

การสังเคราะห์กราฟิติคาร์บอนไนไตรด์จากสารตั้งต้นเมลามีน
โดยใช้ความร้อนเพื่อเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง
สำหรับการผลิตไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์



นางสาวดารณี ปิยฉัตรพนม

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมวัสดุ
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ปีการศึกษา 2562

**THERMAL SYNTHESIS OF $g\text{-C}_3\text{N}_4$ DERIVED FROM
MELAMINE FOR PHOTOCATALYTIC HYDROGEN
PEROXIDE PRODUCTION**



**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirement for the
Degree of Master of Engineering in Material Engineering**

Suranaree University of Technology

Academic Year 2019

การสังเคราะห์กราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์จากสารตั้งต้นเมลามีนโดยการใช้ความร้อน
เพื่อเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงสำหรับการผลิตไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์

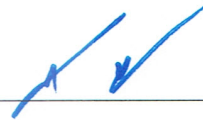
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นักวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



(ผศ. ดร. อ่อนลมี กมลอินทร์)

ประธานกรรมการ



(ผศ. ดร. สุขเกษม วัชรมัยสกุล)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)



(ผศ. ดร. จีรัชญา อายะวรรณ)

กรรมการ



(รศ. ร.อ. ดร. กนต์ธร ชำนิประศาสน์)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและพัฒนาความเป็นสากล



(รศ. ดร. พรศิริ จงกล)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

การณิ ปิยฉัตรพนม : การสังเคราะห์กราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์จากสารตั้งต้นเมลามีนโดยการใช้ความร้อนเพื่อเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงสำหรับการผลิตไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (THERMAL SYNTHESIS OF g-C₃N₄ DERIVED FROM MELAMINE FOR PHOTOCATALYTIC HYDROGEN PEROXIDE PRODUCTION) อาจารย์ที่ปรึกษา : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุขเกษม วัชรมัศกุล, 77 หน้า.

การศึกษากการสังเคราะห์กราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์จากสารตั้งต้นเมลามีนโดยการใช้ความร้อน เพื่อเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงสำหรับการผลิตไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์นี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษากระบวนการสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยากาฟิติกคาร์บอนไนไตรด์ศึกษาอุณหภูมิที่เหมาะสมในการผลิตไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ และศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาสำหรับการผลิตไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ด้วยกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง ในการวิจัยนี้ได้เลือกสารตั้งต้นเมลามีนโดยการใช้ความร้อนในการสังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 400-600 °C เพื่อให้ได้ตัวเร่งปฏิกิริยากาฟิติกคาร์บอนไนไตรด์ และนำไปขึ้นรูปด้วยกระบวนการจุ่มเคลือบบนพื้นผิวของฟองน้ำ เพื่อทดสอบประสิทธิภาพกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงสำหรับการผลิตไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ จากผลการทดลอง X-ray Diffraction (XRD) พบว่าโครงสร้างกราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์เริ่มเกิดที่อุณหภูมิ 550 และ 600 °C การทดสอบประสิทธิภาพกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงของตัวเร่งปฏิกิริยากาฟิติกคาร์บอนไนไตรด์ที่ผ่านการสังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 550 และ 600 °C พบว่า ตัวเร่งปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 600 °C มีสมบัติที่เหมาะสมมากกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 500 °C เนื่องจากมีประสิทธิภาพในการผลิตปริมาณความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ได้สูงถึง 100 ppm ภายในเวลา 1 ชั่วโมง

นอกจากนี้จากการทดสอบการฆ่าเชื้อแบคทีเรีย Bacillus subtilis ของตัวเร่งปฏิกิริยากาฟิติกคาร์บอนไนไตรด์ที่อุณหภูมิ 600 °C สามารถฆ่าเชื้อ Bacillus subtilis ได้ทั้งหมดภายในเวลาเพียง 1 ชั่วโมง โดยไม่มีเชื้อแบคทีเรียหลงเหลืออยู่ แสดงให้เห็นว่าตัวเร่งปฏิกิริยามีประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อแบคทีเรียได้เป็นอย่างดี

DARANEE PIYACHATPANOM : THERMAL SYNTHESIS OF g-C₃N₄
DERIVED FROM MELAMINE FOR PHOTOCATALYTIC HYDROGEN
PEROXIDE PRODUCTION. THESIS ADVISOR : ASSOC. PROF.
SUKASEM WATCHARAMAISAKUL, Ph.D., 77 PP.

PHOTOCATALYTIC PROCESS/GRAPHITIC CARBON NITRIDE/HYDROGEN
PEROXIDE PRODUCTION

The research on g-C₃N₄ synthesis from melamine by pyrolysis as the photocatalyst for H₂O₂ production aims to study the synthesis of g-C₃N₄ catalyst. The optimum pyrolysis temperature was investigated to obtain the suitable photocatalytic properties for H₂O₂ production. Melamine was used as a precursor for g-C₃N₄ synthesis powder with various temperatures of 400-600 ° C. The catalyst samples were fabricated by dip coating method before testing the efficiency of H₂O₂ production. The X-ray Diffraction (XRD) showed that the structure of g-C₃N₄ was formed approximately at 550-600 ° C. The higher efficiency of H₂O₂ production was found in the catalyst synthesized at 600 ° C with H₂O₂ concentration of 100 ppm in 1 hour compared to the one from 550 ° C.

Moreover, the test on anti-Bacillus subtilis by g-C₃N₄ catalyst synthesized at 600 ° C showed that it was able to kill all the Bacillus subtilis within 1 hour, indicating that the catalyst was high effective for killing bacteria.

School of Ceramic Engineering

Academic year 2019

Student's Signature ณัฐวิจิตร วัฒนกุล
Advisor's Signature Yuan W.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี เนื่องจากได้รับความช่วยเหลืออย่างยิ่ง ทั้งด้านวิชาการ และด้านการดำเนินงานวิจัย จากบุคคลทุกท่าน ดังต่อไปนี้

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุขเกษม วัชรมัชสกุล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ช่วยเหลือในการทำการศึกษาวิจัยให้คำแนะนำในการเขียน และช่วยตรวจทานเนื้อวิทยานิพนธ์ ตลอดจนผลงานวิจัยที่ได้รับการเผยแพร่ รวมทั้งชี้แนะแนวทางการเรียน

คณาจารย์ทุกท่านในสาขาวิชาวิศวกรรมเซรามิก มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ให้ความเมตตาและให้ความรู้กับผู้วิจัยมาโดยตลอด

คุณพันทิพา นำสว่างรุ่งเรือง ที่ได้ให้ความช่วยเหลือและประสานงาน ทางด้านเอกสาร ตลอดระยะเวลาที่ศึกษา

นายสงคราม ขวาระประภาส และนางหนึ่งฤทัย ประเสริฐ เจ้าหน้าที่ปฏิบัติการสาขาวิชา วิศวกรรมเซรามิก ที่ช่วยเหลือในการดำเนินการวิจัยรวมทั้งเจ้าหน้าที่ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ให้คำแนะนำและช่วยเหลือด้านเครื่องมือวิจัย

คุณสุวิทย์ แวนเกตุ บริษัท นำวิวัฒน์การช่าง (1992) จำกัด ที่ให้คำแนะนำและช่วยเหลือใน ด้านเครื่องมือวิจัย

ขอขอบคุณศูนย์ความเป็นเลิศทางด้านชีวกลศาสตร์ทางการแพทย์ ที่สนับสนุนเงินทุน ในการทำงานวิจัย

ขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ได้เปิดโอกาสทางการศึกษา และให้การช่วยเหลือสนับสนุนด้านทุนการศึกษา รวมทั้งด้านอุปกรณ์และเครื่องมือวิทยาศาสตร์

สำหรับคุณประโยชน์อันใดที่เกิดจากงานวิจัยในครั้งนี้ เป็นผลมาจากความช่วยเหลือและ กรณาจากทุกท่านที่ได้กล่าวมาข้างต้น รวมทั้งบุคคลอื่นที่ผู้วิจัยมิได้กล่าวถึง ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งเป็น อย่างยิ่ง จึงขอขอบพระคุณอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้ด้วย

คารณี ปิยฉัตรพนม

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูป.....	ฉ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหาการวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	3
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
2 ปรัชสน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 กระบวนการเกิดปฏิกิริยาด้วยแสง (Photocatalytic process).....	5
2.2 ตัวเร่งปฏิกิริยาที่กระตุ้นด้วยแสง (Photocatalyst).....	7
2.3 กระบวนการดูดซับ (Adsorption process).....	9
2.4 ปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง.....	10
2.5 วัสดุกึ่งตัวนำ (Semiconductor).....	11
2.5.1 แบบจำลองแถบพลังงาน (Energy band model).....	12
2.6 กลไกการเกิดกระบวนการการผลิตไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H ₂ O ₂).....	15
2.7 ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H ₂ O ₂).....	16
2.8 สารตั้งต้นเมลามีน.....	18
2.8.1 กลไกการสังเคราะห์สารกราฟิตคาร์บอนไนไตรด์โดยใช้สารตั้งต้นเมลามีน.....	19

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า	
2.9	กระบวนการเคลือบแบบจุ่ม (Dip coating).....	19
2.10	วัสดุรองรับการเคลือบ (Coated substrate).....	20
2.11	เชื้อ Bacillus subtilis.....	21
2.12	แนวคิดงานวิจัย.....	21
2.13	การทบทวนเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	22
2.13.1	สารตั้งต้นในการสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยากราฟิติก คาร์บอนไนไตรด์.....	22
2.13.2	ประสิทธิภาพการผลิตไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์ด้วย กระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง.....	22
3	วิธีดำเนินการวิจัย.....	28
3.1	สารเคมี อุปกรณ์ และเครื่องมือวิเคราะห์.....	28
3.2	วิธีการทดลอง.....	29
3.2.1	การเตรียมวัสดุการสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยากราฟิติก คาร์บอนไนไตรด์.....	30
3.2.2	กระบวนการขึ้นรูปตัวเร่งปฏิกิริยากราฟิติก คาร์บอนไนไตรด์ด้วยกระบวนการจุ่มชิ้นงาน (Dipping).....	32
3.2.3	การทดสอบประสิทธิภาพกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง สำหรับการผลิตปริมาณของไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์.....	36
3.2.4	การวิเคราะห์สมบัติของวัสดุตัวเร่งปฏิกิริยา.....	37
4	ผลการทดลองและการอภิปรายผล.....	41
4.1	การสังเคราะห์กราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์จากสารตั้งต้นเมลามีน.....	41
4.2	ผลการวิเคราะห์วัฏภาคของวัสดุกราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์ที่ผ่าน การสังเคราะห์ที่อุณหภูมิแตกต่างกัน.....	42
4.3	ผลการศึกษาสมบัติทางความร้อนของสารตั้งต้นเมลามีน.....	43
4.4	ผลการศึกษาโครงสร้างทางจุลภาคของตัวเร่งปฏิกิริยากราฟิติก คาร์บอนไนไตรด์.....	44

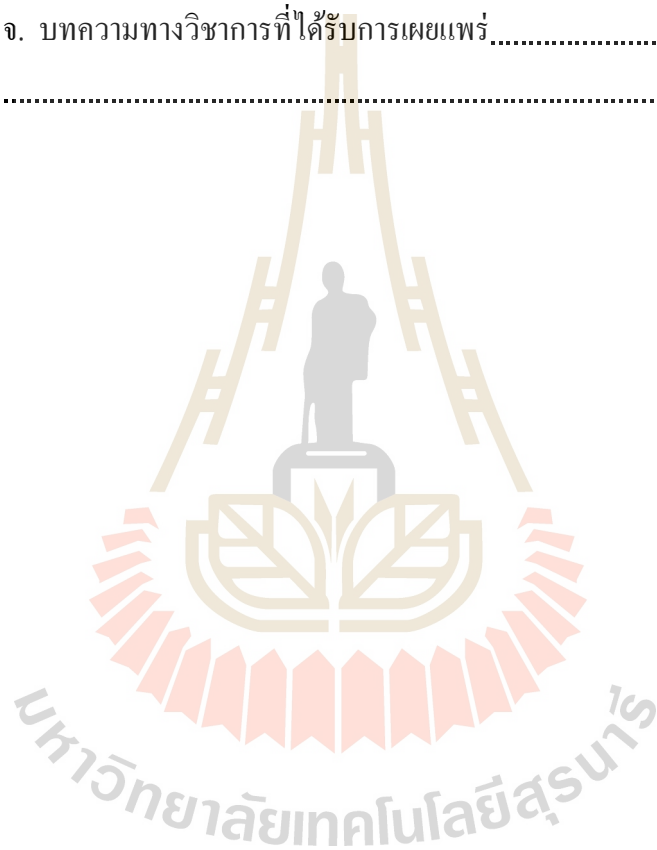
สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.5 ผลการศึกษาโครงสร้างและสัณฐานของตัวเร่งปฏิกิริยากราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์.....	45
4.6 ผลการวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะของวัสดุตัวเร่งปฏิกิริยากราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์.....	47
4.7 ผลการศึกษาโครงสร้างทางจุลภาคของตัวเร่งปฏิกิริยากราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์ที่ผ่านการขึ้นรูปด้วยวิธีการจุ่มบนฟองน้ำ.....	48
4.8 ผลการทดสอบประสิทธิภาพกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงสำหรับการผลิตไอไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์.....	48
4.9 ผลการทดสอบประสิทธิภาพกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงสำหรับการผลิตไอไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์ โดยทำการฉายแสงและไม่ฉายแสง.....	49
4.10 การทดสอบประสิทธิภาพกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงสำหรับการผลิตไอไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์ โดยทำการทดสอบในเครื่องกำเนิดไอไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์.....	50
4.11 การทดสอบประสิทธิภาพการฆ่าเชื้อโรคเบื้องต้นของไอไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์ที่ได้จากตัวเร่งปฏิกิริยากราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์.....	52
4.12 การทดสอบประสิทธิภาพการฆ่าเชื้อแบคทีเรีย <i>Bacillus subtilis</i> ของตัวเร่งปฏิกิริยา กราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์.....	55
4.13 ผลการศึกษาเชื้อแบคทีเรีย <i>Bacillus subtilis</i> ที่ผ่านการอบฆ่าเชื้อด้วยไอไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์.....	56
5 สรุปผลการวิจัย.....	58
5.1 สรุปผลงานวิจัย.....	58
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	59
รายการอ้างอิง.....	60
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก. ชิ้นงานตัวเร่งปฏิกิริยาหลังการอบที่อุณหภูมิต่างกัน.....	65
ภาคผนวก ข. ภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคของผงกราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์.....	67

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

ภาคผนวก ค. ภาพถ่ายโครงสร้างจุดภาคของชิ้นงานฟองน้ำ	
กราฟติกคาร์บอนไนไตรด์.....	69
ภาคผนวก ง. ขยายสเกลชิ้นงานฟองน้ำขนาดใหญ่ขึ้นจากเดิม.....	71
ภาคผนวก จ. บทความทางวิชาการที่ได้รับการเผยแพร่.....	74
ประวัติผู้เขียน.....	76



สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1	ข้อมูลการจำแนกแสงตามช่วงความยาวคลื่น7
2.2	ข้อแตกต่างระหว่างการดูดซับทางกายภาพและทางเคมี 10
2.3	แถบพลังงานและช่วงความยาวคลื่นที่มีผลต่อแถบพลังงานของสารสารกึ่งตัวนำ 12
2.4	สมบัติโดยทั่วไปของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (Hydrogen peroxide, online) 18
2.5	คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของเมลามีน 18
2.6	งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการใช้สารตั้งต้นต่าง ๆ ในการสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยา กราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์ด้วยกระบวนการใช้ความร้อนในการสังเคราะห์ 22
2.7	การเปรียบเทียบปริมาณความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์จากตัวเร่ง ปฏิกิริยาต่าง ๆ 24
2.8	การเปรียบเทียบการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยากราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์ต่าง ๆ สำหรับการผลิตไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 26
3.1	สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย 28
3.2	เครื่องมือ วัสดุ และอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย 28
3.3	เครื่องมือวิเคราะห์ทดสอบ 29
4.1	ค่าพื้นที่ผิวจำเพาะและปริมาตรรูพรุนของตัวเร่งปฏิกิริยา กราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์ 47

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1	กลไกของการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงของวัสดุกึ่งตัวนำ6
2.2	ความยาวคลื่นของแสง.....8
2.3	โครงสร้างอะตอม 11
2.4	แบบจำลองแถบพลังงานของโลหะ วัสดุกึ่งตัวนำ และฉนวน..... 13
2.5	ค่าพลังงานที่ขอบบน-ล่าง ของแถบพลังงานของวัสดุกึ่งตัวนำ..... 13
2.6	การเชื่อมต่อหน่วยย่อยต่าง ๆ ในระนาบ 2 มิติ เพื่อสร้างเป็นแผ่น กราฟิติการ์บอนไนไตรด์โดยหน่วยเล็ก ๆ ที่เชื่อมต่อกันเป็น (ก) เอส-ไตรอะซีน หรือ (ข) ไตร-เอส-ไตรอะซีน 14
2.7	กลไกการเกิดกระบวนการการผลิตไฮโดรเจนเพอร็อกไซด์บนพื้นผิวของ กราฟิติการ์บอนไนไตรด์..... 16
2.8	โครงสร้างทางเคมีของ H ₂ O ₂ 16
2.9	กลไกการสังเคราะห์สารกราฟิติการ์บอนไนไตรด์จากสารตั้งต้นเมลามีน 19
2.10	กระบวนการจุ่มเคลือบ..... 20
2.11	ฟองน้ำใช้สำหรับเป็นวัสดุรองรับการเคลือบ..... 20
2.12	แบคทีเรีย Bacillus subtilis..... 21
3.1	แผนผังการเตรียมวัสดุการสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยากราฟิติการ์บอนไนไตรด์..... 30
3.2	นำผงเมลามีนเข้าเตาเผาที่อุณหภูมิต่าง ๆ 31
3.3	(ก) หลังทำการเผา และ (ข) บดผงกราฟิติการ์บอนไนไตรด์ให้ละเอียด 31
3.4	แผนผังกระบวนการขึ้นรูปตัวเร่งปฏิกิริยากราฟิติการ์บอนไนไตรด์ด้วย กระบวนการจุ่มชิ้นงาน (Dipping)..... 32
3.5	ทำการละลาย PVA เป็นเวลา 24 ชั่วโมง 33
3.6	กวนผสมสารด้วยเครื่อง Mini Ball mill 33
3.7	น้ำ Slip กราฟิติการ์บอนไนไตรด์..... 34
3.8	(ก) นำฟองน้ำจุ่มในน้ำ Slip และ (ข) หลังการจุ่มน้ำ Slip 34

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.9	35
3.10	35
3.11	36
3.12	37
4.1	42
4.2	43
4.3	44
4.4	45
4.5	46
4.6	47
4.7	48
4.8	49
4.9	50
4.10	51

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.11 ผลการทดสอบปริมาณความเข้มข้นไอโซโครเจนเพอร์ออกไซด์ของตัวเร่งปฏิกิริยากราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์ที่อุณหภูมิ 600 °C ด้วยเครื่องกำเนิดไอโซโครเจนเพอร์ออกไซด์อบแห้ง.....	51
4.12 การผลิตปริมาณความเข้มข้นของไอโซโครเจนเพอร์ออกไซด์ที่ 100 ppm.....	52
4.13 ผลการฆ่าเชื้อโรคบนขนมปังที่ผ่านการอบฆ่าเชื้อ (ซ่าย) และไม่ผ่านการอบฆ่าเชื้อ (ขวา) ด้วยไอโซโครเจนเพอร์ออกไซด์เป็นระยะเวลา 1 วัน	53
4.14 ผลการฆ่าเชื้อโรคบนขนมปังที่ผ่านการอบฆ่าเชื้อ (ซ่าย) และไม่ผ่านการอบฆ่าเชื้อ (ขวา) ด้วยไอโซโครเจนเพอร์ออกไซด์เป็นระยะเวลา 4 วัน	53
4.15 ผลการฆ่าเชื้อโรคบนขนมปังที่ผ่านการอบฆ่าเชื้อ (ซ่าย) และไม่ผ่านการอบฆ่าเชื้อ (ขวา) ด้วยไอโซโครเจนเพอร์ออกไซด์เป็นระยะเวลา 6 วัน	54
4.16 ผลการฆ่าเชื้อโรคบนขนมปังที่ผ่านการอบฆ่าเชื้อ (ซ่าย) และไม่ผ่านการอบฆ่าเชื้อ (ขวา) ด้วยไอโซโครเจนเพอร์ออกไซด์เป็นระยะเวลา 9 วัน	54
4.17 ผลการฆ่าเชื้อโรคบนขนมปังที่ผ่านการอบฆ่าเชื้อ (ซ่าย) และไม่ผ่านการอบฆ่าเชื้อ (ขวา) ด้วยไอโซโครเจนเพอร์ออกไซด์เป็นระยะเวลา 10 วัน	55
4.18 ผลการทดสอบการฆ่าเชื้อแบคทีเรีย <i>Bacillus subtilis</i> ของตัวเร่งปฏิกิริยากราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์ด้วยกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง (ก) เชื้อแบคทีเรีย <i>Bacillus subtilis</i> ที่ไม่ผ่านการอบฆ่าเชื้อ และ (ข) เชื้อแบคทีเรีย <i>Bacillus subtilis</i> ผ่านการอบฆ่าเชื้อ	56
4.19 (ก) เชื้อแบคทีเรีย <i>Bacillus subtilis</i> ที่ยังไม่โดนทำลาย (ข) และ (ค) เชื้อแบคทีเรีย <i>Bacillus subtilis</i> ที่โดนทำลาย ด้วยไอโซโครเจนเพอร์ออกไซด์	57
ก.1 ชิ้นงานฟองน้ำขนาด 2×3×0.5 ซม. ที่ผ่านการจุ่มเคลือบด้วยน้ำ Slip กราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์.....	66
ก.2 ชิ้นงานตัวเร่งปฏิกิริยาหลังอบที่อุณหภูมิ 100, 130, 150 และ 200 °C.....	66
ข.1 ภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคของผงตัวเร่งปฏิกิริยากราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์ ที่อุณหภูมิต่าง ๆ ที่กำลังขยาย 25,000 เท่า.....	68

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
ค.1 ภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานฟองน้ำตัวเร่งปฏิกิริยากราฟิติกคาร์บอน ในไตรด์ทอณูหุมี 600 องศาเซลเซียส ที่กำลังขยาย 100, 200, 20,000 และ 50,000 เท่า.....	70
ง.1 เตรียมน้ำ Slip แล้วนำชิ้นงานฟองน้ำขนาด 20×24 ซม. จุ่มลงในน้ำ Slip	72
ง.2 ชิ้นงานฟองน้ำที่ผ่านการจุ่มเคลือบด้วยน้ำ Slip กราฟิติกคาร์บอนในไตรด์.....	72
ง.3 อบที่อุณหภูมิ 130 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง.....	73
ง.4 ชิ้นงานฟองน้ำตัวเร่งปฏิกิริยากราฟิติกคาร์บอนในไตรด์หลังการอบ	73



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหาการวิจัย

ปัจจุบันงานทางด้าน การแพทย์ต้องมีการทำให้เครื่องมือทางการแพทย์ปราศจากเชื้อ (Sterilization) ซึ่งเป็นกระบวนการในการทำลายหรือขจัดเชื้อจุลชีพทุกชนิด รวมทั้งสปอร์ของเชื้อแบคทีเรียจากเครื่องมือทางการแพทย์ เช่น เครื่องมือผ่าตัด เข็มฉีดยา ข้อมือเทียม และวัสดุฝังในร่างกาย เป็นต้น ดังนั้นอุปกรณ์ที่ใช้ในการวินิจฉัยโรคจะต้องได้รับการทำให้ปราศจากเชื้อโรคก่อนที่จะผ่านเข้าสู่ร่างกาย โดยวิธีการทำให้ปราศจากเชื้อแบ่งออกได้เป็น 2 วิธี ได้แก่ 1) วิธีทางกายภาพ (Physical method) คือ การใช้ความร้อน (Heat sterilization) การใช้ความร้อนชื้น (Steam under pressure) และ การใช้ความร้อนแห้ง (Dry heat) และ 2) วิธีทางเคมี (Chemical method) คือ การใช้แก๊ส ได้แก่ Ethylene oxide gas, Formaldehyde gas และ Hydrogen peroxide (H_2O_2) ในช่วงไม่กี่ปีที่ผ่านมา การทำให้ปราศจากเชื้อโดยใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (Hydrogen peroxide) ซึ่งเป็นเทคโนโลยีใหม่ที่มีการใช้ทดแทน Ethylene oxide gas และ Formaldehyde gas อย่างไรก็ตาม การใช้ Ethylene oxide gas และ Formaldehyde gas เป็นสารเคมีที่ทำลายเชื้อจุลชีพได้อย่างกว้างขวาง แต่ในการทำลายสปอร์นั้นเกิดขึ้นได้อย่างช้า ๆ โดยใช้ระยะเวลาประมาณ 3-6 ชั่วโมง เมื่อเสร็จสิ้นกระบวนการจะกลายเป็นพิษทำให้เกิดการระคายเคืองต่อผิวหนังและระบบทางเดินหายใจจะเกิดอาการแพ้ได้และมีกลิ่นเหม็น ปัจจุบันจึงหันมานิยมใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ซึ่งเป็นสารเคมีที่มีฤทธิ์ในการทำลายเชื้อแบคทีเรีย เชื้อไวรัส เชื้อรา และสปอร์ของเชื้อแบคทีเรีย ไอระเหยของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์นี้สามารถทำลายเชื้อได้ในเวลาอันรวดเร็วประมาณ 1 ชั่วโมง ที่ความเข้มข้น 100 ppm ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์จึงเป็นวิธีที่ใหม่ สารที่เหลือหลังจากเสร็จสิ้นกระบวนการคือ ก๊าซออกซิเจนและน้ำ

นอกจากนี้เทคโนโลยีการผลิตไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ยังสามารถผลิตได้หลายวิธี เช่น กระบวนการ Anthraquinone ซึ่งเป็นการผลิตในระดับอุตสาหกรรม (Campos-Martin, Blanco-Brieva, & Fierro, 2006) กระบวนการนี้สามารถผลิตไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ได้ในปริมาณที่สูงมากในแต่ละรอบ แต่อย่างไรก็ตามพบว่าไม่ค่อยเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมเท่าไรนักและมีขั้นตอนการทำงานค่อนข้างซับซ้อน อีกวิธีหนึ่งคือ การผลิตไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ส่วนใหญ่จะสังเคราะห์เข้ามาในลักษณะที่เป็นของเหลวไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (Liquid) จากนั้นนำมาผ่านการให้

ความร้อนด้วยพลาสมา (Plasma) เพื่อให้โมเลกุลแตกละเอียดกลายเป็นละอองฝอย ทำให้เกิดเป็นไอขึ้นมา อย่างไรก็ตามการผลิตโดยวิธีกรรมนี้มีข้อเสียคือ ของเหลวไฮโดรเจนเพอร็อกไซด์นั้นต้องส่งนำเข้าจากต่างประเทศ ซึ่งมีต้นทุนที่สูงและเป็นอันตรายต่อผู้ปฏิบัติงานในกรณีที่เกิดการรั่วซึมออกมา และไม่ปีที่ผ่านมาการผลิตไฮโดรเจนเพอร็อกไซด์ด้วยกระบวนการเร่งปฏิกิริยาดำเนินการ (Photocatalytic process) ได้รับความสนใจเป็นอย่างมาก เนื่องจากกระบวนการนี้เป็นวิธีที่ปลอดภัย เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม และสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ นอกจากนี้ยังสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการผลิตไฮโดรเจนเพอร็อกไซด์ได้ ซึ่งเป็นการเร่งปฏิกิริยาเคมีโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst) ที่สามารถทำหน้าที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเคมีได้โดยการกระตุ้นด้วยแสง สามารถเพิ่มอัตราเร็วของปฏิกิริยาทำให้ปฏิกิริยานั้นเข้าสู่สมดุลเร็วขึ้น โดยที่ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงหลังจากปฏิกิริยาเสร็จสมบูรณ์ ในอดีตที่ผ่านมาการผลิตไฮโดรเจนเพอร็อกไซด์ด้วยกระบวนการนี้ นิยมใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์และมีการปรับปรุงคุณสมบัติไทเทเนียมไดออกไซด์อย่างไรก็ตามยังคง มีข้อจำกัดในเรื่องของการใช้งานภายใต้แสงยูวี ได้ปริมาณความเข้มข้นของไฮโดรเจนเพอร็อกไซด์ที่ต่ำ และไฮโดรเจนเพอร็อกไซด์เกิดการสลายตัวได้ง่าย นอกจากนี้พบว่า ยังมีวัสดุกึ่งตัวนำที่ใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ได้รับความสนใจนั่นคือ วัสดุกราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์ ($g-C_3N_4$) เนื่องจากมีแถบช่องว่างพลังงาน (Energy band gap) ที่แคบกว่าวัสดุกึ่งตัวนำตัวอื่น ๆ (2.7 eV) ทำให้สามารถตอบสนองต่อแสงที่มองเห็นได้ (Visible light) ได้ (Chong, Jin, Chow, & Saint, 2010) โดยไม่ต้องใช้งานภายใต้แสงยูวี และยังสามารถผลิตไฮโดรเจนเพอร็อกไซด์จากเอทานอลและน้ำได้อีกด้วย โดยใช้เอทานอลและน้ำเป็นสารตั้งต้นในการกำเนิดไอของไฮโดรเจนเพอร็อกไซด์ เนื่องจากมีความประหยัด ต้นทุนต่ำ ไม่เป็นอันตรายต่อผู้ปฏิบัติงาน และไม่ต้องนำผ่านการให้ความร้อนด้วยพลาสมาเป็นองค์ประกอบในการผลิตไฮโดรเจนเพอร็อกไซด์อีกด้วย

ดังนั้นในงานนี้ผู้วิจัยจึงมุ่งเน้นที่จะสังเคราะห์กราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์ ($g-C_3N_4$) เพื่อเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาดำเนินการ เนื่องจากมีแถบช่องว่างพลังงานที่เหมาะสม ทำให้สามารถตอบสนองต่อแสงที่มองเห็นได้ ไม่เป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิต และสามารถนำมาประยุกต์ใช้สำหรับการผลิตไฮโดรเจนเพอร็อกไซด์ โดยใช้กระบวนการเร่งปฏิกิริยาดำเนินการ ซึ่งมีความประหยัด ไม่เป็นอันตรายต่อผู้ปฏิบัติงาน และยังสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ ในงานวิจัยนี้ใช้สารตั้งต้นเมลามีนโดยใช้วิธีการให้ความร้อน เพื่อสังเคราะห์กราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์ ซึ่งเป็นวิธีการที่สะดวกรวดเร็วในการสังเคราะห์ ทำการขึ้นรูปตัวเร่งปฏิกิริยากราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์ด้วยกระบวนการจุ่ม (Dipping process) และทำการทดสอบประสิทธิภาพในการผลิตไฮโดรเจนเพอร็อกไซด์ซึ่งไฮโดรเจนเพอร็อกไซด์สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้อย่างกว้างขวาง เช่น สามารถฆ่าเชื้อ

แบบที่เรีย เขื่อไวรัส รวมถึงสปอร์ของเชื้อแบคทีเรียได้ และในด้านทางการแพทย์และสาธารณสุข นอกจากนี้ยังการทดสอบประสิทธิภาพการฆ่าเชื้อโรคอีกด้วย

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษากระบวนการสังเคราะห์กราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์จากสารตั้งต้นเมลามีน โดยให้ความร้อน เพื่อใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาคด้วยแสง

1.2.2 เพื่อศึกษาอุณหภูมิที่ใช้ในการสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหมาะสมในการผลิต ไอโซโครเจนเพอร์ออกไซด์

1.2.3 เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยากราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์ ในการผลิตไอโซโครเจนเพอร์ออกไซด์ด้วยกระบวนการเร่งปฏิกิริยาคด้วยแสง

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1.3.1 ศึกษาอุณหภูมิที่ใช้ในการสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยากราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์ จากสารตั้งต้นเมลามีนที่มีผลต่อการผลิต ไอโซโครเจนเพอร์ออกไซด์

1.3.2 ศึกษาโครงสร้างจุลภาคของตัวเร่งปฏิกิริยากราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์

1.3.3 วิเคราะห์ห้วงภาคของตัวเร่งปฏิกิริยากราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์ที่ผ่านการสังเคราะห์ ที่อุณหภูมิต่างกัน

1.3.4 วิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะของตัวเร่งปฏิกิริยากราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์

1.3.5 ทดสอบประสิทธิภาพการผลิต ไอโซโครเจนเพอร์ออกไซด์ด้วยกระบวนการเร่งปฏิกิริยาคด้วยแสงของตัวเร่งปฏิกิริยากราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์ที่อุณหภูมิต่างกัน

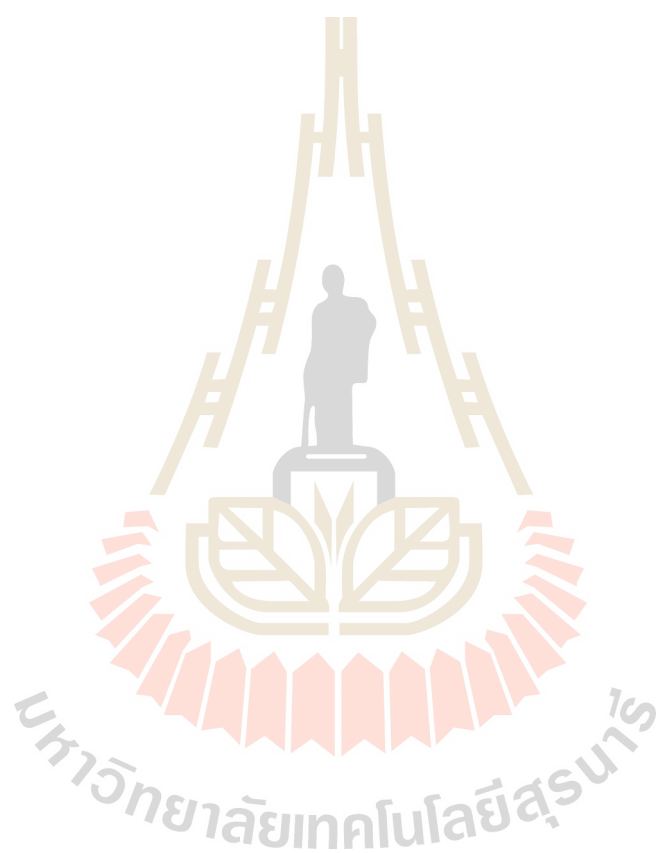
1.3.6 ทดสอบประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อโรคด้วยกระบวนการเร่งปฏิกิริยาคด้วยแสงของ ตัวเร่งปฏิกิริยากราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 สามารถสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยากราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์จากสารตั้งต้นเมลามีน ด้วยวิธีการให้ความร้อนได้

1.4.2 สามารถทราบอุณหภูมิที่ใช้ในการสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยากราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์ที่มีสมบัติที่เหมาะสมในการผลิต ไอโซโครเจนเพอร์ออกไซด์ได้

1.4.3 สามารถขึ้นรูปชิ้นงานตัวเร่งปฏิกิริยากราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์ด้วยวิธีการจุ่มบนพื้นผิวของฟองน้ำ เพื่อนำไปผลิตไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ด้วยกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงได้อย่างมีประสิทธิภาพ



บทที่ 2

ปฏิกิริยารวมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

กระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง (Photocatalytic) เป็นกระบวนการที่มีตัวเร่งปฏิกิริยา คือ วัสดุกึ่งตัวนำ (Semiconductor) โดยใช้พลังงานแสงเป็นตัวกระตุ้นทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมี โดยที่ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงเมื่อสิ้นสุดกระบวนการ เรียกสารนี้ว่าตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง (Photocatalyst) เกิดจากการรวมตัวกันของ “โฟโต (Photo)” ให้นำหน้าคำที่แสงเข้ามาเกี่ยวข้องกับ และ “คะตะลิสต์ (Catalyst)” คือ อนุภาคตัวเร่งที่เป็นตัวกลางในการทำให้เกิดอัตราการเปลี่ยนแปลงทางเคมี

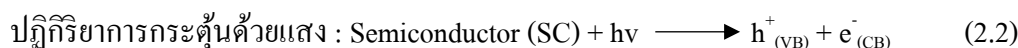
2.1 กระบวนการเกิดปฏิกิริยาด้วยแสง (Photocatalytic process)

กลไกการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง โดยใช้วัสดุกึ่งตัวนำ (Semiconductor) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา เมื่อได้รับพลังงานแสงที่อยู่ในรูปโฟตอน (Photon) มากพอที่จะไปกระตุ้นอิเล็กตรอน (Electron) และหลุม (Hole) พลังงานนี้จะเรียกว่า “พลังงานกระตุ้น” สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 2.1

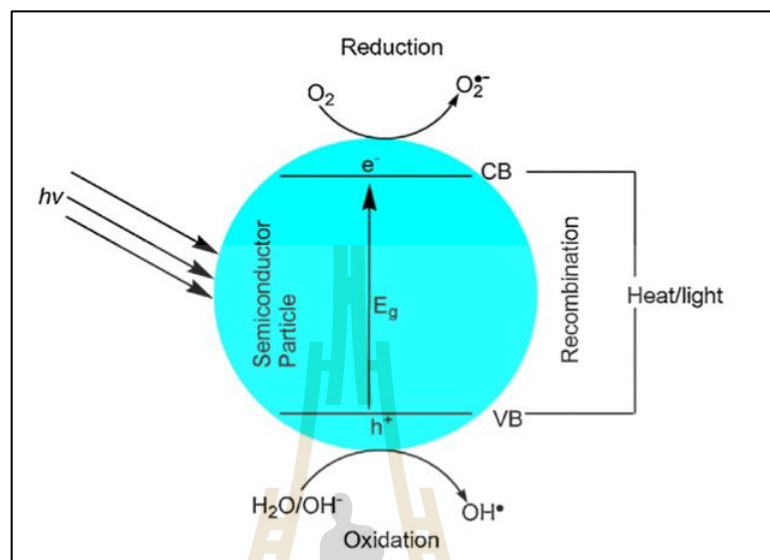
$$E = hv = \frac{hc}{\lambda} \quad (2.1)$$

โดยที่	E	คือ พลังงานโฟตอน (จูล)
	h	คือ ค่าคงที่ของพลังค์ (6.625×10^{-34} จูล-วินาที)
	v	คือ ความถี่ (วินาที ⁻¹)
	c	คือ ความเร็วแสง (3×10^8 เมตร/วินาที)
	λ	คือ ความยาวคลื่นแสง (นาโนเมตร)

จากการกระตุ้นด้วยแสงทำให้อิเล็กตรอนที่แถบเวเลนซ์ (Valence band) ซึ่งเป็นระดับศักย์พลังงานที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยหลุมที่เหลืออยู่หลังจากที่อิเล็กตรอนถูกกระตุ้นไปแล้ว ส่งผลทำให้เกิด Electron-hole pair ดังในสมการที่ 2.2



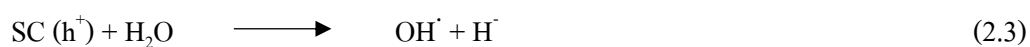
ซึ่งสามารถเคลื่อนที่ไปมาระหว่างแถบเวเลนซ์และแถบการนำ (Conduction band) ได้อย่างรวดเร็ว ดังรูปที่ 2.1



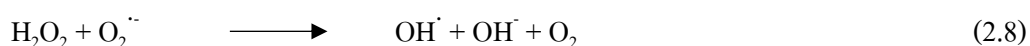
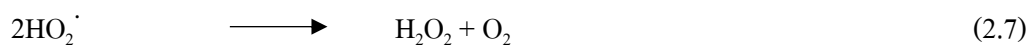
รูปที่ 2.1 กลไกของการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงของวัสดุกึ่งตัวนำ (Mamba & Mishra, 2016)

ปฏิกิริยาที่แถบเวเลนซ์ที่มีหลุมอยู่จะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation) โดยที่ (h⁺) จะทำปฏิกิริยากับน้ำ (H₂O) และไฮดรอกไซด์ไอออน (OH⁻) จะเกิดเป็นไฮดรอกซิลเรดิคัล (OH[•]) ดังแสดงในสมการที่ 2.3-2.4 ส่วนที่ผิวของวัสดุกึ่งตัวนำที่มีอิเล็กตรอน (e⁻) จะเกิดปฏิกิริยารีดักชัน (Reduction) กับออกซิเจน (O₂) ที่ดูดติดบนผิววัสดุกึ่งตัวนำ จะทำให้เกิดเป็นซูเปอร์ออกไซด์เรดิคัล (Superoxide radical, O₂^{•-}) ดังแสดงในสมการที่ 2.5 และเมื่อซูเปอร์ออกไซด์เรดิคัลทำปฏิกิริยากับไฮโดรเจนไอออนจะเกิดเป็นไฮโดรเปอร์ออกไซด์เรดิคัล (HO₂[•]) ดังแสดงในสมการที่ 2.6 เมื่อไฮโดรเปอร์ออกไซด์เรดิคัลรวมกันจะกลายเป็นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H₂O₂) และออกซิเจน ดังแสดงในสมการที่ 2.7 ซึ่งไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์สามารถรับซูเปอร์ออกไซด์เรดิคัลและกลายเป็นไฮดรอกซิลเรดิคัลได้ ดังแสดงในสมการที่ 2.8 ดังนั้นจึงสามารถกำจัดสารพิษออกไปได้ และเมื่อเสร็จสิ้นกระบวนการสิ่งที่ได้สุดท้ายคือ คาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ (Tarr, 2003; Tang, 2003)

ปฏิกิริยาออกซิเดชัน :



ปฏิกิริยารีดักชัน :



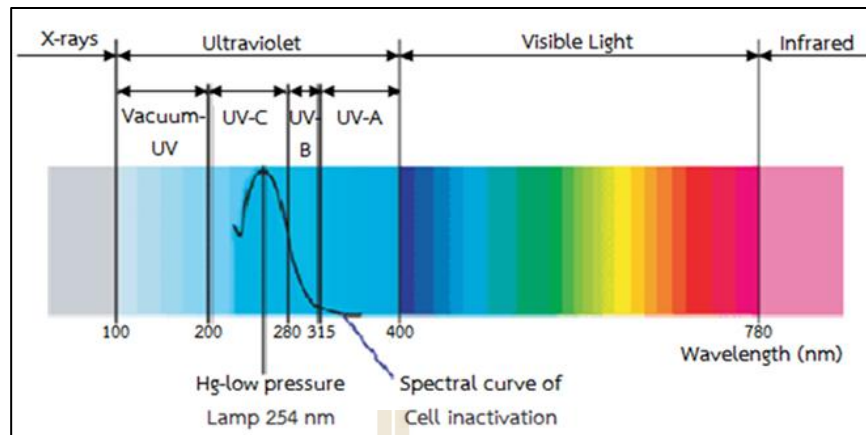
2.2 ตัวเร่งปฏิกิริยาที่กระตุ้นด้วยแสง (Photocatalyst)

ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ถูกกระตุ้นด้วยแสง มักจะใช้วัสดุจำพวกวัสดุกึ่งตัวนำจะทำหน้าที่คล้ายคลึงกับคลอโรฟิลล์ (Chlorophyll) ในพืชสีเขียวที่ใช้สังเคราะห์แสงจะเปลี่ยนแก๊ส คาร์บอนไดออกไซด์ เป็นแป้งและแก๊สออกซิเจน ซึ่งเป็นกระบวนการสร้างอาหารของพืชสำหรับตัวเร่งปฏิกิริยาจะถูกนำมาใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง เพื่อเปลี่ยนสารอินทรีย์และอนินทรีย์ที่เป็นพิษให้กลายเป็นไม่มีพิษหรือมีพิษน้อยลง

ดังที่กล่าวมาแล้วข้างต้นสำหรับกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง สิ่งที่เราขาดไม่ได้ในกระบวนการนี้คือ แสงที่ใช้ในการกระตุ้นตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งสามารถจำแนกแสงตามช่วงความยาวคลื่นได้ดังนี้ (Venturini & Bacchi, 2009) แสดงดังตารางที่ 2.1 และแสดงดังรูปที่ 2.2

ตารางที่ 2.1 ข้อมูลช่วงความยาวคลื่นแสง

ชนิดคลื่น	ช่วงความยาวคลื่น
Ultraviolet (UV)	100-400 nm
Ultraviolet Vacuum (UV-V)	100-200 nm
Ultraviolet C (UV-C)	200-280 nm
Ultraviolet B (UV-B)	280-315 nm
Ultraviolet A (UV-A)	315-400 nm
Visible light	400-780 nm
Infrared	780-1000 nm



รูปที่ 2.2 ความยาวคลื่นของแสง (Venturini & Bacchi, 2009)

เมื่อทราบค่าแถบพลังงานของวัสดุกึ่งตัวนำสามารถนำมาคำนวณหาค่าความยาวคลื่นของโฟตอนที่มีค่าแถบพลังงานเท่ากับวัสดุกึ่งตัวนำนั้น เช่น กราฟิติการ์บอนไนไตรด์มีค่าแถบพลังงาน 2.7 eV สามารถคำนวณหาได้ดังนี้

$$\lambda = \frac{hc}{E}$$

$$\lambda = \frac{(6.625 \times 10^{-34} \text{ J-s}) \times (3 \times 10^8 \text{ m/s})}{2.7 \text{ eV}} \times \frac{1 \text{ eV}}{1.6 \times 10^{-19} \text{ J}}$$

$$\lambda = 0.460 \times 10^{-6} \text{ m} = 460 \text{ nm}$$

ดังนั้นจึงสามารถบอกได้ว่าค่าความยาวคลื่นแสงที่มีค่าแถบพลังงานเท่ากับ 2.7 eV ของวัสดุกึ่งตัวนำของกราฟิติการ์บอนไนไตรด์คือ 460 นาโนเมตร ซึ่งอยู่ในช่วงของแสงที่สามารถมองเห็นได้ (Visible light)

2.3 กระบวนการดูดซับ (Adsorption process)

กระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงเป็นวิธีการหนึ่ง ที่มีประสิทธิภาพในการกำจัดมลพิษ สารอินทรีย์และอนินทรีย์ในอากาศหรือน้ำได้ โดยกระบวนการนี้ประกอบไปด้วย 2 กระบวนการหลัก ๆ คือ กระบวนการเกิดปฏิกิริยาด้วยแสง ซึ่งได้กล่าวในข้างต้นและกระบวนการดูดซับ

กระบวนการดูดซับเป็นปรากฏการณ์ที่สารในสถานะของเหลวหรือแก๊สถูกดึงให้มายึดเกาะและติดบริเวณพื้นผิวของของแข็ง สำหรับในกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงของแข็งในที่นี้คือ ตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst) ความสามารถในการดูดซับสารจะแตกต่างกันขึ้นอยู่กับชนิดและสมบัติของสารนั้น ๆ การยึดเกาะของโมเลกุลบริเวณพื้นผิวของสารสามารถเกิดขึ้นได้ด้วยแรงทางกายภาพหรือทางเคมีหรือได้ทั้งสองอย่างพร้อมกัน ซึ่งสามารถแบ่งการดูดซับได้ 2 ประเภท ได้แก่ การดูดซับทางกายภาพและการดูดซับทางเคมี

1. การดูดซับทางกายภาพ (Physical adsorption) เป็นการดูดซับที่เกิดจากแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับกับตัวดูดซับ โดยมี 2 แรงหลัก ๆ ได้แก่ แรงแวนเดอร์วาลส์ (Van der Waals' force) และแรงทางไฟฟ้าสถิตย์ (Electrostatic force)

1) แรงแวนเดอร์วาลส์ (Van der Waals' force) ซึ่งเป็นแรงดึงดูดอย่างอ่อนเป็นกระบวนการคายความร้อนที่มักเกิดขึ้นที่อุณหภูมิต่ำ มีค่าความร้อนของการดูดซับต่ำทำให้กระบวนการสามารถผันกลับไปมาได้ ซึ่งส่งผลให้ตัวดูดซับฟื้นฟูสภาพได้ง่ายขึ้น ที่ความดันสูงจะสามารถเกิดการดูดซับบนผิวของตัวดูดซับได้หลายชั้น (Multilayer) ซึ่งจำนวนชั้นของสารถูกดูดซับจะเป็นสัดส่วนกับความเข้มข้นของสารที่ถูกดูดซับและขนาดรูพรุน

2) แรงทางไฟฟ้าสถิตย์ (Electrostatic force) เป็นแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลที่มีขั้วกับสารที่มีขั้ว ระหว่างสารที่ไม่มีขั้วกับสารที่ไม่มีขั้วด้วยกัน หรือระหว่างสารที่มีขั้วกับสารที่ไม่มีขั้ว โดยแรงทางไฟฟ้าสถิตย์เป็นแรงระหว่างอนุภาคที่มีค่าน้อยที่สุด เมื่อเทียบกับแรงประเภทอื่น ๆ ซึ่งอนุภาคที่อยู่ใกล้กันมากมีค่าศักย์ทางไฟฟ้าสถิตย์ต่างกันและจะเกิดแรงดึงดูดกัน

2. การดูดซับทางเคมี (Chemical adsorption) เป็นการดูดซับที่เกิดจากการยึดเหนี่ยวกันด้วยแรงที่มากกว่าการดูดซับทางกายภาพ เมื่อตัวถูกดูดซับกับตัวดูดซับทำปฏิกิริยาเคมีกันจะส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมีของตัวถูกดูดซับเดิมคือ มีการทำลายแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอะตอมหรือกลุ่มอะตอมเดิมแล้วมีการจัดเรียงอะตอมไปเป็นสารประกอบใหม่ขึ้น โดยมีพันธะเคมีซึ่งเป็นพันธะที่แข็งแรง มีพลังงานกระตุ้นเข้ามาเกี่ยวข้องทำให้ความร้อนของการดูดซับมีค่าสูงหมายความว่า การกำจัดตัวถูกดูดซับออกจากผิวตัวดูดซับจะทำได้ยากคือ ไม่สามารถเกิดปฏิกิริยาผันกลับได้ (Irreversible) และการดูดซับประเภทนี้จะเป็นการดูดซับแบบชั้นเดียว (Monolayer) เท่านั้น ซึ่งการดูดซับทางกายภาพและทางเคมีมีข้อแตกต่างกัน แสดงดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ข้อแตกต่างระหว่างการดูดซับทางกายภาพและทางเคมี

ตัวแปร	การดูดซับทางกายภาพ	การดูดซับทางเคมี
1. อุณหภูมิที่เกิดการดูดซับ	ต่ำ	สูง
2. แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุล	แรงแวนเดอร์วาลส์	พันธะทางเคมี
3. การผันกลับของปฏิกิริยา	ผันกลับได้	ส่วนใหญ่ไม่ผันกลับ
4. การดูดซับแก๊สของแข็ง	เกิดได้เกือบทุกชนิด	เกิดเฉพาะบางระบบ
5. รูปแบบชั้นของการดูดซับ	Monolayer และ Multilayer	Monolayer

2.4 ปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง

ประสิทธิภาพของกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงขึ้นอยู่กับปัจจัยต่าง ๆ ได้แก่ การควบคุมสถานะต่าง ๆ ในกระบวนการนี้ เช่น ความเข้มของแสง (Light intensity) ความยาวคลื่นแสง (Wavelength) ค่าพีเอช (pH) ของสารละลาย ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst loading) อุณหภูมิ (Temperature) ขนาดอนุภาค และพื้นที่ผิว เป็นต้น โดยปัจจัยที่ส่งผลที่ได้กล่าวมาสามารถอธิบายได้ดังนี้

1) ความเข้มของแสง (Light intensity) และความยาวคลื่นแสง (Wavelength) ที่ใช้ในกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงจะสัมพันธ์กับแถบช่องว่างพลังงานของตัวเร่งปฏิกิริยาในการกระตุ้นให้เกิดคู่อิเล็กตรอนและหลุม (hole) โดยความเข้มของแสงที่เหมาะสมในการกระตุ้นอาจจะอยู่ในช่วงอัลตราไวโอเล็ตหรือช่วงแสงที่ตามองเห็น (Visible) ขึ้นกับแถบช่องว่างพลังงานของตัวเร่งปฏิกิริยา

2) ค่าพีเอชของสารละลาย (pH solution) มีผลต่อการเปลี่ยนค่าประจุบนพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาซึ่งค่าประจุบนพื้นผิวมีผลต่อการดูดซับสารอินทรีย์ชนิดต่าง ๆ

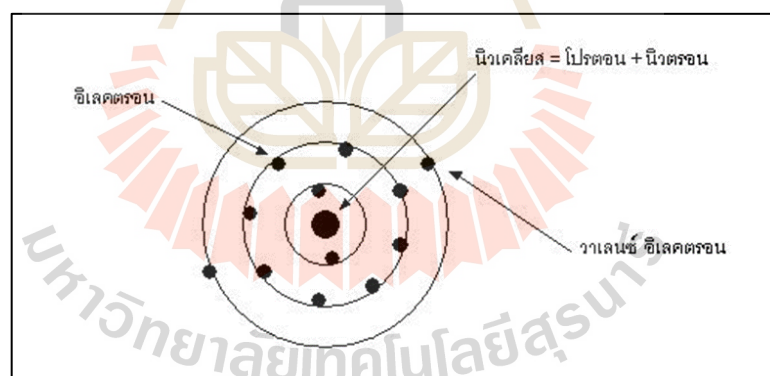
3) ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst loading) หากมีมากเกินไปจะทำให้แสงที่ส่องผ่านไปยังตัวเร่งปฏิกิริยาลดลง เนื่องจากมีความทึบแสงมากทำให้ความสามารถในการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงลดลง

4) อุณหภูมิ (Temperature) อัตราการเกิดปฏิกิริยาของกระบวนการนี้สามารถเกิดในอัตราที่ต่ำเนื่องจากอัตราการรวมตัวใหม่ของคู่อิเล็กตรอนและหลุม (Electron-hole recombination) จะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วกลายเป็นความร้อนและการดูดซับ บริเวณพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา

5) ขนาดอนุภาค (Particle size) และพื้นที่ผิว (Surface area) เป็นส่วนที่สำคัญในการเพิ่มความสามารถการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง หากมีขนาดอนุภาคเล็กในระดับนาโนเมตรจะทำให้มีพื้นที่ผิวมาก ซึ่งทำให้กระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

2.5 วัสดุกึ่งตัวนำ (Semiconductor)

วัสดุกึ่งตัวนำเป็นธาตุอย่างหนึ่ง ซึ่งในธาตุทุกชนิดจะประกอบไปด้วยอะตอม โดยที่ภายในอะตอมของธาตุเหล่านี้จะประกอบไปด้วยโปรตอน นิวตรอน และอิเล็กตรอน โปรตอนกับนิวตรอนจะอยู่ในนิวเคลียส ซึ่งเป็นจุดศูนย์กลางของอะตอมและมีอิเล็กตรอนวิ่งอยู่รอบนอก คล้าย ๆ กับวงโคจรในระบบสุริยะ โดยที่อิเล็กตรอนที่อยู่ในวงโคจรใกล้กับนิวเคลียสจะมีระดับพลังงานต่ำ เนื่องจากนิวเคลียสสามารถดึงดูดอิเล็กตรอนเหล่านี้ได้อยู่ได้ ขณะที่อิเล็กตรอนที่โคจรรอบนิวเคลียสที่อยู่ห่างไกลออกไปจะมีระดับพลังงานสูง และพร้อมที่จะเคลื่อนที่ได้ง่ายถ้าได้รับพลังงานกระตุ้นจากภายนอกอย่างเพียงพอ อิเล็กตรอนในวงโคจรนอกสุดของอะตอม นั้น ๆ เรียกว่า “วาเลนซ์อิเล็กตรอน” ดังแสดงในรูปที่ 2.3 (ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ เรื่องสารกึ่งตัวนำ, ออนไลน์)



รูปที่ 2.3 โครงสร้างอะตอม (ที่มา : <http://sites.google.com>)

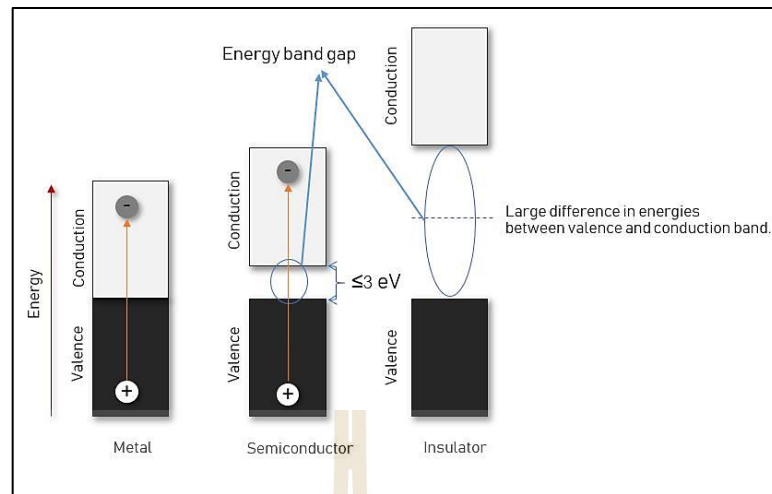
วัสดุกึ่งตัวนำที่สามารถนำมาใช้เป็นโฟโตคะตะลิสต์ด้วยกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง มีหลายชนิด ได้แก่ CdO, CdS, g-C₃N₄, ZnO, ZnS, TiO₂, SnO₂ และ WO₃ เป็นต้น ดังแสดงในตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 แถบพลังงานและช่วงความยาวคลื่นที่มีผลต่อแถบพลังงานของวัสดุกึ่งตัวนำ

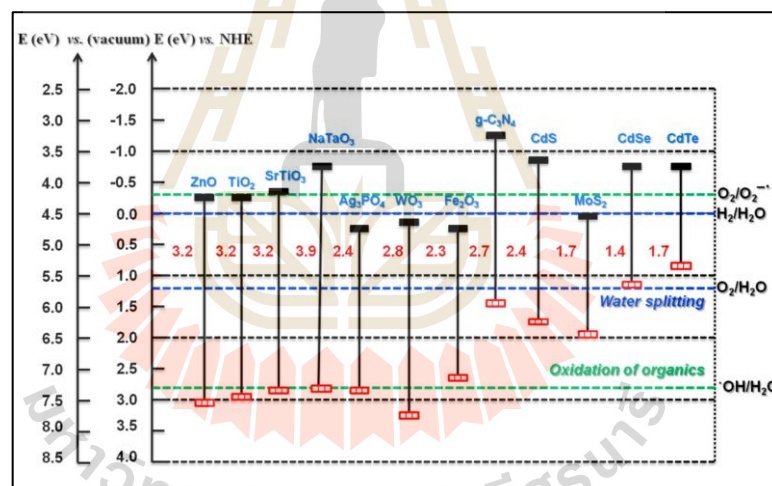
วัสดุสารกึ่งตัวนำ	แถบพลังงาน (eV)	ช่วงความยาวคลื่นที่มีผลต่อแถบพลังงาน (nm)
CdO	2.1	592
CdS	2.5	497
g-C ₃ N ₄	2.7	460
ZnO	3.2	388
ZnS	3.7	335
TiO ₂	3.2	388
SnO ₂	3.9	318
WO ₃	2.8	443

2.5.1 แบบจำลองแถบพลังงาน (Energy band model)

แบบจำลองแถบพลังงานคือแบบจำลองปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นเมื่ออะตอมของธาตุรวมตัวกันเป็นโมเลกุลในโครงสร้างของเนื้อวัสดุแข็ง โดยระดับพลังงานย่อยของอิเล็กตรอนในกลุ่มอะตอมจะรวมตัวกันเกิดเป็นแถบพลังงาน (Energy band) ที่มีอิเล็กตรอนบรรจุอยู่และช่องว่างระหว่างแถบพลังงาน (Energy gap หรือ Band gap; Eg) ที่ไม่มีอิเล็กตรอน แถบพลังงานชั้นในบริเวณที่อยู่ใกล้กับนิวเคลียสของกลุ่มอะตอมจะมีพลังงานต่ำ อะตอมสร้างพันธะระหว่างกันเกิดเป็นโครงสร้างทำให้อิเล็กตรอนไม่สามารถเคลื่อนที่ได้ เรียกว่า แถบวาเลนซ์ (Valence band) ส่วนแถบพลังงานชั้นนอกจะมีพลังงานสูงกว่าและอิเล็กตรอนสามารถเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระเรียกว่า “แถบนำไฟฟ้า (Conduction band)” แบบจำลองแถบพลังงานสามารถนำมาใช้อธิบายสมบัติการนำไฟฟ้าที่แตกต่างกันของสารนำไฟฟ้า (Conductor) เช่น โลหะ (Metal) ฉนวน (Insulator) และวัสดุกึ่งตัวนำ แสดงดังรูปที่ 2.4 แถบวาเลนซ์ (Valence band) และแถบนำไฟฟ้า (Conduction band) ของโลหะจะอยู่ใกล้กันมีช่องว่างระหว่างแถบพลังงานแคบหรือซ้อนทับกัน ฉนวนมีช่องว่างระหว่างแถบพลังงานกว้าง วัสดุกึ่งตัวนำจะมีความกว้างของช่องว่างระหว่างแถบพลังงาน (Energy band) อยู่ระหว่างโลหะและฉนวน (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2557)



รูปที่ 2.4 แบบจำลองแถบพลังงานของโลหะ วัสดุกึ่งตัวนำ และฉนวน



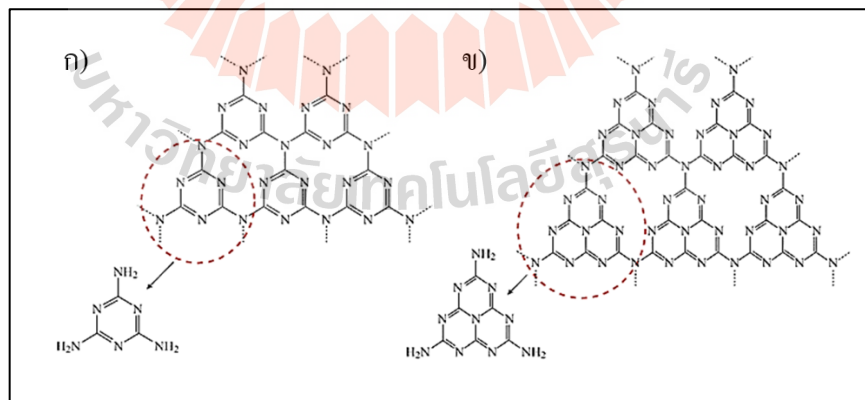
รูปที่ 2.5 ค่าพลังงานที่ขอบบน-ล่าง ของแถบพลังงานของวัสดุกึ่งตัวนำ

(Kumar, Karthikeyan, & Lee, 2018)

จุดเริ่มต้นของกระบวนการเร่งปฏิกิริยาดำเนินการด้วยแสง เริ่มต้นในปี 1972 หลังจากมีการค้นพบไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) โดย Fujishima and Honda ซึ่งได้รับความนิยมเป็นอย่างมาก นำมาใช้เป็นวัสดุกึ่งตัวนำในกระบวนการเร่งปฏิกิริยาดำเนินการด้วยแสงที่สามารถบำบัดน้ำเสียได้ (Fujishima & Honda, 1972) เนื่องจากเป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติในการเร่งปฏิกิริยาดำเนินการด้วยแสง ไม่เป็นพิษ ราคาถูก และมีเสถียรภาพทางเคมี (Demir, 2019) ต่อมาไทเทเนียมไดออกไซด์จึงเป็นที่นิยมใน

การนำมาประยุกต์ใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาดำเนินไปด้วยแสงที่สามารถย่อยสลายมลพิษต่าง ๆ ได้ อย่างไรก็ตามไทเทเนียมไดออกไซด์นั้นก็มีแถบช่องว่างพลังงานที่กว้าง (3.0-3.2 eV) (C. Zhang et al., 2015) และพบข้อจำกัดคือ สามารถใช้งานได้ในแสงยูวีเท่านั้น ไม่สามารถตอบสนองต่อแสงที่มองเห็นได้ ดังนั้นจึงมีการพัฒนาปรับปรุงคุณสมบัติของกระบวนการเร่งปฏิกิริยาดำเนินไปด้วยแสง โดยการลดแถบช่องว่างพลังงานให้แคบลง อย่างไรก็ตามต้องมีการเติมสารตัวอื่นร่วมด้วย เช่น จากงานวิจัยของ (Asahi, Morikawa, Ohwaki, Aoki, & Taga, 2001) ได้เติมสารซัลเฟอร์ (Sulphur doping) ผสมกับไทเทเนียมไดออกไซด์ เพื่อช่วยลดแถบช่องว่างพลังงานให้แคบลง แต่เนื่องจากซัลเฟอร์นั้นมีรัศมีขนาดใหญ่จึงทำให้ไม่สามารถรวมตัวเข้ากับโครงสร้างผลึกของไทเทเนียมไดออกไซด์ได้ ดังนั้นจึงมีการพัฒนาปรับปรุงคุณสมบัติต่อมาเรื่อย ๆ ยกตัวอย่างเช่น การเติมซิลิกา (Silica, SiO₂) หรือกราฟีน (Graphene) เพื่อช่วยลดแถบช่องว่างพลังงานให้แคบลงได้ แต่พบว่ายังมีข้อจำกัดในเรื่องของการทำงานภายใต้แสงยูวีอยู่ ซึ่งไม่สะดวกต่อการใช้งาน

ในช่วงไม่กี่ปีที่ผ่านมาได้ค้นพบวัสดุที่น่าสนใจคือ กราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์ (g-C₃N₄) เป็นวัสดุที่เป็นสัณฐานหนึ่งของสารประกอบคาร์บอนไนไตรด์ วัสดุชนิดนี้ประกอบไปด้วยอะตอมคาร์บอน (C) และไนโตรเจน (N) ที่มีการจัดเรียงตัวเป็นแผ่นและเรียงซ้อนกันคล้ายคาร์บอนกราฟไฟต์โดยที่ในแต่ละแผ่นจะมีลักษณะการต่อเชื่อมโยงกันของหน่วยเล็ก ๆ ดังรูปที่ 2.6 หน่วยเล็ก ๆ ที่ต่อกันเป็นเครือข่าย 2 มิติได้แก่ เอส-ไตรอะซีน (s-triazine) หรือ ไตร-เอส-ไตรอะซีน (tri-s-triazine) ที่เชื่อมต่อกับกลุ่มอะมิโน (Goettmann, Fischer, Antonietti, & Thomas, 2006)



รูปที่ 2.6 การเชื่อมต่อหน่วยย่อยต่าง ๆ ในระนาบ 2 มิติ เพื่อสร้างเป็นแผ่นกราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์ โดยหน่วยเล็ก ๆ ที่เชื่อมต่อกันเป็น (ก) เอส-ไตรอะซีน หรือ (ข) ไตร-เอส-ไตรอะซีน

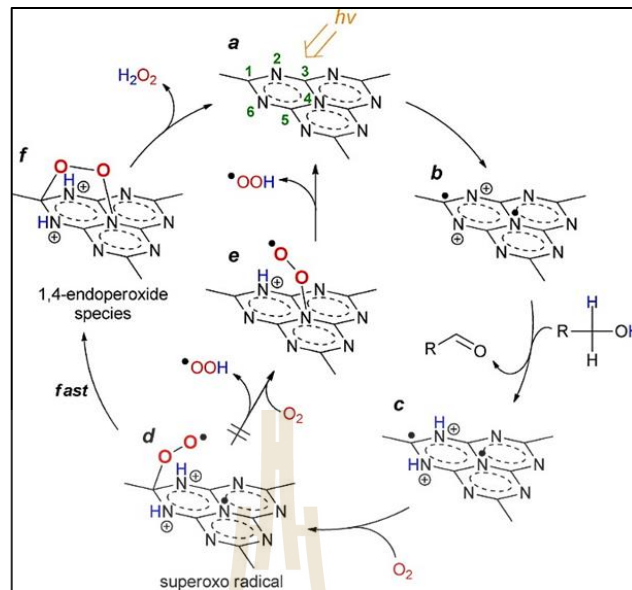
(A. Wang, Wang, Fu, Wong-Ng, & Lan, 2017)

การสังเคราะห์วัสดุกราฟิกคาร์บอนไนไตรด์นั้นทำได้หลากหลายวิธี เช่น กระบวนการเคลือบโดยไอเชิงเคมี (Chemical vapor deposition process: CVD), กระบวนการเคลือบโดยไอเชิงฟิสิกส์ (Physical vapor deposition process: PVD) และกระบวนการใช้ความร้อน (Thermally) (X. Wang et al., 2009) เป็นต้น โดยสารตั้งต้นในการสังเคราะห์วัสดุกราฟิกคาร์บอนไนไตรด์มีหลากหลายและหาได้ง่าย เช่น ไซยานาไมด์ (Cyanamide), เมลามีน (Melamine), ปฏิกริยาการให้ความร้อนแก่ยูเรีย และไดไซยานาไมด์ (Dicyanamide) (Kumar, Surendar, Kumar, Baruah, & Shanker, 2014)

ในปัจจุบันวัสดุกราฟิกคาร์บอนไนไตรด์ได้รับความสนใจอย่างมากเนื่องจากมีสมบัติที่เด่น ๆ เช่น เป็นวัสดุที่มีพื้นที่ผิวสูง, มีความทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงทางเคมีและความร้อนสูง, เป็นวัสดุกึ่งตัวนำที่มีแถบช่องว่างพลังงานที่เหมาะสม (2.7 eV) และมีการตอบสนองต่อแสงที่มองเห็นได้ (Chong, Jin, Chow, & Saint, 2010) ทำให้สามารถนำไปใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเคมีโดยการกระตุ้นด้วยแสงซึ่งเป็นสมบัติที่โดดเด่นกว่าวัสดุคาร์บอนนาโนและกราฟีน ตัวอย่างการใช้งานของกราฟิกคาร์บอนไนไตรด์ ได้แก่ สามารถผลิตไฮโดรเจน ใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการการเร่งปฏิกิริยาได้ สามารถย่อยสลายมลพิษได้ทั้งอินทรีย์และอนินทรีย์ การใช้เป็นตัวเร่งโดยใช้แสงแยกโมเลกุลน้ำในเซลล์เชื้อเพลิง การใช้เป็นเซนเซอร์ของแก๊สชนิดต่าง ๆ และสามารถผลิตไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์ได้ (Hu et al., 2015), (Rahman, Ran, Tang, Jaroniec, & Qiao, 2016)

2.6 กลไกการเกิดกระบวนการการผลิตไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์ (H_2O_2)

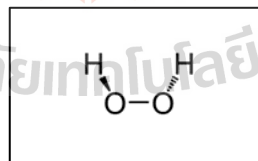
กลไกการเกิดกระบวนการการผลิตไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์ใช้กราฟิกคาร์บอนไนไตรด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา จากรูปที่ 2.7 เมื่อตัวเร่งปฏิกิริยาได้รับพลังงานแสง (ก) ส่งผลทำให้เกิดคู่อิเล็กตรอนและหลุม (Electron-hole pair) (ข) เกิดอิเล็กตรอน (e^-) ขึ้นที่ตำแหน่ง C1 และ N4 ของวงแหวนไตรอะซีน โดยที่หลุม (h^+) จะอยู่ในตำแหน่งที่ N2 และ N6 (Huda & Turner, 2010) (ฃ) อิเล็กตรอนที่ตำแหน่ง C1 และ N4 จะเป็นตำแหน่งที่ออกซิเจนลดลง (ค) เกิดเป็นซูเปอร์ออกไซด์เรดิคัล (ง) และซูเปอร์ออกไซด์เรดิคัลทำปฏิกิริยากับ โปรตอนส่งผลให้เกิดการลดจำนวนอิเล็กตรอนของออกซิเจน ทำให้เกิดเป็นไฮโดรเพอร์ออกไซด์เรดิคัล (OOH) มีสมการดังนี้ $O_2 + H^+ + e^- \rightarrow OOH$ (จ) ในทางกลับกันซูเปอร์ออกไซด์เรดิคัลจะลดลงอย่างรวดเร็วโดยอิเล็กตรอนที่ตำแหน่งพาราของวงแหวนไตรอะซีนจะทำให้เกิด 1,4 Endoperoxide species ขึ้นและตัวให้โปรตอนของเอนโดเพอร์ออกไซด์ (Endoperoxide) จะเป็นตัวที่ผลิตไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์



รูปที่ 2.7 กลไกการเกิดกระบวนการการผลิตไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์บนพื้นผิวของกราฟิติการ์บอนไนไตรด์ (Shiraishi, Kanazawa, Sugano, et al., 2014)

2.7 ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2)

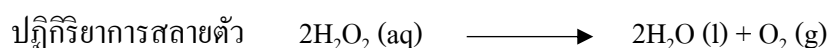
ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ถูกค้นพบเมื่อปี 1818 โดย Louis Jacques Thenard นักเคมีชาวฝรั่งเศส มีสูตรทางเคมีว่า H_2O_2 เป็นสารประกอบเปอร์ออกไซด์ (สารที่ประกอบด้วยออกซิเจนสองตัวและเชื่อมกันเป็นพันธะเดี่ยว) รูปแบบที่ง่ายที่สุด แสดงดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 โครงสร้างทางเคมีของ H_2O_2

มีลักษณะเป็นของเหลวใส ไม่มีสี คล้ายน้ำแต่มีความข้นกว่าน้ำเล็กน้อย ซึ่งสามารถสลายตัวเป็นออกซิเจนกับน้ำ เมื่อเจือจางจะเป็นสารละลายไม่มีสีเนื่องจากไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์สามารถสลายตัวเป็นน้ำได้เมื่อถูกแสงและความร้อนจึงควรเก็บรักษาสารชนิดนี้ไว้ในภาชนะทึบแสง (Krishnan, Berry, Fey, & Wagener, 2006)

นอกจากนี้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ยังเป็นสารฆ่าเชื้อ (Sanitizer) ที่มีฤทธิ์ในการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์และแบคทีเรียโดยปกติไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์จะสลายตัวไปเองอย่างช้า ๆ ซึ่งจะได้ผลิตภัณฑ์เป็นน้ำและแก๊สออกซิเจน โดยมีแสงสว่างและความร้อนจะช่วยเร่งให้เกิดการสลายตัวเร็วขึ้น



ในอดีตไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์จะใช้เป็นยาทารักษาผิวหนังเพื่อยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อโรคหรือเป็นยารักษาแผล เช่น แผลถลอก แผลไหม้ที่ไม่มีอาการรุนแรง เป็นต้น ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เป็นสารประเภท Oxidizing agent จึงมีกลไกการออกฤทธิ์ที่สามารถต่อต้านและยับยั้งการเจริญเติบโตของแบคทีเรีย ยีสต์ และเชื้อไวรัสได้ แต่อย่างไรก็ตามไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์มีฤทธิ์ก่อให้เกิดการระคายต่อเนื้อเยื่อหรือต่อเซลล์ได้ นอกจากนี้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่มีความเข้มข้นมาก ๆ จะมีคุณสมบัติเป็นสารอันตรายที่สามารถระเบิดได้ ถ้าได้รับความร้อนจากภายนอกในปริมาณสูง หากนำยาไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ไปไว้ในที่ที่มีอุณหภูมิสูงจะเกิดการสลายตัวกลายเป็นน้ำและมีการปลดปล่อยออกซิเจนออกมา ซึ่งเป็นสาเหตุของการระเบิดได้

ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ได้รับความนิยมเป็นอย่างมากในการนำมาใช้ประโยชน์ในด้านอุตสาหกรรมอย่างแพร่หลายในการฆ่าเชื้อแบคทีเรียและจุลินทรีย์ เช่น การฆ่าเชื้อในห้องสะอาด ห้องฉุกเฉิน และใช้ในการฆ่าเชื้อเครื่องมือทางการแพทย์ เนื่องจากไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เป็นสารที่เกิดปฏิกิริยาได้อย่างรวดเร็วสลายตัวง่าย ในอดีตจะใช้ Ethylene oxide gas และ Formaldehyde gas ในการกำจัดเชื้อโรค แต่เมื่อเสร็จสิ้นกระบวนการจะเป็นอันตรายต่อระบบทางเดินหายใจทำให้แสบจมูก เกิดการระคายเคืองต่อผิวหนัง ในปัจจุบันจึงหันมาใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์แทน เนื่องจากสามารถฆ่าเชื้อแบคทีเรีย ไวรัส และเชื้อราต่าง ๆ รวมถึงสปอร์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ อีกทั้งกระบวนการอบฆ่าเชื้อด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ใช้เวลาไม่นานนัก เมื่อเสร็จสิ้นกระบวนการจะไม่เหลือสิ่งตกค้างในสิ่งแวดล้อม จึงไม่มีปัญหาการระคายเคืองและไม่มีความเสี่ยงต่อการเป็นมะเร็ง อย่างไรก็ตามไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ต้องมีมาตรการในการควบคุมการใช้ที่ความเข้มข้นไม่เกิน 75 ppm เนื่องจากจะก่อให้เกิดอันตรายต่อสุขภาพได้ ดังนั้นควรควบคุมระดับปริมาณความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ต่ำกว่า 1 ppm ตามมาตรฐานคณะกรรมการองค์การควบคุมของประเทศสหรัฐอเมริกาเป็นผู้กำหนด ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์นอกจากจะใช้ในการฆ่าเชื้อแล้วยังสามารถนำไปประยุกต์ใช้อุตสาหกรรมอื่น ๆ ได้อีกด้วย เช่น อุตสาหกรรมเครื่องหนังและ

เชื้อโรคระบาด อุตสาหกรรมกระดาษสำหรับคุณสมบัติการฟอกขาว อุตสาหกรรมยาและสารเคมี และอุตสาหกรรมบำบัดน้ำเสีย (Edwards, Freakley, Lewis, Pritchard, & Hutchings, 2015)

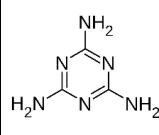
ตารางที่ 2.4 สมบัติโดยทั่วไปของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (Hydrogen peroxide, online)

คุณสมบัติ	
ชื่อโดยทั่วไป	Hydrogen peroxide
ชื่อตามระบบ IUPAC	Dihydrogen dioxide
สูตรโมเลกุล	H ₂ O ₂
จุดเดือด	152 องศาเซลเซียส
จุดหลอมเหลว	-0.43 องศาเซลเซียส
คุณสมบัติ	เป็นของเหลวที่ไม่คงตัว ไม่มีสี

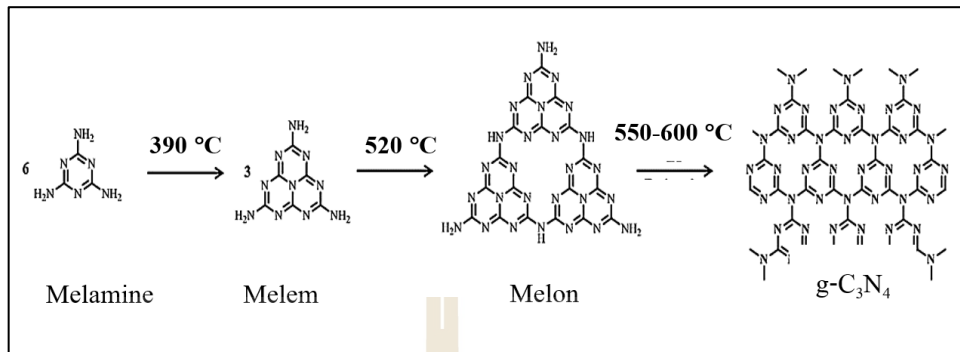
2.8 สารตั้งต้นเมลามีน

สารเมลามีนถูกสังเคราะห์ขึ้นครั้งแรกโดย Liebig ในปี ค.ศ. 1834 เมลามีนเป็นสารอินทรีย์ที่ละลายน้ำได้เล็กน้อย ลักษณะเป็นผงสีขาว สูตรเคมีคือ C₃H₆N₆ มีชื่อทางเคมีว่า 1, 3, 5-triazine-2, 4, 6-triamine ซึ่งเมลามีนเป็นพลาสติกชนิดหนึ่งมีสารฟอร์มัลดีไฮด์เป็นส่วนประกอบ ส่วนใหญ่เมลามีนจะถูกนำมาผลิตพลาสติก, งานเมลามีน, ถุงพลาสติก, พลาสติกสำหรับห่ออาหาร, น้ำยาดับเพลิงคุณภาพดี, น้ำยาทำความสะอาด และปุ๋ย (Sathyanarayana et al., 2019) นอกจากนี้ได้มีการพัฒนานำเมลามีนมาสังเคราะห์เป็นสารกราฟิติกคาร์บอนไนโตรไดร์อีกด้วย เพราะโครงสร้างของเมลามีนมีไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบที่ค่อนข้างสูงประมาณ 66.6 เปอร์เซ็นต์โดยมวล แสดงจากตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของเมลามีน

โครงสร้าง	สูตรเคมี	น้ำหนักโมเลกุล	% ไนโตรเจน	ลักษณะ	จุดหลอมเหลว	อ้างอิง
	C ₃ H ₆ N ₆	126.12 g/mol	66.6%	ผงสีขาว	345-347 °C	(Rovina & Siddiquee, 2015)

2.8.1 กลไกการสังเคราะห์สารกราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์ โดยใช้สารตั้งต้นเมลามีน



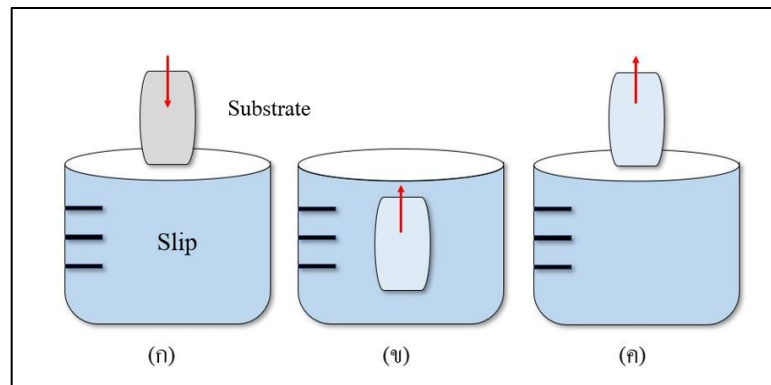
รูปที่ 2.9 กลไกการสังเคราะห์สารกราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์จากสารตั้งต้นเมลามีน

(Sun, Chen, Qi, & Shi, 2015)

เมื่อให้ความร้อนกับสารตั้งต้นเมลามีนจะพบว่าเมื่ออุณหภูมิ 390 องศาเซลเซียส สารตั้งต้นเมลามีนจะเปลี่ยนโครงสร้างไปเป็นเมลเอม (Melem) ต่อมาเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นที่ 520 องศาเซลเซียส จากเมลเอมจะเปลี่ยนโครงสร้างไปเป็นเมลอน (Melon) เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นตั้งแต่ 550-600 องศาเซลเซียส จะเปลี่ยนโครงสร้างไปเป็นกราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์ (g-C₃N₄) และพบว่าเมื่ออุณหภูมิสูงเกิน 650 องศาเซลเซียส จะทำให้กราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์เกิดการสลายตัว ดังรูปที่ 2.9

2.9 กระบวนการเคลือบแบบจุ่ม (Dip coating)

การเคลือบแบบจุ่ม เป็นวิธีการหนึ่งของการประยุกต์ใช้ในการเคลือบผิวของวัสดุ โดยอาศัยหลักการจุ่มเคลือบของเหลวบนพื้นผิววัสดุอย่างช้า ๆ เพื่อให้พื้นผิวของวัสดุมีความสม่ำเสมอ หากต้องการความหนาในการจุ่มเคลือบน้อยๆ ให้ใช้ความเร็วในการจุ่มเคลือบแบบจุ่มเร็ว แต่หากต้องการเคลือบแบบหนามากให้ใช้ความเร็วในการจุ่มแบบช้า ๆ หรือทำการจุ่มหลายครั้ง เพื่อให้มีความหนาเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ความหนาในการจุ่มเคลือบบนพื้นผิวของวัสดุยังขึ้นอยู่กับความหนืดของของเหลวอีกด้วย ดังรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 กระบวนการจุ่มเคลือบ

2.10 วัสดุรองรับการเคลือบ (Coated substrate)

การประยุกต์ใช้งานของกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงเป็นที่นิยมเป็นอย่างมาก ซึ่งเป็นกระบวนการที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม ต้นทุนต่ำ และสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ มีหลายงานวิจัยที่ได้นำกระบวนการนี้มาประยุกต์ใช้โดยนำวัสดุกึ่งตัวนำต่าง ๆ เคลือบบนผิวของวัสดุ เช่น การทำเป็นฟิล์มบางเคลือบบนกระจก เป็นต้น สำหรับงานวิจัยนี้สนใจจะนำตัวเร่งปฏิกิริยากราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์ไปประยุกต์ใช้งาน โดยการเคลือบลงบนพื้นผิวของฟองน้ำที่ทำมาจากวัสดุในลอนซึ่งประกอบด้วยรูพรุนจำนวนมาก เนื่องจากเป็นวัสดุที่หาง่าย ราคาถูก และสามารถขึ้นรูปง่าย โดยที่โครงสร้างของฟองน้ำนั้นโปร่ง ซึ่งช่วยให้ตัวเร่งปฏิกิริยามีพื้นที่ผิวสัมผัสมาก เมื่อทำการฉายแสงด้วยกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงจะช่วยให้แสงสามารถผ่านทะลุตัวฟองน้ำเข้าไปได้หมด

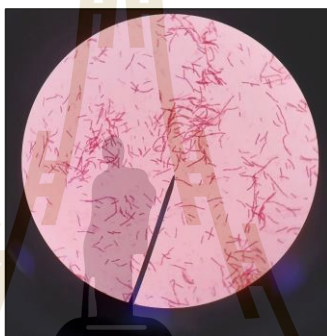


รูปที่ 2.11 ฟองน้ำใช้สำหรับเป็นวัสดุรองรับการเคลือบ

(ที่มา : <http://shop.molycare.com>)

2.11 เชื้อ *Bacillus subtilis*

Bacillus subtilis เป็นเชื้อแบคทีเรียที่สามารถสร้างสปอร์ได้ ในงานวิจัยนี้ที่เลือกเชื้อแบคทีเรียชนิดนี้มา เนื่องจากเป็นเชื้อที่มีความทนทานสูงสุดมากกว่าเชื้อไวรัส ดังนั้นถ้าสามารถฆ่าเชื้อแบคทีเรียชนิดนี้ได้ แสดงว่าจะสามารถฆ่าเชื้อไวรัสได้เช่นกัน ข้อดีของเชื้อนี้คือ ไม่เป็นเชื้อก่อโรค และนำมาใช้ประโยชน์ทางด้านอาหารได้ เช่น การทำนมเปรี้ยว เป็นต้น โดยมีลักษณะเป็นรูปทรงท่อนตรง โดยส่วนใหญ่เคลื่อนที่ได้ สร้างสปอร์ช่วงอุณหภูมิในการเติบโตอยู่ระหว่าง 30-37 องศาเซลเซียส และสามารถเติบโตได้ดีในสภาพที่มีออกซิเจนเป็นจุลินทรีย์ที่อยู่ในสิ่งแวดล้อมเป็นจำนวนมาก ซึ่งส่วนใหญ่แบคทีเรียนี้จะเกิดตามแหล่งน้ำและอาหาร



รูปที่ 2.12 แบคทีเรีย *Bacillus subtilis*

2.12 แนวคิดงานวิจัย

จากปัญหาดังกล่าวผู้วิจัยจึงมีแนวคิดที่จะทำการผลิตไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์โดยใช้กระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง เนื่องจากเป็นวิธีที่มีความประหยัด ต้นทุนต่ำ เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม และสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ ซึ่งจะเลือกใช้วัสดุกึ่งตัวนำที่ไม่เป็นพิษ สามารถผลิตไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ได้ในปริมาณที่สูง และสามารถตอบสนองต่อแสงที่มองเห็นได้ งานวิจัยนี้ใช้สารตั้งต้นเมลามีน โดยใช้วิธีการให้ความร้อน เพื่อสังเคราะห์กราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์ เพื่อใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง ซึ่งเป็นวิธีการที่สะดวกรวดเร็วในการสังเคราะห์ ทำการขึ้นรูปตัวเร่งปฏิกิริยากราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์ด้วยกระบวนการจุ่มเคลือบบนฟองน้ำ ทำการทดสอบประสิทธิภาพในการผลิตไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ และทดสอบประสิทธิภาพการฆ่าเชื้อโรค โดยผู้วิจัยสังเกตเห็นว่า ผลจากการวิจัยและองค์ความรู้ที่ได้จากการศึกษาจะสามารถสังเคราะห์วัสดุกึ่งตัวนำ เพื่อผลิตไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ได้จริง และสามารถนำไปประยุกต์ใช้ให้เกิดประโยชน์ในงานอื่น ๆ ได้

2.13 การทบทวนเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.13.1 สารตั้งต้นในการสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยากราฟิติกคาร์บอนไนโตรด

สารตั้งต้นในการสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยากราฟิติกคาร์บอนไนโตรด สามารถใช้สารตั้งต้นในการสังเคราะห์ได้หลากหลายประเภท ได้แก่ Melamine, Sulfuric-acid-treated-melamine, Sulfur-mixed melamine, Cyanamide, Dicyandiamide, Urea และ Guanidine carbonate ด้วยกระบวนการใช้ความร้อนในการสังเคราะห์ ดังตารางที่ 2.6

ตารางที่ 2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการใช้สารตั้งต้นต่าง ๆ ในการสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยากราฟิติกคาร์บอนไนโตรดด้วยกระบวนการใช้ความร้อนในการสังเคราะห์

สารตั้งต้น	อุณหภูมิและเวลา	แถบพลังงาน (eV)	อ้างอิง
1.Melamine	550-600 °C, 2 ชม.	2.8	(S. Yan, Li, & Zou, 2009)
2.Sulfuric-acid-treated-melamine	600 °C, 4 ชม.	2.69	(H. Yan, Chen, & Xu, 2012)
3.Sulfur-mixed melamine	650 °C, 2 ชม.	2.65	(J. Zhang et al., 2012)
4. Cyanamide	550 °C, 4 ชม.	2.75	(S. Yan et al., 2009)
5.Dicyandiamide	550 °C, 2 ชม.	2.68	(Z. Zhao et al., 2018)
6.Guanidine carbonate	590 °C, 2 ชม.	2.44	(Z. Zhao et al., 2018)
7.Urea	550 °C, 2 ชม.	2.68	(Dong, Wang, Sun, Ho, & Zhang, 2013)

2.13.2 ประสิทธิภาพการผลิตไฮโดรเจนเพอร็อกไซด์ด้วยกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง

จากแนวคิดในการศึกษาการสังเคราะห์วัสดุกราฟิติกคาร์บอนไนโตรด ($g-C_3N_4$) เพื่อนำไปผลิตไฮโดรเจนเพอร็อกไซด์ในกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง มีการศึกษากันอย่างกว้างขวาง โดยจะกล่าวถึงไฮโดรเจนเพอร็อกไซด์ เป็นสารที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในกระบวนการทางชีวภาพและการฟื้นฟูสิ่งแวดล้อมต่าง ๆ (Peng, Shi, Gu, & Deng, 2003) ซึ่งไฮโดรเจนเพอร็อกไซด์เป็นสารต้านอนุมูลอิสระที่มีศักยภาพสูง สามารถย่อยสลายพวกอินทรีย์และอนินทรีย์ได้ เนื่องจากไฮโดรเจนเพอร็อกไซด์ทำปฏิกิริยากับน้ำและออกซิเจนเท่านั้น จึงทำให้เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม และไม่อันตรายต่อสิ่งมีชีวิต

ปัจจุบันกระบวนการผลิตไอโซโครเจนเพอร์ออกไซด์สามารถผลิตได้หลายวิธี เช่น จากรายงานของ (Campos-Martin, 2006) ได้ทำการผลิตไอโซโครเจนเพอร์ออกไซด์ด้วยกระบวนการ Anthraquinone ซึ่งเป็นการผลิตในระดับอุตสาหกรรม โดยมีกระบวนการนี้เป็นการทำงานแบบวัฏจักรที่นำ Alkyl anthraquinone ไปใช้ซ้ำ ซึ่งจะประกอบไปด้วยขั้นตอนดังต่อไปนี้ Hydrogenation, Filtration, Oxidation และ Extraction ตามลำดับ ซึ่งข้อดีของกระบวนการนี้คือสามารถผลิตไอโซโครเจนเพอร์ออกไซด์ได้ในปริมาณที่สูงมากในแต่ละรอบ (Kim, Choi, Hu, Choi, & Kim, 2018) อย่างไรก็ตามกระบวนการนี้มีขั้นตอนที่ต้องใช้พลังงานสูง การทำงานค่อนข้างซับซ้อน ต้นทุนในการผลิตสูง และไม่ค่อยเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมเท่าไรนัก

นอกจากนี้ทางผู้วิจัยเองได้มีโอกาสไปศึกษาดูงานที่บริษัท นำวิวัฒนาการช่าง (1992) จำกัด ซึ่งเป็นบริษัทที่ผลิตเครื่องมือและอุปกรณ์เกี่ยวกับการฆ่าเชื้อโรคในโรงพยาบาล และทางบริษัทได้มอบความรู้เกี่ยวกับกระบวนการผลิตไอโซโครเจนเพอร์ออกไซด์ โดยส่วนใหญ่ไอโซโครเจนเพอร์ออกไซด์นั้น จะสังเคราะห์จากต่างประเทศในรูปแบบของเหลว แล้วนำมาผ่านเครื่องพลาสมาทำให้โมเลกุลแตกกลายเป็นละอองฝอย เพื่อทำให้เกิดเป็นไอออกมา อย่างไรก็ตามกระบวนการนี้ยังมีข้อเสียคือ ของเหลวไอโซโครเจนเพอร์ออกไซด์ต้องมีการสังเคราะห์จากต่างประเทศซึ่งมีราคาแพง และเป็นอันตรายต่อผู้ปฏิบัติงานในกรณีที่ของเหลวไอโซโครเจนเพอร์ออกไซด์เกิดการรั่วซึมออกมา

เมื่อเร็ว ๆ นี้ การผลิตไอโซโครเจนเพอร์ออกไซด์ด้วยกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงได้รับความนิยมเป็นอย่างมาก เนื่องจากกระบวนการนี้เป็นวิธีที่ปลอดภัย เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม และสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ในอดีตที่ผ่านมาการผลิตไอโซโครเจนเพอร์ออกไซด์ด้วยกระบวนการนี้ นิยมใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์และมีการปรับปรุงคุณสมบัติของไทเทเนียมไดออกไซด์ให้มีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น ตัวอย่างเช่น งานวิจัยของ (Tsukamoto et al., 2012) ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับการนำตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ถูกเติมด้วยอนุภาคโลหะผสม (Au-Ag) มาทำการผลิตไอโซโครเจนเพอร์ออกไซด์ด้วยกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง ซึ่งได้ทำการทดสอบโดยใช้ส่วนผสมของเอทานอล/น้ำ และตัวเร่งปฏิกิริยา 5 มิลลิกรัม โดยทำภายใต้แสงยูวี ($\lambda > 280 \text{ nm}$) จากการทดสอบพบว่า ตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ถูกเติมด้วยอนุภาคโลหะผสม (Au-Ag) สามารถผลิตปริมาณไอของไอโซโครเจนเพอร์ออกไซด์ได้ถึง 3.4 mM เมื่อเทียบกับตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ไม่มีการปรับปรุงคุณสมบัติด้วยการเติมอนุภาคโลหะผสมซึ่งพบว่า สามารถผลิตปริมาณไอของไอโซโครเจนเพอร์ออกไซด์ได้เพียง 0.5 mM เท่านั้น

จากงานวิจัยของ (Sahel et al., 2016) ได้ศึกษาการผลิตไอโซโครเจนเพอร์ออกไซด์จากตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์และซิงค์ออกไซด์ โดยทำการทดสอบในเครื่องปฏิกรณ์

แก้วขนาด 1 ลิตร จากนั้นฉายแสงด้วยหลอดไฟยูวี 125 วัตต์ ที่อยู่ภายในเครื่องปฏิกรณ์แก้ว และตัวเร่งปฏิกิริยา 5 กรัมต่อลิตร การทดสอบตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์พบว่า สามารถผลิตปริมาณไอของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ได้น้อยกว่า $0.02 \mu\text{mol/L}$ เท่านั้นและในการทดสอบตัวเร่งปฏิกิริยาซิงค์ออกไซด์พบว่าสามารถผลิตปริมาณไอไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ได้ประมาณ $0.18 \mu\text{mol/L/min}$ ดังนั้นสรุปได้ว่า ตัวเร่งปฏิกิริยาซิงค์ออกไซด์สามารถผลิตปริมาณไอของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ได้มากกว่าไทเทเนียมไดออกไซด์

จากงานวิจัยของ (Rao, Rajeshwar, Verneker, & DuBow, 1980) ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับการผลิตไอไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์ที่แขวนลอยอยู่ในน้ำมาทำการทดลองในปริมาณ 10 กรัม 20 กรัม และ 30 กรัม ภายใต้แสงยูวี พบว่าปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์ที่แขวนลอยอยู่ในน้ำ 30 กรัม สามารถผลิตปริมาณไอไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ได้มากกว่า 10 กรัม และ 20 กรัม ดังนั้นแสดงว่าปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์มีผลต่อการเกิดไอไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

จากงานวิจัยของ (Shiraishi, Kanazawa, Sugano, et al., 2014) ทำการศึกษาการผลิตปริมาณไอของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์จากตัวเร่งปฏิกิริยาต่าง ๆ ด้วยกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง โดยทำการทดสอบจะใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาได้แก่ TiO_2 , Au/TiO_2 , F-TiO_2 , N-TiO_2 , $\text{g-C}_3\text{N}_4$ และ $\text{Pt}_{0.1}/\text{g-C}_3\text{N}_4$ โดยใช้ส่วนผสมเอทานอล/น้ำ (9/1 v/v, 5 mL) ทำการฉายแสงด้วยหลอดไฟซินอน ($\lambda > 420 \text{ nm}$) แล้วทำการกวนผสมที่อุณหภูมิห้อง ดังแสดงในตารางที่ 2.7

ตารางที่ 2.7 การเปรียบเทียบปริมาณความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์จากตัวเร่งปฏิกิริยาต่าง ๆ

Catalyst	H_2O_2 (μmol)	CH_3CHO (μmol)	CH_3COOH (μmol)	CO_2 (μmol)	H_2O_2 selectivity/%
TiO_2	<0.2	83	0.1	3.4	<0.2
Au/TiO_2	3.0	47	N.D.	1.5	6.3
F-TiO_2	<0.2	50	N.D.	1.4	<0.4
N-TiO_2	<0.2	23	N.D.	2.1	<0.8
$\text{g-C}_3\text{N}_4$	30	32	0.7	1.5	90
$\text{Pt/g-C}_3\text{N}_4$	4.2	38	N.D.	1.9	11

ผลจากตารางที่ 2.7 การเปรียบเทียบปริมาณไอของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ จากตัวเร่งปฏิกิริยาที่ต่างกัน ได้แก่ ไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) พบว่า สามารถผลิตปริมาณ ความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์น้อยกว่า $0.2 \mu\text{mol}$ ได้มีการปรับปรุงคุณสมบัติ โดยการเติมสารตัวอื่นกับไทเทเนียมไดออกไซด์ ได้แก่ ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เติมด้วยทอง (Au/TiO_2), ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เติมด้วยฟลูออไรด์ (F-TiO_2) และไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เติมด้วย ไนโตรเจน (N-TiO_2) พบว่า สามารถผลิตปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ได้ $3.0 \mu\text{mol}$, $0.2 \mu\text{mol}$ และ $0.2 \mu\text{mol}$ ตามลำดับ แม้ว่าไทเทเนียมไดออกไซด์จะมีการปรับปรุงคุณสมบัติ แต่สามารถผลิต ปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ได้ค่อนข้างน้อย ซึ่งจากการทดสอบนี้พบว่า กราฟิติกคาร์บอน ไนไตรด์ ($\text{g-C}_3\text{N}_4$) นั้น สามารถผลิตปริมาณของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ได้มากที่สุดถึง $30 \mu\text{mol}$ และนอกจากนี้ได้ทำการปรับปรุงคุณสมบัติกราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์โดยการเติมแพลทินัม ($\text{Pt/g-C}_3\text{N}_4$) พบว่า สามารถผลิตปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ได้ $4.2 \mu\text{mol}$ ซึ่งยังน้อยกว่า ตัวดั้งเดิม

จากงานวิจัยของ (Li et al., 2016) ได้ทำการทดสอบกราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์ โดยการฉายแสงและไม่ทำการฉายแสงพบว่า การทดสอบโดยไม่ทำการฉายแสงนั้น ไม่สามารถผลิต ปริมาณความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ได้ แต่เมื่อทำการฉายแสงไปที่ตัวเร่งปฏิกิริยา ทำให้เกิดการผลิตปริมาณความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ออกมา ดังนั้นการที่จะ ผลิตไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ได้นั้น จะต้องผ่านกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง และพบว่า กราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์สามารถตอบสนองต่อแสงที่มองเห็นได้ดี

นอกจากนี้ยังมีงานวิจัยอีกมากมายได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับตัวเร่งปฏิกิริยากราฟิติก คาร์บอนไนไตรด์สำหรับการผลิตไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ได้แก่ $\text{g-C}_3\text{N}_4/\text{BDI}$, $\text{g-C}_3\text{N}_4/\text{PWO}$, $\text{g-C}_3\text{N}_4/\text{CNTs}$, $\text{g-C}_3\text{N}_4/\text{PDI}$, $\text{g-C}_3\text{N}_4/\text{PDI/rGO}$ และ $\text{g-C}_3\text{N}_4/\text{DCN}$ เป็นต้น ทั้งนี้เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติ ของตัวเร่งปฏิกิริยาในการผลิตปริมาณของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ให้มีประสิทธิภาพ เพิ่มขึ้น ภายใต้แสงที่มองเห็น เพื่อนำไปใช้ให้เกิดประโยชน์ในงานทางด้านต่าง ๆ ได้จริง ผลจาก ตารางที่ 2.8

ตารางที่ 2.8 การเปรียบเทียบการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยากราฟิกคาร์บอนไนไตรด์ต่าง ๆ สำหรับการผลิตไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

ตัวเร่งปฏิกิริยา	ปริมาณ	การทดลอง	H ₂ O ₂ (μmol)	อ้างอิง
g-C ₃ N ₄ /BDI	50 mg	- Pure water 30 mL - λ > 420 nm, Solar simulator 27.3 Wm ⁻²	41 (48 h)	(Kofuji, Ohkita, et al., 2016)
g-C ₃ N ₄ /PWO	0.1 g	- Pure water (100 ml) - λ > 420 nm, 25 °C, Xe lamp 300 W	6.3 (1 h)	(Zhao & Zhao, 2018)
g-C ₃ N ₄ /CNTs	0.1 g	- Acid/water mixture (5/95 v/v, 100 ml) - λ > 400 nm, 25 °C, Xe lamp 300 W	48.7 (1 h)	(S. Zhao et al., 2018)
g-C ₃ N ₄ /PDI	50 mg	- Water 30 mL - λ > 420 nm, Xe lamp	21.08 (48 h)	(Shiraishi, Kanazawa, Kofuji, et al., 2014)
g-C ₃ N ₄ /PDI/rGO	50 mg	- Pure water 30 mL - λ > 420 nm, Xe lamp	29 (24 h)	(Kofuji, Isobe, et al., 2016)
g-C ₃ N ₄ /PDI	50 mg	- Pure water 30 mL - λ > 420 nm, Xe lamp	14 (24 h)	(Kofuji, Isobe, et al., 2016)
g-C ₃ N ₄ /DCN	50 mg	- 60 mL solution containing 20 vol% IPA - λ > 420 nm, sunlight	96 (2 h)	(Shi et al., 2018)

* BDI : Biphenyl diimide, PWO : Polyoxomelalates, CNTs : Carbon nanotubes, PDI : Pyromellitic diimide, rGO : Reduced graphene oxide, DCN : Defective g-C₃N₄

จากการศึกษานวิจัยที่ได้กล่าวมาพบว่า ตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์บริสุทธิ์และที่มีการปรับปรุงคุณสมบัติของไทเทเนียมไดออกไซด์ ยังคงมีข้อจำกัดในเรื่องของการใช้งานภายใต้แสงยูวี ได้ปริมาณความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ต่ำ และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์จะเกิดการสลายตัวได้ง่ายถ้าไม่มีการปรับปรุงคุณสมบัติโดยการเติมสารตัวอื่น ๆ ดังนั้นจึงต้องมีการพัฒนาการผลิตไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงที่สามารถ

ตอบสนองต่อแสงที่มองเห็นได้ และจากข้อมูลในข้างต้นจะเห็นได้ว่า กราฟิติการ์บอนไนไตรด์ มีคุณสมบัติที่สามารถตอบสนองต่อแสงที่มองเห็นได้ สามารถผลิตปริมาณความเข้มข้นของ ไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์ได้อย่างมีประสิทธิภาพเป็นอย่างมากและยังช่วยส่งเสริมการเกิด ไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์ได้เป็นอย่างดี โดยที่ไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์ไม่สลายตัวง่าย เนื่องจาก กราฟิติการ์บอนไนไตรด์มีแถบช่องว่างพลังงานที่เหมาะสม (2.7 eV) มีความทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงทางเคมีและความร้อนสูง



บทที่ 3

วิธีการดำเนินการวิจัย

บทนี้แสดงรายการสารเคมีและเครื่องมือที่ใช้ในการเตรียมการสังเคราะห์วัสดุตัวเร่งปฏิกิริยาค้ำด้วยแสงและการทดสอบปริมาณของไอโซโครเจนเพอร์ออกไซด์ด้วยกระบวนการเร่งปฏิกิริยาค้ำด้วยแสงของชิ้นงาน ซึ่งประกอบไปด้วย วัสดุและสารเคมีที่จำเป็น เครื่องมือและอุปกรณ์การทดลอง เครื่องมือวัดและวิเคราะห์ จากนั้นอธิบายวิธีการทดลองที่ละเอียดขั้นตอนเพื่อต่อการเข้าใจ

3.1 สารเคมี อุปกรณ์ และเครื่องมือวิเคราะห์

ตารางที่ 3.1 สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย

สารเคมี	สูตรเคมี	ผู้ผลิต
เมลามีน (Melamine)	$C_3H_6N_6$	ALDRICH
เอทานอล (Ethanol)	C_2H_5OH	RCL LABSCAN

ตารางที่ 3.2 เครื่องมือ วัสดุ และอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

วัสดุและอุปกรณ์
ถ้วยหลอมอะลูมินา (Alumina crucible)
เตาเผา (Carbolite Kiln)
โกร่งบดสาร (Agate mortar and pestle set)
ชุดกันความร้อน (Heat protection suit)
น้ำกลั่น (Distilled water)
บีกเกอร์ (Beaker)
หลอดไฟ (LED) ขนาด 100 W Day light (6500 K)
ชุดเครื่องกวนสาร (Hotplate Stirrer + Magnetic bar)
เครื่องกวนผสม (Mini Ball mill)
ตู้อบ (Oven)

ตารางที่ 3.2 เครื่องมือ วัสดุ และอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย (ต่อ)

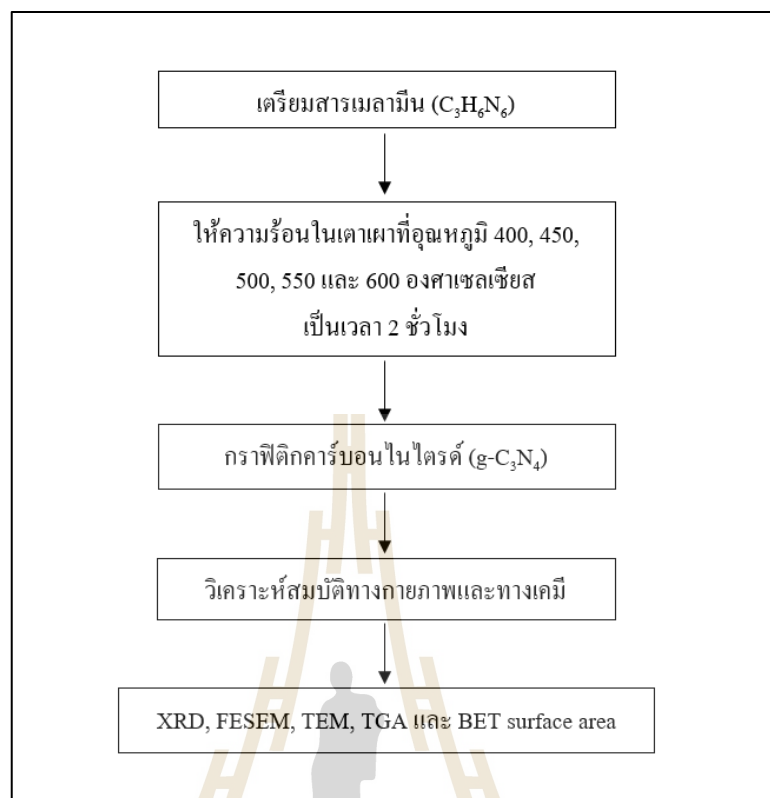
วัสดุและอุปกรณ์
ลูกบดอะลูมินา (Alumina ceramic balls)
ฟองน้ำไนลอนสำหรับรถยนต์ (Sponge nylon)
กล่องดำทึบแสง (Black box)
เครื่องกำเนิด (Generator)

ตารางที่ 3.3 เครื่องมือวิเคราะห์ทดสอบ

เครื่องมือวิเคราะห์ทดสอบ
เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray Diffractometer : XRD) รุ่น D2 PHASER
เครื่องวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนของวัสดุ (Thermogravimetric Analysis : TGA)
เครื่องวัดพื้นที่ผิวจำเพาะ (Brunauer-Emmet-Teller : BET) รุ่น Bel Sorp Mini
เครื่องวัดปริมาณความเข้มข้นของไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์ (Drager X-am 5100)
กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดชนิดฟิลด์อิมิตชันและเอกซเรย์สเปกโตรสโกปีแบบกระจายพลังงาน (Field Emission Scanning Electron Microscope/Energy Dispersive X-ray Spectroscopy : FE-SEM/EDS) รุ่น JEOL/JSM-7800F
กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (Transmission Electron Microscope : TEM) รุ่น FEI/Technai G2 20S-TWIN

3.2 วิธีการทดลอง

สำหรับงานวิจัยนี้ได้แบ่งการทดลองออกเป็น 3 ส่วนหลัก ๆ โดยส่วนแรก คือ การเตรียมวัสดุการสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาจากสารตั้งต้นเมลามีนวิธีการใช้ความร้อนและวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและทางเคมี ดังแผนผังรูปที่ 3.1 ในส่วนที่สองคือ กระบวนการขึ้นรูปตัวเร่งปฏิกิริยากาฟิดิกคาร์บอนไนไตรด์ ($g\text{-C}_3\text{N}_4$) ด้วยกระบวนการจุ่มขึ้นงาน (Dipping process) ดังแผนผังรูปที่ 3.2 และในส่วนที่สามคือ การทดสอบประสิทธิภาพกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงสำหรับการผลิตปริมาณของไอไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์ ซึ่งจะแสดงขั้นตอนการทดลองโดยพอสังเขป ดังแผนผังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.1 แผนผังการเตรียมวัสดุการสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยากราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์

จากแผนผังวิธีการทดลองที่ได้แสดงข้างต้นรูปที่ 3.1 สามารถอธิบายได้อย่างละเอียดดังนี้

3.2.1 การเตรียมวัสดุการสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยากราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์

วิธีการเตรียมผงกราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์จากสารตั้งต้นเมลามีนมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. เตรียมผงเมลามีน 20 กรัม และนำไปใส่ด้วยหลอดอะลูมินา
2. นำด้วยหลอดอะลูมินาหลังจากใส่ผงเมลามีนแล้ว นำเข้าเตาเผาที่อุณหภูมิ 400, 450 500, 550 และ 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง โดยใช้อัตราเพิ่มอุณหภูมิเท่ากับ 10 องศาเซลเซียสต่อนาที



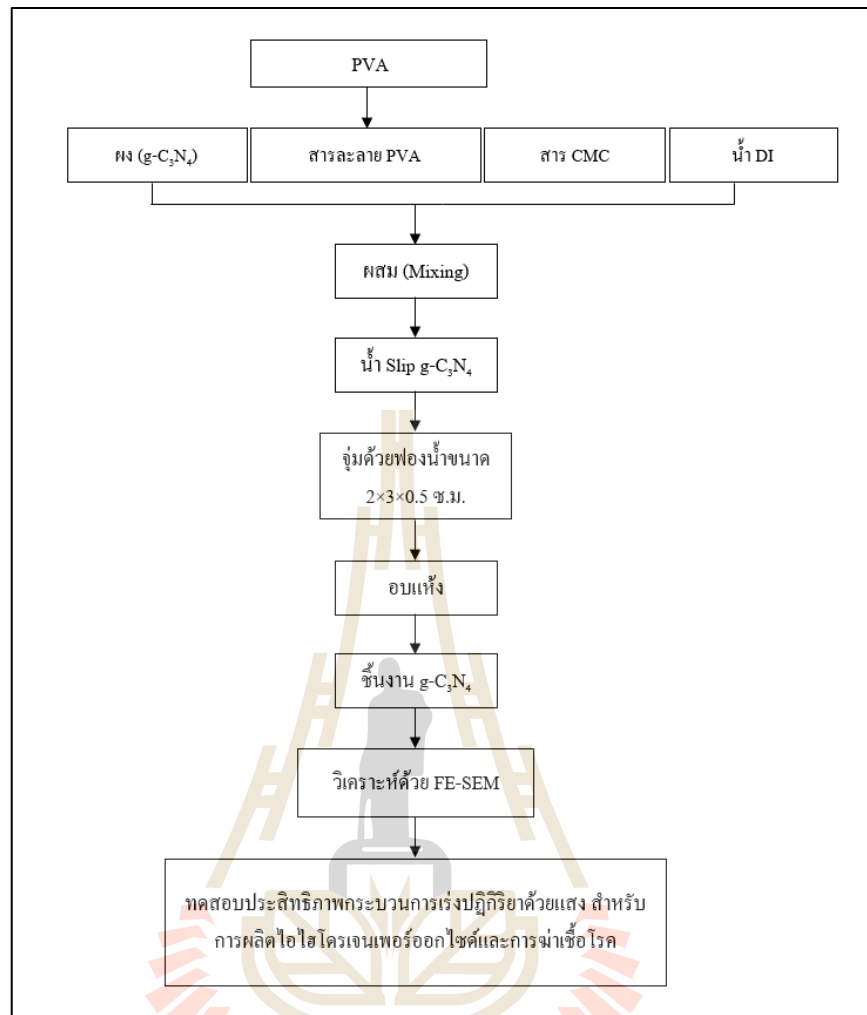
รูปที่ 3.2 นำผงเมลามีนเข้าเตาเผาที่อุณหภูมิต่าง ๆ

3. เมื่อเผาที่อุณหภูมิ 400, 450, 500, 550 และ 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง เมื่อครบตามเวลาที่กำหนด จากนั้นเปิดเตาเผา
4. นำถ้วยหลอมอะลูมินาออกจากเตาเผา ทำการบดผงกราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์ ให้ละเอียด



รูปที่ 3.3 (ก) หลังทำการเผา และ(ข) บดผงกราฟิติกคาร์บอน-ไนไตรด์ให้ละเอียด

5. วิเคราะห์องค์ประกอบทางกายภาพและทางเคมีของผงกราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์ ที่เตรียมได้ด้วยเครื่อง XRD, TGA, BET, FE-SEM/EDS และ TEM



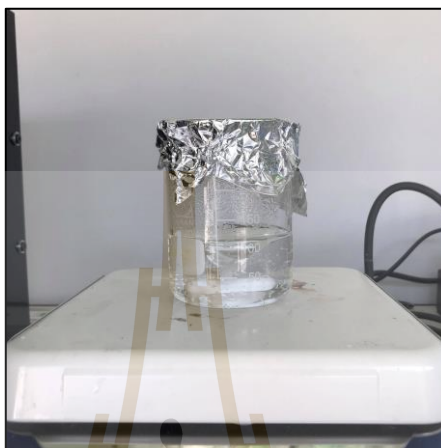
รูปที่ 3.4 แผนผังกระบวนการขึ้นรูปตัวเร่งปฏิกิริยากราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์ ด้วยกระบวนการจุ่มชิ้นงาน (Dipping process)

จากแผนผังวิธีการทดลองที่ได้แสดงข้างต้น ดังรูปที่ 3.4 สามารถอธิบายได้อย่างละเอียดดังนี้

3.2.2 กระบวนการขึ้นรูปตัวเร่งปฏิกิริยากราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์ด้วยกระบวนการจุ่มชิ้นงาน (Dipping)

ขั้นตอนกระบวนการขึ้นรูปตัวเร่งปฏิกิริยากราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์ด้วยกระบวนการจุ่ม มีดังนี้

1. เตรียมโพลีไวนิลแอลกอฮอล์ (PVA) โดยใช้อัตราส่วน PVA 3% โดยน้ำหนัก ทำการละลายด้วยเครื่องกวนสาร (Hotplate Stirrer) ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส โดยใช้ Magnetic bar กวนผสมให้เข้ากัน เป็นเวลา 24 ชั่วโมง



รูปที่ 3.5 ทำการละลาย PVA เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

2. นำผงตัวอย่างกราฟิติกคาร์บอนในไตรด์ปริมาณ 15 กรัม ผสมกับสารละลายโพลีไวนิลแอลกอฮอล์ที่ละลายแล้ว 15 มิลลิลิตร สารคาร์บอนซีเมทิลเซลลูโลส 0.08 กรัม และเตรียมน้ำ DI 20 มิลลิลิตร ทำการกวนผสมด้วยเครื่อง Mini Ball mill เป็นเวลา 24 ชั่วโมง



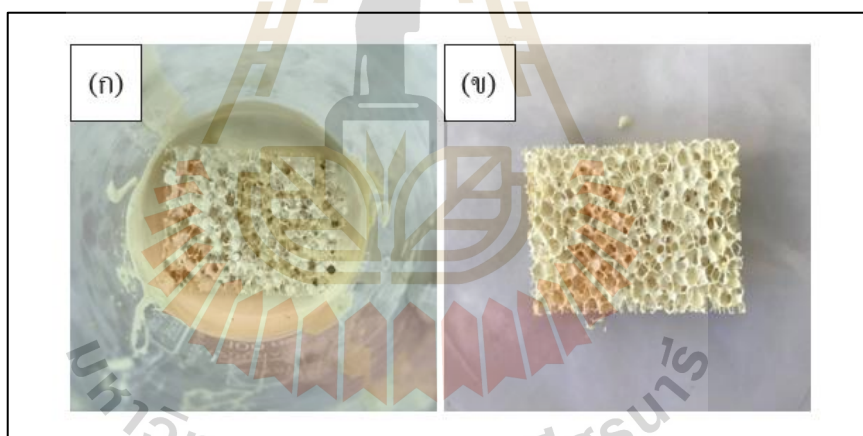
รูปที่ 3.6 กวนผสมสารด้วยเครื่อง Mini Ball mill

3. เมื่อครบเวลาที่กำหนดจะได้น้ำ Slip กราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์



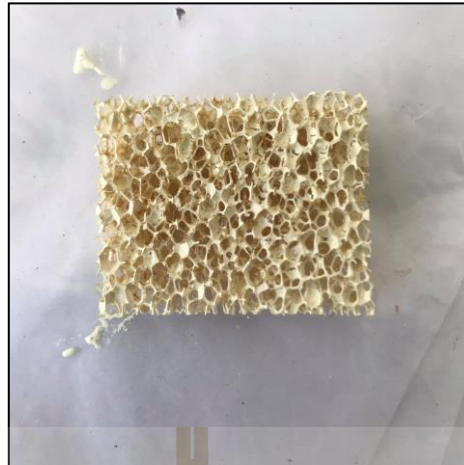
รูปที่ 3.7 น้ำ Slip กราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์

4. นำฟองน้ำขนาด $2 \times 3 \times 0.5$ เซนติเมตร จุ่มลงไปในน้ำ Slip เป็นเวลา 30 วินาที

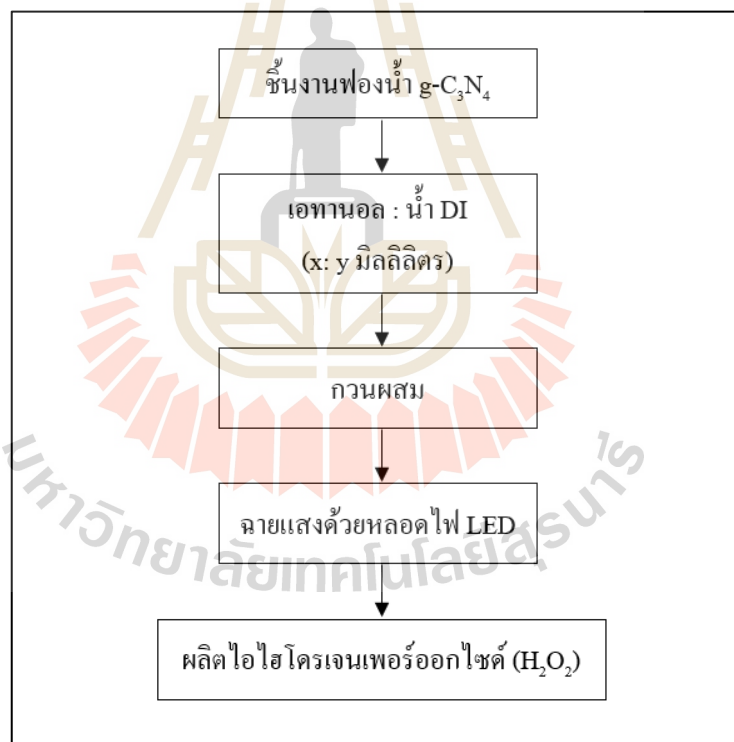


รูปที่ 3.8 (ก) นำฟองน้ำจุ่มในน้ำ Slip และ (ข) หลังการจุ่มน้ำ Slip

5. นำชิ้นงานที่ได้ไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 130 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง
6. จะได้ชิ้นงานกราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์และนำชิ้นงานไปศึกษาโครงสร้างจุลภาคของตัวอย่างกราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์ที่ผ่านการขึ้นรูป และทดสอบประสิทธิภาพปริมาณการผลิตไอไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์



รูปที่ 3.9 ชิ้นงานหลังการอบ



รูปที่ 3.10 แผนผังการทดสอบประสิทธิภาพกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง
สำหรับการผลิตไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

จากแผนผังวิธีการทดลองที่ได้แสดงข้างต้นดังรูปที่ 3.10 สามารถอธิบายได้อย่างละเอียดดังนี้

3.2.3 การทดสอบประสิทธิภาพกระบวนการเร่งปฏิกิริยาดำวยแสง สำหรับการผลิตไอโซโครเจนเพอร์ออกไซด์

การทดสอบนี้จะใช้วัสดุที่ผ่านการขึ้นรูปแล้ว ถูกนำไปทดสอบประสิทธิภาพในการผลิตไอโซโครเจนเพอร์ออกไซด์ ในระดับห้องปฏิบัติการด้วยชุดทดสอบประสิทธิภาพของกระบวนการเร่งปฏิกิริยาดำวยแสง เพื่อหาตัวเร่งปฏิกิริยาดำวยแสงที่ดีที่สุดที่สามารถผลิตไอโซโครเจนเพอร์ออกไซด์ได้ในปริมาณที่สูง

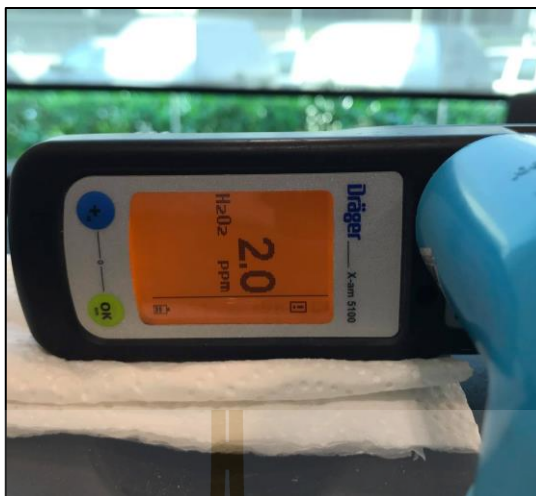
โดยขั้นตอนการทดสอบประสิทธิภาพกระบวนการเร่งปฏิกิริยาดำวยแสง สำหรับการผลิตไอโซโครเจนเพอร์ออกไซด์มีดังนี้

1. นำชิ้นงานฟองน้ำกราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์ใส่ในบีกเกอร์ขนาด 100 มิลลิลิตร
2. จากนั้นนำเอทานอลและน้ำ DI ใส่บีกเกอร์ในอัตราส่วน $x : y$ มิลลิลิตร
3. ทำการกวนผสมด้วยเครื่องกวนสาร จากนั้นทำการทดสอบกระบวนการเร่งปฏิกิริยาดำวยแสง โดยใช้หลอดไฟ LED ($\lambda > 420 \text{ nm}$) ในการฉายแสงไปยังตัวอย่างชิ้นงาน



รูปที่ 3.11 ทำการทดสอบกระบวนการเร่งปฏิกิริยาดำวยแสง

4. จากนั้นทำการทดสอบการผลิตไอโซโครเจนเพอร์ออกไซด์ที่เกิดขึ้นด้วยเครื่องวัดไอโซโครเจนเพอร์ออกไซด์ Drager X-am 5100 และทำการจับเวลา



รูปที่ 3.12 ทดสอบการผลิตไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ด้วยเครื่อง Dräger X-am 5100

3.2.4 การวิเคราะห์สมบัติของวัสดุตัวเร่งปฏิกิริยา

1. การวิเคราะห์เฟสและโครงสร้างผลึกด้วยเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน (X-ray diffraction : XRD) เป็นการศึกษาเกี่ยวกับ โครงสร้างผลึก การจัดเรียงตัวของอะตอมใน โมเลกุลของ สารประกอบต่าง ๆ โดยอาศัยหลักการเลี้ยวเบนและการกระเจิงของรังสีเอ็กซ์ เมื่อลำรังสีตกกระทบ วัตถุจะเกิดการหักเหของลำรังสีที่สะท้อนทำมุมระนาบของวัตถุเท่ากับมุมของลำรังสีตกกระทบ โดยมีหัววัดสัญญาณ (Detector) เป็นตัวรับข้อมูล (ค้นศนีย์ รัก ไทยเจริญชีพ, ออนไลน์) ซึ่งเทคนิคนี้ เป็นประโยชน์ต่อนักวิจัยที่จะนำไปปรับปรุงพัฒนาต่อไป โดยขั้นตอนในการเตรียมวิเคราะห์มีดังนี้

- 1) เตรียมสารตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบ
- 2) นำสารตัวอย่างใส่ใน Sample Holder โดยบริเวณผิวหน้าของตัวอย่างต้อง เรียบสม่ำเสมอ

- 3) นำ Sample Holder ที่มีสารตัวอย่างใส่ในเครื่อง X-ray diffraction

- 4) เครื่องจะทำการยิงรังสีเอ็กซ์ไปกระทบที่ตัวอย่างชิ้นงาน

- 5) เครื่องทำการวิเคราะห์ประมวลผลแสดงเป็นกราฟ XRD pattern

2. การวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวของวัสดุตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยกล้องจุลทรรศน์ อิเล็กตรอนแบบส่องกราดชนิดฟิลด์อิมิสชันและเอกซเรย์สเปคโตรสโคปีแบบกระจายพลังงาน (Field Emission Scanning Electron Microscope : FE-SEM)

เครื่อง FE-SEM ใช้ในการศึกษาโครงสร้างขนาดเล็กระดับจุลภาค เป็นกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนที่มีกำลังขยายสูงถึงระดับ 1,000,000 เท่า ทำให้สามารถศึกษาโครงสร้าง

ขนาดเล็กระดับไมโครหรือนาโนได้ นอกจากนี้ยังเชื่อมต่ออุปกรณ์วิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงาน (Energy Dispersive X-Ray Spectrometer : EDS) ช่วยในการศึกษา ชนิด ปริมาณ และการกระจายขององค์ประกอบธาตุของวัสดุที่ศึกษาได้ ซึ่งจะเห็นได้ว่า FE-SEM เป็นเครื่องมือที่มีความจำเป็นต่อการศึกษาในการวิจัย ด้วยกำลังขยายที่สูง สามารถนำมาประยุกต์ใช้งานได้หลากหลาย และครอบคลุมการศึกษาวิจัยในระดับจุลภาค (ศูนย์ความเป็นเลิศด้านฟิสิกส์, ออนไลน์) โดยมีขั้นตอนการเตรียมวิเคราะห์ด้วยเครื่อง FE-SEM ดังนี้

- 1) ตัวอย่างอยู่ในสถานะของแข็ง เช่น เป็นผง เป็นแผ่น เป็นแท่ง เป็นต้น
- 2) นำตัวอย่างไปติดบนแท่นติดชิ้นงาน (Specimen stub) ให้ใช้ไม้พันสำลีตัดตัวอย่างแล้วเกาะเบา ๆ ให้ผงตัวอย่างกระจายลงบนแท่นติดชิ้นงานที่มีเทปคาร์บอนสองหน้าติดอยู่ไม่ให้เกาะกลุ่มกัน

- 3) จากนั้นใช้ลูกยางเป่าอนุภาคที่ไม่ติดออกไป
- 4) นำไปเคลือบผิวด้วยทองหรือคาร์บอน เพื่อให้ตัวอย่างนำไฟฟ้า (ในกรณีตัวอย่างไม่นำไฟฟ้าต้องผ่านการเคลือบด้วยทองหรือคาร์บอนก่อน หากตัวอย่างมีการนำไฟฟ้าดีตลอดทั้งชิ้นงานจะสามารถนำเข้าเครื่อง FE-SEM ได้ โดยไม่ต้องผ่านการเคลือบ)

- 5) นำตัวอย่างไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง FE-SEM

3. การวิเคราะห์โครงสร้างผลึกและสัณฐานของตัวเร่งปฏิกิริยาคู่ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบทรานสมิSSION (Transmission Electron Microscopy : TEM)

เครื่อง TEM ใช้ศึกษาสิ่งเล็ก ๆ ในระดับนาโนเมตร และเหมาะสำหรับศึกษารายละเอียดขององค์ประกอบภายในตัวอย่าง เช่น ลักษณะของเยื่อหุ้มเซลล์ ผนังเซลล์ เป็นต้น โดยอาศัยหลักการยิงลำอิเล็กตรอนทะลุผ่านตัวอย่างชิ้นงานที่มีความบางมาก ๆ (น้อยกว่า 100 นาโนเมตร) และใช้เลนส์แม่เหล็กในการเบี่ยงเบนลำอิเล็กตรอนเพื่อขยายขนาดวัตถุเข้าสู่จอรับภาพ โดยขั้นตอนการเตรียมวิเคราะห์ด้วยเครื่อง TEM มีดังนี้

- 1) นำผงตัวอย่างมาทำให้เกิดการกระจายตัวในของเหลวตัวกลาง ของเหลวที่นิยมใช้คือ น้ำปราศจากไอออน (DI water) และแอลกอฮอล์

- 2) จากนั้นนำไปเขย่าด้วยคลื่นเสียงความถี่สูง (Sonication) เป็นเวลาประมาณ 15 นาที ซึ่งระยะเวลาและความแรงขึ้นกับสมบัติของผงตัวอย่าง

- 3) หยดตัวอย่างที่อนุภาคกระจายตัวดีแล้วลงบนแผ่นรองรับตัวอย่าง (Grid) และปล่อยให้แห้ง

- 4) จากนั้นจึงนำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง TEM

4. การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนของวัสดุตัวเร่งปฏิกิริยาด้วย Thermogravimetric Analysis (TGA)

TGA เป็นเทคนิคที่ใช้ในการวิเคราะห์ความเสถียรของวัสดุ เมื่อได้รับความร้อนโดยการวัดน้ำหนักของวัสดุที่เปลี่ยนแปลงในแต่ละช่วงอุณหภูมิด้วยเครื่องชั่งที่มีความไวสูง เทคนิคนี้เหมาะสำหรับการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงสภาพของวัสดุที่เกี่ยวข้องกับการดูดซับแก๊สหรือระเหยของน้ำ การตกผลึก (Crystallization) เนื่องจากการเปลี่ยนเฟส การแตกตัวของวัสดุ (Decomposition) และศึกษาการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันและรีดักชัน โดยมีขั้นตอนการวิเคราะห์ดังนี้

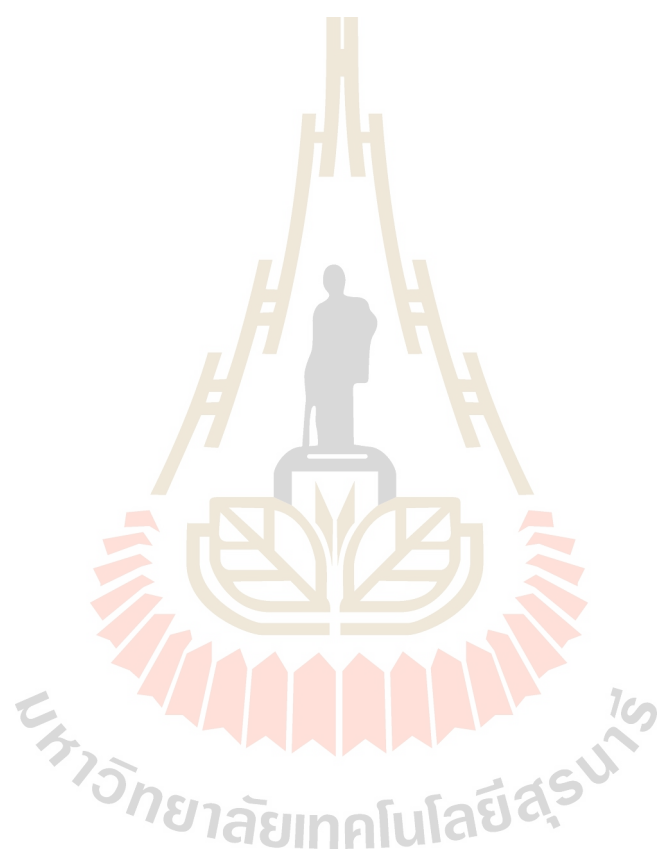
- 1) นำผงตัวอย่างใส่บนจานขนาดเล็กที่เชื่อมต่อกับเครื่องชั่งละเอียดภายในเครื่อง
- 2) ภายในเครื่องจะมีเตาที่สามารถควบคุมอุณหภูมิและบรรยากาศได้ บรรยากาศภายใน เช่น แก๊สไนโตรเจน แก๊สออกซิเจน หรืออากาศ เป็นต้น
- 3) โดยน้ำหนักของตัวอย่างที่เปลี่ยนแปลงจะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิเฉพาะของสารแต่ละชนิด ซึ่งน้ำหนักที่หายไปนั้นเกิดจากการระเหย การย่อยสลาย หรือเกิดปฏิกิริยาต่าง ๆ

5. การวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะของวัสดุตัวเร่งปฏิกิริยา

พื้นที่ผิวจำเพาะของวัสดุ เป็นสมบัติทางกายภาพที่มีความสำคัญสำหรับการนำไปใช้ประกอบการพิจารณาเพื่อนำวัสดุนั้นไปพัฒนาและมีคุณภาพ โดยการใช้เครื่องวิเคราะห์ขนาดพื้นที่ผิวจำเพาะนี้ จะใช้วิธีการวิเคราะห์ไอโซเทิร์มของแก๊สไนโตรเจนที่ถูกดูดซับบนผิวของวัสดุที่อุณหภูมิ 77 เคลวิน หรือ -196 องศาเซลเซียส ขั้นตอนการทดลองมีดังนี้

- 1) ทำการชั่งน้ำหนักวัสดุตัวอย่าง จากนั้นนำไปใส่ใน Sample cell ซึ่งมีจำนวน 2 เซลล์ เซลล์หนึ่งบรรจุวัสดุตัวอย่างที่ต้องการทดสอบพื้นที่ผิวจำเพาะ ส่วนเซลล์ที่สองใช้สำหรับเป็นเซลล์อ้างอิง
- 2) ทำการให้ความร้อนแก่เซลล์ที่บรรจุวัสดุตัวอย่างเพื่อเป็นการไล่ความชื้นออกจากผิวหน้าของวัสดุตัวอย่างและทำให้เซลล์ทั้งสองเป็นสุญญากาศ
- 3) จากนั้นนำเซลล์ทั้งสองผ่านแก๊สไนโตรเจน โดยแก๊สไนโตรเจนที่เข้ามาในเซลล์ที่บรรจุวัสดุตัวอย่างจะถูกดูดซับบนผิวของวัสดุทำให้ความดันภายในเซลล์ที่บรรจุวัสดุตัวอย่างลดลงจนกระทั่งคงที่ (P) โดยข้อมูลที่บันทึกผลคือค่าความดันสัมพัทธ์ (P/P_0)
- 4) เครื่องจะทำการปล่อยแก๊สไนโตรเจนเข้ามาอีกครั้ง และแก๊สไนโตรเจนถูกดูดซับจนความดันคงที่อีกเช่นเดิม จนกระทั่งความดันภายในเซลล์ที่บรรจุวัสดุตัวอย่างไม่ลดลง แสดงว่าไม่เกิดการดูดซับแก๊สแล้ว

5) เครื่องทำการประมวลผลโดยใช้โปรแกรมตามสมการ BET แสดงผลออกมาเป็น ค่าพื้นที่ผิวจำเพาะและปริมาตรรูพรุน



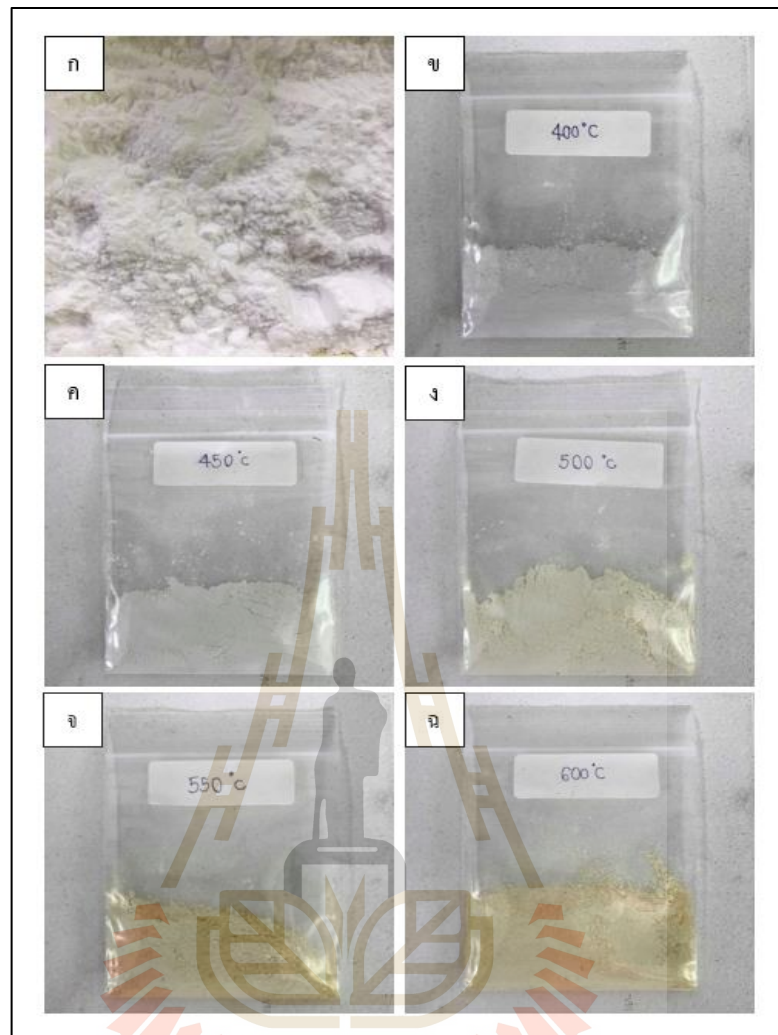
บทที่ 4

ผลการทดลองและการอภิปรายผล

บทนี้จะนำเสนอผลการทดลองและการอภิปรายผลสมบัติของการสังเคราะห์กราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์จากสารตั้งต้นเมลามีนด้วยวิธีการใช้ความร้อนที่อุณหภูมิแตกต่างกัน เพื่อใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงที่สามารถใช้งานภายใต้แสงที่มองเห็นได้ ผลของอุณหภูมิที่ใช้ในการสังเคราะห์กราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์ที่มีสมบัติที่เหมาะสมในการผลิตไอโซโครเจนเพอร์ออกไซด์ทดสอบประสิทธิภาพการผลิตไอโซโครเจนเพอร์ออกไซด์ด้วยกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงและการทดสอบประสิทธิภาพการฆ่าเชื้อโรคของไอโซโครเจนเพอร์ออกไซด์ที่ได้จากตัวเร่งปฏิกิริยากราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์

4.1 การสังเคราะห์กราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์จากสารตั้งต้นเมลามีน

ในงานวิจัยนี้ศึกษาการเตรียมการสังเคราะห์กราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์จากสารตั้งต้นเมลามีนด้วยวิธีการใช้ความร้อน เพื่อใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาสำหรับการผลิตไอโซโครเจนเพอร์ออกไซด์ โดยได้ทำการศึกษาการสังเคราะห์สารตั้งต้นเมลามีนที่อุณหภูมิต่าง ๆ คือ 400, 450, 500, 550 และ 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ซึ่งลักษณะของสารที่ผ่านการสังเคราะห์ แสดงในรูปที่ 4.1 พบว่าลักษณะสีของสารเมลามีนหลังจากการเผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เริ่มเปลี่ยนจากสีขาวกลายเป็นสีเหลืองอ่อน ส่วนที่อุณหภูมิ 550 และ 600 องศาเซลเซียส นั้นจะเห็นได้ว่าลักษณะของสีนั้นเปลี่ยนไปเป็นสีเหลืองเข้มอย่างชัดเจน ซึ่งคาดว่าน่าจะเป็นสีของกราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์อย่างสมบูรณ์ โดยผลการวิเคราะห์จะแสดงในลำดับต่อไป

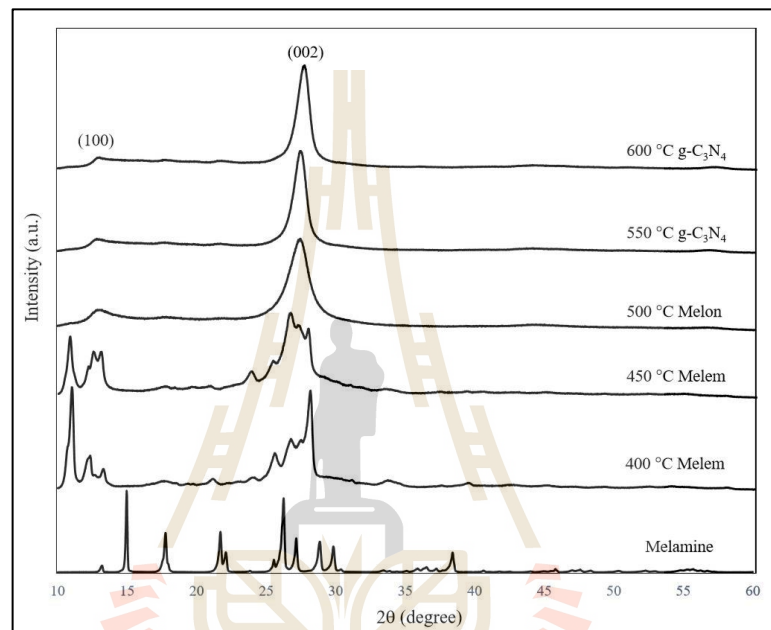


รูปที่ 4.1 ผลกราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์สังเคราะห์จากสารตั้งต้นเมลามีนที่อุณหภูมิต่าง ๆ (ก) สารเมลามีน (ข) 400 °C (ค) 450 °C (ง) 500 °C (จ) 550 °C และ (ฉ) 600 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

4.2 ผลการวิเคราะห์วัฏภาคของวัสดุกราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์ที่ผ่านการสังเคราะห์ที่อุณหภูมิต่างกัน

จากผลการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของกราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์จากสารตั้งต้นเมลามีนที่เตรียมได้ทั้งหมดด้วยเทคนิค X-ray Diffraction (XRD) พบว่า รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของสารตั้งต้นเมลามีนหลังการเผาที่อุณหภูมิ 400, 450, 500, 550 และ 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง แสดงผลดังรูปที่ 4.2 จะเห็นได้ว่าโครงสร้างผลึกของเมลามีนปรากฏรูปแบบแสดงจุดยอด (Peak) ที่ชัดเจน เมื่ออุณหภูมิที่ 400 และ 450 องศาเซลเซียส จะปรากฏรูปแบบแสดงจุดยอดใหม่

ซึ่งค่อนข้างกว้างขึ้นจากเดิม และเกิดการเปลี่ยนโครงสร้างจากเมลามีนเป็น โครงสร้างของ Melem ส่วนอุณหภูมิที่ 500 องศาเซลเซียส เกิดการเปลี่ยนโครงสร้างจาก Melem เป็นโครงสร้างของ Melon และที่อุณหภูมิ 550 และ 600 องศาเซลเซียส จะเกิดการเปลี่ยนโครงสร้างเป็นกราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์ ซึ่งปรากฏรูปแบบแสดงจุดยอดที่ $2\theta = 12.9^\circ$ และ 27.2° ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ (S. Yan, Li, & Zou, 2009)



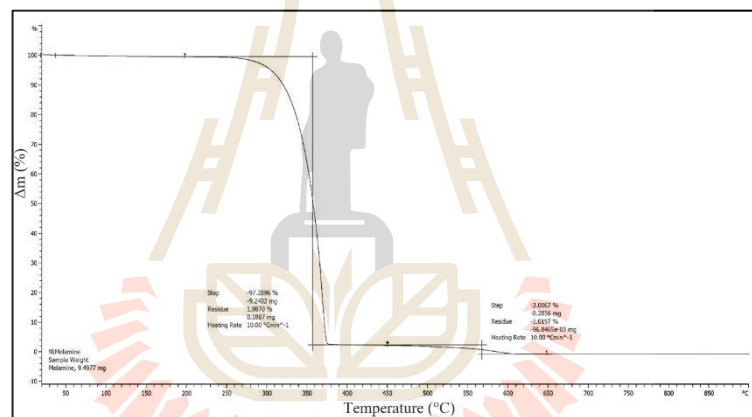
รูปที่ 4.2 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (X-ray Diffraction : XRD) ของกราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์ จากสารตั้งต้นเมลามีนหลังการเผาที่อุณหภูมิต่าง ๆ

ซึ่งสามารถสรุปได้ว่า โครงสร้างจะมีการเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิของการสังเคราะห์ ส่วนลักษณะสีของวัสดุขึ้นอยู่กับอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาเท่านั้น โดยจะไม่ขึ้นกับปัจจัยอื่น ๆ นอกจากนี้พบว่า อุณหภูมิที่ 600 องศาเซลเซียส จะเกิดโครงสร้างของกราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์ อย่างสมบูรณ์

4.3 ผลการศึกษาสมบัติทางความร้อนของสารตั้งต้นเมลามีน

จากการทดสอบการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของสารตั้งต้นเมลามีน โดยอาศัยคุณสมบัติทางความร้อนด้วยเครื่องเทอร์โมกราวิเมตริก โดยลักษณะตัวอย่างเป็นผงสีขาวบรรจุในถ้วยใส่ตัวอย่าง อะลูมินาปริมาณ 9.5 มิลลิกรัม ซึ่งทดสอบที่อุณหภูมิตั้งแต่ 20-900 องศาเซลเซียส ดังรูปที่ 4.3 พบว่า

ผลการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักเมื่อได้รับความร้อนของสารตั้งต้นเมลามีน เกิดขึ้นในช่วงอุณหภูมิ ประมาณ 180-450 องศาเซลเซียส โดยในช่วงนี้มีการสูญเสียน้ำหนัก 97.29 เปอร์เซ็นต์ แสดงว่า เมลามีนเกิดการระเหยและมีการควบแน่นเกิดขึ้น จึงทำให้เกิดโครงสร้างของ Melem ($C_6N_{10}H_6$) ที่อุณหภูมิ 400-450 องศาเซลเซียส ซึ่งจากงานวิจัยของ (Sattler, 2009) ได้กล่าวว่า โครงสร้างของ Melem จะเกิดขึ้นเมื่อเกิดการควบแน่น โมเลกุลของเมลามีนที่อุณหภูมิสูงกว่า 300 องศาเซลเซียส เมื่ออุณหภูมิที่ 500 องศาเซลเซียส โครงสร้างของ Melem จะเกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างเป็น Melon ($C_6N_8H_2$) และเมื่ออุณหภูมิสูงกว่า 550-600 องศาเซลเซียส จะเกิดโครงสร้างของกราฟิติก คาร์บอนไนไตรด์ นอกจากนี้ยังพบว่า เมื่อทำการเพิ่มอุณหภูมิถึง 650 องศาเซลเซียส กราฟิติก คาร์บอนไนไตรด์จะเกิดการสลายตัว ซึ่งจากผลการวิเคราะห์ที่กล่าวในข้างต้นนี้ สอดคล้องกับการวิเคราะห์ผลของ XRD

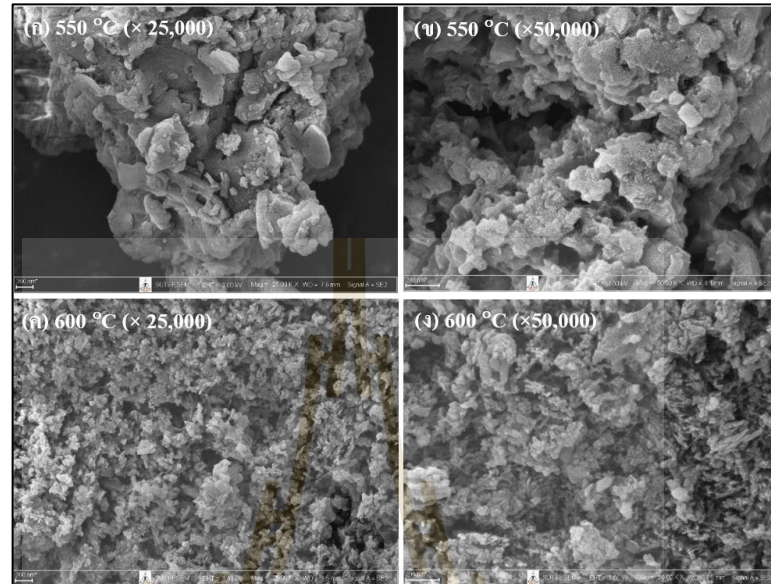


รูปที่ 4.3 การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของสารตั้งต้นเมลามีน

4.4 ผลการศึกษาโครงสร้างทางจุลภาคของตัวเร่งปฏิกิริยากราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์

จากผลการศึกษาโครงสร้างทางจุลภาคของตัวเร่งปฏิกิริยากราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์ที่ผ่านการสังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 550 และ 600 องศาเซลเซียส ด้วยเครื่อง Field Emission Scanning Electron Microscope (FE-SEM) ดังรูปที่ 4.4 (ก,ข) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยากราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์ที่ผ่านการสังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส จะเห็นได้ว่ากราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์ที่ได้จากการเตรียมด้วยวิธีการใช้ความร้อน จะเห็นว่าขนาดอนุภาคมีการรวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อน และมีโครงสร้างแบบ Lamellar และรูปที่ 4.4 (ค,ง) ตัวเร่งปฏิกิริยากราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์ที่ผ่านการสังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส มีขนาดอนุภาคขนาดเล็กเป็นจำนวนมาก มีโครงสร้างลักษณะเป็นแผ่น

บางชั้นเป็นชั้น ๆ สิ่งที่สังเกตได้คือ ขนาดอนุภาคเกิดการรวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อนกลมหรือเรียกว่า การ Agglomerates เนื่องจากมีอนุภาคขนาดเล็กจำนวนมากรวมกันทำให้อนุภาคมีขนาดใหญ่ขึ้น

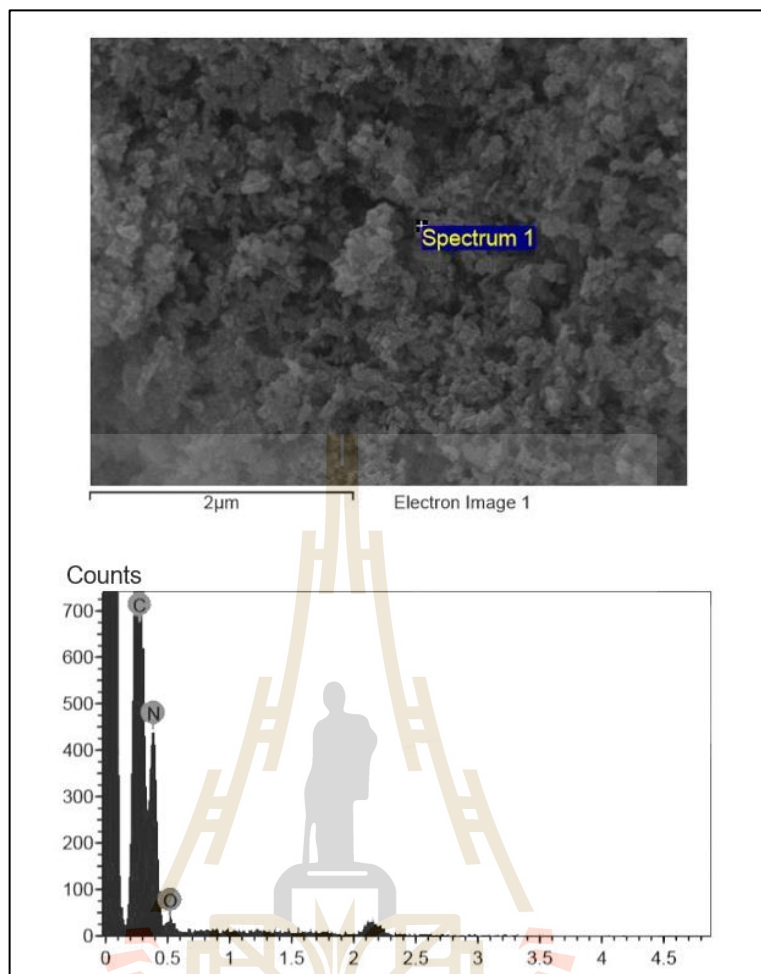


รูปที่ 4.4 โครงสร้างทางจุลภาคของตัวเร่งปฏิกิริยากราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์

(ก) และ (ข) ตัวเร่งปฏิกิริยา $g\text{-C}_3\text{N}_4$ 550 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

(ค) และ (ง) ตัวเร่งปฏิกิริยา $g\text{-C}_3\text{N}_4$ 600 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

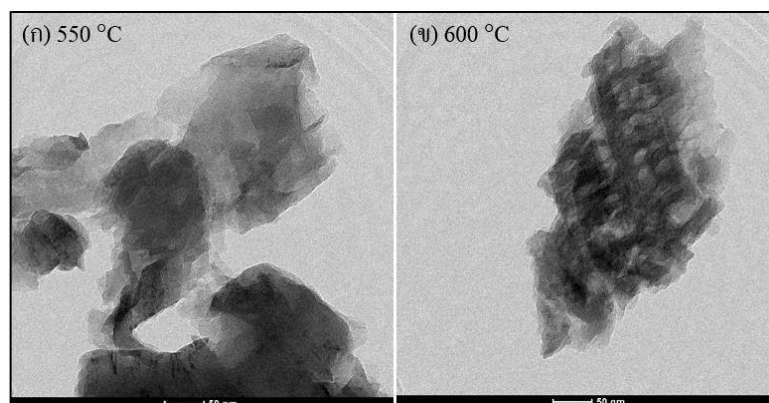
จากผลการวิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงาน Energy Dispersive X-Ray Spectrometer (EDS) เพื่อยืนยันองค์ประกอบของกราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์ จากภาพ FESEM ในรูปที่ 4.5 ซึ่งพบอะตอมของคาร์บอน, ไนโตรเจน และออกซิเจนของตัวเร่งปฏิกิริยากราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์



รูปที่ 4.5 การวิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงาน (EDS) ของตัวเร่งปฏิกิริยากาฟิดิกคาร์บอนไนไตรด์

4.5 ผลการศึกษาโครงสร้างและลักษณะของตัวเร่งปฏิกิริยากาฟิดิกคาร์บอนไนไตรด์

จากผลการศึกษาโครงสร้างและลักษณะของตัวเร่งปฏิกิริยากาฟิดิกคาร์บอนไนไตรด์ ที่ผ่านการสังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 550 และ 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ด้วยเครื่อง Transmission Electron Microscopy (TEM) ดังรูปที่ 4.6 ก) ตัวเร่งปฏิกิริยากาฟิดิกคาร์บอนไนไตรด์ ที่ผ่านการสังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส จะเห็นได้ว่ากาฟิดิกคาร์บอนไนไตรด์ โครงสร้างเกิดการรวมกันเป็นกลุ่ม และรูปที่ 4.6 ข) ตัวเร่งปฏิกิริยากาฟิดิกคาร์บอนไนไตรด์ ที่ผ่านการสังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส แสดงให้เห็นว่ากาฟิดิกคาร์บอนไนไตรด์มีลักษณะเป็นแผ่นนาโน (Nanosheets) โครงสร้างเป็นแผ่นบาง ๆ ซ้อนทับกันเป็นชั้น โดยที่กาฟิดิกคาร์บอนไนไตรด์มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยประมาณ 50 นาโนเมตร ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ (Praus, P., Svoboda, 2017)



รูปที่ 4.6 ภาพจาก TEM แสดงโครงสร้างและสัณฐานของตัวเร่งปฏิกิริยากราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์
 (ก) ตัวเร่งปฏิกิริยากราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์ที่อุณหภูมิ 550 °C เป็นเวลา 2 ชม.
 (ข) ตัวเร่งปฏิกิริยากราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์ที่อุณหภูมิ 600 °C เป็นเวลา 2 ชม.

4.6 ผลการวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะของวัสดุตัวเร่งปฏิกิริยากราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์

จากการวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยเทคนิค BET (Brunauer Emmett teller) โดยเตรียมผงตัวเร่งปฏิกิริยากราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์ที่อุณหภูมิ 550 และ 600 องศาเซลเซียส ทำการเตรียมปริมาณผงตัวเร่งปฏิกิริยาให้มีน้ำหนักประมาณ 0.1 ถึง 0.3 กรัม บรรจุลงในหลอดใส่ตัวอย่าง อบไล่แก๊สที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง ดังตารางที่ 4.1

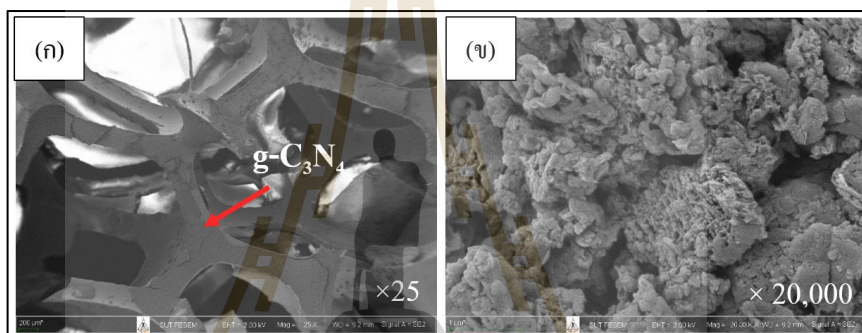
ตารางที่ 4.1 ค่าพื้นที่ผิวจำเพาะและปริมาตรรูพรุนของตัวเร่งปฏิกิริยากราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์

ตัวอย่างชิ้นงาน	พื้นที่ผิวจำเพาะ (m ² /g)	ปริมาตรรูพรุน (cm ³ /g)
g-C ₃ N ₄ 550 °C	4.66	0.81
g-C ₃ N ₄ 600 °C	20.24	2.72

ผลของค่าพื้นที่ผิวจำเพาะของตัวเร่งปฏิกิริยากราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์แสดงให้เห็นว่าที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส มีค่าพื้นที่ผิวจำเพาะและปริมาตรรูพรุนมากกว่าที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส เนื่องจากอุณหภูมิการสังเคราะห์ที่สูงทำให้เกิดโครงสร้างผลึกของกราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์มากกว่า ซึ่งเป็นไปตามผลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD ซึ่งปรากฏรูปแบบแสดงจุดยอดของโครงสร้างอย่างเห็นได้ชัด และสอดคล้องกับงานวิจัยของ (Praus, P., Svoboda, 2017)

4.7 ผลการศึกษาโครงสร้างทางจุลภาคของตัวเร่งปฏิกิริยากราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์ที่ผ่านการขึ้นรูปด้วยกระบวนการจุ่มบนฟองน้ำ

จากผลการศึกษาโครงสร้างทางจุลภาคของตัวเร่งปฏิกิริยากราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์ที่ผ่านการขึ้นรูปด้วยกระบวนการจุ่มบนฟองน้ำ ดังรูปที่ 4.7 (ก) แสดงให้เห็นว่ากราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์สามารถติดอยู่บนพื้นผิวของฟองน้ำได้เป็นอย่างดี และรูปที่ 4.7 (ข) เมื่อทำการเพิ่มกำลังขยาย 20,000 เท่า จะเห็นได้ว่ามีลักษณะของโครงสร้างเป็นแผ่นเรียงซ้อนกันเป็นชั้น ๆ และขนาดอนุภาคเกิดการรวมตัวกันเป็นขนาดใหญ่ เนื่องจากประกอบด้วยผลึกของกราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์เป็นจำนวนมาก

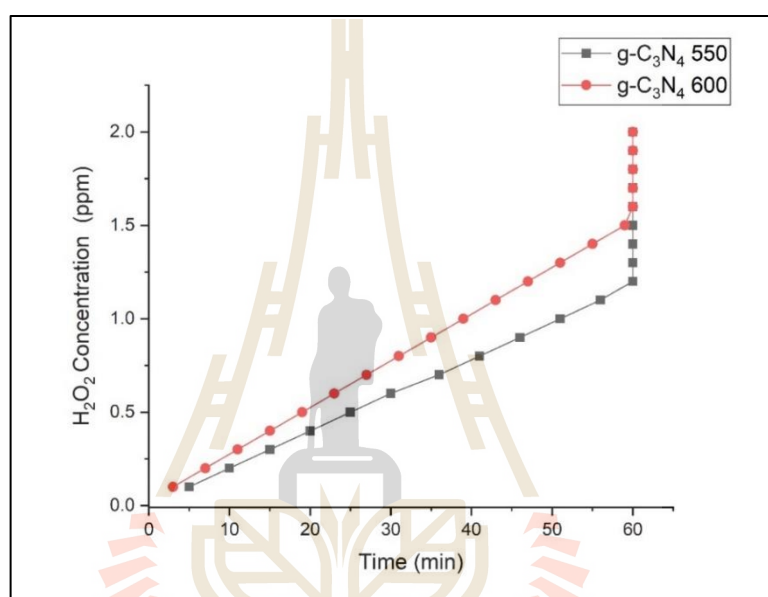


รูปที่ 4.7 โครงสร้างทางจุลภาคของตัวเร่งปฏิกิริยากราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์ที่ผ่านการขึ้นรูปด้วยวิธีการจุ่มบนฟองน้ำ (ก) กราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์ติดบนพื้นผิวของฟองน้ำที่กําลังขยาย 25 เท่า และ (ข) เพิ่มกําลังขยาย 20,000 เท่า

4.8 ผลการทดสอบประสิทธิภาพกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงสำหรับการผลิตไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

ประสิทธิภาพการผลิตไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ด้วยกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงเป็นเวลา 1 ชั่วโมง ของตัวเร่งปฏิกิริยากราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์ที่ผ่านการขึ้นรูปด้วยกระบวนการจุ่มบนพื้นผิวของฟองน้ำ จากผลการศึกษาดังรูปที่ 4.8 โดยทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการผลิตไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ของตัวเร่งปฏิกิริยากราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์ที่ผ่านการสังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 550 และ 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง โดยผ่านกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงพบว่า เมื่อทำการทดสอบทั้ง 2 ชิ้นงาน จะแสดงให้เห็นได้ว่าเมื่อเวลาเพิ่มขึ้นความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์จึงเพิ่มขึ้นด้วยเช่นกัน และสามารถผลิตปริมาณความเข้มข้นของ

ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ได้ถึง 2 ppm ภายในเวลา 1 ชั่วโมง แต่อย่างไรก็ตามพบว่า ตัวเร่งปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส สามารถผลิตไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ได้เร็วกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส เนื่องจากตัวเร่งปฏิกิริยาอุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส มีโครงสร้างของ กราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์มากกว่า แสดงให้เห็นว่าตัวเร่งปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส มีประสิทธิภาพในการผลิตไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์และสามารถตอบสนองต่อแสงที่มองเห็นได้เป็นอย่างดี

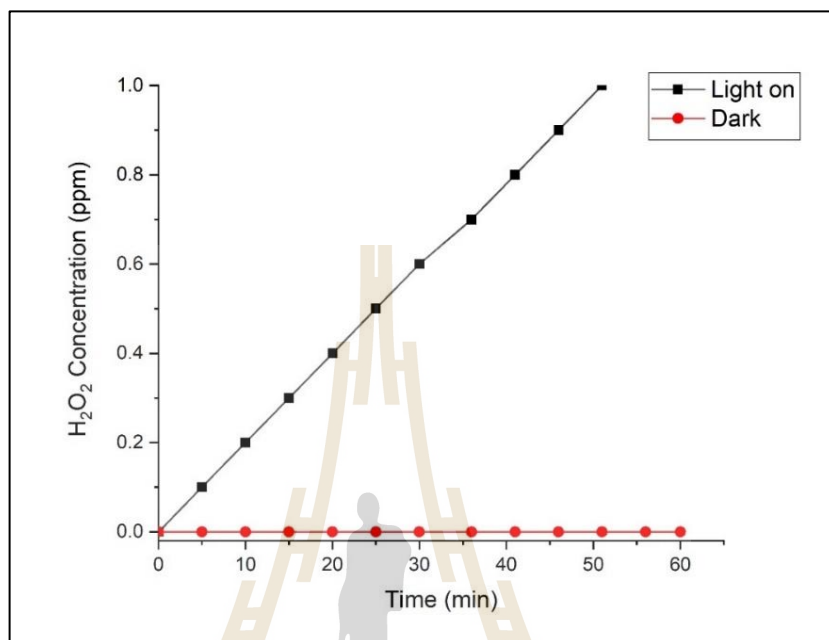


รูปที่ 4.8 ผลการทดสอบประสิทธิภาพการผลิตไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ด้วยกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง

4.9 ผลการทดสอบประสิทธิภาพกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงสำหรับการผลิตไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ โดยทำการฉายแสงและไม่ฉายแสง

จากการทดสอบประสิทธิภาพกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงสำหรับการผลิตไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ โดยทำการฉายแสงและไม่ฉายแสงไปยังตัวเร่งปฏิกิริยากราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์ แสดงดังรูปที่ 4.9 เมื่อทำการฉายแสงภายใต้การรับแสงด้วยหลอดไฟ LED ($\lambda > 420$ nm) ไปยังตัวเร่งปฏิกิริยาพบว่า ภายในเวลา 5 นาที จะเริ่มเกิดการผลิตไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ได้ 0.1 ppm และเมื่อเวลาผ่านไปยังสามารถผลิตไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ได้เพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ จนถึง 1 ppm

และเมื่อทำการทดสอบตัวเร่งปฏิกิริยาไม่ฉายแสงพบว่า ไม่สามารถผลิตไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ได้ ซึ่งแสดงให้เห็นได้ว่า แสงมีผลต่อการเกิดปริมาณความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

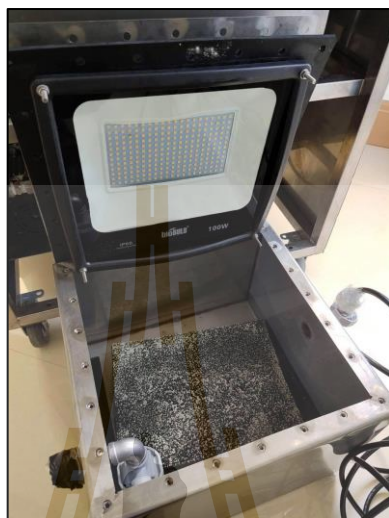


รูปที่ 4.9 ผลการทดสอบประสิทธิภาพกระบวนการเร่งปฏิกิริยาคด้วยแสง โดยทำการฉายแสงและไม่ฉายแสง

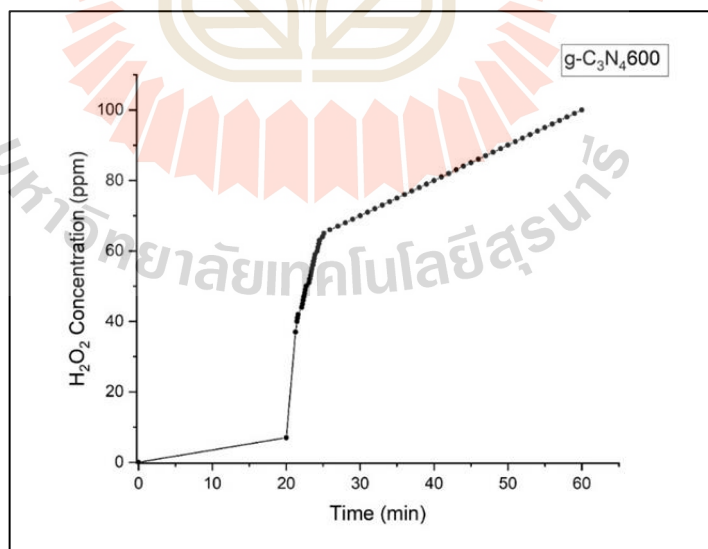
4.10 การทดสอบประสิทธิภาพกระบวนการเร่งปฏิกิริยาคด้วยแสงสำหรับการผลิตไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ โดยทำการทดสอบในเครื่องกำเนิดไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

การทดสอบประสิทธิภาพการผลิตไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ด้วยเครื่องกำเนิด ดังรูปที่ 4.10 งานวิจัยนี้ได้ทำการขยายสเกลงานให้ใหญ่ขึ้น โดยนำตัวเร่งปฏิกิริยากราฟิติการ์บอนไนไตรด์ ที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส มาทำการทดสอบในเครื่องกำเนิด ภายในเครื่องจะมีส่วนผสมของเอทานอลและน้ำกลั่นในอัตราส่วน $x : y$ มิลลิลิตร ใช้หลอดไฟ LED 100 วัตต์ เมื่อทำการทดสอบพบว่า ในช่วงแรกของการทดสอบจะเกิดไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ค่อนข้างช้า เนื่องจากความเข้มข้นที่ตัว Sensor ตรวจจับกับความเข้มข้นที่อยู่ภายในตู้ นั้นไม่เท่ากัน จึงทำให้ต้องใช้เวลาในการเกิดไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ เมื่อเวลาผ่านไป 20 นาที จะเกิดไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์อยู่ที่ 7 ppm พอเวลาผ่านไป 21 นาที จะเกิดไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์อยู่ที่ 37 ppm ตั้งแต่ช่วง 21 นาที เป็นต้นไป จะเกิดไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์อย่างรวดเร็วและเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ จนถึงระยะเวลา 60 นาที

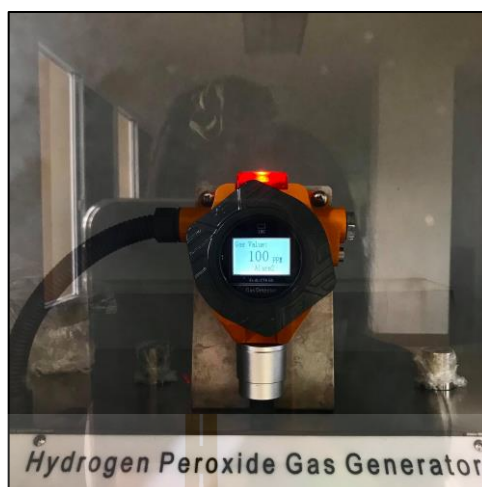
ซึ่งสามารถผลิตไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ได้ถึง 100 ppm ดังรูปที่ 4.11 แสดงให้เห็นว่า ตัวเร่งปฏิกิริยากราฟิตคาร์บอนไนไตรด์เมื่อทำการขยายสเกลให้ใหญ่ขึ้นจะสามารถผลิตปริมาณความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ได้ในปริมาณที่สูงมากภายในเวลา 60 นาที ดังรูปที่ 4.12



รูปที่ 4.10 เครื่องกำเนิดสำหรับการผลิตไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์



รูปที่ 4.11 ผลการทดสอบปริมาณความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ของตัวเร่งปฏิกิริยากราฟิตคาร์บอนไนไตรด์ที่อุณหภูมิ 600 °C ด้วยเครื่องกำเนิดไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์



รูปที่ 4.12 การผลิตปริมาณความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ 100 ppm

4.11 การทดสอบประสิทธิภาพการฆ่าเชื้อโรคเบื้องต้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ได้จากตัวเร่งปฏิกิริยากราฟิติการ์บอนไนไตรด์

ในการทดสอบการฆ่าเชื้อโรคเบื้องต้นนี้ นำขนมปังมาทำการทดสอบด้วยกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง เป็นจำนวน 2 แผ่น โดยที่นำขนมปังแผ่นหนึ่งไปผ่านการอบฆ่าเชื้อด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ความเข้มข้น 100 ppm ส่วนอีกแผ่นหนึ่งไม่ผ่านการอบฆ่าเชื้อ จากนั้นทำการรอดูผลทั้งหมด 10 วัน แสดงดังรูปที่ 4.13 จากผลการทดลองพบว่า รูปที่ 4.13 (ก) วันที่ 1 ขนมปังทั้ง 2 แผ่น ยังคงสภาพเดิมไม่เกิดการเปลี่ยนแปลง รูปที่ 4.13 (ข) วันที่ 4 ยังไม่เกิดการเปลี่ยนแปลง รูปที่ 4.13 (ค) วันที่ 6 จะเห็นได้ว่าขนมปังที่ไม่ผ่านการอบฆ่าเชื้อ เริ่มมีเชื้อราเกิดขึ้นที่บริเวณขอบของขนมปัง ส่วนขนมปังที่ผ่านการอบฆ่าเชื่อนั้นยังคงสภาพเดิมไม่มีการเปลี่ยนแปลงและไม่มีเชื้อราเกิดขึ้น รูปที่ 4.13 (ง) วันที่ 9 จะเห็นได้ว่า ขนมปังที่ไม่ผ่านการอบฆ่าเชื้อมีเชื้อราเกิดขึ้นบนขนมปัง ส่วนขนมปังที่ผ่านการอบฆ่าเชื้อไม่มีเชื้อราเกิดขึ้น และรูปที่ 4.13 (ฉ) วันที่ 10 ขนมปังที่ไม่ผ่านการอบฆ่าเชื้อมีเชื้อราเกิดขึ้นอย่างชัดเจน ส่วนขนมปังที่ผ่านการอบฆ่าเชื้อยังคงสภาพเดิมเหมือนวันแรก แสดงให้เห็นว่าการผลิตไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ด้วยกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงของตัวเร่งปฏิกิริยากราฟิติการ์บอนไนไตรด์ที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส สามารถฆ่าเชื้อโรคได้อย่างมีประสิทธิภาพ



รูปที่ 4.13 ผลการฆ่าเชื้อ โรคบนขนมปังที่ผ่านการอบฆ่าเชื้อ (ซ้าย) และไม่ผ่านการอบฆ่าเชื้อ (ขวา) ด้วยไอโซโครเจนเพอร์ออกไซด์เป็นระยะเวลา 1 วัน



รูปที่ 4.14 ผลการฆ่าเชื้อ โรคบนขนมปังที่ผ่านการอบฆ่าเชื้อ (ซ้าย) และไม่ผ่านการอบฆ่าเชื้อ (ขวา) ด้วยไอโซโครเจนเพอร์ออกไซด์เป็นระยะเวลา 4 วัน



รูปที่ 4.15 ผลการฆ่าเชื้อ โรคบนขนมปังที่ผ่านการอบฆ่าเชื้อ (ข้าว) และไม่ผ่านการอบฆ่าเชื้อ (ข้าว) ด้วยไอไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์เป็นระยะเวลา 6 วัน



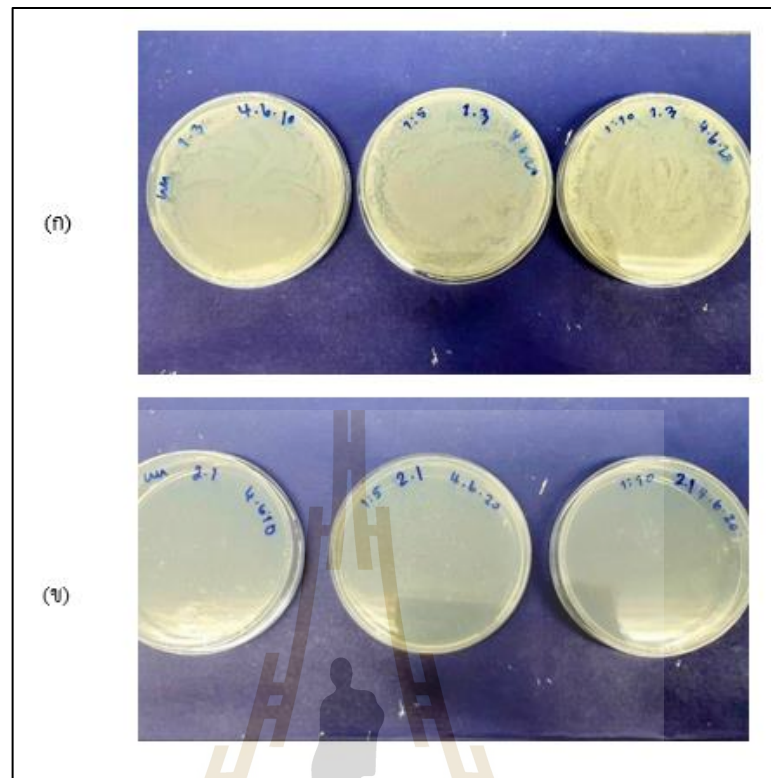
รูปที่ 4.16 ผลการฆ่าเชื้อ โรคบนขนมปังที่ผ่านการอบฆ่าเชื้อ (ข้าว) และไม่ผ่านการอบฆ่าเชื้อ (ข้าว) ด้วยไอไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์เป็นระยะเวลา 9 วัน



รูปที่ 4.17 ผลการฆ่าเชื้อ โรคบนขนมปังที่ผ่านการอบฆ่าเชื้อ (ซ้าย) และไม่ผ่านการอบฆ่าเชื้อ (ขวา) ด้วยไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์เป็นระยะเวลา 10 วัน

4.12 การทดสอบประสิทธิภาพการฆ่าเชื้อแบคทีเรีย *Bacillus subtilis* ของตัวเร่งปฏิกิริยากราฟิติการ์บอนไนไตรด์

การทดสอบการฆ่าเชื้อแบคทีเรีย *Bacillus subtilis* ของตัวเร่งปฏิกิริยากราฟิติการ์บอนไนไตรด์ ที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส ด้วยกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง ในการทดสอบใช้ความเข้มข้นของไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์ที่ 100 ppm เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ในการอบฆ่าเชื้อ จากผลการทดลองดังรูปที่ 4.14 (ก) เชื้อแบคทีเรีย *Bacillus subtilis* ที่ไม่ผ่านการอบฆ่าเชื้อ ส่วนรูปที่ 4.14 (ข) เชื้อแบคทีเรีย *Bacillus subtilis* ที่ผ่านการอบฆ่าเชื้อ ซึ่งจะเห็นได้ว่า ตัวเร่งปฏิกิริยากราฟิติการ์บอนไนไตรด์สามารถฆ่าเชื้อ *Bacillus subtilis* ได้ 100 เปอร์เซ็นต์ ภายในเวลา 1 ชั่วโมง โดยที่ไม่มีเชื้อหลงเหลืออยู่

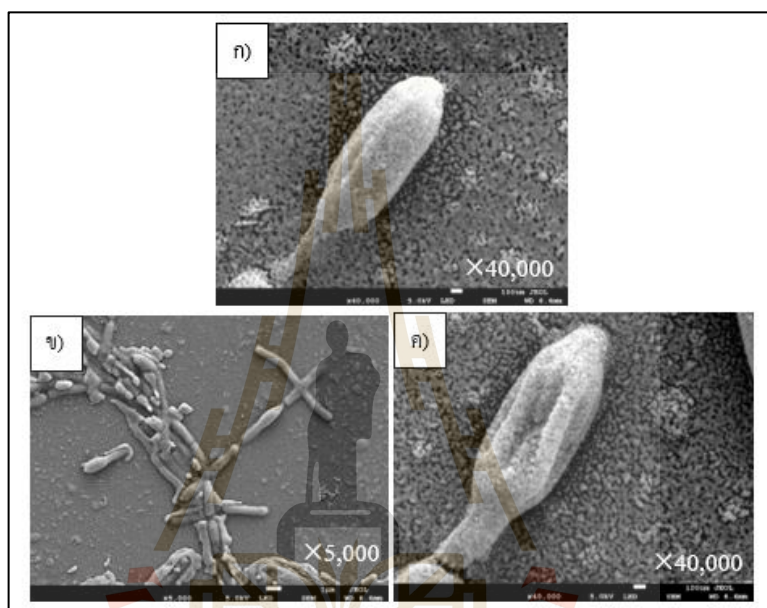


รูปที่ 4.18 ผลการทดสอบการฆ่าเชื้อแบคทีเรีย *Bacillus subtilis* ของตัวเร่งปฏิกิริยากราฟิติกคาร์บอนไนไตรต์ด้วยกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง (ก) เชื้อแบคทีเรีย *Bacillus subtilis* ที่ไม่ผ่านการอบฆ่าเชื้อ และ(ข) เชื้อแบคทีเรีย *Bacillus subtilis* ผ่านการอบฆ่าเชื้อ

4.13 ผลการศึกษาเชื้อแบคทีเรีย *Bacillus subtilis* ที่ผ่านการอบฆ่าเชื้อด้วยไอไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

จากผลการศึกษาการฆ่าเชื้อแบคทีเรีย *Bacillus subtilis* ที่ถ่ายด้วยกล้อง SEM โดยกลไกการฆ่าเชื้อของไอไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์มีดังนี้ เนื่องจากไอไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์จะทำให้ปฏิกิริยาการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรีย โดยการเกิดกระบวนการเปอร์ออกซิเดชันทำให้ผิวของเซลล์แบคทีเรียแตกและไม่สามารถซึมผ่านเข้าออกของน้ำได้ จึงทำให้แบคทีเรียต่าง ๆ รวมทั้งสปอร์ของเชื้อแบคทีเรานั้นไม่สามารถอยู่รอดได้ จากรูปที่ 4.15 (ก) เชื้อแบคทีเรีย *Bacillus subtilis* ที่ไม่ผ่านการอบฆ่าเชื้อด้วยไอไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ซึ่งเชื้อแบคทีเรียที่ยังไม่โดนทำลาย จะมีลักษณะเป็นรูปทรงท่อนตรงสมบูรณ์ ในขณะที่ทำการทดสอบการอบฆ่าเชื้อแบคทีเรีย *Bacillus subtilis* ของตัวเร่งปฏิกิริยากราฟิติกคาร์บอนไนไตรต์ที่อุณหภูมิ 600°C ด้วยกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง โดยใช้ความเข้มข้นของไอไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่

100 ppm เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จากรูปที่ 4.15 (ข, ค) จะเห็นได้ว่าไอโซโครเจนเพอร์ออกไซด์สามารถฆ่าเชื้อแบคทีเรีย *Bacillus subtilis* ได้หมด ซึ่งลักษณะของเชื้อแบคทีเรียที่โดนทำลายนั้นจะมีลักษณะที่เหี่ยวและแตกหักเป็นท่อน ๆ ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่าไอโซโครเจนเพอร์ออกไซด์ที่ผลิตจากตัวเร่งปฏิกิริยากราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์มีประสิทธิภาพอย่างมากในการฆ่าเชื้อแบคทีเรีย ภายในเวลาเพียง 1 ชั่วโมง เท่านั้น



รูปที่ 4.19 (ก) เชื้อแบคทีเรีย *Bacillus subtilis* ที่ยังไม่โดนทำลาย
 (ข) และ (ค) เชื้อแบคทีเรีย *Bacillus subtilis* ที่โดนทำลาย
 ด้วยไอโซโครเจนเพอร์ออกไซด์

บทที่ 5

บทสรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาการเตรียมการสังเคราะห์กราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์จากสารตั้งต้นเมลามีน โดยการใช้ความร้อนที่อุณหภูมิ 400, 450, 500, 550 และ 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง เพื่อเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาดำแสง ซึ่งมีข้อดีคือ เป็นวิธีที่สังเคราะห์ง่ายไม่ซับซ้อนและประหยัดเวลาเป็นอย่างมาก นอกจากนี้ยังทำการขึ้นรูปด้วยกระบวนการจุ่มเคลือบสารกราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์บนพื้นผิวของฟองน้ำ ทำการทดสอบประสิทธิภาพในกระบวนการเร่งปฏิกิริยาดำแสงสำหรับการผลิตไอโซโครเจนเพอร์ออกไซด์ และการทดสอบประสิทธิภาพการฆ่าเชื้อแบคทีเรียของตัวเร่งปฏิกิริยากราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์ ซึ่งสามารถสรุปได้ว่า เมื่อทำการสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยากราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์ที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส มีสมบัติที่เหมาะสมสำหรับการผลิตไอโซโครเจนเพอร์ออกไซด์ เนื่องจากมีพื้นที่ผิวจำเพาะที่สูง มีปริมาณเฟสของกราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์ที่สูงมาก จึงทำให้มีประสิทธิภาพมากกว่าตัวเร่งปฏิกิริยากราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์ที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส เมื่อทำการทดสอบประสิทธิภาพการผลิตไอโซโครเจนเพอร์ออกไซด์ด้วยกระบวนการเร่งปฏิกิริยาดำแสง โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส พบว่าสามารถผลิตปริมาณความเข้มข้นของไอโซโครเจนเพอร์ออกไซด์ได้ถึง 100 ppm ภายในเวลา 1 ชั่วโมงเท่านั้น และยังสามารถฆ่าเชื้อแบคทีเรีย *Bacillus subtilis* ได้ทั้งหมด โดยไม่มีเชื้อแบคทีเรียหลงเหลืออยู่ 100 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งแสดงให้เห็นว่า ตัวเร่งปฏิกิริยากราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์ที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส มีประสิทธิภาพในการผลิตไอโซโครเจนเพอร์ออกไซด์ได้เป็นอย่างดีและสามารถนำไปใช้ประโยชน์ในการฆ่าเชื้อโรคได้จริง

ซึ่งงานวิจัยนี้ถือว่าเป็นนวัตกรรมที่ใหม่มาก โดยปกติทางอุตสาหกรรมจะนิยมใช้ไอโซโครเจนเพอร์ออกไซด์ที่เป็นของเหลวสำหรับการผลิตไอโซโครเจนเพอร์ออกไซด์ ซึ่งการใช้ไอโซโครเจนเพอร์ออกไซด์ที่เป็นของเหลวอาจทำให้เกิดอันตรายต่อผู้ปฏิบัติงานได้ หากมีการสัมผัสโดยตรงอาจก่อให้เกิดมะเร็งได้ง่ายและมีต้นทุนที่สูง ในขณะที่งานวิจัยของเรานี้สารตั้งต้นที่ใช้ในการผลิตไอโซโครเจนเพอร์ออกไซด์เป็นเพียงเอทานอลและน้ำเท่านั้น ซึ่งมีความปลอดภัยไม่ก่อให้เกิดมะเร็ง และมีต้นทุนที่ต่ำ นอกจากนี้ยังสามารถนำมาใช้ประโยชน์ในการฆ่าเชื้อโรคได้อย่างมีประสิทธิภาพ

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ควรศึกษาวิธีการจุ่มเคลือบบนพื้นผิวของฟองน้ำเพิ่มเติม เพื่อให้ชิ้นงานมีความคงทนในขณะใช้งานและมีประสิทธิภาพในการผลิตไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ได้สูงขึ้น
2. ควรมีการศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับตัวเร่งปฏิกิริยากราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์ว่าสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับงานทางด้านอื่น ๆ อะไรได้บ้าง เพื่อให้เกิดประโยชน์อย่างกว้างขวาง
3. ฟองน้ำที่ใช้ในการจุ่มต้องไม่มีคราบน้ำมัน เพราะจะทำให้การจุ่มน้ำ Slip ไม่ทั่วทั้งผิวของฟองน้ำอาจทำให้ประสิทธิภาพการเกิดไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ลดลงได้
4. ควรทดสอบการจุ่มเคลือบกับชิ้นงานอื่น ๆ เพื่อสามารถประยุกต์ใช้งานได้อย่างกว้างขวาง



รายการอ้างอิง

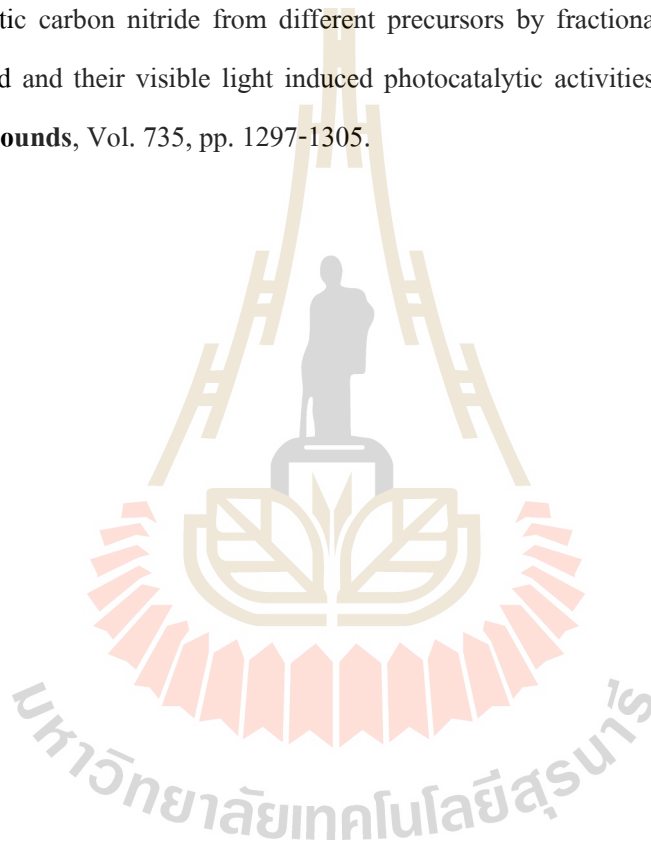
- ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ เรื่องสารกึ่งตัวนำ สิรินทรลัมปนาท, XRD Available Online: <http://www.material.chula.ac.th/>
- กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. (2557). พลังงานแสงอาทิตย์. สารานุกรมพลังงานทดแทน (pp. 27-28). กรุงเทพฯ, ประเทศไทย.
- Asahi, R., Morikawa, T., Ohwaki, T., Aoki, K., & Taga, Y. (2001). Visible-light photocatalysis in nitrogen-doped titanium oxides. **Science**, Vol. 293, pp. 269-271.
- Campos-Martin, J. M., Blanco-Brieva, G., & Fierro, J. L. (2006). Hydrogen peroxide synthesis: an outlook beyond the anthraquinone process. **Angewandte Chemie International Edition**, Vol. 45, pp. 6962-6984.
- Chong, M. N., Jin, B., Chow, C. W., & Saint, C. (2010). Recent developments in photocatalytic water treatment technology: a review. **Water research**, Vol. 44, pp. 2997-3027.
- Demir, C. Z. (2019). Experimental investigation of photocatalytic hydrogen production with boron-doped TiO₂ and multi-walled carbon nanotubes-TiO₂.
- Dong, F., Wang, Z., Sun, Y., Ho, W.-K., & Zhang, H. (2013). Engineering the nanoarchitecture and texture of polymeric carbon nitride semiconductor for enhanced visible light photocatalytic activity. **Journal of colloid and interface science**, Vol. 401, pp. 70-79.
- Edwards, J. K., Freakley, S. J., Lewis, R. J., Pritchard, J. C., & Hutchings, G. J. (2015). Advances in the direct synthesis of hydrogen peroxide from hydrogen and oxygen. **Catalysis Today**, Vol. 248, pp. 3-9.
- Fujishima, A., & Honda, K. (1972). Electrochemical photolysis of water at a semiconductor electrode. **Nature**, Vol. 238, pp. 37-38.
- Goettmann, F., Fischer, A., Antonietti, M., & Thomas, A. (2006). Metal-free catalysis of sustainable Friedel-Crafts reactions: direct activation of benzene by carbon nitrides to avoid the use of metal chlorides and halogenated compounds. **Chemical communications**, Vol. 43, pp. 4530-4532.

- Hu, S., Li, F., Fan, Z., Wang, F., Zhao, Y., & Lv, Z. (2015). Band gap-tunable potassium doped graphitic carbon nitride with enhanced mineralization ability. **Dalton Transactions**, Vol. 44, pp. 1084-1092.
- Huda, M. N., & Turner, J. A. (2010). Morphology-dependent optical absorption and conduction properties of photoelectrochemical photocatalysts for H₂ production: a case study. **Journal of Applied Physics**, Vol. 107, pp. 123703.
- Kim, H.-i., Choi, Y., Hu, S., Choi, W., & Kim, J.-H. (2018). Photocatalytic hydrogen peroxide production by anthraquinone-augmented polymeric carbon nitride. **Applied Catalysis B: Environmental**, Vol. 229, pp. 121-129.
- Kofuji, Y., Isobe, Y., Shiraishi, Y., Sakamoto, H., Tanaka, S., Ichikawa, S., & Hirai, T. (2016). Carbon nitride–aromatic diimide–graphene nanohybrids: metal-free photocatalysts for solar-to-hydrogen peroxide energy conversion with 0.2% efficiency. **Journal of the American Chemical Society**, Vol. 138, pp. 10019-10025.
- Kofuji, Y., Ohkita, S., Shiraishi, Y., Sakamoto, H., Tanaka, S., Ichikawa, S., & Hirai, T. (2016). Graphitic carbon nitride doped with biphenyl diimide: efficient photocatalyst for hydrogen peroxide production from water and molecular oxygen by sunlight. **Acs Catalysis**, Vol. 6, pp. 7021-7029.
- Krishnan, J., Berry, J., Fey, G., & Wagener, S. (2006). Vaporized hydrogen peroxide-based biodecontamination of a high-containment laboratory under negative pressure. **Applied Biosafety**, Vol. 11, pp. 74-80.
- Kumar, S., Karthikeyan, S., & Lee, A. F. (2018). g-C₃N₄-based nanomaterials for visible light-driven photocatalysis. **Catalysts**, Vol. 8, pp. 74.
- Kumar, S., Surendar, T., Kumar, B., Baruah, A., & Shanker, V. (2014). Synthesis of highly efficient and recyclable visible-light responsive mesoporous g-C₃N₄ photocatalyst via facile template-free sonochemical route. **RSC Advances**, Vol. 4, pp. 8132-8137.
- Li, S., Dong, G., Hailili, R., Yang, L., Li, Y., Wang, F., . . . Wang, C. (2016). Effective photocatalytic H₂O₂ production under visible light irradiation at g-C₃N₄ modulated by carbon vacancies. **Applied Catalysis B: Environmental**, Vol. 190, pp. 26-35.
- Mamba, G., & Mishra, A. (2016). Graphitic carbon nitride (g-C₃N₄) nanocomposites: a new and exciting generation of visible light driven photocatalysts for environmental pollution remediation. **Applied Catalysis B: Environmental**, Vol. 198, pp. 347-377.

- Peng, J., Shi, F., Gu, Y., & Deng, Y. (2003). Highly selective and green aqueous–ionic liquid biphasic hydroxylation of benzene to phenol with hydrogen peroxide. **Green Chemistry**, Vol. 5, pp. 224-226.
- Praus, P., Svoboda, L., Ritz, M., Troppová, I., Šihor, M., & Kočí, K. (2017). Graphitic carbon nitride: Synthesis, characterization and photocatalytic decomposition of nitrous oxide. **Materials Chemistry and Physics**, Vol. 193, pp. 438-446.
- Rahman, M. Z., Ran, J., Tang, Y., Jaroniec, M., & Qiao, S. Z. (2016). Surface activated carbon nitride nanosheets with optimized electro-optical properties for highly efficient photocatalytic hydrogen production. **Journal of Materials Chemistry A**, Vol. 4, pp. 2445-2452.
- Rao, M., Rajeshwar, K., Verneker, V. P., & DuBow, J. (1980). Photosynthetic production of hydrogen and hydrogen peroxide on semiconducting oxide grains in aqueous solutions. **The Journal of Physical Chemistry**, Vol. 84, pp. 1987-1991.
- Rovina, K., & Siddiquee, S. (2015). A review of recent advances in melamine detection techniques. **Journal of Food Composition and Analysis**, Vol. 43, pp. 25-38.
- Sahel, K., Ellselami, L., Mirali, I., Dappozze, F., Bouhent, M., & Guillard, C. (2016). Hydrogen peroxide and photocatalysis. **Applied Catalysis B: Environmental**, Vol. 188, pp. 106-112.
- Sathyanarayana, S., Flynn, J. T., Messito, M. J., Gross, R., Whitlock, K. B., Kannan, K., . . . Christakis, D. (2019). Melamine and cyanuric acid exposure and kidney injury in US children. **Environmental research**, Vol. 171, pp. 18-23.
- Shi, L., Yang, L., Zhou, W., Liu, Y., Yin, L., Hai, X., . . . Ye, J. (2018). Photoassisted Construction of Holey Defective g-C₃N₄ Photocatalysts for Efficient Visible-Light-Driven H₂O₂ Production. **Small**, Vol. 14, pp. 1703142.
- Shiraishi, Y., Kanazawa, S., Kofuji, Y., Sakamoto, H., Ichikawa, S., Tanaka, S., & Hirai, T. (2014). Sunlight-driven hydrogen peroxide production from water and molecular oxygen by metal-free photocatalysts. **Angewandte Chemie International Edition**, Vol. 53, pp. 13454-13459.
- Shiraishi, Y., Kanazawa, S., Sugano, Y., Tsukamoto, D., Sakamoto, H., Ichikawa, S., & Hirai, T. (2014). Highly selective production of hydrogen peroxide on graphitic carbon nitride (g-C₃N₄) photocatalyst activated by visible light. **Acs Catalysis**, Vol. 4, pp. 774-780.

- Sun, Y.-p., Chen, J., Qi, H.-y., & Shi, Y.-p. (2015). Graphitic carbon nitrides modified hollow fiber solid phase microextraction for extraction and determination of uric acid in urine and serum coupled with gas chromatography-mass spectrometry. **Journal of Chromatography B**, Vol. 1004, pp. 53-59.
- Tang, W. Z. (2003). Physicochemical treatment of hazardous wastes: **CRC Press**.
- Tarr, M. A. (2003). Chemical degradation methods for wastes and pollutants: environmental and industrial applications: **CRC press**.
- Tsukamoto, D., Shiro, A., Shiraishi, Y., Sugano, Y., Ichikawa, S., Tanaka, S., & Hirai, T. (2012). Photocatalytic H₂O₂ production from ethanol/O₂ system using TiO₂ loaded with Au–Ag bimetallic alloy nanoparticles. **Acs Catalysis**, Vol. 2, pp. 599-603.
- Venturini, L., & Bacchi, M. (2009). Research, design, and development of a photocatalytic asphalt pavement. Paper presented at the Proceedings of 2nd International Conference on Environmentally Friendly Roads: **ENVIROAD**.
- Wang, A., Wang, C., Fu, L., Wong-Ng, W., & Lan, Y. (2017). Recent advances of graphitic carbon nitride-based structures and applications in catalyst, sensing, imaging, and LEDs. **Nano-micro letters**, Vol. 9, pp. 47.
- Wang, X., Maeda, K., Thomas, A., Takanabe, K., Xin, G., Carlsson, J. M., . . . Antonietti, M. (2009). A metal-free polymeric photocatalyst for hydrogen production from water under visible light. **Nature materials**, Vol. 8, pp. 76-80.
- Yan, H., Chen, Y., & Xu, S. (2012). Synthesis of graphitic carbon nitride by directly heating sulfuric acid treated melamine for enhanced photocatalytic H₂ production from water under visible light. **International Journal of hydrogen energy**, Vol. 37, pp. 125-133.
- Yan, S., Li, Z., & Zou, Z. (2009). Photodegradation performance of g-C₃N₄ fabricated by directly heating melamine. **Langmuir**, Vol. 25, pp. 10397-10401.
- Zhang, C., Li, Y., Wang, D., Zhang, W., Wang, Q., Wang, Y., & Wang, P. (2015). Ag@ helical chiral TiO₂ nanofibers for visible light photocatalytic degradation of 17 α -ethinylestradiol. **Environmental Science and Pollution Research**, Vol. 22, pp. 10444-10451.
- Zhang, J., Zhang, G., Chen, X., Lin, S., Möhlmann, L., Dotsega, G., . . . Wang, X. (2012). Co-monomer control of carbon nitride semiconductors to optimize hydrogen evolution with visible light. **Angewandte Chemie International Edition**, Vol. 51, pp. 3183-3187.

- Zhao, S., Guo, T., Li, X., Xu, T., Yang, B., & Zhao, X. (2018). Carbon nanotubes covalent combined with graphitic carbon nitride for photocatalytic hydrogen peroxide production under visible light. **Applied Catalysis B: Environmental**, Vol. 224, pp. 725-732.
- Zhao, S., & Zhao, X. (2018). Polyoxometalates-derived metal oxides incorporated into graphitic carbon nitride framework for photocatalytic hydrogen peroxide production under visible light. **Journal of Catalysis**, Vol. 366, pp. 98-106.
- Zhao, Z., Ma, Y., Fan, J., Xue, Y., Chang, H., Masubuchi, Y., & Yin, S. (2018). Synthesis of graphitic carbon nitride from different precursors by fractional thermal polymerization method and their visible light induced photocatalytic activities. **Journal of Alloys and Compounds**, Vol. 735, pp. 1297-1305.

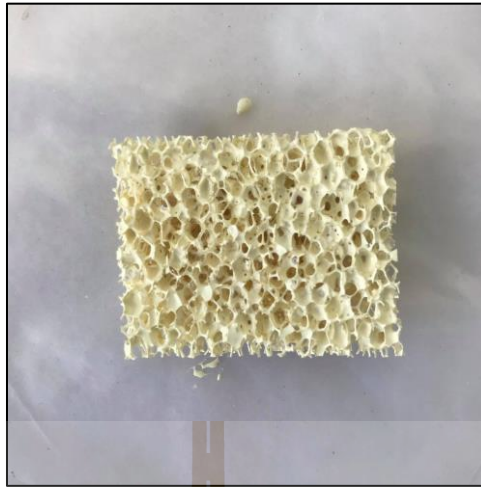




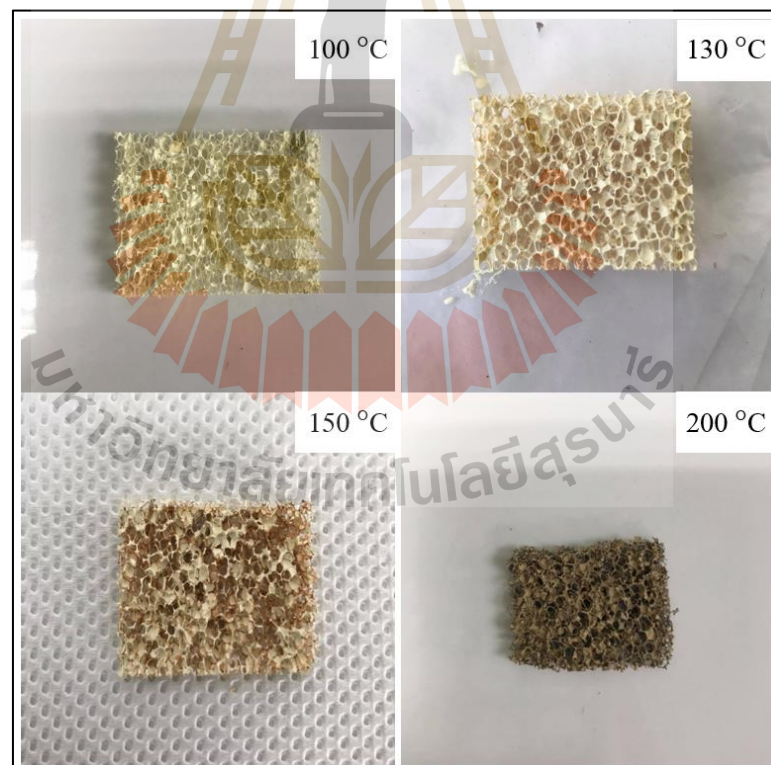
ภาคผนวก ก

ชิ้นงานตัวเร่งปฏิกิริยาหลังการอบที่อุณหภูมิต่างกัน

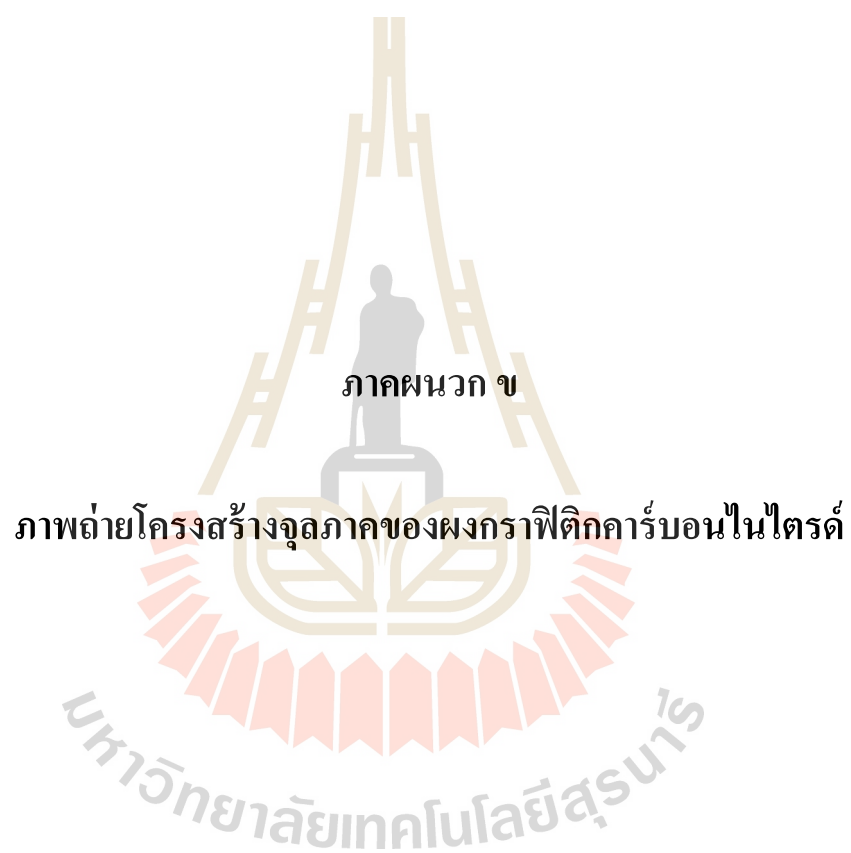
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

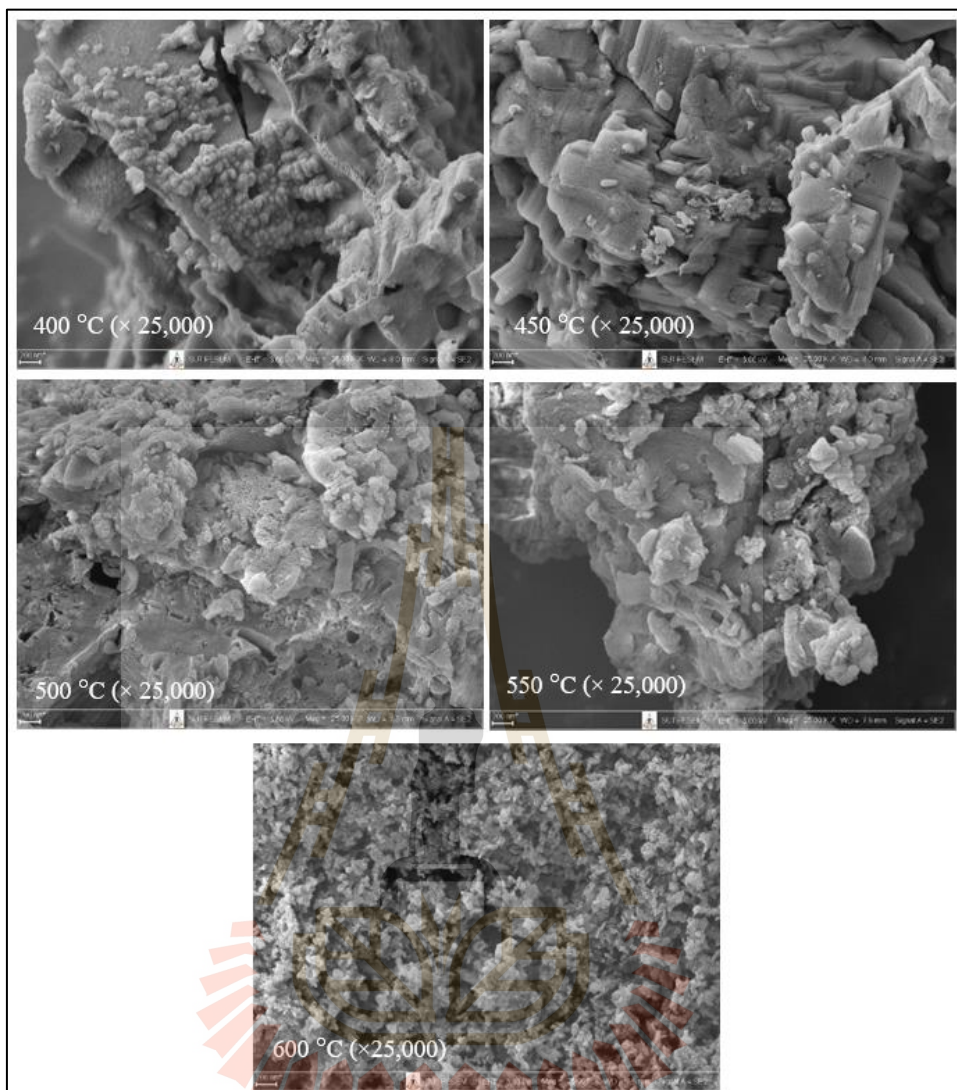


รูปที่ ก.1 ชิ้นงานฟองน้ำขนาด $2 \times 3 \times 0.5$ ซม. ที่ผ่านการจุ่มเคลือบด้วยน้ำ Slip กราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์



รูปที่ ก.2 ชิ้นงานตัวเร่งปฏิกิริยาหลังอบที่อุณหภูมิ 100, 130, 150 และ 200 องศาเซลเซียส





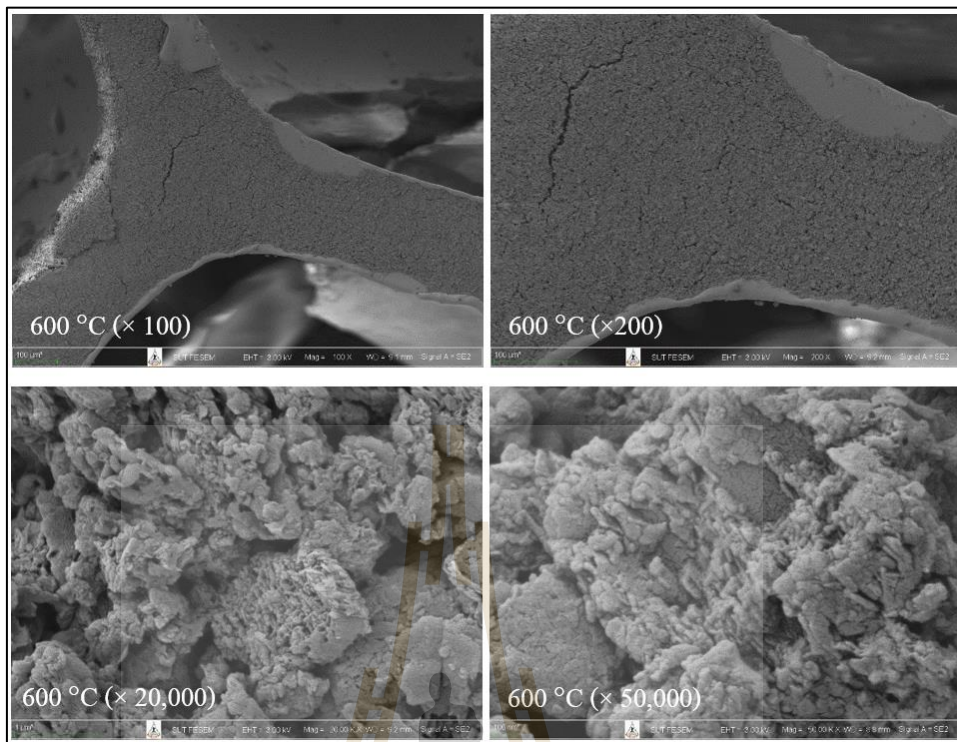
รูปที่ ข.1 ภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคของผงตัวเร่งปฏิกิริยากราฟิติการ์บอนไนไตรด์
ที่อุณหภูมิต่าง ๆ ที่กำลังขยาย 25,000 เท่า



ภาคผนวก ค

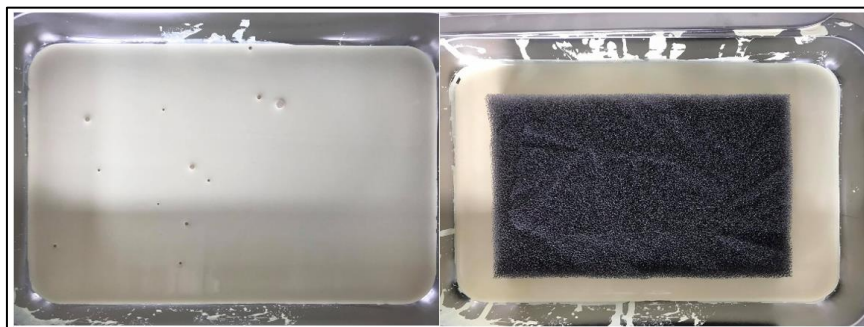
ภาพถ่ายโครงสร้างจุดภาคของชิ้นงานฟองน้ำกราฟิกคาร์บอนไนไตรด์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

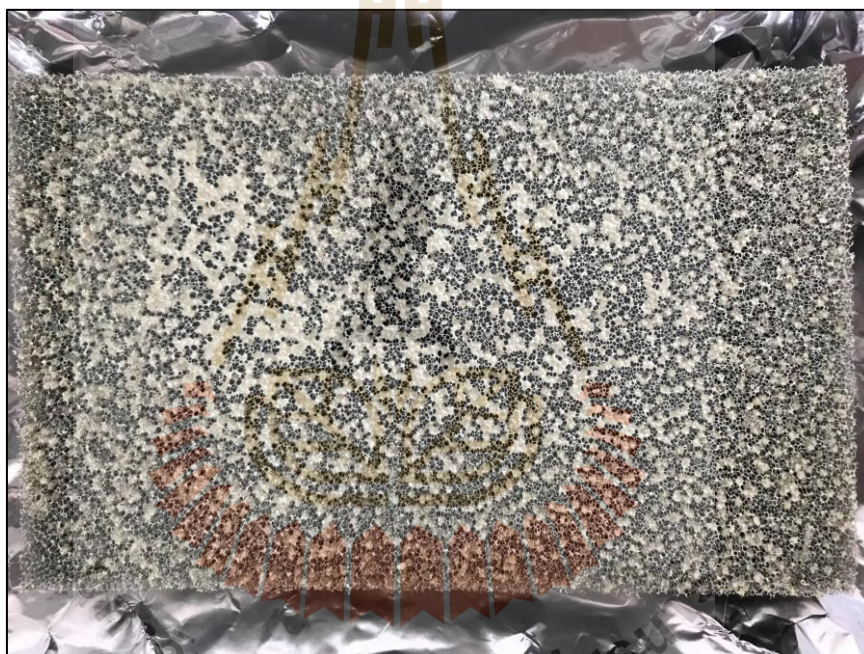


รูปที่ ค.1 ภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานฟองน้ำตัวเร่งปฏิกิริยากราฟิตคาร์บอนไนไตรด์ ที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส ที่กำลังขยาย 100, 200, 20000 และ 50000 เท่า

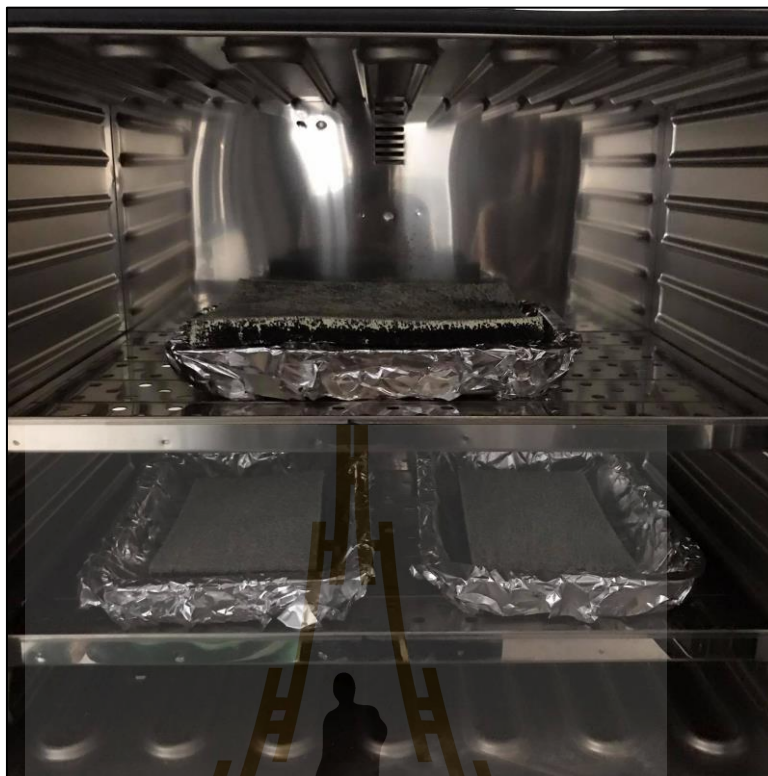




รูปที่ ง.1 เตรียมน้ำ Slip แล้วนำชิ้นงานฟองน้ำขนาด 20×24 ซม. จุ่มลงในน้ำ Slip



รูปที่ ง.2 ชิ้นงานฟองน้ำที่ผ่านการจุ่มเคลือบด้วยน้ำ Slip กราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์



รูปที่ ง.3 อบที่อุณหภูมิ 130 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง



รูปที่ ง.4 ชิ้นงานฟองน้ำตัวเร่งปฏิกิริยากราฟิติการ์บอนไนโตรดัดหลังการอบ



ภาคผนวก จ

บทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

รายชื่อบทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา

D. Piyachatpanom, S. Watcharamaisakul. "Synthesis of graphitic carbon nitride (g-C₃N₄) powder from melamine by pyrolysis process". Suranaree Journal of Science and Technology, (2020). (in press).

ยื่นจดอนุสิทธิบัตร เรื่อง สูตรส่วนผสมการเตรียมน้ำ Slip และกระบวนการขึ้นรูปกราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์เพื่อเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาดำแสงสำหรับการผลิตไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ โดยผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุขเกษม วัชรมัชสกุล และนางสาวดารณี ปิยฉัตรพนม เลขที่คำขอ 2003000998.



มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



Ref. No. 7421(3)/c. 18

Suranaree Journal of Science and Technology
111 University Avenue, Muang District
Nakhon Ratchasima 30000, Thailand
Tel. 66-44-224756 Fax. 66-44-224750
E-mail: journal@g.sut.ac.th

June 18, 2020

Dear Ms. Daranee Piyachatpanom,

I am pleased to confirm that your paper “**Synthesis of Graphitic Carbon Nitride ($g\text{-C}_3\text{N}_4$) Powder from Melamine by Pyrolysis Process**” has been accepted for publication in Suranaree Journal of Science and Technology since **May 26, 2020**.

This acceptance is subject to the assumption that you meet all the conditions to publish in this journal. In particular, you have not submitted your manuscript to another journal. Please inform me immediately if you cannot meet these conditions.

The galley proof of your paper will be soon created. If we need any additional information to create the proof, we will let you know. If not, you will be contacted again with a request to approve the proof.

Thank you for submitting your paper to Suranaree Journal of Science and Technology.

Sincerely,

Rattikorn Yimnirun

Rattikorn Yimnirun, Ph.D.

Professor

Editor-in-Chief

ประวัติผู้เขียน

นางสาวดารณี ปิยฉัตรพนม เกิดเมื่อวันที่ 29 เดือนมีนาคม พ.ศ. 2538 ณ จังหวัดระยอง สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาจากโรงเรียนวัดป่าประดู่ อำเภอเมือง จังหวัดระยอง ในปีการศึกษา 2556 และเข้ารับการศึกษาระดับอุดมศึกษา ณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา จนสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีจาก สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิชาวิศวกรรมเซรามิก มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ในปีการศึกษา 2559 ในระหว่างจบการศึกษาระดับปริญญาตรีได้รับทุนการศึกษาในระดับปริญญาโท จึงทำให้เกิดแรงจูงใจที่จะศึกษาต่อในระดับที่สูงขึ้น เพื่อพัฒนาความรู้ความสามารถของตนเองให้มากขึ้น ในสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิชาวิศวกรรมวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ในปีการศึกษา 2560 จากประสบการณ์ที่ได้รับการศึกษาทำให้ผู้วิจัยได้ความรู้มากมายและสามารถพัฒนาความรู้ที่ได้รับมาประยุกต์ใช้กับงานวิจัยได้เป็นอย่างดี



มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี