

## คำนำ

ปัจจุบันมีการขยายตัวทางอุตสาหกรรม และการเพิ่มผลผลิตทางการเกษตรเพื่อรองรับจำนวนประชากรที่เพิ่มขึ้นอย่างมาก ซึ่งได้ก่อให้เกิดปัญหาต่อสิ่งแวดล้อมต่างๆ มากมายไม่ว่าจะเป็นปัญหามลพิษทางอากาศ มลพิษทางดินและมลพิษทางน้ำ โดยเฉพาะน้ำเสียที่เกิดจากโรงงานอุตสาหกรรมที่มีการปล่อยสารพิษต่างๆ ที่ย่อยสลายได้ยากลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ รวมไปถึงการใช้ยาปราบศัตรูพืชในภาคเกษตรกรรม ส่งผลให้มีการปนเปื้อนในสารพิษตกค้างในดินแหล่งน้ำ จากการทำกรเกษตรรวมถึงแหล่งน้ำธรรมชาติจึงก่อให้เกิดปัญหามลพิษทางน้ำและเป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตทั้งหลาย นับวันจะมีความรุนแรงมากขึ้น ส่งผลกระทบต่อสุขภาพอนามัยของประชาชนที่ประกอบอาชีพเกษตรกรรม

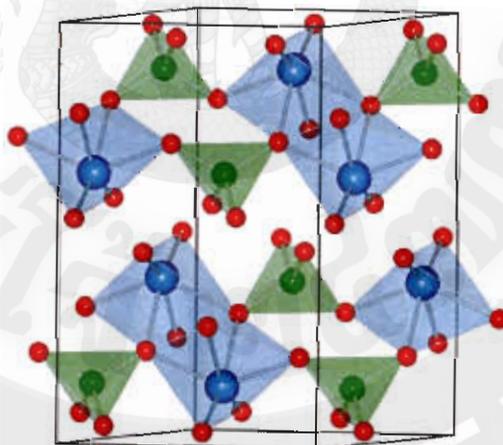
สารประกอบคลอโรฟีนอล (Chlorophenol compound) เป็นองค์ประกอบในยาปราบศัตรูพืช ที่มีใช้ในภาคเกษตรกรรมและมีใช้กันอย่างกว้างขวางในโรงงานอุตสาหกรรมต่างๆ สารเหล่านี้เป็นสารพิษที่ก่อมะเร็งเป็นอันตรายทั้งต่อมนุษย์ สัตว์และสิ่งมีชีวิตในน้ำ ทั้งยังเป็นตัวการสำคัญที่ก่อมลพิษทางน้ำ ซึ่งเป็นผลมาจากการปล่อยน้ำเสียที่มีการปนเปื้อนสารพิษเหล่านี้ของโรงงานอุตสาหกรรมลงสู่แหล่งน้ำลำคลองและน้ำหลากที่ไหลชะล้างในพื้นที่เกษตรกรรม ที่มีการสะสมของยาปราบศัตรูพืชจนเกิดการปนเปื้อนในแม่น้ำลำคลองรวมไปถึงน้ำใต้ดิน

ดังนั้น จึงได้มีการนำเอาเทคโนโลยีการบำบัดน้ำเสียขั้นสูง มาใช้เพื่อการบำบัดน้ำเสียที่มีการปนเปื้อนสารประกอบคลอโรฟีนอล โดยการใช้โดยการใช้แสงอัลตราไวโอเลตหรือแสงวิสิเบิลร่วมกับสารกึ่งตัวนำ (UV-Vis/Semiconductor) จึงเป็นที่สนใจในปัจจุบัน เนื่องจากเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพสูงและประสบผลสำเร็จในการนำมาใช้กำจัดสารพิษต่างๆ รวมทั้งยังสามารถย่อยสลายสารประกอบอินทรีย์ต่างๆ ได้อย่างมากมายหลายชนิด แต่วิธีนี้ก็ยังมีข้อด้อยอยู่บ้าง ในกรณีที่ต้องการกำจัดสารบางชนิดที่มี โครงสร้างซับซ้อนก็จำเป็นต้องฉายแสงอัลตราไวโอเลตหรือแสงวิสิเบิลเป็นเวลานานมาก ซึ่งบางครั้งอาจจะนานกว่าการบำบัดด้วยวิธีอื่นๆ เช่น การใช้สารเคมีเป็นตัวออกซิไดซ์ (Oxidizing agent) และหากปฏิกิริยาการย่อยสลายเกิดขึ้นไม่สมบูรณ์ จะทำให้เกิดสารตัวกลาง (Intermediate) ซึ่งเป็นผลพลอยได้จากปฏิกิริยาที่ไม่สมบูรณ์ที่มีความเป็นพิษสูงกว่าในสารตั้งต้นที่ต้องการกำจัด ซึ่งหากปล่อยลงสู่แหล่งน้ำก็จะทำให้เกิดมลพิษต่อไปได้

### บิสมัธวานาเดต (Bismuth vanadate, BiVO<sub>4</sub>)

บิสมัธวานาเดต (BiVO<sub>4</sub>)<sup>[1-3]</sup> เป็นสารประกอบอนินทรีย์ที่มีสีเหลือง ประกอบด้วยบิสมัธหนึ่งอะตอม วานาเดียมหนึ่งอะตอม และออกซิเจนสี่อะตอม เป็นสารประเภทกึ่งตัวนำที่มีคุณสมบัติเฟอร์โรอิเล็กทริก (Ferroelectric) และเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาโดยการกระตุ้นด้วยแสงในช่วงแสงวิสิเบิล (Visible) บิสมัธวานาเดต เป็นวัสดุที่สามารถนำมาประยุกต์ใช้ในหลายด้าน เช่น สารที่มีสถานะแก๊ส จะใช้เป็นตัวตรวจจับสารที่เป็นสถานะของแข็งใช้เป็นขั้วบวกแทนลิเทียมในแบตเตอรี่ นอกจากนี้ยังนำไปใช้เป็นตัวเติมในการผลิตประเภทสีทาแทนตะกั่วและแคดเมียม เนื่องจากบิสมัธวานาเดตมีเชดสีที่สว่าง ย้อมติดสีได้ดี และที่สำคัญคือ ไม่เป็นพิษต่อระบบนิเวศ ในการเติมบิสมัธวานาเดตลงในสารละลายจะแสดงคุณสมบัติเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalytic) และเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาโดยการกระตุ้นด้วยแสง (Photocatalytic) เมื่อเติมบิสมัธวานาเดตลงน้ำจะเกิดปฏิกิริยาไฮโดรเจนชันขึ้น

บิสมัธวานาเดตจะมีโครงสร้างของผลึกอยู่ 3 ชนิด คือ โมโนคลินิก (Monoclinic) แบบชีไลท์ (Sheelite) เตตระโกนัล (Tetragonal) แบบชีไลท์ (Sheelite) และเตตระโกนัล (Tetragonal) แบบเซอร์คอน (Zircon) ซึ่งสามารถสังเคราะห์บิสมัธวานาเดต โครงสร้างผลึก โมโนคลินิกได้ในกระบวนการที่ใช้อุณหภูมิสูง ส่วน โครงสร้างผลึกแบบเตตระโกนัล ได้จากกระบวนการสังเคราะห์ที่อุณหภูมิต่ำ<sup>[4-5]</sup>



ภาพที่ 1 โครงสร้างโมโนคลินิกของบิสมัธวานาเดต<sup>[6]</sup>

โดยอะตอมสีฟ้า คือ บิสมัธ

อะตอมสีเขียว คือ วานาเดียม

และอะตอมสีแดง คือ ออกซิเจน

ตารางที่ 1 สมบัติทางกายภาพของบิสมัทวานาเดต<sup>[7]</sup>

ชื่อ	บิสมัทวานาเดต
สูตรโมเลกุล	$\text{BiVO}_4$
น้ำหนักโมเลกุล	395.92 กรัมต่อโมล
สี	เหลือง
กลิ่น	ไม่มีกลิ่น
ลักษณะ	ของแข็ง
โครงสร้างผลึก	เฮกซะโกนอล เตตระโกนอล และโมโนคลินิก
ค่าความเป็นกรด-ด่าง	7-8
ความหนาแน่น	5.9 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร
จุดหลอมเหลว	1000 องศาเซลเซียส
ค่าการดูดซับน้ำมัน	18 เปอร์เซ็นต์

### ฟีนอล (Phenol)

ฟีนอล (Phenol)<sup>[8]</sup> เป็นสารประกอบอินทรีย์ที่มีหมู่ไฮดรอกซิล (-OH) ต่ออยู่กับหมู่แอริล (Ar) มีสูตรทั่วไปคือ  $\text{ArOH}$

การที่หมู่ -OH ต่ออยู่กับหมู่แอริล ทำให้สมบัติส่วนใหญ่ของฟีนอลต่างจากแอลกอฮอล์ทั่วไป ตัวอย่างของสารประกอบอินทรีย์ในกลุ่มนี้ เช่น ฟีนอล มีสูตรเป็น  $\text{C}_6\text{H}_5\text{OH}$



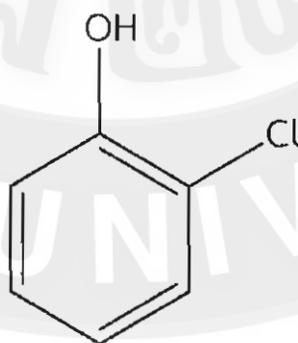
ภาพที่ 2 โครงสร้างฟีนอล<sup>[8]</sup>

## ตารางที่ 2 คุณสมบัติของฟีนอล<sup>[8]</sup>

ชื่อ	ฟีนอล
สูตรโมเลกุล	$C_6H_5OH$
น้ำหนักโมเลกุล	94.11 กรัมต่อโมล
ลักษณะ	เป็นผลึกของแข็งสีขาว
กรด (Kp)	9.95
ความหนาแน่น	1.07 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร
จุดหลอมเหลว	40.5 องศาเซลเซียส
จุดเดือด	181 องศาเซลเซียส
การละลายในน้ำ	8.3 กรัมต่อน้ำ 100 มิลลิลิตร (20 องศาเซลเซียส)
ประโยชน์	นำมาใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตพลาสติกบางชนิด สีข้อม ยามา เชื้อโรค สารกันเหี่ยว เป็นต้น

### 2-คลอโรฟีนอล (2-chlorophenol)

2-chlorophenol หรือ Ortho-chlorophenol<sup>[9]</sup> มีสูตรโมเลกุลเป็น  $C_6H_5ClO$  พบว่ามีลักษณะที่เป็นของเหลวไม่มีสีหรือสีน้ำตาลอ่อนละลายน้ำได้น้อยมีกลิ่นฉุนรุนแรงและมีความเป็นพิษสูง หากกลืนหรือสัมผัสโดนผิวหนังและหากสูดดมอาจมีอันตรายถึงชีวิต รวมถึงเป็นสารก่อมะเร็งและมีผลกระทบต่อระบบสืบพันธุ์ และยังเป็นหนึ่งในสาเหตุสำคัญที่ทำให้เกิดมลพิษทางน้ำ



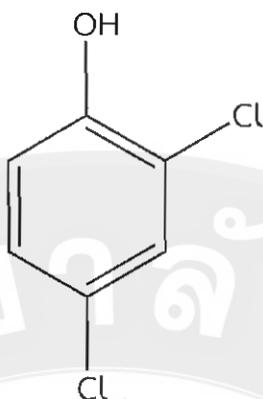
ภาพที่ 3 โครงสร้าง 2-คลอโรฟีนอล<sup>[9]</sup>

### ตารางที่ 3 คุณสมบัติของ 2-คลอโรฟีนอล<sup>[9]</sup>

ชื่อ	2-คลอโรฟีนอล
สูตรโมเลกุล	$C_6H_5ClO$
น้ำหนักโมเลกุล	128.56 กรัมต่อ โมล
ลักษณะ	เป็นของเหลวสีเหลืองใส
กรต (Kp)	8.56
ความหนาแน่น	1.2634 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ที่ 20 องศาเซลเซียส
จุดหลอมเหลว	9.4 องศาเซลเซียส
จุดเดือด	174.9 องศาเซลเซียส
การละลายในน้ำ	20 กรัมค่อน้ำ 1000 มิลลิลิตร (20 องศาเซลเซียส)
ความละลายได้	ละลายได้ในเอทานอล อีเทอร์ เบนซีน
ความดันไอ	0.308 กิโลปาสกาล
ประโยชน์	นำมาใช้เป็นองค์ประกอบในยาฆ่าแมลง ใช้เป็นสารฆ่าเชื้อโรค และใช้เป็นสารตัวกลางในอุตสาหกรรมเคมี

#### 2,4-ไดคลอโรฟีนอล (2,4-dichlorophenol)

2,4-ไดคลอโรฟีนอล (2,4-dichlorophenol)<sup>[10]</sup> มีสูตรโมเลกุลเป็น  $C_6H_4Cl_2O$  ใช้เป็นตัวทำละลายในการสกัดสารหรือแยกสารมีลักษณะเป็นผลึกของแข็งสีขาวที่อุณหภูมิห้อง แต่เมื่อละลายเป็นของเหลวจะไม่มีสีและสารนี้ยังใช้อย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมยา สี ย้อมผ้า ยาฆ่าแมลง และน้ำยารักษาเนื้อไม้ ซึ่งสารนี้เป็นสารพิษและเป็นสารที่ก่อให้เกิดมะเร็ง ดังนั้นจึงมีความจำเป็นที่จะต้องทำการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมที่ปนเปื้อนด้วยสารนี้ ก่อนการปล่อยทิ้งสู่สิ่งแวดล้อม แต่หากถูกดูดซึมสู่วิวหนังหรือหากดูดซึมเข้าสู่ร่างกายปริมาณมากอาจถึงตายได้



ภาพที่ 4 โครงสร้าง 2,4-ไดคลอโรฟีนอล<sup>(10)</sup>

ตารางที่ 4 คุณสมบัติของ 2,4-ไดคลอโรฟีนอล<sup>(10)</sup>

ชื่อ	2,4-ไดคลอโรฟีนอล
สูตรโมเลกุล	$C_6H_4Cl_2O$
น้ำหนักโมเลกุล	163.00 กรัมต่อโมล
ลักษณะ	เป็นของแข็งผลึกสีขาว
ความหนาแน่น	1.38 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร
จุดหลอมเหลว	42-43 องศาเซลเซียส
จุดเดือด	209-210 องศาเซลเซียส
การละลายในน้ำ	0.45 กรัมต่อน้ำ 100 มิลลิลิตร (20 องศาเซลเซียส)
ความละลายได้	ละลายได้ในเอทานอล อีเทอร์
ประโยชน์	ใช้เป็นตัวทำละลายในการสกัดหรือแยกสาร ใช้เป็นตัวกลางเริ่มต้นในการเตรียม 2,4-ไดคลอโรฟีนอกซีอะซิติกแอซิด

#### การเตรียมสารบิสมันวานาเดต

การเตรียมสารบิสมันวานาเดต<sup>(11)</sup> สามารถทำการเตรียมได้โดยวิธีทางเคมีหลายวิธีด้วยกัน นักวิจัยหลายๆ ท่านมุ่งสนใจในการออกแบบวิธีการเตรียมในทางที่จะทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณสมบัติที่สมบูรณ์และมีประสิทธิภาพ มีวิธีดังต่อไปนี้

## 1 วิธีการเตรียมในสถานะของแข็ง (Solid state reaction)

วิธีการเตรียมในสถานะของแข็ง<sup>[11]</sup> เป็นวิธีการเตรียมสารอิเล็กทรอนิกส์แบบดั้งเดิมบางครั้งเรียกว่า กระบวนการออกไซด์ผสม (mixed oxide process) นิยมใช้กันมากที่สุด เนื่องจากเตรียมง่าย เริ่มจากนำสารตั้งต้นที่เป็นของแข็งมาชั่งให้ได้ตามสัดส่วนที่ต้องการ แล้วนำมาบดคลุกเคล้าจนเป็นเนื้อเดียวกัน (อาจใช้เครื่องเขย่าหรือเครื่องบด) อบให้แห้ง จากนั้นนำไปเผาที่อุณหภูมิและเวลาที่ต้องการ ผลผลิตที่ได้มักมีความบริสุทธิ์ต่ำไม่เป็นเนื้อเดียวกัน และบางทีอาจมีสารประกอบรูปอื่นๆ เจือปนจากสารตั้งต้น หรือจากชุดอุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียม เช่น ซิลิกา อะลูมินา เป็นต้น สิ่งเจือปนเหล่านี้มีผลกระทบต่อสมบัติต่างๆ ของสารที่ต้องการเตรียม

## 2. วิธีการเตรียมแบบตกตะกอนร่วม (Coprecipitation method)

วิธีการตกตะกอนร่วม<sup>[12]</sup> เป็นวิธีของการแยกไอออน หรือโมเลกุลของสารที่สนใจซึ่งอยู่ในเฟสของสารละลายจะถูกทำให้กระจายมาอยู่ในเฟสของของแข็ง หรือที่เรียกว่าตะกอนได้ โดยเพิ่มสมบัติที่เหมาะสมสำหรับการตกตะกอน เช่น ค่า pH ความเข้มข้น บรรยากาศ และอัตราการผสมสารละลาย เป็นต้น ซึ่งจะบริสุทธิ์แค่ไหนนั้นจะพิจารณาจากการเปรียบเทียบระหว่างค่าผลคูณของไอออน (Ion product) กับค่าคงที่ของการละลาย (Solubility product constant,  $K_{sp}$ ) วิธีการตกตะกอนเป็นวิธีที่มีกระบวนการเตรียมตามชนิดของตัวกลางหลักที่ใช้

## 3. วิธีการเตรียมแบบไฮโดรเทอร์มอล (Hydrothermal method)

วิธีไฮโดรเทอร์มอล<sup>[13-14]</sup> เป็นวิธีที่ได้รับความนิยมอย่างกว้างขวาง ในปัจจุบันได้มีการเตรียมผงเซรามิก เนื่องจากผงเซรามิกที่เตรียมได้มีความสม่ำเสมอทั้งองค์ประกอบเคมีและขนาดของอนุภาคสามารถเตรียมได้ในขั้นตอนเดียวที่อุณหภูมิและความดันปานกลาง โดยไม่ต้องผ่านขั้นตอนการแคลไซน์ (Calcination) และมีอุณหภูมิของการเผาผนึก (Sintering temperature) ต่ำ เมื่อเปรียบเทียบกับผงที่เตรียมได้จากวิธีการเตรียมทางเคมีอื่นๆ เพราะอนุภาคมีขนาดเล็กกว่าแต่วิธีการเตรียมแบบนี้จะต้องมีการควบคุมค่า pH อุณหภูมิ และความเข้มข้นของสารที่ทำปฏิกิริยาวิธีไฮโดรเทอร์มอลได้ถูกนำมาใช้ในการเตรียมสารเฟอร์โรอิเล็กทริกทั้งผงและฟิล์มบาง

กลไกพื้นฐานสำหรับวิธีไฮโดรเทอร์มอลของอนุภาคเซรามิกออกไซด์ สามารถอธิบายได้ดีเมื่ออนุภาคเป็นสารแขวนลอย กลไกของการตกตะกอนของอนุภาคที่เป็นสารพวกออกไซด์ไฮดรอกไซด์ หรือสารประกอบออกไซด์ จะสามารถละลายในสารละลายได้จนกระทั่งอิ่มตัว และสุดท้ายจะได้ผลิตภัณฑ์ตกตะกอนออกมา

กรณีของสารแขวนลอยไม่สามารถละลายในสารละลายของเหลว ดังนั้นอาจจะเติมเบสลงไปหรืออนุภาคเซรามิกส์ การเลือกใช้แต่ละกลไกขึ้นอยู่กับสภาวะในการเตรียมนั้นด้วย การเตรียมโดยวิธีไฮโดรเทอร์มอลในการผลิตผงเซรามิกส์ มีข้อได้เปรียบ คือ ใช้อุณหภูมิต่ำไม่สูงมาก

เหมือนการเผาแคล-ไซน์ และวัตถุดิบขั้นต้นมีราคาถูกกว่า แต่อย่างไรก็ตามกระบวนการนี้สามารถเลือกใช้ออกไซด์ได้บางชนิดเท่านั้น ซึ่งเป็นชนิดที่เกิดได้ภายใต้สภาวะไฮโดรเทอร์มอล

#### 4. วิธีการเตรียมแบบซอล-เจล (Sol-gel method)

วิธีการเตรียมแบบซอล-เจล<sup>15-16)</sup> นิยมใช้ในการเตรียมอิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งจะเกี่ยวข้องกับปฏิกิริยาโลหะอัลคอกไซด์ หลังจากนั้นทำให้แห้งและอัดผงอนุภาคให้ติดกันเป็นก้อนแข็ง โดยใช้ความร้อนแต่เป็นอุณหภูมิต่ำกว่าจุดหลอมละลายของโลหะ จะได้สารที่เป็นตัวนำไปผลิตอุปกรณ์ที่เป็นเซรามิกส์

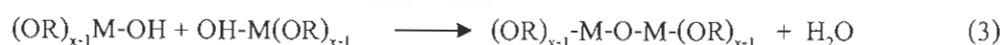
ซอล (Sol) คือ สารแขวนลอยในสถานะของเหลวคล้ายสารละลายแขวนลอยชนิดหนึ่ง ซึ่งจับตัวแข็งเป็นวุ้น มีความหนืดสูงจนสารละลายมีความยืดหยุ่นอย่างของแข็ง ที่เป็นเช่นนั้นเนื่องจากโครงร่างตาข่าย (Net work) ของเฟสที่กระจายตัว (Dispersed phase) หรือคอลลอยด์ (Colloid) หรือสารตัวกลางทำกระจาย (Dispersion medium) วนเวียนอยู่ในโครงร่างตาข่ายนั้น การเปลี่ยนจากซอล (Sol) ไปเป็นเจล (Gel) จะทำให้มีความหนืดสูงขึ้น ในระบบของซอล-เจล จะอธิบายได้เป็น 2 แบบ ซึ่งแตกต่างกัน คือ

1. ระบบอนุภาคที่แขวนลอย จะเกี่ยวข้องกับการกระจายของโลหะออกไซด์ หรืออนุภาคของไฮดรอกไซด์ ในของเหลวที่เป็นซอล แล้วซอลจะรวมตัวกันเป็นเจล

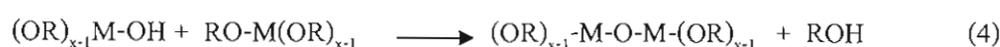
2. ระบบของพอลิเมอร์ จะเกี่ยวข้องกับการเกิดพอลิเมอร์ของสารเคมีอินทรีย์ของโลหะ-อัลคอกไซด์ที่จะผลิตเจลได้พอลิเมอร์ที่มีลักษณะโครงร่างตาข่าย สำหรับระบบของพอลิเมอร์โมเลกุลที่เป็นโครงร่างตาข่ายได้จากการเกิดพอลิเมอร์ของโลหะอินทรีย์ เช่น โลหะอัลคอกไซด์ซึ่งประกอบด้วยอะตอมของโลหะกับกลุ่มอัลคิลที่ต่อกับออกซิเจน เช่น  $-CH_3$  (เมทิล),  $-C_2H_5$  (เอทิล) เป็นต้น ดังปฏิกิริยาโลหะอัลคอกไซด์สายสั้นๆ สำหรับ  $M(OR)_x$  ที่ถูกไฮโดรไลซิสบางส่วนหรือทั้งหมด



ปฏิกิริยาต่อไปเป็นการต่อสายลูกโซ่จากปฏิกิริยาพอลิคอนเดนเซนชัน (Polycondensation)



ออกโซเลชัน (Oxolation)

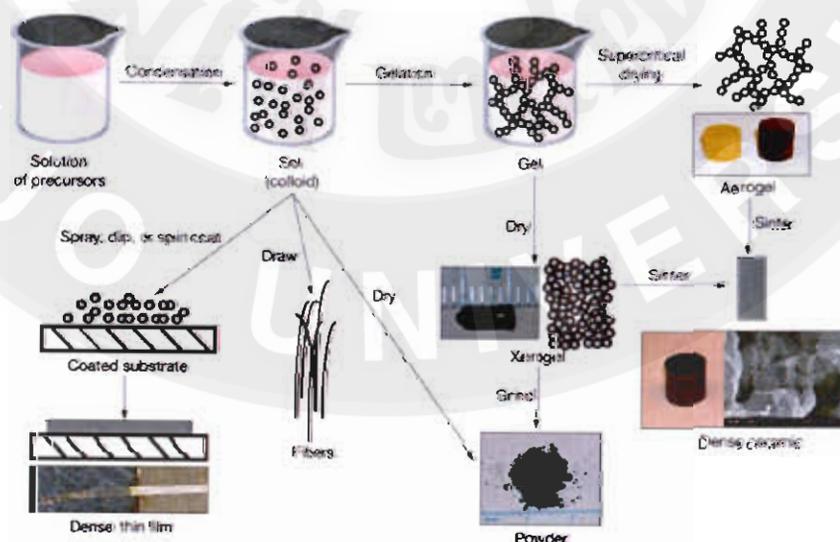


อัลโคโซเลชัน (Alcoxolation)

ในระบบนี้จะมีเจลเลชัน (Gelation) เกิดขึ้น เมื่อมีสารที่มีโมเลกุลสายยาวเป็นผลิตภัณฑ์จากการเกิดไฮโดรไลซิส และพอลิคอนเดนเซนชันของอัลคอกไซด์ ผลิตภัณฑ์จะมีลักษณะเป็นโครงร่างตาข่ายที่ใหญ่ขึ้นอย่างรวดเร็ว จุดที่เริ่มเป็นเจลจะเป็นช่วงเวลาที่เกิดโมเลกุลขนาดใหญ่ที่ล้อมรอบซอล ซึ่งจะสามารถสังเกตได้จากการทดลอง พบว่ามีความหนืดเพิ่มขึ้น เกิดพฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง และการไหลของเจลที่เหมาะสมซึ่งสามารถทำเป็นฟิล์ม เส้นใย หรือการขึ้นรูปต่างๆ

ขั้นตอนการทำให้เจลแห้งจะทำให้เจลเกิดรูพรุน และเป็นของแข็งออสัญฐานที่อนุภาคของเจลตัวอย่างของการทำให้แห้งโดยการระเหยเจลทำให้อยู่ในรูปของเซโรเจล (Xerogel) ซึ่งจะมีการยุบตัวของผิวหน้าเจลเท่านั้น แต่การทำให้เจลแห้งภายใต้สภาพวิกฤต เช่น ที่ความดันวิกฤตและอุณหภูมิวิกฤต เมื่อของเหลวและไอสมดุลซึ่งกันและกัน จะสามารถกำจัดของเหลวและไอที่อยู่ระหว่างผิวทั้งสอง จะทำให้เกิดรูพรุนทั่วทั้งหมด เรียกว่า แอโรเจล (Aerogel) แสดงดังรูป 1.5

วิธีแบบซอล-เจล เป็นวิธีการเตรียมสาร โดยเริ่มจากการใช้สารตั้งต้น ที่อยู่ในสภาพของสารละลายซึ่งผสมเข้ากันเป็นอย่างดีและสามารถทำปฏิกิริยากันในระดับโมเลกุล ทำให้เกิดโมเลกุลที่เป็นสายโซ่ยาวหรือเกิดอนุภาคที่มีขนาดเล็กกระจายตัวอยู่ในของเหลวที่เรียกว่า ซอล (Sol) เมื่อความเข้มข้นของสารละลายเพิ่มขึ้น ความหนืดของสารจะสูงขึ้นจนกระทั่งกลายสภาพเป็นสารกึ่งของเหลวที่เรียกว่า เจล (Gel) จากนั้นจึงนำเจลที่ได้ไปทำให้แห้งสนิท แล้วบดให้เป็นผงละเอียดก่อนนำไปเผา แคลไซน์ด้วยอุณหภูมิที่เหมาะสมต่อไป วิธีการเตรียมแบบซอล-เจล จะทำให้ได้ผงที่มีขนาดเล็กและมีความบริสุทธิ์สูงมาก และสามารถผสมเป็นเนื้อเดียวกัน



ภาพที่ 5 วิธีการเตรียมสารแบบซอล-เจล<sup>[17]</sup>

ตารางที่ 5 การเปรียบเทียบวิธีการเตรียมวัสดุโฟโตแคตาไลติกส์<sup>(18)</sup>

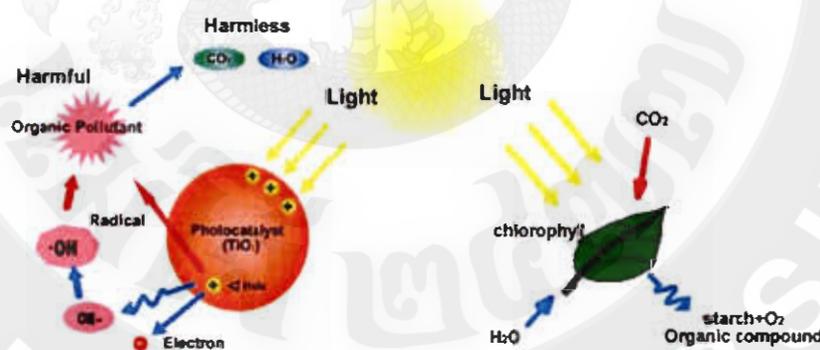
วิธี	ข้อดี	ข้อเสีย
1. โซลิดสเตท (Solid state method)	1. สารตั้งต้นราคาถูก 2. สังเคราะห์ได้ปริมาณมาก	1. อนุภาคมีขนาดใหญ่ 2. มีสารมลทินจากขั้นตอนการบด 3. ใช้อุณหภูมิสูงในการเผาแคลไซน์
2. การตกตะกอนร่วม (Co-precipitation method)	1. ได้ผงละเอียด (ถ้าอัตราการตกตะกอนต่ำในสารละลายที่มีความเข้มข้นเจือจาง)	1. อนุภาคเกาะกัน เกิดการรวมตัวเป็นก้อน 2. ต้องบดเพื่อให้ได้ผงละเอียดและขนาดอนุภาคสม่ำเสมอ
3. ไฮโดรเทอร์มอล (Hydrothermal method)	1. ได้ผงละเอียด 2. ความบริสุทธิ์สูง 3. สามารถควบคุมขนาดอนุภาคได้	1. ต้องควบคุมอุณหภูมิ ความเข้มข้นของสารระหว่างที่เข้าทำปฏิกิริยา 2. ต้องควบคุมค่า pH ในเครื่อง 3. ต้องมีการควบคุมอัตราการคนอย่างสม่ำเสมอ
4. ซอล-เจล (Sol-gel method)	1. ได้ผงละเอียดสม่ำเสมอ มีความบริสุทธิ์สูง 2. เกิดการรวมตัวกันในระดับโมเลกุลของสารตั้งต้น ทำให้พื้นที่ผิวของเจลมาก	1. สารตั้งต้นมีราคาสูง 2. มีความชื้นสูง

#### ปฏิกิริยาโฟโตแคตาไลติกส์ (Photocatalytic)

กระบวนการโฟโตแคตาไลติกส์ (Photocatalytic process)<sup>(19-22)</sup> เป็นเทคนิคการเร่งปฏิกิริยาโดยใช้แสงไปกระตุ้นอิเล็กตรอนที่แถบวาเลนซ์ (Valence band) ของสารประกอบกึ่งตัวนำ ซึ่งแวนดลอยอยู่ในน้ำที่มีสิ่งเจือปนหลุดออกจากตำแหน่งส่งผลให้คู่อิเล็กตรอนที่หลุดไป และโฮล (hole) ซึ่งเป็นช่องว่างที่ไม่มีอิเล็กตรอน ซึ่งมีประจุบวกสามารถสร้างพลังงานความร้อนกลับมา รวมตัวกันหรือทำปฏิกิริยากับสิ่งแวดล้อมภายนอก โดยที่โฮลจะทำปฏิกิริยากับน้ำและหมู่ไฮดรอกซิล เพื่อทำให้เกิดไฮดรอกซิลเรดิคัล (Hydroxyl radical) ซึ่งเป็นตัวออกซิไดส์ที่แรงซึ่งจะสามารถไปทำให้โมเลกุลของสารอินทรีย์ที่ละลายอยู่แตกตัวออกกลายเป็น น้ำ คาร์บอนไดออกไซด์ ในที่สุด

ส่วนอิเล็กตรอนจะทำปฏิกิริยากับออกซิเจนที่ละลายอยู่ ทำให้เกิดซูเปอร์ออกไซด์แอนไอออน ซึ่งสามารถทำให้เกิดไฮดรอกซิลเรดิคัลได้ หลังจากปฏิกิริยาผ่านไปหลายขั้นตอน ในอีกทางหนึ่ง อิเล็กตรอนสามารถลดปริมาณโลหะบางชนิดที่ละลายอยู่ได้ด้วย

ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อประสิทธิภาพของปฏิกิริยาการเร่งด้วยแสง คือ การรวมตัวกันใหม่ของอิเล็กตรอนกับโฮล (Electron/Hole recombination) โดยปกติแล้วความสัมพันธ์ของอัตราการรวมตัวกันใหม่กับปริมาณอิเล็กตรอนและโฮลจะเพิ่มขึ้นอย่างเป็นเส้นตรง กล่าวคือ ถ้าปฏิกิริยารีดักชันสามารถเกิดได้อย่างรวดเร็ว ซึ่งหมายถึง ปริมาณอิเล็กตรอนที่แถบคอนดักชันของอนุภาคของสารกึ่งตัวนำมีมาก จะมีผลทำให้การรวมตัวกันใหม่ของอิเล็กตรอนกับโฮลมีอัตราลดลง และประสิทธิภาพของปฏิกิริยาออกซิเดชันจะเพิ่มขึ้น เนื่องจากโฮลสามารถทำปฏิกิริยาออกซิเดชันได้มากขึ้น ในทางกลับกันถ้าโฮลที่ว่างของแถบวาเลนซ์ถูกบรรจุด้วยอิเล็กตรอนให้เต็มอย่างรวดเร็วด้วยปฏิกิริยาออกซิเดชันจะมีผลทำให้ประสิทธิภาพของปฏิกิริยารีดักชันเพิ่มขึ้น ผลลัพธ์โดยรวมแล้วคือว่า เมื่อเกิดปฏิกิริยารีดักชันของโลหะจะเป็นการส่งเสริมให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของสารอินทรีย์ อย่างไรก็ตามสิ่งที่สนับสนุนการเพิ่มของขบวนการย้อนกลับเป็นความซับซ้อนยุ่งยากมาก เพราะโดยปกติแล้วปฏิกิริยาออกซิเดชันจะเกิดผ่านไฮดรอกซิลเรดิคัลเท่านั้น แสดงดังรูป 1.6



ภาพที่ 6 ปฏิกิริยาโฟโตแคตาไลติกส์และ โฟโตเคมี<sup>[23]</sup>

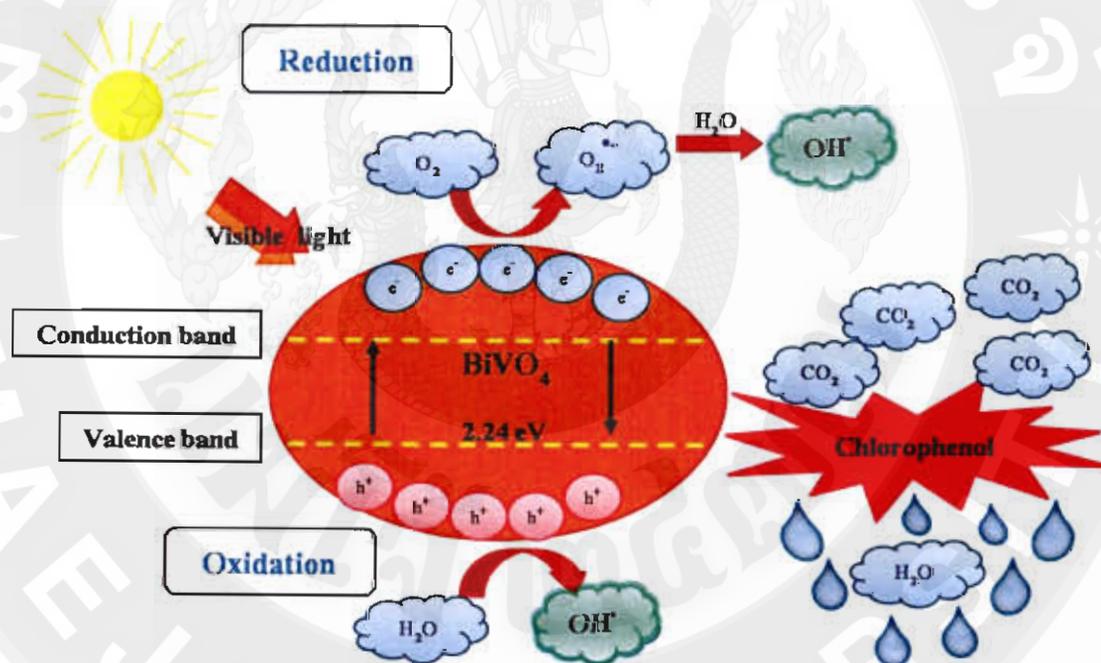
#### กลไกของปฏิกิริยาโฟโตแคตาไลติกส์ของบิสมัทนาเคด

ปฏิกิริยาโฟโตแคตาไลติกส์ของบิสมัทนาเคด<sup>[24-25]</sup> ในการบำบัดสารอินทรีย์โดยทั่วไปนั้นจะเกิดจากการที่บริเวณผิวของสารประเภทโฟโตแคตาไลสต์ที่มีช่องว่าง (Hole) จะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันกับไฮดรอกไซด์ไอออน ( $\text{OH}^-$ ) และน้ำ ( $\text{H}_2\text{O}$ ) เกิดเป็นไฮดรอกซิลเรดิคัล ( $\text{OH}^\cdot$ ) และเรดิคัลตัวอื่นๆ ส่วนที่บริเวณผิวของสารประเภทโฟโตแคตาไลสต์ ที่มีอิเล็กตรอนจะเกิดปฏิกิริยา

รีดักชันกับออกซิเจน ( $O_2$ ) เกิดเป็นซูเปอร์ออกไซด์ไฮดรอกไซด์ไอออนเรดิคัล ( $O_2^{\cdot-}$ ) เปอร์ไฮดรอกซิลเรดิคัลออกไซด์ ( $HO^{\cdot}$ ) และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ( $H_2O_2$ ) จะเกิดจากปฏิกิริยาระหว่างน้ำ ( $H_2O$ ) กับซูเปอร์ออกไซด์ไฮดรอกไซด์ไอออนเรดิคัล ( $O_2^{\cdot-}$ ) โดยสามารถเกิดไฮดรอกซิลเรดิคัล ( $OH^{\cdot}$ ) ได้อีก

ในขณะที่สภาวะที่มีแก๊สออกซิเจนไม่เพียงพอ จะทำให้เกิดโปรตอน ( $H^+$ ) ซึ่งเกิดจากการแตกตัวของน้ำเข้ามาจับอิเล็กตรอนแทนเกิดเป็นไฮโดรเจนเรดิคัล ( $H^{\cdot}$ ) โดยจากการศึกษาพบว่าไฮโดรเจนเรดิคัล ( $H^{\cdot}$ ) จะทำหน้าที่เป็นตัวออกซิเดชันหลักในปฏิกิริยาโฟโตแคตาลิสต์ เนื่องจากไฮโดรเจนเรดิคัล ( $H^{\cdot}$ ) เป็นสารที่ไวต่อการเกิดปฏิกิริยา

เนื่องจากไฮดรอกซิลเรดิคัล ( $OH^{\cdot}$ ) และช่องว่างที่ผิวของตัวแคตาลิสต์ มีคุณสมบัติเป็นประจุบวก การออกซิไดซ์ของช่องว่างกับไฮดรอกไซด์ไอออน ( $OH^-$ ) จะเกิดไฮดรอกซิลเรดิคัล ( $OH^{\cdot}$ ) และขณะเดียวกันช่องว่างจะเกิดการออกซิไดซ์กับสารอินทรีย์ด้วย แสดงดังรูป 1.7



ภาพที่ 7 กลไกการกำจัดคลอโรฟีนอล ด้วยปฏิกิริยาโฟโตแคตาไลติกส์ของบิสมัทวานาเดต ภายใต้การฉายแสงวิสิเบิล<sup>[25]</sup>

ดังนั้นการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของปฏิกิริยาโฟโตแคตาไลติกส์ จึงเกิดได้ 2 กระบวนการ คือ

1. การเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของช่องว่างกับไฮดรอกไซด์ไอออน ( $OH^-$ ) และน้ำ ( $H_2O$ ) เกิดเป็นไฮดรอกซิลเรดิคัล ( $OH^{\cdot}$ ) และปฏิกิริยารีดักชันของอิเล็กตรอนกับออกซิเจน ( $O_2$ )

หรือไฮโดรเจนไอออน ( $H^+$ ) เกิดเป็นซูเปอร์ออกไซด์ไอออนเรดิคัล ( $O_2^{\cdot-}$ ) เปอร์ไฮดรอกซิลเรดิคัล- ออกไซด์ ( $HO^{\cdot}$ ) และไฮโดรเจนเรดิคัล ( $H^{\cdot}$ )

2. การเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของสารอินทรีย์ที่ดูดติดบนโฮล (Hole) ของตัวแคตาลิสต์ ดังนั้นการเกิดปฏิกิริยาโฟโตแคตาไลติกส์ พบว่า ตัวปฏิกิริยาหลักที่เกิดขึ้น คือ ไฮดรอกซิลเรดิคัล ( $OH^{\cdot}$ ) กับสารอินทรีย์ ส่วนการเกิดปฏิกิริยาระหว่างช่องว่างกับสารอินทรีย์นั้นเป็นปฏิกิริยารองซึ่งเกิดขึ้นได้น้อยกว่า

### วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อศึกษาวิธีการเตรียมผงบิสมัทนาเคด โดยวิธีซอล-เจล
2. เพื่อศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของผงบิสมัทนาเคด
3. เพื่อศึกษาถึงประสิทธิภาพในการสลายตัวของฟีนอลและคลอโรฟีนอลโดยปฏิกิริยาโฟโตแคตาไลติกส์ของผงบิสมัทนาเคด
4. เพื่อนำความรู้ที่ได้ไปประยุกต์ใช้ในการกำจัดฟีนอลและคลอโรฟีนอลที่ปนเปื้อนในแหล่งน้ำธรรมชาติจากกิจกรรมทางภาคเกษตรกรรม

### ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถเตรียมและพัฒนาสารประเภทโฟโตแคตาลิสต์ที่เตรียมได้โดยวิธีซอล-เจล
2. สามารถกำจัดฟีนอลและคลอโรฟีนอล ที่ปนเปื้อนในแหล่งน้ำธรรมชาติจากกิจกรรมทางภาคเกษตรกรรม
3. นำความรู้ที่ได้ไปประยุกต์และพัฒนาผลิตภัณฑ์สารประเภทโฟโตแคตาลิสต์ สำหรับการใช้กำจัดของเสียที่อยู่ในรูปของฟีนอลและคลอโรฟีนอล ในโรงงานอุตสาหกรรมการผลิตยาปราบศัตรูพืช โดยมีภาครัฐและภาคเอกชนร่วมมือกัน ให้องค์ความรู้แก่ประชาชน
4. สามารถนำเสนอผลงานทางวิชาการในที่ประชุมระดับชาติและระดับนานาชาติ
5. สามารถเผยแพร่ผลงานทางวิชาการในวารสารระดับชาติและระดับนานาชาติ

### การตรวจเอกสาร

Gotić และคณะ<sup>[11]</sup> ได้ทำการศึกษาการเตรียมผงบิสมัทวานาเดตบริสุทธิ์ที่มีโครงสร้างผลึกแบบโมโนคลินิก โดยวิธีแบบดั้งเดิม (Solid-state reaction) ได้ผงบิสมัทวานาเดตแบบไม่เป็นเนื้อเดียวกัน (Inhomogeneously) และเป็นแบบเนื้อเดียวกัน (Homogeneously) ที่มีอนุภาคขนาดประมาณ 15 ไมโครเมตร และมีรูปร่างไม่สม่ำเสมอ ส่วนผงบิสมัทวานาเดตที่เตรียมโดยวิธีไฮโดรเทอร์มอลที่อุณหภูมิห้อง มีขนาดอนุภาคเท่ากับ 0.3-1.2 ไมโครเมตร และได้ทำการตรวจสอบลักษณะเฉพาะของผงบิสมัทวานาเดต โดยเทคนิครามานสเปกโทรสโคปี พบว่า การเตรียมตัวอย่างที่อุณหภูมิสูงจะมีโครงสร้างของวานาเดต ( $\text{VO}_4^{3-}$ ) แบบเตตระฮีดรอล (Tetrahedral) ที่มีสมมาตรน้อยกว่าการเตรียมตัวอย่างที่อุณหภูมิต่ำและพบว่าตัวอย่างที่เตรียมที่อุณหภูมิสูงจะมีความเป็นผลึกที่ดีกว่า

Liu และคณะ<sup>[13]</sup> ได้ทำการเตรียมผงบิสมัทวานาเดต ( $\text{BiVO}_4$ ) โดยวิธีไฮโดรเทอร์มอล โดยใช้สารตั้งต้น คือสารละลายบิสมัทไนเตรตและวานาเดียมที่มีจากสารตั้งต้นวานาเดียมออกไซด์ ( $\text{V}_2\text{O}_5$ ) และโซเดียมวานาเดต ( $\text{NaVO}_3$ ) ทำการตรวจสอบลักษณะเฉพาะของผงบิสมัทวานาเดต โดยเทคนิคเอ็กซ์เรย์ดีฟแฟรคชัน พบว่า การเตรียมผงบิสมัทวานาเดตที่บริสุทธิ์จะต้องใช้อุณหภูมิ 200 และ 140 องศาเซลเซียส ที่เตรียมได้จากวานาเดียมออกไซด์และโซเดียมวานาเดต พบว่า จะเกิดการรวมตัวของอนุภาคเล็กๆ ที่มีลักษณะเป็นแท่งและเป็นแผ่น ตามลำดับ โดยมีโครงสร้างผลึกแบบโมโนคลินิก

Zhang และคณะ<sup>[5]</sup> ได้ทำการศึกษาการเหนี่ยวนำแสงช่วงวิสิเบิลใช้ทำปฏิกิริยาโฟโตแคตตาลิซิสของผงบิสมัทวานาเดต ( $\text{BiVO}_4$ ) ที่เตรียมได้โดยวิธีการเผาไหม้สารละลาย (Solution combustion) และทำการศึกษาปฏิกิริยาโฟโตแคตตาลิซิส เพื่อใช้ในการสลายตัวของสีซ็อมโรดามีนบี (Rhodamine B, RhB) และฟีนอล ภายใต้การฉายรังสีของแสงช่วงวิสิเบิล ( $\lambda = 420$  นาโนเมตร) ซึ่งการสลายตัวของสีซ็อมโรดามีนบีที่มีความเข้มข้นสูงและการเปลี่ยนแปลงค่า COD แสดงให้เห็นว่าปฏิกิริยาโฟโตแคตตาลิซิสของผงบิสมัทวานาเดต มีประสิทธิภาพในการย่อยสลายสารประกอบอินทรีย์ที่มีโครงสร้างเป็นแบบอะโรมาติก และการลดลงของปริมาณคาร์บอนทั้งหมดในสารอินทรีย์ (TOC) แสดงให้เห็นว่าการเกิดไมเนอร์ไรเซชัน (mineralization) ของสีซ็อมโรดามีนบีมีมากกว่าการเกิดปฏิกิริยาโฟโตแคตตาลิซิสของผงบิสมัทวานาเดต นอกจากนี้ยังช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของปฏิกิริยาโฟโตแคตตาลิซิสในการย่อยสลายฟีนอล

D'Oliveira และคณะ<sup>[26]</sup> ได้ทำการศึกษาการกำจัดสารประเภทโมโนคลอโรฟีนอล โดยใช้ปฏิกิริยาโฟโตแคตาไลติกส์ โดยทำการศึกษาการเปรียบเทียบระหว่างคลอโรฟีนอล (2-Chlorophenol, 2CP) และคลอโรฟีนอล (3-Chlorophenol, 3CP) รวมไปถึงปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อปฏิกิริยาโฟโตแคตาไลติกส์ของ 2CP และ 3CP คือ ความเข้มข้นเริ่มต้น ค่า pH และอินเตอร์มีเดียต โดยทำการทดลองฉายแสงที่มีความยาวคลื่น ( $\lambda$ ) มากกว่าหรือเท่ากับ 340 นาโนเมตร และ 290 นาโนเมตร ไปยังสารละลาย 2CP และ 3CP ที่มีการเติมไททานเนียมไดออกไซด์ และไม่มีการเติมไททานเนียมไดออกไซด์ พบว่า ที่ความยาวคลื่นมากกว่า 340 นาโนเมตร ทั้ง 2CP และ 3CP ที่ไม่มีการเติมไททานเนียมไดออกไซด์จะเกิดปฏิกิริยาน้อยมาก สามารถย่อยสลายโมโนคลอโรฟีนอลได้น้อยกว่า 5 % ที่เวลา 120 นาที แต่เมื่อมีการเติมไททานเนียมไดออกไซด์ พบว่า สามารถย่อยสลายโมโนคลอโรฟีนอลได้มากขึ้น แต่ที่ความยาวคลื่นมากกว่า 290 นาโนเมตร สารละลายโมโนคลอโรฟีนอลที่ไม่มีไททานเนียมไดออกไซด์ สามารถย่อยสลายโมโนคลอโรฟีนอลได้ (2CP และ 3CP) ถึง 99 % ที่เวลา 175 และ 245 นาที ตามลำดับ สำหรับสารละลายโมโนคลอโรฟีนอล ที่มีไททานเนียมไดออกไซด์ สามารถย่อยสลายโมโนคลอโรฟีนอลได้เพิ่มอีกขึ้นเล็กน้อย

ดังนั้นเพื่อหลีกเลี่ยงผลของปฏิกิริยาโฟโตไลซิส จึงต้องมีการฉายแสงที่มีความยาวคลื่นมากกว่า 340 นาโนเมตร ในการศึกษาถึงผลของความเข้มข้นเริ่มต้น พบว่า ในปฏิกิริยาการย่อยสลาย 3CP อัตราการเกิดปฏิกิริยาจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ เมื่อความเข้มข้นเพิ่มขึ้น และจะเริ่มคงที่ เมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นเท่ากับ 1.6 มิลลิโมลต่อลิตร

ส่วนผลของค่า pH นั้น พบว่า ที่ช่วง 3.5-9.0 จะไม่มีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยา ในการวิเคราะห์สารตัวกลางต่างๆ ที่เกิดขึ้นในระหว่างการสลายตัวของ 3CP พบสารตัวกลาง 10 ชนิด โดยตัวหลัก คือ คลอโรไฮโดรควิโนน (Chlorohydroquinone, CHQ) และไฮดรอกซีไฮโดรควิโนน (Hydroxyhydroquinone, HHQ) โดยคลอโรไฮโดรควิโนนจะสลายตัวได้อย่างสมบูรณ์ที่เวลา 60 นาที นับจากเมื่อ 3CP ถูกย่อยสลายจนหมดและไฮดรอกซีไฮโดรควิโนน สามารถสลายตัวได้รวดเร็วกว่าคลอโรไฮโดรควิโนน ในปฏิกิริยาโฟโตแคตาไลติกส์ของ 3CP

Ilisz และคณะ<sup>[27]</sup> ได้ทำการศึกษาวิธีการบำบัดน้ำเสียให้เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมด้วยการนำเสนอในรูปแบบของสารอินทรีย์ที่เป็นมลพิษคือ 2-chlorophenol (2CP) ซึ่งครั้งแรกจะถูกดูดซับและถูกกำจัดออกโดยปฏิกิริยาโฟโตไลติกส์โดยตรง หรือกระบวนการโฟโตแคตาไลติกส์ที่ต่างกัน จะเป็นตัวดูดซับสารอินทรีย์ (ที่มี hexadecylpyridinium chloride) จากแร่ดินเหนียว (montmorillonite) และจะถูกโฟโตแคตาไลต์เป็น Degussa P25 ปริมาณคาร์บอนของสารอินทรีย์และปริมาณคลอรีนของสารอินทรีย์ที่ต้องการตรวจวัด ได้จากกระบวนการของไมเนอร์โรเซชัน ในขณะที่เกิดการย่อยสลายของ 2CP และการก่อตัวของตัวกลางซึ่งจะสามารถติดตามได้ด้วยเทคนิค

HPLC การย่อยสลายสารมลพิษที่เป็นสารอินทรีย์จะมาพร้อมกับการทำลายตัวดูดซับ การกำจัด 2CP ที่ผ่านการรวมกันของตัวดูดซับ และสามารถเกิดปฏิกิริยาโฟโตแคตาไลติกส์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ในช่วงเวลาที่เหมาะสม และสามารถนำไปใช้ในโรงงานในการบำบัดน้ำเสียให้เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม

Suryaman และคณะ<sup>[28]</sup> ได้ทำการศึกษาการบำบัดน้ำเสียด้วยการรวมตัวเอาวิธีการบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพและกระบวนการโฟโตแคตาไลติกส์ มาเพื่อใช้ในการกำจัด 2-chlorophenol, 2,4-dichlorophenol, 2,4,5-trichlorophenol และ pentachlorophenol ที่ปนเปื้อนอยู่ในน้ำประปาการกำจัดสารประกอบคลอรีนที่ฟีนอลสามารถทำได้โดยการบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพ และการบำบัดน้ำเสียด้วยปฏิกิริยาโฟโตแคตาไลติกส์ภายใต้การฉายรังสียูวี ร่วมกับการใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ และยังสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้

Zhang และคณะ<sup>[29]</sup> ได้ทำการศึกษาแผ่นซิลเวอร์ที่เจือปนบนแผ่นฟิล์มบิสมัทวานาเดตโดยเทคนิคโฟโตรีดักชัน ซึ่งทำการวิเคราะห์โครงสร้างพื้นฐานของแผ่นซิลเวอร์ ด้วยเทคนิคเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรกชัน การศึกษาด้วยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดทำให้ทราบถึงขนาดของแผ่นซิลเวอร์ที่มีขนาด 10-20 มิลลิเมตร การย่อยสลายฟีนอลด้วยปฏิกิริยาโฟโตแคตาไลติกส์ จะแสดงอัตราการลดลงของฟีนอลบนซิลเวอร์ที่เจือปนในแผ่นฟิล์มบิสมัทวานาเดต เปรียบเทียบกับแผ่นฟิล์มบิสมัทวานาเดต การขนส่งอิเล็กตรอนจากแผ่นบิสมัทวานาเดตในโลหะซิลเวอร์ สามารถเพิ่มประจุในการแยกได้ และเพิ่มความสามารถในการทำปฏิกิริยาโฟโตแคตาไลติกส์ ซึ่งจะสามารถกระตุ้นการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนได้ และแสงที่ผ่านรูของแผ่นซิลเวอร์ จะถูกปล่อยออกมาบนแผ่นฟิล์มบิสมัทวานาเดต ในเวลา 4 ชั่วโมง การกำจัดฟีนอลบนซิลเวอร์ที่เจือปนในแผ่นฟิล์มบิสมัทวานาเดต และแผ่นฟิล์มบิสมัทวานาเดตในกระบวนการโฟโตอิเล็กโตรแคตาไลติกส์ สามารถย่อยสลายฟีนอลได้ 94.1% และ 61.0% ตามลำดับ

## อุปกรณ์และวิธีการ

## สารเคมี

ตารางที่ 6 สารเคมีที่ใช้ในการวิจัย

ชื่อสารเคมี	เกรด/ความบริสุทธิ์	บริษัทผู้ผลิต	ประเทศ
1. Acetic acid (CH <sub>3</sub> COOH)	99.7 % v/v	Pathumwan	Thailand
2. Acetonitrile (CH <sub>3</sub> CN)	99.9 % v/v	Pathumwan	Thailand
3. Ammonium vanadate (NH <sub>4</sub> VO <sub>3</sub> )	99.5 % w/v	Ajax	Australia
4. Bismuth nitrate (Bi(NO <sub>3</sub> ) <sub>3</sub> ·5H <sub>2</sub> O)	99.0 % w/v	Ajax	Australia
5. 2-Chlorophenol (C <sub>6</sub> H <sub>5</sub> ClO)	98.0 % v/v	Fluka	England
6. 2,4-Dichlorophenol (C <sub>6</sub> H <sub>5</sub> Cl <sub>2</sub> O)	97.0 % w/v	Fluka	England
7. Ethanol (C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> OH)	99.8 % v/v	Merck	Germany
8. Methanol (CH <sub>3</sub> OH)	99.9 % v/v	Pathumwan	Thailand
9. Nitric acid (HNO <sub>3</sub> )	65.0 % v/v	Merck	Germany
10. Phenol (C <sub>6</sub> H <sub>5</sub> OH)	99.5 % w/v	Odczynniki Chemiczne SA	Poland
11. 2-Propanol (C <sub>3</sub> H <sub>7</sub> OH)	99.8 % w/v	Merck	Germany

## เครื่องมือและอุปกรณ์

ตารางที่ 7 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย

เครื่องมือและอุปกรณ์	บริษัทผู้ผลิตและรุ่น	ประเทศ
1. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope)	JEOL JSM-5410LV	Japan
2. โกร่งบด (Mortar)	-	-
3. เครื่องเคลือบทองด้วยสูญญากาศ (Fine coater)	JEOL JFC 1200	Japan
4. เครื่องโครมาโทกราฟีของเหลวสมรรถนะสูง (High performance liquid chromatograph)	Agilent HP 1100	USA
5. เครื่องชั่งชนิด 4 ตำแหน่ง (Analytical balance)	Mettler Toledo AB304-5	Switzerland
6. เครื่องฟูรีเยร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตร- มิเตอร์ (Fourier transform infrared spectrophotometer)	PerkinElmer SpectrumRX I	USA
7. เครื่องวัดการกระจายพลังงาน สเปกโตรโฟโต มิเตอร์ (Energy dispersive X-ray spectrometer)	Oxford IncaPentaFETx3	England
8. เครื่องวิเคราะห์หาพื้นที่ผิวอนุภาค (Surface area analyzer)	Quantachrome Autosorb 1 MP	USA
9. เครื่องอัลตราโซนิค (Ultrasonic)	Labquid I36H	England
10. เครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรคโตมิเตอร์ (X-ray diffractometer)	Bruker D8 Advance	Germany
11. ตู้อบอุณหภูมิ (Hotbox oven size 2)	Thai Polymedic Gallenkamp	Thailand

## วิธีการวิจัย

### 1. วิธีการเตรียมสารเคมี

#### 1.1 การเตรียมสารละลายกรดไนตริก ความเข้มข้น 4.0 โมลาร์

1. ปิเปตสารละลายกรดไนตริก เข้มข้น 65 % ปริมาตร 27.30 มิลลิลิตร ใส่ลงในขวดวัดปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร
2. ปรับปริมาตรด้วยน้ำปราศจากไอออนในขวดวัดปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร จนมีปริมาตรครบ

#### 1.2 การเตรียมสารละลาย 2-โพรพานอล ความเข้มข้น 2.0 โมลาร์

1. ปิเปตสารละลาย 2-โพรพานอล ปริมาตร 15.33 มิลลิลิตร ใส่ลงในขวดวัดปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร
2. ปรับปริมาตรด้วยน้ำปราศจากไอออนในขวดวัดปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร จนมีปริมาตรครบ

#### 1.3 การเตรียมสารละลายบิสมัทไนเตรท ความเข้มข้น 0.03 โมลาร์

1. ชั่งบิสมัทไนเตรท เพนตะไฮเดรต หนัก 0.3693 กรัม ละลายด้วยสารละลายกรดไนตริกเข้มข้น 4.0 โมลาร์ ปริมาตร 20 มิลลิลิตร ในบีกเกอร์ขนาด 100 มิลลิลิตร คนสารละลายด้วยแท่งแม่เหล็ก คนจนสารละลายหมด
2. เทลงในขวดวัดปริมาตรขนาด 25 มิลลิลิตร แล้วปรับปริมาตรด้วยสารละลายกรดไนตริกเข้มข้น 4.0 โมลาร์ ในขวดวัดปริมาตร จนมีปริมาตรครบ

#### 1.4 การเตรียมสารละลายแอมโมเนียมวานาเดต ความเข้มข้น 0.03 โมลาร์

1. ชั่งแอมโมเนียมวานาเดต หนัก 0.0891 กรัม ละลายด้วยน้ำปราศจากไอออน ปริมาตร 50 มิลลิลิตร ในบีกเกอร์ขนาด 100 มิลลิลิตร คนสารละลายด้วยแท่งแม่เหล็ก คนจนสารละลายหมด
2. เทลงในขวดวัดปริมาตรขนาด 50 มิลลิลิตร แล้วปรับปริมาตรด้วยน้ำปราศจากไอออน ในขวดวัดปริมาตร จนมีปริมาตรครบ

#### 1.5 การเตรียมสารละลายฟีนอล ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร

1. ชั่งฟีนอล หนัก 0.0102 กรัม ละลายด้วยน้ำปราศจากไอออนในบีกเกอร์ขนาด 100 มิลลิลิตร คนสารละลายด้วยแท่งแก้วจนสารละลายหมด

2. เทสารลงในขวดวัดปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร แล้วปรับปริมาตรด้วยน้ำปราศจากไอออนในขวดวัดปริมาตร จนมีปริมาตรครบ

#### 1.6 การเตรียมสารละลาย 2-คลอโรฟีนอล ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร

1. ปิเปต 2-คลอโรฟีนอล ปริมาตร 8.2 ไมโครลิตร ละลายด้วยน้ำปราศจากไอออนในบีกเกอร์ขนาด 100 มิลลิลิตร

2. เทสารลงในขวดวัดปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร แล้วปรับปริมาตรด้วยน้ำปราศจากไอออนในขวดวัดปริมาตร จนมีปริมาตรครบ

#### 1.7 การเตรียมสารละลาย 2,4-ไดคลอโรฟีนอล ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร

1. ชั่ง 2,4-ไดคลอโรฟีนอล หนัก 0.0104 กรัม ละลายด้วยน้ำปราศจากไอออนในบีกเกอร์ขนาด 100 มิลลิลิตร คนสารละลายด้วยแท่งแก้วคนสารจนสารละลายหมด

2. เทสารลงในขวดวัดปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร แล้วปรับปริมาตรด้วยน้ำปราศจากไอออนในขวดวัดปริมาตร จนมีปริมาตรครบ

#### 1.8 การเตรียมสารละลายฟีนอล ความเข้มข้น 5.00 มิลลิกรัมต่อลิตร

1. ปิเปตสารละลายฟีนอล ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 5.00 มิลลิลิตร ลงในขวดวัดปริมาตร ขนาด 100 มิลลิลิตร

2. ปรับปริมาตรด้วยน้ำปราศจากไอออนในขวดวัดปริมาตร จนมีปริมาตรครบ

#### 1.9 การเตรียมสารละลาย 2-คลอโรฟีนอล ความเข้มข้น 5.00 มิลลิกรัมต่อลิตร

1. ปิเปตสารละลาย 2-คลอโรฟีนอล ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 5.00 มิลลิลิตร ลงในขวดวัดปริมาตร ขนาด 100 มิลลิลิตร

2. ปรับปริมาตรด้วยน้ำปราศจากไอออนในขวดวัดปริมาตร จนมีปริมาตรครบ

#### 1.10 การเตรียมสารละลาย 2,4-ไดคลอโรฟีนอล ความเข้มข้น 5.00 มิลลิกรัมต่อลิตร

1. ปิเปตสารละลาย 2,4-ไดคลอโรฟีนอล ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 5.00 มิลลิลิตร ลงในขวดวัดปริมาตร ขนาด 100 มิลลิลิตร

2. ปรับปริมาตรด้วยน้ำปราศจากไอออนในขวดวัดปริมาตร จนมีปริมาตรครบ

### 1.11 การเตรียมสารละลายมาตรฐานฟีนอล

1. ปิเปตสารละลายฟีนอล ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 1.0, 2.0, 3.0, 4.0, 5.0 มิลลิลิตร ลงในขวดปริมาตร ขนาด 100 มิลลิลิตร
2. ปรับปริมาตรด้วยน้ำปราศจากไอออนในขวดวัดปริมาตร จนมีปริมาตรครบ ได้สารละลายมาตรฐานฟีนอล ที่มีความเข้มข้น 1.0, 2.0, 3.0, 4.0 และ 5.0 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ

### 1.12 การเตรียมสารละลายมาตรฐาน 2-คลอโรฟีนอล

1. ปิเปตสารละลาย 2-คลอโรฟีนอล ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 1.00, 2.0, 3.0, 4.0, 5.0 มิลลิลิตร ลงในขวดปริมาตร ขนาด 100 มิลลิลิตร
2. ปรับปริมาตรด้วยน้ำปราศจากไอออนในขวดวัดปริมาตร จนมีปริมาตรครบ ได้สารละลายมาตรฐาน 2-คลอโรฟีนอล ที่มีความเข้มข้น 1.0, 2.0, 3.0, 4.0 และ 5.0 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ

### 1.13 การเตรียมสารละลายมาตรฐาน 2,4-ไดคลอโรฟีนอล

1. ปิเปตสารละลาย 2,4-ไดคลอโรฟีนอล ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 1.0, 2.0, 3.0, 4.0, 5.0 มิลลิลิตร ลงในขวดปริมาตร ขนาด 100 มิลลิลิตร
2. ปรับปริมาตรด้วยน้ำปราศจากไอออนในขวดวัดปริมาตร จนมีปริมาตรครบ ได้สารละลายมาตรฐาน 2,4-ไดคลอโรฟีนอล ที่มีความเข้มข้น 1.0, 2.0, 3.0, 4.0 และ 5.0 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ

## 2. การเตรียมผงบิสฟีนอล A โดยวิธีซอล-เจล

1. นำสารละลายบิสฟีนอล A ในเตรท ความเข้มข้น 0.03 โมลาร์ ที่ละลายในกรดไนตริก ความเข้มข้น 4.0 โมลาร์ ปริมาตร 20 มิลลิลิตร และสารละลายแอมโมเนียมวานาเดต ความเข้มข้น 0.03 โมลาร์ ที่ละลายด้วยน้ำปราศจากไอออน ปริมาตร 50 มิลลิลิตร
2. ผสมสารละลายทั้งสองในบีกเกอร์ขนาด 250 มิลลิลิตร เติมสารละลาย 2-โพรพานอล ความเข้มข้น 2.0 โมลาร์ ภายใต้การคนด้วยแท่งแม่เหล็กคนสาร ได้ตะกอนสีเหลือง
3. อบตะกอนที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง
4. นำผงตะกอนไปเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 400, 500 และ 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

### 3. การตรวจสอบลักษณะของผงบิสมัทวานาเดต

#### 3.1 การตรวจสอบลักษณะโครงสร้าง โดยเครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟร็กโตมิเตอร์

1. นำผงบิสมัทวานาเดตที่เตรียมได้ โดยไม่ผ่านการเผาแคลไซน์และที่ผ่านการเผาแคลไซน์ โดยทำการบดให้ละเอียด
2. นำมาอัดในช่องกลางของแผ่นซีตสารตัวอย่าง ทำการเกลี่ยผิวด้านบนของสารให้เรียบ
3. ทำการวิเคราะห์ด้วยเครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟร็กโตมิเตอร์
4. นำข้อมูลที่ได้ไปเปรียบเทียบกับข้อมูลในเพิ่มมาตรฐาน

#### 3.2 การตรวจสอบลักษณะสัณฐานวิทยา โดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด และการตรวจสอบองค์ประกอบทางเคมี โดยเครื่องวัดการกระจายพลังงาน สเปกโตรมิเตอร์

1. นำผงบิสมัทวานาเดตที่เตรียมได้ โดยที่ผ่านการเผาแคลไซน์ โดยทำการบดให้ละเอียดและทำให้เป็นสารแขวนลอย โดยการนำไปกระจายตัวในตัวทำละลายที่เหมาะสม คือ เอทานอลบริสุทธิ์
2. นำไปกระจายตัวในเครื่องอัลตราโซนิก ประมาณ 30 นาที
3. นำตะกอนที่แขวนลอยในเอทานอลดังกล่าว หยดใส่สตัป (Stub) ที่ติดด้วยทองแดงเทป แล้วทิ้งให้แห้งและนำสตัปไปเคลือบด้วยทอง โดยเครื่องเคลือบทอง (Fine coater) ด้วยกระแสไฟฟ้า 15 มิลลิแอมแปร์ นาน 150 วินาที
4. นำไปวิเคราะห์หาลักษณะทางสัณฐาน โดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด และวิเคราะห์หาองค์ประกอบทางเคมี โดยเครื่องวัดการกระจายพลังงาน สเปกโตรมิเตอร์

#### 3.3 การวิเคราะห์หาพื้นที่ผิวของอนุภาค โดยเครื่องวิเคราะห์หาพื้นที่ผิวอนุภาค

1. เตรียมผงบิสมัทวานาเดตที่เตรียมได้ประมาณ 2 กรัม บดให้ละเอียด จากนั้นอบแห้งในเตาอบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง
2. ทำการตั้งอุณหภูมิไล่แก๊ส ที่อุณหภูมิ 120 และ 150 องศาเซลเซียส
3. เวลาของการไล่แก๊ส 1 ตัวอย่าง ใช้เวลา 2-3 ชั่วโมง โดยใช้แก๊สไนโตรเจน
4. นำผงบิสมัทวานาเดตใส่ในหลอดทดลองปลายกระเปาะ (Pellet cell) แล้วนำไปวิเคราะห์หาค่าพื้นที่ผิวโดยทฤษฎีของ บรูเนอร์ เอ็มเมทท์ และเทลเลอร์ (Brunauer, S., Emmett, P.H., and Teller, E., BET)
5. การวิเคราะห์พื้นที่ผิวใช้เวลา 6-7 ชั่วโมง

### 3.4 การตรวจสอบหมู่ฟังก์ชัน โดยเครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรด สเปกโทรมิเตอร์

1. นำผงบิสมัทวานาเดตที่เตรียมได้ โดยที่ผ่านการเผาแคลไซน์์ โดยทำการบดให้ละเอียด
2. ชั่งตะกอนที่เตรียมได้หนัก 0.001 กรัม และโพแทสเซียมโบรไมด์หนัก 0.01 กรัม ลงไปในโถงบด ทำการบดสารให้เข้ากัน
3. นำไปอัดด้วยความดัน 1500-2000 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ให้กลายเป็นแผ่นบาง (KBr pellet) นำแผ่นบางวางลงบนแผ่น (pellet) เอาสก็อตเทปปิดเพื่อยึดสารตัวอย่างไว้กับ sample holder
4. นำไปวิเคราะห์ตรวจสอบหมู่ฟังก์ชัน โดยฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรด สเปกโทรมิเตอร์

### 4. การทำปฏิกิริยาโฟโตแคตาไลติกส์ของการย่อยสลายฟีนอล 2-คลอโรฟีนอล และ 2,4-ไดคลอโรฟีนอล ด้วยผงบิสมัทวานาเดต โดยเครื่องโครมาโทกราฟของเหลวสมรรถนะสูง

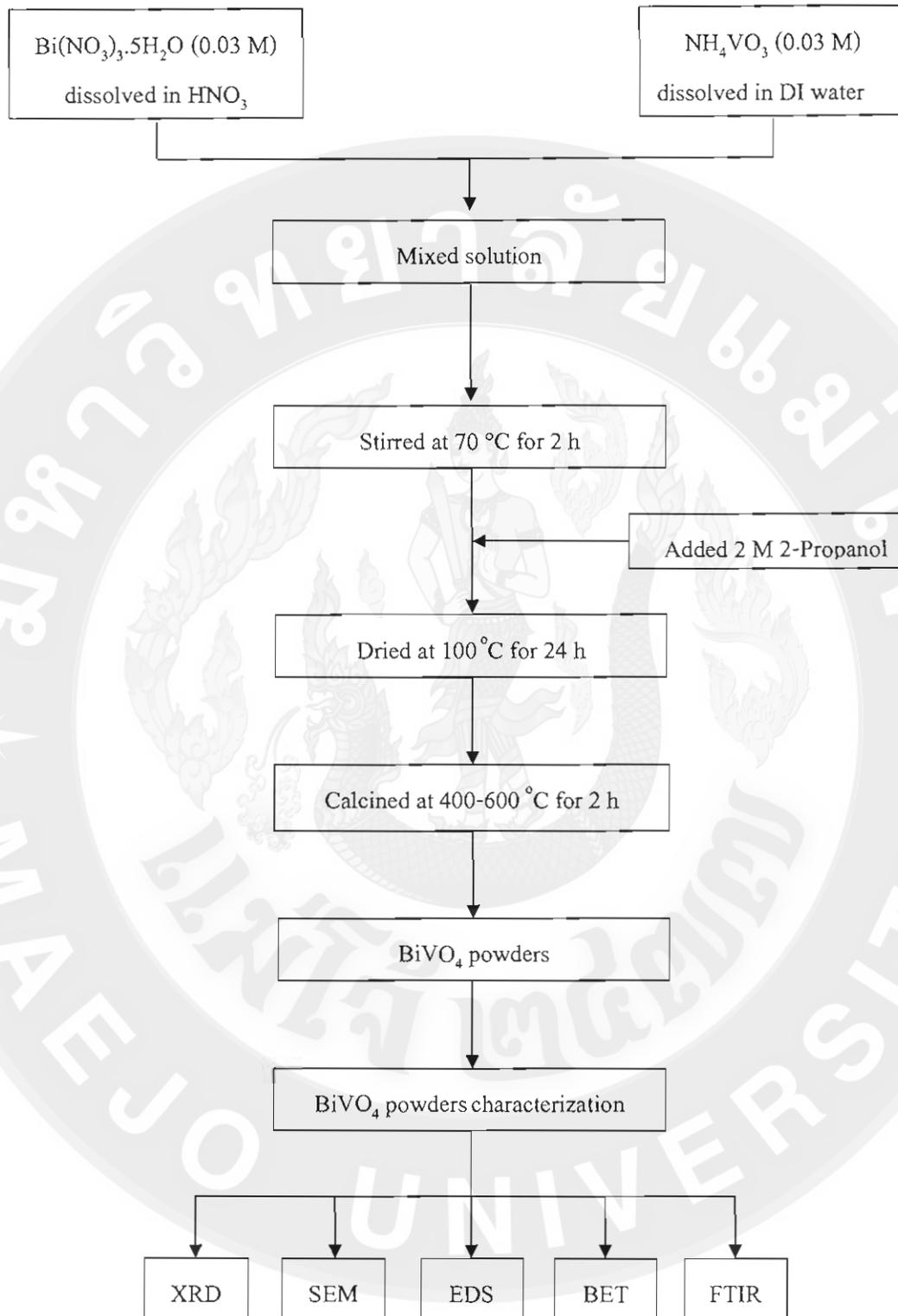
1. นำผงบิสมัทวานาเดตที่เตรียมได้มาบดให้ละเอียด ชั่งปริมาณ 0.1250, 0.2500 และ 0.5000 กรัม ลงในบีกเกอร์ขนาด 100 มิลลิลิตร
2. เติมสารละลายฟีนอล 2-คลอโรฟีนอล และ 2,4-ไดคลอโรฟีนอล ความเข้มข้น 5.0 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ปริมาณ 25 มิลลิลิตร ในแต่ละบีกเกอร์ ปิดด้วยกระดาษฟอรัย นำไปกระจายตัวโดยใช้เครื่องอัลตราโซนิค เป็นเวลา 20 นาที
3. ทำการคนด้วยแท่งแม่เหล็ก เป็นเวลา 30 นาที แล้วตั้งทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง
4. นำสารละลายที่ตั้งทิ้งไว้ข้ามคืน มาทำปฏิกิริยาโฟโตแคตาไลติกส์ ด้วยการให้แสงจากหลอดควิสิเบิล ขณะทำปฏิกิริยาต้องคนสารละลายตลอดเวลาการทำทดลอง
5. ดูดสารละลายฟีนอล 2-คลอโรฟีนอล และ 2,4-ไดคลอโรฟีนอล ตามลำดับ มาครั้งละ 1 มิลลิลิตร ที่เวลา 0, 30, 60, 90, 120, 150 และ 180 นาที กรองด้วยแผ่นกรองขนาด 0.45 ไมครอน
6. นำไปวัดหาปริมาณสารละลายฟีนอล 2-คลอโรฟีนอล และ 2,4-ไดคลอโรฟีนอล ตามลำดับ ด้วยเครื่องโครมาโทกราฟของเหลวสมรรถนะสูง
7. สภาวะที่ใช้ในการทำทดลอง โดยเครื่องโครมาโทกราฟของเหลวสมรรถนะสูง

ตารางที่ 8 สภาวะการทำงานของเครื่องโครมาโทกราฟของเหลวสมรรถนะสูง<sup>(42)</sup>

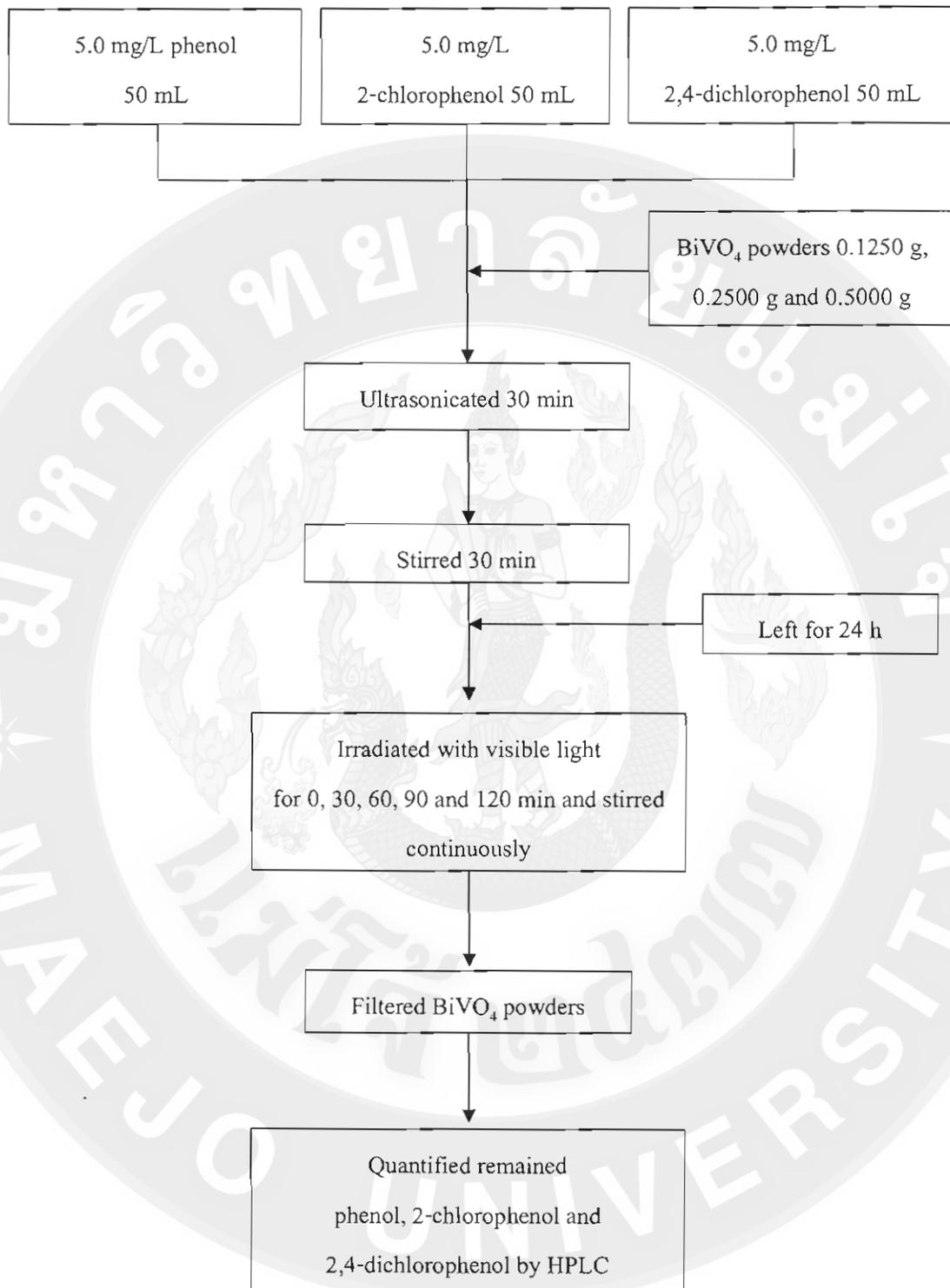
พารามิเตอร์	สภาวะ
ชนิดคอลัมน์	ODS C <sub>18</sub> (ขนาด : ยาว = 125 มิลลิเมตร, เส้นผ่านศูนย์กลาง = 0.4 มิลลิเมตร)
ตัวพา	CH <sub>3</sub> CN : CH <sub>3</sub> COOH : H <sub>2</sub> O อัตราส่วน 40 : 0.1 : 60
อัตราการไหล	1.0 มิลลิลิตรต่อนาที
ปริมาณสารที่ฉีด	20 ไมโครลิตร

5. การทดสอบหาปริมาณสลายฟีนอล 2-คลอโรฟีนอล และ 2,4-ไดคลอโรฟีนอล ในตัวอย่างน้ำธรรมชาติ โดยวิธีเติมสารละลายมาตรฐาน

- เก็บตัวอย่างน้ำธรรมชาติจากแหล่งน้ำ 3 แหล่ง ได้แก่ แปลงผัก นาข้าว และคลองชลประทาน มาปริมาตร 500 มิลลิลิตร
- ทำการกรองตัวอย่างน้ำธรรมชาติโดยใช้กระดาษกรองเบอร์ 4
- ปิเปตตัวอย่างน้ำธรรมชาติปริมาตร 5.00 มิลลิลิตร ใส่ลงในขวดวัดปริมาตรขนาด 25 มิลลิลิตร
- ปิเปตสารละลายฟีนอล 2-คลอโรฟีนอล และ 2,4-ไดคลอโรฟีนอล ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 0.25, 0.50, 0.75, 1.00 และ 1.25 มิลลิลิตร ได้สารละลายความเข้มข้น 1.0-5.0 มิลลิกรัมต่อลิตร ลงในขวดวัดปริมาตรขนาด 25 มิลลิลิตร ที่มีตัวอย่างน้ำธรรมชาติอยู่
- ปรับปริมาตรด้วยน้ำปราศจากไอออนในขวดวัดปริมาตร จนมีปริมาตรครบ
- นำมาวิเคราะห์ด้วยเครื่องโครมาโทกราฟของเหลวสมรรถนะสูง ตามสภาวะการทำงาน แสดงดังตาราง 2.3



ภาพที่ 8 ผังการเตรียมและการหาลักษณะเฉพาะของผงบิสมัธวานาเดต ที่เตรียมโดยวิธีซอล-เจล



ภาพที่ 9 การสลายตัวของฟีนอล และอนุพันธ์ของฟีนอล โดยปฏิกิริยาตัวเร่งด้วยแสงของ  
ผงบิสมัทวานาเดต ที่เตรียมโดยวิธีซอล-เจล

### ผลการวิจัย

ผงบิส്മัธวานาเดต ที่เตรียมได้โดยวิธีซอล-เจล ในอัตราส่วนโดยโมลของบิส്മัธไนเตรต : แอมโมเนียมวานาเดต เท่ากับ 1:1 ในสารละลายกรดไนตริก ทำการเตรียมสารละลายให้อยู่ในรูปแบบซอล โดยเติมสารละลาย 2-โพรพานอล และทำการอบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ได้สารสีเหลืองเกิดการเปลี่ยนแปลงจากซอลเป็นเจล จากนั้นทำการเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 400, 500 และ 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง แล้วนำมาศึกษาลักษณะเฉพาะของผงบิส്മัธวานาเดต ดังนี้

#### เปอร์เซ็นต์ผลผลิตของผงบิส്മัธวานาเดต

จากการคำนวณหาเปอร์เซ็นต์ผลผลิตของผงบิส്മัธวานาเดตที่เตรียมได้โดยวิธีซอล-เจล แสดงดังตารางที่ 9

ตารางที่ 9 เปอร์เซ็นต์ผลผลิตของผงบิส്മัธวานาเดตที่เตรียมได้โดยวิธีซอล-เจล

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	น้ำหนักทางทฤษฎี (กรัม)	น้ำหนักที่ได้จริง (กรัม)	บิส്മัธวานาเดต (เปอร์เซ็นต์)
400	11.8776	9.3521	78.74
500	11.8776	9.4016	79.15
600	11.8776	9.4260	79.36

จากภาพที่ 10 ของผงบิส്മัธวานาเดต เห็นได้ว่า ผงบิส്മัธวานาเดตที่เตรียมได้โดยวิธีซอล-เจล มีลักษณะเป็นผงของแข็งละเอียดมีสีเหลืองและจากการคำนวณหาเปอร์เซ็นต์ผลผลิตของผงบิส്മัธวานาเดตที่เตรียมได้โดยวิธีซอล-เจล ที่อุณหภูมิ 400, 500 และ 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง พบว่า มีเปอร์เซ็นต์ผลผลิตที่ใกล้เคียงกัน อยู่ในช่วงระหว่าง 78.74-79.36 เปอร์เซ็นต์



(ก)



(ข)



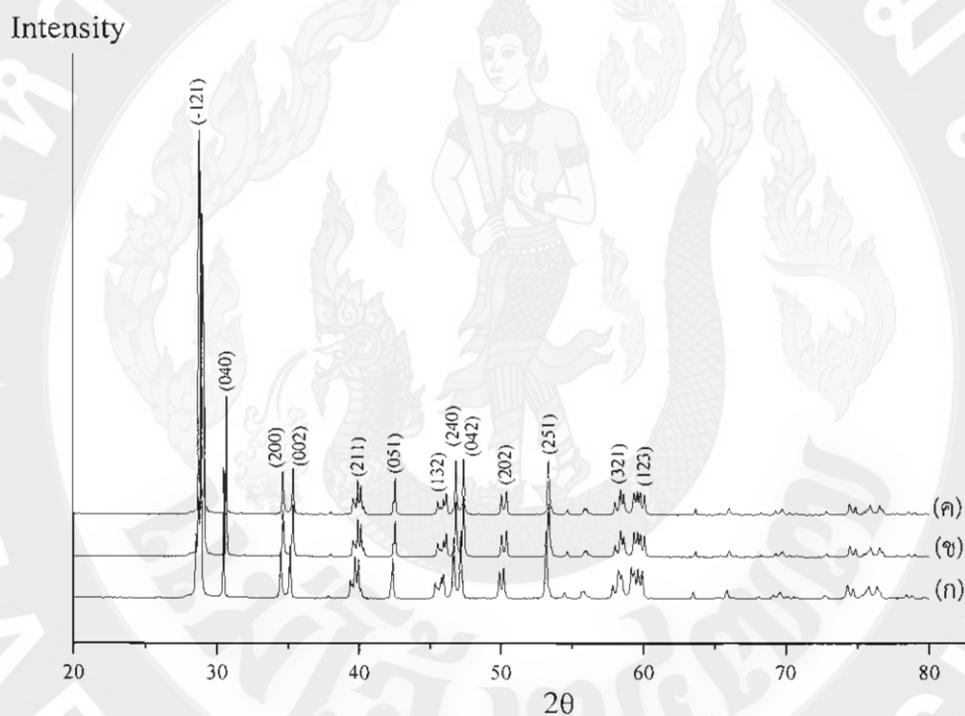
(ค)

ภาพที่ 10 ลักษณะของผงบิสมัทรวานาเดต ที่เตรียมได้โดยวิธีซอล-เจล เมาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ

(ก) 400 (ข) 500 และ (ค) 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

การตรวจสอบลักษณะทางโครงสร้างของผงบิสมัทวานาเดต โดยเครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟร็กโตมิเตอร์

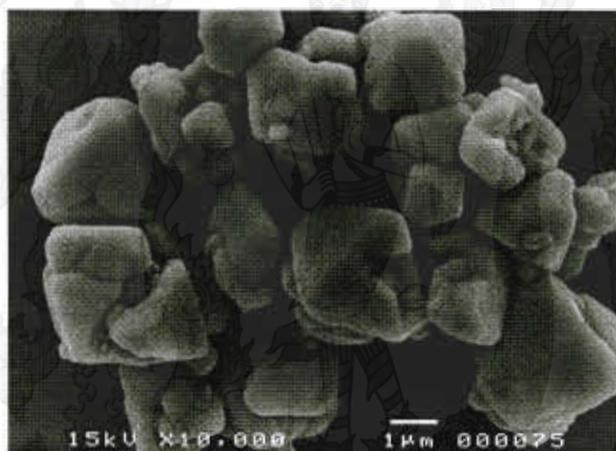
จากการตรวจสอบลักษณะทางโครงสร้างของผงบิสมัทวานาเดต ที่เตรียมได้โดยวิธีซอล-เจล โดยเครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟร็กโตมิเตอร์ จากภาพที่ 11 (ก-ค) แสดงรูปแบบ XRD ของผงบิสมัทวานาเดตที่เตรียมได้โดยวิธีซอล-เจล เผาเคลไซน์ที่อุณหภูมิ 400, 500 และ 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ตามลำดับ พบว่า รูปแบบ XRD ดังแสดงในภาพที่ 11 (ก-ค) มีโครงสร้างแบบโมโนคลินิก หลังผ่านการเผาเคลไซน์ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง เมื่อเปรียบเทียบกับข้อมูลมาตรฐาน Joint Committee on Powder Diffraction Standards (JCPDS) หมายเลข 14-0688<sup>[31]</sup>



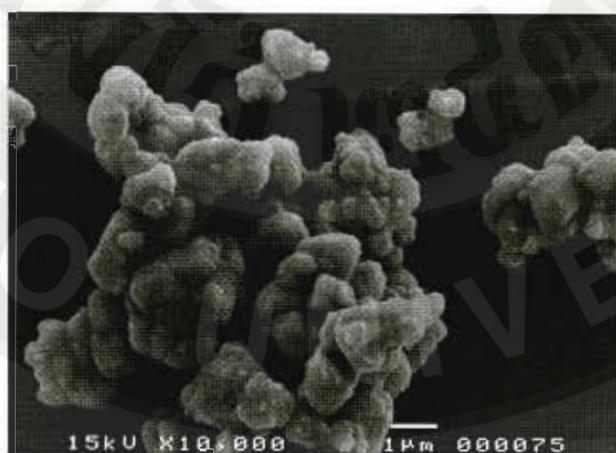
ภาพที่ 11 รูปแบบ XRD ของผงบิสมัทวานาเดตที่เตรียมได้โดยวิธีซอล-เจล เผาเคลไซน์ที่อุณหภูมิ (ก) 400 (ข) 500 และ (ค) 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

**การตรวจสอบลักษณะพื้นฐานวิทยาของผงบิสมัทวานาเดต โดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM)**

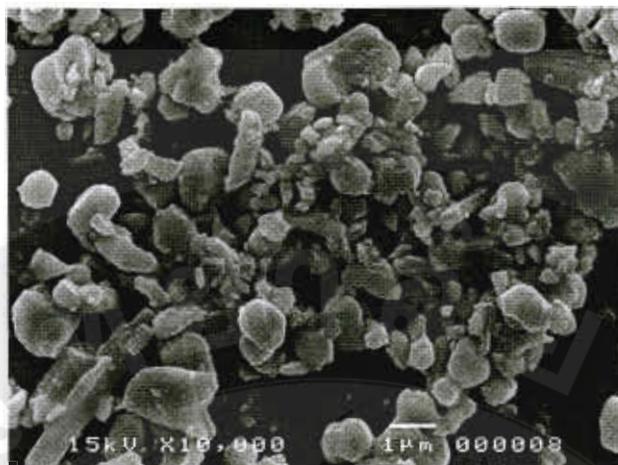
การตรวจสอบลักษณะทางสัณฐานวิทยาของผงบิสมัทวานาเดต ที่เตรียมได้โดยวิธีซอล-เจล โดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด จากภาพที่ 12 (ก-ค) แสดง SEM ของผงบิสมัทวานาเดต ที่เตรียมได้โดยวิธีซอล-เจล เคาเคลไซน์ที่อุณหภูมิ 400, 500 และ 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง พบว่า ผงบิสมัทวานาเดตมีลักษณะเป็นผงละเอียดสีเหลือง มีรูปร่างไม่แน่นอนและมีขนาดอนุภาคเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 0.5-3.0 ไมโครเมตร



(ก)



(ข)



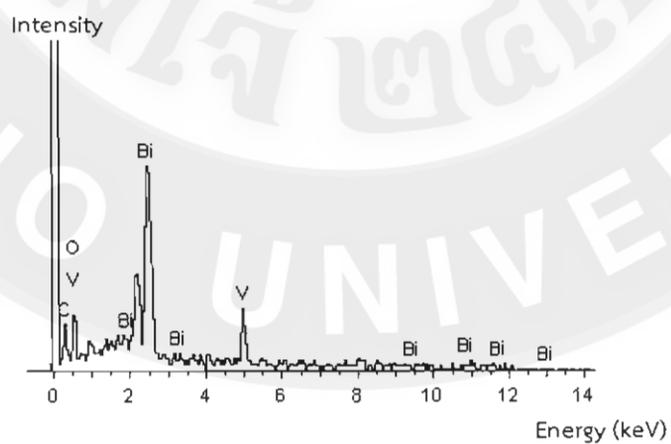
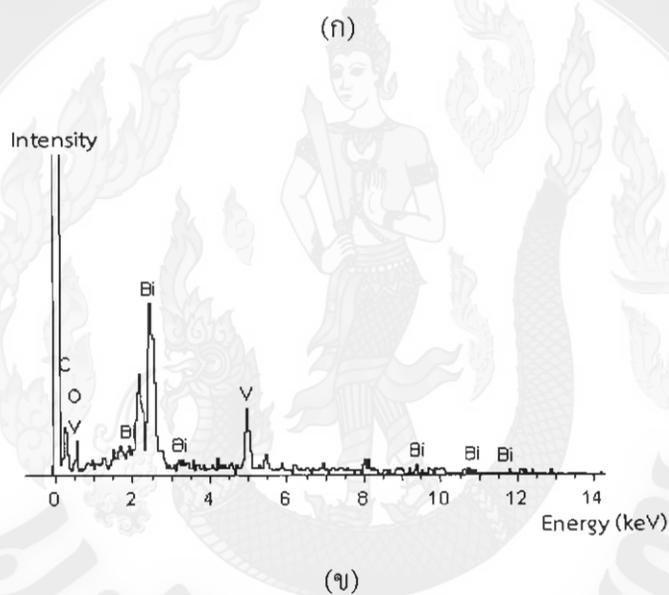
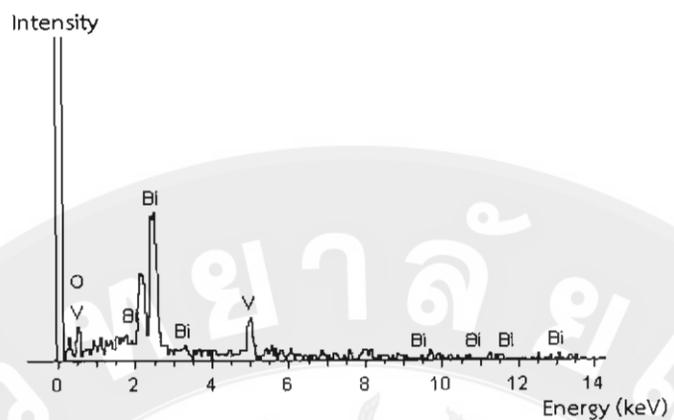
(ค)

ภาพที่ 12 SEM ของผงบิสมัทเทลลูไรด์ ที่เตรียมได้โดยวิธีซอล-เจล เผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ

(ก) 400 (ข) 500 และ (ค) 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

การวิเคราะห์หาธาตุที่เป็นองค์ประกอบของผงบิสมัทเทลลูไรด์ โดยเครื่องวัดการกระจายพลังงานทางสเปกโทรมิเตอร์ (Energy dispersive X-ray spectrometer, EDS)

จากการวิเคราะห์หาธาตุที่เป็นองค์ประกอบของผงบิสมัทเทลลูไรด์ ที่เตรียมได้โดยวิธีซอล-เจล โดยเครื่องวัดการกระจายพลังงาน ทางสเปกโทรมิเตอร์ พบว่า ธาตุที่เป็นองค์ประกอบหลักของผงบิสมัทเทลลูไรด์ คือ ธาตุบิสมัท ซึ่งมีระดับพลังงาน  $M_{\alpha}$  เท่ากับ 2.42 และ 3.19 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ มีระดับพลังงาน  $L_{\gamma}$  เท่ากับ 9.42 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ มีระดับพลังงาน  $L_{\alpha}$  เท่ากับ 10.8 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ และมีระดับพลังงาน  $L_{\beta}$  เท่ากับ 13.0 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ ธาตุเทลลูไรด์ ซึ่งมีระดับพลังงาน  $K_{\alpha}$  เท่ากับ 4.95 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ และธาตุออกซิเจน ซึ่งมีระดับพลังงาน  $K_{\alpha}$  เท่ากับ 0.52 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ แสดงดังภาพที่ 13 (ก-ค)



(ค)

ภาพที่ 13 EDS ของผงบิสมัทวานาเดต ที่เตรียมได้โดยวิธีซอล-เจล เคาเคลชันที่อุณหภูมิ

(ก) 400 (ข) 500 และ (ค) 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

### การวิเคราะห์หาพื้นที่ผิวของอนุภาคโดยเครื่องวิเคราะห์หาพื้นที่ผิวอนุภาค (Surface area analyzer, BET)

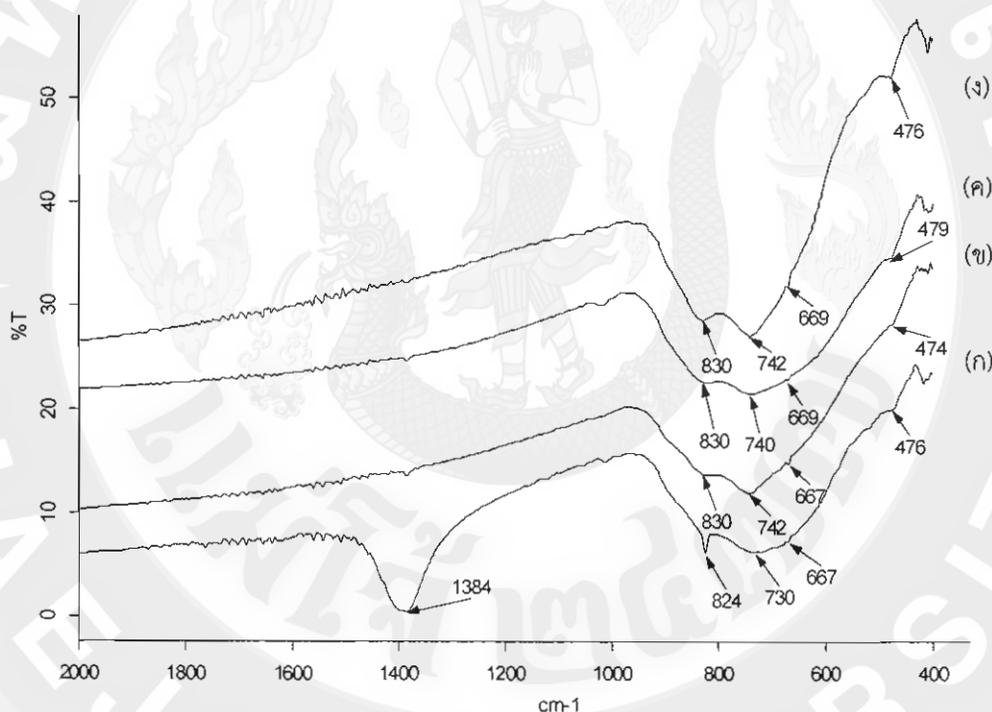
จากการวิเคราะห์หาพื้นที่ผิวจำเพาะของอนุภาคผงบิสมัทวานาเดต ที่เตรียมได้โดยวิธีซอล-เจล โดยเครื่องวิเคราะห์หาพื้นที่ผิวของอนุภาค พบว่า ผงบิสมัทวานาเดตที่ได้จากการเตรียมได้โดยวิธีซอล-เจล เผาเคลไซน์ที่อุณหภูมิ 400, 500 และ 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง มีพื้นที่ผิวที่แตกต่างกัน เนื่องจากอุณหภูมิในการผ่านเคลไซน์ที่ต่างกัน แรงในการบดผงบิสมัทวานาเดต และเวลาในการบดผงบิสมัทวานาเดต เมื่อทำการเปรียบเทียบค่าพื้นที่ผิวจำเพาะของอนุภาคผงบิสมัทวานาเดต ที่เตรียมได้โดยวิธีซอล-เจล เผาเคลไซน์ที่อุณหภูมิ 400, 500 และ 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง มีค่าพื้นที่ผิวจำเพาะเท่ากับ 1.20, 1.31 และ 2.92 ตารางเมตรต่อกรัม ตามลำดับ ดังตารางที่ 10 เห็นได้ว่าค่าพื้นที่ผิวจำเพาะสอดคล้องกับรูป SEM ของบิสมัทวานาเดต ที่เตรียมได้โดยวิธีซอล-เจล เมื่ออุณหภูมิในการเผาเคลไซน์เพิ่มขึ้น ขนาดของอนุภาคจะลดลง พื้นที่ผิวของอนุภาคจะเพิ่มขึ้น

ตารางที่ 10 ค่าพื้นที่ผิวอนุภาคของผงบิสมัทวานาเดต ที่เตรียมได้โดยวิธีซอล-เจล

สารตัวอย่าง	พื้นที่ผิวจำเพาะ ( $\text{m}^2/\text{g}$ )
$\text{BiVO}_4$ 400 °C	1.20
$\text{BiVO}_4$ 500 °C	1.31
$\text{BiVO}_4$ 600 °C	2.92

### การวิเคราะห์สเปกตรัม เพื่อตรวจสอบหมู่ฟังก์ชัน โดยเครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรด สเปกโตรมิเตอร์ (Fourier transform infrared spectrometer, FTIR)

จากการวิเคราะห์สเปกตรัมเพื่อตรวจสอบหมู่ฟังก์ชันของผงบิสมัทวานาเดต ที่เตรียมได้โดยวิธีซอล-เจล โดยเครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรด สเปกโตรมิเตอร์ พบว่า ในช่วงคลื่น 470-480 ต่อเซนติเมตร เป็นการสั่นแบบ stretching ของพันธะ  $\text{VO}_4^{3-}$  ในช่วงคลื่น 730-750 ต่อเซนติเมตร และ 820-830 ต่อเซนติเมตร เป็นการสั่นแบบ stretching ของพันธะ V-O และในช่วงคลื่น 660-670 ต่อเซนติเมตร เป็นการสั่นแบบ bending ของพันธะ Bi-O<sup>(III)</sup> สังเกตได้ว่า เมื่ออุณหภูมิในการเผาแคลไซน์เพิ่มขึ้นความกว้างของพีคจะลดลง และพีคของการสั่นแบบ stretching ของพันธะ V-O และพีคของการสั่นแบบ bending ของพันธะ Bi-O จะมีค่าเลขคลื่นที่เพิ่มขึ้น แสดงดังภาพที่ 14

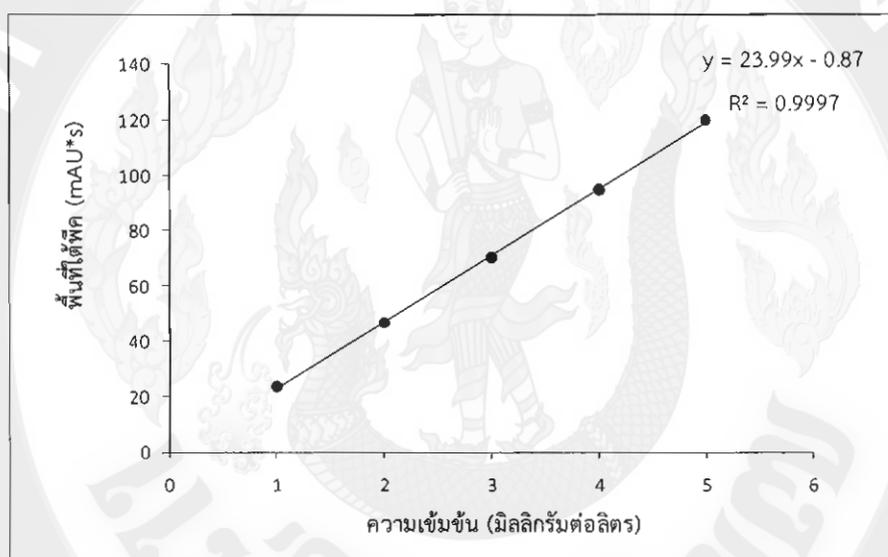


ภาพที่ 14 FTIR สเปกตรัมของผงบิสมัทวานาเดตที่เตรียมได้โดยวิธีซอล-เจล (ก) ก่อนเผาแคลไซน์ และเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ (ข) 400 (ค) 500 และ (ง) 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

การศึกษาการสลายตัวของฟีนอล 2-คลอโรฟีนอล และ 2,4-ไดคลอโรฟีนอล โดยผงบิสมีทวานาเดต ที่เตรียมได้โดยวิธีซอล-เจล

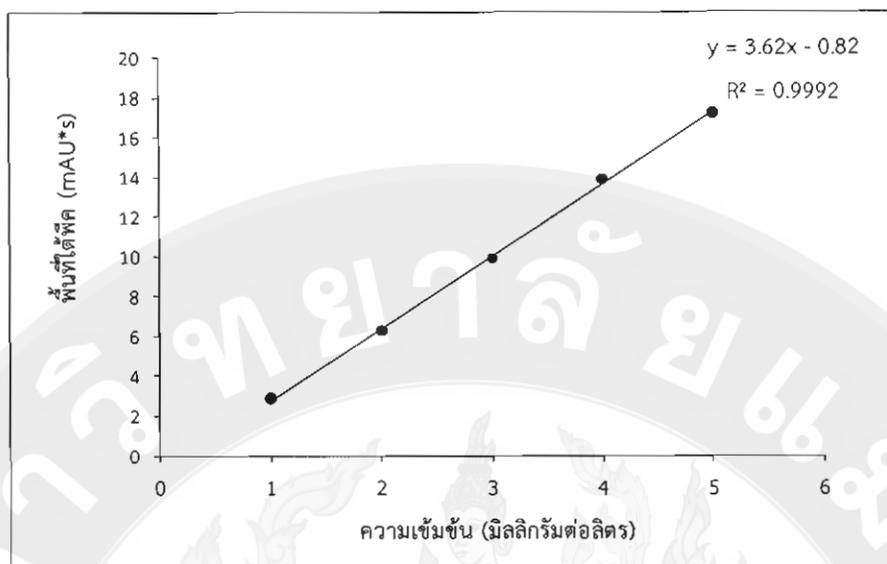
### 1. การศึกษาช่วงความเป็นเส้นตรงของการวิเคราะห์ และการสร้างกราฟมาตรฐาน

จากการศึกษาช่วงความเป็นเส้นตรง ของการวิเคราะห์สารละลายมาตรฐานฟีนอลอยู่ในช่วงความเข้มข้น 1.0-5.0 มิลลิกรัมต่อลิตร เพื่อศึกษาการลดปริมาณลงของฟีนอล พบว่า กราฟมาตรฐานของสารละลายมาตรฐานฟีนอล มีค่าความสัมพันธ์ดังสมการ  $y = 23.99x - 0.87$  โดยมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เท่ากับ 0.9997 แสดงดังภาพที่ 15



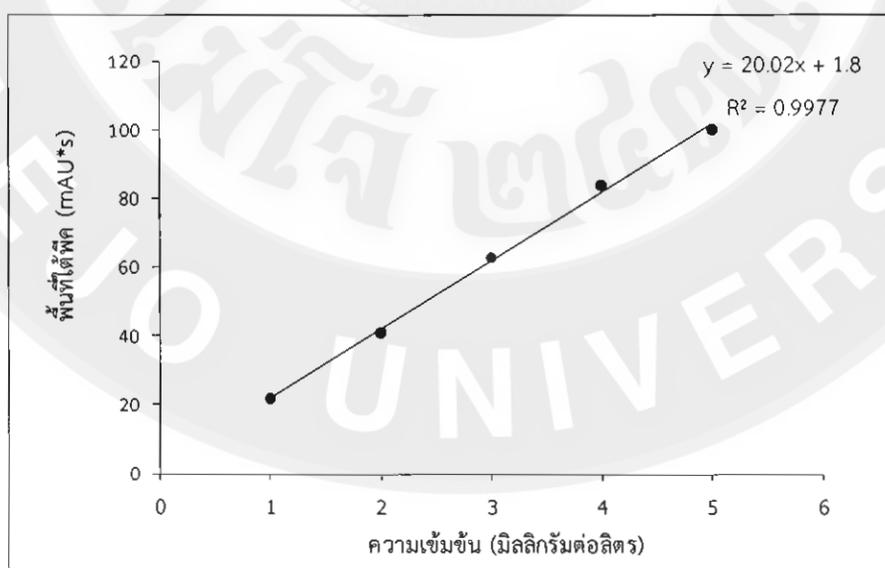
ภาพที่ 15 กราฟมาตรฐานของสารละลายฟีนอล

จากการศึกษาช่วงความเป็นเส้นตรง ของการวิเคราะห์สารละลายมาตรฐาน 2-คลอโรฟีนอล อยู่ในช่วงความเข้มข้น 1.0-5.0 มิลลิกรัมต่อลิตร เพื่อศึกษาการลดปริมาณลงของ 2-คลอโรฟีนอล พบว่า กราฟมาตรฐานของสารละลายมาตรฐาน 2-คลอโรฟีนอล มีค่าความสัมพันธ์ดังสมการ  $y = 3.62x - 0.82$  โดยมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เท่ากับ 0.9992 แสดงดังภาพที่ 16



ภาพที่ 16 กราฟมาตรฐานของสารละลาย 2-คลอโรฟีนอล

การศึกษาช่วงความเป็นเส้นตรง ของการวิเคราะห์สารละลายมาตรฐาน 2,4-ไดคลอโรฟีนอล อยู่ในช่วงความเข้มข้น 1.0-5.0 มิลลิกรัมต่อลิตร เพื่อศึกษาการลดปริมาณลงของ 2,4-ไดคลอโรฟีนอล พบว่า กราฟมาตรฐานของสารละลายมาตรฐาน 2,4-ไดคลอโรฟีนอล มีความสัมพันธ์ ดังสมการ  $y = 20.02x + 1.8$  โดยมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เท่ากับ 0.9977 แสดงดังภาพที่ 17



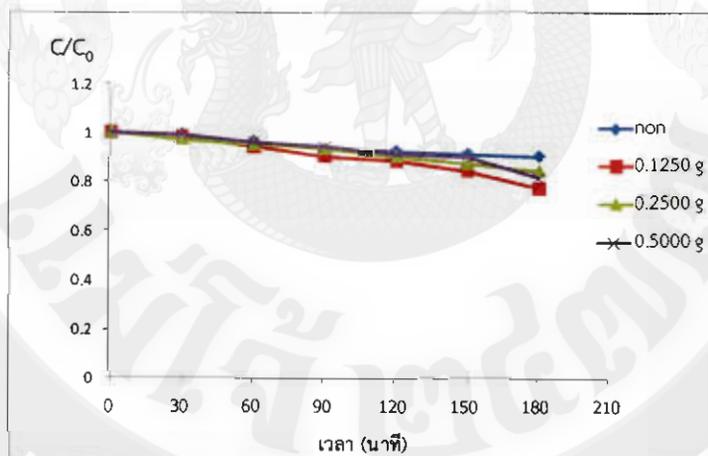
ภาพที่ 17 กราฟมาตรฐานของสารละลาย 2,4-ไดคลอโรฟีนอล

## 2. การศึกษาปฏิกิริยาโฟโตแคตตาไลติกส์ของการย่อยสลายฟีนอล

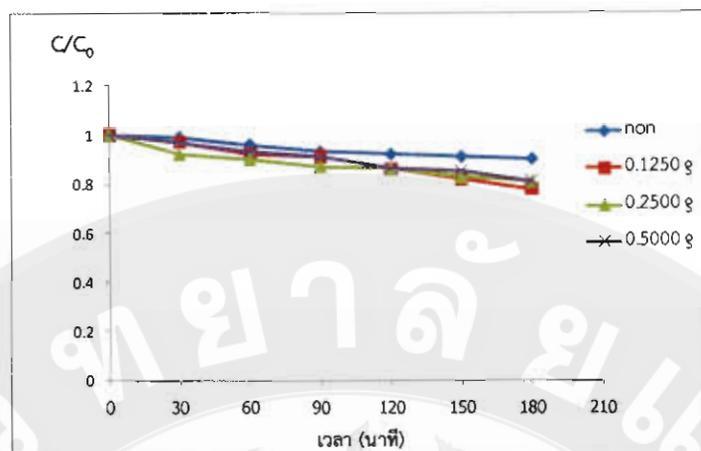
การศึกษาการสลายตัวของฟีนอล โดยผงบิสมัทธวานาแคต ที่เตรียมได้โดยวิธีซอล-เจล เผาเคลไชน์ที่อุณหภูมิ 400, 500 และ 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง แล้วนำผงบิสมัทธวานาแคต ปริมาณ 0.1250, 0.2500 และ 0.5000 กรัม มาศึกษาการสลายตัวของฟีนอล โดยเครื่องโครมาโทกราฟของเหลวสมรรถนะสูง ในช่วงเวลา 0-180 นาที

จากผลการศึกษาการสลายตัวของฟีนอล พบว่า เมื่อเพิ่มเวลาในการทำปฏิกิริยาโฟโตแคตตาไลติกส์ด้วยแสงวิสิเบิลจะทำให้ค่า  $C/C_0$  ของสารละลายฟีนอลลดลง ในช่วงเวลา 90-180 นาที มีการสลายตัวของฟีนอล โดยผงบิสมัทธวานาแคตที่ได้จากการเตรียมโดยวิธีซอล-เจล เผาเคลไชน์ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ปริมาณ 0.1250 กรัม มีเปอร์เซ็นต์การสลายฟีนอลมากที่สุด คือ 22.52 เปอร์เซ็นต์ และผงบิสมัทธวานาแคตที่ได้จากการเตรียมโดยวิธีซอล-เจล เผาเคลไชน์ที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ปริมาณ 0.1250 กรัม มีเปอร์เซ็นต์การสลายฟีนอลน้อยที่สุด คือ 12.78 เปอร์เซ็นต์ แสดงดังภาพที่ 18 (ก-ค) และภาพที่ 19 (ก-ค) และตารางที่

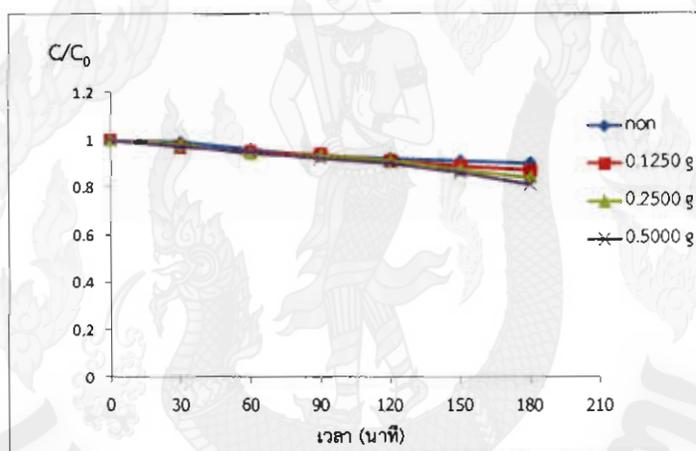
11



(ก)

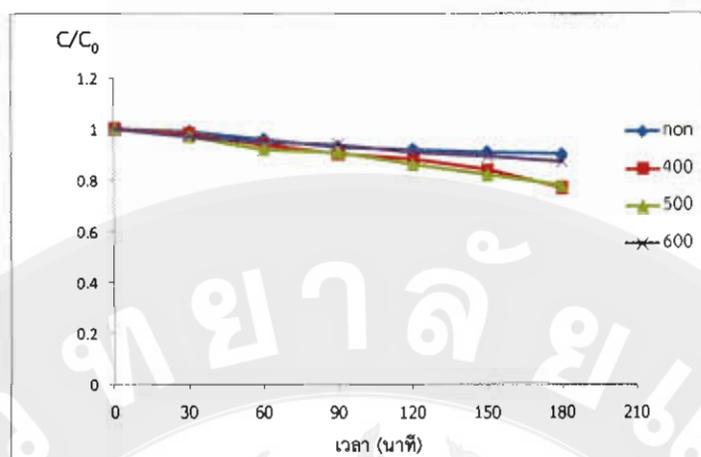


(ข)

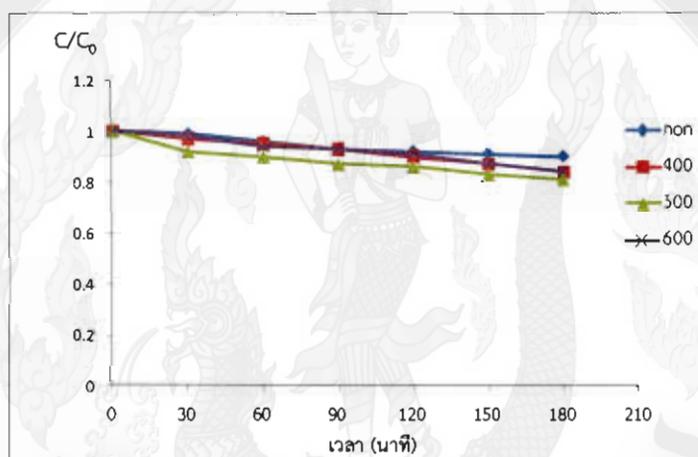


(ค)

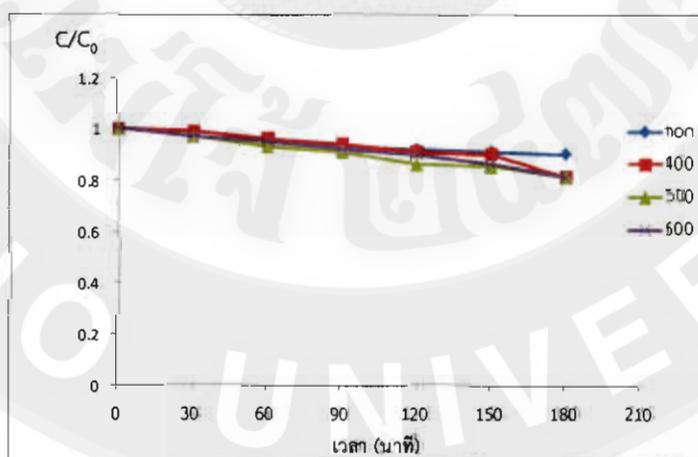
ภาพที่ 18 กราฟสลายตัวของฟีนอล โดยผงบิสมีชวานาแคตที่เตรียมได้โดยวิธีซอล-เจล  
 เผาแคลไซต์ที่อุณหภูมิ (ก) 400 (ข) 500 และ (ค) 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง  
 ปริมาณ 0.1250, 0.2500 และ 0.5000 กรัม



(ก)



(ข)



(ค)

ภาพที่ 19 กราฟสลายตัวของฟีนอล โดยผงบิสมัทวานาเดตที่เตรียมได้โดยวิธีซอล-เจล  
 เผาเคลือบที่อุณหภูมิ 400, 500 และ 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง  
 ปริมาณ (ก) 0.1250 (ข) 0.2500 และ (ค) 0.5000 กรัม

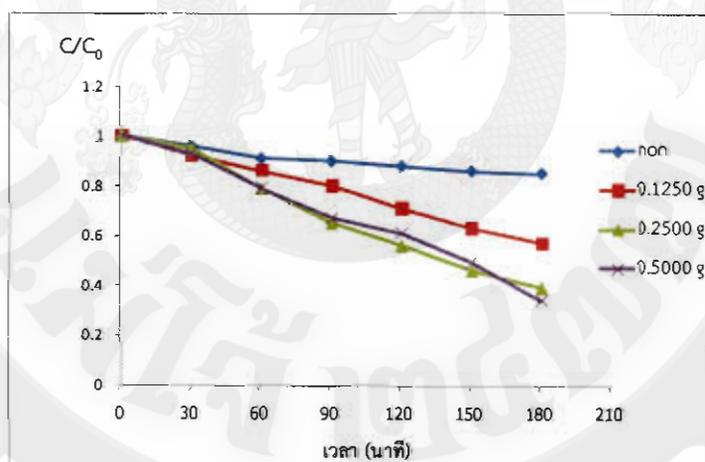
ตารางที่ 11 การสลายตัวของฟีนอล โดยผงบิสมัทวานาเดตที่เตรียมได้โดยวิธีซอล-เจล เผาแคลไซต์ที่อุณหภูมิ 400, 500 และ 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ปริมาณ 0.1250, 0.2500 และ 0.5000 กรัม

สารตัวอย่าง			ความเข้มข้นเริ่มต้น ( $C_0$ )	ความเข้มข้นที่เวลา 180 นาที ( $C$ )	$C/C_0$	% degradation ( $\eta$ )
Non	$\text{BiVO}_4$		5.00	4.5	0.90	10.00
0.1250 g	$\text{BiVO}_4$	400 °C	4.84	3.75	0.77	22.52
0.2500 g	$\text{BiVO}_4$	400 °C	4.78	4.02	0.84	15.90
0.5000 g	$\text{BiVO}_4$	400 °C	4.89	3.94	0.81	19.43
0.1250 g	$\text{BiVO}_4$	500 °C	4.95	3.87	0.78	21.82
0.2500 g	$\text{BiVO}_4$	500 °C	4.90	3.99	0.81	18.57
0.5000 g	$\text{BiVO}_4$	500 °C	4.80	3.90	0.81	18.75
0.1250 g	$\text{BiVO}_4$	600 °C	4.93	4.30	0.87	12.78
0.2500 g	$\text{BiVO}_4$	600 °C	4.95	4.16	0.84	15.96
0.5000 g	$\text{BiVO}_4$	600 °C	4.85	3.95	0.81	18.56

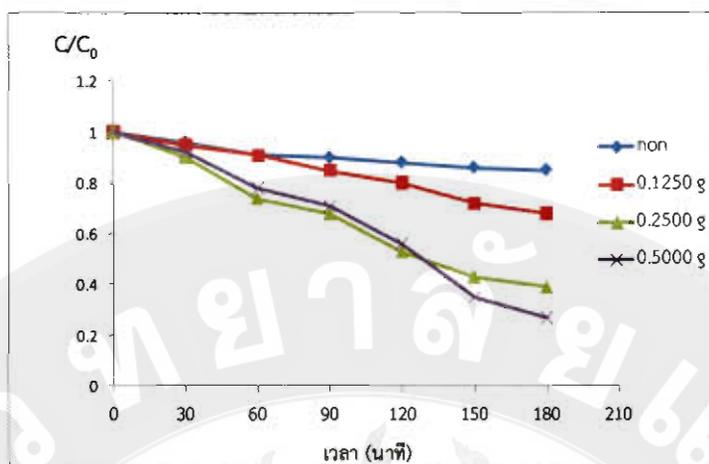
### 3. การศึกษาปฏิกิริยาโฟโตแคตาไลติกส์ของการย่อยสลาย 2-คลอโรฟีนอล

การศึกษาการสลายตัวของ 2-คลอโรฟีนอล โดยผงบิสมัทวานาเดตที่เตรียมได้โดยวิธีซอล-เจล เมาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 400, 500 และ 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง แล้วนำผงบิสมัทวานาเดตปริมาณ 0.1250, 0.2500 และ 0.5000 กรัม มาศึกษาสลายตัวของ 2-คลอโรฟีนอล โดยเครื่องโครมาโทกราฟของเหลวสมรรถนะสูง ในช่วงเวลา 0-180 นาที

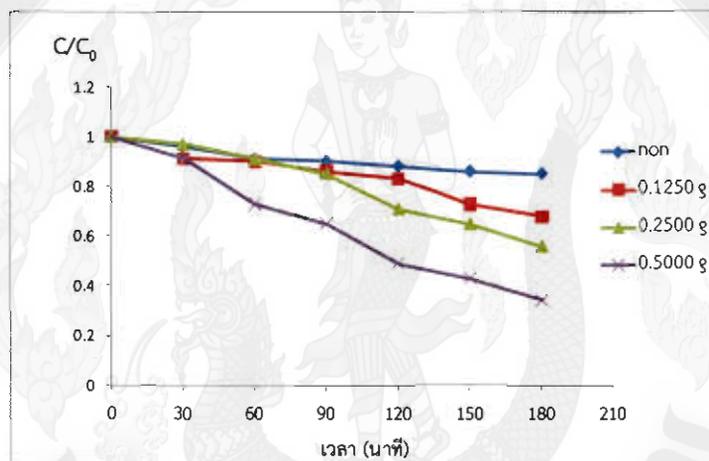
จากผลการศึกษาการสลายตัวของ 2-คลอโรฟีนอล พบว่า เมื่อเพิ่มเวลาในการทำปฏิกิริยาโฟโตแคตาไลติกส์ด้วยแสงวิเบิลจะทำให้ค่า  $C/C_0$  ของสารละลาย 2-คลอโรฟีนอลลดลง ในช่วงเวลา 30-180 นาที มีการสลายตัวของ 2-คลอโรฟีนอล โดยผงบิสมัทวานาเดตที่ได้จากการเตรียมโดยวิธีซอล-เจล เมาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ปริมาณ 0.5000 กรัม มีเปอร์เซ็นต์การสลาย 2-คลอโรฟีนอลมากที่สุด คือ 73.38 เปอร์เซ็นต์ และผงบิสมัทวานาเดตที่ได้จากการเตรียมโดยวิธีซอล-เจล เมาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ปริมาณ 0.1250 กรัม มีเปอร์เซ็นต์การสลาย 2-คลอโรฟีนอลต่ำสุด คือ 31.91 เปอร์เซ็นต์ แสดงดังภาพที่ 20 (ก-ค) และภาพที่ 21 (ก-ค) และตารางที่ 12



(ก)

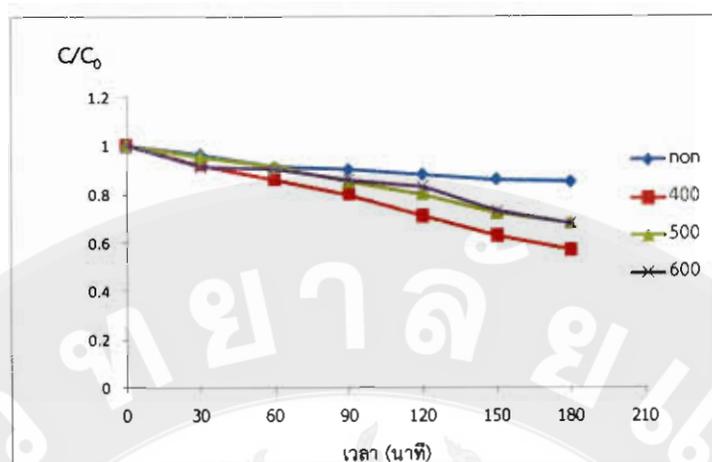


(ข)

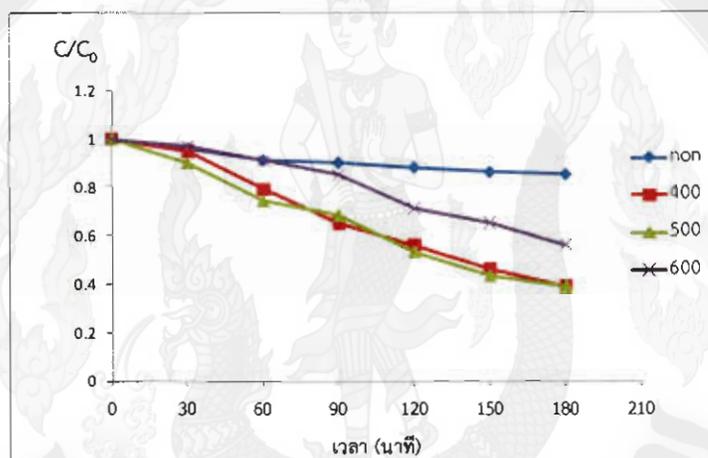


(ค)

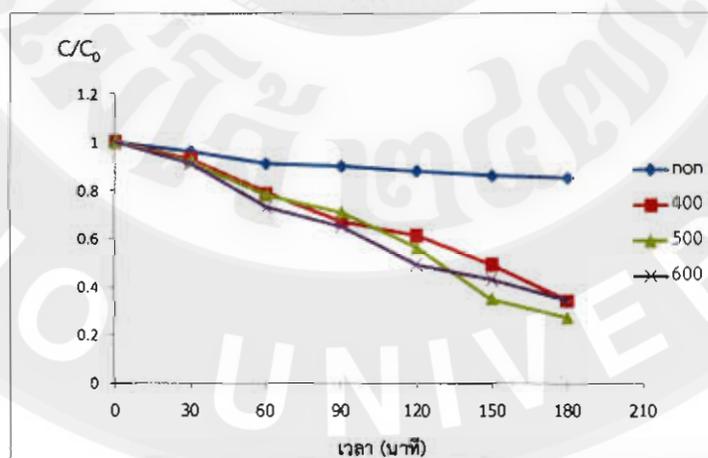
ภาพที่ 20 กราฟการสลายตัวของ 2-คลอโรฟีนอล โดยผงบิสมัทวานาเดตที่เตรียมได้โดยวิธีซอล-เจล เมาแคตไซน์ที่อุณหภูมิ (ก) 400 (ข) 500 และ (ค) 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ปริมาณ 0.1250, 0.2500 และ 0.5000 กรัม



(ก)



(ข)



(ค)

ภาพที่ 21 กราฟสลายตัวของ 2-คลอโรฟีนอล โดยผงบิสมีทวานาเคดที่เตรียมได้โดยวิธีซอล-เจลเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 400, 500 และ 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ปริมาณ (ก) 0.1250 (ข) 0.2500 และ (ค) 0.5000 กรัม

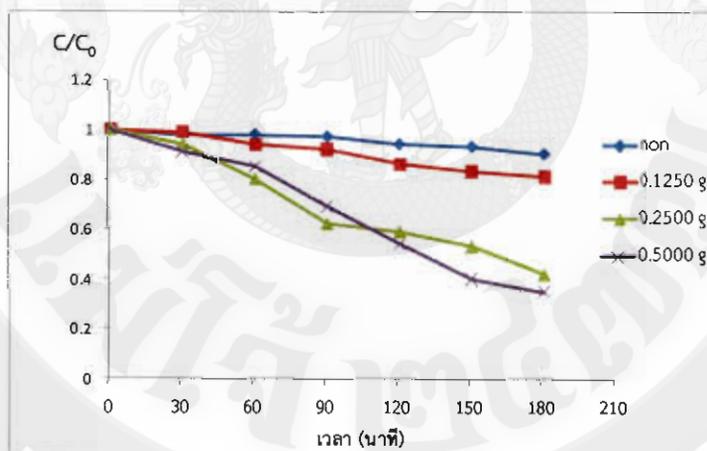
ตารางที่ 12 การสลายตัวของ 2-คลอโรฟีนอล โดยผงบิสมัทวานาเดตที่เตรียมได้โดยวิธีซอล-เจล เผาเคลือบที่อุณหภูมิ 400, 500 และ 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ปริมาณ 0.1250, 0.2500 และ 0.5000 กรัม

สารตัวอย่าง		ความเข้มข้น เริ่มต้น ( $C_0$ )	ความเข้มข้นที่ เวลา 180 นาที ( $C$ )	$C/C_0$	% degradation ( $\eta$ )
Non	$\text{BiVO}_4$	4.26	3.60	0.85	15.49
0.1250 g	$\text{BiVO}_4$ 400 °C	3.68	2.08	0.57	43.48
0.2500 g	$\text{BiVO}_4$ 400 °C	3.02	1.17	0.39	61.26
0.5000 g	$\text{BiVO}_4$ 400 °C	2.85	0.97	0.34	65.96
0.1250 g	$\text{BiVO}_4$ 500 °C	3.76	2.55	0.68	32.18
0.2500 g	$\text{BiVO}_4$ 500 °C	3.24	1.28	0.39	60.49
0.5000 g	$\text{BiVO}_4$ 500 °C	2.93	0.78	0.27	73.38
0.1250 g	$\text{BiVO}_4$ 600 °C	4.23	2.88	0.68	31.91
0.2500 g	$\text{BiVO}_4$ 600 °C	4.12	2.30	0.56	44.17
0.5000 g	$\text{BiVO}_4$ 600 °C	3.82	1.28	0.34	66.49

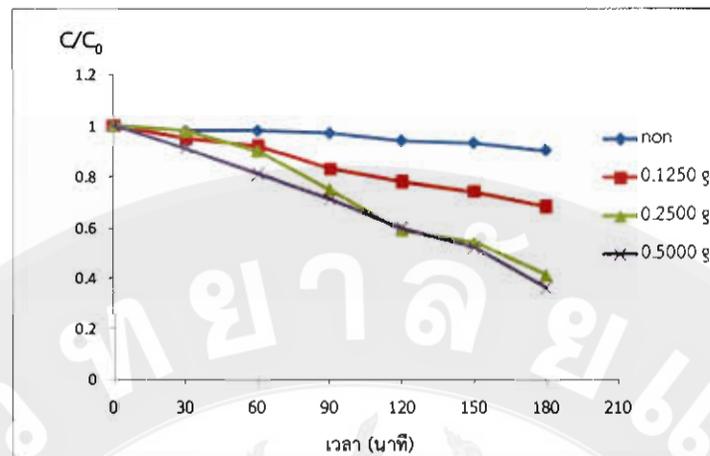
#### 4. การศึกษาปฏิกิริยาโฟโตแคตตาไลติกส์ของการย่อยสลาย 2,4-ไดคลอโรฟีนอล

การศึกษาการสลายตัวของ 2,4-ไดคลอโรฟีนอล โดยผงบิสมัทวานาเดตที่เตรียมได้โดยวิธีซอล-เจล เผาเคลที่อุณหภูมิ 400, 500 และ 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง แล้วนำผงบิสมัทวานาเดตปริมาณ 0.1250, 0.2500 และ 0.5000 กรัม มาศึกษาสลายตัวของ 2,4-ไดคลอโรฟีนอล โดยเครื่องโครมาโทกราฟของเหลวสมรรถนะสูง ในช่วงเวลา 0-180 นาที

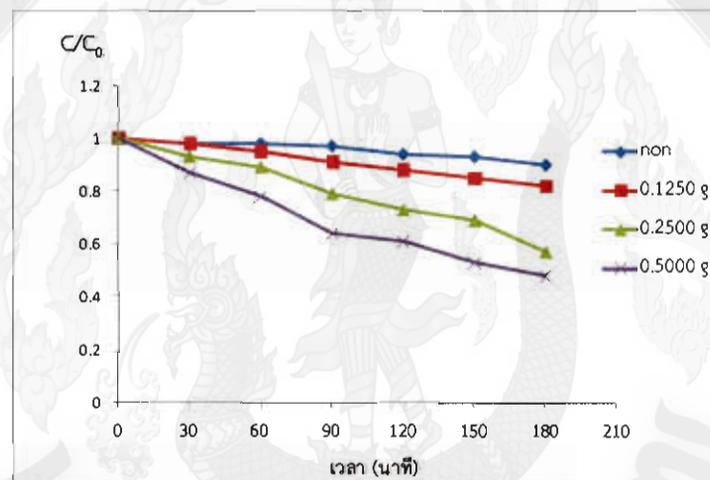
จากผลการศึกษาการสลายตัวของ 2,4-ไดคลอโรฟีนอล พบว่า เมื่อเพิ่มเวลาในการทำปฏิกิริยาโฟโตแคตตาไลติกส์ด้วยแสงวิสิเบิลจะทำให้ค่า  $C/C_0$  ของสารละลาย 2,4-ไดคลอโรฟีนอลลดลง ในช่วงเวลา 30-180 นาที มีการสลายตัวของ 2,4-ไดคลอโรฟีนอล โดยผงบิสมัทวานาเดตที่ได้จากการเตรียมโดยวิธีซอล-เจล เผาเคลที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ปริมาณ 0.5000 กรัม มีเปอร์เซ็นต์การสลาย 2,4-ไดคลอโรฟีนอลมากที่สุด คือ 65.34 เปอร์เซ็นต์ และผงบิสมัทวานาเดตที่ได้จากการเตรียมโดยวิธีซอล-เจล เผาเคลที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ปริมาณ 0.1250 กรัม มีเปอร์เซ็นต์การสลาย 2,4-ไดคลอโรฟีนอลต่ำสุด คือ 17.62 เปอร์เซ็นต์ แสดงดังภาพที่ 22 (ก-ค) และภาพที่ 23 (ก-ค) และตารางที่ 13



(ก)

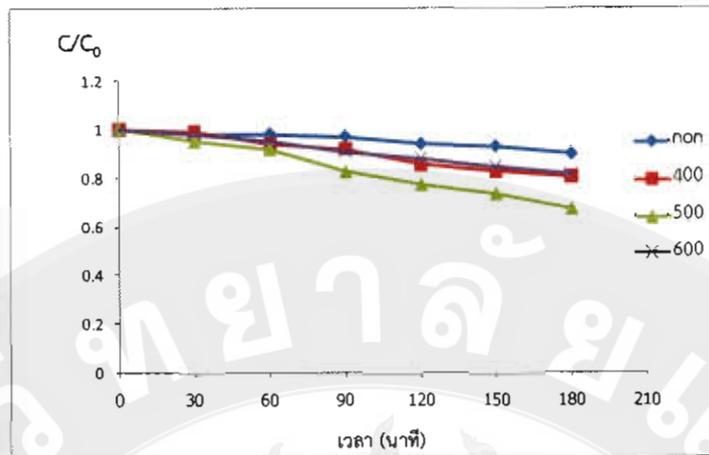


(ข)

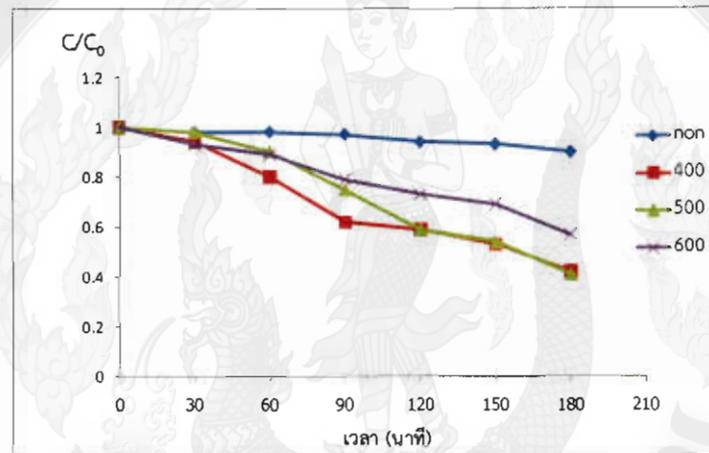


(ค)

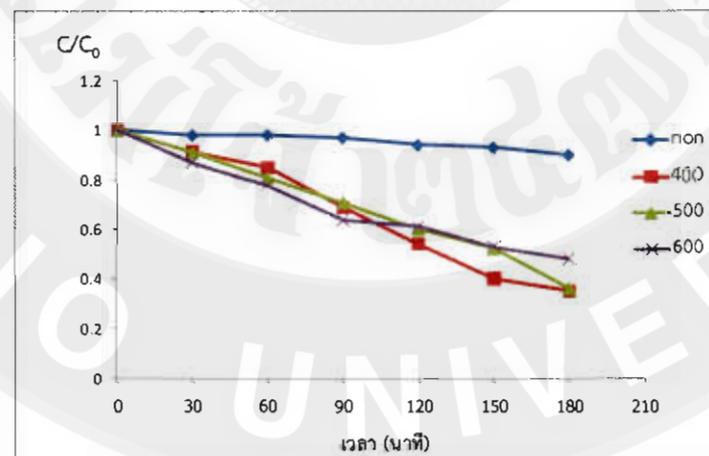
ภาพที่ 22 กราฟการสลายตัวของ 2,4-ไดคลอโรฟีนอล โดยผงบิสมัทริชวานาเดตที่เตรียมได้โดยวิธี ซอด-เจด เพาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ (ก) 400 (ข) 500 และ (ค) 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ปริมาณ 0.1250, 0.2500 และ 0.5000 กรัม



(ก)



(ข)



(ค)

ภาพที่ 23 กราฟการสลายตัวของ 2,4-ไดคลอโรฟีนอล โดยผงบิสมัทวานาเดตที่เตรียมได้ โดยวิธีซอล-เจล เผาเคลไชน์ที่อุณหภูมิ 400, 500 และ 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ปริมาณ (ก) 0.1250 (ข) 0.2500 และ (ค) 0.5000 กรัม

ตารางที่ 13 การสลายตัวของ 2,4-ไดคลอโรฟีนอล โดยผงบิสมีธวานาแคตที่เตรียมได้โดยวิธีซอล-เจล เมาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 400, 500 และ 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ปริมาณ 0.1250, 0.2500 และ 0.5000 กรัม

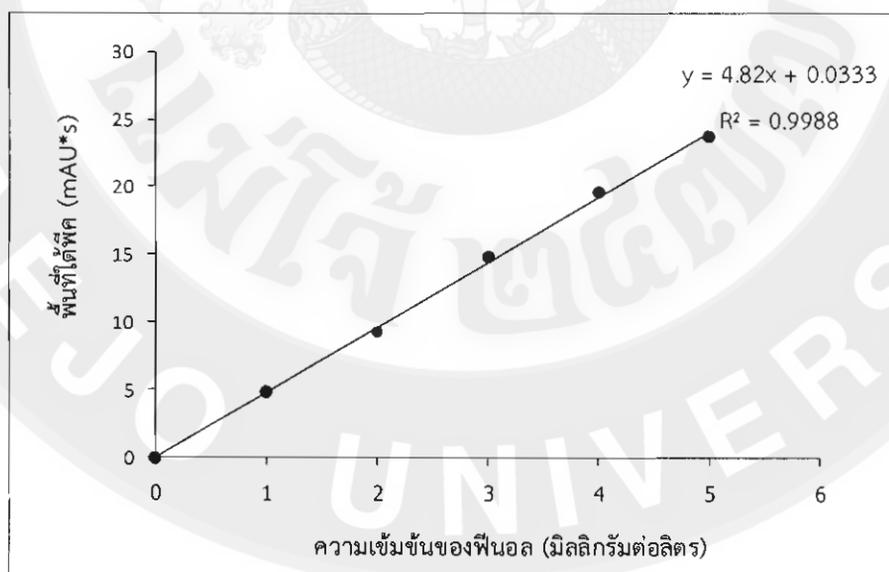
สารตัวอย่าง		ความเข้มข้น เริ่มต้น ( $C_0$ )	ความเข้มข้นที่ เวลา 180 นาที ( $C$ )	$C/C_0$	% degradation ( $\eta$ )
Non	$\text{BiVO}_4$	5.03	4.53	0.90	9.94
0.1250 g	$\text{BiVO}_4$ 400 °C	4.71	3.80	0.81	19.32
0.2500 g	$\text{BiVO}_4$ 400 °C	3.88	1.63	0.42	57.99
0.5000 g	$\text{BiVO}_4$ 400 °C	3.52	1.22	0.35	65.34
0.1250 g	$\text{BiVO}_4$ 500 °C	4.74	3.23	0.68	31.86
0.2500 g	$\text{BiVO}_4$ 500 °C	3.47	1.43	0.41	58.79
0.5000 g	$\text{BiVO}_4$ 500 °C	2.91	1.06	0.36	63.57
0.1250 g	$\text{BiVO}_4$ 600 °C	4.88	4.02	0.82	17.62
0.2500 g	$\text{BiVO}_4$ 600 °C	4.87	2.76	0.57	43.33
0.5000 g	$\text{BiVO}_4$ 600 °C	4.71	2.26	0.48	52.02

จากการศึกษาการสลายตัวของฟีนอล 2-คลอโรฟีนอล และ 2,4-ไดคลอโรฟีนอล โดยผงบิสมีธวานาแคต ที่เตรียมได้โดยวิธีซอล-เจล เมาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 400, 500 และ 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ปริมาณ 0.1250, 0.2500 และ 0.5000 กรัม พบว่า ผงบิสมีธวานาแคต ที่เตรียมได้ เมาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 500 และ 400 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ปริมาณ 0.5000 กรัม มีประสิทธิภาพในการสลายตัวของ 2-คลอโรฟีนอล และ 2,4-ไดคลอโรฟีนอล ได้สูงที่สุดตามลำดับ เนื่องจากปริมาณผงบิสมีธวานาแคตเพิ่มขึ้น ปฏิกิริยาโฟโตแคตาไลติกส์ในการสลายตัวของ 2-คลอโรฟีนอล และ 2,4-ไดคลอโรฟีนอลจะเพิ่มขึ้น และผงบิสมีธวานาแคตที่เตรียมได้ เมาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ปริมาณ 0.1250 กรัม มีประสิทธิภาพในการสลายตัวของฟีนอลได้สูงที่สุด เนื่องจากสารฟีนอลมีความเสถียรกว่า 2-คลอโรฟีนอล และ 2,4-ไดคลอโรฟีนอล จึงทำให้เปอร์เซ็นต์การสลายฟีนอลที่ได้มีค่าน้อยกว่าเปอร์เซ็นต์การสลาย 2-คลอโรฟีนอล และ 2,4-ไดคลอโรฟีนอล

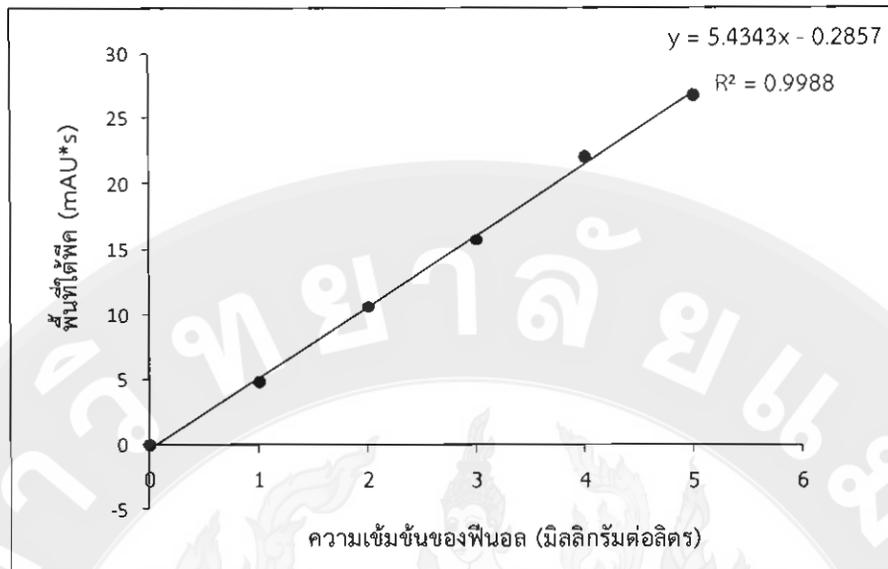
### 5. การทดสอบหาปริมาณฟีนอล 2-คลอโรฟีนอล และ 2,4-ไดคลอโรฟีนอล ในตัวอย่างน้ำธรรมชาติ โดยวิธีเติมสารละลายมาตรฐาน

การศึกษาหาปริมาณฟีนอล 2-คลอโรฟีนอล และ 2,4-ไดคลอโรฟีนอล ในน้ำตัวอย่างธรรมชาติจากแหล่งน้ำ 3 แหล่ง ได้แก่ แปลงผัก นาข้าว และคลองชลประทาน โดยทำการเก็บตัวอย่างน้ำธรรมชาติในแต่ละแหล่งมาปริมาตร 500 มิลลิลิตร แล้วนำมากรองเพื่อกำจัดตะกอนและสิ่งปนเปื้อน จากนั้นบีบตัวอย่างน้ำธรรมชาติในปริมาตรที่เท่ากัน ลงในขวดวัดปริมาตรแต่ละขวด แล้วบีบเติมสารละลายมาตรฐานฟีนอล 2-คลอโรฟีนอล และ 2,4-ไดคลอโรฟีนอล ที่ทราบความเข้มข้นตามช่วงความเป็นเส้นตรงลงในขวดวัดปริมาตรขนาด 25 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรด้วยน้ำปราศจากไอออน แล้วนำมาวิเคราะห์ด้วยเครื่องโครมาโทกราฟของเหลวสมรรถนะสูง

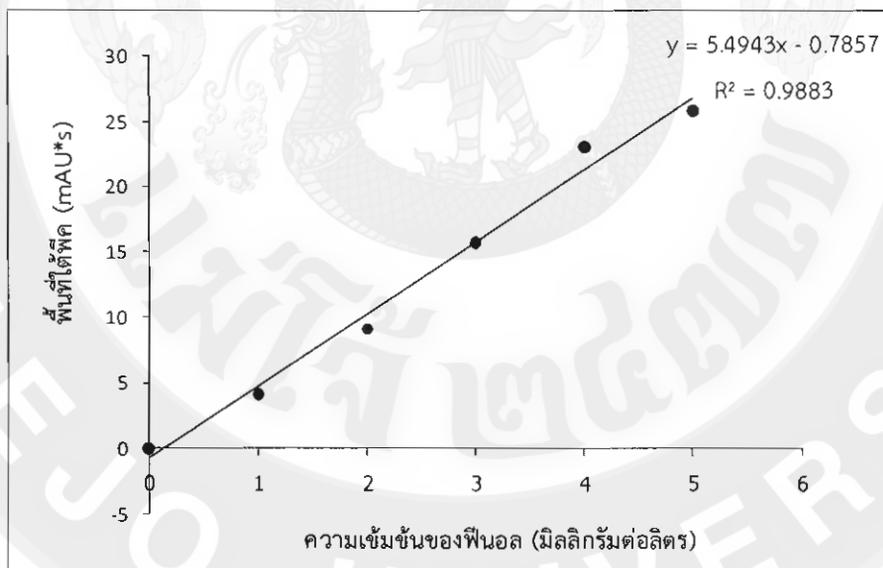
จากการทดสอบหาปริมาณฟีนอล 2-คลอโรฟีนอล และ 2,4-ไดคลอโรฟีนอล ในตัวอย่างน้ำธรรมชาติจากแหล่งน้ำ 3 แหล่ง โดยวิธีเติมสารละลายมาตรฐาน พบว่า ในตัวอย่างน้ำธรรมชาติจากแหล่งน้ำทั้ง 3 แหล่ง ไม่พบฟีนอล 2-คลอโรฟีนอล และ 2,4-ไดคลอโรฟีนอล เนื่องจากในตัวอย่างน้ำธรรมชาติทั้ง 3 แหล่ง อาจมีปริมาณฟีนอล 2-คลอโรฟีนอล และ 2,4-ไดคลอโรฟีนอล ที่น้อยกว่าระดับความเข้มข้นมีลติกรัมต่อลิตร จึงทำให้ตรวจวัดไม่พบปริมาณฟีนอล 2-คลอโรฟีนอล และ 2,4-ไดคลอโรฟีนอล ในตัวอย่างน้ำธรรมชาติ แสดงดังภาพที่ 24-32



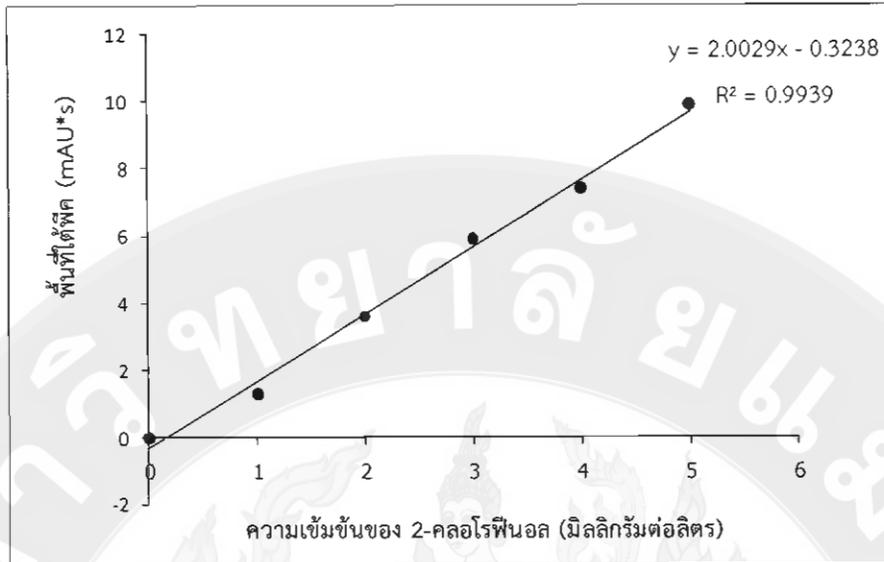
ภาพที่ 24 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานฟีนอลกับพื้นที่ใต้พีคโดยวิธีการเติมสารละลายมาตรฐาน ในตัวอย่างน้ำธรรมชาติจากแปลงผัก



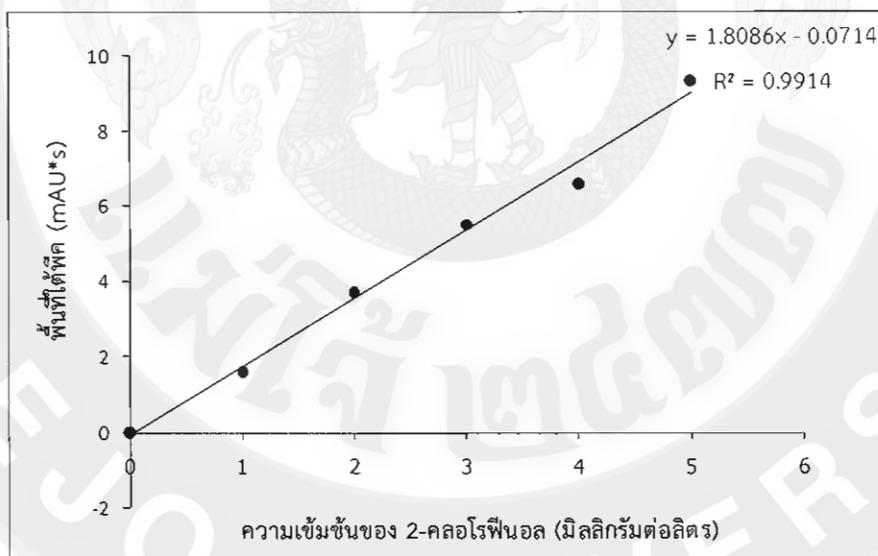
ภาพที่ 25 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานฟีนอลกับพื้นที่ใต้พีคโดยวิธีการเติมสารละลายมาตรฐาน ในตัวอย่างน้ำธรรมชาติจากนาข้าว



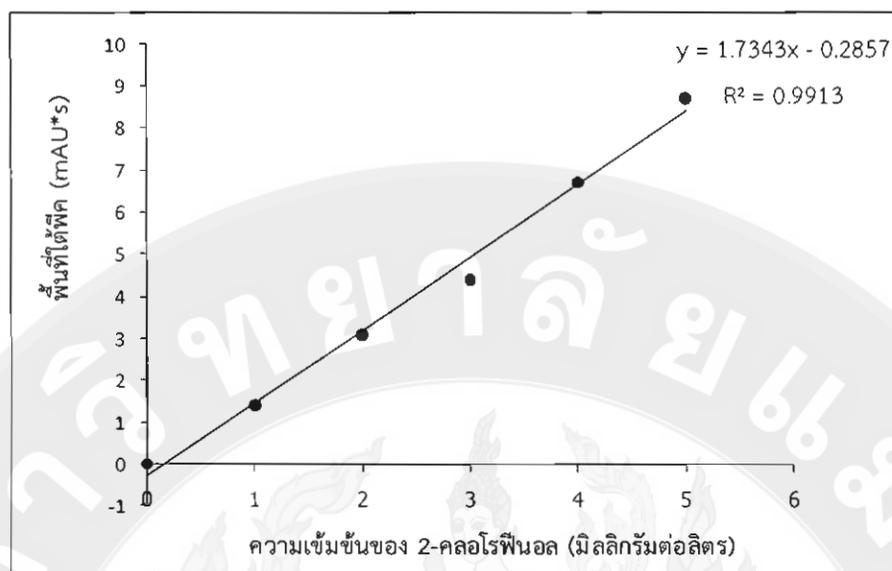
ภาพที่ 26 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานฟีนอลกับพื้นที่ใต้พีคโดยวิธีการเติมสารละลายมาตรฐาน ในตัวอย่างน้ำธรรมชาติจากคลองชลประทาน



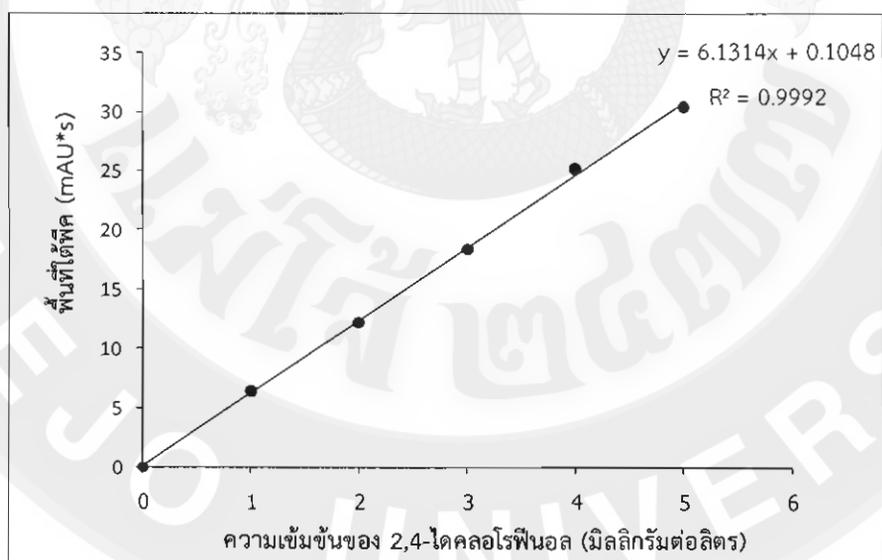
ภาพที่ 27 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐาน 2-คลอโรฟีนอลกับพื้นที่ที่ได้ฟัด โดยวิธีการเติมสารละลายมาตรฐาน ในตัวอย่างน้ำธรรมชาติจากแปลงผัก



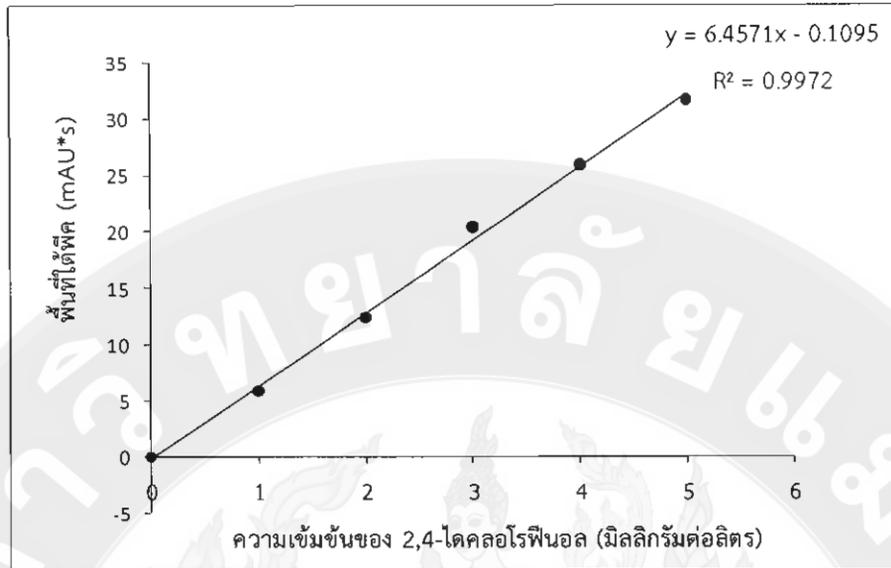
ภาพที่ 28 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐาน 2-คลอโรฟีนอลกับพื้นที่ที่ได้ฟัด โดยวิธีการเติมสารละลายมาตรฐาน ในตัวอย่างน้ำธรรมชาติจากนาข้าว



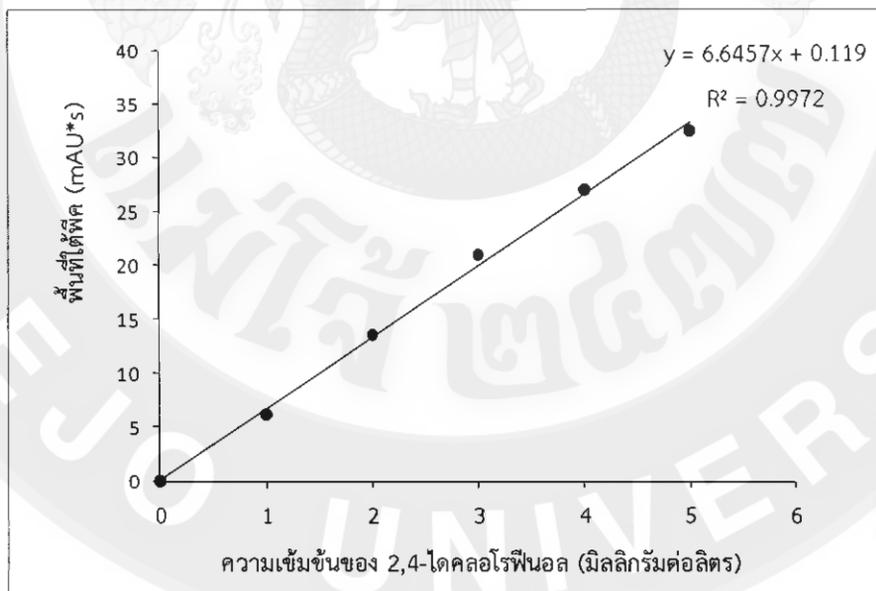
ภาพที่ 29 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐาน 2-คลอโรฟีนอลกับพื้นที่ใต้พีค โดยวิธีการเติมสารละลายมาตรฐาน ในตัวอย่างน้ำธรรมชาติจากคลองชลประทาน



ภาพที่ 30 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐาน 2,4-ไดคลอโรฟีนอลกับพื้นที่ใต้พีค โดยวิธีการเติมสารละลายมาตรฐาน ในตัวอย่างน้ำธรรมชาติจากแปลงผัก



ภาพที่ 31 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐาน 2,4-ไดคลอโรฟินอลกับพื้นที่ใต้พีค โดยวิธีการเติมสารละลายมาตรฐาน ในตัวอย่างน้ำธรรมชาติจากนาข้าว



ภาพที่ 32 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐาน 2,4-ไดคลอโรฟินอลกับพื้นที่ใต้พีค โดยวิธีการเติมสารละลายมาตรฐาน ในตัวอย่างน้ำธรรมชาติจากคลองชลประทาน

## วิจารณ์ผลการวิจัย

การตรวจสอบลักษณะทางโครงสร้างของผงบิสมัทวานาเดต โดยเครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟร็กโตมิเตอร์

ผงบิสมัทวานาเดตที่เตรียมได้โดยวิธีซอล-เจล เผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 400, 500 และ 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง พบว่า รูปแบบ XRD มีโครงสร้างแบบ โมโนคลินิก หลังผ่านการเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง เมื่อเปรียบเทียบกับข้อมูลมาตรฐาน Joint Committee on Powder Diffraction Standards (JCPDS) หมายเลข 14-0688<sup>[31]</sup>

การตรวจสอบลักษณะสัณฐานวิทยาของผงบิสมัทวานาเดต โดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM)

จากการตรวจสอบลักษณะสัณฐานวิทยาของผงบิสมัทวานาเดต โดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด พบว่า อนุภาคของผงบิสมัทวานาเดตมีการเกาะตัวกันค่อนข้างสูง เนื่องจากแรงในการบดผงบิสมัทวานาเดต และความแรงของเครื่องอัลตราโซนิคต่ำ จึงทำให้อนุภาคกระจายตัวได้ไม่ดี และยังไม่สอดคล้องกับขนาดอนุภาคเฉลี่ย ที่คำนวณได้จากสมการเชียร์เรอร์ ซึ่งอาจเนื่องมาจากผงบิสมัทวานาเดต ที่เตรียมได้โดยวิธีซอล-เจล ต้องผ่านการเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิสูงจึงทำให้อนุภาคมีขนาดเล็กลง เมื่ออุณหภูมิในการเผาแคลไซน์เพิ่มขึ้นขนาดของอนุภาคก็จะลดลง และมีความบริสุทธิ์เพิ่มขึ้น

การวิเคราะห์หาธาตุที่เป็นองค์ประกอบของผงบิสมัทวานาเดต โดยเครื่องวัดการกระจายพลังงานทางสเปกโตรมิเตอร์ (Energy dispersive X-ray spectrometer, EDS)

จากการวิเคราะห์หาธาตุที่เป็นองค์ประกอบของผงบิสมัทวานาเดต ที่เตรียมได้โดยวิธีซอล-เจล พบว่า ธาตุที่เป็นองค์ประกอบหลักของผงบิสมัทวานาเดต คือ ธาตุบิสมัท ธาตุวานาเดียม และธาตุออกซิเจน ซึ่งมีผลการทดลองสอดคล้องกับงานวิจัยของ Pusit Pookmanee และคณะ<sup>[30]</sup>

การวิเคราะห์สเปกตรัม เพื่อตรวจสอบหมู่ฟังก์ชัน โดยเครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ (Fourier transform infrared spectrometer, FTIR)

จากผลการวิจัย พบว่า สอดคล้องกับงานวิจัยของ M. Gotić และคณะ<sup>[11]</sup> ผงบิสมัทวานาเดต โดยวิธีไฮโดรเทอร์มอล ทำการตรวจสอบหมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิค FTIR พบว่า มีการสั่นของพันธะ  $\text{VO}_4^{3-}$  stretching ในช่วงคลื่น 474 ค่อเซนติเมตร และ 809-830 ค่อเซนติเมตร มีการสั่นของพันธะ V-

O stretching ในช่วงคลื่น 729-743 ต่อเซนติเมตร และมีการสั่นของพันธะ Bi-O bending ในช่วงคลื่น 623-650 ต่อเซนติเมตร

การศึกษาการสลายตัวของฟีนอล 2-คลอโรฟีนอล และ 2,4-ไดคลอโรฟีนอล โดยผงบิสมัทวานาเดตที่เตรียมได้โดยวิธีซอล-เจล

ผงบิสมัทวานาเดตที่เตรียม ได้โดยวิธีซอล-เจล พบว่า ประสิทธิภาพในการสลายตัวของฟีนอล 2-คลอโรฟีนอล และ 2,4-ไดคลอโรฟีนอล มีปัจจัยที่เกี่ยวข้องที่สำคัญ คือ ความเข้มของแหล่งกำเนิดแสงวิเลเบิลที่ใช้ ในงานวิจัยนี้ ใช้กำลัง 8 วัตต์ ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับวิจัยที่ผ่านมา จะมีการใช้แหล่งกำเนิดที่มีกำลังมากกว่า ประมาณ 20 เท่า ซึ่งงานวิจัยนี้ มีประสิทธิภาพในสามารถย่อยสลายสารดังกล่าวได้เหมือนกัน และมีค่าใช้จ่ายที่ถูกกว่างานวิจัยที่ผ่านมา

จากงานวิจัยของ Zhijie Zhang และคณะ<sup>[51]</sup> ได้ทำการศึกษาการสลายตัวของโรดามีนบี (Rhodamine B, RhB) และฟีนอล โดยผงบิสมัทวานาเดตที่เตรียมได้จากวิธีการเผาไหม้สารละลาย (Solution combustion) พบว่า ปฏิกิริยาโฟโตแคตาลิซิสของผงบิสมัทวานาเดต มีประสิทธิภาพในการสลายตัวของสารประกอบอินทรีย์ที่มีโครงสร้างเป็นแบบอะโรมาติก และการลดปริมาณคาร์บอนของสารอินทรีย์ (TOC) และสามารถย่อยสลายฟีนอลได้ 92.40 เปอร์เซ็นต์ ในเวลา 150 นาที

## สรุปผลการวิจัย

### การตรวจสอบลักษณะเฉพาะของผงบิสมัทวานาเดต

#### 1. การตรวจสอบลักษณะโครงสร้างของผงบิสมัทวานาเดต

การตรวจสอบลักษณะโครงสร้างของผงบิสมัทวานาเดต โดยเครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟร็กโทร-มิเตอร์ (XRD) ผงบิสมัทวานาเดตที่เตรียมได้โดยวิธีซอล-เจล เผาแคลไซต์ที่อุณหภูมิ 400, 500 และ 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง พบว่า ผงบิสมัทวานาเดตที่เตรียมได้ มีโครงสร้างเป็นแบบโมโนคลินิกเพียงเฟสเดียว

#### 2. การตรวจสอบลักษณะสัณฐานวิทยาของผงบิสมัทวานาเดต

การตรวจสอบลักษณะทางสัณฐานวิทยาของผงบิสมัทวานาเดต ที่เตรียมได้โดยวิธีซอล-เจล เผาแคลไซต์ที่อุณหภูมิ 400, 500 และ 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง โดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) พบว่า ผงบิสมัทวานาเดตที่เตรียมได้ มีรูปร่างอนุภาคที่ไม่แน่นอนเกาะรวมตัวกันค่อนข้างสูง และมีขนาดเฉลี่ยประมาณ 0.5-3.0 ไมโครเมตร

#### 3. การวิเคราะห์ธาตุที่เป็นองค์ประกอบทางเคมีของผงบิสมัทวานาเดต

การวิเคราะห์ธาตุที่เป็นองค์ประกอบทางเคมีของผงบิสมัทวานาเดต ที่เตรียมได้โดยวิธีซอล-เจล เผาแคลไซต์ที่อุณหภูมิ 400, 500 และ 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง โดยเครื่องวัดการกระจายพลังงาน ทางสเปกโตรมิเตอร์ (EDS) พบว่า มีธาตุที่เป็นองค์ประกอบของผงบิสมัทวานาเดต คือ ธาตุบิสมัท ธาตุวานาเดียม และออกซิเจน

#### 4. การวิเคราะห์หาพื้นที่ผิวของอนุภาคผงบิสมัทวานาเดต

การวิเคราะห์หาพื้นที่ผิวของอนุภาคผงบิสมัทวานาเดต ที่เตรียมได้โดยวิธีซอล-เจล เผาแคลไซต์ที่อุณหภูมิ 400, 500 และ 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง โดยเครื่องวิเคราะห์หาพื้นที่ผิวของอนุภาค (BET) พบว่า ผงบิสมัทวานาเดตที่เตรียมได้ เผาแคลไซต์ที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง อนุภาคมีขนาดพื้นที่ผิวมากที่สุด

##### 5. การวิเคราะห์สเปกตรัม เพื่อตรวจสอบหมู่ฟังก์ชันของผงบิสมัธวานาเดต

การวิเคราะห์สเปกตรัมเพื่อตรวจสอบหมู่ฟังก์ชันของผงบิสมัธวานาเดต ที่เตรียมได้โดยวิธีซอล-เจล เมาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 400, 500 และ 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง โดยเครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรด สเปกโทรมิเตอร์ (FTIR) พบว่า มีหมู่ฟังก์ชันของพันธะ  $\text{VO}_4^{3-}$  stretching, พันธะ V-O stretching และพันธะ Bi-O bending ของ  $\text{BiVO}_4$

##### การศึกษาการสลายตัวของฟีนอล 2-คลอโรฟีนอล และ 2,4-ไดคลอโรฟีนอล โดยผงบิสมัธวานาเดตที่เตรียมได้โดยวิธีซอล-เจล

จากการศึกษาการสลายตัวของฟีนอล 2-คลอโรฟีนอล และ 2,4-ไดคลอโรฟีนอล โดยผงบิสมัธวานาเดต ที่เตรียมได้โดยวิธีซอล-เจล เมาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 400, 500 และ 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ปริมาณ 0.1250, 0.2500 และ 0.5000 กรัม พบว่า ผงบิสมัธวานาเดตที่เตรียมได้ เมาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส ปริมาณ 0.1250 กรัม มีประสิทธิภาพในการสลายตัวของฟีนอลได้สูงที่สุด และผงบิสมัธวานาเดตที่เตรียมได้ เมาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 500 และ 600 องศาเซลเซียส ปริมาณ 0.5000 กรัม มีประสิทธิภาพในการสลายตัวของ 2-คลอโรฟีนอล และ 2,4- ไดคลอโรฟีนอลได้สูงที่สุด ตามลำดับ

##### การทดสอบหาปริมาณฟีนอล 2-คลอโรฟีนอล และ 2,4-ไดคลอโรฟีนอล ในตัวอย่างน้ำธรรมชาติ โดยวิธีเติมสารละลายมาตรฐาน

จากการหาปริมาณฟีนอล 2-คลอโรฟีนอล และ 2,4-ไดคลอโรฟีนอล ในน้ำตัวอย่างธรรมชาติจากแหล่งน้ำ 3 แหล่ง ได้แก่ แปลงผัก นาข้าว และคลองชลประทาน ด้วยวิธีเติมสารละลายมาตรฐานแล้วนำมาวิเคราะห์ด้วยเครื่องโครมาโทกราฟีของเหลวสมรรถนะสูง พบว่าการตรวจวัดไม่พบปริมาณฟีนอล 2-คลอโรฟีนอล และ 2,4-ไดคลอโรฟีนอล ในตัวอย่างน้ำธรรมชาติทั้ง 3 แหล่ง