



ใบรับรองวิทยานิพนธ์

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมไฟฟ้า)

ปริญญา

วิศวกรรมไฟฟ้า

วิศวกรรมไฟฟ้า

สาขา

ภาควิชา

เรื่อง การพัฒนาเครื่องวัดออกซิเจนที่ละลายในน้ำแบบโพลารोगราฟิคด้วยการไบอัสแบบพัลส์

The Development of Pulse Biased Polarographic Dissolved Oxygen Meter

นามผู้วิจัย นายสมหมาย โชครุ่ง

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(อาจารย์ศุภิสิต ธนเพทาย, Ph.D.)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(รองศาสตราจารย์ชัยวัฒน์ ชัยกุล, วศ.ม.)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ชูเกียรติ การะเกตุ, Ph.D.)

หัวหน้าภาควิชา

(รองศาสตราจารย์มงคล รักษาพัชรวงค์, Ph.D.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์กัญจนา ชีระกุล, D.Agr.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่..... เดือน..... พ.ศ.

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การพัฒนาเครื่องวัดออกซิเจนที่ละลายในน้ำแบบโพลารोगราฟิกระด้วยการไบแอสแบบพัลส์

The Development of Pulse Biased Polarographic Dissolved Oxygen Meter

โดย

นายสมหมาย โชครุ่ง

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญา

พ.ศ. 2552

สมหมาย โชครุ่ง 2552: การพัฒนาเครื่องวัดออกซิเจนที่ละลายในน้ำแบบโพลาริ
กราฟิکด้วยการไบอัสแบบพัลส์ ปรินูญวุฒิสวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
(วิศวกรรมไฟฟ้า) สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า อาจารย์ที่ปรึกษา
วิทยานิพนธ์หลัก: อาจารย์คุณุต ชนเพทย, Ph.D. 63 หน้า

แหล่งนำทางการเกษตรที่ใช้ในการเลี้ยงสัตว์น้ำ เช่น บ่อเลี้ยง มีความจำเป็นอย่างยิ่งที่
ต้องมีการตรวจวัดระดับออกซิเจนที่ละลายในน้ำอยู่เสมอ เพื่อควบคุมคุณภาพน้ำให้เหมาะสม
สำหรับการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำอยู่ตลอดเวลาจึงมีความจำเป็นต้องใช้เครื่องวัดออกซิเจนที่ละลาย
ในน้ำ อย่างไรก็ตามการวัดออกซิเจนที่ต้องจุ่มหัววัดแช่อยู่ในน้ำอย่างต่อเนื่องเป็นเวลานาน ขั้ว
อิเล็กโทรดของหัววัดจะสกปรกทำให้ค่าที่วัดได้ไม่ถูกต้อง จึงต้องหมั่นทำความสะอาดหัววัดอยู่
บ่อยๆ ดังนั้นเพื่อประหยัดเวลาให้สามารถทำการวัดอย่างต่อเนื่องได้นานขึ้น จึงได้พัฒนาชุด
เครื่องวัดออกซิเจนที่ละลายในน้ำแบบโพลาริกราฟิกด้วยการไบอัสแบบพัลส์ขึ้น เครื่องวัด
ออกซิเจนที่มีการไบอัสแบบพัลส์ที่ได้พัฒนาขึ้นมานี้สามารถใช้วัดค่าได้อย่างถูกต้อง ถึงแม้จะ
ผ่านการใช้งานอย่างต่อเนื่องนานถึง 45 วัน โดยค่าที่วัดได้แตกต่างจากเครื่องวัดมาตรฐานไม่
เกิน 0.5 ppm

Somma Chokrung 2009: The Development of Pulse Biased Polarographic Dissolved Oxygen Meter. Master of Engineering (Electrical Engineering),
Major Field: Electrical Engineering , Department of Electrical Engineering.
Thesis Advisor: Mr. Dusit Thanapatay, Ph.D. 63 pages.

Agricultural water resource used for aquaculture such as prawn pond needs to be measured the level of dissolved oxygen in water regularly for controlling the water quality suitable for aquaculture all time. The water dissolved oxygen meter is then necessary. However, when the probe is dipped in the water continuously for long time, the electrodes of the probe will be dirty which causes inaccuracy of the measurement. Consequently, it needs to clean the probe so often. To extend the period of the continuous measurement, we have developed the pulse biased polarographic dissolved oxygen meter. The developed meter can measure the water dissolved oxygen correctly even though it has been operated continuously 45 days with small difference less than 0.5 ppm from the measurement value of the standard meter.

Key word: pulse biasing, water dissolved oxygen meter

Student's signature

Thesis Advisor's signature

____ / ____ / ____

กิตติกรรมประกาศ

ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ ดร.คูสิต ชนเพทย ประธานกรรมการที่ปรึกษา ที่ได้ช่วยเหลือ ในการวางแผนการวิจัยในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ตลอดจนให้คำปรึกษาแนะนำและตรวจแก้ไขข้อบกพร่องในวิทยานิพนธ์ให้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ขอขอบคุณ รองศาสตราจารย์ ชัยวัฒน์ ชัยกุล ที่ให้คำปรึกษาตั้งแต่ทำงานวิจัยด้านระบบตรวจวัดคุณภาพน้ำ รวมถึงให้คำปรึกษา วงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่ผ่านมา และขอขอบคุณห้องปฏิบัติการวิจัยระบบเทคโนโลยีสมองกลฝังตัวของศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ ที่อำนวยความสะดวกด้านการทดลอง และประกอบงานวิจัยจนสำเร็จลุล่วงด้วยดี

ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อจรัส โชครุ่ง , คุณแม่กุหลาบ โชครุ่ง ตลอดจนพี่ๆ และเพื่อนๆทุกคนที่ให้การสนับสนุน และให้กำลังใจในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จนสำเร็จลุล่วงไปด้วยดีข้าพเจ้าหวังว่าผู้ที่ได้อ่านวิทยานิพนธ์เล่มนี้จะสามารถสร้างเครื่องวัดได้โดยไม่ต้องพึ่งการนำเข้าจากต่างประเทศ หากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีข้อบกพร่องประการใด ข้าพเจ้ายินดีรับข้อเสนอแนะ และขออภัยมา ณ ที่นี้ด้วย

สมหมาย โชครุ่ง

เมษายน 2552

สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(3)
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	(6)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	3
การตรวจเอกสาร	4
อุปกรณ์และวิธีการ	8
อุปกรณ์	8
วิธีการ	8
ผลและวิจารณ์	58
ผล	58
วิจารณ์	60
สรุปและข้อเสนอแนะ	61
สรุป	61
ข้อเสนอแนะ	61
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	62
ประวัติการศึกษา และการทำงาน	63

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	แสดงคุณสมบัติของวัสดุที่จะนำมาทำแมมเบรน	12
2	แสดงค่าความต้านทานของเทอมิสเตอร์ $10k\Omega$ กับอุณหภูมิ	22
3	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและแรงดันสัญญาณเอาต์พุต	33
4	แสดงผลการทดสอบวงจรเปลี่ยนแรงดันเป็นกระแส	40
5	แสดงค่าออกซิเจนอิ่มตัวในอากาศที่ความดัน 760 mm Hg อุณหภูมิต่างๆ	51
6	อุปกรณ์บอร์ดรับสัญญาณและส่งสัญญาณ(4-20mA)	53
7	แสดงการเปรียบเทียบผลการวัดค่าออกซิเจนที่ละลายในน้ำด้วย เครื่องวัดไบอัสแบบพัลส์	59
8	แสดงการเปรียบเทียบผลการวัดค่าออกซิเจนที่ละลายในน้ำด้วย เครื่องวัด DO กับเครื่องวัด DO ด้วยการไบอัสด้วยไฟตรงคงที่ หลังมีการใช้งานอย่าง ต่อเนื่องนาน 45 วัน	60

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	แสดงโครงสร้างของหัววัดออกซิเจนแบบโพลารोगราฟฟิก	10
2	โครงสร้างหัววัดออกซิเจน (Dissolved Oxygen probe)	13
3	โครงสร้างส่วนลำตัวของหัววัดออกซิเจน	14
4	โครงสร้างส่วนปลายหัววัดสำหรับยี่ห้อเล็กโตรด	14
5	แท่งกลวง สำหรับใส่อิเล็กโตรไลต์โพแทสเซียมคลอไรด์ (KCl)	15
6	หัวปิดสำหรับใส่เมมเบรน(membrane)	15
7	ส่วนประกอบของหัววัดออกซิเจน	16
8	ประกอบอิเล็กโตรดเงินและทองคำกับส่วนปลายหัววัดสำหรับยี่ห้อเล็กโตรด	17
9	ส่วนประกอบของชุดเมมเบรน	18
10	การใส่เมมเบรนของหัววัด	18
11	กาว อีพอกซี ที่ใช้ในการประกอบอิเล็กโตรด	19
12	ประกอบหัววัดออกซิเจนพร้อมสายสัญญาณ	19
13	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิ (T) กับความต้านทาน (R) ของเทอร์มิสเตอร์ และ อื่นๆ	20
14	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและค่าความต้านทานของเทอร์มิสเตอร์	23
15	แผนภาพแสดงการต่อเครื่องมือที่ใช้ในการปรับเทียบมาตรฐานของหัววัดออกซิเจน	24
16	แสดงอุปกรณ์รับสัญญาณและการเก็บข้อมูลของหัววัดที่สร้างขึ้น	25
17	แสดงหัววัดที่สร้างขึ้น (Self-development probe)	25
18	แสดงอุปกรณ์รับสัญญาณเครื่องวัดมาตรฐาน (Standard DO meter)	26
19	แสดงหัววัดออกซิเจนมาตรฐาน (Standard DO probe)	27

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
20	แสดงการเก็บข้อมูลของหัววัดออกซิเจนกับหัววัดมาตรฐาน	27
21	แสดงการทำงานของระบบหัววัดออกซิเจนแบบไบอัสคงที่	28
22	แสดงการทำงานของระบบหัววัดออกซิเจนแบบพัลส์ไบอัส	29
23	แสดงวงจรรับสัญญาณจากหัววัดออกซิเจนเปลี่ยนกระแสเป็นแรงดัน	29
24	แสดงบอร์ดรับสัญญาณทดสอบจากหัววัดและบอร์ดวัดอุณหภูมิ	31
25	แสดงตู้ปรับอุณหภูมิขึ้นลงเพื่อทดสอบผลการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ	32
26	แสดงการติดตั้งหัววัดออกซิเจนที่ละลายในน้ำเพื่อทดสอบการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ	32
27	กราฟแสดงอุณหภูมิและสัญญาณเอาต์พุต	33
28	แสดงวงจร Sample and Hold	36
29	แสดงวงจรขยายผลต่าง (differential amplifier)	37
30	แสดงวงจรเปลี่ยนแรงดันเป็นกระแส 4-20mA (I to V converter)	38
31	กราฟแสดงความสัมพันธ์การทดสอบวงจรเปลี่ยนแรงดันเป็นกระแส	41
32	แสดงวงจรผลิตความถี่ Pulse oscillator ควบคุมการ ON-OFF การนำกระแส ของQ1และQ2	41
33	กราฟแสดงการทำงานของIC555 และ ควบคุมMOSFET	43
34	กราฟแสดงการทำงานของIC555 และ สัญญาณที่ออกจาก Op amp	43
35	วงจรภาคจ่ายไฟ (Power Supply)	44
36	แสดงวงจรรับสัญญาณของหัววัดออกซิเจนแบบไบอัสคงที่	45
37	แสดงวงจรรับสัญญาณของหัววัดออกซิเจนแบบพัลส์ไบอัส	47
38	วงจรทดสอบการทำงานของหัววัดออกซิเจน	47
39	วงจรส่งสัญญาณมาตรฐาน 4-20mA	48
40	วงจรแสดงผลค่าการวัดออกซิเจนพร้อมปรับตั้งค่าการวัด	48
41	แสดงโครงสร้างภายในของ DO Meter	49
42	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Volt ที่ ADC และ ค่าออกซิเจน mg/l	50

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
43	แสดงแผ่นวงจรพิมพ์(PCB) และอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์	55
44	แสดงแผ่นวงจรพิมพ์ (PCB) และอุปกรณ์	56
45	แสดงการต่อหัววัดออกซิเจนเข้ากับบอร์ดพร้อมมิเตอร์แสดงผล	57
46	แสดงการใช้งานของหัววัดออกซิเจนที่ละลายในน้ำ	57
47	แสดงการเปรียบเทียบความสะอาดของอิเล็กทรอนิกส์ที่ไปอัสแบบพัลส์	59

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

DO	=	ค่าออกซิเจนที่ละลายในน้ำ(Dissolved Oxygen)
Pulse Biasing	=	การไบอัสสัญญาณรูปคลื่นสี่เหลี่ยม
Probe	=	หัววัด
Polarographic	=	การไบอัสด้วยแรงดัน
Transmitter	=	วงจรส่งสัญญาณมาตรฐาน
PCB	=	แผ่นวงจรพิมพ์

การพัฒนาเครื่องวัดออกซิเจนที่ละลายในน้ำแบบโพลารोगราฟิคด้วยการไบอัสแบบพัลส์

The Development of Pulse Biased Polarographic Dissolved Oxygen Meter

คำนำ

ในปัจจุบันในสภาพแวดล้อมที่ประกอบด้วยทางอากาศและทางน้ำมีผลต่อการดำรงชีวิตของมนุษย์มาก ทำให้มนุษย์ต้องคิดค้นสิ่งประดิษฐ์มาช่วยตรวจหาค่าสารตกค้างหรือสารที่มีประโยชน์กับมนุษย์ว่ายังมีอยู่หรือมีค่าเท่าใด เช่นในน้ำ ประกอบไปด้วย ก๊าซหลายชนิดทั้งที่มีประโยชน์และไม่เป็นประโยชน์ต่อสัตว์น้ำ สำหรับ ก๊าซที่เป็นประโยชน์นั้น คือ ก๊าซออกซิเจน หรือที่เข้าใจคือ ค่าออกซิเจนที่ละลายในน้ำ หรือ ค่า DO (Dissolved oxygen)

ค่า DO (Dissolved oxygen) คือ ค่าออกซิเจนที่ละลายในน้ำ โดยในปัจจุบันนี้สามารถหาค่าได้หลายวิธีการ คือ หาค่าได้ด้วยการไตร่ตรองทางเคมี และการหาค่าด้วยการวัดโดยใช้เครื่องมือวัด ในการใช้เครื่องมือวัด ประกอบไปด้วยการใช้แสงในการวัดและการใช้หลักของ biosensor หรือใช้หลักการวัดทางเคมี (บุญชัย, 2544: 37-100) โดยวิธีการที่จะได้ นำมาใช้ในการหาค่าออกซิเจน โดยใช้หลักการทำงานของโพลารोगราฟิเคส หรือหลักการไบอัสด้วยแรงดันไฟฟ้า ที่ประมาณ 0.7 V ให้กับขั้วแคโทด ซึ่งทำจากทองคำ และขั้วแอโนดซึ่งทำจากเงิน เพื่อที่จะทำให้เกิดปฏิกิริยาสมบูรณ์ ทำให้เกิดการไหลของกระแสมากขึ้นหรือ ลดลงตามปริมาณออกซิเจนที่ซึมผ่านเมมเบรน ทำให้สามารถที่จะหาค่าออกซิเจนที่ละลายในน้ำได้ ในการใช้งานหัววัดออกซิเจน หรือ DO probe ที่มี การเปิดใช้งานโดยป้อนแรงดันไบอัสตลอดเวลา จะส่งผลให้ขั้วอิเล็กโตรดเกิดปฏิกิริยาเคมี กลายเป็นสีดำ ซึ่งทำให้อายุการใช้งานสั้น ฉะนั้นจึงเห็นว่าควรปรับปรุงระบบการทำงานของระบบ หัววัด เพื่อให้มีอายุการใช้งานที่นานขึ้น โดยการป้อนกระแสไบอัสแบบพัลส์ ซึ่งจะมีการจ่ายกระแส และหยุดจ่ายกระแสสลับกันให้กับขั้วอิเล็กโตรด (มานะ, 2535: 57-67)

ฉะนั้นจึงต้องมีการออกแบบและปรับปรุงวงจรควบคุมการทำงานของหัววัดออกซิเจน เพื่อลดการสึกกร่อนของขั้วอิเล็กโตรด ซึ่งจะช่วยให้วัดค่าได้แม่นยำขึ้น ช่วยให้อายุการใช้งานของหัววัดยาวขึ้น และช่วยยืดอายุการใช้งานของขั้วอิเล็กโตรดด้วย

การวิจัยและการออกแบบเครื่องมือวัดปริมาณออกซิเจนในครั้งนี้ได้ทำการออกแบบโครงสร้างของหัววัดออกซิเจนแบบ โพลารोगราฟิค โดยมีทองคำ(Au) และเงิน (Ag)เป็นขั้วอิเล็กโทรด พร้อมทั้งสารละลายอิเล็กโทรไลต์เพื่อให้ปฏิกิริยาของหัววัดสมบูรณ์ พร้อมทั้งออกแบบวงจรรับสัญญาณของหัววัดที่มีการไบอัสแบบพัลส์ โดยในการวัดค่าออกซิเจนจะมีการทดสอบด้วยการปรับค่าออกซิเจนในน้ำให้มีค่าตั้งแต่ 0-20 ppm เพื่อทดสอบและอ่านค่าเทียบกับเครื่องมือวัดค่ามาตรฐาน เมื่อทดสอบกับค่ามาตรฐานแล้วก็นำวงจรที่ผลิตความถี่หรือวงจรไบอัสแบบพัลส์ไปลงไปที่หัววัดเพื่อทำการวัดค่าเทียบกับกับหัววัดมาตรฐานเพื่อจะได้ทราบผลของการวัดค่าว่าค่าที่ได้ไม่ได้แตกต่างจากหัววัดที่มีการไบอัสคงที่ หลังจากนั้นทำการเปิดเครื่องวัดออกซิเจนแบบพัลส์และแบบไบอัสคงที่ ที่ได้สร้างขึ้นจุ่มวัดน้ำทิ้งไว้ประมาณ 45 วันเพื่อจะได้ทราบการเปลี่ยนแปลงของ ความสกปรกของอิเล็กโทรดแบบไบอัสคงที่และไบอัสไม่คงที่และนำมาวัดค่าผลการตอบสนองของหัววัดทั้งสองประเภทเพื่อหาผลสรุปต่อไป

วัตถุประสงค์

ในปัจจุบันการหาค่าออกซิเจนที่ละลายในน้ำ สามารถหาได้หลายวิธีการ แต่จะกล่าวถึงการหาค่าออกซิเจนที่ละลายในน้ำแบบ โพลารोगราฟิک (Polarographic cell) หัววัดมีการไบอัสด้วยแรงดัน 0.7V ปฏิกริยาจะทำให้เกิดการไหลของกระแสผ่าน อิเล็กโตรดที่สามารถสร้างได้ดังนี้

1. เพื่อศึกษาและออกแบบการสร้างหัววัดของออกซิเจนที่ละลายในน้ำ โดยหลักการโพลารोगราฟิก
2. เพื่อศึกษาและออกแบบวงจรให้สามารถทำงานได้ดีในสภาวะสิ่งแวดล้อมต่างๆ พร้อมการชดเชย อุณหภูมิ และ การสร้างวงจรให้มีการไบอัสแบบพัลส์ เพื่อยืดอายุการใช้งานของหัววัด
3. เพื่อศึกษาเปรียบเทียบการทำงานของหัววัดออกซิเจนด้วยวงจรที่มีการไบอัสแบบพัลส์ และ ไบอัสคงที่

การตรวจเอกสาร

ในปัจจุบันการวัดค่าออกซิเจนที่ละลายในน้ำมีความสำคัญและจำเป็นมากในระบบการเลี้ยงสัตว์น้ำ โดยทำการวัดค่าออกซิเจนตลอดเวลาเพื่อการมอนิเตอร์ค่าการเปลี่ยนแปลงออกซิเจนของแหล่งน้ำและเฝ้าระวัง ในปัจจุบันเครื่องวัดออกซิเจนแบ่งเป็นหลายประเภท โดยการวิจัยนี้เพื่อต้องการสร้างและออกแบบเครื่องมือวัดให้สามารถทำงานได้นานและยืดอายุอิเล็กทรอนิกส์ของหัววัด

เครื่องวัดปริมาณออกซิเจนในของเหลวในขณะนี้สามารถแบ่งออกได้เป็น 4 แบบคือ

1. กัลวานิก เซลล์ (Galvanic cell)
2. โพลารोगราฟิค เซลล์ (Polorographic cell)
3. มัลติเพิล-อะโนด เซลล์ (Multiple-anode cell)
4. การวัดแบบเชิงแสง และวัดโดยวิธีอื่น(Thallium cell and other detector)

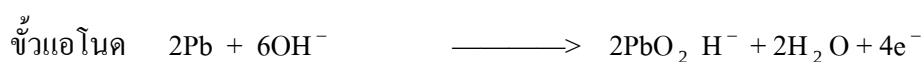
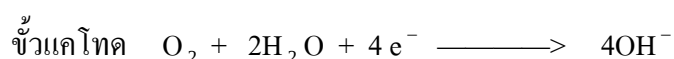
เครื่องมือที่วัดหาปริมาณออกซิเจนที่สร้างขึ้นขณะนี้ สามารถวัดได้ที่อุณหภูมิสูงสุดที่ 65 °C วัดค่าได้ตั้งแต่ 0-20ppm หรือ 0-20mg/l พร้อมทั้งมีความละเอียด อยู่ในช่วง 0.1 ppm และความผิดพลาดอยู่ในช่วง 0.5 ppm และหัววัดสามารถจุ่มวัดได้นาน 45 วันโดยที่ไม่จำเป็นต้องทำความสะอาดอิเล็กทรอนิกส์ของหัววัด

กัลวานิก เซลล์ (Galvanic cell)

กัลวานิก เซลล์ เป็นเครื่องมือที่ใช้วัดหาออกซิเจน ได้ทั้งในของเหลวและในอากาศวัดค่าในช่วง 0-20ppm ประกอบด้วยสารอิเล็กโทรไลต์และมี 2 ขั้ว อิเล็กโทรด เมื่อออกซิเจนแพร่ผ่านเซลล์เมมเบรน เข้าสู่อิเล็กโทรไลต์เข้าสู่สภาวะสมดุล ที่ขั้วแคโทดจะมีการจ่ายกระแสอิเล็กตรอนจากภายนอก ซึ่งทำให้เกิดความต่างศักย์หรือแรงดันระหว่างขั้วทั้งสอง เมื่อออกซิเจน 1 โมเลกุลแพร่ผ่านเมมเบรนเข้ามาสัมผัสกับขั้วแคโทด ขั้วแคโทดจะจ่าย $4 e^-$ ให้แก่ออกซิเจนและรวมตัวกับ 2 โมเลกุลของน้ำได้ 4 ไฮดรอกไซด์ เกิดขึ้น เป็นสาเหตุให้เกิดแรงไหลของกระแสอิเล็กตรอน ไหลผ่านสารอิเล็กโทรไลต์ ปริมาณการไหลของกระแสอิเล็กตรอน ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของออกซิเจนในสารละลายตัวอย่างที่ทำการวัด (สุกพร , 2538: 2-47)

วัสดุที่ใช้ทำขั้วอิเล็กโทรดโดยทั่วไป เป็นเงินหรือตะกั่ว สารละลายอิเล็กโทรไลต์ใช้ โพตัสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) ส่วนขั้วแคโทดจำเป็นต้องใช้โลหะเงิน ขั้วของแอโนดเลือก โลหะพื้นฐานเช่น ตะกั่ว แคดเมียม สังกะสี ในการเลือกสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ต้องมี คุณสมบัติไม่ละลายขั้วแอโนด

ในกรณีที่ใช้ตะกั่วเป็นขั้วแอโนด ปฏิกิริยาของเซลล์เขียนได้ดังนี้

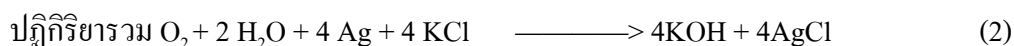
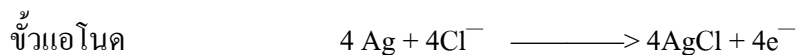
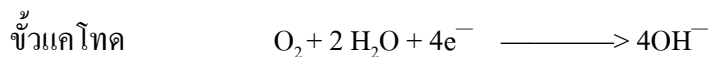


โพลารोगราฟิค เซลล์ (Polarographic cell)

การวัดปริมาณออกซิเจนในน้ำ โดยห้ววัดแบบ Clark Electrode ซึ่งเป็นแบบ โพลารोगราฟิค เซนเซอร์ (Polarographic sensor) และมีเทอร์มิสเตอร์สำหรับวัดอุณหภูมิ และชดเชยผล จากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิขณะทำการวัด แผ่นเมมเบรนที่ครอบห้ววัดใช้เพื่อแยกส่วนห้ววัดกับ น้ำภายนอกและยอมให้ก๊าซผ่านเข้าไปได้ โดยภายในห้ววัดจะมีขั้วแอโนด(ขั้วบวก) ทำด้วยเงิน และ ขั้วแคโทด(ขั้วลบ) ทำด้วยทองคำ และมีน้ำยาโพตัสเซียมคลอไรด์เป็นสารอิเล็กโทรไลต์ เชื่อม ระหว่างขั้วอิเล็กโทรดทั้งสอง ออกซิเจนที่แพร่ผ่านเข้าไปในทำปฏิกิริยากับขั้วแคโทด ทำให้เกิดการ ไหลของกระแสไฟฟ้าเกิดขึ้น(ศุภพร, 2538: 2-47)

อัตราการแพร่ผ่านเมมเบรนของออกซิเจน เป็นปฏิกิริยาโดยตรงกับความแตกต่างของ แรงดันภายในกับภายนอก เมื่อออกซิเจนแพร่ผ่านเข้าไปทำปฏิกิริยากับขั้วแคโทดอย่างรวดเร็ว ซึ่งจะถือว่าแรงดันของออกซิเจนภายในแผ่นเมมเบรนเป็นศูนย์ ดังนั้นปริมาณออกซิเจนที่แพร่ผ่าน เมมเบรนจะเป็นปฏิกิริยาโดยตรงกับแรงดันสมบูรณ์ของออกซิเจนนอกแผ่นเมมเบรน ถ้าแรงดัน ออกซิเจนเพิ่มขึ้นก็จะมีออกซิเจนแพร่ผ่านเมมเบรนมากขึ้น อันเป็นผลให้มีกระแสไหลผ่าน เซนเซอร์มากขึ้นด้วย

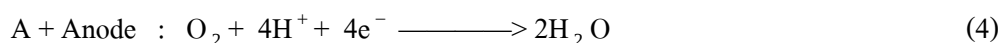
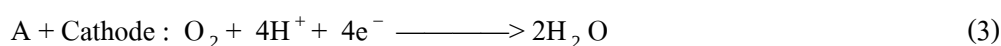
ปฏิกิริยาเคมี



มัลติเพิล - แอโนด เซลล์ (Multiple-anode cell)

มัลติเพิล อะโนด เซลล์ ประกอบด้วยขั้วแอโนด จำนวนหลายขั้วมี 3 ขั้วอิเล็กโตรด โดยสองขั้วเป็นขั้วบวกและขั้วลบ ส่วนอีกขั้วที่เหลือเป็นขั้วอิเล็กโตรดอ้างอิงมีสารละลายอิเล็กโตรไลต์เป็นโพตัสเชียมไฮดรอกไซด์ มีการป้อนแรงดันภายนอก ให้แก่ขั้วแคโทดและแอโนด สัญญาณที่ไหลไปยังขั้วแอโนด มีการแยกโดยอิสระต่อกัน แต่จะมีปริมาณมากน้อยขึ้นอยู่กับปริมาณออกซิเจนที่ละลายอยู่ในน้ำหรือสารละลายที่ต้องการวัด เมื่อจุ่มหัววัดลงในสารที่ทำการวัดออกซิเจนที่ละลายอยู่จะแพร่ผ่านเมมเบรนเข้ามาสู่สารละลายอิเล็กโตรไลต์ และถูกรีดิวซ์ที่ขั้วแคโทด โดยออกซิเจนจะรับอิเล็กตรอนที่ขั้วแคโทดและรวมตัวกับน้ำเกิดเป็นไฮดรอกไซด์ ซึ่งไฮดรอกไซด์จะเกิดขึ้นมากน้อยเพียงใด ขึ้นอยู่กับปริมาณออกซิเจนที่ละลายอยู่ในสารละลายตัวอย่าง ไฮดรอกไซด์จะเคลื่อนที่ไปที่ขั้วแอโนด แล้วถ่ายเทไปอิเล็กตรอนไปที่ขั้วแอโนด ออกซิเจนจะแพร่ผ่านเมมเบรนจะกระทั้งความเข้มข้นภายในสารละลายอิเล็กโตรไลต์และสารตัวอย่างเท่ากัน

ปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้น เขียนได้ดังนี้



การวัดแบบเชิงแสง และวัดโดยวิธีอื่น (Thallium cell and other detector)

การวัดแบบเชิงแสงเป็นการหาค่าออกซิเจนที่ละลายในน้ำที่ได้ออกแบบให้ใช้การยิงแสงไปยังสารเรืองแสงที่จุ่มหรือสัมผัสกับน้ำมีจะวัดหรือสารละลายที่จะวัดค่า หลักการทำงานจะใช้แสง

ที่กำเนิดจาก LED ที่กำเนิดความยาวคลื่นในช่วง 380-420 นาโนเมตร และตัวรับที่เรียกว่า Optodiode หรือ Opto transistor รับที่ความยาวคลื่น 600-680 นาโนเมตร โดยมีสารฟลูออเรสเซนต์เป็นสารที่เคลือบอยู่กับแผ่นที่จะนำไปรวมตัวกับน้ำที่จะวัด เพื่อเป็นสารที่เรืองแสงขณะที่มีการยิงแสงไปกระทบ โดยปริมาณออกซิเจนจะแปรผันตามปริมาณหรือความเข้มของสารเรืองแสงซึ่งการเรืองแสงจะเรืองที่ความอยู่ในช่วงที่ Opto transistor รับได้

การไตเตรตเป็นวิธีการหนึ่งที่ใช้หลักการหยดสารละลายลงไปเพื่อให้สารละลายเปลี่ยนสี และเป็นหลักการผสมสารเคมีเพื่อหาปริมาณออกซิเจนในน้ำ

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

1. ออปแอมป์ LM 358 และ LM 555 Astable Oscillator
2. MOSFET IRFD110 , IRFD 024
3. Transister 2N3904, 2N3906, BD 140
4. Voltage referent 2.5V LM336, LM385
5. แผ่นวงจรพิมพ์ PCB
6. แท่งพลาสติกกลึงเป็นหัววัดออกซิเจน
7. อิเล็กโตรด ทองคำ (Au) และ เงิน (Ag)
8. สารละลาย โพแทสเซียมคลอไรด์ (KCl)
9. เครื่องวัดออกซิเจนมาตรฐานHANNA (HI964400)
10. ภาจแสดงผล(LCD)

วิธีการ

1. ขั้นตอนการดำเนินงาน

1.1 ศึกษาการทำงานของหัววัดออกซิเจนที่ละลายในน้ำแบบ โพลารोगราฟิค (Polarographic) ที่ใช้ในการตรวจวัดค่าออกซิเจนที่ละลายในน้ำ

1.2 ศึกษาการทำงานของหัววัดออกซิเจน (DO probe) แบบการไบอัสที่แรงดัน 0.7V และการไบอัสแบบพัลส์ เพื่อลดการสึกหรอและความสกปรกของอิเล็กโตรดซึ่งเหมาะสำหรับงานสถานีตรวจวัดแบบออนไลน์

1.3 ออกแบบวงจรไบอัสแบบพัลส์ ให้สามารถทำงานได้ โดยให้ หัววัดออกซิเจน

(DO probe)ทำงานได้ตามปกติ

1.4 สร้างและประกอบหัววัดออกซิเจนที่ละลายในน้ำ และประกอบวงจรไบอัสพร้อมทั้งวงจรกรองสัญญาณ (D.H Rhie, 1995: 1-5) ส่งสัญญาณมาตรฐาน 4-20 mA ให้สามารถและเชื่อมต่อใช้งานกับระบบสถานีตรวจวัด คุณภาพน้ำได้

1.5 ทำการเปรียบเทียบค่าจากการวัดของหัววัดออกซิเจนแบบที่มีการไบอัสแบบพัลส์ กับค่าที่ได้จากแบบที่มีการไบอัสคงที่

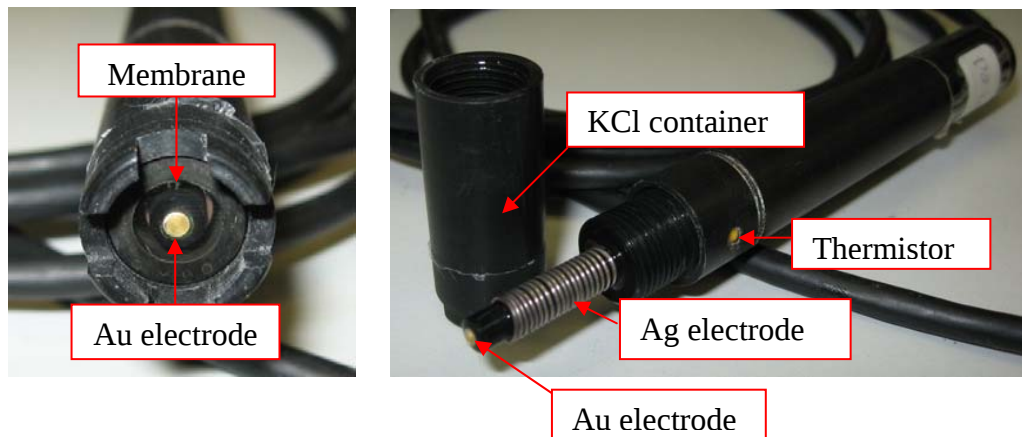
1.6 สรุปผล และ วิเคราะห์ผลการทดลอง

2. ทฤษฎีเบื้องต้นหัววัดออกซิเจน (Dissolved Oxygen Probe)

Dissolved Oxygen หรือปริมาณการวัดการละลายของก๊าซออกซิเจนในน้ำภายในปริมาตรหนึ่งๆ เนื่องจากก๊าซออกซิเจนเป็นก๊าซสำหรับสิ่งมีชีวิตต่างๆ ดังนั้นการวัดปริมาณออกซิเจนในน้ำจะเป็นตัวชี้ถึงความไม่สมบูรณ์ของน้ำซึ่งอาจจะมีผลต่อการดำรงชีวิตของสัตว์น้ำได้

ความสามารถในการละลายของออกซิเจนในน้ำ ขึ้นอยู่กับปัจจัยคือความดันอากาศเหนือน้ำ, สารละลายที่เจือปนในน้ำ (Salinity) และอุณหภูมิของน้ำ หัววัดที่สร้างขึ้นเป็นชนิดโพลารोगราฟิคแบบคลาร์ก (Clark type Polarographic probe) ดังภาพที่1 ซึ่งโครงสร้างหัววัดประกอบด้วยขั้วอิเล็กโทรดที่ทำด้วยทองคำเป็นขั้วแอโนด (ขั้วบวก) และพันรอบด้วยลวดเงิน เป็นขั้วแคโทด (ขั้วลบ) ขั้วทั้งสองจะอยู่ภายในฝาปิดและมีสารอิเล็กโทรไลต์เช่น โพตัสเซียมคลอไรด์ (KCl) บรรจุอยู่ ด้านปลายของฝาปิดจะมีเมมเบรน(membrane) ซึ่งทำจากสารเทฟลอน ซึ่งยอมให้ก๊าซซึมผ่านได้ แต่จะไม่ยอมให้สารละลายซึมผ่าน(บุญชัย, 2544: 37-100)

2.1 โครงสร้างของหัววัดออกซิเจนแบบ โพลารोगราฟิค



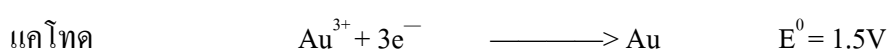
ภาพที่ 1 แสดงโครงสร้างของหัววัดออกซิเจนแบบโพลารोगราฟิค

เมื่อออกซิเจนซึมผ่านเมมเบรน เข้ามาผสมกับสารอิเล็กโตรไลต์ จะไม่เกิดปฏิกิริยาเคมี จนกว่าจะใส่แรงดันไฟฟ้า(bias)ระหว่างขั้วอิเล็กโตรดให้มีค่า 0.7V เพื่อกระตุ้นให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเจนในโปตัสเซียมคลอไรด์ เกิดไฮดรอกไซด์ไอออน (OH^-) ที่ขั้วแคโทดและเกิดซิลเวอร์คลอไรด์ (AgCl) ที่ขั้วแอโนด ปฏิกิริยานี้จะทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าไหลระหว่างขั้วทั้งสอง ปริมาณกระแสจะมากขึ้นกับปริมาณออกซิเจนที่ซึมผ่านเมมเบรน(บุญชัย กิ่งรุ่งเพชร และคณะ, 2544)

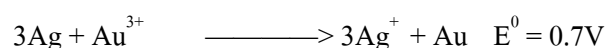
หน่วยของการวัด DO มี 2 ชนิดคือ ppm (part per million) หรือส่วนของหนึ่งล้าน ซึ่งมีค่าเท่ากับ mg/l (มิลลิกรัมต่อลิตร) หรือหน่วย เปอร์เซ็นต์ความเข้มข้น (Percent concentration) ซึ่งกำหนดให้เป็นสัดส่วนเปอร์เซ็นต์ของค่าออกซิเจนที่ละลายเต็มทีในน้ำ 1 ลิตร ณ อุณหภูมินั้นๆ

2.2 ปฏิกิริยาเคมีที่หัววัด

ขั้วอิเล็กโตรดที่ใช้สร้างหัววัด ใช้โลหะทองและโลหะเงิน โลหะทั้งสองเมื่อเทียบศักย์ไฟฟ้ากับครึ่งเซลล์มาตรฐานของอิเล็กโตรดที่ทำจากไฮโดรเจนจะเขียนได้ว่า

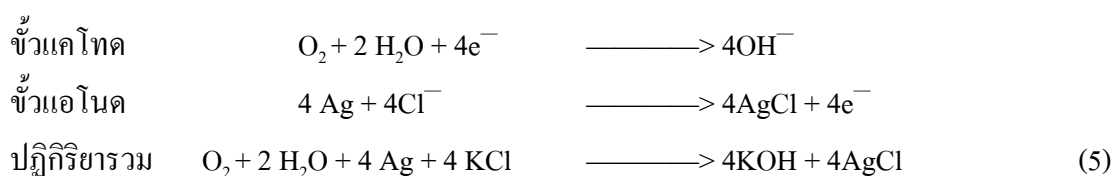


รวมทั้งสองสมการจะได้ว่า



(E^0 หมายถึงศักดาไฟฟ้าครึ่งเซลล์เมื่อเทียบกับอิเล็กโตรดที่ทำจากไฮโดรเจน ค่าเป็นบวก หมายความว่าสามารถรับอิเล็กตรอนได้ดีกว่าไฮโดรเจนค่าเป็นลบหมายถึงจะสูญเสียอิเล็กตรอนง่ายกว่าไฮโดรเจน)

จากสมการรวมจะเห็นว่าศักย์ไฟฟ้าของโลหะเงินสูงกว่าศักย์ของโลหะทอง 0.7V ซึ่งมองในทางกลับกันคือถ้ากระตุ้นด้วยแรงดันไฟฟ้า ที่มีความต่างศักย์มากกว่า 0.7V จะทำให้เกิดปฏิกิริยาที่ขั้วอิเล็กโตรดได้ ภายในหัววัด เมื่อออกซิเจนซึมผ่านเมมเบรน ออกซิเจนจะทำปฏิกิริยาร่วมกับอิเล็กโตรด สามารถเขียนเป็นสมการ ได้ดังนี้



อัตราการซึมผ่านเมมเบรนของออกซิเจน เป็นปฏิกากับความแตกต่างของแรงดันภายในกับภายนอกของแผ่นเมมเบรน ออกซิเจนที่ซึมผ่านเข้าไปจะทำปฏิกิริยาเคมีกับขั้วแคโทดอย่างรวดเร็วทำให้ปริมาณออกซิเจนภายในเป็นน้อยมากจนถือได้ว่าแรงดันออกซิเจนภายในมีค่าเป็นศูนย์ ดังนั้นปริมาณออกซิเจนที่ซึมผ่านเมมเบรนจะเป็นปฏิกาสัมบูรณ์ของออกซิเจนภายนอก ถ้าแรงดันของออกซิเจนเพิ่มมากขึ้น การซึมผ่านก็จะมากขึ้นเป็นผลให้มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านอิเล็กโตรดมากขึ้นด้วย

เมื่อหยุดทำการไบอัสแรงดันไฟฟ้าให้หัววัดออกซิเจนโดยหยุดจ่ายแรงดันให้แก่ขั้วอิเล็กโตรดจะให้ปฏิกิริยา (5) ย้อนกลับ คือ AgCl จะละลายใน KOH ทำให้ไม่เหลือคราบ AgCl เกาะที่ขั้วแอโนด

2.3 การเลือกชนิดเมมเบรน

การเลือกชนิดของเมมเบรนมีผลต่อหัววัดออกซิเจน เมมเบรนที่เลือกใช้ส่วนใหญ่ทำจากสารโพลีเมอร์ เป็นสารสังเคราะห์ มีรูพรุนเพื่อให้ก๊าซออกซิเจนซึมผ่านจากสารละลายที่ต้องการวัด ผ่านเข้าไปยังสารละลายอิเล็กโตรไลต์ เพื่อทำปฏิกิริยากับอิเล็กโตรดในหัววัด เมมเบรนแต่ละชนิดจะยอมให้ออกซิเจนซึมผ่านต่างกัน ซึ่งจะประมาณได้ด้วยสมการทางคณิตศาสตร์ดังนี้

$$J = \frac{PO_2}{(Z_s / D_s S + Z_m / D_m S_m + Z_e / D_e S_e)} \quad (6)$$

โดยที่ J คือปริมาณการไหลของออกซิเจน

PO_2 คือแรงดันออกซิเจนในน้ำ

Z คือ ความหนาในชั้นต่างๆหน่วยเป็น เมตร (m)

D คือสัมประสิทธิ์การแพร่ในชั้นต่างๆ (Diffusion coefficient) หน่วยเป็น ($m^2 s^{-1}$)

S คือความสามารถในการละลายออกซิเจนในชั้นต่างๆ ($mol m^{-3} kPa^{-1}$)

จะเห็นได้ว่า J หรือปริมาณเส้นออกซิเจนที่ไหลผ่านอิเล็กโตรดภายในช่วงเวลาหนึ่ง สามารถคำนวณเป็นกระแสไฟฟ้าระหว่างอิเล็กโตรดได้ เพราะ J จะสัมพันธ์กับปริมาณประจุไฟฟ้า และจากนิยามกระแสไฟฟ้าคือประจุที่ไหลในหนึ่งหน่วยเวลา ทางด้านขวามือ PO_2 คือแรงดันออกซิเจนในน้ำ ด้านล่างสมการประกอบด้วยตัวหาร 3 ส่วน ซึ่งกำหนดเป็นตัวแทนระหว่างชั้นที่ออกซิเจนซึมผ่านจากผิวหน้าเมมเบรน (s) ตัวเมมเบรน (m) และจากสารอิเล็กโตรไลต์ไปที่อิเล็กโตรด(e) จะเห็นได้ว่าทั้ง 3 เทอมมีผลต่อปริมาณกระแสไฟฟ้า แต่เนื่องจากผลจากการเปลี่ยนเมมเบรนมีผลต่อชั้น (m) มากที่สุด ส่วนชั้น (s) และ (e) จะคงที่เพราะไม่ได้เปลี่ยนโครงสร้างห้วงใดแต่อย่างใด ดังนั้นจากนิยามที่กำหนดข้างต้น เมื่อทดลองวัดเมมเบรนที่ทำจากสารชนิดต่างๆโดยกำหนดความหนา Z_m คือ 0.001 นิ้ว หรือ 25.4 μm (micron) ได้ผลดังนี้

ตารางที่ 1 แสดงคุณสมบัติของวัสดุที่จะนำมาทำเมมเบรน

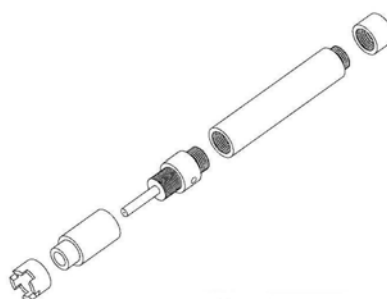
วัสดุ(Material)	$D_m (m^2 s^{-1}) \times 10^{-11}$	$S_m (mol m^{-3} kPa^{-1}) \times 10^7$	$Z_m / D_m S_m$
PTFE	2.54	0.106	0.943
PFA	2.69	0.093	1.02
FEP	1.73	0.088	1.67
Tefzel	1.34	0.017	112
PTME	343	0.04	1850

PTFE มีคุณสมบัติที่เฉื่อยต่อสารเคมีและตัวทำละลายเกือบทั้งหมด ตารางที่ 1 สามารถใช้งานได้ดีถึงอุณหภูมิ 160°C PFA มีชื่อทางการค้าว่า Teflon หรือ Neoflon มีคุณสมบัติไม่ทำปฏิกิริยาต่อสารเคมีเกือบทั้งหมด ยกเว้นเพียง 1-2 ชนิดที่พบยากเท่านั้น FEP มีคุณสมบัติทางเคมีคล้าย PFA แต่สามารถใช้งานได้ที่อุณหภูมิต่ำกว่าคือประมาณ 120°C Tefzel มีคุณสมบัติที่แข็ง ทนต่อการเป็นรอย ใช้งานได้ยาวนาน ทนต่อสภาพอากาศและสารเคมีต่างๆ มีค่า dielectric (คุณสมบัติทางไฟฟ้า) ต่ำ สามารถใช้งานได้ถึงอุณหภูมิ 150°C

จะเห็นว่า PTFE, PFA, FEP ให้ผลต่อการทดลองที่ดี เพราะมีค่า Z_m/D_mS_m ต่ำ ส่วน Tefzel และ PTME ให้ผลที่ต่ำมาก สำหรับการพัฒนาหัววัดออกซิเจน ไม่สามารถเลือกชนิดเมมเบรนและขนาดความหนาได้อย่างอิสระ เพราะเนื่องจากไม่สามารถผลิตได้เอง ดังนั้นในการพัฒนาจะใช้ชนิดที่หาได้ โดยพยายามทดลองเพื่อให้ใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพและคำนึงถึงราคาเป็นสำคัญ เพราะเมมเบรนเป็นส่วนที่มีผลต่อการวัด และจะต้องเปลี่ยนหลังจากใช้ไปช่วงเวลาหนึ่ง

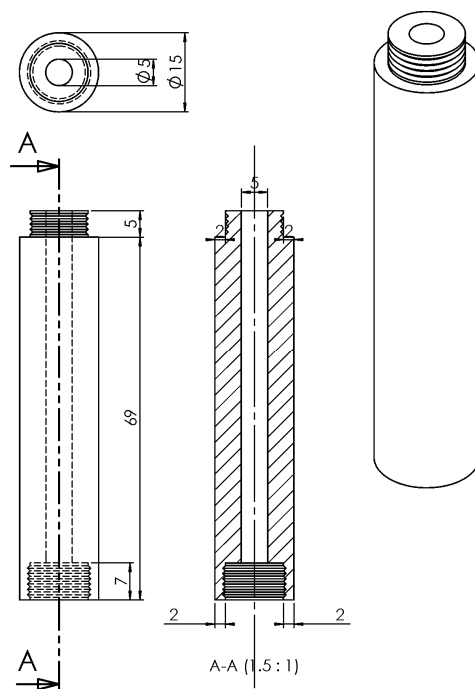
3. การพัฒนาออกแบบหัววัดค่าออกซิเจนในน้ำ

3.1 โครงสร้างหัววัด



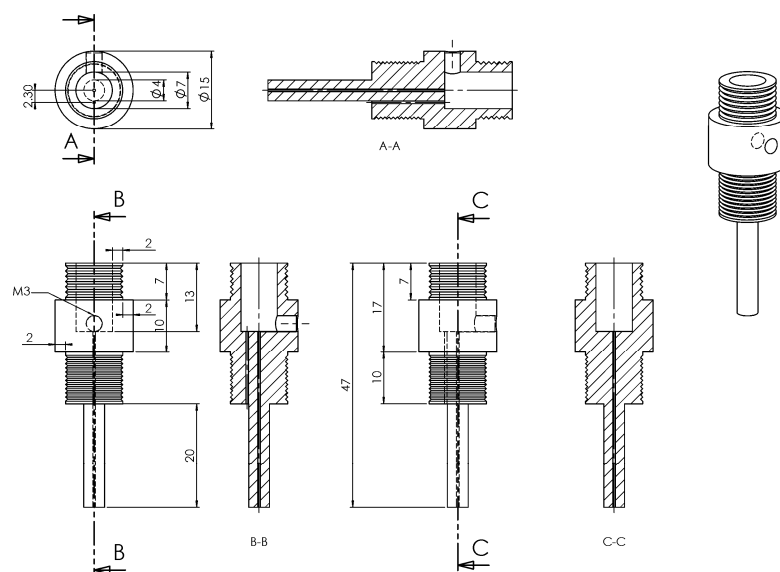
ภาพที่ 2 โครงสร้างหัววัดออกซิเจน (Dissolved Oxygen probe)

โครงสร้างของหัววัดออกซิเจนตามภาพที่ 2 ประกอบไปด้วยพลาสติกกึ่งเป็นรูปร่าง 5 ส่วนเพื่อประกอบเป็นหัววัดออกซิเจน(บุญชัย, 2544 : 37-100)



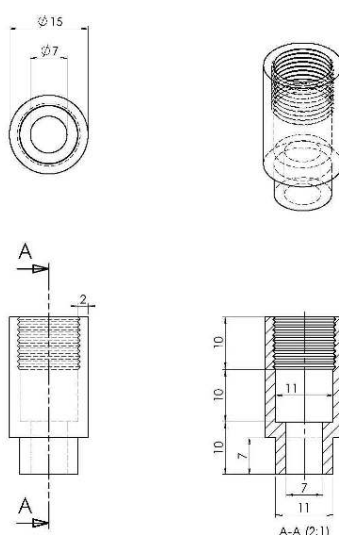
ภาพที่ 3 โครงสร้างส่วนลำตัวของหัววัดออกซิเจน

ส่วนของลำตัวหัววัดออกซิเจนภาพที่ 3 ทำหน้าที่ยึดติดกับส่วนของขีดยึดเล็ก ไตรดและ
 เป็นส่วนในการยึดสายไฟพร้อมบัคกริพร้อมทั้งเป็นส่วนที่จับในขณะที่ทำการวัดออกซิเจนด้วย



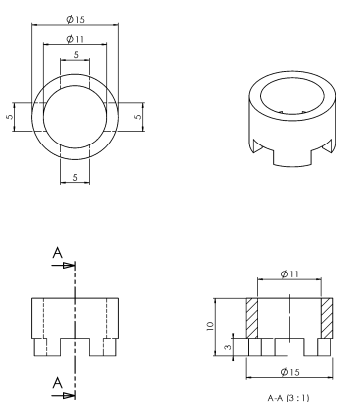
ภาพที่ 4 โครงสร้างส่วนปลายหัววัดสำหรับขีดยึดเล็ก ไตรด

โครงสร้างส่วนปลายของหัววัดสำหรับยัดอิเล็กโตรดตามภาพที่ 4 ทำหน้าที่ในการยึด
ทองคำและเงินพร้อมกับเทอร์มิสเตอร์ ให้เข้ากับหัววัด ในการยัดจะใช้ กาวอีพอกซี (Epoxy)



ภาพที่ 5 แท่งกลวง สำหรับใส่อิเล็กโตรดโพแทสเซียมคลอไรด์ (KCl)

หัวใส่สารละลายอิเล็กโตรไลต์ KCl ในภาพที่ 5 เพื่อประกอบเข้ากับหัววัดออกซิเจนใน
ส่วนปลายจะประกอบเข้ากับหัวปิดสำหรับใส่เมมเบรน



ภาพที่ 6 หัวปิดสำหรับใส่เมมเบรน(membrane)

ในภาพที่ 6 แสดงหัวปิดหรือหัวยึดเมมเบรนให้ ยึดเข้ากับ แท่งกลวงตามภาพที่ 5 ให้เข้ากันเพื่อใส่สารละลาย KCl 0.1M พร้อมทั้งจะประกอบเข้ากับหัววัดต่อไป

3.2 วัสดุและอุปกรณ์สำหรับสร้างหัววัด

วัสดุสำหรับสร้างหัววัด DO probe ประกอบด้วย

- 3.2.1 โลหะเงินขึ้นรูปเป็นเส้นสำหรับทำเป็นขั้วแคโทด (ขั้วลบ)
- 3.2.2 โลหะทองขึ้นรูปเป็นเส้นสำหรับทำเป็นขั้วแอโนด (ขั้วบวก)
- 3.2.3 เมมเบรนทำด้วยเทฟลอน ความหนาประมาณ 30 ไมครอน
- 3.2.4 พลาสติกทรงกระบอกตัน ชนิดเดลริน (Delrin) สีดำ สำหรับสร้างตัวโพรบ
- 3.2.5 สายเคเบิลสำหรับเชื่อมต่อระหว่างอุปกรณ์อ่านค่าและโพรบ
- 3.2.6 เทอร์มิสเตอร์สำหรับวัดค่าอุณหภูมิ
- 3.2.7 กาวอีพอกซี (Epoxy) สำหรับยึดอิเล็กโตรด



ภาพที่ 7 ส่วนประกอบของหัววัดออกซิเจน

แท่งกลึงพลาสติกที่นำมาประกอบหัววัดมี 4 ชิ้น ส่วนของอิเล็กโตรด 2 ชิ้น และส่วนของวัดอุณหภูมิ 1 ชิ้น รวมทั้งหมด 7 ชิ้น ตามภาพที่ 7 โดยนำทุกส่วนมาประกอบเข้ากัน ด้วยกาวอีพอกซี

3.3 วิธีการสร้างหัววัด

การสร้างหัววัดออกซิเจน (DO probe) มีดังนี้

3.3.1 นำพลาสติกทอนกลมขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 15 mm กลึงขึ้นรูปทรงกระบอกกลวง ตามภาพที่ 7 โครงสร้างทั้งหมดประกอบด้วย 4 ส่วน

3.3.2 ประกอบขั้วอิเล็กทรอนิกส์ทั้งสอง

3.3.3 ประกอบเทอร์มิสเตอร์เข้ากับส่วนปลายหัววัดสำหรับยึดอิเล็กทรอนิกส์

3.3.4 ประกอบสายเคเบิลเข้ากับอิเล็กทรอนิกส์และเทอร์มิสเตอร์ สำหรับนำไปต่อเข้ากับอุปกรณ์อ่านค่าต่อไป

3.3.5 เมื่อต้องการประกอบเมมเบรนเข้ากับอิเล็กทรอนิกส์ จะต้องบรรจุสารละลายโพแทสเซียมคลอไรด์ (KCl) ความเข้มข้น 0.1M ให้เต็ม แล้วขันเกลียวเข้าประกอบ



ภาพที่ 8 ประกอบอิเล็กทรอนิกส์และทองคำกับส่วนปลายหัววัดสำหรับยึดอิเล็กทรอนิกส์

จากภาพที่ 8 ประกอบอิเล็กทรอนิกส์ เงิน และ ทองคำ เข้ากับส่วนปลายของหัววัดสำหรับชนิดอิเล็กทรอนิกส์โดยใช้ กาวอีพอกซี่ ก่อนที่จะนำมาต่อเข้ากับสายไฟเคเบิลซึ่งมี 4 เส้นคือรับสัญญาณ หัววัดออกซิเจน 2 เส้นและหัววัดอุณหภูมิ(Thermistor sensor) 2 เส้น



ภาพที่ 9 ส่วนประกอบของชุดเมมเบรน

การประกอบชุดเมมเบรนให้เข้ากับแท่งกลวงของชุดหัววัดตามภาพที่ 9 ต้องนำเมมเบรนมาวางบนแท่งให้อยู่ตำแหน่งตรงกลางของแท่งกลวงเมื่อกดลงไปจะได้มีขนาดความตึงที่พอดี



ภาพที่ 10 การใส่เมมเบรนของหัววัด

การใส่เมมเบรนตามภาพที่ 10 ให้เข้ากับแท่งกลวงโดยการกดให้ฝาปิดลงในแนวตั้งฉาก เพื่อจะทำให้เมมเบรนมีความตึงสม่ำเสมอ



ภาพที่ 11 กาวอีพอกซีที่ใช้ในการประกอบอิเล็กทรอนิกส์

กาวที่ใช้ในการประกอบตามภาพที่ 11 เป็นกาว อีพอกซี (Epoxy) โดยการใช้งานจะมี ส่วนผสมของกาว 2 หลอด คือ กาวทำแข็ง (Hardener) และกาวเรซิน (Resin) นำกาวทั้ง 2 หลอดมา ผสมกันในอัตราส่วน 1 ต่อ 1 จากการทดสอบหลายยี่ห้อพบว่ายี่ห้อนี้ (DURO) มีค่าความนำไฟฟ้า ต่ำที่สุดหรือมีค่าความเป็นฉนวนสูงที่สุด



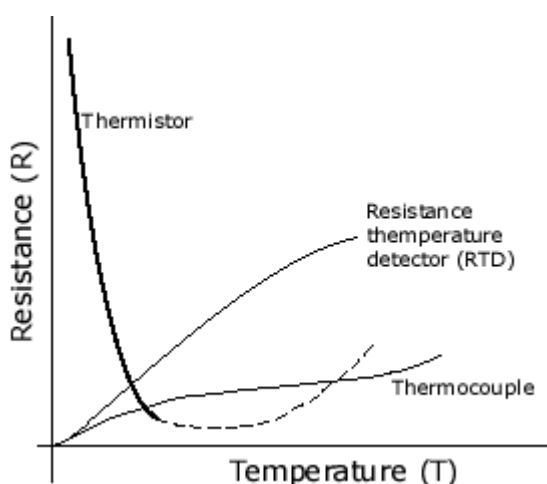
ภาพที่ 12 ประกอบหัววัดออกซิเจนพร้อมสายสัญญาณ

หัววัดที่ประกอบเสร็จพร้อมใช้งานตามภาพที่ 12 สามารถนำไปใช้งานโดยต่อเข้ากับเครื่องอ่านค่าออกซิเจนได้โดยสามารถต่อหัววัดเข้ากับสายเคเบิลได้ยาวถึง 5 เมตรแต่ไม่ควรต่อยาวมากเพราะจะมีผลต่อสัญญาณรบกวนจะทำให้ค่าที่อ่านได้ไม่นิ่ง

4. ทฤษฎีเบื้องต้นหัววัดอุณหภูมิ (Temperature probe)

4.1 ทฤษฎีเบื้องต้นเกี่ยวกับเทอร์มิสเตอร์

เทอร์มิสเตอร์เป็นอุปกรณ์ที่มีการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทาน เมื่อ อุณหภูมิ เปลี่ยนไป สามารถนำไปประยุกต์ใช้ตรวจสอบอุณหภูมิได้ดีในย่านระหว่าง -40°C ถึง 150°C และมีความถูกต้องอยู่ระหว่าง $\pm 0.35^{\circ}\text{C}$ เทอร์มิสเตอร์สร้างจากสารกึ่งตัวนำจำพวกซิลิกาออกไซด์ตอบสนองต่ออุณหภูมิต้านตรงข้าม (Negative Temperature Coefficient , NTC) มีขนาดเล็กขนาดเข็มหมุด มีการตอบสนองต่อการวัดที่ค่อนข้างเร็ว ประมาณ 2 วินาที มีคุณสมบัติการวัดซ้ำที่ดี และราคาถูก ข้อเสียคือความสัมพันธ์ระหว่าง ความต้านทานและอุณหภูมิไม่เป็นเชิงเส้น



ภาพที่13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิ (T) กับความต้านทาน (R) ของเทอร์มิสเตอร์ และ อื่นๆ

โดยทั่วไปความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทาน R และอุณหภูมิ T สามารถประมาณได้ดังนี้

$$R = R_{Ref} e^{\beta \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{ref}} \right)} \quad (7)$$

โดยที่

T คืออุณหภูมิในหน่วยของสเคลวิน (K)

T_{Ref} คืออุณหภูมิอ้างอิง โดยทั่วไปคืออุณหภูมิห้อง 25°C , 77°F หรือ 298.15 K

R คือความต้านทานในหน่วยโอห์ม(Ω)

R_{Ref} คือความต้านทานที่อุณหภูมิ T_{Ref} หน่วยโอห์ม(Ω)

β คือค่าที่ได้จากการปรับตั้ง ขึ้นอยู่กับวัสดุที่ใช้ทำเทอร์มิสเตอร์ โดยทั่วไปมีค่าระหว่าง 3,000 ถึง 5,000 ค่านี้จะได้จากผู้ผลิต

เนื่องจากทั้ง R และ T เป็นค่าจำนวนจริงและเป็นบวก ดังนั้นสามารถหาค่า T ได้ดังนี้

$$\frac{1}{T} = \frac{1}{T_{Ref}} + \frac{1}{\beta} [\ln(R) - \ln(R_{Ref})]$$

หรือ

$$T = \frac{T_{Ref} \beta}{\beta + T_{Ref} [\ln(R) - \ln(R_{Ref})]} \quad (8)$$

ค่า β อาจเปลี่ยนตามอุณหภูมิได้บ้างเล็กน้อย ดังนั้นถ้าสามารถกำหนดสมการที่เหมาะสมกับคุณสมบัติ R-T และใช้วิธี Fit curve กับกราฟอาจจะชดเชยการเปลี่ยนแปลง β ได้ดีกว่า สมการที่เหมาะสมสำหรับคุณสมบัติของ R-T ที่เป็น NTC (Negative Temperature Coefficient) Steinhart and Hart กำหนดไว้ดังนี้

$$\frac{1}{T} = A + B \ln(R) + C [\ln(R)]^3 \quad (9)$$

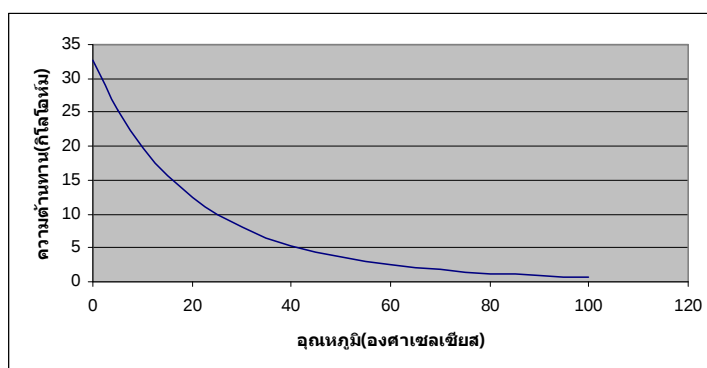
โดยที่ A, B และ C เป็นค่าคงที่ ซึ่งได้จากการปรับตั้ง

ตารางที่ 2 แสดงค่าความต้านทานของเทอร์มิสเตอร์ $10\text{k}\Omega$ กับอุณหภูมิ

อุณหภูมิ(องศาเซลเซียส)	ความต้านทาน(กิโลโอห์ม)
0	32.62
5	25.38
10	19.89
15	15.71
20	12.49
25	10.00
30	8.05
35	6.52
40	5.32
45	4.36
50	3.59
55	2.98
60	2.48
65	2.07
70	1.74
75	1.47
80	1.25
85	1.06
90	0.91
95	0.78
100	0.67

จากตารางที่ 2 แสดงค่าความต้านทานของเทอร์มิสเตอร์เปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานตามอุณหภูมิจากตารางพบว่าค่าที่เปลี่ยนแปลงจะมีการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานมากเมื่ออุณหภูมิต่ำ

และจะมีค่าการเปลี่ยนแปลงความต้านทานน้อยเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นหรือที่เรียกว่าเป็นประเภท NTC Thermistor

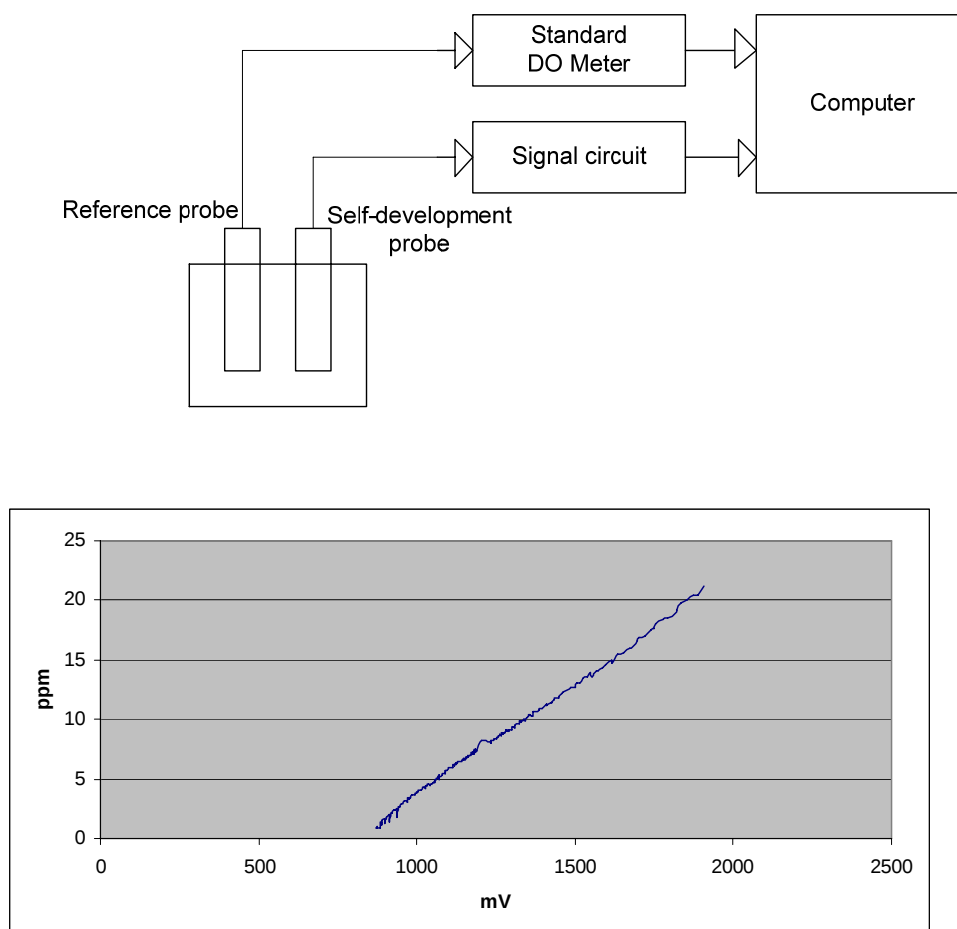


ภาพที่ 14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและค่าความต้านทานของเทอร์มิสเตอร์

จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและค่าความต้านทานของเทอร์มิสเตอร์ตามภาพที่ 14 พบว่าค่าการเปลี่ยนแปลงไม่เป็นเชิงเส้น ซึ่งเป็นคุณสมบัติของเทอร์มิสเตอร์

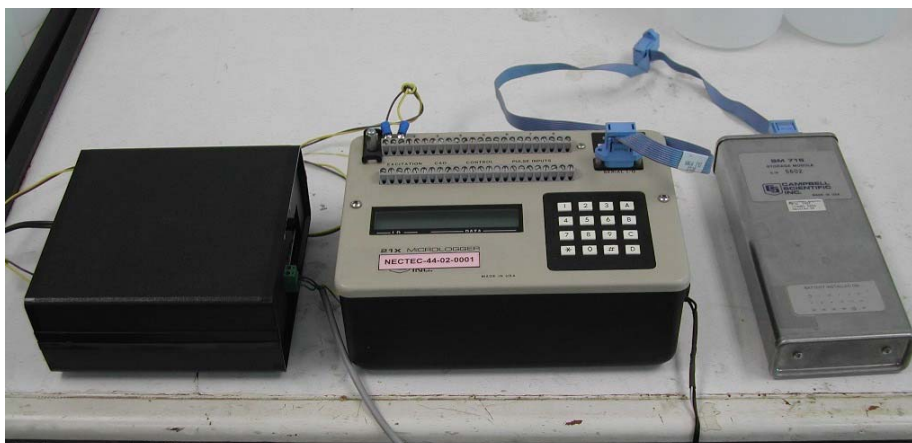
5. วิธีการทดสอบหัววัดออกซิเจน

การทดสอบหัววัดออกซิเจนทำโดยใช้วงจรเชื่อมต่อ ซึ่งวงจรประกอบด้วย I to V ซึ่งจะไบแอสด้วยแรงดัน 0.7V เพื่อกระตุ้นให้เกิดปฏิกิริยา Electrolysis ที่หัววัดซึ่งเกิดระหว่างที่ออกซิเจนซึมผ่านเมมเบรนเข้ามาผสมกับสารอิเล็กโตรไลต์ กระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยา จะเปลี่ยนตามปริมาณออกซิเจนที่ซึมผ่านเมมเบรน หากมีออกซิเจนมาก กระแสไฟฟ้าจะเกิดมาก วงจร I to V จะเปลี่ยนกระแสไฟฟ้าเป็นแรงดัน และชดเชยค่าที่อ่านได้กับอุณหภูมิผ่านทางเทอร์มิสเตอร์ ค่าแรงดันจะเข้าวงจรขยาย เพื่อให้ค่าอยู่ในช่วงที่ต้องการอ่านจากอุปกรณ์อ่านค่า ก่อนส่งออกทางเอาต์พุตต่อไป (บุญชัย, 2544: 37-100)



ภาพที่ 15 (a) แผนภาพแสดงการต่อเครื่องมือที่ใช้ในการเปรียบเทียบมาตรฐานของ
หัววัดออกซิเจน
(b) กราฟความสัมพันธ์ระหว่างผลการวัดค่าออกซิเจนที่ละลายในน้ำ
จากเครื่องมือทั้งสอง

จากภาพที่ 15 แสดงการต่อเครื่องมือการสอบเทียบมาตรฐานกับหัววัดที่ได้สร้างขึ้นโดยการเก็บข้อมูลผ่านเครื่อง Data logger โดยทั้งสองหัววัดสามารถเก็บค่าพร้อมกันและนำค่าที่ได้มาเทียบเวลาจะพบว่าเมื่อนำค่ามาหาความสัมพันธ์จะได้ความสัมพันธ์เป็นเส้นตรงหรือเชิงเส้นทำให้สามารถที่จะนำข้อมูลการตอบสนองของหัววัดที่สร้างขึ้นมาทำการวัดค่าได้แม่นยำ



ภาพที่ 16 แสดงอุปกรณ์รับสัญญาณและการเก็บข้อมูลของหัววัดที่สร้างขึ้น

จากภาพที่ 16 แสดงอุปกรณ์ในการเก็บข้อมูลของหัววัดที่ได้สร้างขึ้นต่อเข้ากับชุดเก็บข้อมูล หรือชุด Data logger ซึ่งสามารถนำค่าแรงดันมาต่อเข้ากับชุดเก็บข้อมูลพร้อมทั้งตั้งเวลาเริ่มต้นได้



ภาพที่ 17 แสดงหัววัดที่สร้างขึ้น (Self-development probe)

จากภาพที่ 17 แสดงหัววัดที่สร้างขึ้นและทดสอบหาค่าความสัมพันธ์เทียบกับหัววัดมาตรฐานเพื่อนำข้อมูลที่ได้ไปปรับตั้งค่าหรือการปรับเทียบ Calibrate ในการวัดค่าออกซิเจนต่อไป



ภาพที่ 18 แสดงอุปกรณ์รับสัญญาณเครื่องวัดมาตรฐาน (Standard DO meter)

จากภาพที่ 18 แสดงเครื่องวัดมาตรฐานยี่ห้อ HANNA รุ่น HI 964400 ทำหน้าที่วัดเปรียบเทียบค่าออกซิเจนที่ละลายในน้ำ วัดหาค่าออกซิเจนละลายอยู่ในน้ำ (ppm) เพื่อทำการเปรียบเทียบกับค่าที่อ่านได้ว่ามีแรงดันกี่ mV เพื่อหาความสัมพันธ์ โดยเครื่องวัดมาตรฐานมีคุณลักษณะคือสามารถวัดค่าออกซิเจนได้ตั้งแต่ 0-20 ppm



ภาพที่ 19 แสดงหัววัดออกซิเจนมาตรฐาน (Standard DO probe)

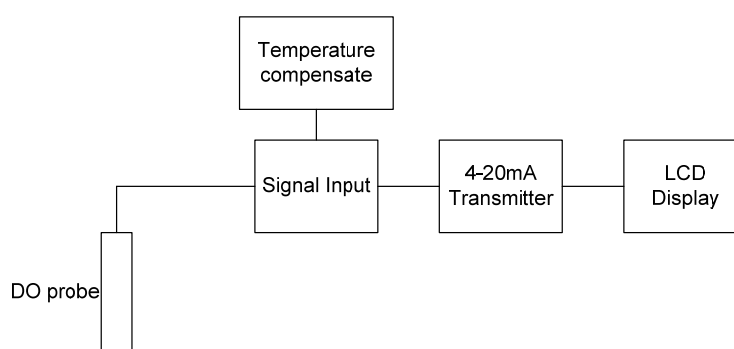
แสดงหัววัดมาตรฐานที่เครื่องวัดยี่ห้อ HANNA ตามภาพที่ 19 ใช้วัดค่าออกซิเจนเป็นประเภทโพลาโรกราฟิก โดยมีเงินเป็นขั้วแอโนด และ แพลตินัมเป็นขั้วแคโทด เมมเบรนเป็นประเภทTeflon หนากว่าหัววัดที่สร้างขึ้น ในส่วนหัววัดมาตรฐานด้ามจับด้านในจะเป็นโลหะด้านนอกถูกเคลือบด้วยพลาสติก



ภาพที่ 20 แสดงการเก็บข้อมูลของหัววัดออกซิเจนกับหัววัดมาตรฐาน

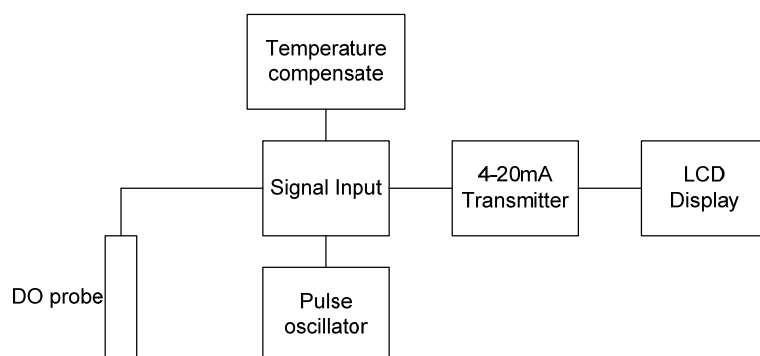
การทดลองในการหาความสัมพันธ์ตามภาพที่ 20 เป็นการเก็บข้อมูลและทดสอบหัววัดออกซิเจนเพื่อสอบเทียบพร้อมทั้งทดสอบการตอบสนองของหัววัด โดยในภาพจะพบว่ามีถึงก๊าซ 2 ถึง ทำหน้าที่ในการจ่ายก๊าซให้กับถังน้ำที่มีหัววัด โดย มีก๊าซ ออกซิเจน(O_2) และ ก๊าซไนโตรเจน(N_2) ซึ่งก๊าซไนโตรเจนทำหน้าที่ในการลดออกซิเจนที่ละลายอยู่ในน้ำ

6. การออกแบบวงจรรับสัญญาณจาก DO probe



ภาพที่ 21 แสดงการทำงานของระบบหัววัดออกซิเจนแบบไบอัสคงที่

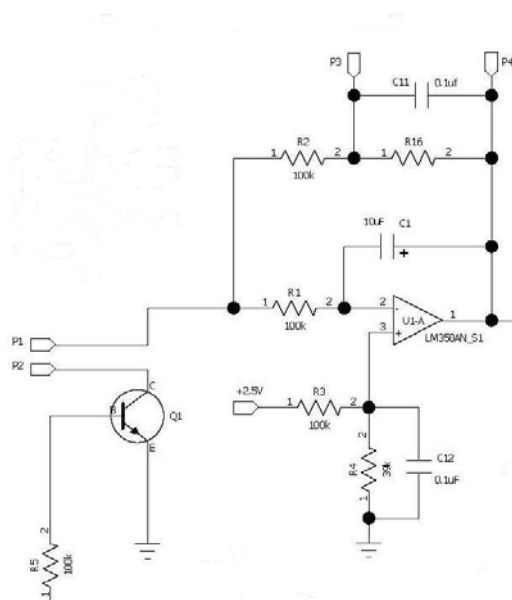
การทำงานของวงจรวัดค่าออกซิเจนดังภาพที่ 21 แสดงโครงสร้างและองค์ประกอบการทำงานของวงจรซึ่งประกอบด้วยหัววัดออกซิเจน วงจรรับสัญญาณ(Signal input circuit) วงจรชดเชยอุณหภูมิ(Temperature compensate) วงจรเปลี่ยนแรงดันเป็นกระแส 4-20mA หรือ วงจรส่งกระแส 4-20mA และวงจรแสดงผลพร้อมวงจรปรับตั้งค่าการวัดโดยควบคุมและคำนวณการทำงานด้วย Microcontroller MSP 430



ภาพที่ 22 แสดงการทำงานของระบบหัววัดออกซิเจนแบบพัลส์ไบอัส

การทำงานของระบบหัววัดออกซิเจนแบบพัลส์ไบอัสแสดงตามภาพที่ 22 โครงสร้างของวงจรประกอบด้วย วงจรรับสัญญาณ (Signal input circuit) วงจรชดเชยอุณหภูมิ (Temperature compensate) วงจรพัลส์ไบอัส (Pulse oscillator) วงจรส่งสัญญาณ 4-20mA และวงจรแสดงผล ซึ่งแตกต่างจากการทำงานของวงจรที่ผ่านมาตรงที่มีวงจรพัลส์ไบอัส

6.1 วงจรรับสัญญาณจากหัววัด



ภาพที่ 23 แสดงวงจรรับสัญญาณจากหัววัดออกซิเจนเปลี่ยนกระแสเป็นแรงดัน

การทำงานของวงจรของภาครับสัญญาณ โดยใช้ ออปแอมป์ (op amp) ตามภาพที่ 23 ทำหน้าที่เปลี่ยนกระแสเป็นแรงดันด้วยการต่อร่วมกับ R1, R2 และ R16 ส่วน C1 ทำหน้าที่ low pass filter เพื่อให้สัญญาณไม่มีการรบกวนจากความถี่สูง ส่วน R3 และ R4 ทำหน้าที่แบ่งแรงดันให้เท่ากับ 0.7 โวลต์เพื่อทำหน้าที่ไบอัสกับหัววัด DO Probe Q1 ทำหน้าที่ควบคุมการปิดเปิดด้วย Pulse การไหลของกระแสที่ไหลผ่าน DO Probe ให้ทำงานตามจังหวะที่ควบคุม

P1 ต่อเข้ากับหัววัดออกซิเจนที่ละลายในน้ำ โดยต่อเข้ากับขั้ว Anode ของเงิน และ P2 ต่อเข้ากับขั้ว Cathode ของ ทองคำ กล่าวคือ P1 และ P2 มีค่าแรงต่างกัน 0.7 Volt เพื่อให้หัววัดสามารถทำปฏิกิริยาเคมีได้ เมื่อเกิดการไบอัสที่แรงดัน 0.7 Volt (ในสภาวะ Q1 ON) จะเกิดกระแสไหลจาก P1 ไป P2 โดยที่กระแสจะไหลจาก Op amp U1-A จากขา 1 ไหลผ่าน R16, R2 และ Thermistor ซึ่งอยู่ระหว่าง P3, P4 ของวงจรในภาพที่ 23 ในส่วนของวงจร Low pass filter มี C1, R1 ทำหน้าที่กำจัดสัญญาณรบกวน

การออกแบบการทำงานของวงจรเปลี่ยนกระแสเป็นแรงดัน (Current to Voltage converter) สามารถคำนวณหาความสัมพันธ์ ได้ดังนี้

$$V_{out} = I_{probe} \left(R2 + \frac{R16 \times R_{th}}{R16 + R_{th}} \right) + 2.5V_{ref} \left(\frac{R4}{R3 + R4} \right) \quad (10)$$

$$\text{โดยที่ } R_{th} = \text{Thermistor} , V_{bias} = 0.7 = 2.5V_{ref} \left(\frac{R4}{R3 + R4} \right)$$

เลือกค่า R4 = 39K และ R3 = 100K จะทำให้ V_{bias} ประมาณ 0.7 Volt

V_{out} เป็นแรงดันเอาต์พุตของออปแอมป์ U1-A , I_{probe} เป็นกระแสเอาต์พุตจากหัววัดออกซิเจนและ R_{th} เป็นเทอร์มิสเตอร์แบบ NTC (Negative Temperature Coefficient) มีไว้เพื่อชดเชยการเปลี่ยนแปลงของกระแสที่เกิดขึ้นเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลง

จากวงจรพบว่าการเปลี่ยนแปลงค่า R2 ทำให้ V_{out} เปลี่ยนไปขึ้นอยู่กับความเหมาะสมและการตอบสนองของหัววัดในการเลือกค่า ซึ่งการตอบสนองของหัววัดขึ้นอยู่กับขนาดพื้นที่ผิว

ของทองคำหรือพื้นที่ผิวของอิเล็กโตรด ถ้าพื้นที่ผิวมากกระแสที่ไหลผ่านได้มากทำให้ต้องมีการลดค่า R2 ลงเพื่อให้แรงดัน V_{out} ให้เหมาะสมกับวงจรที่จะนำสัญญาณไปทำการปรับ Gain และ off set ต่อไป

6.1.1 ผลการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ

การออกแบบวงจรให้สามารถวัดค่าได้แม่นยำวงจรต้องวัดค่าออกซิเจนได้คงที่เมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลงไป เพราะผลของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิขณะทำการวัดค่าส่งผลกระทบต่อให้กับปฏิกิริยาเคมีในหัววัดซึ่งทำให้กระแสที่ไหลผ่านอิเล็กโตรดมีการเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ กล่าวคือถ้าอุณหภูมิสูงขึ้นจะทำให้กระแสสูงขึ้นด้วย ดังนั้นจำเป็นต้องมีการทดสอบเพื่อหาความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงของกระแสหรือแรงดันเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลงไปซึ่ง สามารถหาความสัมพันธ์ได้จากการทดลองดังนี้



ภาพที่ 24 แสดงบอร์ดรับสัญญาณทดสอบจากหัววัดและบอร์ดวัดอุณหภูมิ

จากภาพที่ 24 แสดงการทดสอบอุณหภูมิมีผลต่อแรงดันหรือกระแสของหัววัดเมื่อค่าออกซิเจนคงที่ โดยใช้บอร์ดอุณหภูมิ(บอร์ดที่มีจอ LCD) จากหัววัดออกซิเจนและบอร์ดรับสัญญาณจากหัววัดออกซิเจนโดยมีมิเตอร์วัดแรงดันของสัญญาณ



ภาพที่ 25 แสดงตู้ปรับอุณหภูมิขึ้นลงเพื่อทดสอบผลการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ

การทดสอบการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิต้องใช้ตู้ปรับอุณหภูมิ (Temperature Control) ตามภาพที่ 25 โดยตู้สามารถปรับอุณหภูมิขึ้นลงได้ตั้งแต่ 0-100 °C หรือต่ำกว่า



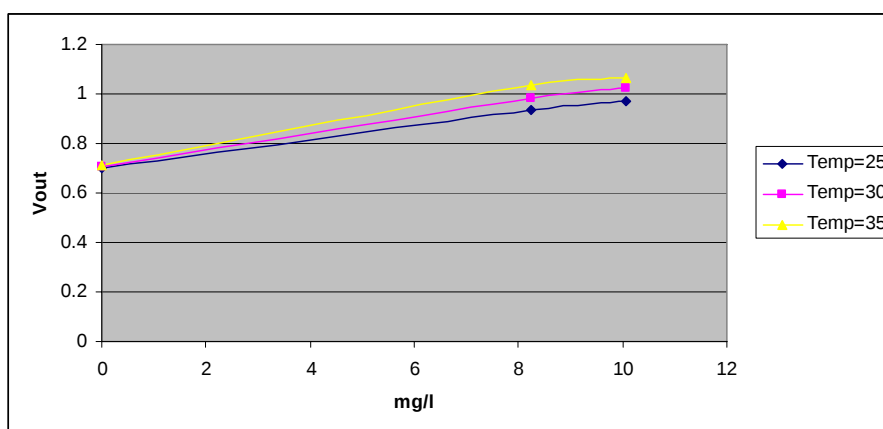
ภาพที่ 26 แสดงการติดตั้งหัววัดออกซิเจนที่ละลายในน้ำเพื่อทดสอบการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ

จากภาพที่ 26 แสดงการติดตั้งหัววัดออกซิเจนภายในตู้ โดยที่หัววัดจุ่มอยู่ในสารละลายคือน้ำภายในขวดรูปชมพู่ ซึ่งขวดตั้งอยู่บนกล่องวงจรที่ควบคุมการกวนน้ำเพื่อทำให้น้ำอิ่มตัวได้ตามอุณหภูมิต่างได้ การที่กวนน้ำให้อิ่มตัวตามอุณหภูมิต่างๆสามารถทำให้ทราบค่าออกซิเจนที่ละลายอยู่ในน้ำได้โดยมีความสัมพันธ์ตามตารางที่ 4

ตารางที่ 3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและแรงดันสัญญาณเอาต์พุต

DO (mg/l)	อุณหภูมิ(องศาเซลเซียส)		
	25	30	35
0	0.701	0.703	0.709
8.24	0.933	0.982	1.037
10.07	0.972	1.025	1.063

ผลการทดลองเก็บข้อมูลได้ตามตารางที่ 3 พบว่าค่าออกซิเจนที่ทดลองมีอยู่ 3 ค่าคือ ออกซิเจน 0, 8.24 และ 10.07 โดยพิจารณาจากข้อมูลพบว่าเมื่อมีการปรับอุณหภูมิ 3 ค่า คือ 25°C , 30°C และ 35°C ค่าแรงดันเปลี่ยนแปลงนำมาเขียนกราฟได้ดังนี้



ภาพที่ 27 กราฟแสดงอุณหภูมิและสัญญาณเอาต์พุต

จากภาพที่23 สามารถนำมาคำนวณหาค่าการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิมาคำนวณหาค่าที่จะชดเชย อุปกรณ์ที่จะทำให้สัญญาณเอาท์พุท คงที่ได้ด้วยการใส่ Thermistor แบบ NTC เข้าไปในวงจร และการชดเชยมีการต่อร่วมกับ R16 โดยมีการหาค่าความสัมพันธ์ ดังนี้

$$\text{จากสมการ(10) } V_{out} = I_{probe} \left(R2 + \frac{R16 \times R_{th}}{R16 + R_{th}} \right) + 2.5V_{ref} \left(\frac{R4}{R3 + R4} \right)$$

นำสมการที่ (10) มาหาความสัมพันธ์ดังนี้

$$V_{out} = I_{probe} \left(R2 + \frac{R16 \times R_{th}}{R16 + R_{th}} \right) + 2.5V_{ref} \left(\frac{R4}{R3 + R4} \right)$$

กำหนดให้ $R16 // R_{th} = R_x$ at 25°C , $0.7 = 2.5V_{ref} \left(\frac{R4}{R3 + R4} \right)$, $R16 // R_{th} = R_y$ at 30°C

$$V_{out_{25^\circ\text{C}}} = I_{p1}(R2 + R_x) + 0.7$$

$$V_{out_{30^\circ\text{C}}} = I_{p2}(R2 + R_y) + 0.7$$

เมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลงไปแต่ สัญญาณ output คงที่ ทำให้ สมการ $V_{out_{25^\circ\text{C}}} = V_{out_{30^\circ\text{C}}}$

$$I_{p1}(R2 + R_x) = I_{p2}(R2 + R_y)$$

$$\frac{I_{p1}}{I_{p2}} = \frac{(R2 + R_y)}{(R2 + R_x)} \quad (11)$$

หาค่า I_{p1}, I_{p2} จากตาราง $V_{out1} = 0.933\text{at}25^\circ\text{C}, V_{out2} = 0.982\text{at}30^\circ\text{C}, R2=100\text{K}$

$$I_{p1} = \frac{V_{out1} - 0.7}{R2} = 2.33\mu\text{A}$$

$$I_{p2} = \frac{V_{out2} - 0.7}{R2} = 2.82 \mu A$$

แทนค่าในสมการ(5) โดยที่ $R_x = \left(\frac{R_{16} \times R_{th}}{R_{16} + R_{th}} \right), R_{th} = 10k \text{ at } 25^\circ C$

จากสมการที่ (8) แทนค่าลงในสมการ

$$\frac{2.33}{2.82} = \frac{(100k + R_y)}{(100k + R_x)}$$

$$0.826(100k + R_x) = (100k + R_y)$$

$$82.6k + 0.826R_x = 100k + R_y$$

$$R_y = 0.826R_x - 17.4k \quad (12)$$

จากสมการที่ (9) สามารถหาค่า R_y ได้เมื่อกำหนดค่า R_x

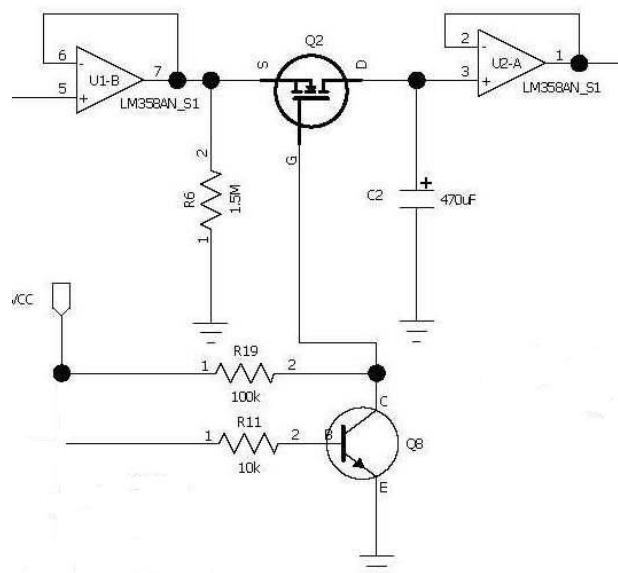
เช่นกำหนดให้ค่า $R_x = 30k$ ที่อุณหภูมิ $25^\circ C$ จะได้ว่า

$$R_y = 0.826 \times 30k - 17.4k$$

$$R_y = 7.38k \quad \text{ที่อุณหภูมิ } 30^\circ C$$

จากภาพที่ 23 แสดงวงจรที่มีการชดเชยอุณหภูมิ โดยมี R16 ต่อขนานกับเทอร์มิสเตอร์ และจากการคำนวณตามสมการที่ 9 พบว่าทราบค่า $R_x=30k$ และ $R_y=7.38k$ ทำให้ต้องมีการเลือกค่าเทอร์มิสเตอร์ให้มากพอที่จะขนานกับ R16 ให้เท่ากับหรือใกล้เคียง 30 k หรือไม่ต้องมีค่า R16 มาต่อขนานจะทำให้สามารถลดค่าเทอร์มิสเตอร์ลงได้

6.2 วงจร Sample and Hold

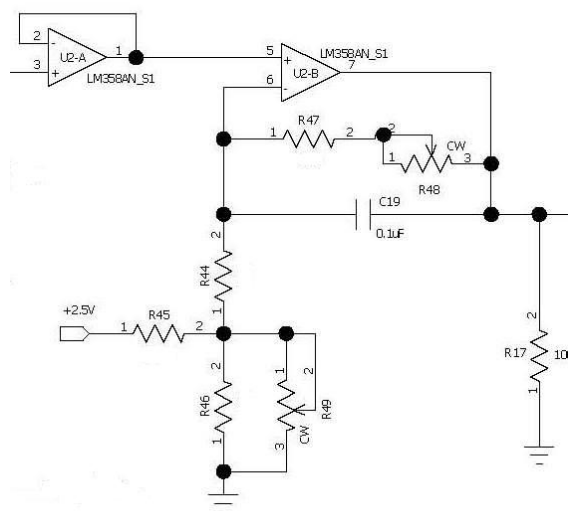


ภาพที่ 28 แสดงวงจร Sample and Hold

จากภาพที่ 28 เนื่องแรงดันเอาต์พุตจากออปแอมป์ U1-B มีลักษณะ ON-OFF สลับกันตลอดเวลา จึงเกิดความยากลำบากที่จะอ่านค่าหรือนำไปแสดงผล ดังนั้นจึงได้เพิ่มวงจรเก็บรักษาค่าแรงดัน ซึ่งมีส่วนประกอบสำคัญ คือ ทรานซิสเตอร์ Q2 ซึ่งเป็น MOSFET กับ ตัวเก็บประจุ C2 โดยเมื่อทรานซิสเตอร์ Q2 ได้รับสัญญาณแรงดันสูงจากไอซี 555 ที่ป้อนเข้ามาทางขาเกต ทรานซิสเตอร์ Q2 จะนำกระแส ซึ่งในที่นี้ได้ถูกออกแบบมาให้ทรานซิสเตอร์ Q2 เริ่มนำกระแส ในขณะที่ทรานซิสเตอร์ Q1 อยู่ในภาวณำกระแส แต่จะหยุดนำกระแสพร้อมๆกัน

ในช่วงเวลาที่ทรานซิสเตอร์ Q2 นำกระแส จะเกิดการอัดประจุไปเก็บไว้ในตัวเก็บประจุ C2 ด้วยแรงดันที่มีค่าเท่ากับแรงดันเอาต์พุตของออปแอมป์ U1-B ที่ถูกส่งผ่านมาทางวงจรบัฟเฟอร์ของออปแอมป์ U2-A และเมื่อทรานซิสเตอร์ Q2 ได้รับแรงดัน 0 V จากไอซี 555 ทรานซิสเตอร์ Q2 จะหยุดนำกระแส ทำให้แรงดันที่คร่อมตัวเก็บประจุ C2 มีค่าเท่ากับแรงดันเอาต์พุตของออปแอมป์ U1-B ของตอนที่ทรานซิสเตอร์ Q2 นำกระแส ซึ่งเป็นการเก็บรักษาค่าแรงดันนั่นเอง จากวงจรจะพบว่า มี Q8 ซึ่งทำหน้าที่การกลับเฟสของสัญญาณ IC2 555 ก่อนนำสัญญาณมาไบอัสที่ MOSFET

6.3 วงจรขยายผลต่างของสัญญาณ



ภาพที่ 29 แสดงวงจรขยายผลต่าง (differential amplifier)

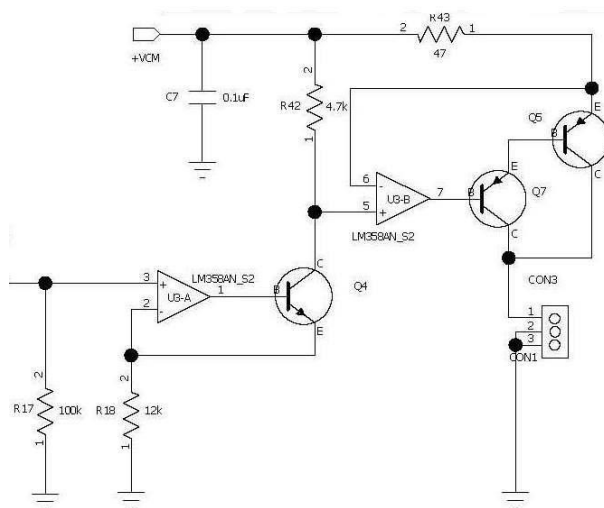
วงจรขยายสัญญาณทำหน้าที่ขยายสัญญาณให้มีขนาดที่เหมาะสมโดยมีการทำงานดังนี้คือ Op amp U2-B ทำหน้าที่ร่วมกับ R44, R45, R46, R47, R48, และ R49 โดยมีความสัมพันธ์ดังนี้

$$V_{out} = V_{in} \left(\frac{R47 + R48}{R44 + R45 // R46 // R49} \right) + V_{in} - 2.5 \left(\frac{R46 // R49}{R45 + R46 // R49} \right) \left(\frac{R47 + R48}{R44 + R45 // R46 // R49} \right) \quad (13)$$

โดยที่ V_{out} คือสัญญาณที่ออกจากขา 7 ของ U2-A , V_{in} คือสัญญาณที่เข้าขา 5 ของ U2-A ซึ่งการทำงานของ op amp U2-A ทำหน้าที่ขยายสัญญาณให้มีขนาดที่เหมาะสมก่อนที่จะส่งสัญญาณไปที่ภาคจ่ายกระแส 4-20mA

จากการทำงานของวงจรตามภาพที่ 29 จะพบ R48และR49 เป็นความต้านทานที่ปรับค่าอัตราการขยาย(Gain or Slope) และ ปรับค่า ชดเชย (Offset) ให้ได้ค่าที่เหมาะสมตามสมการที่ 10 และเพื่อเป็นการชดเชยหัววัด คือในการประกอบหรือการสร้างหัววัดที่สร้างขึ้นแต่ละหัววัดมีการตอบสนองของกระแสในหัววัดที่แตกต่างกันซึ่งมีความจำเป็นที่ต้องมีการปรับแต่งสัญญาณแรงดันให้เหมาะกับการส่งสัญญาณไปที่วงจรเปลี่ยนแรงดันเป็นกระแส4-20mA ต่อไป

6.4 วงจรเปลี่ยนแรงดันเป็นกระแส 4-20mA



ภาพที่30 แสดงวงจรเปลี่ยนแรงดันเป็นกระแส 4-20mA (I to V converter)

การออกแบบวงจรเปลี่ยนแรงดันเป็นกระแสโดย op amp U3-A และ U3-B ต่อร่วมกัน เมื่อมีการป้อนสัญญาณที่มีค่า Volt เข้าทางขา 3 ของ U3-A จะทำให้มีกระแสไหลผ่าน R42, Q4 และ R18 ทำให้เกิดแรงดันคร่อม R42 ทำให้เกิดแรงดันที่ขา 5 ของ U3-B ซึ่งส่งผลให้เกิดการไหลของกระแสผ่าน Q5, Q7 จ่ายออกไปทางขา Collector ตาม Volt ที่เปลี่ยนแปลง ขณะที่ R43 ทำหน้าที่ limit กระแสไม่ให้กระแสมากเกินไปถ้ามีแรงดันเข้าขา 3 ของ U3-A

จากภาพที่30 สามารถอธิบายการทำงานของวงจรได้ด้วยความสัมพันธ์ของสมการดังนี้
พิจารณา Op amp (U3-A)

$$V_{in(U3-A)} = I_{CE} \times R18 \quad \text{ดังนั้น} \quad I_{CE} = \frac{V_{in(U3-A)}}{R18}$$

$$V_{in(U3-B)} = V_{CM} - I_{CE} \times R42 \quad , \quad V_{CM} \text{ คือ โฟลตของวงจรในภาพที่ 30}$$

$$V_{in(U3-B)} \text{ ขา 5} = I_{Q5} \times R43$$

จากสมการสามารถรวมกันได้

$$I_{E(Q5)} = \frac{\left(V_{CM} - V_{in(U3-A)} \times \frac{R42}{R18} \right)}{R43}$$

โดยที่ $I_{C(Q5)} = I_{E(Q5)} - I_{B(Q5)}$, กระแส 4-20 mA ถูกจ่ายผ่าน $I_{C(Q5)} + I_{C(Q7)}$

จากวงจรถ้ากระแสที่ไหลผ่านขา Base เข้าขา 7 ของ U3-B น้อยมากสามารถสรุปได้ว่า

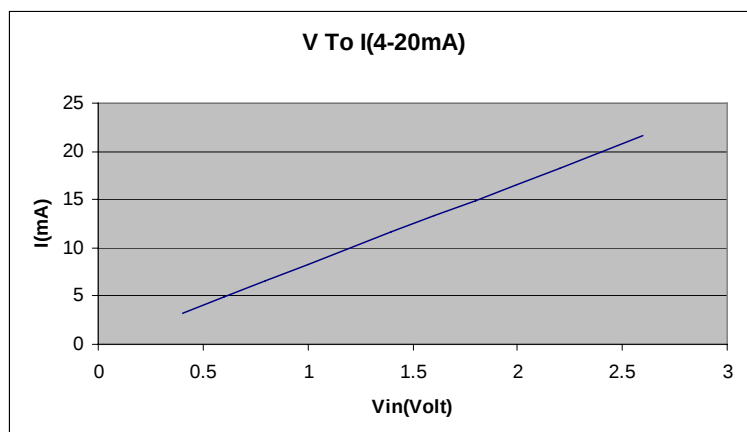
$$I_{4-20mA} = \frac{\left(V_{CM} - V_{in(U3-A)} \times \frac{R42}{R18} \right)}{R43} \quad (14)$$

การทำงานของวงจรโดยได้อธิบายด้วยสมการพบว่ากระแสที่จ่ายออกจากขา C หรือ Collector ของ Q5 มีความสัมพันธ์กับ $V_{in(U3-A)}$ เป็นเชิงเส้นนำไปใช้เป็นวงจรเปลี่ยนแรงดันเป็นกระแส(4-20mA)

ตารางที่ 4 แสดงผลการทดสอบวงจรเปลี่ยนแรงดันเป็นกระแส

Vin(Volt) ขา 3 (U3-A)	$I_{4-20mA} = I_{C(Q5)} + I_{C(Q7)}$
0.40	3.238
0.60	4.974
0.80	6.642
1.00	8.298
1.20	9.960
1.40	11.625
1.60	13.280
1.80	14.940
2.00	16.595
2.20	18.247
2.40	19.910
2.60	21.583

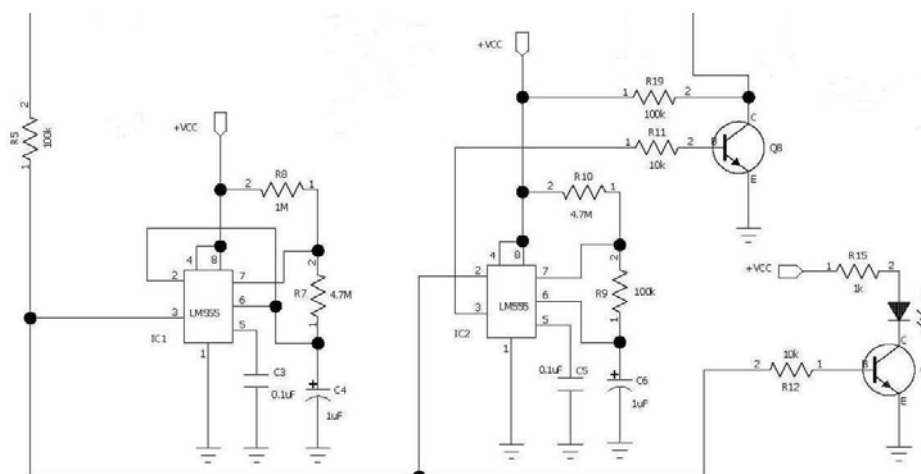
การทดสอบและเก็บข้อมูลของวงจรเปลี่ยนแรงดันเป็นกระแส 4-20mA ตามตารางที่4 โดยหาความสัมพันธ์ของ Vin(Volt) ขา 3 (U3-A) และ $I(mA) = I_{C(Q5)} + I_{C(Q7)}$ เพื่อทำการทดสอบความเป็นเชิงเส้นของวงจร โดยป้อนค่าแรงดันตั้งแต่ 0.4-2.6 โวลต์และเก็บค่ากระแสเพื่อนำมาเขียนกราฟต่อไป



ภาพที่ 31 กราฟแสดงความสัมพันธ์การทดสอบวงจรเปลี่ยนแรงดันเป็นกระแส

การหาค่าความสัมพันธ์จากผลการทดลองเมื่อเปลี่ยนแรงดันเป็นกระแสตามภาพที่ 31 พบว่าค่าความสัมพันธ์มีความเป็นเชิงเส้นหรือเป็นเส้นตรง

6.5 วงจรผลิตความถี่ Pulse oscillator



ภาพที่ 32 แสดงวงจรผลิตความถี่ Pulse oscillator ควบคุมการ ON-OFF การนำกระแส ของ Q1 และ Q2

การทำงานของวงจรควบคุมผลิตความถี่ Pulse oscillator ตามภาพที่ 32 เพื่อทำหน้าที่ให้ Q1 และ Q2 ทำหน้าที่ปิดเปิดให้นำกระแสตามรูปคลื่นที่กำหนดด้วย IC1 และ IC2 โดยที่ IC1 ทำหน้าที่ผลิต Pulse ผ่านขา 3 ของ IC1 ป้อนให้กับ Q1 ซึ่ง IC1 ต่อวงจรแบบ Astable โดยความถี่ถูกกำหนดด้วย R7, R8 และ C4 ตามสมการดังนี้

$$t1 = 0.693(R8 + R7)C4 \quad \text{โดยที่ } t1 \text{ คือเวลา ON}$$

$$t2 = 0.693(R7)C4 \quad \text{โดยที่ } t2 \text{ คือเวลา OFF}$$

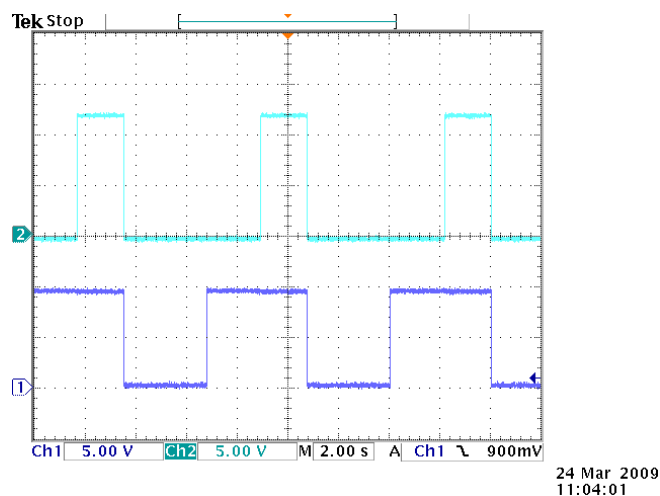
$$t1 + t2 = T = 0.693(R8 + 2R7)C4 \quad \text{โดยที่ } T \text{ คือคาบ}$$

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1.44}{(R8 + 2R7)C4} \quad (15)$$

จากภาพที่ 32 แสดงวงจรผลิตความถี่ ได้ค่า R7 4.7 M, R8 1M และ C4 1 μF ของ IC1 LM555 ซึ่งทำหน้าที่ผลิตความถี่ Pulse ป้อนให้กับทรานซิสเตอร์ Q1 ทำหน้าที่ ปิด เปิด การไหลของกระแส ของหัววัดออกซิเจน(DO probe)

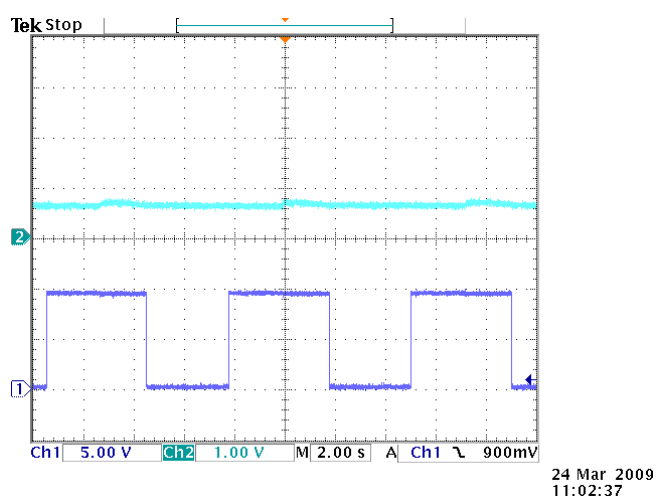
การทำงานของ IC2 LM555 ทำหน้าที่ในการ ปิด เปิด การทำงานของ Q2 หรือ MOSFET เพื่อควบคุมการทำงานของวงจร Hold ค่าเพื่อไม่ให้ สัญญาณ มีการเปลี่ยนแปลงเมื่อ Q1 หยุดนำกระแส โดย IC2 ถูกควบคุมความถี่ด้วย R9 100k , R10 4.7M และ C6 1 μF ในส่วนของ Q8 ทำหน้าที่กลับเฟสของสัญญาณที่นำไปไบอัสควบคุม MOSFET

การทำงานของ IC1 นอกจากจะไบอัสให้ Q1 ทำงาน ปิดเปิด ยังจะไบอัสให้ Q2 ทำหน้าที่ ปิดเปิด LED แสดงผลให้ทำงานตามจังหวะด้วย



ภาพที่ 33 กราฟแสดงการทำงานของIC555 และ ควบคุมMOSFET

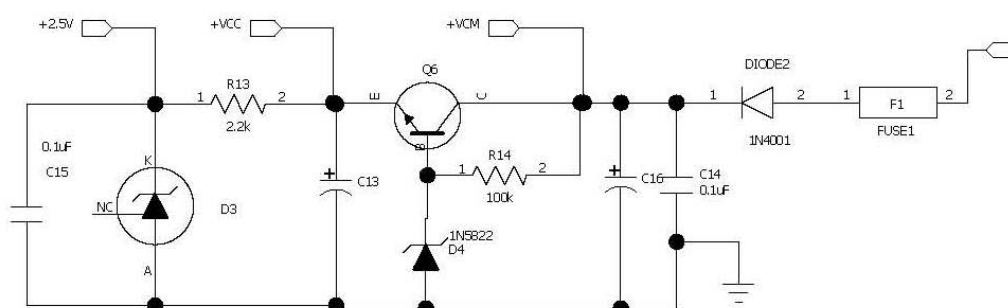
การทำงานของวงจรผลิตความถี่(Pulse oscillator) ควบคุมการไปอัสทรานซิสเตอร์ Q19 ตามภาพที่ 33 ที่ Ch1 เปลี่ยนแปลงระหว่าง 0-11V โดยมีความกว้างของ Pulse ON 4 วินาที และ Pulse OFF 3.8 วินาที ขณะที่การไปอัส MOSFET ของ IC2 LM555 แสดงที่ Ch2 เปลี่ยนแปลงระหว่าง 0-5V MOSFET จะ ON ที่แรงดันประมาณ 2.0-4.0 V แต่จาก Ch2 MOSFET จะ ON ทันทีเมื่อสัญญาณเปลี่ยนแรงดันเป็น 12 โวลต์ และก็จะ OFF เมื่อสัญญาณจาก Ch1 เปลี่ยนเป็นศูนย์ ซึ่งเป็นไปในทิศทางเดียวกันกับ Ch1



ภาพที่ 34 กราฟแสดงการทำงานของIC555 และสัญญาณที่ออกจาก Op Amp

จากภาพที่ 34 กราฟแสดง Ch1 Pulse ความถี่ ในกราฟ Ch2 แสดงสัญญาณที่มีการเปลี่ยนแปลงบางช่วงที่เห็นการเปลี่ยนแปลง ขณะที่ MOSFET ON กระแสจะถูกชาร์จใส่ตัวเก็บประจุทำให้เห็นการเปลี่ยนแปลงได้ชัดแต่จากการวัดค่าและอ่านค่าที่แสดงออกทางจอแสดงผลค่าที่ได้ไม่เปลี่ยนแปลงไปมากนัก

6.6 วงจรภาคจ่ายไฟ



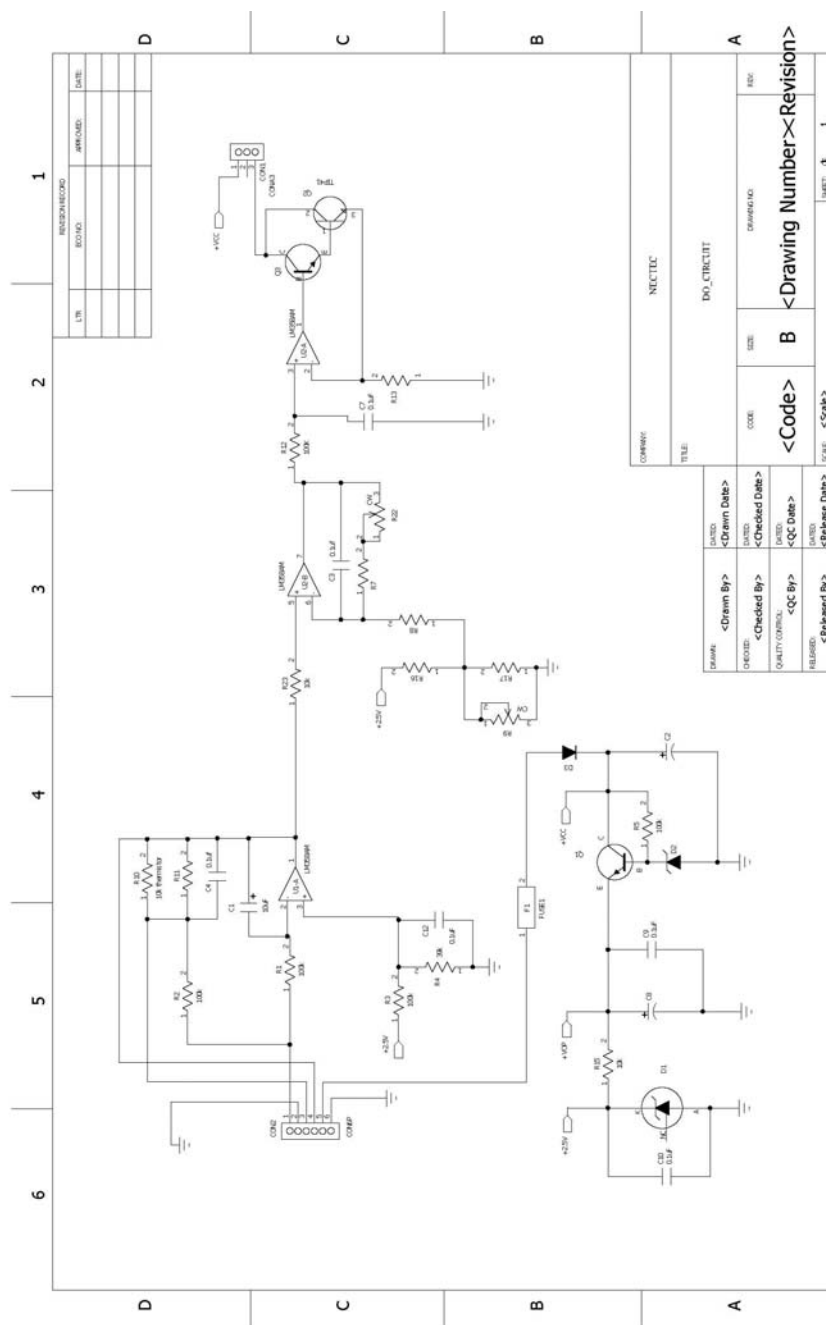
ภาพที่ 35 วงจรภาคจ่ายไฟ (Power Supply)

การทำงานของวงจรภาคจ่ายไฟตามภาพที่ 35 ประกอบด้วย Q6 , D4 ทำหน้าที่ รักษาสภาพแรงดันเมื่อมีการจ่ายแรงดันผ่าน FUSE , DIODE , C14, C16 วงจร Q6 จะทำงานเมื่อมีการ Bias ด้วยกระแสที่ขา Base ผ่าน R14 และ D4 ทำหน้าที่ รักษาแรงดันให้คงที่ โดยจากรูปมีความสัมพันธ์ดังนี้

$$V_{CC} = V_{CM} - V_{ZD} + V_{BE} \quad (16)$$

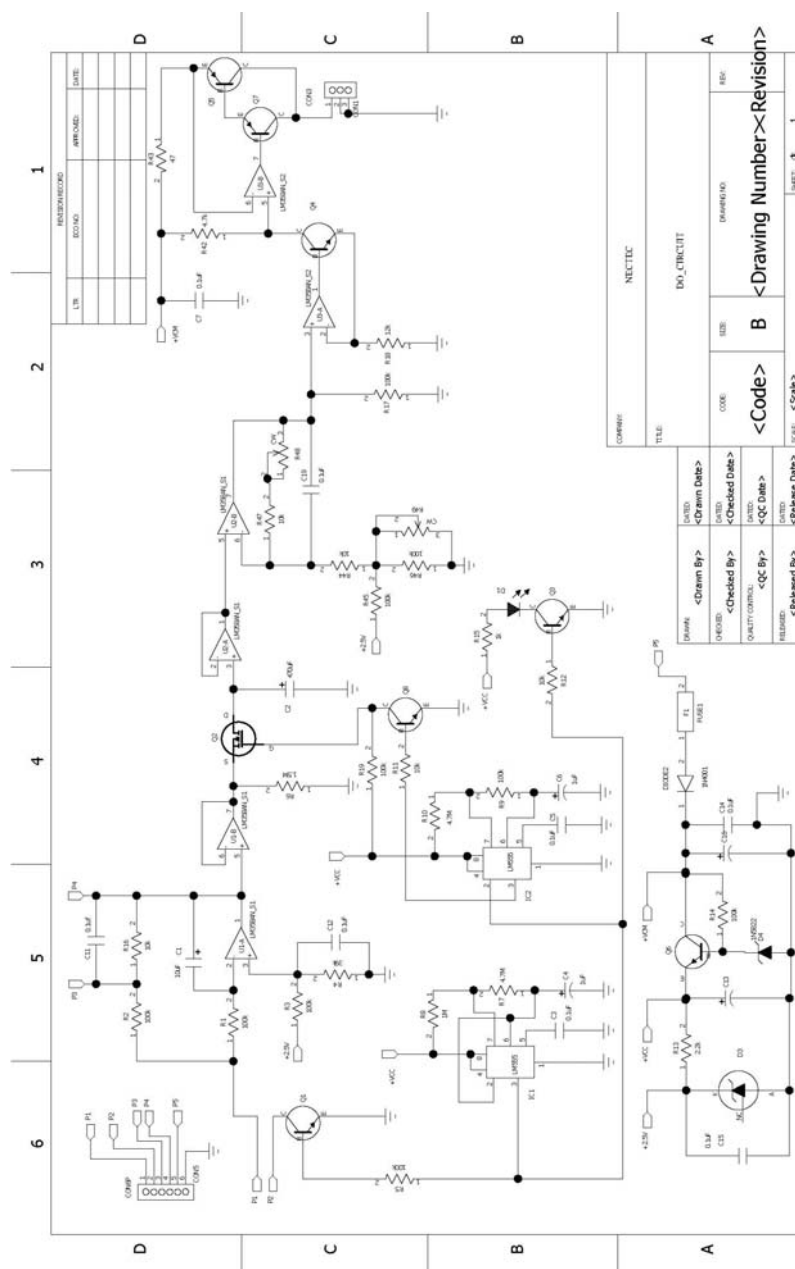
โดยที่ $V_{BE} = 0.6, V_{ZD} = 12V$

ในส่วนของ D3 ทำหน้าที่รักษาแรงดันให้คงที่เรียกว่า Reference Voltage เป็น IC ที่มีเสถียรภาพโดยให้แรงดันออกมาที่ 2.5 โวลต์ เบอร์ที่ใช้คือ LM 385 หรือ LM 336 ซึ่งให้แรงดันเท่ากันสามารถใช้แทนกันได้



ภาพที่ 36 แสดงวงจรรับสัญญาณของหัววัดออกซิเจนแบบไบอัสคงที่

แสดงการออกแบบวงจรตามรูปที่ 36 ออกแบบโดยการรวมวงจร รับสัญญาณ วงจร
ชดเชยอุณหภูมิ วงจรขยายผลต่าง วงจรเปลี่ยนแรงดันเป็นกระแส 4-20 mA และวงจรภาคจ่ายไฟ
รวมเป็นวงจรเดียวกัน

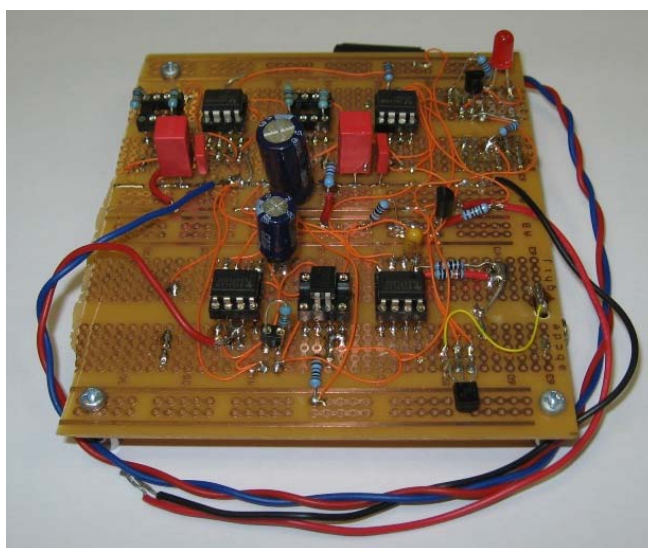


ภาพที่ 37 แสดงวงจรรับสัญญาณของหัววัดออกซิเจนแบบพัลส์ไบอัส

วงจรที่แสดงตามภาพที่ 37 เป็นการออกแบบวงจรโดยรวมวงจรรับสัญญาณ วงจร
ชดเชยอุณหภูมิ วงจรขยายผลต่าง วงจรผลิตพัลส์ไบอัส วงจรเปลี่ยนแรงดันเป็นกระแส 4-20 mA

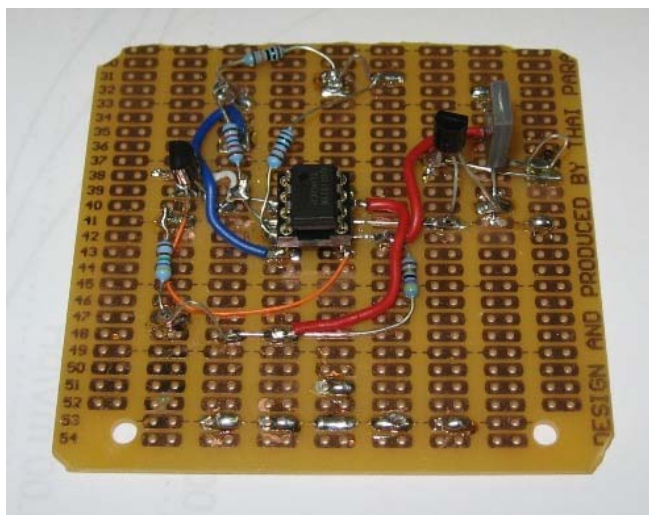
และวงจรภาคจ่ายไฟ โดยวงจรจะรับสัญญาณจากหัววัดออกซิเจนเพื่อเปลี่ยนเป็นกระแส 4-20mA ให้กับวงจรแสดงผลต่อไป

7. วงจรทดสอบ



ภาพที่ 38 วงจรทดสอบการทำงานของหัววัดออกซิเจน

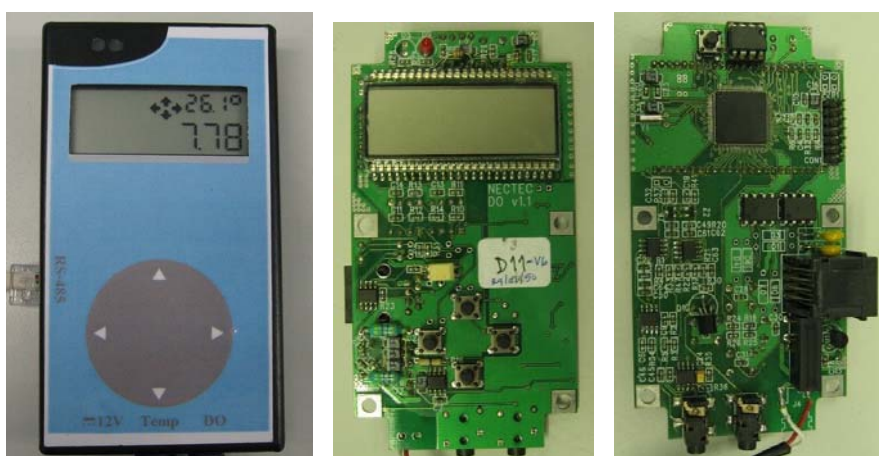
จากภาพที่ 38 แสดงวงจรที่ประกอบขึ้นประกอบไปด้วยวงจร 3 ส่วนคือ วงจรรับสัญญาณ หรือวงจรเปลี่ยนกระแสเป็นแรงดัน วงจรผลิตความถี่ไบอัส (Pulse bias) วงจรขยายสัญญาณ (Differential amplifier) โดยสัญญาณที่ออกมาจะมีแรงดันระหว่าง 0-2.5 V เพื่อส่งต่อให้วงจรเปลี่ยนแรงดันเป็นกระแส 4-20 mA



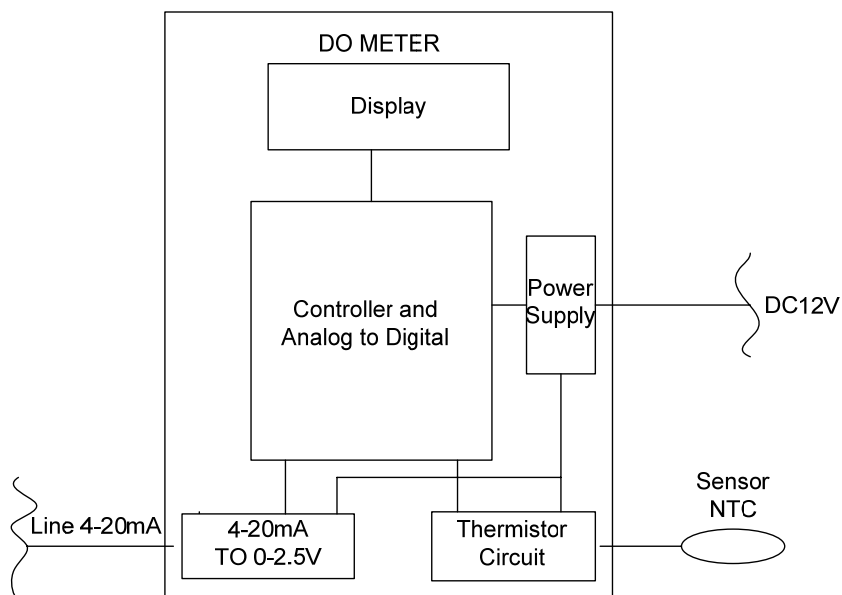
ภาพที่ 39 วงจรส่งสัญญาณมาตรฐาน 4-20mA

จากภาพที่ 39 แสดงวงจรเปลี่ยนแรงดันเป็นกระแสมาตรฐาน 4-20mA เพื่อทำการจ่ายกระแสให้กับวงจรแสดงผล ที่ ส่งเป็นกระแสเนื่องจากกระแสสามารถส่งข้อมูลได้ไกลและ ลดสัญญาณรบกวนจากสิ่งแวดล้อมภายนอกได้ นอกจากนี้วงจรภาครับที่เปลี่ยนกระแสเป็นแรงดัน มีอิมพีแดนซ์อินพุทมีค่าต่ำทำให้ลดสัญญาณรบกวน และค่าความต้านทานของสายไม่มีผลต่อกระแสสัญญาณด้วย

8. วงจรแสดงผลและประมวลผล



ภาพที่ 40 วงจรแสดงผลค่าการวัดออกซิเจนพร้อมปรับตั้งค่าการวัด



ภาพที่ 41 แสดงโครงสร้างภายในของ DO Meter

จากภาพที่ 41 วงจรแสดงผลซึ่งในวงจรประกอบด้วยวงจร 4 ส่วนคือ ภาคเปลี่ยนกระแส 4-20mA เป็นแรงดัน 0-2.5 V ภาครับสัญญาณจาก Temperature Sensor ภาคประมวลผล (Controller MSP430 มี ภาค ADC ในตัว) ภาค แสดงผล และภาคจ่ายไฟ

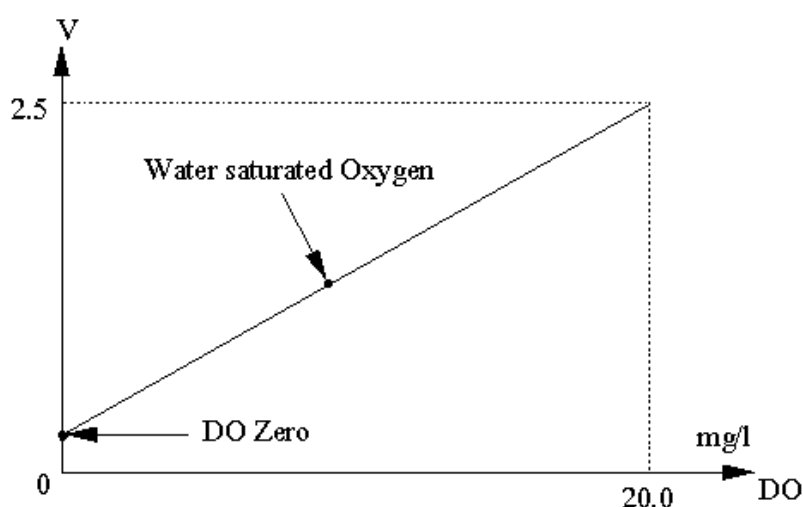
เมื่อสัญญาณ 4-20mA ได้ถูกส่งเข้ามาทางภาครับกระแสภาครับจะทำการเปลี่ยนกระแสเป็นแรงดันให้เหมาะสมประมาณ 0-2.5 V และส่งต่อไปยัง Controller ซึ่งมี ADC อยู่ภายในเปลี่ยนสัญญาณให้เป็น Digital และทำการประมวลผลพร้อมแสดงผลเป็นตัวเลขต่อไป

การทำงานของ meter ได้ออกแบบให้สามารถทำการปรับตั้งค่าของออกซิเจน (Calibration) ซึ่งสามารถปรับตั้งค่าของออกซิเจนได้ 2 จุดคือ CAL. DO=0 และ CAL. DO อากาศ (อากาศที่อิ่มตัวไปด้วยน้ำตามตารางที่ 4) เพื่อเครื่องจะได้ประมวลผลจากการวัดค่าได้ถูกต้องแม่นยำ

9. การปรับตั้งค่าของเครื่องมือวัดออกซิเจน (DO meter)

9.1 การคำนวณค่าออกซิเจน (DO)

ค่าDOจะมีสมการเป็นกราฟดังรูป



ภาพที่ 42 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Volt ที่ ADC และ ค่าออกซิเจน mg/l

ค่า slope และ offset ของ DO เกิดจากการปรับตั้ง 2 จุด โดยจุดแรกเกิดจากค่า DO ของสารละลายที่ไม่มีออกซิเจน ($DO=0$) และจุดที่สองเกิดจากค่า DO ในน้ำที่อิ่มตัวออกซิเจนที่อุณหภูมิและความดันนั้น ๆ (Water saturated oxygen) ค่า offset ของ DO วัดจาก Voltage ที่วัดในสารละลายที่ไม่มีออกซิเจน ($DO=0$) และ ค่า DO ในน้ำที่อิ่มตัวด้วยออกซิเจน หรือวัด DO ในอากาศที่อิ่มตัวไปด้วยน้ำ วัดจากอุณหภูมิและความดันตามความสัมพันธ์ของตาราง แต่เนื่องจากมิเตอร์กำหนดให้วัดที่ความดัน 760 mmHg เท่านั้น จึงหาความสัมพันธ์เฉพาะการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิซึ่งจะได้ค่า DO ในน้ำที่อิ่มตัวออกซิเจนแสดงตามตารางที่ 4 ดังนี้

ตารางที่ 5 แสดงค่าออกซิเจนอิ่มตัวในอากาศที่ความดัน 760 mm Hg อุณหภูมิต่างๆ

อุณหภูมิ(องศาเซลเซียส)	DO(ความชื้นอากาศ 100%) ppm	DO(ความชื้นอากาศ 0%) ppm
10	11.27	11.4
11	11.01	11.14
12	10.76	10.90
13	10.52	10.66
14	10.29	10.44
15	10.07	10.22
16	9.85	10.01
17	9.65	9.82
18	9.45	9.63
19	9.26	9.45
20	9.07	9.27
21	8.90	9.11
22	8.72	8.95
23	8.56	8.80
24	8.40	8.65

ตารางที่ 5 (ต่อ)

อุณหภูมิ(องศาเซลเซียส)	DO(ความชื้นอากาศ 100%) ppm	DO(ความชื้นอากาศ 0%) ppm
25	8.24	8.51
26	8.09	8.37
27	7.95	8.24
28	7.18	8.12
29	7.67	8.00
30	7.54	7.88
31	7.41	7.77
32	7.28	7.66
33	7.16	7.56
34	7.05	7.46
35	6.93	7.37
36	6.82	7.27
37	6.71	7.18
38	6.61	7.10
39	6.51	7.01
40	6.41	6.93

จากตารางที่ 4 แสดงค่าออกซิเจนที่อิ่มตัวในอากาศตามอุณหภูมิ และตามความชื้นของอากาศ ค่าทุกค่าจะจากตารางจะถูกเก็บไว้ที่หน่วยความจำของ Controller เช่น ขณะทำการปรับตั้งค่า หรือ การ CAL. ในอากาศ ที่อุณหภูมิ 30 °C ค่าที่อ่านได้จากตารางคือ DO=7.54 ppm (ที่ความชื้นอากาศ 100 %) จะทำให้เครื่องทราบว่า ตอนนี้ออกซิเจนในอากาศมีค่า 7.54 ppm ที่ ADC ค่าหนึ่ง และเมื่อทำการปรับตั้งกับค่า DO=0 จะทำให้ทราบว่า ADC ค่าหนึ่ง เมื่อทำการลากเส้นจะพบว่าเป็นเส้นตรงจากภาพที่ 40 ทำให้เมื่อนำไปวัดค่าออกซิเจนตามค่าต่างๆค่าที่แสดงออกมาจะอยู่ในจุดของสมการเส้นตรง (โดยที่กำหนดการตอบสนองของ DO probe เป็นเส้นตรงที่เคยได้ทดลอง)

10. อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์

ตารางที่ 6 อุปกรณ์บอร์ดรับสัญญาณและส่งสัญญาณ(4-20mA)

รายการ	จำนวน	ประเภท	เบอร์อุปกรณ์
1	1	DIODE2	1N4001
2	1	D4	1N5822
3	4	Q1 Q3-4 Q6	2N3904
4	1	Q7	2N3906
5	1	Q5	BD140
6	7	C3 C5 C7 C12 C14-15 C19	0.1uF
7	1	C11	0.1uf
8	1	C1	10uF
9	1	C2	470uF
10	2	C13 C16	100uF
11	2	C4 C6	1uF
12	1	CON1	CON3
13	1	CON5	CON6P
14	1	F1	FUSE1
15	1	Q2	IRFD110
16	1	D1	LED-1
17	2	IC1-2	LM555
18	2	U1-2	LM358AN
19	1	U3	LM358AN
20	1	D3	LM385BZ-2.5

ตารางที่ 6 (ต่อ)

รายการ	จำนวน	ประเภท	เบอร์อุปกรณ์
21	1	R6	1/4W,1.5M
22	9	R1-3 R5 R9 R14 R17 R45-46	1/4W,100k
23	5	R12-13 R16 R44 R47	1/4W,10k
24	1	R18	1/4W,12k
25	1	R8	1/4W,1M
26	1	R11	1/4W,1k
27	1	R15	1/4W,330
28	1	R4	1/4W,39k
29	1	R43	1/4W,47
30	1	R42	1/4W,470
31	2	R7 R10	1/4W,470k
32	2	R48-49	VRES-TOP-ADJ

การออกแบบและการสร้างแผ่นวงจรตามภาพที่ 43 แสดงแผ่นวงจร(a) TOP กือด้านบน (b) BOTTOM ด้านล่าง และ (c) คือตำแหน่งลงอุปกรณ์ ด้วยการออกแบบโดยใช้โปรแกรมในการช่วยออกแบบด้วยโปรแกรม POWER PCB

12. แผ่นวงจรพิมพ์ (PCB) ประกอบเสร็จ



ภาพที่ 44 แสดงแผ่นวงจรพิมพ์ (PCB) และอุปกรณ์

วงจรรับสัญญาณและส่งสัญญาณ 4-20mA ตามภาพที่ 44 มี 2 บอร์ดคือ บอร์ดซ้ายคือ บอร์ดที่เป็นวงจรไบอัสคงที่ และบอร์ดขวาเป็นวงจรไบอัสแบบพัลส์



ภาพที่ 45 แสดงการต่อหัววัดออกซิเจนเข้ากับบอร์ดพร้อมมิเตอร์แสดงผล

จากภาพที่43 การต่อหัววัดออกซิเจนที่ละลายในน้ำเข้ากับบอร์ดรับสัญญาณและ สัญญาณจะถูกส่งเข้ากับมิเตอร์แสดงผลการวัด ก่อนจะทำการวัดค่าออกซิเจนต้องมีการปรับตั้งค่าออกซิเจนในอากาศหรือที่เรียกว่าการ CAL. DOในอากาศด้วยการนำหัววัดขึ้นจากน้ำที่จะวัดถึงจะทำการปรับตั้งได้



ภาพที่ 46 แสดงการใช้งานของหัววัดออกซิเจนที่ละลายในน้ำ

ภาพที่ 46 แสดงการวัดค่าออกซิเจนที่ละลายในน้ำ ด้วยการหัววัดออกซิเจนที่สร้างขึ้น พร้อมบอร์ดรับสัญญาณ และมิเตอร์แสดงผล

ผลและวิจารณ์

ผล

เมื่อนำเครื่องวัดออกซิเจนที่ทำขึ้นเองที่มีการไบอัสแบบพัลส์ กับเครื่องมือวัดมาตรฐาน (HANNA HI964400) ไปวัดน้ำในถังที่มีการเพิ่มออกซิเจนอย่างช้าๆตั้งแต่ 0-20 ppm พร้อมๆกัน ได้ผลดังตารางที่ 6 ซึ่งแสดงผลการวัดในการทดลอง 2 ครั้ง จะเห็นว่าค่าที่วัดได้จากเครื่องวัดออกซิเจนที่ทำขึ้นเองที่มีการไบอัสแบบพัลส์ มีความแตกต่างไปจากค่าที่อ่านได้จากเครื่องมือวัดมาตรฐานเพียงเล็กน้อยเท่านั้น

นอกจากนี้เมื่อนำหัววัดออกซิเจนที่มีการไบอัสแบบพัลส์ และมีการไบอัสด้วยไฟตรงคงที่แบบธรรมดา ไปจุ่มแช่ในน้ำแล้วเปิดใช้งานวัดปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำอย่างต่อเนื่องนาน 45 วัน พบว่าของอิเล็กทรอนิกส์ของหัววัดออกซิเจนที่มีการไบอัสแบบพัลส์ ยังคงมีความเสถียรอยู่มาก เมื่อเทียบกับอิเล็กทรอนิกส์ของหัววัดที่มีการไบอัสด้วยไฟตรงคงที่แบบธรรมดา ดังแสดงไว้ในรูปที่ 6 โดยค่าที่อ่านได้จากเครื่องวัดออกซิเจนที่มีการไบอัสแบบพัลส์ยังคงมีความถูกต้องแม่นยำสูง ในขณะที่เครื่องวัดที่หัววัดที่ไบอัสด้วยไฟตรงคงที่แบบธรรมดามีความผิดพลาดสูงมาก ดังตัวอย่างผลการวัดที่แสดงไว้ในตารางที่ 7

ตารางที่ 7 แสดงการเปรียบเทียบผลการวัดค่าออกซิเจนที่ละลายในน้ำด้วยเครื่องวัด DO
ไบอัสแบบพัลส์

เครื่องวัด DOมาตรฐาน (ppm)	เครื่องวัด DO ไบอัสแบบพัลส์ (ppm)			ความคลาดเคลื่อน
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ค่าเฉลี่ย	
0	0.1	0.0	0.05	0.05
2	2.0	1.9	1.95	-0.05
4	4.2	4.1	4.15	0.15
6	6.1	5.9	6.00	0
8	8.2	8.0	8.10	0.1
10	10.3	9.9	10.10	0.1
12	12.4	12.2	12.30	0.3
14	14.2	14.1	14.15	0.15
16	15.9	16.3	16.10	0.1
18	18.1	18.0	18.05	0.05
20	20.4	19.9	20.15	0.15



ภาพที่ 47 แสดงการเปรียบเทียบความสะอาดของอิเล็กโทรดที่ไบอัสแบบพัลส์
(a)และไบอัสด้วย ไฟตรงคงที่
(b) หลังจากมีการใช้งานอย่างต่อเนื่องนาน 45 วัน

ตารางที่ 8 แสดงการเปรียบเทียบผลการวัดค่าออกซิเจนที่ละลายในน้ำด้วยเครื่องวัด DO ไบอัสแบบพัลส์ กับเครื่องวัด DO ไบอัสด้วยไฟตรงคงที่หลังมีการใช้งานอย่างต่อเนื่องนาน 45 วัน

เครื่องวัด	เครื่องวัด	เครื่องวัด	ความ
DOมาตรฐาน	DO ไบอัสแบบพัลส์	DO ไบอัสด้วยไฟตรง	คลาดเคลื่อน
(ppm)	ค่าที่อ่านได้ (ppm)	ค่าที่อ่านได้ (ppm)	
2.00	2.2	0.7	-1.3
7.50	7.2	4.2	-3.3
12.00	11.7	7.3	-4.7
20.00	19.6	12.4	-7.6

วิจารณ์

เครื่องวัดออกซิเจนที่ละลายในน้ำที่มีหัววัดแบบโพลารोगราฟิที่ได้รับการไบอัสแบบพัลส์ที่ได้พัฒนาวิจัยขึ้นมา นอกจากจะสามารถให้ผลการวัดที่ถูกต้องแม่นยำในระดับเดียวกันกับเครื่องวัดที่หัววัดถูกไบอัสด้วยแรงดันไฟตรงคงที่ที่มีใช้งานกันอยู่ทั่วไปแล้วยังมีอายุการใช้งานที่ยาวนานกว่า จึงเหมาะที่จะนำไปใช้งานที่ต้องการวัดระดับออกซิเจนในน้ำอย่างต่อเนื่องที่มีการจุ่มแช่ในน้ำเพื่อข้อมูลอยู่ตลอดเวลา ซึ่งถึงแม้จะใช้งานอย่างต่อเนื่องนานถึง 45 วันก็ยังวัดได้อย่างถูกต้องแม่นยำด้วยค่าความผิดพลาดไม่เกิน 0.5 ppm จึงช่วยลดความถี่ในการทำความสะอาดขั้วอิเล็กโทรด อันเป็นการลดภาระในการทำความสะอาดดูแลรักษาหัววัดออกซิเจนอีกด้วย

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

การวิจัยนี้สามารถสร้างอุปกรณ์ตรวจวัดปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำแบบโพลาริกราฟิค คือ มีทองคำ(Au) และ เงิน (Ag) เป็นขั้วอิเล็กโทรด และสร้างวงจรรับสัญญาณจากหัววัด พร้อมทั้งแสดงผลด้วยจอ LCD เครื่องตรวจวัดค่าออกซิเจนสามารถตอบสนองค่าการวัด 0-20 ppm โดยใช้การทำงานของวงจรไบอัสแบบพัลส์ไปที่ อิเล็กโทรด (electrode) ด้วยสัญญาณ ON=4 วินาที และ OFF= 3.8 วินาที ของหัววัดเพื่อลดการสึกหรอของอิเล็กโทรดของหัววัด พร้อมทั้งยืดอายุการทำงาน of หัววัดเพื่อลดการทำความสะอาดของอิเล็กโทรด เหมาะกับการนำไปใช้งานด้านการจุ่มแช่หัววัดเป็นเวลานาน เนื้อหาได้อธิบายการทำงานของหัววัดและวงจรต่างๆเพื่อที่จะสามารถนำไปสร้างได้เอง ซึ่งจากการทดสอบการวัดค่าเทียบออกซิเจนที่ละลายในน้ำของหัววัดที่สร้างขึ้น (DO probe) กับหัววัดออกซิเจนมาตรฐาน (Standard DO meter) พบว่าค่าที่อ่านได้ไม่แตกต่างกันมากจากเครื่องวัดมาตรฐานผิดพลาดไม่เกิน 0.5 ppm โดยอุปกรณ์ต่างๆสามารถสร้างขึ้นได้และลดการนำเข้าจากต่างประเทศซึ่งมีราคาสูง

ข้อเสนอแนะ

ในการวิจัยในครั้งนี้การออกแบบวงจรผลิตความถี่เพื่อลดการไบอัสด้วยแรงดันคงที่เพื่อลดการสึกหรอของหัววัดด้วยสัญญาณไบอัสแบบพัลส์ด้วย ON=4 วินาที และ OFF=3 วินาที ซึ่งถ้าต้องการพัฒนาระบบ การออกแบบอาจจะทำการขยายความถี่หรือการ ON-OFF ให้กว้างขึ้นหรือลดลงเพื่อหาความเหมาะสม และอาจจะทำการควบคุมการON-OFF ด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ด้วยการโปรแกรมได้

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

บุญชัย กิ่งรุ่งเพชร. 2544. การพัฒนาอุปกรณ์ระบบตรวจวัดคุณภาพน้ำและส่งเสริมเครือข่ายการ
เฝ้าระวังติดตามตรวจสอบคุณภาพน้ำ เสนอกรมควบคุมมลพิษ. โดยศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์ และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ. (2544): 37-100.

มานะ ศรียุทธศักดิ์. 2535. รายงานการวิจัย การพัฒนาหัววัดน้ำตาลกลูโคสและหัววัดออกซิเจน.
เสนอศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์ และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ. (2535): 57-67.

ศุภพร ภู่เกษมวรารกุล. 2538. เครื่องวัดปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.(2538): 2-47.

D.H Rhie. 1995. **Development of Low Power Type Sensor for the DO Concentration
Measurement by Clark Electrode.** J.KIEEME Vol.8 (1995) : 1-5.

ประวัติการศึกษา และการทำงาน

ชื่อ –นามสกุล	นายสมหมาย โชครุ่ง
วัน เดือน ปี ที่เกิด	16 พฤศจิกายน 2518
สถานที่เกิด	อ. เมือง จ.ปราจีนบุรี
ประวัติการศึกษา	วศ.บ. (ไฟฟ้า) มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ บางเขน
ตำแหน่งหน้าที่การงานปัจจุบัน	ผู้ช่วยนักวิจัย2
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ
ผลงานดีเด่นและรางวัลทางวิชาการ	-
ทุนการศึกษาที่ได้รับ	-