

## รายการอ้างอิง

- [1] Ysmael, V., Gabriel, A., Victor, R., Hua, Z., Allan, J. J., Arturo, K. Pt/C obtained from carbon with different treatments and  $(\text{NH}_4)_2\text{PtCl}_6$  as a Pt precursor, Applied Catalysis A: General 277 (2004): 201-207.
- [2] Wolf, V., Hubert, A.G., and Arnold, L. Handbook of fuel cells – Fundamentals Technology and Applications, Vol. 2: Electrocatalysis. New York: John Wiley & Sons, 2003.
- [3] Appleby, A.J., and Foulkes, F.R. Fuel cell handbook. New York: Van Nostrand Reinhold, 1989.
- [4] Terrance, W. Dynamic Electrochemistry Transport, and Mechanistic Insight, Proceedings of the fuel cell technology workshop, King Mongkut' s University of Technology Thonburi, 2000.
- [5] How Stuff Works, Learn how Everything Works. How Fuel Cells Work [online]. Available from: <http://www.howstuffworks.com/fuel-cell2.htm> [2007, June 05].
- [6] Wolf, V., Hubert, A.G., and Arnold L. Handbook of fuel cells – Fundamentals, Technology and Applications, Vol. 1: Fundamentals and survey of systems. New York: John Wiley & Sons, 2003.
- [7] เพ็ญศรี ทองนพเนื้อ. เคมีวิเคราะห์เชิงไฟฟ้า, พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2542.
- [8] Larminie, J., and Dick, A. Fuel cell systems explained. Chichester: John Wiley & Sons, 2000.
- [9] วิชา เรื่องพรวิสุทธิ์. อะตอมและโมเลกุลแบบไฮดรอกซีโรจีเนียส – หลักทฤษฎีและการประยุกต์, สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2534.
- [10] Answer.com, Online Dictionary, Encyclopedia and much more. Catalysis [online]. Available from: <http://www.answers.com/topic/catalysis?cat=technology> [2008, January 17].
- [11] Geus, J.W. Production and thermal pretreatment of supported catalysts. Amsterdam: Elsevier, 1983.
- [12] Schlesinger, M., Paunovic, M. Modern Electroplating. 4<sup>th</sup> edition. New York: John Wiley & Sons, 2000.

- [13] Kinoshita, K. Electrochemical Oxygen Technology. John Wiley & Sons. 1992.
- [14] FCTec, Fuel Cell Test and Evaluation Center. Proton Exchange Membrane Fuel Cells [online]. Available from: [http://www.fctec.com/fctec\\_types\\_pem.asp](http://www.fctec.com/fctec_types_pem.asp). [2008, January 29].
- [15] Ralph, T.R., and Hogarth, M.P. Catalysis for low temperature fuel cells Part I: The cathode challenges. Platinum metals Reviews 49 (2002): 3-14.
- [16] Kim, K., Electrochemical oxygen technology. New York: John Wiley & Sons, 1992.
- [17] Xianguo, L. Principles of Fuel Cells. Taylor & Francis Group. 2005.
- [18] Epsilon. Linear Sweep Voltammetry/ Cyclic Voltammetry [online]. Available from: <http://www.epsilon-web.com/EC/manual/Techniques/CycVolt/cv.html>. [2007, June 14].
- [19] Wood, D.L., Yi, J.S., and Nguyen, T.V. Effect of direct liquid water injection and interdigitated flow field on the performance of proton exchange membrane fuel cells, Electrochimica Acta 43 (1998): 3795-3809.
- [20] ECO CHEMIE. Electrochemical Impedance Spectroscopy [online]. Available from: <http://www.ecochemie.nl>. [2007, March 17].
- [21] Gamry Instruments. Application notes on Electrochemistry from Gamry [online]. Available from: [http://www.gamry.com/App\\_Notes/Index.htm](http://www.gamry.com/App_Notes/Index.htm). [2007, March 19].
- [22] Foulkes, F.R., Fuel cell handbook (fifth edition). New York: Van Nostrand Reinhold, 2000.
- [23] E Learning เคมีทั่วไป. อัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมี [ออนไลน์]. Available from: <http://202.29.15.135/chemistry/lesson.php?less=5&page=21>. [2007, August 22].
- [24] Zhenhua, Z., Weijiang, Z., Suli, W., Guoxiong, W., Luhua, J., Huanqiao, L., Gongquan, S., Qin, X. Preparation of highly active 40wt.% Pt/C cathode electrocatalysts for DMFC via different routes, Catalysis Today 93-95 (2004): 523-528.
- [25] José, R.C. S., Ermete, A., Ernesto, R. G. Carbon supported Pt<sub>70</sub>Co<sub>30</sub> electrocatalyst prepared by the formic acid method for the oxygen reduction reaction in polymer electrolyte fuel cell, Journal of Power Sources 141 (2005): 13-18.
- [26] Zhoulin, L., Leong, M. G., Liang, H., Weixiang, C., Jim, Y. L. Carbon-supported Pt nanoparticles as catalyst for proton exchange membrane fuel cells, Journal of Power Sources 139 (2005): 73-78.

- [27] Benítez, R., Chaparro, A.M., Daza, L. Electrochemical characterization of Pt/C suspensions for the reduction of oxygen, Journal of Power Sources 151 (2005): 2-10.
- [28] Changpeng, L., Xinzhong, X., Tianhong, L., Wei, X. The preparation of high activity DMFC Pt/C electrocatalysts using a pre-precipitation method, Journal of Power Sources (2006): Article in press.
- [29] Yong-Hun, C., Hyun-Seo, P., Yoon-Hwan, C., Dae-Sik, J., Hee-Young, P., Yung-Eun, S. Effect of platinum amount in carbon supported platinum catalyst on performance of polymer electrolyte membrane fuel cell, Journal of Power Sources 172 (2007): 89–93.
- [30] Warren, B.E. X-ray Diffraction. MA: Addison-Wesley, 1996.
- [31] Matthias, M., Amim, H. Reduction of Pd(II) in Aqueous Solution: Stabilization and Reactions of an Intermediate Cluster and Pd Colloid Formation, J. Phys. Chem 96 (1992): 4719-4724.
- [32] Brunislav, M., Marija, B. Reductive halogen elimination from phenols by organic radicals in aqueous solution; chain reaction induced by proton-coupled electron transfer. J. Phys. Chem 111 (2007): 8622-8628.
- [33] Xin, W., I-Ming, H. Surfactant stabilized Pt and Pt alloy electrocatalyst for polymer electrolyte fuel cells. Electrochimica Acta 47 (2002): 2981-2987.
- [34] Wagner, J., Tshikhudo, T.R., Köhler, J.M. Microfluidic generation of metal nanoparticles by borohydride reduction. Chemical Engineering Journal 135S (2008): S104-S109.
- [35] Barsoukov, E., Macdonald, J.R. Impedance Spectroscopy Theory, Experiment, and Applications. 2<sup>nd</sup> edition. New York: John Wiley & Sons, 2005.

ภาคผนวก

## ภาคผนวก ก

## การคำนวณปริมาณแพลทินัมจากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRF

การหาปริมาณของแพลทินัมบนตัวเร่งปฏิกิริยาสามารถทำได้โดยนำน้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมได้มาลบออกด้วยน้ำหนักของตัวรองรับก่อนการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งน้ำหนักที่เป็นส่วนต่างนี้คือปริมาณของแพลทินัมและสารเจือปนต่าง ๆ ที่มีอยู่บนตัวเร่งปฏิกิริยา จากนั้นตัวเร่งปฏิกิริยาจะถูกวิเคราะห์ด้วยเทคนิค X-rays fluorescence (XRF) เพื่อที่จะหาปริมาณของแพลทินัมที่ถูกต้อง และนำไปคำนวณหาร้อยละโดยน้ำหนักของแพลทินัมบนตัวเร่งปฏิกิริยาต่อไป

$$M_{gain} = M_{catalyst} - M_{support} \quad (ก.1)$$

$$\%Pt = \frac{\%Pt_{XRF} \times M_{gain}}{M_{catalyst}} \quad (ก.2)$$

โดยที่	$M_{gain}$	คือน้ำหนักของแพลทินัมและสารเจือปนต่าง ๆ (มิลลิกรัม)
	$M_{catalyst}$	คือน้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ได้ (มิลลิกรัม)
	$M_{support}$	คือน้ำหนักของตัวรองรับก่อนเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา (มิลลิกรัม)
	$\%Pt$	คือร้อยละโดยน้ำหนักของแพลทินัมบนตัวเร่งปฏิกิริยา
	$\%Pt_{XRF}$	คือร้อยละโดยน้ำหนักของแพลทินัมที่ได้จากการวิเคราะห์โดยเทคนิค XRF

ตารางที่ ก.1 ข้อมูลการคำนวณปริมาณแพลทินัมจากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRF

ตัวแปรที่ใช้ในการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา		น้ำหนักของตัวรองรับ	น้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยา	น้ำหนักของแพลทินัมและสารเจือปน	ร้อยละโดยน้ำหนักของแพลทินัมจากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRF	ร้อยละโดยน้ำหนักของแพลทินัมบนตัวเร่งปฏิกิริยา
		(มิลลิกรัม)	(มิลลิกรัม)	(มิลลิกรัม)		
เตรียมโดยใช้กรดเฮกซะคลอโรแพลทินิก	วิธีอิมเพรกเนชันแบบธรรมดา	40.00	41.92	1.92	67.49	3.09
	วิธีอิมเพรกเนชันแบบเติมกรดฟอรั่มิก	40.00	48.49	8.49	90.67	15.88
	วิธีรีดักชันด้วยแอลกอฮอล์	40.00	49.19	9.19	91.23	17.04
เตรียมโดยใช้แอมโมเนียมเฮกซะคลอโรแพลทินेट	วิธีอิมเพรกเนชันแบบธรรมดา	40.00	42.25	2.25	67.78	3.61
	วิธีอิมเพรกเนชันแบบเติมกรดฟอรั่มิก	40.00	48.79	8.79	90.89	16.37
	วิธีรีดักชันด้วยแอลกอฮอล์	40.00	49.62	9.62	91.95	17.83

ตารางที่ ก.1 ข้อมูลการคำนวณปริมาณแพลทินัมจากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRF (ต่อ)

ตัวแปรที่ใช้ในการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา		น้ำหนักของตัวรองรับ	น้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยา	น้ำหนักของแพลทินัมและสารเจือปน	ร้อยละโดยน้ำหนักของแพลทินัมจากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRF	ร้อยละโดยน้ำหนักของแพลทินัมบนตัวเร่งปฏิกิริยา
		(มิลลิกรัม)	(มิลลิกรัม)	(มิลลิกรัม)		
ชนิดของแอลกอฮอล์	เมทานอล	40.00	49.62	9.62	91.95	17.83
	เอทานอล	40.00	49.29	9.29	91.06	17.16
	2-โพรพานอล	40.00	46.76	6.76	93.22	13.48
ค่าความเป็นกรด-เบสเริ่มต้น	1	40.00	49.91	9.91	91.76	18.22
	2	40.00	49.42	9.42	96.15	18.33
	4	40.00	49.04	9.04	97.41	17.96
	7	40.00	49.62	9.62	91.95	17.83
	9	40.00	47.17	7.17	94.36	14.34

ตารางที่ ก.1 ข้อมูลการคำนวณปริมาณแพลทินัมจากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRF (ต่อ)

ตัวแปรที่ใช้ในการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา	น้ำหนักของตัวรองรับ	น้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยา	น้ำหนักของแพลทินัมและสารเจือปน	ร้อยละโดยน้ำหนักของแพลทินัมจากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRF	ร้อยละโดยน้ำหนักของแพลทินัมบนตัวเร่งปฏิกิริยา	
	(มิลลิกรัม)	(มิลลิกรัม)	(มิลลิกรัม)			
ความเข้มข้นของเมทานอล (โมลต่อลิตร)	3.0	40.00	49.35	9.35	94.22	17.85
	4.0	40.00	49.19	9.19	94.46	17.65
	5.0	40.00	49.91	9.91	91.76	18.22
	6.0	40.00	48.96	8.96	95.38	17.46
เวลาที่ใช้ในการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา (ชั่วโมง)	1	40.00	49.26	9.26	95.86	18.02
	2	40.00	49.44	9.44	95.14	18.17
	3	40.00	49.91	9.91	91.76	18.22
	4	40.00	49.51	9.51	95.72	18.39



## ภาคผนวก ข

## ผลการวิเคราะห์ X-rays diffraction

การคำนวณขนาดอนุภาคของโลหะแพลทินัมจากการวิเคราะห์ X-rays diffraction (XRD) สามารถคำนวณได้จากสมการของ Debye-Scherrer

$$L_{111} = \frac{0.9\lambda_{k\alpha 1}}{B_{2\theta} \cos \theta_{\max}} \quad (\text{ข.1})$$

โดยที่  $L_{111}$  คือขนาดอนุภาคของแพลทินัมที่มีระนาบผลึกเป็น [111] (นาโนเมตร)  
 $\lambda_{k\alpha 1}$  คือความยาวคลื่นของ X-rays ในที่นี้คือ 0.154056 นาโนเมตร  
 $\beta_{2\theta}$  คือความกว้างที่ความเข้มครึ่งหนึ่งของพีค Pt (111) (เรเดียน)  
 $\theta_{\max}$  คือมุม Bragg ของการสะท้อนของรังสี (เรเดียน)

โดยทั่วไปแล้วจากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD ค่า  $\beta_{2\theta}$  และค่า  $\theta_{\max}$  จะมีค่าอยู่ในหน่วยขององศา ดังนั้นต้องทำการเปลี่ยนค่าให้อยู่ในรูปของเรเดียนโดยใช้สมการ (ข.2)

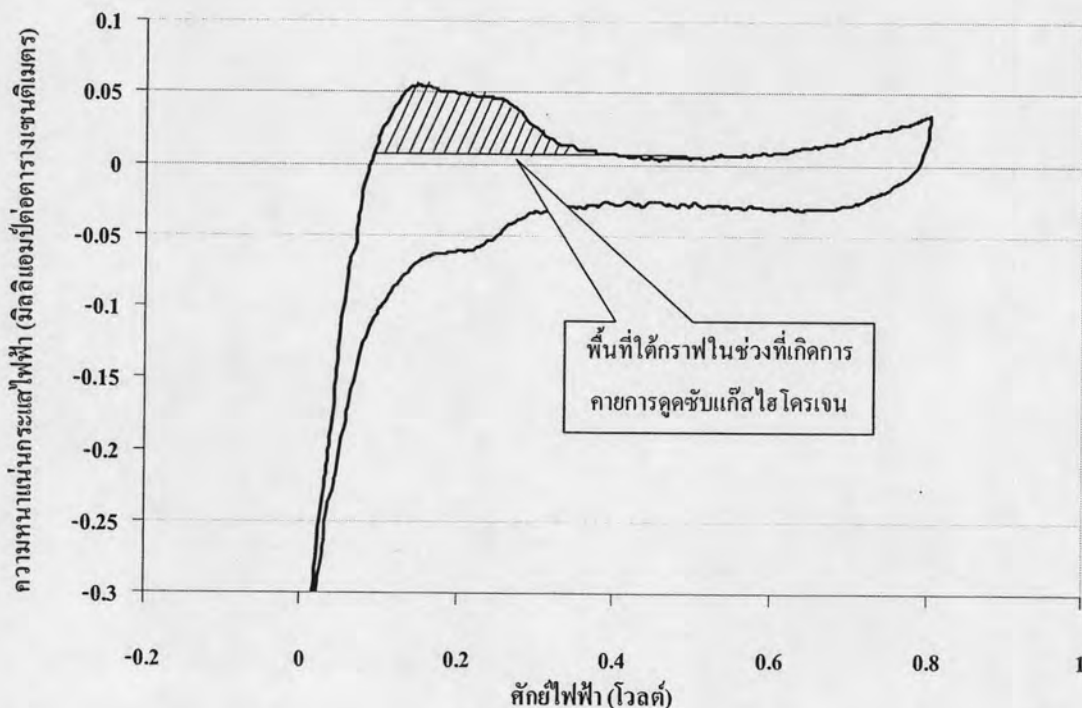
$$\text{Rad} = \frac{\text{Deg} \times \pi}{180} \quad (\text{ข.2})$$

โดยที่ Rad คือค่าในหน่วยเรเดียน  
 Deg คือค่าในหน่วยองศา

ภาคผนวก ค

การคำนวณหาพื้นที่ของการเกิดปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้า

จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตรีซึ่งเป็นการศึกษาการเกิดปฏิกิริยาบนขั้วไฟฟ้าจะได้กราฟไซคลิกโวลแทมเมตรีออกมา ซึ่งจากกราฟนี้จะสามารถนำไปคำนวณหาพื้นที่ของการเกิดปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้า (Electrochemical surface area, ECA) ได้ โดยเริ่มจากการคำนวณค่าประจุไฟฟ้า (Charge) ที่เกี่ยวข้องกับปฏิกิริยาโดยเริ่มจากการคำนวณหาพื้นที่ใต้กราฟจากกราฟไซคลิกโวลแทมเมตรีในช่วงที่เกิดการคายการดูดซับแก๊สไฮโดรเจนขึ้นดังแสดงในรูปที่ ค.1 ซึ่งค่าที่ได้จะอยู่ในหน่วยแอมแปร์โวลต์ต่อตารางเซนติเมตร



รูปที่ ค.1 พื้นที่ใต้กราฟในช่วงที่เกิดการดูดซับแก๊สไฮโดรเจนจากกราฟไซคลิกโวลแทมเมตรี

เมื่อคำนวณหาพื้นที่ใต้กราฟแล้วจึงนำค่าที่ได้ไปคำนวณโดยใช้สมการ (ค.1)

$$ECA = \frac{A}{C_{Pt} \times S_R \times CL} \tag{ค.1}$$

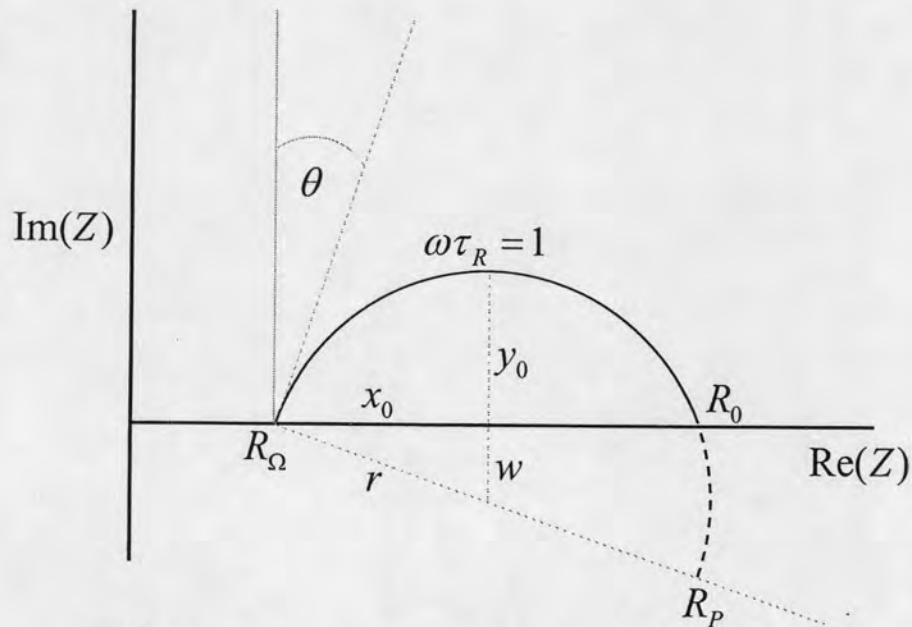
โดยที่	ECA	คือพื้นที่ของการเกิดปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้า (ตารางเซนติเมตรของแพลทินัมต่อกรัมของแพลทินัม)
	A	คือพื้นที่ที่ได้กราฟไซคลิกโวลแทมเมตรี (แอมแปร์โวลต์ต่อตารางเซนติเมตร)
	$C_{Pt}$	คือความหนาแน่นของประจุไฟฟ้าของแพลทินัมซึ่งมีค่าเท่ากับ 210 ไมโครคูลอมบ์ต่อตารางเซนติเมตรของแพลทินัม
	$S_R$	คืออัตราการวัดค่าหรือ Scan rate (โวลต์ต่อวินาที) ในที่นี้คือ 0.02 โวลต์ต่อวินาที
	CL	คือปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาซึ่งในที่นี้คือแพลทินัม (กรัมของแพลทินัมต่อตารางเซนติเมตร)

## ภาคผนวก ง

## การคำนวณอิมพีแดนซ์

จากการวิเคราะห์อิมพีแดนซ์ทางเคมีไฟฟ้า ผลการวิเคราะห์ที่ได้จะแสดงอยู่ในรูปของกราฟ Nyquist plot ซึ่งจากกราฟ Nyquist plot นี้จะสามารถนำไปคำนวณหาค่าอิมพีแดนซ์ต่าง ๆ ได้แก่ ความต้านทานโอห์มมิก ความต้านทานจากการถ่ายโอนประจุ เอลิเมนต์เฟสคงที่ และเลขชี้กำลังของเอลิเมนต์เฟสคงที่ได้ ซึ่งการคำนวณสามารถทำได้โดยวิธีต่างๆดังนี้

## ง.1 การคำนวณจากกราฟ Nyquist plot โดยตรง



รูปที่ ง.1 กราฟ Nyquist plot และตัวแปรต่างๆที่ใช้ในการคำนวณ

โดยทั่วไปแล้วกราฟ Nyquist plot ของระบบเซลล์เชื้อเพลิงจะมีลักษณะเป็นรูปครึ่งวงกลม แต่จากการวิเคราะห์พบว่ากราฟ Nyquist plot ที่เกิดขึ้นจะมีลักษณะเป็นส่วนโค้งของครึ่งวงกลมที่ถูกดทับอยู่ (Depressed arc) โดยรูปที่ ง.1 แสดงกราฟ Nyquist plot และตัวแปรต่างๆที่ใช้ในการคำนวณหาค่าอิมพีแดนซ์ต่าง ๆ ของระบบ

- เมื่อ  $R_{\Omega}$  คือค่าความต้านทานโอห์มมิก (โอห์ม)  
 $R_0$  คือค่าอิมพีแดนซ์ที่ตัดแกนนอนในช่วงค่าความถี่ต่ำ (โอห์ม)  
 $R_p$  คือค่าความต้านทานจากการถ่ายโอนประจุ (โอห์ม)  
 $\theta$  คือมุมของเฟสที่เปลี่ยนแปลงไป (เรเดียน)  
 $x_0$  คือครึ่งหนึ่งของระยะตามแนวแกนนอนจากจุด  $R_{\Omega}$  ไปยังจุด  $R_0$  (โอห์ม)

- $y_0$  คือความสูงของส่วนโค้งของครึ่งวงกลมจากแกนนอนที่ตำแหน่ง  $\omega\tau_R$  เท่ากับ 1 (โอห์ม)
- $r$  คือรัศมีของครึ่งวงกลม (โอห์ม)
- $w$  คือส่วนต่างระหว่างรัศมีของครึ่งวงกลมกับค่า  $y_0$  (โอห์ม)
- $\omega$  คือความเร็วเชิงมุม (เรเดียนต่อวินาที)
- $\tau_R$  คือค่าคงที่เวลา (Time constant, วินาที)

ซึ่งค่าอิมพีแดนซ์ที่ตัดแกนนอนในช่วงค่าความถี่สูงจะมีค่าเท่ากับความต้านทานโอห์มมิก ในขณะที่ค่าความต้านทานจากการถ่ายโอนประจุจะมีค่าเท่ากับเส้นผ่านศูนย์กลางของครึ่งวงกลม ดังนั้นการคำนวณหาค่าจึงมีความซับซ้อนมากกว่า โดยการคำนวณจะเริ่มจากการหามุมของเฟสที่เปลี่ยนแปลงไปหรือค่า  $\theta$  ก่อน แต่ในการคำนวณจริงมักจะใช้เลขชี้กำลังของเอลิเมนต์เฟสคงที่หรือค่า  $\alpha$  แทนเพื่อให้สะดวกต่อการคำนวณ ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างค่าทั้งสองค่าแสดงอยู่ในสมการที่ (ง.1)

$$\alpha = \frac{\frac{\pi}{2} - \theta}{\frac{\pi}{2}} \quad (ง.1)$$

ที่ตำแหน่งค่า  $\omega\tau_R$  เท่ากับ 1 เรเดียนค่าสัดส่วนระหว่าง  $x_0$  ต่อ  $y_0$  จะเป็นฟังก์ชันของค่า  $\alpha$  ดังแสดงในสมการที่ (ง.2)

$$\frac{x_0}{y_0} = \tan\left(\frac{\alpha\pi}{4}\right) \quad (ง.2)$$

เนื่องจากค่า  $x_0$  และค่า  $y_0$  สามารถวัดได้จากกราฟ Nyquist plot ดังนั้นจึงสามารถคำนวณหา ค่าเลขชี้กำลังของเอลิเมนต์เฟสคงที่หรือค่า  $\alpha$  ได้จากสมการที่ (ง.2) จากนั้นจึงนำค่าที่ได้ไปคำนวณหาค่าความต้านทานจากการถ่ายโอนประจุ โดยจากรูปที่ ง.1 จะสามารถหาค่า  $w$  ได้จากความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $x_0$  กับค่า  $\alpha$  ดังแสดงในสมการที่ (ง.3)

$$w = x_0 \left[ \frac{\left(1 - \tan\left(\frac{\alpha\pi}{4}\right)^2\right)}{2 \tan\left(\frac{\alpha\pi}{4}\right)} \right] \quad (ง.3)$$

ซึ่งค่าความต้านทานจากการถ่ายโอนประจุจะเท่ากับสองเท่าของรัศมีของครึ่งวงกลมหรือเส้นผ่านศูนย์กลางของครึ่งวงกลม และจากรูปที่ ง.1 จะพบว่าค่ารัศมี  $r$  จะมีค่าเท่ากับผลรวมของค่า  $w$  กับค่า  $y_0$  ดังแสดงในสมการที่ (ง.4) หรือสมการที่ (ง.5)

$$r = y_0 + w \quad (ง.4)$$

$$R_p = 2r = 2y_0 + 2x_0 \left[ \frac{\left( 1 - \tan\left(\frac{\alpha\pi}{4}\right)^2 \right)}{2 \tan\left(\frac{\alpha\pi}{4}\right)} \right] \quad (ง.5)$$

สำหรับค่าเอลิเมนต์เฟสคงที่สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (ง.6)

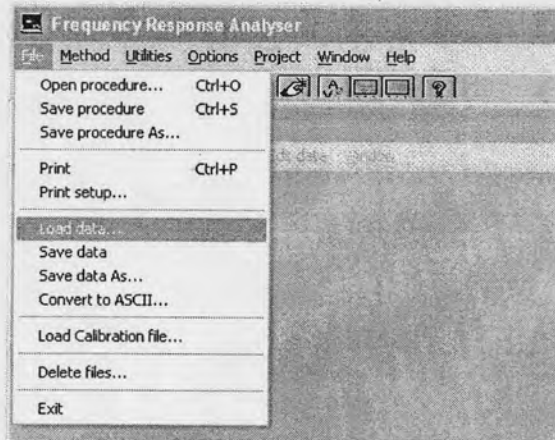
$$Q = \frac{1}{Z(i\omega_{\max})^\alpha} \quad (ง.6)$$

- โดยที่  $Q$  คือค่าเอลิเมนต์เฟสคงที่ (ฟารัด)  
 $Z$  คือค่าอิมพีแดนซ์ที่ตำแหน่งที่สูงที่สุดของส่วน โคงของครึ่งวงกลม (โอห์ม)  
 $i$  คือจำนวนจินตภาพหรือ  $\sqrt{-1}$   
 $\omega_{\max}$  คือความเร็วเชิงมุมที่ตำแหน่งที่สูงที่สุดของส่วน โคงของครึ่งวงกลม (เรเดียนต่อวินาที)  
 $\alpha$  คือเลขชี้กำลังของเอลิเมนต์เฟสคงที่

## ง.2 การคำนวณโดยใช้โปรแกรม FRA

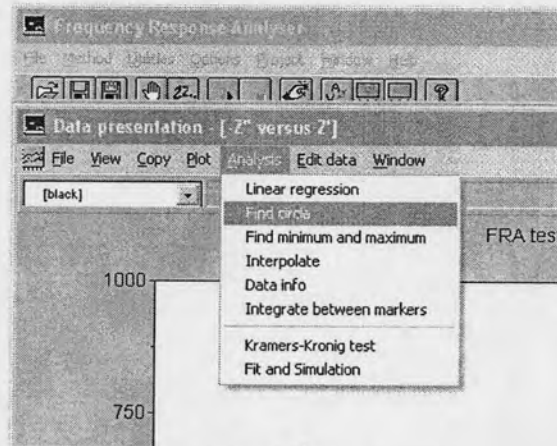
จากกราฟ Nyquist plot ที่ได้จากการวิเคราะห์ ค่าอิมพีแดนซ์ต่าง ๆ จะสามารถหาได้โดยใช้ฟังก์ชันที่มีอยู่ในโปรแกรม FRA ช่วยในการคำนวณได้ โดยขั้นตอนการใช้งานมีดังนี้

1. เปิดโปรแกรม FRA
2. เรียกข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์ในรูปของ Nyquist plot โดยไปที่แถบคำสั่ง File จากนั้นจึงเลือกคำสั่ง Load data ดังแสดงในรูปที่ ง.2 จากนั้นจึงเลือกไฟล์ข้อมูลการวิเคราะห์ที่ต้องการ

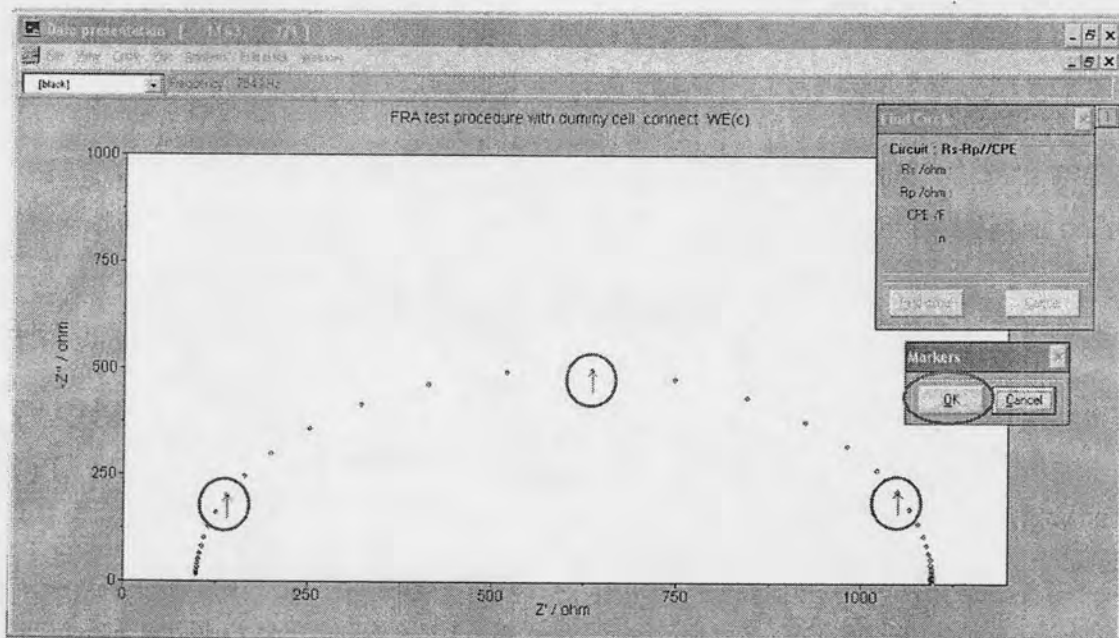


รูปที่ ง.2 ขั้นตอนการเรียกข้อมูล

3. ทำการเลือกคำสั่ง Find circle ที่อยู่ในแถบคำสั่ง Analysis ดังแสดงในรูปที่ ง.3



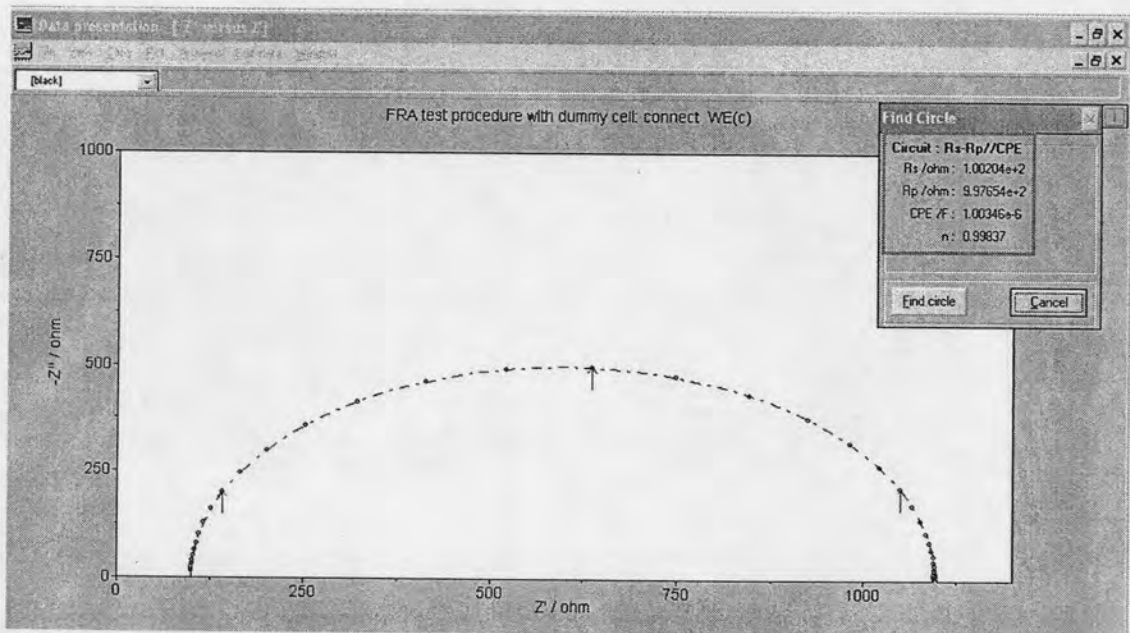
ง.3 การเลือกคำสั่ง Find circle



รูปที่ ง.4 การกำหนดตำแหน่งของส่วนโค้ง

4. กำหนดตำแหน่งของส่วนโค้งจำนวน 3 จุดบนข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์ จากนั้นจึงคลิกที่ปุ่ม OK ในหน้าต่าง Markers ดังแสดงในรูปที่ ง.4
5. สังเกตส่วนโค้งที่เกิดขึ้น ถ้าพบว่ามีความสอดคล้องกับข้อมูลการวิเคราะห์ให้ทำการบันทึกค่าอิมพีแดนซ์ต่าง ๆ ที่อยู่ในหน้าต่าง Find Circle ดังแสดงในรูปที่ ง.5

โดยที่  $R_s$  คือความต้านทาน โอห์มมิกหรือ  $R_\Omega$  (โอห์ม)  
 $R_p$  คือความต้านทานการถ่ายโอนประจุ (โอห์ม)  
 CPE คือค่าเอลิเมนต์เฟสคงที่ (ฟารัด)  
 n คือเลขชี้กำลังของเอลิเมนต์เฟสคงที่หรือ  $\alpha$



รูปที่ ง.5 ค่าอิมพีแดนซ์ที่ได้จากการใช้โปรแกรม FRA

6. ในกรณีที่ส่วนโค้งไม่สอดคล้องกับข้อมูลการวิเคราะห์ให้ทำการกำหนดส่วนโค้งใหม่ในขั้นตอนที่ 3 อีกครั้งจนกระทั่งได้ส่วนโค้งที่สอดคล้องกับข้อมูลการวิเคราะห์

โดยในตารางที่ ง.1 แสดงค่าอิมพีแดนซ์ที่ได้จากการใช้โปรแกรม FRA เปรียบเทียบกับค่าอิมพีแดนซ์ที่ได้จากการคำนวณ และค่าเฉลี่ยระหว่างค่าที่ได้จากการคำนวณทั้งสองวิธีดังกล่าว



ตารางที่ ง.1 ค่าอิมพีแดนซ์ของระบบที่ได้จากการคำนวณด้วยวิธีต่าง ๆ

ตัวเร่งปฏิกิริยา	เยื่อแผ่น	ความต้านทาน โอห์มมิก (โอห์ม)			ความต้านทานจากการถ่ายโอนประจุ (โอห์ม)			เอลิเมนต์เฟสคงที่ (ฟารัด)			เลขชี้กำลังของเอลิเมนต์เฟสคงที่ ( $\alpha$ )		
		FRA	จากการ คำนวณ	ค่าเฉลี่ย	FRA	จากการ คำนวณ	ค่าเฉลี่ย	FRA	จากการ คำนวณ	ค่าเฉลี่ย	FRA	จากการ คำนวณ	ค่าเฉลี่ย
ตัวเร่งปฏิกิริยา ของบริษัท E-TEK	Nafion 115	0.0860	0.0810	<b>0.0835</b>	0.2718	0.2600	<b>0.2659</b>	0.1144	0.1000	<b>0.1072</b>	0.7430	0.7900	<b>0.7665</b>
ตัวเร่งปฏิกิริยา ที่เตรียมขึ้นเอง	Nafion 115	0.0921	0.0907	<b>0.0914</b>	0.1899	0.1974	<b>0.1936</b>	0.1077	0.0984	<b>0.1031</b>	0.7256	0.7415	<b>0.7336</b>
ตัวเร่งปฏิกิริยา ของบริษัท E-TEK	Nafion 212	0.0749	0.0695	<b>0.0722</b>	0.1592	0.1709	<b>0.1651</b>	0.2051	0.2169	<b>0.2110</b>	0.7479	0.8000	<b>0.7740</b>
ตัวเร่งปฏิกิริยา ที่เตรียมขึ้นเอง	Nafion 212	0.0833	0.0710	<b>0.0772</b>	0.1373	0.1675	<b>0.1524</b>	0.1982	0.2296	<b>0.2139</b>	0.7235	0.7425	<b>0.7330</b>

## ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายกฤษณะ ลีลารุจิ เกิดวันที่ 5 มีนาคม 2528 ที่จังหวัดกรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาปีที่ 6 จากโรงเรียนกรุงเทพคริสเตียนวิทยาลัย จังหวัดกรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาปริญญาตรีวิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาเทคโนโลยีทางเชื้อเพลิง ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2547 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปีการศึกษา 2548