

การพัฒนาวิธีการเคลือบตัวเร่งปฏิกิริยาบนผิวขั้วอิเล็กโทรดของเซลล์เชื้อเพลิง ด้วยเทคนิคการพ่นละอองไฟฟ้า

Development of a novel electrospray technique for electrocatalyst deposition in PEMFCs

นักจุฑา จิ่งท่าไม้¹, พรณวดี พรหมประเสริฐ¹, อนนท์พิชญ์ เกิดกุล¹, วีรชัย ไกลถิ่น¹,
กรกช สมบัติมันคง² และ ยศพงษ์ ลออนวล^{1*}

¹ ห้องปฏิบัติการวิจัยเครื่องยนต์และการเผาไหม้

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

126 ถนนประชาธิปไตย แขวงบางมด เขตทุ่งครุ กรุงเทพมหานคร 10140

² ห้องปฏิบัติการวัสดุและงานระบบเพื่อใช้ประโยชน์ทางไฟฟ้าเคมี ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ

114 อุทยานวิทยาศาสตร์ประเทศไทย ถนนพหลโยธิน ตำบลคลองหนึ่ง อำเภอคลองหลวง จังหวัดปทุมธานี 12120

*ติดต่อ: E-mail: yossapong.lao@kmutt.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการพัฒนากระบวนการเคลือบชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาบนผิวขั้วไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงแบบเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอนด้วยเทคนิคการพ่นละอองไฟฟ้า โดยใช้ผงคาร์บอนเป็นตัวแทนของตัวเร่งปฏิกิริยาในสารละลายผสมแนฟไอออนและไอโซโพรพานอล และหาความสัมพันธ์ที่เหมาะสมของค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าช่วง 6.6-7.8 kV และอัตราการไหลช่วง 0.1-1.1 ml/hr ที่ทำให้เกิดละอองไฟฟ้ารูปแบบ Cone – jet แล้วทำการศึกษขนาดและการกระจายตัวของอนุภาคบนผิวขั้วไฟฟ้าที่ได้จากการพ่นละอองไฟฟ้าด้วยกล้องอิเล็กตรอนแบบส่องกราด พบว่าการพ่นละอองไฟฟ้าให้ขนาดของอนุภาคที่เล็กและมีการกระจายตัวของอนุภาคที่สม่ำเสมอกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการทา ทำให้ลดปริมาณการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาและต้นทุนในกระบวนการผลิต

คำหลัก: การพ่นละอองไฟฟ้า: ขั้วไฟฟ้า: เซลล์เชื้อเพลิงแบบเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน

Abstract

A novel electrospray technique was developed in this present work which is applicable for MEA (Membrane electrode assembly) fabrication in proton exchange membrane fuel cell (PEMFC). The catalyst suspension employed in the electrospray process was composed of carbon black, Nafion and isopropanol. Accordingly, the effect of applied voltage and the flow rate on the cone-jet formation were investigated in a range of 6.6-7.8 kV and 0.1-1.1 ml/hr respectively. The particle size distribution of the carbon black electrospun on electrode surface was examined by scanning electron technique. By using the electrospray technique, the carbon black was found to uniformly disperse on electrode surface more than using the painting technique. Consequently, this novel electrospray method is a promising technique that reduces platinum loading and production cost of PEMFCs.

Keywords: Electrodes: Electrospray: Proton Exchange Membranes Fuel Cell

TSF-229

1. บทนำ

เซลล์เชื้อเพลิงเป็นอุปกรณ์เปลี่ยนรูปพลังงานชนิดหนึ่งที่ทำให้ประสิทธิภาพสูงและสามารถนำมาทดแทนแหล่งพลังงานไฟฟ้าได้ โดยการเปลี่ยนรูปพลังงานเคมีของสารตั้งต้นจากกระบวนการเกิดปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีเปลี่ยนเป็นพลังงานไฟฟ้า ได้ผลิตภัณฑ์เป็นน้ำและพลังงานความร้อนนั้น ทำให้เซลล์เชื้อเพลิงเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม ดังนั้นจึงมีการค้นคว้าและวิจัยเซลล์เชื้อเพลิงเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่อง โดยเซลล์เชื้อเพลิงแบบเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอนหรือเซลล์เชื้อเพลิงฟิวส์ (Proton Exchange Membrane Fuel Cell, PEMFC) [1] เป็นเซลล์เชื้อเพลิงที่ได้รับความนิยมในการนำมาประยุกต์ใช้อย่างแพร่หลายโดยเฉพาะในยานพาหนะ เนื่องจากมีขนาดกะทัดรัด น้ำหนักเบา และมีช่วงการทำงานที่อุณหภูมิต่ำ แต่เนื่องจากเซลล์เชื้อเพลิงประเภทนี้ใช้แพลทินัมเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาซึ่งมีราคาแพง ดังนั้นเพื่อเป็นการลดต้นทุนในการผลิตเซลล์เชื้อเพลิงฟิวส์ ทำให้มีการพัฒนาเทคนิคและกระบวนการต่างๆ เพื่อให้เกิดการใช้ประโยชน์จากแพลทินัมอย่างสูงสุด

วิธีการพ่นละอองด้วยไฟฟ้าเป็นเทคนิคหนึ่งที่ถูกนำเสนอสำหรับการประยุกต์ใช้การเคลือบชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาบนผิวขั้วไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงฟิวส์ โดย Benítez et al. [2] ทำการทดลองเปรียบเทียบการเตรียมขั้วไฟฟ้าด้วยเทคนิคการพ่นละอองด้วยไฟฟ้า (Electrospray) เทคนิคการชุบ (Impregnation) และเทคนิคการพ่นละอองด้วยแรงดัน (Spraying) ผลการทดลองพบว่าเทคนิคการพ่นละอองด้วยไฟฟ้าให้การกระจายตัวของผิวเคลือบดีกว่าเทคนิคอื่น ซึ่งทำให้การนำโปรตอนและอิเล็กตรอนส่งผ่านได้ง่าย รวมถึงการเกิดปฏิกิริยาของแพลทินัมมีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น

ขั้วไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงฟิวส์ถูกเตรียมจากสารละลายที่ประกอบไปด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมบนตัวรองรับคาร์บอน (Pt/C) กับไอออนเมอร์ (Ionomer) ซึ่งมีหน้าที่ช่วยนำโปรตอน ในสารละลาย (Solvent) โดยสารเคลือบชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาจะเคลือบบนแผ่นรองรับที่มาจากแผ่นผ้าคาร์บอนหรือ

แผ่นกระดาษคาร์บอน (Carbon Cloth, Carbon Paper) หลังจากกระบวนการเคลือบชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาสารละลายซึ่งส่วนมากเป็นแอลกอฮอล์จะระเหยออกไป เหลือเป็นแผ่นฟิล์มบางของตัวเร่งปฏิกิริยาและไอออนเมอร์ทำหน้าที่ในการนำโปรตอนและอิเล็กตรอน [3]

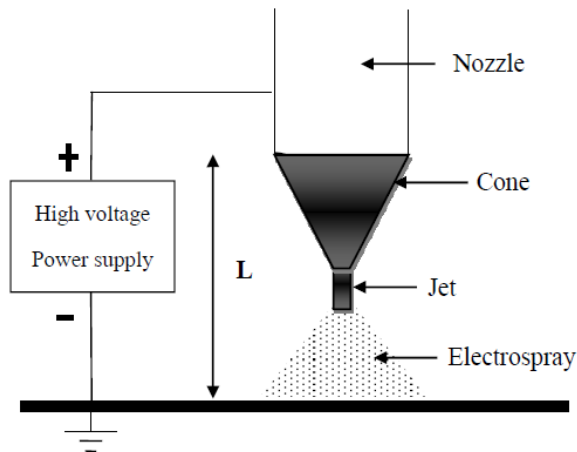
งานวิจัยนี้ทำการศึกษาและทดลองการเคลือบชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาโดยวิธีการพ่นละอองไฟฟ้า เพื่อทำการศึกษารูปแบบของการพ่นละอองไฟฟ้าที่เหมาะสม การหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าและค่าอัตราการไหลของการพ่นละอองไฟฟ้า และศึกษาสมการที่ใช้ทำนายค่ากระแสไฟฟ้าที่ได้จากการคำนวณกับค่าที่ได้จากการทดลอง นอกจากนี้ทำการวิเคราะห์พื้นผิวเคลือบโดยเปรียบเทียบกับวิธีการทาด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Optical Microscope) และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM)

2. การพ่นละอองด้วยไฟฟ้า

2.1 หลักการพ่นละอองด้วยไฟฟ้า

วิธีการพ่นละอองไฟฟ้าเป็นเทคนิคที่มีกระบวนการโดยอาศัยหลักการแตกตัวของอนุภาคของของเหลวด้วยแรงทางสนามไฟฟ้า โดยการป้อนแรงดันไฟฟ้าที่แตกต่างกันให้กับสารละลายที่บริเวณปลายเข็มหัวฉีด และที่บริเวณแผ่นโลหะรองรับ โดยเมื่อเพิ่มอัตราการไหลและค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่เหมาะสมจะเกิดละอองไฟฟ้ารูปแบบ Cone-jet ซึ่งมีความน่าสนใจ เนื่องจากมีลักษณะเฉพาะตัว คือ เกิดเป็นรูปโคน (Cone) ที่ปลายเข็มโลหะและมีลำของเหลว (Jet) ที่ปลายโคน และเกิดการแตกตัวเป็นละอองไฟฟ้า (Electrospray) ที่ปลายสุดของลำของเหลว โดยลักษณะเด่นของละอองไฟฟ้าแบบ Cone-jet จะมีการกระจายตัวของละอองที่สม่ำเสมอ มีรูปร่างของละอองที่แน่นอนและมีขนาดเล็ก [4] ซึ่งการเกิดละอองไฟฟ้ารูปแบบ Cone-jet แสดงดังรูปที่ 1

TSF-229



รูปที่ 1 การเกิดละอองไฟฟ้ารูปแบบ Cone-jet [4]

ในระหว่างกระบวนการพ่นละอองไฟฟ้าเมื่อของเหลวที่บริเวณปลายเข็มหัวฉีดมีลักษณะเป็นโคนบริเวณดังกล่าวจะมีความหนาแน่นของประจุมาก โดยเมื่อของเหลวที่มีประจุเกิดการเคลื่อนที่ไปยังแผ่นรองรับด้วยแรงทางสนามไฟฟ้าจะค่อยๆ กลายเป็นหยดของเหลวที่มีขนาดเล็กลง เนื่องจากการระเหยของสารละลาย และเกิดปรากฏการณ์ Coulomb Explosion ขึ้น ทำให้ภายในหยดของเหลวมีความหนาแน่นของประจุมากขึ้นจนสามารถเอาชนะแรงดึงดูดของหยดของเหลวดังกล่าวได้ จึงเกิดการแตกตัวเป็นละอองสเปรย์ขนาดเล็ก ซึ่งมีความสม่ำเสมอสูง ถูกเคลือบลงบนผิวของแผ่นรองรับ

การเคลือบผิวด้วยการพ่นละอองไฟฟ้าจะป้องกันการเกิดการรวมกลุ่มกันของสารและให้การยึดเกาะกับแผ่นรองรับได้ดี ซึ่งลักษณะพื้นผิวเคลือบที่ได้จะแตกต่างกันขึ้นกับพารามิเตอร์ต่างๆ ในกระบวนการพ่นละอองไฟฟ้างี้ คือ อัตราการไหลของของเหลว ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า ระยะห่างระหว่างปลายเข็มและแผ่นโลหะรองรับ และค่าคุณสมบัติของสาร ซึ่งปัจจัยเหล่านี้จะส่งผลต่อการควบคุมการระเหยของสารละลาย และขนาดของหยดละออง [3], [5]

2.2 ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าเริ่มต้น

ในการศึกษาวิธีการพ่นละอองไฟฟ้า สามารถทำนายค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าเริ่มต้นในการเกิดละอองไฟฟ้ารูปแบบ Cone-jet ได้ โดยจากงานวิจัยที่

ผ่านมา Smith [6] ทำการทดลองหาความสัมพันธ์ของค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าเริ่มต้นที่ทำให้เกิดการพ่นละอองไฟฟ้ารูปแบบ Cone-jet ในรูปของสมการที่ (1)

$$V_0 = A_1 \left(\frac{2r_c \gamma \cos \theta_0}{\epsilon_0} \right)^{1/2} \ln \left(\frac{4L}{r_c} \right) \quad (1)$$

V_0 = ความต่างศักย์ไฟฟ้าเริ่มต้นที่ทำให้เกิดละอองไฟฟ้ารูปแบบ Cone-jet (V)

A_1 = ค่าคงที่ (0.5 – 0.701) (Smith ใช้ค่า 0.667)

θ_0 = ค่ามุมครึ่งของการเกิดละอองไฟฟ้ารูปแบบ Cone-jet ของ Taylor (49.3°) [4]

L = ระยะห่างระหว่างเข็มพ่นละอองกับโลหะที่ต่อขั้วอิเล็กโทรดลบ (m)

r_c = เส้นผ่านศูนย์กลางในของท่อโลหะพ่นละออง (m)

โดยการทดลองนี้ได้อธิบายว่า ของเหลวที่มีค่าแรงตึงผิวมากกว่า 0.05 N/m ในสภาวะความดันบรรยากาศจะไม่สามารถเกิดการพ่นละอองไฟฟ้ารูปแบบ Cone-jet ได้ และค่าการนำไฟฟ้าของของเหลวในช่วง 10^{-11} - 10^{-1} S/m สามารถทำให้เกิดการพ่นละอองไฟฟ้ารูปแบบ Cone-jet ในสภาวะความดันบรรยากาศ

2.3 สมการ Scaling Laws

จากการทดลองของ Gañán-Calvo et al [7] พบว่าของเหลวต่างชนิดกัน สามารถหาความสัมพันธ์ของค่ากระแสไฟฟ้าและขนาดละอองได้จากอัตราการไหลของของเหลว ซึ่งสามารถนำไปเขียนสมการแสดงความสัมพันธ์ซึ่งเรียกว่า Scaling Laws เพื่อทำนายค่ากระแสไฟฟ้า และขนาดละอองของการพ่นละอองไฟฟ้า ตามสมการที่ (2)-(5) ซึ่งแสดงดังต่อไปนี้

เมื่อ $\delta_\mu \delta^{1/3} \leq 1$ สำหรับของเหลวที่มีการนำไฟฟ้าสูง
สมการหาค่ากระแสไฟฟ้า

$$\frac{I}{I_0} = \frac{6.2}{(\epsilon_r - 1)^{1/4}} \left(\frac{Q}{Q_0} \right)^{1/2} - 2 \quad (2)$$

TSF-229

สมการหาขนาดเล็อง

$$\frac{D}{D_\theta} = 1.6(\epsilon_r - 1)^{\frac{1}{6}} \left(\frac{Q}{Q_\theta} \right)^{\frac{1}{3}} - (\epsilon_r - 1)^{\frac{1}{3}} \quad (3)$$

เมื่อ $\delta_\mu \delta^{\frac{1}{3}} \gg 1$ สำหรับของเหลวที่มีการนำไฟฟ้าต่ำ

สมการหาค่ากระแสไฟฟ้า

$$\frac{I}{I_\theta} = 11 \left(\frac{Q}{Q_\theta} \right)^{\frac{1}{4}} - 5 \quad (4)$$

สมการหาขนาดเล็อง

$$\frac{D}{D_\theta} = 1.2 \left(\frac{Q}{Q_\theta} \right)^{\frac{1}{2}} - 0.3 \quad (5)$$

โดยที่ $\delta_\mu \delta^{\frac{1}{3}} =$ ตัวแปรไร้มิติหาได้จาก

$$\delta_\mu \delta^{\frac{1}{3}} = \left(\frac{\gamma^3 \epsilon_0^2}{\mu^3 K^2 Q} \right)^{\frac{1}{3}}$$

$$\delta_\mu = \frac{\rho Q_\theta}{\mu D_\theta} = \left(\frac{\rho \epsilon_0 \gamma^2}{K \mu^3} \right)^{\frac{1}{3}}, \quad \delta = \frac{Q_\theta}{Q} = \left(\frac{\gamma \epsilon_0}{\rho K Q} \right)$$

$$I_\theta = \left(\frac{\epsilon_0 \gamma^2}{\rho} \right)^{\frac{1}{2}}, \quad D_\theta = \left(\frac{\epsilon_0^2 \gamma}{\rho K^2} \right)^{\frac{1}{3}}, \quad Q_\theta = \frac{\epsilon_0 \gamma}{\rho K}$$

ภายใต้เงื่อนไขที่อัตราการไหลต่ำสุดของของไหล

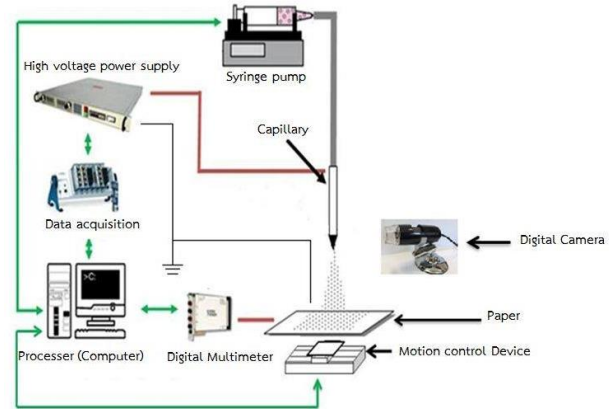
ต้องไม่น้อยกว่า $Q_{\min} \sim (\epsilon_r - 1)^{\frac{1}{2}} Q_\theta$

โดยสมการ Scaling Laws พบว่าเมื่ออัตราการไหลมีค่ามาก ค่ากระแสไฟฟ้าและขนาดเล็องจะมีค่ามากตามไปด้วย ดังนั้นการคำนวณค่ากระแสไฟฟ้าและขนาดเล็องต้องทราบค่าคุณสมบัติเฉพาะตัวของสาร ได้แก่ ค่าความหนาแน่น ค่าแรงตึงผิว ค่าความนำไฟฟ้า ค่าความหนืด ค่าความยอมเป็นไฟฟ้าในสุญญากาศ และค่าความเป็นขั้วไฟฟ้า เพื่อนำไปแทนค่าในสมการการคำนวณ

3. อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

3.1 การออกแบบการทดลอง

ห้องปฏิบัติการวิจัยได้พัฒนาและประยุกต์ระบบที่ใช้ในการทดลองจากงานวิจัยก่อนหน้าสำหรับการเคลือบผิวแม่พิมพ์เซรามิกซ์ด้วยสารช่วยการจับตัว



รูปที่ 2 รูปแสดงระบบการพ่นละอองไฟฟ้าเพื่อเคลือบผิวขั้วไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิง

ของยางโดยวิธีการพ่นละอองไฟฟ้า [4] สำหรับการศึกษาและทดลองครั้งนี้ โดยระบบที่ใช้ในการทดลองแสดงดังรูปที่ 2 แล้วดำเนินการทดสอบค่าคุณสมบัติเฉพาะตัวของสาร ได้แก่ ค่าความหนาแน่น (ρ , kg/m³), ค่าแรงตึงผิว (γ , N/m), ค่าความนำไฟฟ้า (K , kg⁻¹·m⁻³·s³·A²), ค่าความหนืด (μ , kg/m·s), ค่าความยอมเป็นไฟฟ้าในสุญญากาศ (ϵ_0 , s⁴·A²·m⁻³·kg⁻¹) และค่าความเป็นขั้วไฟฟ้า (ϵ_r) ของสารละลายไอโซโพรพานอลบริสุทธิ์และสารเคลือบผิวชั้นตัวเร่งปฏิกิริยา แล้วนำไปคำนวณหาค่าทางทฤษฎีด้วยสมการ Scaling Laws เพื่อทำนายค่ากระแสไฟฟ้าและขนาดเล็องที่เกิดขึ้น ผลการทดสอบแสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 แสดงค่าคุณสมบัติของสารละลายไอโซโพรพานอลและสารเคลือบผิวชั้นตัวเร่งปฏิกิริยา

คุณสมบัติสาร	สารละลายไอโซโพรพานอลบริสุทธิ์ [8]	สารเคลือบผิวชั้นตัวเร่งปฏิกิริยา
ρ	783	846.95
γ	0.0224	0.02604
K	0.000006	13.41333x10 ⁻⁶
μ	0.00196	0.002251
ϵ_0	8.854x10 ⁻¹²	8.854x10 ⁻¹²
ϵ_r	18.6	18.13163

TSF-229

3.2 การเตรียมการทดลอง

- สำหรับการเตรียมการทดลองมีขั้นตอนดังต่อไปนี้
1. เตรียมสารเคลือบผิวชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาโดยใช้ผงคาร์บอน 0.5%wt แنفอออน 3.5%wt และสารละลายไอโซโพรพานอล 96%wt ในหลอดทดลอง แล้วนำไปสั่นด้วยคลื่นอัลตราโซนิกโดยใช้ Ultra Sonicator เป็นเวลา 30 นาที เพื่อให้สารเคลือบผิวชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นเนื้อเดียวกันและลดการจับกลุ่มก้อนของผงคาร์บอน
 2. บ้อนค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าผ่านเครื่องจ่ายแรงดันไฟฟ้ายี่ห้อ Spellman รุ่น SL40P300 โดยบ้อนค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าบวกที่เข็มโลหะ และบ้อนค่าความต่างศักย์ไฟฟาลบที่แผ่นรองรับ และบ้อนค่ากระแสไฟฟ้าแบบ DC
 3. ทำการทดลองเคลือบผิวชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาลงบนแผ่นรองรับด้วยวิธีการพ่นละอองไฟฟ้ารูปแบบ Cone-jet โดยทำการปรับเปลี่ยนค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าและค่าอัตราการไหลที่แตกต่างกัน และมีเงื่อนไขการทดลองดังแสดงในตารางที่ 2

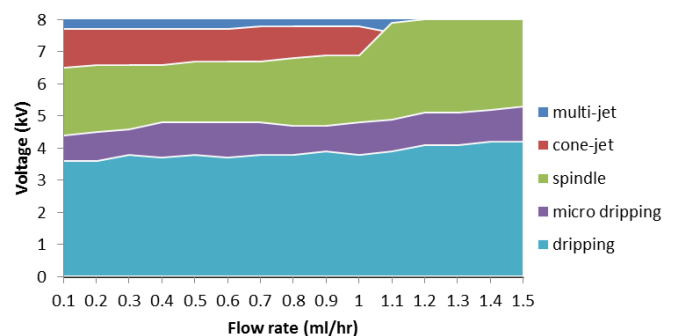
4. ผลการทดลอง

4.1 การหารูปแบบและค่าตัวแปรที่เหมาะสมในการพ่นละอองไฟฟ้า

เมื่อทำการเคลือบผิวด้วยวิธีการพ่นละอองไฟฟ้า โดยทำการปรับค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าและค่าอัตราการไหลเพิ่มขึ้นแล้วหาความสัมพันธ์พบว่า การพ่นละอองไฟฟ้าจะเกิดลักษณะหยดของของเหลวในรูปแบบต่างๆ ดังต่อไปนี้คือ รูปแบบ Dripping รูปแบบ Micro Dripping รูปแบบ Spindle รูปแบบ Cone-jet และรูปแบบ Multi-jet โดยเมื่อทำการปรับค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าเพิ่มขึ้นรูปแบบจะเปลี่ยนแปลงไปตามลำดับ แสดงความสัมพันธ์ของค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าและค่าอัตราการไหลในการเกิดรูปแบบต่างๆ ของวิธีการพ่นละอองไฟฟ้า ดังแสดงในรูปที่ 3 ซึ่งจากการศึกษารูปแบบการเกิดละอองไฟฟ้า พบว่ารูปแบบ Cone-jet เป็นรูปแบบที่เหมาะสมสำหรับการเคลือบผิวชั้นตัวเร่ง

ตารางที่ 2 แสดงเงื่อนไขการทดลองการเคลือบผิวด้วยวิธีการพ่นละอองไฟฟ้ารูปแบบ Cone-jet

สภาวะ	ตัวแปร	เงื่อนไข
พื้นแปร	ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า	6.6-7.8 kV
	อัตราการไหล	0.1-1.1 ml/hr
	ระยะเวลาในการเคลือบ	6,12,18 min
คงที่	ระยะห่างระหว่างปลายเข็มกับแผ่นรองรับ	0.02 m



รูปที่ 3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าและค่าอัตราการไหลในการพ่นละอองไฟฟ้ารูปแบบต่างๆ ของสารเคลือบผิวชั้นตัวเร่งปฏิกิริยา

ปฏิกิริยา เนื่องจากให้ละอองการพ่นที่มีความสม่ำเสมอ และลำละอองมีความเสถียรสูง โดยจากการทดลองได้ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าช่วง 6.6-7.8 kV และค่าอัตราการไหลช่วง 0.1-1.1 ml/hr ที่ทำให้เกิดการพ่นละอองไฟฟ้ารูปแบบ Cone-jet ลักษณะรูปแบบ Cone-jet ของการพ่นละอองไฟฟ้าของสารละลายไอโซโพรพานอลแสดงดังรูปที่ 4

4.2 การศึกษาและคำนวณหาค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าเริ่มต้น และทำนายค่ากระแสไฟฟ้าจากสมการ Scaling Laws

สังเกตผลการทดลองในตารางที่ 3 พบว่าในการทดลองหาค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าเริ่มต้นที่ทำให้เกิดการพ่นละอองไฟฟ้ารูปแบบ Cone-jet ของสารละลายไอโซโพรพานอลบริสุทธิ์มีค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าเริ่มต้นน้อยกว่าสารเคลือบผิวชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาซึ่งมี

TSF-229



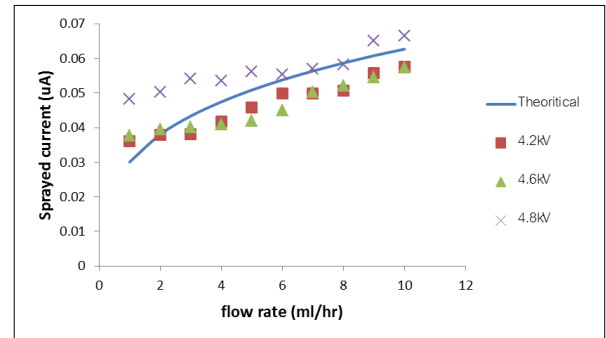
รูปที่ 4 ลักษณะ Cone-jet ของการพ่นละอองไฟฟ้า

ตารางที่ 3 แสดงการเปรียบเทียบค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าเริ่มต้นที่ทำให้เกิดการพ่นละอองไฟฟ้ารูปแบบ Cone-jet

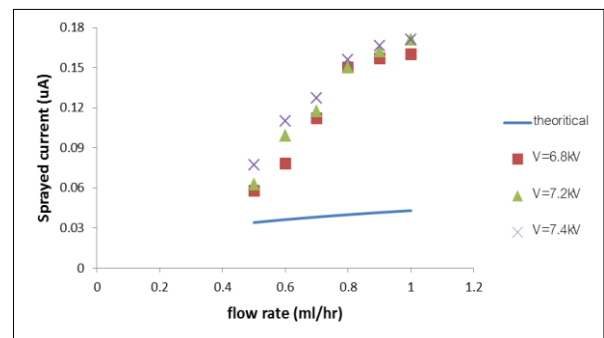
สาร	ความต่างศักย์ไฟฟ้าเริ่มต้น	
	ค่าจากการคำนวณ	ค่าจากการทดลอง
Isopropanol	3.931 kV	4.000 kV
Suspension of Carbon and Nafion in Isopropanol	6.734 kV	6.600 kV

คาร์บอนผสมอยู่ทำให้มีการนำไฟฟ้าได้ดีกว่า รวมถึงการเปรียบเทียบค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าเริ่มต้นจากการคำนวณในสมการ (1) เปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการทดลอง พบว่าค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ได้จากการคำนวณและการทดลองมีค่าใกล้เคียงกัน ดังนั้นสมการ (1) สามารถทำนายค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าเริ่มต้นได้ทั้งสารละลายบริสุทธิ์และสารละลายผสม

ในการทำนายค่ากระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นโดยใช้สมการ Scaling Laws ทำการเปรียบเทียบค่าที่ได้จากการคำนวณ และค่าที่ได้จากการทดลองของสารละลายไอโซโพรพานอลบริสุทธิ์และสารเคลือบผิวชั้นตัวเร่งปฏิกิริยา ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 5



(ก) สารละลายไอโซโพรพานอล



(ข) สารเคลือบผิวชั้นตัวเร่งปฏิกิริยา

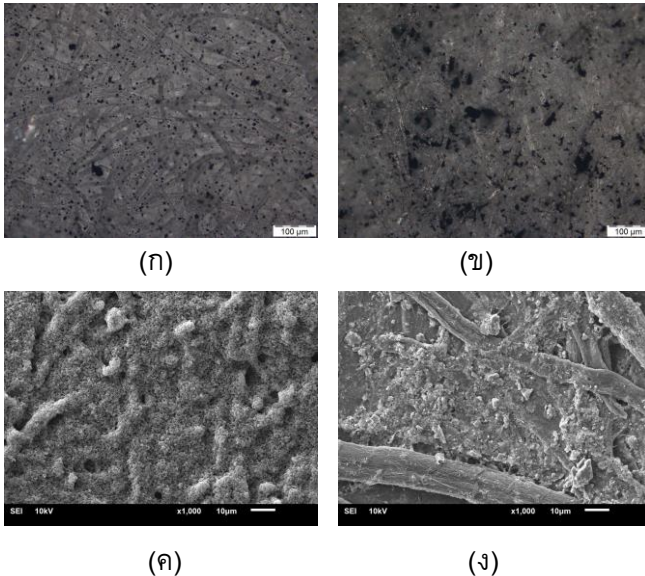
รูปที่ 5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้าและอัตราการไหลที่ค่าความต่างศักย์ต่างๆ โดยการทดลอง แล้วเปรียบเทียบกับค่าที่คำนวณทางทฤษฎี

จากผลการทดลองในรูปที่ 5 พบว่าการทำนายค่ากระแสไฟฟ้าของการพ่นละอองไฟฟ้า โดยในรูปภาพ (ก) แสดงค่าที่ได้จากการทดลองมีแนวโน้มเป็นไปตามค่าที่ได้จากการคำนวณทางทฤษฎี ส่วนในภาพ (ข) แสดงค่าที่ได้จากการทดลองไม่เป็นไปตามทฤษฎี ดังนั้นสมการ Scaling Laws สามารถทำนายค่ากระแสไฟฟ้าได้ในสารละลายบริสุทธิ์เท่านั้น

4.3 การวิเคราะห์ผิวเคลือบชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยวิธีการพ่นละอองไฟฟ้าเปรียบเทียบกับวิธีการทา

เมื่อทำการเคลือบผิวชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาตามเงื่อนไขการทดลองที่กำหนดไว้ในตารางที่ 2 โดยพิจารณาที่เงื่อนไขค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า 7.4 kV ค่าอัตราการไหล 0.1 ml/hr และระยะเวลาการเคลือบที่ 12 นาที มีปริมาณสารเคลือบที่ 0.02 ml แล้วทำการวิเคราะห์โดยเปรียบเทียบพื้นผิวที่ถูกเคลือบด้วยวิธี

TSF-229



รูปที่ 6 แสดงลักษณะผิวเคลือบชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาที่วิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงกำลังขยาย 20 เท่า ที่เตรียมด้วย (ก) วิธีการพ่นละอองไฟฟ้า (ข) วิธีการทา และวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดกำลังขยาย 1000 เท่า ด้วย (ค) วิธีการพ่นละอองไฟฟ้า (ง) วิธีการทา

การทาในปริมาณสารเคลือบที่เท่ากันด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Optical Microscope) และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) เพื่อวิเคราะห์ลักษณะการกระจายตัวของอนุภาคและพื้นผิวเคลือบดังแสดงในรูปที่ 6

จากการวิเคราะห์พื้นผิวเคลือบด้วยกล้องจุลทรรศน์พบว่า การเคลือบผิวด้วยวิธีการพ่นละอองไฟฟ้างดภาพ (ก) ให้ลักษณะการกระจายตัวของอนุภาคคาร์บอนได้ดี ขนาดของอนุภาคมีขนาดเล็ก และมีความสม่ำเสมอว่าการเคลือบผิวด้วยวิธีการทาดังภาพ (ข) ซึ่งสังเกตเห็นได้วิธีการทาพบนุภาคคาร์บอนเกิดการจับตัวเป็นกลุ่มก้อน ส่งผลให้ในการนำไปใช้จริง ประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงจะลดลง รวมถึงการสิ้นเปลืองตัวเร่งปฏิกิริยาซึ่งมีราคาแพง

นอกจากนี้ได้ทำการวิเคราะห์พื้นผิวเคลือบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดพบว่าผิวเคลือบด้วยวิธีการพ่นละอองไฟฟ้างดภาพ (ค)

สังเกตเห็นได้อย่างชัดเจนว่า อนุภาคของชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาสามารถเคลือบทับผิวแผ่นรองรับได้ครอบคลุม ไม่เกิดการจับตัวเป็นกลุ่มก้อน มีการเรียงตัวของอนุภาคที่ละเอียดและสม่ำเสมอ ส่งผลต่อการทำปฏิกิริยาได้ดี เนื่องด้วยพื้นที่ปฏิกิริยาที่เพิ่มมากขึ้นจากการกระจายตัวของอนุภาค รวมถึงความเป็นรูพรุนที่ดี ทำให้เกิดการส่งผ่านโปรตอนได้ดีขึ้น ส่วนผิวเคลือบที่ได้จากวิธีการทาดังภาพ (ง) พบว่าอนุภาคของชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาเคลือบคลุมแผ่นรองรับไม่สม่ำเสมอ มีการจับตัวกันของอนุภาคเป็นกลุ่มก้อน และเห็นพื้นผิวของแผ่นรองรับ

ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่าวิธีการพ่นละอองไฟฟ้าให้ประสิทธิภาพดีกว่าวิธีการทา และสามารถนำมาพัฒนาเพื่อประยุกต์ใช้ในการเคลือบชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาในการผลิตขั้วไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงให้ประสิทธิภาพการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงเพิ่มขึ้น และลดต้นทุนของตัวเร่งปฏิกิริยาจากการใช้ประโยชน์อย่างสูงสุดอีกด้วย

5. สรุปผลการทดลอง

วิธีการพ่นละอองไฟฟ้าเป็นอีกเทคนิคหนึ่งที่น่าสนใจ สำหรับประยุกต์ใช้ในการเคลือบผิวชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาบนขั้วไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิง เนื่องด้วยให้ลักษณะของผิวเคลือบที่มีความสม่ำเสมอ ไม่เกิดการจับกลุ่มก้อนของอนุภาคตัวเร่งปฏิกิริยา โดยจากการศึกษารูปแบบการพ่นละอองไฟฟ้าที่เหมาะสมสำหรับการเคลือบผิวด้วยสารเคลือบผิวชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาคือ รูปแบบ Cone-jet ที่ปรากฏในช่วงค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า 6.6-7.8 kV และช่วงอัตราการไหล 0.1-1.1 ml/hr และค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าเริ่มต้นในการเกิดรูปแบบ Cone-jet ของการพ่นละอองไฟฟ้าสามารถทำนายค่าได้จากการคำนวณในสมการของ Smith ทั้งสารละลายบริสุทธิ์และสารละลายผสม แต่เมื่อนำค่าคุณสมบัติของสารที่ทำการวัด แล้วนำมาคำนวณตามสมการ Scaling Laws เพื่อทำนายค่ากระแสไฟฟ้า พบว่าสมการดังกล่าวไม่สามารถทำนายค่ากระแสไฟฟ้าของสารละลายผสมได้ซึ่งควรมีการพัฒนาสมการที่เหมาะสมต่อไป นอกจากนี้เมื่อทำการ

TSF-229

เปรียบเทียบลักษณะการเคลือบผิวด้วยเทคนิคการพ่นละอองไฟฟ้ากับเทคนิคการทา พบว่าเทคนิคการพ่นละอองไฟฟ้าให้อัตราการเคลือบที่ต่ำ ดังนั้นจึงควรมีการปรับปรุงและพัฒนากระบวนการพ่นละอองไฟฟ้าให้สามารถนำมาใช้งานจริงในการเคลือบผิวชิ้นตัวเร่งปฏิกิริยาสำหรับการผลิตขั้วไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิง เพื่อให้ประสิทธิภาพการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงดีขึ้น และลดต้นทุนในการผลิตเซลล์เชื้อเพลิงอันเนื่องมาจากตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีราคาแพง

6. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยชิ้นนี้สามารถสำเร็จและลุล่วงไปด้วยดี ขอขอบคุณภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ในความอนุเคราะห์การวิเคราะห์ค่าคุณสมบัติเฉพาะของสาร

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] มะลิ หุ่นสม (2555). เซลล์เชื้อเพลิงฟิวเซลล์และการวิเคราะห์เชิงเคมีไฟฟ้า, พิมพ์ครั้งที่ 1, กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- [2] Benítez, R., Soler, J. and DaZa, L. (2005). Novel method for preparation of PEMFC electrodes by the electrospray technique, *Journal of Power Sources*, vol.151, (2005), pp. 108-113.
- [3] Chaparro, A.M., Benítez, R., Gubler, L., Scherer, G.G. and Daza, L. (2007). Study of membrane electrode assemblies for PEMFC, with cathodes prepared by the electrospray method, *Journal of Power Sources*, vol. 169, (2007), pp. 77-84.
- [4] ภูวดล แก้วคำจันทร์ (2554). การพัฒนาวิธีการพ่นละอองไฟฟ้าสำหรับการเคลือบแม่พิมพ์เซรามิกส์ด้วยสารช่วยการจับตัวของยาง, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- [5] Martin, S., Martinez-Vazquez, B., Garcia-Ybarra, P.L. and Castillo, J.L. (2013). Peak utilization of catalyst with ultra-low Pt loaded PEM fuel cell electrodes prepared by the electrospray method, *Journal of Power Sources*, vol. 229, (2013), pp. 179-184.
- [6] Smith, David P.H. (1986). The electrohydrodynamics atomization of liquid, *IEEE Transactions Industry Applications*, Vol. IA-22 (3) pp. 527.
- [7] Gañán-Calvo, A.M., Dávila, J. and Barrero, A. (1997). Current and droplet size in the electrospraying of liquids. Scaling Laws, *Journal of Aerosol Science*, vol. 28(2), (1997), pp. 249-275.
- [8] Yaws, Carl L. (1999). Chemical Properties Handbook, ISBN: 9780070734012, McGraw-Hill, New York.