T-BIM-O-167-05

# การเตรียมฟิล์มพอลิพิร์โรลบนแผ่นทองแดงโดยวิธีการพอกพูนด้วยไฟฟ้า

# Preparation of polypyrrole film on copper plate by electrodeposition method

ธิดา คุณสมบัติ[1], เก็จวลี พฤกษาทร[*1,2]

Tida Kunnasombut[1], Kejvalee Pruksathorn[*1,2]

[1]*ศูนย์วิจัยเชื้อเพลิง ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย กรุงเทพฯ* 10330
[2]*ศูนย์ความเป็นเลิศด้านเทคโนโลยีปิโตรเคมีและวัสดุ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย กรุงเทพฯ* 10330
*ติดต่อ E-mail: kejvalee.p@chula.ac.th

## บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาการเตรียมฟิล์มพอลิพิร์โรล (Polypyrrole) บนแผ่นทองแดงโดยเทคนิคการพอกพูนด้วยไฟฟ้า (Electrodeposition) เพื่อทดสอบผลที่มีต่อความสามารถในการป้องกันการกัดกร่อนและค่าการนำไฟฟ้าของแผ่นทองแดงที่ผ่านการเคลือบ สารละลายอิเล็กโทรไลต์ใช้กรดโดเดซิลเบนซีนซัลโฟนิกและพอลิพิร์โรล ความเข้มข้น 0.05 และ 0.15 โมลต่อลิตร ตามลำดับ เวลาที่ใช้ในการเคลือบเท่ากับ 15 นาที ผลการทดลองพบว่า จะเริ่มเกิดฟิล์มพอลิพิร์โรลเคลือบแผ่นทองแดงที่ค่ากระแสไฟฟ้ามากกว่า 55 มิลลิแอมแปร์ เมื่อเพิ่มค่ากระแสไฟฟ้าความหนาของชั้นฟิล์มพอลิพิร์โรลบนแผ่นทองแดงและค่าความต้านทานเชิงสัมผัส (Interfacial contact resistance) มีค่าเพิ่มขึ้น แผ่นทองแดงที่ผ่านการเคลือบพอลิพิร์โรลสามารถป้องกันการกัดกร่อนได้ดีกว่าแผ่นทองแดงที่ไม่ผ่านการเคลือบ การป้องกันการกัดกร่อนเพิ่มขึ้นเมื่อใช้กระแสไฟฟ้าในการเคลือบเพิ่มขึ้นจนถึงค่า 70 มิลลิแอมแปร์ จากนั้นความสามารถในการป้องกันการกัดกร่อนจะลดลง โดยภาวะที่ดีที่สุดในการเคลือบฟิล์มพอลิพิร์โรลคือ ที่ค่ากระแสไฟฟ้า 70 มิลลิแอมแปร์ จะให้ชั้นฟิล์มที่เรียบและสม่ำเสมอ การป้องกันการกัดกร่อนดีขึ้นประมาณ 2 ถึง 3 เท่า เมื่อเทียบกับแผ่นทองแดงที่ไม่ผ่านการเคลือบ

**คำสำคัญ:** พอลิพิร์โรล, การนำไฟฟ้า, การป้องกันการกัดกร่อน, การเคลือบ, แผ่นทองแดง

**Abstract**

This research studied the preparation of polypyrrole films on copper plates by electrodeposition method for enhancing their corrosion resistances. The used electrolyte solutions contained 0.05 mol/L of dodecylbenzenesulfonic acid and 0.15 mol/L of pyrrole monomers. The coating time was set for 15 min. The electrical conducting properties and corrosion resistances of coated copper plates were investigated. The results showed that the polypyrrole films appeared on the copper plates at the coating currents more than 55 mA. When the coating currents increased, the thicknesses and electrical contact resistances (Interfacial contact resistances) of the polypyrrole films increased. The corrosion resistance of coated plates increased with increasing of coating currents from 55 to 70 mA. After that it will be decreased with increasing of current. The coating current of 70 mA was the optimum condition for coating the smooth and uniform polypyrrole film textures. The corrosion resistance of coated copper plates was approximately 2 to 3 times higher than the pristine one.

**Keywords:** Polypyrrole, Conductivity, Corrosion resistance, Electrodeposition, Copper

**บทนำ**

การเสื่อมสภาพของโลหะทำให้สมบัติของโลหะเปลี่ยนไปในทางที่ไม่ดีนับเป็นปัญหาหนึ่งอันไม่พึงประสงค์ ซึ่งเกิดกับโลหะที่นำมาใช้งาน อาทิเช่น ปัญหาการกัดกร่อน (Corrosion) ของโลหะที่ใช้ทำเป็นขั้วไฟฟ้า (Electrode) ซึ่งเป็นปัญหาที่สำคัญประการหนึ่งในเซลล์เชื้อเพลิงชนิดเยื่อแลกเปลี่ยนโปรตอน (Proton exchange membrane fuel cell) เนื่องจากภาวะที่เกิดขึ้นในเซลล์เชื้อเพลิงมีฤทธิ์เป็นกรด [1] เมื่อเกิดปัญหาการกัดกร่อนทำให้ต้องสิ้นเปลืองงบประมาณส่วนหนึ่งในการซ่อมแซมบำรุงรักษา หรือการรื้อใหม่ทดแทน จึงพัฒนาและคิดค้นการป้องกันหรือเพิ่มความคงทนทานแก่โลหะเพื่อลดปัญหาการกัดกร่อนและเพิ่มอายุการใช้งาน โดยในงานวิจัยนี้ศึกษาการลดการกัดกร่อน และค่าการนำไฟฟ้าที่ไม่เปลี่ยนแปลงจากเดิมมากนักโดยการใช้เทคนิคการพอกพูนด้วยไฟฟ้า (Electrochemical deposition) เคลือบฟิล์มพอลิเมอร์กึ่งตัวนำไฟฟ้าบนผิวโลหะ โดยโลหะที่เราเลือกใช้เป็นขั้วไฟฟ้า คือแผ่นทองแดงเนื่องจากแผ่นทองแดงมีข้อดี คือมีค่าการนำไฟฟ้าสูง มีความแข็งแรง บิดงอได้ยาก แก๊สไม่ซึมผ่าน และมีราคาถูก [2] แต่ก็ยังคงมีข้อเสียคือ ความต้านทานการกัดกร่อนต่ำเมื่ออยู่ในภาวะที่มีความเป็นกรดสูง จึงเลือกใช้พอลิพิร์โรล (Polypyrrole) เคลือบบนผิวของแผ่นทองแดง เนื่องจากพอลิพิร์โรลมีสมบัติต้านทานการกัดกร่อน เพราะว่ามีโครงสร้างที่เป็นปัจจัยสำคัญในการยับยั้งการกัดกร่อนได้ อีกทั้งน้ำหนักเบา ยืดหยุ่น และเป็นสารกึ่งตัวนำไฟฟ้า [3] เพื่อไม่ให้สูญเสียความสามารถในการนำไฟฟ้าของแผ่นทองแดง โดยคาดว่าพอลิพิร์โรลจะช่วยเพิ่มความต้านทานการกัดกร่อนของแผ่นทองแดงได้มากขึ้นโดยสามารถ

ควบคุมความหนาและลักษณะของฟิล์มได้ด้วยกระแสไฟฟ้า ความเข้มข้น และเวลา ซึ่งในที่นี้เราจะเลือกใช้การควบคุมด้วยกระแสไฟฟ้าที่มีผลต่อการสังเคราะห์ฟิล์มพอลิพิร์โรล

## อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

### อุปกรณ์

กรดโดเดซิลเบนซีนซัลโฟนิก มอนอเมอร์พิร์โรล แผ่นทองแดง กรดซัลฟิวริก กรดไนตริก แผ่นสแตนเลส เครื่องจ่ายไฟกระแสตรง (Power supply) มัลติโวลต์มิเตอร์ (Multi-miter) Potentiostat/Galvanostat เครื่องวัดความหนาไมโครมิเตอร์ เครื่องกวนแม่เหล็กและแท่งแม่เหล็ก

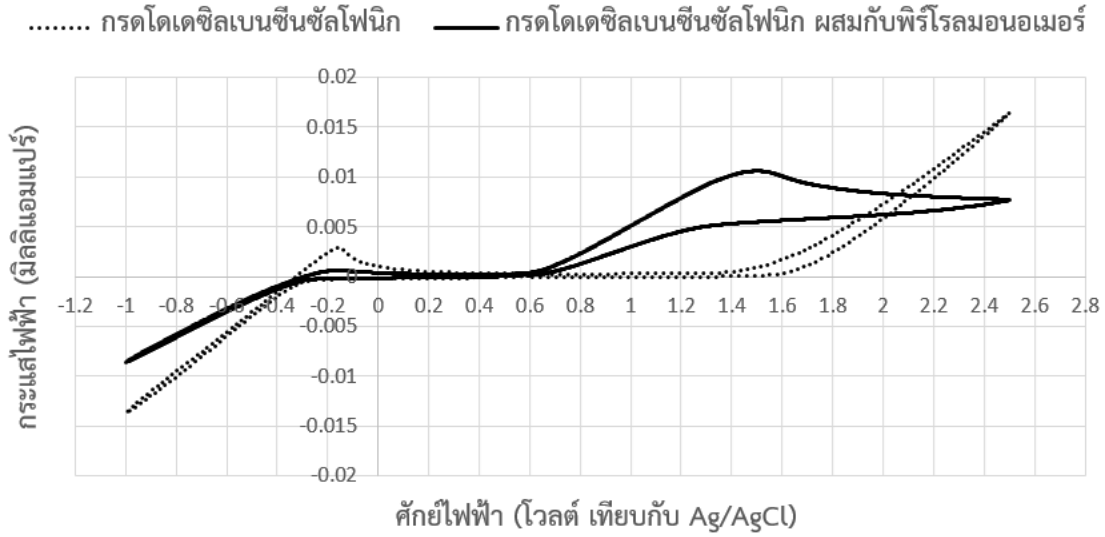
### วิธีการทดลอง

เริ่มจากการกลั่นมอนอเมอร์พิร์โรลเพื่อแยกตัวยับยั้งออกเพื่อความบริสุทธิ์ ใช้วิธีไซคลิกโวลแทมเมตรี (Cyclic voltammetry, CV) เพื่อหาช่วงศักย์ไฟฟ้าของการเกิดปฏิกิริยาอิเล็กโทรพอลิเมอร์ไรเซชันของพอลิพิร์โรล ในการเคลือบนำแผ่นทองแดงความหนา 511 ไมโครเมตร ตัดเป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 1x1 เซนติเมตร จำนวน 2 ชิ้น และ 0.5x1 เซนติเมตร ให้อยู่ในแผ่นเดียวกันใช้เป็นพื้นที่สำหรับการเคลือบ เตรียมแผ่นทองแดงโดยจุ่มลงในกรดไนตริกเป็นเวลา 30 วินาที ล้างด้วยน้ำปราศจากไอออนอีกครั้งเพื่อล้างกรดไนตริกออก ทำการเคลือบในสารละลาย กรดโดเดซิลเบนซีนซัลโฟนิกและพอลิพิร์โรลความเข้มข้น 0.05 และ 0.15 โมลต่อลิตร ตามลำดับ เวลาที่ใช้ในการเคลือบเท่ากับ 15 นาที โดยให้กระแสไฟฟ้าคงที่ในช่วง 55 - 250 มิลลิแอมแปร์ หลังจากนั้นนำแผ่นทองแดงที่ผ่านการเคลือบแล้วที่กระแสไฟฟ้าค่าต่างๆ มาศึกษาอัตราการกัดกร่อน และศึกษาค่าความต้านทานเชิงสัมผัส Interfacial Contact Resistance (ICR) โดยวิธีการศึกษาอัตราการกัดกร่อนใช้เทคนิคเคมีไฟฟ้าหรือ วิธีทาเฟล (Tafel method) ก็จะได้ค่ากระแสไฟฟ้ากัดกร่อน หรือ Corrosion current density ($I_{corr}$) และ ศักย์ไฟฟ้ากัดกร่อน หรือ Corrosion potential ($E_{corr}$) ส่วนวิธีการศึกษาค่าความต้านทานเชิงสัมผัสทำโดยการกดชิ้นงาน และให้กระแสไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายไฟฟ้า (Power supply) รุ่น GPS-3303 ยี่ห้อ GW INSTEK ในช่วง 0.1 - 2.0 แอมแปร์ และวัดค่าความต่างศักย์ของชิ้นงานด้วยมัลติโวลต์มิเตอร์ (Multi-miter) Model RM-15 Sangchai meter เมื่อได้ค่าความต่างศักย์และกระแสไฟฟ้าแล้ว นำไปเขียนกราฟระหว่างค่าความต่างศักย์และกระแสไฟฟ้าโดยความชันของกราฟที่ได้ คือค่าความต้านทานหลังจากนั้นนำค่าความต้านทานที่ได้ไปแทนสูตรเพื่อหาค่าความต้านทานเชิงสัมผัส และสุดท้ายทดสอบเอกลักษณ์ของฟิล์มพอลิพิร์โรลที่เราสังเคราะห์ได้บนแผ่นทองแดงโดยเทคนิค Fourier Transform Infrared spectroscopy (FTIR)

**ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง**

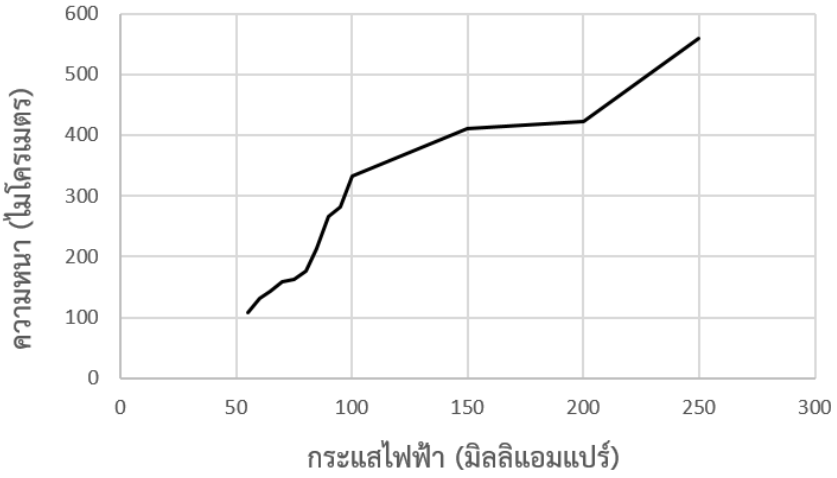
**ผลการทดลอง**

ผลของการศึกษาการเกิดปฏิกิริยาอิเล็กโทรพอลิเมอร์ไรเซชัน ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์พิร์โรลมอนอเมอร์ความเข้มข้น 0.05 โมลต่อลิตร และสารละลายโดเดซิลเบนซีนซัลโฟนิกความเข้มข้น 0.05 โมลต่อลิตร มีค่าความเป็นกรด-เบสเท่ากับ 1.08 และมีค่าการนำไฟฟ้าเท่ากับ 5.56 มิลลิซีเมนต์ต่อตารางเซนติเมตร พบว่าช่วงมอนอเมอร์พิร์โรลเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันอยู่ที่ค่าศักย์ไฟฟ้าประมาณ 0.6 โวลต์เทียบกับขั้วไฟฟ้าอ้างอิง Ag/AgCl แสดงดังรูปที่ 1 ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมาของนักวิจัยอื่นๆ [2,4] ดังนั้นเราสามารถสังเคราะห์พอลิพิร์โรลได้ที่ขั้วแอโนดเนื่องจากเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันที่ค่าศักย์ไฟฟ้าประมาณ 0.6 โวลต์เทียบกับขั้วไฟฟ้าอ้างอิง Ag/AgCl



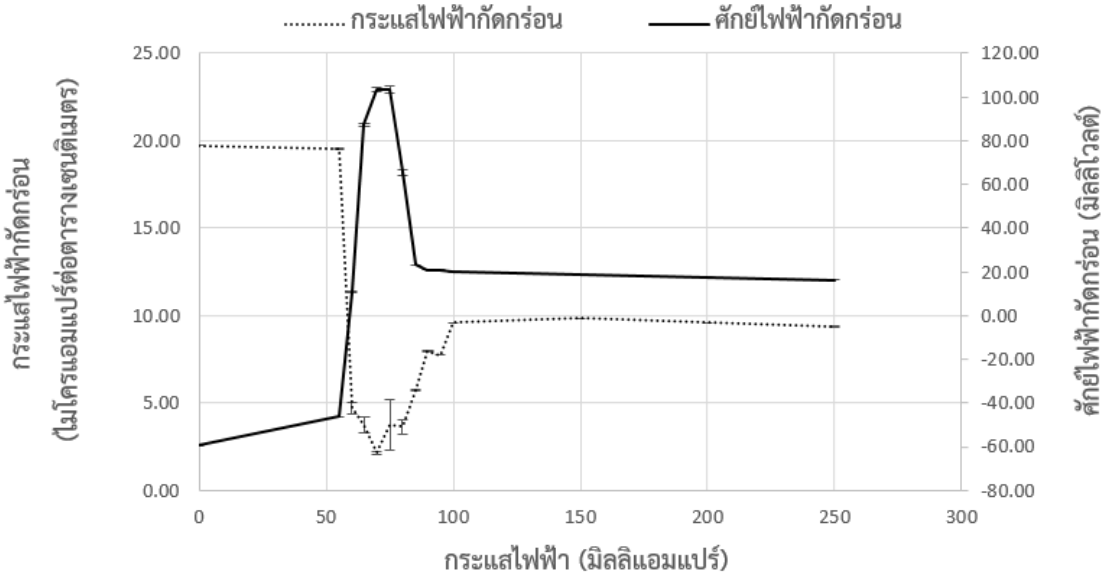

**รูปที่ 1 ไซคลิกโวลแทมโมแกรมแสดงการเกิดอิเล็กโทรพอลิเมอร์ไรเซชันของพอลิพิร์โรล**

ผลของการเคลือบพอลิพิร์โรลบนแผ่นทองแดงพบว่า เมื่อศึกษาผลของกระแสไฟฟ้า พบว่าที่กระแสไฟฟ้า 55 มิลลิแอมแปร์ เริ่มมีการเคลือบพอลิพิร์โรลแต่เกิดการเคลือบไม่ทั่วทั้งแผ่น เนื่องจากปริมาณกระแสไฟฟ้า และเวลาไม่เพียงพอต่อการเคลือบ เมื่อเราเพิ่มกระแสไฟฟ้ามากขึ้นทำให้เกิดการเคลือบพอลิพิร์โรลทั่วทั้งแผ่น และเมื่อเคลือบด้วยกระแสไฟฟ้าที่มากขึ้นเรื่อยๆ จนถึงกระแสไฟฟ้าที่ 70 มิลลิแอมแปร์ เกิดการเคลือบของชั้นฟิล์มพอลิพิร์โรลที่เรียบเนียน หลังจากนั้นเมื่อให้กระแสไฟฟ้ามากขึ้นจะทำให้ความหนาของชั้นฟิล์มพอลิพิร์โรลมากขึ้นแสดงดังรูปที่ 2 เมื่อถึงกระแสไฟฟ้าที่ 100 มิลลิแอมแปร์ จะเกิดการหลุดร่อนของพอลิพิร์โรลที่เคลือบบนผิวทองแดงหลุดออกมา เนื่องจากฟองแก๊สที่มากขึ้นทำให้ฟองแก๊สไปแทรกบริเวณระหว่างผิวทองแดงกับชั้นฟิล์มพอลิพิร์โรลทำให้ฟิล์มพอลิพิร์โรลหลุดร่อนออกมาบางส่วนได้ อีกทั้งยังมีการเกิดขึ้นของชั้นฟิล์มที่หนาและขรุขระซึ่งไม่เหมาะต่อการนำมาใช้งาน

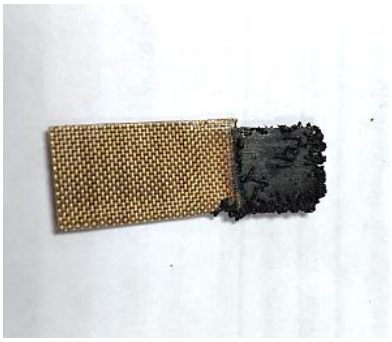



**รูปที่ 2 ความหนาของฟิล์มพอลิพิร์โรลกับกระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการเคลือบ**

นำแผ่นทองแดงที่ผ่านการเคลือบแล้วมาวัดค่าการป้องกันการกัดกร่อน และค่าการนำไฟฟ้า โดยค่าการป้องกันการกัดกร่อนสามารถดูได้จากค่ากระแสไฟฟ้ากัดกร่อน หรือ Corrosion current density ( $I_{corr}$ ) และศักย์ไฟฟ้ากัดกร่อน หรือ Corrosion potential ( $E_{corr}$ ) โดยค่า $I_{corr}$ น้อย หมายถึงมีอัตราการกัดกร่อนน้อย พบว่าเมื่อค่ากระแสไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้น ค่า $I_{corr}$ มีค่าลดลง ส่วนค่า $E_{corr}$ มีค่าเพิ่มมากขึ้น หมายถึงเกิดการกัดกร่อนได้ยาก จนถึงกระแสไฟฟ้าที่ 70 มิลลิแอมแปร์ หลังจากนั้นค่า $I_{corr}$ มีค่าเพิ่มขึ้น และ $E_{corr}$ มีค่าลดลงเล็กน้อยแสดงดังรูปที่ 3 อาจเนื่องมาจากการเคลือบพอลิพิร์โรลบนผิวของแผ่นทองแดงมีการเคลือบที่ไม่เรียบเนียนสม่ำเสมอทั้งแผ่น แสดงดังรูปที่ 4 ทั้งนี้อาจเนื่องจากค่ากระแสไฟฟ้าที่สูงเกินไป จะทำให้เกิดฟองแก๊สขึ้นที่ผิวแผ่นทองแดงทำให้การยึดเกาะของฟิล์มไม่ดี จึงเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้ค่าการป้องกันการกัดกร่อนไม่ดี




**รูปที่ 3 การป้องกันการกัดกร่อนที่ได้จากค่า $I_{corr}$ และ $E_{corr}$ กับกระแสไฟฟ้า**



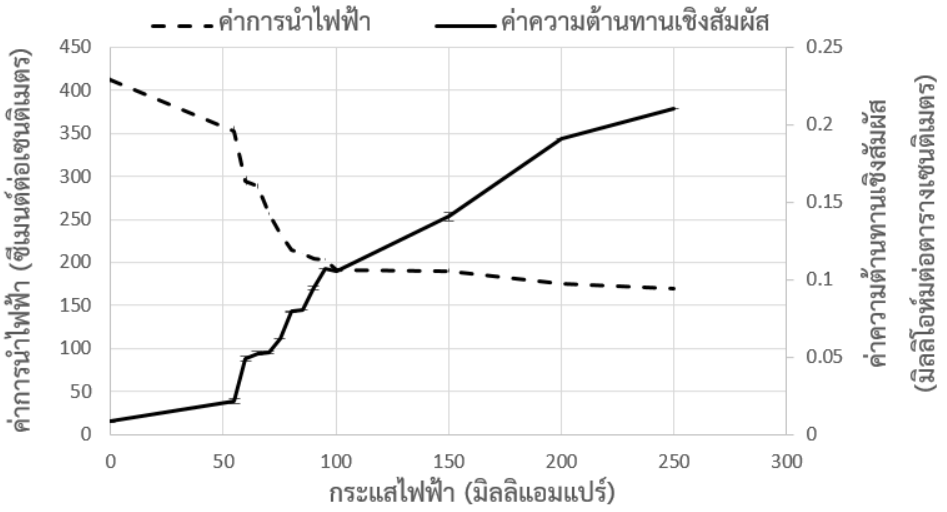
**รูปที่ 4 ลักษณะผิวชั้นฟิล์มพอลิพิร์โรลเมื่อใช้กระแสไฟฟ้ามากกว่า 70 มิลลิแอมแปร์**

ส่วนค่าการนำไฟฟ้าสามารถหาได้จากค่าความต้านทานทาน และค่าความต้านทานเชิงสัมผัส สามารถหาได้จากสมการที่ (1)

$$ICR = \frac{[(R_2 \times A_2) - (R_1 \times A_1)]}{2} \qquad (1)$$

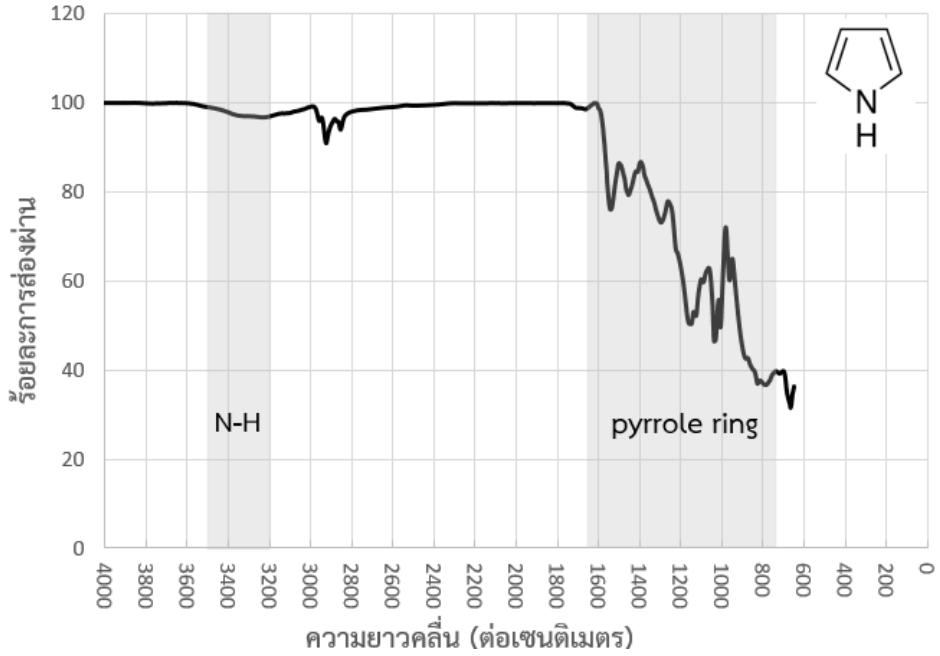
โดย ICR คือ ค่าความต้านทานเชิงสัมผัส $R_1$ คือ วัดค่าความต้านทานสัมผัสเครื่องมือวัด (โอห์มตารางเซนติเมตร) $A_1$ คือ พื้นที่ผิวสัมผัสของผ้าคาร์บอน (ตารางเซนติเมตร) $R_2$ คือ ค่าความต้านทานสัมผัสตอนมีชิ้นงาน (โอห์มตารางเซนติเมตร) $A_2$ คือ พื้นที่ผิวสัมผัสของชิ้นงาน (ตารางเซนติเมตร)

พบว่ามีค่าลดลงเมื่อมีความหนาของชั้นฟิล์มเพิ่มมากขึ้นแสดงดังรูปที่ 5 ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่ากระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการเคลือบที่ 70 มิลลิแอมแปร์ สามารถป้องกันการกัดกร่อนได้ดีที่สุด เนื่องจากมีค่า $I_{corr}$ ลดลงร้อยละ 20 และ $E_{corr}$ เพิ่มขึ้นร้อยละ 67 เมื่อเทียบกับแผ่นทองแดงที่ไม่ผ่านการเคลือบ แต่ค่าการนำไฟฟ้ามีค่าลดลงร้อยละ 62 เทียบกับแผ่นทองแดงที่ไม่ผ่านการเคลือบ แต่ค่ายังอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ (มากกว่า 100 ซีเมนต์/เซนติเมตร) และค่าการป้องกันการกัดกร่อนต้องมีค่าน้อยกว่า 16 ไมโครแอมแปร์/ตารางเซนติเมตร ซึ่งเป็นค่ามาตรฐานของขั้วไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิง [5]




**รูปที่ 5 การนำไฟฟ้าและความต้านทานเชิงสัมผัสกับกระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการเคลือบ**

ลักษณะของฟิล์มพอลิพิร์โรลที่ได้จากการเคลือบ มีลักษณะเป็นสีดำเนื้อด้าน เมื่อนำมาทดสอบด้วยเทคนิค Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) พอลิพิร์โรลจะมีตำแหน่งการดูดกลืนแสงที่สำคัญซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะของพอลิพิร์โรล แสดงดังรูปที่ 6




**รูปที่ 6 ผล FTIR ของพอลิพิร์โรลที่เคลือบบนแผ่นทองแดง**

ผลที่ได้ปรากฏตำแหน่งของพีคที่พบมีดังนี้ มีการสั่นแบบยืดพันธะของพันธะ N-H ที่ 3229 $cm^{-1}$ การสั่นแบบยืดของวงแหวนอะโรมาติก C=C ที่ประมาณ 1644 $cm^{-1}$ การยืด ของพันธะ C-C และ C-N ที่ 1455 $cm^{-1}$ การสั่นแบบยืดและแบบงอของพันธะ C-N ที่ 1296 $cm^{-1}$ การสั่นแบบยืดของพันธะ C=N ที่ 1149 $cm^{-1}$ การสั่น

ของพันธะ N-H ที่ 1091 $cm^{-1}$ และการสั่นของวงพิร์โรลที่ตำแหน่ง 963, 787 $cm^{-1}$ ซึ่งสเปกตราของพอลิเมอร์ที่กำหนดสอดคล้องกับงานของ Saville [6] และ พัชราลัย [7] จึงยืนยันได้ว่าพอลิเมอร์ที่ทำการสังเคราะห์ได้เป็นพอลิพิร์โรลจริง

**สรุปผลการทดลอง**

ผลของการเตรียมฟิล์มพอลิพิร์โรลบนแผ่นทองแดงโดยเทคนิคการเคลือบด้วยกระแสไฟฟ้าคงที่ ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ใช้กรดโดเดซิลเบนซีนซัลโฟนิกและพอลิพิร์โรล ความเข้มข้น 0.05 และ 0.15 โมลต่อลิตร ตามลำดับ เวลาที่ใช้ในการเคลือบเท่ากับ 15 นาที พบว่าจะเริ่มเกิดฟิล์มพอลิพิร์โรลเคลือบแผ่นทองแดงที่ค่ากระแสไฟฟ้ามากกว่า 55 มิลลิแอมแปร์ พอลิพิร์โรลที่ได้มีลักษณะเป็นสีดำเนื้อด้านติดอยู่บนแผ่นทองแดง เมื่อเพิ่มค่ากระแสไฟฟ้า ความหนาของชั้นฟิล์มพอลิพิร์โรลบนแผ่นทองแดงและค่าความต้านทานเชิงสัมผัสมีค่าเพิ่มขึ้น ค่าการนำไฟฟ้าลดลงแผ่นทองแดงที่ผ่านการเคลือบพอลิพิร์โรลจะสามารถป้องกันการกัดกร่อนได้ดีกว่าแผ่นทองแดงที่ไม่ผ่านการเคลือบ โดยการป้องกันการกัดกร่อนจะเพิ่มขึ้นเมื่อใช้กระแสไฟฟ้าในการเคลือบเพิ่มขึ้นจนถึงค่า 70 มิลลิแอมแปร์ จากนั้นความสามารถการป้องกันการกัดกร่อนจะลดลงเมื่อค่ากระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้น โดยภาวะที่ดีที่สุดในการเคลือบฟิล์มพอลิพิร์โรลคือ ที่ค่ากระแสไฟฟ้า 70 มิลลิแอมแปร์ สามารถป้องกันการกัดกร่อนได้ดีที่สุด เนื่องจากมีค่า $I_{corr}$ ลดลงร้อยละ 20 และ $E_{corr}$ เพิ่มขึ้นร้อยละ 67 เมื่อเทียบกับแผ่นทองแดงที่ไม่ผ่านการเคลือบ แต่ค่าการนำไฟฟ้า จะมีค่าลดลงร้อยละ 62 เทียบกับแผ่นทองแดงที่ไม่ผ่านการเคลือบ ดังนั้นถ้านำภาวะที่เหมาะสมของการเคลือบพอลิพิร์โรลบนแผ่นทองแดงที่ได้มาศึกษาโดยการ ควบคุมเวลา หรือความเข้มข้นของพอลิพิร์โรลเพื่อให้มีการป้องกันการกัดกร่อน และค่าการนำไฟฟ้าที่เหมาะสมต่อการนำมาใช้งานทั้งในภาวะการทำงานที่ต้องทนการกัดกร่อนและเป็นขั้วไฟฟ้าในเซลล์เชื้อเพลิงชนิดเยื่อแลกเปลี่ยนโปรตอน

**กิตติกรรมประกาศ**

ขอขอบพระคุณ ทุนอุดหนุนวิทยานิพนธ์สำหรับนิสิต บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้ทุนสนับสนุนการวิจัย

**เอกสารอ้างอิง**

[1] วิภาสศรี วิริยะรักษ์. (2553). *การสังเคราะห์พอลิอะนิลีนบนเหล็กกล้าไร้สนิมโดยวิธีเคมีไฟฟ้า*. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, สาขาวิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์หมาวิทยาลัย, 1-2.

[2] Prissanaroon, W., Brack. N., Pigram, P. J., Liesegang, J. (2004). Electropolymerisation of pyrrole on copper in aqueous media. *Synthetic Metals, 142*, 25-34.

[3] Shine, J., Mcclure, J. C., Chianelli, R., Pich, P., Sebastian, P.J. (2005). Conducting polymer-coated stainless steel bipolar plates for proton exchange membrane fuel cells (PEMFC). *Hydrogen Energy, 30*, 1339-1344.

[4] Pan, T. J., Zao, X. W., Wang, T., Hu, J., Chen, Z. D., Ren, Y. J. (2016). Electrodeposited conductive polypyrrole/polyaniline composite film for the corrosion protection of copper bipolar plates in protonexchange membrane fuel cells. *Power Source, 302*, 180-188

[5] Raja Vadivelan, M., Senthil Kumar, N ., Balaji, R. (2015). A review on corrosion of metallic bi-polar plates for proton exchange membrane (PEM) Fuel Cells. *Mathematics, 11*, 83-99.

[6] Saville, P. (2005). Polypyrrole Formation and Use. *Technical Memorandum DRDC Atlantic*, 14.

[7] พัชราลัย อรุณยงค์. (2554). *การเคลือบพอลิพิร์โรลและพอลิแอนิลีนบนขั้วไฟฟ้าเหล็กล้าไร้สนิม*. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, สาขาวิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์หมาวิทยาลัย, 84-85.