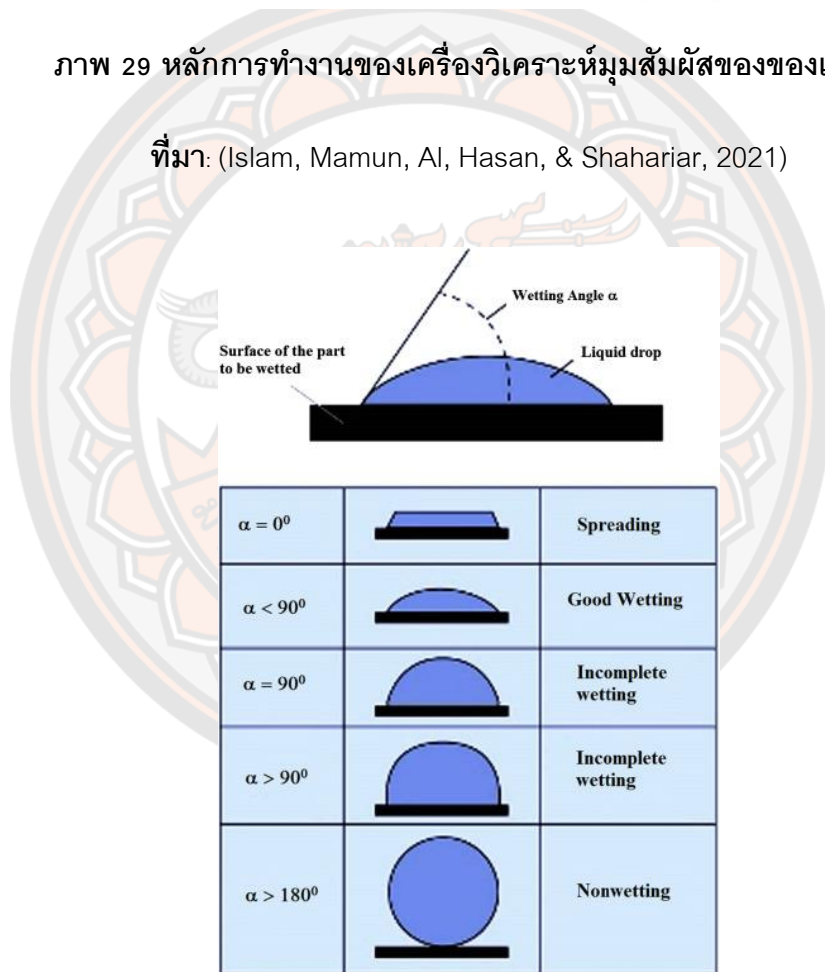
12.7 เครื่องวิเคราะห์มุมสัมผัสของของเหลว (Contact Angle)

เครื่องวิเคราะห์มุมสัมผัสของของเหลวเป็นเครื่องมือวัดมุมระหว่างพื้นระนาบของของเหลวกับอากาศ มุมสัมผัสที่ได้จะใช้ในการบ่งบอกคุณลักษณะของชิ้นงาน หรือตัวอย่างได้ เช่น มุมสัมผัสมากแสดงพฤติกรรมความไม่ชอบน้ำ หรือ Hydrophobic และมุมสัมผัสน้อยจะแสดงพฤติกรรมความชอบน้ำ หรือ Hydrophilic



ภาพ 29 หลักการทำงานของเครื่องวิเคราะห์มุมสัมผัสของของเหลว

ที่มา: (Islam, Mamun, Al, Hasan, & Shahariar, 2021)



ภาพ 30 ขนาดมุมสัมผัสของของเหลวที่แสดงพฤติกรรม Hydrophobic และ Hydrophilic

ที่มา: (Chapter, 2017)

13. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

(Kwon, Shin, Kim, Choi, & Yoon, 2004) ทำการศึกษาเกี่ยวกับการเคลือบฟิล์มไททาเนียมไดออกไซด์ลงบนแก้ว, พอลิคาร์บอเนต, พอลิเมทิลเมทาไครเลต, และอะลูมิเนียม โดยใช้วิธีโซล-เจล ในการสังเคราะห์ไททาเนียมไดออกไซด์ ซึ่งใช้สารตั้งต้นแอลคอกไซด์ต่างชนิดกัน พบว่าฟิล์มที่เคลือบบนวัสดุเป็นผลึกระดับนาโน (<10 นาโนเมตร) และโครงร่างผลึกแบบอนาเทส เมื่อความหนาของฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์เพิ่มมากขึ้น ส่งผลต่อประสิทธิภาพการย่อยสลายเมทิลีนบลูด้วยแสง และความร้อนในการสังเคราะห์ฟิล์มไททาเนียมไดออกไซด์ที่เหมาะสมคือ 400°C

(ศรีโพธิ์โรจน์, 2553) ทำการศึกษาฟิล์มบางซิลเวอร์ และไททาเนียมไดออกไซด์เคลือบบนผิวเซรามิก เพื่อยับยั้งจุลชีพ โดยทำการสังเคราะห์ไททาเนียมไดออกไซด์ด้วยวิธีโซล-เจล และทำการศึกษาปริมาณสัดส่วนของปริมาณซิลเวอร์ที่เหมาะสม และอุณหภูมิที่ใช้เผา ตั้งแต่ 450-650°C พบว่า เมื่อใส่ปริมาณของซิลเวอร์เพิ่มมากขึ้น ส่งผลกระทบต่อโครงร่างผลึกของไททาเนียมไดออกไซด์ ทำให้ผลึกอนาเทสลดน้อยลง และประสิทธิภาพในการสลายสารอินทรีย์ลดน้อยลงด้วย โดยที่สัดส่วน 1% mol Ag/TiO₂ และ 10% mol Ag/TiO₂ มีประสิทธิภาพในการยับยั้งแบคทีเรีย *E. Coli* และ *Aspergillus niger* ประมาณ 25.86% และ 47.86% ตามลำดับ ภายใต้แสงฟลูออเรสเซนส์

(สีคง & คงเรือง, 2553) ทำการศึกษากการเคลือบไททาเนียมไดออกไซด์ลงบนวัสดุกันกระแทก เพื่อยืดอายุการเก็บรักษามะม่วงน้ำดอกไม้หลังการเก็บเกี่ยว พบว่า เมื่อสังเคราะห์ไททาเนียมไดออกไซด์ด้วยวิธีโซล-เจล โดยทำการเจือด้วย 3SnO₂ และ 0.2Fe³⁺ ปริมาณ 5%WV ช่วยทำให้ยืดอายุการเก็บรักษามะม่วงน้ำดอกไม้ได้ จาก 6 วัน เป็น 14 วัน โดยทำการสเปรย์ไททาเนียมไดออกไซด์ลงบนวัสดุกันกระแทก และเก็บรักษามะม่วงน้ำดอกไม้ไว้ที่อุณหภูมิ 11°C ภายใต้แสงฟลูออเรสเซนส์ 10 วัตต์

(หทัยสมิทธิ์, 2550) ทำการศึกษากการเตรียมไททาเนียมไดออกไซด์ ผลึกแบบอนาเทส และประยุกต์ใช้ในการทำลายเชื้อแบคทีเรีย โดยการฉายแสง พบว่า ทำการเตรียมฟิล์มไททาเนียมไดออกไซด์ด้วยวิธีโซล-เจล และเคลือบลงบนแผ่นกระจกด้วยวิธีแบบรีเอ็กทีฟดีซี-แมกนีตรอน สเปคโตรริง สามารถทำลายเชื้อแบคทีเรียทั่วไปได้ประมาณ 50% ภายใต้แสง near-UV ที่ 0.5 mW/cm² ที่โดยใช้ความเข้มของแสงสูงสุดที่ความยาวคลื่นประมาณ 365 nm

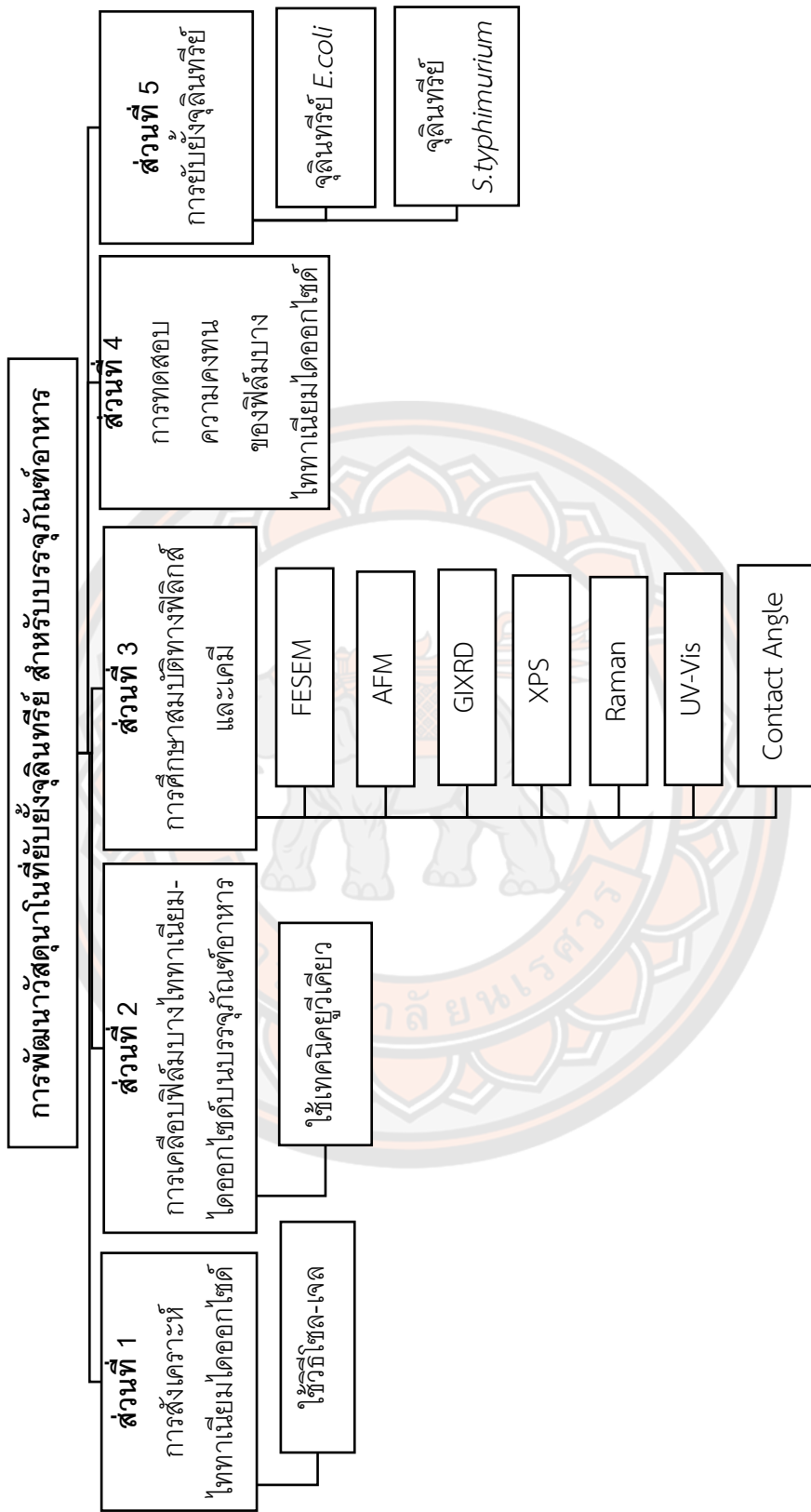
บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

จุดประสงค์ของงานวิจัยนี้ คือ การพัฒนาวัสดุนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ที่มีความสามารถในการยับยั้งจุลินทรีย์ สำหรับบรรจุภัณฑ์อาหาร โดยรายละเอียดตัวอย่างบรรจุภัณฑ์อาหารที่เลือกใช้ในงานวิจัยนี้ แสดงดังตาราง 4 และกรอบแนวคิดของงานวิจัย แสดงดังรูปที่ 31

ตาราง 4 ตัวอย่างบรรจุภัณฑ์อาหารที่เลือกใช้

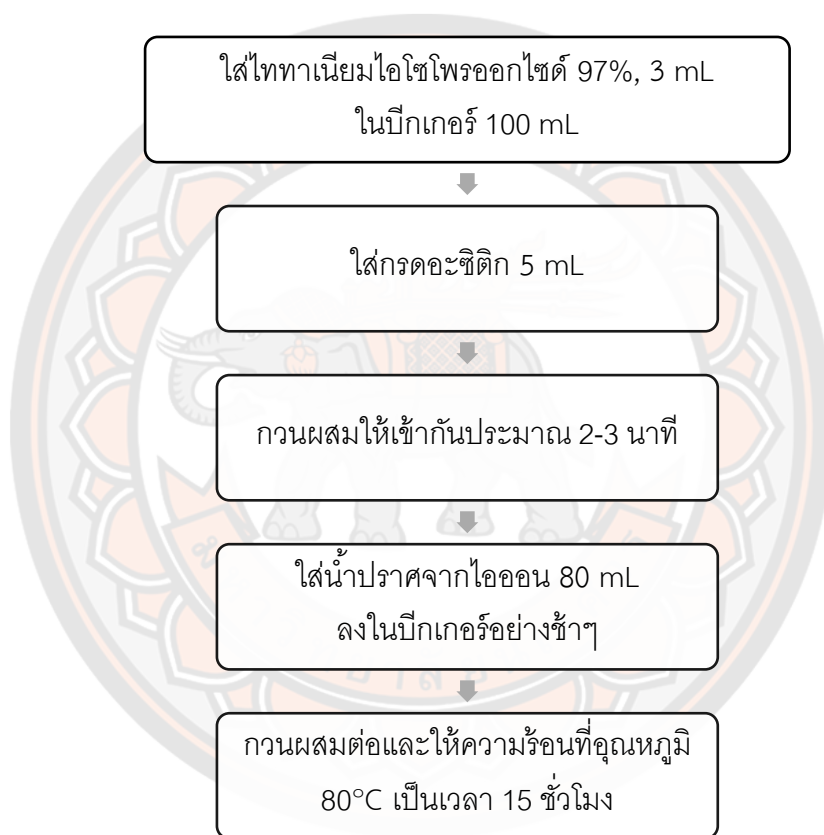
ชื่อตัวอย่าง	ประเภท	สารตั้งต้นที่ผลิต	ภาพผลิตภัณฑ์
A	พลาสติกแข็งแบบใส	Polyvinyl chloride, PVC	
B	โฟม	Polystyrene, PS	
C	ฟิล์มบางพลาสติก	Poly (vinylidene chloride), PVDC	
D	กล่องพลาสติกใส	Polyethylene Terephthalate, PET	



ภาพ 31 สรุปกรอบแนวคิดของงานวิจัย

ส่วนที่ 1 การสังเคราะห์ไททาเนียมไดออกไซด์ด้วยวิธีโซล-เจล

ใช้ไททาเนียมไอโซโพรอกไซด์ (Titanium Isopropoxide; TTIP, 97%) จากบริษัท Sigma-Aldrich จำกัด ผสมกับกรดอะซิติก (Acetic acid) จากบริษัท RCI labscan จำกัด ในอัตราส่วน 1:1.67 %w/w ด้วยเครื่องกวนผสม ประมาณ 2-3 นาที จากนั้นเติมน้ำปราศจากไอออน (DI water) 80 mL และกวนผสมต่ออีกเป็นเวลา 15 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 80 °C โดยขั้นตอนการสังเคราะห์ไททาเนียมไดออกไซด์ แสดงดังภาพ 32



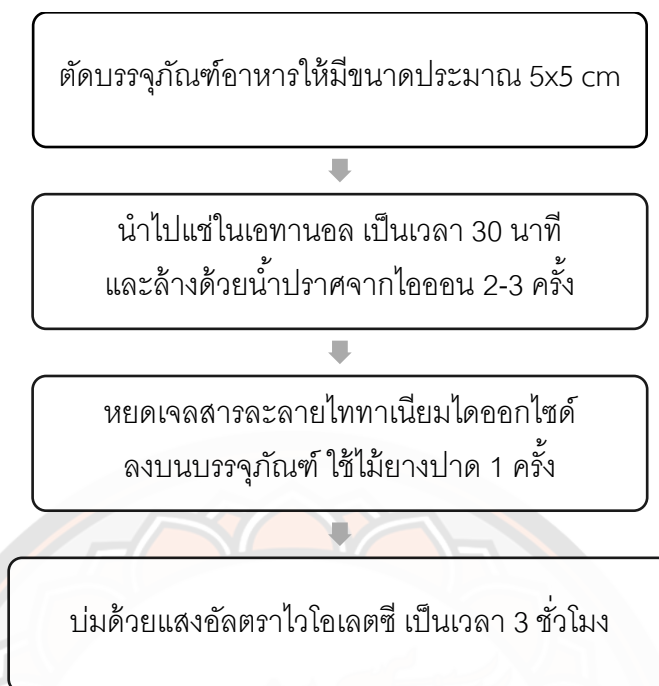
ภาพ 32 ขั้นตอนการสังเคราะห์ไททาเนียมไดออกไซด์ด้วยวิธีโซล-เจล

ส่วนที่ 2 การเคลือบฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์ลงบนบรรจุภัณฑ์อาหาร ด้วยเทคนิคยูวีเคียว

เนื่องจากบรรจุภัณฑ์อาหารเป็นวัสดุพอลิเมอร์ที่ทนความร้อนได้ต่ำ ผู้วิจัยจึงเลือกเทคนิคที่ใช้ความร้อนไม่สูงมากนักในการเคลือบลงบนบรรจุภัณฑ์อาหาร ซึ่งเทคนิคยูวีเคียวเป็นการบ่ม หรือทำให้ไททาเนียมไดออกไซด์เป็นผลึกแข็งติดบนผิวของบรรจุภัณฑ์อาหารอย่างช้า ๆ ด้วยแสงอัลตราไวโอเลตซี แทนการใช้พลังงานความร้อนสูง โดยผู้วิจัยคัดเลือกตัวอย่างบรรจุภัณฑ์อาหารที่นิยมใช้กัน 4 ชนิด ทั้งนี้บรรจุภัณฑ์แต่ละชนิดทำจากวัสดุพอลิเมอร์ต่างชนิดกัน ดังตาราง 4

การเตรียมตัวอย่างบรรจุภัณฑ์อาหาร ทำได้โดยตัดตัวอย่างบรรจุภัณฑ์อาหารทั้ง 4 ชนิด ให้มีขนาด 5 x 5 cm และทำความสะอาดพื้นผิวดูดด้วยการแช่ในเอทานอล และใช้เครื่องกวนผสมอย่างช้า ๆ ประมาณ 100 rpm เป็นเวลา 30 นาที จากนั้นล้างด้วยน้ำปราศจากไอออน 2-3 ครั้ง

การเคลือบฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์ลงบนตัวอย่างบรรจุภัณฑ์อาหาร ทำได้โดยหยดเจลไททาเนียมไดออกไซด์ลงบนบรรจุภัณฑ์อาหาร 1-2 หยด และใช้ไม้ยางปาดเกลี่ยเจลไททาเนียมไดออกไซด์ให้ทั่วทั้งพื้นผิว จากนั้นบ่มด้วยแสงอัลตราไวโอเลตซี เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ขั้นตอนการเคลือบบรรจุภัณฑ์อาหารด้วยฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์ แสดงดังภาพ 33 ทั้งนี้การใช้อนุภาคแสงของ อัลตราไวโอเลตซี จะช่วยให้เกิดกระบวนการโฟโตพอลิเมอไรเซชัน (Photo-Polymerization process) สามารถเปลี่ยนสถานะของสารเคลือบ จากเจลไททาเนียมไดออกไซด์ กลายเป็นผลึกของแข็งยึดเกาะติดบนบรรจุภัณฑ์อาหาร โดยระยะเวลาที่เหมาะสมในการฉายแสงอัลตราไวโอเลตซีในเทคนิคยูวีเคียวของงานวิจัยนี้ คือ 3 ชั่วโมง



ภาพ 33 ขั้นตอนการเคลือบฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์บนบรรจุภัณฑ์อาหารด้วยเทคนิคยูวีเคียว

ส่วนที่ 3 การศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์และเคมีของฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์ที่เคลือบบนบรรจุภัณฑ์อาหาร

นำตัวอย่างบรรจุภัณฑ์อาหารที่เคลือบด้วยฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์ไปวิเคราะห์สมบัติทางฟิสิกส์และเคมี ด้วยเครื่องมือวิเคราะห์ขั้นสูงต่าง ๆ ดังตาราง 5

ตาราง 5 เครื่องมือที่ใช้วิเคราะห์ในงานวิจัยนี้

จุดประสงค์	เครื่องมือวิเคราะห์
วิเคราะห์โครงสร้างผลึก	X-ray Diffractometer (XRD) ยี่ห้อ Bruker รุ่น D8 Advance
วิเคราะห์โครงสร้างโมเลกุล	Raman spectroscopy ยี่ห้อ Horiba รุ่น LabRAM HR Evolution
วิเคราะห์ชนิดธาตุ ปริมาณธาตุ และองค์ประกอบทางเคมี	X-ray Photoelectron spectroscopy (XPS) ยี่ห้อ Kratos Analytical รุ่น Axis Ultra DLD

จุดประสงค์	เครื่องมือวิเคราะห์
วิเคราะห์ช่องว่างพลังงาน (E_g)	UV-VIS Spectroscopy ยี่ห้อ Mapada รุ่น UV-6100
วิเคราะห์ลักษณะพื้นผิว	Field Emission Scanning Electron Microscope (FESEM) ยี่ห้อ JOEL รุ่น JSM-6335F
วิเคราะห์โครงสร้างสัณฐาน	Atomic Force Microscope (AFM) ยี่ห้อ Park Systems รุ่น XE-120
วิเคราะห์มุมสัมผัสของน้ำต่อพื้นผิว	Contact Angle ยี่ห้อ Dataphysics รุ่น OCA-20

1) ศึกษาโครงสร้างผลึกของไททานเนียมไดออกไซด์บนผิวของบรรจุภัณฑ์อาหารด้วยเครื่อง X-ray Diffractometer โดยใช้เครื่องยี่ห้อ Bruker รุ่น D8 Advance ในโหมด Grazing incidence ใช้มุมตกกระทบในการวิเคราะห์ (incident angle) เท่ากับ 0.5° ที่พลังงาน 40 keV และใช้ความยาวคลื่น 1.5406 nm เพื่อวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของฟิล์มบางไททานเนียมไดออกไซด์บนพื้นผิวของบรรจุภัณฑ์อาหาร ทั้งเชิงคุณภาพ และเชิงปริมาณ เครื่องมือ X-ray Diffractometer (XRD) แสดงดังภาพ 34



ภาพ 34 เครื่อง X-ray Diffractometer (XRD) ยี่ห้อ Bruker รุ่น D8 Advance

2) ศึกษาโครงสร้างโมเลกุลของบรรจุภัณฑ์อาหาร ด้วยเครื่อง Raman spectroscopy ใช้เครื่องยี่ห้อ Horiba รุ่น LabRAM HR Evolution โดยใช้เลเซอร์ที่มีความยาวคลื่น 785 nm เพื่อวิเคราะห์เปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างโมเลกุลของบรรจุภัณฑ์อาหารที่เคลือบด้วยฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์ กับโครงสร้างโมเลกุลของบรรจุภัณฑ์อาหารแบบดั้งเดิมที่ไม่เคลือบด้วยฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์ ซึ่งเครื่องมือ Raman spectroscopy ที่ใช้ในการวิเคราะห์ แสดงดังภาพ 35



ภาพ 35 เครื่อง Raman spectroscopy ยี่ห้อ Horiba รุ่น LabRAM HR Evolution

3) ศึกษาชนิดธาตุ ปริมาณธาตุ และองค์ประกอบทางเคมีที่บริเวณพื้นผิวของบรรจุภัณฑ์อาหารที่เคลือบด้วยฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์ ด้วยเครื่อง X-ray Photoelectron spectroscopy ยี่ห้อ Kratos Analytical รุ่น Axis Ultra DLD โดยทำการวิเคราะห์แบบ Survey spectra ทั้งหมด 4 ตัวอย่าง เพื่อเปรียบเทียบชนิดธาตุ รวมทั้งปริมาณของธาตุที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวของบรรจุภัณฑ์อาหารทั้ง 4 ชนิด ที่เคลือบด้วยฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์ และวิเคราะห์แบบ High resolution เพื่อตรวจสอบรายละเอียดของธาตุไททาเนียม (Ti) ธาตุออกซิเจน (O) และธาตุคาร์บอน (C) ที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวบรรจุภัณฑ์อาหาร เครื่องมือ X-ray Photoelectron spectroscopy สำหรับการวิเคราะห์ดังกล่าว แสดงในภาพ 36



ภาพ 36 เครื่อง X-ray Photoelectron spectroscopy
ยี่ห้อ Kratos Analytical รุ่น Axis Ultra DLD

4) วิเคราะห์หาช่องว่างพลังงานของฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์ที่เคลือบลงบนพื้นผิวของบรรจุภัณฑ์อาหาร ใช้เครื่อง UV-VIS Spectroscopy ยี่ห้อ Mapada รุ่น UV-6100 Spectrophotometer ผู้วิจัยใช้ 2 วิธี ได้แก่ วิธีการคำนวณ และวิธีการหาค่าช่องว่างพลังงานจากกราฟแบบ Tauc's plot ซึ่งเป็นกราฟที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนกับพลังงาน และใช้เทคนิค UV-vis diffuse reflectance spectroscopy โดยสัมประสิทธิ์การดูดกลืนสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 22

$$\alpha (hv) \approx A (hv) = \log \left(\frac{1}{T} \right) \quad (22)$$

โดย	α	คือ สัมประสิทธิ์การดูดกลืน
	A	คือ ค่าการดูดกลืนแสง
	T	คือ ค่าเปอร์เซ็นต์การทะลุผ่านของแสง
	hv	คือ พลังงานในหน่วย eV

และพลังงานสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 23

$$E = hv = h \frac{c}{\lambda} = 1.2431 \times 10^{-6} \times \frac{1}{\lambda} \quad (23)$$

โดย λ คือ ความยาวคลื่น (nm)

และค่าช่องว่างพลังงาน สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 24

$$\alpha (hv) \approx \frac{(hv - E_g)^2}{hv} \quad (24)$$

ในการวิเคราะห์ช่องว่างพลังงาน ผู้วิจัยทำการวิเคราะห์ในช่วงความยาวคลื่น 300-600 nm เพื่อครอบคลุมความยาวคลื่นในช่วงแสงอัลตราไวโอเล็ตเอ ซึ่งมีความยาวคลื่นประมาณ 315-400 nm ซึ่งผู้วิจัยใช้ช่วงแสงนี้เป็นพลังงานกระตุ้นให้เกิดกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส ในงานส่วนที่ 4 คือ การยับยั้งจุลินทรีย์ การวิเคราะห์นี้ ใช้บรรจุภัณฑ์อาหารเป็นตัวแทน คือ แผ่นพลาสติกแข็งสีใส หรือตัวอย่าง A เนื่องจากเป็นบรรจุภัณฑ์อาหารที่มีความแข็งแรงกว่าบรรจุภัณฑ์ชนิดอื่น ๆ สะดวกในการวิเคราะห์ และมีความโปร่งแสง เครื่อง UV-VIS Spectroscopy แสดงในภาพ 37



ภาพ 37 เครื่อง UV-VIS Spectroscopy ยี่ห้อ Mapada รุ่น UV-6100 Spectrophotometer

5) ศึกษาลักษณะพื้นผิวของบรรจุภัณฑ์อาหารที่เคลือบด้วยฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์ ด้วยเครื่อง Field Emission Scanning Electron Microscope (FESEM) ยี่ห้อ JOEL รุ่น JSM-6335F มีแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนแบบ cold cathode field emission ทำงานในภาวะสุญญากาศสูง ใช้แหล่งกำเนิดแสงที่มีความยาวคลื่น 1.5 nm ที่ 15 kV โดยทำการศึกษาลักษณะพื้นผิวของบรรจุภัณฑ์อาหารในแนวราบ (Top View) และทำการเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างพื้นผิวของบรรจุภัณฑ์อาหารแบบเคลือบและแบบดั้งเดิมที่ไม่เคลือบด้วยฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์ เครื่อง Field Emission Scanning Electron Microscope (FESEM) แสดงดังภาพ 38



ภาพ 38 เครื่อง Field Emission Scanning Electron Microscope
ยี่ห้อ JOEL รุ่น JSM-6335F

6) ศึกษาโครงสร้างพื้นฐานลักษณะทางกายภาพของฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์บนผิวของบรรจุภัณฑ์อาหาร ด้วยเครื่อง Atomic Force Microscope (AFM) ยี่ห้อ Park Systems รุ่น XE-120 การวิเคราะห์บรรจุภัณฑ์อาหารที่เคลือบด้วยฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์ทั้งหมด 4 ชนิดเพื่อเปรียบเทียบความแตกต่างของความขรุขระของพื้นผิวฟิล์มไททาเนียมไดออกไซด์ที่เคลือบบนบรรจุภัณฑ์อาหารแต่ละชนิด เครื่องมือที่ใช้วิเคราะห์ Atomic Force Microscope (AFM) แสดงดังภาพ 39



ภาพ 39 เครื่อง Atomic Force Microscope ยี่ห้อ Park Systems รุ่น XE-120

7) ศึกษาคุณสมบัติของน้ำตอพื้นผิวของฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์บนบรรจุภัณฑ์อาหาร ด้วยเครื่อง Contact Angle ยี่ห้อ Dataphysics รุ่น OCA-20 โดยทำการศึกษาเปรียบเทียบ และวิเคราะห์ความชอบน้ำ และความไม่ชอบน้ำของฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์ เครื่อง Contact Angle แสดงดังภาพ 40 ซึ่งทำการแบ่งวิเคราะห์ออกเป็น 2 ส่วน คือ

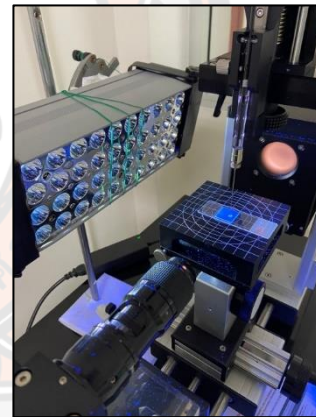
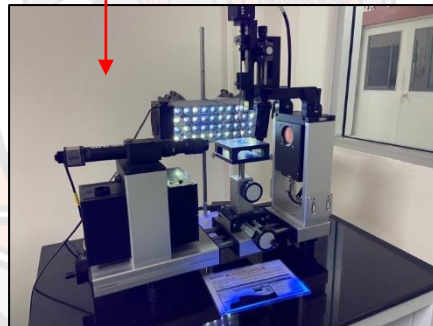
7.1 วิเคราะห์เปรียบเทียบความเปลี่ยนแปลงของมุมสัมผัสน้ำ โดยเปรียบเทียบระหว่างบรรจุภัณฑ์อาหารแบบดั้งเดิมที่ยังไม่เคยเคลือบด้วยฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์ กับบรรจุภัณฑ์อาหารที่เคลือบด้วยฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์ ในส่วนนี้จะทำการวิเคราะห์โดยใช้น้ำปราศจากไอออน ในปริมาตร 1 μL เป็นตัวแทนของน้ำที่สัมผัสตลอดการวิเคราะห์

7.2 วิเคราะห์เปรียบเทียบความเปลี่ยนแปลงของมุมสัมผัสน้ำตอพื้นผิวของฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์บนบรรจุภัณฑ์อาหารทั้ง 4 ชนิด เมื่อได้รับการฉายแสงอัลตราไวโอเล็ตเอ ที่เวลา 3, 6, 9, 12, 15, 20, 30 นาที ในส่วนนี้จะทำการวิเคราะห์โดยใช้น้ำปราศจากไอออน ในปริมาตร 10 μL เป็นตัวแทนของน้ำที่สัมผัสตลอดการวิเคราะห์ การวิเคราะห์ในส่วนนี้แสดงให้เห็นดังภาพ 41



ภาพ 40 เครื่อง Contact Angle ยี่ห้อ Dataphysics รุ่น OCA-20

หลอดไฟ UVA



ภาพ 41 การวิเคราะห์มุมสัมผัสของน้ำต่อพื้นผิวของฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์บนบรรจุภัณฑ์อาหาร

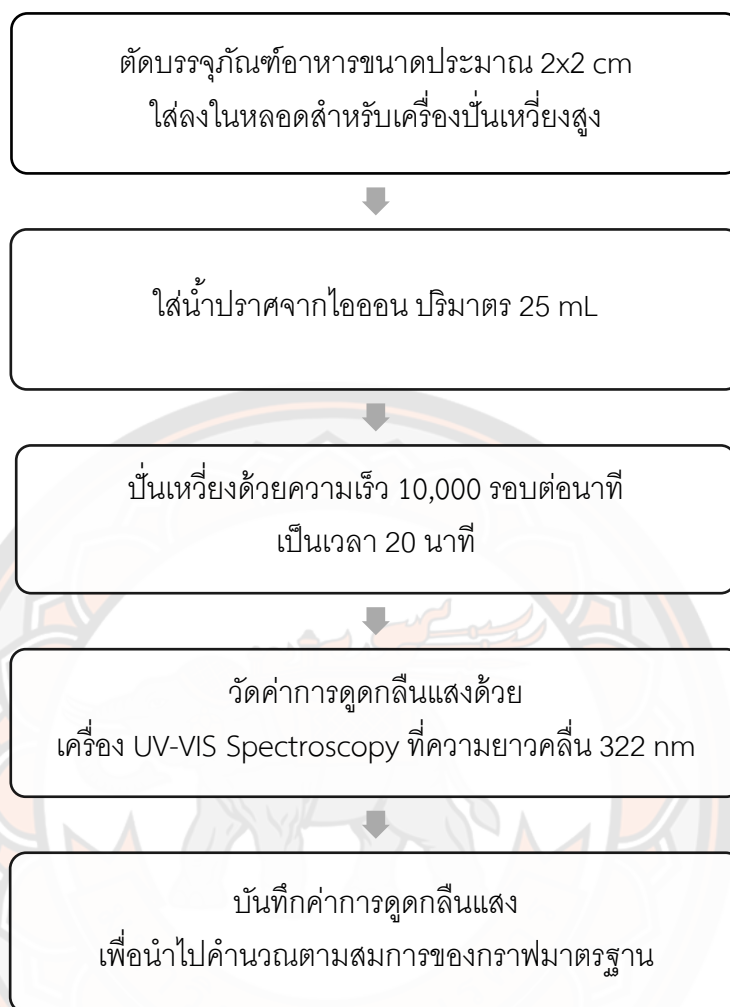
ส่วนที่ 4 การทดสอบความคงทนของฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์ที่เคลือบบนผิวของบรรจุภัณฑ์อาหาร

การทดสอบความคงทนของฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์ โดยตัดขนาดของบรรจุภัณฑ์อาหารที่เคลือบด้วยฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์ให้มีขนาด 2x2 cm จากนั้นใส่ลงในหลอดสำหรับเครื่องปั่นเหวี่ยงความเร็วสูง จากนั้นใส่น้ำปราศจากไอออนลงในหลอด ในปริมาณ 25 mL ทำการปั่นเหวี่ยงด้วยเครื่องปั่นเหวี่ยงความเร็วสูง ยี่ห้อ Scan Speed รุ่น 1248 (ภาพ 42) ด้วยความเร็ว 10,000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 20 นาที ของ 1 รอบการทดลอง จากนั้นนำน้ำที่ได้หลังการปั่นเหวี่ยงไปวัดปริมาณของไททาเนียมไดออกไซด์ด้วยเครื่อง UV-VIS Spectroscopy ยี่ห้อ Mapada รุ่น UV-6100 Spectrophotometer แสดงในภาพ 37

จำนวนรอบในการทดลองนี้ = n หมายถึง ทำการทดลองซ้ำ ๆ จนกว่าจะพบปริมาณการหลุดของฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์ที่เคลือบบนบรรจุภัณฑ์อาหาร และปนเปื้อนอยู่ในน้ำปราศจากไอออน ทั้งนี้ความคงทนของฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์จะรายงานผลในรูปของปริมาณที่หลุดออกในแต่ละรอบ และเนื่องจากไททาเนียมไดออกไซด์ที่หลุดออกมาจากบรรจุภัณฑ์อาหารมีปริมาณน้อยมาก ไม่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า ผู้วิจัยจึงเลือกวิเคราะห์ด้วยเครื่อง UV-vis spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 322 nm โดยทำกราฟมาตรฐาน (Standard curve) ของไททาเนียมไดออกไซด์ (P25) เป็นตัวเปรียบเทียบ เพื่อคำนวณค่าเป็นปริมาณของไททาเนียมไดออกไซด์ที่หลุดออกจากบรรจุภัณฑ์อาหาร



ภาพ 42 เครื่องปั่นเหวี่ยงความเร็วสูง ยี่ห้อ Scan Speed รุ่น 1248



ภาพ 43 ขั้นตอนการทดสอบความคงทนของฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์

ส่วนที่ 5 การทดสอบการยับยั้งจุลินทรีย์ของบรรจุภัณฑ์อาหารที่เคลือบด้วยฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์

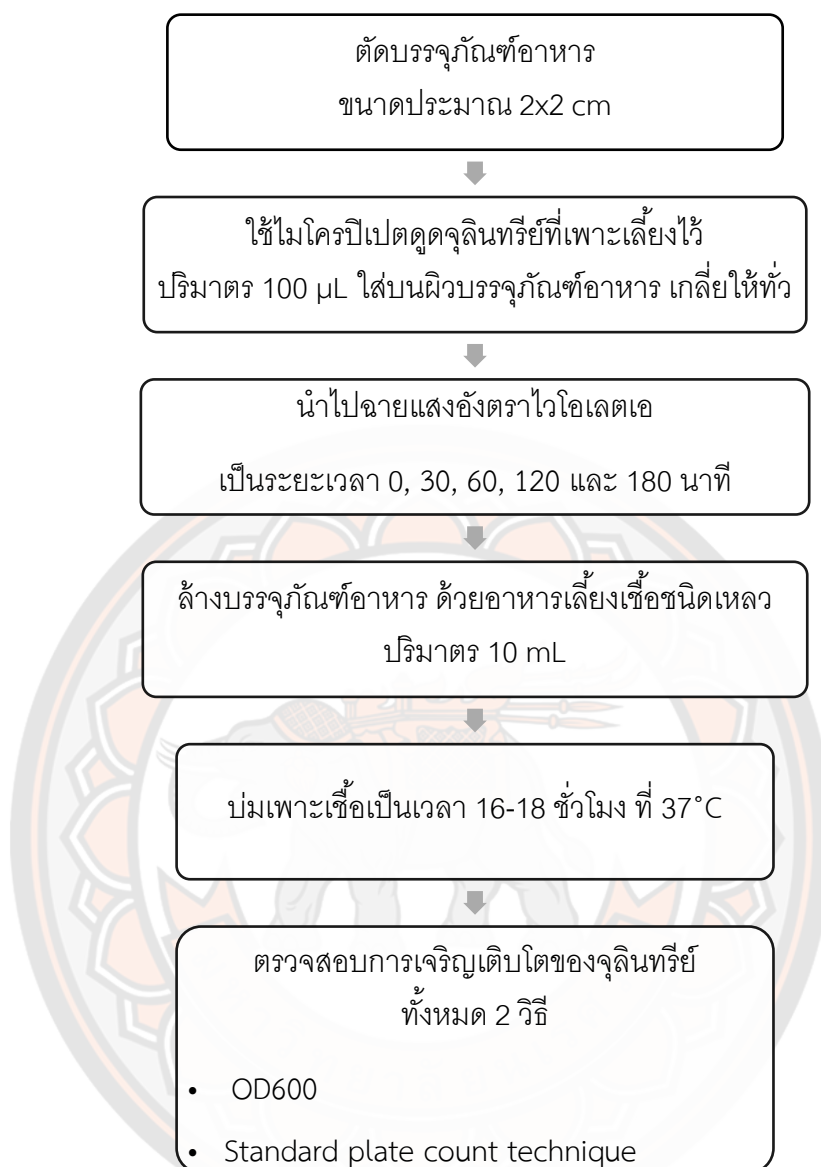
การทดสอบนี้ใช้เชื้อจุลินทรีย์ 2 ชนิด ได้แก่ *E-coli*, ATCC 25922 และ *S. typhimurium*, TISTR 1469 โดยนำเชื้อจุลินทรีย์ 1 colony มาเพาะในอาหารเลี้ยงเชื้อชนิดเหลว (Nutrient broth) เป็นเวลา 16-18 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 37°C โดยให้ความเข้มข้นเริ่มต้นของแบคทีเรียอยู่ที่ประมาณ 1×10^9 CFU/mL จากนั้นเตรียมบรรจุภัณฑ์อาหารที่เคลือบด้วยไททาเนียมไดออกไซด์ ขนาด 2x2 cm และใช้ไมโครปิเปตดูดจุลินทรีย์ที่เพาะเลี้ยงไว้ ปริมาตร 100 μ L ใส่บนบรรจุภัณฑ์อาหารที่เคลือบด้วยฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์ และแบบดั้งเดิมที่ไม่เคลือบด้วยฟิล์มบางไททาเนียม-

ไดออกไซด์ จากนั้นนำเข้าสู่ชุดทดลองที่มีแสงอัลตราไวโอเลตเอ ที่ 10 วัตต์ เป็นเวลา 0, 30, 60, 120 และ 180 นาที จากนั้นล้างบรรจุภัณฑ์อาหารที่ผ่านการฉายแสงอัลตราไวโอเลตเอ ด้วยอาหารเลี้ยงเชื้อชนิดเหลว ปริมาตร 10 mL และนำอาหารเลี้ยงเชื้อชนิดเหลวที่ได้ ไปบ่มเพาะเชื้อเป็นเวลา 16-18 ชั่วโมง ที่ 37°C และตรวจสอบการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ด้วย 2 วิธี คือ

1) การวัดความขุ่นของเซลล์จุลินทรีย์ที่ความยาวคลื่น 600 nm (OD600) โดยใช้เครื่อง UV-vis spectrophotometer

2) Standard plate count technique โดยเจือจางความเข้มข้นของเซลล์จุลินทรีย์เป็นลำดับส่วน จากนั้นใช้ไมโครปิเปตดูดจุลินทรีย์ในอาหารเลี้ยงเชื้อชนิดเหลว ปริมาตร 0.1 mL ใส่ในอาหารเลี้ยงเชื้อชนิดแข็ง ที่อยู่ในจานเพาะเชื้อ เกลี่ยจุลินทรีย์ชนิดเหลวให้ทั่วจากเพาะเชื้อด้วย sterile spreader บ่มเป็นเวลา 18 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 37°C และนับจำนวน colony ของจุลินทรีย์ที่เกิดขึ้นบนจานเพาะเชื้อ เปรียบเทียบจำนวน colony ที่เวลาฉายแสงอัลตราไวโอเลตเอ ที่แตกต่างกัน





ภาพ 44 ขั้นตอนการทดสอบการยับยั้งจุลินทรีย์ของฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์บนบรรจุภัณฑ์อาหาร

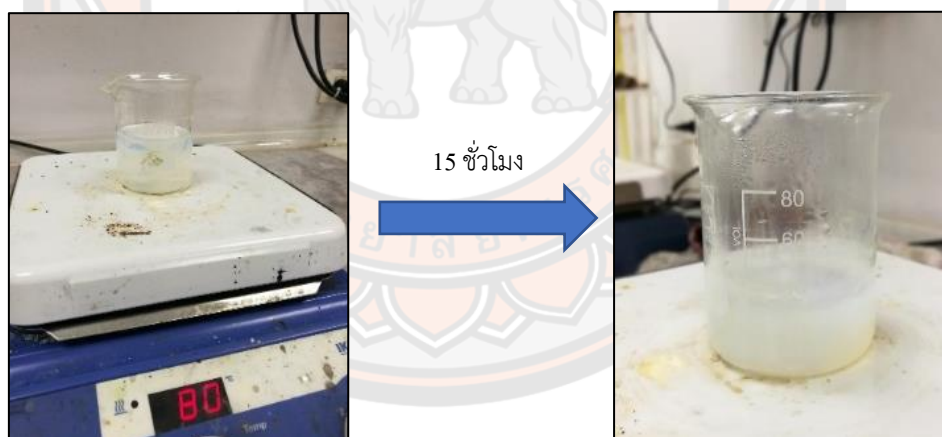
บทที่ 4

ผลการวิจัย

ผลการวิจัยและการอธิบายผลการวิจัยนี้จะแบ่งออกเป็น 5 ส่วนสอดคล้องตามวัตถุประสงค์และวิธีดำเนินการทดลอง ดังนี้

1. การสังเคราะห์ไททาเนียมไดออกไซด์

จากการสังเคราะห์ไททาเนียมไดออกไซด์ ด้วยวิธีโซล-เจล ในระหว่างกระบวนการสังเคราะห์สารละลายที่ได้มีลักษณะเหลว และจะเปลี่ยนเป็นของเหลวลักษณะเจลสีขาวขุ่น (ดังภาพ 45) เมื่อเวลาผ่านไป 15 ชั่วโมง แสดงถึงการเตรียมเจลที่เสร็จสมบูรณ์และพร้อมใช้ในการเคลือบบรรจุภัณฑ์อาหารต่อไป

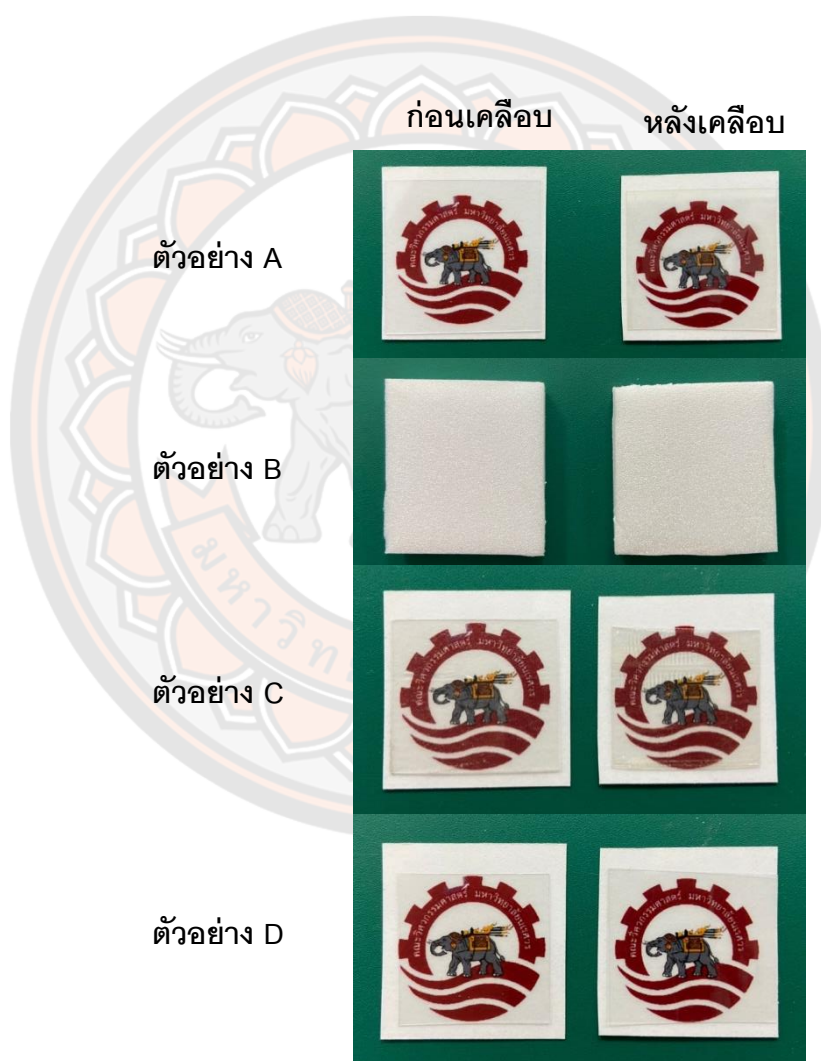


ภาพ 45 ลักษณะของเจลไททาเนียมไดออกไซด์ที่ได้

2. การเคลือบฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์ลงบนบรรจุภัณฑ์อาหาร

ลักษณะภายนอกของบรรจุภัณฑ์อาหารที่เคลือบด้วยฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์ แสดงในภาพ 46 เนื่องจากแผ่นพลาสติกแข็งแบบใส (ตัวอย่าง A), ฟิล์มบางพลาสติก (ตัวอย่าง C), และกล่องพลาสติกใส (D) เป็นบรรจุภัณฑ์อาหารที่โปร่งใส ทำให้สังเกตเห็นความเปลี่ยนแปลง

ได้ง่าย ซึ่งจากภาพ และสังเกตด้วยตาเปล่า ไม่พบความเปลี่ยนแปลงของพื้นผิว และการสัมผัสโดยตรง ทั้งนี้บรรจุภัณฑ์อาหารที่เคลือบด้วยฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์ยังคงรูปร่างเดิม และสำหรับโฟม (ตัวอย่าง B) ที่มีลักษณะที่บวม ทำให้สังเกตด้วยตาเปล่าได้ยาก แต่ยังคงรูปร่าง และผิวสัมผัสเช่นเดิม จึงกล่าวได้ว่า เทคนิคยูวีเคียวช่วยให้ไททาเนียมไดออกไซด์เคลือบลงบนบรรจุภัณฑ์อาหารได้ โดยไม่ทำให้บรรจุภัณฑ์อาหารเปลี่ยนรูปร่าง และผิวสัมผัสไป เมื่อเทียบกับบรรจุภัณฑ์อาหารดั้งเดิม

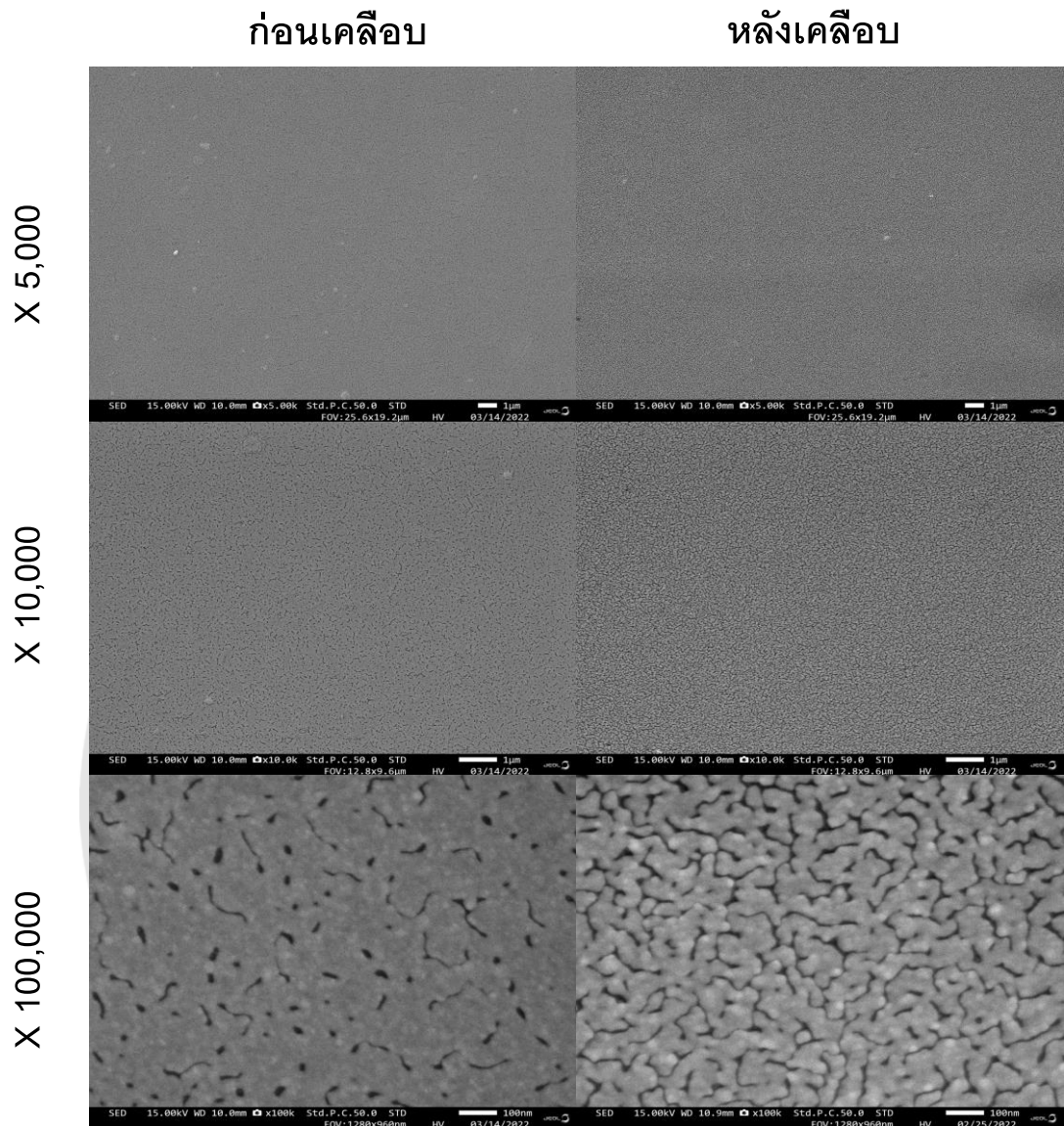


ภาพ 46 บรรจุภัณฑ์อาหารก่อน และหลังเคลือบด้วยฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์

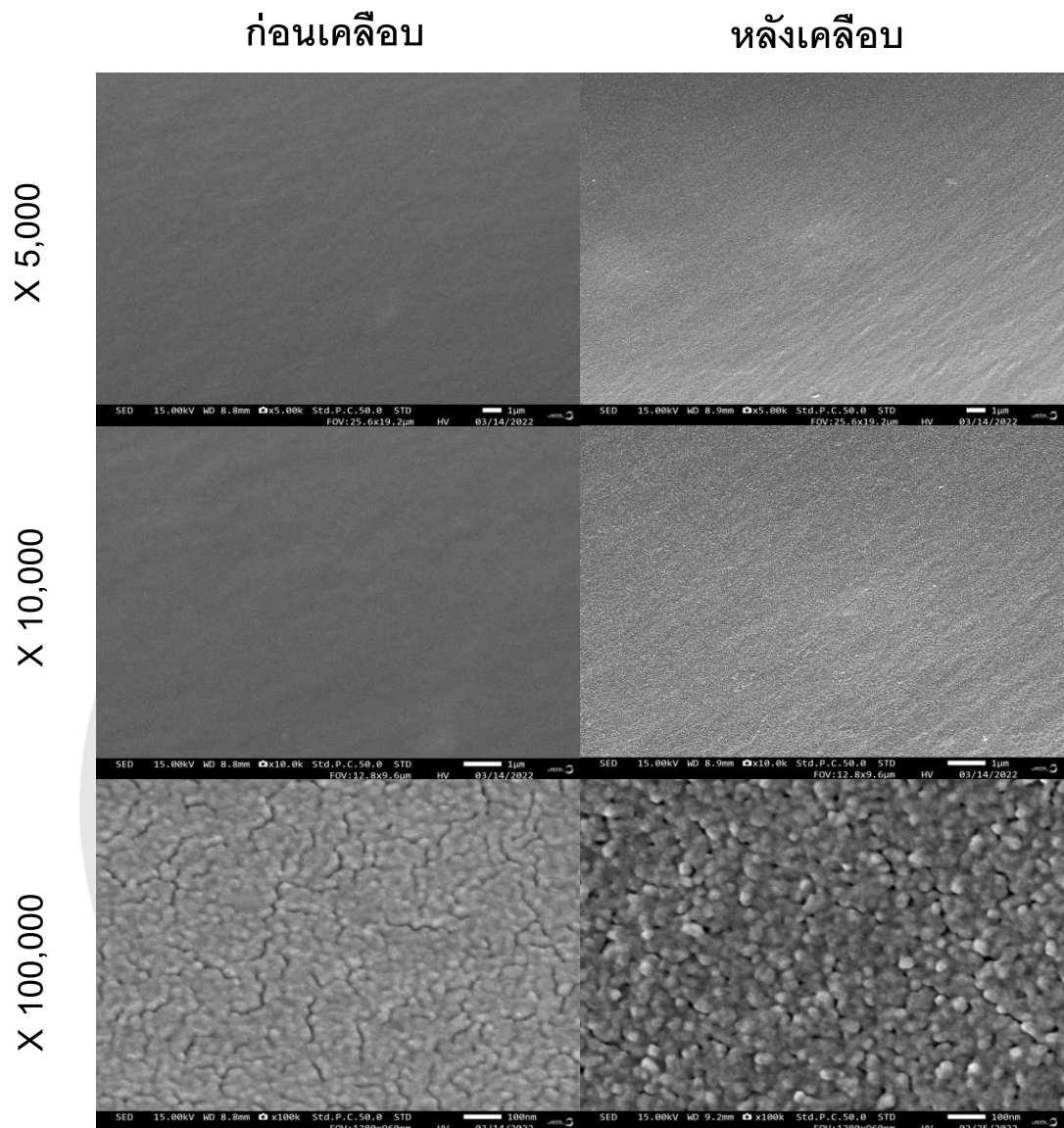
3. ลักษณะสมบัติทางฟิสิกส์ และเคมีของบรรจุภัณฑ์อาหาร

3.1 ผลการวิจัยลักษณะพื้นฐานของฟิล์มบางด้วยเทคนิค FESEM

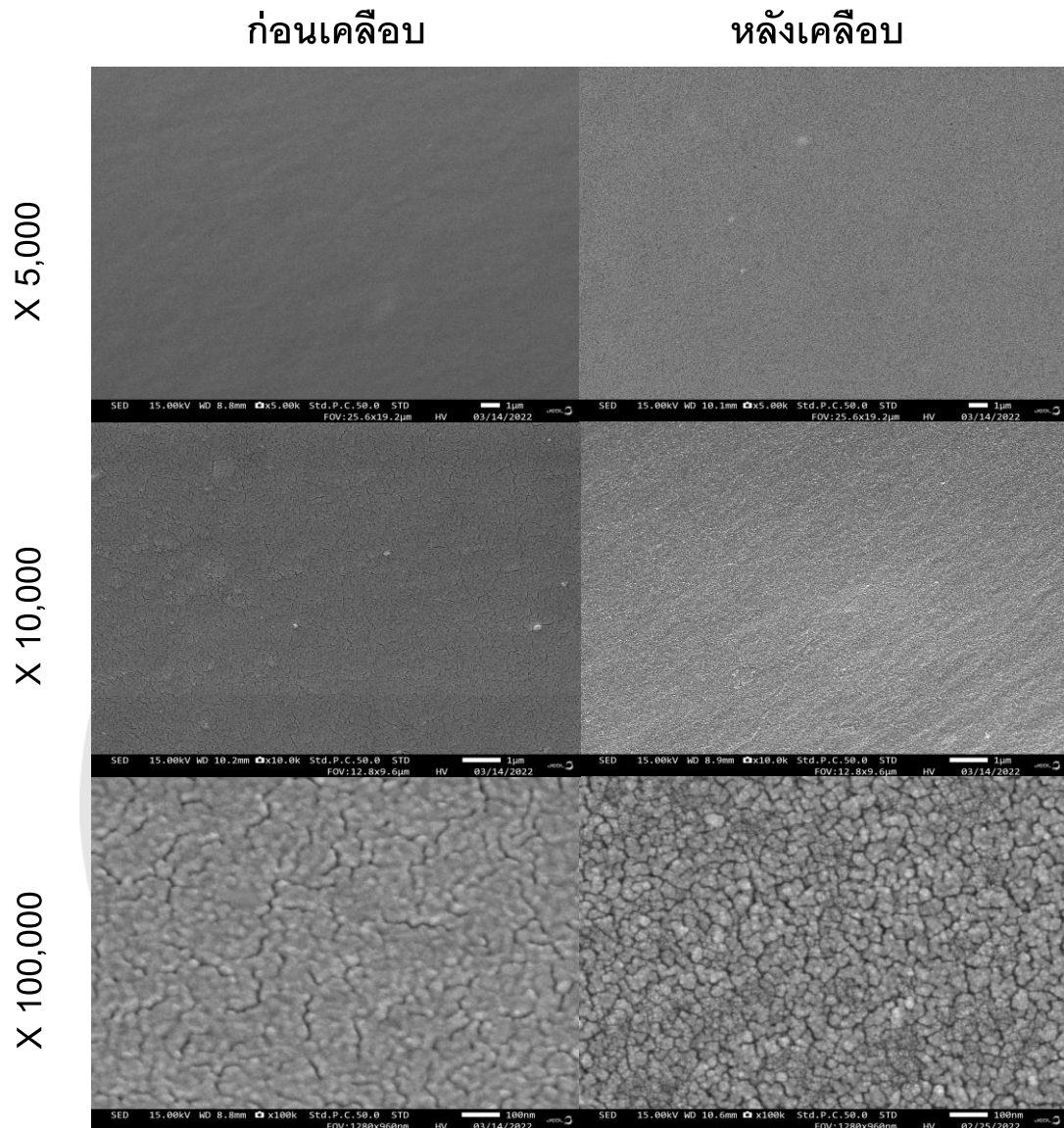
ลักษณะพื้นฐานของตัวอย่างบรรจุภัณฑ์อาหารแบบดั้งเดิม และแบบเคลือบฟิล์มบาง ไททาเนียมไดออกไซด์ ที่กำลังขยายต่าง ๆ ได้แก่ 5,000, 10,000, และ 100,000 เท่า แสดงในภาพ 47-50 จะเห็นได้ว่า ที่กำลังขยาย 5,000 และ 10,000 เท่า บรรจุภัณฑ์อาหารแบบดั้งเดิมของ ตัวอย่าง A (ภาพ 47), ตัวอย่าง B (ภาพ 48), ตัวอย่าง C (ภาพ 49) และตัวอย่าง D (ภาพ 50) มีลักษณะเรียบเนียน และบรรจุภัณฑ์ที่เคลือบฟิล์มบางจะมีพื้นผิวที่ขรุขระขึ้นเล็กน้อย แต่ยังคงไม่เห็นความแตกต่างที่ชัดเจนมากนัก และที่กำลังขยาย 100,000 เท่า พบว่า ลักษณะพื้นผิวแตกต่างกันอย่างชัดเจน กล่าวคือ บรรจุภัณฑ์ที่เคลือบฟิล์มบางจะมีพื้นผิวที่ขรุขระเป็นอย่างมาก แต่ก็ไม่พบรอยแยก หรือเป็นรูพรุน ทั้งนี้ลักษณะฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์บนบรรจุภัณฑ์อาหารมีลักษณะคล้ายเป็นอนุภาคทรงกลมระดับนาโน เช่นเดียวกับฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์ที่เคลือบบนผิวกระจก และผ่านกระบวนการเผาที่ 500 °C (Alzamani, Shokuhfar, Eghdam, & Mastali, 2013) นั้นแสดงถึง ประสิทธิภาพของการเคลือบฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์บนบรรจุภัณฑ์อาหารด้วยเทคนิคยูวีเคียว



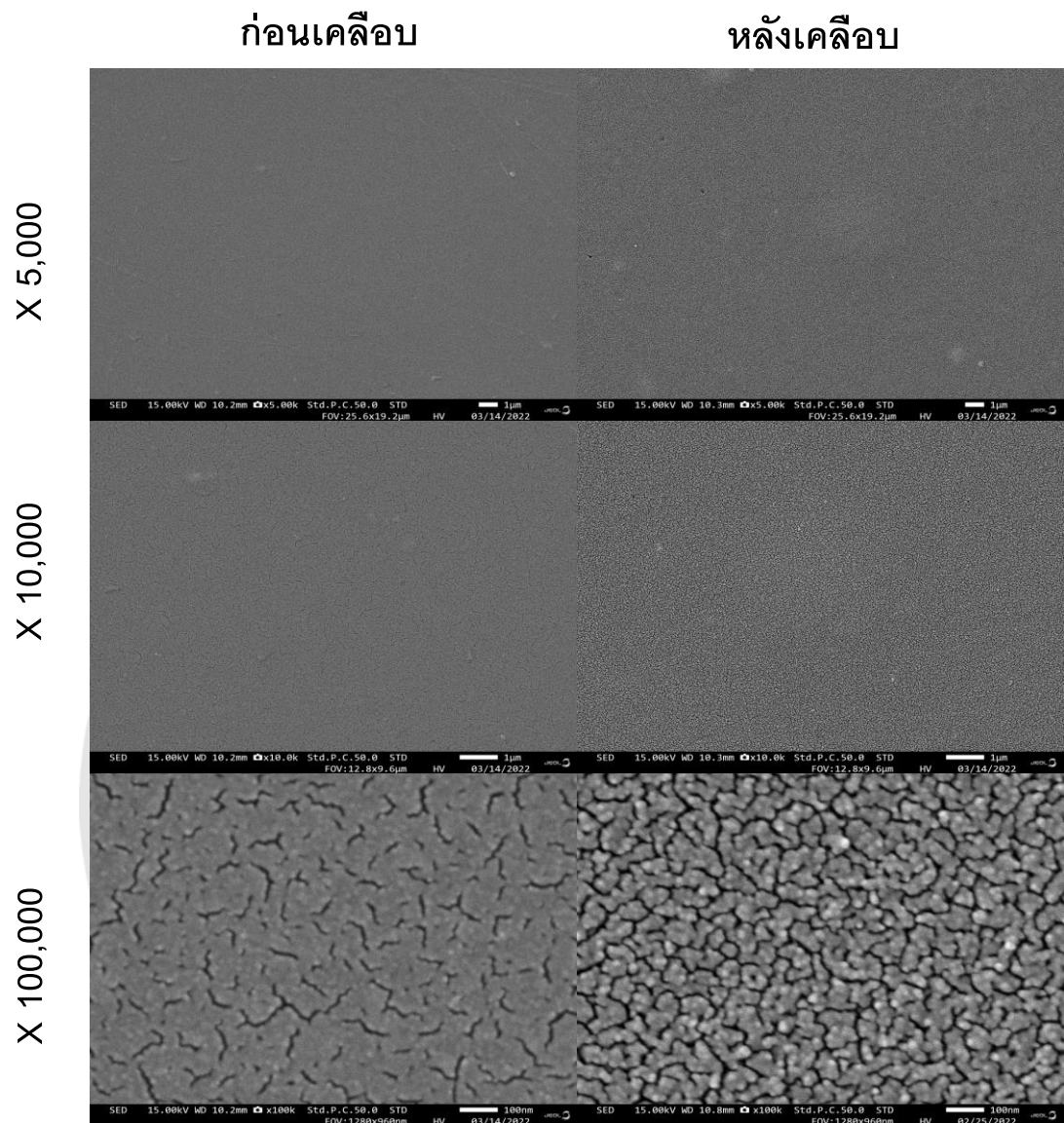
ภาพ 47 ภาพถ่าย FESEM ของตัวอย่าง A



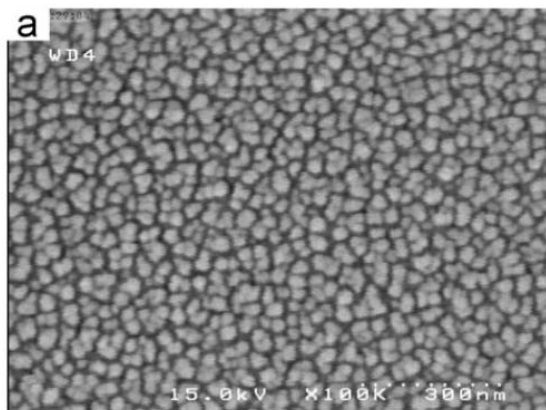
ภาพ 48 ภาพถ่าย FESEM ของตัวอย่าง B



ภาพ 49 ภาพถ่าย FESEM ของตัวอย่าง C



ภาพ 50 ภาพถ่าย FESEM ของตัวอย่าง D

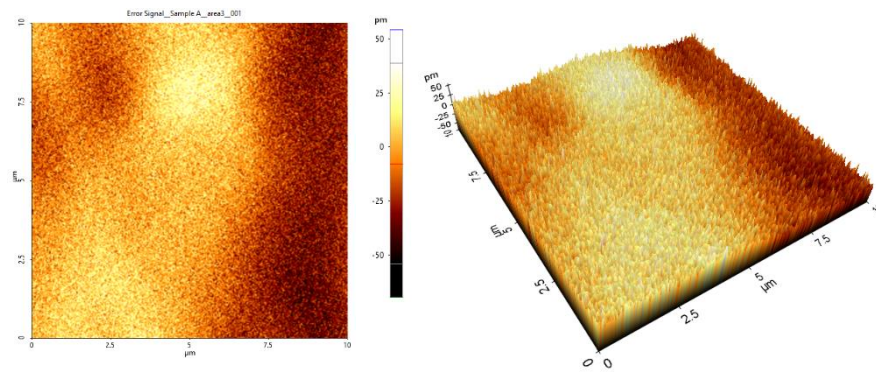


ภาพ 51 ภาพถ่าย FESEM ของฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์ในงานวิจัยอื่น

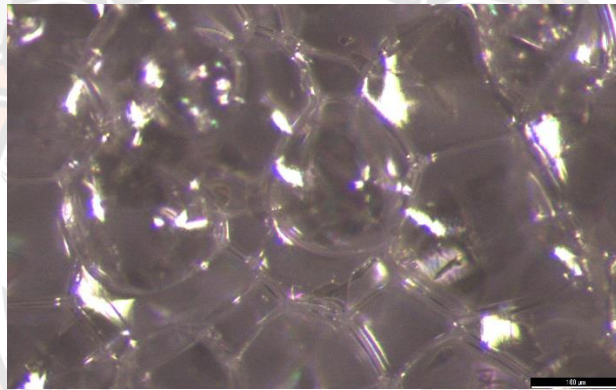
ที่มา: (Alzamani, Shokuhfar, Eghdam, & Mastali, 2013)

3.2 ผลการวิจัยโครงสร้างพื้นฐานของฟิล์มบางด้วยเทคนิค AFM

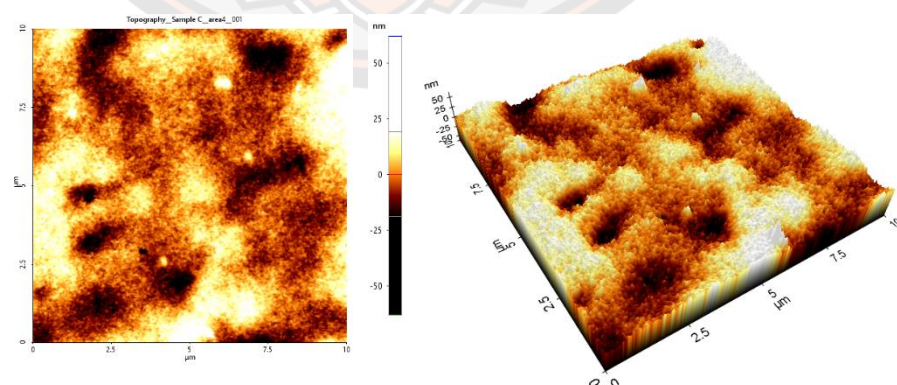
ลักษณะพื้นฐานของฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์ที่เคลือบบนบรรจุภัณฑ์อาหาร แสดงในภาพ 52-55 โดยทำการวิเคราะห์ในพื้นที่ $10 \times 10 \mu\text{m}$ ในตัวอย่าง A, C และ D สำหรับตัวอย่าง B มีลักษณะคล้ายฟองน้ำ ทำให้ไม่สามารถสแกนในพื้นที่ดังกล่าวได้ จากผลการวิเคราะห์พบว่า ฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์ที่เคลือบบนตัวอย่าง C มีค่าความขรุขระของพื้นผิว (Root Mean Square, RMS) มากที่สุด เท่ากับ 9.714 nm รองลงมาเป็นตัวอย่าง D และ A ซึ่งมีค่าเท่ากับ 4.472 และ 3.888 nm ตามลำดับ ทั้งนี้เมื่อพิจารณาร่วมกับการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค FESEM สามารถเห็นได้ว่า ลักษณะพื้นผิวเดิมของตัวอย่าง C มีความขรุขระมากกว่าตัวอย่างอื่น ๆ จึงส่งผลทำให้ตัวอย่าง C มีค่า RMS มากที่สุดเช่นกัน จากภาพ 52 และ 54 จะเห็นได้ว่า ตัวอย่าง A และ D มีลักษณะพื้นผิวที่เรียบเนียน แสดงถึง การฟอร์มตัวของฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์อย่างสม่ำเสมอทั่วทั้งพื้นผิว ไม่มีการจับตัวกันเป็นก้อนขนาดใหญ่



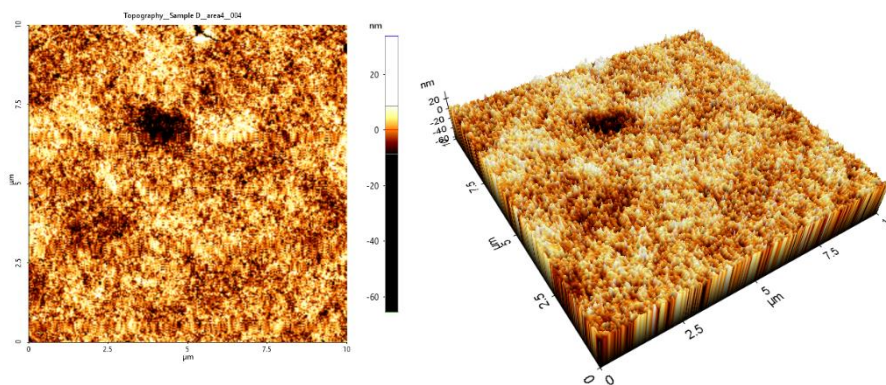
ภาพ 52 ภาพถ่าย AFM ของตัวอย่าง A



ภาพ 53 ภาพถ่าย AFM ของตัวอย่าง B



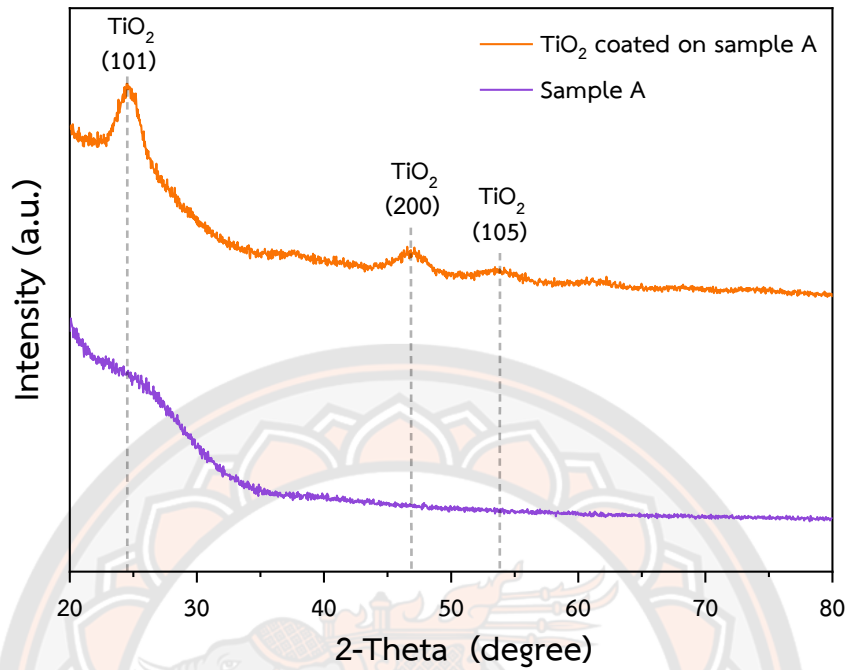
ภาพ 54 ภาพถ่าย AFM ของตัวอย่าง C



ภาพ 55 ภาพถ่าย AFM ของตัวอย่าง D

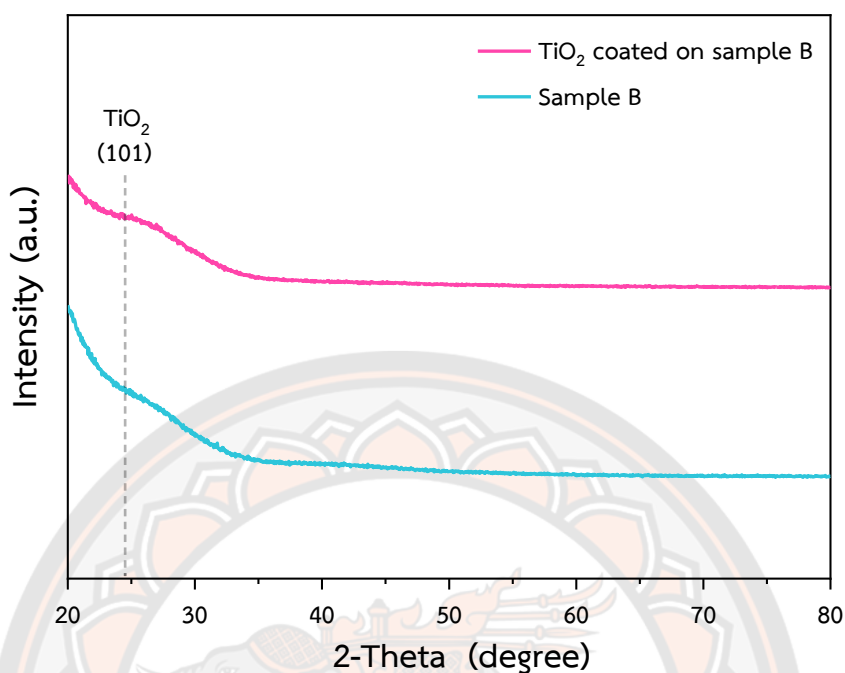
3.3 ผลการวิจัยโครงสร้างผลึกของฟิล์มบางด้วยเทคนิค GIXRD

จากผล GIXRD ของตัวอย่างบรรจุภัณฑ์อาหารที่เคลือบด้วยฟิล์มบางไททานเนียมไดออกไซด์ทั้ง 4 ชนิด ทำการเปรียบเทียบกับบรรจุภัณฑ์อาหารแบบดั้งเดิม แสดงดังภาพ 56-59 โดยตัวอย่าง A ที่เคลือบฟิล์มบาง พบพีคตำแหน่ง 2-Theta เท่ากับ 24.9° , 47.1° และ 54.0° ซึ่งเป็นตำแหน่งโครงสร้างผลึก 101, 200, 105 ของไททานเนียมไดออกไซด์แบบอนาเทส (Peng et al., 2016; Pessoa et al., 2015) ขณะที่ตัวอย่าง A แบบดั้งเดิมที่ไม่ได้เคลือบด้วยฟิล์มบางไททานเนียมไดออกไซด์ไม่พบตำแหน่งพีคของ 2-Theta ใดๆ (ภาพ 56)



ภาพ 56 ผลการวิเคราะห์ GIXRD ของตัวอย่าง A

ตัวอย่าง B ที่เคลือบด้วยฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์ จะพบพีคตำแหน่ง 2-Theta เท่ากับ 24.9° เพียงตำแหน่งเดียว ซึ่งเป็นตำแหน่งโครงสร้างผลึก 101 ของไททาเนียมไดออกไซด์แบบอนาเทส (Peng et al., 2016; Pessoa et al., 2015) แม้พีคจะไม่ชัดเจนมากนัก แต่เมื่อเทียบกับตัวอย่าง B แบบดั้งเดิมที่ไม่ได้เคลือบซึ่งไม่พบตำแหน่งพีคของ 2-Theta ใด ๆ (ภาพ 57)

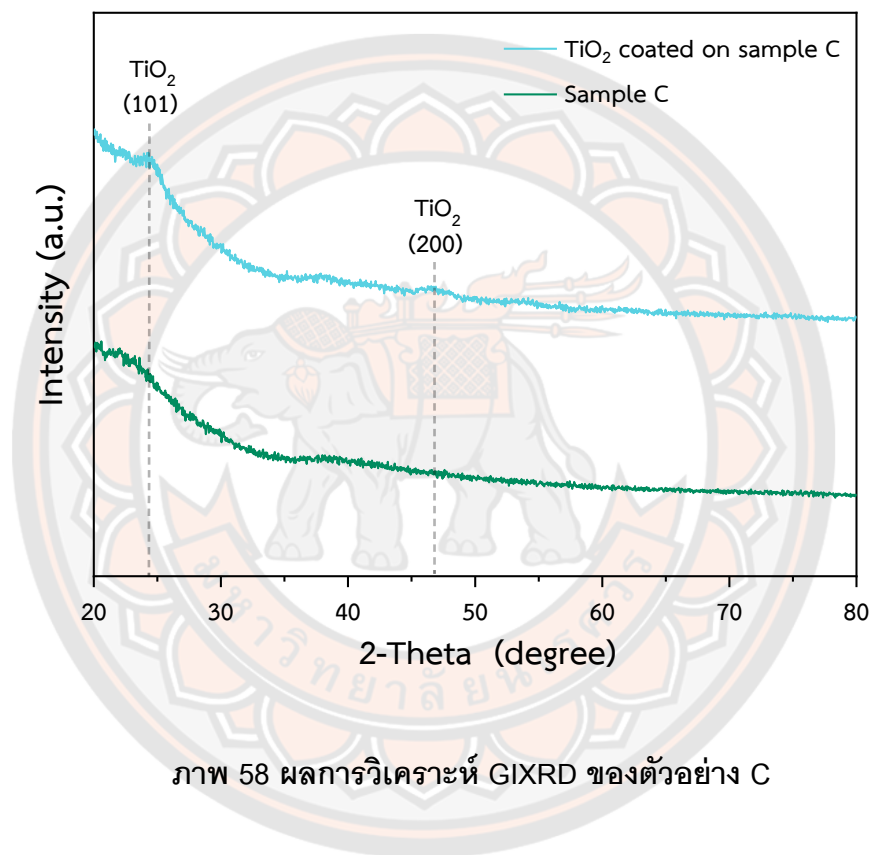


ภาพ 57 ผลการวิเคราะห์ GIXRD ของตัวอย่าง B

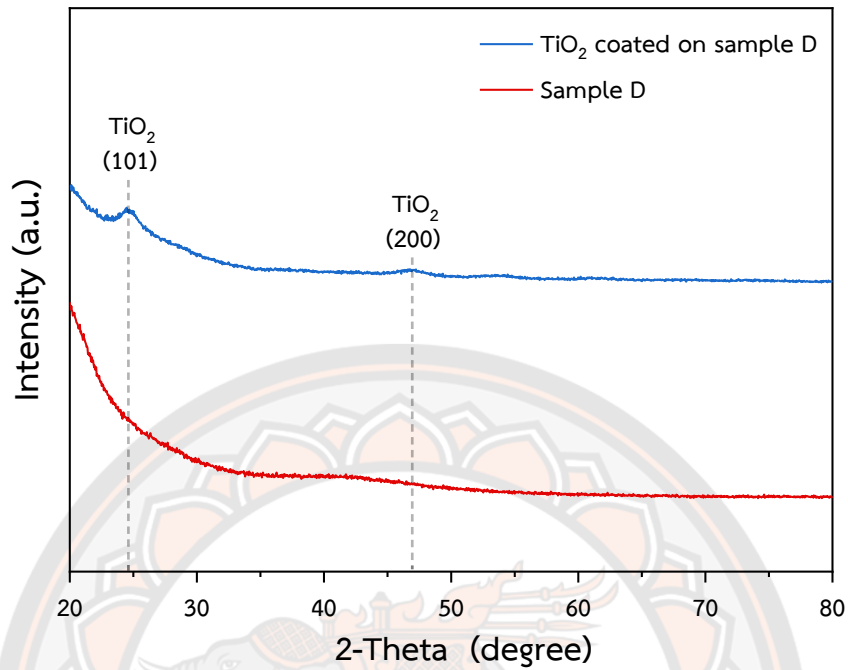
ขณะที่ตัวอย่าง C และ D ที่เคลือบด้วยฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์ พบพิกัดตำแหน่ง 2-Theta ที่ 24.9° และ 47.1° เหมือนกัน ซึ่งเป็นตำแหน่งโครงสร้างผลึก 101 และ 200 ของไททาเนียมไดออกไซด์แบบอนาเทส (Peng et al., 2016; Pessoa et al., 2015) และสำหรับตัวอย่าง C และ D แบบดั้งเดิมที่ไม่ได้เคลือบด้วยฟิล์มบางไม่พบตำแหน่งพิกัดของ 2-Theta ใด ๆ (ภาพ 58 และ 59)

เมื่อเปรียบเทียบตัวอย่างบรรจุภัณฑ์ทั้ง 4 ชนิด ที่เคลือบด้วยฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์ พบว่า ทุกตัวอย่างพบพิกัดตำแหน่ง 2-Theta เท่ากับ 24.9° อย่างเด่นชัด แสดงการเปรียบเทียบในภาพ 60 ซึ่งตัวอย่าง B พบพิกัดค่าที่สุด ทั้งนี้เนื่องจากพื้นผิวของตัวอย่าง B แบบดั้งเดิมมีความขรุขระ หนุนขึ้นคล้ายฟองน้ำ ดังภาพ AFM ดังนั้นเมื่อเคลือบด้วยฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์แล้ว พื้นผิวของตัวอย่าง B จะยังคงมีความขรุขระอยู่ จากหลักการทางเทคนิค GIXRD คือ ยิ่งลำแสงอิเล็กตรอนลงที่พื้นผิว และหมุนรอบตัวอย่างในแนวราบ จึงทำให้ผลการวิเคราะห์ของตัวอย่าง B มีคลื่นการรบกวนจากพื้นผิวดั้งเดิมสูงกว่าตัวอย่างอื่น ๆ ดังนั้น จากผล

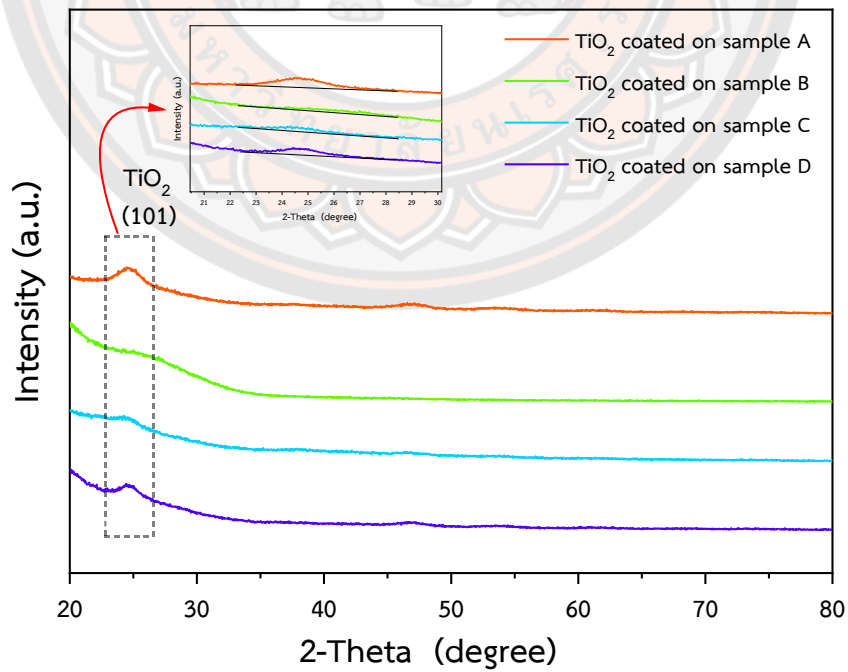
การวิเคราะห์ด้วยเทคนิค GIXRD ข้างต้น แสดงถึงการมีอยู่ของผลึกไททาเนียมไดออกไซด์บนตัวอย่างบรรจุภัณฑ์ทั้ง 4 ชนิด และโครงสร้างผลึกของไททาเนียมไดออกไซด์ที่ได้เป็นแบบอนาเทสทั้งหมด ซึ่งเป็นโครงสร้างผลึกที่นิยมนำมาใช้ในกระบวนการโฟโตคะตะไลติก (Ruzycski et al., 2003)



ภาพ 58 ผลการวิเคราะห์ GIXRD ของตัวอย่าง C



ภาพ 59 ผลการวิเคราะห์ GIXRD ของตัวอย่าง D

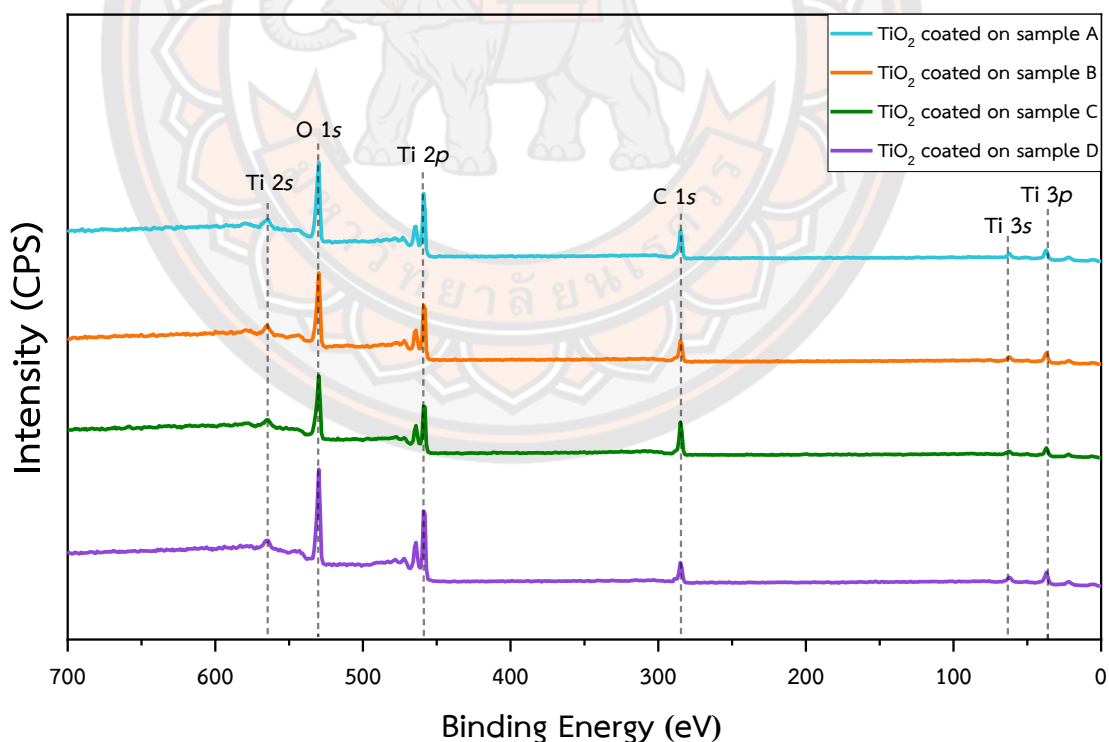


ภาพ 60 เปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ GIXRD ของตัวอย่างทั้ง 4 ชนิด

3.4 ผลการวิจัยชนิดธาตุ และปริมาณธาตุของฟิล์มบางด้วยเทคนิค XPS

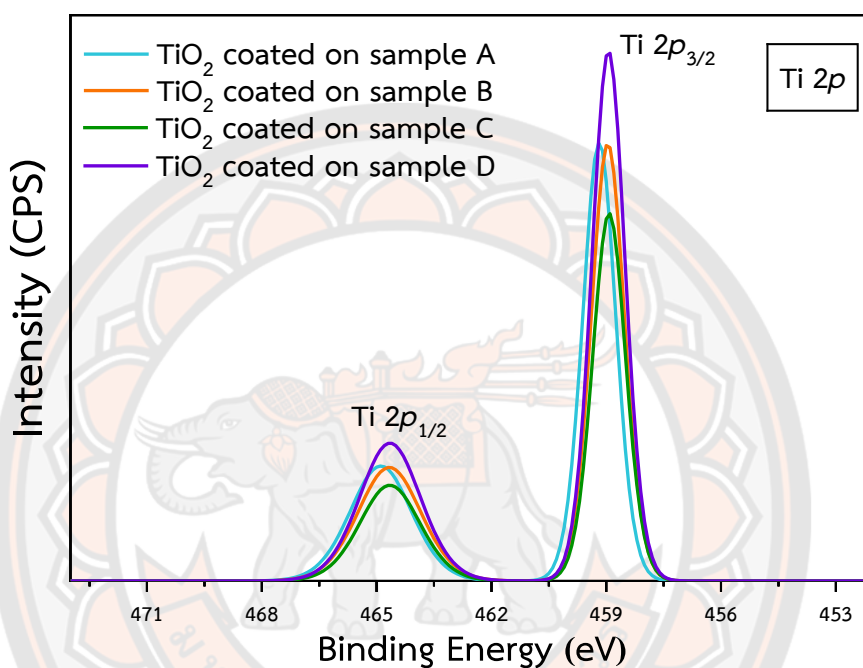
เทคนิคนี้เป็นการวัดเชิงพื้นผิว โดยสเปกตรัมที่ได้เกิดจากอิเล็กตรอนในชั้นพลังงานของธาตุต่าง ๆ ถูกกระตุ้นด้วยรังสีเอ็กซ์ และปลดปล่อยพลังงานออกมา ทำให้สามารถตรวจวัดได้ ซึ่งอิเล็กตรอนที่หลุดออกมาเหล่านี้เรียกว่า Photoemission electron

สเปกตรัม XPS ของพลังงานยึดเหนี่ยวของอะตอมในตัวอย่าง A, B, C, และ D แสดงดังภาพ 61 จะเห็นได้ว่า พบสเปกตรัมของธาตุหลัก 3 ธาตุ ได้แก่ ไททาเนียม (Ti) และออกซิเจน (O) ซึ่งมาจากไททาเนียมไดออกไซด์ที่ใช้ในการเคลือบบรรจุภัณฑ์อาหาร และคาร์บอน (C) ที่มาจากบรรจุภัณฑ์อาหาร ทั้งนี้การหลุดของอิเล็กตรอนในชั้นพลังงานของธาตุแรกพบ คือ ไททาเนียม (Ti 3p), ไททาเนียม (Ti 3s), คาร์บอน (C 1s), ไททาเนียม (Ti 2p), ออกซิเจน (O 1s) และไททาเนียม (Ti 2s) ตามลำดับ ที่ตำแหน่งพลังงานแรงยึดเหนี่ยวเท่ากับ 37, 62, 285, 459, 530, และ 565 eV ตามลำดับ



ภาพ 61 สเปกตรัม XPS ของพลังงานยึดเหนี่ยวของอะตอมในตัวอย่าง A, B, C, และ D

เมื่อพิจารณาที่ตำแหน่งพลังงานแรงยึดเหนี่ยว 459 eV ของไททาเนียม (Ti 2p) และเปรียบเทียบความสูงของพีคสเปกตรัมของตัวอย่าง A, B, C และ D ดังภาพ 62 พบว่า ตัวอย่าง D มีความเข้มของสเปกตรัมสูงที่สุด รองลงมาเป็นตัวอย่าง A และ B ซึ่งมีความสูงใกล้เคียง และตัวอย่าง C ที่มีความเข้มของสเปกตรัมต่ำที่สุด

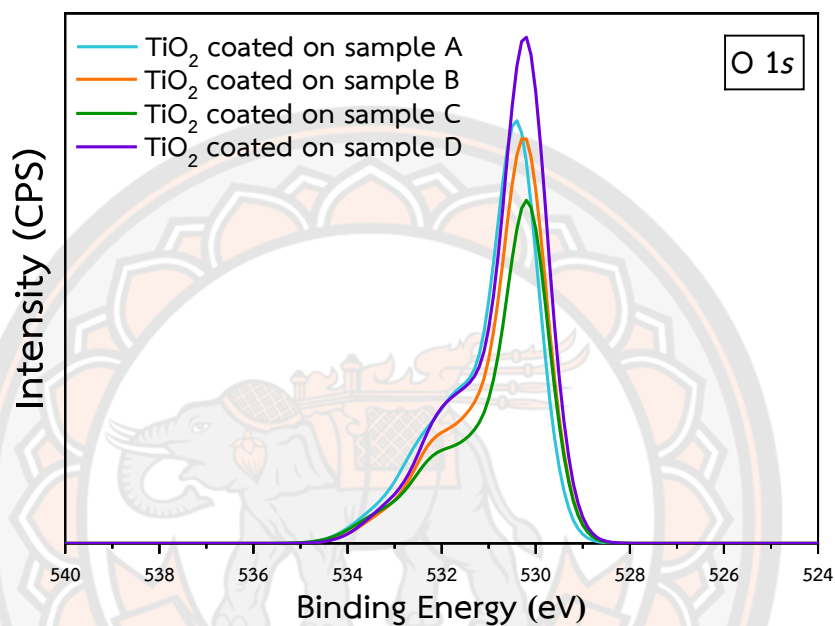


ภาพ 62 เปรียบเทียบสเปกตรัมของไททาเนียม (Ti 2p) ของทั้ง 4 ตัวอย่าง

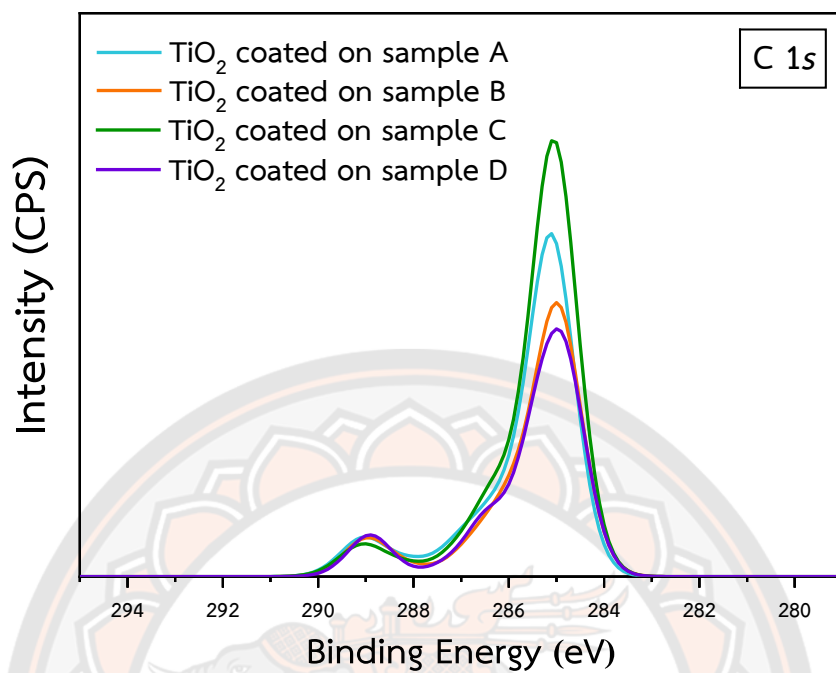
ตำแหน่งพลังงานแรงยึดเหนี่ยว 530 eV ของออกซิเจน (O 1s) เมื่อเปรียบเทียบความสูงของพีคสเปกตรัมของตัวอย่าง A, B, C และ D ดังภาพ 63 พบว่า ตัวอย่าง D มีความเข้มของสเปกตรัมสูงที่สุด รองลงมาเป็นตัวอย่าง A และ B มีความสูงใกล้เคียงกัน และตัวอย่าง C ที่มีความเข้มของสเปกตรัมต่ำที่สุด ซึ่งลำดับความเข้มของสเปกตรัมออกซิเจน (O 1s) ในแต่ละตัวอย่างสอดคล้องกับลำดับความเข้มของสเปกตรัมไททาเนียม (Ti 2p) นั้นแสดงถึงโครงสร้างโมเลกุลของไททาเนียมไดออกไซด์

ตำแหน่งพลังงานแรงยึดเหนี่ยว 285 eV ของคาร์บอน (C 1s) ซึ่งเป็นอิเล็กตรอนของคาร์บอนของพื้นผิวบรรจุภัณฑ์อาหาร ดังภาพ 64 พบว่า ตัวอย่าง C มีความเข้มของสเปกตรัมสูงที่สุด และตัวอย่าง D มีความเข้มของสเปกตรัมต่ำที่สุด ซึ่งแสดงให้เห็นว่า แม้ตัวอย่างแต่ละ

ตัวอย่างจะเคลือบด้วยฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์เช่นเดียวกัน แต่โครงสร้างโมเลกุลที่ได้กลับแตกต่างกัน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับกระบวนการฟอร์มตัวของพันธะเคมีที่เกิดขึ้น โดยรายละเอียดพื้นที่ใต้กราฟของธาตุไททาเนียม (Ti 2p), ออกซิเจน (O 1s) และคาร์บอน (C 1s) ของแต่ละตัวอย่าง แสดงในตาราง 6



ภาพ 63 เปรียบเทียบสเปกตรัม O 1s ของทั้ง 4 ตัวอย่าง



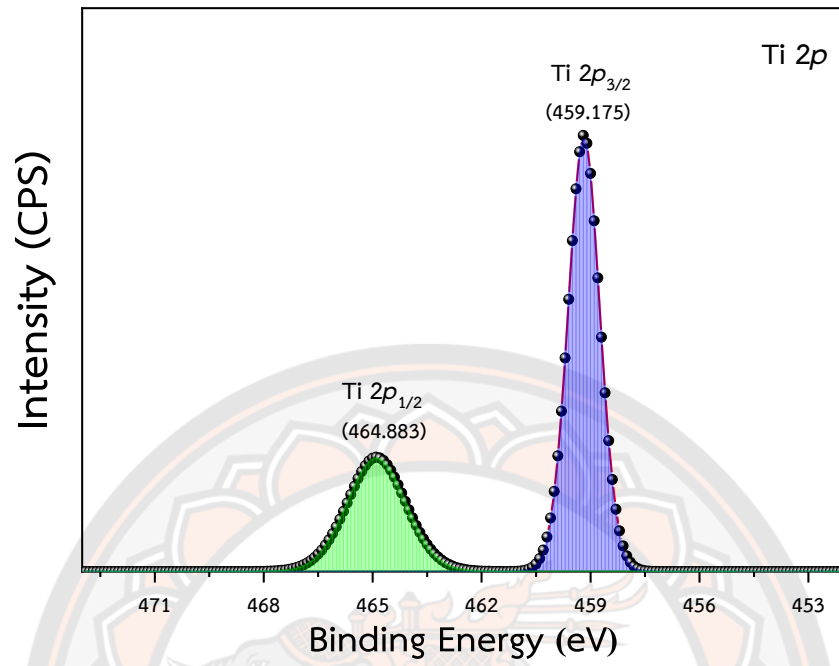
ภาพ 64 เปรียบเทียบสเปกตรัม C 1s ของทั้ง 4 ตัวอย่าง

ตาราง 6 พื้นที่ใต้กราฟของธาตุ Ti 2p, O 1s, และ C 1s ของทั้ง 4 ตัวอย่าง

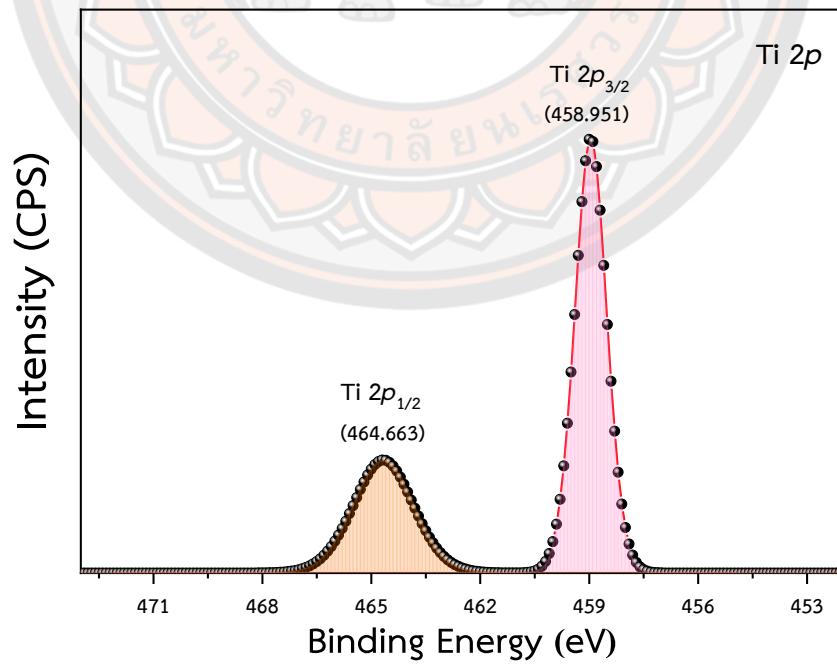
ตัวอย่าง	พื้นที่ใต้กราฟ (CPS eV)		
	Ti 2p	O 1s	C 1s
A	109,160	123,060	42,370
B	110,350	114,940	34,950
C	93,740	103,710	47,680
D	140,100	142,010	30,810

จากการวิเคราะห์ธาตุไททาเนียม (Ti) ตำแหน่งสเปกตรัม XPS ของไททาเนียมมาจากอนุภาคอิเล็กทรอนิกส์ทั้งหมด 22 ตัว จัดเรียงตัวในแต่ละชั้นของอะตอมไททาเนียม ดังนี้ $1s^2$, $2s^2$, $2p^6$, $3s^2$, $3p^6$, $3d^2$ และ $4s^2$ ซึ่งผลการวิเคราะห์สเปกตรัม XPS ของพลังงานยึดเหนี่ยวของอะตอมไททาเนียมพบอิเล็กทรอนิกส์ของไททาเนียมในชั้น Ti 3p, Ti 3s, Ti 2p และ Ti 2s ที่ตำแหน่งพลังงานแรงยึดเหนี่ยว เท่ากับ 37, 62, 459, และ 565 eV ตามลำดับ เมื่อทำการ peak fitting ที่ตำแหน่งธาตุไททาเนียม (Ti 2p) ของทั้ง 4 ตัวอย่าง โดยใช้ Gaussian distribution function พบ 2 พีค คือ Ti $2p_{3/2}$ ที่พลังงานยึดเหนี่ยว ประมาณ 458.917-459.175 eV และ Ti $2p_{1/2}$ ที่พลังงานยึดเหนี่ยว ประมาณ 464.646-466.883 eV สอดคล้องกับธาตุไททาเนียม ชนิด Ti^{4+} ซึ่งมีประจุ +4 (Khan et al., 2014) ซึ่งรายละเอียดตำแหน่งพลังงานยึดเหนี่ยวของ Ti $2p_{3/2}$ และ Ti $2p_{1/2}$ ของทั้ง 4 ตัวอย่าง แสดงในภาพ 65-68

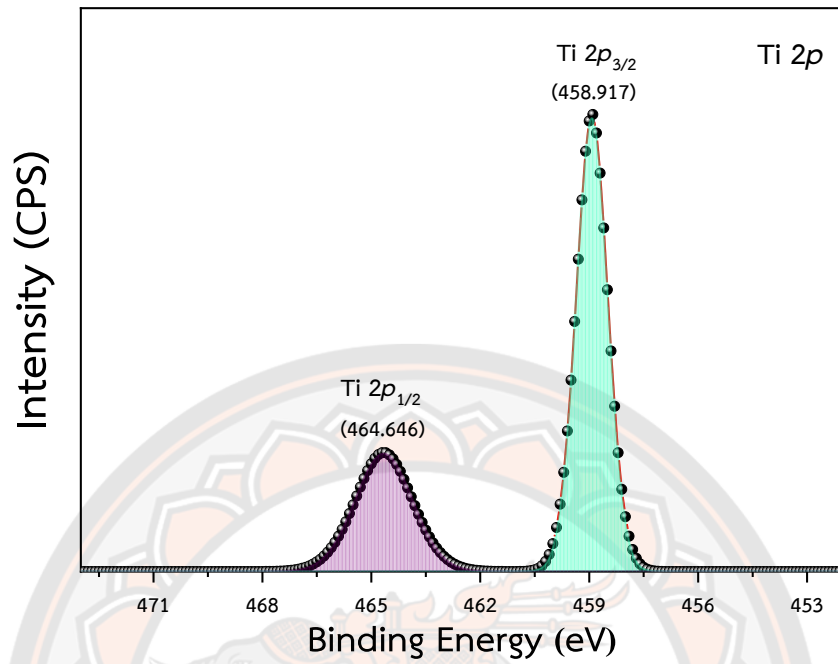
จากผลการวิจัยของ (Jia et al., 2019) รายงานว่า โดยปกติตำแหน่งแรงยึดเหนี่ยวอิเล็กทรอนิกส์ของ Ti $2p_{3/2}$ และ Ti $2p_{1/2}$ จะอยู่ที่ 458.38 และ 464.07 eV ซึ่งเมื่อมีการแทรกตัวของอะตอมอื่นในโครงสร้างโมเลกุลของไททาเนียมไดออกไซด์ จะทำให้ตำแหน่งของแรงยึดเหนี่ยวอิเล็กทรอนิกส์เปลี่ยนไป คือ มีตำแหน่งแรงยึดเหนี่ยวอิเล็กทรอนิกส์เพิ่มมากขึ้น (Positive shift) ซึ่งในงานวิจัยนี้ พบว่า แรงยึดเหนี่ยวอิเล็กทรอนิกส์ของ Ti $2p_{3/2}$ และ Ti $2p_{1/2}$ ของทั้ง 4 ตัวอย่างเปลี่ยนไป โดยมีแรงยึดเหนี่ยวอิเล็กทรอนิกส์เพิ่มมากขึ้น ประมาณ 0.5-0.8 eV แสดงรายละเอียดดังตาราง 7 ซึ่งผลดังกล่าวแสดงถึงการแทรกตัวของอะตอมอื่นในโครงสร้างโมเลกุลของไททาเนียมไดออกไซด์



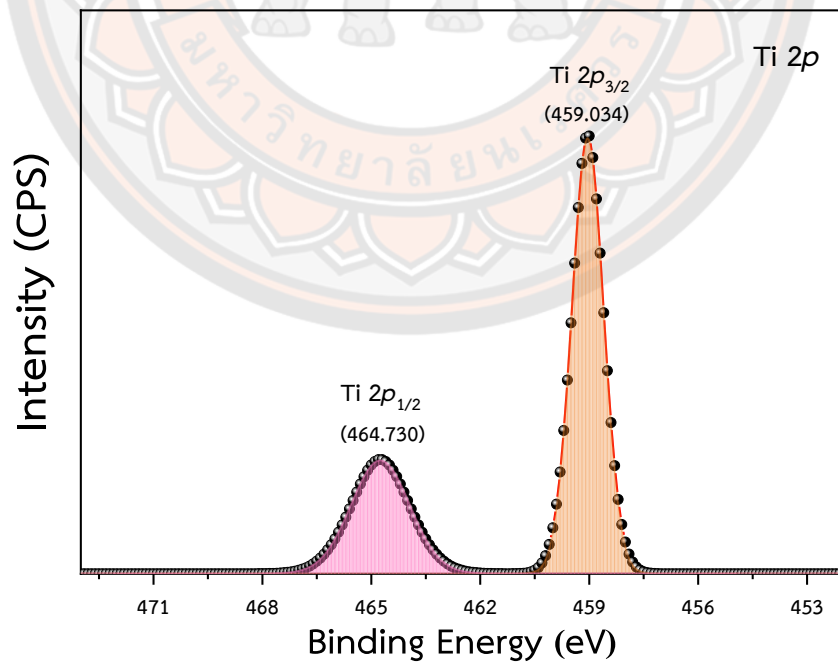
ภาพ 65 สเปกตรัม Ti 2p ของตัวอย่าง A



ภาพ 66 สเปกตรัม Ti 2p ของตัวอย่าง B



ภาพ 67 สเปกตรัม Ti 2p ของตัวอย่าง C



ภาพ 68 สเปกตรัม Ti 2p ของตัวอย่าง D

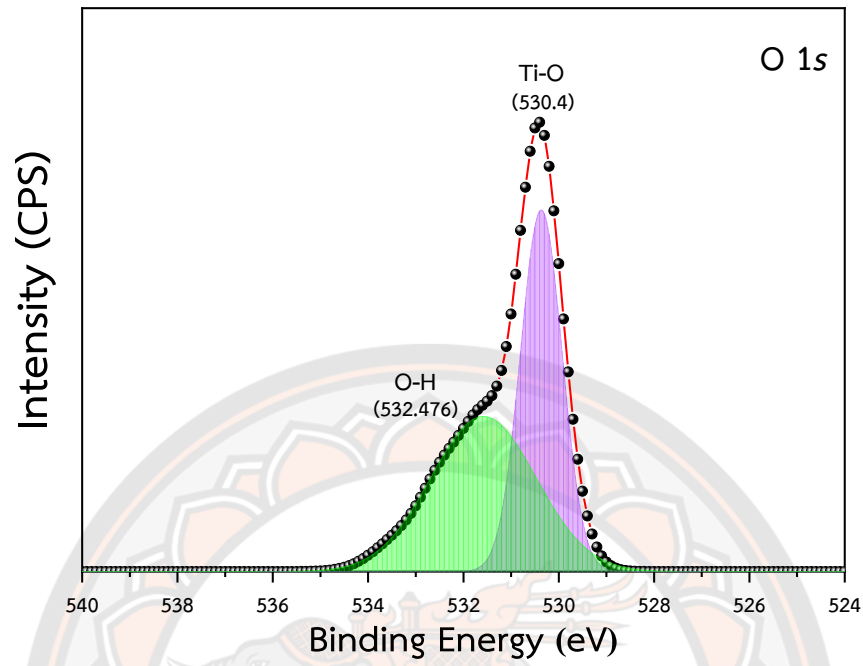
ตาราง 7 ตำแหน่งพลังงานยึดเหนี่ยวของ Ti $2p_{3/2}$ และ Ti $2p_{1/2}$ ของทั้ง 4 ตัวอย่าง

Sample	Binding Energy (eV)		Positive Shift (eV)	
	Ti $2p_{3/2}$	Ti $2p_{1/2}$	Ti $2p_{3/2}$	Ti $2p_{1/2}$
TiO ₂	458.380	464.070	-	-
A	459.175	464.883	0.79	0.81
B	458.951	464.663	0.57	0.59
C	458.917	464.646	0.53	0.57
D	459.034	464.730	0.65	0.66

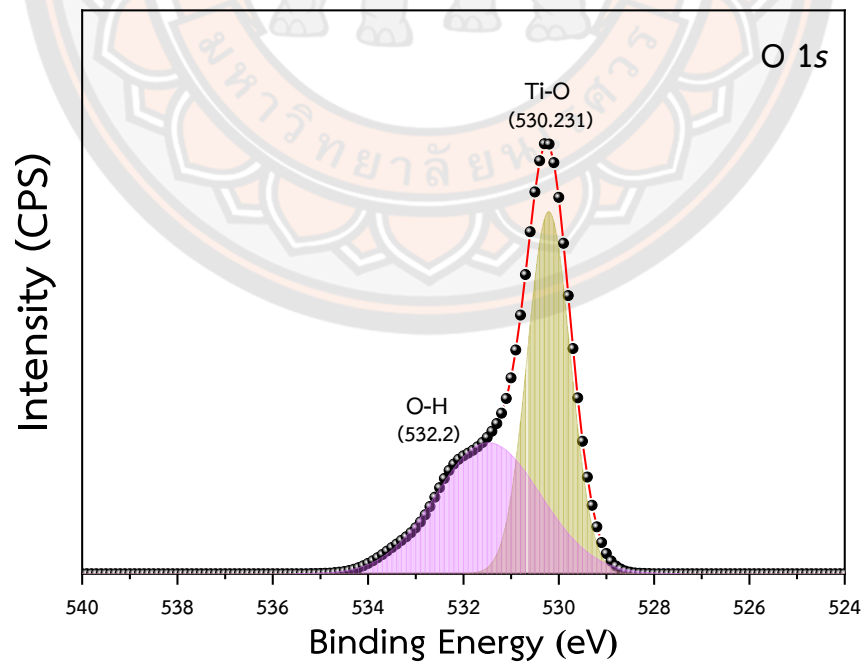
ที่มา: Binding Energy ของ TiO₂ (Jia et al., 2019)

จากการวิเคราะห์ธาตุออกซิเจน (O) ตำแหน่งสเปกตรัม XPS ของออกซิเจนมาจากอนุภาคอิเล็กตรอนทั้ง 8 ตัว จัดเรียงตัวในแต่ละชั้นของอะตอมไททาเนียม ดังนี้ $1s^2$, $2s^2$ และ $2p^4$ ซึ่งจากผลการวิเคราะห์สเปกตรัม XPS ของพลังงานยึดเหนี่ยวของอะตอมออกซิเจนตรวจพบอิเล็กตรอนของออกซิเจนในชั้น O 1s ที่ตำแหน่งพลังงานแรงยึดเหนี่ยวเท่ากับ 530 eV เมื่อทำการ peak fitting ที่ตำแหน่งธาตุออกซิเจน O 1s ของทั้ง 4 ตัวอย่าง โดยใช้ Gaussian distribution function พบพันธะ Ti-O และพันธะ O-H ที่ตำแหน่งพลังงานยึดเหนี่ยวประมาณ 530.178-530.4 และ 532.2-532.467 eV ตามลำดับ แสดงในภาพ 69-72

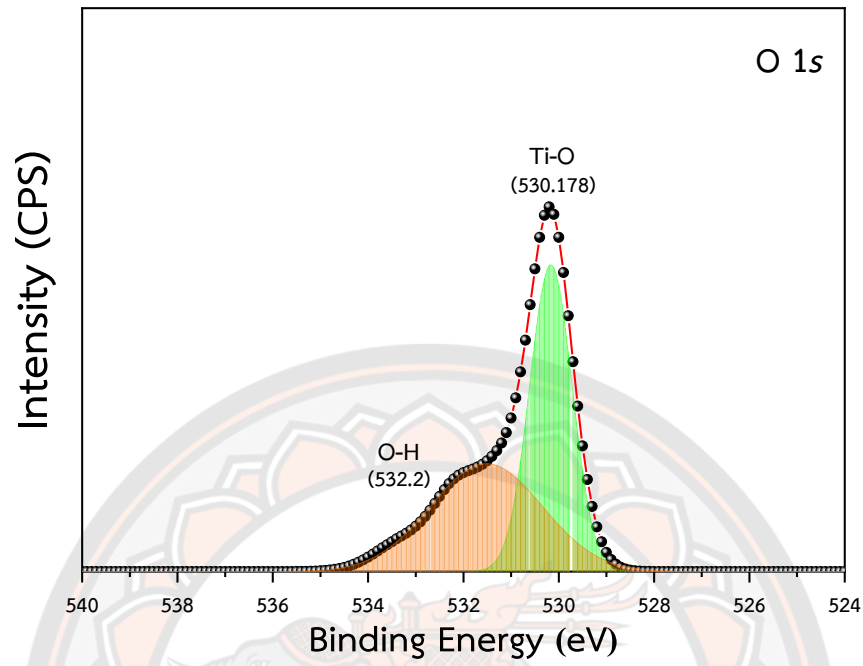
จากผลการวิจัยของ (Yang et al., 2017) รายงานว่า ตำแหน่งแรงยึดเหนี่ยวอิเล็กตรอนของพันธะ Ti-O และพันธะ O-H ที่ 529.68 และ 531.64 eV สอดคล้องกับธาตุออกซิเจนชนิด O^{2-} ซึ่งมีประจุ -2 (Erdem et al., 2001) และพันธะ O-H ที่พบ เกิดจากการดูดซับโมเลกุลของน้ำ (H_2O) จากสิ่งแวดล้อม ซึ่งเมื่อนำมาพิจารณาร่วมกับผลการทดลองในงานวิจัยนี้ พบว่า ตำแหน่งแรงยึดเหนี่ยวอิเล็กตรอนของพันธะ Ti-O และพันธะ O-H ของทั้ง 4 ตัวอย่างเปลี่ยนไปเช่นเดียวกับแรงยึดเหนี่ยวอิเล็กตรอนของธาตุไททาเนียม โดยมีแรงยึดเหนี่ยวอิเล็กตรอนเพิ่มมากขึ้นประมาณ 0.5-0.8 eV แสดงรายละเอียดดังตาราง 8 ซึ่งผลดังกล่าวแสดงถึงการแทรกตัวของอะตอมอื่นในโครงสร้างโมเลกุลของไททาเนียมไดออกไซด์ ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ธาตุไททาเนียมที่วิเคราะห์ไว้ข้างต้น



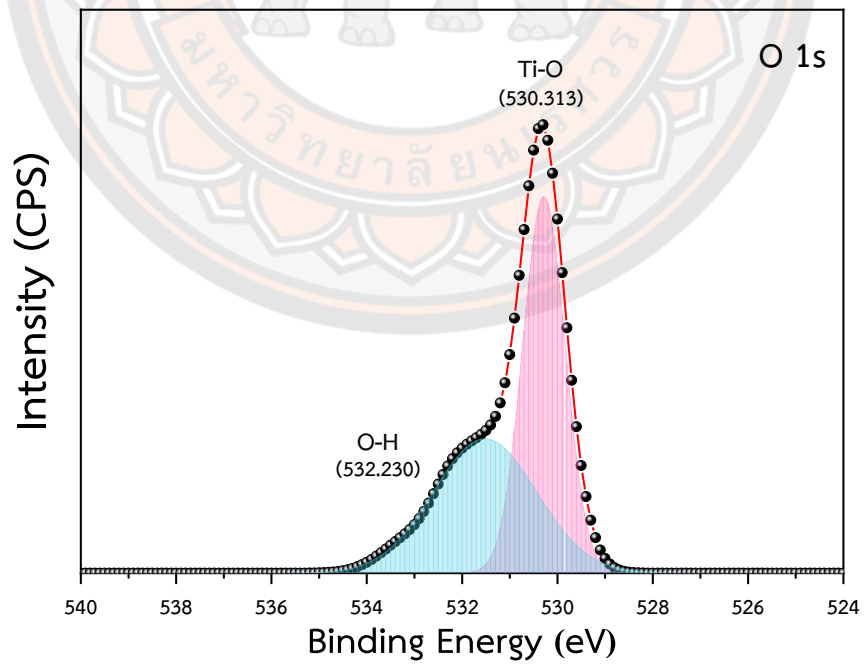
ภาพ 69 สเปกตรัม O 1s ของตัวอย่าง A



ภาพ 70 สเปกตรัม O 1s ของตัวอย่าง B



ภาพ 71 สเปกตรัม O 1s ของตัวอย่าง C



ภาพ 72 สเปกตรัม O 1s ของตัวอย่าง D

ตาราง 8 ตำแหน่งพลังงานยึดเหนี่ยวพันธะ Ti-O และพันธะ O-H ของทั้ง 4 ตัวอย่าง

Sample	Binding Energy (eV)		Positive Shift (eV)	
	Ti-O	O-H	Ti-O	O-H
O ²⁻	529.68	531.64	-	-
A	530.4	532.476	0.72	0.84
B	530.231	532.2	0.55	0.56
C	530.175	532.2	0.49	0.56
D	530.313	532.23	0.63	0.29

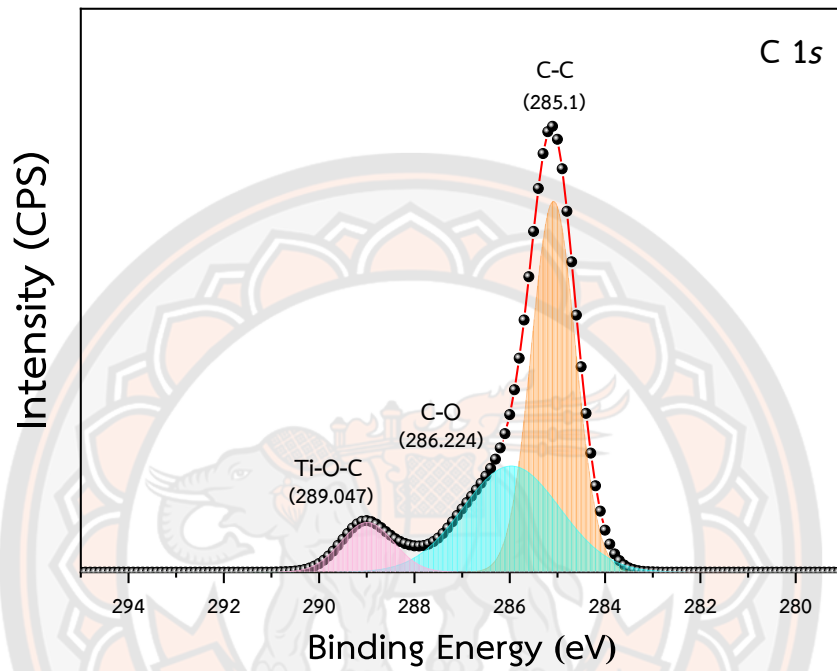
ที่มา: Binding Energy ของ O²⁻ (Yang et al., 2017)

จากการวิเคราะห์ธาตุคาร์บอน (C) ซึ่งเป็นธาตุที่ตรวจพบในการวิเคราะห์สเปกตรัม XPS ของทั้ง 4 ตัวอย่าง เนื่องจากการใช้งานรังสีเอกซ์ของเครื่อง XPS ใช้เพื่อกระตุ้นอิเล็กตรอนในชั้นพลังงานของธาตุต่าง ๆ ให้หลุดออก (Focused Beam of X-ray) มีระดับความลึกที่ยิงลงพื้นผิวประมาณ 5 nm โดยทั่วไปฟิล์มบางของวัสดุนาโนจะมีความหนา 1-100 nm เมื่อทำการเปรียบเทียบระดับความลึกดังกล่าว ทำให้สามารถอนุมานได้ว่า ธาตุคาร์บอน (C) ที่พบมาจากโครงสร้างโมเลกุลของพื้นผิวบรรจุภัณฑ์อาหาร

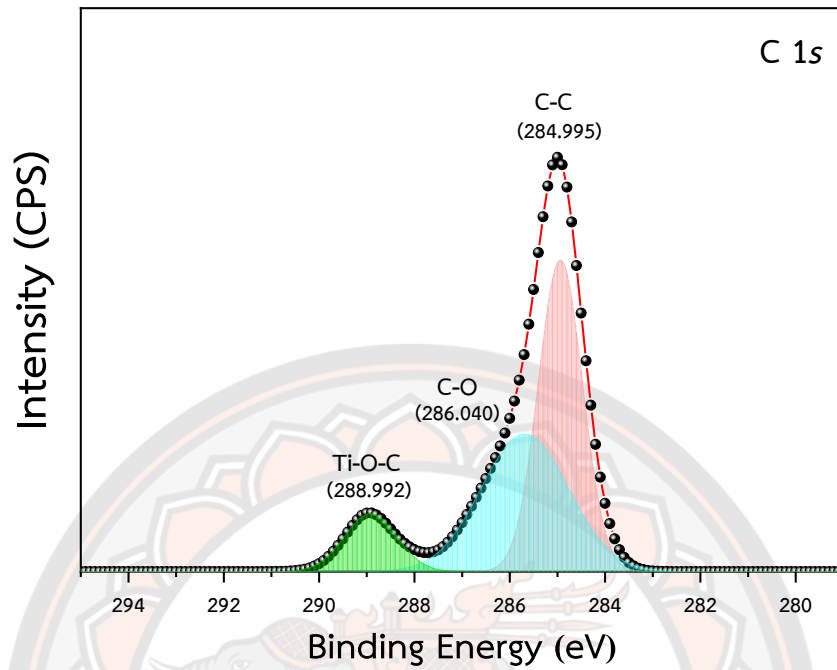
ตำแหน่งสเปกตรัม XPS ของคาร์บอน (C) มาจากอนุภาคอิเล็กตรอนทั้ง 6 ตัว จัดเรียงตัวในแต่ละชั้นของอะตอมคาร์บอน ดังนี้ $1s^2$, $2s^2$ และ $2p^2$ ซึ่งผลการวิเคราะห์สเปกตรัม XPS ของพลังงานยึดเหนี่ยวของอะตอมคาร์บอน พบอิเล็กตรอนของคาร์บอนในชั้น C 1s ที่ตำแหน่งพลังงานแรงยึดเหนี่ยวเท่ากับ 285 eV เมื่อทำการ peak fitting ที่ตำแหน่งธาตุคาร์บอน C 1s ทั้ง 4 ตัวอย่าง โดยใช้ Gaussian distribution function พบสเปกตรัมของพลังงานยึดเหนี่ยวพันธะ C-C, พันธะ C-O และพันธะ Ti-O-C ในทั้ง 4 ตัวอย่าง ซึ่งพบที่ตำแหน่งพลังงานยึดเหนี่ยวประมาณ 284.995-285.483, 286.04-284.534 และ 288.988-289.066 eV ตามลำดับ แสดงในภาพ 73-76

จากผลการวิจัยของ (Jia et al., 2019) รายงานว่าพันธะ C-C สามารถพบได้ที่ตำแหน่งพลังงานยึดเหนี่ยว 284.76 eV และที่ตำแหน่งพลังงานยึดเหนี่ยว 286.15 และ 289.12 eV เป็น

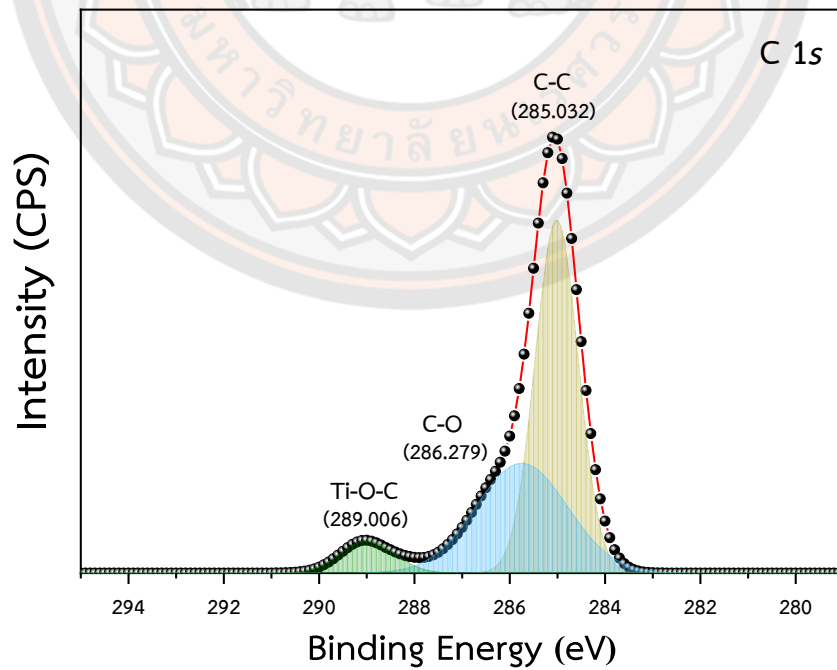
โครงสร้างพันธะของออกซิเจนร่วมกับคาร์บอน คือ พันธะ C-O และพันธะ Ti-O-C ซึ่งจากตำแหน่งพลังงานยึดเหนี่ยวสอดคล้องกับงานวิจัยนี้ ทำให้สรุปได้ว่า มีคาร์บอนในโครงสร้างโมเลกุลของไททานเนียมไดออกไซด์ต่อกันแบบ Ti-O-C



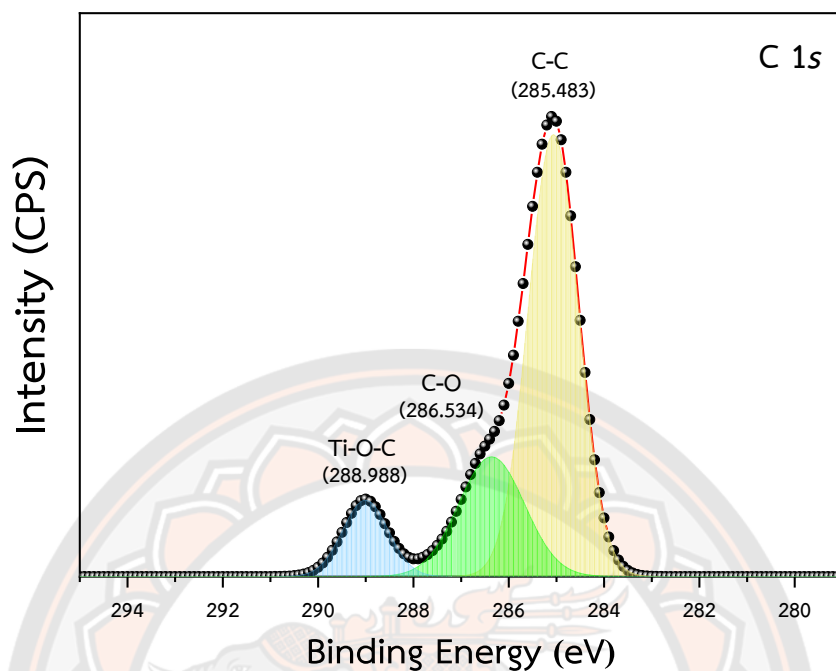
ภาพ 73 สเปกตรัม C 1s ของตัวอย่าง A



ภาพ 74 สเปกตรัม C 1s ของตัวอย่าง B



ภาพ 75 สเปกตรัม C 1s ของตัวอย่าง C



ภาพ 76 สเปกตรัม C 1s ของตัวอย่าง D

เมื่อทำการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของตำแหน่งแรงยึดเหนี่ยวอิเล็กตรอนของธาตุคาร์บอน ดังตาราง 9 พบว่า มีแรงยึดเหนี่ยวอิเล็กตรอนของพันธะ C-C เพิ่มมากขึ้นประมาณ 0.2-0.8 eV ในขณะที่แรงยึดเหนี่ยวอิเล็กตรอนของพันธะ C-O เปลี่ยนแปลงไปเพียง 0.07-0.38 eV โดยที่ตัวอย่าง B แรงยึดเหนี่ยวอิเล็กตรอนกลับลดลง และสำหรับแรงยึดเหนี่ยวอิเล็กตรอนพันธะ Ti-O-C ของทั้ง 4 ตัวอย่างลดลงทั้งหมด ทั้งนี้เนื่องจากพันธะ Ti-O-C ถ่ายโอนอิเล็กตรอนในพันธะให้กับพันธะอื่น ๆ เช่น พันธะ O-Ti หรือพันธะ O-H ทำให้ทั้ง 2 พันธะนี้มีแรงยึดเหนี่ยวอิเล็กตรอนเพิ่มมากขึ้น ดังที่แสดงผลในตาราง 8 ข้างต้น จากผลดังกล่าวสอดคล้องกัน และสามารถสรุปได้ว่าการแทรกตัวของอะตอมคาร์บอนในโครงสร้างโมเลกุลของไททานเนียมไดออกไซด์อย่างชัดเจน

ตาราง 9 ตำแหน่งพลังงานยึดเหนี่ยวพันธะ C-C, พันธะ C-O และพันธะ Ti-O-C ของทั้ง 4 ตัวอย่าง

Sample	Binding Energy (eV)			Positive Shift (eV)		
	C-C	C-O	Ti-O-C	C-C	C-O	Ti-O-C
C 1s	284.76	286.15	289.12	-	-	-
A	285.1	286.224	289.07	0.34	0.07	-0.05
B	284.995	286.04	288.992	0.23	-0.11	-0.13
C	285.032	286.279	289.066	0.27	0.13	-0.005
D	285.483	286.534	288.988	0.88	0.38	-0.13

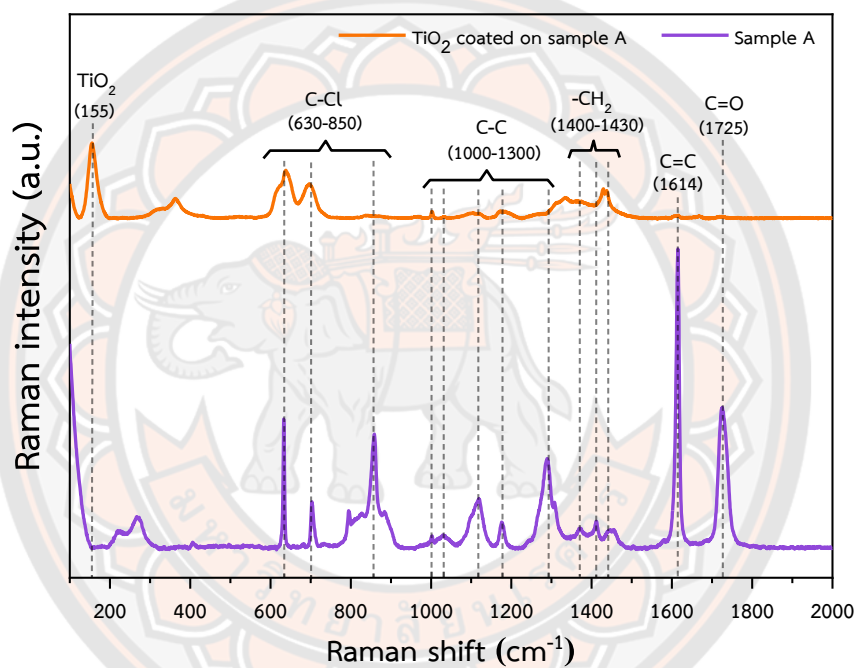
ที่มา: Binding Energy ของคาร์บอน (Jia et al., 2019)

3.5 ผลการวิจัยโครงสร้างโมเลกุลของฟิล์มบางด้วยเทคนิค Raman Spectrometer

จากภาพ 77 เมื่อเปรียบเทียบรามานสเปกตรัมระหว่างตัวอย่าง A แบบดั้งเดิม และตัวอย่าง A ที่เคลือบฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์ พบสเปกตรัมของพันธะที่แตกต่างอย่างเด่นชัด คือ ที่ 155 cm^{-1} แม้ว่าจะงานวิจัยของ (Al-Taweel & Saud, 2016; El-Deen et al., 2018) จะรายงานว่า สเปกตรัมของไททาเนียมไดออกไซด์อยู่ที่ $143\text{-}144\text{ cm}^{-1}$ อย่างไรก็ตาม ตำแหน่งสเปกตรัมที่เปลี่ยนแปลงตำแหน่งไปในงานวิจัยนี้ เนื่องมาจากโครงสร้างโมเลกุลของไททาเนียมไดออกไซด์มีอะตอมของคาร์บอนแทรกตัวอยู่ สอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XPS นอกจากนี้ งานวิจัยของ (Bansal et al., 2020; Zhang, Xiao, Zheng, & Wan, 2015) พบว่า เมื่อไททาเนียมไดออกไซด์เจือปนกับอะตอมอื่น ๆ จะทำให้สเปกตรัมเปลี่ยนแปลงตำแหน่งไปที่ 155 cm^{-1} เช่นเดียวกับงานวิจัยนี้

เมื่อพิจารณาตำแหน่งยอดสเปกตรัมอื่น ๆ พบว่า เป็นสเปกตรัมของโมเลกุลที่พื้นผิวของบรรจุภัณฑ์อาหาร จากงานวิจัยของ (Ludwig et al., 2018; Moustafa, Morsy, Ateia, & Abdel-Haleem, 2021; Prokhorov et al., 2016; Rouabah et al., 2021; Sadek, Mansour, Ahmed, Abd-El-Messieh, & El-Komy, 2021) รายงานว่า ตำแหน่งของสเปกตรัม $630\text{-}850, 1000\text{-}1300,$

1400-1430, 1614 และ 1725 cm^{-1} คือ ตำแหน่งสเปกตรัมของพันธะ C-Cl, C-C, $-\text{CH}_2$, C=C และ C=O ตามลำดับ จากสเปกตรัมของตัวอย่าง A แบบดั้งเดิม แสดงว่าเป็นบรรจุภัณฑ์อาหารที่มีโครงสร้างโมเลกุลของ PVC การเปลี่ยนแปลงของสเปกตรัมของโครงสร้างโมเลกุล PVC ในตัวอย่าง A ที่เคลือบด้วยฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์ เนื่องมาจากอะตอมคาร์บอนในโครงสร้างโมเลกุลของ PVC ได้แตกตัว และเข้าไปแทนที่ส่วนประกอบโครงสร้างโมเลกุลของไททาเนียมไดออกไซด์ รายละเอียดของแต่ละสเปกตรัมแสดงในตาราง 10



ภาพ 77 สเปกตรัม Raman shift ของตัวอย่าง A

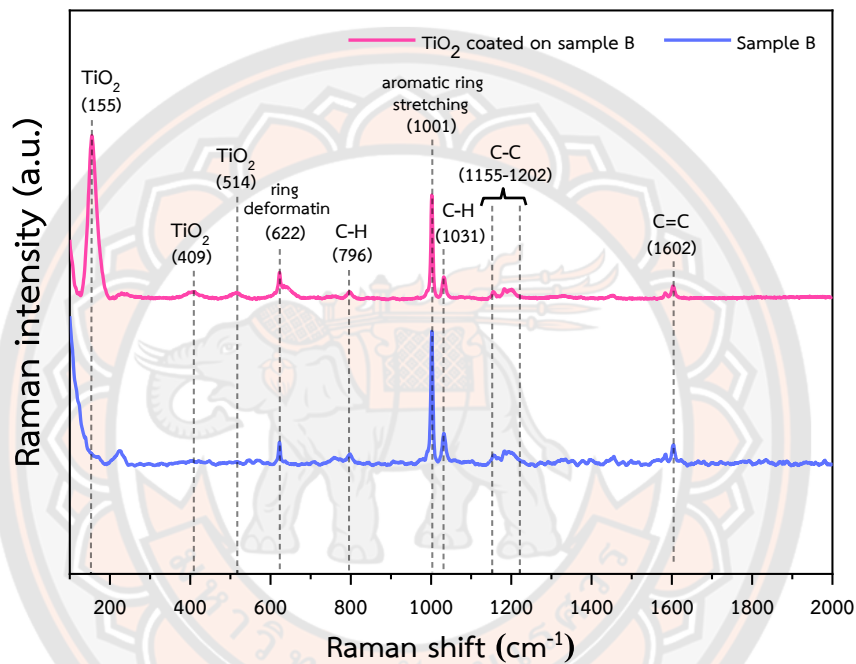
ตาราง 10 รายละเอียดตำแหน่งของรามานสเปกตรัมของตัวอย่าง A

พันธะเคมี	ตำแหน่งยอดสเปกตรัม (cm^{-1})	อ้างอิง
TiO_2	155	(Bansal et al., 2020; Zhang et al., 2015)
C-Cl	630-850	(Moustafa et al., 2021; Prokhorov et al., 2016; Rouabah et al., 2021; Sadek et al., 2021)
C-C	1000-1300	(Rouabah et al., 2021)
$-\text{CH}_2$	1400-1430	(Ludwig et al., 2018; Sadek et al., 2021)
C=C	1614	(Rouabah et al., 2021)
C=O	1725	(Ludwig et al., 2018)

จากภาพ 78 เมื่อทำการเปรียบเทียบรามานสเปกตรัมระหว่างตัวอย่าง B แบบดั้งเดิม และตัวอย่าง B ที่เคลือบด้วยฟิล์มบางไททานเนียมไดออกไซด์ พบสเปกตรัมของพันธะที่แตกต่างกันคือพันธะไททานเนียมไดออกไซด์ที่ 155 cm^{-1} เช่นเดียวกับตัวอย่าง A ทั้งนี้เนื่องมาจากการเคลือบฟิล์มบางไททานเนียมไดออกไซด์บนตัวอย่าง A และ B ใช้เทคนิคยิววีเคียวเหมือนกัน ผลการวิเคราะห์ที่ได้ยังแสดงถึงโครงสร้างโมเลกุลของไททานเนียมไดออกไซด์ที่มีอะตอมของคาร์บอนแทรกตัวอยู่เช่นเดียวกัน สอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XPS นอกจากนี้ตัวอย่าง B ที่เคลือบด้วยฟิล์มบางยังพบสเปกตรัมที่ตำแหน่งอื่น ๆ ได้แก่ 409 และ 514 cm^{-1} ซึ่งก็คือพันธะของไททานเนียมไดออกไซด์เช่นเดียวกัน (Bansal et al., 2020; Zhang et al., 2015)

เมื่อพิจารณาตำแหน่งยอดสเปกตรัมอื่น ๆ พบว่า เป็นสเปกตรัมของโมเลกุลที่พื้นผิวของบรรจุภัณฑ์อาหาร จากงานวิจัยของ (Mazilu, De Luca, Riches, Herrington, & Dholakia, 2010; Menezes, Reyer, Marletta, & Musso, 2017; Mohammed, 2017) รายงานว่า ที่ตำแหน่งสเปกตรัม $622, 796, 1001, 1013, 1155-1202$ และ 1602 cm^{-1} คือ ตำแหน่งสเปกตรัมของพันธะ ring deformation, C-H, aromatic ring stretching, C-H, C-C และ C=C ตามลำดับ

จากสเปกตรัมของตัวอย่าง B แบบดั้งเดิม แสดงว่า เป็นบรรจุภัณฑ์อาหารที่มีโครงสร้างโมเลกุลของ PS และการเปลี่ยนแปลงของสเปกตรัมของโครงสร้างโมเลกุล PS ในตัวอย่าง B ที่เคลือบด้วยฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์ เนื่องมาจากอะตอมคาร์บอนในโครงสร้างโมเลกุลของ PS ได้แตกตัวและเข้าไปแทนที่ส่วนประกอบโครงสร้างโมเลกุลของไททาเนียมไดออกไซด์ รายละเอียดของแต่ละสเปกตรัมแสดงในตาราง 11



ภาพ 78 สเปกตรัม Raman shift ของตัวอย่าง B

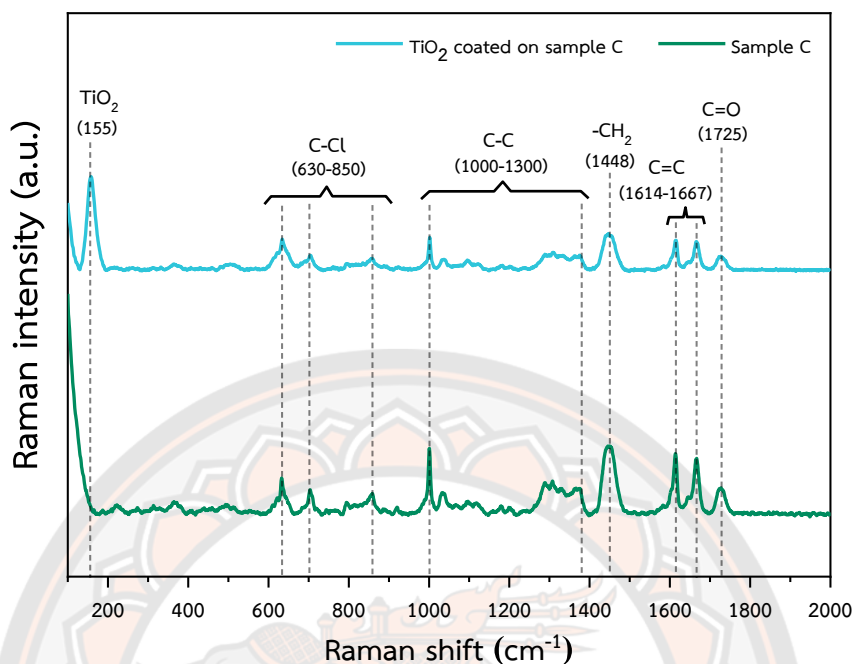
ตาราง 11 รายละเอียดตำแหน่งของรามานสเปกตรัมของตัวอย่าง B

พันธะเคมี	ตำแหน่งยอด	
	สเปกตรัม (cm^{-1})	อ้างอิง
TiO_2	155, 409, 514	(Bansal et al., 2020; Zhang et al., 2015)
Ring deformation	622	(Menezes et al., 2017; Mohammed, 2017)
C-H	796, 1031	(Mazilu et al., 2010; Mohammed, 2017)

พันธะเคมี	ตำแหน่งยอด	
	สเปกตรัม (cm^{-1})	อ้างอิง
Aromatic ring stretching	1001	(Mazilu et al., 2010; Menezes et al., 2017; Mohammed, 2017)
C-C	1155-1202	(Mazilu et al., 2010)
C=C	1602	(Menezes et al., 2017; Mohammed, 2017)

จากภาพ 79 เมื่อทำการเปรียบเทียบปริมาณสเปกตรัมระหว่างตัวอย่าง C แบบดั้งเดิม และตัวอย่าง C ที่เคลือบด้วยฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์ พบสเปกตรัมของพันธะที่แตกต่างกัน คือพันธะไททาเนียมไดออกไซด์ ที่ 155 cm^{-1} เช่นเดียวกับตัวอย่าง A และ B ทั้งนี้เนื่องมาจากการเคลือบฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์บนตัวอย่าง A, B และ C ใช้เทคนิคยูวีเคียวเหมือนกัน ผลการวิเคราะห์ที่ได้ยังแสดงถึงโครงสร้างโมเลกุลของไททาเนียมไดออกไซด์ที่มีอะตอมของคาร์บอนแทรกตัวอยู่เช่นเดียวกัน สอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XPS

เมื่อพิจารณาดำแหน่งยอดสเปกตรัมอื่น ๆ พบว่า เป็นสเปกตรัมของโมเลกุลที่พื้นผิวของบรรจุภัณฑ์อาหาร จากงานวิจัยของ (Ludwig et al., 2018; Moustafa et al., 2021; Prokhorov et al., 2016; Rouabah et al., 2021; Sadek et al., 2021) รายงานว่า ที่ตำแหน่งยอดสเปกตรัม 630-850, 1000-1300, 1448, 1614-1667 และ 1725 cm^{-1} คือ ตำแหน่งสเปกตรัมของพันธะ C-Cl, C-C, $-\text{CH}_2$, C=C และ C=O ตามลำดับ จากสเปกตรัมของตัวอย่าง C แบบดั้งเดิม แสดงว่าเป็นบรรจุภัณฑ์อาหารที่มีโครงสร้างโมเลกุลของ PVDC การเปลี่ยนแปลงของสเปกตรัมของโครงสร้างโมเลกุล PVDC ในตัวอย่าง C ที่เคลือบด้วยฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์ เนื่องมาจากอะตอมคาร์บอนในโครงสร้างโมเลกุลของ PVDC ได้แตกตัวและเข้าไปแทนที่ส่วนประกอบโครงสร้างโมเลกุลของไททาเนียมไดออกไซด์ รายละเอียดของแต่ละสเปกตรัมแสดงในตาราง 12



ภาพ 79 สเปกตรัม Raman shift ของตัวอย่าง C

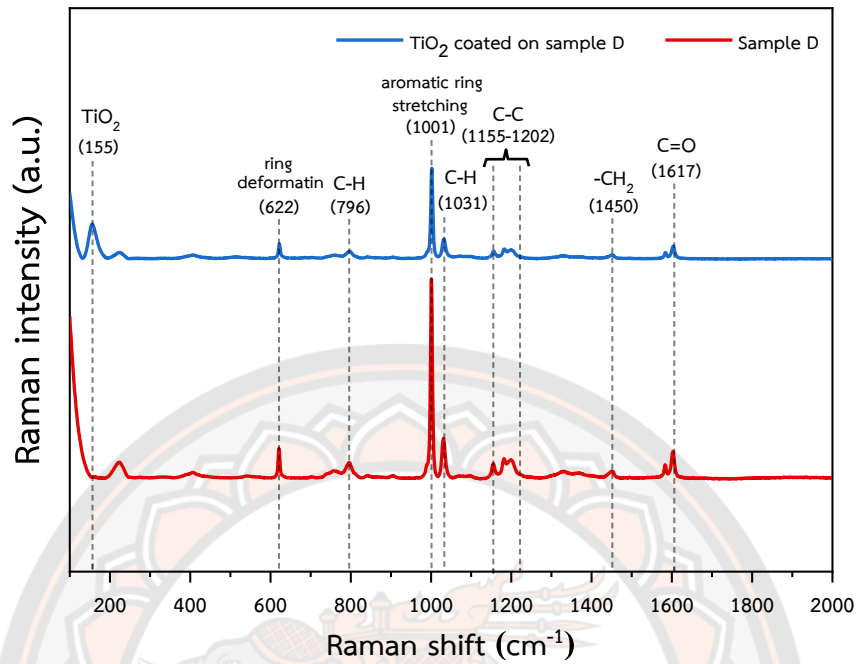
ตาราง 12 รายละเอียดตำแหน่งของรามานสเปกตรัมของตัวอย่าง C

พันธะเคมี	ตำแหน่งยอดสเปกตรัม (cm^{-1})	อ้างอิง
TiO_2	155	(Bansal et al., 2020; Zhang et al., 2015)
C-Cl	630-850	(Moustafa et al., 2021; Prokhorov et al., 2016; Rouabah et al., 2021; Sadek et al., 2021)
C-C	1000-1300	(Rouabah et al., 2021)
$-\text{CH}_2$	1448	(Ludwig et al., 2018; Sadek et al., 2021)
C=C	1614-1667	(Rouabah et al., 2021)

C=O	1725	(Ludwig et al., 2018)
-----	------	-----------------------

จากภาพ 80 เมื่อทำการเปรียบเทียบรามานสเปกตรัมระหว่างตัวอย่าง D แบบดั้งเดิม และ ตัวอย่าง D ที่เคลือบด้วยฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์ พบสเปกตรัมของพันธะที่แตกต่างกัน คือ พันธะไททาเนียมไดออกไซด์ ที่ 155 cm^{-1} เช่นเดียวกับตัวอย่าง A, B และ C ทั้งนี้เนื่องมาจากการเคลือบฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์บนตัวอย่าง A, B, C และ D ใช้เทคนิคยิวีเคียวเหมือนกัน ผลการวิเคราะห์ที่ได้ยังแสดงถึงโครงสร้างโมเลกุลของไททาเนียมไดออกไซด์ที่มีอะตอมของคาร์บอนแทรกตัวอยู่เช่นเดียวกัน สอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XPS

เมื่อพิจารณาดำแหน่งยอดสเปกตรัมอื่น ๆ พบว่า เป็นสเปกตรัมของโมเลกุลที่พื้นผิวของบรรจุภัณฑ์อาหาร จากงานวิจัยของ (Kim, Park, Han, Seo, & Park, 2021; Zuo et al., 2016) รายงานว่า ที่ตำแหน่งยอดสเปกตรัม 622, 796, 1001, 1013, 1155-1202, 1450 และ 1617 cm^{-1} คือ ตำแหน่งสเปกตรัมของพันธะ ring deformation, C-H, aromatic ring stretching, C-H, C-C, $-\text{CH}_2$ และ C=O ตามลำดับ จากสเปกตรัมของตัวอย่าง D แบบดั้งเดิม แสดงว่า เป็นบรรจุภัณฑ์อาหารที่มีโครงสร้างโมเลกุลของ PET การเปลี่ยนแปลงของสเปกตรัมของโครงสร้างโมเลกุล PET ในตัวอย่าง D ที่เคลือบด้วยฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์ เนื่องมาจากอะตอมคาร์บอนในโครงสร้างโมเลกุลของ PET ได้แตกตัวและเข้าไปแทนที่ส่วนประกอบโครงสร้างโมเลกุลของไททาเนียมไดออกไซด์ รายละเอียดของแต่ละสเปกตรัม แสดงในตาราง 13

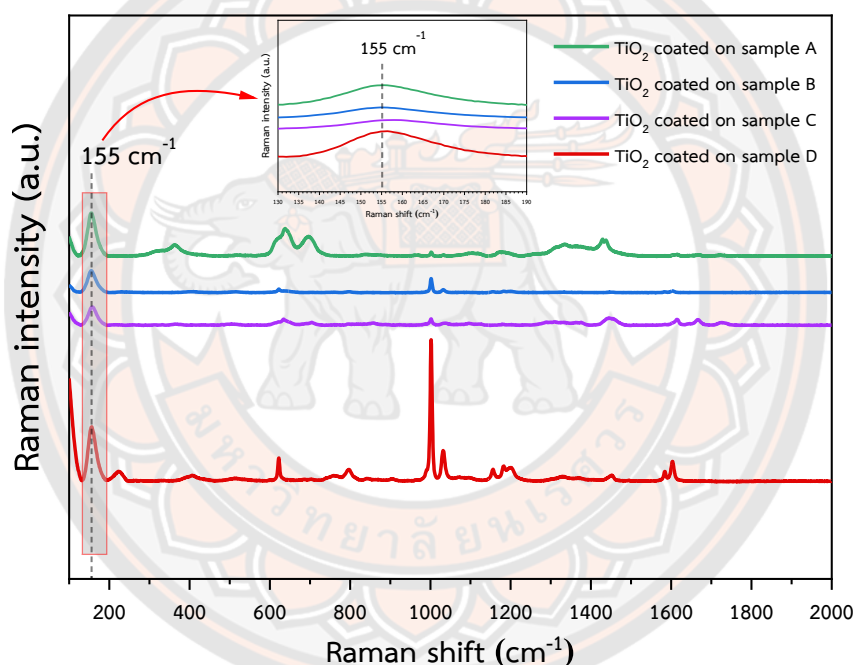


ภาพ 80 สเปกตรัม Raman shift ของตัวอย่าง D

ตาราง 13 รายละเอียดตำแหน่งของรามานสเปกตรัมของตัวอย่าง D

พันธะเคมี	ตำแหน่งยอด สเปกตรัม (cm^{-1})	อ้างอิง
TiO_2	155	(Bansal et al., 2020; Zhang et al., 2015)
Ring deformation	622	(Zuo et al., 2016)
C-H	796, 1031	(Mazilu et al., 2010)
Aromatic ring stretching	1001	(Mazilu et al., 2010; Menezes et al., 2017; Mohammed, 2017)
C-C	1155-1202	(Mazilu et al., 2010; Zuo et al., 2016)
$-\text{CH}_2$	1450	(Kim et al., 2021)
C=O	1602	(Kim et al., 2021)

เมื่อทำการเปรียบเทียบทั้ง 4 ตัวอย่าง พบ ตำแหน่งยอดสเปกตรัมของไททาเนียม-ไดออกไซด์อยู่ในตำแหน่งเดียวกัน คือ 155 cm^{-1} ดังแสดงในภาพ 81 ซึ่งทำการวิเคราะห์ความเข้มของรามานสเปกตรัมที่ตำแหน่งดังกล่าว พบว่า ความเข้มของรามานสเปกตรัมของตัวอย่าง D สูงที่สุด รองลงมา ได้แก่ A, B และ C ตามลำดับ ซึ่งลำดับความเข้มของรามานสเปกตรัมนี้ตรงกับ ความสูงของสเปกตรัม XPS ของธาตุ Ti และ O จากผลดังกล่าวจึงกล่าวได้ว่า เมื่อมีธาตุคาร์บอนในตัวอย่างสูงขึ้น ส่งผลทำให้โครงสร้างโมเลกุลของไททาเนียมไดออกไซด์มีจำนวนลดลง เนื่องจากอะตอมของคาร์บอนแทรกตัวอยู่ในโครงสร้างโมเลกุลไททาเนียมไดออกไซด์เป็นจำนวนมาก



ภาพ 81 ผลการวิเคราะห์ Raman Spectrometer ของทั้ง 4 ตัวอย่าง

2.6 ช่องว่างพลังงานของฟิล์มบางด้วยเทคนิค UV-VIS Spectroscopy

ในการวิเคราะห์หาช่องว่างพลังงานจะใช้ตัวอย่าง A เป็นตัวแทนของบรรจุภัณฑ์ที่เคลือบด้วยฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์ เนื่องจากตัวอย่าง A เป็นบรรจุภัณฑ์อาหารที่มีความแข็งแรงกว่าตัวอย่างอื่น ๆ และสะดวกในการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคนี้ โดยกำหนดช่วงความยาวคลื่นที่ใช้ คือ 300-600 nm ซึ่งครอบคลุมช่วงแสงอัลตราไวโอเล็ตเอ ที่มีความยาวคลื่น 315-400 nm

(Chawengkijwanich & Hayata, 2008) จากภาพ 82 จะเห็นได้ว่า ตัวอย่าง A มีค่าสัมประสิทธิ์การทะลุผ่านของแสง (Transmission) ในช่วง 365-600 nm มากกว่า 80% ทั้งนี้การคำนวณหาค่าช่องว่างพลังงานทำทั้งหมด 2 วิธี คือ การคำนวณ และการใช้กราฟแบบ Tauc's plot

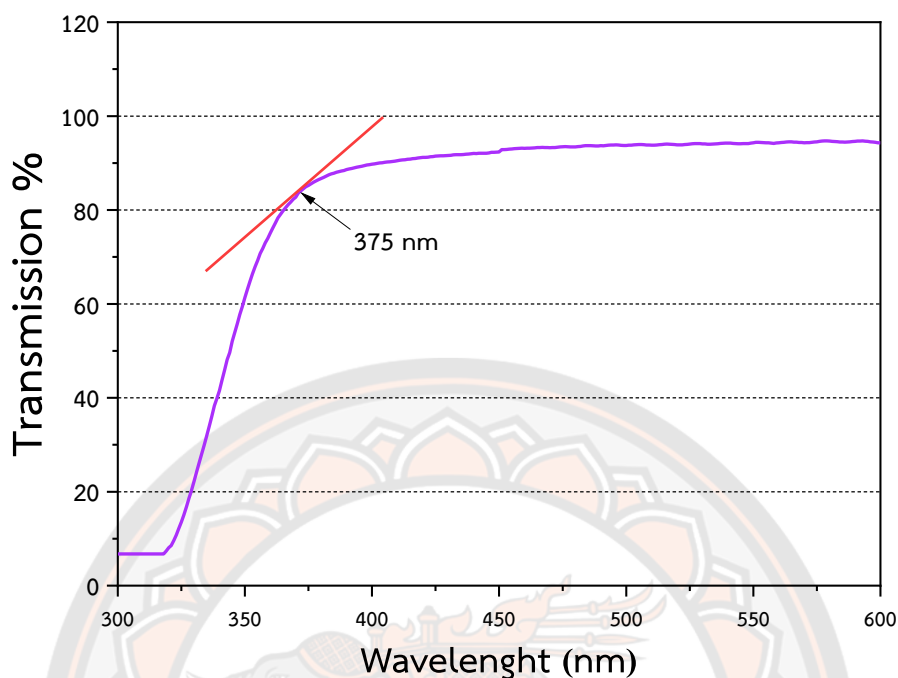
ในวิธีการคำนวณ ช่วงความยาวคลื่นที่ค่าสัมประสิทธิ์การทะลุผ่านของแสงเริ่มมีการเปลี่ยนแปลง เท่ากับ 375 nm จากนั้นนำค่าความยาวคลื่น 375 nm มาคำนวณหาค่าพลังงานที่ใช้ในการเปลี่ยนแปลงระดับพลังงาน หรือช่องว่างพลังงาน จากนั้นเปลี่ยนหน่วยให้เป็น eV ซึ่งจะได้ค่าช่องว่างพลังงานของฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์ที่เคลือบบนตัวอย่าง A เท่ากับ 3.34 eV

$$E = \frac{6.63 \times 10^{-34} \times 3 \times 10^8}{375 \times 10^{-9}}$$

$$E = 5.35 \times 10^{-19} \text{ J}$$

$$E = \frac{5.35 \times 10^{-19}}{1.6 \times 10^{-19}}$$

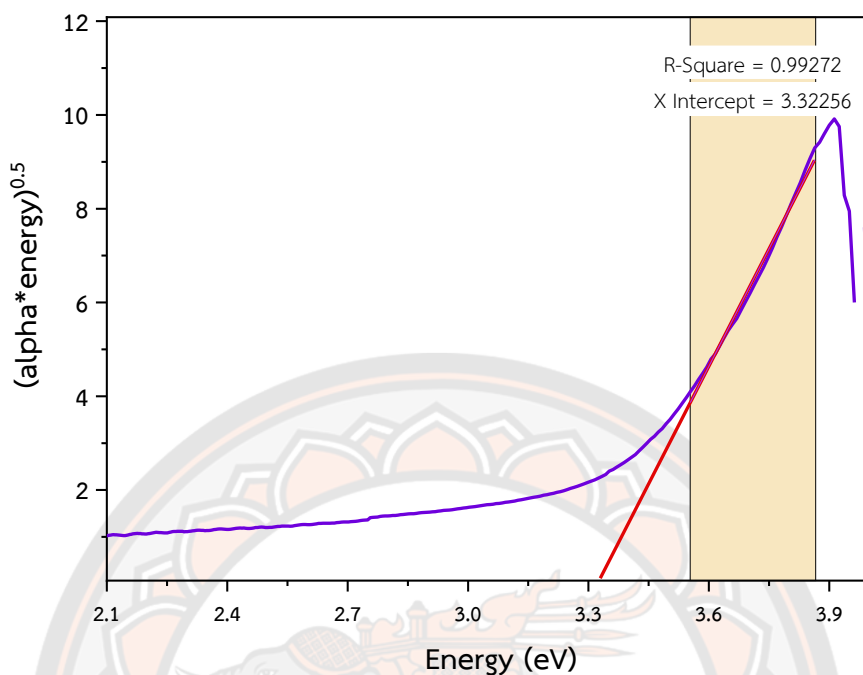
$$E = 3.34 \text{ eV}$$



ภาพ 82 Transmission (%) ที่ความยาวคลื่นต่าง ๆ ของตัวอย่าง A

สำหรับวิธีการหาค่าช่องว่างพลังงานจากกราฟแบบ Tauc's plot สามารถทำได้จากความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง ($\alpha \times \text{energy}$)^{0.5} เทียบกับค่าพลังงาน (eV) จากนั้นสร้างจุดตัดในแนวแกน x ซึ่งค่าช่องว่างพลังงานที่ได้ มีค่าเท่ากับ 3.32256 eV ดังแสดงในภาพ 83

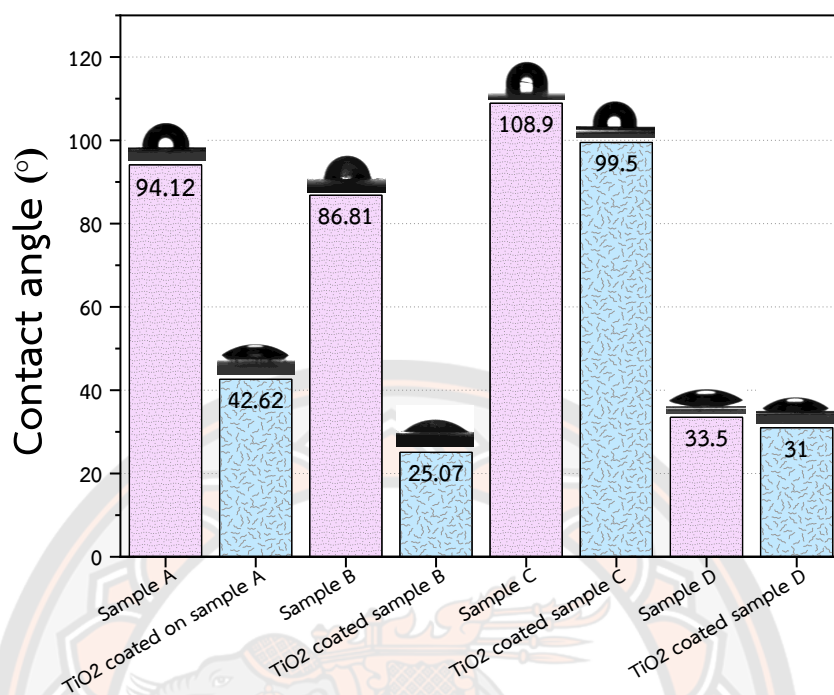
จากการหาค่าช่องว่างพลังงานของฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์ทั้ง 2 วิธี พบว่ามีค่าใกล้เคียงกัน คือ 3.32 และ 3.34 eV ซึ่งสอดคล้องตามงานวิจัยของ (Kafizas, Crick, & Parkin, 2010) รายงานว่า ช่องว่างพลังงานของไททาเนียมไดออกไซด์แบบอนาเทส จะมีช่องว่างพลังงานอยู่ที่ ประมาณ 3.2 eV และต้องการอนุภาคของแสงในช่วงแสงอัลตราไวโอเล็ตเอ เพื่อกระตุ้นให้อิเล็กตรอนจากชั้นวาเลนซ์ไปยังชั้นคอนดักชัน และเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสต่อไป โดยงานวิจัยนี้ได้ค่าช่องว่างพลังงานของฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์ใกล้เคียงกับงานวิจัยดังกล่าว จึงสามารถสรุปได้ว่า ฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์ที่เคลือบบนบรรจุภัณฑ์อาหารนี้ จำเป็นต้องใช้อนุภาคของแสงในช่วงแสงอัลตราไวโอเล็ตเอขึ้นไป เพื่อกระตุ้นให้เกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสในกระบวนการกำจัดและยับยั้งจุลินทรีย์อย่างมีประสิทธิภาพ



ภาพ 83 ค่าช่องว่างพลังงานจากกราฟแบบ Tauc's plot ของตัวอย่าง A

3.7 ผลการวิจัยมุมสัมผัสของน้ำต่อพื้นผิวของฟิล์มบางด้วยเทคนิค Contact Angle

จากภาพ 84 พบว่า ตัวอย่าง A, B, C และ D แบบดั้งเดิมที่ไม่ได้เคลือบด้วยฟิล์มบาง จะมีมุมสัมผัสของน้ำต่อผิว เท่ากับ 94.12° , 86.81° , 108.9° และ 33.5° จากนั้นเมื่อเคลือบด้วยฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์ มุมสัมผัสของน้ำต่อพื้นผิวลดลงเป็น 42.62° , 25.07° , 99.5° และ 31° ตามลำดับ ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่า ตัวอย่าง A, B, C และ D มีความชอบน้ำมากขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากการเพิ่มพื้นที่ผิวของฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์ขึ้น ดังแสดงในภาพ FESEM และจากการที่พื้นผิวของตัวอย่างดูดซับน้ำได้มากขึ้น มุมสัมผัสน้ำต่อผิวจึงมีค่าลดลง

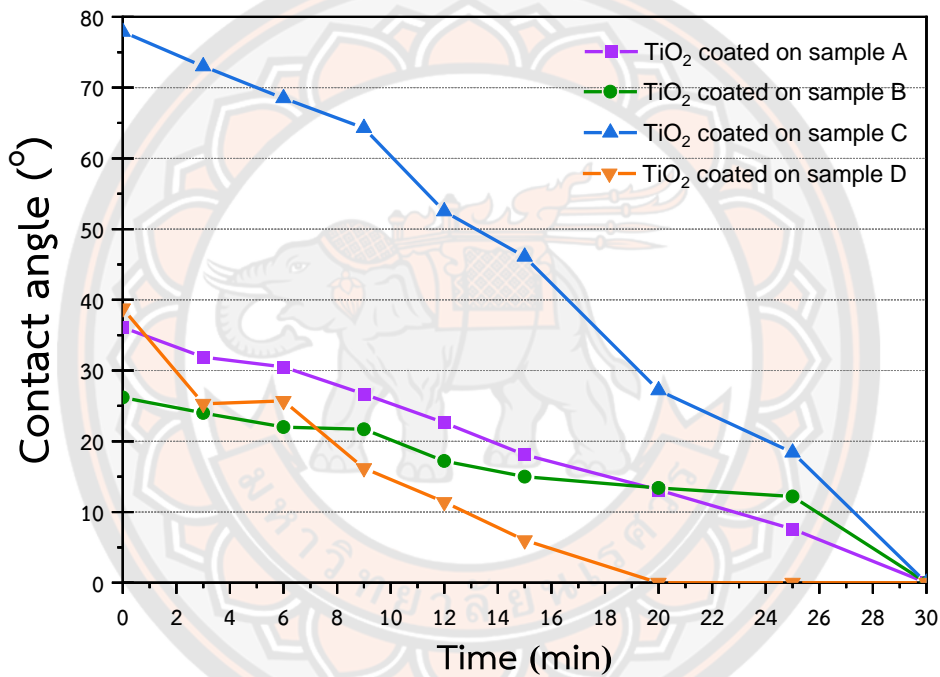


ภาพ 84 มุมสัมผัสผิวน้ำก่อนและหลังเคลือบด้วยไททาเนียมไดออกไซด์ของทั้ง 4 ตัวอย่าง

จากภาพ 85 จะเห็นได้ว่า ตัวอย่าง A, B, C และ D หลังฉายแสงเป็นเวลา 30 นาที มีค่ามุมสัมผัสของน้ำเท่ากับ 0 คือ หยดน้ำแนบไปกับพื้นผิวของฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์ โดยตัวอย่าง D จะมีแนวโน้มของมุมสัมผัสของน้ำลดลงเร็วที่สุด มีค่าเท่ากับ 0 ที่ระยะเวลาฉายแสง 20 นาที ตัวอย่าง A และ B จะมีแนวโน้มของมุมสัมผัสของน้ำลดลงใกล้เคียงกัน ถึงแม้ว่าตัวอย่าง C จะมีแนวโน้มการลดลงของมุมสัมผัสของน้ำช้าที่สุด แต่ก็ลดลงเท่ากับ 0 เช่นเดียวกัน ที่ระยะเวลาฉายแสง 30 นาที สอดคล้องกับงานวิจัยของ (Borras et al., 2007; M.-K. Lee & Park, 2019; Ozasa et al., 2008; Sangbin Park et al., 2021) รายงานว่า เมื่อระยะเวลาฉายแสงเพิ่มขึ้น มุมสัมผัสของน้ำจะเพิ่มมากขึ้น ซึ่งแสดงถึงความชอบน้ำมากขึ้นนั่นเอง

จากผลการวิเคราะห์ XPS ข้างต้น เมื่อเปรียบเทียบทั้ง 4 ตัวอย่าง พบว่า ตัวอย่าง D มีความเข้มของสเปกตรัม XPS ของธาตุ Ti และ O สูงที่สุด และมีความเข้มของรามานสเปกตรัมของพันธะ ไททาเนียมไดออกไซด์สูงที่สุดเช่นเดียวกัน จากงานวิจัยของ (M.-K. Lee & Park, 2019) รายงานว่า การลดลงของมุมสัมผัสของน้ำหลังฉายแสง เนื่องมาจากการเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสขึ้น โดยมีการแลกเปลี่ยนประจุในปฏิกิริยาออกซิเดชัน ระหว่าง Ti-OH ที่เป็นตัวให้ประจุ มีค่า pK_a เท่ากับ 2.9 กับ OH ของน้ำ (H_2O) ที่มีค่า pK_a เท่ากับ 12.7 ซึ่งเป็นตัวรับประจุ ทำให้เกิด

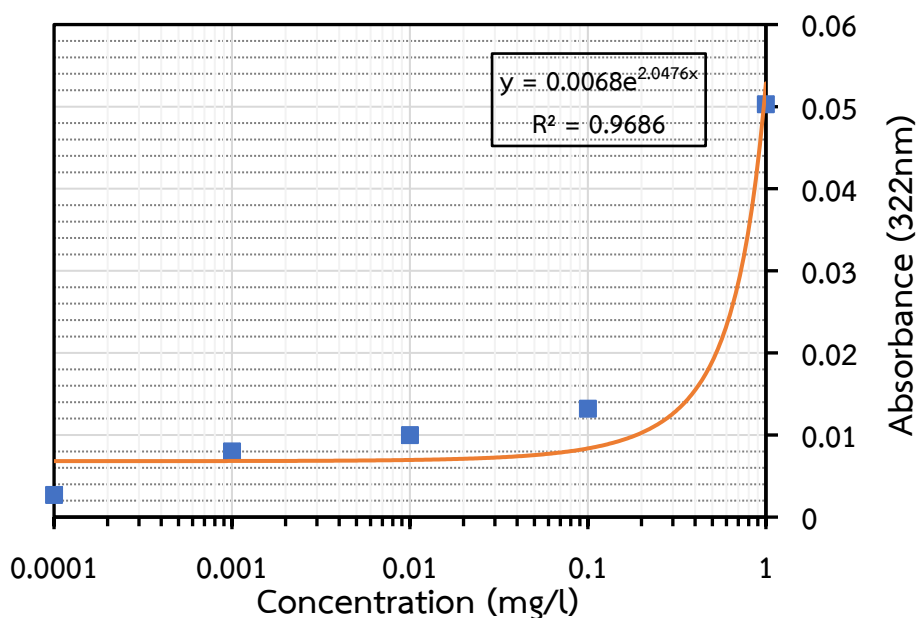
เป็นผลิตภัณฑ์ใหม่ คือ อนุมูลอิสระไฮดรอกซิล ($\cdot\text{OH}$) และอนุมูลนี้มีความสำคัญในกระบวนการกำจัดและยับยั้งจุลินทรีย์ ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่า ตัวอย่าง D มีการแลกเปลี่ยนประจุระหว่าง Ti-OH และ OH ของ H_2O เร็วกว่าตัวอย่าง A, B และ C เนื่องจากมีธาตุ Ti และ O มากกว่าตัวอย่างอื่น ๆ และมีโครงสร้างโมเลกุลของไททาเนียมไดออกไซด์สูงกว่าตัวอย่างอื่น ๆ มีการแทรกตัวของธาตุคาร์บอนน้อยกว่าตัวอย่างอื่น ๆ ขณะเดียวกัน ตัวอย่าง C มีธาตุคาร์บอนแทรกตัวอยู่ในโครงสร้างโมเลกุลของพันธะไททาเนียมไดออกไซด์มากที่สุด จึงเกิดการแลกเปลี่ยนประจุระหว่าง Ti-OH และ OH ของ H_2O ได้ช้ากว่า และทำให้มุมสัมผัสของน้ำลดลงได้ช้ากว่า



ภาพ 85 มุมสัมผัสของน้ำของทั้ง 4 ตัวอย่างที่ระยะเวลาการฉายแสงอัลตราไวโอเล็ตเอต่าง ๆ

4. การทดสอบความคงทนของฟิล์มบางที่เคลือบบนบรรจุภัณฑ์อาหาร

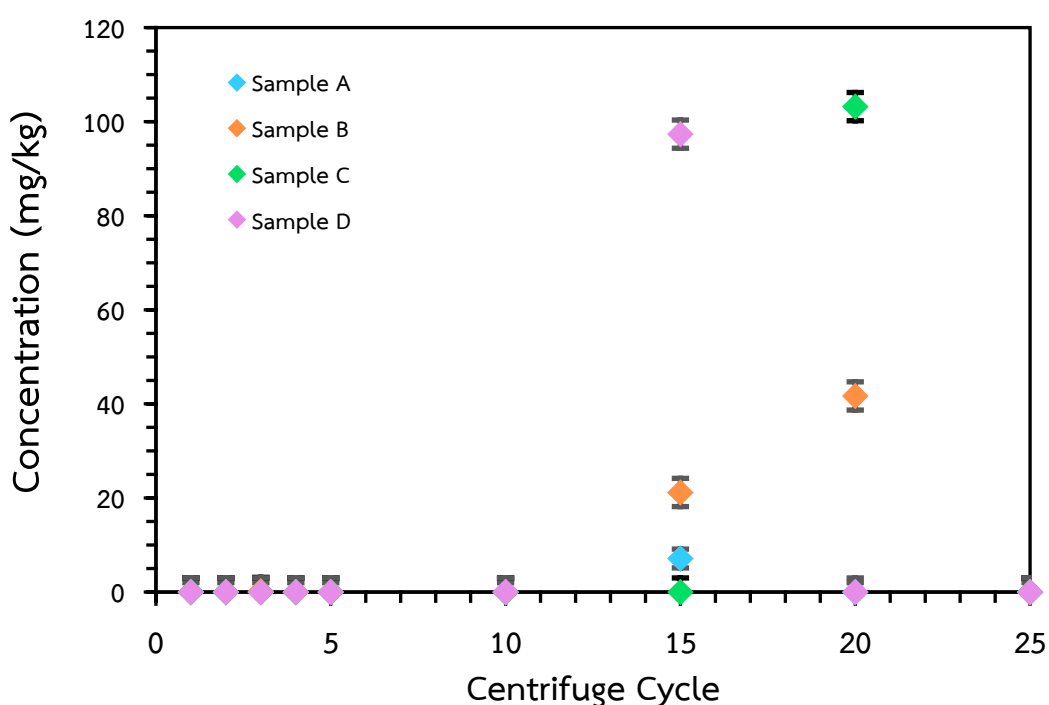
วิธีการทดสอบความคงทนของฟิล์มในงานวิจัยนี้อ้างอิงจาก (Zeng, Roberts, & Xia, 2010) โดยต้องสร้างกราฟมาตรฐานของปริมาณไททาเนียมไดออกไซด์ (P25) เทียบกับการดูดกลืนแสง ทั้งนี้ค่าการดูดกลืนแสงที่สูงสุดของไททาเนียมไดออกไซด์ (P25) ที่ได้ อยู่ที่ความยาวคลื่น 322 nm ดังนั้น จึงใช้ความเข้มของค่าการดูดกลืนแสงที่ 322 nm ในการสร้างกราฟมาตรฐาน โดยสมการแสดงความสัมพันธ์ที่ได้ คือ $y = 0.0068e^{2.0476x}$ และมีค่าความแปรผัน (R^2) เท่ากับ 0.9686 แสดงดังภาพ 86



ภาพ 86 กราฟมาตรฐานของไททาเนียมไดออกไซด์ (P25)

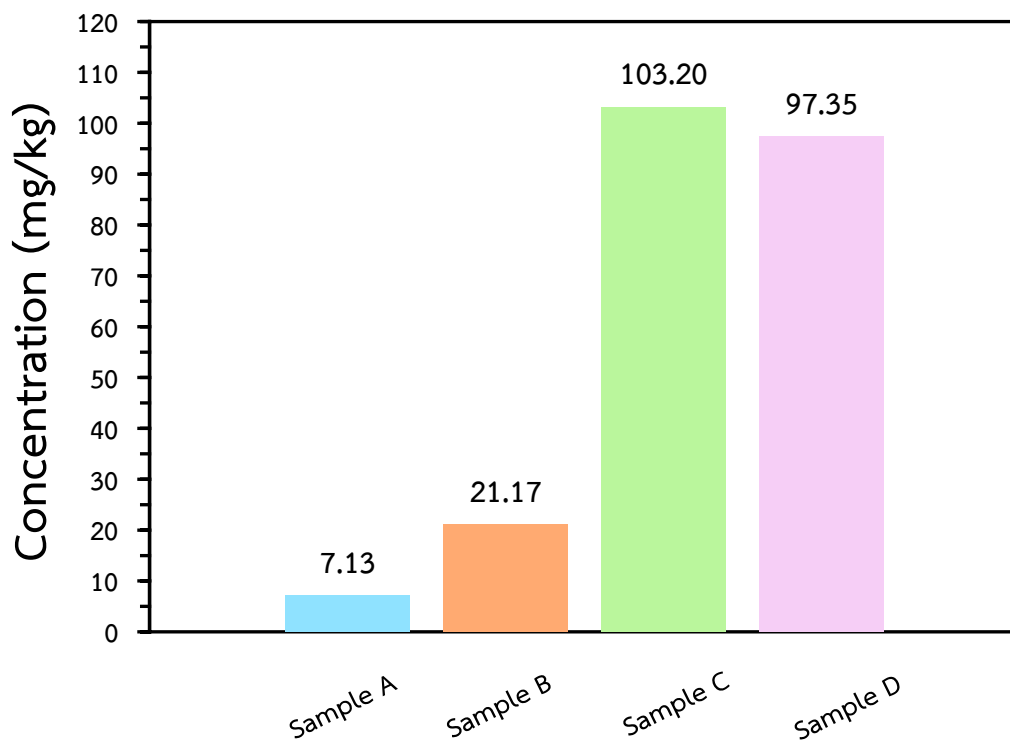
ความคงทนของฟิล์มบางจะวัดจากการหลุดของฟิล์มบางที่เคลือบบนบรรจุภัณฑ์ หลังจากการปั่นเหวี่ยงด้วยความเร็ว 10,000 rpm โดยแต่ละรอบของการปั่นเหวี่ยงใช้เวลา 20 นาที จากนั้นวิเคราะห์การหลุดของฟิล์มบางด้วยเครื่อง UV-VIS Spectroscopy ที่ความยาวคลื่น 322 nm และเทียบกับกราฟมาตรฐาน เพื่อให้ได้ปริมาณไททาเนียมไดออกไซด์ที่หลุดออก ซึ่งผลดังกล่าวแสดงดังภาพ 87 จะเห็นได้ว่าการปั่นเหวี่ยงรอบที่ 1-10 ไม่พบการหลุดออกของฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์เลย และในรอบที่ 15 พบการหลุดออกของฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์ของตัวอย่าง A,

B และ D ในปริมาณ 7.13, 21.17, และ 97.35 mg/kg ตามลำดับ และในรอบที่ 20 พบการหลุดออกของฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์ของตัวอย่าง B และ C ในปริมาณ 41.69 และ 103.20 mg/kg และเมื่อทำการทดสอบถึงรอบที่ 25 ไม่พบการหลุดออกของฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์อีก จึงสามารถสรุปได้ว่า ฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์ที่เคลือบบนบรรจุภัณฑ์อาหารทั้ง 4 ตัวอย่างจะหลุดออกได้ตามเวลา เมื่อผ่านการปั่นเหวี่ยงหรือการสัมผัสพื้นผิวของบรรจุภัณฑ์อาหาร



ภาพ 87 การหลุดของฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์ในแต่ละรอบของการทดลอง

เมื่อเปรียบเทียบปริมาณการหลุดออกของฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์ในตัวอย่าง A, B, C และ D ดังภาพ 88 พบว่า ตัวอย่าง C มีปริมาณการหลุดออกของฟิล์มบางไททาเนียมมากที่สุด และพบในการปั่นเหวี่ยงรอบที่ 20 รองลงมา คือ ตัวอย่าง C, B และ A ซึ่งมีปริมาณการหลุดออกของฟิล์มบางเท่ากับ 97.35, 21.17 และ 7.13 mg/kg ตามลำดับ ในรอบที่ 15 ทั้งนี้การหลุดออกของฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์ที่เคลือบบนบรรจุภัณฑ์อาหารชนิดต่าง ๆ จะขึ้นอยู่กับสารพอลิเมอร์ของไททาเนียมไดออกไซด์บนพอลิเมอร์แต่ละชนิด

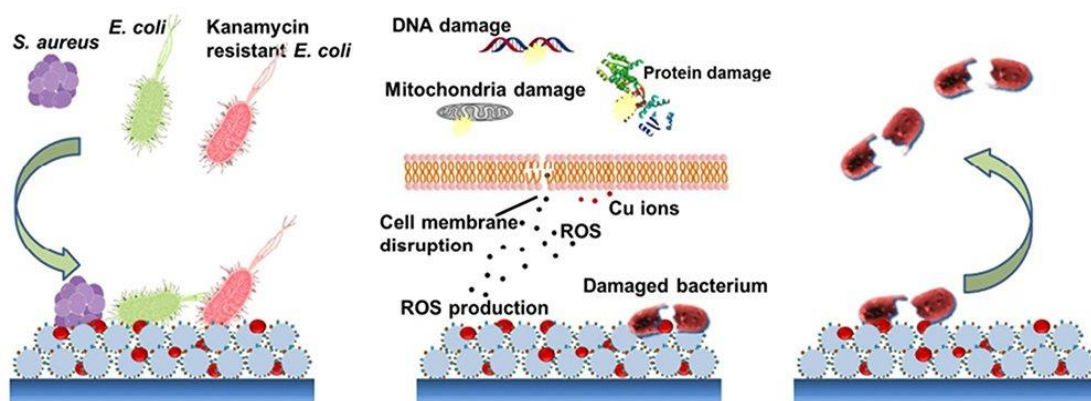


ภาพ 88 การเปรียบเทียบการหลุดออกของฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์

5. การยับยั้งจุลินทรีย์ของบรรจุภัณฑ์อาหารที่เคลือบด้วยฟิล์มบาง

การทดสอบการยับยั้งจุลินทรีย์ของบรรจุภัณฑ์อาหารที่เคลือบด้วยฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์ จะวัดจากการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ด้วย 2 วิธี คือ การวัดความขุ่น OD600 ด้วยเครื่อง UV-vis spectrophotometer และวิธี Standard plate count technique โดยในระหว่างการทดสอบจะฉายแสงอัลตราไวโอเล็ตเอ เพื่อให้อนุภาคแสงในช่วงแสงอัลตราไวโอเล็ตเอ กระตุ้นอิเล็กตรอนของไททาเนียมไดออกไซด์ให้เกิดกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส และได้อนุมูลอิสระ (Reactive Oxygen Species; ROS) ซึ่ง 2 ตัวที่สำคัญ คือ ซูเปอร์ออกไซด์ ($\cdot\text{O}_2$) และไฮดรอกซิลเรดิคัล ($\cdot\text{OH}$) จากงานวิจัยของ (Pant, Park, & Park, 2019; Yadav, Kim, & Pawar, 2016) รายงานว่า ROS มีความสามารถในการทำลายองค์ประกอบของผนังเซลล์โดยตรง ทำลายรูปร่างของเซลล์ หรือแม้กระทั่งมีความสามารถในการข้ามผ่านผนังเซลล์เข้าไปทำปฏิกิริยาออกซิเดชันทำลายส่วนประกอบอื่น ๆ ของเซลล์ เช่น ไขมัน, DNA หรือโปรตีน ซึ่งสุดท้ายแล้วจะทำให้ระบบ

การทำงานของเซลล์จุลินทรีย์เสียหาย และเซลล์ตายในที่สุด จึงสามารถกล่าวได้ว่า ไททาเนียมไดออกไซด์มีคุณสมบัติในการกำจัดและยับยั้งจุลินทรีย์ได้โดยตรง

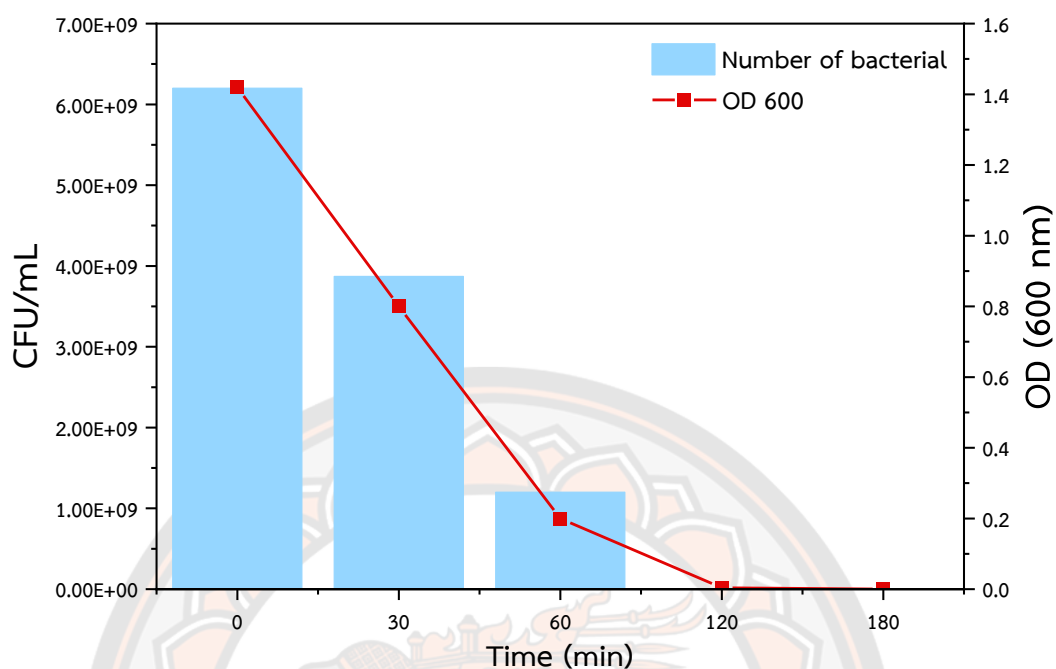


ภาพ 89 กลไกการยับยั้งจุลินทรีย์ของ Reactive Oxygen Species (ROS)

ที่มา: (Munir, Ahmed, Usman, & Salman, 2020)

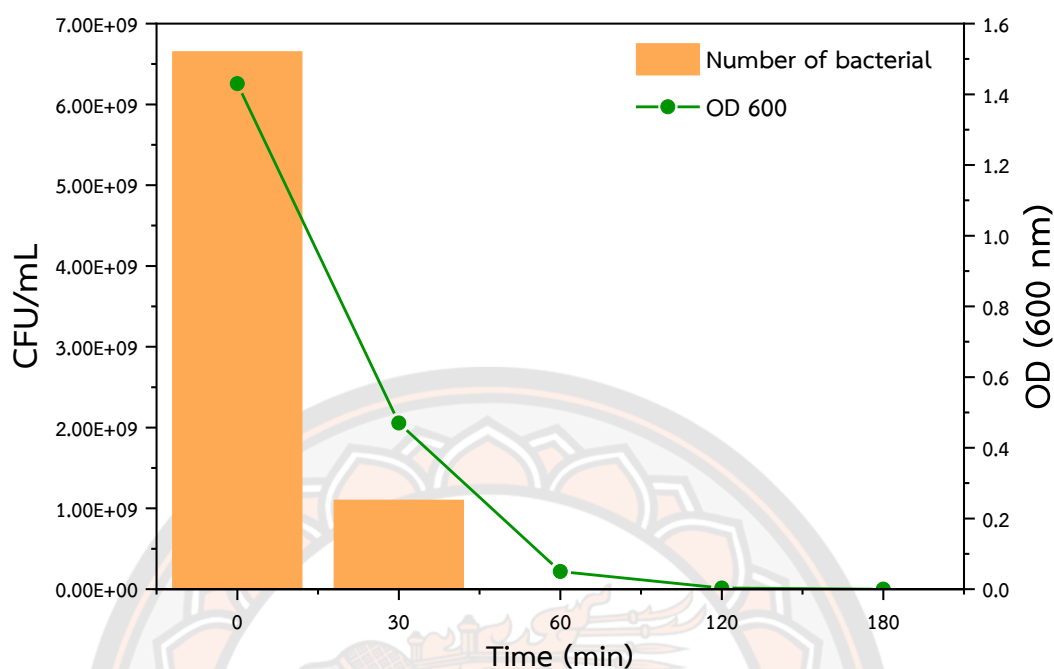
5.1 จุลินทรีย์ *E. coli*

จากภาพ 90 พบว่า ตัวอย่าง A มีจำนวนจุลินทรีย์ และค่าความขุ่น OD600 ลดลงอย่างเห็นได้ชัด โดยจำนวนจุลินทรีย์ลดลงจากค่าเริ่มต้น 6.2×10^9 CFU/mL เหลือเพียง 3.8×10^9 CFU/mL และ 1.2×10^9 CFU/mL หลังฉายแสงอัลตราไวโอเลตเอ เป็นเวลา 30 และ 60 นาที ตามลำดับ และเมื่อฉายแสงอัลตราไวโอเลตเอ เป็นระยะเวลา 120 นาที ไม่พบจุลินทรีย์ *E. coli* เลย สำหรับค่าความขุ่น OD600 พบว่า ค่าความขุ่นของจุลินทรีย์ *E. coli* เริ่มต้นอยู่ที่ 1.420 และลดลงเหลือ 0.812, 0.214, 0.004 และ 0 เมื่อฉายแสงอัลตราไวโอเลตเอ เป็นระยะเวลา 30, 60, 120 และ 180 นาที ตามลำดับ จึงสามารถสรุปได้ว่าตัวอย่าง A มีประสิทธิภาพในการยับยั้งจุลินทรีย์ *E. coli* ถึง 99% ภายใต้การฉายแสงอัลตราไวโอเลตเอเป็นระยะเวลา 120 นาที



ภาพ 90 ประสิทธิภาพการยับยั้งจุลินทรีย์ *E. coli* ของตัวอย่าง A

จากภาพ 91 พบว่า ตัวอย่าง B มีจำนวนจุลินทรีย์ และค่าความขุ่น OD600 ลดลงอย่างเห็นได้ชัด โดยจำนวนจุลินทรีย์ลดลงจากค่าเริ่มต้น 6.65×10^9 CFU/mL เหลือเพียง 1.1×10^9 CFU/mL หลังฉายแสงอัลตราไวโอเลตเอ เป็นเวลา 30 นาที และเมื่อฉายแสงอัลตราไวโอเลตเอ เป็นระยะเวลา 60 นาที ไม่พบจุลินทรีย์ *E. coli* เลย สำหรับค่าความขุ่น OD600 พบว่า ค่าความขุ่นของจุลินทรีย์ *E. coli* เริ่มต้นอยู่ที่ 1.430 และลดลงเหลือ 0.470, 0.051, 0.003 และ 0 เมื่อฉายแสงอัลตราไวโอเลตเอ เป็นระยะเวลา 30, 60, 120 และ 180 นาที ตามลำดับ จึงสามารถสรุปได้ว่า ตัวอย่าง B มีประสิทธิภาพในการยับยั้งจุลินทรีย์ *E. coli* ถึง 99% ภายใต้การฉายแสงอัลตราไวโอเลตเอ เป็นระยะเวลา 120 นาที

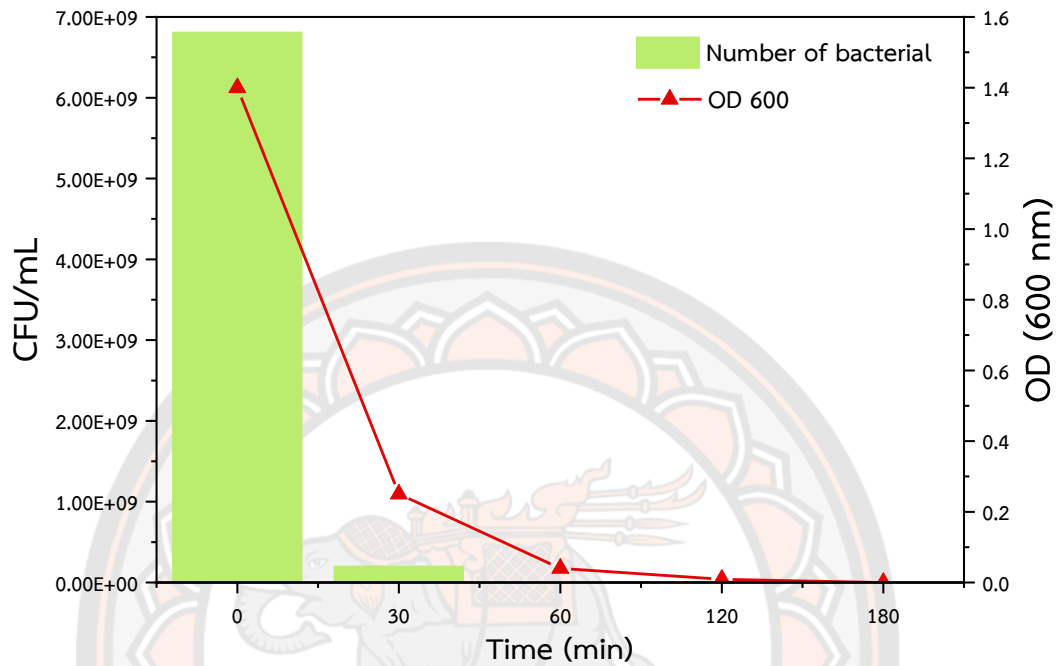


ภาพ 91 ประสิทธิภาพการยับยั้งจุลินทรีย์ *E. coli* ของตัวอย่าง B

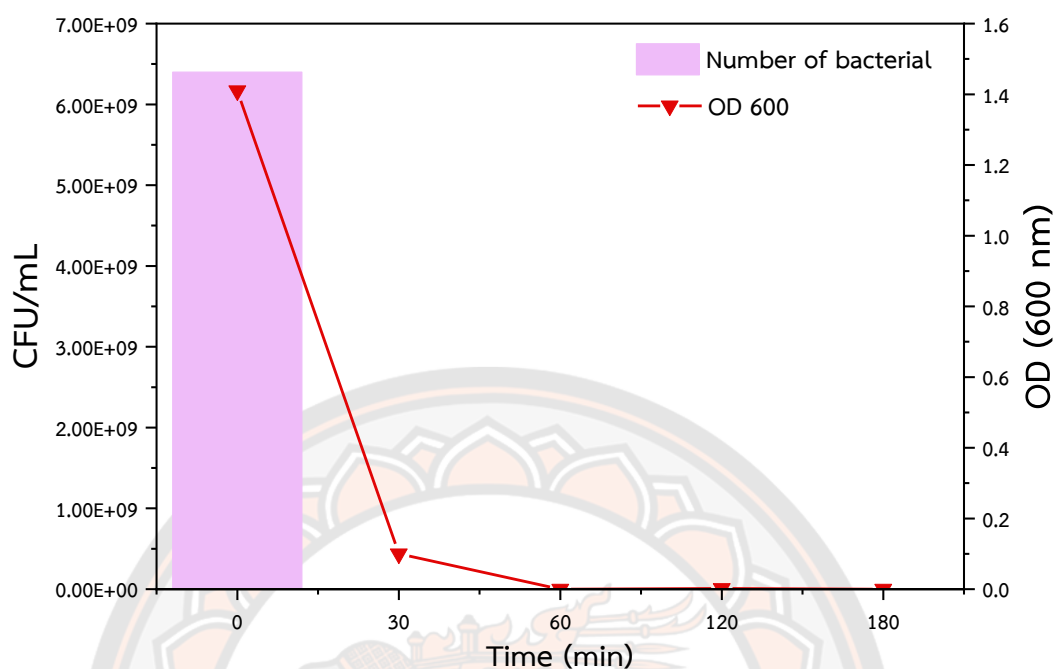
จากภาพ 92 พบว่า ตัวอย่าง C มีจำนวนจุลินทรีย์ และค่าความขุ่น OD600 ลดลงอย่างเห็นได้ชัด โดยจำนวนจุลินทรีย์ลดลงจากค่าเริ่มต้น 6.81×10^9 CFU/mL เหลือเพียง 2×10^8 CFU/mL หลังฉายแสงอัลตราไวโอเล็ตเอ เป็นเวลา 30 นาที และเมื่อฉายแสงอัลตราไวโอเล็ตเอ เป็นระยะเวลา 60 นาที ไม่พบจุลินทรีย์ *E. coli* เลย สำหรับค่าความขุ่น OD600 พบว่า ค่าความขุ่นของจุลินทรีย์ *E. coli* เริ่มต้นอยู่ที่ 1.410 และลดลงเหลือ 0.250, 0.040, 0.009 และ 0 เมื่อฉายแสงอัลตราไวโอเล็ตเอ เป็นระยะเวลา 30, 60, 120 และ 180 นาที ตามลำดับ จึงสามารถสรุปได้ว่า ตัวอย่าง C มีประสิทธิภาพในการยับยั้งจุลินทรีย์ *E. coli* ถึง 99% ภายใต้การฉายแสงอัลตราไวโอเล็ตเอเป็นระยะเวลา 120 นาที

จากภาพ 93 พบว่า ตัวอย่าง D มีจำนวนจุลินทรีย์เริ่มต้น 6.4×10^9 CFU/mL และเมื่อฉายแสงอัลตราไวโอเล็ตเอ เป็นระยะเวลา 30 นาที ไม่พบจุลินทรีย์ *E. coli* เลย สำหรับค่าความขุ่น OD600 พบว่า ค่าความขุ่นของจุลินทรีย์ *E. coli* เริ่มต้นอยู่ที่ 1.410 และลดลงเหลือ 0.121, 0.002, 0.004 และ 0.001 เมื่อฉายแสงอัลตราไวโอเล็ตเอ เป็นระยะเวลา 30, 60, 120 และ 180 นาที

ตามลำดับ จึงสามารถสรุปได้ว่าตัวอย่าง D มีประสิทธิภาพในการยับยั้งจุลินทรีย์ *E. coli* ถึง 99% ภายใต้การฉายแสงอัลตราไวโอเล็ตเอ เป็นระยะเวลา 60 นาที

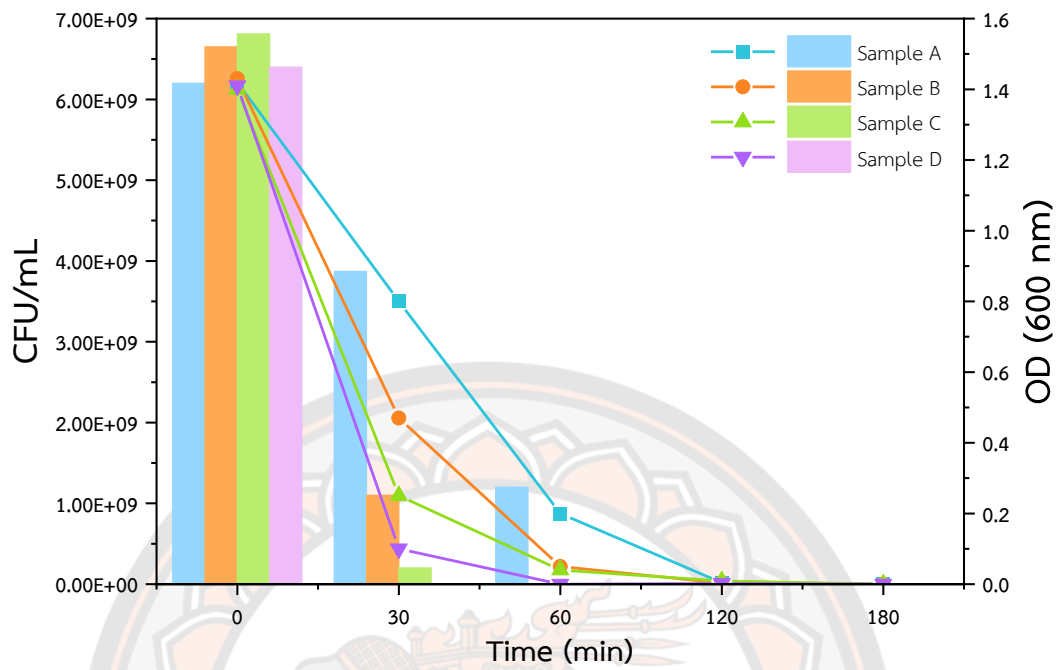


ภาพ 92 ประสิทธิภาพการยับยั้งจุลินทรีย์ *E. coli* ของตัวอย่าง C



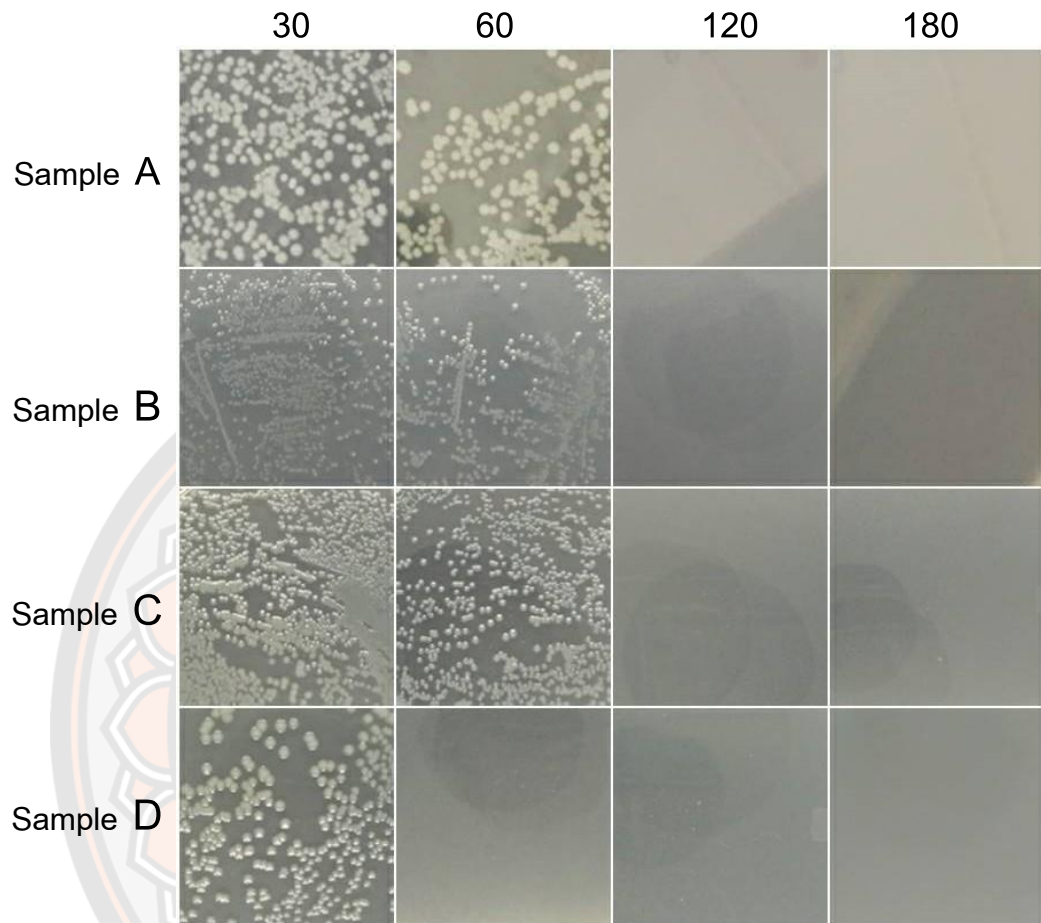
ภาพ 93 ประสิทธิภาพการยับยั้งจุลินทรีย์ *E. coli* ของตัวอย่าง D

เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการยับยั้งจุลินทรีย์ *E. coli* ของทั้ง 4 ตัวอย่าง ดังภาพ 94 พบว่า ทั้ง 4 ตัวอย่างมีประสิทธิภาพในการยับยั้งจุลินทรีย์ได้ถึง 99% หลังฉายแสงเป็นเวลา 30-120 นาที โดยที่ตัวอย่าง D มีประสิทธิภาพการยับยั้งจุลินทรีย์ *E. coli* ได้เร็วที่สุด ทั้งนี้ สอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค GIXRD เนื่องจากตัวอย่าง A, B, C และ D ที่เคลือบด้วยฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์มีโครงสร้างผลึกแบบอนาเทส ทั้งยังมีช่องว่างพลังงานอยู่ที่ 3.32 eV เมื่อได้รับอนุภาคของแสงอัลตราไวโอเลตเอ ซึ่งเป็นช่วงค่าที่เหมาะสมสำหรับฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์ที่เคลือบบนบรรจุภัณฑ์อาหาร จึงเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสขึ้น นอกจากนี้ ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XPS และ Raman ยังแสดงอีกว่า ฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์ที่เคลือบบนตัวอย่าง D มีธาตุ Ti และ O มากที่สุด และยังมีพันธะของไททาเนียมไดออกไซด์มากที่สุด จึงส่งผลให้ตัวอย่าง D สามารถยับยั้งจุลินทรีย์ *E. coli* ได้อย่างรวดเร็ว



ภาพ 94 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการยับยั้งจุลินทรีย์ *E. coli* ของทั้ง 4 ตัวอย่าง

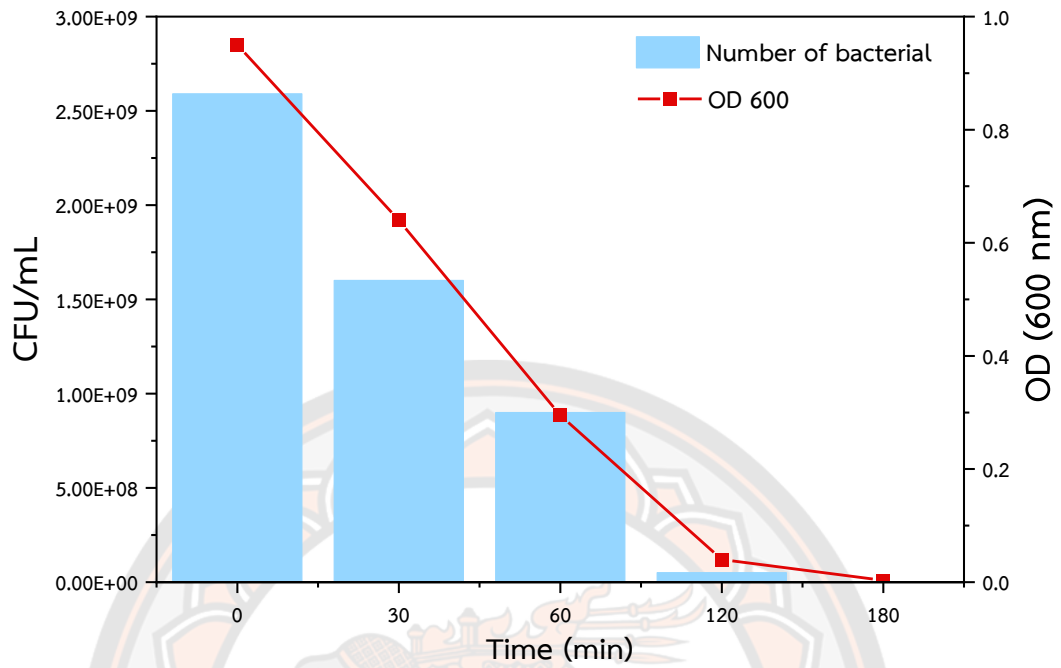
ระยะเวลาการฉายแสง UVA (นาที)

ภาพ 95 จำนวนจุลินทรีย์ *E.coli* ในวิธี Standard plate count technique

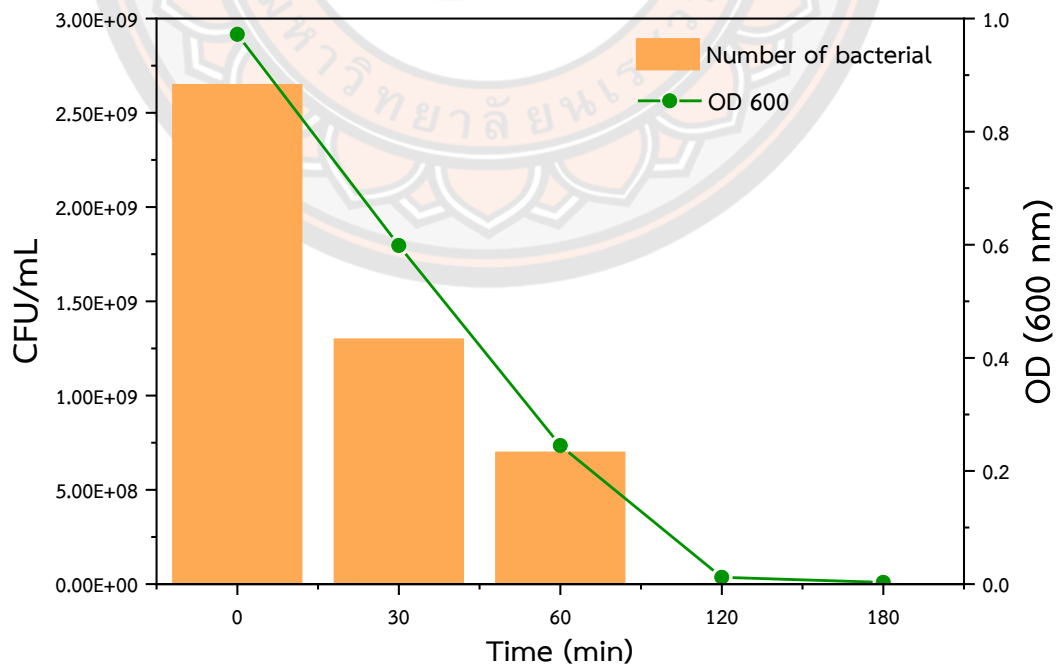
5.2 จุลินทรีย์ *S. typhimurium*

จากภาพ 96 จะเห็นได้ว่า ตัวอย่าง A มีจำนวนจุลินทรีย์ และค่าความขุ่น OD600 ลดลงอย่างเห็นได้ชัด โดยจำนวนจุลินทรีย์ลดลงจากค่าเริ่มต้น 2.59×10^9 CFU/mL เหลือเพียง 1.6×10^9 , 9×10^8 และ 5×10^7 CFU/mL หลังฉายแสงอัลตราไวโอเลตเอ เป็นเวลา 30, 60 และ 120 นาที ตามลำดับ และเมื่อฉายแสงอัลตราไวโอเลตเอ เป็นระยะเวลา 180 นาที ไม่พบจุลินทรีย์ *S. typhimurium* เลย สำหรับค่าความขุ่น OD600 พบว่า ค่าความขุ่นของจุลินทรีย์ *S. typhimurium* เริ่มต้นอยู่ที่ 0.950 และลดลงเหลือ 0.641, 0.295, 0.040 และ 0.003 เมื่อฉายแสงอัลตราไวโอเลตเอ เป็นระยะเวลา 30, 60, 120 และ 180 นาที ตามลำดับ จึงสามารถสรุปได้ว่า ตัวอย่าง A มีประสิทธิภาพในการยับยั้งจุลินทรีย์ *S. typhimurium* ถึง 99% ภายใต้การฉายแสงอัลตราไวโอเลตเอ เป็นระยะเวลา 180 นาที

จากภาพ 97 จะเห็นได้ว่า ตัวอย่าง B มีจำนวนจุลินทรีย์ และค่าความขุ่น OD600 ลดลงอย่างเห็นได้ชัด โดยจำนวนจุลินทรีย์ลดลงจากค่าเริ่มต้น 2.65×10^9 CFU/mL เหลือเพียง 1.3×10^9 และ 7×10^8 CFU/mL หลังฉายแสงอัลตราไวโอเลตเอ เป็นเวลา 30 และ 60 นาที ตามลำดับ และเมื่อฉายแสงอัลตราไวโอเลตเอ เป็นระยะเวลา 120 นาที ไม่พบจุลินทรีย์ *S. typhimurium* เลย สำหรับค่าความขุ่น OD600 พบว่า ค่าความขุ่นของจุลินทรีย์ *S. typhimurium* เริ่มต้นอยู่ที่ 0.972 และลดลงเหลือ 0.598, 0.245, 0.012, และ 0.003 เมื่อฉายแสงอัลตราไวโอเลตเอ เป็นระยะเวลา 30, 60, 120 และ 180 นาที ตามลำดับ จึงสามารถสรุปได้ว่า ตัวอย่าง B มีประสิทธิภาพในการยับยั้งจุลินทรีย์ *S. typhimurium* ถึง 99% ภายใต้การฉายแสงอัลตราไวโอเลตเอ เป็นระยะเวลา 180 นาที

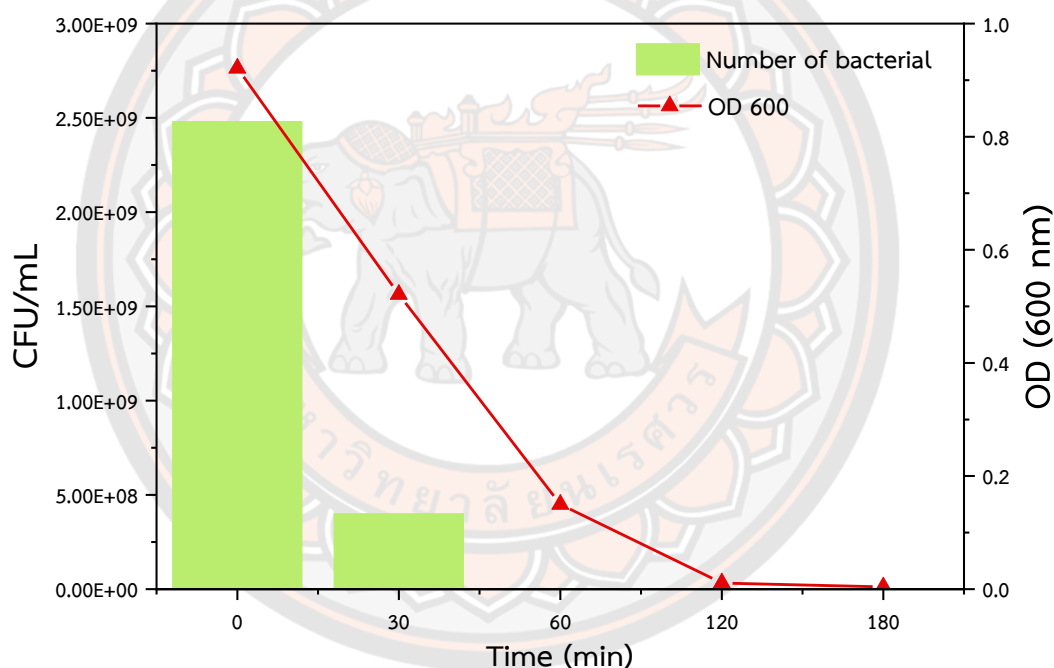


ภาพ 96 ประสิทธิภาพการยับยั้งจุลินทรีย์ *S. typhimurium* ของตัวอย่าง A



ภาพ 97 ประสิทธิภาพการยับยั้งจุลินทรีย์ *S. typhimurium* ของตัวอย่าง B

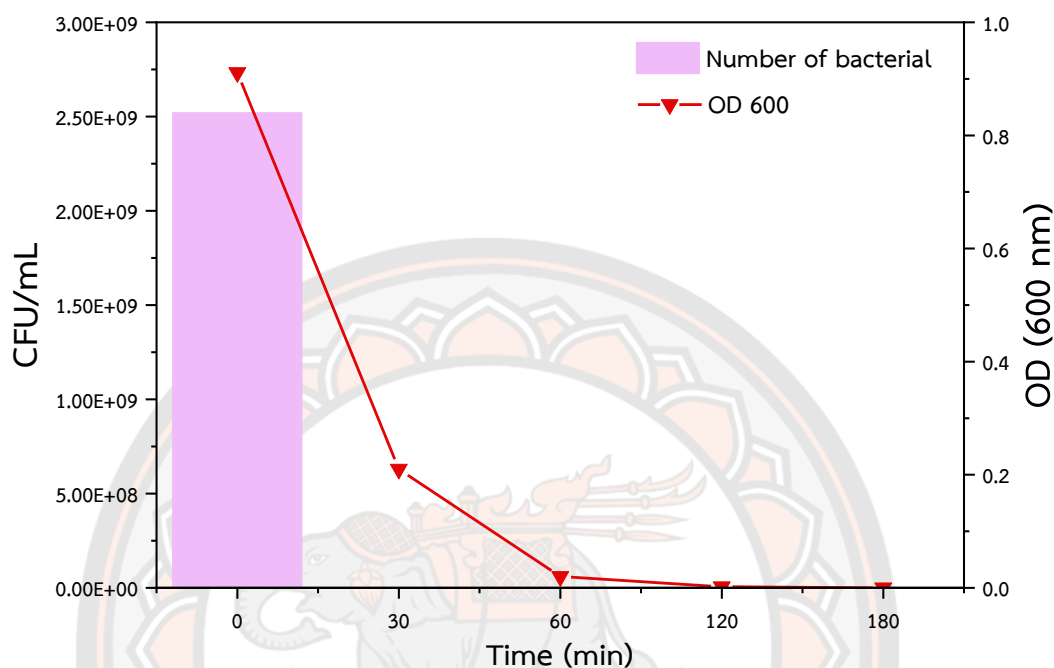
จากภาพ 98 จะเห็นได้ว่า ตัวอย่าง C มีจำนวนจุลินทรีย์ และค่าความขุ่น OD600 ลดลงอย่างเห็นได้ชัด โดยจำนวนจุลินทรีย์ลดลงจากค่าเริ่มต้น 2.48×10^9 CFU/mL เหลือเพียง 4×10^8 CFU/mL หลังฉายแสงอัลตราไวโอเลตเอ เป็นเวลา 30 นาที และเมื่อฉายแสงอัลตราไวโอเลตเอ เป็นระยะเวลา 60 นาที ไม่พบจุลินทรีย์ *S. typhimurium* เลย สำหรับค่าความขุ่น OD 600 พบว่า ค่าความขุ่นของจุลินทรีย์ *S. typhimurium* เริ่มต้นอยู่ที่ 0.921 และลดลงเหลือ 0.521, 0.150, 0.011 และ 0.004 เมื่อฉายแสงอัลตราไวโอเลตเอ เป็นระยะเวลา 30, 60, 120 และ 180 นาที ตามลำดับ จึงสามารถสรุปได้ว่า ตัวอย่าง C มีประสิทธิภาพในการยับยั้งจุลินทรีย์ *S. typhimurium* ถึง 99% ภายใต้การฉายแสงอัลตราไวโอเลตเอ เป็นระยะเวลา 180 นาที



ภาพ 98 ประสิทธิภาพการยับยั้งจุลินทรีย์ *S. typhimurium* ของตัวอย่าง C

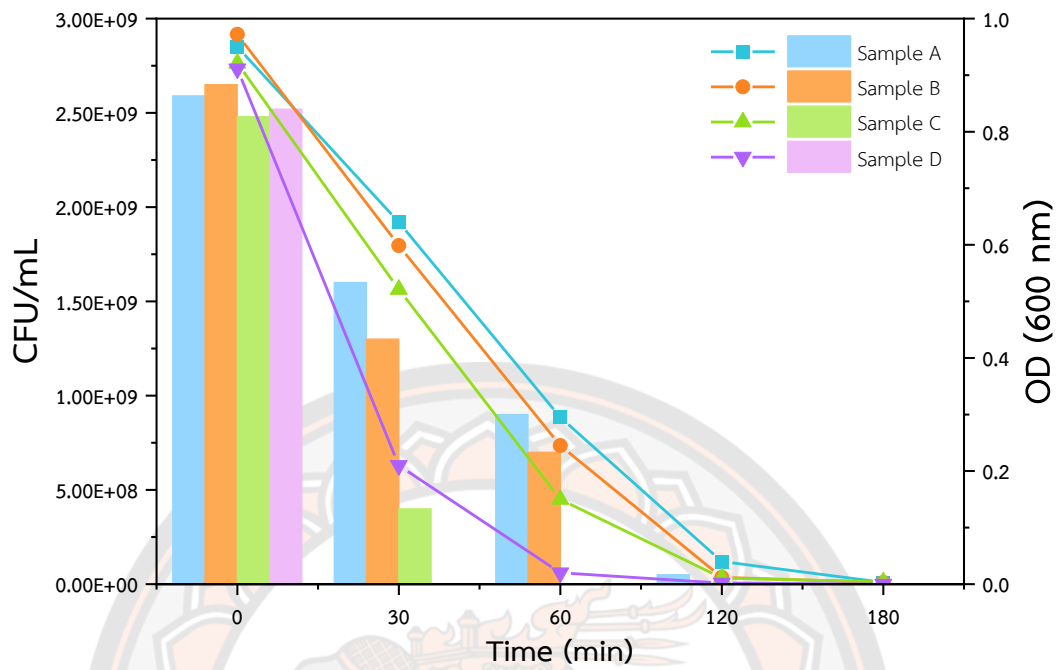
จากภาพ 99 พบว่า ตัวอย่าง D มีจำนวนจุลินทรีย์เริ่มต้น 2.52×10^9 CFU/mL และเมื่อฉายแสงอัลตราไวโอเลตเอ เป็นระยะเวลา 30 นาที ไม่พบจุลินทรีย์ *S. typhimurium* เลย สำหรับค่าความขุ่น OD600 พบว่า ค่าความขุ่นของจุลินทรีย์ *S. typhimurium* เริ่มต้นอยู่ที่ 0.911 และลดลงเหลือ 0.210, 0.002, 0.002 และ 0 เมื่อฉายแสงอัลตราไวโอเลตเอ เป็นระยะเวลา 30, 60,

120 และ 180 นาที ตามลำดับ จึงสามารถสรุปได้ว่า ตัวอย่าง D มีประสิทธิภาพในการยับยั้งจุลินทรีย์ *S. typhimurium* ถึง 99% ภายใต้การฉายแสงอัลตราไวโอเล็ตเอ เป็นระยะเวลา 120 นาที



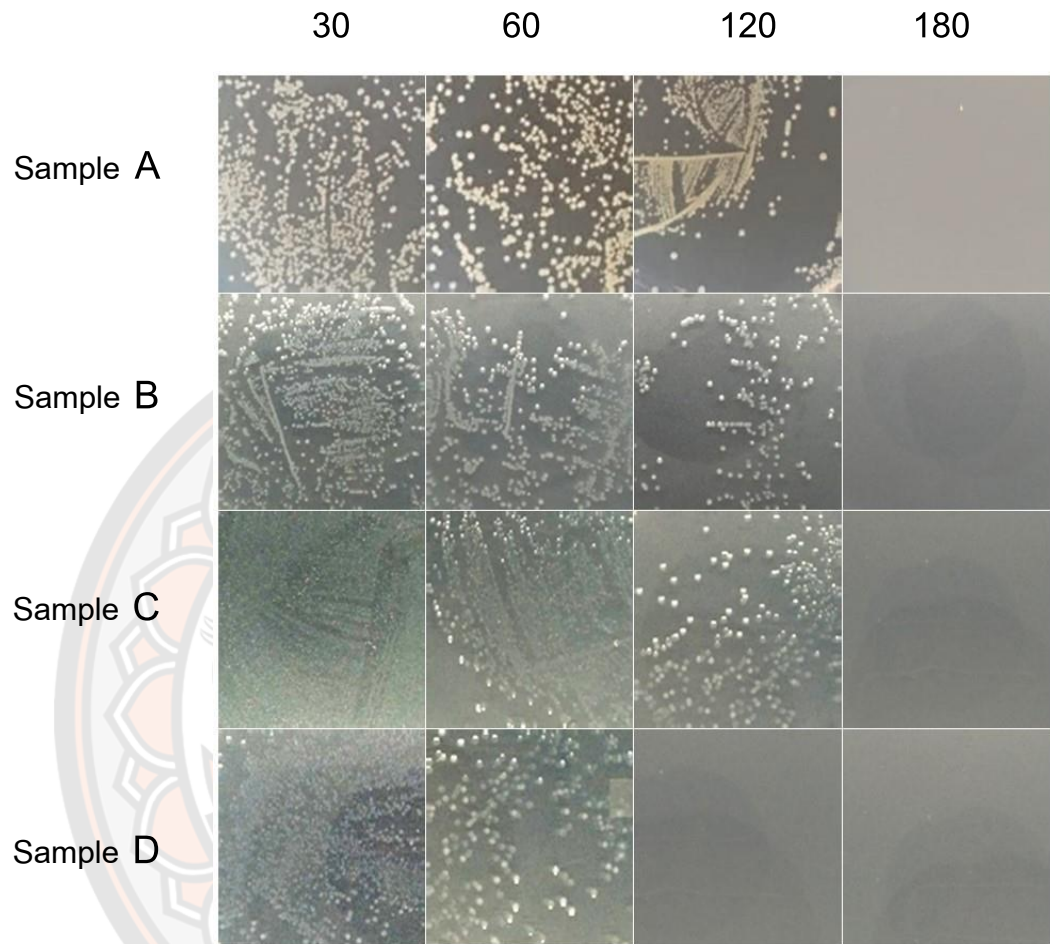
ภาพ 99 ประสิทธิภาพการยับยั้งจุลินทรีย์ *S. typhimurium* ของตัวอย่าง D

เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการยับยั้งจุลินทรีย์ *S. typhimurium* ของทั้ง 4 ตัวอย่าง ดังภาพ 100 พบว่า ทั้ง 4 ตัวอย่างมีประสิทธิภาพในการยับยั้งจุลินทรีย์ได้ถึง 99% หลังฉายแสงอัลตราไวโอเล็ตเอเป็นเวลา 30-120 นาที โดยตัวอย่าง D มีประสิทธิภาพการยับยั้งจุลินทรีย์ *S. typhimurium* ได้เร็วที่สุด ซึ่งผลการทดลองสอดคล้องกับการยับยั้งจุลินทรีย์ *E. coli* ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่า บรรจุภัณฑ์อาหารทั้ง 4 ชนิด ที่เคลือบด้วยฟิล์มบางของไททาเนียมไดออกไซด์สามารถยับยั้งจุลินทรีย์ *E. coli* และ *S. typhimurium* ได้เป็นอย่างดี ทั้งนี้ปริมาณของธาตุ Ti ของพันธะไททาเนียมไดออกไซด์ที่ก่อตัวร่วมกับบรรจุภัณฑ์อาหาร ซึ่งมีสารพอลิเมอร์ตั้งต้นที่แตกต่างกันเป็นปัจจัยสำคัญต่อปริมาณการเกิดกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส ซึ่งส่งผลโดยตรงต่อความว่องไวในการยับยั้งจุลินทรีย์



ภาพ 100 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการยับยั้งจุลินทรีย์ *S. typhimurium* ของทั้ง 4 ตัวอย่าง

ระยะเวลาการฉายแสง UVA (นาที)

ภาพ 101 จำนวนจุลินทรีย์ *S. typhimurium* ในวิธี Standard plate count technique

บทที่ 5

บทสรุป

1. สรุปผลการวิจัย

1. การสังเคราะห์ไททาเนียมไดออกไซด์ด้วยวิธีโซล-เจล โดยใช้อัตราส่วนของไททาเนียม-ไอโซโพรพอกไซด์ และกรดอะซิติก 1:1.67 w/w% เป็นวิธีที่เหมาะสม เพื่อให้ได้เจลที่สามารถเคลือบบนบรรจุภัณฑ์อาหารได้ดี फिल्मบางที่ได้มีความเรียบเนียน คงทน และมีความสามารถในการยับยั้งจุลินทรีย์ *E. coli* และ *S. typhimurium* ได้ 99%

2. การเคลือบฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์บนบรรจุภัณฑ์อาหารด้วยวิธีการปาดร่วมกับเทคนิคยูวีเคียวได้ผลเป็นอย่างดี โดยฟิล์มบางที่ได้ใส ไม่มีสี มีความเรียบเนียน และให้ผิวสัมผัสคงเดิม นอกจากนี้บรรจุภัณฑ์อาหารที่ทำจากวัสดุพอลิเมอร์ต่าง ๆ ได้แก่ PVC, PS, PVDC, และ PET ยังคงสภาพรูปร่างเดิม ไม่หลอมละลายจากอุณหภูมิที่สูงเกินไป

3. จากการวิเคราะห์สมบัติทางฟิสิกส์และเคมีของฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์ที่เคลือบบนบรรจุภัณฑ์อาหารด้วยด้วยเครื่องมือวิเคราะห์ขั้นสูงต่าง ๆ ได้ผลสรุปที่สำคัญ ดังนี้

3.1 เทคนิค FESEM ที่กำลังขยาย 100,000 เท่า เห็นความแตกต่างระหว่างบรรจุภัณฑ์อาหารแบบดั้งเดิม และแบบที่เคลือบด้วยฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์อย่างชัดเจน และเห็นผลึกของฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์บนพื้นผิวของบรรจุภัณฑ์อาหารทั้ง 4 ชนิด

3.2 เทคนิค AFM ฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์เกิดขึ้นอย่างสม่ำเสมอทั่วทั้งพื้นผิว ส่งผลให้พื้นผิวของบรรจุภัณฑ์อาหารที่เคลือบด้วยฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์มีความเรียบเนียน โดยเฉพาะในวัสดุพอลิเมอร์ PVC และ PET

3.3 เทคนิค GIXRD ฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์ที่เคลือบบนบรรจุภัณฑ์อาหารทั้ง 4 ชนิด อยู่ในผลึกแบบอนาเทส

3.4 เทคนิค XPS และ Raman Spectrometer พบองค์ประกอบของ Ti^{4+} , O^{2-} และ C บนฟิล์มบาง โดยระหว่างการเคลือบฟิล์มบางบนบรรจุภัณฑ์อาหาร ธาตุคาร์บอนที่เป็นองค์ประกอบของพอลิเมอร์หลุดออกจากโครงสร้างของบรรจุภัณฑ์อาหาร และทำให้โครงสร้างของ

ฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์ต่อกันแบบ Ti-O-C ทั้งนี้วัสดุพอลิเมอร์ PET พบธาตุ Ti และ O มากที่สุด และมีพันธะของไททาเนียมไดออกไซด์มากที่สุด

3.5 เทคนิค UV-VIS Spectroscopy ช่องว่างพลังงานของฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์ มีค่าเท่ากับ 3.32 eV ซึ่งเหมาะสำหรับการใช้แสงอัลตราไวโอเลตเอ เพื่อให้กระตุ้นให้เกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสในการยับยั้งการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์

3.6 เทคนิค Contact angle หลังเคลือบฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์ บรรจุภัณฑ์อาหารมีความชอบน้ำเพิ่มขึ้น และความชอบน้ำจะเพิ่มมากขึ้นตามระยะเวลาการกระตุ้นด้วยแสง อัลตราไวโอเลตเอ ซึ่งแสดงถึงประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนประจุของกระบวนการโฟโตคะตะไลซิสที่เกิดขึ้นบนฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์

4. ฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์ที่เคลือบลงบนบรรจุภัณฑ์อาหารมีความคงทนอย่างมาก โดยพบการหลุดออกของฟิล์มบางในการปั่นเหวี่ยงที่ความเร็ว 10,000 รอบ/นาที ในรอบที่ 15 ของการทดลอง โดยปริมาณการหลุดออกของไททาเนียมไดออกไซด์เป็น 7.13, 21.17 และ 97.35 mg/kg ในวัสดุพอลิเมอร์ PVC, PS, และ PET ตามลำดับ

5. บรรจุภัณฑ์อาหารที่เคลือบด้วยฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์สามารถยับยั้งจุลินทรีย์ *E. coli* และ *S. typhimurium* ได้ 99% ภายใต้การฉายแสงอัลตราไวโอเลตเอ ในระยะเวลา 30-180 นาที ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุพอลิเมอร์ โดยวัสดุพอลิเมอร์ที่สามารถยับยั้งจุลินทรีย์ได้เร็วที่สุด คือ PET

2. ข้อเสนอแนะ

1. การเคลือบฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์บนบรรจุภัณฑ์อาหารจำนวนมาก ควรพิจารณาการใช้เครื่องมือที่มีมาตรฐาน เพื่อให้ความหนาของฟิล์มบางสม่ำเสมอ
2. การทดสอบความคงทนของฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์ที่เคลือบบนบรรจุภัณฑ์อาหารควรทดสอบในสภาวะที่เป็นกรดและด่างเพิ่มเติม เพื่อสอดคล้องกับการใช้งานจริง
3. การทดสอบการยับยั้งจุลินทรีย์ควรทดสอบกับจุลินทรีย์อื่น ๆ เพิ่มเติม เช่น จุลินทรีย์แกรมบวก (Gram-Positive bacteria) รวมถึงจุลินทรีย์ที่มักพบในอาหาร
4. ควรทดสอบบรรจุภัณฑ์อาหารนี้กับอาหารจริง เพื่อสังเกตการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ในอาหาร การยืดอายุของอาหาร รวมถึงการปนเปื้อนของไททาเนียมไดออกไซด์ในอาหารด้วย



บรรณานุกรม

- Abd Elkodous, M., Hassaan, A., Ghoneim, A., & Abdeen, Z. (2018). C-dots dispersed macro-mesoporous TiO₂ photocatalyst for effective waste water treatment. *Characterization and Application of Nanomaterials*, 1(2).
- Agarwal, D., Bhatt, P., Pathan, A., Patel, H., & Joshi, U. (2012). *Development of portable experimental set-up for AFM to work at cryogenic temperature*. Paper presented at the AIP Conference Proceedings.
- AL-Jawad, S. M., Taha, A. A., & Salim, M. M. (2017). Synthesis and characterization of pure and Fe doped TiO₂ thin films for antimicrobial activity. *Optik*, 142, 42-53.
- Al-Taweel, S. S., & Saud, H. R. (2016). New route for synthesis of pure anatase TiO₂ nanoparticles via ultrasound-assisted sol-gel method. *J. Chem. Pharm. Res*, 8(2), 620-626.
- Alzamani, M., Shokuhfar, A., Eghdam, E., & Mastali, S. (2013). Influence of catalyst on structural and morphological properties of TiO₂ nanostructured films prepared by sol-gel on glass. *Progress in Natural Science: Materials International*, 23(1), 77-84.
- Anastasio, R., Maassen, E., Cardinaels, R., Peters, G., & van Breemen, L. (2018). Thin film mechanical characterization of UV-curing acrylate systems. *Polymer*, 150, 84-94.
- Andersson, M., Österlund, L., Ljungstroem, S., & Palmqvist, A. (2002). Preparation of nanosize anatase and rutile TiO₂ by hydrothermal treatment of microemulsions and their activity for photocatalytic wet oxidation of phenol. *The Journal of Physical Chemistry B*, 106(41), 10674-10679.
- Bansal, J., Tabassum, R., Swami, S. K., Bishnoi, S., Vashishtha, P., Gupta, G., . . . Hafiz, A. (2020). Performance analysis of anomalous photocatalytic activity of Cr-doped TiO₂ nanoparticles [Cr (x) TiO₂ (1-x)]. *Applied Physics A*, 126(5), 1-10.
- Baptista, A., Silva, F., Porteiro, J., Míguez, J., & Pinto, G. (2018). Sputtering physical vapour deposition (PVD) coatings: A critical review on process improvement and market trend demands. *Coatings*, 8(11), 402.

- Benedix, R., Dehn, F., Quaas, J., & Orgass, M. (2000). Application of titanium dioxide photocatalysis to create self-cleaning building materials. *Lacer*, 5, 157-168.
- Biocat. (2020). OD600 DiluPhotometer. Retrieved from <https://www1.biocat.com/products/OD600-IMP>
- Black, J. G., & Black, L. J. (2017). *Microbiology: Principles and Explorations* (Vol. 2017).
- Borras, A., Lopez, C., Rico, V., Gracia, F., Gonzalez-Elipe, A., Richter, E., . . . Sauthier, G. (2007). Effect of visible and UV illumination on the water contact angle of TiO₂ thin films with incorporated nitrogen. *The Journal of Physical Chemistry C*, 111(4), 1801-1808.
- Carp, O., Huisman, C. L., & Reller, A. (2004). Photoinduced reactivity of titanium dioxide. *Progress in solid state chemistry*, 32(1-2), 33-177.
- Cedillo-González, E. I., Hernández-López, J. M., Ruiz-Valdés, J. J., Barbieri, V., & Siligardi, C. (2020). Self-cleaning TiO₂ coatings for building materials: The influence of morphology and humidity in the stain removal performance. *Construction and Building Materials*, 237, 117692.
- Chae, S. Y., Park, M. K., Lee, S. K., Kim, T. Y., Kim, S. K., & Lee, W. I. (2003). Preparation of size-controlled TiO₂ nanoparticles and derivation of optically transparent photocatalytic films. *Chemistry of Materials*, 15(17), 3326-3331.
- Chapter, O. (2017). Contact Angle Measurement Techniques for Nanomaterials. *Thermal and Rheological Measurement Techniques for Nanomaterials Characterization*, 3, 173.
- Chawengkijwanich, C., & Hayata, Y. (2008). Development of TiO₂ powder-coated food packaging film and its ability to inactivate Escherichia coli in vitro and in actual tests. *International journal of food microbiology*, 123(3), 288-292.
- Chung, C. J., Lin, H. I., Tsou, H. K., Shi, Z. Y., & He, J. L. (2008). An antimicrobial TiO₂ coating for reducing hospital-acquired infection. *Journal of Biomedical Materials Research Part B: Applied Biomaterials: An Official Journal of The Society for Biomaterials, The Japanese Society for Biomaterials, and The Australian Society for Biomaterials and the Korean Society for Biomaterials*, 85(1), 220-224.

- Comparelli, R., Fanizza, E., Curri, M., Cozzoli, P., Mascolo, G., Passino, R., & Agostiano, A. (2005). Photocatalytic degradation of azo dyes by organic-capped anatase TiO₂ nanocrystals immobilized onto substrates. *Applied Catalysis B: Environmental*, 55(2), 81-91.
- CORPORATION, A. (2020). Cures Quickly to Reduce Environmental Burdens Photo(Light) curing Resins (ADEKA ARKLS KR series). Retrieved from <https://www.adeka.co.jp/en/chemical/pickup/pickup06.html>
- Dharma, J., Pisal, A., & Shelton, C. (2009). Simple method of measuring the band gap energy value of TiO₂ in the powder form using a UV/Vis/NIR spectrometer. *Application Note Shelton, CT: PerkinElmer*, 1-4.
- El-Deen, S., Hashem, A., Abdel Ghany, A., Indris, S., Ehrenberg, H., Mauger, A., & Julien, C. (2018). Anatase TiO₂ nanoparticles for lithium-ion batteries. *Ionics*, 24(10), 2925-2934.
- Erdem, B., Hunsicker, R. A., Simmons, G. W., Sudol, E. D., Dimonie, V. L., & El-Aasser, M. S. (2001). XPS and FTIR surface characterization of TiO₂ particles used in polymer encapsulation. *Langmuir*, 17(9), 2664-2669.
- Foster, H. A., Ditta, I. B., Varghese, S., & Steele, A. (2011). Photocatalytic disinfection using titanium dioxide: spectrum and mechanism of antimicrobial activity. *Applied microbiology and biotechnology*, 90(6), 1847-1868.
- GmbH, W.-V. (2000). X-Ray Photoelectron Spectroscopy (XPS). Retrieved from <https://www.chemistryviews.org/details/ezone/10463356/X-Ray-Photoelectron-Spectroscopy-XPS/>
- Gogniat, G., Thyssen, M., Denis, M., Pulgarin, C., & Dukan, S. (2006). The bactericidal effect of TiO₂ photocatalysis involves adsorption onto catalyst and the loss of membrane integrity. *FEMS microbiology letters*, 258(1), 18-24.
- Gotro, J. (2016). UV Curing Part Four: Every body Gets Acrylated. Retrieved from <https://polymerinnovationblog.com/uv-curing-part-four-every-body-gets-acrylated/>

- György, E., Sauthier, G., Figueras, A., Giannoudakos, A., Kompitsas, M., & Mihailescu, I. (2006). Growth of Au–TiO₂ nanocomposite thin films by a dual-laser, dual-target system. *Journal of applied physics*, 100(11), 114302.
- Huo, J., Hu, Y., Jiang, H., & Li, C. (2014). In situ surface hydrogenation synthesis of Ti³⁺-self-doped TiO₂ with enhanced visible light photoactivity. *Nanoscale*, 6(15), 9078-9084.
- Islam, M., Mamun, M., Al, A., Hasan, M., & Shahariar, H. (2021). Scalable coating process of AgNPs-silicone on cotton fabric for developing hydrophobic and antimicrobial properties. *Journal of Coatings Technology and Research*, 18(3), 887-898.
- Jia, K., Wang, Y., Pan, Q., Zhong, B., Luo, Y., Cui, G., . . . Sun, X. (2019). Enabling the electrocatalytic fixation of N₂ to NH₃ by C-doped TiO₂ nanoparticles under ambient conditions. *Nanoscale Advances*, 1(3), 961-964.
- Kafizas, A., Crick, C., & Parkin, I. P. (2010). The combinatorial atmospheric pressure chemical vapour deposition (cAPCVD) of a gradating substitutional/interstitial N-doped anatase TiO₂ thin-film; UVA and visible light photocatalytic activities. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, 216(2-3), 156-166.
- Keerthana, K. (2016). Comparative study on durability properties of bacterial concrete. *International Research Journal of Engineering and Technology*, 3(12), 29-132.
- Khan, M. M., Ansari, S. A., Pradhan, D., Ansari, M. O., Lee, J., & Cho, M. H. (2014). Band gap engineered TiO₂ nanoparticles for visible light induced photoelectrochemical and photocatalytic studies. *Journal of Materials Chemistry A*, 2(3), 637-644.
- Kim, M. O., Park, J. K., Han, T. H., Seo, J., & Park, S. (2021). Influence of Polyethylene Terephthalate Powder on Hydration of Portland Cement. *Polymers*, 13(15), 2551.
- Koohestania, H., Alinezhad, M., & Sadrnezhaad, S. K. (2015). Characterization of TiO₂-ZrO₂ nanocomposite prepared by co-precipitation method. *Advances in Nanocomposite Research.*, <http://docs.sadrnezhaad.com/papers/564.pdf>, accessed, 15.

- Kwon, C. H., Shin, H., Kim, J. H., Choi, W. S., & Yoon, K. H. (2004). Degradation of methylene blue via photocatalysis of titanium dioxide. *Materials Chemistry and Physics*, 86(1), 78-82.
- Lee, M.-K., & Park, Y.-C. (2019). Contact angle relaxation and long-lasting hydrophilicity of sputtered anatase TiO₂ thin films by novel quantitative XPS analysis. *Langmuir*, 35(6), 2066-2077.
- Lee, T., Sanzogni, A. V., Burn, P. L., & Mark, A. E. (2020). Evolution and Morphology of Thin Films Formed by Solvent Evaporation: An Organic Semiconductor Case Study. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 12(36), 40548-40557.
- Levchuk, I., Homola, T., Moreno-Andrés, J., Rueda-Márquez, J. J., Dzik, P., Morínigo, M. Á., . . . Vahala, R. (2019). Solar photocatalytic disinfection using ink-jet printed composite TiO₂/SiO₂ thin films on flexible substrate: Applicability to drinking and marine water. *Solar Energy*, 191, 518-529.
- Lingle, R. (2018). PHA bioplastics a 'tunable' solution for convenience food packaging. Retrieved from <https://www.plasticstoday.com/packaging/pha-bioplastics-tunable-solution-convenience-food-packaging>
- Liu, X., Xu, J., Lou, Y., Pan, C., Zhang, Y., & Wang, Z. (2022). Aptamer-Based Fluorescence Detection and Selective Disinfection of Salmonella Typhimurium by Using Hollow Carbon Nitride Nanosphere. *Biosensors*, 12(4), 228.
- Long, M., Wang, J., Zhuang, H., Zhang, Y., Wu, H., & Zhang, J. (2014). Performance and mechanism of standard nano-TiO₂ (P-25) in photocatalytic disinfection of foodborne microorganisms–Salmonella typhimurium and Listeria monocytogenes. *Food Control*, 39, 68-74.
- Ludwig, V., Ludwig, Z. M. D. C., Rodrigues, M. M., Anjos, V., Costa, C. B., das Dores, D. R. S. A., . . . Soares, F. (2018). Analysis by Raman and infrared spectroscopy combined with theoretical studies on the identification of plasticizer in PVC films. *Vibrational Spectroscopy*, 98, 134-138.
- Majowicz, S. E., Musto, J., Scallan, E., Angulo, F., Kirk, M., O'brien, S., . . . Hoekstra, R. (2010). International Collaboration on Enteric Disease “Burden of Illness” Studies.

2010. *The global burden of nontyphoidal Salmonella gastroenteritis. Clin Infect Dis*, 50(6), 882-889.
- Masciangioli, T., & Zhang, W.-X. (2003). Peer reviewed: environmental technologies at the nanoscale. In: ACS Publications.
- Matsunaga, T., Tomoda, R., Nakajima, T., Nakamura, N., & Komine, T. (1988). Continuous-sterilization system that uses photoconductor powders. *Applied and environmental microbiology*, 54(6), 1330-1333.
- Mazilu, M., De Luca, A. C., Riches, A., Herrington, C. S., & Dholakia, K. (2010). Optimal algorithm for fluorescence suppression of modulated Raman spectroscopy. *Optics express*, 18(11), 11382-11395.
- Menezes, D. B., Reyer, A., Marletta, A., & Musso, M. (2017). Glass transition of polystyrene (PS) studied by Raman spectroscopic investigation of its phenyl functional groups. *Materials Research Express*, 4(1), 015303.
- Mohammed, I. K. (2017). *The effect of gamma irradiation on chemical, morphology and optical properties of polystyrene nanosphere at various exposure time.*
- Moustafa, H., Morsy, M., Ateia, M. A., & Abdel-Haleem, F. M. (2021). Ultrafast response humidity sensors based on polyvinyl chloride/graphene oxide nanocomposites for intelligent food packaging. *Sensors and Actuators A: Physical*, 331, 112918.
- Munir, M. U., Ahmed, A., Usman, M., & Salman, S. (2020). Recent advances in nanotechnology-aided materials in combating microbial resistance and functioning as antibiotics substitutes. *International Journal of Nanomedicine*, 15, 7329.
- Noman, M. T., Petru, M., Amor, N., Yang, T., & Mansoor, T. (2020). Thermophysiological comfort of sonochemically synthesized nano TiO₂ coated woven fabrics. *Scientific reports*, 10(1), 1-12.
- Ozasa, K., Nemoto, S., Li, Y., Hara, M., Maeda, M., & Mochitate, K. (2008). Contact angle and biocompatibility of sol-gel prepared TiO₂ thin films for their use as semiconductor-based cell-viability sensors. *Surface and Interface Analysis: An International Journal devoted to the development and application of techniques for the analysis of surfaces, interfaces and thin films*, 40(3-4), 579-583.

- Pant, B., Park, M., & Park, S.-J. (2019). Recent advances in TiO₂ films prepared by sol-gel methods for photocatalytic degradation of organic pollutants and antibacterial activities. *Coatings*, 9(10), 613.
- Park, S., Kim, H. R., Bang, H., Fujimori, K., Kim, B. S., Kim, S. H., & Kim, I. S. (2012). Fabrication and deodorizing efficiency of nanostructured core-sheath TiO₂ nanofibers. *Journal of applied polymer science*, 125(4), 2929-2935.
- Park, S., Yoon, Y., Lee, S., Park, T., Kim, K., & Hong, J. (2021). Thermoinduced and Photoinduced Sustainable Hydrophilic Surface of Sputtered-TiO₂ Thin Film. *Coatings*, 11(11), 1360.
- Peng, X., Wang, Z., Huang, P., Chen, X., Fu, X., & Dai, W. (2016). Comparative study of two different TiO₂ film sensors on response to H₂ under UV light and room temperature. *Sensors*, 16(8), 1249.
- Pertanian, B. K. P. D. (2008). Pedoman Diagnosis Optik Golongan Bakteri. *Badan Karantina Pertanian Jakarta*.
- Pessoa, R., Pereira, F., Testoni, G., Chiappim, W., Maciel, H., & Santos, L. (2015). Effect of substrate type on structure of TiO₂ thin film deposited by atomic layer deposition technique. *Journal of Integrated Circuits and Systems*, 10(1), 38-42.
- Pichat, P., Disdier, J., Hoang-Van, C., Mas, D., Goutailler, G., & Gaysse, C. (2000). Purification/deodorization of indoor air and gaseous effluents by TiO₂ photocatalysis. *Catalysis today*, 63(2-4), 363-369.
- Pierre, A. C., & Pajonk, G. M. (2002). Chemistry of aerogels and their applications. *Chemical Reviews*, 102(11), 4243-4266.
- Prokhorov, K., Aleksandrova, D., Sagitova, E., Nikolaeva, G. Y., Vlasova, T., Pashinin, P., . . . Shilton, S. (2016). *Raman spectroscopy evaluation of polyvinylchloride structure*. Paper presented at the Journal of Physics: Conference Series.
- Quintavalla, S., & Vicini, L. (2002). Antimicrobial food packaging in meat industry. *Meat science*, 62(3), 373-380.
- Rouabah, N., Boudine, B., Nazir, R., Zaabat, M., Sebais, M., Halimi, O., . . . Chala, A. (2021). Structural, optical and photocatalytic properties of PVC/CdS

- nanocomposites prepared by soft chemistry method. *Journal of Inorganic and Organometallic Polymers and Materials*, 31(3), 1102-1110.
- Ruzycki, N., Herman, G. S., Boatner, L. A., & Diebold, U. (2003). Scanning tunneling microscopy study of the anatase (1 0 0) surface. *Surface science*, 529(1-2), L239-L244.
- Sadek, E., Mansour, N., Ahmed, S., Abd-El-Messieh, S., & El-Komy, D. (2021). Synthesis, characterization and applications of poly (vinyl chloride) nanocomposites loaded with metal oxide nanoparticles. *Polymer Bulletin*, 78(10), 5481-5502.
- Sarasa, J., Gracia, J. M., & Javierre, C. (2009). Study of the biodisintegration of a bioplastic material waste. *Bioresource technology*, 100(15), 3764-3768.
- Semnani, D. (2017). Geometrical characterization of electrospun nanofibers. In *Electrospun Nanofibers* (pp. 151-180): Elsevier.
- Stabrawa, I., Kubala-Kukuś, A., Banaś, D., Pepponi, G., Braziewicz, J., Pajek, M., & Teodorczyk, M. (2019). Characterization of the morphology of titanium and titanium (IV) oxide nanolayers deposited on different substrates by application of grazing incidence X-ray diffraction and X-ray reflectometry techniques. *Thin Solid Films*, 671, 103-110.
- Sunada, K., Watanabe, T., & Hashimoto, K. (2003). Studies on photokilling of bacteria on TiO₂ thin film. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, 156(1-3), 227-233.
- Tankeshwar, A. (2022). Pour Plate Method: Procedure, Uses, (Dis) Advantages. Retrieved from <https://microbeonline.com/pour-plate-method-principle-procedure-uses-dis-advantages/>
- Taoda, H. (2008). Development of TiO₂ photocatalysts suitable for practical use and their applications in environmental cleanup. *Research on Chemical Intermediates*, 34(4), 417-426.
- Vijayalakshmi, R., & Rajendran, V. (2012). Synthesis and characterization of nano-TiO₂ via different methods. *Arch. Appl. Sci. Res*, 4(2), 1183-1190.

- Wasa, K., Kitabatake, M., & Adachi, H. (2004). *Thin film materials technology: sputtering of control compound materials*: Springer Science & Business Media.
- Wight, A., & Davis, M. (2002). Design and preparation of organic–inorganic hybrid catalysts. *Chemical Reviews*, 102(10), 3589-3614.
- Yadav, H. M., Kim, J.-S., & Pawar, S. H. (2016). Developments in photocatalytic antibacterial activity of nano TiO₂: A review. *Korean Journal of Chemical Engineering*, 33(7), 1989-1998.
- Yang, C., Zhang, X., Qin, J., Shen, X., Yu, R., Ma, M., & Liu, R. (2017). Porous carbon-doped TiO₂ on TiC nanostructures for enhanced photocatalytic hydrogen production under visible light. *Journal of Catalysis*, 347, 36-44.
- Zeng, J., Roberts, S., & Xia, Y. (2010). Nanocrystal-based time–temperature indicators. *Chemistry–A European Journal*, 16(42), 12559-12563.
- Zhang, W., Xiao, X., Zheng, L., & Wan, C. (2015). Fabrication of TiO₂/MoS₂@ zeolite photocatalyst and its photocatalytic activity for degradation of methyl orange under visible light. *Applied Surface Science*, 358, 468-478.
- Zuo, Z., Zhu, K., Gu, C., Wen, Y., Cui, G., & Qu, J. (2016). Transparent, flexible surface enhanced Raman scattering substrates based on Ag-coated structured PET (polyethylene terephthalate) for in-situ detection. *Applied Surface Science*, 379, 66-72.
- เจริญสุข, จ. (2560). การพัฒนาฟิล์มพอลิเมอร์ผสมไททาเนียมไดออกไซด์เจือด้วยเงิน สำหรับยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย (Vol. 2560).
- ฉิมกมลทอง, ร. (2554). ผลของสภาวะการบ่มเร่งพอลิเอทิลีนและพอลิไวนิลคลอไรด์ที่ผสมซิลเวอร์คอลลอยด์ต่อประสิทธิภาพการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียและสมบัติสำหรับการประยุกต์ใช้งานด้านบรรจุภัณฑ์ (Vol. 2554).
- ชอปีติพร, ภ. เ. (2561). รามาน สเปกโตรสโคปี. วารสารเพื่อวิจัยและพัฒนาองค์การเภสัชกรรม, 25(1), 15-16.
- บุญญะหงษ์, ส., & สมบูรณ์, ว. (2553). การเตรียมฟิล์มบางของไททาเนียมไดออกไซด์ด้วยวิธีโซล-เจล สำหรับเคลือบกระจกทำความสะอาดตัวเอง (Vol. 2553).

- บุญญะหงส์, ส. (2552). การเตรียมฟิล์มไททาเนียมไดออกไซด์ด้วยวิธีโซล-เจล สำหรับเคลือบกระจก
 ทำความสะอาดตัวเอง (Vol. 2552).
- บุญยอด, เ. (2554). ปฏิกริยาโฟโตแคตะไลติกและพฤติกรรมการฆ่าเชื้อแบคทีเรียของฟิล์มบางไททา
 นีเนียมไดออกไซด์บนพอลิเมอร์ (Vol. 2554).
- ปนิทานเต, ป. (2553). บรรจุภัณฑ์ล้ำสมัย เพื่อโลกยุคใหม่. ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ,
 2553(1). Retrieved from [https://www2.mtec.or.th/th/e-
 magazine/admin/upload/252_33-37.pdf](https://www2.mtec.or.th/th/e-magazine/admin/upload/252_33-37.pdf)
- ผลพฤกษ์, ส. (2549). การนำกลับภาชนะโพลีเอทิลีนเพื่อผลิตคอนกรีตบล็อก (Vol. 2549).
- เผือกบัวขาว, น. (2550). สมบัติเชิงกลและสัญญาณวิทยาของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่
 ผ่านกระบวนการขึ้นรูปใหม่ โดยมีแคลเซียมคาร์บอเนตเป็นสารเติมแต่ง (Vol. 2550).
- ศรีเปล่ง, อ. (2548). ชีวิวิทยา 1 (Vol. 2548).
- ศรีไพโรจน์, ส. (2553). ฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์เคลือบบนผิวเซรามิกเพื่อยับยั้งจุลชีพ (Vol.
 2553).
- ศรีสิทธิ์, ก. (2556). การดูดซับและย่อยสลายสารคลอโรฟิรฟอสโดยใช้รูไททาเนียมไดออกไซด์ที่
 เจือด้วยไนโตรเจนภายใต้แสงวิซิเบิล (Vol. 2556).
- สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน. (2562). หลักการพื้นฐานเทคนิค X-ray Photoelectron Spectroscopy
 (XPS). Retrieved from [https://www.slri.or.th/th/beamline/bl32a-
 pes.html?view=article&id=2950:2013-07-17-08-22-33558&catid=57:bl32a-pes](https://www.slri.or.th/th/beamline/bl32a-pes.html?view=article&id=2950:2013-07-17-08-22-33558&catid=57:bl32a-pes)
- สีคง, เ., & คงเรือง, บ. (2553). การพัฒนาสารเคลือบไททาเนียมไดออกไซด์เพื่อยืดอายุการเก็บรักษา
 ผัก (Vol. 2553).
- สีโต, ก. (2546). โฟโตเฟนตันและ TiO_2 -โฟโตคะตะไลติกเดกระเดชน์ของสีย้อมที่ฟเวด 141 (Vol.
 2546).
- สินอนตร, ว. (2560). การปลูกและวิเคราะห์วัสดุโครงสร้างนาโนซิงค์ออกไซด์เจือฟลูออรีนที่
 สังเคราะห์ด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล. (ปริญญาโท). สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า
 เจ้าคุณทหารลาดกระบัง,
- สุวรรณฤกษ์, ณ., วรวัฒน์กุล, ธ., & อนันต์ภัทรชัย, จ. (2546). การศึกษาผลของการเคลือบผิวไททา
 นีเนียมไดออกไซด์ด้วยวิธีโซล-เจล โดยใช้ไอโซพโรพานอลแอลกอฮอล์ (Vol. 2546).

- หทัยสมิทธิ์, ข. (2550). การเตรียมไททาเนียมไดออกไซด์-เฟสอานาเทสและประยุกต์ใช้ในการทำลายเชื้อแบคทีเรียโดยการฉายแสง. Paper presented at the การประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 45: สาขาวิทยาศาสตร์, กรุงเทพฯ.
- เหลือองอักษร, ศ. (2553). การศึกษาเชิงเปรียบเทียบระหว่างการตรวจวัดด้วยเครื่องตรวจวัดแบบออนไลน์ การตรวจเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ และการวิเคราะห์ในห้องปฏิบัติการด้วยวิธีมาตรฐานของน้ำทิ้งชุมชนและน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม (Vol. 2553).
- เอี่ยมพนาภิจ, ก. (2547). การศึกษาการเคลือบฟิล์มบางหลายชั้นที่ให้ค่าการปลดปล่อยรังสีต่ำของเงิน-ไททาเนียมไดออกไซด์ โดยวิธีสปีดเตอร์ (Vol. 2547).





ตาราง 14 ค่ามุมสัมพัทธ์ของตัวอย่าง A แบบดั้งเดิม และแบบเคลือบฟิล์มบาง

ตัวอย่าง A			
แบบดั้งเดิม		แบบเคลือบฟิล์มบาง	
มุมด้านซ้าย	มุมด้านขวา	มุมด้านซ้าย	มุมด้านขวา
86.2	85.6	32	32
88.4	88.9	35.4	35.8
89.1	89.5	35.2	34.8
102.7	104.1	46.2	45.6
92.8	93	31.5	32.5
104	105.1	69	67.4

ตาราง 15 ค่ามุมสัมพัทธ์ของตัวอย่าง B แบบดั้งเดิม และแบบเคลือบฟิล์มบาง

ตัวอย่าง B			
แบบดั้งเดิม		แบบเคลือบฟิล์มบาง	
มุมด้านซ้าย	มุมด้านซ้าย	มุมด้านซ้าย	มุมด้านขวา
93.8	97.1	29.1	29.1
94.4	96.2	39.2	37.5
83.3	82.6	37.3	37.3
83.4	81.6	37.2	37.2
78.7	77.1	38.1	42.2
87.2	86.3	59.3	27.8

ตาราง 16 ค่ามุมสัมพัทธ์น้ำของตัวอย่าง C แบบดั้งเดิม และแบบเคลือบฟิล์มบาง

ตัวอย่าง C			
แบบดั้งเดิม		แบบเคลือบฟิล์มบาง	
มุมด้านซ้าย	มุมด้านซ้าย	มุมด้านซ้าย	มุมด้านขวา
108.5	97.7	98.4	110.4
107.2	97.8	99.5	100.3
108.9	109	99.4	111.3
108.4	101.8	100.2	102.4
107.7	100.1	99.3	102.9
108.2	108.5	100	110.1

ตาราง 17 ค่ามุมสัมพัทธ์น้ำของตัวอย่าง D แบบดั้งเดิม และแบบเคลือบฟิล์มบาง

ตัวอย่าง D			
แบบดั้งเดิม		แบบเคลือบฟิล์มบาง	
มุมด้านซ้าย	มุมด้านซ้าย	มุมด้านซ้าย	มุมด้านซ้าย
33.6	34.3	31.6	31.8
32.5	32.9	31.1	30.6
33.3	33.5	30.8	30.9
33.8	22.3	31	31
32.4	33.3	31.3	31.6
33.5	33.8	30.5	30.4

ตาราง 18 ค่ามุมสัมพัทธ์น้ำของทั้ง 4 ตัวอย่างที่ระยะเวลาการฉายแสงอัลตราไวโอเล็ตเอต่าง ๆ

เวลา (นาที)	ตัวอย่าง A		ตัวอย่าง B	
	มุมด้านซ้าย	มุมด้านขวา	มุมด้านซ้าย	มุมด้านขวา
0	36.1	36.1	26.2	26.2
3	31.9	33.3	24	24
6	30.5	30.5	22	22
9	26.7	26.7	21.7	21.7
12	22.6	24.4	17.2	17.2
15	18.1	19.5	15	15
20	13.1	14.7	13.4	13.2
25	7.6	7.6	12.2	12.2
30	0	0	0	0

เวลา(นาที)	ตัวอย่าง C		ตัวอย่าง D	
	มุมด้านซ้าย	มุมด้านขวา	มุมด้านซ้าย	มุมด้านขวา
0	77.9	79.9	38.8	44.9
3	73	75	25.3	28.6
6	68.5	70.5	25.7	30.9
9	64.3	66.4	16.2	21.8
12	52.5	53.9	11.4	11.4
15	46.1	47.5	6	6
20	27.2	28	0	0
25	18.4	18.4	0	0
30	0	0	0	0

ตาราง 19 ค่าการดูดกลืนแสงของไททาเนียมไดออกไซด์ (P25)

ความเข้มข้น (mg/l)	ค่าการดูดกลืนแสง
1	0.0503
0.1	0.0132
0.01	0.01
0.001	0.008
0.0001	0.0027

ตาราง 20 ค่าการดูดกลืนแสงของฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์ที่หลุดออกในแต่ละรอบ

ครั้งที่	จำนวนรอบการปั่นเหวี่ยงของตัวอย่าง A								
	1	2	3	4	5	10	15	20	25
1	0.0029	0.0003	0.0026	0.0063	0.0014	0.0011	0.0069	0.0028	0.0023
2	0.0063	0.0086	0.0003	0.004	0.0013	0.0018	0.0059	0.0035	0
3	0.0011	0.0096	0.0014	0.0016	0.0013	0.0013	0.0056	0.0049	0.0019

ตาราง 20 ค่าการดูดกลืนแสงของฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์ที่หลุดออกในแต่ละรอบ (ต่อ)

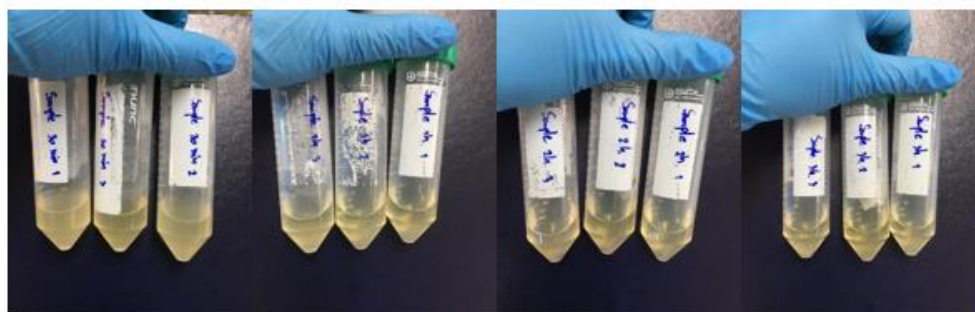
ครั้งที่	จำนวนรอบการปั่นเหวี่ยงของตัวอย่าง B
----------	-------------------------------------

	1	2	3	4	5	10	15	20	25
1	0.0101	0.0039	0.0006	0.0032	0.0019	0.0001	0.0069	0.0064	0
2	0.0083	0.004	0.0152	0.0017	0.0053	0	0.0083	0.0059	0.0067
3	0.0062	0.0083	0.0085	0.0078	0.0004	0.001	0.0013	0.0083	0.0017

ครั้งที่	จำนวนรอบการปั่นเหวี่ยงของตัวอย่าง C								
	1	2	3	4	5	10	15	20	25
1	0.0033	0.0002	0.0004	0	0	0.0008	0.0007	0.0079	0.0042
2	0.0011	0.0013	0.0004	0	0	0	0.0026	0.0084	0.0027

ตาราง 20 ค่าการดูดกลืนแสงของฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์ที่หลุดออกในแต่ละรอบ (ต่อ)

ครั้งที่	จำนวนรอบการปั่นเหวี่ยงของตัวอย่าง D								
	1	2	3	4	5	10	15	20	25
1	0.0008	0.0041	0.0005	0.0023	0.0006	0.003	0.007	0.0052	0.0002
2	0.0011	0.0028	0.0022	0.0028	0.0027	0.0005	0.0083	0.0038	0
3	0.0017	0.0013	0.0032	0	0.001	0	0.0071	0.0016	0.0008

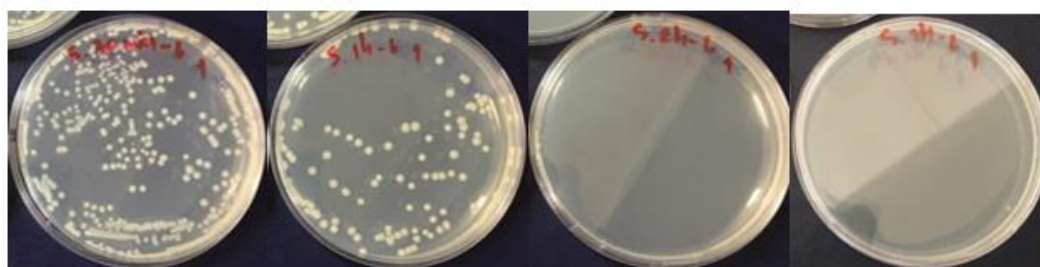


หลังฉายแสง 30 นาที

60 นาที

120 นาที

180 นาที



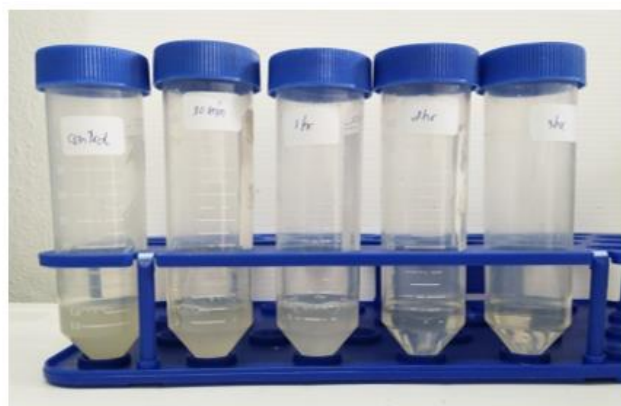
หลังฉายแสง 30 นาที

60 นาที

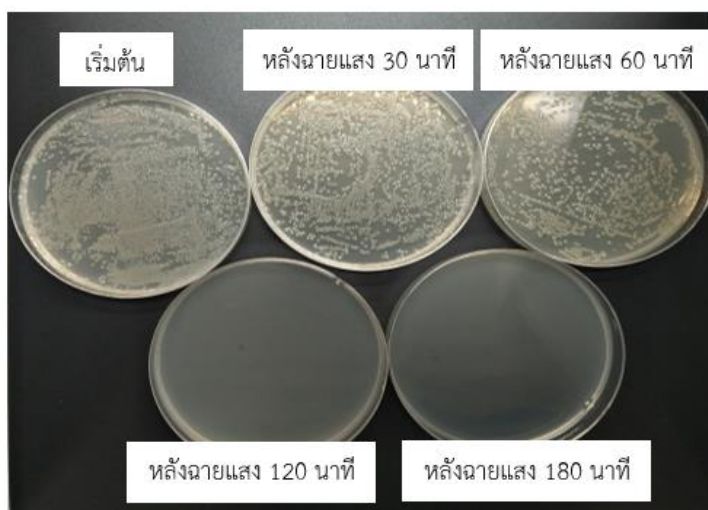
120 นาที

180 นาที

ภาพ 102 การยับยั้งการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ *E.coli* ของตัวอย่าง A
ในอาหารเลี้ยงเชื้อชนิดเหลว และชนิดแข็ง



อาหารเลี้ยงเชื้อชนิดเหลว

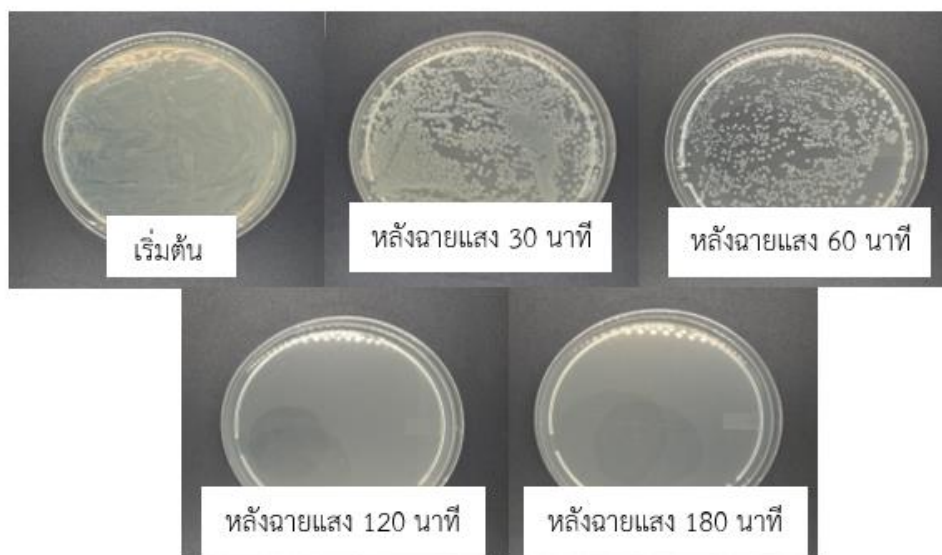


อาหารเลี้ยงเชื้อชนิดแข็ง

ภาพ 103 การยับยั้งการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ *E.coli* ของตัวอย่าง B ในอาหารเลี้ยงเชื้อชนิดเหลว และชนิดแข็ง

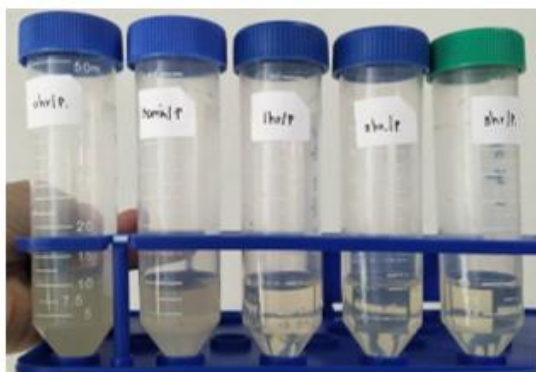


อาหารเลี้ยงเชื้อชนิดเหลว

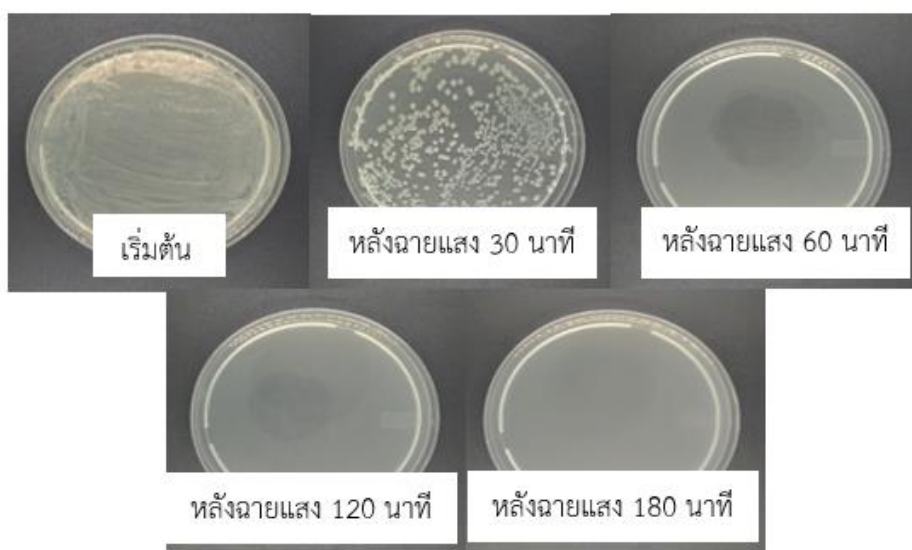


อาหารเลี้ยงเชื้อชนิดแข็ง

ภาพ 104 การยับยั้งการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ *E.coli* ของตัวอย่าง C
ในอาหารเลี้ยงเชื้อชนิดเหลว และชนิดแข็ง

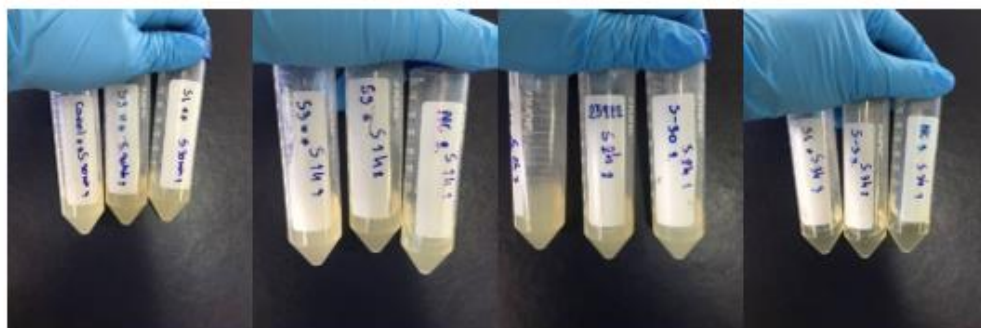


อาหารเลี้ยงเชื้อชนิดเหลว



อาหารเลี้ยงเชื้อชนิดแข็ง

ภาพ 105 การยับยั้งการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ *E.coli* ของตัวอย่าง D ในอาหารเลี้ยงเชื้อชนิดเหลว และชนิดแข็ง

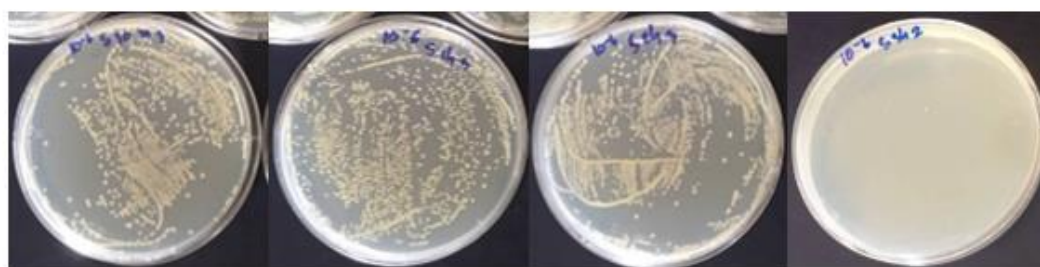


หลังฉายแสง 30 นาที

60 นาที

120 นาที

180 นาที



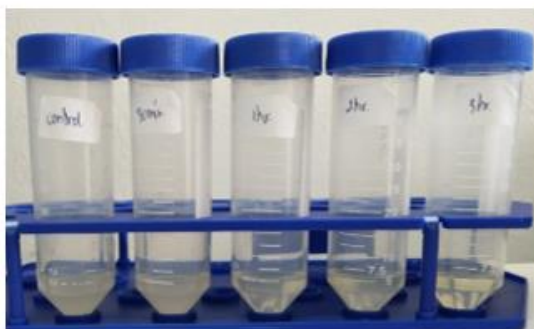
หลังฉายแสง 30 นาที

60 นาที

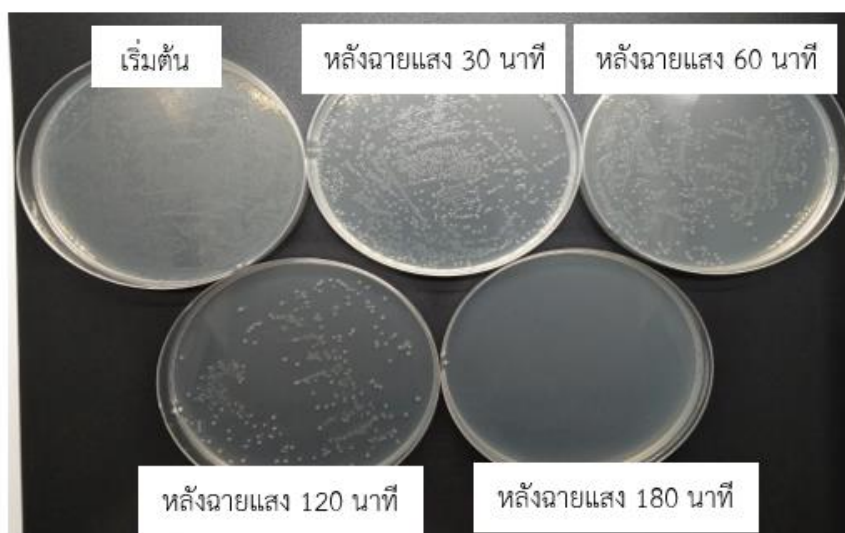
120 นาที

180 นาที

ภาพ 106 การยับยั้งการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ *S. typhimurium* ของตัวอย่าง A ในอาหารเลี้ยงเชื้อชนิดเหลว และชนิดแข็ง

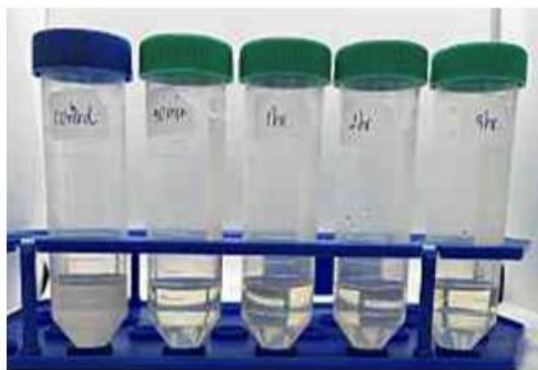


อาหารเลี้ยงเชื้อชนิดเหลว

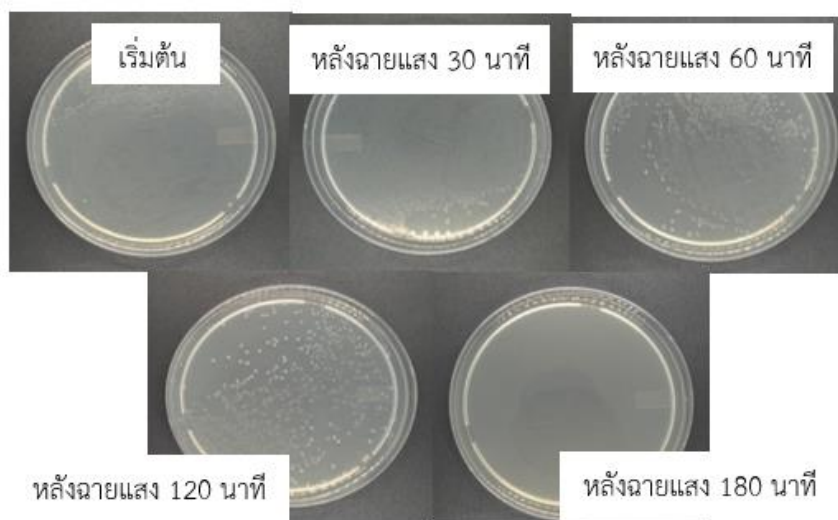


อาหารเลี้ยงเชื้อชนิดแข็ง

ภาพ 107 การยับยั้งการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ *S. typhimurium* ของตัวอย่าง B ในอาหารเลี้ยงเชื้อชนิดเหลว และชนิดแข็ง

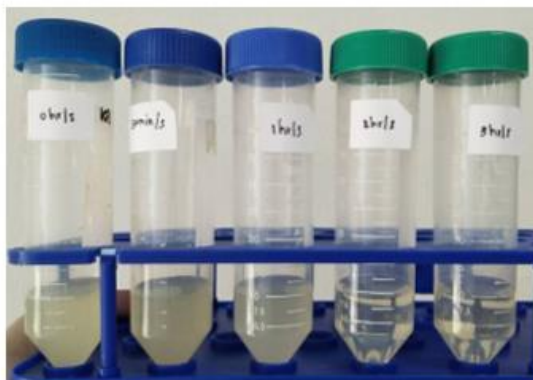


อาหารเลี้ยงเชื้อชนิดเหลว

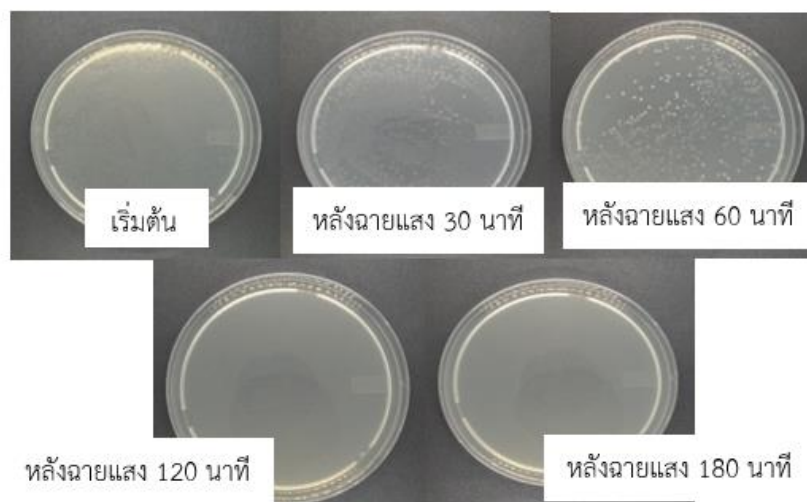


อาหารเลี้ยงเชื้อชนิดแข็ง

ภาพ 108 การยับยั้งการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ *S. typhimurium* ของตัวอย่าง C ในอาหารเลี้ยงเชื้อชนิดเหลว และชนิดแข็ง



อาหารเลี้ยงเชื้อชนิดเหลว



อาหารเลี้ยงเชื้อชนิดแข็ง

ภาพ 109 การยับยั้งการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ *S. typhimurium* ของตัวอย่าง D ในอาหารเลี้ยงเชื้อชนิดเหลว และชนิดแข็ง