

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง



# รายงานการวิจัย

## เรื่อง

โครงการพัฒนาระบบควบคุมคุณภาพน้ำอัจฉริยะเพื่อการบริหารจัดการในบ่อเลี้ยงกุ้งทะเล

Development of Excellent Water Quality Control System  
for Shrimp Culture Management

โดย

RCH

TD

313

.T48

ธ 617ค

ดร.ชุติมา ขมวิสัย หัวหน้าโครงการวิจัย

เลขหมู่.....

เลขทะเบียน...115599

กรมประมง กระทรวงเกษตรและสหกรณ์

วัน,เดือน,ปี...21 ส.ค. 2554

ผศ.ดร.พิสิฐ บุญศรีเมือง ผู้ร่วมงานวิจัย

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยประเภททุนวิจัยนวมินทร์ ประจำปี 2551

จากสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

b. 12912368  
1. ....  
1. ....

## กิตติกรรมประกาศ

โครงการพัฒนาระบบควบคุมคุณภาพน้ำอัจฉริยะเพื่อการบริหารจัดการในบ่อเลี้ยงกุ้งทะเลได้รับการสนับสนุนงบประมาณจากทุนอุดหนุนการวิจัยทุน โครงการวิจัยการจัดการรายงานวิจัยสู่การพัฒนาที่ยั่งยืน ประจำปี 2551 จากสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ คณะผู้ดำเนินงานวิจัยได้พัฒนาระบบควบคุมคุณภาพน้ำ ซึ่งสามารถลดการใช้พลังงานส่วนเกิน อันเป็นแนวทางในการลดปัญหาภาวะโลกร้อนแนวทางหนึ่ง ซึ่งผลงานวิจัยที่ได้สามารถนำไปเผยแพร่ และปรับใช้ในการบริหารจัดการฟาร์มเลี้ยงกุ้งทะเลของประเทศไทย ทางคณะผู้วิจัยขอขอบคุณ คุณดำรง เสนาะสรรพ เกษตรกรผู้เลี้ยงกุ้งทะเลในโครงการอ่าวคุ้งกระเบน อันเนื่องมาจากพระราชดำริ และศูนย์วิจัยและพัฒนาการเพาะเลี้ยงกุ้งทะเล จังหวัดสมุทรสงคราม ที่อนุเคราะห์ในการใช้สถานที่ในการวิจัย และเจ้าหน้าที่ศูนย์ศึกษาการพัฒนาประมงอ่าวคุ้งกระเบนอันเนื่องมาจากพระราชดำริ และศูนย์วิจัยและพัฒนาการเพาะเลี้ยงกุ้งทะเล จังหวัดสมุทรสงคราม ที่ช่วยประสานงานในการทำวิจัย สุดท้ายนี้ขอขอบคุณสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ที่ได้ให้ทุนสนับสนุนในการดำเนินงานวิจัยดังกล่าว



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชื่อโครงการ (ภาษาไทย) โครงการพัฒนาระบบควบคุมคุณภาพน้ำอัจฉริยะเพื่อการบริหารจัดการในบ่อเลี้ยงกุ้งทะเล  
(ภาษาอังกฤษ) Development of Excellent Water Quality Control System for Shrimp Culture Management

ชื่อผู้วิจัย และคณะ 1) ดร. ชุตินา ขมวิไลย์  
กรมประมง กระทรวงเกษตรและสหกรณ์  
เกษตรกลาง จตุจักร กรุงเทพฯ 10900 หมายเลขโทรศัพท์ /โทรสาร 0 2562 0552  
2) ผศ. ดร. พิสิฐ บุญศรีเมือง  
คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
3 หมู่ 2 ถ. ฉลองกรุง แขวงลำปลาทิว เขตลาดกระบัง กรุงเทพฯ  
หมายเลขโทรศัพท์ 0 2737 3000 ต่อ 3349

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยประเภททุนโครงการวิจัยการจัดการรายงานวิจัยสู่การพัฒนาที่ยั่งยืน ประจำปี 2551  
จำนวนเงิน 995,000 บาท ระยะเวลาทำการวิจัย 12 เดือน ตั้งแต่ธันวาคม 2551 ถึง ธันวาคม 2552

## บทคัดย่อ

การเพาะเลี้ยงกุ้งทะเลในประเทศไทยได้พัฒนาและขยายตัวอย่างรวดเร็วตั้งแต่ปี 2528 เป็นต้นมา ประเทศไทยเป็นผู้นำในด้านการผลิตและส่งออกสินค้ากุ้ง สามารถนำรายได้เข้าสู่ประเทศปีละกว่า 80,000 ล้านบาท อุตสาหกรรมการเพาะเลี้ยงกุ้งทะเลในขั้นตอนการผลิตมีการใช้พลังงานน้ำมันและพลังงานไฟฟ้าเพื่อจัดการคุณภาพของน้ำให้เหมาะสมแก่การเจริญเติบโตของกุ้ง ซึ่งพลังงานดังกล่าวที่ใช้ในอุตสาหกรรมการเพาะเลี้ยงกุ้งทะเลมีการใช้ในปริมาณมาก เมื่อราคาของน้ำมันปรับตัวสูงขึ้น จึงส่งผลให้ต้นทุนการผลิตกุ้งสูงขึ้นตามลำดับ ดังนั้น เพื่อเป็นการใช้พลังงานในอุตสาหกรรมการเพาะเลี้ยงกุ้งทะเลให้เกิดประโยชน์สูงสุด ลดการสูญเสียพลังงานที่เกินความจำเป็น จึงได้มีการวิจัยและพัฒนาระบบควบคุมคุณภาพน้ำอัจฉริยะในการจัดการคุณภาพน้ำในบ่อเลี้ยงกุ้งให้เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของกุ้งเพื่อลดปริมาณการใช้พลังงาน ซึ่งส่งผลให้ต้นทุนการผลิตกุ้งทะเลลดลง ในการพัฒนาระบบดังกล่าวได้นำเทคโนโลยีด้านคอมพิวเตอร์มาประยุกต์ใช้ในการควบคุมการปิด-เปิดเครื่องตีน้ำ โดยใช้ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำเป็นตัวควบคุมการทำงานของเครื่องตีน้ำ หลักการทำงานของระบบควบคุมคุณภาพน้ำอัจฉริยะ ประกอบด้วยวงจร 4 ส่วน คือ วงจรเซ็นเซอร์ วงจรส่วนประมวลผลกลาง วงจรขับเคลื่อนมอเตอร์ และวงจรเพาเวอร์ซัพพลาย

จากนั้นทดสอบระบบในภาคสนาม ณ บ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำ จังหวัดจันทบุรี ทำการวิจัยในบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำขนาด 2.9 ไร่ 1 บ่อ ซึ่งเป็นบ่อทดลองที่ติดตั้งเครื่องควบคุมคุณภาพน้ำอัจฉริยะ และบ่อขนาด 2 ไร่ 1 บ่อ เป็นบ่อควบคุมที่ไม่ได้ติดตั้งเครื่องควบคุมคุณภาพน้ำอัจฉริยะ ซึ่งการเปิดปิดเครื่องตีน้ำทำโดยเกษตรกร ผลการวิจัยพบว่าเมื่อเลี้ยงกุ้งได้ 85 วัน บ่อเลี้ยงกุ้งที่ติดตั้งเครื่องควบคุมคุณภาพน้ำอัจฉริยะ (บ่อทดลอง) ให้ผลผลิต 304 กิโลกรัม/ไร่ ขนาดกุ้ง 72 ตัว/กิโลกรัม อัตราการเจริญเติบโตเฉลี่ยต่อวันเท่ากับ 0.16 ส่วนบ่อ

ควบคุมให้ผลผลิต 400 กิโลกรัม/ไร่ ขนาดกุ้ง 91 ตัว/กิโลกรัม อัตราการเจริญเติบโตเฉลี่ยต่อวันเท่ากับ 0.13 นอกจากนี้ทำการวิจัยในบ่อเลี้ยงกุ้งขาว จังหวัดสมุทรสงคราม ผลการวิจัยพบว่าเมื่อเลี้ยงกุ้งได้ 76 วัน บ่อเลี้ยงกุ้งที่ติดตั้งเครื่องควบคุมคุณภาพน้ำอัจฉริยะให้ผลผลิต 651.8 กิโลกรัม/ไร่ ขนาดกุ้ง 108 ตัว/กิโลกรัม อัตราการเจริญเติบโตเฉลี่ยต่อวันเท่ากับ 0.12 ส่วนบ่อควบคุมให้ผลผลิต 691.9 กิโลกรัม/ไร่ ขนาดกุ้ง 102 ตัว/กิโลกรัม อัตราการเจริญเติบโตเฉลี่ยต่อวันเท่ากับ 0.13 ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำเป็นปัจจัยสำคัญในการบริหารจัดการฟาร์มเลี้ยงกุ้งทะเล โดยในช่วง เวลา 14.00 น. เป็นช่วงที่ออกซิเจนมีการละลายน้ำสูงสุด จึงไม่จำเป็นต้องเปิดเครื่องตีน้ำ แต่ควรมีการผสมน้ำในบ่อ เพื่อป้องกันการแบ่งชั้นของน้ำ นอกจากนี้ผลการวิจัยสามารถนำระบบควบคุมคุณภาพน้ำอัจฉริยะมาประยุกต์ใช้ในการบริหารจัดการฟาร์มเลี้ยงกุ้งทะเลเพื่อลดการใช้พลังงานส่วนเกิน ซึ่งสามารถลดการใช้พลังงานไฟฟ้าได้ประมาณ 30% ซึ่งเกษตรกรสามารถติดตามปริมาณออกซิเจนละลายน้ำได้ตลอดเวลา จึงทำให้จัดการคุณภาพน้ำได้อย่างทันที นอกจากนี้ ข้อมูลเกี่ยวกับปริมาณออกซิเจนที่ละลายน้ำยังสามารถประเมินสถานการณ์การเลี้ยงกุ้งภายในบ่อได้อีกด้วย

#### Abstract

Marine shrimp culture in Thailand has developed and grown rapidly since 1985 onwards. Thailand was the world's largest shrimp producer and exporter, earning 80 billion baht per year in export revenues. Every stage of shrimp production is energy-intensive, depending heavily on both oil and electricity to maintain optimal water quality for shrimp growth. The recent spike in energy prices therefore led to sharply increased production costs for the shrimp industry. To maximize energy use efficiency in shrimp cultivation, and minimize energy loss, the need to develop an excellent water quality control system for shrimp culture management became clear. The aim of the system would be to optimize shrimp pond water quality whilst minimizing energy use and production costs.

The water quality control system for shrimp culture management was developed by IT application. To develop the excellent water quality management system, comprising 4 separate circuits: sensor circuit, CPU, motor driver circuit and power supply. After system development, install the system at the Kung Krabaen Bay Royal Project farm. The treatment pond, with an area of 2.9 rai, will be set with the water quality management system, which will control the aerators to deliver and maintain optimal DO concentrations. The control pond, with an area of 2 rai, will not be set with an automated control system, but will be manually controlled. The results showed that after rearing shrimps for 85 days, the experimental pond set with the excellent water quality management system produced 304 kg of shrimps/rai, averaging 72 shrimps per kg, The Average Daily Growth Rate : ADG was 0.16. The control pond yielded 400 kg of shrimps/rai, averaging 91 shrimps per kg, with ADG 0.13. In Samutsongkram, the white shrimp experimental pond had 651.8 kg/rai, averaging 108 shrimps per kg. ADG was 0.12 while

the production in control pond was 691.9 kg/rai, averaging 102 shrimps/kg. The ADG and survival rate were 0.13 and 94.10%, respectively. The water quality data collected demonstrates the importance of dissolved oxygen as a factor in shrimp farm management. The system showed to reduce 30% of electric power. Additionally, the data show that from 2 p.m. DO levels are at their highest, so there is no need to operate the aerators during this period. However, it is nevertheless important to ensure complete mixing to prevent layering of water. These data is useful in improving shrimp farm management to reduce energy loss. Shrimp farmer can easily monitor DO in real time, allowing them to take action immediately as necessary. Moreover, the data from DO levels will be useful in evaluating shrimp pond production.



# สารบัญเรื่อง

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	i
บทคัดย่อ	ii
ABSTRACT	iii
ความสำคัญและที่มาของปัญหา	1
วัตถุประสงค์การวิจัย	2
ขอบเขตการวิจัย	2
แนวความคิดการวิจัย	3
วิธีการดำเนินการวิจัยโดยสรุป	8
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	9
วิธีดำเนินการวิจัย	10
ผลการวิจัย	12
วิจารณ์ผลการวิจัย	43
สรุปและข้อเสนอแนะ	46
บรรณานุกรม	48



## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1 แสดงค่าอิมิตัวของออกซิเจนที่ความเค็มและอุณหภูมิต่าง ๆ	4
ตารางที่ 2 แสดงต้นทุนการเลี้ยงกุ้งขาวแวนาไม ปี 2550 (ต้นทุนเฉลี่ยต่อไร่ต่อรุ่น)	7
ตารางที่ 3 แสดงต้นทุนในการติดตั้งเครื่องควบคุมคุณภาพน้ำอัจฉริยะ	32
ตารางที่ 4 แสดงรายละเอียดการเลี้ยงกุ้งกุลาดำ ของนายดำรง เสนาะสรรพ จังหวัดจันทบุรี	36
ตารางที่ 5 แสดงปริมาณการใช้ไฟฟ้าในการเลี้ยงกุ้งกุลาดำของนายดำรง เสนาะสรรพ จังหวัดจันทบุรี	37
ตารางที่ 6 แสดงรายละเอียดการเลี้ยงกุ้งขาว ของศูนย์วิจัยและพัฒนาการเพาะเลี้ยงกุ้งทะเล จังหวัดสมุทรสงคราม	40
ตารางที่ 7 แสดงปริมาณการใช้ไฟฟ้าในการเลี้ยงกุ้งขาวของศูนย์วิจัยและพัฒนาการเพาะเลี้ยงกุ้งทะเล จังหวัดสมุทรสงคราม	41



# สารบัญภาพ

	หน้า
ภาพที่ 1 โครงสร้างของระบบควบคุมคุณภาพน้ำอัจฉริยะ	8
ภาพที่ 2 ระบบชลประทานน้ำเค็มเพื่อการเพาะเลี้ยงกุ้งทะเลในบริเวณโครงการ	13
ภาพที่ 3 ภาพถ่ายบ่อเลี้ยงกุ้งทะเลของนายดำรง เสนาะสรรพ	13
ภาพที่ 4 แบบจำลองบ่อเลี้ยงกุ้งเพื่อใช้ในการทดลองทั้งสองบ่อ	15
ภาพที่ 5 ใบพัดตีน้ำประเภทต่างๆ ที่นิยมใช้ในปัจจุบัน	16
ภาพที่ 6 ภาพถ่ายเบรกเกอร์หรือสวิตช์เปิด-ปิดมอเตอร์ไฟฟ้าจากสถานที่ใช้งานจริง	17
ภาพที่ 7 ภาพถ่ายแสดงมอเตอร์ขนาด 3 แรงม้า	17
ภาพที่ 8 บล็อกไดอะแกรมของระบบควบคุมคุณภาพน้ำอัจฉริยะ	18
ภาพที่ 9 โครงสร้างของหัววัดแบบ DO electrode	19
ภาพที่ 10 โครงสร้างของหัววัดออกซิเจนละลายในน้ำแบบลูมิเนสเซนซ์	20
ภาพที่ 11 โครงสร้างภายในหัววัดออกซิเจนละลายในน้ำแบบลูมิเนสเซนซ์	21
ภาพที่ 12 หัววัดออกซิเจนละลายในน้ำแบบลูมิเนสเซนซ์และอุปกรณ์ต่อรวมเพื่อใช้สำหรับติดตั้งในบ่อเลี้ยงกุ้ง	23
ภาพที่ 13 วงจรหน่วยควบคุมส่วนกลางของเครื่องควบคุมคุณภาพน้ำอัจฉริยะ	25
ภาพที่ 14 จอแอลซีดี (LCD) แสดงสถานะการทำงานของเครื่องควบคุม	26
ภาพที่ 15 จอแอลซีดี (LCD) แสดงค่าที่อ่านค่าได้จากเซ็นเซอร์ปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำ(DO, ppm)	27
ภาพที่ 16 จอแอลซีดี (LCD) แสดงค่าที่อ่านค่าได้จากเซ็นเซอร์อุณหภูมิของน้ำ	27
ภาพที่ 17 วงจรภาคขับมอเตอร์ (motor driver circuit)	28
ภาพที่ 18 ภาพถ่ายวงจรชุดขับมอเตอร์ (motor driver circuit)	28
ภาพที่ 19 วงจรภาคเพาเวอร์ซัพพลาย (motor driver circuit)	30
ภาพที่ 20 การทำงานของโปรแกรม NRCT LDO Data logger	31
ภาพที่ 21 การติดตั้งเครื่องมือควบคุมคุณภาพน้ำอัจฉริยะ ณ บ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำ จังหวัดจันทบุรี	33
ภาพที่ 22 เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำระหว่างบ่อที่ติดตั้งเครื่องควบคุมคุณภาพน้ำ(บ่อทดลอง) และบ่อที่ไม่ได้ติดตั้งเครื่องควบคุม(บ่อควบคุม) ณ จังหวัดจันทบุรี	34
ภาพที่ 23 ค่าเฉลี่ยอุณหภูมิของน้ำในรอบวันของบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำ ณ จังหวัดจันทบุรี	34

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา<sup>vii</sup> และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญญภาพ (ต่อ)

	หน้า
ภาพที่ 24 เปรียบเทียบปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าต่อวันระหว่างบ่อที่ติดตั้งเครื่องควบคุม คุณภาพน้ำ และบ่อที่ไม่ได้ติดตั้งเครื่องควบคุม ณ จังหวัดจันทบุรี	37
ภาพที่ 25 เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำระหว่างบ่อที่ติดตั้งเครื่อง ควบคุมคุณภาพน้ำ(บ่อทดลอง) และบ่อที่ไม่ได้ติดตั้งเครื่องควบคุม(บ่อควบคุม) ณ จังหวัดจันทบุรี	39
ภาพที่ 26 ค่าเฉลี่ยอุณหภูมิของน้ำในรอบวันของบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำ ณ จังหวัดจันทบุรี	39
ภาพที่ 27 เปรียบเทียบปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าต่อวันระหว่างบ่อที่ติดตั้งเครื่องควบคุม คุณภาพน้ำ และบ่อที่ไม่ได้ติดตั้งเครื่องควบคุม ณ จังหวัดจันทบุรี	41



## โครงการพัฒนาระบบควบคุมคุณภาพน้ำอัจฉริยะเพื่อการบริหารจัดการในบ่อเลี้ยงกุ้งทะเล

### Development of Excellent Water Quality Control System for Shrimp Culture Management

#### บทนำ

#### ความสำคัญและที่มาของปัญหา

การเพาะเลี้ยงกุ้งทะเลในประเทศไทยได้พัฒนาและขยายตัวอย่างรวดเร็วตั้งแต่ปี 2528 เป็นต้นมา ในปี พ.ศ. 2543 ประเทศไทยส่งออกสินค้ากุ้งได้สูงสุดมีมูลค่าถึง 107,891 ล้านบาท (กรมประมง, 2549) สินค้ากุ้งมีความสำคัญต่อประเทศไทยทั้งในด้านสังคมและเศรษฐกิจ โดยมีผู้เกี่ยวข้องตั้งแต่การจับพ่อแม่พันธุ์จากทะเลถึงการเพาะเลี้ยงพ่อแม่พันธุ์ในระบบโรงเรือน การเพาะฟัก การเพาะเลี้ยง การจับ/การลำเลียงผลผลิต การคัดแยกผลผลิต ตลาดกลางสินค้ากุ้ง และการแปรรูป รวมมากกว่า 1 ล้านคน ซึ่งทั้งนี้ ในแวดวงอุตสาหกรรมกุ้งของโลก ประเทศไทยเป็นผู้นำทั้งด้านการผลิตและการส่งออกมานับตั้งแต่ปี 2533 ซึ่งหากนับถึงปัจจุบัน อุตสาหกรรมกุ้งสร้างรายได้ให้แก่ประเทศทั้งจากในรูปของสินค้ากุ้งและผลิตภัณฑ์ รวมทั้งปัจจัยการผลิตที่เกี่ยวข้อง รวมมูลค่ามากกว่า 2 ล้านล้านบาท (2,000,000 ล้านบาท) โดยมีมูลค่าการส่งออกสินค้ากุ้งและผลิตภัณฑ์อยู่ในช่วง 75,000-85,000 ล้านบาท/ปี และในปี 2552 ประเทศไทยสามารถผลิตกุ้งทะเลได้ 560,000 ตัน ส่งออก 390,000 ตัน นำรายได้เข้าสู่ประเทศประมาณ 93,000 ล้านบาท ซึ่งอุตสาหกรรมกุ้งทั้งระบบเกิดจากการเพิ่มมูลค่าทรัพยากรภายในประเทศ (Local Content) เป็นหลัก

อุตสาหกรรมการเพาะเลี้ยงกุ้งทะเลในขั้นตอนการผลิตมีการใช้พลังงานน้ำมันและพลังงานไฟฟ้าเพื่อจัดการคุณภาพของน้ำให้เหมาะสมแก่การเจริญเติบโตของกุ้ง ซึ่งพลังงานดังกล่าวที่ใช้ในอุตสาหกรรมการเพาะเลี้ยงกุ้งทะเลมีการใช้ในปริมาณมาก เมื่อราคาของน้ำมันปรับตัวสูงขึ้น จึงส่งผลให้ต้นทุนการผลิตกุ้งสูงขึ้นตามลำดับ และสืบเนื่องต่อการแข่งขันในการส่งออกสินค้ากุ้งและผลิตภัณฑ์ไปยังตลาดโลก

การเพาะเลี้ยงกุ้งทะเลเป็นกลุ่มที่มีการใช้พลังงานในการผลิตเพื่อการจัดการคุณภาพน้ำซึ่งการจัดการคุณภาพน้ำในบ่อเลี้ยงกุ้งทะเล เป็นปัจจัยสำคัญในการบริหารจัดการฟาร์มเลี้ยงกุ้งให้ประสบความสำเร็จ โดยมีปัจจัยหลักที่สำคัญ ออกซิเจน (Dissolved Oxygen: DO) ออกซิเจนมีความจำเป็นสำหรับการหายใจของกุ้งเพื่อเผาผลาญอาหารให้พลังงานและสร้างการเจริญเติบโต ปัจจุบันเครื่องเพิ่มออกซิเจนในน้ำสำหรับฟาร์มเลี้ยงกุ้งส่วนใหญ่จะใช้น้ำมันและพลังงานไฟฟ้าเป็นแหล่งพลังงาน แต่เนื่องจากปัจจุบันราคาน้ำมันมีราคาสูงขึ้น เช่นเดียวกับพลังงานไฟฟ้าที่ส่วนหนึ่งผลิตมาจากน้ำมัน ดังนั้นราคาไฟฟ้าจึงมีราคาแพงขึ้นเช่นกัน จากปัญหาด้านทุนของพลังงานที่สูงขึ้นนี้ส่งผลโดยตรงต่อต้นทุนการผลิตกุ้งในประเทศไทยเป็นอย่างมาก ซึ่งต้นทุนการผลิตเป็นปัจจัย

สำคัญในการชี้วัดความสามารถในการแข่งขันของอุตสาหกรรมกุ้ง ทั้งนี้ต้นทุนในด้านพลังงานของประเทศไทย คิดเป็นร้อยละ 14-30 ของต้นทุนทั้งหมด

ดังนั้น เพื่อเป็นการใช้พลังงานในอุตสาหกรรมเพาะเลี้ยงกุ้งทะเล ให้เกิดประโยชน์สูงสุด ลดการสูญเสียพลังงานที่เกินความจำเป็น ด้วยเหตุดังกล่าวจึงเป็นแนวความคิดในการวิจัยและพัฒนาระบบควบคุมคุณภาพน้ำอัจฉริยะ ในการจัดการคุณภาพน้ำในบ่อเลี้ยงกุ้ง เพื่อให้เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของกุ้ง ลดปริมาณการใช้พลังงานโดยควบคุมคุณภาพของน้ำให้เหมาะสมและสอดคล้องต่อการเจริญเติบโตของกุ้ง ซึ่งส่งผลให้ต้นทุนการผลิตกุ้งทะเลลดลง และสามารถแข่งขันกับต่างประเทศได้

### วัตถุประสงค์ของการวิจัย

วัตถุประสงค์หลัก

เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงานในการเพาะเลี้ยงกุ้งทะเล

วัตถุประสงค์รอง

- 1) เพื่อพัฒนาระบบควบคุมคุณภาพน้ำอัจฉริยะต้นแบบ ในการบริหารจัดการคุณภาพน้ำในบ่อเลี้ยงกุ้งทะเล
- 2) เพื่อให้กุ้งทะเลมีการเจริญเติบโตที่ดี ได้ผลผลิตต่อรอบเพิ่มขึ้น กุ้งที่ผลิตได้มีคุณภาพ
- 3) เพื่อลดต้นทุนในการผลิตกุ้งทะเลของเกษตรกร โดยลดการใช้พลังงานส่วนเกิน

### ขอบเขตของการวิจัย

โครงการวิจัยนี้มุ่งเน้นการใช้พลังงานให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุด ลดปริมาณการใช้น้ำมัน ลดภาวะโลกร้อน และเป็นการลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม โดยการพัฒนาและสร้างเครื่องควบคุมคุณภาพน้ำอัจฉริยะ เครื่องควบคุมคุณภาพน้ำอัจฉริยะนี้สามารถควบคุมเครื่องให้อากาศแบบใบพัดตีน้ำได้ทั้งสองประเภท คือ

1. แบบมอเตอร์ใช้ไฟฟ้า
2. แบบเครื่องยนต์

เครื่องควบคุมคุณภาพน้ำอัจฉริยะ สามารถควบคุมแหล่งต้นกำลังทั้งแบบใช้มอเตอร์ไฟฟ้าและแบบใช้เครื่องยนต์ ทั้งสองประเภทนี้มีข้อดีและข้อด้อยแตกต่างกัน ซึ่งแบบใช้มอเตอร์จะใช้ในพื้นที่ซึ่งมีสายไฟฟ้าเข้าถึง และแบบใช้เครื่องยนต์ส่วนมากนิยมใช้ในพื้นที่ซึ่งมีสายไฟฟ้าเข้าไม่ถึง เครื่องควบคุมคุณภาพน้ำอัจฉริยะจะทำการควบคุมการทำงานของเครื่องให้อากาศแบบใบพัดตีน้ำให้ทำการตีน้ำ เมื่อค่าออกซิเจนมีค่าไม่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของกุ้งและเครื่องควบคุมจะสั่งให้เครื่องให้อากาศแบบใบพัดตีน้ำให้หยุดทำการตีน้ำเมื่อค่า

ออกซิเจนเพียงพอต่อการเจริญเติบโต และเมื่อระดับของออกซิเจนอยู่ในระดับที่เป็นอันตรายต่อกุ้ง โดยไม่สามารถแก้ไขด้วยการใช้เครื่องตีน้ำเพื่อควบคุมคุณภาพน้ำ เครื่องควบคุมฯจะส่งสัญญาณเตือนให้ผู้เลี้ยงหาแนวทางแก้ไขด้วยวิธีการอื่นๆต่อไป ซึ่งจะเป็นการป้องกันการตายของกุ้งทั้งบ่อได้ นอกจากนี้เครื่องควบคุมคุณภาพน้ำอัจฉริยะยังสามารถบันทึกข้อมูลระบบดับออกซิเจนของบ่อเลี้ยงกุ้งโดยอัตโนมัติและสามารถสามารถโอนถ่ายข้อมูลไปยังคอมพิวเตอร์ได้ เพื่อใช้ประกอบการศึกษาวิจัยต่อไป

### แนวความคิดของการวิจัย

การจัดการคุณภาพน้ำในบ่อเลี้ยงกุ้งทะเล เป็นหัวใจสำคัญในการบริหารจัดการฟาร์มเลี้ยงกุ้งให้ประสบความสำเร็จ โดยมีปัจจัยหลักที่สำคัญ ออกซิเจน (Dissolved Oxygen: DO) ออกซิเจนมีความจำเป็นสำหรับการหายใจของกุ้งเพื่อเผาผลาญอาหารให้พลังงานและสร้างการเจริญเติบโต ระดับออกซิเจนละลายน้ำที่เหมาะสมต่อการเลี้ยงกุ้งทะเลต้องไม่ต่ำกว่า 5 มิลลิกรัม/ลิตร (มก./ล) การขาดออกซิเจนจะส่งผลกระทบต่อ การเจริญเติบโต และอัตราแลกเนื้อในการเลี้ยงกุ้ง เพราะทำกุ้งให้กินอาหารน้อยและโตช้า บ่อที่มีปริมาณออกซิเจนละลายในบ่อเลี้ยงต่ำกว่า 3 มก./ล. มีความเสี่ยงที่กุ้งจะโตช้า การสะสมของของเสียในบ่อเลี้ยงกุ้ง และพื้นบ่อเน่าเสียง่าย ทำให้การเลี้ยงกุ้งมีปัญหา ระดับออกซิเจนละลายในน้ำที่จนทำให้กุ้งตายคือ น้อยกว่า 1.5 มก./ล.

การเปลี่ยนแปลงปริมาณออกซิเจนที่ละลายน้ำในรอบวัน ปริมาณออกซิเจนที่ละลายมีแนวโน้มสูงขึ้นตั้งแต่ 8:00 นาฬิกา ไปจนถึง 15:00 นาฬิกา ซึ่งเป็นค่าสูงสุด และมีแนวโน้มลดลงตั้งแต่วันที่ 18:00 นาฬิกา ไปเรื่อยๆ จนถึง 6:00 นาฬิกา ซึ่งจะเป็นค่าต่ำสุด ปริมาณออกซิเจนละลายในน้ำบริสุทธิ์ที่อุณหภูมิของน้ำ 25 องศาเซลเซียส จะมีปริมาณออกซิเจนอิ่มตัวประมาณ 8.24 มิลลิกรัมออกซิเจนต่อลิตร แต่เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นเป็น 30 องศาเซลเซียส จะมีปริมาณออกซิเจนอิ่มตัวในน้ำ 7.54 มิลลิกรัมออกซิเจนต่อลิตร ส่วนในน้ำทะเลที่ความเค็ม 30 ppt และอุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส จะมีปริมาณออกซิเจนละลายอิ่มตัวในน้ำประมาณ 6.39 มิลลิกรัมออกซิเจนต่อลิตร ถ้าอุณหภูมิของน้ำสูงขึ้นหรือค่าความเค็มเพิ่มขึ้น ปริมาณออกซิเจนละลายในน้ำจะมีค่าลดลง ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำมีผลต่อการดำรงชีวิตของกุ้งมาก ถ้าปริมาณออกซิเจนละลายในน้ำมีค่าต่ำกว่า 5 มิลลิกรัมออกซิเจนต่อลิตร กุ้งจะมีการเจริญเติบโตช้า กุ้งทะเลจะมีการเจริญเติบโตดีถ้ามีปริมาณออกซิเจนละลายสูงกว่า 5 มิลลิกรัมต่อลิตร ปัจจัยที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของปริมาณออกซิเจนละลายในน้ำ ได้แก่ แสงแดด การไหลเวียนของน้ำ แพลงก์ตอนพืชและสัตว์ ฟิซน้ำ ความโปร่งแสง ความลึกของบ่อ ชนิดและปริมาณจุลินทรีย์ สิ่งขับถ่ายของกุ้ง รวมทั้งปริมาณอาหารที่เหลือจากการกินของกุ้ง

การละลายของออกซิเจนในน้ำขึ้นกับอุณหภูมิ ความเค็มและระดับความสูงจากน้ำทะเล การละลายของออกซิเจนในน้ำจะลดลงเมื่อปัจจัยเหล่านี้มีค่าเพิ่มขึ้น ออกซิเจนจากอากาศสามารถแพร่เข้าไปละลายน้ำได้ดีในน้ำมีปริมาณออกซิเจนน้อย เมื่อออกซิเจนละลายในน้ำเพิ่มมากขึ้นจนถึงจุดอิ่มตัว (ออกซิเจนละลายในน้ำ 100%)

การแพร่ของออกซิเจนจากน้ำสู่อากาศและอากาศสู่น้ำเท่ากัน และเมื่อเราใช้เครื่องเพิ่มออกซิเจนมากขึ้น ออกซิเจนก็จะแพร่จากน้ำออกสู่อากาศ ปริมาณออกซิเจนมีค่าต่ำสุดในช่วงเช้ามืดเนื่องจากมีการใช้ไปในการย่อยสลายของสารอินทรีย์โดยจุลินทรีย์ และการหายใจสิ่งมีชีวิตในบ่อ หลังจากพลงก์ตอนพีชเริ่มมีการสังเคราะห์แสง ปริมาณออกซิเจนจะเพิ่มขึ้นสูงสุดในช่วงบ่าย ปริมาณออกซิเจนในบ่อเลี้ยงกุ้งควรมีการวัดอย่างสม่ำเสมออย่างน้อยวันละ 2 ครั้ง เพื่อตรวจสอบว่าออกซิเจนในน้ำมีความเข้มข้นที่เหมาะสมหรือไม่ ถ้าหากออกซิเจนในน้ำมีค่าสูงกว่า 4 มก./ล. ปัญหาเกี่ยวกับออกซิเจนจะหมดไป

ตารางที่ 1 แสดง ค่าอิ่มตัวของออกซิเจนที่ความเค็มและอุณหภูมิต่าง ๆ

อุณหภูมิ °C	0 ppt	5 ppt	10 ppt	15 ppt	20 ppt
0	14.6	13.8	13.0	12.1	11.3
5	12.8	12.1	11.4	10.7	10.0
10	11.3	10.7	10.1	9.6	9.0
15	10.2	9.7	9.1	8.6	8.1
20	9.2	8.7	8.3	7.9	7.4
25	8.4	8.0	7.6	7.2	6.7
30	7.6	7.3	6.9	6.5	6.1

จากตารางจะเห็นว่าความสามารถในการละลายลงน้ำหรือซึมเข้าไปอยู่ในน้ำของออกซิเจนมีค่าจำกัด ค่าจำกัดนี้เรียกว่าค่าอิ่มตัว ซึ่งขึ้นกับความเค็ม อุณหภูมิ และความดัน ดังนั้นที่ความเค็มและอุณหภูมิหนึ่ง ๆ ค่าออกซิเจนละลายน้ำจะมีขีดจำกัดอยู่ที่ค่าหนึ่งเท่านั้น ในน้ำจืด ออกซิเจนจะละลายได้ดีกว่าในน้ำเค็ม และในน้ำอุณหภูมิต่ำออกซิเจนจะละลายได้ดีกว่าในน้ำอุณหภูมิสูง

ปัจจุบันเครื่องเพิ่มออกซิเจนในน้ำสำหรับฟาร์มเลี้ยงกุ้งส่วนใหญ่จะใช้น้ำมันและพลังงานไฟฟ้าเป็นแหล่งพลังงาน โดยมีวัตถุประสงค์ดังนี้

1. เพิ่มออกซิเจนหรือรักษาระดับของออกซิเจน ที่ละลายในน้ำให้เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของกุ้ง ความสำคัญของการใช้เครื่องให้อากาศจะเห็นได้ชัดเจนในตอนกลางคืนหลังจากที่ระดับออกซิเจนเริ่มลดลงต่ำกว่าจุดอิ่มตัว ซึ่งถ้าเป็นบ่อที่มีสีน้ำหรือพลงก์ตอนเหมาะสมในภาวะที่มีแสงแดดปกติทั้งวันออกซิเจนจะเริ่มลดต่ำกว่าจุดอิ่มตัวประมาณ 2-3 ฟุต การเปิดเครื่องให้อากาศจึงมีความจำเป็นและมีประโยชน์มากหลังจากจุดนี้เป็นต้นไปจนถึงเช้ามืดที่มักเป็นเวลาในระดับออกซิเจนต่ำที่สุดในรอบวัน ในวันที่อากาศมีครึ้มไม่มีแสงแดด

การสังเคราะห์แสงโดยแสงที่ตอนพีชในบ่อเกิดขึ้นน้อยมากควรเปิดเครื่องให้อากาศเพื่อรักษาระดับออกซิเจนในบ่อให้อยู่ในระดับที่เหมาะสม

2. ทำให้พื้นบ่อสะอาด เนื่องจากกึ่งกลางใช้เวลาส่วนใหญ่อยู่ที่บริเวณพื้นบ่อ ถ้าพื้นบ่อสะอาดกึ่งจะแข็งแรงโตเร็ว ไม่ค่อยมีปัญหาป่วยเป็นโรค จำนวนเครื่องให้อากาศในบ่อเลี้ยงกึ่งไม่มีกฎเกณฑ์แน่นอนว่าต้องมีกี่เครื่องต่อพื้นที่ 1 ไร่หรือกี่เครื่องต่อบ่อ แต่ต้องมีเพียงพอที่จะทำให้พื้นบ่อสะอาดสำหรับปริมาณกึ่งในบ่อ การใช้เครื่องให้อากาศน้อยเกินไป จะทำให้พื้นบ่อไม่สะอาด ถ้ามีกึ่งอย่างหนาแน่นมากพื้นที่สะอาดมีไม่เพียงพอ กึ่งจะโตช้า และในที่สุดจะเกิดปัญหาป่วยได้ง่ายส่วนการใช้เครื่องให้อากาศจำนวนมากเกินไป ถ้ามีกึ่งไม่หนาแน่นมากก็เป็นกรเลี้ยงปลาทำให้ต้นทุนสูงขึ้น ดังนั้นจึงต้องวางตำแหน่งเครื่องให้อากาศให้ถูกต้องเหมาะสมกับลักษณะรูปร่างของบ่อและมีจำนวนที่เพียงพอด้วย

เครื่องให้อากาศแบบใบพัดตีน้ำ เครื่องให้อากาศแบบนี้นิยมเรียกกันทั่วไปว่าเครื่องตีน้ำ มีทั้งแบบมอเตอร์ใช้ไฟฟ้าและแบบเครื่องยนต์

1. แบบมอเตอร์ ที่มีขายทั่วไปมีกำลัง 2 แรงม้ามี 4 ใบพัด (4 วง) เป็นแบบที่มีในวงการเลี้ยงกึ่งมาตั้งแต่ยุคแรก ๆ และยังมีให้เห็นทั่วไปในปัจจุบันนี้หลายฟาร์ม มีการนำมาดัดแปลงให้เป็นแขนยาวโดยเพิ่มจำนวนใบพัดให้มากขึ้น เพื่อเพิ่มพื้นที่ทำความสะอาดพื้นบ่อ สำหรับเครื่องตีน้ำที่ชาวนาเลี้ยงกึ่งนำมาดัดแปลงในแต่ละฟาร์มจะแตกต่างกันออกไป ทั้งในด้านจำนวนใบพัดตีน้ำและจำนวนแขน

ตัวอย่างมอเตอร์ 3 แรงม้า บางฟาร์มใช้เพียงแขนเดียว แต่บางฟาร์มติดตั้งได้ 3 แขนยาวแต่ละแขนจะมีใบพัด 16 ใบ รวมได้ 48 ใบ ความเร็วรอบ 60 รอบ/นาที

มอเตอร์ 5 แรงม้า บางฟาร์มดัดแปลงเป็น 4 แขน แต่ละแขนมีใบพัด 16 ใบรวมทั้งหมด 64 ใบ ความเร็ว 60 รอบ/นาที หรืออาจจะประกอบเป็น 5 แขนจำนวนใบพัดแขนละ 13 ใบรวมทั้งหมด 65 ใบ

2. แบบเครื่องยนต์ ส่วนมากจะใช้เครื่องขนาด 11 แรงม้า สามารถติดตั้งได้เช่นเดียวกับมอเตอร์ขนาด 5 แรงม้า

สำหรับเครื่องยนต์ 4 สูบ สามารถติดตั้งได้จำนวนถึง 8 แขนในแต่ละแขนจะมีใบพัด 16-20 ใบ รวมทั้งหมดได้ถึง 128-160 ใบ

บ่อขนาด 3-4 ไร่ อาจจะใช้เครื่อง 4 สูบเพียง 1 เครื่องก็พอเพียง

ข้อควรระวัง การติดตั้งใบพัดจำนวนมากเกินไป เครื่องยนต์จะทำงานหนักโอกาสเสียและต้องซ่อม อาจพบบ่อยกว่าการติดตั้งใบพัด จำนวนพอเหมาะเช่นเครื่องยนต์ 4 สูบติดตั้งเพียง 128 ใบก็น่าจะเพียงพอ

เครื่องให้อากาศแบบใบพัดตีน้ำพบได้ทั่วไปและมีเกษตรกรใช้มากที่สุด เนื่องจากส่วนใหญ่ฟาร์มห่างไกลตัวเมืองไม่มีกระแสไฟฟ้าแรงสูงผ่าน ต้องใช้เครื่องยนต์จึงติดตั้งแบบแขนยาวเกือบทั้งหมด

ข้อจำกัดของเครื่องตีน้ำแขนยาวคือใบพัดตีน้ำในระดับผิวน้ำและลงไปไม่ ลึกมาก ดังนั้นกระแสน้ำที่ เคลื่อนตัวในระดับน้ำลึกพื้นบ่อจะไม่แรงมาก ถ้าระดับน้ำลึกมากการทำความสะอาดพื้นบ่อทำได้น้อยมาก ระดับ ความลึกของน้ำที่เหมาะสมถ้าเป็นเครื่องยนต์หรือมอเตอร์ที่ปรับความเร็ว 60 รอบ/นาที ความลึกควรอยู่ระหว่าง 1.2-1.4 เมตร ถ้าเป็นมอเตอร์ที่ความเร็วรอบ 80 รอบ/นาที ความลึก 1.4-1.6 เมตร

ปัจจุบันเครื่องเพิ่มออกซิเจนในน้ำสำหรับฟาร์มเลี้ยงกุ้งส่วนใหญ่จะใช้น้ำมันและพลังงานไฟฟ้าเป็น แหล่งพลังงาน แต่เนื่องจากปัจจุบันราคาน้ำมันมีราคาสูงขึ้น เช่นเดียวกับพลังงานไฟฟ้าที่ส่วนหนึ่งผลิตมาจาก น้ำมัน ดังนั้นราคาไฟฟ้าจึงมีราคาแพงขึ้นเช่นกัน จากปัญหาด้านทุนของพลังงานที่สูงขึ้นนี้ส่งผลโดยตรงต่อ ต้นทุนการผลิตกุ้งในประเทศไทยเป็นอย่างมาก ซึ่งต้นทุนการผลิตเป็นปัจจัยสำคัญในการชี้วัดความสามารถใน การแข่งขันของอุตสาหกรรมกุ้ง ทั้งนี้ต้นทุนในด้านพลังงานของประเทศไทยคิดเป็นร้อยละ 14-30 ของต้นทุน ทั้งหมด (ตารางที่ 2) ดังนั้นเพื่อเป็นการลดต้นทุนการผลิต การใช้พลังงานน้ำมันหรือพลังงานไฟฟ้าให้เกิด ประสิทธิภาพสูงสุด ลดการใช้พลังงานส่วนเกิน จะช่วยลดต้นทุนการผลิต ประหยัดพลังงาน และลดปัญหา แรงงาน อีกทั้งเป็นการลดสภาวะโลกร้อนอีกทางหนึ่งด้วย รวมทั้งยังส่งผลให้กุ้งมีการเจริญเติบโตที่ดี ผลผลิตกุ้ง มีปริมาณเพิ่มขึ้น ทำให้อุตสาหกรรมกุ้งไทยเกิดความยั่งยืนตลอดไป

ตารางที่ 2 แสดงต้นทุนการเลี้ยงกุ้งขาวแวนาไม ปี 2550 (ต้นทุนเฉลี่ยต่อไร่ต่อรุ่น)

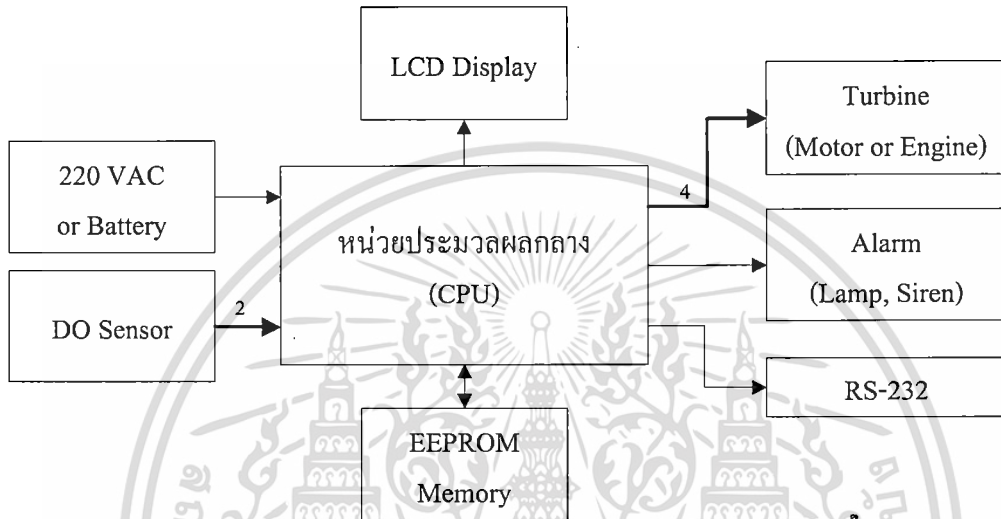
รายการ	ขนาดกุ้ง 60 - 70 ตัว/ทุ่ง				ขนาดกุ้ง 50 ตัว / กก.			
	เงินสด	ไม่เป็นเงินสด	รวม	ร้อยละ	เงินสด	ไม่เป็นเงินสด	รวม	ร้อยละ
<b>ต้นทุนคงที่</b>	<b>2,000</b>	<b>5,120</b>	<b>7,120</b>	<b>4.32</b>	<b>2,000</b>	<b>5,685</b>	<b>7,685</b>	<b>4.25</b>
- ค่าเช่า/ค่าใช้ที่ดิน	2,000	0	2,000	1.21	2,000	0	2,000	1.11
- ค่าเสื่อมอุปกรณ์	0	5,015	5,015	3.04	0	5,572	5,572	3.08
- ค่าเสียโอกาสเงินลงทุนคงที่	0	105	105	0.06	0	114	114	0.06
<b>ต้นทุนผันแปร</b>	<b>156,069</b>	<b>1,548</b>	<b>157,617</b>	<b>95.68</b>	<b>171,576</b>	<b>1,716</b>	<b>173,291</b>	<b>95.75</b>
- เติรมบ่อ	4,044	0	4,044	2.45	4,044	0	4,044	2.23
- ค่าลูกกุ้ง	12,000	0	12,000	7.28	12,000	0	12,000	6.63
- อาหาร	75,644	0	75,644	45.92	85,890	0	85,890	47.46
- สารเคมี	16,310	0	16,310	9.90	16,310	0	16,310	9.01
- ค่าแรงงาน	12,216	0	12,216	7.42	13,573	0	13,573	7.50
- ค่าน้ำ	728	0	728	0.44	728	0	728	0.40
- ค่าไฟฟ้า	17,693	0	17,693	10.74	19,659	0	19,659	10.86
- ค่าน้ำมัน	6,460	0	6,460	3.92	7,178	0	7,178	3.97
- ค่าแก๊ส	3,800	0	3,800	2.31	4,222	0	4,222	2.33
- ค่าซ่อมแซม	1,981	0	1,981	1.20	2,201	0	2,201	1.22
- อื่น ๆ	5,193	0	5,193	3.15	5,770	0	5,770	3.19
- ค่าเสียโอกาสเงินลงทุนผันแปร	0	1,548	1,548	0.94	0	1,716	1,716	0.95
<b>รวมต้นทุนทั้งหมด</b>	<b>158,069</b>	<b>6,668</b>	<b>164,737</b>	<b>100.00</b>	<b>173,576</b>	<b>7,401</b>	<b>180,977</b>	<b>100.00</b>
เนื้อที่บ่อเลี้ยง (ไร่)			3.75				3.75	
อัตราปล่อย (ตัว/ตรม.)			75				75	
ระยะเวลาเลี้ยง (วัน)			108				120	
อัตราการรอด (ร้อยละ)			85.19				65.00	
ผลผลิต (กก./ไร่)			1,572.75				1,560	
ขนาดผลผลิต (ตัว/กก.)			65.00				50	
<b>ต้นทุน</b>								
- ต่อไร่			164,737				180,977	
- ต่อกก.			104.74				116.01	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## วิธีการดำเนินการวิจัย

### 1) การพัฒนาระบบควบคุมคุณภาพน้ำอัจฉริยะ (Machine Development)

1.1 ดำเนินการศึกษาวิจัยและพัฒนาระบบควบคุมคุณภาพน้ำอัจฉริยะต้นแบบ โดยมีโครงสร้างโดยรวมของระบบควบคุมคุณภาพน้ำอัจฉริยะสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 1



ภาพที่ 1 โครงสร้างของระบบควบคุมคุณภาพน้ำอัจฉริยะ

1.2 ทดสอบประสิทธิภาพการทำงานของระบบควบคุมคุณภาพน้ำอัจฉริยะต้นแบบในขั้นต้น (Pilot demonstration) ณ ห้องปฏิบัติการคณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

### 2) สำรวจและคัดเลือกพื้นที่ที่จะดำเนินการวิจัยในภาคสนาม

2.1 สำรวจพื้นที่เลี้ยงกุ้งทะเล ณ โครงการพระราชดำริ ศูนย์ศึกษาการพัฒนาอ่าวคุ้งกระเบน อันเนื่องมาจากพระราชดำริ จังหวัดจันทบุรี

2.2 คัดเลือกบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำของนายดำรง เสนาะสรรพ์ ประธานกลุ่มผู้ผลิตกุ้งกุลาดำอินทรีย์คุ้งกระเบน ซึ่งเป็นเกษตรกรผู้เลี้ยงกุ้งในศูนย์ศึกษาการพัฒนาอ่าวคุ้งกระเบน อันเนื่องมาจากพระราชดำริ จังหวัดจันทบุรี มีบ่อเลี้ยงกุ้งขนาดประมาณ 2 ไร่ จำนวน 2 บ่อ

2.3 คัดเลือกบ่อเลี้ยงกุ้งขาว ของศูนย์วิจัยและพัฒนาการเพาะเลี้ยงกุ้งทะเล จังหวัดสมุทรสงคราม พื้นที่บ่อเลี้ยงกุ้งขนาดประมาณ 1 ไร่ จำนวน 2 บ่อ

### 3) การทดสอบระบบควบคุมคุณภาพน้ำอัจฉริยะต้นแบบในพื้นที่จริง (On-farm Implementation)

3.1 ทดสอบระบบควบคุมคุณภาพน้ำอัจฉริยะต้นแบบในบ่อเลี้ยงกุ้งจริง โดยทำการเลี้ยงกุ้งทะเล จำนวน 1 รอบการเลี้ยง ในบ่อเลี้ยงกุ้งทะเล โดยแบ่งเป็น

ชุดควบคุม 1 บ่อ (Control)

ชุดทดลอง 1 บ่อ (Treatment)

3.2 เครื่องให้อากาศแบบใบพัดตีน้ำ โดยใช้เครื่องยนต์ขนาด 11 แรงม้า ประกอบเป็น 5 แขน จำนวนใบพัดแขนละ 13 ใบรวมทั้งหมด 65 ใบ ความเร็ว 60 รอบ/นาที ความลึกควรรออยู่ระหว่าง 1.2-1.4 เมตร

3.3 เก็บข้อมูลการเจริญเติบโตของกุ้ง ผลผลิต และต้นทุนการผลิตต่อหน่วย

#### ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) ประสิทธิภาพการใช้พลังงานในอุตสาหกรรมการเพาะเลี้ยงกุ้งเพิ่มขึ้น
- 2) ลดการใช้พลังงานไฟฟ้าและพลังงานน้ำมัน
- 3) ลดต้นทุนการผลิตในแต่ละรอบการเลี้ยง
- 4) การจัดการเลี้ยงกุ้งทะเลมีประสิทธิภาพ

## วิธีดำเนินการวิจัย และสถานที่ทำการทดลอง/เก็บข้อมูล

### 1) สำรวจและคัดเลือกพื้นที่ที่จะดำเนินการวิจัยในภาคสนาม

1.1 สำรวจพื้นที่เลี้ยงกุ้งทะเล ณ โครงการพระราชดำริ ศูนย์ศึกษาการพัฒนาอ่าวคุ้งกระเบน อันเนื่องมาจากพระราชดำริ จังหวัดจันทบุรี

1.2 คัดเลือกบ่อเลี้ยงกุ้งทะเลของนายดำรง เสนาะสรรพ ประธานกลุ่มผู้ผลิตกุ้งกุลาดำอินทรีย์คุ้งกระเบน ซึ่งเป็นเกษตรกรผู้เลี้ยงกุ้งในโครงการพระราชดำริอ่าวคุ้งกระเบน จังหวัดจันทบุรี มีบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำขนาดประมาณ 2 ไร่ จำนวน 2 บ่อ

1.3 คัดเลือกบ่อเลี้ยงกุ้งขาว ของศูนย์วิจัยและพัฒนาการเพาะเลี้ยงกุ้งทะเล จังหวัดสมุทรสงคราม พื้นที่บ่อเลี้ยงกุ้งขนาดประมาณ 1 ไร่ จำนวน 2 บ่อ

### 2) การพัฒนาระบบควบคุมคุณภาพน้ำอัจฉริยะ (Machine Development)

2.1 ดำเนินการศึกษาวิจัยและประดิษฐ์ระบบควบคุมคุณภาพน้ำอัจฉริยะต้นแบบ โดยมีส่วนที่สำคัญต้องพิจารณาดังนี้

ปริมาณออกซิเจนที่ละลายน้ำ-ระบบดังกล่าวจะประกอบด้วยเครื่องวัดออกซิเจนที่ละลายน้ำ (DO meter) โดยค่าพารามิเตอร์ที่กล่าวมาข้างต้นจากเครื่องมือวัดจะถูกส่งไปยังหน่วยประมวลผลกลาง (CPU) เพื่อคำนวณและตรวจสอบค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ให้อยู่ในค่าที่เหมาะสม ในกรณีที่คุณภาพน้ำมีค่าไม่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของกุ้งทะเล หน่วยประมวลผลกลางจะไปควบคุมการเปิดปิดของเครื่องตีน้ำในบ่อเลี้ยงกุ้งเพื่อปรับคุณภาพของน้ำให้เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของกุ้ง ส่วนในกรณีที่คุณภาพของน้ำต่ำกว่าค่าที่เครื่องควบคุมจะสามารถปรับได้แล้วหน่วยประมวลผลกลางจะส่งสัญญาณเตือนไปยังเกษตรกรกุ้งเพื่อแก้ไขปัญหาได้ทันเวลา ก่อนที่กุ้งจะตายทั้งบ่อ นอกจากนี้ เครื่องมือดังกล่าว ยังสามารถเก็บบันทึกข้อมูลคุณภาพของน้ำเป็นระยะไว้ในหน่วยความจำถาวร (EEPROM Memory) เพื่อช่วยในการวิเคราะห์คุณภาพของน้ำ ถ้าโอนข้อมูลระหว่างเครื่องควบคุมกับคอมพิวเตอร์ได้

เครื่องให้อากาศแบบใบพัดตีน้ำ- ส่วนใหญ่มีอุปกรณ์ต้นกำลังอยู่สองประเภทดังที่กล่าวมาแล้วข้างต้น ทั้งสองแบบจะมีข้อแตกต่างอยู่เล็กน้อยคือ

- แบบมอเตอร์ สามารถออกแบบให้มีจำนวนมอเตอร์ขนาดเล็กหลายตัวกระจายอยู่ทั่วทั้งบ่อได้ เพื่อลดจำนวนชุดเกียร์ การควบคุมสามารถทำได้จากเครื่องควบคุมเพียงชุดเดียว สามารถควบคุมเครื่องให้อากาศได้หลายจุด

- แบบเครื่องยนต์ ส่วนใหญ่จะออกแบบมีจำนวนเครื่องยนต์เพียงเครื่องเดียวเนื่องจากกำลังเครื่องยนต์มีขนาดใหญ่ ใช้ขับใบพัดตีน้ำหลายๆใบร่วมกับชุด เพื่อให้สามารถเติมออกซิเจนเพียงพอ แบบนี้ต้องการจุดควบคุมเพียงจุดเดียว เครื่องควบคุมสามารถทำงานได้จากพลังงานแบตเตอรี่ โครงสร้างโดยรวมของระบบควบคุมคุณภาพน้ำอัจฉริยะสามารถแสดงได้ดังภาพที่ 1

2.2 ทดสอบประสิทธิภาพการทำงานระบบควบคุมคุณภาพน้ำอัจฉริยะต้นแบบในขั้นต้น (Pilot demonstration)

### 3) การทดสอบระบบควบคุมคุณภาพน้ำอัจฉริยะต้นแบบในพื้นที่จริง (On-farm Implementation)

3.1 ทดสอบระบบควบคุมคุณภาพน้ำอัจฉริยะต้นแบบในบ่อเลี้ยงกุ้งจริง โดยสถานที่ทำการทดลอง คือ บ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำภายใน โครงการพระราชดำริ ศูนย์พัฒนาประมงน้ำจืดจันทบุรี โดยทำการเลี้ยงกุ้งทะเลจำนวน 1 รอบการเลี้ยง ในบ่อขนาด 2.9 ไร่ จำนวน 1 บ่อ และบ่อขนาด 2 ไร่ จำนวน 1 บ่อ และที่ศูนย์วิจัยและพัฒนาการเพาะเลี้ยงกุ้งทะเลในบ่อเลี้ยงกุ้งขาวขนาด 1 ไร่ จำนวน 2 บ่อ โดยแบ่งเป็น

บ่อควบคุม 1 บ่อ (Control)

บ่อทดลอง 1 บ่อ (Treatment)

3.2 เครื่องให้อากาศแบบ ใบพัดตีน้ำ โดยใช้เครื่องยนต์ขนาด 11 แรงม้า ประกอบเป็น 5 แขน จำนวนใบพัดแขนละ 13 ใบรวมทั้งหมด 65 ใบ ความเร็ว 60 รอบ/นาที ความลึกควรอยู่ระหว่าง 1.2-1.4 เมตร

3.3 เก็บข้อมูลการเจริญเติบโตของกุ้ง ผลผลิต และต้นทุนการผลิตต่อหน่วย

## ผลการวิจัย

### 1) ตำรวจและคัดเลือกพื้นที่ที่จะดำเนินการวิจัยในภาคสนาม

คณะผู้วิจัยได้ออกสำรวจสถานที่เลี้ยงกุ้ง เก็บรวบรวมข้อมูลจากเกษตรกรผู้เลี้ยงกุ้งเพื่อมารับทราบข้อมูลและปัญหา นอกจากนี้เพื่อหาสถานที่ในการทดสอบและติดตั้งเครื่องควบคุมคุณภาพน้ำกับเกษตรกรผู้เลี้ยงกุ้ง โดยสถานที่ทำการทดสอบและติดตั้งเครื่องควบคุมคุณภาพน้ำ เป็นบริเวณโครงการพระราชดำริ ศูนย์พัฒนาประมงน้ำจืดกระบะเบน จังหวัดจันทบุรี ซึ่งมีระบบชลประทานน้ำเค็มจัดสรรน้ำทะเลให้แก่เกษตรกรผู้เพาะเลี้ยงกุ้งทะเลในโครงการ (ภาพที่ 2) และทางผู้วิจัยได้คัดเลือกบ่อของเกษตรกรผู้เลี้ยงกุ้งกุลาดำ คือนายดำรง เสนาะสรรพ ประธานกลุ่มผู้ผลิตกุ้งกุลาดำอินทรีย์กุ้งกระบะเบน ซึ่งเป็นเกษตรกรผู้เลี้ยงกุ้งในโครงการพระราชดำริอ่าวคุ้งกระเบน จังหวัดจันทบุรี มีบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำขนาด 2.9 ไร่ จำนวน 1 บ่อ และบ่อขนาด 2 ไร่จำนวน 1 บ่อ โดยแบ่งเป็นบ่อควบคุม 1 บ่อ (Control) และบ่อทดลอง 1 บ่อ (Treatment) ดังแสดงได้ดังภาพที่ 3

นอกจากนี้ทางผู้วิจัยยังได้ทำการศึกษาเพิ่มเติมในบ่อเลี้ยงกุ้งขาว ณ ศูนย์วิจัยและพัฒนาการเพาะเลี้ยงกุ้งทะเล จังหวัดสมุทรสงคราม ซึ่งมีบ่อขนาด 1 ไร่ จำนวน 2 บ่อ เพิ่มเติมอีกด้วย

แนวทางในการทำการทดลองและทดสอบเครื่องควบคุมคุณภาพน้ำ สามารถเขียนเป็นแบบจำลองได้ดังภาพที่ 4 จากรูปจะเห็นได้ว่าสามารถแบ่งบ่อเลี้ยงกุ้งจำนวนสองบ่อ คือ

1. บ่อเลี้ยงกุ้งด้วยวิธีการปกติ โดยเปิดเครื่องตีน้ำตามปกติโดยเกษตรกร กำหนดให้เป็นบ่อเลี้ยงกุ้งที่ 1 (บ่อควบคุม)
2. บ่อเลี้ยงกุ้งโดยใช้เครื่องควบคุม ทำการเปิด - ปิด เครื่องตีน้ำโดยอัตโนมัติ กำหนดให้เป็นบ่อเลี้ยงกุ้งที่ 2 (บ่อทดลอง)

ในแต่ละบ่อจะใช้มอเตอร์เป็นต้นกำลังในการขับเคลื่อนตีน้ำ โดยกั้นตีน้ำจะกระจายออกเป็นจุดๆ สี่จุดกระจายโดยรอบของบ่อ แต่ละจุดจะใช้มอเตอร์ขนาด 3 แรงม้าเป็นตัวขับเคลื่อนตีน้ำให้หมุนแยกกันโดยอิสระจำนวน 4 จุด ดังภาพที่ 4 โดยทั่วไปเกษตรกรจะใช้เบรกเกอร์ (breaker) เป็นลวิตซ์เพื่อเปิด-ปิดการทำงานของมอเตอร์แยกกันอิสระในแต่ละตัวของมอเตอร์ดังภาพที่ 6



ภาพที่ 2 ระบบชลประทานน้ำเค็มเพื่อการเพาะเลี้ยงกุ้งทะเลในบริเวณโครงการ



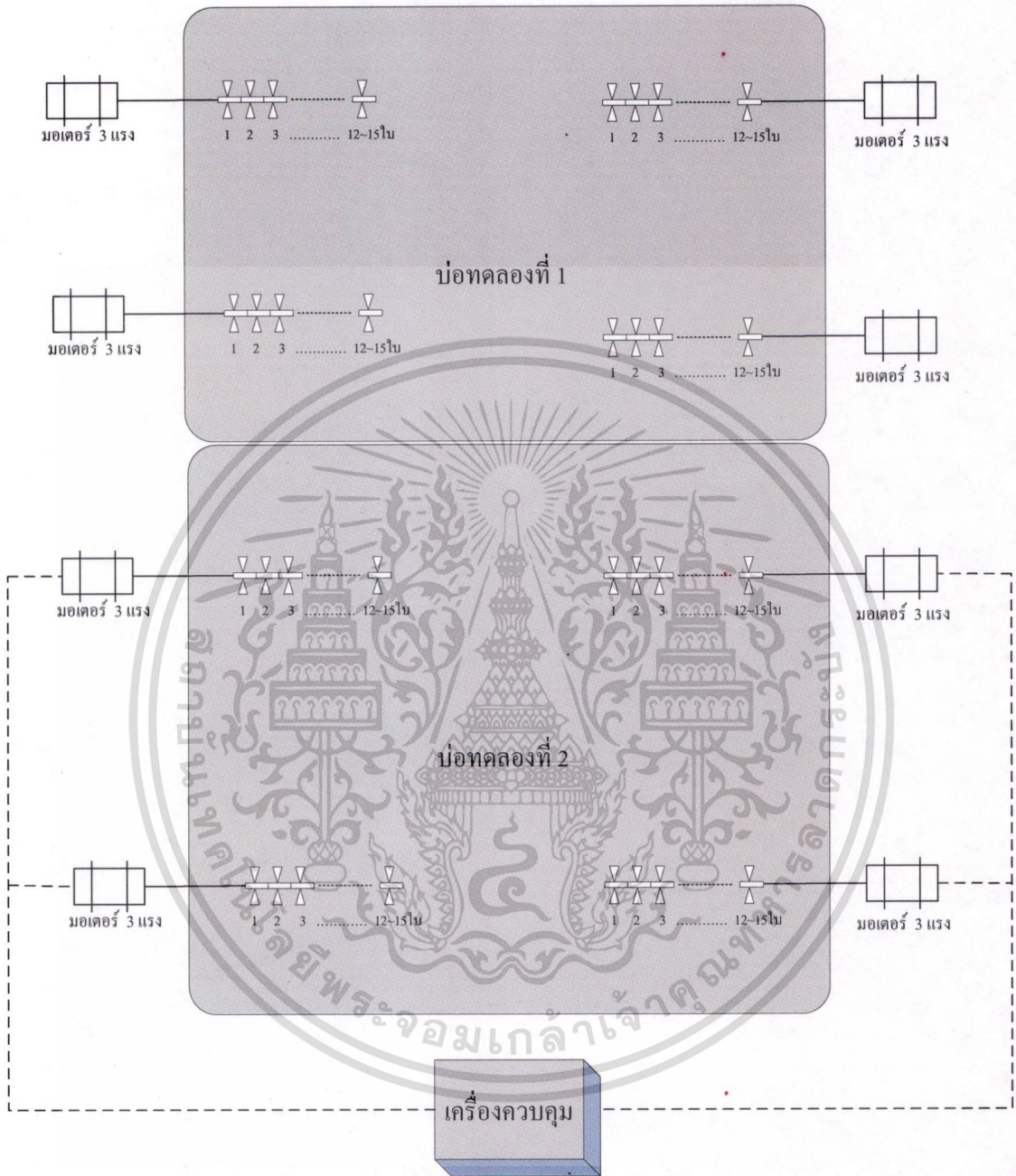
ภาพที่ 3 ภาพถ่ายบ่อเลี้ยงกุ้งทะเลของนายดำรง เสนาะสรรพ

ไบพดกัณฑ์น้ำที่เกษตรกรนิยมใช้มีอยู่หลายประเภท อาจจะแตกต่างในเรื่องของรูปร่าง หรือวัสดุที่นำมาใช้ ซึ่งจะส่งผลโดยตรงกับราคา ไบพดกัณฑ์น้ำสามารถแสดงได้ดังภาพที่ 5(ก) 5(ข) และ 5(ค) ตามลำดับ โดยชนิดที่นิยมมากที่สุดคือแบบที่ 5(ก) วัสดุจะทำจากพลาสติก แม้ว่าอายุการใช้งานจะไม่ยาวนานเหมือนสแตนเลส (Stainless) แต่เนื่องจากกัณฑ์น้ำแบบพลาสติกได้รับความนิยมมากกว่าเพราะมีราคาที่ถูกลงกว่ามาก ซึ่งในการทดสอบเครื่องควบคุมคุณภาพน้ำในงานวิจัยนี้จะใช้ไบพด

ในแบบที่ 5(ก) เช่นกัน ในการออกแบบตำแหน่งการติดตั้งกังหันตึ้นน้ำทั้งสองบ่อ จะกำหนดให้อยู่ในลักษณะที่ใกล้เคียงกันมากที่สุด เพื่อไม่ให้เกิดความได้เปรียบเสียเปรียบจากการทดลอง ส่วนที่แตกต่างคือในบ่อทดลองที่ 2 จะมีเครื่องควบคุมคุณภาพน้ำต่อไปควบคุมการเปิด-ปิดมอเตอร์ผ่านเบรกเกอร์แบบอัตโนมัติ

ในส่วนของต้นกำลังในการทดลองนี้จะใช้มอเตอร์ไฟฟ้าเป็นต้นกำลังแทนเครื่องยนต์ในเบื้องต้น เนื่องจากค่าพลังงานไฟฟ้ามีราคาถูกกว่าน้ำมันมาก และสะดวก สามารถใช้งานได้ง่่ายกว่า จึงเป็นที่นิยมมากกว่าในกลุ่มเกษตรกร ต้นกำลังที่เป็นเครื่องยนต์ส่วนใหญ่จะใช้ในพื้นที่ที่ห่างไกลสายไฟฟ้าเข้าไปไม่ถึง





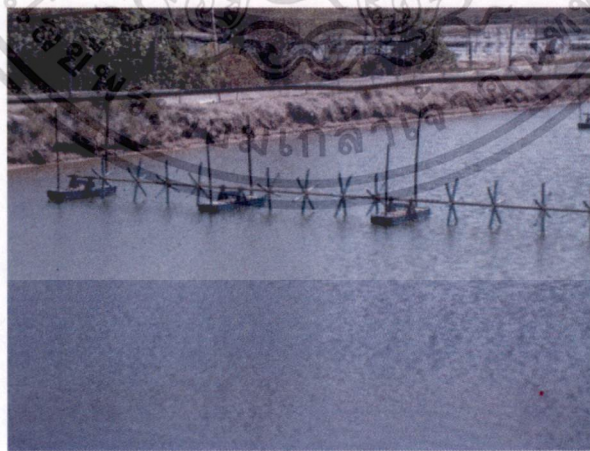
ภาพที่ 4 แบบจำลองบ่อเลี้ยงกุ้งเพื่อใช้ในการทดลองทั้งสองบ่อ



(ก)



(ข)



(ค)

ภาพที่ 5 ใบบัดตึน้ำประเภทต่างๆ ที่นิยมใช้ในปัจจุบัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง



ภาพที่ 6 ภาพถ่ายเบรกเกอร์หรือสวิตช์เปิด-ปิดมอเตอร์ไฟฟ้าจากสถานที่ใช้งานจริง



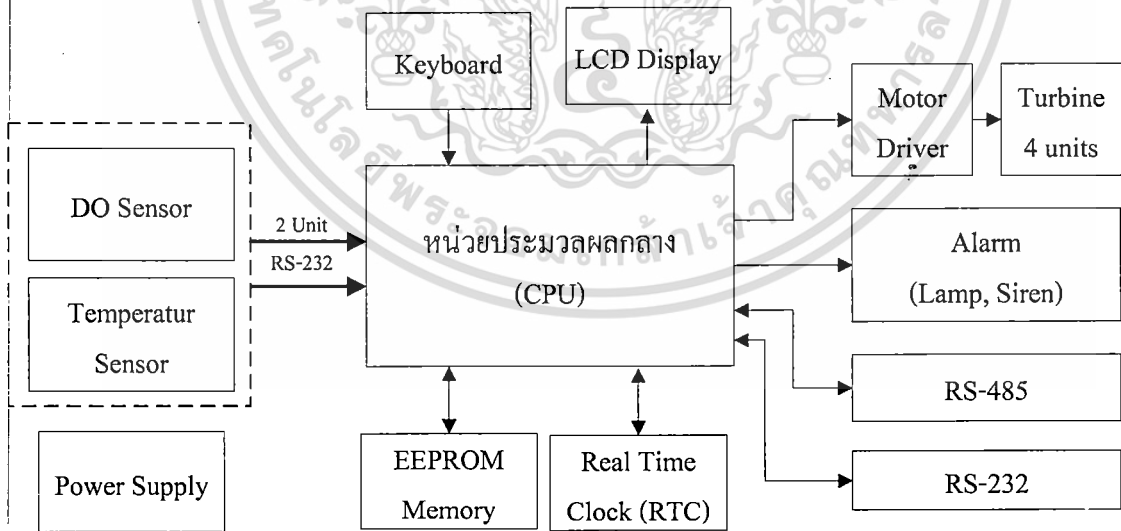
ภาพที่ 7 ภาพถ่ายแสดงมอเตอร์ขนาด 3 แรงม้า

## 2) การพัฒนาเครื่องควบคุมคุณภาพน้ำอัจฉริยะ (Machine Development)

### 2.1 การออกแบบเครื่องควบคุมคุณภาพน้ำ

จากการสำรวจและเก็บรวบรวมข้อมูลต่างๆ ด้วยวิธีการสอบถามข้อมูลจากเกษตรกรผู้เลี้ยงกุ้ง คณะผู้วิจัยได้สรุปโครงสร้างและทำการออกแบบระบบควบคุมคุณภาพน้ำอัจฉริยะได้ดังในภาพที่ 8 จากรูปจะเป็นการแสดง บล็อกไดอะแกรมของระบบควบคุมคุณภาพน้ำอัจฉริยะ ซึ่งสามารถแยกในส่วนวงจรเป็นได้เป็นส่วนใหญ่ๆ ออกเป็น 4 ส่วนคือ

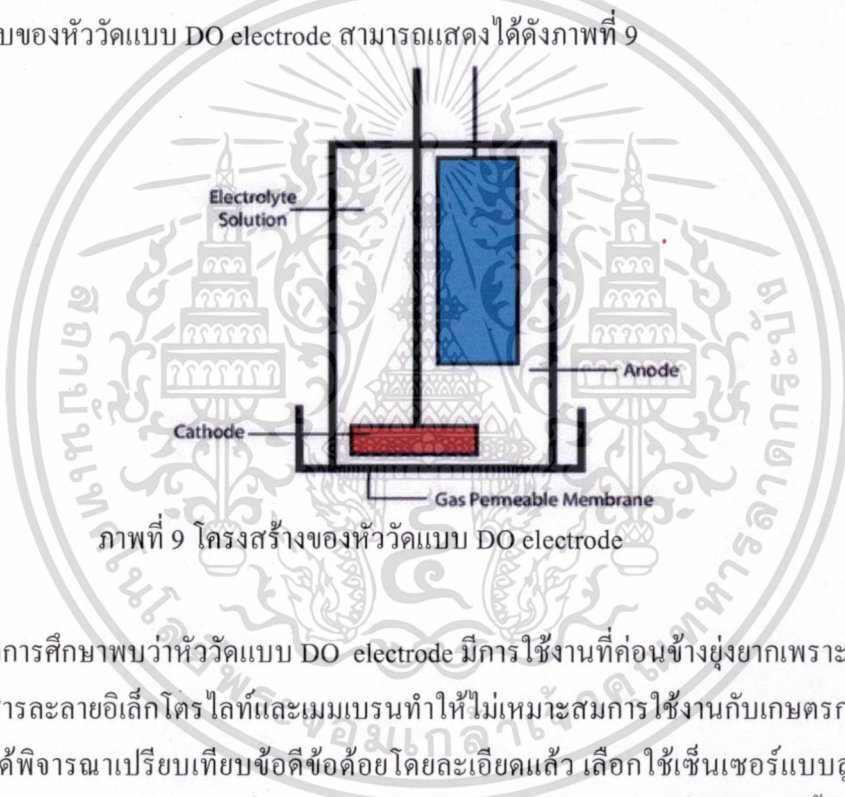
- 1) วงจรเซ็นเซอร์ ทำหน้าที่ตรวจจับค่าออกซิเจนที่ละลายอยู่น้ำและอุณหภูมิของน้ำ จากนั้นก็จะส่งให้หน่วยประมวลผลการใช้ในการควบคุมการทำงานของมอเตอร์
- 2) วงจรส่วนประมวลผลกลาง ทำหน้าที่ในการประมวลผลต่างๆ นอกจากนี้ยังประกอบไปด้วย หน้าแอลซีดีเพื่อแสดงสภาวะการทำงาน คีย์บอร์ดเพื่อใช้ในการตั้งค่าควบคุมต่างๆ ส่วนความจำแบบถาวร(EEPROM) วงจรเพื่อใช้ในการติดต่อสื่อสารและแลกเปลี่ยนข้อมูลแบบ RS232 และ RS485
- 3) วงจรขับมอเตอร์เพื่อใช้ควบคุมการทำงานของมอเตอร์ โดยจะรับสัญญาณจากหน่วยประมวลผลกลางเพื่อทำหน้าที่เปิดเปิด มอเตอร์ให้สอดคล้องกับปริมาณออกซิเจนที่ละลายอยู่ในน้ำ
- 4) วงจรเพาเวอร์ซัพพลาย ทำหน้าที่แปลงแรงดันไฟฟ้าขนาด 220VAC ให้เป็นแรงดันขนาด 5VDC และ 3 VDC ให้แก่วงจรต่างในวงจรส่วนประมวลผลกลาง



ภาพที่ 8 บล็อกไดอะแกรมของระบบควบคุมคุณภาพน้ำอัจฉริยะ

## 2.2 อุปกรณ์ตรวจจับค่าออกซิเจนละลายในน้ำ(DO)

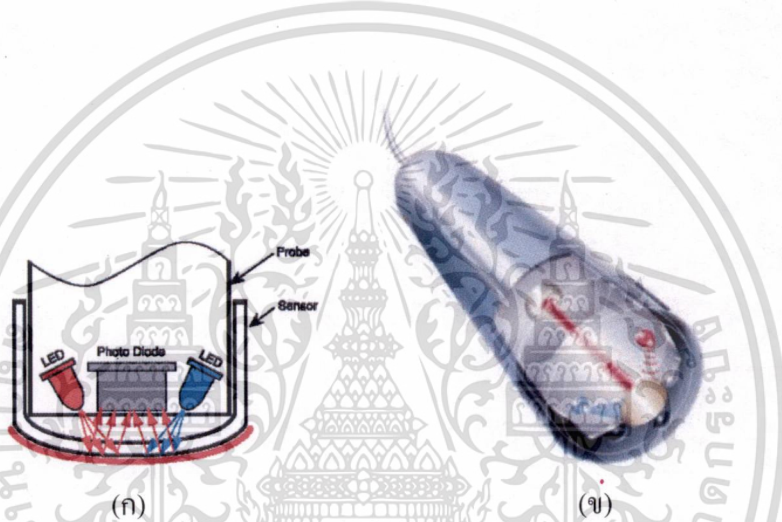
อุปกรณ์ตรวจจับค่าออกซิเจนละลายในน้ำ (Dissolved Oxygen meter : DO meter) ในห้องทดลองมีใช้อยู่หลายประเภทส่วนที่แตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัดเจนนคือ หัววัด (Probe) โดยหัววัดนี้จะมีหลักการตรวจจับออกซิเจนที่แตกต่างกันเช่น หัววัดแบบ DO electrode ซึ่งประกอบไปด้วย ขั้วแอโนด, ขั้วแคโทด, สารละลายอิเล็กโทรไลต์ และ gas permeable membrane ซึ่งเมื่อทำการวัด เมมเบรนนี้จะยอมให้เฉพาะก๊าซออกซิเจนผ่านเข้ามาใน electrode เท่านั้น จากนั้นจะเกิดแรงดันภายในเมมเบรน แล้วก๊าซออกซิเจนจะซึมเข้าสู่สารละลายอิเล็กโทรไลต์ ซึ่ง DO meter จะสามารถวัดค่าแรงดันระหว่างขั้วแอโนดและแคโทด ที่เกิดจากการเคลื่อนที่ของโมเลกุลของออกซิเจนในสารละลายได้ ส่วนประกอบของหัววัดแบบ DO electrode สามารถแสดงได้ดังภาพที่ 9



ภาพที่ 9 โครงสร้างของหัววัดแบบ DO electrode

จากการศึกษาพบว่าหัววัดแบบ DO electrode มีการใช้งานที่ค่อนข้างยุ่งยากเพราะจำเป็นต้องมีการเปลี่ยนสารละลายอิเล็กโทรไลต์และเมมเบรนทำให้ไม่เหมาะสมการใช้งานกับเกษตรกร ดังนั้นทางคณะผู้วิจัยได้พิจารณาเปรียบเทียบข้อดีข้อด้อยโดยละเอียดแล้ว เลือกลงใช้เซ็นเซอร์แบบลูมิเนสเซนซ์ (Luminescent Dissolve Oxygen) ซึ่งเซ็นเซอร์แบบลูมิเนสเซนซ์ไม่มีส่วนที่สัมผัสกับน้ำโดยตรงทำให้อายุการใช้งานค่อนข้างนานและไม่จำเป็นต้องเปลี่ยนอิเล็กโทรไลต์และเมมเบรนเช่นเดียวกับหัววัดแบบ DO electrode แต่ข้อเสียของเซ็นเซอร์ชนิดนี้คือ มีราคาแพง หลักการทำงานของหัววัดแบบลูมิเนสเซนซ์ต่างจากเทคโนโลยีหัววัดออกซิเจนชนิดอื่น เพราะหัววัดชนิดนี้ไม่ได้ใช้ออกซิเจนในการเกิดปฏิกิริยา แต่จะมีสารประเภทลูมิเนสเซนซ์เคลือบอยู่บริเวณปลายหัววัด โดยเมื่อแสงสีฟ้าจากหลอด LED ภายในหัววัดเรืองแสง จะทำให้เกิดปฏิกิริยาลูมิเนสเซนซ์ของสารเคลือบบนผิวของหัววัด โดยสารลูมิเนสเซนซ์จะถูกกระตุ้นทันทีจากสภาวะพื้น แล้วปล่อยแสงสีแดงออกมา ซึ่งแสงสีแดงนี้จะถูกตรวจจับโดย

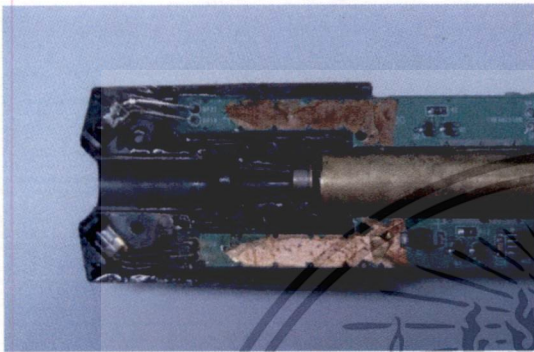
photodiode และวัดเวลาที่เกิดปฏิกิริยาจนกระทั่งกลับสู่สภาวะพื้น โดยความเข้มข้นของออกซิเจนจะแปรผกผันกับเวลาที่ทำให้สารลูมิเนสเซนซ์ กลับสู่สภาวะพื้นสามารถแสดงโครงสร้างและหลักการที่กล่าวมาข้างต้นได้ดังภาพที่ 10 หรืออีกความหมายหนึ่งก็คือยังมีออกซิเจนมากเวลาที่เกิดการเรืองแสงจะสั้นแต่หากมีออกซิเจนน้อยเวลาที่ใช้ในการเรืองแสงจะนาน ด้วยเหตุผลที่หัววัดชนิดนี้ไม่ได้ใช้ออกซิเจนในการเกิดปฏิกิริยา ดังนั้น จึงไม่จำเป็นต้องเปรียบเทียบมาตรฐาน (calibration) ใหม่ หรือทำความสะอาดบ่อยๆ (ยกเว้นเมื่อใช้งานกับของเหลวที่มีความหนืด) จึงเป็นผลให้มีอายุการใช้งานยาวนานกว่า และให้ผลการวัดที่มีความเสถียรและแม่นยำกว่า ทั้งการวัดในระบบที่มีการไหลและไม่มีการไหลของน้ำ



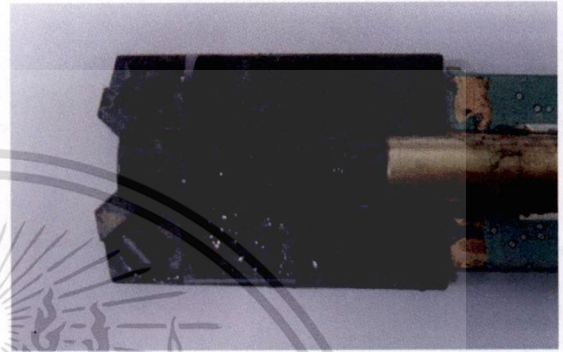
ภาพที่ 10 โครงสร้างของหัววัดออกซิเจนละลายในน้ำแบบลูมิเนสเซนซ์

การวิจัยในครั้งนี้เลือกใช้หัววัดแบบลูมิเนสเซนซ์ เพื่อจะใช้ในการวัดปริมาณออกซิเจน และอุณหภูมิ เป็นแบบ real time ในโครงการวิจัยนี้เลือกใช้โมดูล (Module) หัววัดออกซิเจนละลายในน้ำแบบลูมิเนสเซนซ์ที่สามารถอ่านค่าได้เป็นดิจิทัล การเชื่อมต่อจะเป็นการส่ง-รับข้อมูลบนมาตรฐานสัญญาณทางไฟฟ้าแบบ RS-232 และใช้รูปแบบการสื่อสารข้อมูล หรือ โพรโตคอล (protocol) แบบ MODBUS ซึ่งเป็นโพรโตคอลมาตรฐานในการสื่อสารชนิดหนึ่งที่ได้รับคามนิยมในอุตสาหกรรม ในโครงการวิจัยนี้ใช้หัววัดออกซิเจนละลายในน้ำจำนวน 2 ชุด โดยหัววัดออกซิเจนทั้งสองชุดสามารถที่จะต่อกันแบบขนานได้โดยตรงเข้าที่พอร์ต RS-232 ของหน่วยประมวลผลกลางดังแสดงได้ดังภาพที่ 13 จากรูปเห็นได้ว่า RS-232 ของหน่วยประมวลผลการมีอยู่เพียงพอร์ตเดียว แต่เนื่องจากสัญญาณที่ได้จากหัววัดออกซิเจนละลายในน้ำนั้นเป็นสัญญาณแบบดิจิทัลทำให้สามารถที่จะกำหนดการอ่านค่าออกซิเจนที่ได้จากเซ็นเซอร์แต่ละตัวคนละช่วงเวลา กัน โดยไม่เกิดการชนกันของข้อมูล

จากรูปโครงสร้างของหัววัดออกซิเจนละลายในน้ำแบบลูมิเนสเซนซ์ในภาพที่ 11(ก) (ข) (ค) และ(ง) ตามลำดับ แสดงโครงสร้างภายในและการจัดวางตำแหน่งของ LED, LANE, Optical filter, Photodiode และอุปกรณ์ต่างๆ



(ก) ภาพถ่ายภายใน



(ข) ภาพถ่ายภายในพร้อมฝาครอบเลนส์

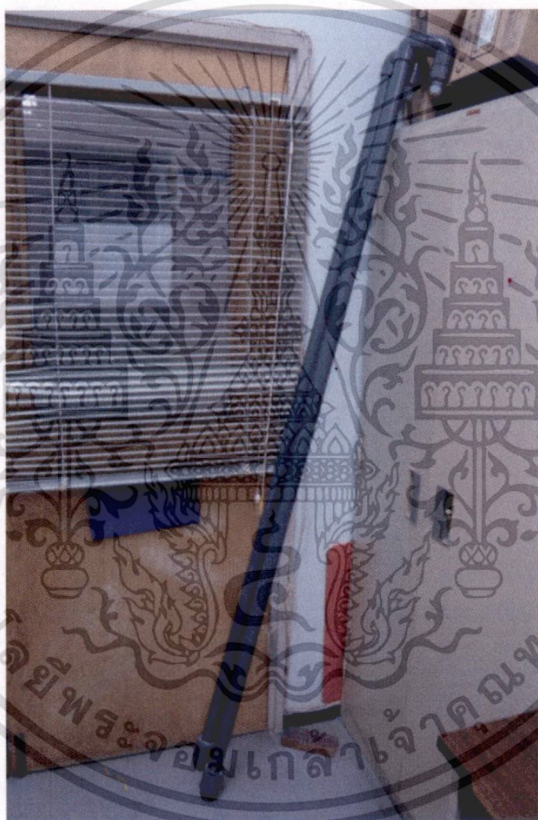


(ค) ภาพถ่ายฝาครอบหัววัดออกซิเจน

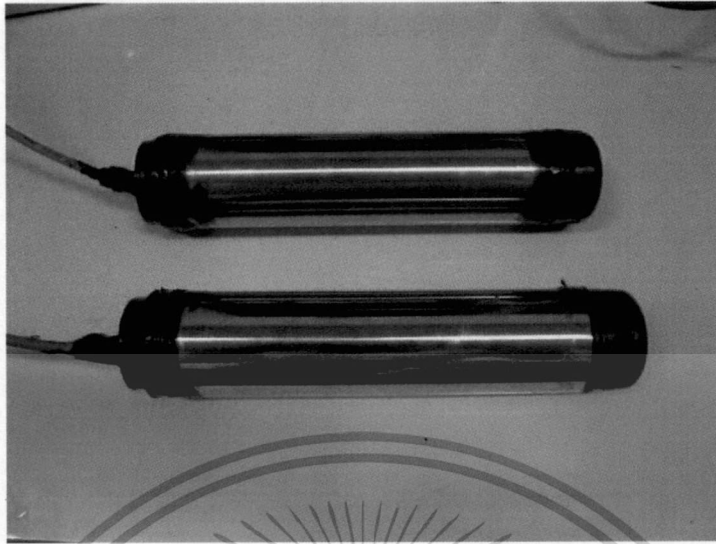
(ง) ภาพถ่ายฝาครอบด้านนอกหัววัดออกซิเจน

ภาพที่ 11 ภาพถ่ายโครงสร้างภายในหัววัดออกซิเจนละลายในน้ำแบบลูมิเนสเซนซ์

การป้องกันชั้นสุดท้ายจะเป็นกระบอกสแตนเลสที่อยู่ด้านนอกสุดของหัววัดออกซิเจนละลายในน้ำแบบลูมิเนสเซนซ์ที่แสดงได้ดังภาพที่ 12(ข) อีกชั้นหนึ่งเนื่องจากภายในอุปกรณ์เกี่ยวกับแสงและใช้หลักการหักเหของแสงจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องยึดอุปกรณ์ต่างไม่ให้ออกมาเคลื่อนที่ได้แม้แต่น้อย เพราะมิเช่นนั้นจะเกิดความผิดพลาดในการวัดปริมาณออกซิเจนได้ ในการใช้งานจริงจำเป็นต้องมีตัวยึดเพื่อให้เกิดความมั่นคงและป้องกันไม่ให้น้ำเข้าไปภายในหัวเซ็นเซอร์ได้ง่าย เพราะจะทำให้เกิดการลัดวงจรภายใน การยึดโดยด้านปลายของหัวเซ็นเซอร์จะมีเกลียวเพื่อสามารถไขยึดกับท่อพีวีซีที่แสดงได้ดังภาพที่ 12(ก) นอกจากนี้ท่อพีวีซียังช่วยไม่ให้เกิดแรงดึงระหว่างสายไฟกับหัวเซ็นเซอร์ได้อีกด้วย



(ก) ภาพถ่ายอุปกรณ์ต่อรวมเพื่อใช้ในการติดตั้งในบ่อเลี้ยงกุ้งจำนวน 2 ชุด



(ข) ภาพถ่ายหัววัดออกซิเจนฯ จำนวน 2 ชุด

ภาพที่ 12 ภาพถ่ายแสดงหัววัดออกซิเจนละลายในน้ำแบบลูมิเนสเซนซ์และอุปกรณ์ต่อรวมเพื่อใช้สำหรับติดตั้งในบ่อเลี้ยงกุ้ง

### 2.3 วงจรควบคุมส่วนกลาง

จากบล็อกไดอะแกรมที่ออกแบบไว้ในภาพที่ 8 สามารถออกแบบวงจรควบคุมส่วนกลางได้ดังในรูปที่ 12 โดยวงจรทั้งหมดที่แสดงในรูปนี้จะประกอบได้ด้วยบล็อกการทำงานหลักต่างๆ ดังนี้คือ

- หน่วยประมวลผลกลางจะใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์เบอร์ AT89C5131
- ฐานเวลาจริง (RTC: Real Time Clock) ใช้ไอซีชิปเบอร์ DS1307
- การสื่อสารข้อมูลมาตรฐาน RS-232 ใช้ไอซีชิปเบอร์ MAX232E
- การสื่อสารข้อมูลมาตรฐาน RS-485 ใช้ไอซีชิปเบอร์ DS75176
- คีย์บอร์ดเป็นขนาด 16 ปุ่ม แบบ 4x4
- จอแอลซีดี ขนาด 16x2 อักขร
- หน่วยความจำแบบถาวรภายนอก (EEPROM) ไอซีชิปเบอร์ 24CL512
- วงจรกำเนิดสัญญาณเตือน

ในส่วนของหน่วยประมวลผลกลางจะใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์เบอร์ AT89C5131 เป็นหน่วยประมวลผลกลาง หน้าทีหลักเป็นส่วนที่ควบคุมการทำงานของมอเตอร์ทั้ง สี่ตัว ดังแบบจำลองบ่อเลี้ยงกุ้งที่แสดงไว้ดังภาพที่ 4 โดยไมโครคอนโทรลเลอร์เบอร์ AT89C5131 มีทั้งหมด 34 Pins 5 พอร์ต ซึ่งได้แก่ Port 0, Port 1,

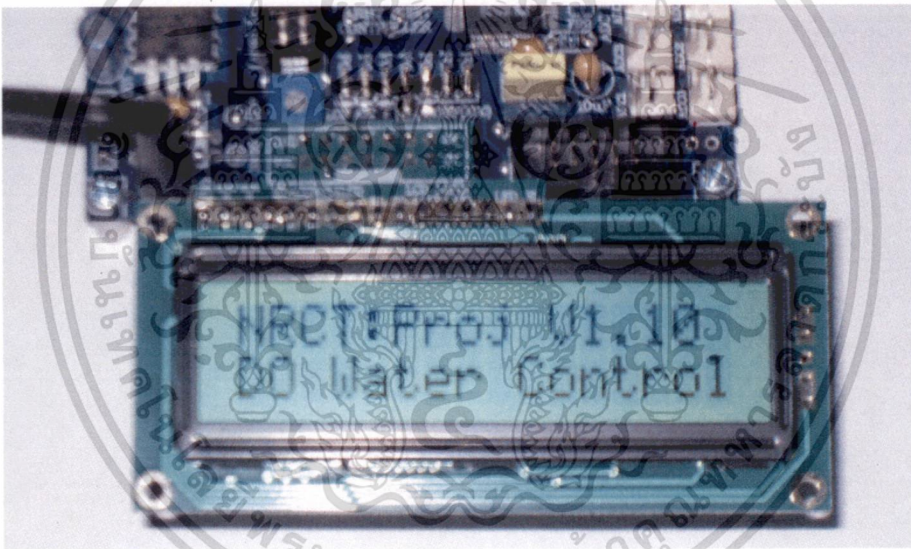
Port 2, Port 3, Port 4 โดยพอร์ต 4 จะมีแค่ 2 บิตซึ่งใช้ในการสื่อสารอนุกรม TWI (I2C) โดย 2 ขานี้จะต่อออกไปที่พอร์ต I2C BUS และ ขณะเดียวกันก็ต่อให้กับ IC DS1307 กับ EEPROM : 24LS512 ด้วยในส่วนของพอร์ต P0 – P3 จะต่อออกไปที่พอร์ต 34 Pin ทั้งหมด ยกเว้น 2 ขา คือ P3.0 และ P3.1 ซึ่งถูกใช้งานในส่วนของการสื่อสารอนุกรม ( UART ) เท่านั้น พอร์ต LCD ใช้กับ Character LCD โดยเชื่อมต่อแบบ 4 บิต โดยสัญญาณที่ใช้เชื่อมต่อกับ LCD จะเป็นสัญญาณชุดเดียวกับที่ต่อไปยังขั้วต่อของ PORT-P2 โดยในการเชื่อมต่อสายสัญญาณจากขั้วต่อของพอร์ต LCD ไปยังจอแสดงผล LCD นั้น ให้ยึดชื่อสัญญาณเป็นจุดอ้างอิง โดยให้ต่อสัญญาณที่มีชื่อตรงกันเข้าด้วยกันให้ครบ

การสื่อสารอนุกรมแบบ RS232/RS422 ในกรณีนี้จะต้องทำการติดตั้งไอซี Line Driver เบอร์ MAX232 และ เบอร์ 75176 ตามลำดับ จำนวนอย่างละ 1 ตัว เพื่อทำหน้าที่เปลี่ยนระดับสัญญาณไฟฟ้าในการ รับ-ส่ง แบบ TTL จาก CPU ให้เป็นระดับสัญญาณมาตรฐาน RS-232 และ RS-485 ในแต่ละมาตรฐานตามลำดับ เพื่อ รับ-ส่ง สัญญาณกับอุปกรณ์ที่มีระดับสัญญาณทางไฟฟ้าเป็นแบบ Balance Line เหมือนกัน โดยถ้าต้องการใช้การสื่อสารแบบทิศทางเดียว วัตถุประสงค์ของการเปลี่ยนระดับแรงดันไฟตามมาตรฐาน RS-232 และ RS-485 นั้นเพื่อใช้ในการส่งรับข้อมูลระหว่างหน่วยประมวลผลกลางและระหว่างหน่วยควบคุมกลางกับคอมพิวเตอร์ เพื่อสะดวกในการเก็บข้อมูลการทดลองและการกำหนดค่าต่างๆของหน่วยควบคุมจากคอมพิวเตอร์

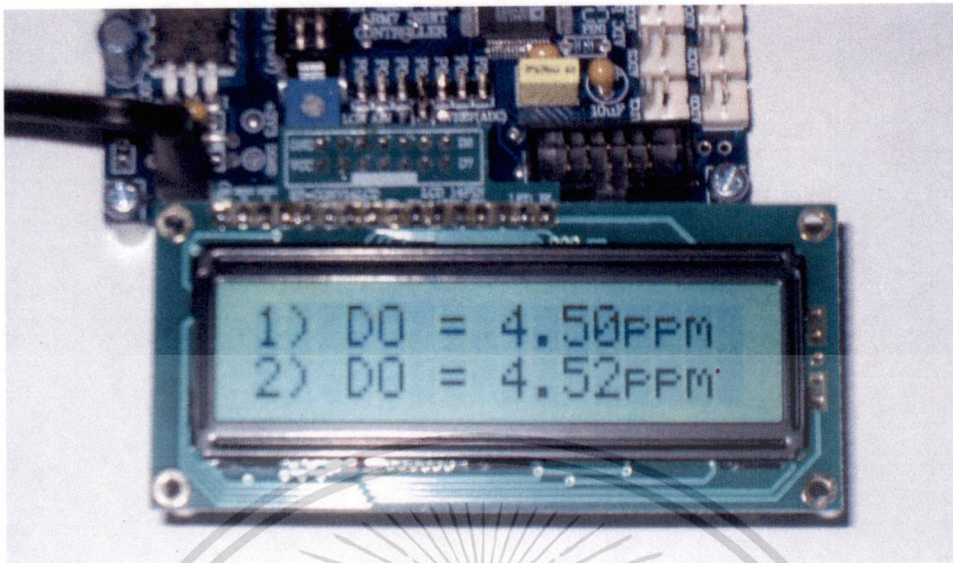


การแสดงผลสถานะการทำงานและการควบคุมการทำงานต่างๆสามารถทำได้โดยการ อ่านค่าผ่านทาง หน้าจอแอลซีดีของเครื่องควบคุมและกำหนดค่าผ่านทางคีย์บอร์ดเครื่องควบคุม โดยตัวอย่างการแสดงผลสถานะการทำงานของเครื่องสามารถแสดงได้ดังภาพที่ 14 ภาพที่ 15 และภาพที่ 16 ตามลำดับ จากภาพแสดงหน้าจอ ปกติภายหลังจากเปิดเครื่อง เครื่องจะแสดงชื่อ โดยจะค้างอยู่ประมาณ 5 วินาที หลังจากนั้นจะแสดงค่าของปริมาณ ออกซิเจนที่ละลายในน้ำ (DO, ppm) จากเซ็นเซอร์ปริมาณออกซิเจนทั้งสองตัว ดังแสดงได้ดังภาพที่ 15 โดย หน้าจอแสดงผลสถานะการทำงานของเครื่องสามารถเปลี่ยนแปลงได้ตามความต้องการของผู้ใช้ได้ ว่าต้องการให้ แสดงพารามิเตอร์ใด เช่นแสดงค่าอุณหภูมิซึ่งอ่านได้ทั้งสองตัว ดังแสดงในภาพที่ 16 เป็นตัวอย่างการแสดงผลค่า อุณหภูมิของน้ำซึ่งอ่านได้จากเซ็นเซอร์ทั้งสองตัว

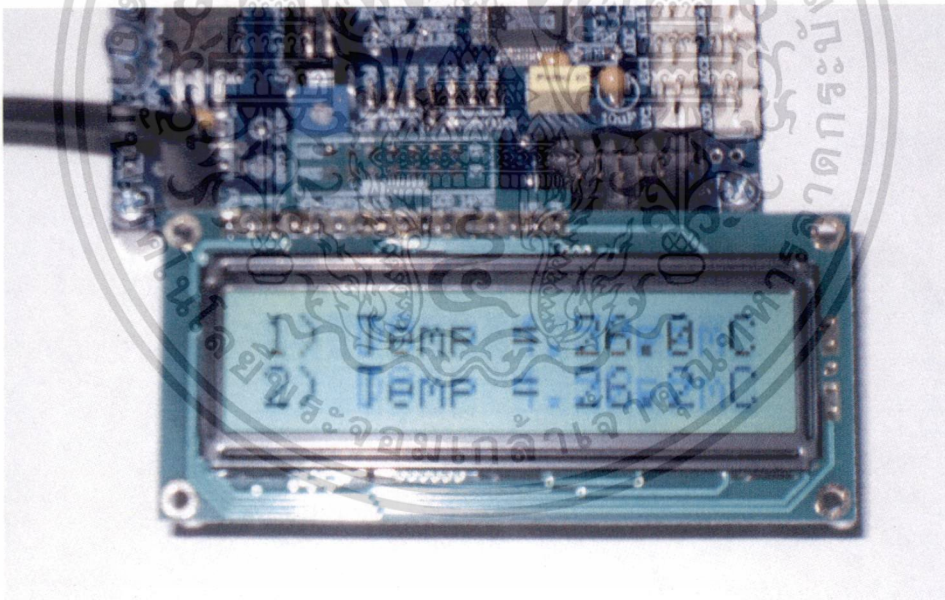
ผลที่ได้จากการทดลองสามารถอ่านค่าได้อย่างถูกต้อง เนื่องอุปกรณ์ออกซิเจนเซ็นเซอร์และอุณหภูมิ เซ็นเซอร์เป็นโมดูลซึ่งสามารถให้ค่าที่เป็นดิจิตอลได้เลย ทำให้เกิดความสะดวกและง่ายต่อการใช้งาน



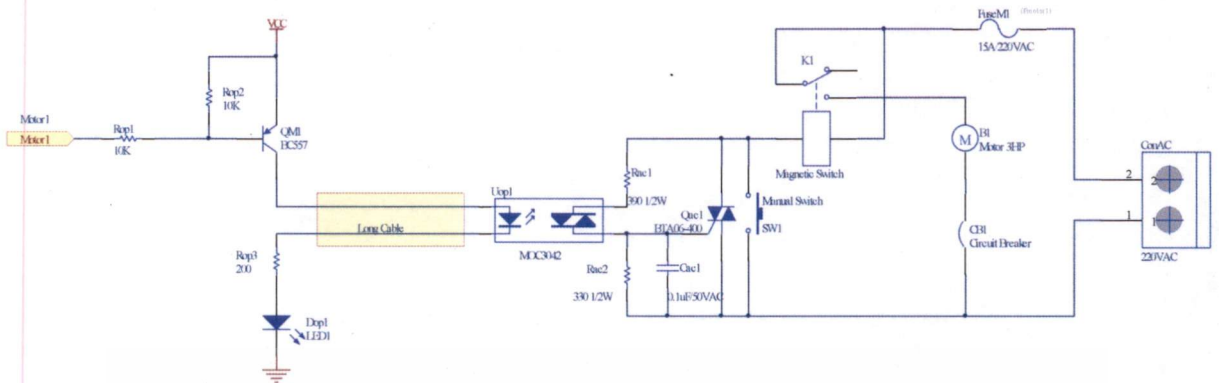
ภาพที่ 14 จอแอลซีดี (LCD) แสดงสถานะการทำงานของเครื่องควบคุม



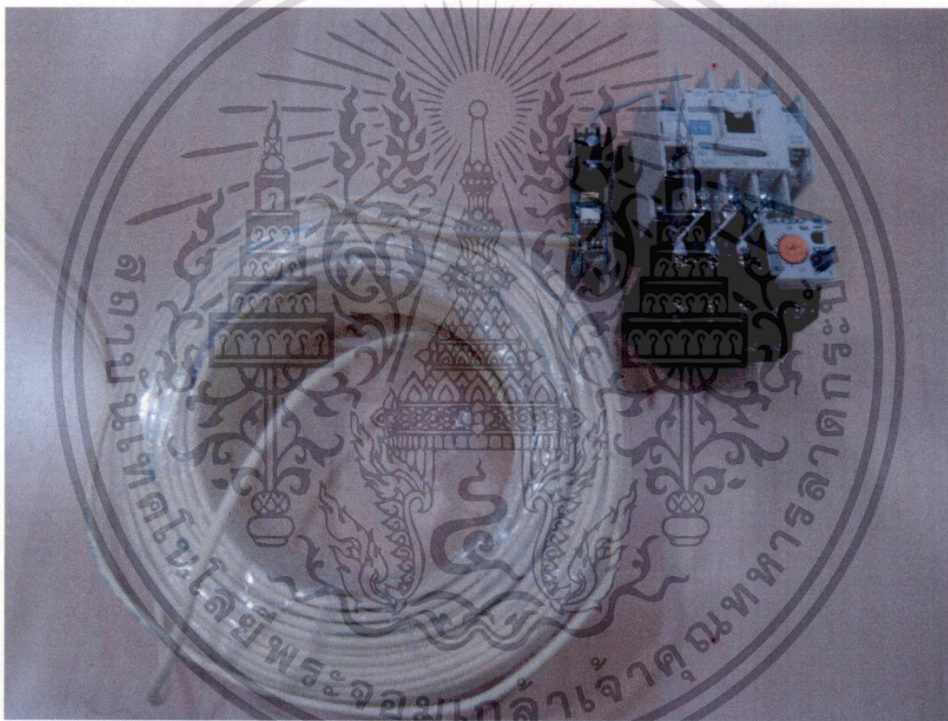
ภาพที่ 15 จอแอลซีดี (LCD) แสดงค่าที่อ่านค่าได้จากเซ็นเซอร์ปริมาณออกซิเจนที่ละลาย  
ในน้ำ(DO, ppm)



ภาพที่ 16 จอแอลซีดี (LCD) แสดงค่าที่อ่านค่าได้จากเซ็นเซอร์อุณหภูมิของน้ำ



ภาพที่ 17 วงจรภาคขับมอเตอร์ (motor driver circuit)



ภาพที่ 18 ภาพถ่ายวงจรชุดขับมอเตอร์ (motor driver circuit)

วงจรภาคขับมอเตอร์ (motor driver circuit) ขนาด 3 แรงม้าแบบ opto-isolate output แสดงได้ดังภาพที่ 18 โดยในเครื่องควบคุมคุณภาพน้ำฯ จะประกอบด้วยวงจรภาคขับมอเตอร์จำนวน 4 ชุดเหมือนกัน แต่แตกต่างกันตรงที่การเชื่อมต่อกับพอร์ตของหน่วยประมวลผลการกลางต่างพอร์ตกัน เพื่อแยกการควบคุมการทำงานของมอเตอร์ได้อย่างอิสระ ใช้วงจรแบบ OPTO-ISOLATE ในการควบคุมการทำงาน เพื่อป้องกันสัญญาณรบกวนต่างๆที่เกิดจากการทำงานของอุปกรณ์ Output ที่จะย้อนกลับมารบกวนการทำงานของวงจรควบคุมหรือไมโครคอนโทรลเลอร์ต่างๆ ทำให้ประสิทธิภาพการทำงานในระบบไมโครคอนโทรลเลอร์ต่างๆ มีเสถียรภาพ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และความน่าเชื่อถือมากยิ่งขึ้น โดยการทำงานของวงจรมันจะออกแบบให้การทำงานของ AC OUTPUT ทำงานด้วยสถานะลอจิก “0” และหยุดทำงานด้วยสถานะลอจิก “1” เพื่อป้องกันไม่ให้ AC OUTPUT ทำงานในขณะที่ระบบไมโครคอนโทรลเลอร์เกิดการ RESET หรือสัญญาณจากหน่วยควบคุมกลางถูกปล่อยลอยอยู่หรือชำรุด

การทำงานของวงจรมันเริ่มจาก เมื่อมีการป้อนสถานะลอจิก “0” ที่ตำแหน่งพอร์ตศูนย์ (Port 0) ซึ่งจะส่งผลให้ขาเบส (Base) ของทรานซิสเตอร์ BC557 ที่ต่ออยู่ทางด้าน Input ของ OPTO ISOLATE ได้รับการไบอัสที่ถูกต้อง ทำให้ทรานซิสเตอร์นำกระแส ซึ่งจะทำให้มีแรงดัน +VCC(+5VDC) ไหลออกจากขา Emitter ไปยัง Collector ผ่านไปยัง OPTO ISOLATE (MOC3042) ไปยัง LED และ ตัวต้านทาน 330 โอห์ม ลง GND ซึ่งส่งผลให้หลอดแสดงผล LED ติดสว่างและ วงจร OPTO ISOLATE ทำงาน โดยที่ไอซี OPTO ISOLATE เบอร์ MOC3042 นี้จะเป็นแบบ Zero Crossing ซึ่งทำหน้าที่จุดชนวนเกิดให้กับ TRIAC ที่มุมศูนย์องศา ของไฟสลับ 220VAC/50Hz เป็นผลให้ TRIAC นำกระแส หลังจาก TRIAC นำกระแสก็จะส่งผลให้มีกระแสไหลในขดลวด Magnetic switch หน้าคอนเทร็คก็จะติดกัน ส่งผลให้มีกระแสในวงจรมอเตอร์ครบวงจร มอเตอร์ก็จะทำงานไปหมุนใบพัดให้ตึกน้ำเพื่อเพิ่มออกซิเจนภายในบ่อเลี้ยงกุ้ง ในวงจรนี้จะมี Manual switch ต่อขนานกับ TRIAC ในกรณีที่เมื่อเหตุขัดข้องจากหน่วยควบคุมหรือปัญหาอื่นใดก็ตาม เกษตรกรสามารถเปิดกั้นตึกน้ำได้เองจาก Manual switch นี้ โดย Manual switch จะไปควบคุม Magnetic switch ตัวเดียวกัน

ความเสียหายของมอเตอร์และวงจรขับมอเตอร์อีกกรณีหนึ่งคือความร้อนจากมอเตอร์ ซึ่งความร้อนนี้เกิดได้จากหลายสาเหตุ เช่น

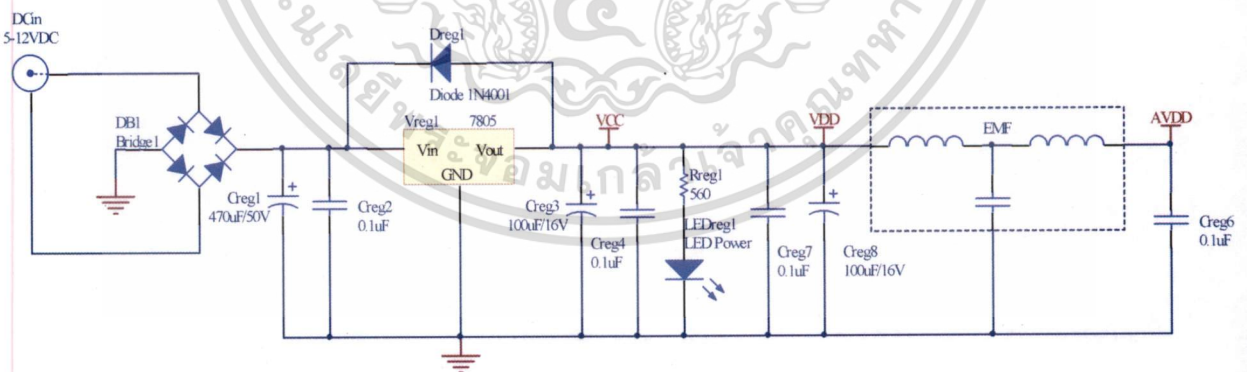
- จำนวนกระแสของโหลด
- ระยะเวลาของการมีโหลดเกิน
- ความถี่บ่อยในการสตาร์ทมอเตอร์
- เวลาที่ใช้ในการสตาร์ทจนมอเตอร์ถึงความเร็วสูงสุด
- อุณหภูมิแวดล้อม (Ambient temperature)
- ความสามารถในการระบายความร้อน
- ช่วงเวลาในการทำงาน (Duty cycle)

ดังนั้นจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องทำการติดตั้ง โอเวอร์ โหลดที่มีขนาดเหมาะสมในอุปกรณ์สตาร์ทมอเตอร์ เพื่อทำการป้องกันมอเตอร์จากการเกิดโอเวอร์ โหลด หรือความร้อนเกินพิกัดซึ่งจะส่งผลต่ออายุการใช้งานของมอเตอร์ได้ ในวงจรภาคขับก็จะมีการป้องกันความเสียหายกับมอเตอร์ดังกล่าวโดยใช้โอเวอร์ โหลดทำงานด้วยความร้อน (Thermal Overload Relay) โอเวอร์ โหลดประกอบด้วยขดลวดความร้อน (Heater) พันอยู่บนแผ่นไบเมทัล (Bimetal) ซึ่งทำจากโลหะ 2 ชนิดเชื่อมติดกัน โกงตัวได้เมื่อเกิดความร้อนขึ้น ขดลวดความร้อนเป็นทางผ่านของกระแสจากแหล่งจ่ายไปยังมอเตอร์ เมื่อกระแสที่ไหลเข้ามอเตอร์มีค่าสูง ทำให้ชุด

ขดลวดความร้อนเกิดความร้อนสูงขึ้น เป็นผลให้แผ่นไบเมทัลลร้อน และโค้งตัวดันให้น้ำสัมผัสสปริงปิดของ โอเวอร์โหลตที่ต่ออนุกรมอยู่กับวงจรควบคุมเปิดวงจร ตัดกระแส ออกจากคอยล์แม่เหล็กของคอนแทกเตอร์ จึง ทำให้น้ำสัมผัสหลัก (Main Contact) ของคอนแทกเตอร์ปลดมอเตอร์ออกจากแหล่งจ่ายเป็นการป้องกันมอเตอร์ จากความเสียหายได้ ดังแสดงไว้ในภาพที่ 15

การออกแบบเพื่อใช้งานจริง เนื่องจากมอเตอร์ต่อเข้ากับเพลาขับและใบพัดคัตน้ำจะกระจายอยู่รอบๆ เพื่อป้องกันไฟฟ้าช็อตเกษตรกร การเชื่อมต่อระหว่างหน่วยควบคุมกลางกับวงจรภาคขับเคลื่อนมอเตอร์ (motor driver circuit) จะใช้ไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันต่ำสามารถต่อกับสายเคเบิลความยาวหลายร้อยเมตรได้

วงจรเพาเวอร์ซัพพลายทำหน้าที่เปลี่ยนแรงดันไฟฟ้าให้อยู่ในระดับที่ต้องการ โดยที่แรงดันไฟฟ้าแต่ละ จุดจะมีค่าที่แตกต่างกัน วงจรบริดจ์ (bridge) DB1 ทำหน้าที่เปลี่ยนไฟฟ้ากระแสสลับให้เป็นไฟฟ้ากระแสตรง หรืออาจสามารถต่อเข้ากับไฟฟ้ากระแสตรงได้โดยตรงจะทำหน้าที่ป้องกันการต่อไฟฟ้าสลับขั้วได้ จากนั้นจะ ผ่านตัวเก็บประจุเพื่อทำให้ไฟฟ้ามีความเรียบยิ่งขึ้นและป้องกันสัญญาณรบกวนจากความถี่สูงที่แทรกเข้ามา จากนั้นผ่านวงจรเลกดูเลเตอร์เพื่อควบคุมแรงดันให้คงที่ใช้ไอซีเบอร์ 7805 โดยแรงดันทางด้านเอาต์พุตของเลก ดูเลเตอร์จะเท่ากับ 5VDC จากนั้นต่อร่วมกับตัวเก็บประจุอีกครั้งเพื่อทำให้ไฟฟ้ามีกระแสเรียบมากยิ่งขึ้น แรงดันไฟฟ้าสำหรับไมโครคอนโทรลเลอร์เท่ากับ 3.3VDC โดยผ่านคอยล์ EMF ที่ตำแหน่ง AVDD ซึ่งจะเห็นว่า มีตัวเก็บประจุขนาด 0.1 $\mu$ F ต่ออยู่ ซึ่งตัวเก็บประจุขนาด 0.1 $\mu$ F นี้ในการออกแบบผ่านวงจรพิมพ์(PCB)จริง จะต้องอยู่ในตำแหน่งใกล้กับขา VDD ของไมโครคอนโทรลเลอร์มากที่สุด เพื่อป้องกันสัญญาณรบกวนเข้าไป รบกวนการทำงานของไมโครคอนโทรลเลอร์ทำให้การทำงานของไมโครคอนโทรลเลอร์เกิดการ ทำงานที่ ผิดพลาดได้

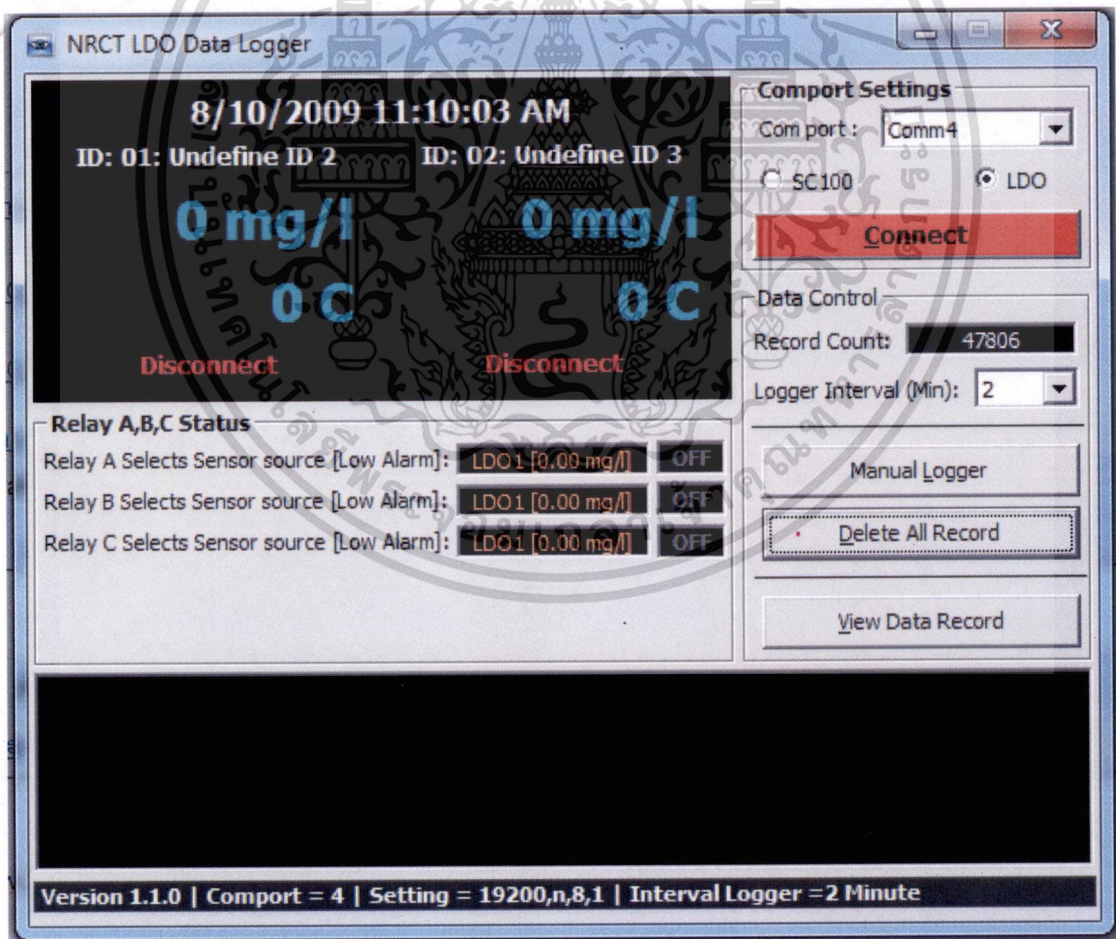


ภาพที่ 19 วงจรภาคเพาเวอร์ซัพพลาย (motor driver circuit)

## 2.4 โปรแกรมจัดเก็บปริมาณออกซิเจนแบบฐานข้อมูล

คณะผู้วิจัยได้พัฒนาโปรแกรม NRCT LDO Data logger ขึ้นเพื่อความสะดวกความสามารถในการเก็บผลการทดลองอย่างมีประสิทธิภาพดังจะสามารถแสดงหน้าจกรการทำงานของโปรแกรมได้ดังรูปที่ 19 โดยในการวิจัยหาค่าปริมาณออกซิเจนที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของกุ้งและกำหนดจุดการทำงานของเครื่องควบคุมควบคุมคุณภาพน้ำอัจฉริยะให้ประหยัดพลังงานมากที่สุด เริ่มต้นจากการกำหนดค่าตามทฤษฎี จากนั้นทำการทดลองและบันทึกปริมาณออกซิเจนทั้งแบบให้มีการควบคุมแบบอัตโนมัติและการควบคุมแบบ manual โดยปริมาณออกซิเจนของโปรแกรม NRCT LDO Data logger ที่ออกแบบนี้ สามารถอ่านได้ความละเอียดได้ถึง 1 นาที่ เพื่อเป็นข้อมูลดิบในการวิเคราะห์โดยละเอียดต่อไป ความสามารถของโปรแกรมนี้จะสามารถเก็บข้อมูลที่มีความถี่ 1 นาทีต่อค่า เป็นระยะเวลามากกว่าหนึ่งปี ซึ่งเพียงพอต่อการทำวิจัยในครั้งนี้

โปรแกรมสามารถบันทึกเวลา วัน เดือน ปี ได้อย่างละเอียด รวมทั้งการเปิดปิดการทำงานของมอเตอร์กักน้ำ โปรแกรมนี้ทำงานอยู่บนระบบปฏิบัติการของวินโดวส์ (Windows OS) ซึ่งเป็นระบบปฏิบัติการที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย



ภาพที่ 20 การทำงานของโปรแกรม NRCT LDO Data logger

## 2.5 ต้นทุนของเครื่องควบคุมคุณภาพน้ำอัจฉริยะ

เครื่องควบคุมคุณภาพน้ำอัจฉริยะ ประกอบด้วยส่วนที่สำคัญ ดังต่อไปนี้

1. อุปกรณ์ตรวจวัดออกซิเจน
2. วงจรควบคุมส่วนกลาง
3. ภาคขับมอเตอร์
4. โปรแกรมจัดเก็บข้อมูล
5. Module รับส่งข้อมูลสื่อสาร

ซึ่งเมื่อประเมินต้นทุนเครื่องควบคุมคุณภาพน้ำอัจฉริยะมีต้นทุนประมาณ 79,700 บาท รายละเอียดแสดงดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 แสดงต้นทุนของเครื่องควบคุมคุณภาพน้ำอัจฉริยะ

รายการ	จำนวน (หน่วย)	ราคา (บาท)
Oxygen sensor module	1	60,000
Mainboard controller	1	2,500
Power Supply	1	1,000
Motor Driver Circuit	4	4,000
Magnetic Switch 3 Ø	4	3,200
Over load circuit 3 Ø	4	2,000
Data transmission RS-485 Cable (ตาม ระยะทางโดยประมาณ)	4	2,000
RS-485 to RS-232 converter	1	1,000
LCD monitor	1	1,000
Keyboard	1	500
Siren	1	200
ตู้ Control	1	2,000
<b>รวมทั้งหมด</b>		<b>79,400</b>

### 3) การทดสอบระบบควบคุมคุณภาพน้ำอัจฉริยะต้นแบบในพื้นที่จริง (On-farm Implementation)

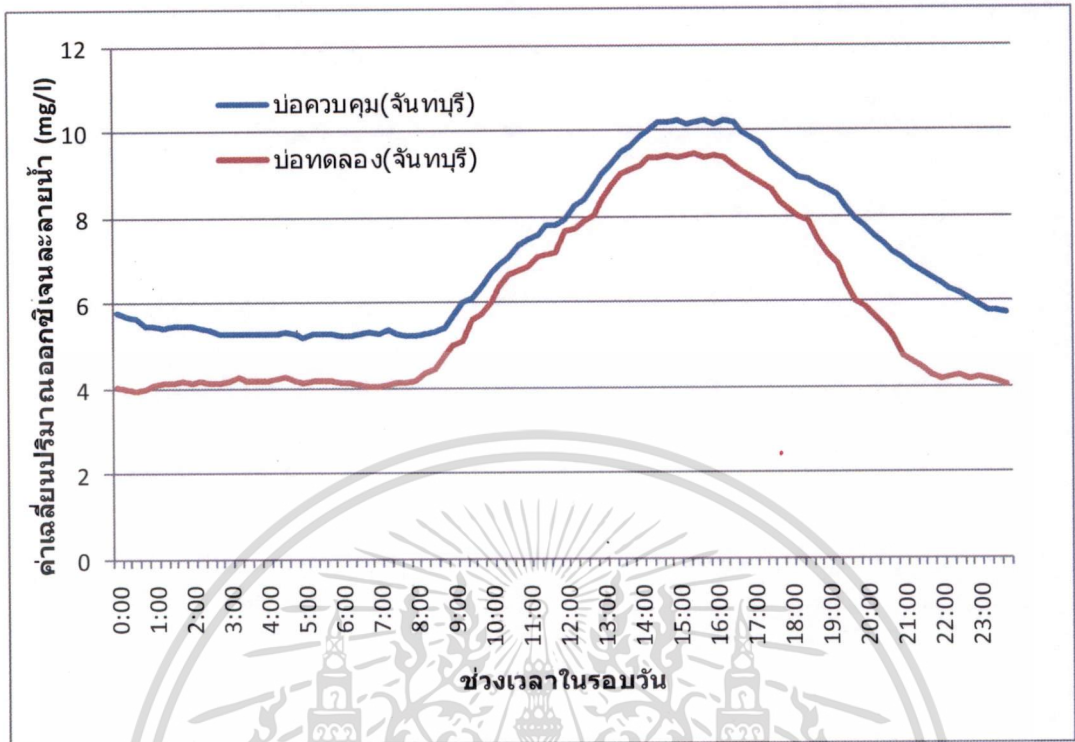
#### 3.1 จังหวัดจันทบุรี

##### 3.1.1 ข้อมูลด้านการเลี้ยงกุ้งกุลาดำ

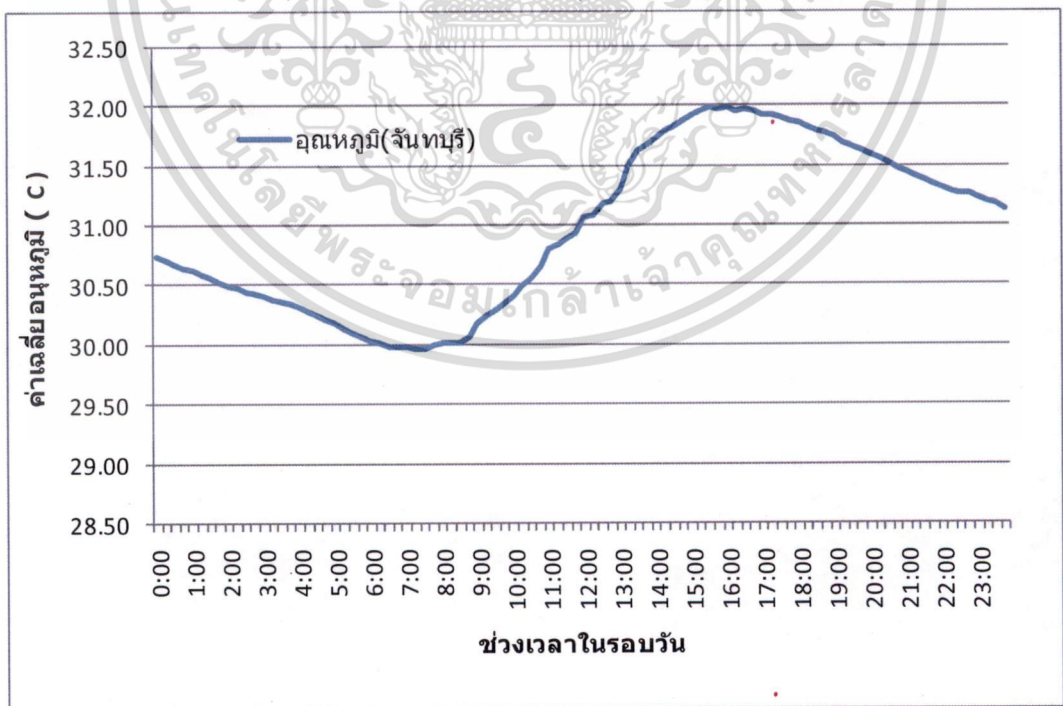
ทำการติดตั้งระบบควบคุมคุณภาพน้ำอัจฉริยะ ณ บ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำ ของนายดำรง เสนาะสรรพ โดยใช้ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำเป็นตัวกำหนดการเปิดปิดมอเตอร์เครื่องตีน้ำ



ภาพที่ 21 แสดงการติดตั้งเครื่องมือควบคุมคุณภาพน้ำอัจฉริยะ ณ บ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำ จังหวัดจันทบุรี



ภาพที่ 22 เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำระหว่างบ่อที่ติดตั้งเครื่องควบคุมคุณภาพน้ำ (บ่อดทดลอง) และบ่อที่ไม่ได้ติดตั้งเครื่องควบคุม (บ่อควบคุม) ณ จังหวัดจันทบุรี



ภาพที่ 23 ค่าเฉลี่ยอุณหภูมิของน้ำในรอบวันของบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำ ณ จังหวัดจันทบุรี

การเลี้ยงกุ้งกุลาดำของนายดำรง เสนาะสรรพ์ เกษตรกรผู้เพาะเลี้ยงกุ้งกุลาดำในพื้นที่โครงการพระราชดำริ อ่าว  
คุ้งกระเบน จังหวัดจันทบุรี ปล่อยุ้งกุลาดำ P15 เมื่อวันที่ 17 สิงหาคม 2552 ในการศึกษาครั้งนี้ได้แบ่งการวิจัย  
เป็นบ่อควบคุมและบ่อทดลอง ซึ่งบ่อควบคุมคือบ่อที่ไม่ได้ติดตั้งเครื่องควบคุมคุณภาพน้ำอัจฉริยะ ซึ่งการเปิดปิด  
เครื่องตีน้ำทำโดยเกษตรกรเอง บ่อมีขนาด 2 ไร่ ปล่อยุ้งกุลาดำที่อัตราการความหนาแน่น 25 ตัว/ตารางเมตร ส่วน  
บ่อทดลองเป็นบ่อที่ติดตั้งเครื่องควบคุมคุณภาพน้ำอัจฉริยะ โดยให้ปริมาณออกซิเจนเป็นตัวควบคุมการทำงานของ  
เครื่องตีน้ำ มีขนาด 2.9 ไร่ ปล่อยุ้งที่อัตราการความหนาแน่น 22 ตัว/ตารางเมตร โดยในแต่ละบ่อติดตั้งเครื่องตี  
น้ำจำนวน 4 จุด

### 3.1.2 คุณภาพน้ำ

จากการเก็บข้อมูลปริมาณออกซิเจนละลายน้ำเฉลี่ยในรอบวัน (ตลอดระยะเวลาการเลี้ยง 85 วัน) พบว่า  
ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำมีค่าเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 5.8 – 10.2 มิลลิกรัม/ลิตร และ 4.0 - 9.2 มิลลิกรัม/ลิตร ในบ่อ  
ควบคุมและบ่อทดลอง ตามลำดับ

จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าปริมาณออกซิเจนละลายน้ำมีค่าต่ำในช่วงเวลา 22.00 – 8.00 น. และ  
ปริมาณออกซิเจนจะมีค่าเพิ่มขึ้นตั้งแต่เวลาประมาณ 8.00 น.จนถึงเวลาประมาณ 14.00 น. และค่อย ๆ ลดต่ำลงอีก  
ครั้งหนึ่ง โดยในบ่อควบคุมมีปริมาณออกซิเจนละลายน้ำสูงกว่าในบ่อทดลองประมาณ 0.2-1.8 มิลลิกรัม/ลิตร  
ตลอดวัน (ภาพที่ 22) ส่วนอุณหภูมิเฉลี่ยตลอดระยะเวลาการเลี้ยงในรอบวันมีค่าระหว่าง 30-32 องศาเซลเซียส  
(ภาพที่ 23)

### 3.1.3 การเจริญเติบโต

เมื่อเลี้ยงกุ้งได้ 85 วัน กุ้งกุลาดำเป็นโรคตัวแดงดวงขาว จำเป็นต้องจับกุ้งทั้งหมด โดยมีรายละเอียด  
ผลผลิต ดังนี้ บ่อควบคุมให้ผลผลิต 400 กิโลกรัม/ไร่ ขนาดกุ้ง 91 ตัว/กิโลกรัม อัตราการเจริญเติบโตเฉลี่ยต่อวัน  
เท่ากับ 0.13 อัตรารอด 91% และอัตราแลกเนื้อ 1.62 ส่วนบ่อทดลองให้ผลผลิต 304 กิโลกรัม/ไร่ ขนาดกุ้ง 72  
ตัว/กิโลกรัม อัตราการเจริญเติบโตเฉลี่ยต่อวันเท่ากับ 0.16 อัตรารอด 61.2% และอัตราแลกเนื้อ 1.18 รายละเอียด  
แสดงดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 แสดงรายละเอียดการเลี้ยงกุ้งกุลาดำ ของนายดำรง เสนาะสรรพ์ จังหวัดจันทบุรี

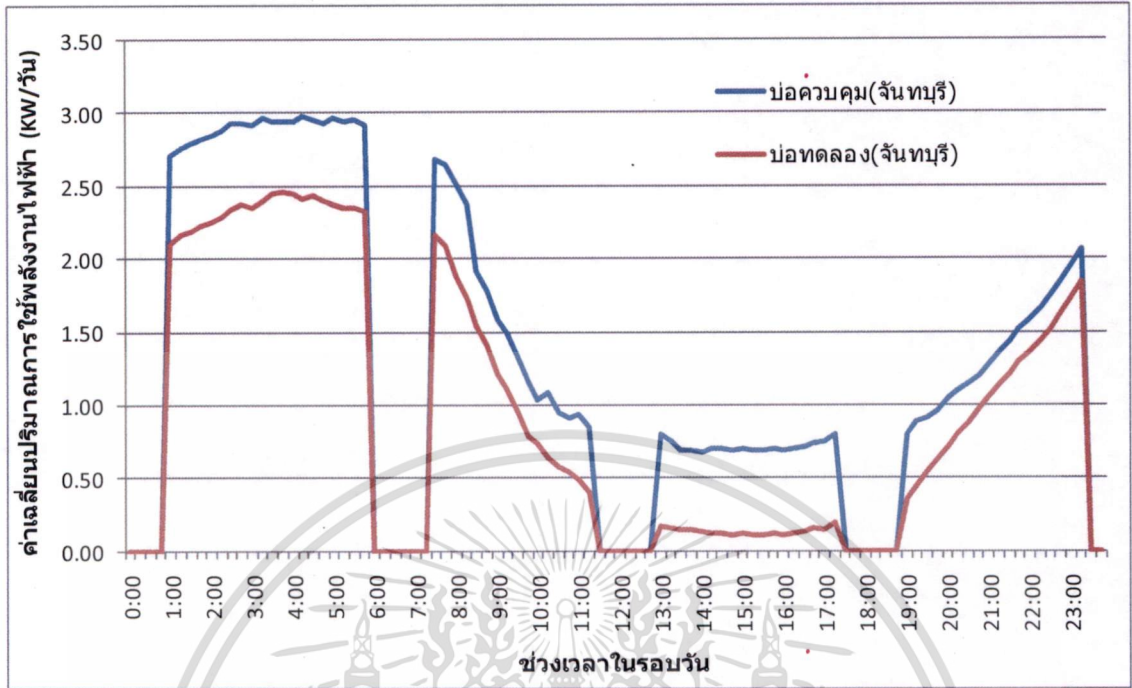
รายการ	บ่อควบคุม	บ่อทดลอง
ขนาดบ่อ (ไร่)	2	2.9
ความหนาแน่น (ตัว/ตารางเมตร)	25	22
จำนวนกุ้งที่ปล่อย (ตัว)	80,000	104,000
วันที่ลงกุ้ง	17 สิงหาคม 2552	17 สิงหาคม 2552
วันที่จับกุ้ง	9 พฤศจิกายน 2552	9 พฤศจิกายน 2552
ระยะเวลาการเลี้ยง (วัน)	85	85
ปริมาณกุ้งที่จับ (กิโลกรัม)	800	884.3
ผลผลิต (กิโลกรัม/ไร่)	400	304.9
ขนาดกุ้งที่จับ (ตัว/กิโลกรัม)	91	72
อัตราการเจริญเติบโต: ADG (กรัม/ตัว/วัน)	0.13	0.16
อัตราการแลกเนื้อ FCR	1.62	1.18
อัตราการรอด (%)	91.0	61.2

หมายเหตุ : กุ้งกุลาดำเป็นโรคตัวแดงดวงขาว จึงจำเป็นต้องจับกุ้งในวันที่ 9 พฤศจิกายน 2552

3.1.4 ปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้า

จากการเก็บข้อมูลปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าเฉลี่ยในรอบวัน (ตลอดระยะเวลาการเลี้ยง 85 วัน) พบว่า ปริมาณการใช้ไฟฟ้ามีค่าเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 0 – 3.0 กิโลวัตต์ และ 0 – 2.5 กิโลวัตต์ ในบ่อควบคุมและบ่อทดลอง ตามลำดับ โดยในบ่อทดลองมีค่าต่ำกว่าบ่อควบคุมประมาณ 0.5 กิโลวัตต์ ในช่วงเวลา 23.30 – 00.30 น. 6.30 – 7.30 น. 11.30 – 12.30 น. และ 17.30 – 18.30 น. เกษตรกรปิดเครื่องตีน้ำเพื่อให้อาหารกุ้ง ปริมาณไฟฟ้าจึงลดต่ำ เป็นศูนย์ (ภาพที่ 24)

เมื่อประเมินปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าทั้งหมด พบว่าในบ่อควบคุมมีการใช้ 2,616.81 ยูนิท ส่วนในบ่อทดลองมีค่า 1,846.67 ยูนิท ซึ่งประหยัดได้ 770.13 ยูนิท คิดเป็น 29.43% รายละเอียดแสดงดังตารางที่ 5



ภาพที่ 24 เปรียบเทียบปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าต่อวันระหว่างบ่อที่ติดตั้งเครื่องควบคุมคุณภาพน้ำ และบ่อที่ไม่ได้ติดตั้งเครื่องควบคุม ณ จังหวัดจันทบุรี

ตารางที่ 5 แสดงปริมาณการใช้ไฟฟ้าในการเลี้ยงกุ้งกุลาดำของนายดำรง เสนาะสรรพ

ลำดับ	รายการ	ผลการทดลอง ณ จันทบุรี จำนวน 85 วัน	
		บ่อควบคุม	บ่อทดลอง
1.	พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ทั้งหมด (ยูนิต)	2,616.81	1,846.67
2.	ค่าไฟฟ้าที่ใช้(บาท)	11,776	8,310
3.	พลังงานที่ประหยัด (ยูนิต)		770.13
4.	พลังงานที่ประหยัด (%)		29.43

### 3.2 จังหวัดสมุทรสงคราม

#### 3.2.1 ข้อมูลด้านการเลี้ยงกุ้งขาว

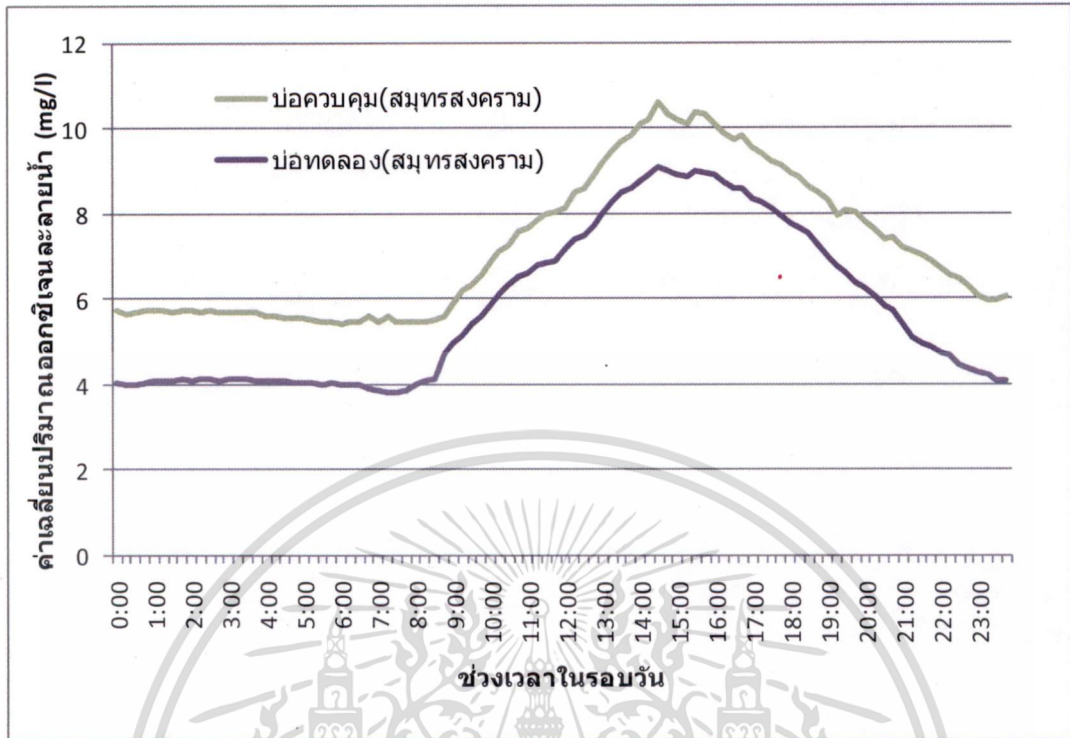
ทำการติดตั้งระบบควบคุมคุณภาพน้ำอัจฉริยะ ณ บ่อเลี้ยงกุ้งขาว ของศูนย์วิจัยและพัฒนาการเพาะเลี้ยงกุ้งทะเล จังหวัดสมุทรสงคราม โดยใช้ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำเป็นตัวกำหนดการเปิดปิดมอเตอร์เครื่องตีน้ำ โดยเริ่มทำการติดตั้งเครื่องควบคุมคุณภาพน้ำอัจฉริยะ เมื่อวันที่ 16 พฤศจิกายน 2552 ซึ่งกุ้งขาวมีอายุประมาณ 1 เดือน (การเลี้ยงกุ้งขาวของศูนย์วิจัยและพัฒนาการเพาะเลี้ยงกุ้งทะเล จังหวัดสมุทรสงคราม ปล่อยุ้งขาว P15 เมื่อวันที่ 16 ตุลาคม 2552) โดยแบ่งการวิจัยเป็นบ่อควบคุมและบ่อทดลอง ซึ่งบ่อควบคุมคือบ่อที่ไม่ได้ติดตั้งเครื่องควบคุมคุณภาพน้ำอัจฉริยะ ซึ่งการเปิดปิดเครื่องตีน้ำทำโดยเจ้าหน้าที่ผู้ดูแลบ่อ บ่อมีขนาด 1 ไร่ ปล่อยุ้งขาวที่อัตราการความหนาแน่น 46 ตัว/ตารางเมตร ส่วนบ่อทดลองเป็นบ่อที่ติดตั้งเครื่องควบคุมคุณภาพน้ำอัจฉริยะ โดยใช้ปริมาณออกซิเจนเป็นตัวควบคุมการทำงานของเครื่องตีน้ำ มีขนาด 1 ไร่ ปล่อยุ้งขาวที่อัตราการความหนาแน่น 46 ตัว/ตารางเมตร

#### 3.2.2 คุณภาพน้ำ

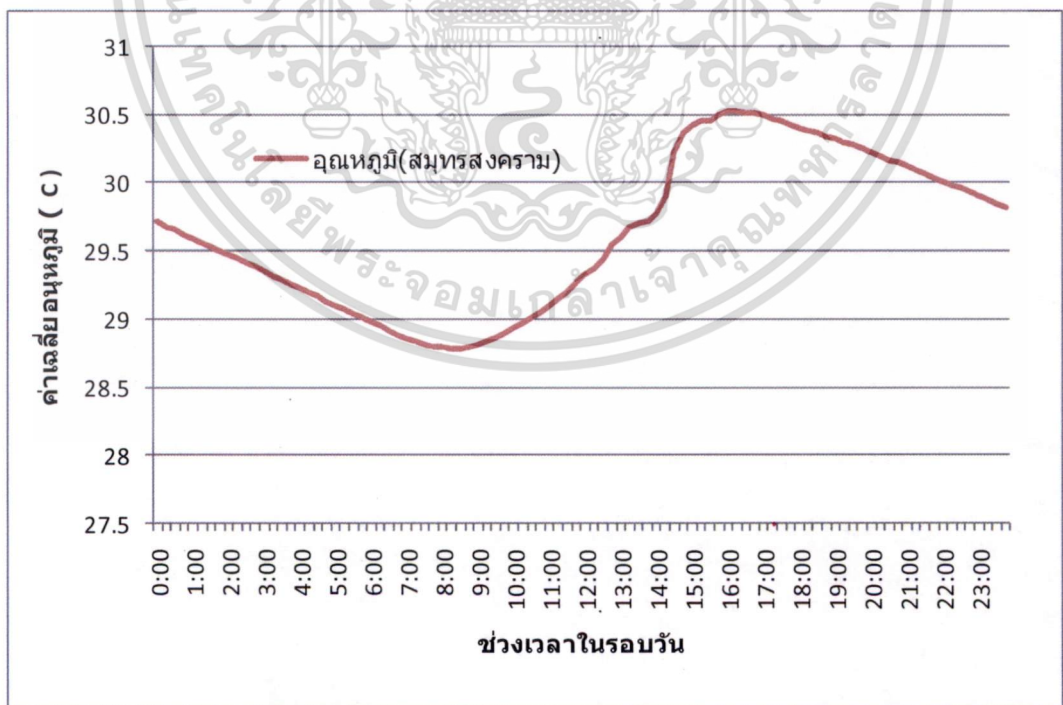
จากการเก็บข้อมูลปริมาณออกซิเจนละลายน้ำเฉลี่ยในรอบวัน พบว่าปริมาณออกซิเจนละลายน้ำมีค่าเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 5.8 – 10.2 มิลลิกรัม/ลิตร และ 4.0 - 9.0 มิลลิกรัม/ลิตร ในบ่อควบคุมและบ่อทดลอง ตามลำดับ นอกจากนี้ยังพบว่าปริมาณออกซิเจนละลายน้ำมีค่าต่ำในช่วงเวลา 22.00 – 8.00 น. และปริมาณออกซิเจนจะมีค่าเพิ่มขึ้นตั้งแต่เวลาประมาณ 8.00 น.จนถึงเวลาประมาณ 14.00 น. และค่อย ๆ ลดต่ำลงอีกครั้งหนึ่ง โดยในบ่อควบคุมมีปริมาณออกซิเจนละลายน้ำสูงกว่าในบ่อทดลองประมาณ 0.8-1.8 มิลลิกรัม/ลิตร ตลอดวัน (ภาพที่ 25) ส่วนอุณหภูมิเฉลี่ยตลอดระยะเวลาการเลี้ยงในรอบวันมีค่าระหว่าง 28.7-30.6 องศาเซลเซียส (ภาพที่ 26)

#### 3.2.3 การเจริญเติบโต

เมื่อเลี้ยงกุ้งได้ 76 วัน กุ้งขาวเป็นโรคตัวแดงดวงขาว จำเป็นต้องจับกุ้งทั้งหมด โดยมีรายละเอียดผลผลิตดังนี้ บ่อควบคุมให้ผลผลิต 691.9 กิโลกรัม/ไร่ ขนาดกุ้ง 102 ตัว/กิโลกรัม อัตราการเจริญเติบโตเฉลี่ยต่อวันเท่ากับ 0.13 อัตรารอด 94.10% และอัตราแลกเนื้อ 1.23 ส่วนบ่อทดลองให้ผลผลิต 651.8 กิโลกรัม/ไร่ ขนาดกุ้ง 108 ตัว/กิโลกรัม อัตราการเจริญเติบโตเฉลี่ยต่อวันเท่ากับ 0.12 อัตรารอด 93.86% และอัตราแลกเนื้อ 1.28 รายละเอียดแสดงดังตารางที่ 6



ภาพที่ 25 เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำระหว่างบ่อที่ติดตั้งเครื่องควบคุมคุณภาพน้ำ และบ่อที่ไม่ได้ติดตั้งเครื่องควบคุม ณ จังหวัดสมุทรสงคราม



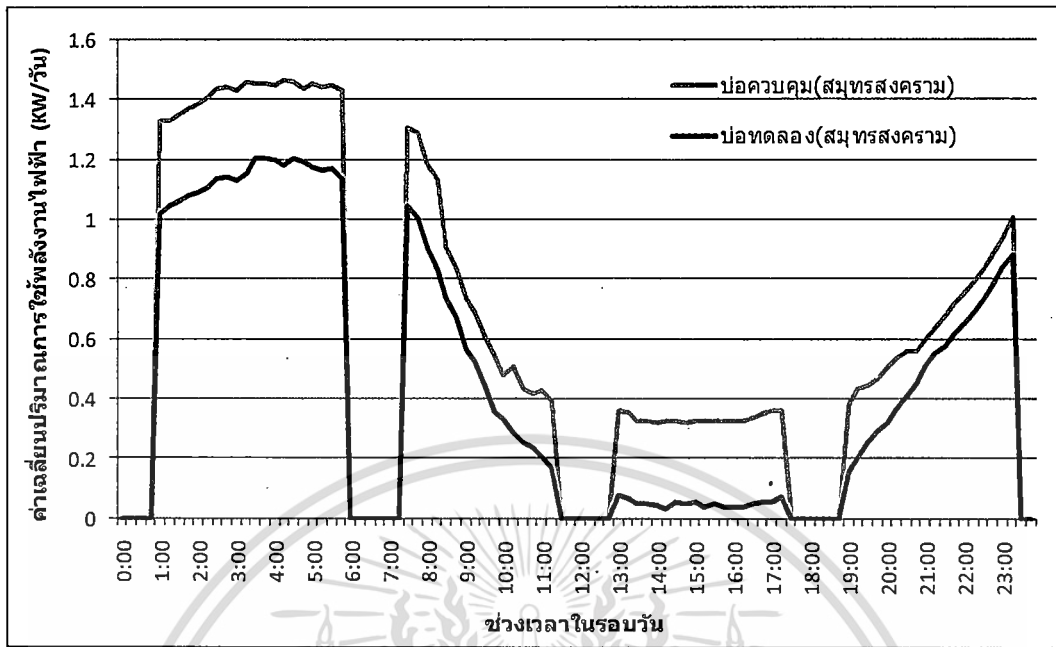
ภาพที่ 26 ค่าเฉลี่ยอุณหภูมิของน้ำในรอบวันของบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำในจังหวัดสมุทรสงคราม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 6 แสดงรายละเอียดการเลี้ยงกุ้งขาว ของศูนย์วิจัยและพัฒนาการเพาะเลี้ยงกุ้งทะเล  
จังหวัดสมุทรสงคราม,

รายการ	บ่อควบคุม	บ่อทดลอง
ขนาดบ่อ (ไร่)	1	1
ความหนาแน่น (ตัว/ตารางเมตร)	46	46
จำนวนกุ้งที่ปล่อย (ตัว)	75,000	75,000
วันที่ลงกุ้ง	16 ตุลาคม 2552	16 ตุลาคม 2552
วันที่จับกุ้ง	30 ธันวาคม 2552	30 ธันวาคม 2552
ระยะเวลาการเลี้ยง (วัน)	76	76
ปริมาณกุ้งที่จับ (กิโลกรัม)	691.9	651.8
ผลผลิต (กิโลกรัม/ไร่)	691.9	651.8
ขนาดกุ้งที่จับ (ตัว/กิโลกรัม)	102	108
อัตราการเจริญเติบโต: ADG (กรัม/ตัว/วัน)	0.13	0.12
อัตราการแลกเนื้อ FCR	1.23	1.28
อัตราการรอด (%)	94.10	93.86

หมายเหตุ : กุ้งขาวเป็นโรคตัวแดงดวงขาว จึงจำเป็นต้องจับกุ้งในวันที่ 30 ธันวาคม 2552



ภาพที่ 27 เปรียบเทียบปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าต่อวันระหว่างบ่อที่ติดตั้งเครื่องควบคุมคุณภาพน้ำ และบ่อที่ไม่ได้ติดตั้งเครื่องควบคุม ณ จังหวัดสมุทรสงคราม

ตารางที่ 7 แสดงปริมาณการใช้ไฟฟ้าในการเลี้ยงกุ้งกุลาดำของนายดำรง เสนาะสรรพ

ลำดับ	รายการ	ผลการทดลอง ณ สมุทรสงคราม จำนวน 45 วัน	
		บ่อควบคุม	บ่อทดลอง
1.	พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ทั้งหมด (ยูนิต)	1,234	883
2.	ค่าไฟฟ้าที่ใช้(บาท)	4,964	3,551
3.	พลังงานที่ประหยัด (ยูนิต)		351
4.	พลังงานที่ประหยัด (%)		28.46

### 3.1.4 ปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้า

จากการเก็บข้อมูลปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าเฉลี่ยในรอบวัน พบว่าปริมาณการใช้ไฟฟ้ามีค่าเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 0 – 1.5 กิโลวัตต์ และ 0 – 1.2 กิโลวัตต์ ในบ่อควบคุมและบ่อทดลอง ตามลำดับ โดยในบ่อทดลองมีค่าต่ำกว่าบ่อควบคุมประมาณ 0.3 กิโลวัตต์ ส่วนในช่วงเวลา 23.30 – 00.30 น. 6.30 – 7.30 น. 11.30 – 12.30 น. และ 17.30 – 18.30 น. เกษตรกรปิดเครื่องตีน้ำเพื่อให้อาหารกุ้ง ปริมาณไฟฟ้าจึงลดต่ำเป็นศูนย์ (ภาพที่ 27)

เมื่อประเมินปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าทั้งหมด พบว่าในบ่อควบคุมมีการใช้ 1,234 หน่วย ส่วนในบ่อทดลองมีค่า 883 หน่วย ซึ่งประหยัดได้ 351 หน่วย คิดเป็น 28.46% รายละเอียดแสดงดังตารางที่ 7



## วิจารณ์ผลการศึกษา

### 1) สำรองและคัดเลือกพื้นที่ที่จะดำเนินการวิจัยในภาคสนาม

ทางผู้วิจัยได้คัดเลือกบ่อของเกษตรกรผู้เลี้ยงกุ้งกุลาดำ คือนายดำรง เสนาะสรรพ์ ประธานกลุ่มผู้ผลิตกุ้งกุลาดำอินทรีย์กุ้งกระเบน ซึ่งเป็นเกษตรกรผู้เลี้ยงกุ้งในโครงการพระราชดำริอ่าวกุ้งกระเบน จังหวัดจันทบุรี เกษตรกรผู้เลี้ยงกุ้งกุลาดำรายนี้เป็นเกษตรกรรายย่อยในโครงการพระราชดำริอ่าวกุ้งกระเบน จังหวัดจันทบุรี ซึ่งได้รับการจัดสรรที่ดินให้ทำกินแบบพอเพียง อีกทั้งยังเป็นผู้นำกลุ่มเกษตรกรรายย่อย ซึ่งได้ดำเนินการเลี้ยงกุ้งกุลาดำมากกว่า 20 ปี มีบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำขนาด 2.9 ไร่ จำนวน 1 บ่อ และบ่อขนาด 2 ไร่จำนวน 1 บ่อ โดยแบ่งเป็นบ่อควบคุม 1 บ่อ (Control) และบ่อทดลอง 1 บ่อ (Treatment)

นอกจากนี้ทางผู้วิจัยยังได้มีการปรับแผนการวิจัยโดยทำการศึกษาเพิ่มเติมในบ่อเลี้ยงกุ้งขาวของศูนย์วิจัยและพัฒนาการเพาะเลี้ยงกุ้งทะเล จังหวัดสมุทรสงครามอีกด้วย

### 2) การพัฒนาระบบควบคุมคุณภาพน้ำอัจฉริยะ (Machine Development)

การใช้งานสำหรับเครื่องควบคุมคุณภาพน้ำอัจฉริยะในการเลี้ยงกุ้งเริ่มต้นมีปัญหาในเรื่องของความเชื่อมั่น เนื่องจากในเลี้ยงกุ้งแต่ละครั้งจำเป็นต้องมีเงินลงทุนหลักแสนบาทขึ้นไป ดังนั้นในการออกแบบจำเป็นต้องออกแบบให้ผู้เลี้ยงกุ้งสามารถแก้ปัญหาในเบื้องต้น และต้องมีการสร้างความเข้าใจการทำงานของเครื่องอย่างละเอียดก่อนใช้งานจริง ซึ่งในการออกแบบจำเป็นต้องมีสวิตช์ที่สามารถตัดการทำงานของเครื่องควบคุมคุณภาพน้ำอัจฉริยะทั้งระบบออกจากการควบคุมของมอเตอร์เครื่องตีน้ำในกรณีที่เครื่องเสีย หรือทำงานผิดพลาดให้สามารถทำงานแบบ manual เช่นเดิมที่ใช้งานปกติ หลังจากนั้นแจ้งทางเทคนิคเพื่อทำการตรวจสอบและแก้ไขต่อไป เพราะในการเลี้ยงกุ้ง โดยทั่วไปจะต้องมีเครื่องตีน้ำในเวลากลางคืนอย่างน้อย 1-2 ตัวทำงานอยู่หรือมากกว่านั้นในกรณีที่กุ้งมีระยะเวลาการเลี้ยงเพิ่มขึ้น

การทำงานของเครื่องควบคุมคุณภาพน้ำอัจฉริยะออกแบบให้สามารถควบคุมการปิด-เปิดมอเตอร์เครื่องตีน้ำแบบ (On-Off) เนื่องจากอุปกรณ์ควบคุมมีราคาสูง สามารถหาซื้อได้ง่ายตามท้องตลาด ความเร็วของใบพัดตีน้ำจะถูกกำหนดความถี่ที่เหมาะสมไว้เพื่อให้เกิดประสิทธิภาพในการเพิ่มออกซิเจนในน้ำให้ได้มากที่สุด กล่าวคือถ้าเร็วเกินไปก็จะสิ้นเปลืองพลังงานหากช้าเกินไปก็เพิ่มออกซิเจนได้ไม่ดี นอกจากนั้นยังสามารถนำอุปกรณ์ควบคุมมอเตอร์ของเดิมที่เกษตรกรมีอยู่มาปรับใช้งานได้ จึงเป็นการลดต้นทุนการติดตั้งระบบควบคุมคุณภาพน้ำอัจฉริยะได้อีกทางหนึ่งด้วย จากการศึกษาในบ่อกุ้งที่ใช้ในการทดลองพบว่าเมื่อเปิดเครื่องตีน้ำแล้วในกรณีปกติออกซิเจนละลายน้ำจะใช้เวลาประมาณ 15-20 นาที จึงอิ่มตัว โดยจะมีมอเตอร์เครื่องตีน้ำเครื่องหนึ่งจะทำหน้าที่ในการตีน้ำทุก

1 ชั่วโมง เป็นเวลา 15 นาที เพื่อทำหน้าที่ป้องกันการแยกตัวของชั้นน้ำในบ่อเลี้ยงกุ้ง ส่วนการควบคุมแบบอัตโนมัตินั้นเครื่องควบคุมคุณภาพน้ำอัจฉริยะจะทำการเปิดมอเตอร์กักกันตื้นน้ำที่เหลืออีกสามตัวเมื่อออกซิเจนต่ำกว่าระดับซึ่งกำหนดไว้คือ 5, 4.5 และ 4 มิลลิกรัม/ลิตร โดยเครื่องจะเปิดมอเตอร์เครื่องตื้นน้ำจำนวน 1, 2 และ 3 ตัวตามลำดับ เครื่องควบคุมคุณภาพน้ำอัจฉริยะจะเปิดมอเตอร์เครื่องตื้นน้ำเป็นเวลา 15 นาที จากนั้นจึงจะตรวจสอบระดับออกซิเจนละลายน้ำอีกครั้ง หากปริมาณออกซิเจนต่ำกว่าระดับที่กำหนดไว้ เครื่องควบคุมคุณภาพน้ำอัจฉริยะจะทำการเปิดมอเตอร์เครื่องตื้นน้ำต่อไป ในการเปิด-ปิดมอเตอร์เป็นระยะเวลา 15 นาที เพื่อไม่ให้มีการเปิด-ปิด มอเตอร์บ่อยเกินไปซึ่งจะทำให้อุปกรณ์ควบคุมมอเตอร์และมอเตอร์เสื่อมสภาพเร็ว นอกจากนี้ยังเป็นการสิ้นเปลืองพลังงานเนื่องจากพลังงานที่ให้มอเตอร์หมุนเริ่มต้นจะต้องใช้มากกว่าในสถานะที่มอเตอร์ทำงานปกติ การวัดปริมาณออกซิเจนเครื่องจะอ่านค่าปริมาณออกซิเจน ทุก 15 วินาที จำนวน 4 ค่าโดยหาค่าเฉลี่ยเพื่อใช้ในการตัดสินใจว่าปริมาณออกซิเจนที่ละลายอยู่ในน้ำต่ำกว่าเกณฑ์ซึ่งกำหนดไว้หรือไม่ เพื่อให้แน่ใจว่าปริมาณออกซิเจนนั้นลดต่ำกว่าเกณฑ์ที่กำหนดไว้จริง

ในโครงการวิจัยฯ พบว่าระบบควบคุมคุณภาพน้ำอัจฉริยะมีหัวใจการทำงานของเครื่อง คือ เซ็นเซอร์ตรวจวัดการละลายออกซิเจน (DO sensor) ทางคณะผู้วิจัยได้ศึกษาและเปรียบเทียบข้อดีข้อด้อยของเซ็นเซอร์ตรวจวัดการละลายออกซิเจนในน้ำจืดนำไปสู่การเลือกใช้ออปติคัลดีโอเซ็นเซอร์ (Optical DO sensor) ซึ่งสามารถใช้งานได้ดีในการเลี้ยงกุ้งทะเลจริง เนื่องจากมีหลักการสะท้อนของแสงเพื่อใช้วัดปริมาณออกซิเจนที่อยู่ในน้ำ ซึ่งแตกต่างจากเซ็นเซอร์ตรวจวัดการละลายออกซิเจนที่ใช้เมมเบรน ซึ่งจำเป็นจะต้องเปลี่ยนสารละลายทุกๆ 3 เดือน ซึ่งค่อนข้างยุ่งยากและมีค่าใช้จ่ายสูงกว่าในระยะยาว แต่ข้อเสียของ Optical sensor คือมีราคาค่อนข้างแพง

เครื่องควบคุมคุณภาพน้ำอัจฉริยะนี้สามารถใช้กับกักตื้นน้ำที่มีเครื่องยนต์เป็นต้นกำลังได้ โดยการเปลี่ยนแปลงชนิดโหมคการทำงานในส่วนของส่วนควบคุมเป็นแบบเครื่องยนต์แทนการใช้แบบมอเตอร์ซึ่งจะเป็นการเปลี่ยนแปลงทางซอฟต์แวร์ภายในเพื่อเปิด-ปิดกักตื้นน้ำแบบเครื่องยนต์ได้ โดยเครื่องยนต์จำเป็นต้องเป็นรุ่นที่สามารถสตาร์ทได้ด้วยไฟฟ้า

### 3) การทดสอบระบบควบคุมคุณภาพน้ำอัจฉริยะต้นแบบในพื้นที่จริง (On-farm

#### Implementation)

การเลี้ยงกุ้งกุลาดำของนายดำรง เสนาะสรรพ์ เกษตรกรผู้เพาะเลี้ยงกุ้งกุลาดำในพื้นที่โครงการพระราชดำริ อ่าวคุ้งกระเบน จังหวัดจันทบุรี ปล่อยกุ้งกุลาดำ P15 เมื่อวันที่ 17 สิงหาคม 2552 โดยแบ่งการวิจัยเป็นบ่อควบคุมและบ่อทดลอง ซึ่งบ่อควบคุมคือบ่อที่ไม่ได้ติดตั้งเครื่องควบคุมคุณภาพน้ำอัจฉริยะ โดยการเปิดปิดเครื่องตื้นน้ำทำโดยเกษตรกรเอง บ่อมีขนาด 2 ไร่ ปล่อยกุ้งกุลาดำที่อัตราการความ

หนาแน่น 25ตัว/ตารางเมตร ส่วนบ่อทดลองเป็นบ่อที่ติดตั้งเครื่องควบคุมคุณภาพน้ำอัจฉริยะ โดยใช้ปริมาณออกซิเจนเป็นตัวควบคุมการทำงานของเครื่องตีน้ำ มีขนาด 2.9 ไร่ ปล่อยกุ้งที่อัตราความหนาแน่น 22 ตัว/ตารางเมตร ทั้งนี้อัตราความหนาแน่นของกุ้งในบ่อควบคุมและบ่อทดลองไม่เท่ากัน เนื่องจากเป็นการวิจัยร่วมกับเกษตรกร ซึ่งการกำหนดความหนาแน่นของกุ้งที่ปล่อยขึ้นอยู่กับเกษตรกรผู้เพาะเลี้ยงกุ้งทะเล และจำนวนลูกพันธุ์ที่เกษตรกรซื้อมา นอกจากนี้ในการศึกษาครั้งนี้ดำเนินการทดสอบในภาคสนามช่วงเดือนสิงหาคม-ธันวาคม 2552 เนื่องจากในช่วงเมษายน 2552 เกิดโรคระบาด เกษตรกรจึงเลื่อนการลงกุ้งมาในเดือนสิงหาคม 2552 อนึ่ง การเลี้ยงกุ้งทะเลเป็นอาชีพที่มีการลงทุนและความเสี่ยงค่อนข้างสูง ดังนั้นหากทำการศึกษารอบทุกช่วงฤดูกาลจำเป็นต้องใช้งบประมาณสูงขึ้นด้วย

จากผลการศึกษาสามารถสังเกตได้ว่าบ่อควบคุมจะมีค่าปริมาณออกซิเจนละลายน้ำเฉลี่ยในรอบวันสูงกว่าค่าที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของกุ้ง เนื่องจากเกษตรกรไม่สามารถทราบปริมาณออกซิเจนที่แท้จริงภายในบ่อระหว่างการเลี้ยง จึงเปิดเครื่องตีน้ำมากเกินไปจนความต้องการส่งผลให้สิ้นเปลืองพลังงานโดยไม่จำเป็น แตกต่างจากบ่อทดลองที่มีการติดตั้งเครื่องควบคุมคุณภาพน้ำอัจฉริยะมีการควบคุมปริมาณออกซิเจนอัตโนมัติ โดยจะรักษาระดับปริมาณออกซิเจนที่ต้องการสำหรับการเจริญเติบโตของกุ้งโดยในเครื่องควบคุมจะกำหนดปริมาณออกซิเจนไว้ที่ 4 มิลลิกรัม/ลิตร ในระยะทำการทดสอบพบว่าบางครั้งปริมาณออกซิเจนมีโอกาสต่ำกว่าระดับที่เครื่องควบคุมคุณภาพน้ำจะสามารถควบคุมได้ อาจเกิดจากหลายสาเหตุเช่น วันที่มีฝนตกและสภาพอากาศแบบปิด เป็นต้น

นอกจากนี้ยังพบว่าปริมาณออกซิเจนละลายน้ำมีค่าต่ำในช่วงเวลา 22.00 - 8.00 น. ดังนั้นในการเลี้ยงกุ้งโดยทั่วไปแล้วเกษตรกรโดยทั่วไปจำเป็นต้องมีการเฝ้าดูกุ้งในเวลากลางคืน ซึ่งยากต่อการทำงาน และปริมาณออกซิเจนจะมีค่าเพิ่มขึ้นตั้งแต่เวลาประมาณ 8.00 น.จนถึงเวลาประมาณ 14.00 น. และค่อย ๆ ลดต่ำลงอีกครั้งหนึ่ง โดยในบ่อควบคุมมีปริมาณออกซิเจนละลายน้ำสูงกว่าในบ่อทดลองประมาณ 1-2 มก/ล. ตลอดวัน เนื่องจากเกษตรกรเปิดเครื่องตีน้ำโดยอาศัยประสบการณ์และจากการสังเกตควบคุมกัน จึงทำให้เกษตรกรเปิดเครื่องตีน้ำเกินความจำเป็นในการเลี้ยงกุ้ง โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อกุ้งโตขึ้น โดยทั่วไปเกษตรกรจะเปิดเครื่องตีน้ำทุกเครื่อง ตลอดทั้งกลางวันและกลางคืน ส่งผลให้มีการใช้พลังงานมากเกินไป

ทางด้านประสิทธิภาพของเครื่องควบคุมคุณภาพน้ำอัจฉริยะสามารถประหยัดพลังงานได้ดีจากการทดลองสามารถลดพลังงานได้ประมาณ 30 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของเครือเจริญโภคภัณฑ์ (2550) พบว่าเทคโนโลยีการควบคุมเครื่องให้อากาศอัตโนมัติสามารถลดปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าจากการให้อากาศที่เกินความจำเป็นได้ประมาณ 29% การลดปริมาณการใช้พลังงานใน

เครื่องดีน้ำอาจขึ้นอยู่กับการบริหารจัดการในบ่อเลี้ยงกุ้งด้วย เช่น ความหนาแน่นในการเลี้ยงกุ้งที่เหมาะสม ปริมาณการให้อาหารในแต่ละวันว่าสอดคล้องกับการกินอาหารของกุ้งหรือไม่ สภาพแวดล้อมธรรมชาติ เช่น ฤดูกาล พบว่าในช่วงอุณหภูมิต่ำ ส่งผลให้กุ้งอ่อนแอ และเกิดโรคได้ง่าย (ชลอ, 2543) ซึ่งจากการวิจัยเป็นช่วงซึ่งใกล้ฤดูหนาว อุณหภูมิต่ำส่งผลให้กุ้งเป็นโรคตัวแดงดวงขาวอีกทั้งระยะเวลาในตอนกลางวันของฤดูหนาวน้อยกว่าในฤดูร้อน ส่งผลต่อแพลงก์ตอนในการสังเคราะห์แสงเพื่อเพิ่มปริมาณออกซิเจนในเวลากลางวัน



## สรุปผลการศึกษา

1. ทางผู้วิจัยได้คัดเลือกบ่อของเกษตรกรผู้เลี้ยงกุ้งกุลาดำ ของนายดำรง เสนาะสรรพ์ ประธานกลุ่มผู้ผลิตกุ้งกุลาดำอินทรีย์กุ้งกระเบน ซึ่งเป็นเกษตรกรผู้เลี้ยงกุ้งในโครงการพระราชดำริอ่าวกุ้งกระเบน จังหวัดจันทบุรี โดยแบ่งเป็นบ่อควบคุม 1 บ่อ (Control) และบ่อทดลอง 1 บ่อ (Treatment)

1.1) บ่อควบคุม เป็นบ่อเลี้ยงกุ้งที่มีการเปิดเครื่องตีน้ำตามปกติโดยเกษตรกร เป็นบ่อขนาด 2 ไร่ จำนวน 1 บ่อ ปล่อยกุ้งในอัตรา 25 ตัว/ตารางเมตร

1.2) บ่อทดลอง เป็นบ่อเลี้ยงกุ้งที่ใช้เครื่องควบคุมคุณภาพน้ำอัจฉริยะ ทำการเปิด - ปิด เครื่องตีน้ำโดยอัตโนมัติ ขนาด 2.9 ไร่ จำนวน 1 บ่อ ปล่อยกุ้งในอัตรา 22 ตัว/ตารางเมตร

## 2. การออกแบบเครื่องควบคุมคุณภาพน้ำอัจฉริยะ

โครงสร้างและการออกแบบระบบควบคุมคุณภาพน้ำอัจฉริยะ สามารถแยกในส่วนวงจร ออกเป็น 4 ส่วน คือ

2.1 วงจรเซ็นเซอร์ ทำหน้าที่ตรวจจับค่าออกซิเจนที่ละลายอยู่ในน้ำและอุณหภูมิของน้ำ จากนั้นก็จะส่งให้หน่วยประมวลผลการใช้ในการควบคุมการทำงานของมอเตอร์

2.2 วงจรส่วนประมวลผลกลาง ทำหน้าที่ในการประมวลผลต่างๆ นอกจากนี้ยังประกอบไปด้วยหน้าแอลซีดีเพื่อแสดงสถานะการทำงาน คีย์บอร์ดเพื่อใช้ในการตั้งค่าควบคุมต่างๆ ส่วนความจำแบบถาวร (EEPROM) วงจรเพื่อใช้ในการติดต่อสื่อสารและแลกเปลี่ยนข้อมูลแบบ RS232 และ RS485

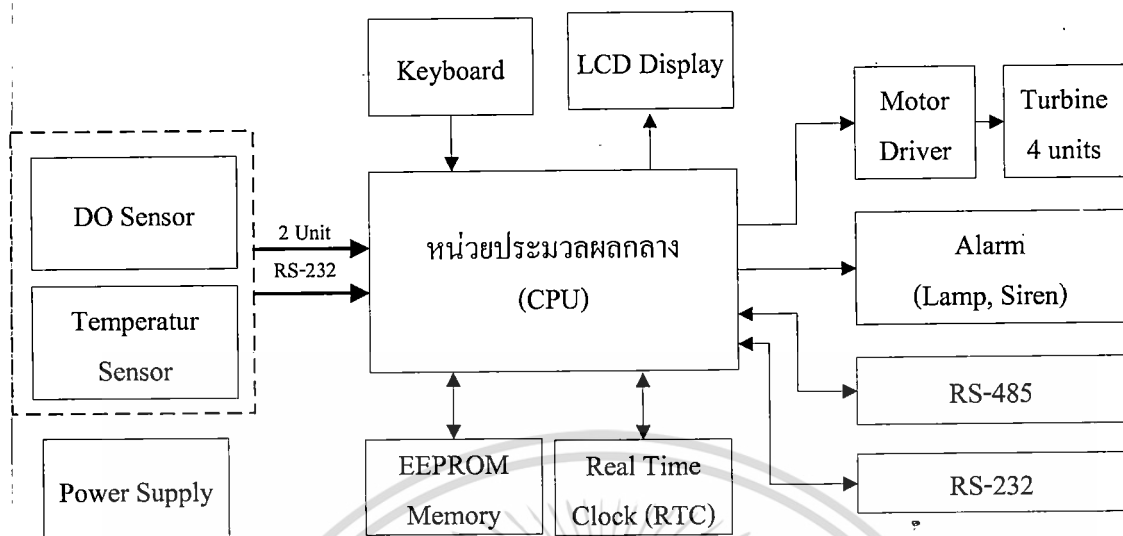
2.3) วงจรขับมอเตอร์เพื่อใช้ควบคุมการทำงานของมอเตอร์ โดยจะรับสัญญาณจากหน่วยประมวลผลกลางเพื่อทำหน้าที่เปิดปิด มอเตอร์ให้สอดคล้องกับปริมาณออกซิเจนที่ละลายอยู่ในน้ำ

2.4) วงจรเพาเวอร์ซัพพลาย ทำหน้าที่แปลงแรงดันไฟฟ้าขนาด 220VAC ให้เป็นแรงดันขนาด 5VDC และ 3 VDC ให้แก่วงจรต่างในวงจรส่วนประมวลผลกลาง

3. เครื่องควบคุมคุณภาพน้ำอัจฉริยะใช้ปริมาณออกซิเจนเป็นตัวควบคุมการทำงานของเครื่องตีน้ำ

4. พลังงานที่ใช้สำหรับการเลี้ยงกุ้งส่วนใหญ่ใช้เพื่อเติมอากาศ และกวนน้ำ ไม่ให้มีการแบ่งชั้นของน้ำ

5. ผลการวิจัยพบว่าหลังจากติดตั้งเครื่องควบคุมคุณภาพน้ำอัจฉริยะต้นทุนในด้านพลังงานลดลงประมาณ 30% และการเจริญเติบโตของกุ้งมีแนวโน้มดีกว่า



ภาพแสดงบล็อกไดอะแกรมของระบบควบคุมคุณภาพน้ำอัจฉริยะ

**ข้อเสนอแนะ**

1. จากผลการวิจัยพบว่าปริมาณออกซิเจนที่ละลายน้ำมีปริมาณการแปรผันต่อการตีน้ำด้วยเครื่องให้ออกอากาศเป็นอย่างมาก โดยเฉพาะในช่วงระยะเวลา 12:00-20:00 น. ดังนั้นการศึกษาเพื่อหาแบบจำลอง (Model) เพื่อใช้ในการประเมินคุณภาพและบริหารจัดการน้ำในบ่อเลี้ยงกุ้ง เพื่อให้การเลี้ยงกุ้งประสบความสำเร็จ
2. แนวทางศึกษาและวิจัยเพิ่มเติม พบว่าวัตถุประสงค์ของเครื่องตีน้ำนอกจากจะเพิ่มออกซิเจนที่ละลายอยู่ในน้ำแล้ว ยังทำอีกหน้าที่หนึ่งคือป้องกันแบ่งตัวของชั้นน้ำในบ่อเลี้ยงกุ้ง ดังนั้นจึงมีความจำเป็นที่จะต้องใช้พลังงานส่วนหนึ่งในการตีน้ำทำให้สูญเสียพลังงานในส่วนนี้ การหาพลังงานทดแทนอื่นมาทำหน้าที่ก็จะเป็นประโยชน์เช่น พลังงานลม และพลังงานแสงอาทิตย์ เป็นต้น ข้อดีคือพลังงานที่ถูกแปลงมานี้สามารถเปลี่ยนพลังงานกลเพื่อให้กังหันไปตีน้ำโดยตรงส่งผลให้การทำงานของระบบไม่ยุ่งยากซับซ้อนในเรื่องของการกักเก็บพลังงาน หากมีการใช้งานควบคู่กับระบบควบคุมคุณภาพน้ำอัจฉริยะก็จะช่วยให้สามารถประหยัดพลังงานได้มากขึ้น
3. ในอนาคตการส่งออกสินค้ากุ้งอาจจะมีกีดกันทางการค้าในเรื่องของคาร์บอนเครดิต (carbon credit) การใช้พลังงานทดแทนร่วมกับระบบควบคุมคุณภาพน้ำอัจฉริยะก็จะเป็นอีกแนวทางหนึ่งที่ช่วยป้องกันการกีดกันทางการค้าที่อาจเกิดขึ้นได้ในอนาคตอันใกล้

## บรรณานุกรม

- 1) กรมประมง 2551 ยุทธศาสตร์กึ่งกับอุตสาหกรรมกึ่งไทย เอกสารเผยแพร่ประชาสัมพันธ์ กรุงเทพฯ 40 หน้า.
- 2) กรมประมงและกระทรวงพลังงาน 2550 รายงานการประชุมเพื่อจัดทำแนวทางและแผนการดำเนินงาน การส่งเสริมการเลี้ยงกึ่งเชิงเศรษฐกิจนิเวศน์ด้านพลังงานในประเทศไทย. เอกสารประกอบการประชุม. กรุงเทพฯ 15 หน้า.
- 3) คณะกรรมการบริหารคัสเตอร์กึ่งประเทศไทย. 2550 คชันชีวัดขีดความสามารถในการแข่งขันของ อุตสาหกรรมกึ่งไทย ศูนย์พันธุวิศวกรรมและเทคโนโลยีชีวภาพแห่งชาติ ปทุมธานี 70 หน้า.
- 4) เครื่องเจริญโภคภัณฑ์ 2550 การประหยัดพลังงานในบ่อเลี้ยงกึ่งด้วยระบบควบคุมเครื่องให้อากาศ อัตโนมัติ ใน ข่าวกึ่ง เดือนกันยายน 2550 หน้า 2.
- 5) ชลอ ลิมสุวรรณ. 2543. กึ่งไทย 2000 สู่ความยั่งยืนและเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม. เจริญรัฐการพิมพ์ กรุงเทพฯ 260 หน้า.
- 6) ชลอ ลิมสุวรรณ, วราห์ เทพาหุดี, นิตี ชูเชิด และพรเลิศ จันทรรัชชกุล “การจัดการคุณภาพน้ำและ บ่อเลี้ยงกึ่งกุลาดำ,” คณะประมง มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ และกรมประมง กระทรวงเกษตรและ สหกรณ์.
- 7) พรเลิศ จันทรรัชชกุล และ ชลอ ลิมสุวรรณ, “การจัดการคุณภาพน้ำและบ่อเลี้ยงกึ่งกุลาดำ,” กรมประมง กระทรวงเกษตรและสหกรณ์ และคณะประมง มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- 8) ชิริธิดา บุตรดา และวิวัฒน์ เรืองเลิศปัญญากุล “ผลของตำแหน่งของเครื่องเติมอากาศต่อการกวนผสมใน บ่อเลี้ยงกึ่ง,” ใน การประชุมวิชาการกึ่งทะเลแห่งชาติ ครั้งที่ 5 29-30 มีนาคม 2547 โรงแรมมิราเคิล แกรนด์ คอนเวนชัน กรุงเทพฯ หน้า 219-230.
- 9) นิตี ชูเชิด, ชลอ ลิมสุวรรณ, วราห์ เทพาหุดี, เต็มดวง สมศิริ นิติศ ภัทรกุลชัย และสุภมาส ศรีวงศ์พุก “การศึกษาความสัมพันธ์ของคุณภาพน้ำ การเกิดโรค และอัตราการอดในการอนุบาลกึ่งก้ามกรามสายพันธุ์ ที่ปรับปรุงแล้ว,” คณะประมง มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ และสถาบันวิจัยสุขภาพสัตว์น้ำจืด กรมประมง กระทรวงเกษตรและสหกรณ์.
- 10) นิตี ชูเชิด, “การวิจัยเรื่องการสร้างเครือข่ายในการส่งเสริมและพัฒนาาระบบการจัดการองค์ความรู้ใน อุตสาหกรรมกึ่งเลี้ยงกึ่งของประเทศไทย,” คณะประมง มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- 11) นิตี ชูเชิด และ ชลอ ลิมสุวรรณ “แนวทางการเลี้ยงกึ่งกุลาดำในอนาคต,” คณะประมง มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

- 12) ณาตยา ศรีจันทิก และมลฤดี นิพันธุ์พงษ์ “การวิเคราะห์ธุรกิจการเลี้ยงกุ้งกุลาดำในพื้นที่ชายฝั่งทะเลอันดามัน,” เอกสารวิชาการฉบับที่ 13/2542 กองเศรษฐกิจการประมง กรมประมง 49 หน้า.
- 13) ณาตยา ศรีจันทิก “ต้นทุนการผลิตกุ้งขาวในเขตจังหวัดฉะเชิงเทรา ปี 2551” เอกสารยังไม่ตีพิมพ์ 1 หน้า.
- 14) มติชน 2550 ร่วมถวายความจงรักภักดี ร่วมทำชีวิตเศรษฐกิจพอเพียง ร่วมกันประหยัดพลังงาน ใน ข่าว มติชน 24 มกราคม 2550 สำนักวิจัยและพัฒนาประมงชายฝั่ง กรมประมง 2549 การจัดการองค์ความรู้ การเพาะเลี้ยงกุ้งทะเล เอกสารเผยแพร่ประชาสัมพันธ์ กรุงเทพฯ 120 หน้า.
- 15) Allen, J.D., Ramshaw, R.S., Yao, Y. and Brackenbury, T.E., 1993, "Implementation of a MPT for a Photovoltaic Array Using a Digital Signal Processor", IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 30, No. 1, pp. 163-166.
- 16) Bernhard Meyhofer. 2008. Best practice guide Eco/Energy-Efficiency management in Thai shrimp farms. Bangkok. 55 p.
- 17) Boegli, U. and Ulmi, R., 1986, "Realization of a New Inverter Circuit for Direct Photovoltaic Energy Feedback into the Public Grid", IEEE Transactions on Industrial Application, 30 March - 2 April 1986, U.S.A., pp. 1-10.
- 18) Erickson, R.W. and Maksimovic, D., 2001, Fundamentals of Power Electronics, 2<sup>nd</sup> ed., Kluwer Academic Publishers, U.S.A., pp. 1-1 03. 13 1-406, 441-584, 761-800, 863-871.
- 19) Mohan, N., Undeland, M.T. and Robbins, W. P., 1995, Power Electronics: Converters, Applications, and Design, 2nd ed., John Wiley & Sons, Canada, pp. 1-405.
- 20) Smedley, K. and C'uk, S., 1994, "Switching Flow-graph Nolinear Modeling Technique", IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 9, No. 4, pp. 405-413.