



การพัฒนาเทคนิคโฟโตอิเล็กโทรคะตะไลซิสเพื่อกำจัดสารประกอบฟีนอล  
ภายใต้แสงอาทิตย์

Development of photoelectrocatalysis techniques for phenolic compound  
degradation under solar light

รัชชัย จุฑามาศ<sup>1</sup>, ฉัตรชัย พลเชี่ยว<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี  
อำเภอธัญบุรี จังหวัดปทุมธานี 12110

\*E-mail: [chatchai@rmutt.ac.th](mailto:chatchai@rmutt.ac.th)

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้พัฒนาเทคนิคโฟโตอิเล็กโทรคะตะไลซิส (PEC) สำหรับกำจัดสารประกอบฟีนอลโดยใช้ขั้วไฟฟ้า FTO/WO<sub>3</sub>/BiVO<sub>4</sub> ใช้สารละลายควินไฮโครเปอร์ออกไซด์ (CHP) เป็นตัวแทนของสารประกอบฟีนอล สำหรับการศึกษาศมบัติด้านโฟโตอิเล็กโทรคะตะไลซิสและกระบวนการกำจัด ศักยภาพด้านโฟโตอิเล็กโทรคะตะไลซิสโดยใช้เทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตรีภายใต้การเร่งด้วยแสงช่วงวิสิเบิล และตรวจวัดปริมาณ CHP ที่ลดลงด้วยเครื่องคูวีวิสิเบิลสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ ศึกษาค่าศักย์ไฟฟ้าและกำลังของแสงที่ให้กับระบบเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมและกลไกการเกิดปฏิกิริยาในกระบวนการสลายตัวของ CHP นอกจากนี้ยังศึกษาค่าซีโอดีเพื่อยืนยันการกำจัดสารประกอบอินทรีย์ทั้งหมดในระบบ ที่สภาวะที่เหมาะสมพบว่าเทคนิค PEC สามารถกำจัดสารประกอบ CHP จนสามารถปล่อยลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติได้ แสดงให้เห็นว่าเทคนิคที่ได้พัฒนาขึ้นนี้มีประสิทธิภาพสูงในการกำจัดสารประกอบฟีนอล เหมาะที่จะพัฒนาเพื่อใช้กับระบบบำบัดน้ำเสียต่อไป

คำสำคัญ: โฟโตอิเล็กโทรคะตะไลซิส, ควินไฮโครเปอร์ออกไซด์, ขั้วไฟฟ้า FTO/WO<sub>3</sub>/BiVO<sub>4</sub>

Received: Jun 07, 2015

Revised: Jun 15, 2015

Accepted: Jun 16, 2015

### Abstract

This research, photoelectrocatalysis (PEC) was developed for phenolic compound degradation using FTO/WO<sub>3</sub>/BiVO<sub>4</sub> electrode. Cumene hydroperoxide (CHP) was selected as the phenolic compound for studying with photoelectrocatalytic property and the degradation process. The photoelectrocatalytic properties were studied by cyclic voltammetry under visible light irradiation. The decreased amount of the CHP was determined by a UV/Vis spectrophotometer. Potential and power of light source given to the system were studied for the optimization and the mechanism of the CHP degradation process. Moreover, a COD value was studied in order to confirm the conversion of all organic compounds in the system. The optimal condition found that the PEC technique could eliminate CHP compound which can be released into the water. This indicated that the developed technique represented high efficiency for the removal of phenolic compound which is suitable for water treatment systems.

**Keywords:** Photoelectrocatalysis, cumene hydroperoxide compound, FTO/WO<sub>3</sub>/BiVO<sub>4</sub> electrode

### 1. บทนำ

ในน้ำเสียที่เกิดจากกระบวนการผลิตสารประกอบฟีนอล จะมีสารเคมีที่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อมออกมาด้วย ซึ่งสารเคมีดังกล่าวจะถูกบำบัดไปก่อนที่จะนำน้ำเสียที่บำบัดแล้วเข้าสู่ระบบบำบัดรวมทั่วไปของโรงงาน ซึ่งระบบบำบัดรวมดังกล่าวได้แก่ การบำบัดโดยใช้กระบวนการแอคทีเวตเต็ดสลัดจ์ (Activated sludge process) ซึ่งขั้นตอนดังกล่าวจะมีการใช้เชื้อแบคทีเรียในการย่อยสลายสารอินทรีย์ที่ปนเปื้อนในน้ำเสีย เชื้อเหล่านี้ไม่สามารถทนต่อสารเคมีที่เป็นพิษสูงได้ ถ้าเชื้อตายระบบบำบัดน้ำเสียในโรงงานก็ไม่สามารถทำงานได้ จึงได้ทำการแก้ปัญหาดังกล่าวโดยใช้ถ่านกัมมันต์ในการดูดซับสารพิษดังกล่าวออกจากน้ำเสียก่อนที่จะเข้าสู่บ่อรวม อย่างไรก็ตามวิธีการดังกล่าวจะมีค่าใช้จ่ายสูง และต้องเปลี่ยนถ่านกัมมันต์บ่อยๆ และถ่านดังกล่าวหลังจากดูดซับสารพิษเหล่านั้นต้องกลายเป็นของเสียอันตราย และต้องมีค่าใช้จ่ายในการกำจัดเพิ่มเติมอีก ดังนั้นการสรรหาเทคโนโลยีการบำบัดใหม่ ที่ทำให้มี

ของเสียที่เหลือจากการบำบัดน้อยที่สุด น่าจะเป็นแนวทางที่ดีในการแก้ปัญหาด้านสิ่งแวดล้อมให้กับโรงงาน ในงานวิจัยนี้ได้เลือกการบำบัดมลพิษประเภทอนุพันธ์ของฟีนอล มาใช้เป็นกรณีศึกษา โดยเลือกใช้สารประกอบคูมินไฮโดรเปอร์ออกไซด์ (Cumene hydroperoxide; CHP) ซึ่งเป็นสารประกอบที่ใช้ในกระบวนการผลิตสารประกอบฟีนอล และจากกระบวนการผลิตจะมีของเสีย CHP ปนเปื้อนออกมาด้วยซึ่งมีความเป็นพิษสูงมากเมื่อปล่อยลงสู่แหล่งน้ำ

สำหรับเทคนิคที่เลือกมาเพื่อใช้กำจัดสารประกอบ CHP นี้คือเทคนิคโฟโตอิเล็กโทรคะตะไลซิส (Photoelectrocatalysis; PEC) โดยการตรึงสารกึ่งตัวนำลงบนขั้วไฟฟ้าที่นำไฟฟ้าได้ แล้วกระตุ้นการเกิดปฏิกิริยาด้วยการให้แสงและศักย์ไฟฟ้า ซึ่งเป็นเทคนิคใหม่ที่ได้รับการสนใจอย่างมากในด้านการประยุกต์ใช้กับงานด้านพลังงานและสิ่งแวดล้อม โดยมีจุดเด่นของเทคนิคคือ มีประสิทธิภาพในการเกิดปฏิกิริยารีดอกซ์สูง และที่

สำคัญในกระบวนการกำจัดจะเสร็จสิ้นในกระบวนการเดียวโดยไม่ต้องมีขั้นตอนการกำจัดสารที่เหลือจากกระบวนการ ซึ่งหลักสำคัญของการพัฒนาเทคนิคดังกล่าวนี้คือการพัฒนาสารกึ่งตัวนำให้มีประสิทธิภาพสูงสุดในการดูดกลืนแสงและออกซิไดซ์สารประกอบฟีนอลในสารละลายให้ได้มากที่สุด จากการศึกษาได้มีการพัฒนาในส่วนดังกล่าวกันอย่างแพร่หลาย เช่น การใช้  $\text{TiO}_2$  หรือ  $\text{ZnO}$  ในการกำจัด สารประกอบฟีนอล [1, 2] แต่เนื่องจากสารกึ่งตัวนำดังกล่าวดูดกลืนได้เฉพาะช่วงแสงอัลตราไวโอเล็ต ซึ่งมีปริมาณน้อยในแสงอาทิตย์ ทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดไม่มากนัก จึงต้องมีการพัฒนาเพื่อให้มีคุณสมบัติในการดูดกลืนในช่วงแสงวิสิเบิล ซึ่งมีปริมาณมากในแสงอาทิตย์ โดยการเติมสารที่มีสมบัติช่วยในการดูดกลืนแสงวิสิเบิล เช่น การเติมสีย้อม(dye),  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  และ carbon nanotube ลงบน  $\text{TiO}_2$  เป็นต้น [3-5] ดังนั้นสารกึ่งตัวนำที่มีสมบัติการดูดกลืนแสงวิสิเบิลจึงได้รับความสนใจพัฒนาเพื่อลดจุดด้อยดังกล่าวโดยเฉพาะอย่างยิ่ง  $\text{BiVO}_4$  ซึ่งมีสมบัติการดูดกลืนแสงในช่วงวิสิเบิล และมีประสิทธิภาพในการออกซิไดซ์ได้เป็นอย่างดี [7, 8] โดยเฉพาะงานวิจัยที่ผ่านมาได้พัฒนาสมบัติของสารกึ่งตัวนำ  $\text{BiVO}_4$  ร่วมกับ สารกึ่งตัวนำอื่นและอนุภาคนาโนของโลหะ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของการเกิดปฏิกิริยาด้วยเทคนิค PEC ในปฏิกิริยาการออกซิไดซ์น้ำให้กลายเป็นออกซิเจน [9-11] ซึ่งล่าสุดได้พัฒนาสารกึ่งตัวนำดังกล่าวสำหรับกำจัดสารปนเปื้อนจากสีย้อมได้สำเร็จ [12] ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้พัฒนาเทคนิค PEC โดยใช้สารกึ่งตัวนำดังกล่าวเพื่อใช้กำจัดสารประกอบฟีนอลประเภท CHP โดยได้ศึกษาปัจจัยที่สำคัญที่มีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัด CHP จนได้สภาวะที่เหมาะสมที่มีประสิทธิภาพสูงสุดในการกำจัดสารประกอบ CHP

จนกลายเป็นสารที่สามารถปล่อยลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติได้

## 2. วัสดุอุปกรณ์และวิธีดำเนินการวิจัย

### 2.1 วัสดุอุปกรณ์

เครื่องวิเคราะห์ทางเคมีไฟฟ้าแบบตั้งโต๊ะ Potentiostat : AUTOLAB model PGSTAT 20 voltammetric analyzer (Eco Chemie, Utrecht) เครื่องยูวีวิสิเบิลสเปกโตร-โฟโตมิเตอร์: UV/Vis spectrophotometer model UV-2401PC (SHIMADZU) ส่วนสารเคมีที่ใช้ในงานวิจัยจะใช้สารเคมีเกรดสำหรับงานวิเคราะห์ คือ คูมินไฮโดรเปอร์ออกไซด์ (Cumene hydroperoxide (CHP); Fluka) โซเดียมซัลเฟต (Sodium sulphate ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ); Fluka) กรดทังสติก (Tungstic acid; Sigma-Aldrich) บิสมัท(III) ไนเตรท (Bismuth (III) nitrate; Univar) วานาเดียมออกไซด์อะซีติลอะซีโตน (Vanadium (IV) oxide acetylacetonate, Merk) กรดอะซีติก (Acetic acid; RCI Labscan) อะซีติล อะซีโตน (Acetyl acetone; Panreac) กระจกนำไฟฟ้า (Fluorine doped tin oxide; FTO, Sigma-aldrich)

### 2.2 วิธีดำเนินการวิจัย

#### 2.2.1 การเตรียมขั้วไฟฟ้า FTO/ $\text{WO}_3$ / $\text{BiVO}_4$ และศึกษาสมบัติ PEC

เตรียมขั้วไฟฟ้า FTO/ $\text{WO}_3$ / $\text{BiVO}_4$  ด้วยเทคนิคการตรึงแบบหมุน (spin coating) [10] โดยตรึง 0.1 M  $\text{WO}_3$  ลงบนกระจก FTO เป็นชั้นใน และ 0.05 M  $\text{BiVO}_4$  เป็นชั้นนอกจำนวน 5 ชั้น โดยการตรึงแต่ละชั้นจะอบที่อุณหภูมิ  $150^\circ\text{C}$  เป็นเวลา 5 นาที หลังจากนั้นนำไปเผาที่อุณหภูมิ  $550^\circ\text{C}$  เป็นเวลา 1 ชั่วโมง หลังจากนั้นต่อขั้วไฟฟ้าด้วยลวดทองแดง

แล้วนำไปทดสอบสมบัติ PEC ด้วยเทคนิคไซคลิก โวลแทมเมตรี (Cyclic voltammetry) ในสารละลาย อิเล็กโทรไลต์ 0.1 M  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  และสารละลาย 5 ppm CHP ภายใต้สภาวะเร่งด้วยแสงช่วงวิสิเบิล โดยใช้หลอดทั้งสแตน 25 W

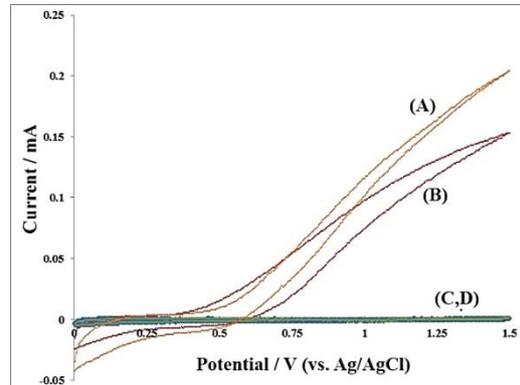
### 2.2.2 การศึกษาการกำจัด CHP ด้วยเทคนิค PEC

ในการศึกษาการกำจัดสารประกอบ CHP ด้วยเทคนิค PEC โดยใช้สารละลาย 100 ppm CHP ใน 0.1M  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  เป็นสารละลายตัวอย่าง โดยศึกษาปัจจัยต่างๆที่มีผลการประสิทธิผลการกำจัด เช่น ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า ความแรงของหลอดไฟ และกลไกในการกำจัด CHP โดยติดตามปริมาณ CHP จากการวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่องยูวี วิสิเบิลสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ นอกจากนี้ยังศึกษาค่าซีไอดี (Chemical oxygen demand, COD) เพื่อยืนยันการกำจัดสารประกอบอินทรีย์ทั้งหมดในระบบด้วย

## 3. ผลการวิจัยและวิจารณ์ผลการวิจัย

### 3.1 ผลการศึกษาการเตรียมขั้วไฟฟ้า FTO/ $\text{WO}_3$ / $\text{BiVO}_4$ และสมบัติ PEC

จากการเตรียมขั้วไฟฟ้า FTO/ $\text{WO}_3$ / $\text{BiVO}_4$  ด้วยเทคนิค spin coating พบว่าได้ขั้วไฟฟ้าที่มีลักษณะโปร่งแสงสีเหลือง ดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่น 500 นาโนเมตร ซึ่งสอดคล้องกับสมบัติของ  $\text{BiVO}_4$  ซึ่งอยู่ผิวหน้าขั้วไฟฟ้า สอดคล้องกับผลงานวิจัยก่อนหน้านี้ [10] เมื่อทำการศึกษาสมบัติ PEC ในสารละลาย CHP ภายใต้สภาวะที่มีแสงเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาได้ผลดังแสดงในรูปที่ 1

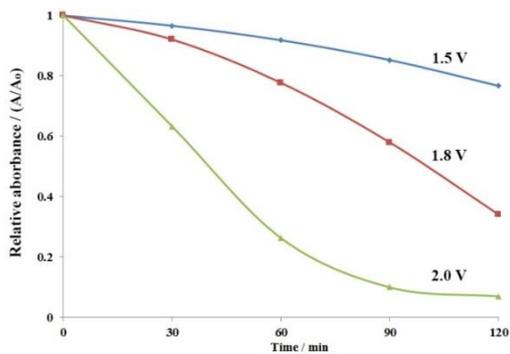


รูปที่ 1 แสดงไซคลิกโวลแทมโมแกรมของขั้วไฟฟ้า FTO/ $\text{WO}_3$ / $\text{BiVO}_4$  ภายใต้สภาวะต่างๆ (A) สารละลาย 5 ppm CHP ใน 0.1 M  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  ภายใต้สภาวะที่มีแสง (B) สารละลาย 0.1 M  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  ภายใต้สภาวะที่มีแสง (C, D) สารละลาย 5 ppm CHP ใน 0.1 M  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  และ สารละลาย 0.1 M  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  ตามลำดับ ภายใต้สภาวะที่ไม่มีแสง

จากรูปจะเห็นว่าในสารละลาย CHP (รูปที่ 1A) จะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันที่ศักย์ไฟฟ้า 0.75 V มากกว่าในสารละลายที่มีแต่  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  อย่างเดียว (รูปที่ 1B) ภายใต้สภาวะที่มีแสงเป็นตัวกระตุ้นการเกิดปฏิกิริยาที่ผิวหน้าขั้วไฟฟ้าสารกึ่งตัวนำ ซึ่งจะไม่นพบการเกิดปฏิกิริยาในสภาวะที่มืด (รูปที่ 1C,D) ทุกค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า แสดงให้เห็นว่าสารละลาย CHP ถูกออกซิไดซ์ตั้งแต่ศักย์ไฟฟ้า 0.75V เป็นต้นไป โดยจะเห็นชัดเจนมากขึ้นเมื่อเพิ่มศักย์ไฟฟ้าไปจนถึง 1.5 V ภายใต้สภาวะที่มีแสงเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งเป็นการยืนยันสมบัติความเป็น PEC ของขั้วไฟฟ้า FTO/ $\text{WO}_3$ / $\text{BiVO}_4$  ในการออกซิไดซ์สารประกอบ CHP สามารถใช้เป็นข้อมูลในการออกแบบการศึกษาการกำจัด CHP ในการทดลองต่อไป

**3.2 ผลการศึกษาการกำจัด CHP ด้วยเทคนิค PEC**

จากการศึกษาเบื้องต้นของการเกิดปฏิกิริยาออกซิชั่นของ CHP ภายใต้สภาวะที่มีแสงเป็นตัวเร่ง โดยพบว่าเมื่อให้ศักย์ไฟฟ้าไปทางบวกมากขึ้นจะได้ค่ากระแสออกซิเดชันของ CHP มากขึ้น ดังนั้นได้ทำการศึกษาผลของศักย์ไฟฟ้าในการกำจัด CHP ดังแสดงผลการศึกษาในรูปที่ 2

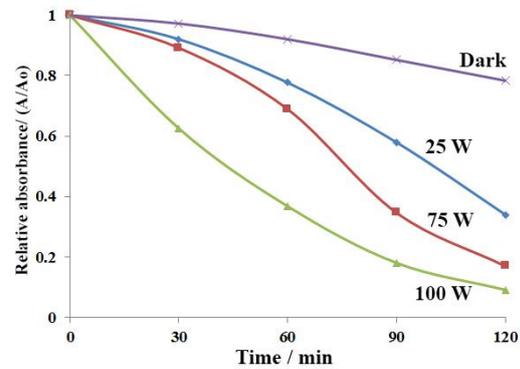


รูปที่ 2 แสดงผลของศักย์ไฟฟ้าต่ออัตราการลดลงของ CHP โดยแสดงความสัมพันธ์ของค่าการดูดกลืนแสงสัมพัทธ์ (Relative absorbance;  $A/A_0$ ) กับ เวลาที่ใช้ในการกำจัด ( $A$  = ค่าการดูดกลืนแสง ณ เวลาใดๆ และ  $A_0$  = ค่าการดูดกลืนแสง ณ เวลาเริ่มต้น)

จากรูปที่ 2 พบว่าเมื่อเพิ่มศักย์ไฟฟ้ามากขึ้น จาก 1.5 V ถึง 2.0 V จะเกิดการกำจัด CHP มากขึ้น แสดงให้เห็นว่าศักย์ไฟฟ้ามีผลโดยตรงกับการกำจัด CHP โดยจะเห็นว่าที่ศักย์ไฟฟ้า 2.0 V สามารถกำจัด CHP ได้ถึง 90% ที่เวลา 90 นาที โดยเฉพาะช่วงแรกของการกำจัดจะเกิดการลดลงอย่างรวดเร็ว แสดงให้เห็นว่าการให้ศักย์ตั้งแต่ 2.0 V เป็นต้นไปสามารถกำจัด CHP ได้อย่างมีประสิทธิภาพ แต่อย่างไรก็ตาม การให้ศักย์ไฟฟ้าที่สูงมากเกินไปก็อาจมีผลต่ออายุของขั้วไฟฟ้าได้

อีกปัจจัยหนึ่งที่มีความสำคัญมากสำหรับการกำจัด CHP ด้วยเทคนิค PEC คือ แสงในการ

ทดลองได้ศึกษาผลของความแรงของแสงโดยการใช้หลอดทั้งสแตนท์ที่มีกำลังวัตต์ที่แตกต่างกัน ตั้งแต่ 25 – 100 W ดังแสดงในรูปที่ 3

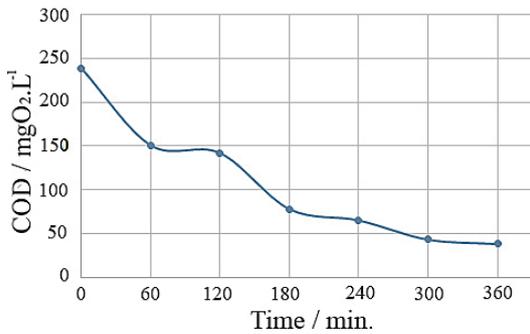


รูปที่ 3 แสดงผลของความแรงของแหล่งกำเนิดแสงต่ออัตราการลดลงของ CHP โดยแสดงความสัมพันธ์ของค่าการดูดกลืนแสงสัมพัทธ์ (Relative absorbance;  $A/A_0$ ) กับ เวลาที่ใช้ในการกำจัด ( $A$  = ค่าการดูดกลืนแสง ณ เวลาใดๆ และ  $A_0$  = ค่าการดูดกลืนแสง ณ เวลาเริ่มต้น)

พบว่าเมื่อเพิ่มค่าความแรงของแสงจากหลอดทั้งสแตนท์จะทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดมากขึ้น แต่อย่างไรก็ตามการเพิ่มความแรงของต้นกำเนิดแสงมากก็จะมีผลต่ออุณหภูมิของสารละลายด้วย ในขณะที่สภาวะไม่ได้ให้แสงแก่ระบบ (dark) ยังมีการกำจัด CHP ประมาณ 20% ซึ่งเป็นผลมาจากการให้ศักย์ไฟฟ้าอย่างเดียว แสดงให้เห็นว่าในกระบวนการกำจัด CHP นี้จะได้ประสิทธิภาพสูงสุดจะต้องเร่งทั้งแสงและศักย์ไฟฟ้า ซึ่งสามารถยืนยันกระบวนการกำจัด CHP ได้ว่าเป็นกระบวนการ “PEC”

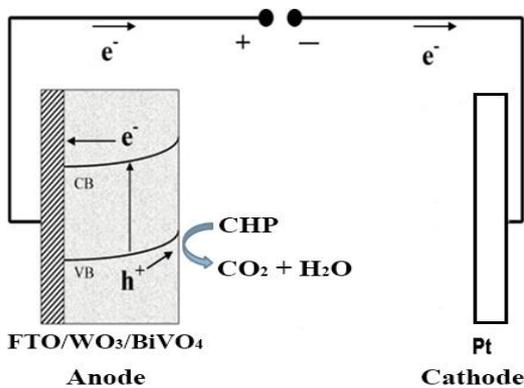
นอกจากนี้ยังได้ทำการศึกษาค่า COD เพื่อยืนยันว่ากระบวนการกำจัดสารอินทรีย์ CHP ได้หมดสิ้นหรือไม่ จากการทดลองดังรูปที่ 4 พบว่ากระบวนการดังกล่าวนี้สามารถลดค่า COD ให้อยู่ในมาตรฐานน้ำทิ้งภายในเวลา 3 ชั่วโมง แสดงให้เห็นว่า

เทคนิคที่ได้พัฒนาขึ้นนี้สามารถกำจัด CHP ให้กลายเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์(CO<sub>2</sub>)ได้อย่างมีประสิทธิภาพ



รูปที่ 4 แสดงการลดลงของค่า COD จากกระบวนการกำจัด CHP ด้วยเทคนิค PEC

จากการศึกษาการกำจัด CHP ด้วยเทคนิค PEC สามารถอธิบายกลไกการเกิดปฏิกิริยาที่ขั้วไฟฟ้าได้ดังรูปที่ 5



รูปที่ 5 แสดงกลไกการเกิดปฏิกิริยาการกำจัด CHP ที่ผิวหน้าขั้วไฟฟ้า FTO/WO<sub>3</sub>/BiVO<sub>4</sub> ด้วยกระบวนการ PEC

เมื่อกระตุ้นขั้วไฟฟ้า FTO/WO<sub>3</sub>/BiVO<sub>4</sub> ด้วยแสงวิสิเบิล ทำให้เกิดการแยกของอิเล็กตรอน (e<sup>-</sup>) และ ช่องว่าง (hole; h<sup>+</sup>) ซึ่งมีประจุเป็นบวกที่แถบการนำ (Conduction band; CB) และ แถบวาเลนซ์ (Valent band; VB) ตามลำดับ เมื่อให้ศักย์ไฟฟ้าไปด้านบวกจะช่วยเหนี่ยวนำ e<sup>-</sup> ให้ไหลจากขั้วไฟฟ้า

Anode ไปยัง Cathode ทำให้เกิดการแยกกันของ e<sup>-</sup> และ h<sup>+</sup> ได้อย่างมีประสิทธิภาพ เป็นการเพิ่มปริมาณ h<sup>+</sup> ให้เกิดขึ้นที่ผิวหน้าขั้วไฟฟ้าจำนวนมากขึ้น ซึ่งจะมีความมีประสิทธิภาพสูงในการออกซิไดซ์ CHP ให้กลายเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ จะเห็นได้ว่าเทคนิคที่ได้พัฒนาขึ้นนี้สามารถกำจัดสารประกอบฟีนอล ซึ่งเป็นสารอินทรีย์ที่มีความเป็นพิษสูงให้กลายเป็นสารที่สามารถปล่อยลงสู่ธรรมชาติได้อย่างมีประสิทธิภาพในขั้นตอนเดียว

#### 4. สรุปผลการวิจัย

สามารถเตรียมขั้วไฟฟ้า FTO/WO<sub>3</sub>/BiVO<sub>4</sub> เพื่อใช้กำจัดสารประกอบฟีนอล CHP ด้วยเทคนิค PEC ภายใต้สภาวะแรงด้วยแสงวิสิเบิลได้อย่างมีประสิทธิภาพ ที่สภาวะที่เหมาะสมสามารถกำจัด CHP ให้กลายเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ จนสามารถปล่อยลงสู่ธรรมชาติได้ และสามารถเข้าใจกลไกการเกิดปฏิกิริยาที่ขั้วไฟฟ้าจากกระบวนการกำจัดได้เป็นอย่างดี ดังนั้นในงานวิจัยนี้สามารถสรุปได้ว่าเทคนิค PEC ที่ได้พัฒนาขึ้นโดยใช้ขั้วไฟฟ้า FTO/WO<sub>3</sub>/BiVO<sub>4</sub> นี้ประสบความสำเร็จในการกำจัดสารประกอบฟีนอลในน้ำได้เป็นอย่างดี ซึ่งเป็นวิธีที่ง่าย และมีประสิทธิภาพ เหมาะสมที่จะนำไปประยุกต์ใช้กับการบำบัดน้ำเสียต่อไป

#### 5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ขอขอบคุณทุนอุดหนุนจากสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย และสถาบันวิจัยและเทคโนโลยี ปตท. / บริษัท ปตท. จำกัด (มหาชน) ที่ร่วมสนับสนุนทุนวิจัย ภายใต้โครงการพัฒนานักวิจัยและงานวิจัยเพื่ออุตสาหกรรม-พวอ. ระดับปริญญาโท (MSD56I0106)

## 6. เอกสารอ้างอิง

- [1] G. Waldner, M. Pourmodjib, R. Bauer and M. Neumann- Spallart. Photoelectrocatalytic degradation of 4-chlorophenol and oxalic acid on titanium dioxide electrodes. *Chemosphere* 50 (2003): 989-998.
- [2] M. Fan, C. Yang, W. Pu and J. Zhang. Liquid phase deposition of ZnO film for photoelectrocatalytic degradation of p-nitrophenol. *Mat. Sci. in Semicon. Proc.* 17 (2014): 104–109
- [3] G. Qinb, Q. Wua, Z. Sunb, Y. Wangb, J. Luob and S. Xueb. Enhanced photoelectrocatalytic degradation of phenols with bifunctionalized dye-sensitized TiO<sub>2</sub> film. *J. Hazard. Mater.* 199 (2012): 226-232.
- [4] Y. Cong, Z. Li, Y. Zhang, Q. Wang and Q. Xu. Synthesis of Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/TiO<sub>2</sub> nanotube arrays for photoelectro-Fenton degradation of phenol. *Chem. Eng. J.* 191 (2012): 356-363.
- [5] L.C. Chena, Y.C. Hoa, W.S. Guoa, C.M. Huangb and T.C. Panb. Enhanced visible light-induced photoelectrocatalytic degradation of phenol by carbon nanotube-doped TiO<sub>2</sub> electrodes. *Electrochim Acta.* 54 (2009): 3884-3891.
- [6] X. Zhanga, S. Chena, X. Quana and H. Zhaoa. Preparation and characterization of BiVO<sub>4</sub> film electrode and investigation of its photoelectrocatalytic (PEC) ability under visible light. *Sep Purif Technol.* 64 (2009): 309-313.
- [7] B. Zhou, J. Qu, X. Zhao and H. Liu. Fabrication and photoelectrocatalytic properties of nanocrystalline monoclinic BiVO<sub>4</sub> thin-film electrode. *J. Environ. Sci.* 23 (2011): 151-159.
- [8] H. Parka, A. Baka, Y.Y. Ahnb, J. Choic and M.R. Hoffmannnc. Photoelectrochemical performance of multi-layered BiO<sub>x</sub>-TiO<sub>2</sub>/Ti electrodes for degradation of phenol and production of molecular hydrogen in water. *J. Hazard. Mater.* 211 (2012): 47-54.
- [9] C. Ponchio, S.y. Kishioka, Y. Murakami, A.Y. Nosaka and Y. Nosaka. FTO/SnO<sub>2</sub>/BiVO<sub>4</sub> Composite Photoelectrode for Water Oxidation under Visible Light Irradiation. *Electrochim Solid St.* 11 (2008): H160-H163.
- [10] C. Ponchio, S.y. Kishioka, Y. Murakami, A.Y. Nosaka and Y. Nosaka. Efficient photocatalytic activity of water oxidation over WO<sub>3</sub>/BiVO<sub>4</sub> composite under visible light irradiation, *Electrochim Acta.* 54 (2009): 1147- 1152.
- [11] C. Ponchio, S.y. Kishioka, Y. Murakami, A.Y. Nosaka and Y. Nosaka. Enhanced photoelectrocatalytic activity of FTO/WO<sub>3</sub>/BiVO<sub>4</sub> electrode modified with gold nanoparticles for water oxidation under visible light irradiation, *Electrochim Acta.* 55 (2010): 592–596.

- [12] C. Ponchio, A.Y. Nosaka and Y. Nosaka.  
Photoelectrocatalytic performance of  
WO<sub>3</sub>/BiVO<sub>4</sub> toward the dye degradation.  
Electrochimica Acta. 94 (2013): 314– 319.