NU Science Journal 2010; 7(1): 50 - 58

การทดสอบความไวต่อโปรตอนของวัสดุต่างๆ เพื่อคัดกรองก่อนนำมาทำเป็นอิเล็กโทรดขนาดจิ๋ว

ปริญญา มาสวัสดิ์

Selectivity Testing of Protonic Sense Materials for Development to Microprobe Electrodes

Prinya Masawat

ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร จังหวัดพิษณุโลก 65000
ภาควิชาเคมี และศูนย์ความเป็นเลิศด้านนวัตกรรมทางเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล
Corresponding author. E-mail: prinyam@nu.ac.th

บทคัดย่อ

ได้ทำการคัดกรองวัสดุที่มีความไวต่อโปรตอนซึ่งสามารถหาได้จากห้องปฏิบัติการก่อนนำมาทำเป็นอิเล็กโทรดขนาดจิ๋ว ซึ่งใช้วิธีการวัดค่าศักย์ไฟฟ้าแบบธรรมดาโดยอาศัยความแตกต่างของขั้วไฟฟ้าสองอันคือ ขั้วอ้างอิง และขั้วชี้บอก วัสดุที่ใช้ทำเป็น ขั้วอ้างอิง-ขั้วชี้บอก ได้แก่ อะลูมิเนียม-ทองแดง แพลตทินัม-ไส้ดินสอดำ ซิลเวอร์/ซิลเวอร์คอลไรด์-ไส้ดินสอดำ ซิลเวอร์/ซิลเวอร์คอลไรด์-ทองแดง และ ซิลเวอร์-อะลูมิเนียม ในการวัดค่าศักย์ไฟฟ้าของสารละลายตัวอย่างที่มีค่าพีเอชต่างๆ โดยหนึ่งโปรตอนจะได้ค่าประมาณ 59 มิลลิโวลต์ ต่อ 1 ช่วงความเป็นกรด-ด่าง การทดลองจะแสดงถึงค่าความจำเพาะต่อโปรตอนจากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าพีเอช และ ค่าศักย์ไฟฟ้าของวัสดุแต่ละชนิด โดยเปรียบเทียบกับการวัดโดยใช้อิเล็กโทรดแบบกระเปาะแก้ว ที่มีสมการเส้นตรงคือ $y = -58.00x + 392.1$ และค่าความเป็นเส้นตรงเท่ากับ 0.999 พบว่าจากการทดลองวัดค่าศักย์ไฟฟ้าของสารละลายที่มีค่าพีเอชต่างๆ วัสดุที่มีความเหมาะสมและมีค่าใกล้เคียงกับอิเล็กโทรดแบบกระเปาะแก้วคือ ซิลเวอร์/ซิลเวอร์คอลไรด์-ทองแดง ซึ่งมีสมการคือ $y = -25.07x - 73.69$ และ ค่าความเป็นเส้นตรงเท่ากับ 0.931

คำสำคัญ : ขั้วอ้างอิง ขั้วชี้บอก วัสดุที่มีความไวต่อโปรตอน อิเล็กโทรดขนาดจิ๋ว

Abstract

Protonic sense materials have been selected from our laboratory for development to microprobe electrodes. The basic measurement was based on potentiometric method using reference electrode and indicator electrode. The materials tested were Aluminum-Copper, Platinum-Pencil lead, Silver/Silver chloride-Pencil lead, Silver/Silver chloride-Copper and Silver-Aluminum. Measurement of mV count of solution with various pH found that one proton contains 59 mV / pH range. The selectivity of materials to proton can be seen from the graph plotted between pH and mV count. The commercial glass electrode was used as comparing electrode and it showed the linear equation of y = -58.00x +392.1 with r^2 = 0.999. The Silver/Silver chloride-Copper probe was found to be the protonic sense material which provided linear equation of y = -25.07x – 73.69 with r^2 = 0.931.

Keywords: reference electrode, indicator electrode, protonic sense material, microprobe electrode

บทนำ

อิเล็กโทรดที่ใช้กันโดยทั่วไปสำหรับวัดค่าความเป็นกรด-ด่างหรือพีเอชของสารละลายต่างๆ นิยมใช้เป็นอิเล็กโทรดที่ทำด้วยกระเปาะแก้วไวต่อโปรตอนเนื่องจากให้ค่าที่ถูกต้องและเสถียร (Galster, 1991) แต่อย่างไรก็ตามอิเล็กโทรดแบบกระเปาะแก้วมีขนาดใหญ่ และต้องจุ่มอยู่ในสารละลายตลอดเวลาเพื่อรักษาระดับความชื้นให้เหมาะสมแก่การสื่อโปรตอน รวมทั้งยังมีข้อจำกัดและข้อควรระวังอีกมากที่เป็นปัญหาในการใช้งาน และเนื่องจากความต้านทานที่สูงของเยื่อแก้วทำให้เป็นปัญหาในการทำย่อส่วนอิเล็กโทรดและทำให้ไม่สามารถทำย่อส่วนเครื่องวัดพีเอชได้ด้วย นอกจากนี้อิเล็กโทรดชนิดนี้ยังแตกหักง่ายและไม่เสถียรในระบบที่มีสารกัดกร่อนจึงทำให้มีข้อจำกัดในการประยุกต์ใช้วัดค่าพีเอชในกระบวนการที่ต้องมีการกวนสารละลายและในตัวกลางที่มีกรดไฮโดรฟลูออริก (Qingwen *et al*., 2000) ด้วยเหตุผลดังกล่าว จึงมีงานวิจัยเพื่อมุ่งเน้นที่จะหาวัสดุทางเลือกใหม่เพื่อใช้แทนอิเล็กโทรดแบบกระเปาะแก้ว (Pasztor *et al*., 1993; Kinlen, *et al.,* 1994; Koncki *et al.,* 1997; Pooler *et al.,* 1998; Ekmekci *et al.*, 2004; Matthiesen, 2004) โดยอิเล็กโทรดของแข็งชนิดโลหะ-โลหะออกไซด์ และ โลหะออกไซด์ ได้ถูกนำมาศึกษาเพื่อเป็นอิเล็กโทรดทางเลือกใหม่ (Qingwen *et al*., 2000; Pasztor *et al*., 1993; Kinlen, *et al.,* 1994; Koncki, R. *et al.,* 1997) ซึ่งพบว่าเมื่อเปรียบเทียบกับอิเล็กโทรดแบบกระเปาะแก้วแล้ว การใช้โลหะออกไซด์เป็นวัสดุที่ไวต่อการตรวจวัดพีเอชทำให้เซนเซอร์ชนิดนี้มีความทนทานมากกว่า ราคาถูกกว่า สามารถทำให้เล็กลงได้ง่ายกว่า และสามารถนำไปใช้งานในตัวอย่างสิ่งแวดล้อมได้ดีกว่า โดยจากที่ได้มีรายงานการใช้โลหะ

ออกไซด์เป็นอิเล็กโทรด พบว่า IrO_2, TiO_2, PtO_2, SnO_2, RuO_2 เป็นต้น มีเพียง IrO_2 เท่านั้นที่ทำหน้าที่เป็นอิเล็กโทรดตรวจวัดพีเอชได้ในช่วงที่กว้าง (Kinlen, P.J. *et al.,* 1994) แต่อย่างไรก็ตาม ด้วยราคาการผลิตที่ค่อนข้างสูงจึงทำให้อิเล็กโทรดชนิดนี้ไม่เป็นที่น่าสนใจนัก ดังนั้นการพัฒนา ค้นหาวัสดุที่ไวต่อการตรวจวัดพีเอชที่ราคาถูกและมีประสิทธิภาพดี จึงเป็นจุดมุ่งหมายที่ท้าทายในงานวิจัยนี้

จากเหตุผลดังกล่าว งานวิจัยนี้จึงได้ทำการคัดกรองวัสดุต่างๆ ที่มีความไวต่อโปรตอนก่อนที่จะนำมาทำเป็นอิเล็กโทรดแบบของแข็งเล็กจิ๋ว โดยเลือกจากวัสดุที่มีในห้องปฏิบัติการ ได้แก่ลวดอะลูมิเนียม ลวดทองแดง ลวดแพลตทินัม ลวดเงิน และไส้ดินสอดำซึ่งได้รายงานการวิจัยแล้วว่ามีกราไฟต์อยู่จึงสามารถนำมาทำเป็นขั้วไฟฟ้าได้ (Masawat *et al*., 2002; Masawat 2007)

อุปกรณ์ สารเคมีและวิธีการทดลอง

การเตรียมอิเล็กโทรด

ลวดเงิน (60 mm length, 0.25 mm diameter, 99.9%, Aldrich, Germany) จะถูกนำมาจุ่มในสารละลาย 0.6 M $FeCl_3$ เป็นเวลา 1 คืนเพื่อทำให้เกิดเป็นขั้วอ้างอิงซิลเวอร์/ซิลเวอร์คลอไรด์ เมื่อจะใช้งานจะนำขั้วอ้างอิงนี้ไปบัดกรีตะกั่วเข้ากับสายไฟขนาดเล็กก่อนสอดเข้าไปในหลอดแก้ว (120 mm length, 5 mm diameter) โดยปล่อยให้ขั้วโผล่ออกมาจากหลอดแก้วประมาณ 3 mm ส่วนลวดเงิน (60 mm length, 0.25 mm diameter, 99.9%, Aldrich, Germany) ลวดอะลูมิเนียม (60 mm length, 1.0 mm diameter, 99.9%, Aldrich, Germany) ลวดทองแดง (60 mm length, 0.5 mm diameter, 99.9%, Aldrich, Germany) ลวดแพลตทินัม (60 mm length, 0.25 diameter, 99.9%, Aldrich, Germany) และไส้ดินสอดำ (2H pencil lead, 60 mm length, 0.5 mm diameter, Steadler, Germany) จะถูกจับคู่ทดสอบเพื่อทำหน้าที่เป็นขั้วชี้บอก (indicator electrode) และขั้วอ้างอิง (reference electrode) โดยการจับคู่วัสดุเพื่อใช้ทำเป็นขั้วอ้างอิง-ขั้วชี้บอก ได้แก่ อะลูมิเนียม-ทองแดง แพลตทินัม-ไส้ดินสอดำ ซิลเวอร์/ซิลเวอร์คลอไรด์-ไส้ดินสอดำ ซิลเวอร์/ซิลเวอร์คลอไรด์-ทองแดง และซิลเวอร์-อะลูมิเนียม ซึ่งแต่ละโลหะที่เลือกจะต้องทำการบัดกรีตะกั่วก่อนสอดเข้าไปในหลอดแก้วและปล่อยให้ปลายโผล่ออกมาประมาณ 3 มิลลิเมตร

การเตรียมสารละลายทดสอบ

ช่วงพีเอชที่ทำการศึกษาคือ 2.0-12.0 ซึ่งสารละลายทดสอบที่มีพีเอชต่างๆ ประกอบด้วยสารละลายกรดเกลือ (HCl; pH 2 และ 3) สารละลายอะซิเตท บัฟเฟอร์ (acetate buffer; pH 4-6) สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH; pH 11 และ 12) และสารละลายโซเดียมไบคาร์บอเนต ($NaHCO_3$; pH 8-10) ซึ่งปรับให้ได้พีเอชตามต้องการด้วยกรดเกลือ (1.0 M HCl) และโซเดียมไฮดรอกไซด์ (1.0 M NaOH)

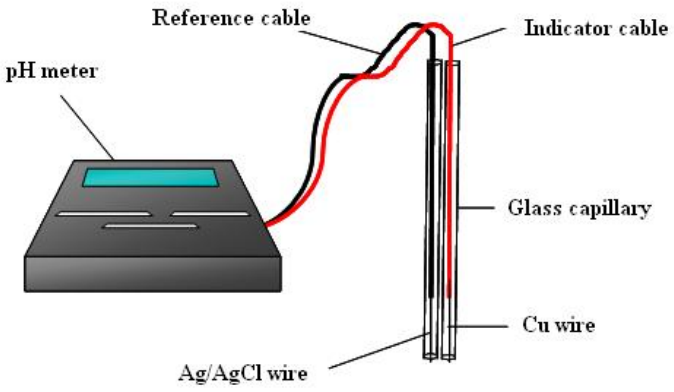
การจัดอุปกรณ์ในการวัดค่าศักย์ไฟฟ้าของโลหะที่นำมาทำเป็นอิเล็กโทรด

อิเล็กโทรดโดยทั่วไปแล้วจะประกอบไปด้วยอิเล็กโทรดที่ทำงานร่วมกันอยู่ 2 ส่วน คือ ขั้วชี้บอก กับอีกส่วนหนึ่งคือ ขั้วอ้างอิง โดยที่ขั้วชี้บอกจะทำหน้าที่อ่านปริมาณความเข้มข้นของ H^+ ที่มีอยู่ในสารละลาย ในขณะที่ขั้วอ้างอิงจะทำหน้าที่เป็นตัวเชื่อมวงจรไฟฟ้าให้อิเล็กโทรดทั้งชุดให้ทำงานได้ (หรือในทางทฤษฎีก็คือ เป็นตัวคอยให้สัญญาณเปรียบเทียบแก่วงจรที่กำลังทำการอ่านค่าจากขั้วชี้บอก)

เนื่องจากยังไม่มีรายงานเกี่ยวกับความจำเพาะของโลหะแต่ละชนิดที่มีต่อ H^+ และยังไม่ทราบกลไกที่แน่นอน ดังนั้นการทดลองจึงเป็นลักษณะแบบลองผิด ลองถูก (trial and error) โดยวัสดุที่นำมาทำการคัดกรองก่อนนำไปทำเป็นอิเล็กโทรดต้องมีการจับคู่กันเพื่อให้วัสดุต่างๆ ทำหน้าที่เป็นขั้วอ้างอิง และ ขั้วชี้บอก โดยต่อขั้วบวกของเครื่องวัดพีเอชเข้ากับวัสดุที่ทำหน้าที่เป็นขั้วชี้บอก ส่วนขั้วลบต่อกับวัสดุที่ทำหน้าที่เป็นขั้วอ้างอิง และใช้วิธีการวัดค่าศักย์ไฟฟ้าแบบธรรมดา (basic potentiometry) ซึ่งอาศัยความแตกต่างของศักย์ของขั้วไฟฟ้าสองอัน โดยหนึ่งโปรตอนจะได้ค่าประมาณ 59 มิลลิโวลต์ต่อ 1 ช่วงความเป็นกรด-ด่าง และความเข้มข้นของ H^+ ต่างกันทุกๆ 10 เท่า จะให้ค่า ศักย์ไฟฟ้าออกมาได้แตกต่างกันประมาณ 60 มิลลิโวลต์ ซึ่งที่ความเข้มข้นต่างกันทุกๆ 10 เท่านี้เอง ที่ค่าของพีเอชจะต่างกันเท่ากับ 1 pH unit ค่า 1 Relative หรือ 1 pH unit มีค่าในทางปฏิบัติจริงๆ เท่ากับ 59 มิลลิโวลต์ ที่ 25 ^{o}C ซึ่งหมายความว่า ถ้าอุณหภูมิของสารละลายตัวอย่างขณะที่ทำการวัดมีค่าเปลี่ยนแปลงไปจาก 25 ^{o}C ค่าเป็นมิลลิโวลต์ ของ 1 Relative นี้ก็จะมีการเปลี่ยนแปลงตามไปด้วย (Galster, 1991)

จากความเข้มข้นของ H^+ ที่วัดได้นี้ จะเป็นตัวชี้สภาพความเป็นกรดหรือด่างของสารละลายตัวอย่าง ถ้ามี H^+ มาก [OH^- มีน้อย] จะส่งผลให้อิเล็กโทรดให้ค่ากระแสไฟฟ้าออกมาเป็นบวกสูง ความต่างศักย์ที่ออกมาก็จะเป็นบวกสูงจะได้ผลที่มีค่าพีเอชต่ำ ถ้าในสารละลายที่มี H^+ น้อย [OH^- มีมาก] อิเล็กโทรดก็จะให้ค่ากระแสไฟฟ้าออกมาเป็นลบสูง ความต่างศักย์ที่ออกมาก็จะเป็นลบสูงแสดงค่าพีเอช ที่สูงหรือแสดงความเป็นด่างหรือเบสมากนั่นเอง

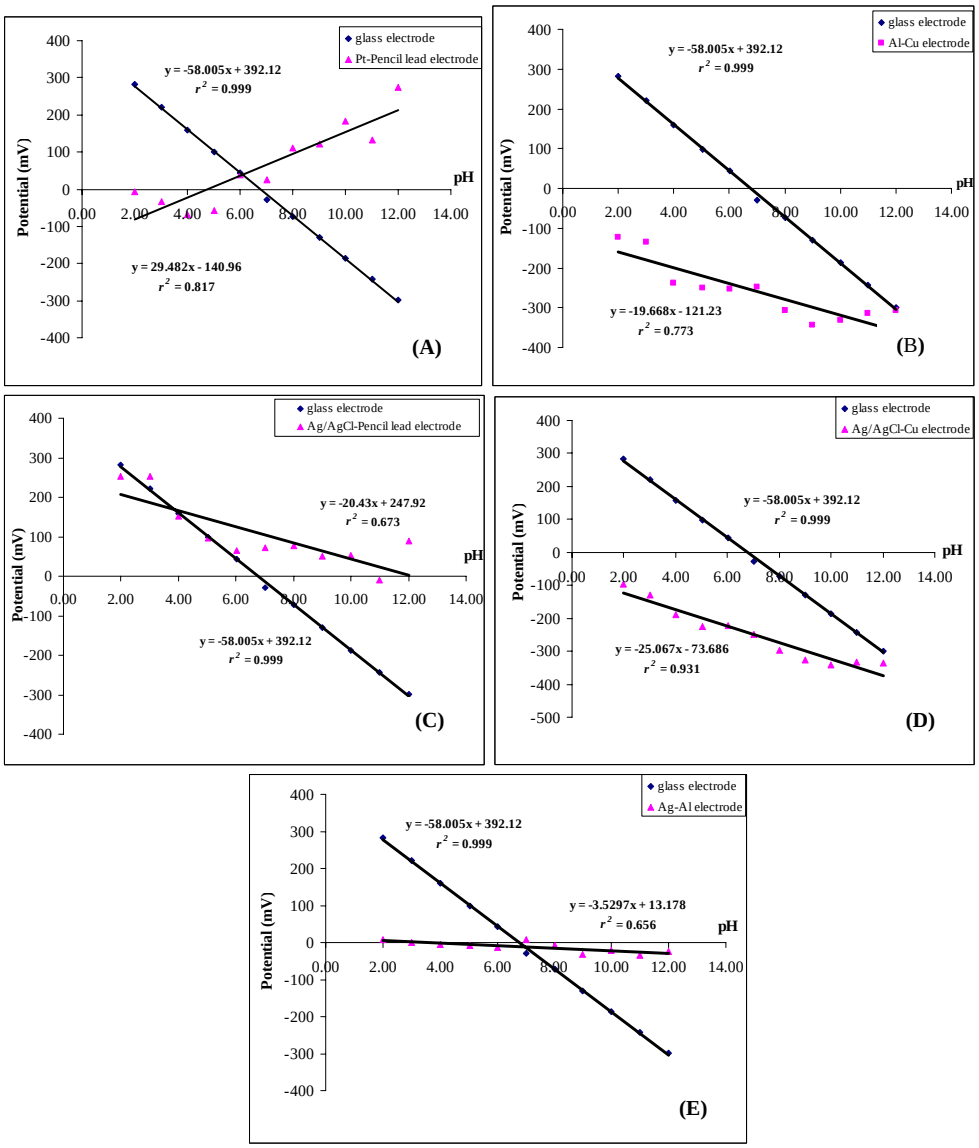
ในการคัดกรองวัสดุเพื่อที่จะนำไปทำเป็นอิเล็กโทรดขนาดจิ๋ว เมื่อจับคู่ของโลหะเพื่อให้ทำหน้าที่เป็นขั้วอ้างอิง และ ขั้วชี้บอกแล้วก็ทำการต่อขั้วบวกของเครื่องวัดพีเอช (pH meter: Model F-21, HORIBA, Japan) เข้ากับวัสดุที่ทำหน้าที่เป็นขั้วชี้บอก ส่วนขั้วลบต่อกับวัสดุที่ทำหน้าที่เป็นขั้วอ้างอิง ดังแสดงในรูป 1 ก่อนการวัดค่าศักย์ไฟฟ้าแล้วนำค่าที่ได้ไปสร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าพีเอชและค่าศักย์ไฟฟ้า ซึ่งค่าความเป็นเส้นตรง (r^2) จากกราฟนี้ ควรมีค่าเข้าใกล้ 1 หรือมีค่าใกล้เคียงกับค่าความสัมพันธ์ที่ได้จากการวัดโดยใช้อิเล็กโทรดแบบกระเปาะแก้ว (combined glass electrode, HORIBA, Japan)



รูป 1 การจัดอุปกรณ์ในการวัดค่าศักย์ไฟฟ้าของโลหะที่นำมาทำอิเล็กโทรดของแข็งขนาดจิ๋ว

ผลการทดลองและการวิจารณ์

จากการวัดค่าศักย์ไฟฟ้าของสารละลายพีเอชต่างๆ โดยใช้อิเล็กโทรดของแข็งขนาดจิ๋วที่มีการจับคู่กันระหว่างโลหะต่างๆ และ/หรือโลหะออกไซด์ เปรียบเทียบกับการใช้อิเล็กโทรดแบบกระเปาะแก้ว พบว่า จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าศักย์ไฟฟ้าและค่าพีเอชดังรูป 2 และตาราง 1 สรุปค่าความชันและค่าความเป็นเส้นตรงของอิเล็กโทรดแบบกระเปาะแก้วเปรียบเทียบกับอิเล็กโทรดของแข็งขนาดจิ๋วที่ใช้โลหะต่างชนิดกัน คู่ของซิลเวอร์/ซิลเวอร์คลอไรด์-ทองแดงให้ค่าความเป็นเส้นตรงใกล้เคียงกับการใช้อิเล็กโทรดแบบกระเปาะแก้วมากที่สุด โดยมีค่าความชัน (near-Nernstian slope) เท่ากับ -23.9 mV pH^{-1} ในขณะที่อิเล็กโทรดแบบกระเปาะแก้วมีค่าความชันเท่ากับ -58.0 mV pH^{-1}



รูป 2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าพีเอชและศักย์ไฟฟ้าของอิเล็กโทรดแบบกระเปาะแก้วเปรียบเทียบกับอิเล็กโทรดของแข็งขนาดจิ๋วต่างๆ : (A) แพลตทินัม-ไส้ดินสอดำ (B) อะลูมิเนียม-ทองแดง (C) ซิลเวอร์/ซิลเวอร์คลอไรด์-ไส้ดินสอดำ (D) ซิลเวอร์/ซิลเวอร์คลอไรด์-ทองแดง และ (E) ซิลเวอร์-อะลูมิเนียม

ตาราง 1 ค่าความชันและค่าความเป็นเส้นตรงของอิเล็กโทรดแบบกระเปาะแก้วเปรียบเทียบกับอิเล็กโทรดของแข็งขนาดจิ๋วที่ใช้โลหะต่างชนิดกัน

อิเล็กโทรด (ขั้วอ้างอิง-ขั้วชี้บอก)	**ช่วงพีเอชที่ศึกษา**	**ค่าความชัน, mV pH^{-1}** (%RSD, n = 3)	**ค่าความเป็นเส้นตรง (r^2)** (%RSD, n = 3)
อิเล็กโทรดแบบกระเปาะแก้ว	2.0-12.0	-57.5 (1.19)	0.992 (0.64)
แพลตทินัม-ไส้ดินสอดำ	2.0-12.0	27.5 (12.0)	0.729 (13.4)
อะลูมิเนียม-ทองแดง	2.0-12.0	-19.0 (6.87)	0.753 (2.67)
ซิลเวอร์/ซิลเวอร์คลอไรด์-ไส้ดินสอดำ	2.0-12.0	-23.2 (10.2)	0.627 (6.33)
ซิลเวอร์/ซิลเวอร์คลอไรด์-ทองแดง	2.0-12.0	-24.0 (4.38)	0.933 (1.04)
ซิลเวอร์-อะลูมิเนียม	2.0-12.0	-3.6 (14.6)	0.557 (13.5)

และเพื่อทดสอบความเสถียรของอิเล็กโทรดซิลเวอร์/ซิลเวอร์คลอไรด์-ทองแดง จึงได้ทำการทดลองแบบ Intra day คือ ทำการทดลองวัดค่าศักย์ไฟฟ้าภายในหนึ่งวันแต่ทำในช่วงเวลาที่แตกต่างกันออกไป เช่น ทุกหนึ่ง หรือ สองชั่วโมง พบว่า ค่าความชันเฉลี่ยเท่ากับ -25.2 mV pH^{-1} (%RSD = 4.15, n = 3) และ Inter day คือ ทำการทดลองวัดค่าศักย์ไฟฟ้าในทุกหนึ่ง หรือสองวัน ซึ่งพบว่าค่าที่วัดได้มีความแตกต่างจากครั้งแรกเล็กน้อย มีค่าความชันเฉลี่ยเท่ากับ -25.3 mV pH^{-1} (%RSD = 0.34, n = 3) และความสัมพันธ์ของค่าศักย์ไฟฟ้าและพีเอชยังคงเป็นเส้นตรงที่มีค่าความเป็นเส้นตรงค่อนข้างสูงอยู่ อาจเป็นผลเนื่องจากคลอไรด์ที่จับอยู่บนลวดเงินลดลง สังเกตจากสีที่จางลงของคลอไรด์ ดังนั้นเพื่อให้ค่าการวัดถูกต้องทุกครั้งต้องมีการรักษาปริมาณของคลอไรด์ที่จับอยู่บนลวดเงินให้คงที่โดยก่อนจะใช้งานต้องจุ่มลวดเงินในสารละลายเฟอริกคลอไรด์ทิ้งไว้ก่อน 1 คืนและให้เก็บลวดซิลเวอร์/ซิลเวอร์คลอไรด์นี้ในสารละลายโปแตสเซียมคลอไรด์เข้มข้น 3 โมล/ลิตร

สรุปผลการทดลอง

จากการคัดกรองวัสดุบางชนิดที่มีความไวจำเพาะต่อโปรตอน ได้แก่ อะลูมิเนียม ทองแดง แพลตทินัม ไส้ดินสอดำ ซิลเวอร์ และ ซิลเวอร์/ซิลเวอร์คลอไรด์ โดยวิธีการวัดค่าศักย์ไฟฟ้าแบบธรรมดา ซึ่งวัดค่าความต่างศักย์ของขั้วไฟฟ้าสองอันคือ ขั้วอ้างอิง และขั้วชี้บอก ในการตรวจจับโปรตอนที่มีอยู่ในสารละลายตัวอย่างพีเอชต่างๆ แล้วส่งสัญญาณสู่เครื่องวัดพีเอช แสดงเป็นค่าศักย์ไฟฟ้า ทำให้ทราบค่าความสัมพันธ์ของวัสดุคู่ต่างๆ ที่นำมาทำการคัดกรอง ซึ่งแสดงถึงความจำเพาะและความไวต่อโปรตอนของวัสดุคู่ต่างๆ จากผลการทดลองที่ได้พบว่า กราฟไม่เป็นเส้นตรงหรือค่าศักย์ไฟฟ้ามีความสัมพันธ์ที่ไม่แปรผันตรงกับความเข้มข้นของโปรตอน ยกเว้นวัสดุ

หนึ่งคู่ที่มีค่าความสัมพันธ์เป็นเส้นตรงมากที่สุด คือคู่ของซิลเวอร์/ซิลเวอร์คลอไรด์-ทองแดง จึงได้มีการทดสอบความคงตัวของวัสดุคู่นี้และพบว่าวัสดุคู่นี้มีความคงตัวดีมากถ้ามีการจุ่มลวดเงินในสารละลายเฟอริกคลอไรด์ก่อนใช้ 1 คืน และ เก็บลวดซิลเวอร์/ซิลเวอร์คลอไรด์นี้ไว้ในสารละลายโปแตสเซียมคลอไรด์ ซึ่งงานวิจัยนี้ค้นพบว่าคู่อิเล็กโทรดซิลเวอร์/ซิลเวอร์คลอไรด์-ทองแดง มีแนวโน้มที่จะสามารถพัฒนาไปเป็นอิเล็กโทรดของแข็งขนาดจิ๋ว ที่ทนต่อสภาพแวดล้อม และมีอายุการใช้งานที่ยาวนาน นอกจากนี้ราคาต้นทุนการผลิตยังถูกกว่าอิเล็กโทรดแบบกระเปาะแก้วมาก รวมถึงยังสามารถทำให้การพัฒนาการทำย่อส่วนเครื่องวัดพีเอชมีความเป็นไปได้สูงอีกด้วย

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณนายศุภโชค อุปาลี นักศึกษาปริญญาเอก ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ และนายธนวัฒน์ ดวงคำ นิสิตปริญญาตรี ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวรที่ช่วยให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี

ขอขอบคุณภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวรที่ให้ความอนุเคราะห์ทางด้านเครื่องมือและอุปกรณ์รวมทั้งเงินทุนสนับสนุนงานวิจัยนี้บางส่วน

ขอขอบคุณมหาวิทยาลัยนเรศวรที่ให้เงินทุนสนับสนุนงานวิจัยจากงบประมาณแผ่นดิน ประจำปี 2552

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากศูนย์ความเป็นเลิศด้านนวัตกรรมทางเคมี (PERCH-CIC) สำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา กระทรวงศึกษาธิการ

เอกสารอ้างอิง

Ekmekci, G., Kalayci, S., Somer, G. (2004). A solid-state hydroxide ion selective electrode for the measurement of high pH values. *Sens. Actuators, B.*, *101*, 260-264.

Galster, H. (1991) pH Measurements-Fundamentals, Methods, Applications, Instrumentation. VCH. New York.

Kinlen, P.J., Heider, J.E. and Hubbard, D.E. (1994). A solid-state pH sensor based on a Nafion-coated iridium oxide indicator electrode and a polymer-based silver chloride reference electrode. *Sens. Actuators, B.*, *22*, 13-25.

Koncki, R. and Mascini, M. (1997). Screen-printed ruthenium dioxide electrodes for pH measuremtnts. *Anal. Chim. Acta*, *351*, 143-149.

Masawat, P., Liawruangrath, S., Vaneesorn, Y. and Liawruangrath, B. (2002). Design and fabrication of a low-cost flow-through cell for the determination of acetaminophen in pharmaceutical formulations by flow injection cyclic voltammetry. *Talanta*, *58*, 1221-1234.

Masawat, P. (2007). The determination of tetracycline antibiotics by voltammetry using pencil lead electrode. *NU Science Journal*, *4*(2), 165-176.

Matthiesen, H. (2004). In situ measurement of soil pH. *J. of Archaeo. Sci.*, *31*, 1373-1381.

Pasztor, K., Sekiguchi, A., Shimo, N. and Masuhara, H. (1993). Iridium oxide-based microelectrochemical transistors for pH sensing. *Sens. Actuators, B.*, *12*, 225-230.

Pooler, P.M., Wahl, M.L., Rabinowitz, A.B. and Owen, C.S. (1998). pH measurement: A comparison of results using glass membrane electrodes vs solid-state electrodes as a function of solution composition. *Anal. Biochem*., *256*, 238-240.

Qingwen, L., Guoan, L. and Youqin, S. (2000). Response of nanosized cobalt oxide electrodes as pH sensors. *Anal. Chim. Acta*, *409*, 137-142.