รายงานฉบับสมบูรณ์โครงการวิจัย

เรื่อง

การพัฒนาหัววัดออกซิเจนเพื่อใช้งานภาคสนาม

Development of Oxygen Sensors for Field Applications

หัวหน้าโครงการ นายสมศักดิ์ ปัญญาแก้ว

คณะผู้วิจัย นายมานะ ศรียุทธศักดิ์

นายมนตรี สวัสดิ์สกุมาร

นายธารา ชลปราณี

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Mr. Toyosaka Moriizumi

Department of Electrical and Electronics Engineering

Faculty of Engineering

Tokyo Institute of Technology

จท
วศ 15
009798

เสนอต่อ

สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยประเภท โครงการความร่วมมือทางวิชาการระหว่างไทย-ญี่ปุ่น (NRCT-JSPS) ประจำปี 2538

รายงานฉบับสมบูรณ์โครงการวิจัย

เรื่อง

การพัฒนาหัววัดออกซิเจนเพื่อใช้งานภาคสนาม

Development of Oxygen Sensors for Field Applications

หัวหน้าโครงการ นายสมศักดิ์ ปัญญาแก้ว

คณะผู้วิจัย นายมานะ ศรียุทธศักดิ์

นายมนตรี สวัสดิ์ศฤงฆาร

นายธารา ชลปราณี

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Mr. Toyosaka Moriizumi

Department of Electrical and Electronics Engineering

Faculty of Engineering

Tokyo Institute of Technology

สถาบันวิทยบริการ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

เสนอต่อ

สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยประเภท โครงการความร่วมมือทางวิชาการระหว่างไทย-ญี่ปุ่น (NRCT-JSPS) ประจำปี 2536

I18533346 - 9 ก.พ. 2543

บทคัดย่อ

รายงานวิจัยนี้จะกล่าวถึงการพัฒนาหัววัดออกซิเจน สำหรับการใช้งานในภาคสนามที่มีโครงสร้างที่มีความแข็งแรงทนทานต่อการใช้งานได้ หัววัดออกซิเจนที่พัฒนาขึ้นนี้ประกอบด้วยขั้วอาโนดและขั้วคาโทด โดยขั้วอาโนดนั้นทำจากซิลเวอร์-ซิลเวอร์คลอไรด์หรือ ดีบุกและขั้วคาโทดทำจากทอง โครงของหัววัดที่ใช้สำหรับยึดขั้วอาโนดและคาโทดทำขึ้นจากท่อสเตนเลสทำให้มีความทนทานเชิงกลสูง และเนื่องจากขั้วคาโทด และขั้วอาโนดทำขึ้นจากเม็ดทองและดีบุกซึ่งมีลักษณะเป็นแบบบัลก์(bulk)จึงทำให้มีความทนทานเชิงเคมีสูงกว่าแบบที่ทำขึ้นจากฟิล์มบาง จากการทดสอบการทำงานของหัววัดที่พัฒนาขึ้นพบว่า มีการตอบสนองต่อออกซิเจนที่ละลายอยู่ในสารละลายได้ดีในช่วง 0-12 mg/L และมีความเสถียรภาพในการวัดสูงโดยเฉพาะอย่างยิ่งในการวัดสารละลายที่มีความเข้มข้นของเกลือต่ำ หัววัดออกซิเจนที่พัฒนาขึ้นนี้เมื่อเสื่อมสมรรถภาพไปแล้ว สามารถทำการบำรุงรักษาได้โดยง่าย โดยทำการขัดผิวของอิเล็กโทรด ก็จะสามารถทำให้กลับมาใช้ได้อีกต่อไป ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างหัววัดออกซิเจนที่พัฒนาขึ้นเมื่อเทียบกับเครื่องที่เป็นของขาย(YSI model 57)ในการวัดออกซิเจนในสระน้ำ จะมีค่าสูงกว่า 0.8900

Abstract

This research reports a development of reinforced structural oxygen sensor for a field applications. The oxygen sensor composes of anode and cathode. The anode is made of silver-silver chloride or tin. And the cathode is made of gold. The body for supporting the both electordes is made of stainless steel pipe, this bring to a high mechanical resistance. Since the cathode and anode is made of a bulk of gold and tin, then it has a high chemical resistance more than thin film one. The response of the sensor to oxygen can be obtained from the range between 0 to 12 mg/L. The sensor also has a good stability in the measurements, especially under a low salt concentration samples. When the fabricated oxygen sensor lost its sensitivity, it can be maintain easily by polishing the surface of the electrode then it can be reuse again. The correlation coefficient between the fabricated oxygen sensor and the commercial one(YSI model 57) for oxygen measurement in a pond was better than 0.8900.

กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัย "การพัฒนาหัววัดออกซิเจนเพื่อใช้งานภาคสนาม" นี้ ได้รับทุนอุดหนุนจากสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ประเภทโครงการความร่วมมือทางวิชาการระหว่างประเทศไทย-ญี่ปุ่น (NRCT-JSPS) โดยได้รับทุนสนันสนุนประจำปีงบประมาณ 2536 เป็นจำนวนเงิน 273,000 บาท คณะผู้วิจัยขอแสดงความขอบคุณต่อสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ที่ให้การสนับสนุนในครั้งนี้

งานวิจัยนี้สำเร็จได้โดยได้รับความร่วมมือและเอื้อเฟื้อสถานที่ทำวิจัย รวมถึงอุปกรณ์เครื่องมือต่าง ๆ จากห้องปฏิบัติการวิจัยสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ และสถาบันเทคโนโลยีชีวภาพและวิศวกรรมพันธุศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย คณะผู้วิจัยขอแสดงความขอบคุณต่อหน่วยงานทั้งสอง ณ ที่นี้

ผู้วิจัยขอขอบคุณ คุณณรงค์ หอมจันทร์และคุณเลอศักดิ์ พร้อมสงม์ ที่ช่วยเหลือในการพัฒนาชิ้นส่วน และคุณอาภรณ์ ธีระมงคลรัศมี และคุณประวิทย์ ชีวทรรศน์ ที่ให้ความช่วยเหลือในการทดสอบหัววัดที่พัฒนาขึ้น

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญรูป

		หน้าที่
รูปที่ 2.1	โครงสร้างของระบบวัดออกซิเจน	4
รูปที่ 2.2	ลักษณะของหัววัดออกซิเจนแบบกัลวานิก	6
รูปที่ 2.3	ลักษณะของหัววัดออกซิเจนแบบโพลาโรกราฟิก	7
รูปที่ 2.4	ความเข้มข้นของออกซิเจนที่ตำแหน่งต่าง ๆ	8
รูปที่ 3.1	บล็อกไดอะแกรมของวงจรวัดออกซิเจน	12
รูปที่ 3.2	เครื่องวัดที่พัฒนาขึ้น	12
รูปที่ 3.3	ลักษณะของขั้วคาโทดที่ประดิษฐ์ขึ้นจากทอง	13
รูปที่ 3.4	ลักษณะของขั้วอาโนดที่ประดิษฐ์ขึ้นจากตีบุก	14
รูปที่ 3.5	ลักษณะของขั้วอาโนดที่ประดิษฐ์ขึ้นจากซิลเวอร์-ซิลเวอร์คลอไรด์	15
รูปที่ 3.6	แผ่นส่งผ่านออกซิเจนที่ทำจากเทฟรอนหนา 50 ไมโครเมตร	16
รูปที่ 3.7	หัววัดออกซิเจนก่อนประกอบแบบใช้ขั้วอาโนดที่ทำจากตีบุก	16
รูปที่ 3.8	หัววัดออกซิเจนก่อนประกอบแบบใช้ขั้วอาโนดที่ทำจากซิลเวอร์-ซิลเวอร์คลอไรด์	17
รูปที่ 3.9	หัววัดออกซิเจนหลังประกอบ	17
รูปที่ 3.10	ภาพรวมของระบบวัดที่ประกอบด้วยหัววัดและเครื่องวัดออกซิเจน	18
รูปที่ 3.11	หัววัดที่พัฒนาขึ้นเมื่อเทียบกับหัววัดที่เป็นของขาย(YSI model 57)	18
รูปที่ 4.1	บล็อกไดอะแกรมของระบบที่ใช้ในการวัดและทดสอบหัววัดออกซิเจนที่พัฒนาขึ้น	19
รูปที่ 4.2	ระบบที่ใช้ในการวัดและทดสอบหัววัดออกซิเจนที่พัฒนาขึ้น	20
รูปที่ 4.3	ลักษณะการตอบสนองของหัววัดที่พัฒนาขึ้นเมื่อทำการเก็บไว้ในสารละลายที่ไม่มีออกซิเจน	21
รูปที่ 4.4	ลักษณะการตอบสนองของหัววัดที่พัฒนาขึ้นเมื่อทำการเก็บไว้ในสารละลายที่ไม่มีการควบคุมปริมาณออกซิเจน	21

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้าที่

รูปที่ 4.5 ความเสถียรภาพของหัววัดออกซิเจนระยะสั้น 23

รูปที่ 4.6 ความเสถียรภาพของหัววัดออกซิเจนระยะยาว 24

รูปที่ 4.7 ลักษณะการตอบสนองของหัววัดออกซิเจนแบบที่มีขั้วดีบุกเป็นอาโนดเมื่อเทียบกับเครื่อง YSI-57 26

รูปที่ 4.8 ลักษณะการตอบสนองของหัววัดออกซิเจนแบบที่มีขั้วซิลเวอร์-ซิลเวอร์คลอไรด์เป็นอาโนดเทียบกับเครื่อง YSI-57 27

รูปที่ 4.9 เส้นกราฟปรับเทียบของหัววัดออกซิเจนแบบที่มีขั้วดีบุกเป็นอาโนดโดยใช้หัววัด YSI-57 เป็นตัวเปรียบเทียบ 28

รูปที่ 4.10 เส้นกราฟปรับเทียบของหัววัดออกซิเจนแบบที่มีขั้วซิลเวอร์-ซิลเวอร์คลอไรด์เป็นอาโนดโดยใช้หัววัด YSI-57 เป็นตัวเปรียบเทียบ 29

รูปที่ 4.11 เส้นกราฟปรับเทียบของหัววัดออกซิเจนที่มีความเข้มข้นของสารละลายอิเล็กโตรไลต์ (โปแตสเซียมคลอไรด์) 0.1 M, 0.25 M และ 0.5 M 31

รูปที่ 4.12 ลักษณะการตอบสนองของหัววัดออกซิเจนเมื่อใช้ไประยะหนึ่ง 32

รูปที่ 4.13 ลักษณะการตอบสนองของหัววัดออกซิเจนเมื่อใช้ไประยะหนึ่งแล้วนำมาขัดผิวใหม่ 32

รูปที่ 4.14 ภาพในขณะที่ทำการทดสอบภาคสนาม 33

รูปที่ 4.15 ความไวของหัววัดออกซิเจนกับจำนวนครั้งที่ทำการวัด 34

รูปที่ 4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างการวัดด้วยเครื่องที่พัฒนาขึ้นเทียบกับ YSI model 57(n = 64) 34

รูปที่ 4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างการวัดด้วยเครื่องที่พัฒนาขึ้นเทียบกับ YSI model 57 (n = 28 ข้อมูลช่วงกลางที่ตัดข้อมูลที่ผิดปกติในช่วงแรกและช่วงหลังออก) 35

เลขหมู่ จส
๑๙๑๕
เลขทะเบียน 009798
วัน,เดือน,ปี ๒๖.๑.๔๒

สารบัญตาราง

หน้าที่

ตารางที่ 2.1 การสลายตัวของออกซิเจนที่ศักย์ไฟฟ้าต่างๆ 5

ตารางที่ 4.1 การเปรียบเทียบเวลาเข้าสู่จุดเสถียรในการเก็บรักษาในสภาวะที่แตกต่างกัน 22

ตารางที่ 4.2 การเปรียบเทียบความไวในการตอบสนองของหัววัดออกซิเจนชนิดต่างๆ 25

ตารางที่ 4.3 การเปรียบเทียบลักษณะสมบัติความเป็นเชิงเส้นตรงในการวัดของหัววัดออกซิเจน แบบที่มีขั้วดีบุกเป็นขั้วอาโนดในสารละลายต่างๆ 29

ตารางที่ 4.4 การเปรียบเทียบลักษณะสมบัติความเป็นเชิงเส้นตรงในการวัดของหัววัดออกซิเจน แบบที่มีขั้วซิลเวอร์-ซิลเวอร์คลอไรด์เป็นขั้วอาโนด 29

ตารางที่ 4.5 การเปรียบเทียบลักษณะสมบัติความไวและความเป็นเชิงเส้นตรงในการวัดของ หัววัดออกซิเจนที่มีความเข้มข้นของสารละลายอิเล็กโตรไลต์ต่างกัน 30

ตารางที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างการวัดออกซิเจนด้วยเครื่องที่พัฒนาขึ้นเทียบกับ YSI model 57 35

ตารางที่ 5.1 การเปรียบเทียบราคาของระบบวัดออกซิเจนชนิดต่างๆ 37

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สัญญลักษณ์

DO : ออกซิเจนที่ละลายในสารละลาย (Dissolved oxygen)

SHE : ไฮโดรเจนอิเล็กโทรดมาตรฐาน (Standard Hydrogen Electrode)

ppm : หนึ่งในล้าน (part per million)

g/L : กรัมต่อลิตร (gram per liter)

mg/L : มิลลิกรัมต่อลิตร (milligram per liter)

n : จำนวนของอิเล็กตรอนที่เกี่ยวข้องในการเกิดปฏิกิริยาในที่นี้เท่ากับ 4

F : ค่าคงที่ฟาราเดย์ [coulomb/equiv]

A : พื้นที่ของขั้วคาโทด [cm^2]

Do : ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ [cm^2/sec]

δ : ความหนาของแผ่นส่งผ่านออกซิเจน [m]

J : ฟลักซ์ (flux)

Cb : ความเข้มข้นที่บัลก์ (bulk) [mole]

Co : ความเข้มข้นที่ผิวอิเล็กโทรด [mole]

M : โมลาร์ [molar]

uA : ไมโครแอมแปร์ [micro-ampere]

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

	หน้าที่
บทคัดย่อ(ภาษาไทย)	ก
บทคัดย่อ(ภาษาอังกฤษ)	ก
กิตติกรรมประกาศ	ข
สารบัญรูป	ค
สารบัญตาราง	จ
สัญญลักษณ์	ฉ
สารบัญ	ช
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ออกซิเจน	1
1.2 ความสำคัญและที่มาของหัวข้อของการวิจัย	1
1.3 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย	3
บทที่ 2 หลักการทำงานของหัววัดออกซิเจน	4
2.1 หลักการพื้นฐาน	4
2.2 การวัดแบบกัลวานิก	5
2.3 การวัดแบบโพลาโรกราฟิก	6
2.4 ลักษณะสมบัติทางฟิสิกส์ที่สำคัญในการวัดออกซิเจน	10
บทที่ 3 การพัฒนาระบบวัดออกซิเจน	11
3.1 การพัฒนาระบบเครื่องวัด	11

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

หน้าที่

3.2 การประดิษฐ์หัววัดออกซิเจน 13
3.2.1 การพัฒนาขั้วคาโทด 13
3.2.2 การพัฒนาขั้วอาโนด 14
3.2.3 แผ่นฟิล์มส่งผ่านออกซิเจน 15
3.2.4 สารละลายอิเล็กโตรไลต์ 15
3.3. การประกอบหัววัดออกซิเจน 16

บทที่ 4 ลักษณะสมบัติของหัววัดออกซิเจน 19
4.1 ระบบวัดและทดสอบลักษณะสมบัติของหัววัดออกซิเจน 19
4.2 การเข้าสู่จุดเสถียรภาพ(warm up)ของหัววัดออกซิเจน 20
4.3 การศึกษาความเสถียรภาพของหัววัดออกซิเจน 22
4.3.1 ความเสถียรภาพระยะสั้น 22
4.3.2 ความเสถียรภาพระยะยาว 22
4.4 ความไวในการตอบสนองของหัววัดออกซิเจน 25
4.5 กราฟมาตรฐานของหัววัดออกซิเจน 28
4.6 ผลของความเข้มข้นของสารละลายอิเล็กโตรไลต์ 30
4.7 การบำรุงรักษาหัววัดออกซิเจนเมื่อเสื่อมสมรรถภาพ 32
4.8 การทดสอบหัววัดออกซิเจนในภาคสนาม 33

บทที่ 5 การวิเคราะห์ต้นทุนการประดิษฐ์ 36

บทที่ 6 บทสรุป 38
เอกสารอ้างอิง 40

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 1. บทนำ

1.1 ออกซิเจน

ออกซิเจนเป็นธาตุชนิดหนึ่งที่มีความสัมพันธ์และสำคัญต่อสิ่งมีชีวิตทั่วไป ออกซิเจนเป็นองค์ประกอบหลักชนิดหนึ่งของชั้นบรรยากาศของโลก โดยมีถึงประมาณ 21 % ซึ่งมากเป็นอันดับที่สองรองจากก๊าซไนโตรเจน และยังเป็นองค์ประกอบที่สำคัญของร่างกายมนุษย์ ออกซิเจนมีอยู่ในรูปฟอร์มต่าง ๆ ตั้งแต่เป็นโมเลกุลอิสระ และในลักษณะของสารประกอบทั้งที่เป็นสารอินทรีย์และอนินทรีย์ ซึ่งหากรวมออกซิเจนที่อยู่ในรูปฟอร์มอิสระและในรูปสารประกอบเหล่านี้เข้าด้วยกันแล้วจะมีปริมาณถึง 50% ของสารทั้งหมดที่มีอยู่ในโลก ออกซิเจนที่อยู่ในรูปฟอร์มต่างๆ นี้ส่วนใหญ่จะมีค่าไม่คงที่ตลอดเวลาและมีการเปลี่ยนแปลงอยู่เสมอ การเปลี่ยนแปลงส่วนองค์ประกอบของออกซิเจนนี้จะมีผลต่อการดำรงค์ชีวิตของพืชและสัตว์ รวมถึงความเสถียรภาพของสารที่มีออกซิเจนนั้นเป็นองค์ประกอบด้วย ดังนั้นการศึกษาและติดตามการเปลี่ยนแปลงของออกซิเจนในสภาพต่างๆ จึงเป็นประโยชน์อย่างมากต่อการศึกษาสิ่งที่เราสนใจ ตัวอย่างเช่น ปริมาณของออกซิเจนในอากาศนอกจากจะเป็นตัวแปรที่สำคัญในกระบวนการดำรงชีพของสิ่งมีชีวิตแล้ว ยังเป็นตัวแปรที่สำคัญในกระบวนการเผาไหม้ในระบบต่างๆอีกมากมาย

ออกซิเจนที่อยู่ในรูปโมเลกุลอิสระนั้น ยังแบ่งออกเป็นโมเลกุลที่อยู่ในอากาศและที่ละลายอยู่ในน้ำ ออกซิเจนที่ละลายอยู่ในน้ำนี้เราเรียกย่อ ๆ กันว่า DO(Dissolve oxygen) ความสามารถในการละลายอยู่ในน้ำของออกซิเจนนั้น ตามปกติจะมีค่าที่ค่อนข้างต่ำประมาณ 8 ppm หรือ 8 mg/L ที่อุณหภูมิห้อง (25 C) ความสามารถของออกซิเจนที่จะละลายอยู่ในน้ำจะขึ้นกับค่าความดันย่อย(partial pressure) กล่าวคือขึ้นกับค่าความเข้มข้นของออกซิเจนที่มีอยู่ในอากาศที่อยู่เหนือผิวน้ำนั้น นอกจากนี้ยังขึ้นกับอุณหภูมิ ความดัน และสารต่างๆ ที่ผสมอยู่ในน้ำนั้น ๆ ด้วย อย่างไรก็ตามออกซิเจนที่ละลายอยู่ในน้ำนี้จะอยู่ในสภาพของโมเลกุลอิสระ โดยจะไม่ทำปฏิกิริยาทางเคมีกับน้ำโดยตรง แต่อาจจะทำปฏิกิริยากับสารเคมีชนิดอื่นที่มีอยู่ในน้ำ

1.2 ความสำคัญและที่มาของหัวข้อของการวิจัย

ออกซิเจนเป็นก๊าซที่มีความสำคัญมากต่อการดำรงชีพของสิ่งมีชีวิตทุกชนิดทั้งที่อยู่บนบกและในน้ำ โดยเฉพาะอย่างยิ่งออกซิเจนที่ละลายอยู่ในน้ำ ซึ่งจะมีค่าต่ำกว่าในอากาศ จะมีผลผลอย่างมากต่อสิ่งมีชีวิตในน้ำ รวมถึงสภาพคุณภาพของแหล่งน้ำนั้นๆ อีกด้วย สิ่งเหล่านี้จะมีผลโดยตรงต่อการเพาะพันธุ์สัตว์น้ำเพื่อธุรกิจ เช่น ฟาร์มเลี้ยงปลา กุ้ง เป็นต้น ผลของความเข้มข้นของออกซิเจนในน้ำที่มีต่อกระบวนการเมตาบอลิซึมของสิ่งมีชีวิตเพื่อใช้ในการสร้างพลังงาน สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ลักษณะด้วยกันคือ 1) กรณีที่ความเข้มข้นของออกซิเจนมีค่าสูง กระบวนการเมตาบอลิซมจะเป็นแบบที่ใช้ออกซิเจน ที่เรียกว่า Aerobic process ซึ่งจะเป็นปฏิกิริยาออกซิเดชั่นของสารโดยใช้ออกซิเจน ซึ่งผลลัพท์ที่ได้จากกระบวนการมักจะได้สารที่ไม่เป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิตและสภาพแวดล้อมมากนัก และ 2) กรณีที่ความเข้มข้นของออกซิเจนมีค่าต่ำ กระบวนการเมตาบอลิซมจะเป็นแบบที่ไม่ใช้ออกซิเจน ที่เรียกว่า Anaerobic processs

ซึ่งจะเป็นปฏิกิริยารีดักชั่นของสาร ผลลัพท์ที่ได้จากกระบวนการนี้ส่วนมากจะเป็นสารที่มีพิษ หรือเป็นสารที่ก่อให้สภาวะแวดล้อมเสื่อมเสีย เช่น มีกลิ่นเหม็น ลักษณะเช่นนี้มีความสำคัญมากในกรณีที่ต้องการรักษาสภาพแหล่งน้ำให้ดี หรือการเลี้ยงสัตว์น้ำเพื่อธุรกิจ ดังนั้นการวัดออกซิเจนในน้ำจึงเป็นสิ่งจำเป็นอันหนึ่งในการศึกษาสภาวะของแหล่งน้ำ เพราะความเข้มข้นของออกซิเจนที่ละลายอยู่ในน้ำจะเป็นตัวกำหนดกระบวนการทำปฏิกิริยาของจุลินทรีย์ที่มีอยู่ในน้ำนั้นว่าจะเป็นแบบใด หากความเข้มข้นของออกซิเจนในน้ำมีค่าต่ำ ก็จะทำให้เกิดปฏิกิริยาแบบรีดักชั่น ซึ่งจะปล่อยสารที่ทำให้น้ำเสียมากยิ่งขึ้น ในขณะที่น้ำเสียมากขึ้น ความสามารถของการละลายของออกซิเจนก็จะต่ำลงไปอีก อันเป็นวัฏจักรที่ทำให้น้ำเสียยิ่ง ๆ ขึ้นไปด้วย ซึ่งความเข้มข้นของออกซิเจนที่ละลายในน้ำนี้จะส่งผลต่อการดำรงชีพของสัตว์น้ำต่าง ๆ ที่อาศัยอยู่ในน้ำนั้น ๆ และมีผลกระทบต่อการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำเพื่อธุรกิจ

ผลของออกซิเจนต่อการมีชีวิตของมนุษย์นั้นค่อนข้างที่จะชัดเจนและทราบกันดีอยู่แล้วว่า เราไม่สามารถมีชีวิตได้ถ้าขาดออกซิเจนในไม่กี่นาที หรือการขาดออกซิเจนเป็นระยะเวลาสั้นระดับหนึ่ง จะมีผลกระทบต่อการทำงานของระบบประสาทของมนุษย์ได้ ในทางการแพทย์ จึงมีความจำเป็นที่จะต้องคอยตรวจวัดหาความเข้มข้นของออกซิเจนที่มีอยู่ในเลือดของคนไข้ที่มีอาการหนัก นอกจากนี้การตรวจหาออกซิเจนที่เกาะอยู่กับฮีโมโกลบิน ก็เป็นวิธีหนึ่งที่ช่วยแพทย์ในการวินิจฉัยโรคทางโลหิตของผู้ป่วยที่ได้

ในอุตสาหกรรมความเข้มข้นของออกซิเจนที่มีอยู่ในน้ำที่ใช้ในระบบหล่อเลี้ยงความเย็น โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่ระบบที่ใช้ท่อเหล็ก จะมีผลต่อการทำงานและความปลอดภัยของระบบเป็นอย่างมาก กล่าวคือ หากความเข้มข้นของออกซิเจนในน้ำที่ใช้ในการหล่อเลี้ยงระบบให้เย็นมีค่าสูงมาก จะส่งผลทำให้ท่อเหล็กเป็นสนิมได้ง่าย ซึ่งจะทำให้เกิดการอุดตันและเสียหายต่อระบบได้ ดังนั้นจึงจำเป็นที่จะต้องมีระบบวัดและควบคุมความเข้มข้นของออกซิเจนที่มีอยู่ในระบบนั้นให้เป็นศูนย์หรือมีค่าต่ำมาก ๆ

นอกจากนี้การวิจัยและพัฒนาทางเทคโนโลยีชีวภาพ ซึ่งส่วนใหญ่จะเป็นกระบวนการหมักยีสต์ รา หรือจุลินทรีย์ชนิดต่างๆ จำเป็นจะต้องทำการควบคุมปริมาณของออกซิเจนที่มีอยู่ในสารละลายอาหารเลี้ยงเชื้อ(media) เพราะเป็นตัวแปรที่สำคัญอันหนึ่งในกระบวนการเจริญเติบโตและผลิตผลิตภัณฑ์ที่เราต้องการ ซึ่งหากความเข้มข้นของออกซิเจนในสารละลายอาหารมีค่าเปลี่ยนแปลงไปมากแล้วจะทำให้กระบวนการเมตาบอลิสมของเซลเปลี่ยนไปจากสภาพที่ควรจะเป็น อันจะมีผลต่อการผลิตผลิตภัณฑ์

จากที่กล่าวมาแล้วข้างต้น จะเห็นได้ว่าการวัดความเข้มข้นของออกซิเจนมีความสำคัญมากในหลายสาขา โดยเฉพาะอย่างยิ่งการวัดความเข้มข้นของออกซิเจนในสารละลายตัวอย่าง จะมีประโยชน์มากในการวัดและควบคุมคุณภาพแหล่งน้ำต่างๆ ไม่ว่าจะเพื่อการอนุรักษณ์สิ่งแวดล้อมหรือเพื่อการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำในเชิงธุรกิจ อุตสาหกรรมโลหะ ทางการแพทย์ หรืออุตสาหกรรมอาหาร การวิจัยและพัฒนาหัววัดออกซิเจนนั้นเริ่มจาก Mr. L.C.Clark เมื่อปี ค.ศ. 1956[1] ซึ่งได้ทำการประดิษฐ์หัววัดออกซิเจนขึ้นเพื่อใช้ในการวัดออกซิเจนในเลือดตัวอย่างของคนไข้ หลังจากนั้นก็ได้มีการวิจัยและพัฒนาการประดิษฐ์หัววัดออกซิเจนในลักษณะต่าง ๆ กัน[2-6]

การวิจัยและพัฒนาหัววัดออกซิเจนนั้นส่วนมากทำกันในลักษณะที่ใช้แผ่นหรือเส้นลวดพลาตินัมในการประดิษฐ์ และทำการยึดแผ่นหรือเส้นลวดทองขาวนี้โดยใช้ท่อแก้วหรือพลาสติก หัววัดออกซิเจนเหล่านี้ถูกออกแบบให้เหมาะสมกับการใช้งานในแต่ละด้าน หัววัดออกซิเจนเหล่านี้ต้องนำเข้ามาจากต่างประเทศ และยังไม่มีการผลิตขึ้นใช้เองภายในประเทศไทย ซึ่งทำให้มีราคาที่สูงและมีปัญหาในการซ่อมบำรุงรักษาเมื่อเสียหาย หรือเมื่อหัววัดเสื่อมสมรรถภาพไม่สามารถทำการปรับเทียบได้

ดังนั้นการพัฒนาหัววัดออกซิเจนขึ้นใช้งานเองภายในประเทศ โดยให้มีความเหมาะสมกับการใช้งาน และสามารถแก้ไขซ่อมแซม หรือหาเปลี่ยนเองได้ง่าย จะเป็นประโยชน์ต่อการทำงานในหลาย ๆ สาขา ไม่ว่าจะเป็นงานวิจัยพื้นฐาน งานวิจัยประยุกต์ และในเชิงธุรกิจ เนื่องจากมีตลาดที่มีความต้องการจะนำไปใช้งานที่กว้างขวางอยู่แล้ว ซึ่งจะเป็นการวิจัยและพัฒนาพื้นฐานที่จะรองรับการพัฒนาไปสู่อุตสาหกรรมการผลิตหัววัดออกซิเจนในอนาคต โดยในโครงการวิจัยนี้จะได้เน้นการพัฒนาการประดิษฐ์หัววัดออกซิเจนสำหรับการวัดปริมาณออกซิเจนในน้ำ โดยมองในแง่ของการวัดน้ำเสียใน บ่อ สระ แม่น้ำ ลำคลอง หรือในบ่อเลี้ยงสัตว์เป็นเป้าหมายหลัก

คณะผู้วิจัยได้ดำเนินงานวิจัยพื้นฐานในการพัฒนาหัววัดออกซิเจนแบบฟิล์มบางขึ้นในระหว่างปี พ .ศ.2534-2536 ซึ่งพบว่าหัววัดดังกล่าวนั้นจะมีราคาถูกเพราะสามารถผลิตได้คราวละจำนวนมากได้ และมีลักษณะการตอบสนองต่อออกซิเจนได้ในช่วงความเข้มข้น 0-20 mg/L และมีความเสถียรภาพระยะสั้นที่ดี แต่จะมีการเสื่อมสมรรถภาพไปตามเวลาที่ใช้งาน จึงเหมาะสมสำหรับการใช้งานระยะสั้นๆ แบบใช้แล้วทิ้งจึงสามารถนำไปใช้งานได้ในระดับหนึ่งเท่านั้น ทั้งนี้เนื่องจากว่าอิเล็กโทรดที่พัฒนาขึ้นนั้นเป็นลักษณะของแผ่นฟิล์มบาง ซึ่งจะสูญเสียผิวหน้าไปเรื่อยๆ ในระหว่างที่ทำการวัด อันทำให้ลักษณะสมบัติเสียไป จากจุดนี้เองที่ทำให้คณะผู้วิจัยมีความคิดที่จะพัฒนาหัววัดออกซิเจนขึ้นอีกแบบหนึ่งที่มีความคงทนและมีอายุการใช้งานที่ยาว โดยไม่จำเป็นจะต้องเปลี่ยนหัววัดเรื่อยๆ ซึ่งหัววัดออกซิเจนที่จะพัฒนาขึ้นใหม่นี้จะมีลักษณะเป็นแบบบัลก์(bulk) ซึ่งสามารถที่จะทำการบำรุงรักษาหัววัดได้ง่ายในกรณีที่หัววัดเริ่มเสื่อมสมรรถภาพ

1.3 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัยนี้ คือ

1) พัฒนาหัววัดออกซิเจนแบบบัลก์พร้อมระบบวัด
2) ออกแบบโครงสร้างหัววัดออกซิเจนให้มีโครงสร้างที่แข็งแรงกว่าเดิม
3) ทดลองนำเอาหัววัดออกซิเจนไปใช้งานในภาคสนาม

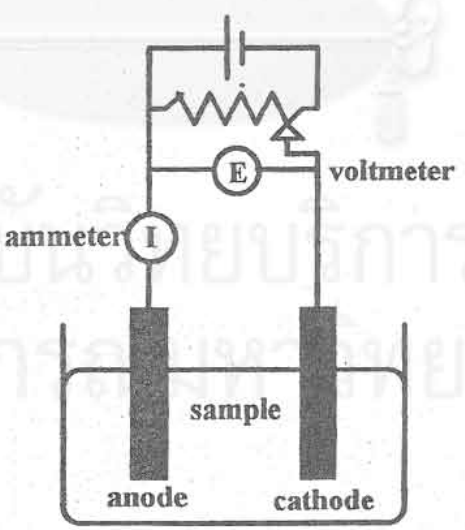
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2. หลักการทำงานของหัววัดออกซิเจน

ในบทที่ 2 นี้จะกล่าวถึงหลักการวัดออกซิเจนในสารละลาย โดยการใช้หัววัดออกซิเจนที่อาศัยปฏิกิริยาทางไฟฟ้าเคมี รวมถึงตัวแปรชนิดต่างๆ ที่เกี่ยวข้องในการวัด

2.1 หลักการพื้นฐาน

หลักการวัดและวิเคราะห์หาปริมาณออกซิเจนโดยใช้หัววัดออกซิเจนจะอาศัยหลักการทางไฟฟ้าเคมีเข้ามาช่วย โดยทำการวัดผลที่เกิดขึ้นจากการทำปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีในการสลายออกซิเจน ด้วยการใช้อิเล็กโทรด 1 คู่ ดังแสดงในรูปที่ 2.1 โดยที่อิเล็กโทรดอันหนึ่งจะทำหน้าที่เป็นขั้วคาโทด และอีกอันหนึ่งทำหน้าที่เป็นขั้วอาโนด การสลายออกซิเจนจะเกิดขึ้นที่ขั้วคาโทด ซึ่งจะมีการถ่ายเทอิเล็กตรอนเกิดขึ้น และจะทำการวัดการไหลของอิเล็กตรอนนี้ออกมาในรูปของกระแสไฟฟ้า กระแสไฟฟ้าที่ได้นี้จะแปรผันโดยตรงกับปริมาณของออกซิเจน ปฏิกิริยาการสลายออกซิเจนนั้นสามารถเกิดขึ้นได้หลายแบบด้วยกัน โดยจะขึ้นกับศักย์ไฟฟ้าที่ให้แก่อิเล็กโทรดดังตารางที่ 2.1



รูปที่ 2.1 โครงสร้างของระบบวัดออกซิเจน

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 2.1 การสลายตัวของออกซิเจนที่ศักย์ไฟฟ้าต่างๆ

ปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี	ศักย์ไฟฟ้า [V vs SHE]
$O_2 + 4H^+ + 4e^- \text{ -------> } 2H_2O$	1.229
$O_2 + 2H^+ + 2e^- \text{ -------> } H_2O_2$	0.695
$O_2 + 2H_2O + 4e^- \text{ -------> } 4OH^-$	0.401
$O_2 + H^+ + e^- \text{ -------> } HO_2$	-0.053
$O_2 + H_2O + 2e^- \text{ -------> } HO_2^- + OH^-$	-0.065
$O_2 + 2H_2O + 2e^- \text{ -------> } H_2O_2 + 2OH^-$	-0.133
$O_2 + e^- \text{ -------> } O_2^-$	-0.284

จากตารางที่ 2.1 จะเห็นได้ว่าในกระบวนการสลายออกซิเจนจะมีการถ่ายเทอิเล็กตรอนเข้ามาเกี่ยวข้องด้วย และอัตราการถ่ายเทอิเล็กตรอนนี้จะแตกต่างกันไปตามค่าศักย์ไฟฟ้าของอิเล็กโทรด ซึ่งจะทำให้การวัดที่ศักย์ไฟฟ้าต่างกันจะได้ความไวในการวัดแตกต่างกันไปด้วย ดังนั้นไม่ว่าจะทำการวัดที่ค่าของศักย์ไฟฟ้าใดๆ จึงจำเป็นที่จะต้องทำการปรับเทียบความไวของหัววัดออกซิเจนแบบนั้นๆ เสมอ เมื่อมองในแง่ของศักย์ไฟฟ้าจะเห็นได้ว่ามีค่าจากลบไปถึงบวก รวมถึงกรณีที่เกือบจะไม่ต้องมีศักย์ไฟฟ้าป้อนให้แก่อิเล็กโทรดเลยก็ยังสามารถมีกระแสไฟฟ้าไหลได้เช่นกัน ดังที่ได้กล่าวมาแล้วว่าการวัดปริมาณของออกซิเจนนี้ทำโดยการวัดกระแสไฟฟ้าที่ไหล ดังนั้นจึงสามารถที่จะแบ่งหลักการวัดอกซิเจนได้ออกเป็น 2 แบบใหญ่ๆ คือ แบบที่ไม่ต้องให้ศักย์ไฟฟ้าแก่อิเล็กโทรด กับแบบที่ต้องป้อนศักย์ไฟฟ้าให้แก่อิเล็กโทรด

การวัดแบบที่ไม่ต้องให้ศักย์ไฟฟ้าแก่อิเล็กโทรดเรียกว่า "**การวัดแบบกัลวานิก(galvanic)**" และการวัดแบบที่ต้องให้ศักย์ไฟฟ้าแก่อิเล็กโทรดเรียกว่า "**การวัดแบบโพลาโรกราฟิก(polarographic)**" โดยแต่ละแบบมีรายละเอียดของหลักการทำงานดังนี้

2.2 การวัดแบบกัลวานิก

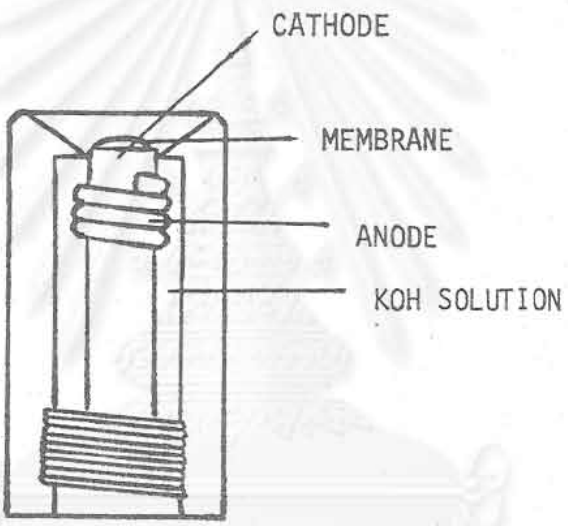
โดยทั่วไปหัววัดออกซิเจนแบบนี้ที่มีขายอยู่จะทำขึ้นจากทองขาวหรือเงิน และตะกั่ว ดังแสดงในรูปที่ 2.2 กล่าวคือใช้แผ่นทองขาวหรือเงินเป็นขั้วคาโทด และใช้ตะกั่วหรือดีบุกเป็นขั้วอาโนด โดยที่ขั้วทั้ง 2 บรรจุอยู่ในท่อเหล็ก แก้ว หรือพลาสติก ซึ่งภายในบรรจุสารละลายโปแตสเซียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้เป็นสารละลายอิเล็กโตรไลต์ และมีแผ่นฟิล์มเทฟรอนติดอยู่ที่ผิวของขั้วคาโทด ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจะเป็นดังสมการที่ (2.1)-(2.3) โดยจะเกิดกระแสไฟฟ้าไหลเนื่องจากการสลายตัวของออกซิเจนที่ขั้วคาโทด ซึ่งค่าของกระแสไฟฟ้าที่ไหลนี้จะแปรผันตามความเข้มข้นของออกซิเจนที่มีอยู่ในสารละลายที่ทำการวัด ดังนั้นโดย

การวัดค่าของกระแสไฟฟ้าก็จะทำให้เราทราบค่าของออกซิเจนที่มีอยู่ได้ การวัดในลักษณะเช่นนี้จะไม่มีการป้อนศักย์ไฟฟ้าให้กับขั้วคาโทดและอาโนด ระบบวัดแบบนี้จึงมีลักษณะการทำงานในทำนองเดียวกับแบตเตอรีที่จ่ายกระแสไฟฟ้าได้โดยอาศัยปฏิกิริยาเคมี

ขั้วคาโทด : $O_2 + 2\,H_2O + 2\,e \longrightarrow HO_2 + 4\,OH$ (2.1)

ขั้วอาโนด : $4\,Sn + 4\,OH \longrightarrow 2\,Sn(OH)_2 + 4e$ (2.2)

ปฏิกิริยารวม : $O_2 + 2\,H_2O + 4\,Sn \longrightarrow 2\,Sn(OH)_2 + 4\,OH$ (2.3)



รูปที่ 2.2 ลักษณะของหัววัดออกซิเจนแบบกัลวานิก

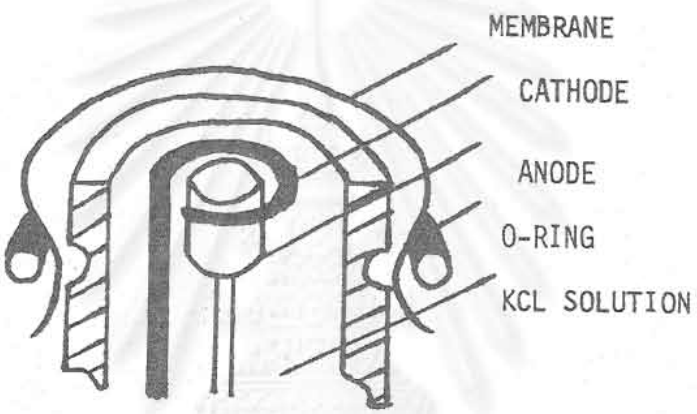
2.3 การวัดแบบโพลาโรกราฟิก

หัววัดแบบนี้มีโครงสร้างดังแสดงในรูปที่ 2.3 ประกอบด้วยขั้วคาโทดที่ทำขึ้นจากทองขาวหรือทองคำ และขั้วอาโนดที่ทำขึ้นจากเงินหรือซิลเวอร์คลอไรด์ ขั้วทั้ง 2 จะบรรจุอยู่ภายในท่อปิดที่มีสารละลายโปแตสเซียมคลอไรด์บรรจุอยู่ ที่ปลายของขั้วคาโทดก็จะมีแผ่นฟิล์มเทฟรอนติดอยู่ ซึ่งใช้เป็นแผ่นฟิล์มส่งผ่านออกซิเจนเช่นเดียวกันกับแบบกัลวานิก การวัดแบบนี้จะต้องให้ความต่างศักย์ไฟฟ้าแก่ขั้วคาโทดและขั้วอาโนดราว 0.4 - 0.6 โวลต์ ปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีที่เกิดขึ้นสามารถแสดงได้ดังสมการที่ (2.4) - (2.6)

ขั้วคาโทด : $O_2 + 2H_2O + 4e \longrightarrow 4OH$ (2.4)

ขั้วอาโนด : $4Ag + 4Cl \longrightarrow 4AgCl + 4e$ (2.5)

ปฏิกิริยารวม : $O_2 + 2H_2O + 4Ag + 4KCl \longrightarrow 4AgCl + 4OH$ (2.6)

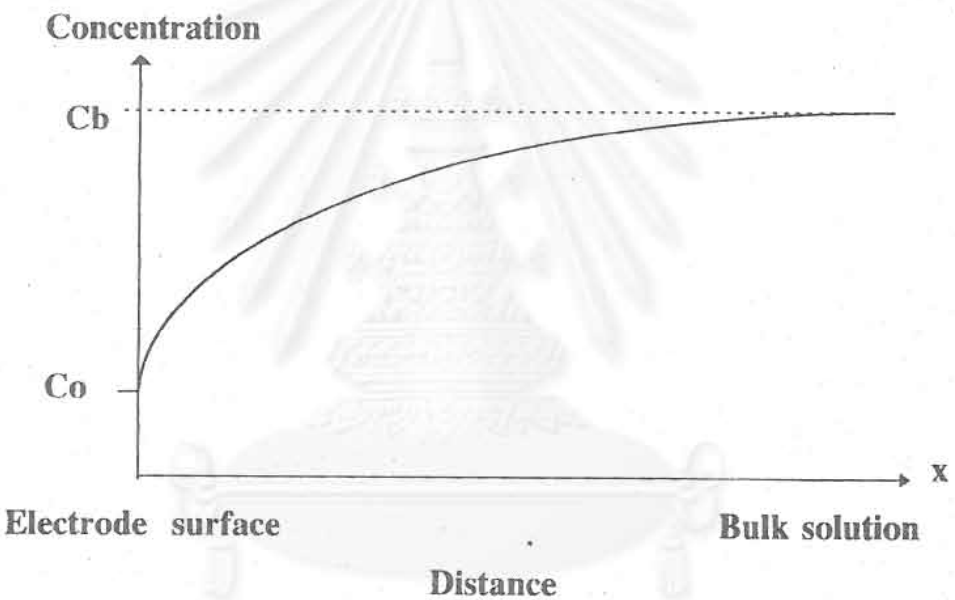


รูปที่ 2.3 ลักษณะของหัววัดออกซิเจนแบบโพลาโรกราฟิก

กระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในปฏิกิริยาข้างต้นจะแปรผันตามความเข้มข้นของออกซิเจนที่มีอยู่ในสารละลายที่จะทำการวัด ดังนั้นในทำนองเดียวกันกับการวัดแบบกัลวานิก โดยการวัดค่าของกระแสไฟฟ้าก็จะทำให้เราทราบค่าของความเข้มข้นของออกซิเจนที่มีอยู่ในสารละลายได้

การทำงานของหัววัดออกซิเจนที่กล่าวมาแล้วข้างต้นนี้ จึงเป็นวัดค่าของกระแสไฟฟ้าที่ไหลระหว่างขั้วคาโทดและขั้วอาโนด ซึ่งค่าของกระแสไฟฟ้านี้จะแปรผันตามค่าความเข้มข้นของปริมาณออกซิเจนที่มีอยู่ที่ขั้วคาโทด โดยทั่วไปแล้วหากเราคิดว่าปริมาณของออกซิเจนที่มีอยู่ในสารละลายตัวอย่างมีค่าเท่ากันทั้งหมด(มีการไหลเวียนทั่วถึงกันทั้งหมด) ค่าความเข้มข้นของออกซิเจนที่ขั้วคาโทดก็จะมีค่าเท่ากับค่าความเข้มข้นของออกซิเจนในสารละลายนั้น ๆ แต่เนื่องจากที่ผิวของขั้วคาโทดจะมีแผ่นฟิล์มสงผ่านออกซิเจนอยู่ ซึ่งแผ่นฟิลม์นี้จะยอมให้ออกซิเจนผ่านเข้ามาได้ แต่จะเป็นตัวกันสารเคมีชนิดอื่น ๆ ไม่ให้เข้ามาทำปฏิกริยาที่ขั้วคาโทดได้ ดังนั้นหากคิดให้ละเอียดแล้ว แม้ว่าค่าความเข้มข้นของ

ออกซิเจนที่ผิวด้านนอกแผ่นฟิล์มส่งผ่านออกซิเจนจะมีค่าเท่ากับค่าของออกซิเจนในสารละลาย แต่ค่าความเข้มข้นนี้จะแตกต่างจากค่าความเข้มข้นของออกซิเจนที่ผิวด้านในของแผ่นฟิล์ม(ด้านที่ติดอยู่กับขั้วคาโทด) เนื่องจากมีความหนาของแผ่นฟิล์มอยู่ กล่าวคือจะมีการลดลงของค่าความเข้มข้นของออกซิเจนจากด้านนอกไปยังด้านใน(รูปที่ 2.4) และเนื่องจากความแตกต่างของค่าออกซิเจนระหว่างด้านนอกและด้านในของแผ่นฟิล์มส่งผ่านออกซิเจนนี้เอง จะทำให้เกิดฟลักซ์ของการส่งออกซิเจนจากด้านนอกเข้าไปยังด้านในแผ่นฟิล์ม ดังนั้นในเชิงทฤษฎีโดยการใช้กฎของ Fick คือ หากให้ความเข้มข้นของออกซิเจนในสารละลายส่วนที่อยู่ด้านนอกของแผ่นส่งผ่านออกซิเจนมีค่าเท่ากันหมดและมีค่าเท่ากับ Cb และความเข้มข้นของออกซิเจนด้านในของแผ่นส่งผ่านออกซิเจนที่ติดอยู่กับขั้วคาโทด มีค่าเป็น Co ค่าของฟลักซ์ของออกซิเจน(J)จะเป็นไปตามกฎของ Fick คือ



รูปที่ 2.4 ความเข้มข้นของออกซิเจนที่ตำแหน่งต่าง ๆ

$$J = Do * \frac{\partial}{\partial x} C(x) \qquad (2.7)$$

$$= Do * \frac{(Cb - Co)}{\delta} \qquad (2.8)$$

ดังนั้นกระแสไฟฟ้าที่ได้จากการทำปฏิกิริยารีดิวซ์ออกซิเจน สามารถเขียนเป็นสมการได้เป็นดังนี้คือ

$$i = n * F * A * J \qquad (2.9)$$

$$= n * F * A * Do * \frac{(Cb - Co)}{\delta} \qquad (2.10)$$

โดยที่ n คือ จำนวนของอิเล็กตรอนที่เกี่ยวข้องในการเกิดปฏิกิริยาในที่นี้เท่ากับ 4

F คือ ค่าคงที่ฟาราเดย์

A คือ พื้นที่ของขั้วคาโทด

Do คือ ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่

δ คือ ความหนาของแผ่นส่งผ่านออกซิเจน

กล่าวคือค่าของกระแสไฟฟ้าที่วัดได้จะแปรผันตาม 1) ขนาดของพื้นที่ของคาโทด(A) 2) ความสามารถในการส่งผ่านมวลของออกซิเจน ซึ่งขึ้นกับสัมประสิทธิ์การแพร่(Do)และความหนาของแผ่นส่งผ่านออกซิเจน(δ) และ 3) ความแตกต่างของความเข้มข้นของออกซิเจนระหว่างด้านในและด้านนอกของแผ่นส่งผ่านออกซิเจน(Cb-Co) ตามปกติแล้วขั้วคาโทดจะมีความสามารถในการทำปฏิกิริยา(สลาย)กับออกซิเจนได้อย่างรวดเร็วมาก ดังนั้นค่า Co หรือความเข้มข้นของออกซิเจนที่ผิวขั้วคาโทดจึงจะเป็นศูนย์อยู่ตลอดเวลา เพราะออกซิเจนที่เข้ามาจะถูกทำปฏิกิริยาไปทั้งหมด ดังนั้นสมการข้างต้นสามารถเขียนใหม่ได้เป็น

$$i = n * F * A * \frac{Do}{\delta} * Cb \qquad (2.11)$$

ซึ่งสามารถสรุปได้ว่า ค่าของกระแสไฟฟ้าที่วัดได้จะขึ้นกับตัวแปร 3 ตัว คือ

1. พื้นที่ผิวของขั้วคาโทด(A)

2. การส่งผ่านมวลของออกซิเจน ซึ่งขึ้นกับสัมประสิทธิ์การแพร่(Do)และความหนา(δ)ของแผ่นฟิล์มส่งผ่านออกซิเจน

3. ความเข้มข้นของออกซิเจนในสารละลาย(Cb)

ดังนั้น หากทำการออกแบบและกำหนดขนาดพื้นที่ของขั้วคาโทดและชนิดของแผ่นส่งผ่านออกซิเจนของหัววัดออกซิเจนแล้ว ค่าของกระแสไฟฟ้าที่ได้จากการวัดจะขึ้นกับความเข้มข้นของออกซิเจนในสารละลายเท่านั้น

2.4 ลักษณะสมบัติทางฟิสิกส์ที่สำคัญในการวัดออกซิเจน

ลักษณะสมบัติทางฟิสิกส์ที่เกี่ยวข้องในการวัดออกซิเจนที่สำคัญได้แก่ คุณสมบัติในการละลายและการแพร่ ลักษณะสมบัติเหล่านี้จะขึ้นกับ อุณหภูมิ ความดัน องค์ประกอบของที่มีผสมอยู่ในสารละลายและอื่น ๆ การละลายและการแพร่ของออกซิเจนนี้จะมีผลโดยตรงในการวัดกระแสที่ได้จากการรีดิวซ์ออกซิเจน ดังสามารถแสดงได้ตามกฎของ Fick(สมการที่ 2.11)

จะเห็นได้ว่ากระแสไฟฟ้าที่จะวัดได้นั้นแปรผันเป็นเชิงเส้นกับสัมประสิทธิ์การแพร่และการละลายของออกซิเจนในสารละลาย และจะแปรผกผันความหนาของชั้นแพร่ ในบางกรณี เช่นในกรณีที่มีการกวนสารละลาย ค่ากระแสไฟฟ้าที่วัดได้จะแปรผันกับรากที่สองของสัมประสิทธิ์การแพร่

ความหนาของชั้นแพร่ในที่นี้ก็คือ ผลบวกของชั้น double layer และความหนาของแผ่นฟิล์มส่งผ่านออกซิเจน โดยทั่วไปชั้นความหนาของ double layer จะมีค่าประมาณตั้งแต่หลายร้อยอังสตรอมไปจนถึงหลายไมโครเมตร ในขณะที่ความหนาของชั้นฟิล์มส่งผ่านออกซิเจนจะมีค่าประมาณ 20-50ไมโครเมตร ดังนั้นในการวัดออกซิเจนนี้ ชั้นความหนาของแผ่นฟิล์มส่งผ่านออกซิเจนจึงเป็นตัวแปรที่มีผลมากที่สุดอันหนึ่ง

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 3 การพัฒนาระบบวัดออกซิเจน

ในบทนี้จะกล่าวถึงการออกแบบและพัฒนาหัววัดออกซิเจน โดยทำตามหลักการที่ได้กล่าวมาแล้วในบทที่ 2 รวมทั้งการประดิษฐ์ระบบเครื่องวัดและแสดงผล การออกแบบหัววัดออกซิเจนที่พัฒนาขึ้นนี้จะมี 2 แบบ คือแบบที่ใช้ดีบุกทำเป็นขั้วอาโนด และแบบที่ใช้ซิลเวอร์-ซิลเวอร์คลอไรด์เป็นขั้วอาโนด ส่วนขั้วคาโทดทำขึ้นจากเม็ดทอง

3.1 การพัฒนาระบบเครื่องวัด

ได้ทำการออกแบบวงจรและทำการพัฒนาระบบเครื่องวัดสัญญาณไฟฟ้าที่ใช้ในการควบคุมการทำงานของหัววัดออกซิเจน วงจรที่พัฒนาขึ้นนั้นเป็นวงจรสำหรับการวัดออกซิเจนแบบโพลาโรกราฟิก (polarographic method) ซึ่งการวัดแบบนี้ต้องมีวงจรควบคุมศักย์ไฟฟ้าที่จ่ายให้แก่หัววัดออกซิเจนให้มีค่าคงที่ตลอดเวลาวัด โดยสามารถปรับค่าได้ในช่วงแรงดัน 0-1.2 โวล์ต ซึ่งในการวัดนั้นหากไม่มีการเน้นกล่าวถึง จะใช้ค่าแรงดัน 0.6 โวลต์ เป็นหลัก รูปที่ 3.1 แสดงบล็อกไดอะแกรมของระบบเครื่องวัด โดยจะมีส่วนประกอบที่สำคัญ 3 ส่วนคือ

1. วงจรควบคุมแรงดัน
2. วงจรแปลงสัญญาณ
3. ภาคแสดงผล

ในการออกแบบระบบวัดนั้น ได้คำนึงถึงการใช้งานในภาคสนามที่ไม่มีแหล่งจ่ายไฟสลับช่วยเลี้ยง จึงได้ทำการปรับปรุงแก้ไขวงจรให้ใช้กำลังงานจากถ่านไฟฉาย โดยพยายามให้กินกระแสไฟฟ้าต่ำ เพื่อให้เครื่องวัดนี้สามารถนำไปใช้งานได้สะดวกและใช้ได้เป็นระยะเวลานาน

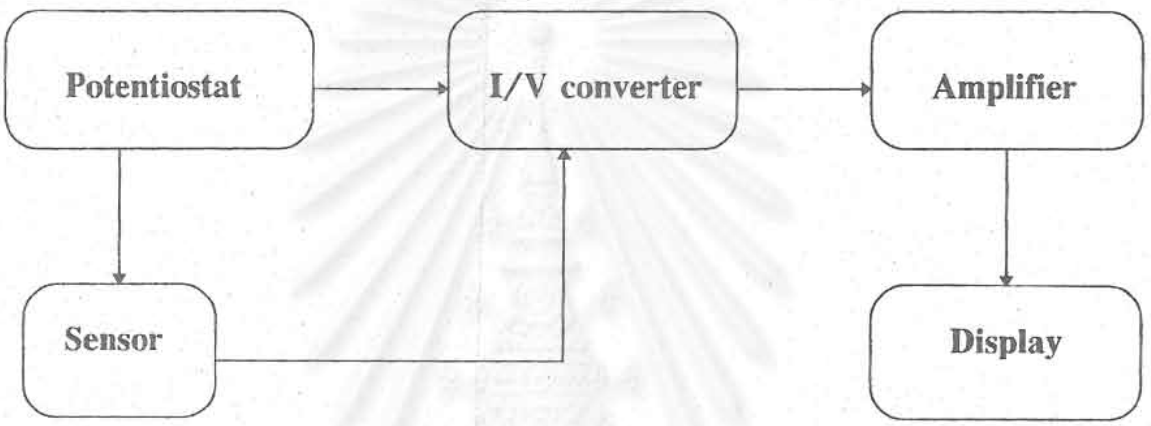
วงจรควบคุมแรงดันจะเป็นส่วนสำคัญในการวัด โดยทำหน้าที่ควบคุมศักย์ไฟฟ้าของหัววัดออกซิเจนให้มีค่าคงที่ตลอดเวลาในระหว่างทำการวัด ออปแอมป์ที่ใช้ได้เลือก TL062 เป็นหลัก เพราะเป็นไอซีที่กินกระแสไฟฟ้าน้อย

วงจรแปลงสัญญาณเป็นวงจรที่จะทำการแปลงสัญญาณที่รับได้ซึ่งเป็นกระแสไฟฟ้าให้เป็นแรงดัน เนื่องจากกระแสไฟฟ้าที่วัดได้จะมีค่าอยู่ในระดับไมโครแอมแปร์ จึงจำเป็นจะต้องมีวงจรขยายสัญญาณ

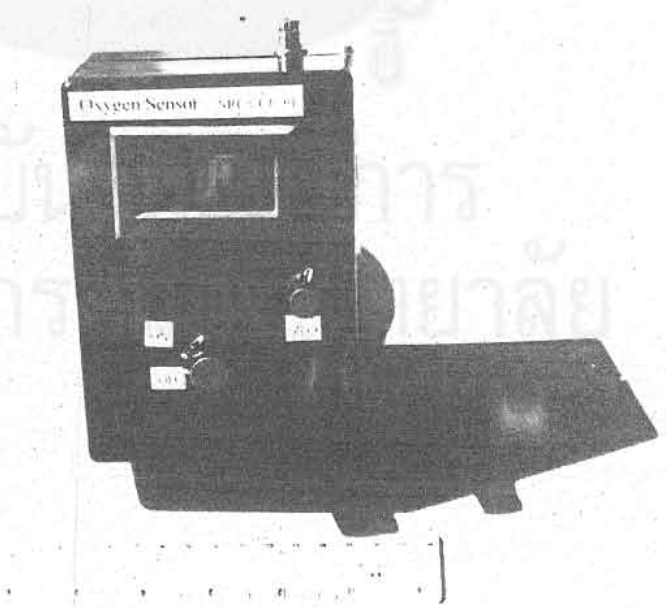
เข้าช่วยเพื่อปรับให้สัญญาณมีค่าสูงขึ้นด้วย อัตรากำลังขยายของวงจรนั้นสามารถปรับค่าได้ เพื่อที่จะสามารถขยายสัญญานให้อ่านได้ง่าย อัตราขยายสัญญานมีค่าจาก 10^3 - 10^6 เท่า

ภาคแสดงผลนั้นออกแบบให้สามารถแสดงผลเป็นตัวเลข โดยใช้ IC เบอร์ 7106 ซึ่งใช้กับตัวแสดงผลที่เป็น LCD(Liquid crystal display) ซึ่งจะไม่กินกระแสไฟฟ้ามากนัก

รูปที่ 3.2 แสดงภาพของเครื่องวัดที่พัฒนาขึ้น



รูปที่ 3.1 บล็อกไดอะแกรมของวงจรวัดออกซิเจน



รูปที่ 3.2 เครื่องวัดออกซิเจนที่พัฒนาขึ้น

3.2 การประดิษฐ์หัววัดออกซิเจน

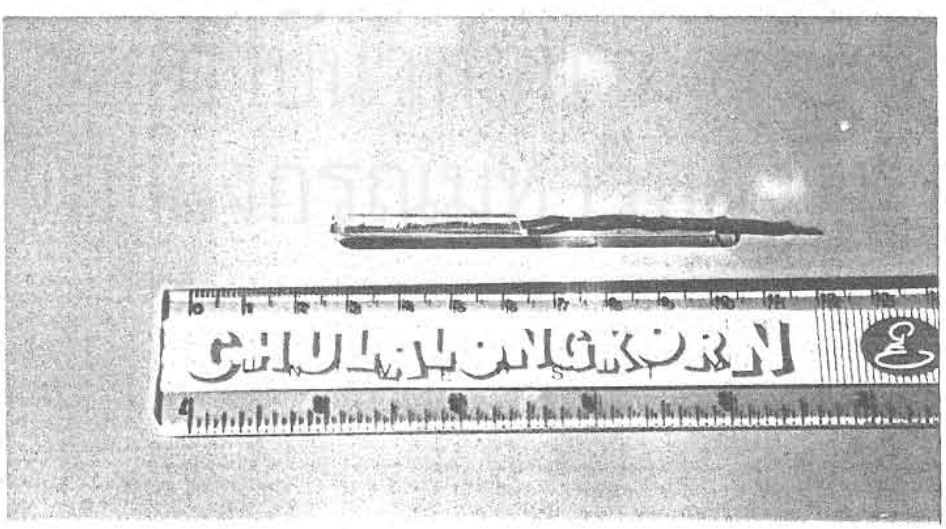
โครงสร้างของหัววัดออกซิเจนประกอบด้วยส่วนสำคัญ 4 ส่วน คือ

1. ขั้วคาโทด
2. ขั้วอาโนด
3. แผ่นฟิล์มส่งผ่านออกซิเจน
4. สารละลายอิเล็กโตรไลต์

ซึ่งนอกจากนี้แล้วยังจำเป็นจะต้องมีโครงที่ใช้สำหรับบรรจุส่วนประกอบทั้ง 4 ส่วนเข้าด้วยกันเพื่อความสะดวกต่อการนำไปใช้งาน รายละเอียดของแต่ละส่วนที่ได้ทำขึ้นเป็นดังต่อไปนี้

3.2.1 การประดิษฐ์ขั้วคาโทด

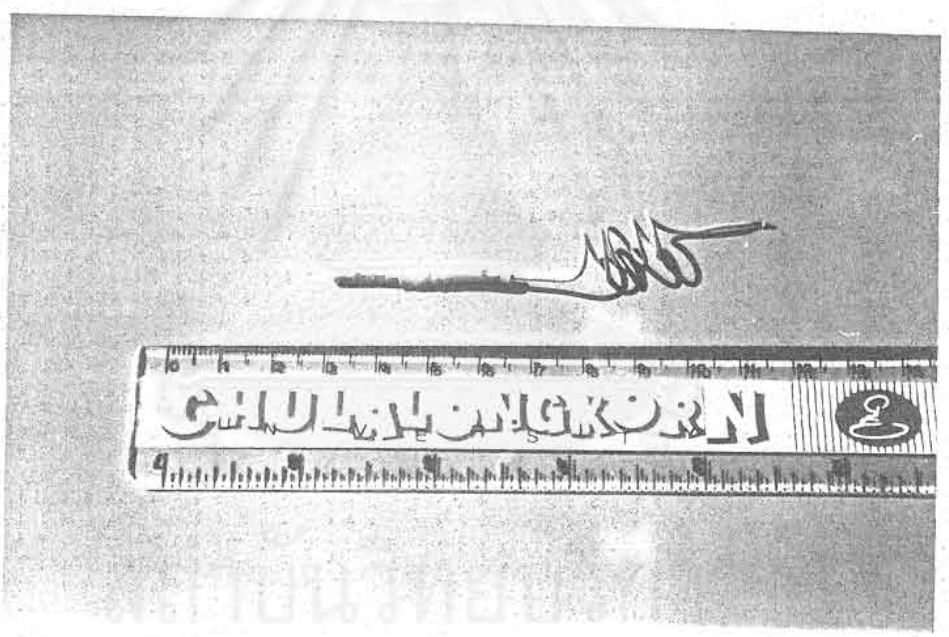
ขั้วคาโทดนั้นเป็นขั้วที่ทำหน้าที่ในการรีดิวซ์ออกซิเจนตามสมการที่ (2.1) ผลที่เกิดขึ้นคือมีการถ่ายเทอิเล็กตรอนจากขั้วอิเล็กโทรดไปยังออกซิเจน วัสดุที่ใช้ทำขั้วคาโทดนั้นจำเป็นจะต้องมีเสถียรภาพสูง โดยทั่วไปจะทำมาจากแพลตินัมหรือทอง คณะผู้วิจัยได้ทำการทดลองประดิษฐ์ขั้วคาโทดแบบฟิล์มบางขึ้น ซึ่งพบว่ามีความเสถียรภาพในระดับหนึ่งและสามารถนำไปใช้งานในลักษณะแบบใช้แล้วทิ้ง (disposable)[1] ได้ แต่ไม่เหมาะสำหรับการนำไปใช้งานแบบระยะเวลายาวนานมาก ๆ นอกจากนี้หัววัดดังกล่าวยังมีข้อเสียที่ความไวในการวัดนั้นขึ้นกับสภาพความนำไฟฟ้าของสารละลาย โดยเฉพาะอย่างยิ่งผลของเกลือที่มีอยู่ในสารละลาย จึงมีปัญหาในกรณีที่จะนำไปใช้งานในระบบที่มีมีเกลือผสมอยู่ เช่น ใช้ในฟาร์มเลี้ยงปลา หรือกุ้ง เป็นต้น ซึ่งในโครงการวิจัยนี้มีจุดประสงค์ที่จะพัฒนาหัววัดออกซิเจนขึ้นอีกแบบหนึ่ง โดยให้สามารถใช้งานได้นาน ๆ และลดผลของความนำไฟฟ้าของสารละลาย จึงทำการเปลี่ยนลักษณะของขั้วคาโทดจากแบบฟิล์มบางมาเป็นแบบบัลก์(bulk) โดยจะทำขึ้นจากเม็ดทอง โดยทำการหลอมทองติดเข้ากับท่อแก้ว แล้วเชื่อมต่อสายโดยใช้กาวเงิน ลักษณะของขั้วคาโทดที่ทำขึ้นใหม่แสดงในรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 ลักษณะของขั้วคาโทดที่ประดิษฐ์ขึ้นจากทอง

3.2.2 การประดิษฐ์ขั้วอาโนด

ขั้วอาโนดเป็นขั้วที่ทำหน้าที่ประกอบร่วมกับขั้วคาโทดในการวัดออกซิเจน โดยจะเป็นขั้วที่ทำหน้าที่ให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันดังสมการที่ (2.2) ซึ่งจะมีอิเล็กตรอนไหลจากสารละลายเข้าสู่ขั้วอาโนด ดังนั้นเมื่อรวมสมการที่ (2.1) และ (2.2) เข้าด้วยกันแล้วจะเห็นว่ามีอิเล็กตรอนไหลจากขั้วคาโทดไปยังขั้วอาโนด หรือมีกระแสไฟฟ้าไหลจากขั้วอาโนดไปยังขั้วคาโทด โดยกระแสไฟฟ้าที่ไหลนี้จะมีค่าแปรผันตามค่าความเข้มข้นของออกซิเจนที่มีอยู่ในสารละลายที่จะทำการวัด แต่เดิมขั้วอาโนดทำขึ้นจากเส้นลวดดีบุก ซึ่งพบว่าเมื่อใช้ไประยะเวลาหนึ่ง ผิวของเส้นลวดดีบุกจะถูกกัดกร่อน ทำให้มีขนาดเล็กลงเรื่อยๆ และขาดในท้ายที่สุด ในงานวิจัยนี้จึงได้ทำการพัฒนาการทำขั้วอาโนดขึ้นใหม่โดยทำขึ้นในลักษณะของบัลก์เช่นเดียวกับขั้วคาโทด โดยทำการหลอมเม็ดดีบุกให้เป็นแท่งขนาดเล็กที่มีเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 2 - 3 มิลลิเมตร แล้วทำการบรรจุลงในท่อแก้วเพื่อทำการเชื่อมสายไฟอีกครั้งหนึ่ง การที่ทำขั้วอาโนดในลักษณะของบัลก์นี้จะมีข้อดีที่ แม้ว่าผิวของขั้วอาโนดจะสึกหรอไปบ้างแต่ก็ยังสามารถทำการขัดผิวใหม่อีกเพียงเล็กน้อยก็สามารถใช้งานต่อไปได้ ลักษณะของขั้วอาโนดที่ทำขึ้นใหม่แสดงได้ดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 ลักษณะของขั้วอาโนดที่ประดิษฐ์ขึ้นจากดีบุก

นอกจากนี้ยังได้ทำการทดลองพัฒนาขั้วอาโนดที่ทำขึ้นจากซิลเวอร์-ซิลเวอร์คลอไรด์ด้วย ขั้วซิลเวอร์-ซิลเวอร์คลอไรด์ ที่ใช้เป็นขั้วอาโนดนี้ทำขึ้นจากเส้นลวดเงิน แล้วนำไปรีดิวซ์ให้เป็นซิลเวอร์คลอไรด์ โดยการนำไปแช่ไว้ในสารละลายเฟอร์ริกคลอไรด์(ความเข้มข้นประมาณ 1 M.) รูปที่ 3.5 แสดง ลักษณะของขั้วอาโนดที่พัฒนาขึ้นจากซิลเวอร์-ซิลเวอร์คลอไรด์

รูปที่ 3.5 ลักษณะของขั้วอาโนดที่พัฒนาขึ้นจากซิลเวอร์-ซิลเวอร์คลอไรด์

3.2.3 แผ่นฟิล์มส่งผ่านออกซิเจน

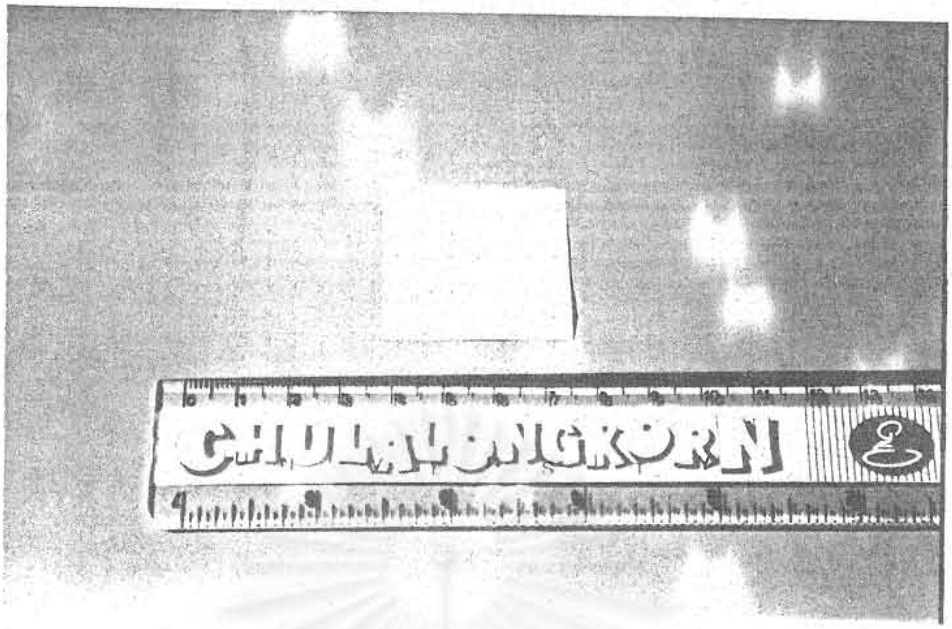
แผ่นฟิล์มส่งผ่านออกซิเจนเป็นแผ่นเมมเบรนบาง ที่ทำหน้าที่กรองให้ออกซิเจนเท่านั้นผ่านเข้าไปทำปฏิกิริยาที่ขั้วคาโทด โดยจะกันน้ำและสารชนิดอื่นไม่ให้เข้าไปทำปฏิกิริยากับขั้วคาโทด เพื่อให้หัววัดตอบสนองต่อออกซิเจนเท่านั้น โดยผลรบกวนจากการรีดิวซ์สารชนิดอื่นจะมีค่าต่ำ แผ่นฟิล์มส่งผ่านออกซิเจนนี้จะถูกวางไว้แนบติดกับผิวหน้าของขั้วคาโทด โดยทำหน้าที่กั้นขั้วคาโทด ขั้วอาโนด สารละลายอิเล็กโตรไลต์ ออกจากสารละลายภายนอก ซึ่งเมื่อเทียบกับแบบเดิมที่ทำในลักษณะของแผ่นฟิล์มบาง ซึ่งไม่สามารถกั้นการทำปฏิกิริยาระหว่างสารละลายกับขั้วอาโนดแล้ว ระบบแบบใหม่นี้สามารถที่จะกันไม่ให้ สารละลายภายนอกเข้ามาทำปฏิกิริยากับทั้งขั้วคาโทดและขั้วอาโนดโดยตรง จึงเป็นการแยกระบบของสารละลายภายนอกออกจากระบบสารละลายภายใน ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ทดลองใช้แผ่นฟิล์มบางของเทฟรอนที่มีความหนาราว 50 ไมโครเมตร เป็นแผ่นส่งผ่านออกซิเจน(รูปที่ 3.6)

3.2.4 สารละลายอิเล็กโตรไลต์

การที่จะให้เกิดปฏิกิริยาตามสมการที่ (3.1) และ (3.2) ได้นั้นจำเป็นจะต้องมีตัวกลางที่เป็นทางผ่านของกระแสไฟฟ้าได้ กล่าวคือขั้วคาโทดและอาโนดจะต้องอยู่ในตัวกลางเดียวกัน สารละลายอิเล็กโตรไลต์จะทำหน้าที่เป็นตัวกลางในการนำไฟฟ้าระหว่างขั้วคาโทดและขั้วอาโนดนี้ ในที่นี้ใช้สารละลายโปแตสเซียมคลอไรด์ที่มีความเข้มข้น 0.1 M เป็นสารละลายอิเล็กโตรไลต์

สารที่ใช้ในการทำให้ค่าของความเข้มข้นของออกซิเจนในสารละลายเป็นศูนย์ เพื่อใช้ในการปรับเทียบหัววัดออกซิเจนนั้น ใช้โซเดียมไนไตรต์(Na_2SO_3) โดยได้ทำการเตรียมสารละลายโซเดียมไนไตรต์ในน้ำปราศจากอิออน โดยให้ความเข้มข้นอยู่ในสภาวะอิ่มตัว

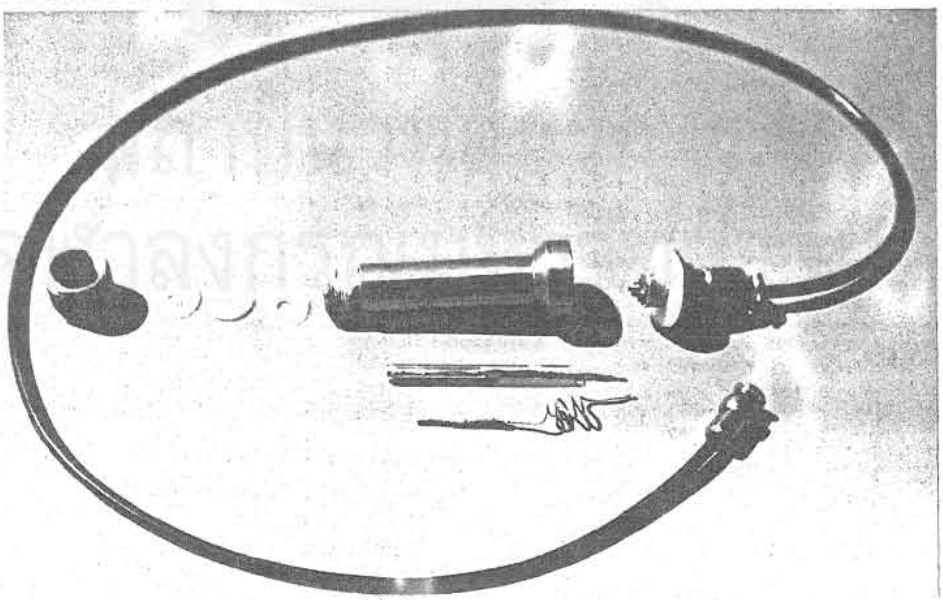
I18553846



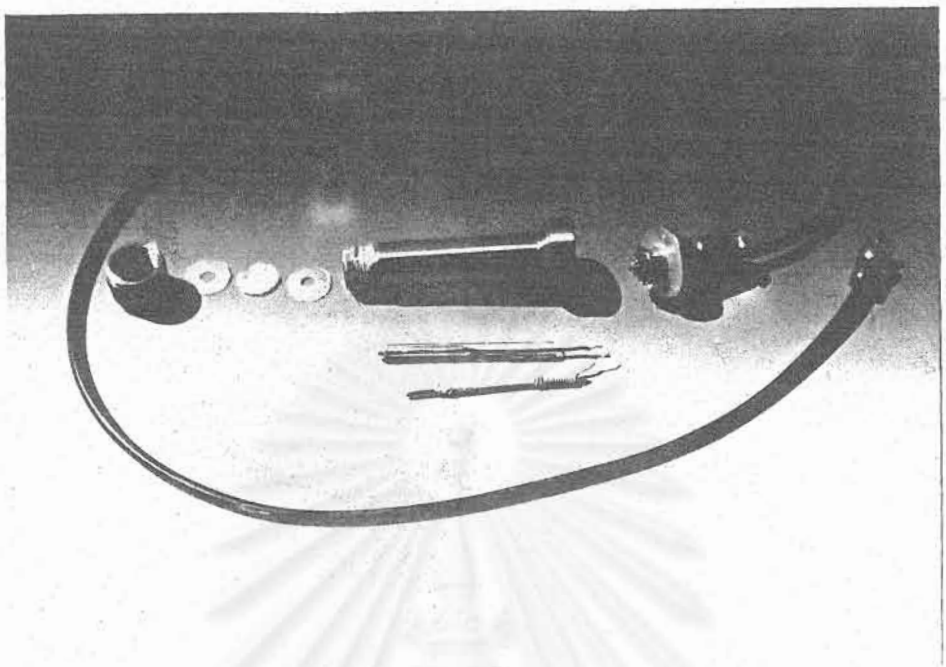
รูปที่ 3.6 แผ่นฟิล์มสงผ่านออกซิเจนที่ทำจากเทฟรอนหนา 50 ไมโครเมตร

3.3 การประกอบหัววัดออกซิเจน

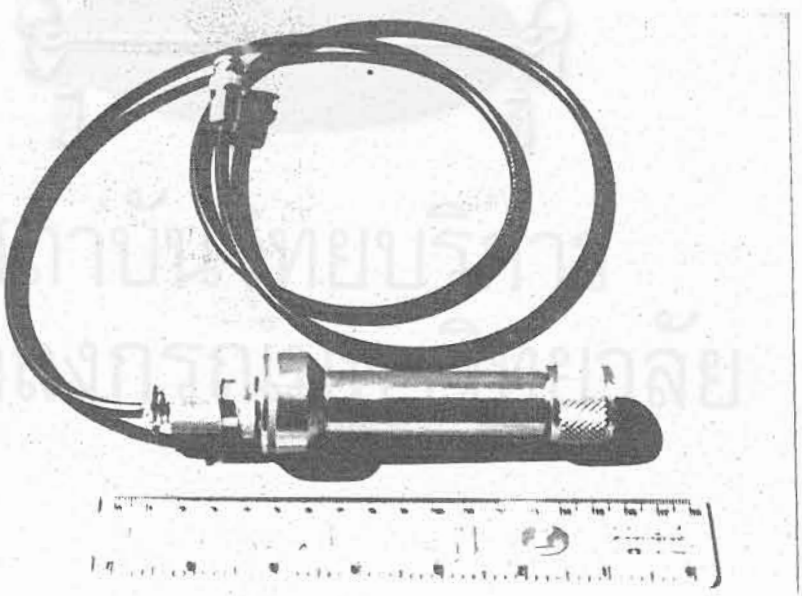
เมื่อได้ส่วนต่าง ๆ ข้างต้นแล้วนำมาประกอบรวมเข้าด้วยกันก็จะได้หัววัดออกซิเจนขึ้น โครงของหัววัดออกซิเจนที่ใช้ในการยึดขั้วคาโทด อาโนด และแผ่นฟิล์มส่งผ่านออกซิเจน และใช้ใส่อิเล็กโตรไลต์นั้นทำขึ้นมาจากท่อสเตนเลส เพื่อให้มีความแข็งแรงและทนทานต่อการใช้งานตามจุดประสงค์ที่ตั้งไว้ รูปที่ 3.7 ถึง 3.9 แสดงลักษณะของหัววัดออกซิเจนที่ก่อนและหลังประกอบ และรูปที่ 3.10 แสดงภาพรวมของระบบวัดที่ประกอบด้วยหัววัดและเครื่องวัดออกซิเจน รูปที่ 3.12 แสดงภาพของหัววัดที่พัฒนาขึ้นเมื่อเทียบกับหัววัดที่เป็นของขาย



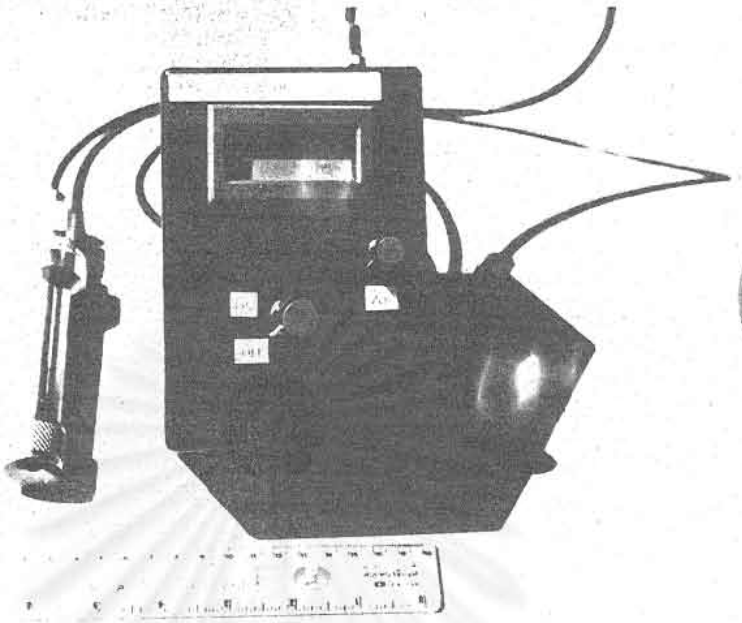
รูปที่ 3.7 หัววัดออกซิเจนก่อนประกอบแบบใช้ขั้วอาโนดที่ทำจากดีบุก



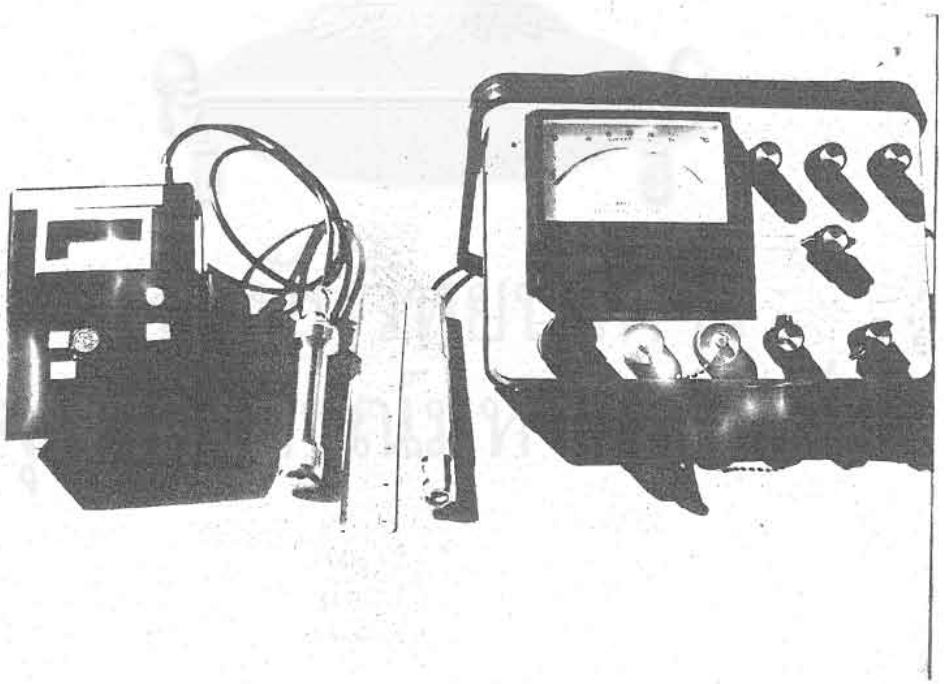
รูปที่ 3.8 หัววัดออกซิเจนก่อนประกอบ(แบบใช้ขั้วอาโนดที่ทำจากซิลเวอร์-ซิลเวอร์คลอไรด์)



รูปที่ 3.9 หัววัดออกซิเจนหลังประกอบ



รูปที่ 3.10 ภาพรวมของระบบวัดที่ประกอบด้วยหัววัดและเครื่องวัดออกซิเจน



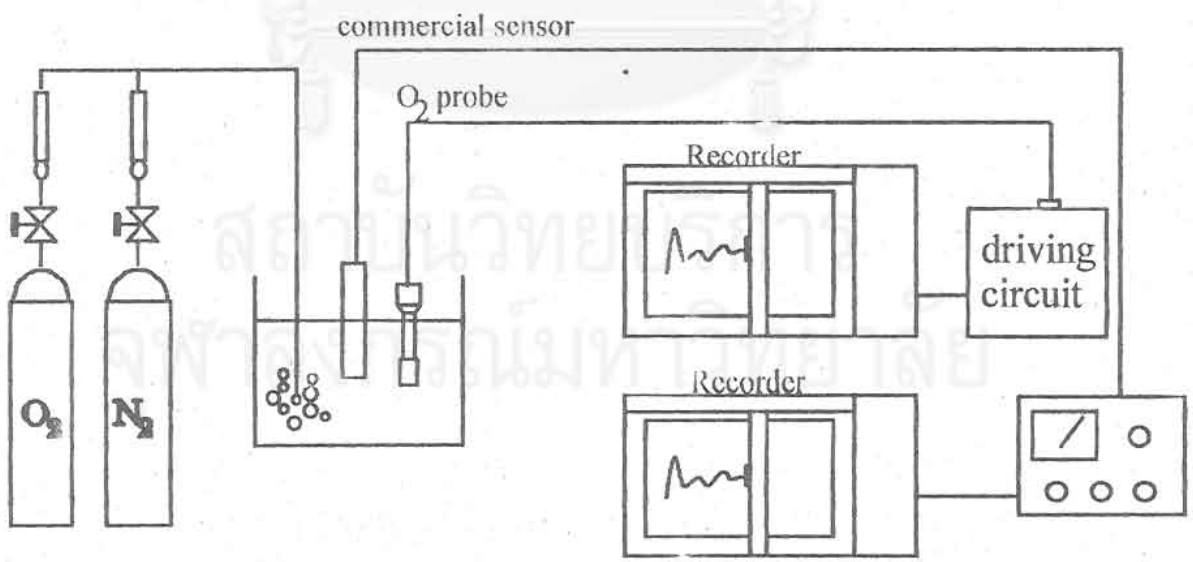
รูปที่ 3.11 ภาพของหัววัดที่พัฒนาขึ้นเมื่อเทียบกับหัววัดที่เป็นของขาย(YSI model 57)

บทที่ 4 ลักษณะสมบัติของหัววัดออกซิเจน

ในบทนี้จะกล่าวถึงการทดสอบลักษณะสมบัติด้านต่าง ๆ ของหัววัดออกซิเจนแบบบัลก์ที่ได้พัฒนาขึ้น โดยได้ทำการเปรียบเทียบกับหัววัดออกซิเจนที่เป็นของขาย เพื่อที่จะได้เปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียของหัววัดทั้งสอง

4.1 ระบบวัดและทดสอบลักษณะสมบัติของหัววัดออกซิเจน

รูปที่ 4.1 แสดงบล็อกไดอะแกรมของระบบที่ใช้ในการวัดและทดสอบหัววัดออกซิเจนที่พัฒนาขึ้น ซึ่งจะประกอบด้วยถังก๊าซไนโตรเจนและออกซิเจนบริสุทธิ์(99.9% จากบริษัท TIG) ก๊าซทั้ง 2 ชนิดจะถูกปรับความดันขาออกเป็นราว 1.5 Kg/cm^2 และส่งไปยังโฟล์วมิเตอร์เพื่อทำการปรับอัตราการไหลของก๊าซทั้งสอง ก๊าซทั้งสองจะถูกผสมกันเพื่อให้ได้ความเข้มข้นของออกซิเจนตามที่ต้องการ จากนั้นจึงจะส่งผ่านไปยังอ่างทดสอบที่มีสารละลายตัวอย่างอยู่ การวัดลักษณะสมบัติของหัววัดออกซิเจนจะทำการวัดเปรียบเทียบกับหัววัดออกซิเจนที่เป็นของขาย ซึ่งในที่นี้ใช้หัววัดออกซิเจนของบริษัท Yellow Spring Instrument. รุ่น YSI-57 ผลการตอบสนองของหัววัดทั้งสองชนิดจะถูกส่งไปเพื่อบันทึกผลการตอบสนองที่เครื่องบันทึกผลแบบกระดาษ รูปที่ 4.2 แสดงภาพของระบบที่ใช้ในการทดสอบ



รูปที่ 4.1 บล็อกไดอะแกรมของระบบที่ใช้ในการวัดและทดสอบหัววัดออกซิเจนที่พัฒนาขึ้น

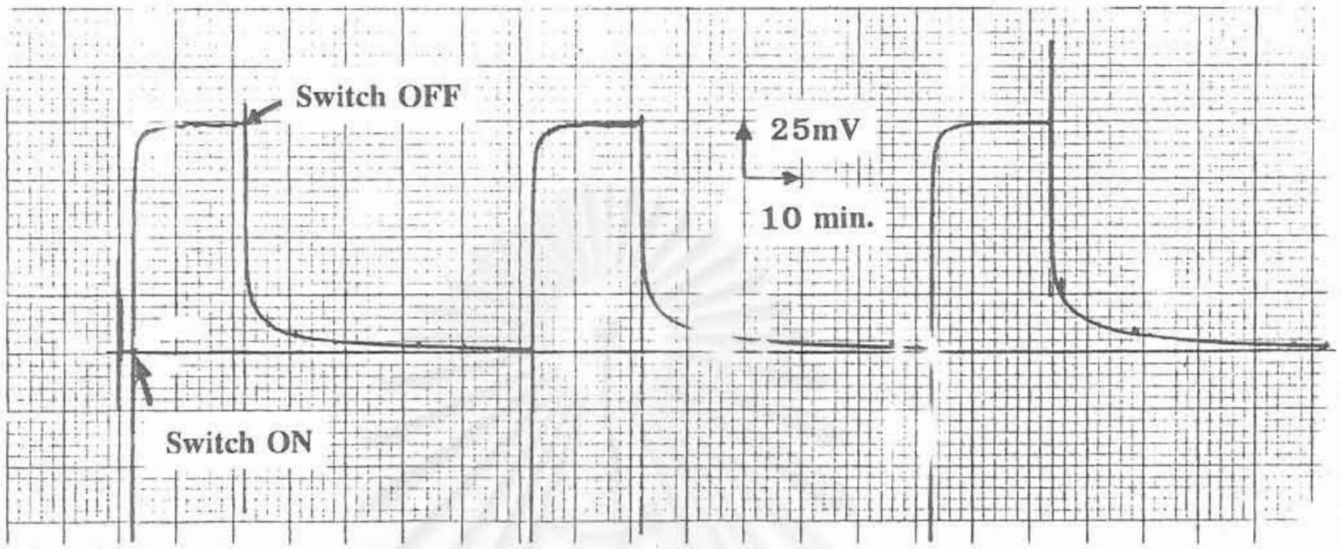
รูปที่ 4.2 ระบบที่ใช้ในการวัดและทดสอบหัววัดออกซิเจนที่พัฒนาขึ้น

4.2 การเข้าสู่จุดเสถียรภาพ(warm up)ของหัววัดออกซิเจน

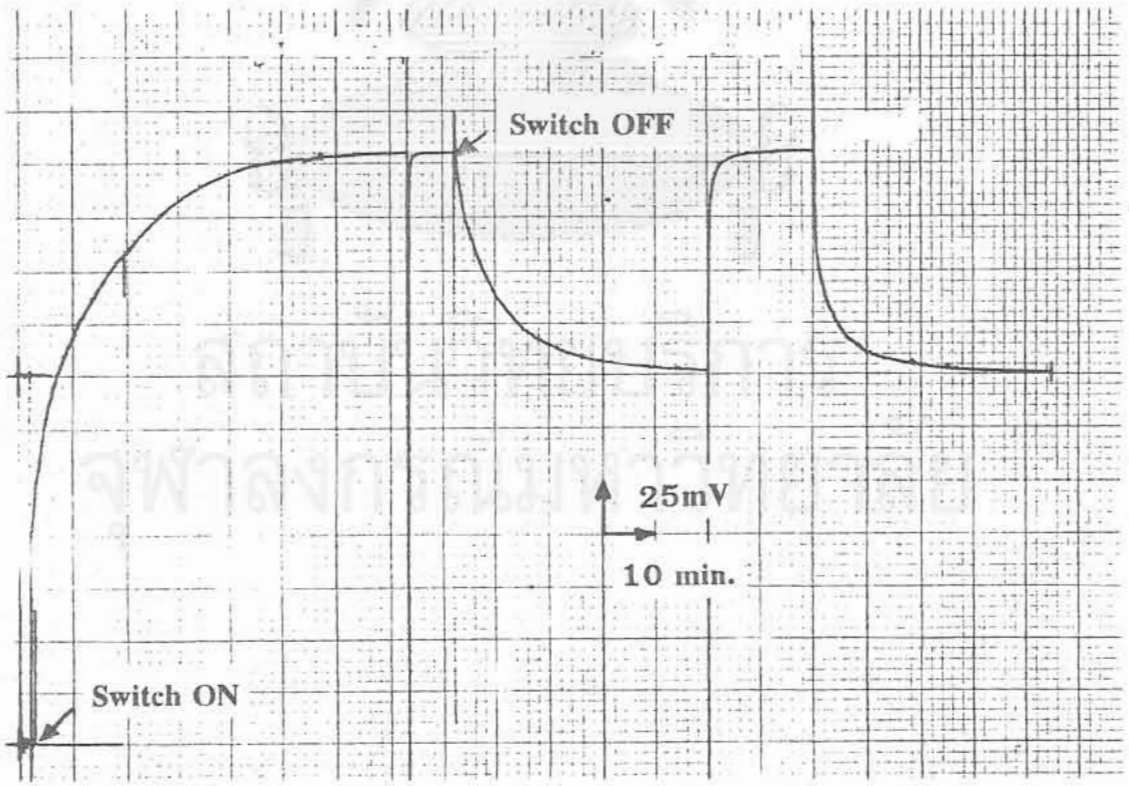
ได้ทำการทดสอบลักษณะสมบัติในการเข้าสู่จุดเสถียรภาพของหัววัดออกซิเจน หรืออาจจะเรียกง่ายๆ ว่า การทดสอบเวลาที่จำเป็นในการอุ่นเครื่องของหัววัดออก จน หัววัดออกซิเจนที่ใช้ในการทดลองนี้เป็นแบบที่มีขั้วดีบุกเป็นขั้วอาโนด การทดสอบได้ทำ 2 ลักษณะคือ ทำการเก็บหัววัดที่พัฒนาขึ้นในสารละลายที่ไม่มีออกซิเจน และในสารละลายน้ำบริสุทธิ์ที่ไม่มีการควบคุมออกซิเจน จากนั้นจึงทำการเปิดสวิทเครื่องวัดเพื่อดูการตอบสนองของหัววัดว่าจะใช้เวลาในการเข้าจุดเสถียรภาพในการวัดเป็นอย่างไร รูปที่ 4.3 แสดงลักษณะการตอบสนองของหัววัดที่พัฒนาขึ้นเมื่อทำการเก็บไว้ในสารละลายที่ไม่มีออกซิเจน และรูปที่ 4.4 แสดงลักษณะการตอบสนองของหัววัดที่พัฒนาขึ้นเมื่อทำการเก็บไว้ในสารละลายที่ไม่มีการควบคุมปริมาณออกซิเจน จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่าหัววัดออกซิเจนที่ทำการเก็บรักษาไว้ในสารละลายที่ไม่มีออกซิเจนจะใช้เวลาในการเข้าสู่จุดเสถียรภาพได้เร็วกว่าหัววัดที่เก็บรักษาไว้ในสารละลายที่ไม่มีการควบคุม โดยจะใช้เวลาเพียง 20 นาที ในขณะที่ไม่มีการควบคุมความเข้มข้นของออกซิเจนจะใช้เวลาประมาณ 80 นาที ส่วนเวลาที่สัญญาณของเครื่องวัดลดลง ป็นศูนย์ภายหลังการปิดสวิทจะใช้เวลาเท่ากันคือประมาณ 50 นาที (ตารางที่ 4.1) ซึ่งเป็นการแสดงให้เห็นว่าการเก็บรักษาหัววัดออกซิเจนที่ไม่ได้ใช้ในสารละลายที่ไม่มีออกซิเจนจะมีประโยชน์ในการประหยัดเวลาเมื่อต้องการนำหัววัดที่เก็บเอาไว้เป็นเวลานาน ไปใช้งาน สาเหตุที่เป็นเช่นนี้สามารถอธิบายได้ดังนี้ การเก็บหัววัดออกซิเจนไว้ในสารละลายที่ไม่มีออกซิเจนเลยนั้น จะทำให้ออกซิเจนที่มีค้างค้างอยู่ในสารละลายอิเล็กโตรไลต์ภายในถูกดูดออกซิเจนไปจนหมด และทำให้หัววัดอยู่ในสภาพที่ใกล้จุดเสถียรภาพอยู่เสมอและพร้อมที่จะทำการวัด ในขณะที่หัววัดที่ทำการเก็บไว้ในสารละลายที่ไม่มีการควบคุมออกซิเจนนั้นจะมีออกซิเจนละลายอยู่ในสารละลายนั้นอยู่ตลอดเวลา ซึ่งออกซิเจนเหล่านี้จะแพร่เข้าไปยังสารละลายอิเล็กโตรไลต์ภายในทำให้สารละลายอิเล็กโตรไลต์ภายใน ีออกซิเจนอยู่ ซึ่งเมื่อจะทำการวัดก็จะเ ดการแพร่ของออกซิเจนที่อยู่ภายในสารละลาย

พยสมุทการ ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

อิเล็กโตรไลต์และออกซิเจนที่มีอยู่ในสารละลายตัวอย่างจนกว่าจะเข้าสู่จุดสมดุล ซึ่งทำให้เกิดความล่าช้าในการเข้าสู่จุดเสถียรภาพ



รูปที่ 4.3 ลักษณะการตอบสนองของหัววัดที่พัฒนาขึ้นเมื่อทำการเก็บไว้ในสารละลายที่ไม่มีออกซิเจน



ปที่ 4.4 ลักษณะการตอบสนองของหัววัดที่พัฒนาขึ้นเมื่อทำการเก็บไว้ใ สารละลายที่ไม่มีการควบคุมปริมาณออกซิเจน

ตารางที่ 4.1 การเปรียบเทียบเวลาเข้าสู่จุดเสถียรในการเก็บรักษาในสภาวะที่แตกต่างกัน

สภาวะที่เก็บรักษา	เวลาที่ใช้ในการเข้าสู่จุดเสถียรภายหลังเปิดเครื่อง	เวลาที่ใช้ในการเข้าสู่จุดเสถียรภายหลังปิดเครื่อง
สภาวะที่ไม่มีออกซิเจนในสารละลาย	ประมาณ 20 นาที	ประมาณ 50 นาที
สภาวะที่ไม่มีการควบคุมออกซิเจนในสารละลาย	ประมาณ 80 นาที	ประมาณ 50 นาที

4.3 การศึกษาความเสถียรภาพของหัววัดออกซิเจน

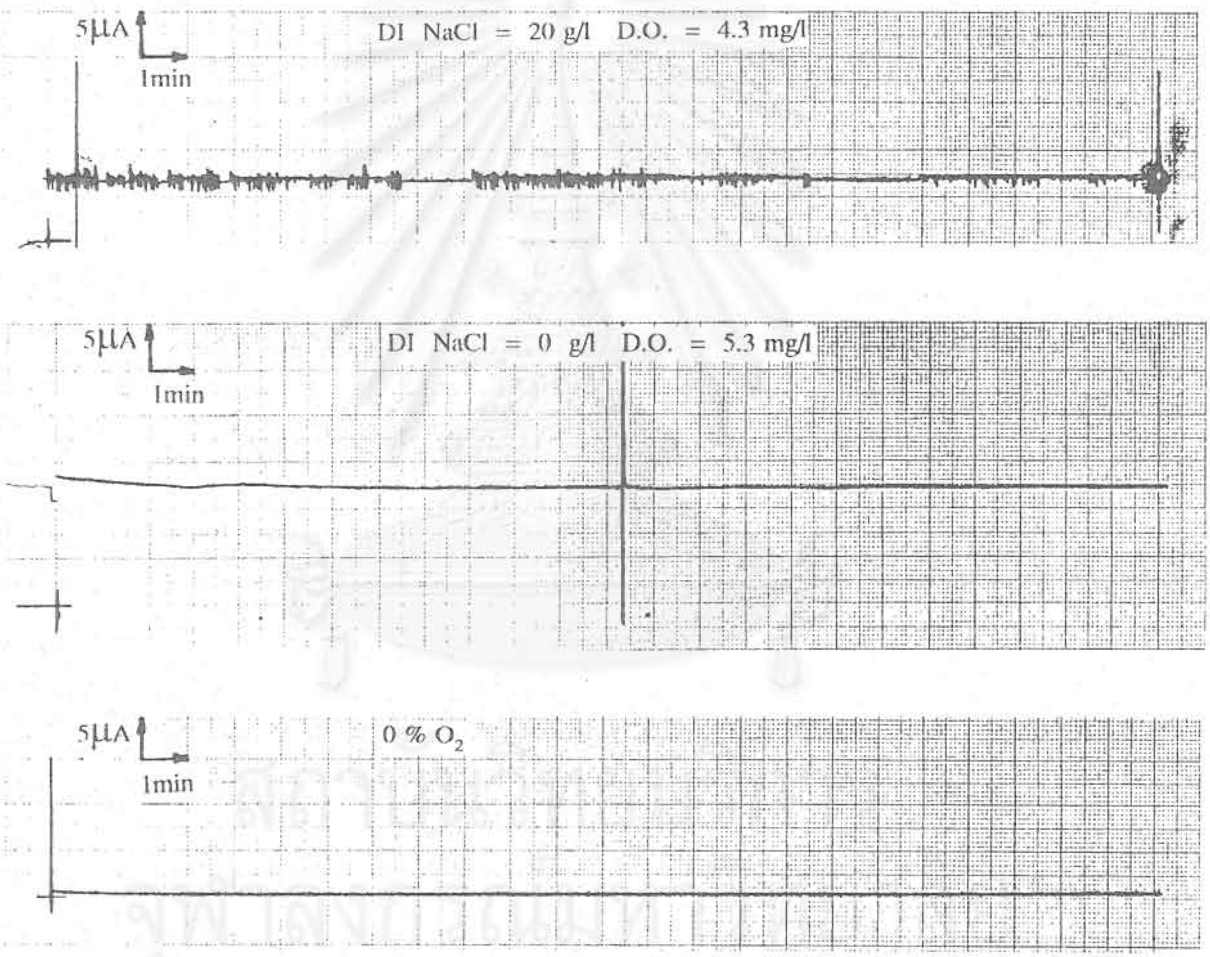
ได้ทำการศึกษาความเสถียรภาพของหัววัดออกซิเจน 2 วิธีคือ ศึกษาความเสถียรภาพในช่วงระยะเวลาสั้นๆ และช่วงระยะเวลายาว การทดสอบนั้นได้ทำภายใต้การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของอิออนที่มีอยู่ในสารละลาย ซึ่งในที่นี้ใช้เกลือโซเดียมคลอไรด์ ทั้งนี้เพราะต้องการที่จะจำลองสภาพแวดล้อมของการวัดที่เป็นน้ำทะเล

4.3.1 ความเสถียรภาพระยะสั้น

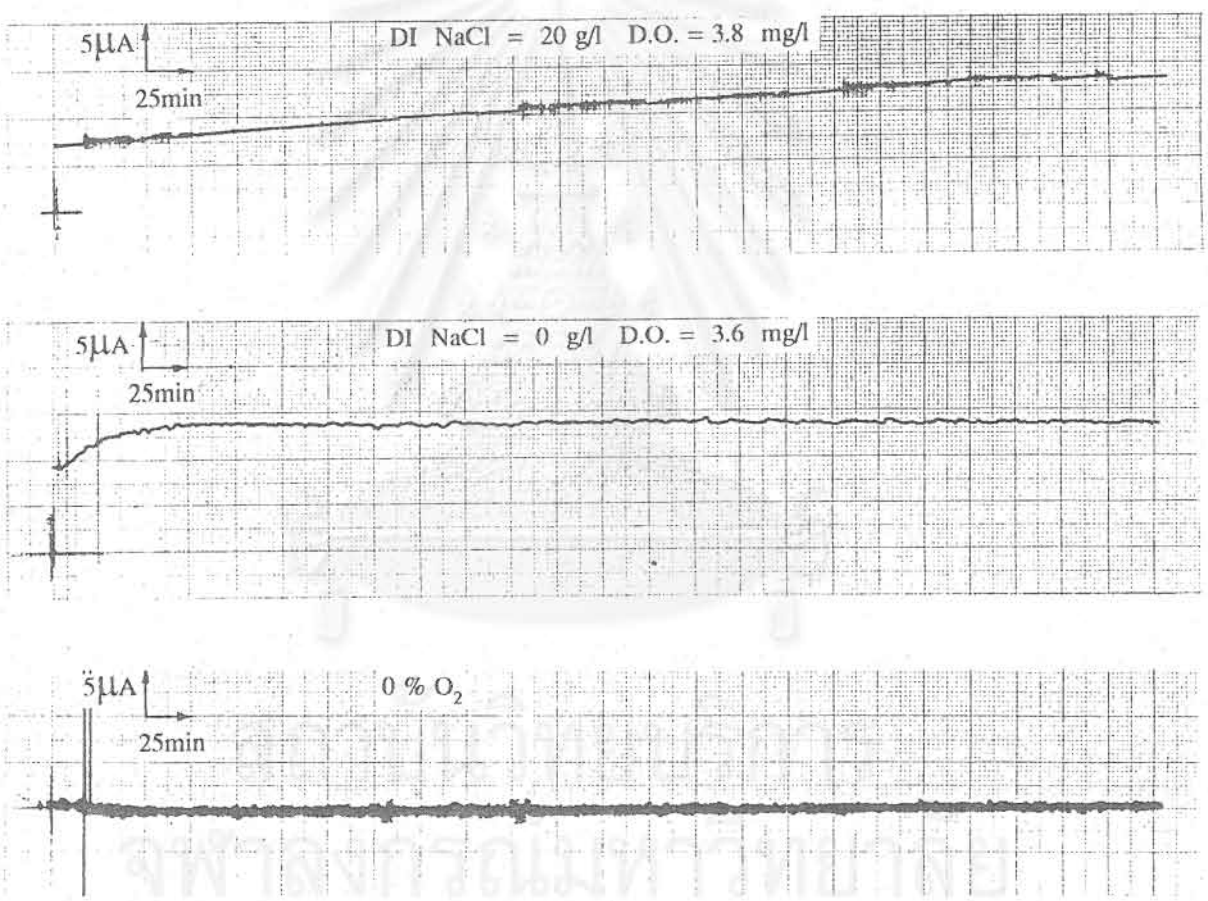
รูปที่ 4.5 แสดงความเสถียรภาพระยะสั้นของหัววัดออกซิเจนที่พัฒนาขึ้น โดยทำการทดสอบในสภาพแวดล้อมต่างๆ กันดังนี้ a) ในน้ำปราศจากอิออนที่ไม่มีออกซิเจน b) ในน้ำที่มีไม่มีเกลือโซเดียมคลอไรด์(มีออกซิเจนละลายอยู่ 5.3 mg/L) และ c) ในน้ำที่มีเกลือโซเดียมคลอไรด์ละลายอยู่ 20 g/L (ซึ่งประมาณได้กับสภาพของน้ำทะเล)(มีออกซิเจนละลายอยู่ 4.3 mg/L) จากผลการทดสอบทั้ง 3 วิธี จะเห็นได้ว่าหัววัดออกซิเจนที่พัฒนาขึ้นนี้มีค่าการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าตามเวลาในระดับที่ต่ำ ซึ่งเป็นการแสดงว่าหัววัดนี้มีความเสถียรภาพระยะสั้นดีในสภาพแวดล้อมต่างๆ กัน

4.3.2 ความเสถียรภาพระยะยาว

รูปที่ 4.6 แสดงผลการทดสอบความเสถียรภาพระยะยาวของหัววัดที่พัฒนาขึ้น โดยทำการทดสอบเช่นเดียวกับการทดสอบความเสถียรภาพระยะสั้น กล่าวคือทำการเปลี่ยนสภาพแวดล้อมที่ใช้ในการวัด โดย a) ในน้ำปราศจากอิออนที่ไม่มีออกซิเจน b) ในน้ำที่มีไม่มีเกลือโซเดียมคลอไรด์ (มีออกซิเจนละลายอยู่ 3.6 mg/L) และ c) ในน้ำที่มีเกลือโซเดียมคลอไรด์ละลายอยู่ 20 g/L (มีออกซิเจนละลายอยู่ 3.8 mg/L) จากผลการทดสอบทั้ง 3 วิธี จะเห็นได้ว่าในกรณีที่ในสารละลายไม่มีเกลือละลายอยู่ หัววัดออกซิเจนที่พัฒนาขึ้นนี้จะมีค่าการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าตามเวลาในระดับที่ต่ำ แต่หากในสารละลายที่ทำการวัดมีเกลือละลายอยู่ในระดับความเข้มข้นสูงจะมีผลทำให้หัววัดที่พัฒนาขึ้นไม่ค่อยมีความเสถียรภาพ จากรูปจะเห็นได้ว่ากระแสไฟฟ้าที่วัดได้ในกรณีที่มีเกลือละลายอยู่สูงจะมีค่ากระแสไฟฟ้าสูงขึ้นตามเวลา ลักษณะเช่นนี้อาจจะอธิบายได้ว่าเกิดจากการที่สารละลายเกลือที่มีอยู่ในสารตัวอย่าง ค่อยๆ แพร่ผ่านแผ่นฟิล์มส่งผ่านออกซิเจนเข้าไปยังสารละลายอิเล็กโตรไลต์ที่อยู่ภายใน ทำให้สภาพความนำ



รูปที่ 4.5 ความเสถียรภาพของหัววัดออกซิเจนระยะสั้น ที่ 24±1 องศาเซลเซียส
a) ในน้ำปราศจากอิออนที่ไม่มีออกซิเจน
b) ในน้ำที่มีไม่มีเกลือโซเดียมคลอไรด์(มีออกซิเจนละลายอยู่ 5.3 mg/L)
c) ในน้ำที่มีเกลือโซเดียมคลอไรด์ละลายอยู่ 20 g/L)(มีออกซิเจนละลายอยู่ 4.3 mg/L)



รูปที่ 4.6 ความเสถียรภาพของหัววัดออกซิเจนระยะยาว ที่ 24±1 องศาเซลเซียส

a) ในน้ำปราศจากอิออนที่ไม่มีออกซิเจน

b) ในน้ำที่มีไม่มีเกลือโซเดียมคลอไรด์ (มีออกซิเจนละลายอยู่ 3.6 mg/L)

c) ในน้ำที่มีเกลือโซเดียมคลอไรด์ละลายอยู่ 20 g/L (มีออกซิเจนละลายอยู่ 3.8 mg/L)

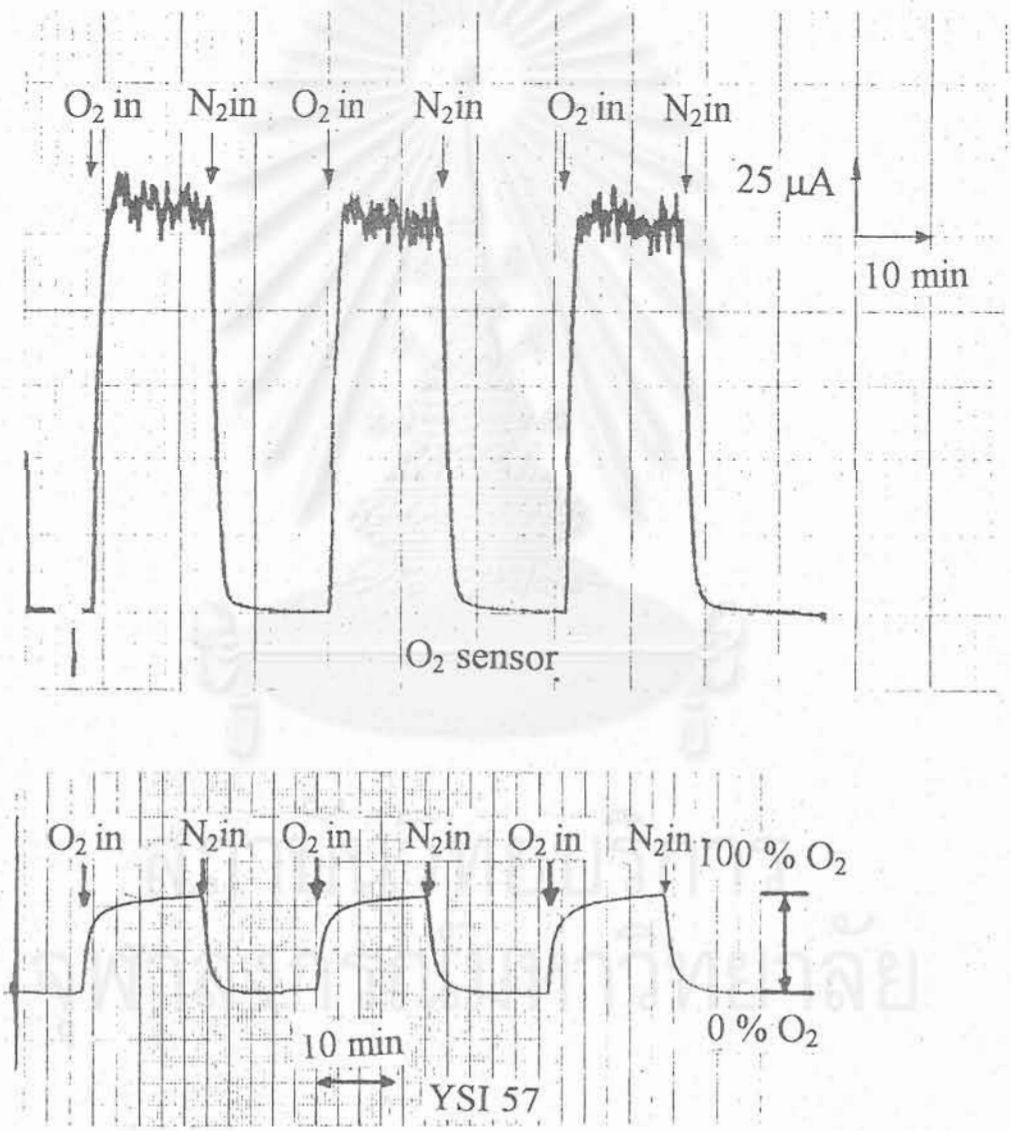
ไฟฟ้าของสารละลายภายในมีค่าสูงขึ้น เป็นเหตุให้ค่ากระแสไฟฟ้าสูงขึ้นเรื่อยๆ ตามเวลา ซึ่งคิดค่าการเปลี่ยนแปลงได้เป็น 1.2 ไมโครแอมแปร์ต่อชั่วโมง ดังนั้นจึงจำเป็นจะต้องระมัดระวังในกรณีที่จะนำไปใช้ในสภาวะที่มีความเข้มข้นของเกลือสูง เช่นกรณีของน้ำทะเล

4.4 ความไวในการตอบสนองของหัววัดออกซิเจน

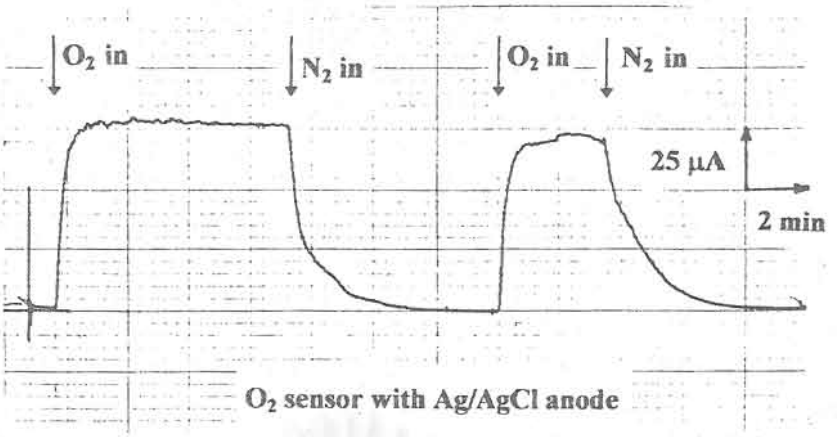
ได้ทำการทดสอบความไวในการตอบสนองของหัววัดออกซิเจนที่พัฒนาขึ้นเมื่อเทียบกับเครื่อง YSI-51 การทดสอบทำโดยให้หัววัดทั้งสองอยู่ในสภาพสมดุลที่ไม่มีออกซิเจนก่อน จากนั้นจึงทำการปล่อยออกซิเจนลงไปในระบบวัด และทำการบันทึกการตอบสนองของหัววัดทั้งสอง รูปที่ 4.7 และ 4.8 แสดงลักษณะการตอบสนองของหัววัดออกซิเจนที่พัฒนาขึ้นแบบขั้วดีบุกเป็นขั้วอาโนด และหัววัดออกซิเจนแบบขั้วซิลเวอร์-ซิลเวอร์คลอไรด์เป็นขั้วอาโนดเมื่อเทียบกับเครื่อง YSI-57 จากผลการทดลองพบว่า เมื่อทำการเพิ่มความเข้มข้นของออกซิเจน หัววัดออกซิเจนแบบขั้วดีบุกเป็นขั้วอาโนดจะมีความไวในการตอบสนองขาขึ้น(rise time)ประมาณ 85 วินาที หัววัดออกซิเจนแบบขั้วซิลเวอร์-ซิลเวอร์คลอไรด์เป็นขั้วอาโนดจะมีความไวในการตอบสนองขาขึ้น(rise time)ประมาณ 105 วินาที ในขณะที่หัววัดของเครื่อง YSI-57 และหัววัดออกซิเจนแบบฟิล์มบาง[9]จะใช้เวลาประมาณ 230 วินาที และ 70 วินาที ตามลำดับ ส่วน ความไวในการตอบสนองขาลง(fall time)ของหัววัดออกซิเจนแบบบัลก์ในขณะที่ลดความเข้มข้นของออกซิเจนแบบขั้วดีบุกจะมีค่าประมาณ 110 วินาที และแบบขั้วซิลเวอร์-ซิลเวอร์คลอไรด์จะมีค่าประมาณ วินาที ในขณะที่หัววัดของเครื่อง YSI-57 และหัววัดออกซิเจนแบบฟิล์มบางจะใช้เวลาประมาณ 170 วินาที และ >300 วินาที ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นได้ว่าหัววัดออกซิเจนที่พัฒนาขึ้นในลักษณะแบบบัลก์จะมีความไวในการตอบสนองขาขึ้นเร็วกว่าหัววัดของเครื่อง YSI-57 แต่ช้ากว่าหัววัดออกซิเจนที่พัฒนาขึ้นในลักษณะของแผ่นฟิล์มบางเพียงเล็กน้อย ส่วนการตอบสนองในขาลงนั้นหัววัดออกซิเจนที่พัฒนาขึ้นในลักษณะแบบบัลก์จะมีความไวในการลดลงเร็วกว่าของทั้ง YSI-57 และหัววัดออกซิเจนแบบฟิล์มบาง

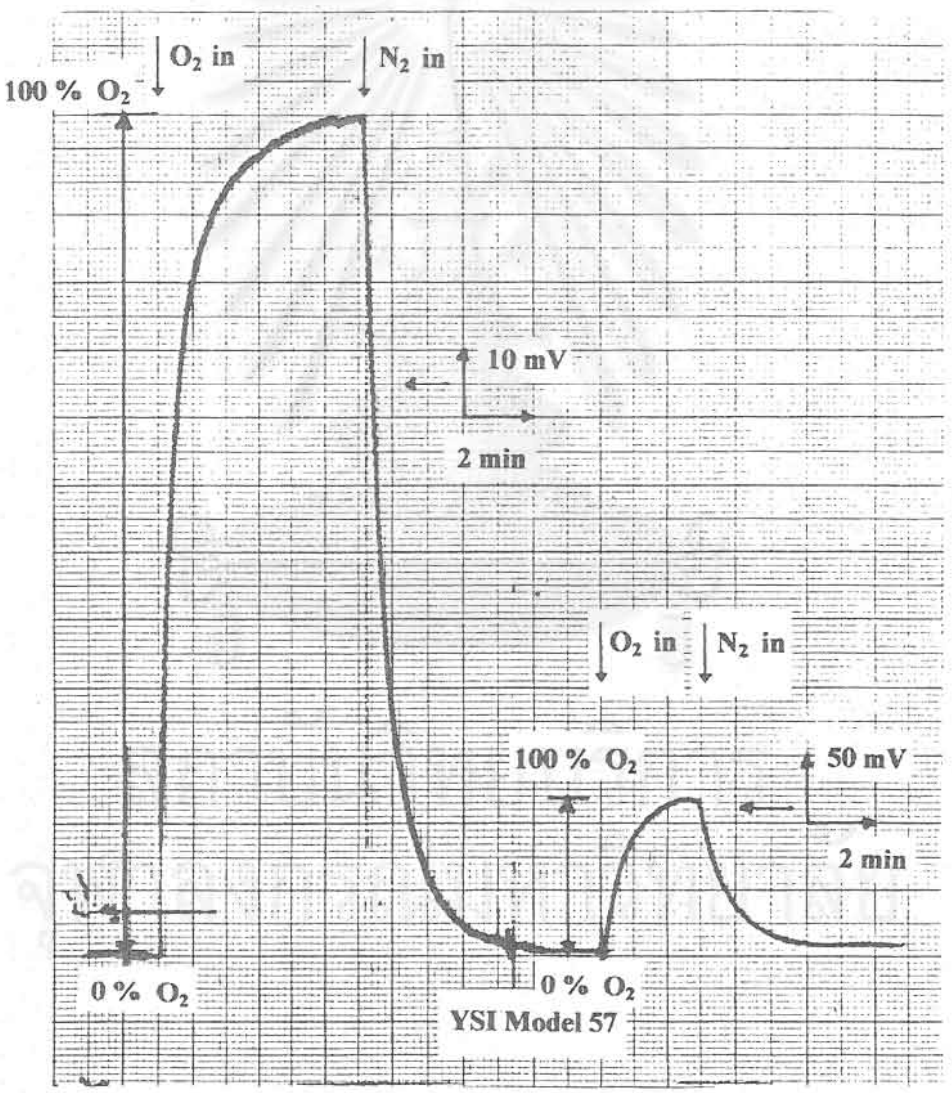
ตารางที่ 4.2 เปรียบเทียบความไวในการตอบสนองของหัววัดออกซิเจนชนิดต่างๆ

ชนิดของหัววัดออกซิเจน	เวลาขาขึ้นจาก 0-100%(วินาที)	เวลาขาลงจาก 100-0%(วินาที)
แบบบัลก์ที่มีขั้วดีบุกเป็นอาโนด	85	110
แบบบัลก์ที่มีขั้วซิลเวอร์คลอไรด์เป็นอาโนด	105	105
แบบฟิล์มบาง	70	170
YSI model 57	230	>300



รูปที่ 4.7 ลักษณะการตอบสนองของหัววัดออกซิเจนแบบที่มีขั้วดีบุกเป็นอาโนดเทียบกับเครื่อง YSI-57 ที่ 24±1 องศาเซลเซียส



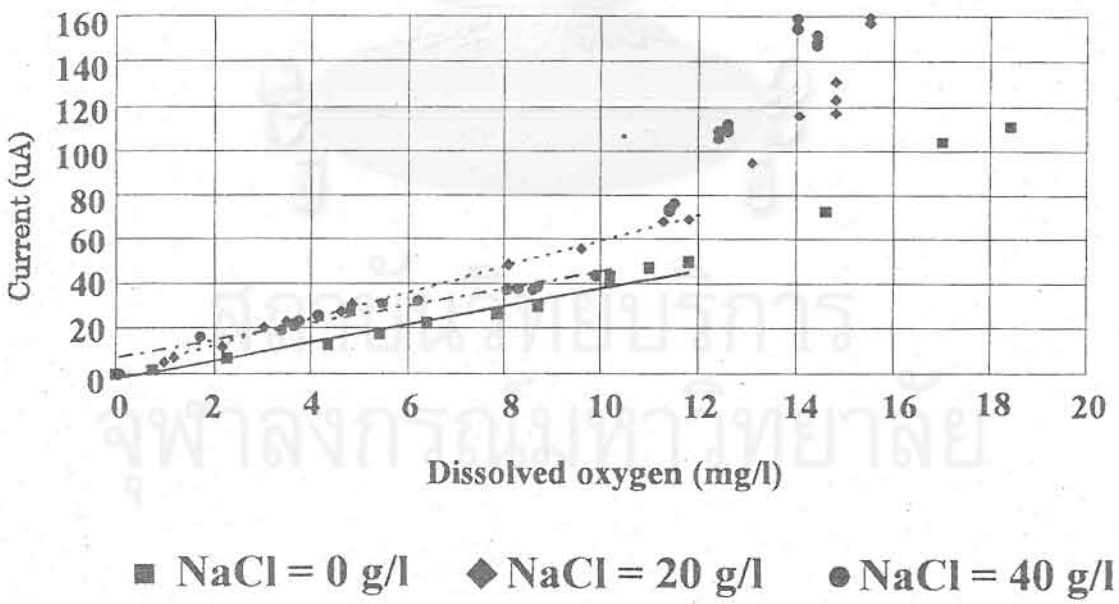


รูปที่ 4.8 ลักษณะการตอบสนองของหัววัดออกซิเจนแบบที่มีขั้วซิลเวอร์-ซิลเวอร์คลอไรด์เป็นอาโนด เทียบกับเครื่อง YSI-57 ที่ 24±1 องศาเซลเซียส

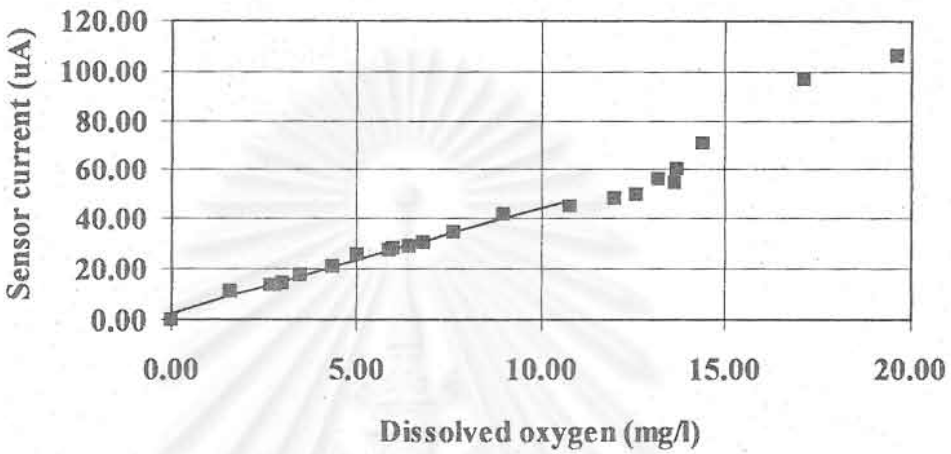
4.5 กราฟมาตรฐานของหัววัดออกซิเจน

เพื่อทำการทดสอบช่วงการทำงานของหัววัดออกซิเจนแบบบัลก์ที่พัฒนาขึ้นได้ทำการปรับความเข้มข้นของออกซิเจนในสารละลายตัวอย่าง โดยการปรับอัตราการไหลของก๊าซออกซิเจนและก๊าซไนโตรเจนในสัดส่วนที่แตกต่างกันโดยให้ได้ค่าความเข้มข้นของออกซิเจนในสารละลายอยู่ในช่วง 0-20 mg/L โดยสารละลายตัวอย่างที่ใช้นั้นได้ทำการทดลองเปลี่ยนความเข้มข้นของเกลือโซเดียมคลอไรด์ 3 ระดับคือ 0, 20 และ 40 g/L เพื่อเป็นการจำลองสภาพการวัดออกซิเจนในน้ำบริสุทธิ์และน้ำทะเล รูปที่ 4.8 แสดงตัวอย่างของเส้นกราฟปรับเทียบที่ได้จากผลการทดสอบโดยใช้หัววัด YSI-57 เป็นตัวเปรียบเทียบ

รูปที่ 4.9 และ 4.10 แสดงผลการทดลองที่ได้จากการวัดโดยใช้หัววัดออกซิเจนแบบขั้วดีบุกและขั้วซิลเวอร์-ซิลเวอร์คลอไรด์เป็นขั้วอาโนด ตามลำดับ จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่าหัววัดออกซิเจนแบบบัลก์ทั้งสองแบบที่พัฒนาขึ้นนี้มีความสามารถในการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของออกซิเจนได้ดีในช่วงความเข้มข้นจาก 0-12 mg/L หาก ความเข้มข้นของออกซิเจนในสารละลายตัวอย่างสูงกว่านี้แล้วการวัดจะสูญเสียความเป็นเชิงเส้นตรงไป ส่วนความไว(sensitivity)ของการวัดจะแตกต่างกันบ้างเล็กน้อยหากมีการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของเกลือโซเดียมคลอไรด์ที่มีอยู่ในสารละลายตัวอย่าง โดยมีแนวโน้มว่าหากความเข้มข้นของเกลือโซเดียมคลอไรด์สูงขึ้นจะมีความไวในการวัดที่สูงขึ้นตามไปด้วย ตารางที่ 4.3 แสดงการเปรียบเทียบลักษณะสมบัติความเป็นเชิงเส้นตรงในการวัดของหัววัดออกซิเจนแบบที่มีขั้วดีบุกเป็นขั้วอาโนดในช่วงความเข้มข้นของออกซิเจนจาก 0 - 12 mg/L ในสารละลายต่างๆ และตารางที่ 4.4 แสดงการเปรียบเทียบลักษณะสมบัติความเป็นเชิงเส้นตรงในการวัดของหัววัดออกซิเจนแบบที่มีขั้วซิลเวอร์-ซิลเวอร์คลอไรด์เป็นขั้วอาโนด



รูปที่ 4.9 เส้นกราฟปรับเทียบของหัววัดออกซิเจนแบบที่มีขั้วดีบุกเป็นอาโนด
โดยใช้หัววัด YSI-57 เป็นตัวเปรียบเทียบ ที่ 24±1 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.10 เส้นกราฟปรับเทียบของหัววัดออกซิเจนแบบที่มีขั้วซิลเวอร์-ซิลเวอร์คลอไรด์เป็นอาโนด โดยใช้หัววัด YSI-57 เป็นตัวเปรียบเทียบ ที่ 24±1 องศาเซลเซียส

ตารางที่ 4.3 การเปรียบเทียบลักษณะสมบัติความเป็นเชิงเส้นตรงในการวัดของหัววัดออกซิเจนแบบที่มีขั้วดีบุกเป็นขั้วอาโนดในสารละลายต่างๆ

ชนิดของสารละลายตัวอย่าง	สมการแสดงความสัมพันธ์	ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์
น้ำบริสุทธิ์	Y = -2.263 + 3.998 X	0.9867
น้ำที่มี NaCl 20 g/L	Y = 0.984 + 5.835 X	0.9968
น้ำที่มี NaCl 40 g/L	Y = 7.229 + 3.807 X	0.9698

ตารางที่ 4.4 การเปรียบเทียบลักษณะสมบัติความเป็นเชิงเส้นตรงในการวัดของหัววัดออกซิเจนแบบที่มีขั้วซิลเวอร์-ซิลเวอร์คลอไรด์เป็นขั้วอาโนด

ชนิดของสารละลายตัวอย่าง	สมการแสดงความสัมพันธ์	ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์
น้ำบริสุทธิ์	Y = -1.37 + 4.84 X	0.9748

4.6 ผลของความเข้มข้นของสารละลายอิเล็กโตรไลต์

ดังที่ได้กล่าวมาแล้วในบทที่ 2 ว่าหัววัดออกซิเจนจะทำงานได้ก็ต่อเมื่อมีสารละลายอิเล็กโตรไลต์ที่อยู่ภายในหัววัดเป็นตัวเชื่อมกระแสระหว่างขั้วอาโนดและขั้วคาโทด ดังนั้นเพื่อที่จะศึกษาผลของสารละลายอิเล็กโตรไลต์ที่มีต่อการทำงานของหัววัดออกซิเจน จึงได้ทำการเปลี่ยนความเข้มข้นของสารละลายอิเล็กโตรไลต์ที่ใช้ ซึ่งได้แก่สารละลายโปรแตสเซียมคลอไรด์ โดยเปลี่ยนค่าความเข้มข้น 3 ระดับด้วยกันคือ 0.1 M, 0.25 M และ 0.5 M รูปที่ 4.11 แสดงเส้นกราฟปรับเทียบของหัววัดออกซิเจนที่มีความเข้มข้นของสารละลายอิเล็กโตรไลต์ต่างกัน หัววัดออกซิเจนที่ใช้ในการทดลองนี้ได้ใช้ขั้วอาโนดที่ทำจากดีบุก เพื่อที่จะได้ค่ากระแสไฟฟ้าที่แท้จริงในการวัดจึงจะไม่ทำการปรับค่าออฟเซ็ตที่ความเข้มข้นของออกซิเจนเป็นศูนย์ นอกจากนี้ยังได้ทำการซีลระบบของหัววัดออกซิเจน เพื่อป้องกันไม่ให้มีการละลายของออกซิเจนจากสภาพแวดล้อมลงไปสู่สารละลายอิเล็กโตรไลต์ที่ใช้

ตารางที่ 4.5 แสดงการเปรียบเทียบลักษณะสมบัติความไวและความเป็นเชิงเส้นตรงในการวัดของหัววัดออกซิเจนที่มีความเข้มข้นของสารละลายอิเล็กโตรไลต์ต่างกัน โดยคิดในช่วงที่หัววัดออกซิเจนมีการตอบสนองเป็นเชิงเส้นตรงคือระหว่างค่าความเข้นข้นของออกซิเจนจาก 0 ถึง 12 mg/L

จากการผลการทดลองจะเห็นได้ว่าแม้จะทำการเปลี่ยนค่าความเข้มข้นของสารละลายอิเล็กโตรไลต์ไปลักษณะการตอบสนองของหัววัดออกซิเจนก็ยังมีแนวโน้มคล้ายกัน โดยจะสามารถวัดออกซิเจนได้ดีในช่วงความเข้มข้นของออกซิเจนระหว่าง 0-12 mg/L และจะมีความไวในการวัดที่ไกล้เคียงกัน แม้จะดูเหมือนว่าความไวในการตอบสนองต่อออกซิเจนจะมีแนวโน้มสูงขึ้นเล็กน้อยเมื่อเพิ่มค่าความเข้มข้นของสารละลายอิเล็กโตรไลต์ ซึ่งเป็นการแสดงให้เห็นว่า สารละลายอิเล็กโตรไลต์ไม่เกี่ยวข้องโดยตรงกับการทำปฏิกิริยาในการวัดออกซิเจน หากแต่เมื่อสังเกตุค่ากระแสพื้นหลัง(Back ground current) ของหัววัดออกซิเจนจะเห็นว่ามีค่าสูงขึ้นเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายอิเล็กโตรไลต์ ในจุดนี้สามารถอธิบายได้ว่าเกิดเนื่องจากความนำไฟฟ้าของสารละลายอิเล็กโตรไลต์มีค่าสูงขึ้นเมื่อเพิ่มค่าความเข้มข้นของสารละลายอิเล็กโตรไลต์

ตารางที่ 4.5 การเปรียบเทียบลักษณะสมบัติความไวและความเป็นเชิงเส้นตรงในการวัดของหัววัดออกซิเจนที่มีความเข้มข้นของสารละลายอิเล็กโตรไลต์ต่างกัน

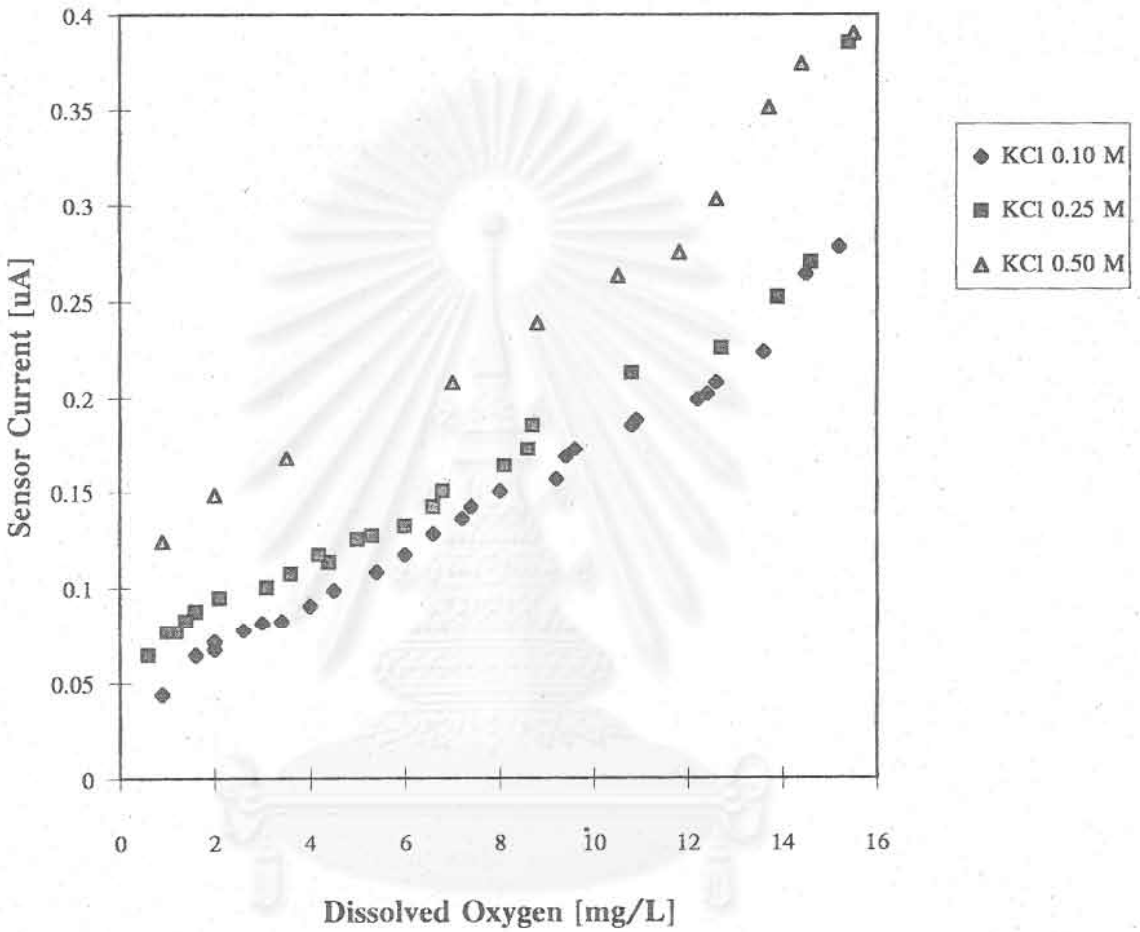
ความเข้มข้นของสารละลายอิเล็กโตรไลต์	สมการแสดงความสัมพันธ์	ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์
KCl 0.10 M	Y = 39.3 + 13.37 X	0.9953
KCl 0.25 M	Y = 58.0 + 13.78 X	0.991
KCl 0.50 M	Y = 114.4 + 14.21 X	0.9924

$y = a + bx$

y : กระแสไฟฟ้าที่วัดได้จากหัววัดออกซิเจน [uA]

x : ความเข้มข้นของออกซิเจนที่ละลายในสารละลาย [mg/L]

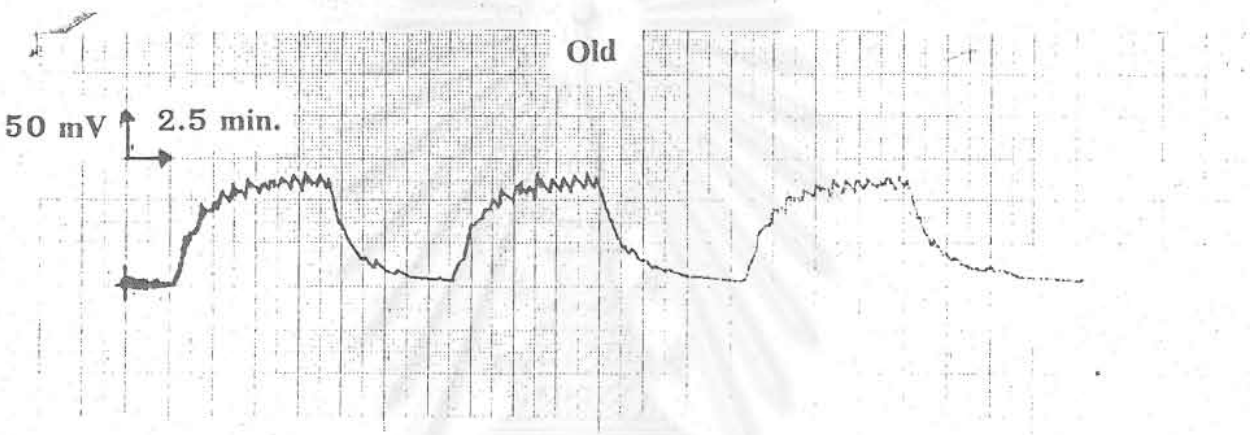
b : ความไวของหัววัดออกซิเจน



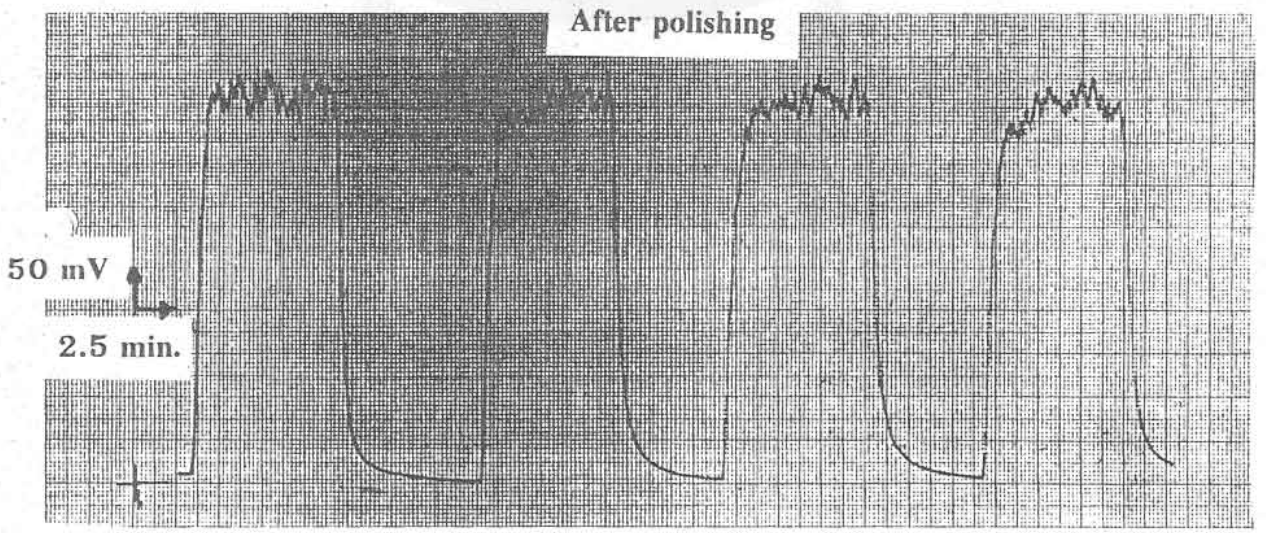
รูปที่ 4.11 เส้นกราฟปรับเทียบของหัววัดออกซิเจนที่มีความเข้มข้นของสารละลายอิเล็กโตรไลต์ (โปแตสเซียมคลอไรด์) 0.1 M, 0.25 M และ 0.5 M ที่ 24+1 องศาเซลเซียส

4.6 การบำรุงรักษาหัววัดออกซิเจนเมื่อเสื่อมสมรรถภาพ

จากหลักการทำงานของหัววัดออกซิเจนที่ได้กล่าวมาแล้วในบทที่ 2 จะเห็นได้ว่าในการวัดออกซิเจนนั้นจะเกิดปฏิกิริยาเคมีที่อิเล็กโทรด โดยจะมีการถ่ายเทอิเล็กตรอนจากขั้วคาโทดและเกิดปฏิกิริยาที่ขั้วอาโนดทำให้ขั้วอาโนดถูกใช้ไปเรื่อยๆ และทำให้สภาพของผิวอาโนดเปลี่ยนสภาพไป และมีผลทำให้ไม่สามารถเกิดปฏิกิริยาได้ดีเหมือนตอนที่ยังใหม่อยู่ ซึ่งจะทำให้ความไวในการวัดสูญเสียไป รูปที่ 4.11 แสดงผลการวัดของหัววัดออกซิเจนที่ใช้ไปนาน ๆ แล้วทำให้ความไวในการตอบสนองช้าและต่ำลง แต่เมื่อทำการขัดผิวอิเล็กโทรดใหม่จะทำให้ความไวในการตอบสนองกลับมาดีขึ้นดังแสดงในรูปที่ 4.12



รูปที่ 4.11 ลักษณะการตอบสนองของหัววัดออกซิเจนเมื่อใช้ไประยะหนึ่ง

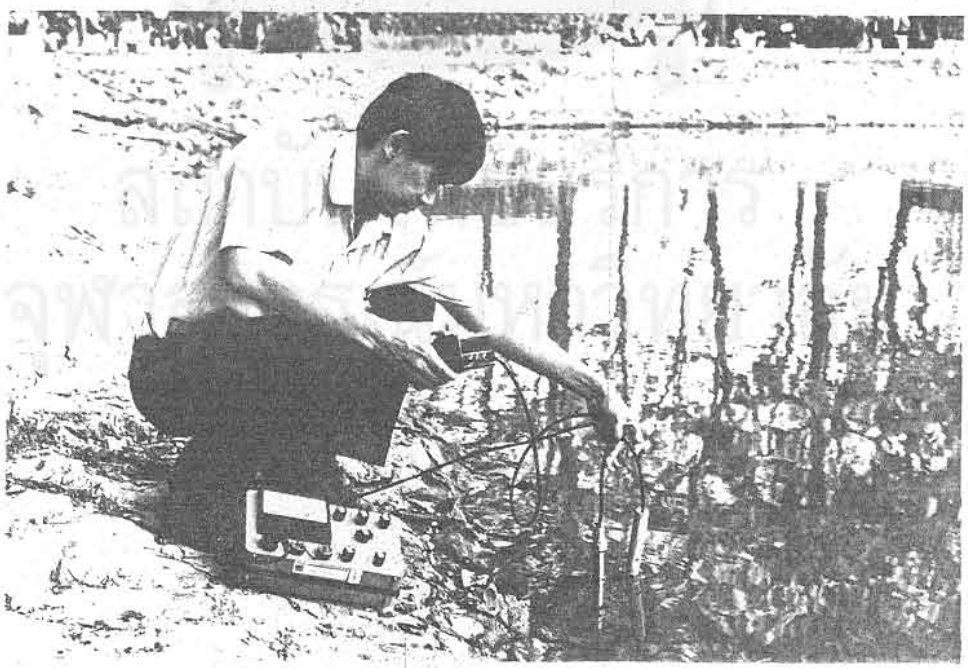


รูปที่ 4.12 ลักษณะการตอบสนองของหัววัดออกซิเจนเมื่อใช้ไประยะหนึ่งแล้วนำมาขัดผิวใหม่

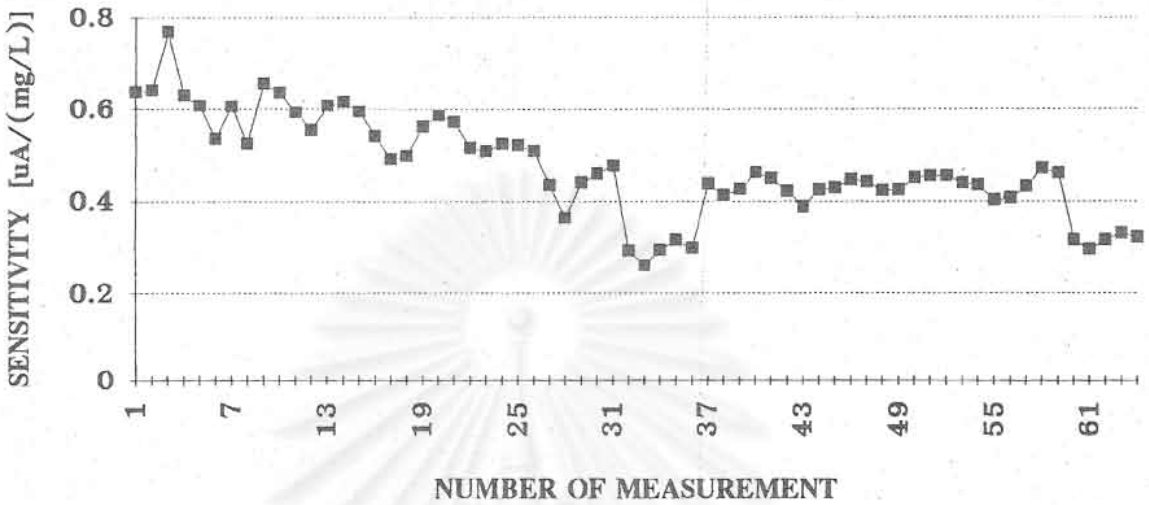
4.7 การทดสอบหัววัดออกซิเจนในภาคสนาม

ได้นำเอาหัววัดออกซิเจนที่พัฒนาขึ้นไปทำการทดสอบวัดในภาคสนามเปรียบเทียบกับหัววัดออกซิเจนที่เป็นของขายของบริษัท Yellow Spring Instrument(YSI) model 57 โดยได้นำไปทดสอบวัดในสระน้ำหน้าจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย รูปที่ 4.13 แสดงภาพในขณะที่ทำการทดสอบ รูปที่ 4.14 แสดงความไวของหัววัดออกซิเจนเมื่อจำนวนครั้งในการวัดเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ โดยได้ทำการวัดทั้งสิ้น 64 จุด จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่าความไวของหัววัดออกซิเจนที่พัฒนาขึ้นนี้มีแนวโน้มที่ตกลงตามเวลาในช่วงการวัดราว 25 ครั้งแรก โดยในช่วงแรกจะมีความไวเป็นประมาณ 0.6 uA/(mg/L O_2) แต่หลังจากนั้นการตอบสนองจะอยู่ในลักษณะที่ค่อนข้างคงที่ กล่าวคือจะมีความไวในการตอบสนองต่อออกซิเจนเป็นประมาณ 0.44 uA/(mg/L O_2) ความไวในการตอบสนองในช่วงนี้จะอยู่ค่อนข้างคงตัวจนกระทั่งการวัดครั้งที่ 60 ซึ่งพบว่าการตอบสนองจะลดลงออย่างรวดเร็วอีกครั้งหนึ่ง ซึ่งภายหลังที่ทำการตรวจเช็คพบว่ามีการรั่วซึมของน้ำจากภายนอกเข้าไปยังหัววัดทำให้การวัดต้องสิ้นสุดลง

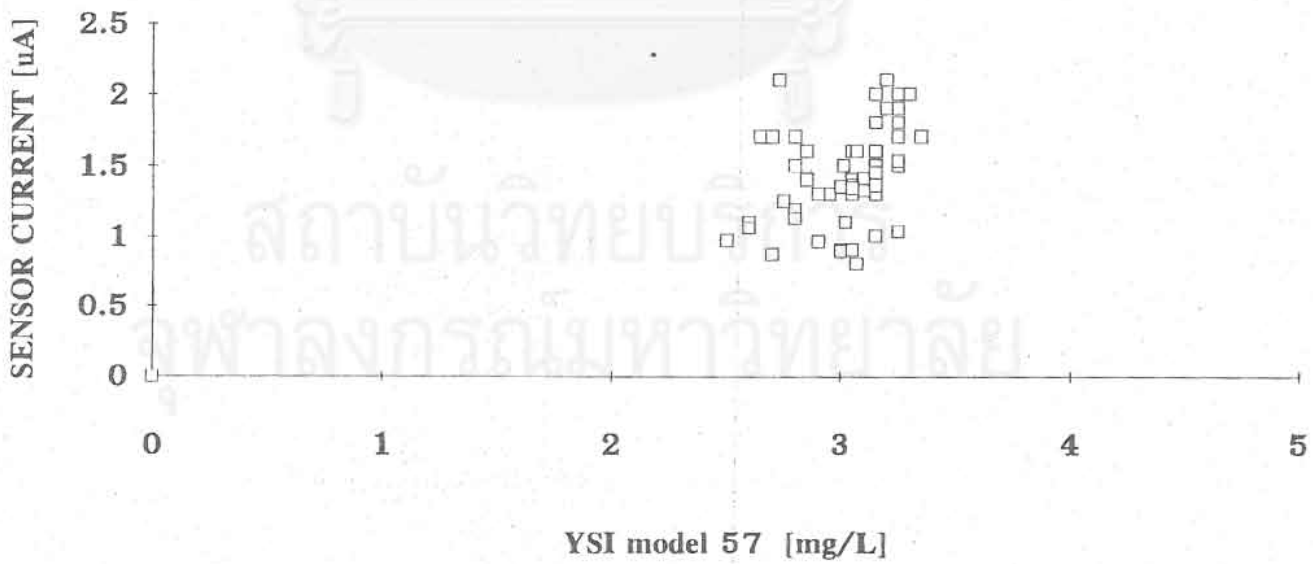
เมื่อนำข้อมูลของการวัดนี้มาหาความสัมพันธ์ระหว่างผลที่ได้จากหัววัดออกซิเจนที่พัฒนาขึ้นกับเครื่อง YSI model 57 จะได้ผลดังรูปที่ 4.15 รูปที่ 4.15 นี้เป็นการนำเอาข้อมูลทั้งหมดที่ได้จากการวัดมาแสดงเข้าไว้รวมกันทั้งหมด ซึ่งจะได้ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างเครื่องวัดทั้งสอง เป็น 0.8900 หากทำการตัดข้อมูลในช่วงแรกของการวัดซึ่งมีการตกลงของสัญญาณ และข้อมูลในช่วงหลังสุดที่ผิดพลาดออกไปแล้ว สามารถเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างเครื่องวัดทั้งสอง ได้ดังรูปที่ 4.16 ซึ่งจะได้ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของทั้งสองเครื่องเป็น 0.9904 ความสัมพันธ์ของการวัดทั้งสองเครื่องสรุปได้ดังตารางที่ 4.5 สาเหตุของความผิดพลาดที่เกิดขึ้นนั้นอาจจะเนื่องมาจาก 1) การขยับเลื่อนของสัญญาณในระหว่างที่ทำการวัด 2) ผลของเกลือที่มีอยู่ในสระน้ำที่ทำให้ความไวในการวัดของหัววัดทั้ง 2 ชนิดเปลี่ยนแปลงไป 3) ผลของอุณหภูมิที่มีต่อหัววัด อันเนื่องจากการระบายความร้อนไม่เท่ากัน เพราะหัววัดออกซิเจนที่พัฒนาขึ้นมีโครงเป็นสเตนเลส ส่วนของขายนั้นเป็นพลาสติก อย่างไรก็ตามค่าความสัมพันธ์ที่ได้นี้มีค่าสูงพอที่จะยอมรับได้



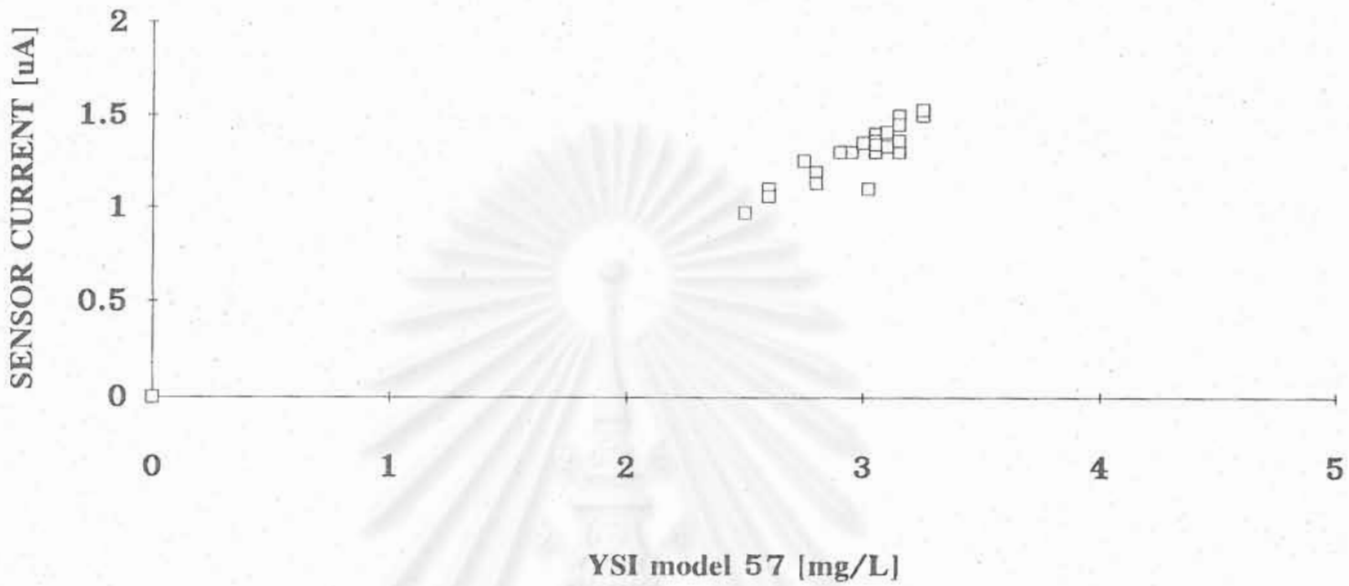
รูปที่ 4.13 ภาพในขณะที่ทำการทดสอบภาคสนาม



รูปที่ 4.14 ความไวของหัววัดออกซิเจนกับจำนวนครั้งที่ทำการวัด



รูปที่ 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างการวัดด้วยเครื่องที่พัฒนาขึ้นเทียบกับ YSI model 57(n = 64)



รูปที่ 4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างการวัดด้วยเครื่องที่พัฒนาขึ้นเทียบกับ YSI model 57
(n = 28 ข้อมูลช่วงกลางที่ตัดข้อมูลที่ผิดปกติในช่วงแรกและช่วงหลังออก)

ตารางที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างการวัดออกซิเจนด้วยเครื่องที่พัฒนาขึ้นเทียบกับ YSI model 57

ชนิดของข้อมูล	ความสัมพันธ์	ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์(r)
ทั้งหมด	Y = -0.033 + 0.483 X	0.8900 (n = 64)
ตัดข้อมูลที่ผิดปกติออก	Y = -0.012 + 0.441 X	0.9904 (n = 28)

บทที่ 5 การวิเคราะห์ต้นทุนการประดิษฐ์

ระบบวัดออกซิเจนที่พัฒนาขึ้นนี้สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ส่วนคือ ส่วนของหัววัดออกซิเจนและส่วนของเครื่องวัด การประดิษฐ์หัววัดออกซิเจนในครั้งนี้ไม่ได้ใช้เครื่องมือผลิตที่มีราคาสูง ใช้กระบวนการประดิษฐ์ที่ง่าย จึงไม่จำเป็นจะต้องลงทุนในแง่ของเครื่องมือมาก ซึ่งจะแตกต่างจากการประดิษฐ์หัววัดออกซิเจนแบบฟิล์มบางซึ่งจำเป็นจะต้องใช้เครื่องระเหยโลหะแบบลำอิเล็กตรอน ซึ่งมีราคาหลายล้านบาท ทำให้ต้องลงทุนในการประดิษฐ์ในช่วงแรกสูง

ในส่วนของหัววัดออกซิเจนนั้นต้นทุนที่ใช้ในการประดิษฐ์สามารถแบ่งได้ดังนี้

ขั้วคาโทด:

1. ทอง(99%) 3 มม.(280 มม. = 5000 บาท)	54 บาท
2. ท่อแก้ว, สายไฟ และกาว	1 บาท
รวม	55 บาท

ขั้วอาโนด:

1. ดีบุก(99.999 %) 0.4 กรัม (500 กรัม = 2500 บาท)	2 บาท
2. ท่อแก้ว, สายไฟ และท่อหด	1 บาท
รวม	3 บาท
โครงสเตนเลส รวมค่าแรงกลึง	500 บาท
สายไฟ coaxial, socket 1 คู่ และขั้ว BNC	180 บาท
รวมทั้งหมด	738 บาท

ในส่วนของเครื่องวัด

1. ชิ้นส่วนและอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์	700 บาท
2. กล่อง	80 บาท
รวมทั้งหมด	780 บาท

กล่าวคือราคาต้นทุนของหัววัดออกซิเจนแบบบัลก์ที่พัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้ประเมินได้เป็นราว 750 บาท และราคาต้นทุนของเครื่องวัดเป็นประมาณ 800 บาท ซึ่งรวมทั้งชุดแล้วจะเป็น ประมาณ 1600 บาท

ตารางที่ 5.1 แสดงการเปรียบเทียบราคาของระบบวัดออกซิเจนชนิดต่างๆ ซึ่งจะเห็นได้ว่าระบบวัดออกซิเจนที่พัฒนาขึ้นเองไม่ว่าจะเป็นแบบฟิล์มบางหรือแบบบัลก์จะมีราคาที่ถูกกว่าของต่างประเทศมาก

เมื่อเปรียบเทียบหัววัดออกซิเจนแบบฟิล์มบางและแบบบัลก์แล้วจะเป็นว่าราคาไม่แตกต่างกันมากนัก โดยราคาของหัววัดออกซิเจนแบบบัลก์จะมีราคาสูงกว่าแบบฟิล์มบางอยู่หลายร้อยบาท แต่ก็มีข้อดีที่การประดิษฐ์นั้นสามารถทำได้ง่ายโดยไม่จำเป็นจะต้องลงทุนเครื่องมือที่มีราคาแพงหลายล้านบาท นอกจากนี้หัววัดออกซิเจนแบบบัลก์ยังสามารถที่จะทำการบำรุงรักษาให้ดีขึ้นใหม่ได้หลังจากที่เสื่อมสมรรถภาพไป โดยไม่จำเป็นที่จะต้องเปลี่ยนหัววัดใหม่เลย ดังเช่นที่จะต้องทำให้กรณีของหัววัดแบบฟิล์มบาง นอกจากนี้หัววัดแบบบัลก์นี้ยังมีความทนทานเชิงกลที่สูงกว่าหัววัดแบบฟิล์มบาง เพราะได้รับการออกแบบโครงสร้างภายนอกให้แข็งแรงกว่าเดิม ทั้งยังดูสวยงามอีกด้วย

ตารางที่ 5.1 การเปรียบเทียบราคาของระบบวัดออกซิเจนชนิดต่างๆ

ชนิด	ราคา(บาท)	จุดเด่น
Yokogawa., DOX8SM1-05A	74,000	ใช้ใน Process control
Yellow Spring Instrument model 57	62,000	มี analog output
WTW., Oxy92	37,500	วัดอุณหภูมิ ปรับเทียบด้วยตัวเอง
Iijima Elec., F-102	25,000	วัดอุณหภูมิ ปรับเทียบด้วยตัวเอง
Ciba corning, checkmate	19,800	วัดอุณหภูมิ ปรับเทียบด้วยตัวเอง
TOA, OE-8270G	- -	ใช้ที่อุณหภูมิสูงได้
หัววัดออกซิเจนแบบฟิล์มบาง	850	ราคาถูก แบบใช้แล้วทิ้ง
หัววัดออกซิเจนแบบบัลก์	1,600	ราคาถูก ใช้ได้หลายครั้ง

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 6 บทสรุป

จากผลการวิจัยที่ได้กล่าวมาแล้วในบทต้นๆ สามารถสรุปผลการวิจัยและพัฒนาหัววัดออกซิเจนแบบบัลก์ ได้ดังต่อไปนี้

ด้านเทคนิก :

1. ได้ทำการประดิษฐ์และพัฒนาหัววัดออกซิเจนแบบบัลก์และเครื่องวัดขึ้น

2. หัววัดออกซิเจนที่พัฒนาขึ้นนี้ประกอบด้วยขั้วคาโทดที่ทำขึ้นจากทองและขั้วอาโนดที่ทำขึ้นจากดีบุกหรือซิลเวอร์-ซิลเวอร์คลอไรด์ ซึ่งหัววัดทั้งสองมีลักษณะเป็นแบบบัลก์(bulk) และมีแผ่นส่งผ่านออกซิเจนที่ทำจากแผ่นฟิล์มเทฟรอนหนา 50 ไมโครเมตร โดยใช้สารละลายโปรแตสเซียมคลอไรด์เข้มข้น 0.1 M เป็นสารละลายอิเล็กโตรไลต์

3. การประดิษฐ์ขึ้นนี้สามารถทำขึ้นเองได้ง่ายในห้องปฏิบัติการทั่วไปและมีราคาถูก โดยไม่จำเป็นต้องใช้เครื่องมือที่มีราคาแพง ดังเช่นการประดิษฐ์หัววัดออกซิเจนแบบฟิล์มบาง ซึ่งต้องใช้เครื่องระเหยแบบลำอิเล็กตรอนที่มีราคาหลายล้านบาท

ด้านลักษณะสมบัติ :

1. หัววัดออกซิเจนที่พัฒนาขึ้นนี้สามารถตอบสนองต่อความเข้มข้นของออกซิเจนที่ละลายอยู่ในน้ำในช่วง 0 ถึง 12 mg/L โดยมีค่าความเป็นเชิงเส้นตรงสูงกว่า 0.970

2. ความเร็วในการตอบสนองขาขึ้นของหัววัดออกซิเจนที่พัฒนาขึ้นมีค่าประมาณ 85 วินาที ซึ่งเร็วกว่าของ บริษัท YSI model 57 ซึ่งจะใช้เวลาประมาณ 110 วินาที

3. ความเร็วในการตอบสนองขาลงของหัววัดออกซิเจนที่พัฒนาขึ้นมีค่าประมาณ 230 วินาที ซึ่งเร็วกว่าของ บริษัท YSI model 57 ซึ่งจะใช้เวลาประมาณ 300 วินาที

4. หัววัดที่พัฒนาขึ้นมีความเสถียรภาพที่ดีพอสมควร โดยเฉพาะอย่างยิ่ง หัววัดที่ใช้ดีบุกเป็นขั้วอาโนด และนำไปใช้ในการวัดในสารละลายที่มีความเข้มข้นของเกลือไม่มากนัก

5. การทดสอบในภาคสนามพบว่าหัววัดที่พัฒนาขึ้นนี้มีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์กับเครื่องวัดที่เป็นของขาย(YSI model 57) ที่สูงในระดับที่ยอมรับได้คือ มีค่าสูงกว่า 0.890

6. หัววัดที่พัฒนาขึ้นนี้จะใช้เวลาในการเข้าสู่เสถียรภาพได้ภายใน 20 นาที หากทำการเก็บรักษาไว้ในสารละลายที่ไม่มีออกซิเจน

7. หัววัดที่พัฒนาขึ้นนี้สามารถทำการบำรุงรักษาได้ง่าย เมื่อความไวในการวัดลดต่ำลง อันเนื่องมาจากการใช้งานไปนาน ๆ ซึ่งทำได้โดยการขัดผิวของหัววัดด้วยกระดาษทรายละเอียด ก็จะสามารถนำกลับมาใช้งานต่อได้อีก โดยไม่จำเป็นต้องทิ้งไป

ผลกระทบต่อสังคม :

1. การพัฒนาหัววัดออกซิเจนในลักษณะแบบบัลก์เป็นการพัฒนาหัววัดออกซิเจนที่ต่อเนื่องจากแบบฟิล์มบาง โดยพยายามที่จะออกแบบให้ง่าย และมีราคาถูก และสามารถทำขึ้นเองได้ง่าย โดยไม่จำเป็นต้องใช้เครื่องมือที่มีราคาแพง และไม่จำเป็นต้องใช้เทคโนโลยีที่สูงมากนัก จึงอาจจะกล่าวได้ว่าเป็นเทคโนโลยีที่เหมาะสมกับบ้านเรา และจะทำให้บุคคลทั่วไปมีโอกาศที่จะนำไปใช้งานได้ในราคาต่ำ

2. ต้นแบบระบบวัดออกซิเจนนี้สามารถนำไปเผยแพร่ให้บุคคลทั่วไปได้ทดลองทำขึ้นเอง เพื่อใช้ในกิจกรรมต่างๆ เช่น ใช้ในการวัดออกซิเจนในสระหรือบ่อเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำเชิงธุรกิจเพื่อควบคุมผลผลิต การช่วยกันรณรงค์ดูแลและติดตามคุณภาพของแม่น้ำ ลำคลอง ไม่ให้เน่าเสีย อันจะเป็นการช่วยกันรักษาสภาวะสิ่งแวดล้อมได้ เป็นต้น

3. ความรู้ที่ได้จากการพัฒนาในครั้งนี้อาจจะเป็น know-how ที่นำไปสู่การผลิตหัววัดออกซิเจนในเชิงอุตสาหกรรมได้

ข้อเสนอแนะ :

1. หัววัดออกซิเจนที่พัฒนาขึ้นในครั้งนี้มีโครงเป็นสเตนเลส ซึ่งยังคงมีน้ำหนักที่สูง และมีราคาสูงอยู่บ้าง ในจุดนี้คณะผู้วิจัยอยู่ในระหว่างการปรับปรุงแก้ไข โดยการนำเอาท่อพีวีซีมาใช้แทน ซึ่งจะทำให้มีน้ำหนักที่เบากว่า และมีราคาที่ต่ำลงไปได้อีก

2. หากทำการออกแบบหัววัดให้สามารถทนแรงดันได้สูง และทนความร้อนได้ถึงราว 130 องศาเซลเซียส ก็จะทำให้หัววัดนี้สามารถนำไปใช้งานในถังหมักในกระบวนการเทคโนโลยีชีวภาพได้ ซึ่งจะเป็นประโยชน์ต่ออุตสาหกรรมอาหารได้เป็นอย่างมาก

3. หากทำการปรับปรุงให้สามารถวัดออกซิเจนในอากาศได้ก็จะมีประโยชน์ในการติดตามมลภาวะทางอากาศได้อีกทางหนึ่ง

เอกสารอ้างอิง

1. L.C.Clark, Trans. Am. Soc. Artif. Int. Organs, 2 (1956) 41

2. F.A.Marovich, US. Patent No. 3,655,564 (1969)

3. E.W.Molloy, US. Patent No. 3,406,109 (1964)

4. I.Fatt, Polarographic Oxygen Sensors, CRC Press (1976)

5. C.D.Ferris, ISA Biomed. Sci. Instrum., 17 (1981) 103

6. C.D.Ferris, J. Clinical Eng. Vol.3, No.3 (1983) 201

7. K. Kinoshita, Electrochemical oxygen Technology, Jojn Wiley&Sons, INC. (1992)

8. D.T.Sawyer, Oxygen Chemistry, Oxford University Press, (1991)

9. มานะ ศรียุทธศักดิ์, สมศักดิ์ ปัญญาแก้ว, มนตรี สวัสดิ์ศฤงฆาร, ธารา ชลปราณี, รายงานฉบับสมบูรณ์โครงการวิจัยเรื่อง" การประดิษฐ์หัววัดออกซิเจนและการประยุกต์" เสนอสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ พ.ศ.2536

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย