

การศึกษาการจัดการพลังงานของระบบเติมอากาศสำหรับบ่อเลี้ยงปลาที่ใช้ระบบ
ผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับแบตเตอรี่และระบบไฟฟ้าพื้นฐาน



ปริญญช นุ่มภา

ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมพลังงานทดแทน
มหาวิทยาลัยแม่โจ้
พ.ศ. 2565

การศึกษาการจัดการพลังงานของระบบเติมอากาศสำหรับบ่อเลี้ยงปลาที่ใช้ระบบ
ผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับแบตเตอรี่และระบบไฟฟ้าพื้นฐาน



ปริญญช นุ่มภา

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของความสมบูรณ์ของการศึกษาตามหลักสูตร

ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมพลังงานทดแทน

สำนักบริหารและพัฒนาระบบสารสนเทศ มหาวิทยาลัยแม่โจ้

พ.ศ. 2565

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยแม่โจ้

การศึกษาการจัดการพลังงานของระบบเติมอากาศสำหรับบ่อเลี้ยงปลาที่ใช้ระบบ
ผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับแบตเตอรี่และระบบไฟฟ้าพื้นฐาน

ปริยานุช นุ่มภา

วิทยานิพนธ์นี้ได้รับการพิจารณาอนุมัติให้เป็นส่วนหนึ่งของความสมบูรณ์ของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมพลังงานทดแทน

พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษา

อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สรารุช พลวงษ์ศรี)

วันที่.....เดือน.....พ.ศ.

อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

(รองศาสตราจารย์ ดร.ชวโรจน์ ใจสิน)

วันที่.....เดือน.....พ.ศ.

อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

(รองศาสตราจารย์ ดร.อักรินทร์ อินทนิเวศน์)

วันที่.....เดือน.....พ.ศ.

ประธานอาจารย์ผู้รับผิดชอบหลักสูตร

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.รจพรรณ นิรัญศิลป์)

วันที่.....เดือน.....พ.ศ.

สำนักบริหารและพัฒนาวิชาการรับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์ ดร.ญาณิน โอภาสพัฒนกิจ)

รองอธิการบดี

วันที่.....เดือน.....พ.ศ.

ชื่อเรื่อง	การศึกษาการจัดการพลังงานของระบบเติมอากาศสำหรับบ่อเลี้ยงปลาชนิดที่ใช้ระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับแบตเตอรี่และระบบไฟฟ้าพื้นฐาน
ชื่อผู้เขียน	นางสาวปรียานุช นุ่มภา
ชื่อปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมพลังงานทดแทน
อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สรารุช พลวงษ์ศรี

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษารูปแบบการจัดการพลังงานและวิเคราะห์ต้นทุนทางพลังงานของระบบเติมอากาศแบบสำหรับบ่อเลี้ยงปลาชนิดที่ใช้ระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ทำงานร่วมกับแบตเตอรี่และระบบไฟฟ้าพื้นฐาน ทำการติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์ขนาดกำลังผลิตไฟฟ้าสูงสุด 325 Wp จำนวน 9 แผง และใช้แบตเตอรี่ขนาด 12 V ต่อแบบอนุกรมจำนวน 24 ลูก สำรองไฟฟ้า 22 Ah เพื่อจ่ายไฟฟ้าให้กับมอเตอร์เติมอากาศขนาด 3 แรงม้า บ่อเลี้ยงปลาชนิดที่ใช้ในการทดสอบเป็นบ่อดินขนาดประมาณ 3 ไร่

การศึกษาส่วนที่หนึ่งเป็นการศึกษารูปแบบการจัดการพลังงาน (M) ในการเติมอากาศในบ่อเลี้ยงปลาจำนวน 5 รูปแบบและเปรียบเทียบกับกรเลี้ยงปลาในรูปแบบควบคุมเดิม (CT) เพื่อพิจารณาเลือกรูปแบบการจัดการพลังงานให้เหมาะสมกับการเลี้ยงปลาในแต่ละช่วงระยะเวลาเลี้ยง 1 รอบการเลี้ยง (Crop) โดยพิจารณาจากค่าพลังงานไฟฟ้าที่ใช้จากระบบไฟฟ้าพื้นฐาน (Grid) ที่น้อยที่สุดและมีค่าปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำ (DO) ไม่ต่ำกว่าการเลี้ยงปลาตามรูปแบบควบคุมเดิม จากการศึกษาพบว่า รูปแบบที่เหมาะสมกับการเลี้ยงปลาในระยะที่ 1 คือ รูปแบบการจัดการพลังงาน M_{PV} ที่มีการใช้พลังงานไฟฟ้าจากระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ (Solar PV) จ่ายให้กับเครื่องเติมอากาศในช่วงเวลากลางวันและช่วงเวลากลางคืนไม่มีการเปิดเครื่องเติมอากาศ ส่วนการเลี้ยงปลาในช่วงระยะที่ 2-4 รูปแบบที่เหมาะสมคือรูปแบบ $M_{PV\&Grid,Grid}$ ที่ในช่วงกลางวันมีการใช้พลังงานไฟฟ้าจากระบบ Solar PV ร่วมกับระบบ Grid และในช่วงกลางคืนมีการเปิดเครื่องเติมอากาศในเวลาที่แตกต่างกันตามช่วงระยะเวลาเลี้ยงที่ 01.00 น. 00.00 น. และ 23.00 น. ตามลำดับ นอกจากนี้ในทุกๆ ระยะของการเลี้ยงจะมีการใช้พลังงานไฟฟ้าจากแบตเตอรี่เสริมในช่วงเวลา 05.00 น.

ส่วนที่ 2 เป็นการนำรูปแบบการเลี้ยงที่เหมาะสมในแต่ละช่วงระยะเวลาเลี้ยงจากการศึกษาในส่วนที่ 1 มาใช้งานจริงในการเลี้ยงปลาชนิดในบ่อดินขนาด 3 ไร่ เลี้ยงปลานิลขนาด 47.17

g/fish จำนวน 10,400 ตัว ใน 1 รอบการเลี้ยง จากการวิเคราะห์ผล พบว่า รูปแบบการจัดการพลังงานที่นำมาใช้ทำให้มีการใช้พลังงานไฟฟ้าทั้งสิ้น 4,185.07 kWh/crop แบ่งเป็นใช้พลังงานไฟฟ้าจากระบบ Grid 2,495.03 kWh/crop และการใช้พลังงานไฟฟ้าจากระบบ Solar PV&battery 1,690.04 kWh/crop ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับรูปแบบควบคุม (CT) ที่มีการใช้พลังงานไฟฟ้าจากระบบ Grid 3,771.20 kWh/Crop ดังนั้นจึงสามารถลดการใช้พลังงานไฟฟ้าได้ 1,276.17 kWh/Crop คิดเป็นผลประหยัด 5,525.82 Baht/crop โดยค่าเฉลี่ยอัตราการเจริญเติบโตของปลานิลเท่ากับ 3.75 g/day อัตราการเปลี่ยนอาหารเป็นน้ำหนัก 1.62 g ประสิทธิภาพการเปลี่ยนอาหารเป็นน้ำหนักเท่ากับ 61.74% อัตราการเจริญเติบโตจำเพาะเท่ากับ 1.80% และดัชนีการใช้พลังงานจำเพาะ 0.46 kWh/fish โดยต้องเงินลงทุนในการติดตั้งระบบเท่ากับ 109,626 บาท สามารถลดการใช้พลังงานไฟฟ้าจากระบบ Grid ลงได้ 4,389.06 kWh/year คิดเป็นเงิน 13,082.78 Baht/year และมีระยะเวลาคืนทุน 8.38 year

คำสำคัญ : การจัดการพลังงาน, ระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์, ระบบเติมอากาศ, บ่อเลี้ยงปลานิล, เศรษฐศาสตร์



Title	ENERGY MANAGEMENT STUDY OF THE AERATOR SYSTEM FOR NILE TILAPIA FISH POND USING SOLAR PHOTOVOLTAIC COMBINED WITH BATTERY AND UTILITY GRID SYSTEM
Author	Miss Preeyanuch Numpha
Degree	Master of Engineering in Renewable Energy Engineering
Advisory Committee Chairperson	Assistant Professor Dr. Sarawut Polvongsri

ABSTRACT

This research aims to study the energy management model and energy cost analysis of the aerator system for Nile tilapia fishpond that uses the solar photovoltaic system (Solar PV) combined with battery and utility grid system. The solar photovoltaic panel with a maximum power of 325 Wp per each panel are installed nine panels and the 12 V of a battery is used 24 batteries in series backup power 22 Ah to supply power to the 3 hp aerator motor. The area of conventional Nile tilapia fish pond is about 3 Rai.

The first part is to investigate the energy management (M) five models study in fish pond and compares the results with the conventional control fish farming (CT) to determine the suitable energy management model of a crop of fish farming by considering the least electricity energy use from the utility grid system and the dissolved oxygen (DO) is not lower than the original control scheme fish cultivation. The results found that the suitable model for fish farming period 1 is M_{PV} energy management model that uses electricity from the Solar PV system to supply electricity the aerators during the daytime and without at nighttime use. For fish farming in period 2-4, the suitable model is $M_{PV\&Grid,Grid}$ where during daytime the electricity from the Solar PV system is used together with the utility grid system, and the same use during night time, the aerator is turned on at difference time following at 1 AM., midnight. and

11 PM., respectively of rearing period. Moreover, at every period the additional electricity will be powered by battery at 5 AM.

The second part is the application of the suitable energy management model from the first part study for one crop of Nile tilapia raising in a soil pond of 3 rai, Nile tilapia is reared 47.17 g/fish with a total of 10,400 fishes. From the result investigation, the applicational of the suitable energy management model results in a total electricity consumption of 4,185.07 kWh/crop, divided into 2,495.03 kWh/crop from the utility grid and 1,690.04 kWh/crop from Solar PV&battery, repectively. When comparing the conventional control fish farming (CT) that uses electricity from the grid line about 3,771.20 kWh/crop, therefore it can reduce electricity consumption by 1,276.17 kWh/crop, representing a savings of 5,525.82 Baht/crop. Nile Tilapia had a mean growth rate of 3.75 g/day, the weight conversion rate is equal to 1.62 g, the feed weight conversion efficiency is equal to 61.74%, the specific growth rate is about 1.80% and the specific energy consumption is equal to 0.46 kWh/fish. The investment of system is equal to 109,626 Baht and can save the electricity from the utility grid system by 4,389.06 kWh/year, equivalent to 13,082.78 Baht/year, with a payback period of 8.38 years.

Keywords : Energy management, Solar photovoltaic system, Aerator system, Nile tilapia fish pond, Economic

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดีเนื่องจากได้รับโอกาส ความช่วยเหลือ ความรู้ และ คำปรึกษาจากผู้ให้การสนับสนุนหลากหลายท่าน

ขอขอบพระคุณโครงการผลิตและพัฒนาศัทยภาพบัณฑิตทางด้านพลังงานทดแทนในกลุ่ม ประเทศอาเซียน ที่ให้การสนับสนุนทุนการศึกษาในระดับบัณฑิตศึกษาและรวมถึงการสนับสนุน งบประมาณในการดำเนินงานวิจัยในครั้งนี้

ขอขอบพระคุณโครงการชุมชนต้นแบบเลี้ยงปลาอัจฉริยะสีเขียวเพื่อลดปริมาณการใช้เชื้อเพลิง ฟอสซิล สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.) ที่ให้การสนับสนุนงบประมาณในการดำเนินงานวิจัย ภายใต้งบโครงการทำวิจัยการพัฒนาพลังงานทดแทนและการประยุกต์ใช้งานจริงเพื่อนำไปสู่ชุมชนสีเขียว

ขอขอบพระคุณนายศุภรัชช์ รัตน์ัง และนางวันดี ชีวา ที่ได้อนุเคราะห์สถานที่สำหรับใช้ในการ ทำงานวิจัย พร้อมทั้งให้คำแนะนำสำหรับการเลี้ยงปลานิล

ขอขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ ดร.ธรรณิศวรรค์ ดีทายาท ที่ให้ความกรุณาเป็นประธาน กรรมการในการสอบป้องกันวิทยานิพนธ์ในครั้งนี้ ตลอดจนให้คำชี้แนะเพื่อปรับปรุงแก้ไขวิทยานิพนธ์ ฉบับนี้ให้สมบูรณ์ที่สุด ขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สรารุช พลวงษ์ศรี ที่ให้ความกรุณาเป็นที่ปรึกษา งานวิจัย และเสียสละเวลาอันมีค่าให้คำปรึกษา ความรู้ ตลอดจนตรวจสอบแก้ไขข้อบกพร่องของ วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ขอขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ ดร.อัครินทร์ อินทนิเวศน์ และรองศาสตราจารย์ ดร.ชวโรจน์ ใจสิน ให้ความกรุณาเป็นที่ปรึกษาร่วมงานวิจัยนี้ และขอขอบพระคุณ คณะอาจารย์และเจ้าหน้าที่วิทยาลัยพลังงานทดแทนทุกท่านที่คอยให้การอบรมสั่งสอน ให้คำปรึกษา และความช่วยเหลือมาโดยตลอด

ขอขอบคุณเพื่อนๆ ที่คอยให้คำปรึกษา และทำยนี้ขอขอบพระคุณครอบครัวของผู้วิจัย ที่ให้ การเลี้ยงดู ให้กำลังใจ และการสนับสนุนเป็นอย่างดีมาโดยตลอด ขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

อนึ่ง ผู้วิจัยหวังว่างานวิจัยฉบับนี้จะมีประโยชน์อยู่ไม่มากนักน้อย และสำหรับข้อบกพร่องต่าง ๆ ที่อาจจะเกิดขึ้นนั้น ผู้วิจัยขอน้อมรับผิดเพียงผู้เดียว และยินดีที่จะรับฟังคำแนะนำจากทุกท่านที่ได้เข้ามา ศึกษาเพื่อเป็นประโยชน์ในการพัฒนางานวิจัยต่อไป

ปรียานุช นุ่มภา

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ค
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ช
สารบัญ.....	ซ
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญภาพ.....	ฎ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ.....	1
1.2 จุดประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและการตรวจสอบเอกสาร.....	4
2.1 ระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์.....	4
2.1.1 หลักการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์.....	6
2.1.2 แผงเซลล์แสงอาทิตย์.....	7
2.1.3 แบตเตอรี่.....	9
2.1.4 เครื่องควบคุมการประจุกระแสไฟฟ้า.....	10
2.1.5 เครื่องแปลงกระแสไฟฟ้า.....	10
2.1.6 การประเมินสมรรถนะของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์.....	11
2.2 ปรลาซิล.....	13
2.2.1 การเจริญเติบโตของปรลาซิล.....	13

2.2.2 คุณสมบัติของน้ำ.....	15
2.3 ความคุ้มค่าทางด้านเศรษฐศาสตร์.....	19
2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	20
บทที่ 3 วัสดุ อุปกรณ์และขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	35
3.1 วัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในดำเนินงานวิจัย.....	35
3.2 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงานวิจัย.....	41
บทที่ 4 ผลการวิจัย.....	51
4.1 ผลการทดสอบการเลี้ยงปลานิลในรูปแบบควบคุม (รูปแบบ CT).....	51
4.2 ผลการทดสอบการเลี้ยงปลานิลด้วยรูปแบบการจัดการพลังงาน (รูปแบบ M).....	56
4.3 ผลการทดสอบการเลี้ยงปลานิลด้วยรูปแบบการจัดการพลังงานที่เหมาะสม.....	68
4.3.1 ผลการทดสอบการใช้พลังงานไฟฟ้าด้วยรูปแบบการจัดการพลังงานที่เหมาะสม.....	68
4.3.2 ผลการทดสอบสมรรถนะของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์.....	85
4.3.3 ผลการทดสอบอัตราการเจริญเติบโตของการเลี้ยงปลานิล.....	86
4.3.4 การประเมินความคุ้มค่าทางด้านเศรษฐศาสตร์.....	90
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย.....	93
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	93
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	94
ภาคผนวก ก ตัวอย่างการคำนวณ.....	95
ภาคผนวก ข ผลงานทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์.....	103
บรรณานุกรม.....	111
ประวัติผู้วิจัย.....	116

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1 เกณฑ์คุณภาพน้ำที่เหมาะสมต่อการดำรงชีวิตของสัตว์น้ำ	15
ตารางที่ 2 ระดับต่ำสุดของออกซิเจนที่สามารถทำให้ปลาตายได้	16
ตารางที่ 3 ปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำที่อุณหภูมิต่างๆ ณ ความดันบรรยากาศ 760 mmHg ..	18
ตารางที่ 4 การเปรียบเทียบสมรรถนะระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์แบบต่อกับระบบจำหน่าย	21
ตารางที่ 5 การเจริญเติบโตการเลี้ยงปลานิลในกระชังระบบปกติและระบบร่วมกับเครื่องเติมอากาศ30	
ตารางที่ 6 สรุปสาระสำคัญจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	33
ตารางที่ 7 คุณสมบัติของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้ในการติดตั้ง.....	35
ตารางที่ 8 คุณสมบัติของเครื่องควบคุมการประจุกระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการติดตั้ง	36
ตารางที่ 9 คุณสมบัติของแบตเตอรี่ที่ใช้ในการติดตั้ง	37
ตารางที่ 10 คุณสมบัติของแคลมป์เพาเวอร์มิเตอร์ที่ใช้ในการติดตั้ง	39
ตารางที่ 11 คุณสมบัติของเครื่องวัดอุณหภูมิของอากาศที่ใช้ในการติดตั้ง	40
ตารางที่ 12 รายละเอียดข้อมูลของการเลี้ยงปลาในรูปแบบควบคุม	43
ตารางที่ 13 รูปแบบการจัดการพลังงานของระบบเติมอากาศแบบหัวทราย	45
ตารางที่ 14 ผลรวมการใช้พลังงานไฟฟ้าระบบไฟฟ้าพื้นฐานของรูปแบบควบคุม	55
ตารางที่ 15 การใช้พลังงานไฟฟ้าในการเติมอากาศของการเลี้ยงปลานิลระยะที่ 1.....	58
ตารางที่ 16 การใช้พลังงานไฟฟ้าในการเติมอากาศของการเลี้ยงปลานิลระยะที่ 2.....	61
ตารางที่ 17 การใช้พลังงานไฟฟ้าในการเติมอากาศของการเลี้ยงปลานิลระยะที่ 3.....	63
ตารางที่ 18 การใช้พลังงานไฟฟ้าในการเติมอากาศของการเลี้ยงปลานิลระยะที่ 4.....	66
ตารางที่ 19 ผลรวมการเปรียบเทียบการใช้พลังงานไฟฟ้าเติมอากาศของระบบไฟฟ้าพื้นฐาน	67
ตารางที่ 20 การใช้พลังงานไฟฟ้าเติมอากาศของระบบ Solar PV ระยะการเลี้ยงที่ 1	72

ตารางที่ 21 การใช้พลังงานไฟฟ้าเติมอากาศของระบบ Solar PV&Grid ระยะการเลี้ยงที่ 2..... 75

ตารางที่ 22 การใช้พลังงานไฟฟ้าเติมอากาศของระบบ Solar PV&Grid ระยะการเลี้ยงที่ 3..... 79

ตารางที่ 23 การใช้พลังงานไฟฟ้าเติมอากาศของระบบ Solar PV&Grid ระยะการเลี้ยงที่ 4..... 83

ตารางที่ 24 การใช้พลังงานในรูปแบบการจัดการพลังงานของการเติมอากาศ 84

ตารางที่ 25 ผลรวมการใช้พลังงานระบบ Grid ในรูปแบบการจัดการพลังงานของการเติมอากาศ ... 84

ตารางที่ 26 รายละเอียดรายรับรายจ่ายและต้นทุนของการเลี้ยงปลานิล 90



สารบัญภาพ

	หน้า
ภาพที่ 1 ระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์แบบอิสระ.....	4
ภาพที่ 2 ระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์แบบต่อกับระบบจำหน่าย	5
ภาพที่ 3 ระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์แบบผสมผสาน	6
ภาพที่ 4 การทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์.....	6
ภาพที่ 5 โครงสร้างแผงเซลล์แสงอาทิตย์.....	7
ภาพที่ 6 ปลานิล (Nile tilapia)	13
ภาพที่ 7 ผลกระทบต่อปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำ (DO) ในบ่อเลี้ยงปลา.....	16
ภาพที่ 8 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับความต้องการออกซิเจนในการเลี้ยงปลา	17
ภาพที่ 9 การเปลี่ยนแปลงรายเดือนของประสิทธิภาพแผงเซลล์แสงอาทิตย์และอินเวอร์เตอร์	22
ภาพที่ 10 ไดอะแกรมระบบไฮบริด PV-Battery	23
ภาพที่ 11 พลังงานไฟฟ้าเทียบกับมุมเอียงที่ต่างกัน (a) และพลังงานไฟฟ้าเทียบกับมุมเอียง 5° (b). 23	
ภาพที่ 12 ระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์แสงอาทิตย์และแบตเตอรี่ (PV-Battery: PVB)	24
ภาพที่ 13 การเปรียบเทียบพลังงานไฟฟ้าจากการวัดและการจำลอง.....	25
ภาพที่ 14 กระแสไฟฟ้าระหว่างกระบวนการชาร์จ (a) และการคายประจุ (b).....	25
ภาพที่ 15 กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ในแต่ละฤดูกาล	26
ภาพที่ 16 การชาร์จประจุและการคายประจุไฟฟ้าของแบตเตอรี่	27
ภาพที่ 17 ช่วงเวลาการคายประจุและชาร์จไฟฟ้าของแบตเตอรี่.....	27
ภาพที่ 18 การแบ่งชั้นของความอิมตัวของ DO ในช่วงฤดูร้อนและฤดูฝนที่ระดับความลึก 20, 50 และ 80 cm (a) ในบ่อที่มีปลาและ (b) ในบ่อที่ไม่มีปลา.....	28
ภาพที่ 19 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของความเข้มข้นของออกซิเจนละลายน้ำ (DO) และขนาดปลา 29	
ภาพที่ 20 (a) น้ำหนักที่เพิ่มขึ้น (b) ค่าอัตราการเปลี่ยนอาหารเป็นเนื้อ (c) ค่าอัตราการเจริญเติบโตเฉลี่ย (d) ค่าอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะ	31

ภาพที่ 21 การเปรียบเทียบปริมาณออกซิเจนละลายในน้ำ	32
ภาพที่ 22 การตรวจหาค่าปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำ (Dissolve Oxygen: DO).....	32
ภาพที่ 23 กรอบแนวคิดการดำเนินงานวิจัย	34
ภาพที่ 24 การติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์	35
ภาพที่ 25 เครื่องควบคุมการประจุกระแสไฟฟ้า MPPT.....	36
ภาพที่ 26 แบตเตอรี่รุ่น Chilwee 6-DZF-22.....	37
ภาพที่ 27 เครื่องแปลงกระแสไฟฟ้ารุ่น SINAMICS V20	38
ภาพที่ 28 มอเตอร์เติมอากาศ	38
ภาพที่ 29 แคลมป์เฟาเวอร์มิเตอร์รุ่น UNI-T UT204	39
ภาพที่ 30 อุปกรณ์วัดความเข้มรังสีแสงอาทิตย์ Apogee และเครื่องบันทึกข้อมูล TSUS	39
ภาพที่ 31 เครื่องวัดอุณหภูมิของอากาศ Tenmars รุ่น TM-305U.....	40
ภาพที่ 32 เครื่องตรวจวัดปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำ รุ่น WA-2017SD.....	41
ภาพที่ 33 หัวทรายเติมอากาศ.....	41
ภาพที่ 34 ขั้นตอนวิธีการดำเนินงานวิจัย	42
ภาพที่ 35 บ่อทดสอบของการเลี้ยงปลานิล.....	43
ภาพที่ 36 ไดอะแกรมหลักการทำงานของระบบเติมอากาศสำหรับบ่อเลี้ยงปลานิล	44
ภาพที่ 37 แผนภาพการตรวจวัดและการเก็บบันทึกข้อมูล.....	47
ภาพที่ 38 ระบบตรวจวัดปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำและอุณหภูมิน้ำบริเวณบ่อเลี้ยงปลานิล ...	48
ภาพที่ 39 ไดอะแกรมการทำงานของแหล่งจ่ายไฟฟ้า (ช่วงกลางวัน)	49
ภาพที่ 40 ไดอะแกรมการทำงานของแหล่งจ่ายไฟฟ้า (ช่วงกลางคืน).....	49
ภาพที่ 41 ปริมาณออกซิเจนที่ละลายน้ำและความเข้มของรังสีแสงอาทิตย์ ของรูปแบบควบคุมใน ระยะการเลี้ยงที่ 1	52
ภาพที่ 42 ปริมาณออกซิเจนที่ละลายน้ำและความเข้มของรังสีแสงอาทิตย์ ของรูปแบบควบคุมใน ระยะการเลี้ยงที่ 2	53

ภาพที่ 43 ปริมาณออกซิเจนที่ละลายน้ำและความเข้มของรังสีแสงอาทิตย์ ของรูปแบบควบคุมใน ระยะการเลี้ยงที่ 3	54
ภาพที่ 44 ปริมาณออกซิเจนที่ละลายน้ำและความเข้มของรังสีแสงอาทิตย์ ของรูปแบบควบคุมใน ระยะการเลี้ยงที่ 4	55
ภาพที่ 45 ปริมาณออกซิเจนที่ละลายน้ำของรูปแบบการจัดการพลังงานในระยะการเลี้ยงที่ 1	57
ภาพที่ 46 เปรียบเทียบปริมาณออกซิเจนที่ละลายน้ำของรูปแบบการจัดการพลังงาน และรูปแบบ ควบคุมในระยะการเลี้ยงที่ 1	59
ภาพที่ 47 ปริมาณออกซิเจนที่ละลายน้ำของรูปแบบการจัดการพลังงานในระยะการเลี้ยงที่ 2	60
ภาพที่ 48 เปรียบเทียบปริมาณออกซิเจนที่ละลายน้ำของรูปแบบการจัดการพลังงาน และรูปแบบ ควบคุมในระยะการเลี้ยงที่ 2	62
ภาพที่ 49 ปริมาณออกซิเจนที่ละลายน้ำของรูปแบบการจัดการพลังงานในระยะการเลี้ยงที่ 3	63
ภาพที่ 50 เปรียบเทียบปริมาณออกซิเจนที่ละลายน้ำของรูปแบบการจัดการพลังงาน และรูปแบบ ควบคุมในระยะการเลี้ยงที่ 3	64
ภาพที่ 51 ปริมาณออกซิเจนที่ละลายน้ำของรูปแบบการจัดการพลังงานในระยะการเลี้ยงที่ 4	65
ภาพที่ 52 เปรียบเทียบปริมาณออกซิเจนที่ละลายน้ำของรูปแบบการจัดการพลังงาน และรูปแบบ ควบคุมในระยะการเลี้ยงที่ 4	67
ภาพที่ 53 ความเข้มรังสีแสงอาทิตย์และอุณหภูมิสิ่งแวดล้อม	69
ภาพที่ 54 กำลังการผลิตไฟฟ้าสูงสุดของระยะการเลี้ยงที่ 1 (6 กุมภาพันธ์ 2563).....	70
ภาพที่ 55 ปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำและอุณหภูมิ (6 กุมภาพันธ์ 2563) ระยะการเลี้ยงที่ 1..	70
ภาพที่ 56 พลังงานไฟฟ้าของระยะการเลี้ยงที่ 1	71
ภาพที่ 57 (ก) กำลังการผลิตพลังงานไฟฟ้าสูงสุด (22 เมษายน 2563) (ข) กำลังการผลิตพลังงาน ไฟฟ้าต่ำสุด (1 เมษายน 2563) ของระยะการเลี้ยงที่ 2	73
ภาพที่ 58 (ก) ปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำ (22 เมษายน 2563) (ข) ปริมาณออกซิเจนที่ละลายใน น้ำ (1 เมษายน 2563) และอุณหภูมิของระยะการเลี้ยงที่ 2.....	74
ภาพที่ 59 พลังงานไฟฟ้าของระยะการเลี้ยงที่ 2.....	75

ภาพที่ 60 (ก) กำลังการผลิตพลังงานไฟฟ้าสูงสุด (20 พฤษภาคม 2563) (ข) กำลังการผลิตพลังงานไฟฟ้าต่ำสุด (23 พฤษภาคม 2563) ของระยะการเลี้ยงที่ 3	77
ภาพที่ 61 (ก) ปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำ (20 พฤษภาคม 2563) (ข) ปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำ (23 พฤษภาคม 2563) และอุณหภูมิของระยะการเลี้ยงที่ 3.....	78
ภาพที่ 62 พลังงานไฟฟ้าของระยะการเลี้ยงที่ 3	79
ภาพที่ 63 (ก) กำลังการผลิตพลังงานไฟฟ้าสูงสุด (7 มิถุนายน 2563) (ข) กำลังการผลิตพลังงานไฟฟ้าต่ำสุด (1 มิถุนายน 2563) ของระยะการเลี้ยงที่ 4	81
ภาพที่ 64 (ก) ปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำ (7 มิถุนายน 2563) (ข) ปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำ (1 มิถุนายน 2563) และอุณหภูมิของระยะการเลี้ยงที่ 4.....	82
ภาพที่ 65 พลังงานไฟฟ้าของระยะการเลี้ยงที่ 4	83
ภาพที่ 66 กำลังไฟฟ้าทางด้านกระแสตรงและกระแสสลับของระบบผลิตไฟฟ้า และประสิทธิภาพแผงเซลล์แสงอาทิตย์.....	85
ภาพที่ 67 ผลผลิตพลังงานไฟฟ้า Array yield: Y_a , Final yield: Y_f และ Reference yield: Y_r	86
ภาพที่ 68 น้ำหนักเฉลี่ย (WG) และปริมาณอาหารของการเลี้ยงปลานิล (FT).....	87
ภาพที่ 69 อัตราการเจริญเติบโตเฉลี่ยต่อวัน (ADG).....	88
ภาพที่ 70 อัตราการเปลี่ยนอาหารเป็นน้ำหนัก (FCR) และ ประสิทธิภาพการเปลี่ยนอาหารเป็นน้ำหนัก (FCE)	89
ภาพที่ 71 อัตราการเจริญเติบโตจำเพาะ (SGR).....	89
ภาพที่ 72 ค่าเฉลี่ยความเข้มรังสีแสงอาทิตย์และพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จาก ระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ในแต่ละเดือนของจังหวัดเชียงใหม่ ปี 2562.....	91
ภาพที่ 73 Cash Flow Diagram ของการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ ร่วมกับไฟฟ้าพื้นฐานและแบตเตอรี่.....	92

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

ประเทศไทยมีการส่งเสริมการใช้พลังงานทดแทน ตามแผนพัฒนาพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือก พ.ศ. 2558-2579 (AEDP2015) มีเป้าหมายเพื่อเพิ่มสัดส่วนการใช้พลังงานทดแทนเป็น 30% (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2558) พลังงานทดแทนดังกล่าวอยู่ในรูปของความร้อน เชื้อเพลิงชีวภาพ และไฟฟ้า ซึ่งประเทศไทยมีศักยภาพการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ โดยรัฐบาลมีการกำหนดการใช้พลังงานทดแทนจากพลังงานแสงอาทิตย์จาก 3.10% เป็น 10.24% จึงได้มีการส่งเสริมให้ใช้พลังงานแสงอาทิตย์ในทุกภาคส่วนรวมทั้งภาคเกษตรกรรมในทุก ๆ ด้าน เช่น การทำนา การทำสวน การทำไร่ และการเลี้ยงสัตว์

โดยชุมชนบ้านทุ่งยาว อำเภอสนทราย จังหวัดเชียงใหม่ ถือเป็นหนึ่งชุมชนในการทำเกษตรกรรม พื้นที่ทั้งหมดของเกษตรกรประกอบอาชีพเลี้ยงปลา 70-80% เช่น ปลานิลและปลาดุก ลักษณะของการเลี้ยงปลาในกลุ่มเกษตรกรชุมชนบ้านทุ่งยาวนั้นนิยมเลี้ยงในบ่อดินตามธรรมชาติ มีระยะเวลาในการเลี้ยงต่อรอบประมาณ 4-5 เดือน ปลาเป็นสิ่งมีชีวิตที่อาศัยอยู่ในน้ำมีการใช้ออกซิเจนในขบวนการหายใจและการย่อยสลายอินทรีย์วัตถุ ในช่วงเวลากลางวันแพลงก์ตอนพืชจะมีการสังเคราะห์แสงและปล่อยออกซิเจนออกมาทำให้ปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำเพิ่มมากขึ้นเพียงพอต่อความต้องการของปลา (พัชรวลัย ศรียศศักดิ์ และคณะ, 2557) ในทางตรงกันข้ามในช่วงกลางคืนไม่มีกระบวนการสังเคราะห์แสงเกิดขึ้น แต่ปลายังคงมีการใช้ออกซิเจนในการหายใจ ทำให้ปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำมีแนวโน้มที่ลดลงอย่างต่อเนื่อง หากปริมาณออกซิเจนที่ละลายน้ำลดต่ำกว่าเกณฑ์ ปลาจะมีสถานะเครียด ไม่กินอาหารส่งผลต่อการเจริญเติบโต หากถึงขั้นรุนแรงจะทำให้ปลาเกิดการขาดออกซิเจนตาย โดยปกติปริมาณออกซิเจนที่ละลายน้ำ (Dissolved Oxygen: DO) ในการเลี้ยงปลาจะไม่ต่ำกว่า 3 mg/L (กรมควบคุมมลพิษ, 2530) จึงมีการนำเครื่องเติมอากาศเข้าช่วยในการเพิ่มออกซิเจนในน้ำ ทำให้ออกซิเจนในชั้นบรรยากาศเข้าผสมกับน้ำจะสามารถช่วยปรับปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำให้เพียงพอต่อปริมาณความต้องการได้ สามารถแบ่งเครื่องเติมอากาศออกตามการใช้งาน 3 แบบ คือ เครื่องเติมอากาศผิวน้ำ (Surface Aerator) เครื่องเติมอากาศใต้ผิวน้ำ (Subsurface Aerator) และเครื่องเติมอากาศแบบแพร่กระจาย (Air Diffuser) เกษตรกรชุมชนบ้านทุ่งยาวส่วนใหญ่นิยมใช้เครื่องเติมอากาศผิวน้ำแบบใบพัดแต่ปริมาณของเติมอากาศภายในบ่อมีการใช้พลังงานไฟฟ้าขับเคลื่อนมอเตอร์สูง ส่งผลให้ต้นทุนในการเลี้ยงปลานั้นสูงขึ้นตามไปด้วย จึงมีการนำเครื่องเติมอากาศแบบหัวทรายใต้ผิวน้ำเข้ามาใช้งานแทนเครื่องเติมอากาศแบบใบพัดในการลดต้นทุนด้านการผลิต ข้อดีคือสามารถลดการใช้พลังงานที่ป้อนเข้าสู่มอเตอร์ได้ เนื่องจากพลังงานที่ป้อนเข้าสู่มอเตอร์

ใช้แรงดันต่ำแต่แรงดันนี้จะเพิ่มขึ้นตามความลึกของน้ำ (Claude E. Boyd and Craig S. Tucker, 1998) ดังนั้นการใช้หัวทรายก็สามารถเพิ่มปริมาณออกซิเจนให้กับบ่อเลี้ยงปลาได้ สำหรับการใช้ออกซิเจนในการเติมอากาศของเกษตรกรนั้นมีปัญหาที่พบคือ ในช่วงเวลากลางคืนเมื่อเกิดเหตุฉุกเฉินที่ทำให้ไม่สามารถจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับเครื่องเติมอากาศได้ หากไม่มีการจ่ายกระแสไฟฟ้าเป็นระยะเวลาานจะทำให้ออกซิเจนช่วงเวลานั้นลดต่ำลง ส่งผลต่อกระบวนการหายใจของปลาทำให้ปลาช็อคตาย จึงมีแนวคิดที่จะนำแบตเตอรี่เข้ามาใช้เพื่อเก็บพลังงานสะสม ในการดำเนินการหากเกิดกรณีฉุกเฉินมอเตอร์จะดึงไฟฟ้าจากพลังงานที่เก็บสะสมในแบตเตอรี่ออกไปใช้ขับมอเตอร์เติมอากาศเพื่อเพิ่มปริมาณออกซิเจนที่ละลายน้ำที่ลดลงและลดการช็อคของปลา อีกทั้งแนวคิดที่จะลดการพึ่งพาการใช้ไฟฟ้าจากระบบไฟฟ้าพื้นฐาน ลดค่าใช้จ่ายทางด้านพลังงานไฟฟ้าที่ต้องจ่ายให้กับการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค (กฟภ) จึงมีการนำเทคโนโลยีพลังงานทดแทนระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์เข้าร่วมกับระบบเติมอากาศข้างต้น

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีแนวคิดที่จะนำระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์มาเข้าร่วมกับระบบเติมอากาศ อีกทั้งมีการใช้แบตเตอรี่เพื่อเก็บสะสมพลังงานไว้ใช้ในเวลากลางคืนและช่วยแก้ปัญหาในช่วงที่เกิดเหตุฉุกเฉินไฟฟ้าดับอย่างกระทันหัน โดยทำการศึกษารูปแบบการจัดการพลังงานของระบบเติมอากาศแบบหัวทรายสำหรับบ่อเลี้ยงปลานิลที่ใช้พลังงานไฟฟ้าจากระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ทำงานร่วมกับแบตเตอรี่และระบบไฟฟ้าพื้นฐาน รวมทั้งเปรียบเทียบต้นทุนในการผลิตทางด้านพลังงานของการเลี้ยงปลานิลด้วยระบบเติมอากาศแบบดั้งเดิมและระบบที่ใช้พลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับแบตเตอรี่

1.2 จุดประสงค์ของงานวิจัย

- 1) เพื่อศึกษารูปแบบการจัดการพลังงานของระบบเติมอากาศแบบหัวทรายสำหรับบ่อเลี้ยงปลานิลที่ใช้พลังงานไฟฟ้าจากระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ทำงานร่วมกับแบตเตอรี่และระบบไฟฟ้าพื้นฐาน
- 2) เพื่อเปรียบเทียบต้นทุนในการผลิตทางด้านพลังงานของการเลี้ยงปลานิลด้วยระบบเติมอากาศแบบดั้งเดิม (ระบบควบคุม) และระบบที่ใช้พลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับแบตเตอรี่

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

- 1) บ่อที่ทำการทดสอบเป็นบ่อดินจำนวน 2 บ่อ ขนาดของบ่อไม่น้อยกว่า 5,000 m² บ่อลึกไม่เกิน 4 m
- 2) ทดสอบโดยใช้เครื่องเติมอากาศแบบหัวทรายใต้น้ำ

3) ใช้ปลานิลแปลงเพศ ขนาดน้ำหนักประมาณ 30 ตัว/kg รอบการเลี้ยงประมาณ 3-4 เดือน อัตราการปล่อยต่อรอบประมาณ 8,000 ตัว

4) ทดสอบโดยใช้ไฟฟ้าจากไฟฟ้าพื้นฐานทำงานร่วมกับแบตเตอรี่ระบบผลิตพลังงานแสงอาทิตย์ แผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด Poly crystalline

5) ศึกษาแบบการจัดการพลังงานของระบบเติมอากาศแบบหัตถรายอย่างน้อย 4 รูปแบบ

6) วิเคราะห์สมรรถนะระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์และต้นทุนในการผลิตทางด้านพลังงาน

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1) ได้รูปแบบการจัดการพลังงานของระบบเติมอากาศแบบหัตถรายสำหรับบ่อเลี้ยงปลานิลที่ใช้พลังงานไฟฟ้าจากระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ทำงานร่วมกับแบตเตอรี่และระบบไฟฟ้าพื้นฐาน

2) ได้ต้นทุนในการผลิตทางด้านพลังงานของการเลี้ยงปลานิลด้วยระบบเติมอากาศแบบดั้งเดิมและระบบที่ใช้พลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับแบตเตอรี่



บทที่ 2

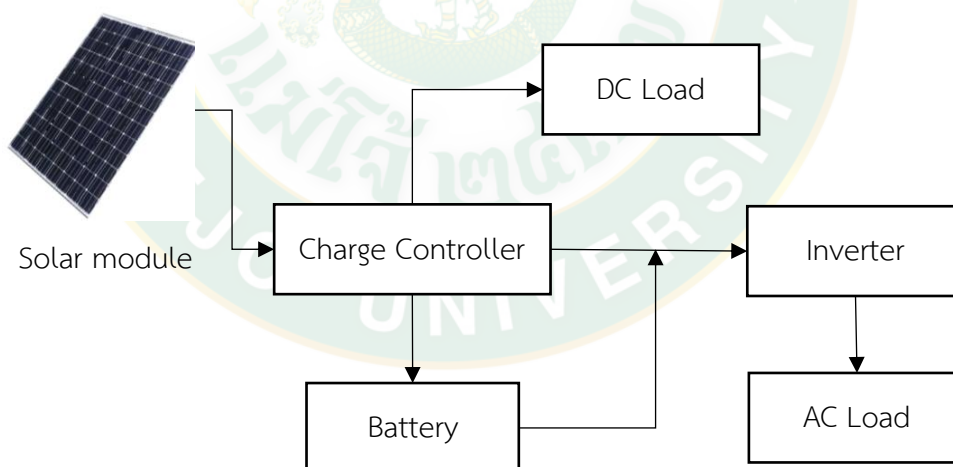
ทฤษฎีและการตรวจสอบเอกสาร

2.1 ระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์

พลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานทดแทนประเภทพลังงานหมุนเวียนที่ใช้แล้วเกิดขึ้นใหม่ได้ตามธรรมชาติ ในระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์สามารถจำแนกออกเป็น 3 รูปแบบ ดังต่อไปนี้

1) ระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์แบบอิสระ (PV Stand alone system)

เป็นระบบผลิตไฟฟ้าที่ได้รับการออกแบบสำหรับใช้งานในพื้นที่ชนบทที่ไม่มีระบบสายส่งไฟฟ้า โดยมีหลักการทำงานแบ่งได้เป็น 2 ช่วงเวลา กล่าวคือ ช่วงเวลากลางวัน เซลล์แสงอาทิตย์ได้รับแสงแดดสามารถผลิตไฟฟ้าจ่ายให้แก่โหลดพร้อมทั้งประจุพลังงานไฟฟ้าส่วนเกินไว้ในแบตเตอรี่พร้อมๆ กัน ส่วนในช่วงกลางคืน เซลล์แสงอาทิตย์ไม่ได้รับแสงแดดจึงไม่สามารถผลิตไฟฟ้าได้ ดังนั้นพลังงานจากแบตเตอรี่ที่เก็บประจุไว้ในช่วงกลางวันจะถูกจ่ายให้แก่โหลด จึงสามารถกล่าวได้ว่า ระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์แบบอิสระสามารถจ่ายกระแสไฟฟ้าให้โหลดได้ทั้งกลางวันและกลางคืน อุปกรณ์ระบบที่สำคัญประกอบด้วยแผงเซลล์แสงอาทิตย์ อุปกรณ์ควบคุมการประจุแบตเตอรี่ และอุปกรณ์เปลี่ยนระบบไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับแบบอิสระ แสดงดังภาพที่ 1

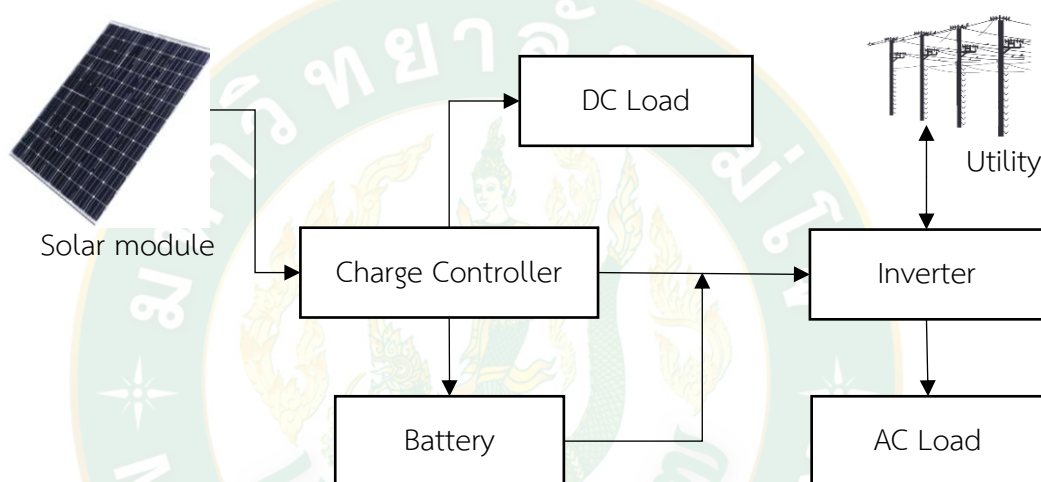


ภาพที่ 1 ระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์แบบอิสระ

2) ระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์แบบต่อกับระบบจำหน่าย (PV Grid connected system)

เป็นระบบผลิตไฟฟ้าที่ถูกรออกแบบสำหรับผลิตไฟฟ้าผ่านอุปกรณ์เปลี่ยนระบบไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับเข้าสู่ระบบสายส่งไฟฟ้าโดยตรง ใช้ผลิตไฟฟ้าในเขตเมือง หรือพื้นที่ที่มีระบบจำหน่ายไฟฟ้าเข้าถึง มีหลักการทำงานแบ่งเป็น 2 ช่วง กล่าวคือ ในช่วงเวลากลางวัน เซลล์

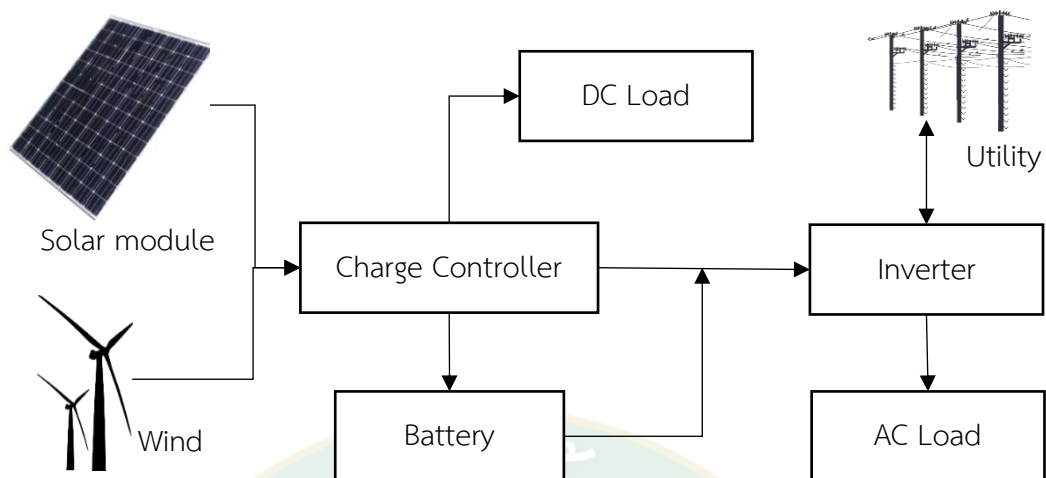
แสงอาทิตย์ได้รับแสงแดดสามารถผลิตไฟฟ้าจ่ายให้แก่โหลดได้โดยตรง โดยผ่านอุปกรณ์เปลี่ยนระบบไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ และหากมีพลังงานไฟฟ้าส่วนที่เกินจะถูกจ่ายเข้าระบบจำหน่ายไฟฟ้า สังเกตได้จากมิเตอร์วัดพลังงานไฟฟ้าจะหมุนกลับทาง ส่วนในช่วงกลางคืนเซลล์แสงอาทิตย์ไม่สามารถผลิตไฟฟ้าได้ กระแสไฟฟ้าจากระบบจำหน่ายไฟฟ้าจะจ่ายให้แก่โหลดโดยตรง สังเกตได้จากมิเตอร์วัดพลังงานไฟฟ้าจะหมุนปกติ ดังนั้น ระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์แบบต่อกับระบบจำหน่ายจะเป็นการใช้งานเซลล์แสงอาทิตย์ผลิตไฟฟ้าในเขตเมืองหรือพื้นที่ที่มีระบบจำหน่ายไฟฟ้าเข้าถึง อุปกรณ์ระบบที่สำคัญประกอบด้วยแผงเซลล์แสงอาทิตย์ อุปกรณ์เปลี่ยนระบบไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับชนิดต่อกับระบบจำหน่ายไฟฟ้า แสดงดังภาพที่ 2



ภาพที่ 2 ระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์แบบต่อกับระบบจำหน่าย

3) ระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์แบบผสมผสาน (PV Hybrid system)

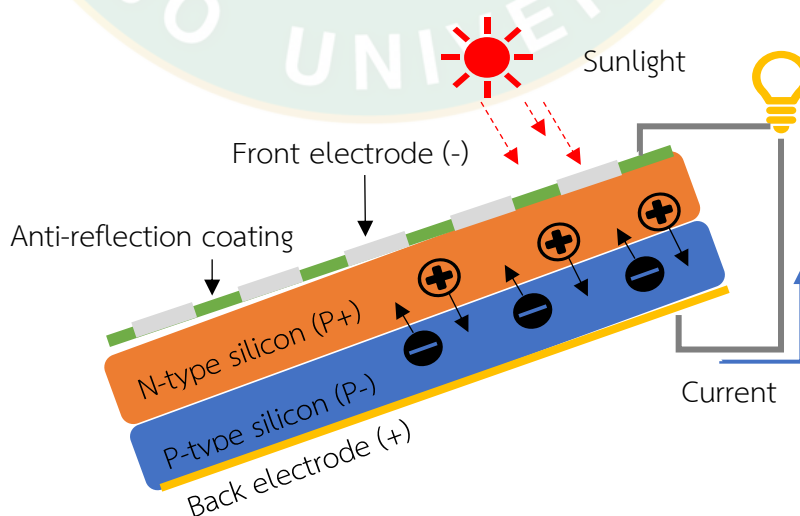
เป็นระบบผลิตไฟฟ้าที่ถูกออกแบบสำหรับทำงานร่วมกับอุปกรณ์ผลิตไฟฟ้าอื่นๆ เช่น ระบบเซลล์แสงอาทิตย์กับพลังงานลม และเครื่องยนต์ดีเซล ระบบเซลล์แสงอาทิตย์กับพลังงานลม และไฟฟ้าพลังน้ำ เป็นต้น โดยรูปแบบระบบจะขึ้นอยู่กับการออกแบบตามวัตถุประสงค์โครงการเป็นกรณีเฉพาะ แสดงดังภาพที่ 3



ภาพที่ 3 ระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์แบบผสมผสาน

2.1.1 หลักการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์

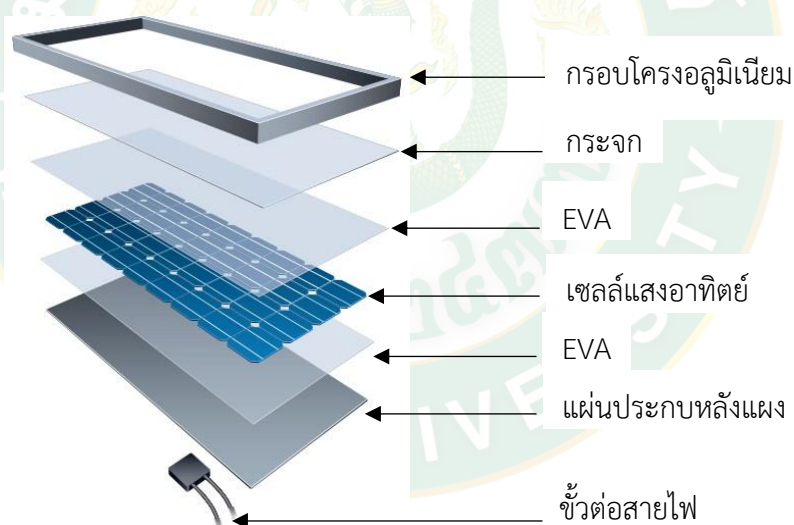
โครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์ที่เป็นพื้นฐานมากที่สุดคือเซลล์แบบรอยต่อพีเอ็น (p-n junction) เช่น เซลล์แสงอาทิตย์ของซิลิกอน แสดงดังภาพที่ 4 เมื่อมีแสงอาทิตย์ตกกระทบกับเซลล์แสงอาทิตย์จะเกิดการสร้างพาหะนำไฟฟ้าประจุลบ (อิเล็กตรอน) และประจุบวก (โฮล) โครงสร้างเซลล์แสงอาทิตย์แบบรอยต่อพีเอ็นจะทำหน้าที่สร้างสนามไฟฟ้าภายในเซลล์เพื่อแยกอิเล็กตรอนให้ไหลผ่านสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (n-type) ไปที่ขั้วลบหรือขั้วไฟฟ้าด้านหน้า และทำให้โฮลไหลผ่านสารกึ่งตัวนำชนิดพี (p-type) ไปที่ขั้วบวกหรือขั้วไฟฟ้าด้านหลัง ด้วยเหตุนี้ทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าแบบกระแสตรงขึ้นที่ขั้วทั้งสอง เมื่อต่อเซลล์แสงอาทิตย์เข้ากับเครื่องใช้ไฟฟ้ากระแสตรงก็จะมีกระแสไฟฟ้าไหลในวงจร (ศูนย์ความเป็นเลิศนาโนเทคโนโลยี, 2562)



ภาพที่ 4 การทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์

2.1.2 แผงเซลล์แสงอาทิตย์

แรงเคลื่อนไฟฟ้าที่ผลิตขึ้นจากเซลล์แสงอาทิตย์เพียงเซลล์เดียวจะมีค่าต่ำมาก การนำมาใช้งานจะต้องนำเซลล์มาต่อกันแบบอนุกรมเพื่อเพิ่มค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าให้สูงขึ้น เซลล์ที่นำมาต่อกันในจำนวนและขนาดที่เหมาะสมเรียกว่า แผงเซลล์แสงอาทิตย์ (Solar Module) ด้านหน้าของแผงเซลล์ประกอบด้วย แผ่นกระจกที่มีส่วนผสมของเหล็กดำ ซึ่งมีคุณสมบัติในการยอมให้แสงผ่านได้ดี และยังเป็นเกราะป้องกันแผ่นเซลล์ แผงเซลล์จะต้องมีการป้องกันความชื้นที่ดีมาก เพราะจะต้องอยู่กลางแจ้งกลางฝนเป็นเวลายาวนาน ในการประกอบจะต้องใช้วัสดุที่มีความคงทนและป้องกันความชื้นที่ดี เช่น ซิลิโคนและอีวีเอ (Ethylene Vinyl Acetate) เป็นต้น แสดงดังภาพที่ 5 เพื่อเป็นการป้องกันแผ่นกระจกด้านบนของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ จึงต้องมีการทำกรอบด้วยวัสดุที่มีความแข็งแรง แต่บางครั้งก็ไม่มีเวลาจำเป็น ถ้ามีการเสริมความแข็งแรงของแผ่นกระจกให้เพียงพอ ซึ่งก็สามารถทดแทนการทำกรอบได้เช่นกัน ดังนั้นแผงเซลล์จึงมีลักษณะเป็นแผ่นเรียบ (laminated) ด้านหลังของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ประกอบไปด้วยกล่องต่อสายไฟซึ่งทำจากวัสดุที่ทนทานต่อสภาพสิ่งแวดล้อม กรอบแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ทำจากอลูมิเนียมน้ำหนักเบา ทนทานและไม่เป็นสนิม



ภาพที่ 5 โครงสร้างแผงเซลล์แสงอาทิตย์

[ที่มา: <http://www.heritage-int.co.th>]

ในการคำนวณวิเคราะห์สมรรถนะของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์จะพิจารณาจากคุณลักษณะทางกระแสไฟฟ้า – แรงดันไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์โดยมีพารามิเตอร์ที่สำคัญมีดังต่อไปนี้ (Nowshad Amin et al., 2009)

- กระแสไฟฟ้าลัดวงจร (Short circuit current: I_{sc}) เป็นกระแสไฟฟ้าในขณะที่แผงเซลล์แสงอาทิตย์ถูกต่อแบบลัดวงจรและมีแรงดันตกคร่อมวงจรในทางอุดมคติเมื่อความต้านทานเท่ากับศูนย์

- แรงดันไฟฟ้าวงจรเปิด (Open circuit voltage: V_{oc}) เป็นแรงดันไฟฟ้าในขณะที่แผงเซลล์แสงอาทิตย์ไม่มีการต่ออยู่กับภาระโหลด

- แรงดัน ณ จุดที่มีกำลังไฟฟ้าสูงสุด (Maximum voltage: V_m) เป็นแรงดันไฟฟ้าในขณะที่กำลังไฟฟ้าสูงสุดของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ต่ออยู่กับภาระโหลด

- กระแส ณ จุดที่มีกำลังไฟฟ้าสูงสุด (Maximum current: I_m) เป็นกระแสไฟฟ้าในขณะที่กำลังไฟฟ้าสูงสุดของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ต่ออยู่กับภาระโหลด

โดยลักษณะของกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ การทดสอบระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับแบตเตอรี่และระบบไฟฟ้าพื้นฐานสมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์จะต้องทำสถานะมาตรฐานตาม Standard Tasting Condition (STD) คือ ความเข้มรังสีอาทิตย์ 1000 W/m^2 ค่ามวลอากาศ (air mass) 1.5 และอุณหภูมิของแผงเซลล์แสงอาทิตย์เท่ากับ $25 \text{ }^\circ\text{C}$ (L.M. Ayompe et al., 2011)

- กำลังไฟฟ้าสูงสุด (Maximum Power: P_{DC}) เป็นผลคูณระหว่างกระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าสูงสุด สามารถคำนวณหาได้จากสมการที่ 1

$$P_{DC} = I_{DC} V_{DC} \quad \text{สมการที่ 1}$$

เมื่อ P_{DC} กำลังไฟฟ้า (W)
 I_{DC} ไฟฟ้ากระแสตรง (A)
 V_{DC} แรงดันไฟฟ้ากระแสตรง (V)

โดยที่พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์สามารถหาได้จากสมการที่ 2

$$E_{DC} = P_{DC} \times t \quad \text{สมการที่ 2}$$

เมื่อ E_{DC} พลังงานไฟฟ้า (Wh)
 t เวลา (h)

- ประสิทธิภาพของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (Photovoltaic efficiency: η_{pv}) เป็นอัตราส่วนของกำลังไฟฟ้าสูงสุดต่อความเข้มของรังสีแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบพื้นแผงรับแสงอาทิตย์สามารถคำนวณหาได้จากสมการที่ 3

$$\eta_{pv} = \frac{P_{DC}}{A_c I_T} \times 100 \quad \text{สมการที่ 3}$$

เมื่อ	η_{pv}	ประสิทธิภาพของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (%)
	A_c	พื้นที่แผงรับแสงอาทิตย์ (m^2)
	I_T	ความเข้มของรังสีดวงอาทิตย์ (W/m^2)

2.1.3 แบตเตอรี่

แบตเตอรี่ (Battery) เป็นตัวเก็บสะสมพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ไว้ใช้ในเวลาที่ต้องการ เช่น เวลาที่ไม่มีแสงอาทิตย์ เวลากลางคืน โดยจะทำหน้าที่ในการควบคุมรักษาแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง (DC) ในระบบไว้ในระดับที่ต้องการ และสามารถจ่ายกระแสไฟฟ้าได้อย่างต่อเนื่องตามขนาดของแบตเตอรี่ จ่ายกระแสได้ตามขนาดของแบตเตอรี่ แบตเตอรี่มีหลายชนิดและหลายขนาดให้เลือกใช้งานตามความเหมาะสม แต่แบตเตอรี่ที่เหมาะสมกับระบบโซลาร์เซลล์ คือ แบตเตอรี่ชนิด Deep Cycle ซึ่งเป็นแบตเตอรี่ชนิดที่สามารถประจุไฟฟ้าได้แม้กระแสไหลเข้าในปริมาณที่น้อยและสามารถจ่ายกระแสไฟฟ้าได้อย่างต่อเนื่อง โดยไม่เกิดการเสียหายของแผ่นเซลล์ภายในตัวแบตเตอรี่ ซึ่งต่างจากแบตเตอรี่รถยนต์ที่ถูกออกแบบมาให้การประจุไฟฟ้าด้วยกระแสที่สูงได้ และจ่ายพลังงานสูงในช่วงเวลาสั้นๆ ได้ดี แต่จะจ่ายพลังงานออกมาไม่ได้มากซึ่งจ่ายเพียง 20-30% ของพลังงานที่เก็บอยู่ หากนำมาใช้งานกับระบบเซลล์แสงอาทิตย์จะจ่ายประจุมาได้น้อยกว่าชนิด Deep Cycle จำนวนแบตเตอรี่ (n_{Battery}) สามารถคำนวณหาได้จากสมการที่ 4

$$n_{\text{Battery}} = \frac{(Whr) \times \text{Day of autonomy}}{(\% \text{discharge}) \times (\% \text{eff}_{\text{battery}}) \times Ah \times V_{\text{battery}}} \quad \text{สมการที่ 4}$$

เมื่อ	n_{Battery}	จำนวนแบตเตอรี่ (ก้อน)
	Whr	ปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่ต้องการ (Whr)
	Day of autonomy	จำนวนวันที่ระบบสามารถทำงานได้โดยไม่มีแสงอาทิตย์ (Day)
	%discharge	ความลึกของการคายประจุ (%)
	%eff _{Battery}	ประสิทธิภาพของแบตเตอรี่ (%)
	Ah	ขนาดของแบตเตอรี่ (Ah)
	V_{Battery}	แรงดันไฟฟ้าของแบตเตอรี่ (V)

โดยขนาดของแบตเตอรี่สามารถหาได้จากสมการที่ 5

$$Ah = \frac{W}{V \times (\%I_{\text{battery}}) \times (\% \text{eff}_{\text{inverter}})} \quad \text{สมการที่ 5}$$

เมื่อ	Ah	ขนาดของแบตเตอรี่ (Ah)
	W	พลังงานไฟฟ้าที่ต้องการใช้ (Wh)

$\%I_{\text{Battery}}$	การใช้งานกระแสไฟฟ้าที่อยู่ในแบตเตอรี่ (0.6)
$\%eff_{\text{inverter}}$	ประสิทธิภาพของเครื่องแปลงกระแสไฟฟ้า (0.85)

2.1.4 เครื่องควบคุมการประจุกระแสไฟฟ้า

เครื่องควบคุมการประจุกระแสไฟฟ้า (Charge controller) เป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่ควบคุมการประจุกระแสไฟฟ้าที่ได้จากแผงเซลล์แสงอาทิตย์มาเก็บสะสมไว้ในแบตเตอรี่โดยออกแบบวงจรควบคุมการประจุกระแสไฟฟ้าให้เหมาะสมกับขนาดของแบตเตอรี่เพื่อยืดอายุการใช้งานของแบตเตอรี่ รวมถึงควบคุมการจ่ายกระแสไฟฟ้าออกจากแบตเตอรี่ผ่านเครื่องควบคุม หลักการทำงาน คือ เมื่อประจุกระแสไฟฟ้าเข้าสู่แบตเตอรี่จนเต็มเครื่องควบคุมการชาร์จประจุจะหยุดหรือลดการประจุกระแสไฟฟ้าน้อยลง (รวมทั้งจะออกแบบให้ตัดการจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับอุปกรณ์ไฟฟ้า กรณีต่อไฟฟ้าใช้งานผ่านเครื่องควบคุมการประจุแบตเตอรี่ ในกรณีที่แรงดันของแบตเตอรี่ลดลงต่ำกว่าค่าที่กำหนดด้วย) ระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์จะใช้เครื่องควบคุมการประจุกระแสไฟฟ้าในกรณีที่มีการเก็บพลังงานไฟฟ้าไว้ในแบตเตอรี่เท่านั้น โดยขนาดของเครื่องควบคุมการประจุกระแสไฟฟ้านั้นจะสามารถหาได้จากสมการที่ 6

$$\text{Size of controller} = 1.3 \times I_{SC} \quad \text{สมการที่ 6}$$

2.1.5 เครื่องแปลงกระแสไฟฟ้า

เครื่องแปลงกระแสไฟฟ้า (Inverter) เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ถือว่ามีหน้าที่มากในระบบและมีความซับซ้อนมากที่สุดของระบบเซลล์แสงอาทิตย์ โดยเครื่องแปลงกระแสไฟฟ้าที่ใช้กับระบบที่ทำงานสัมพันธ์กับการไฟฟ้า (ระบบออนกริด On-grid System) หรือ กริดไทน์ Inverter (Grid-Tied Inverter) โดยลักษณะการทำงานของเครื่องแปลงกระแสไฟฟ้าจะเหมือนกับเครื่องแปลงกระแสไฟฟ้าทั่วไป แต่จะต้องมีแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับจากการไฟฟ้าป้อนให้กับเครื่องแปลงกระแสไฟฟ้าอีกทางหนึ่งตัวเครื่องแปลงกระแสไฟฟ้าถึงจะทำงาน แต่ไฟฟ้าที่ผลิตได้จากแผงเซลล์แสงอาทิตย์จะถูกใช้ไปกับเครื่องใช้ไฟฟ้าต่าง ๆ ภายในบ้าน หรืออาจจะแปลงไฟฟ้าที่ผลิตได้จากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ป้อนตรงให้กับสายส่งเพื่อขายไฟให้การไฟฟ้าตามโครงการต่าง ๆ ได้ ทำให้เครื่องแปลงกระแสไฟฟ้าในปัจจุบันจะตัดการทำงานตัวมันเองทันทีที่ไฟฟ้าจากการไฟฟ้าดับเพื่อป้องกันไฟฟ้าที่ผลิตได้จากแผงเซลล์แสงอาทิตย์โดยผ่านไปยังสายไฟของการไฟฟ้า โดยการหาค่ากำลังไฟฟ้ากระแสสลับ (P_{AC}) สามารถหาได้จากสมการที่ 7

$$P_{AC} = I_{AC} \times V_{AC} \quad \text{สมการที่ 7}$$

เมื่อ	P_{AC}	กำลังไฟฟ้ากระแสสลับ (W)
	I_{AC}	ไฟฟ้ากระแสสลับ (A)

V_{AC} แรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ (V)
โดยที่พลังงานไฟฟ้ากระแสสลับ (E_{AC}) สามารถหาได้จากสมการที่ 8

$$E_{AC} = P_{AC} \times t \quad \text{สมการที่ 8}$$

เมื่อ E_{AC} พลังงานไฟฟ้ากระแสสลับ (Wh)
 t เวลา (hr)

การหาประสิทธิภาพของเครื่องแปลงกระแสไฟฟ้าสามารถหาได้จากสมการที่ 9

$$\eta_{inv} = \frac{P_{AC}}{P_{DC}} \times 100 \quad \text{สมการที่ 9}$$

เมื่อ η_{inv} ประสิทธิภาพของเครื่องแปลงกระแสไฟฟ้า (%)
 P_{AC} กำลังไฟฟ้ากระแสสลับ (kW)
 P_{DC} กำลังไฟฟ้ากระแสตรง (kW)

2.1.6 การประเมินสมรรถนะของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์

การประเมินสมรรถนะของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ โดยการอ้างอิงตามมาตรฐาน International Electrotechnical Commission: IEC 61724 ในการประเมินสมรรถนะระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์แบบต่อกับระบบจำหน่าย (PV Grid connected system) (B. Shiva Kumar and K. Sudhakar., 2015) พารามิเตอร์ที่สำคัญที่สามารถนำมาใช้ในการคำนวณโดยใช้ข้อมูลที่รวบรวมระหว่างการทำงานในสถานที่ที่กำหนด (L.M. Ayompe et al., 2011) ในการเปรียบเทียบสมรรถนะการผลิตไฟฟ้าของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่เชื่อมต่อกับระบบอื่นๆ ได้แก่ พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (Array yield: Y_a) พลังงานไฟฟ้าที่ใช้งานจริงที่ผลิตได้จากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (Final yield: Y_f) พลังงานไฟฟ้าที่ใช้งานจริงที่ผลิตได้จากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (Reference yield: Y_r) และสมรรถนะของระบบเซลล์แสงอาทิตย์ (Performance Ratio: PR)

- พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (Y_a) เป็นค่าพลังงานที่ผลิตจากเซลล์แสงอาทิตย์ เปลี่ยนเป็นพลังงานไฟฟ้ากระแสตรงต่อกำลังไฟฟ้าที่ติดตั้งของระบบ (B. Shiva Kumar and K. Sudhakar., 2015) ซึ่งมีหน่วยเป็น kWh/kW-day สามารถหาได้จากสมการที่ 10

$$Y_a = \frac{\sum E_{pv,DC}}{P_0} \quad \text{สมการที่ 10}$$

เมื่อ Y_a พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (kWh/kW-day)
 $E_{pv,DC}$ พลังงานไฟฟ้ารวมที่ผลิตจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ในหนึ่งวัน (kWh)
 P_0 กำลังไฟฟ้าที่ติดตั้งของระบบ (kWp)
 - พลังงานไฟฟ้าที่ใช้งานจริงที่ผลิตได้จากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (Y_f) เป็นค่าพลังงานไฟฟ้าที่ถูกนำมาใช้งานจริงของระบบโดยผ่านเครื่องแปลงกระแสไฟฟ้าต่อกำลังไฟฟ้าที่ติดตั้งของระบบ (B. Shiva Kumar and K. Sudhakar., 2015) จะต้องกำหนดที่สภาวะมาตรฐานตาม Standard Tasting Condition (STD) แทนการอ้างอิงการเปรียบเทียบทางภูมิศาสตร์ โดย STD จะขึ้นอยู่กับลักษณะของการติดตั้ง การตั้งฉากหรือการเอียงและสถานที่ตั้ง (L.M. Ayompe et al., 2011) ซึ่งมีหน่วยเป็น kWh/kW-day สามารถหาได้จากสมการที่ 11

$$Y_f = \frac{\sum E_{Grid,AC}}{P_0} \quad \text{สมการที่ 11}$$

เมื่อ Y_f พลังงานไฟฟ้าที่ใช้งานจริงที่ผลิตได้จากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (kWh/kW-day)
 $E_{Grid,AC}$ พลังงานไฟฟ้ารวมที่ได้จากเครื่องแปลงกระแสไฟฟ้า (kWh)
 - พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ในทางทฤษฎี (Y_r) ค่าพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ทางทฤษฎีที่มีอยู่ในที่เฉพาะเจาะจงสถานที่ในช่วงเวลาที่กำหนด เป็นอัตราส่วนระหว่างค่าพลังงานแสงอาทิตย์รวมบนระนาบแผงเซลล์ต่อความเข้มรังสีอาทิตย์มาตรฐานซึ่งมีค่าเท่ากับ 1 kW/m^2 ซึ่งมีหน่วยเป็น kWh/kW-day สามารถหาได้จากสมการที่ 12

$$Y_r = \frac{\sum E_i}{A_{stc}} \quad \text{สมการที่ 12}$$

เมื่อ Y_r พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ในทางทฤษฎี (kWh/kW-day)
 E_i พลังงานแสงอาทิตย์รวมบนระนาบแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (kWh/m²)
 A_{stc} ความเข้มรังสีอาทิตย์มาตรฐาน (1 kW/m^2)
 - สมรรถนะของระบบเซลล์แสงอาทิตย์ (PR) เป็นการบ่งบอกถึงคุณลักษณะการทำงานของการผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ แสดงให้เห็นถึงศักยภาพของพลังงานที่ผลิตได้ (Lutero Carmo de Lima et al., 2017) สามารถหาได้จากสมการที่ 13

$$PR = \frac{Y_f}{Y_r} \times 100 \quad \text{สมการที่ 13}$$

2.2 ปลานิล

ปลานิลเป็นปลาน้ำจืดที่อยู่ในวงศ์ปลาหมอสี (Cichlidae) มีชื่อภาษาอังกฤษ Nile tilapia ชื่อวิทยาศาสตร์ *Oreochromis niloticus* (ชื่อเดิมคือ *Tilapia nilotica*) มีรูปร่างลักษณะคล้ายปลาหมอเทศ ลักษณะพิเศษของปลานิลคือ มีริมฝีปากบนและล่างเสมอกัน มีเกล็ด 4 แถวตรงบริเวณแก้มและจะมีลายพาดขวางลำตัวประมาณ 9-10 แถบ ชอบอาศัยอยู่รวมกันเป็นฝูงตามแม่น้ำ ลำคลอง หนอง บึงและทะเลสาบ เป็นปลาที่อยู่ได้ทั้งน้ำจืดและน้ำกร่อย มีความอดทนและสามารถปรับปรุงตัวให้เข้ากับธรรมชาติได้ง่ายเหมาะสมที่จะนำมาเพาะเลี้ยง แสดงดังภาพที่ 6



ภาพที่ 6 ปลานิล (Nile tilapia)

[ที่มา: www4.fisheries.go.th]

2.2.1 การเจริญเติบโตของปลานิล

อาหารในการเลี้ยงปลาถือเป็นสิ่งสำคัญในการเลี้ยงปลา เนื่องจากปลาในการเพาะเลี้ยงจะไม่สามารถหาอาหารกินเองตามธรรมชาติได้ การเจริญเติบโตของปลานั้นจึงขึ้นอยู่กับการจัดการของการให้คุณค่าของสารอาหารตามขนาดของปลา การให้อาหารที่เหมาะสมกับปลานั้นทำให้ปลามีการเจริญเติบโตที่เร็วขึ้นในเวลาเลี้ยงที่สั้น สิ่งสำคัญที่ควรพิจารณามีดังต่อไปนี้ (ฝ่ายบริการวิชาการอาหารสัตว์)

1) ความต้องการสารอาหาร ในลูกปลาวัยอ่อนถึงปลาน้ำจืด ควรมีระดับโปรตีนในอาหารประมาณ 30-40% ความต้องการโปรตีนจะลดลงเมื่อปลาโตขึ้น 25-30%

2) ความถี่ในการให้อาหาร เนื่องจากปลานิลเป็นปลาที่ไม่มีกระเพาะอาหารจึงกินอาหารได้ที่ละน้อยและย่อยได้ช้า จึงควรให้อาหารครั้งละน้อยแต่บ่อยครั้ง คือ 2-5 ครั้งต่อวัน

3) ปริมาณการให้อาหารของน้ำหนักรุ่น-ปลาเนื้อ อายุประมาณ 1-35 วัน น้ำหนักประมาณ 25-100 g ควรให้อาหารประมาณ 3.5-4% อายุประมาณ 36-90 วัน น้ำหนักประมาณ 100-400 g ควรให้อาหาร 3-3.5% และปลาใหญ่อายุประมาณ 91-120 วัน น้ำหนักประมาณ 400-900 g อัตราการให้จะลดลงเหลือประมาณ 1.5-3%

ปลานิลสามารถผสมพันธุ์ได้ตลอดปี โดยใช้ระยะเวลา 3-4 เดือนต่อครั้ง แต่ถ้าได้รับอาหารเพียงพอและเหมาะสม ในระยะเวลา 1 ปี จะสามารถผสมพันธุ์ได้ 5-6 ครั้ง ขนาดอายุและช่วงการสืบพันธุ์ของปลาแต่ละตัวจะแตกต่างกันไปตามสภาพแวดล้อม และสภาพทางสรีรวิทยาของปลา ในการเจริญเติบโตของปลาสามารถคำนวณได้ตามสมการดังต่อไปนี้

- น้ำหนักปลาเฉลี่ยที่เพิ่มขึ้น (Weight Gain: WG) เป็นน้ำหนักปลาในการเลี้ยงตั้งแต่เริ่มต้นจนกระทั่งสิ้นสุดการทดลองนั้นๆ สามารถคำนวณหาได้จากสมการที่ 14 (An Tran-Duy et al., 2008) (Kim T. Tran-Ngoc et al., 2016)

$$WG = W_i - W_f \quad \text{สมการที่ 14}$$

เมื่อ	WG	น้ำหนักปลาเฉลี่ยที่เพิ่มขึ้น (g)
	W_i	น้ำหนักปลาเริ่มต้นของการทดลอง (g)
	W_f	น้ำหนักปลาสุดท้ายของการทดลอง (g)

- อัตราการเจริญเติบโตเฉลี่ยต่อวัน (Average Daily Gain: ADG) เป็นน้ำหนักปลาในการเลี้ยงตั้งแต่เริ่มต้นจนกระทั่งสิ้นสุดการทดลองในระยะเวลาการเลี้ยงนั้นๆ สามารถคำนวณหาได้จากสมการที่ 15

$$ADG = \frac{W_i - W_f}{t} \quad \text{สมการที่ 15}$$

เมื่อ	ADG	อัตราการเจริญเติบโตเฉลี่ยต่อวัน (g/day)
	t	ระยะเวลาการเลี้ยง (day)

- อัตราการเปลี่ยนอาหารเป็นน้ำหนัก (Feed Conversion Ratio: FCR) หรืออัตราการแลกเนื้อแสดงถึงน้ำหนักปลาที่เพิ่มขึ้นใน 1 หน่วยนั้นเกิดจากปริมาณของการให้อาหารในปริมาณเท่าไร ในอาหารที่มีคุณภาพดีนั้นจะให้ค่าอัตราเปลี่ยนอาหารเป็นเนื้อปลาที่ต่ำ สามารถคำนวณหาได้จากสมการที่ 16

$$FCR = \frac{FT}{WG} \quad \text{สมการที่ 16}$$

เมื่อ	FCR	อัตราการเปลี่ยนอาหารเป็นน้ำหนัก
	FT	ปริมาณอาหารที่ให้ (g)

- ประสิทธิภาพการเปลี่ยนอาหารเป็นน้ำหนัก (Food conversion efficiency or Food efficiency: FCE) มีค่าตรงข้ามกับอัตราการเปลี่ยนอาหารเป็นน้ำหนักในหน่วยเปอร์เซ็นต์ (%) สามารถคำนวณหาได้จากสมการที่ 17

$$FCE = \frac{WG}{FT} \times 100$$

สมการที่ 17

เมื่อ FCE ประสิทธิภาพการเปลี่ยนอาหารเป็นน้ำหนัก (%)

- อัตราการเจริญเติบโตจำเพาะ (Specific Growth Rate: SGR) ในหน่วยของเปอร์เซ็นต์ต่อวัน (%/day) สามารถคำนวณหาได้จากสมการที่ 18 (Carlos Henrique da Paixão Lemos et al., 2018) (Kim T. Tran-Ngoc et al., 2016)

$$SGR = \frac{\ln(W_f) - \ln(W_i)}{t} \times 100$$

สมการที่ 18

เมื่อ SGR อัตราการเจริญเติบโตจำเพาะ (%)

ทั้งนี้ในการเจริญเติบโตของปลานิลทั้งหมดยังขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของน้ำโดยมีผลต่อการเจริญเติบโตช้าหรือเร็ว เกิดการตาย เกิดโรคระบาด ตลอดจนมีผลต่อระบบสืบพันธุ์ เป็นต้น

2.2.2 คุณสมบัติของน้ำ

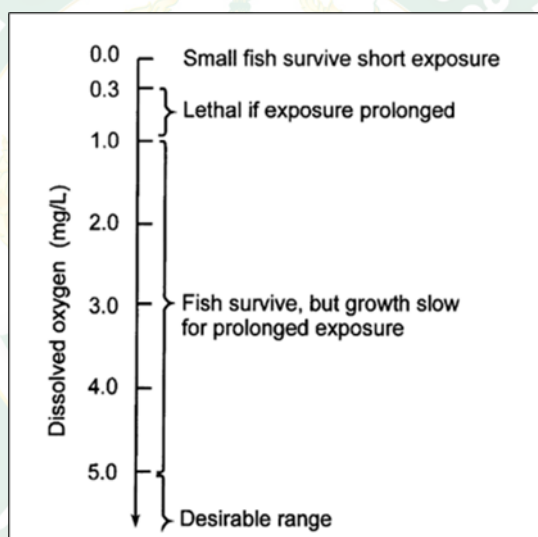
คุณสมบัติของน้ำ (Water quality) เป็นคุณสมบัติของน้ำทางฟิสิกส์ เคมี และชีววะ ซึ่งมีความสัมพันธ์กันต่อการเพาะเลี้ยง ซึ่งเกณฑ์คุณภาพน้ำที่เหมาะสมต่อการดำรงชีวิตของสัตว์น้ำตามเกณฑ์คุณภาพน้ำเพื่อคุ้มครองสัตว์น้ำจืด (กรมควบคุมมลพิษ, 2530) แสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 เกณฑ์คุณภาพน้ำที่เหมาะสมต่อการดำรงชีวิตของสัตว์น้ำ

ลำดับ	ดัชนีคุณภาพน้ำ	ระดับความเข้มข้น	หมายเหตุ
1	อุณหภูมิ (Temperature)	23-32 °C	โดยมีการเปลี่ยนแปลงตามธรรมชาติ และไม่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว
2	ออกซิเจนละลาย (DO)	ต่ำสุด 3 mg/L	-
3	ความเป็นกรด-ด่าง (pH)	5-9	โดยมีการเปลี่ยนแปลงในรอบวัน ไม่ควรเกินกว่า 2.0 หน่วย
4	คาร์บอนไดออกไซด์ (CO ₂)	สูงสุด 30 mg/L	มีออกซิเจนละลายอยู่อย่างเพียงพอ
5	ความขุ่น (Turbidity)	-	-
	- ความโปร่งใส (Transparency)	30 - 60 cm	

ลำดับ	ดัชนีคุณภาพน้ำ	ระดับความเข้มข้น	หมายเหตุ
	- สารแขวนลอย (Suspended solids)	สูงสุด 25	

คุณสมบัติของน้ำมีมากมายหลายประการ แต่ที่มีความสำคัญและมีผลต่อการเพาะเลี้ยงปลานิลคือ ปริมาณออกซิเจนละลายในน้ำ (Dissolved oxygen: DO) ปลาต้องการออกซิเจนในขบวนการหายใจ เมื่อออกซิเจนในน้ำลดลง ปลาจะโผล่มาหายใจที่ผิวน้ำ ดังนั้นปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำจึงมีผลต่อการดำรงชีวิตในด้านต่างๆ เช่น การเจริญเติบโต การตาย อัตราการกินอาหาร การเผาผลาญการให้อาหาร พฤติกรรมของปลา ความต้านทานโรค เป็นต้น แสดงดังภาพที่ 7 ผลกระทบต่อปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำ (DO) ในบ่อเลี้ยงปลา



ภาพที่ 7 ผลกระทบต่อปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำ (DO) ในบ่อเลี้ยงปลา

[ที่มา: (Claude E. Boyd and Craig S. Tucker, 1998)]

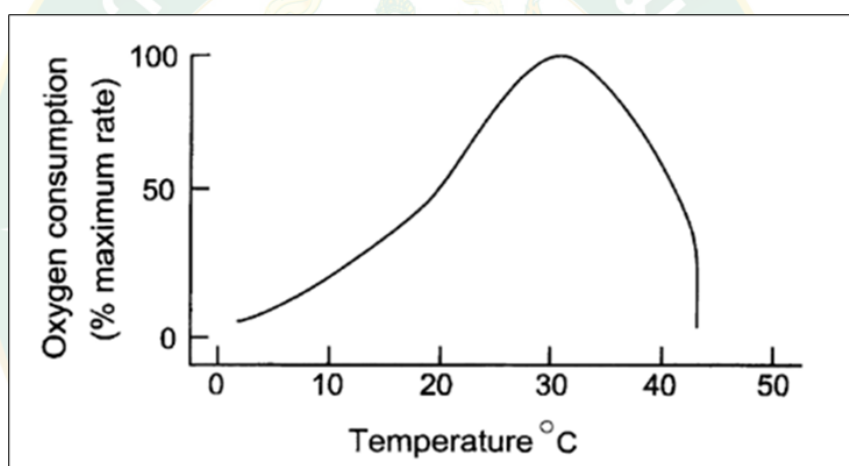
ตามคุณสมบัติของน้ำและวิธีวิเคราะห์สำหรับการวิจัยทางการประมง ในปริมาณออกซิเจนที่ละลายน้ำที่เหมาะสมต่อการเลี้ยงปลานิลไม่ควรต่ำกว่า 0.8-1.2 mg/L (ศักดิ์ชัย ชูโชติ, 2536) แสดงดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ระดับต่ำสุดของออกซิเจนที่สามารถทำให้ปลาทายได้

ชนิดปลา	ปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำ (mg/L)
ปลาทอง	0.1-2.0
ปลาเฉา	0.2-0.6

ชนิดปลา	ปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำ (mg/L)
ปลาไน	0.2-0.8
ปลาลิ้น	0.3-1.1
ปลาชี่สกเทศ	0.7
ปลาสลิด	1.6-3.8
ปลานิล	0.8-1.2
ปลาตะเพียนขาว	0.4-1.1

ซึ่งควรต้องระมัดระวังมากในช่วงเช้า เมื่ออุณหภูมิของน้ำในบ่อเลี้ยงปลาต่ำ จึงทำให้พฤติกรรมของปลานั้นจะลอยหัวในตอนเช้า แสดงให้เห็นว่าปริมาณออกซิเจนในบ่อเลี้ยงปลานั้นกำลังลดลง แสดงดังภาพที่ 8 จึงต้องมีการใช้งานเครื่องเติมอากาศเพื่อเพิ่มออกซิเจนในน้ำ



ภาพที่ 8 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับความต้องการออกซิเจนในการเลี้ยงปลา

[ที่มา: (Claude E. Boyd and Craig S. Tucker, 1998)]

ดังนั้นปัจจัยที่ส่งผลให้ปริมาณของออกซิเจนที่ละลายในน้ำมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับปัจจัยดังต่อไปนี้

1) อุณหภูมิ (Temperature) อุณหภูมิของน้ำเป็นปัจจัยสำคัญที่มีอิทธิพลโดยตรงและทางอ้อมต่อการดำรงชีวิตของการเลี้ยงปลา จึงจำเป็นต้องทำการตรวจสอบเพื่อหาความเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นเป็นระยะทั้งในแหล่งน้ำธรรมชาติและบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำ โดยปกติอุณหภูมิของน้ำตามธรรมชาติจะผันแปรตามภูมิอากาศซึ่งขึ้นอยู่กับฤดูกาล อุณหภูมิของร่างกายของปลาจะเปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิของน้ำและสภาพแวดล้อมที่มันอาศัยอยู่ แต่ต้องอยู่ในขอบเขตที่เหมาะสม โดยปกติอุณหภูมิภายในตัวปลาจะแตกต่างไปจากอุณหภูมิของน้ำเพียง 0.5-1 °C เหยือกปลาจะเป็นอวัยวะที่สำคัญช่วยในการถ่ายเทและรักษาระดับอุณหภูมิของร่างกาย บ่อเลี้ยงปลาธรรมชาติโดยทั่วไปตอนกลางวันที่มี

แต่จัดผิบน้ำชั้นบนจะดูดซับความร้อนไว้ได้มาก อาจมีอุณหภูมิสูงกว่า 35 °C ส่วนน้ำชั้นล่างที่มีอุณหภูมิต่ำอาจเกิดการแบ่งชั้นของอุณหภูมิตามลึกลง (Thermal stratification) แต่มักปรากฏในแหล่งน้ำที่มีขนาดใหญ่ ส่วนในบ่อเลี้ยงปลามีพื้นที่น้อย ความลึกไม่เกิน 2 m จะไม่ค่อยเกิดปรากฏการณ์ดังกล่าว ผลกระทบที่สำคัญต่อปลาเมื่อมีอุณหภูมิสูงขึ้นจะทำให้ออกซิเจนละลายน้ำได้น้อยลง ออกซิเจนจะละลายในน้ำได้ดีและปริมาณมากเมื่ออุณหภูมิน้ำลดต่ำลง แสดงดังตารางที่ 3 ปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำที่อุณหภูมิต่างๆ ณ ความดันบรรยากาศ 760 mmHg (ศักดิ์ชัย ชูโชติ, 2536) โดยอุณหภูมิที่เหมาะสมในการเลี้ยงปลานิลควรอยู่ในช่วง 25-32 °C

ตารางที่ 3 ปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำที่อุณหภูมิต่างๆ ณ ความดันบรรยากาศ 760 mmHg

อุณหภูมิ (°C)	ปริมาณออกซิเจนที่ละลาย (mg/L)
20	8.84
21	8.68
22	8.53
23	8.38
24	8.25
25	8.11
26	7.99
27	7.86
28	7.75
29	7.64
30	7.53
31	7.42
32	7.32
33	7.22
34	7.13
35	7.04

2) ความเค็ม (Salinity) ความเค็มของน้ำเป็นปริมาณของเกลือแร่ต่างๆ โดยเฉพาะโซเดียมคลอไรด์ที่ละลายอยู่ในน้ำ ซึ่งมีผลต่อระบบควบคุมปริมาณน้ำภายในร่างกายของปลา การเปลี่ยนแปลงความเค็มของน้ำอย่างกะทันหันทำให้ปลาตายได้ ปลานิลเป็นปลาที่สามารถทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงของความเค็มได้ในช่วงกว้างและทนทาน สามารถเพาะเลี้ยงได้ในน้ำที่มีความเค็ม 0-

25 ppt หากในที่มีความเค็มต่ำออกซิเจนจะละลายได้ดี และถ้าหากน้ำมีความเค็มสูงออกซิเจนจะละลายน้ำได้น้อยลง

3) การสังเคราะห์แสง ถ้าพืชน้ำและแพลงก์ตอนพืชมีการสังเคราะห์แสงมากขึ้น ปริมาณออกซิเจนในน้ำก็จะเพิ่มมากขึ้นด้วยเช่นกัน

4) การหายใจ ถ้าสัตว์น้ำ พืชน้ำ และพรรณไม้น้ำมีปริมาณหนาแน่นมาก จะทำให้มีการใช้ออกซิเจนเพิ่มมากขึ้น อาจทำให้เกิดภาวะขาดออกซิเจนและทำให้ปลาตายได้

2.3 ความคุ้มค่าทางด้านเศรษฐศาสตร์

การวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ เป็นเครื่องมือในการประเมินความเป็นไปได้ในการตัดสินใจลงทุนเพื่อให้การตัดสินใจลงทุนมีความเหมาะสมและมีประสิทธิภาพ โดยมีตัวแปรที่ใช้วิเคราะห์มีดังนี้

- มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (Net Present Value: NPV) เป็นผลต่างระหว่างมูลค่าปัจจุบันของผลประโยชน์และมูลค่าปัจจุบันของต้นทุนของโครงการเพื่อชี้ให้เห็นว่าโครงการนั้นจะให้ผลประโยชน์คุ้มค่าหรือไม่ สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 19

$$NPV = \sum_{n=0}^N \frac{(R_n - C_n)}{(1+i)^n}$$

สมการที่ 19

เมื่อ	NPV	มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (Baht)
	R_n	ผลประโยชน์หรือผลตอบแทนของโครงการในปีที่ n
	C_n	ต้นทุนหรือค่าใช้จ่ายของโครงการในปีที่ n
	i	อัตราคิดลด (Discount Rate)
	n	ปีของโครงการ

- อัตราผลตอบแทนภายใน (Internal Rate of Return: IRR) คือ อัตราผลตอบแทนที่ได้รับจากการลงทุน ซึ่งเป็นอัตราคิดลด (Discount Rate) ที่ทำให้มูลค่าปัจจุบันของผลประโยชน์เท่ากับมูลค่าปัจจุบันของต้นทุน การประเมิน “การลงทุนให้อัตราผลตอบแทนเท่าใด” เป็นการสุ่มอัตราคิดลด (Discount Rate) ที่ทำให้ NPV มีค่าเท่ากับศูนย์ กล่าวคือ ทำให้เงินสดสุทธิในอนาคตทอนมูลค่ากลับมาปัจจุบันแล้ว มีค่าเท่ากับเงินลงทุนก้อนแรก ดังนั้น IRR ควรมีความมากกว่าต้นทุนทางการเงินและยังมีความมากยิ่งขึ้น สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 20

$$\sum_{n=0}^N \frac{(R_n - C_n)}{(1+i)^n} - TIC = 0$$

สมการที่ 20

เมื่อ	IRR	อัตราผลตอบแทนภายใน (%)
-------	-----	------------------------

TIC เงินลงทุนทั้งหมด ณ เวลาปัจจุบัน

- ระยะเวลาคืนทุน (Payback Period: PB) คือ ระยะเวลาที่ผลตอบแทนสุทธิสะสม จากการค้าเนินงานมีค่าเท่ากับมูลค่าในการลงทุนทั้งหมด โครงการใดที่มีระยะเวลาลงทุนยิ่งสั้นยิ่งมีความต้องการสูง เนื่องจากสามารถนำเงินที่คืนทุนไปลงทุนในกิจการอื่นๆได้ สามารถคำนวณหาได้จากสมการที่ 21

$$PB = \frac{\text{เงินลงทุน}}{\text{ผลตอบแทนจากการลงทุน}} \quad \text{สมการที่ 21}$$

เมื่อ PB ระยะเวลาคืนทุน (year)

- ค่าดัชนีการใช้พลังงานจำเพาะ (Specific Energy Consumption: SEC) เป็นตัวชี้วัดประสิทธิภาพพลังงานในระดับรายผลผลิต โดยวัดปริมาณพลังงานที่ใช้เทียบกับหน่วยนับของผลผลิตทางกายภาพ ดังนั้นค่าดัชนีการใช้พลังงานจำเพาะ จึงสะท้อนถึงประสิทธิภาพและต้นทุนค่าใช้จ่ายด้านพลังงาน สามารถคำนวณหาได้จากสมการที่ 22

$$SEC = \frac{\text{ผลรวมพลังงานไฟฟ้าสุทธิในช่วงเวลาที่พิจารณา (kWh)}}{\text{ผลรวมผลผลิตในช่วงเวลาเดียวกัน (kg_{fish})}} \quad \text{สมการที่ 22}$$

เมื่อ SEC ค่าดัชนีการใช้พลังงานจำเพาะ (kWh/kg_{fish})

2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

L.M. Ayompe et al., 2011 ได้นำเสนอระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์แบบเชื่อมต่อกับระบบจำหน่าย (PV Grid connected system) การประเมินกำลังการผลิต 1.72 kW ในประเทศไอซ์แลนด์ โดยมีการใช้วิเคราะห์สมรรถนะระบบตามมาตรฐาน International Electrotechnical Commission: IEC 61724 ตัวแปรที่บ่งชี้ถึงสมรรถนะใช้ประกอบด้วย พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (Y_p) พลังงานไฟฟ้าที่ใช้งานจริงที่ผลิตได้จากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (Y_f) พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ในทางทฤษฎี (Y_t) สมรรถนะของระบบเซลล์แสงอาทิตย์ (PR) และ Capacity Factor (CF) จากงานวิจัยที่ได้ศึกษาพบว่า ในหนึ่งวันโดยเฉลี่ยทั้งปีแล้วความสัมพันธ์ของค่าความเข้มรังสีแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบแผงเซลล์แสงอาทิตย์ 1.241 kWh/m² พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ในทางทฤษฎีเท่ากับ 2.85 kWh/kWp·day เซลล์แสงอาทิตย์สามารถเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์เป็นไฟฟ้ากระแสตรงได้ 2.62 kWh/kWp·day ในกระบวนการเปลี่ยน

พลังงานแสงอาทิตย์เป็นไฟฟ้าจะมีการสูญเสียในเซลล์แสงอาทิตย์ ทำให้ประสิทธิภาพเฉลี่ยของเซลล์แสงอาทิตย์อยู่ที่ 14.9% พลังงานไฟฟ้าที่ถูกนำไปใช้งานจริงของระบบโดยผ่านเครื่องแปลงกระแสไฟฟ้าเท่ากับ 2.41 kWh/kWp-day พบว่ามีการสูญเสียในระบบในรูปของการเปลี่ยนพลังงาน เช่น สูญเสียในเครื่องแปลงกระแสไฟฟ้าในสายไฟหรือการเชื่อมต่อในจุดต่างๆ โดยเครื่องแปลงกระแสไฟฟ้ามีประสิทธิภาพ 89.2% ทำให้ประสิทธิภาพรวมของในการเชื่อมต่อเข้าระบบจำหน่ายเท่ากับ 12.6% ดังแสดงตารางที่ 4 แสดงตัวอย่างการเปรียบเทียบสมรรถนะของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์แบบต่อกับระบบจำหน่ายที่มีการวิเคราะห์สมรรถนะระบบตาม IEC 61724 ในการเปรียบเทียบการผลิตไฟฟ้าทั้งหมดจะเห็นว่าเป็นไปในทิศทางเดียวกัน เพราะในทางการผลิตจริงแล้วระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ไม่สามารถผลิตไฟฟ้าตามกำลังการผลิตได้ทั้งหมด เนื่องมาจากการสูญเสียในจุดต่าง ๆ

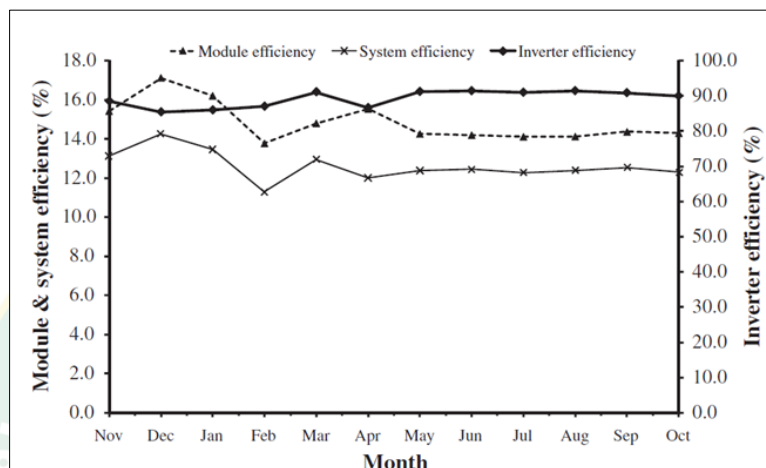
ตารางที่ 4 การเปรียบเทียบสมรรถนะระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์แบบต่อกับระบบจำหน่าย

สมรรถนะ	สถานที่ตั้ง				
	Iceland*	Thailand*	Thailand**	Brazil*	Norway*
Nominal power (kWp)	1.72	6.52	1.0	2.2	2.07
Array yield (kWh/kWp-day)	2.62	3.60	4.22	4.90	2.73
Final yield (kWh/kWp-day)	2.41	3.23	3.42	4.60	2.55
Reference yield (kWh/kWp-day)	2.85	4.25	5.00	5.60	2.80
Performance ratio (%)	81.5	77.00	75.00	82.9	83.30
Capacity factor (%)	10.1	-	-	19.2	10.58
PV module efficiency (%)	12.6	9.95	-	13.3	12.7
Inverter efficiency (%)	89.2	-	-	94.6	88.8
System efficiency (%)	14.9	-	-	12.6	11.6

หมายเหตุ Iceland* (L.M. Ayompe et al., 2011) Thailand* (นิพนธ์ เกตุจ้อย และคงฤทธิ แม้นศิริ, 2010) Thailand** (ศศิวิมล ทรงไตร และคณะ, 2558) Brazil* (Lutero Carmo de Lima et al., 2017) Norway* (Muyiwa S. Adaramola and Emil E.T. Vågnes., 2015)

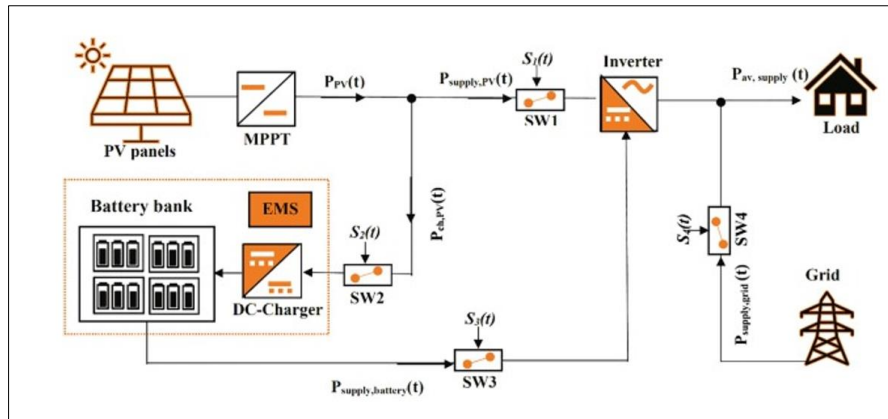
L.M. Ayompe et al., 2011 ได้ทำการวัดประสิทธิภาพการทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์แบบต่อกับระบบจำหน่ายบนหลังคาขนาด 1.72 kW เพื่อประเมินความเหมาะสมของระบบ PV สำหรับการติดตั้งในอาคารที่อยู่อาศัยในไอร์แลนด์ โดยทำการเก็บข้อมูลเดือนพฤศจิกายน 2551 ถึงตุลาคม 2552 มีการติดตั้งแผงขนาด 215 Wp จำนวน 8 แผง จากภาพที่ 9 พบว่าประสิทธิภาพสูงสุดและต่ำสุดของแผงเซลล์แสงอาทิตย์และระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์

ในเดือนธันวาคมและกุมภาพันธ์มีประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์เท่ากับ 13.8% และ 17.1% ตามลำดับ และระบบเซลล์แสงอาทิตย์ในเดือนกุมภาพันธ์และเดือนธันวาคม 11.3% และ 14.3% ตามลำดับ ประสิทธิภาพอินเวอร์เตอร์สูงสุดที่เดือนมิถุนายนและสิงหาคม 91.5% ต่ำสุดที่เดือนธันวาคม 85.4% ทำให้โดยเฉลี่ยใน 1 ปีมีประสิทธิภาพแผงเซลล์แสงอาทิตย์และระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์รวมทั้งประสิทธิภาพของอินเวอร์เตอร์อยู่ 14.9% 12.6% และ 89.2% ตามลำดับ



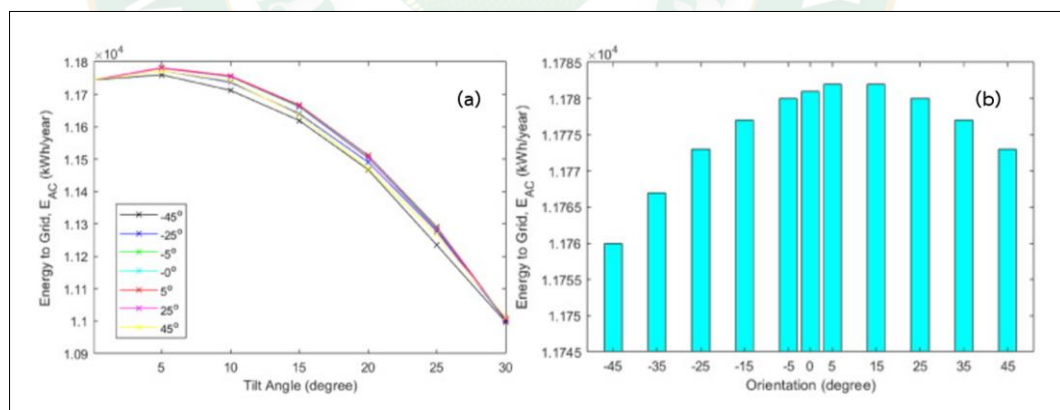
ภาพที่ 9 การเปลี่ยนแปลงรายเดือนของประสิทธิภาพแผงเซลล์แสงอาทิตย์และอินเวอร์เตอร์

Masoume Shabani et al., 2021 ได้นำเสนอการจำลองปรับขนาดและการเพิ่มประสิทธิภาพของระบบแบตเตอรี่ PV ที่เชื่อมต่อกับไฟฟ้าพื้นฐานจากระบบที่มีการจำลองระบบพลังงานไฮบริด แสดงดังภาพที่ 10 ระบบการจัดการพลังงาน (EMS) นี้ประกอบด้วยแผงเซลล์แสงอาทิตย์และตัวควบคุมการประจุกระแสไฟฟ้า MPPT แบตเตอรี่และผ่านอุปกรณ์แปลงกระแสไฟฟ้า โดยมีการกำหนดสถานการณ์จำลอง 2 กรณี ในกรณี 1 มีการใช้แบตเตอรี่แบบทั่วไป กรณี 2 มีการใช้แบตเตอรี่ตามลักษณะเฉพาะของแรงดันไฟภายใต้สภาวะการทำงานที่หลากหลาย พบว่าในกรณี 1 วัฏจักรวงจรชีวิตที่สูงขึ้นและต้องการความจุของแบตเตอรี่ที่มากขึ้น เมื่อเทียบกับกรณี 2 ภายใต้ตัวแปรการออกแบบเดียวกัน ตัวอย่างเช่น ระบบแบตเตอรี่มีความต้องการเพิ่มประสิทธิภาพ 30% ตามกรณีที่ 2 ส่งผลให้มีความจุของแบตเตอรี่น้อยลง 218.7 kWh เมื่อเทียบกับกรณี 1 ซึ่งนำไปสู่การประเมินความจุของแบตเตอรี่สูง 242.8 kWh ในกรณีที่ 2 ต้นทุนของอายุการใช้งานแบตเตอรี่จะลดลง 9.4% เมื่อเทียบกับกรณี 1 ดังนั้นการศึกษานี้แบตเตอรี่ที่มีประสิทธิภาพ ความแม่นยำจะเป็นประโยชน์มากกว่าในเชิงเทคโนโลยีและนำไปสู่การปรับขนาดแบตเตอรี่ที่เหมาะสมยิ่งขึ้น



ภาพที่ 10 ไดอะแกรมระบบไฮบริด PV-Battery

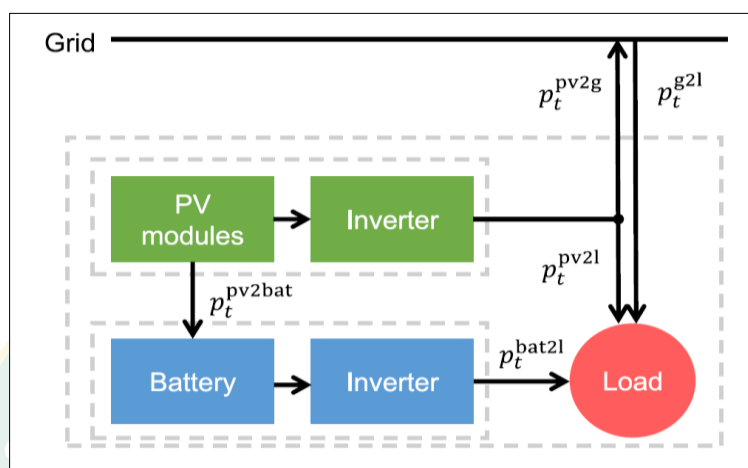
N. Anang et al., 2021 ได้นำเสนอระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับระบบไฟฟ้าพื้นฐานบนหลังคาขนาด 7.8 kWp ประเทศมาเลเซีย ได้มีการหาทิศทาง การติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์และมุมเอียงที่ดีที่สุดเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงาน โดยใช้เมื่อใช้ซอฟต์แวร์ PVsyst 7.1 ทำการจำลองโดยการเปลี่ยนการวางแนวจาก -45° ถึง 45° และสำหรับแต่ละทิศทางมุมเอียงตั้งแต่ 0° ถึง 30° จากภาพที่ 11 พบว่าเมื่อมุมเอียงมีการทำมุมที่เพิ่มมากขึ้นจะทำให้กำลังการผลิตไฟฟ้าลดต่ำลงไปด้วย ดังนั้นการวางแผงด้วยมุมเอียงที่ดีที่สุดคือ 5° การวางแนวที่ดีที่สุดคือ $+5^\circ$ หันไปทางทิศใต้ ทำให้การผลิตพลังงานไฟฟ้าตลอดทั้งปีนั้นเพิ่มขึ้นได้ถึง 4.8%



ภาพที่ 11 พลังงานไฟฟ้าเทียบกับมุมเอียงที่ต่างกัน (a) และพลังงานไฟฟ้าเทียบกับมุมเอียง 5° (b)

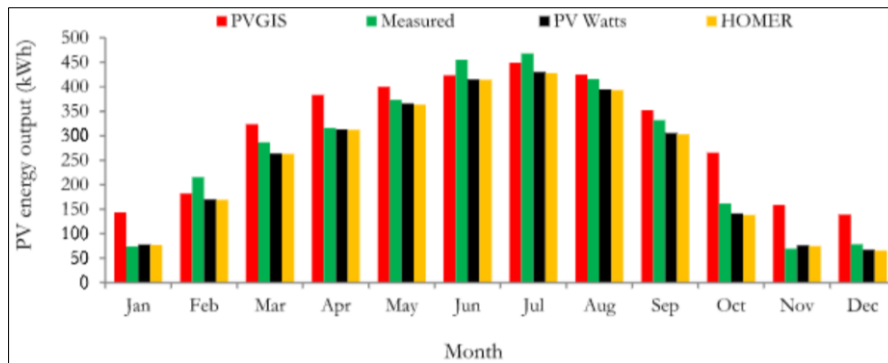
Xuejiao Han et al., 2022 ได้นำเสนอแบบจำลองการเพิ่มประสิทธิภาพทางเทคโนโลยีและเศรษฐศาสตร์เพื่อวิเคราะห์ความเป็นไปได้ทางเศรษฐกิจของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์แสงอาทิตย์และแบตเตอรี่ (PV-Battery: PVB) โดยรูปแบบจำลองประกอบด้วย 5 ส่วน คือ แผงผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ ระบบแบตเตอรี่ อินเวอร์เตอร์ไฮบริด ระบบไฟฟ้าพื้นฐาน (Grid) และโหลดการใช้งาน แสดงดังภาพที่ 12 พบว่าการลงทุนของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์เพียงอย่าง

เดี่ยวนี้อาจจำกัดทางด้านของขนาดที่พิกบนหลังคา ดังนั้นการนำระบบ PVB เข้ามาใช้ใช้งานของกลุ่มเฉพาะที่อยู่อาศัยนั้นความต้องการในการลงทุนนั้นมีความน่าสนใจของการลงทุนเนื่องด้วยมีระยะการคืนทุนที่ต่ำกว่า 10 ปี อีกทั้งปัจจุบันยังมีการพัฒนาของต้นทุนการติดตั้งจึงทำให้ประสิทธิภาพตรงตามความต้องการของการใช้งาน



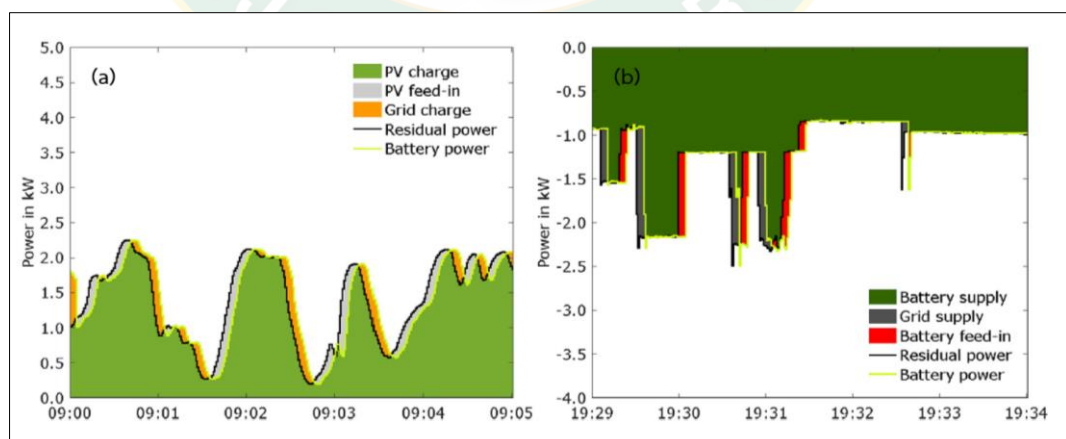
ภาพที่ 12 ระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์แสงอาทิตย์และแบตเตอรี่ (PV-Battery: PVB)

Aziz Haffaf et al., 2021 ได้นำเสนอการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์เชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้าพื้นฐานขนาด 2.4 kWp ประเทศฝรั่งเศส โดยมีการใช้ซอฟต์แวร์จำลองสามโปรแกรม (PVGIS, PV Watts และ HOMER) จากภาพที่ 13 พบว่า ในเดือนมกราคมมีผลผลิตต่ำสุด 74.03 kWh จนสูงสุดเดือนกรกฎาคม 468.44 kWh โดยมีการผลผลิตพลังงาน 3,246.46 kWh/year จากการจำลองพลังงานไฟฟ้าสูงสุดของระบบ PV ของเดือนกรกฎาคมที่ 448.9 kWh ในการใช้เครื่องมือ PVGIS ผลผลิตต่ำในเดือนธันวาคมอยู่ที่ 138.7 kWh เครื่องมือ PV Watts พลังงานที่ได้ในแต่ละเดือนจะอยู่ที่สูงสุดในเดือนมีนาคม 430 kWh และต่ำในเดือนธันวาคม 67 kWh สำหรับ HOMER ผลผลิตต่ำในเดือนธันวาคม 66 kWh และสูงสุดเดือนกรกฎาคม 428 kWh ผลการจำลองที่ได้จากซอฟต์แวร์ทั้งสามถูกนำไปเปรียบเทียบกับประสิทธิภาพจากการวัดของระบบ ผลลัพธ์ของ PV Watts และ HOMER นั้นใกล้เคียงกัน แต่ผลลัพธ์ที่โดยซอฟต์แวร์ PVGIS นั้นสูงไปเมื่อเทียบกับประสิทธิภาพที่วัด



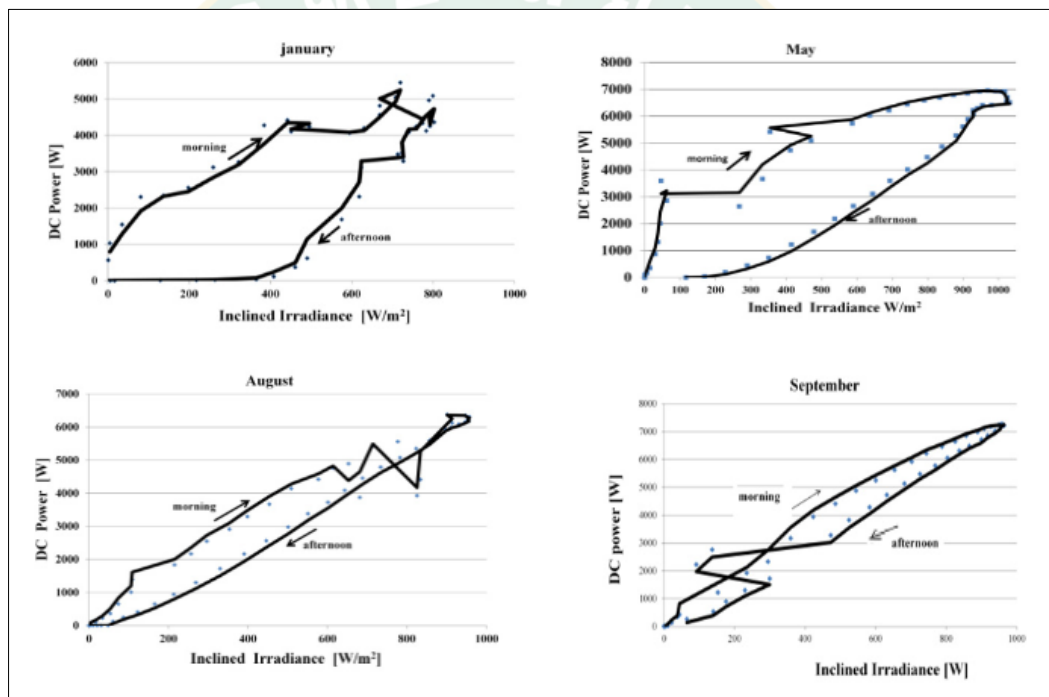
ภาพที่ 13 การเปรียบเทียบพลังงานไฟฟ้าจากการวัดและการจำลอง

Sonal Gaurav et al., 2015 ได้นำเสนอการศึกษาการจำลองที่วิเคราะห์พฤติกรรมการตอบสนองที่เกิดจากการสูญเสียของระบบ Solar PV-Battery ที่เชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้าพื้นฐาน จากภาพที่ 14 แสดงพฤติกรรมพลังงานไฟฟ้าที่เหลือของ Solar PV และพลังงานส่วนเกินของแบตเตอรี่ ซึ่งความแปรปรวนของพลังงานไฟฟ้าของ Solar PV เกิดขึ้นจากความแปรปรวนของอากาศ การทำงานของแบตเตอรี่ (Battery power) จะตอบสนองการทำงานจากการใช้ไฟฟ้าส่วนเกินของระบบ Solar PV หลังจากพลังงานไฟฟ้าลดลงจึงเกิดการดูดพลังงานจาก Grid (Grid charge) และเกิดการป้อนพลังงานจาก Solar PV (PV Feed-in) เข้าไปในระบบอีกหนึ่งรอบ ในทางกลับกันของการคายประจุไฟฟ้าจากความต้องการของโหลด พลังไฟฟ้าส่วนเกินจะลดต่ำกว่าพลังงานไฟฟ้าจากแบตเตอรี่ และความแตกต่างนั้นมาจากระบบ Grid ที่เพิ่ม เมื่อเกิดการสะสมมากขึ้นจะทำให้เกิดการย้อนกลับไฟฟ้าของระบบ Grid เกิดการผันผวนของโหลด ดังนั้นเมื่อโหลดมีความต้องการพลังงานไฟฟ้าที่สูงอย่างกะทันหัน พลังงานไฟฟ้าจากแบตเตอรี่จึงไม่สามารถคายประจุได้อย่างสมบูรณ์



ภาพที่ 14 กระแสไฟฟ้าระหว่างกระบวนการชาร์จ (a) และการคายประจุ (b)

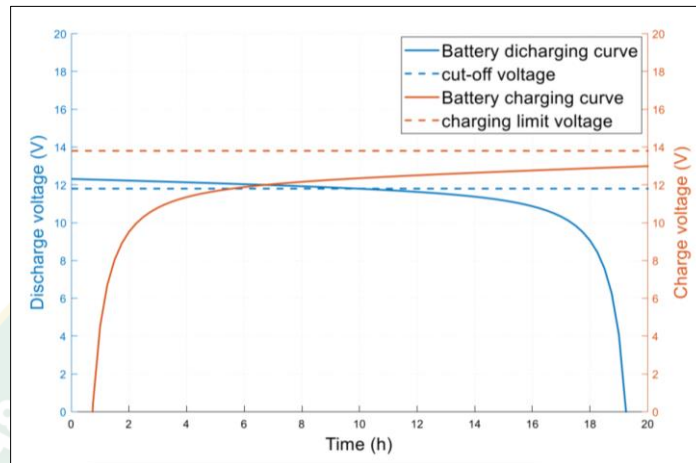
F. Cherfa et al., 2015 ได้นำเสนอศึกษาการผลิตกำลังไฟฟ้าของระบบไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ที่เชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้าพื้นฐานในแต่ละฤดูฤดูกาล (มกราคมสำหรับฤดูหนาว พฤษภาคมสำหรับฤดูใบไม้ผลิ สิงหาคมสำหรับฤดูร้อนและกันยายนสำหรับฤดูใบไม้ร่วง) ในประเทศแอลเจียร์ กำลังการผลิตที่ 9.540 kWp ในตลอดทั้งปีความเข้มรังสีแสงอาทิตย์จะแตกต่างกันออกไปโดยอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมเฉลี่ยที่ 25 °C ทำให้ในฤดูร้อนอุณหภูมิแผงสูงถึง 60 °C ที่ความเข้มรังสีแสงอาทิตย์ 1,000 W/m² จากภาพที่ 15 แสดงกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ที่ขึ้นอยู่กับความเข้มของรังสีแสงอาทิตย์ เมื่อแสงอาทิตย์เริ่มต้นที่ 100 W/m² ระบบจะเริ่มทำการผลิตกระแสไฟฟ้านั้นระหว่างการทำงานนั้น อุณหภูมิของสภาพแวดล้อมเริ่มเพิ่มสูงขึ้นโดยเปลี่ยนแปลงไปตามความสูงของดวงอาทิตย์ในช่วงฤดูกลางส่งผลให้ประสิทธิภาพของแผงลดลง



ภาพที่ 15 กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ในแต่ละฤดูฤดูกาล

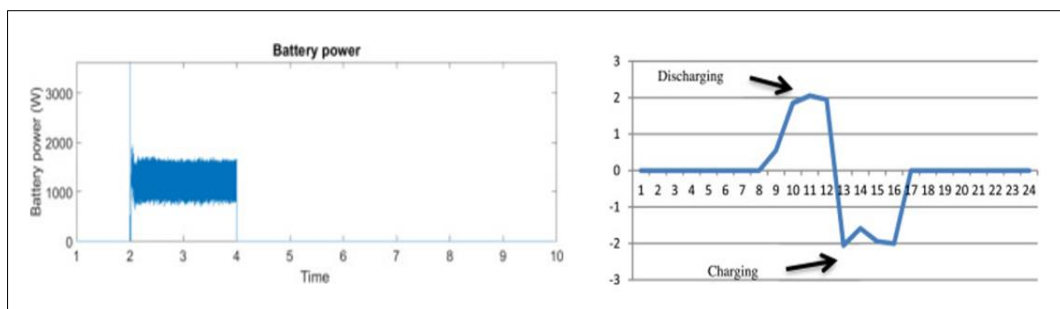
Asmae Chakir et al., 2020 ได้นำเสนอระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ที่เชื่อมกับระบบไฟฟ้าพื้นฐานและแบตเตอรี่โดยมีการพิจารณาการคายประจุไฟฟ้าของแบตเตอรี่และการจำกัดทางด้านของพลังงานไฟฟ้าเพื่อช่วยยืดอายุแบตเตอรี่ โดยพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าต่างๆ ได้แก่ กระแสความจุ แรงดันไฟ และสถานะประจุ ในทุกสภาวะการทำงาน ไม่ควรละเลยอุณหภูมิ เวลาใช้งาน และผลกระทบของกระแสไฟฟ้าที่ต้องการ ยิ่งชาร์จกระแสไฟสูงเท่าใดเวลาในการกักเก็บพลังงานก็จะสั้นลงเท่านั้น แต่กระแสไฟของการชาร์จต้องไม่เกินค่าสูงสุดเพื่อป้องกันไม่ให้แบตเตอรี่เสื่อมสภาพ จากภาพที่ 16 การใช้เทคนิคการชาร์จประจุไฟฟ้าของแบตเตอรี่ แรงดันจะเริ่มเพิ่มขึ้นจนกว่าจะถึง

แรงดันไฟฟ้าลอย มีฉะนั้นในระหว่างการคายประจุแรงดันไฟฟ้าจะลดลงตามเวลาและกระแสไฟฟ้าที่ต้องการ สำหรับแบตเตอรี่ที่มีแรงดันไฟฟ้าปกติ 12 V แรงดันไฟฟ้าที่ระบบควบคุมแนะนำ 11.8 V ซึ่งสอดคล้องกับ SOC_{min} 50% อย่างไรก็ตามในระหว่างท้ายของการชาร์จนั้นแรงดันจะถูกปรับให้เป็นค่า float โดยทั่วไปจะอยู่ที่ 2.35-2.45 V ในกรณีของการศึกษาจะอยู่ที่ประมาณ 13.8 V



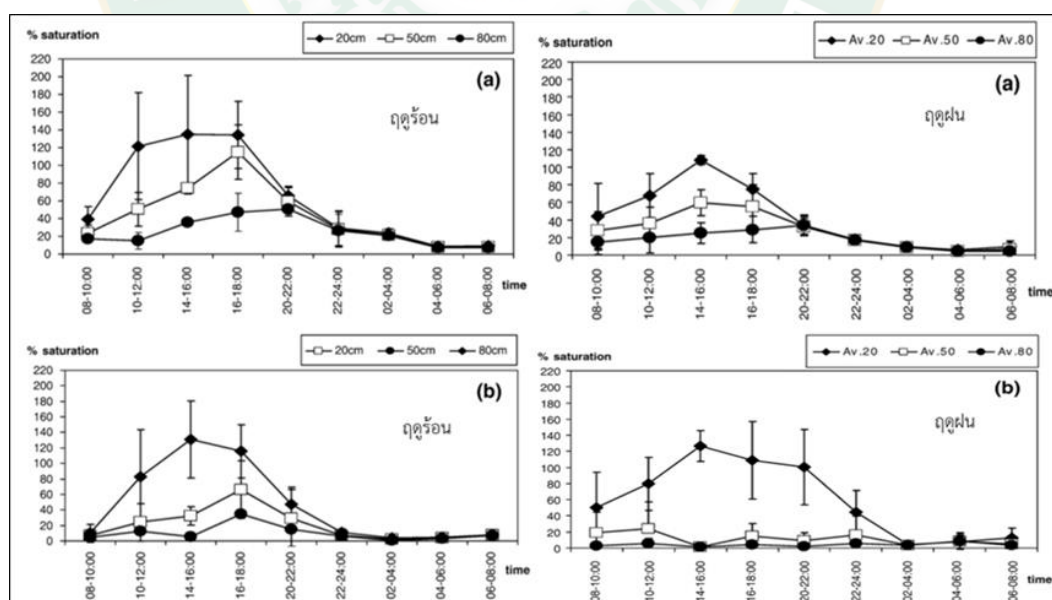
ภาพที่ 16 การชาร์จประจุและการคายประจุไฟฟ้าของแบตเตอรี่

Ismail El Kafazi et al., 2020 ได้นำเสนอระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ขนาด 2.4 kW โดยมีการกักเก็บพลังงานไฟฟ้าส่วนเกินไว้ในแบตเตอรี่เพื่อใช้ในห้วงแลปฏิบัติการณ์เพื่อลดต้นทุนการใช้ไฟฟ้าจากระบบไฟฟ้าพื้นฐาน มีการทดสอบตั้งแต่เวลา 08.00-18.00 น. โดยใช้ไฟฟ้าระบบรวมคือ จากระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ ระบบแบตเตอรี่ และระบบไฟฟ้าพื้นฐาน แต่เมื่อระบบมีกำลังการผลิตที่เกินกว่าความต้องการจะมีการขายไฟฟ้าเข้าในระบบไฟฟ้าพื้นฐาน จากความต้องการของโหลดสูงสุดการใช้งานมีการใช้ไฟฟ้าที่ 2.94-3.19 kW จากภาพที่ 17 พบว่าแบตเตอรี่จะมีการชาร์จประจุไฟฟ้าในช่วงเวลา 08.00-10.00 น. จากนั้นแบตเตอรี่จะคายประจุเมื่อพลังงานที่เก็บไว้จากระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์เหลือน้อยและมีการชาร์จประจุในขณะที่มีกำลังการผลิตจากระบบ Solar PV สูง



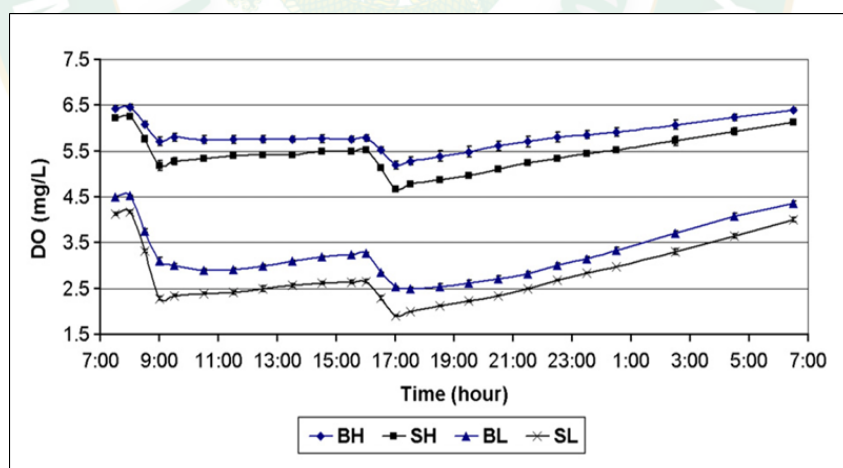
ภาพที่ 17 ช่วงเวลาการคายประจุและชาร์จไฟฟ้าของแบตเตอรี่

Minh Phan-Van et al., 2008 ได้นำเสนอประเมินผลกระทบของ 3 ปัจจัยที่มีผลต่ออุณหภูมิของน้ำและออกซิเจนที่ละลายในน้ำ ได้แก่ ความลึกของน้ำ (20, 50 และ 80 cm) ฤดูกาล (ฤดูร้อนและฤดูฝน) และการผลิตปลา (มีปลาและไม่มีปลา) ทำการวิเคราะห์สถิติโดย Multifactor-ANOVA พบว่าในบ่อเลี้ยงปลานิลและไม่มีปลานิล อุณหภูมิน้ำเฉลี่ยในช่วงฤดูร้อนเปลี่ยนแปลงจาก 29.4 ± 0.6 °C เป็น 30.8 ± 0.9 °C และในช่วงฤดูฝน 28.7 ± 0.4 °C เป็น 29.1 ± 0.5 °C จะเห็นว่าฤดูฝนไม่มีความแตกต่างของอุณหภูมิน้ำในบ่อแม้จะมีปัจจัยการผลิตปลาและปัจจัยความลึกของน้ำ แต่ในฤดูร้อนมีการแบ่งชั้นความร้อนระหว่างพื้นผิวและชั้นล่าง การวิเคราะห์ ANOVA แสดงให้เห็นว่าทั้งสามปัจจัยมีผลอย่างมากต่ออุณหภูมิ แต่สำหรับปริมาณออกซิเจนละลายในน้ำ (DO) พบว่าปัจจัยการผลิตปลาและความลึกของน้ำส่งผลต่อความอิ่มตัวของปริมาณออกซิเจนที่ละลายได้ (%DO saturation) เนื่องจากการทำกิจกรรมต่าง ๆ ของปลา ในช่วงฤดูร้อนระหว่าง 08.30-10.00 น. ที่ระดับความลึก 20, 50 และ 80 cm มีความอิ่มตัวของปริมาณออกซิเจนที่ละลายได้เฉลี่ยของบ่อเลี้ยงปลาอยู่ระหว่าง 31-62%, 27-52% และ 8-14% คิดเป็นปริมาณออกซิเจนละลายในน้ำประมาณ 2.38-4.77 mg/L, 2.08-4 mg/L และ 0.62-1.08 mg/L ตามลำดับ จะเห็นว่าเมื่อความลึกลดลงทำให้ปริมาณออกซิเจนละลายในน้ำลดลงตามไปด้วย [ความอิ่มตัวของปริมาณออกซิเจนที่ละลายได้ (%DO saturation) 100% เทียบเท่ากับปริมาณออกซิเจนละลายในน้ำ (DO) เท่ากับ 8.0 mg/L, 50%DO saturation เทียบเท่า DO เท่ากับ 3.8 mg/L และ 25%DO saturation เทียบเท่า DO เท่ากับ 2 mg/L ตามลำดับ ที่อุณหภูมิน้ำ 29-30 °C] แสดงดังภาพที่ 18



ภาพที่ 18 การแบ่งชั้นของความอิ่มตัวของ DO ในช่วงฤดูร้อนและฤดูฝนที่ระดับความลึก 20, 50 และ 80 cm (a) ในบ่อที่มีปลาและ (b) ในบ่อที่ไม่มีปลา

An Tran-Duy et al., 2008 ได้นำเสนอปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำต่อการเจริญเติบโตของปลาไนล์ โดยการกำหนดการเติมปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำด้วยเครื่องเติมอากาศแบบหัวทรายด้วยการปรับอัตราการไหลด้วยปั๊มที่ 6 L/min ให้ค่อย ๆ ลดลงในเวลาที่ต่อเนื่อง [DO < 3.0 mg/L ถือว่าค่า DO ต่ำ (L) และหาก DO > 5.0 mg/L ถือว่าค่า DO สูง (H) ที่อุณหภูมิของน้ำในถัง 32.3 ± 0.6 °C] ส่งผลถึงผลกระทบต่อความสัมพันธ์ขนาดปลาและปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำมีการเปลี่ยนแปลงอย่างฉับพลัน [เมื่อปลาขนาดเล็กมีปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำต่ำ (SL) ปลาขนาดใหญ่มีปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำต่ำ (BL) และปลาใหญ่มีปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำสูง (BH)] การเปลี่ยนแปลงเหล่านี้มีนัยสำคัญในถังที่มีปลาขนาดเล็กมากกว่ากับปลาใหญ่ที่ระดับปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำเดียวกันและในถังปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำต่ำกว่าในถังปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำสูงในระดับน้ำหนักปลาเดียวกัน ค่าเฉลี่ยปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำในถังปลาขนาดเล็กมีแนวโน้มลดลงตลอด พบว่าปลาขนาดเล็ก (S) มีการกินอาหารและการเจริญเติบโตต่อน้ำหนักตัวที่เพิ่มขึ้นมากกว่าปลาขนาดใหญ่ (B) ที่ระดับปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำเท่ากัน ปลาใหญ่ที่มีปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำสูงจะกินในช่วงบ่ายมากกว่าในตอนเช้าซึ่งตรงกันข้ามกับปลาขนาดเล็กมีปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำต่ำจะกินอาหารช่วงเช้ามากกว่าช่วงบ่าย แสดงดังภาพที่ 19 (B = น้ำหนักปลาตัวใหญ่หนึ่งตัว 144-251 g, L = น้ำหนักปลาตัวเล็กหนึ่งตัว 21-66 g)



ภาพที่ 19 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของความเข้มข้นของออกซิเจนละลายน้ำ (DO) และขนาดปลา

วรพงษ์ นลินานนท์ และคณะ, 2560 ได้เปรียบเทียบการเลี้ยงปลาไนล์ในกระชังแบบทั่วไปและแบบระบบหมุนเวียนน้ำร่วมกับเติมอากาศขนาด 1.5 x 2.5 x 0.9 m ในระบบการเติมอากาศ (air lift pump) จากเครื่องปั๊มลมขนาด 180 W มีการเปิดวันละ 22 hr และปิด 2 hr ช่วงการให้อาหารปลา คือ 8.30 น. และ 16.30 น. จากน้ำหนักการปล่อยเริ่มต้นของระบบปกติกับระบบเติมอากาศเฉลี่ย

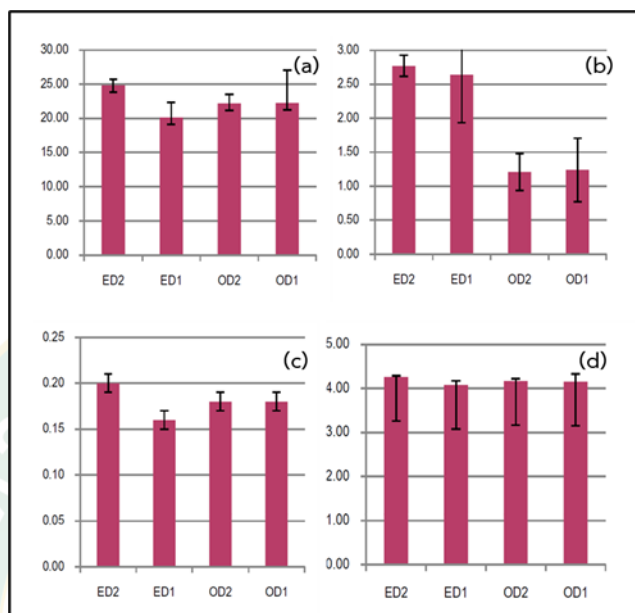
ต่อตัว 0.25 ± 0.01 g เมื่อทำการเลี้ยง 12 สัปดาห์ น้ำหนักเฉลี่ยของปลาสุดท้ายของระบบเติมอากาศเพิ่มขึ้น 23 ± 0.47 g ทำให้การเพิ่มของน้ำหนักอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะประมาณ (SGR) $19\%/day$ พบว่าคุณภาพน้ำในการเลี้ยงปลาในระบบปกติมีปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำ (DO) ระหว่าง $1.9-5.8$ mg/L ซึ่งคุณภาพด้อยกว่าการเติมอากาศในระบบซึ่งมีปริมาณออกซิเจนที่ละลายอยู่ในน้ำที่เพิ่มขึ้นเป็น 7.90 ± 0.84 มีค่าเฉลี่ยที่ดีกว่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) กับคุณภาพน้ำในกระชังทั่วไป การเจริญเติบโตการเปลี่ยนแปลงแสดงดังตารางที่ 5 ในทางด้านเศรษฐศาสตร์ในการเลี้ยงปลาร่วมกับเครื่องเติมอากาศมีต้นทุนผันแปรจากค่าไฟฟ้าของเครื่องเติมอากาศเพิ่มขึ้น ในขณะที่การเจริญเติบโตดีกว่าการเลี้ยงปลานิลในกระชังทั่วไปถึง 35.86%

ตารางที่ 5 การเจริญเติบโตการเลี้ยงปลานิลในกระชังระบบปกติและระบบร่วมกับเครื่องเติมอากาศ

ตัวแปร	กระชังในระบบ	
	ปกติ	ร่วมกับเครื่องเติมอากาศ
น้ำหนักเฉลี่ยเริ่มต้น (g)	0.25 ± 0.01	0.25 ± 0.01
น้ำหนักเฉลี่ยสุดท้าย (g)	41.48 ± 2.05	64.67 ± 2.52
ความยาวเริ่มต้น (cm)	1.10 ± 0.10	1.10 ± 0.10
ความยาวสุดท้าย (cm)	12.32 ± 1.89	15.16 ± 1.63
น้ำหนักเฉลี่ยที่เพิ่มต่อวัน (ADG: g/day)	0.46 ± 0.05	0.71 ± 0.02
อัตราการเจริญเติบโตจำเพาะ (SGR: %/day)	1.12 ± 0.14	1.31 ± 0.12
ปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำ (ml/L)	5.20 ± 1.21	7.90 ± 0.84
ค่าความเป็นกรด-ด่าง	8.67 ± 0.08	8.60 ± 0.16
อุณหภูมิของน้ำในกระชัง ($^{\circ}C$)	28.20 ± 0.54	28.00 ± 0.35

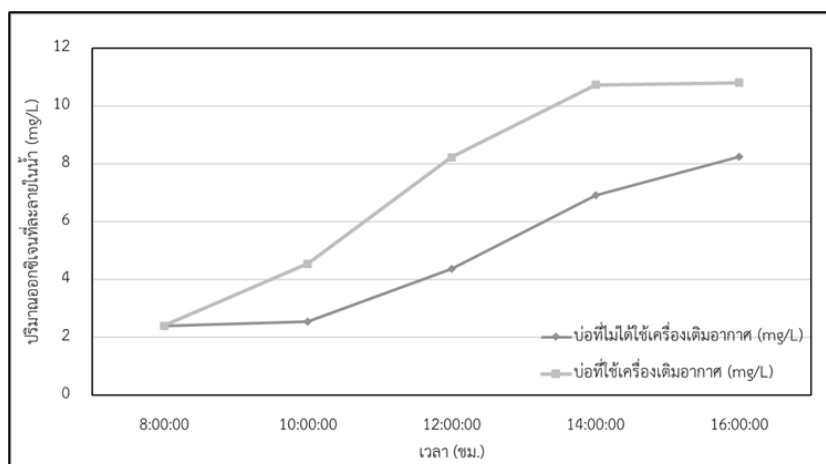
ณรงค์ กมลรัตน์, 2560 ได้ทำการศึกษารูปแบบการให้อาหารที่เหมาะสมในการเลี้ยงปลานิลในกระชังแขวนในบ่อดิน เพื่อลดต้นทุนค่าอาหารของการเลี้ยง จากน้ำหนักปลานิลเริ่มต้น 0.15 ± 0.22 g ปล่อยจำนวน 200 fish/ m^3 โดยแบ่งการทดลองเป็น 2 กลุ่ม คือ การให้อาหารทุกวัน อาหารวันละ 2 มื้อ (ED2) และ 1 มื้อ (ED1) และวันเว้นวัน อาหารวันละ 2 มื้อ (OD2) และ 1 มื้อ (OD1) เป็นเวลา 4 เดือน พบว่าน้ำหนักเฉลี่ยสุดท้ายที่เพิ่มขึ้นของปลาแต่ละกลุ่มคือ 24.67 ± 0.88 , 20.00 ± 2.16 , 22.03 ± 1.32 และ 22.10 ± 4.8 g ตามลำดับ ค่าอัตราการเติบโตเฉลี่ยต่อวัน เท่ากับ 0.2 ± 0.01 , 0.16 ± 0.02 , 0.18 ± 0.01 และ 0.18 ± 0.04 g/day ค่าอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะอยู่ที่ 4.26 ± 0.03 , 4.08 ± 0.09 , 4.16 ± 0.05 และ 4.15 ± 0.17 ซึ่งไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ ($P > 0.05$) ส่วนค่าอัตราการเปลี่ยนอาหารเป็นเนื้อ 2.77 ± 0.16 , 2.64 ± 0.71 , 1.21 ± 0.27 และ 1.24 ± 0.47 ตามลำดับ พบว่าแต่ละกลุ่มมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$) โดยกลุ่มที่ให้อาหารวันเว้นวันให้

ค่าต่ำกว่ากลุ่มที่ให้อาหารทุกวัน ทำให้การให้อาหารเว้นวันโดยให้อาหารวันละ 1-2 มื้อมีอัตราการเจริญเติบโตไม่แตกต่างจากปลาที่ให้อาหารทุกวัน จึงทำให้ต้นทุนค่าอาหารปลาแบบวันเว้นวันมีต้นทุนถูกกว่า 193.50 บาท คิดเป็น 48.40% แสดงดังภาพที่ 20



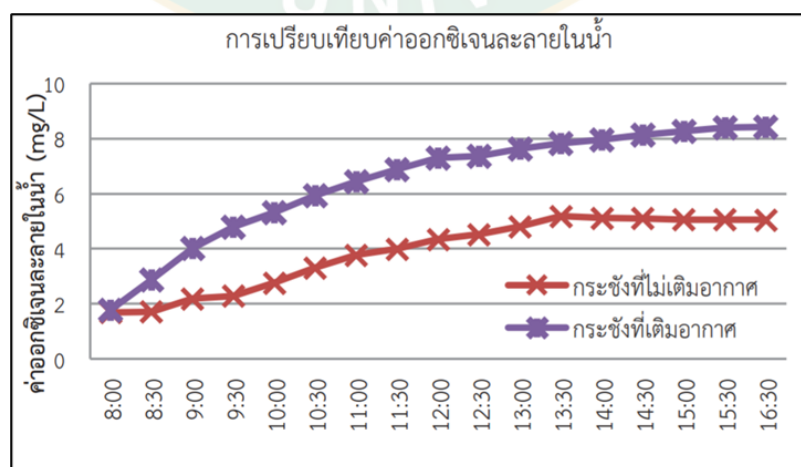
ภาพที่ 20 (a) น้ำหนักที่เพิ่มขึ้น (b) ค่าอัตราการเปลี่ยนอาหารเป็นเนื้อ
(c) ค่าอัตราการเจริญเติบโตเฉลี่ย (d) ค่าอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะ

ปรีชา มหาไม้ และคณะ, 2557 การออกแบบสร้างเครื่องเติมอากาศที่ผิวน้ำแบบกังหันขนาด เล็กสำหรับเพิ่มปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำนำไปใช้กับบ่อเลี้ยงปลาที่เป็นบ่อดินขนาด 20 m² โดยใช้พลังงานจากแสงอาทิตย์ขนาด 80 W และพลังงานจากไฟฟ้าที่เปลี่ยนจากพลังงานกลสำหรับหมุน ใบกังหัน ใช้เวลาในการทดสอบ 8.00-16.00 น. และวัดปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำทุก 2 ชั่วโมง พบว่าบ่อที่ไม่ใช้เครื่องเติมอากาศวัดปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำได้ 2.41 2.45 4.38 6.92 และ 8.26 mg/L ตามลำดับ ซึ่งน้อยกว่าบ่อที่มีการเติมอากาศ โดยบ่อที่มีการเติมอากาศนั้นมีปริมาณ ออกซิเจนที่ละลายในน้ำ 2.41 4.56 8.23 10.73 และ 10.81 mg/L ตามลำดับ บ่อที่มีการเติมอากาศ มีปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำมากกว่าบ่อที่ไม่เติมอากาศเฉลี่ยต่อชั่วโมงเพิ่มขึ้น 1.537 mg/L แสดงดังภาพที่ 21



ภาพที่ 21 การเปรียบเทียบปริมาณออกซิเจนละลายในน้ำ

ซึ่งเป็นแนวทางเดียวกับ พงษ์พันธ์ ราชภักดี และรุ่งโรจน์ จินด้วง, 2562 ได้การพัฒนาเครื่องเติมอากาศผิวน้ำด้วยพลังงานแสงอาทิตย์สำหรับการเลี้ยงปลาในกระชัง แสดงดังภาพที่ 22 เพื่อเพิ่มปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำให้กับปลาในลุ่มแม่น้ำตาปี โดยการออกแบบและสร้างเครื่องกักกันทำงานอัตโนมัติด้วยแผงเซลล์แสงอาทิตย์ขนาด 250 W แบตเตอรี่ 2 ลูก จำนวน 2 ก้อน เข้าใช้งานกับโพลีมอเตอร์ (DC) 24 V ทำการทดสอบตั้งแต่วันที่ 08.00 – 16.30 น. เก็บค่าทุก 30 นาที พบว่ากำลังไฟฟ้าจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์สูงสุด 198.56 W สามารถประจุพลังงานได้ 176 W มีแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าเฉลี่ย 26.65 V และ 6.6 A ตามลำดับ ในช่วงเวลา 12.30-13.00 น. เมื่อตรวจหาปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำพบว่ากระชังที่ไม่มีการเติมอากาศที่มีปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำต่ำกว่ากระชังที่เติมอากาศ โดยกระชังที่ไม่ได้เติมอากาศมีปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำต่ำสุด 1.70 mg/L และสูงสุดที่ 5.05 mg/L เมื่อพิจารณากระชังที่มีการเติมอากาศพบว่ามีปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำต่ำสุด 1.78 mg/L และสูงสุดที่ 8.42 mg/L



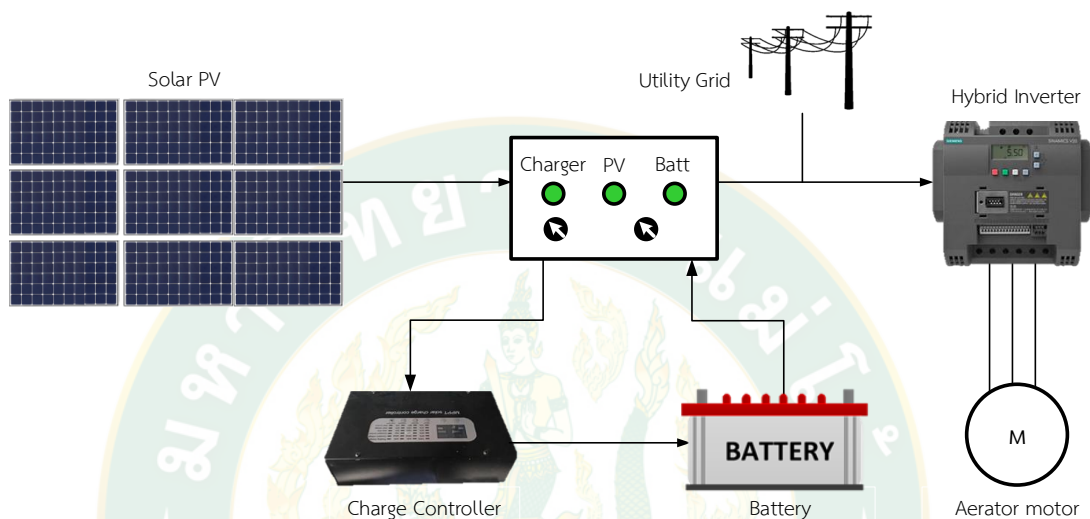
ภาพที่ 22 การตรวจหาค่าปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำ (Dissolve Oxygen: DO)

จากการศึกษางานวิจัย และบทความที่เกี่ยวข้องกับระบบเติมอากาศแบบหัวทรายสำหรับบ่อเลี้ยงปลานิลที่ใช้พลังงานไฟฟ้าจากระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ทำงานร่วมกับแบตเตอรี่และระบบไฟฟ้าพื้นฐาน สามารถสรุปสาระสำคัญของงานวิจัยได้ดังตารางที่ 6

ตารางที่ 6 สรุปสาระสำคัญจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ลำดับ	ผู้วิจัย	สาระสำคัญ	แนวทางในการนำมาประยุกต์
1	Pragya Gawhade and Amit Ojha, 2021	การพัฒนาระบบการทำงานของอินเวอร์เตอร์เนื่องจากช่องโหว่ของระบบไฟฟ้าของการติดตั้งระบบ Solaar PV ร่วมกับ Grid	ตัวแปรที่มีความสำคัญที่มีอิทธิพลต่อการวัดเพื่อไม่ป้องกันความคาดเคลื่อนของข้อมูลของการติดตั้งกับโหลดอุปกรณ์สามเฟส
2.	ศิริวรรณ ทานู และคณะ, 2561	การนำระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับระบบไฟฟ้าพื้นฐานเข้าใช้งานกับระบบเติมอากาศ	การนำใช้ระบบร่วมกับระบบเติมอากาศ
3.	Sonal Gaurav et al., 2015	การจัดการพลังงานของระบบกักเก็บพลังงาน	การจำลองสถานการณ์การทำงานของโหลดที่สถานะต่างๆ
4.	เรวัฒน์ เต็มกล้า และคณะ, 2562	การเปรียบเทียบปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำของการเติมอากาศโดยใช้ระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์	การเพิ่มระดับออกซิเจนในน้ำโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานทางเลือก
5.	Claude E. Boyd and Craig S. Tucker, 1998	การทดสอบประสิทธิภาพการเติมอากาศในบ่อเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ	การออกแบบเพื่อให้มีเครื่องเติมอากาศในบ่อเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำที่ประหยัดต้นทุน แต่มีประสิทธิภาพ

จากงานวิจัยข้างต้น แสดงให้เห็นว่าหากมีการนำพลังงานไฟฟ้าจากระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์เข้าไปเก็บสะสมพลังงานที่แบตเตอรี่เพื่อใช้งานกับระบบเติมอากาศในช่วงเวลากลางคืนหรือช่วงเวลาที่เกิดเหตุฉุกเฉินระบบไฟฟ้าพื้นฐานไม่สามารถจ่ายไฟฟ้าให้กับเครื่องเติมอากาศได้ อีกทั้งยังมีแนวคิดที่จะลดการใช้ไฟฟ้าจากระบบไฟฟ้าพื้นฐานโดยมีการนำเทคโนโลยีพลังงานทดแทนพลังงานแสงอาทิตย์เข้ามาใช้งานจึงเป็นที่มาของกรอบแนวคิด แสดงดังภาพที่ 23



ภาพที่ 23 กรอบแนวคิดการดำเนินงานวิจัย

จากภาพที่ 23 แสดงให้เห็นถึงการทำงานเมื่อแสงอาทิตย์ตกกระทบลงบนพื้นแผงเซลล์แสงอาทิตย์ กระแสไฟฟ้าจะผ่านเข้าเครื่องควบคุมการประจุกระแสไฟฟ้า (Charge Controller) เพื่อควบคุมการประจุกระแสไฟฟ้า พร้อมทั้งประจุพลังงานไฟฟ้าส่วนเกินหรือไฟฟ้าที่ได้เก็บสะสมไว้ในแบตเตอรี่ (Battery) พร้อมทั้งจ่ายให้แก่เครื่องเติมอากาศ (Aerator motor) โดยผ่านอุปกรณ์แปลงไฟฟ้า (Inverter) กระแสตรง (DC) จากแบตเตอรี่ให้เป็นไฟฟ้ากระแสสลับ (AC) โดยจะมีการใช้ไฟฟ้าพื้นฐานเข้ามาช่วยจ่ายพลังงานไฟฟ้าให้กับระบบเมื่อระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับแบตเตอรี่มีการผลิตหรือเก็บสะสมพลังงานไม่เพียงพอต่อปริมาณความต้องการกับการใช้พลังงานร่วมกับโหลด

บทที่ 3

วัสดุ อุปกรณ์และขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

3.1 วัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในดำเนินงานวิจัย

1) แผงเซลล์แสงอาทิตย์

แผงเซลล์แสงอาทิตย์ (Solar Module) สามารถผลิตกระแสไฟฟ้าจากการแสงที่ตกกระทบบนวัตถุที่มีการเปลี่ยนพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้าได้โดยตรง โดยคุณสมบัติของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้ในการทดสอบในการทำวิจัยในระบบนี้มีการติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์ยี่ห้อ ASTRONERGY SOLAR (Astronergy Solar (Thailand) Co., Ltd.) กำลังการผลิตรวม 2.925 kW จำนวน 9 แผง ชนิดแผงโพลีคริสตัลไลน์ ซิลิกอน (Polycrystalline Silicon) แสดงดังภาพที่ 24 แต่ละแผงมีขนาด $2 \times 1 \text{ m}^2$ กำลังไฟฟ้าสูงสุด 325 Wp โดยคุณสมบัติของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้ในการทดสอบมีรายละเอียดแสดงดังตารางที่ 7



ภาพที่ 24 การติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์

ตารางที่ 7 คุณสมบัติของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้ในการติดตั้ง

คุณสมบัติ	รายละเอียด
ชนิดแผงเซลล์แสงอาทิตย์	Poly crystalline
กำลังสูงสุด (P_{max})	325 Wp
แรงดันไฟฟ้าเปิดวงจร (V_{oc})	45.67 V
กระแสไฟฟ้าที่วัดได้เมื่อลัดวงจร (I_{sc})	9.48 A
แรงดันไฟฟ้าที่ใช้งานได้ (V_{mpp})	37.11 V
กระแสไฟฟ้าที่ใช้งานได้ (I_{mpp})	8.77 A
ประสิทธิภาพแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (η_{pv})	16.8%

2) เครื่องควบคุมการประจุกระแสไฟฟ้า

เครื่องควบคุมการประจุกระแสไฟฟ้า (Charge controller) เป็นอุปกรณ์ควบคุมการประจุและการจ่ายประจุกระแสไฟฟ้าออกจากแบตเตอรี่ผ่านเครื่องควบคุม ในงานวิจัยได้มีการใช้เครื่องควบคุมการประจุกระแสไฟฟ้าแสดงภาพที่ 25



ภาพที่ 25 เครื่องควบคุมการประจุกระแสไฟฟ้า MPPT

โดยเครื่องควบคุมนี้มีระบบ MPPT (Maximum Power Point Tracking) เพื่อช่วยในการปรับการเสถียรของแรงดันอีกทั้งความถี่ เนื่องด้วยพลังงานไฟฟ้าได้มากจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์มากหรือน้อยขึ้นอยู่กับความเข้มของแสงอาทิตย์ จึงมีการใช้ MPPT เข้ามาปรับให้เหมาะสม โดยคุณสมบัติของเครื่องควบคุมการประจุกระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการทดสอบมีรายละเอียดแสดงดังตารางที่ 8

ตารางที่ 8 คุณสมบัติของเครื่องควบคุมการประจุกระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการติดตั้ง

คุณสมบัติ	รายละเอียด
ชนิดเครื่องควบคุมการประจุกระแสไฟฟ้า	MPPT
แรงดันไฟฟ้าแผงเซลล์แสงอาทิตย์สูงสุด	420 VDC
แรงดันขาออก	288 V
ประสิทธิภาพของ MPPT	≥99%

3) แบตเตอรี่

แบตเตอรี่ (Battery) เป็นตัวเก็บสะสมพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จากแผงเซลล์แสงอาทิตย์เพื่อจ่ายให้กับอุปกรณ์ในการทำงานต่างๆ โดยแบตเตอรี่ที่ใช้ในงานวิจัยเป็นแบตเตอรี่ชนิด Deep Cycle เนื่องจากมีการใช้กับระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ เพื่อที่ประจุไฟฟ้าได้แม้กระแสไหลเข้าไปในปริมาณที่น้อยและสามารถจ่ายกระแสไฟฟ้าได้อย่างต่อเนื่อง โดยไม่เกิดการเสียหายของแผ่นเซลล์ภายในตัวแบตเตอรี่ แสดงดังภาพที่ 26



ภาพที่ 26 แบตเตอรี่รุ่น Chilwee 6-DZF-22

โดยแบตเตอรี่ที่ใช้ในงานวิจัยมีการต่อแบบอนุกรมเพื่อเป็นการเพิ่มแรงดันไฟฟ้าให้กับระบบ มีการใช้แบตเตอรี่ชนิด 6-DZF-22 ขนาด 12 V ต่อแบบอนุกรมจำนวน 24 ก้อน ทำให้ได้แรงดันรวมในระบบ 288 V 22Ah โดยคุณสมบัติของแบตเตอรี่ที่ใช้ในการทดสอบมีรายละเอียดแสดงดังตารางที่ 9

ตารางที่ 9 คุณสมบัติของแบตเตอรี่ใช้ในการติดตั้ง

คุณสมบัติ	รายละเอียด
รุ่นแบตเตอรี่	Chilwee
ชนิดแบตเตอรี่	6-DZF-22
แรงดัน	12 V
กระแสไฟฟ้า	22Ah
วงจรชีวิต	≥850 รอบ 80% DOD
อัตราการไหลต่ำ	≤3%/12V 22 Ah

4) เครื่องแปลงกระแสไฟฟ้า

เครื่องแปลงกระแสไฟฟ้า (Inverter) เป็นเครื่องแปลงไฟฟ้ากระแสตรงให้เป็นไฟฟ้ากระแสสลับ อุปกรณ์แปลงไฟฟ้าหรืออินเวอร์เตอร์ยี่ห้อ SINAMICS รุ่น SINAMICS V20 ขนาดของกำลังไฟฟ้า 2.2 kW (3 hp) แรงดันไฟฟ้า 3AC 380-480 V (-15%/+10%) กระแสไฟขาออก 13.6 A ความถี่ 50/60 Hz แสดงดังภาพที่ 27



ภาพที่ 27 เครื่องแปลงกระแสไฟฟ้ารุ่น SINAMICS V20

5) มอเตอร์เติมอากาศ

มอเตอร์เติมอากาศที่นำมาใช้งานวิจัยมีขนาดระบบไฟฟ้า 3 phase ขนาด 3 hp กำลังไฟฟ้า 2.237 kW โดยใช้กับแรงดันไฟฟ้า 220 V ความถี่ 50 Hz ความเร็วรอบ 2,840 rpm/min แสดงดังภาพที่ 8



ภาพที่ 28 มอเตอร์เติมอากาศ

6) แคลมป์เพาเวอร์มิเตอร์

แคลมป์เพาเวอร์มิเตอร์ (Power Clamp Meter) ในงานวิจัยมีการใช้แคลมป์ AC/DC รุ่น UNI-T UT204 แสดงดังภาพที่ 29 โดยมีการใช้วัดโหลดไฟฟ้าทั้งกระแสและแรงดันไฟฟ้าทางด้าน AC/DC และยังสามารถวัดค่าทางพลังงาน โดยคุณสมบัติของแคลมป์เพาเวอร์มิเตอร์ที่ใช้ในการทดสอบมีรายละเอียดแสดงดังตารางที่ 10



ภาพที่ 29 แคลมป์เพาเวอร์มิเตอร์รุ่น UNI-T UT204

ตารางที่ 10 คุณสมบัติของแคลมป์เพาเวอร์มิเตอร์ที่ใช้ในการติดตั้ง

คุณสมบัติ	รายละเอียด	ความแม่นยำ
แรงดัน DC	400mV/4V/40V/400V/600V	$\pm(0.8\%+1)$
แรงดัน AC	4V/40V/400V/600V	$\pm(1\%+5)$
กระแส DC	40A/600A	$\pm(2.5\%+5)$
กระแส AC	40A/600A	$\pm(2.5\%+5)$
ความถี่	10Hz~10MHz	$\pm(0.5\%+3)$
	10MHz	Reference only
อุณหภูมิ	-40 °C ~ 1000°C	$\pm(2.5\%+3)$

7) อุปกรณ์เก็บวัดความเข้มรังสีแสงอาทิตย์

อุปกรณ์วัดความเข้มรังสีแสงอาทิตย์ (Pyranometer) รุ่น Apogee SP-100-L ความแม่นยำ $\pm 5\%$ output responsivity 0.2 mV/W/m² และเครื่องบันทึกข้อมูล (Data logger) ยี่ห้อ TSUS 24 Chanel ใช้สำหรับวัดความเข้มของรังสีของแสงอาทิตย์แสดงดังภาพที่ 30



ภาพที่ 30 อุปกรณ์วัดความเข้มรังสีแสงอาทิตย์ Apogee และเครื่องบันทึกข้อมูล TSUS

8) เครื่องวัดอุณหภูมิของอากาศ/ความชื้นสัมพัทธ์

เครื่องวัดอุณหภูมิของอากาศ Data Logger Tenmars รุ่น TM-305U ใช้สำหรับวัดอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศ แสดงดังภาพที่ 31 โดยคุณสมบัติของเครื่องวัดอุณหภูมิของอากาศ/ความชื้นสัมพัทธ์ที่ใช้ในการทดสอบมีรายละเอียดแสดงดังตารางที่ 11



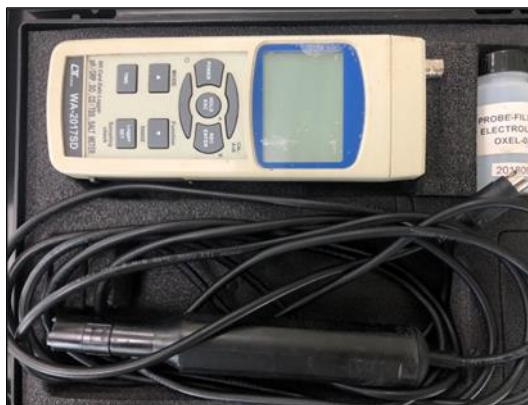
ภาพที่ 31 เครื่องวัดอุณหภูมิของอากาศ Tenmars รุ่น TM-305U

ตารางที่ 11 คุณสมบัติของเครื่องวัดอุณหภูมิของอากาศที่ใช้ในการติดตั้ง

คุณสมบัติ	รายละเอียด	ความแม่นยำ
ยี่ห้อสินค้า	Tenmars	
รุ่น	TM-305U	
ช่วงการวัดอุณหภูมิ	1% - 99%RH	±0.6°C
ช่วงการวัดความชื้น	-40°C - 85°C	±3.0%RH

9) เครื่องตรวจวัดปริมาณออกซิเจน

เครื่องตรวจวัดปริมาณออกซิเจน (Dissolved Oxygen Meter) รุ่น DO-5512SD ช่วงของการวัดจะอยู่ที่ 0-20.0 mg/L ± 0.4 mg/L เป็นเครื่องมือใช้วัดปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำว่ามีปริมาณอยู่มากน้อยเพียงใด เทียบเป็นอัตราส่วนมิลลิกรัมต่อลิตร (1 mg/L = 1 ppm) โดยอาศัยหลักการที่ออกซิเจนเคลื่อนที่ผ่านเมมเบรนของอิเล็กโทรด ซึ่งภายในอิเล็กโทรดจะมีขั้วแคโทดและแอโนดจุ่มอยู่ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์เป็นโพแทสเซียมคลอไรด์ ออกซิเจนที่เคลื่อนที่ผ่านเมมเบรนเข้ามา จะเกิดปฏิกิริยารีดักชันที่แคโทดและเกิดออกซิเดชันที่ขั้วแอโนด ทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าซึ่งเป็นสัดส่วนโดยตรงกับปริมาณออกซิเจนที่ซึมผ่านเข้ามา โดยปกติออกซิเจนในน้ำได้มาจากบรรยากาศและการสังเคราะห์ด้วยแสงของพืชน้ำ ปริมาณของออกซิเจนในน้ำจะแปรผันกับอุณหภูมิ และความเข้มข้นของแร่ธาตุที่อยู่ในน้ำ ถ้าหากอุณหภูมิและความเข้มข้นของแร่ธาตุในน้ำสูง จะทำให้ออกซิเจนในน้ำมีน้อยลง แสดงดังภาพที่ 32



ภาพที่ 32 เครื่องตรวจวัดปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำ รุ่น WA-2017SD

10) หัวทรายเติมอากาศ

หัวทรายเติมอากาศ (Air stone aerator) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ส่งจ่ายออกซิเจนให้กับบ่อเลี้ยงปลานิล การเลี้ยงปลาที่ความหนาแน่นสูงและขนาดปลาที่โตขึ้นทำให้มีการใช้ออกซิเจนเพิ่มขึ้น ของเสียจากปลาและอาหารที่เหลือมีส่วนทำให้ออกซิเจนในบ่อลดลง สาหร่ายที่มีอยู่ในบ่อตายเป็นจำนวนมาก ทำให้จุลินทรีย์ต้องใช้ออกซิเจนเพื่อย่อยสลาย อาจส่งผลให้ออกซิเจนลดลงและน้ำเน่าเสียได้ กระบวนการเติมอากาศจากการแพร่กระจายหรือการใช้อุปกรณ์หรือเครื่องเติมอากาศซึ่งการสัมผัสกันระหว่างน้ำและอากาศ เป็นปัจจัยที่สำคัญต่อการการถ่ายโอนออกซิเจนเพราะอากาศจะสามารถถ่ายเทไปสู่ของเหลวได้ ซึ่งในการเติมอากาศของบ่อเลี้ยงปลานิลมีการใช้หัวทรายทั้งหมด 34 หัว แสดงดังภาพที่ 33

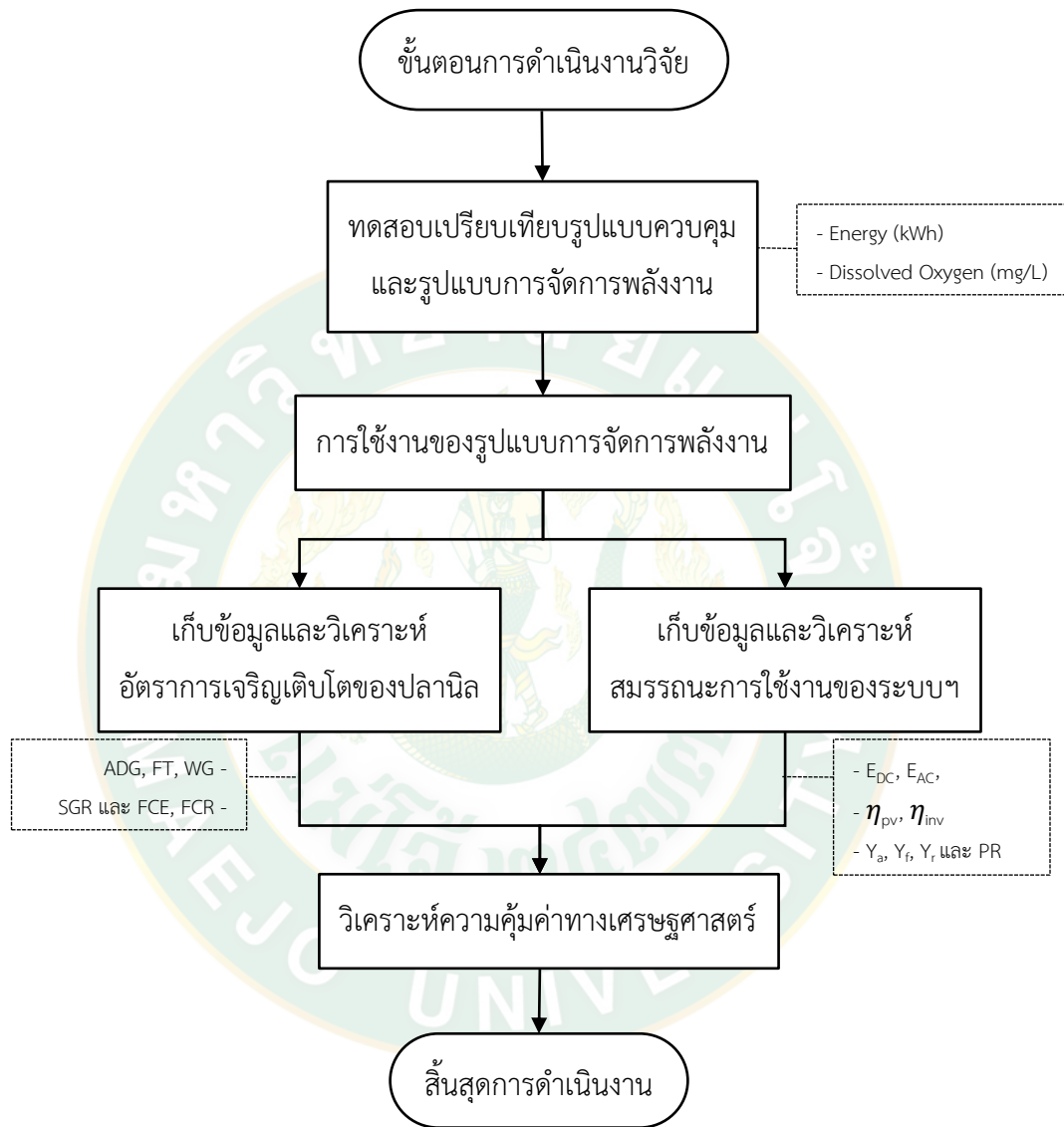


ภาพที่ 33 หัวทรายเติมอากาศ

3.2 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงานวิจัย

ในการศึกษานี้มีขั้นตอนและวิธีการดำเนินงานวิจัย เพื่อศึกษารูปแบบการจัดการพลังงานของระบบเติมอากาศแบบหัวทรายสำหรับบ่อเลี้ยงปลานิลที่ใช้พลังงานไฟฟ้าจากระบบผลิตไฟฟ้าพลังงาน

แสงอาทิตย์ร่วมกับระบบไฟฟ้าพื้นฐาน รวมทั้งเปรียบเทียบต้นทุนในการผลิตทางด้านพลังงานของการเลี้ยงปลานิลด้วยระบบเติมอากาศรูปแบบควบคุมและระบบที่ใช้พลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับแบตเตอรี่ ซึ่งมีขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยแสดงดังภาพที่ 34



ภาพที่ 34 ขั้นตอนวิธีการดำเนินงานวิจัย

ขั้นตอนที่ 1 รูปแบบควบคุมและรูปแบบการจัดการพลังงาน

ในรูปแบบควบคุม (รูปแบบ CT) และรูปแบบการจัดการพลังงาน (รูปแบบ M) เป็นการทดสอบตลอดรอบการเลี้ยงปลาหนึ่งรอบการเลี้ยงเดียวกันตั้งแต่วันที่ 15 มีนาคม - 30 กรกฎาคม 2562 แต่ละระยะของการทดสอบนั้นมีการเปรียบเทียบทั้งปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำและพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ของเครื่องเติมอากาศ โดยในรูปแบบควบคุมและรูปแบบการจัดการพลังงานที่มีการนำมาทดสอบเปรียบเทียบนั้น มีรายละเอียดข้อมูลพื้นฐานทั้งสองรูปแบบมีดังต่อไปนี้

- รูปแบบควบคุม (รูปแบบ CT)

ในงานวิจัยนี้มีการศึกษาการเลี้ยงปลานิลในพื้นที่หมู่บ้านทุ่งยาว อำเภอสนทราย จังหวัดเชียงใหม่ ในรูปแบบควบคุมหรือรูปแบบดั้งเดิม (รูปแบบ CT) มีพื้นที่ของการเลี้ยงปลานิลประมาณ 5,000 m² ความลึก 4 m แสดงดังภาพที่ 35 โดยทำการปล่อยลูกปลานิลจำนวน 8,000 ตัว มีน้ำหนักเริ่มต้นเฉลี่ยในการปล่อย 40.91 g และน้ำหนักสุดท้าย 609.52 g โดยการเติมอากาศมีการใช้งานเครื่องเติมอากาศในระยะแรกของการเลี้ยงจะไม่มีมีการใช้งานเครื่องเติมอากาศทั้งในช่วงกลางวันและกลางคืน จากนั้นในระยะที่ 2-4 จึงเริ่มมีการใช้งานเครื่องเติมอากาศโดยใช้พลังงานไฟฟ้าจากระบบไฟฟ้าพื้นฐาน (ระบบ Grid) ทั้งในช่วงเวลากลางวันและกลางคืนตั้งแต่ 09.00-17.00 น. และ 23.00-09.00 น. ตามลำดับ และมีการให้อาหารเช้าและเย็นตั้งแต่ 10.00-10.30 น. และ 17.00-17.30 น. ทำให้ในการเลี้ยงนี้มีปริมาณการให้อาหารรวมทั้งสิ้น 7,555 kg/Crop โดยรายละเอียดข้อมูลของการเลี้ยงปลาในรูปแบบควบคุม แสดงดังตารางที่ 12



ภาพที่ 35 บ่อทดสอบของการเลี้ยงปลานิล

ตารางที่ 12 รายละเอียดข้อมูลของการเลี้ยงปลาในรูปแบบควบคุม

รายละเอียด	
น้ำหนักเริ่มต้น (g)	40.91
น้ำหนักสุดท้าย (g)	609.52
อัตราการปล่อย (fish)	8,000
ปริมาณพลังงานการใช้ไฟฟ้า (kWh)	3,771.20
ค่าพลังงานการใช้ไฟฟ้า (Baht/Crop)	16,329.30

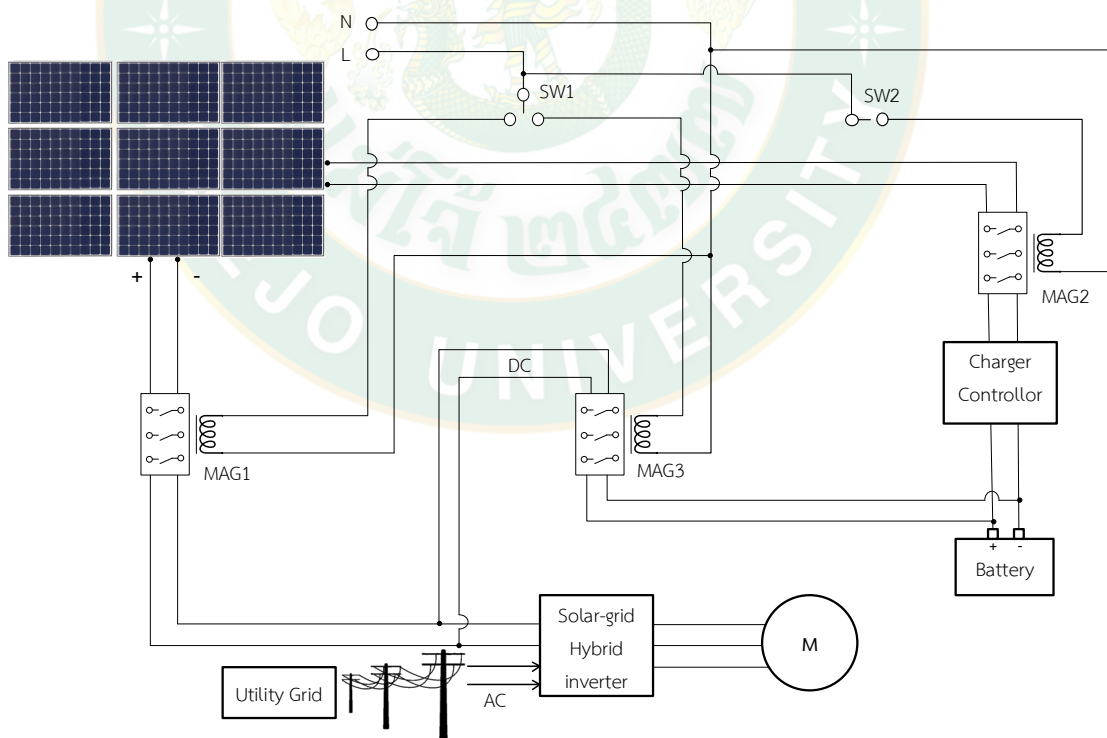
- รูปแบบการจัดการพลังงาน (รูปแบบ M)

รูปแบบการจัดการพลังงาน (รูปแบบ M) เป็นการจัดการพลังงานโดยการนำเทคโนโลยีพลังงานทดแทนพลังงานแสงอาทิตย์เข้ามาใช้งานร่วมกับระบบไฟฟ้าพื้นฐานอีกทั้งยังมีแบตเตอรี่เข้า

มาใช้งานในช่วงเวลากลางคืนหรือเมื่อเกิดเหตุฉุกเฉินไฟฟ้าดับไม่สามารถจ่ายไฟฟ้าให้กับมอเตอร์ได้ เพื่อลดการพึ่งพาการใช้ไฟฟ้าจากระบบไฟฟ้าพื้นฐาน โดยในรูปแบบของการจัดการพลังงานนี้มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

หลักการการทำงานของระบบเติมอากาศสำหรับบ่อเลี้ยงปลานิล

หลักการการทำงานของระบบเติมอากาศสำหรับบ่อเลี้ยงปลานิลโดยใช้ระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ขนาด 325Wp จำนวน 9 แผง กำลังการติดตั้งรวม 2,925 kWp เมื่อระบบมีกำลังการผลิตพลังงานไฟฟ้ามากกว่าความต้องการของโหลดหรือมอเตอร์เติมอากาศ พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จากพลังงานแสงอาทิตย์ (Solar PV) กระแสไฟฟ้าจะไหลเข้ากล่องควบคุมโดยผ่านสวิตช์ (SW1) และแมกเนติก คอนแทคเตอร์ (MAG2) ไปยังเครื่องควบคุมการประจุกระแสไฟฟ้า (Charge controller) เพื่ออัดประจุกระแสไฟฟ้าสำหรับเก็บสะสมพลังงานไว้ในแบตเตอรี่ พร้อมทั้งมีการจ่ายพลังงานไฟฟ้าไปยังอินเวอร์ไฮบริด (Hybrid inverter) โดยมีสวิตช์สามทาง (SW1) เพื่อเลือกใช้ไฟฟ้าระหว่าง Solar PV หรือแบตเตอรี่ในการเปิดเครื่องเติมอากาศให้กับมอเตอร์เติมอากาศ สำหรับการคายประจุไฟฟ้าของแหล่งสะสมพลังงานจากแบตเตอรี่จะมีการใช้ในช่วงเวลากลางคืนโดยการใช้พลังงานไฟฟ้าจากระบบผลิตไฟฟ้าพื้นฐานร่วม (Utility Grid) แสดงดังภาพที่ 36



ภาพที่ 36 ไดอะแกรมหลักการทำงานของระบบเติมอากาศสำหรับบ่อเลี้ยงปลานิล

รูปแบบการจัดการพลังงานของระบบเติมอากาศแบบหัวทราย

รูปแบบการจัดการพลังงานของระบบเติมอากาศแบบหัวทรายในการเปรียบเทียบในการเลือกใช้งานของการเปิดเครื่องเติมอากาศให้กับมอเตอร์ของการเลี้ยงนั้นมีการทดสอบรูปแบบการจัดการพลังงานรวมทั้งสิ้น 5 รูปแบบ โดยแต่ละรูปแบบ M ที่ใช้ในการทดสอบกับระบบเติมอากาศแสดงดังตารางที่ 13

ตารางที่ 13 รูปแบบการจัดการพลังงานของระบบเติมอากาศแบบหัวทราย

รูปแบบ	ช่วงระบบเติมอากาศแบบหัวทราย	
	เวลากลางวัน	เวลากลางคืน
M _{PV}	ใช้พลังงานไฟฟ้าจาก Solar PV	ไม่มีการเติมอากาศ
M _{PV,Grid}	ใช้พลังงานไฟฟ้าจาก Solar PV	ใช้ไฟฟ้าจาก Grid
M _{PV,Grid(DO<3)}	ใช้พลังงานไฟฟ้าจาก Solar PV	ใช้ไฟฟ้าจาก Grid (DO<3 mg/L)
M _{PV&Grid,Grid}	ใช้พลังงานไฟฟ้าจาก Solar PV&Grid	ใช้ไฟฟ้าจาก Grid
M _{PV&Grid,Grid(DO<3)}	ใช้พลังงานไฟฟ้าจาก Solar PV&Grid	ใช้ไฟฟ้าจาก Grid (DO<3 mg/L)

จากตารางที่ 13 รูปแบบการจัดการพลังงานของระบบเติมอากาศแบบหัวทราย มีรายละเอียดในแต่ละรูปแบบดังต่อไปนี้

รูปแบบ M_{PV}

ในการทดสอบรูปแบบ M_{PV} จะมีการทดสอบการใช้งานกับการเลี้ยงปลาในเพียงระยะแรกเท่านั้น โดยมีการเปิดใช้งานเครื่องเติมอากาศดังนี้

กลางวัน: ระบบเติมอากาศใช้พลังงานไฟฟ้าจากระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ (ระบบ Solar PV) เพียงอย่างเดียว

กลางคืน: ไม่มีการใช้งานเครื่องเติมอากาศ

รูปแบบ M_{PV,Grid}

กลางวัน: ระบบเติมอากาศใช้พลังงานไฟฟ้าจากระบบ Solar PV เพียงอย่างเดียว

กลางคืน: ระบบเติมอากาศใช้พลังงานไฟฟ้าจากระบบผลิตไฟฟ้าพื้นฐาน (ระบบ Grid) โดยมีการปรับเปลี่ยนเวลาของการเติมอากาศในระยะ 1-4

รูปแบบ M_{PV,Grid(DO<3)}

กลางวัน: ระบบเติมอากาศใช้พลังงานไฟฟ้าจากระบบ Solar PV เพียงอย่างเดียว

กลางคืน: ระบบเติมอากาศใช้พลังงานไฟฟ้าจากระบบ Grid โดยมีเปิดมอเตอร์เติมอากาศเมื่อปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำน้อยกว่า 3 mg/L

รูปแบบ $M_{PV\&Grid,Grid}$

กลางวัน: ระบบเติมอากาศใช้พลังงานไฟฟ้าจากระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับระบบไฟฟ้าพื้นฐาน (ระบบ Solar PV&Grid)

กลางคืน: ระบบเติมอากาศใช้พลังงานไฟฟ้าจากระบบ Grid โดยมีการปรับเปลี่ยนเวลาของการเติมอากาศในระยะ 1-4

รูปแบบ $M_{PV\&Grid,Grid(DO<3)}$

กลางวัน: ระบบเติมอากาศใช้พลังงานไฟฟ้าจากระบบ Solar PV&Grid

กลางคืน: ระบบเติมอากาศใช้พลังงานไฟฟ้าจากระบบ Grid โดยมีเปิดมอเตอร์เติมอากาศเมื่อปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำน้อยกว่า 3 mg/L

หมายเหตุ***

ทุกรูปแบบ M ของการเลี้ยงปลาในแต่ละระยะการเลี้ยงมีข้อกำหนดดังต่อไปนี้

1) ช่วงกลางวันมีการใช้งานเครื่องเติมอากาศตั้งแต่วันที่ 09.00-17.00 น. ของทุกระยะการเลี้ยง

2) ช่วงเวลากลางคืนที่มีการใช้พลังงานไฟฟ้าจากระบบ Grid จะมีการปรับเปลี่ยนเวลาของการใช้งานเครื่องเติมอากาศในแต่ละระยะ ดังนี้

- ระยะ 1 มีการใช้งาน 66 วัน เปิดเครื่องเติมอากาศตั้งแต่วันที่ 03.00-09.00 น.
- ระยะ 2 มีการใช้งาน 48 วัน เปิดเครื่องเติมอากาศตั้งแต่วันที่ 01.00-09.00 น.
- ระยะ 3 มีการใช้งาน 14 วัน เปิดเครื่องเติมอากาศตั้งแต่วันที่ 00.00-09.00 น.
- ระยะ 4 มีการใช้งาน 20 วัน เปิดเครื่องเติมอากาศตั้งแต่วันที่ 23.00-09.00 น.

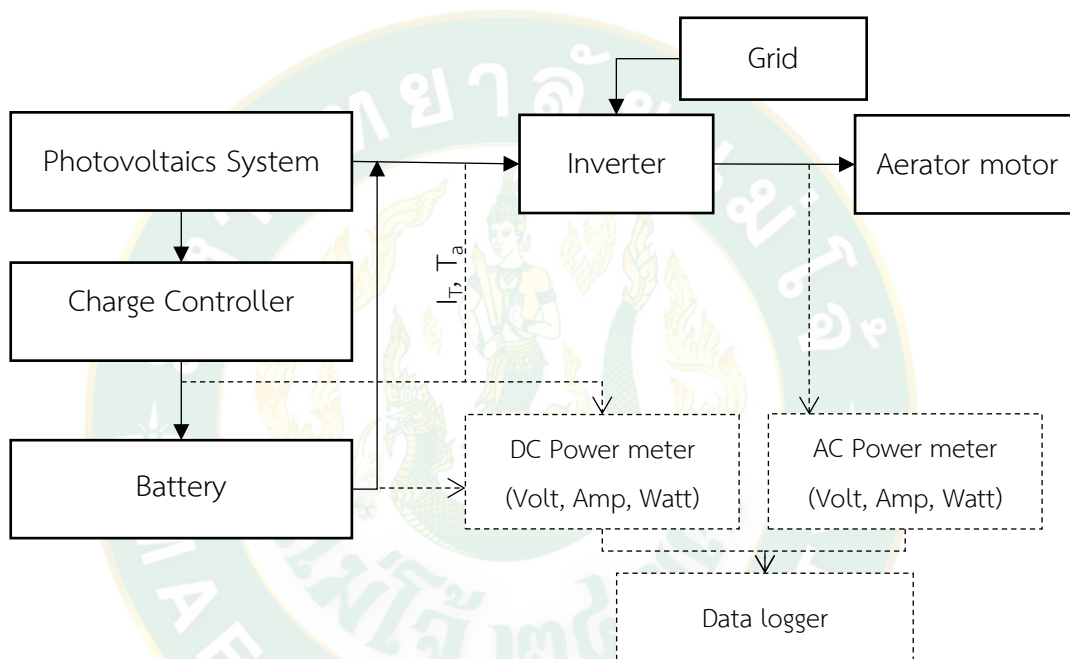
3) ช่วงเวลากลางคืนที่มีการใช้พลังงานไฟฟ้าจากระบบ Grid ($DO < 3$ mg/L) หากปริมาณออกซิเจนในน้ำน้อยกว่า 3 mg/L ก่อนช่วงเวลา 23.00 น. ให้ถือว่าที่เวลา 23.00 น. เป็นเวลาเริ่มต้นของการใช้งานเครื่องเติมอากาศ

ขั้นตอนที่ 2 การทดสอบเปรียบเทียบรูปแบบควบคุมและรูปแบบการจัดการพลังงาน

ในการทดสอบเปรียบเทียบในขั้นตอนที่ 2 มีการเปรียบเทียบปริมาณการใช้ไฟฟ้าและปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำของรูปแบบควบคุม (รูปแบบ CT) และรูปแบบการจัดการพลังงาน (รูปแบบ M) ทั้ง 5 รูปแบบ เพื่อคัดเลือก 1 รูปแบบของการจัดการพลังงานในการนำไปใช้งานจริงในขั้นตอนที่ 3 โดยมีการเก็บข้อมูล 2 ส่วน คือ ปริมาณพลังงานไฟฟ้าของการใช้งานเครื่องเติมอากาศ (Electrical energy consumption) ให้กับมอเตอร์และปริมาณออกซิเจนที่ละลายน้ำ (Dissolved Oxygen: DO) มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

- ปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการใช้งานเครื่องเติมอากาศ

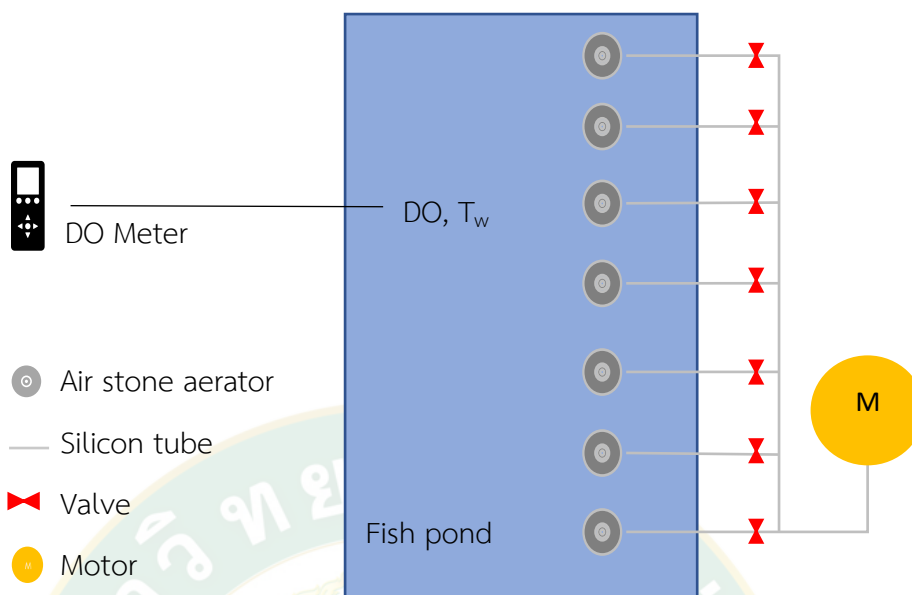
บันทึกข้อมูลทางด้านพลังงานไฟฟ้าด้วยอุปกรณ์การวัดแคลมป์เพาเวอร์มิเตอร์รุ่น UNI-T UT204 ด้านกระแสตรง (DC) และกระแสสลับ (AC) โดยทำการเก็บค่าแรงดันไฟฟ้า (V) กระแสไฟฟ้า (I) และเก็บค่าความเข้มของรังสีดวงอาทิตย์ (I_T) ด้วยอุปกรณ์วัดความเข้มรังสีแสงอาทิตย์ (Pyranometer) รุ่น Apogee SP-100-L เก็บค่าของอุณหภูมิสิ่งแวดล้อม (T_a) ด้วยเครื่องวัดอุณหภูมิ (Data Logger Tenmars) รุ่น TM-305U และทำการบันทึกข้อมูลลงเครื่อง (Data logger) โดยแผนภาพการตรวจวัดและการเก็บบันทึกข้อมูลทางด้านพลังงานแสดงดังภาพที่ 37



ภาพที่ 37 แผนภาพการตรวจวัดและการเก็บบันทึกข้อมูล

- ปริมาณออกซิเจนที่ละลายน้ำ (Dissolved Oxygen: DO)

บันทึกข้อมูลของบ่อเลี้ยงปลาชนิด ทำการวัดค่าปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำและอุณหภูมิของน้ำในบ่อ (T_w) จากเครื่องตรวจวัดปริมาณออกซิเจน (Dissolved Oxygen Meter) รุ่น WA-2017SD โดยข้อมูลจะถูกบันทึกลงใน SD Card ของ Dissolved Oxygen Meter จะจัดเก็บไฟล์ในรูปแบบ Microsoft Excel ในการวัดปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำและอุณหภูมิของน้ำในบ่อแสดงดังภาพที่ 38



ภาพที่ 38 ระบบตรวจวัดปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำและอุณหภูมิน้ำบริเวณบ่อเลี้ยงปลานิล

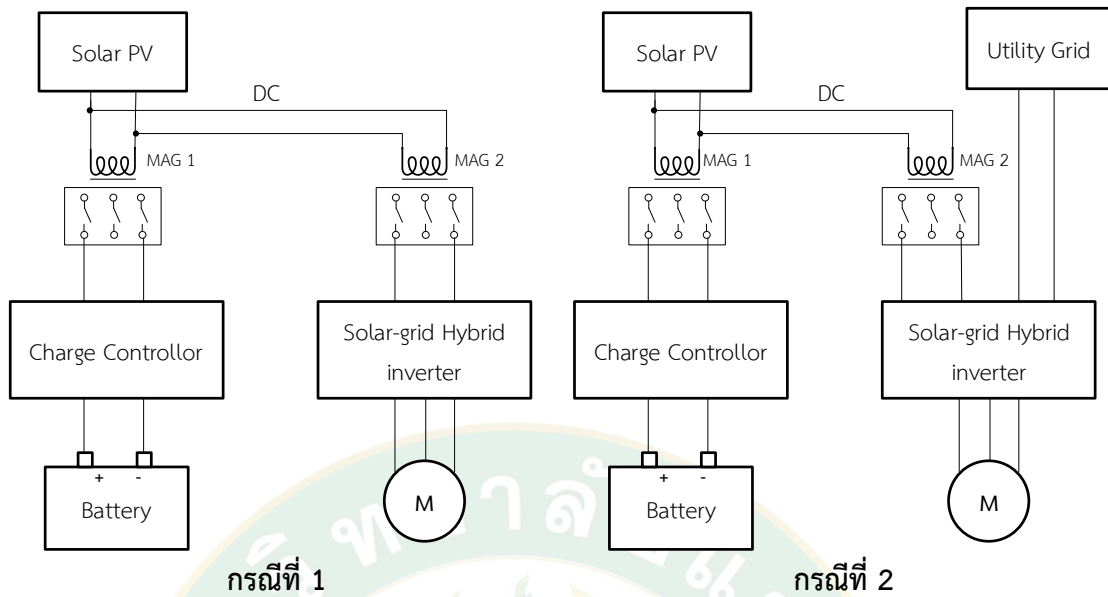
ขั้นตอนที่ 3 การใช้งานของรูปแบบการจัดการพลังงานสำหรับการเติมอากาศ

เมื่อมีการทดสอบเปรียบเทียบรูปแบบการจัดการพลังงานและรูปแบบควบคุมในขั้นตอนที่ 2 ทำให้ได้รูปแบบ M ที่มีความเหมาะสมต่อการใช้งานในแต่ละระยะของการเลี้ยงนำมาใช้งานจริง ซึ่งในรอบการเลี้ยงรูปแบบที่มีการเลือกนำมาใช้งานจริงนี้มีการนำพลังงานไฟฟ้าจากแบตเตอรี่ (Battery) เข้ามาใช้งาน

สำหรับเงื่อนไขการทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับแบตเตอรี่และระบบไฟฟ้าพื้นฐานในช่วงเวลากลางวันมีเงื่อนไขในการจัดการพลังงานของแหล่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าแบ่งออกเป็น 2 กรณี แสดงดังภาพที่ 39

กรณีที่ 1 ระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์มีการอัดประจุกระแสไฟฟ้าสำหรับเก็บสะสมพลังงานไว้ในแบตเตอรี่ผ่านสวิตช์ (SW2) พร้อมทั้งจ่ายกระแสไฟฟ้าของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ผ่านสวิตช์ (SW1) ไปยังอินเวอร์เตอร์ให้กับมอเตอร์เติมอากาศ

กรณีที่ 2 ระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์มีการอัดประจุกระแสไฟฟ้าสำหรับเก็บสะสมพลังงานไว้ในผ่านสวิตช์ (SW2) พร้อมทั้งจ่ายกระแสไฟฟ้าของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ผ่านสวิตช์ (SW1) ไปยังอินเวอร์เตอร์ให้กับมอเตอร์เติมอากาศ โดยการใช้พลังงานไฟฟ้าจากระบบผลิตไฟฟ้าพื้นฐานร่วม

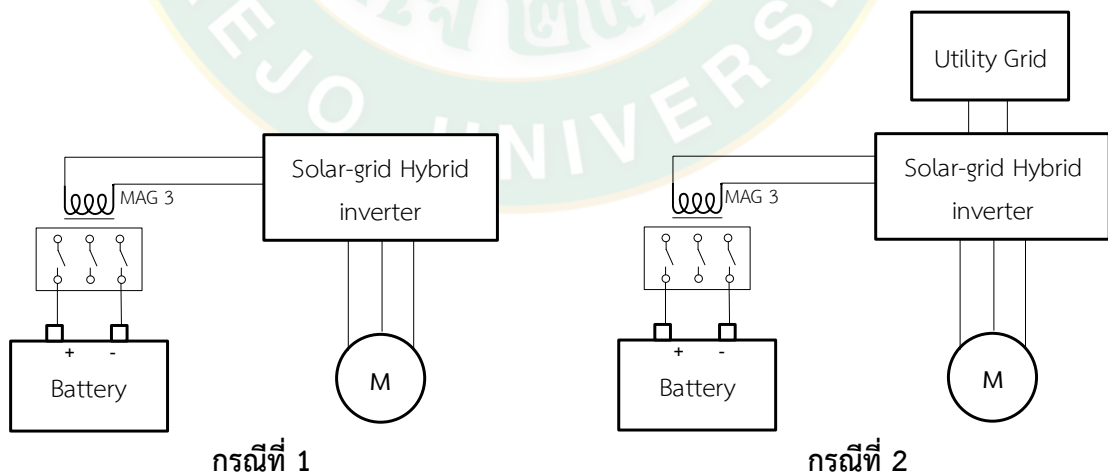


ภาพที่ 39 ไดอะแกรมการทำงานของแหล่งจ่ายไฟฟ้า (ช่วงกลางวัน)

การเปิดใช้งานเครื่องเติมอากาศในช่วงเวลากลางคืนมีการคายประจุกระแสไฟฟ้าที่สะสมจากแบตเตอรี่ โดยเงื่อนไขการจัดการพลังงานของแหล่งจ่ายพลังงานไฟฟ้า 2 กรณี แสดงดังภาพที่ 40

กรณีที่ 1 ใช้พลังงานไฟฟ้าจากแหล่งสะสมพลังงานแบตเตอรี่เพียงอย่างเดียว จากการสลับแหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้าของสวิตช์ (SW1)

กรณีที่ 2 ใช้พลังงานไฟฟ้าจากแหล่งสะสมพลังงานแบตเตอรี่ผ่านสวิตช์ (SW1) พร้อมทั้งมีการใช้ระบบผลิตไฟฟ้าพื้นฐานร่วม



ภาพที่ 40 ไดอะแกรมการทำงานของแหล่งจ่ายไฟฟ้า (ช่วงกลางคืน)

โดยในช่วงกลางวันจะมีการเก็บสะสมพลังงานเข้าที่แบตเตอรี่และมีการนำพลังงานที่ได้นั้นมาใช้ในช่วงเวลากลางคืนที่เวลา 05.00 น. ซึ่งในขั้นตอนของการใช้งานจึงทำการวิเคราะห์แบ่งออกเป็น 2 ส่วน ดังต่อไปนี้

1) วิเคราะห์สมรรถนะของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์

- เก็บข้อมูลทางด้านไฟฟ้าของกระแสตรง (DC) คำนวณหาค่ากำลังไฟฟ้าและพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จากเซลล์แสงอาทิตย์ดังสมการที่ 1-2 และทำการวัดพื้นที่แผงรับแสงอาทิตย์ (AC) ความเข้มของรังสีดวงอาทิตย์ (I_T) เพื่อนำมาวิเคราะห์ประสิทธิภาพของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (η_{pv}) ดังสมการที่ 3

- เก็บข้อมูลทางด้านไฟฟ้าของกระแสสลับ (AC) คำนวณหาค่ากำลังไฟฟ้าและพลังงานไฟฟ้าที่ออกจากเครื่องแปลงกระแสไฟฟ้า (Inverter) ดังสมการที่ 7-8 เพื่อนำมาวิเคราะห์หาประสิทธิภาพเครื่องแปลงกระแสไฟฟ้า (η_{inv}) ดังสมการที่ 9

- คำนวณหาสมรรถนะการผลิตไฟฟ้าของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่เชื่อมต่อกับระบบ ได้แก่ พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (Array yield: Y_a) พลังงานไฟฟ้าที่ใช้งานจริงที่ผลิตได้จากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (Final yield: Y_f) พลังงานไฟฟ้าที่ใช้งานจริงที่ผลิตได้จากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (Reference yield: Y_r) สมรรถนะของระบบเซลล์แสงอาทิตย์ (Performance Ratio: PR) ดังสมการที่ 10-13

2) วิเคราะห์อัตราการเจริญเติบโตของปลานิล

ทำการเก็บข้อมูลหรือการสุ่มตรวจของน้ำหนักปลาเริ่มต้นของการทดลอง (W_i) น้ำหนักปลาสุดท้ายของการทดลอง (W_f) ระยะเวลาการเลี้ยง (t) ปริมาณการให้อาหาร (FT) ในแต่ละระยะของการเลี้ยง จากนั้นนำข้อมูลที่ได้ไปวิเคราะห์น้ำหนักปลาเฉลี่ยที่เพิ่มขึ้น (Weight Gain: WG) อัตราการเจริญเติบโตเฉลี่ยต่อวัน (Average Daily Gain: ADG) อัตราการเปลี่ยนอาหารเป็นน้ำหนัก (Feed Conversion Ratio: FCR) ประสิทธิภาพการเปลี่ยนอาหารเป็นน้ำหนัก (Food conversion efficiency or Food efficiency: FCE) และอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะ (Specific Growth Rate: SGR) ดังสมการที่ 14-18

ขั้นตอนที่ 4 วิเคราะห์ความคุ้มค่าทางด้านเศรษฐศาสตร์

การคำนวณความคุ้มค่าทางด้านเศรษฐศาสตร์โดยการเปรียบเทียบการใช้พลังงานไฟฟ้าจากระบบ Grid ของรูปแบบ CT และรูปแบบ M และค่าใช้จ่ายตลอดอายุโครงการมาคำนวณในการหามูลค่าปัจจุบันสุทธิ (Net Present Value: NPV) อัตราผลตอบแทนภายใน (Internal Rate of Return: IRR) และระยะเวลาคืนทุน (Payback Period: PB) ดังสมการ 19-21 และคำนวณค่าดัชนีการใช้พลังงานจำเพาะ (Specific Energy Consumption: SEC) จากพลังงานไฟฟ้าที่ใช้กับอัตราของการปล่อยลูกปลา ดังสมการที่ 22

บทที่ 4

ผลการวิจัย

การวิเคราะห์ผลของการจัดการพลังงานของระบบเติมอากาศสำหรับบ่อเลี้ยงปลาที่ใช้ระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับแบตเตอรี่และไฟฟ้าพื้นฐานสามารถแบ่งผลการวิเคราะห์ออกเป็น 3 หัวข้อ คือ

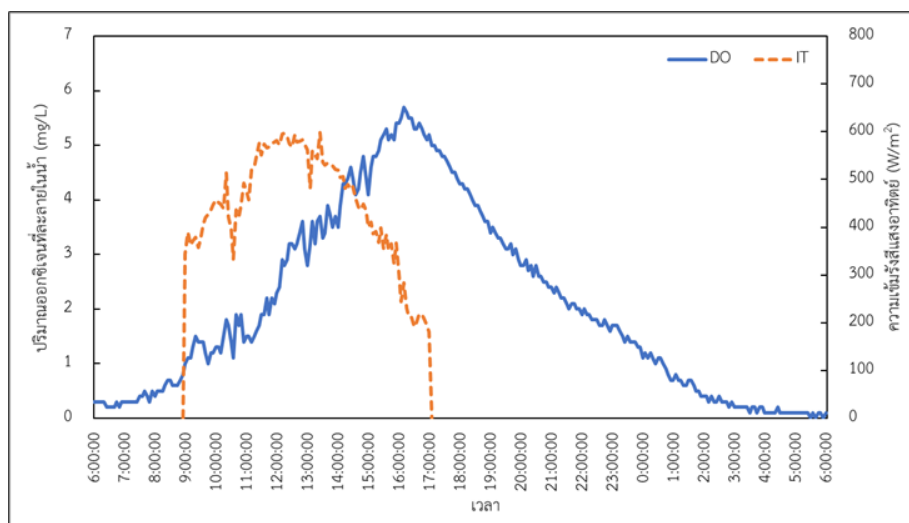
- 4.1 ผลการทดสอบการเลี้ยงปลาในรูปแบบควบคุม (รูปแบบ CT)
- 4.2 ผลการทดสอบการเลี้ยงปลาด้วยรูปแบบการจัดการพลังงาน (รูปแบบ M)
- 4.3 ผลการทดสอบการเลี้ยงปลาด้วยรูปแบบการจัดการพลังงานที่เหมาะสม โดยผลการวิเคราะห์ในแต่ละหัวข้อนั้นมีรายละเอียดการวิเคราะห์ดังต่อไปนี้

4.1 ผลการทดสอบการเลี้ยงปลาในรูปแบบควบคุม (รูปแบบ CT)

ผลการทดสอบการประเมินรูปแบบควบคุม (รูปแบบ CT) กับปริมาณออกซิเจนที่ละลายน้ำและการใช้พลังงานไฟฟ้าของระบบเติมอากาศสำหรับบ่อปลานั้นแบ่งออกเป็น 4 ระยะเวลาเลี้ยง โดยผลการวิเคราะห์ในแต่ละหัวข้อมีรายละเอียดการวิเคราะห์ดังต่อไปนี้

- ระยะเวลาเลี้ยงที่ 1

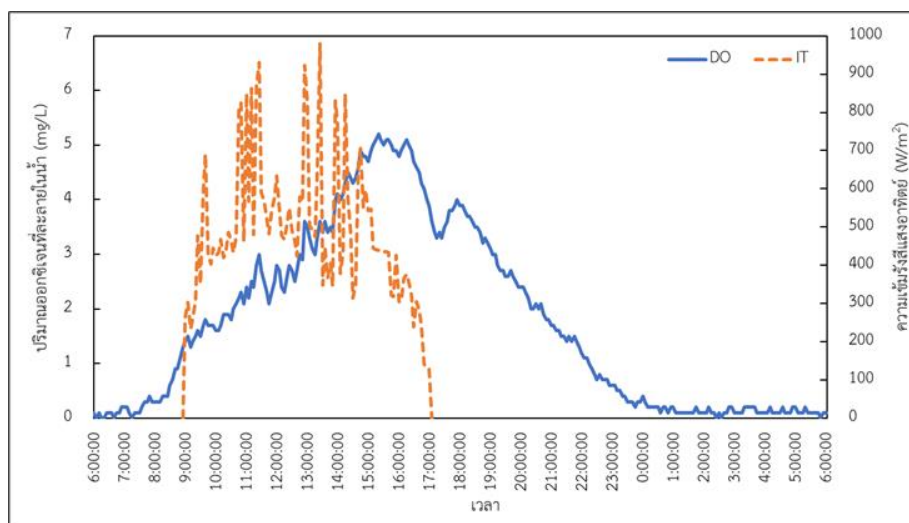
ในการเลี้ยงปลาในระยะแรกนี้จะไม่มีการใช้งานเครื่องเติมอากาศให้กับบ่อเลี้ยงปลาทั้งในช่วงเวลากลางวันและกลางคืน จากภาพที่ 41 พบว่าในวันที่ 16 เมษายน 2562 ตลอดทั้งวันมีผลรวมรังสีแสงอาทิตย์ตกกระทบ $12.78 \text{ MJ/m}^2\text{-day}$ จากช่วงเช้าที่เวลาเริ่มต้น 09.00 น. จะมีความเข้มแสงอาทิตย์เริ่มที่ 344 W/m^2 ทำให้มีปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำและอุณหภูมิในน้ำ 1.00 mg/L และ $30.1 \text{ }^\circ\text{C}$ ตามลำดับ ในระยะการเลี้ยงนี้ปัจจัยในการเพิ่มปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำจะขึ้นอยู่กับแสงอาทิตย์เป็นหลัก เมื่อเริ่มมีแสงอาทิตย์ที่ขุ่นน้ำจะมีการสังเคราะห์แสงและมีการปล่อยออกซิเจนออกมาทำให้ปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำเพิ่มขึ้น โดยมีปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำสูงสุดอยู่ที่ 5.70 mg/L แต่อย่างไรก็ตามหลังจากที่พระอาทิตย์ตกดินอุณหภูมิเริ่มต่ำลง ค่าปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำจึงลดลงตามไปด้วย ในช่วงกลางคืนมีปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำและมีอุณหภูมิในน้ำเฉลี่ย 0.48 mg/L และ $30.09 \text{ }^\circ\text{C}$ ตามลำดับ ทำให้โดยเฉลี่ยตลอดทั้งวันนั้นมีปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำ 2.05 mg/L ที่อุณหภูมิในน้ำ $31.20 \text{ }^\circ\text{C}$



ภาพที่ 41 ปริมาณออกซิเจนที่ละลายน้ำและความเข้มของรังสีแสงอาทิตย์
ของรูปแบบควบคุมในระยการเลี้ยงที่ 1

- ระยการเลี้ยงที่ 2

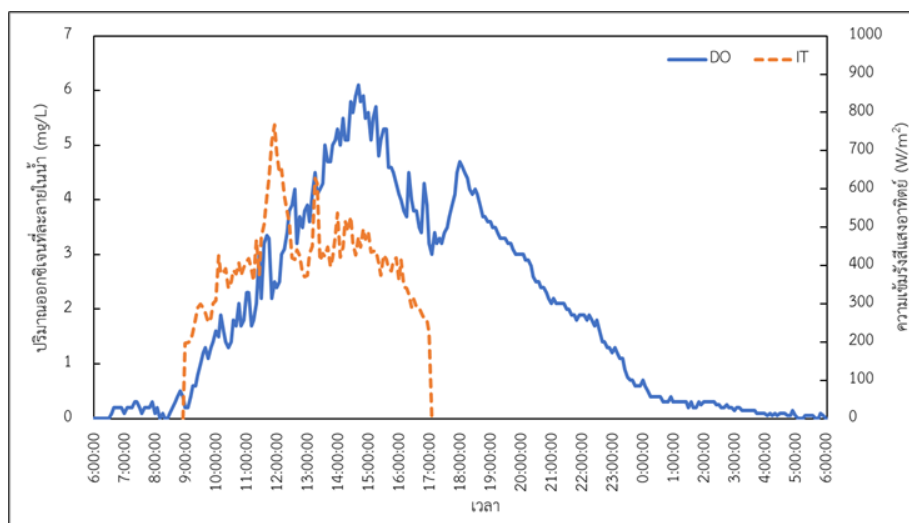
ในระยการเลี้ยงที่ 2 หลังจากเลี้ยงจะพบว่าปลามีการเจริญเติบโตเพิ่มขึ้นจึงทำให้มีความต้องการออกซิเจนเพิ่มขึ้นเช่นกัน การเลี้ยงระยนี้จึงมีการใช้ไฟฟ้าจากระบบ Grid สำหรับใช้งานเครื่องเติมอากาศให้กับมอเตอร์ โดยมีการใช้งานเครื่องเติมอากาศ 2 ช่วงเวลาการทำงาน คือ ช่วงกลางวันตั้งแต่ 09.00-17.00 น. และช่วงกลางคืนเวลา 23.00-09.00 น. จากภาพที่ 42 พบว่าในวันที่ 21 มิถุนายน 2562 ตลอดทั้งวันมีผลรวมรังสีแสงอาทิตย์ตกกระทบ $14.08 \text{ MJ/m}^2\text{-day}$ ที่เวลาเริ่มต้น 09.00 น. ของการใช้งานเครื่องเติมอากาศมีความเข้มรังสีแสงอาทิตย์ 260.90 W/m^2 ปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำและอุณหภูมิน้ำ 1.40 mg/L และ $31.70 \text{ }^\circ\text{C}$ ตามลำดับ จากนั้นเริ่มใช้งานเครื่องเติมอากาศให้กับมอเตอร์อีกทั้งมีความเข้มของรังสีแสงอาทิตย์ที่ช่วยในการสังเคราะห์แสงให้กับแพลงก์ตอนทำให้พืชมีการปล่อยออกซิเจนออกมา ส่งผลให้ปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องและสูงสุด 5.20 mg/L ที่เวลา 15.20 น. ในช่วงกลางวันโดยเฉลี่ยมีปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำ 3.11 mg/L ที่อุณหภูมิ $32.85 \text{ }^\circ\text{C}$ จากนั้นเมื่อพระอาทิตย์เริ่มตกดินและอุณหภูมิเริ่มลดลงจึงทำให้ปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำลดลงตามไปด้วย โดยเฉลี่ยในช่วงกลางคืนมีปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำเฉลี่ย 0.25 mg/L ที่อุณหภูมิ $31.67 \text{ }^\circ\text{C}$



ภาพที่ 42 ปริมาณออกซิเจนที่ละลายน้ำและความเข้มของรังสีแสงอาทิตย์
ของรูปแบบควบคุมในระยการเลี้ยงที่ 2

- ระยการเลี้ยงที่ 3

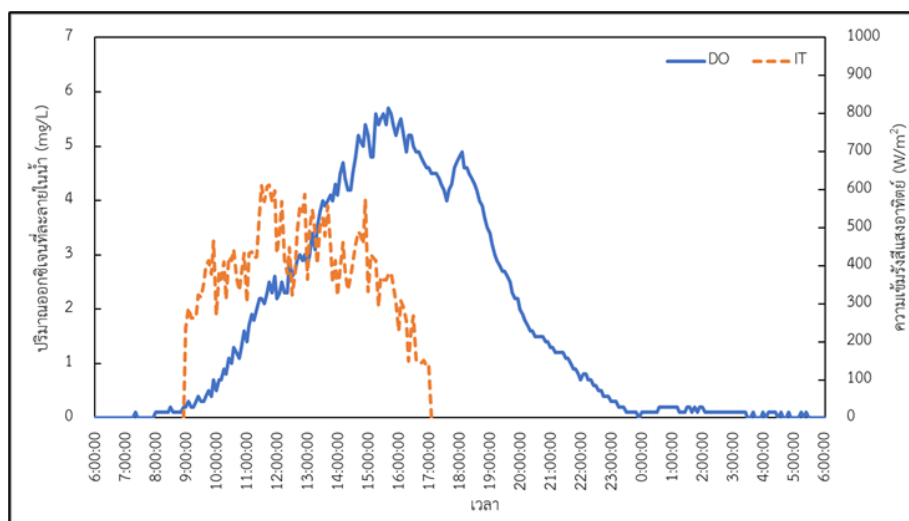
ในระยการเลี้ยงที่ 3 การใช้พลังงานไฟฟ้าจากระบบ Grid สำหรับการเติมอากาศให้กับมอเตอร์ในช่วงเวลา 23.00-17.00 น. (18 h/day) จากภาพที่ 43 จะพบว่าวันที่ 4 กรกฎาคม 2562 ตลอดทั้งวันมีผลรวมรังสีแสงอาทิตย์ตกกระทบ $11.88 \text{ MJ/m}^2\text{-day}$ และมีปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำเฉลี่ยตลอดทั้งวัน 1.96 mg/L ที่อุณหภูมิน้ำ $30.09 \text{ }^\circ\text{C}$ โดยเฉลี่ยในกลางวันมีปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำ 3.41 mg/L ที่อุณหภูมิน้ำ $30.32 \text{ }^\circ\text{C}$ เมื่อเริ่มใช้งานเครื่องเติมอากาศที่เวลาเริ่มต้น 09.00 น. ความเข้มรังสีแสงอาทิตย์ 197.05 W/m^2 มีปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำ 0.2 mg/L ที่อุณหภูมิน้ำ $29.5 \text{ }^\circ\text{C}$ จากนั้นปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องและสูงสุด 6.1 mg/L ที่เวลา 14.40 น. เมื่อปิดเครื่องเติมอากาศที่เวลา 17.00 น. ปริมาณออกซิเจนในน้ำจึงค่อยลดลงตามลำดับ ในช่วงกลางคืนเมื่อเริ่มใช้งานเครื่องเติมอากาศให้กับมอเตอร์ที่เวลา 23.00 น. มีปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำ 1.2 mg/L ที่อุณหภูมิน้ำ $30.3 \text{ }^\circ\text{C}$ เมื่ออุณหภูมิลดลงถึงแม้จะมีการใช้งานเครื่องเติมอากาศแต่ปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำนั้นยังคงลดลงไปด้วย ทำให้โดยเฉลี่ยตลอดทั้งคืนในการเลี้ยงระยนี้มีปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำ 0.23 mg/L ที่อุณหภูมิน้ำ $29.52 \text{ }^\circ\text{C}$



ภาพที่ 43 ปริมาณออกซิเจนที่ละลายน้ำและความเข้มของรังสีแสงอาทิตย์
ของรูปแบบควบคุมในระยการเลี้ยงที่ 3

- ระยการเลี้ยงที่ 4

ในระยการเลี้ยงที่ 4 มีการใช้พลังงานไฟฟ้าจากระบบ Grid สำหรับการใช้งานเครื่องเติมอากาศเช่นเดียวกับระยการเลี้ยงข้างต้นทั้งในช่วงกลางวันและกลางคืนตั้งแต่ 09.00-17.00 น. และ 23.00-09.00 น. ตามลำดับ จากภาพที่ 44 พบว่ารูปแบบควบคุมกับปริมาณออกซิเจนที่ละลายน้ำของระยการเลี้ยงที่ 4 ในวันที่ 10 กรกฎาคม 2562 ตลอดทั้งวันมีผลรวมรังสีแสงอาทิตย์ตกกระทบ $12.88 \text{ MJ/m}^2\text{day}$ ที่เวลาเริ่มต้น 09.00 น. ของการใช้งานเครื่องเติมอากาศมีความเข้มรังสีแสงอาทิตย์ 37.00 W/m^2 ปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำเริ่มต้น 0.2 mg/L ที่อุณหภูมิน้ำ $29.30 \text{ }^\circ\text{C}$ เมื่อมีการใช้งานเครื่องเติมอากาศปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำเริ่มเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องสูงสุด 5.70 mg/L มีอุณหภูมิน้ำ $30.40 \text{ }^\circ\text{C}$ ที่เวลา 15.40 น. จึงทำให้ในช่วงกลางวันมีปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำโดยเฉลี่ย 3.11 mg/L มีอุณหภูมิน้ำ $29.96 \text{ }^\circ\text{C}$ จากนั้นปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำมีการลดลงเมื่อพระอาทิตย์เริ่มตกดินและมีการปิดเครื่องเติมอากาศ ทำให้ในช่วงกลางคืนที่เวลาเริ่มต้น 23.00 น. มีปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำ 0.30 mg/L ที่อุณหภูมิน้ำ $29.30 \text{ }^\circ\text{C}$ โดยเฉลี่ยจึงมีปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำในช่วงเวลากลางคืน 0.10 mg/L ที่อุณหภูมิน้ำ $29.20 \text{ }^\circ\text{C}$



ภาพที่ 44 ปริมาณออกซิเจนที่ละลายน้ำและความเข้มของรังสีแสงอาทิตย์
ของรูปแบบควบคุมในระยการเลี้ยงที่ 4

- การใช้พลังงานไฟฟ้าในการเติมอากาศของรูปแบบควบคุม

การประเมินการใช้พลังงานไฟฟ้าของรูปแบบควบคุม แสดงดังตารางที่ 14 สามารถสรุปได้ว่าตลอดรอบการเลี้ยงหนึ่งรอบในระยการเลี้ยงรูปแบบควบคุมมีการทดสอบรวม 29 day ในระยที่ 1 มีการทดสอบ 11 day ระยที่ 2-4 มีการทดสอบ 12, 2 และ 4 day ตามลำดับ การใช้พลังงานไฟฟ้าในระยการเลี้ยงที่ 1 ระบบไม่มีการใช้งานเครื่องเติมอากาศให้กับมอเตอร์เติมอากาศ จนเข้าสู่ระยการเลี้ยงที่ 2-4 จึงมีการใช้งานเครื่องเติมอากาศ 2 ช่วงเวลา คือช่วงกลางวันตั้งแต่ 09.00-17.00 น. และกลางคืนตั้งแต่ 23.00-09.00 น. ทำให้ในแต่ละระยของการเลี้ยง 2-4 นั้นโดยเฉลี่ยมีการใช้พลังงานไฟฟ้า 46.57, 44.96, 45.32 kWh/day ตามลำดับ

ตารางที่ 14 ผลรวมการใช้พลังงานไฟฟ้าระบบไฟฟ้าพื้นฐานของรูปแบบควบคุม

ระยการเลี้ยง	ช่วงเวลา (day)	G_T (MJ/m ² day)	DO _{avg} (mg/L)	การใช้พลังงานไฟฟ้า		
				Grid _{daytime} (kWh)	Grid _{night time} (kWh)	all-day (kWh/day)
ระยที่ 1	11	12.78	2.05	-	-	-
ระยที่ 2	12	14.08	1.77	20.68	25.89	46.57
ระยที่ 3	2	11.88	1.96	19.86	25.10	44.96
ระยที่ 4	4	11.27	1.70	19.77	25.55	45.32

4.2 ผลการทดสอบการเลี้ยงปลาชนิดด้วยรูปแบบการจัดการพลังงาน (รูปแบบ M)

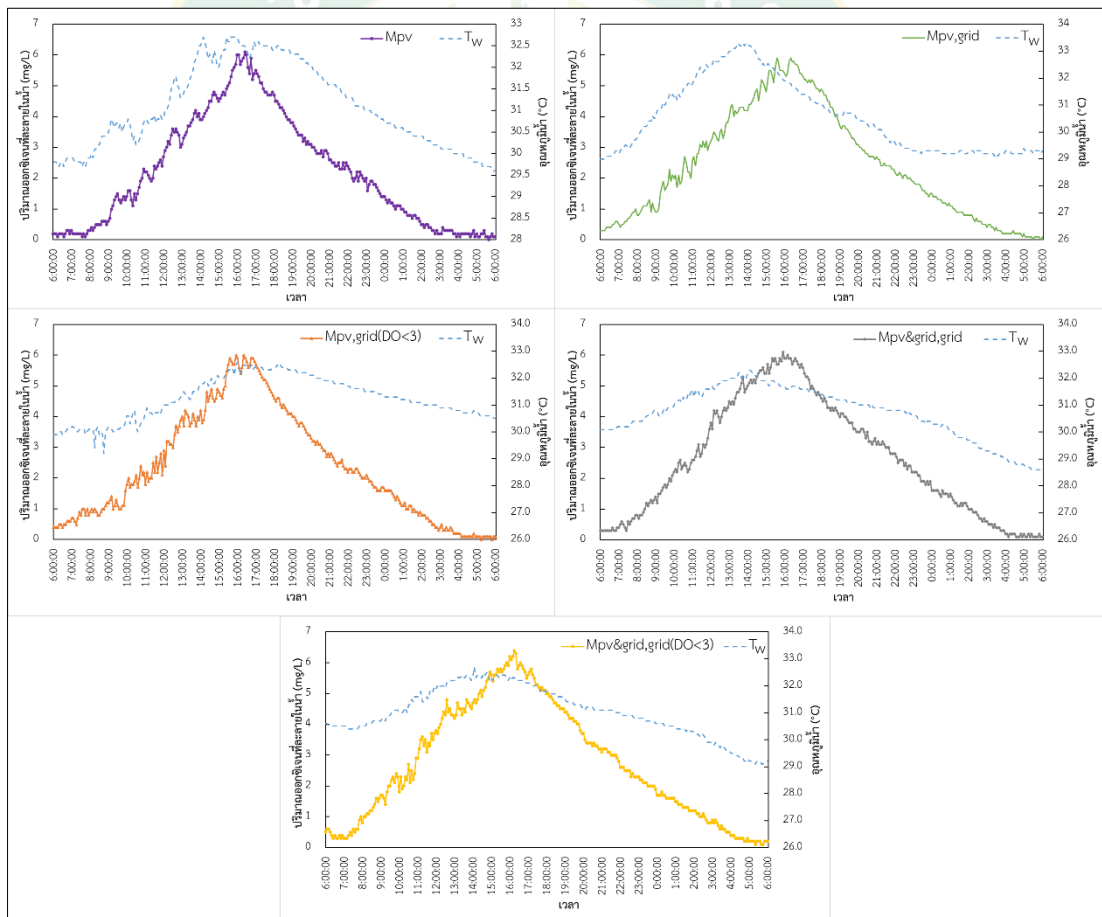
ผลการทดสอบรูปแบบการจัดการพลังงาน (รูปแบบ M) 5 รูปแบบ คือรูปแบบ M_{PV} (กลางวัน: ใช้ไฟฟ้า Solar PV, กลางคืน: ไม่มีการเติมอากาศ) รูปแบบ $M_{PV,Grid}$ (กลางวัน: ใช้ไฟฟ้า Solar PV, กลางคืน: ใช้ไฟฟ้า Grid) รูปแบบ $M_{PV,Grid(DO<3)}$ (กลางวัน: ใช้ไฟฟ้า Solar PV, กลางคืน: ใช้ไฟฟ้า Grid ปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำต่ำกว่า 3 mg/L) รูปแบบ $M_{PV\&Grid,Grid}$ (กลางวัน: ใช้ไฟฟ้า Solar PV&Grid, กลางคืน: ใช้ไฟฟ้า Grid) และรูปแบบ $M_{PV\&Grid,Grid(DO<3)}$ (กลางวัน: ใช้ไฟฟ้า Solar PV&Grid, กลางคืน: ใช้ไฟฟ้า Grid ปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำต่ำกว่า 3 mg/L) ในทุกระยะการเลี้ยงช่วงกลางวันมีการใช้งานเครื่องเติมอากาศตั้งแต่เวลา 09.00-17.00 น. และช่วงกลางคืนที่มีการใช้พลังงานไฟฟ้าจากระบบ Grid จะมีการปรับเปลี่ยนเวลาของการใช้งานเครื่องเติมอากาศในทุกระยะคือ ระยะที่ 1 เริ่มใช้งานเครื่องเติมอากาศที่เวลา 03.00 น. และในระยะ 2-4 จะเริ่มเปิดเครื่องที่ 01.00 น. 00.00 น. และ 23.00 น. ตามลำดับ จนสิ้นสุดที่เวลา 09.00 น. เช่นเดียวกัน และสำหรับในช่วงกลางคืนรูปแบบที่มีการใช้พลังงานไฟฟ้าจากระบบ $Grid(DO<3\text{ mg/L})$ หากปริมาณออกซิเจนในน้ำน้อยกว่า 3 mg/L ก่อนช่วงเวลา 23.00 น. ให้ถือว่าที่เวลา 23.00 น. เป็นเวลาเริ่มต้นของการใช้งานเครื่องเติมอากาศ โดยมีผลทดสอบของแต่ละระยะการเลี้ยงดังนี้

- ระยะการเลี้ยงที่ 1

ในรูปแบบการจัดการพลังงานระยะการเลี้ยงที่ 1 ขนาดของปลาในในระยะเริ่มต้นการเลี้ยงนั้นยังมีขนาดเล็กจึงไม่จำเป็นต้องใช้เครื่องเติมอากาศเข้ามาช่วย อีกทั้งหากสังเกตในช่วงเช้าปลายังไม่มีพฤติกรรมขึ้นมาหายใจบนผิวน้ำ ดังนั้นปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำจึงเพียงพอสำหรับการหายใจของปลา จึงมีการนำรูปแบบ M_{PV} เข้ามาจัดการการใช้พลังงานไฟฟ้าในระยะการเลี้ยงนี้ ระยะเวลาของการเลี้ยงระยะที่ 1 มีการเลี้ยงทั้งหมด 56 วัน ตั้งแต่วันที่ 15 มีนาคม - 9 พฤษภาคม 2562 แต่ละรูปแบบมีการทดสอบ 9 วัน ในช่วงเวลากลางวันมีการใช้งานเครื่องเติมอากาศตั้งแต่ 09.00-17.00 น. ช่วงกลางคืนรูปแบบ M_{Grid} มีการใช้งานเครื่องเติมอากาศตั้งแต่ 03.00-09.00 น. และ $M_{Grid(DO<3)}$ มีปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำต่ำกว่า 3 mg/L ก่อนช่วงเวลา 23.00 น. จึงมีการใช้งานเครื่องเติมอากาศในเวลา 23.00-09.00 น. เมื่อใช้งานเครื่องเติมอากาศทุกรูปแบบจากภาพที่ 45 แสดงปริมาณออกซิเจนที่ละลายน้ำของรูปแบบการจัดการพลังงานในระยะการเลี้ยงที่ 1 พบว่าโดยเฉลี่ยตลอดทั้งวันมีผลรวมรังสีแสงอาทิตย์ตกกระทบใกล้เคียงกันที่ 12.93 MJ/m²day ทำให้รูปแบบ $M_{PV\&Grid,Grid(DO<3)}$ มีปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำสูงสุด รองลงมาเป็นรูปแบบ $M_{PV\&Grid,Grid}$ รูปแบบ $M_{PV,Grid(DO<3)}$ รูปแบบ $M_{PV,Grid}$ และรูปแบบ M_{PV} ตามลำดับ

ในตลอดทั้งวันรูปแบบ $M_{PV\&Grid,Grid(DO<3)}$ มีปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำ 2.73 mg/L อุณหภูมิน้ำเฉลี่ย 31.89 °C มีผลรวมรังสีแสงอาทิตย์ตกกระทบตลอดทั้งวัน 12.85 MJ/m²day ถึงแม้ว่าในช่วงกลางวันจะมีการเปิดรูปแบบการเติมอากาศที่เหมือนกันกับรูปแบบ $M_{PV\&Grid,Grid}$ ที่มี

ปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำช่วงกลางวันใกล้เคียงกันที่ 4.16 และ 4.10 mg/L ตามลำดับ แต่ในช่วงกลางคืนรูปแบบ $M_{Pv\&Grid,Grid(DO<3)}$ มีชั่วโมงการใช้งานเครื่องเติมอากาศที่มากกว่า 4 ชั่วโมง จึงทำให้มีปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำเฉลี่ยตลอดทั้งวันอยู่ที่ 2.73 mg/L ซึ่งสูงกว่ารูปแบบ $M_{Pv\&Grid,Grid}$ 0.12 mg/L และในรูปแบบอื่นๆ มีการใช้พลังงานไฟฟ้าจากระบบ Solar PV เพียงอย่างเดียว จึงทำให้การเติมออกซิเจนนั้นขึ้นอยู่กับความเข้มของรังสีแสงอาทิตย์ ดังนั้นปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำน้อยกว่ารูปแบบที่กล่าวมาข้างต้น โดยรูปแบบ $M_{Pv,Grid}$ และรูปแบบ $M_{Pv,Grid(DO<3)}$ มีปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำ 2.39 และ 2.36 mg/L ตามลำดับ ที่อุณหภูมิน้ำ 30.55 และ 31.23 °C น้อยสุดจะอยู่ในรูปแบบ M_{Pv} เนื่องจากในรูปแบบนี้มีการใช้ไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์เพียงอย่างเดียวโดยกลางคืนไม่มีการเติมอากาศ ทำให้มีปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำเฉลี่ย 2.19 mg/L อุณหภูมิน้ำ 31.07 °C



ภาพที่ 45 ปริมาณออกซิเจนที่ละลายน้ำของรูปแบบการจัดการพลังงานในระยะเวลาเลี้ยงที่ 1

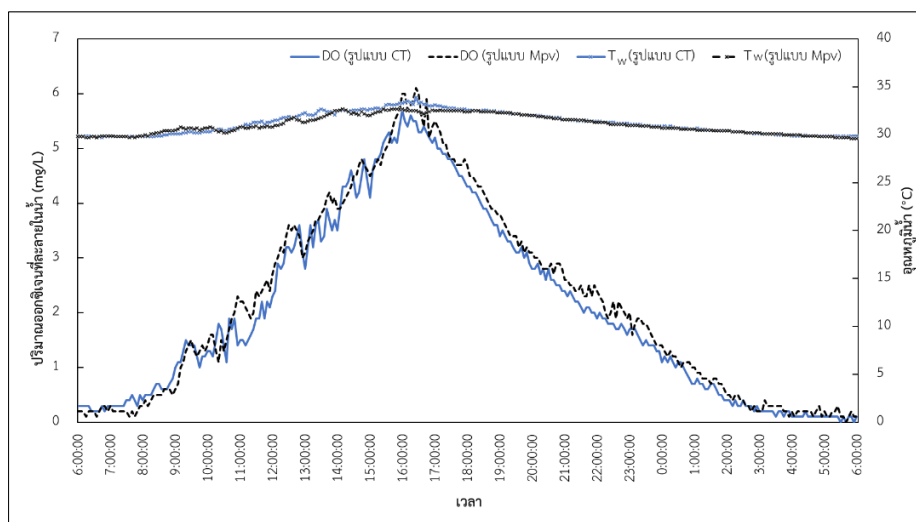
เมื่อพิจารณาการใช้พลังงานไฟฟ้า แสดงดังตารางที่ 15 พบว่า ตลอดทั้งวันรูปแบบ M_{Pv} มีเพียงการใช้พลังงานไฟฟ้าในช่วงกลางวันจากระบบ Solar PV จึงทำให้รวมทั้งสิ้นมีการใช้พลังงาน

ไฟฟ้าน้อยที่สุด 10.77 kWh/day รองลงมาเป็นรูปแบบ $M_{PV,Grid}$ โดยรูปแบบนี้เป็นการเปิดใช้งานเครื่องเติมอากาศในช่วงเวลากลางคืนจากรูปแบบ M_{PV} จึงทำให้มีการใช้พลังงานไฟฟ้าทั้งสิ้น 26.12 kWh/day (กลางวัน: 10.97 kWh/day, กลางคืน: 15.15 kWh/day) ตามไปด้วยรูปแบบ $M_{PV\&Grid,Grid}$ และรูปแบบ $M_{PV,Grid(DO<3)}$ มีการใช้พลังงานไฟฟ้า 35.23 และ 36.18 kWh/day ตามลำดับ และรูปแบบ $M_{PV\&Grid,Grid<3}$ เนื่องจากมีการเปิดเครื่องเติมอากาศเป็นเวลานานที่สุดจึงทำให้มีการใช้พลังงานไฟฟ้ามากขึ้นตามไปด้วยที่ 45.54 kWh/day (กลางวัน: 19.98 kWh/day, กลางคืน: 25.56 kWh/day)

ตารางที่ 15 การใช้พลังงานไฟฟ้าในการเติมอากาศของการเลี้ยงปลาในระยะที่ 1

รูปแบบ	G_T (MJ/m ² day)	DO_{avg} (mg/L)	การใช้พลังงานไฟฟ้า				
			daytime		nighttime	All-day (kWh)	Grid _{all-day} (kWh)
			PV (kWh)	Grid (kWh)	Grid (kWh)		
M_{PV}	12.99	2.19	10.77	-	-	10.77	-
$M_{PV,Grid}$	13.06	2.39	10.97	-	15.15	26.12	15.15
$M_{PV,Grid(DO<3)}$	12.96	2.36	10.78	-	25.40	36.18	25.40
$M_{PV\&Grid,Grid}$	12.81	2.61	10.63	9.41	15.19	35.23	24.60
$M_{PV\&Grid,Grid(DO<3)}$	12.85	2.73	10.56	9.42	25.56	45.54	34.98

ดังนั้นเมื่อพิจารณาการเลือกรูปแบบนั้นจากรายการที่ 15 พบว่า ในการทำงานระบบการเติมอากาศของรูปแบบ M ทุกรูปแบบนั้นมีปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำที่สูงกว่ารูปแบบ CT ในระยะการเลี้ยงที่ 1 ที่จากเดิมในระยะนี้ไม่มีการเติมอากาศให้กับบ่อเลี้ยงปลานิล ทำให้ในทุกรูปแบบ M สามารถนำมาพิจารณาการทำงานได้โดยไม่มีผลกระทบต่อปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำกับรูปแบบ CT ดังนั้นหากพิจารณาการใช้พลังงานไฟฟ้าพบว่ารูปแบบ M_{PV} จึงมีความเหมาะสมสำหรับการใช้งานในช่วงระยะการเลี้ยงที่ 1 เนื่องจากมีการใช้พลังงานไฟฟ้าจากระบบ Solar PV เพียงอย่างเดียว ในขณะที่รูปแบบอื่นๆ มีการใช้ไฟฟ้าจากระบบ Grid อีกทั้งเมื่อเปรียบเทียบกับรูปแบบ CT นั้น การนำรูปแบบ M_{PV} เข้าใช้งานแทนรูปแบบ CT ยังสามารถเพิ่มปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำได้จากภาพที่ 46 พบว่า ในช่วงกลางวันนั้นมีการใช้งานเครื่องเติมอากาศนั้นทำให้ปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำของรูปแบบ M_{PV} เฉลี่ยที่ 3.41 mg/L มีอุณหภูมิในน้ำ 31.56 °C ขณะที่รูปแบบ CT มีปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำเฉลี่ย 3.23 mg/L มีอุณหภูมิในน้ำ 31.86 °C ทำให้ตลอดทั้งวันนั้นปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำสูงกว่ารูปแบบ CT ที่ 0.18 mg/L



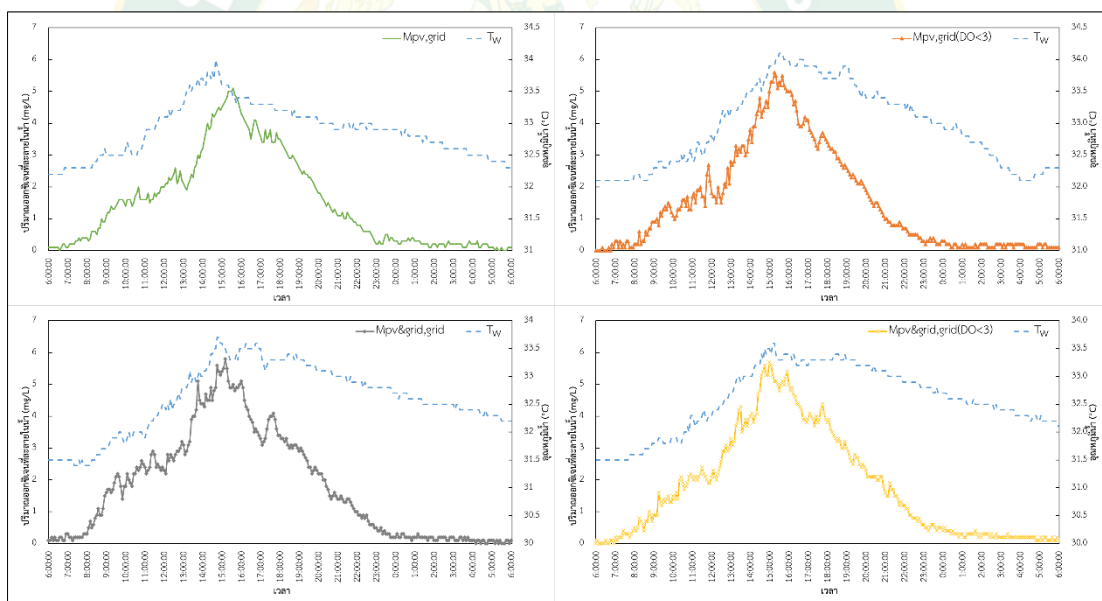
ภาพที่ 46 เปรียบเทียบปริมาณออกซิเจนที่ละลายน้ำของรูปแบบการจัดการพลังงาน และรูปแบบควบคุมในระยะเวลาเลี้ยงที่ 1

- ระยะเวลาเลี้ยงที่ 2

ในระยะเวลาเลี้ยงที่ 2 มีการเลี้ยงปลาชนิด 48 วัน ตั้งแต่วันที่ 10 พฤษภาคม – 26 มิถุนายน 2562 แต่ละรูปแบบมีการทดสอบ 9 วัน พบว่าปลามีการเจริญเติบโตเพิ่มขึ้นจึงมีความต้องการออกซิเจนที่เพิ่มมากขึ้นเช่นกัน เมื่อใช้งานเครื่องเติมอากาศในช่วงกลางวันด้วยระบบ Solar PV เพียงอย่างเดียวและกลางคืนไม่มีการใช้งานเครื่องเติมอากาศ ทำให้ในช่วงเช้ามืดก่อนดวงอาทิตย์ขึ้นปลาเกิดพฤติกรรมที่ขึ้นมาหายใจบนผิวน้ำเพื่อรับออกซิเจนนั้นหมายความว่าปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำไม่เพียงพอสำหรับการหายใจ ดังนั้นรูปแบบ M_{PV} จึงไม่ได้รับการพิจารณาในระยะเวลาเลี้ยงที่ 2 โดยเวลาการใช้งานเครื่องเติมอากาศช่วงกลางวันมีการเปิดระหว่าง 09.00-17.00 น. ช่วงกลางคืนรูปแบบ M_{Grid} มีการใช้งานเครื่องเติมอากาศตั้งแต่ 01.00-09.00 น. และ M_{Grid(DO<3)} มีการใช้งานเครื่องเติมอากาศตั้งแต่ 23.00-09.00 น. เนื่องจากปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำต่ำกว่า 3 mg/L ก่อนช่วงเวลา 23.00 น.

เมื่อพิจารณาปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำ จากภาพที่ 47 พบว่าตลอดทั้งวันมีผลรวมรังสีแสงอาทิตย์ตกกระทบ 14.09 MJ/m²-day สังเกตได้ว่าในรูปแบบที่มีการใช้งานเครื่องเติมอากาศโดยใช้พลังงานไฟฟ้าจากระบบ Solar PV&Grid ทำให้มีการเติมอากาศเข้าไปในน้ำอย่างสม่ำเสมออีกทั้งปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำที่ได้ไม่ขึ้นอยู่กับแสงอาทิตย์เพียงอย่างเดียว จึงทำให้ในรูปแบบ M_{PV&Grid,Grid(DO<3)} มีปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำเฉลี่ยตลอดทั้งวันสูงสุด 1.79 mg/L อุณหภูมิเฉลี่ย 32.59 °C มีผลรวมรังสีแสงอาทิตย์ตกกระทบตลอดทั้งวัน 14.11 MJ/m²-day รองลงมาเป็นรูปแบบ M_{PV&Grid,Grid} รูปแบบ M_{PV,Grid(DO<3)} และรูปแบบ M_{PV,Grid} โดยในช่วงกลางวันของรูปแบบ M_{PV&Grid,Grid(DO<3)} ที่เวลา 09.00 น. มีค่าความเข้มรังสีแสงอาทิตย์ 318.05 W/m² ปริมาณออกซิเจนที่

ละลายในน้ำและอุณหภูมิน้ำที่ 0.9 mg/L และ 31.8 °C และมีค่าสูงสุดที่ 1,039.90 W/m² ทำให้ช่วงกลางวันมีปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำเฉลี่ย 3.22 mg/L และอุณหภูมิน้ำ 32.68 °C โดยเฉลี่ยตลอดทั้งคืนมีปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำ 0.30 mg/L และอุณหภูมิน้ำ 32.01 °C และเมื่อเทียบกับรูปแบบที่กล่าวมาข้างต้นรูปแบบ M_{PV&Grid,Grid} ในช่วงกลางวันมีการเติมอากาศที่เวลา 01.00 น. นั้นพบว่าโดยเฉลี่ยในช่วงเดียวกันนี้ปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำยังคงมีค่าใกล้เคียงกันที่ 0.2 mg/L และ 0.3 mg/L ที่อุณหภูมิน้ำ 32.60 °C แต่ตลอดทั้งวันมีปริมาณออกซิเจนในน้ำเฉลี่ย 1.77 mg/L อุณหภูมิน้ำเฉลี่ย 32.61 °C ในขณะที่ความเข้มแสงอาทิตย์ใกล้เคียงกันแต่รูปแบบ M_{PV,Grid} และรูปแบบ M_{PV,Grid(DO<3)} ในช่วงกลางวันมีการใช้งานเครื่องเติมอากาศโดยใช้ระบบ PV จึงทำให้ปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำโดยเฉลี่ยต่ำกว่าใช้พลังงานไฟฟ้าจาก Solar PV&Grid โดยปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำอยู่ที่ 2.78 และ 2.92 mg/L ตามลำดับ ที่อุณหภูมิน้ำ 33.40 และ 33.90 °C ตามลำดับ ทำให้ตลอดทั้งวันมีปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำเฉลี่ย 1.52 และ 1.53 mg/L ตามลำดับ ที่อุณหภูมิน้ำ 33.12 และ 33.17 °C ตามลำดับ



ภาพที่ 47 ปริมาณออกซิเจนที่ละลายน้ำของรูปแบบการจัดการพลังงานในระยะเวลาเลี้ยงที่ 2

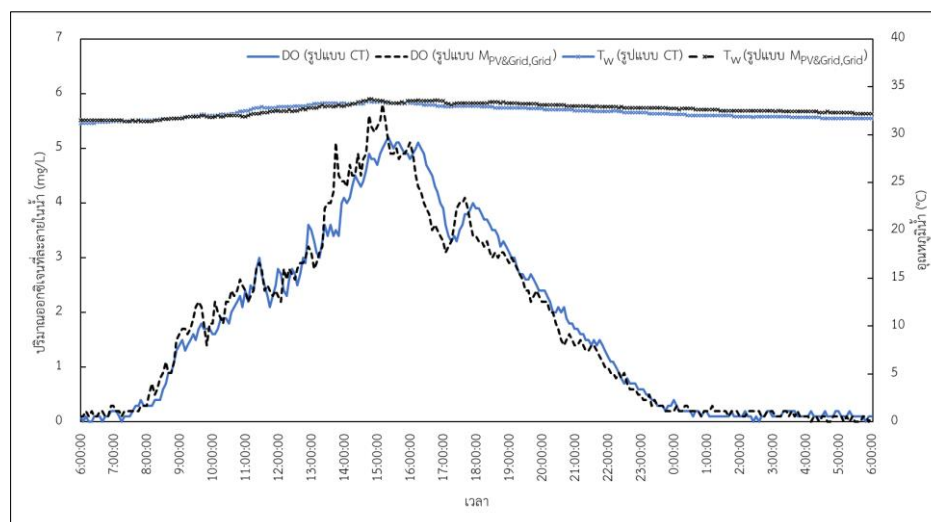
อย่างไรก็ตามการใช้พลังงานไฟฟ้า แสดงดังตารางที่ 16 พบว่า รูปแบบที่ไม่มีการใช้ไฟฟ้าจากระบบ Grid ในช่วงกลางวันยังคงมีการใช้พลังงานไฟฟ้าที่น้อยกว่าระบบ Solar PV&Grid โดยตลอดทั้งวัน รูปแบบ M_{PV,Grid} และรูปแบบ M_{PV,Grid(DO<3)} มีการใช้พลังงานไฟฟ้าทั้งสิ้น 31.64 และ 36.50 kWh/day แต่เนื่องจากรูปแบบ M_{PV,Grid(DO<3)} มีการเปิดเครื่องเติมอากาศในช่วงกลางวันมากกว่า 3 ชั่วโมง จึงทำให้มีการใช้ไฟฟ้าจากระบบ Grid ที่เพิ่มขึ้น 4.82 kWh/day จากนั้นเมื่อมีการใช้พลังงานไฟฟ้าในช่วงกลางวันจากระบบ Solar PV&Grid ในรูปแบบ M_{PV&Grid,Grid} และรูปแบบ M_{PV&Grid,Grid(DO<3)}

จึงทำให้มีการใช้พลังงานไฟฟ้าตลอดทั้งวันที่เพิ่มขึ้นจากรูปแบบที่กล่าวมาข้างต้น โดยรูปแบบ $M_{PV\&Grid,Grid}$ มีการใช้พลังงานไฟฟ้ารวมทั้งสิ้น 40.60 kWh/day (กลางวัน: 20.42 kWh/day, กลางคืน: 20.18 kWh/day) และมากที่สุดในรูปแบบ $M_{PV\&Grid,Grid(DO<3)}$ มีการใช้พลังงานไฟฟ้ารวมทั้งสิ้น 45.58 kWh/day (กลางวัน: 20.34 kWh/day, กลางคืน: 25.24 kWh/day)

ตารางที่ 16 การใช้พลังงานไฟฟ้าในการเติมอากาศของการเลี้ยงปลานิลระยะที่ 2

รูปแบบ	G_T (MJ/m ² day)	DO_{avg} (mg/L)	การใช้พลังงานไฟฟ้า				
			daytime		nighttime	All-day (kWh)	Grid _{all-day} (kWh)
			PV (kWh)	Grid (kWh)	Grid (kWh)		
$M_{PV,Grid}$	13.99	1.52	11.40	-	20.24	31.64	20.24
$M_{PV,Grid(DO<3)}$	14.13	1.53	11.44	-	25.06	36.50	25.06
$M_{PV\&Grid,Grid}$	14.13	1.77	11.48	8.94	20.18	40.60	29.12
$M_{PV\&Grid,Grid(DO<3)}$	14.11	1.79	11.46	8.88	25.24	45.58	34.12

เมื่อพิจารณาทั้งปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำพบว่ารูปแบบ CT มีปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำเฉลี่ยตลอดทั้งวันเฉลี่ย 1.77 mg/L ซึ่งสูงกว่าในรูปแบบ $M_{PV,Grid}$ และรูปแบบ $M_{PV,Grid(DO<3)}$ ดังนั้นรูปแบบที่กล่าวมาข้างต้นจึงไม่ได้รับการพิจารณาสำหรับระบบเติมอากาศเนื่องจากมีผลกระทบต่ออาการเจริญเติบโตของปลา ในขณะที่รูปแบบ $M_{PV\&Grid,Grid}$ และรูปแบบ $M_{PV\&Grid,Grid(DO<3)}$ มีค่าปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำสูงกว่ารูปแบบ CT แต่ในรูปแบบ $M_{PV\&Grid,Grid}$ มีการใช้งานเครื่องเติมอากาศที่น้อยกว่ารูปแบบ CT เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำมีความใกล้เคียงกันในปัจจัยนี้จึงไม่ส่งผลกระทบต่ออาการเลี้ยงปลา จากภาพที่ 48 พบว่า ตลอดทั้งวันรูปแบบ CT มีปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำเฉลี่ย 1.77 mg/L ดังนั้นในจึงมีความเหมาะสมสำหรับการใช้ในระบบเติมอากาศ จากเติมรูปแบบ CT มีการใช้พลังงานไฟฟ้าจากระบบ Grid ที่ 46.57 kWh/day โดยแยกเป็นการใช้พลังงานไฟฟ้าในช่วงกลางวัน 20.68 kWh/day และในช่วงกลางคืน 25.89 kWh/day เมื่อมีการนำรูปแบบ $M_{PV\&Grid,Grid}$ เข้ามาปรับเปลี่ยนจากใช้งานจะสามารถลดการใช้พลังงานไฟฟ้าจากระบบ Grid ได้ถึง 17.45 kWh/day

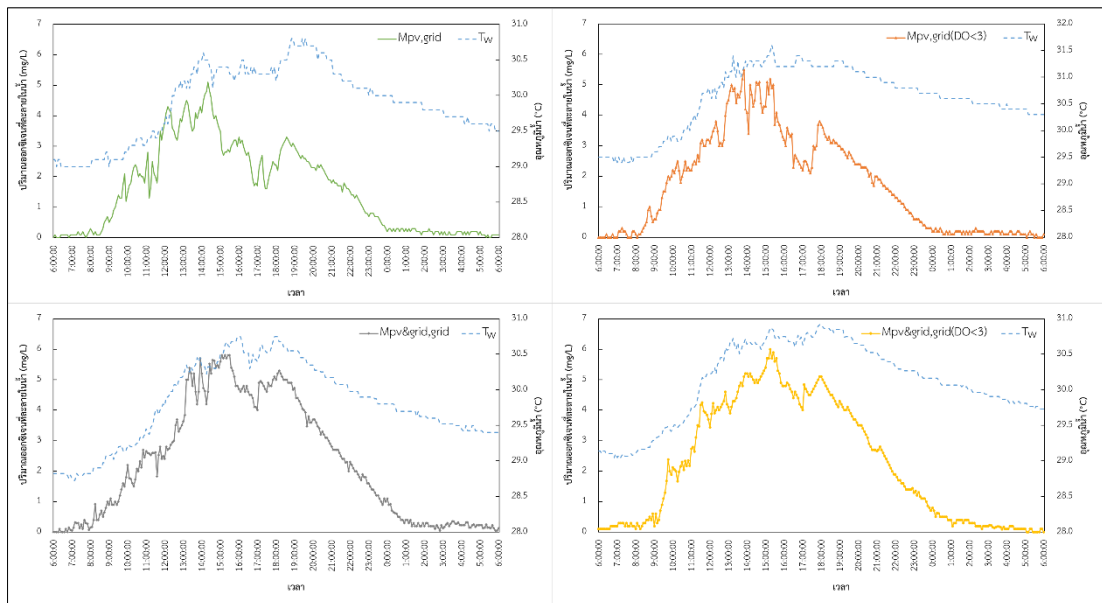


ภาพที่ 48 เปรียบเทียบปริมาณออกซิเจนที่ละลายน้ำของรูปแบบการจัดการพลังงาน และรูปแบบควบคุมในระยะเวลาเลี้ยงที่ 2

- ระยะเวลาเลี้ยงที่ 3

ระยะเวลาเลี้ยงที่ 3 มีการเลี้ยงปลานิล 14 วัน ตั้งแต่วันที่ 27 มิถุนายน - 9 กรกฎาคม 2562 แต่ละรูปแบบมีการทดสอบอย่างละ 3 วัน มีรูปแบบการเติมอากาศใช้งานเดียวกับระยะเวลาเลี้ยงที่ 2 ในช่วงเวลากลางวันมีการเปิดใช้งานเครื่องเติมอากาศตั้งแต่ 09.00-17.00 น. ช่วงกลางคืนรูปแบบ M_{Grid} มีการเปิดเครื่องเติมอากาศตั้งแต่ 00.00-09.00 น. และรูปแบบ M_{Grid(DO<3)} ยังคงมีปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำต่ำกว่า 3 mg/L จึงมีการใช้งานเครื่องเติมอากาศตั้งแต่ 23.00-09.00 น.

จากภาพที่ 49 พบว่าในระยะนี้มีผลรวมรังสีแสงอาทิตย์ตกกระทบบนตลอดทั้งวัน 11.96 MJ/m²-day ในรูปแบบ M_{PV,Grid} และรูปแบบ M_{PV,Grid(DO<3)} มีปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำเฉลี่ยจะน้อยกว่ารูปแบบ M_{PV&Grid,Grid} และรูปแบบ M_{PV&Grid,Grid(DO<3)} อย่างเห็นได้ชัดเจนเนื่องด้วยมีการเปิดเครื่องเติมอากาศที่เวลาเริ่มต้น 09.00 น. อีกทั้งรูปแบบ M_{PV,Grid} และรูปแบบ M_{PV,Grid(DO<3)} มีการเติมอากาศด้วยระบบ Solar PV เพียงอย่างเดียวทำให้ปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำเฉลี่ย 2.90 และ 3.27 mg/L ที่อุณหภูมิน้ำ 29.91 และ 30.75 °C ตามลำดับ และช่วงกลางคืนมีปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำเฉลี่ยเพียง 0.20 และ 0.19 mg/L ที่อุณหภูมิน้ำ 29.40 และ 30.00 °C ตามลำดับ ส่งผลให้รูปแบบ M_{PV,Grid} มีปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำเฉลี่ยตลอดทั้งวันต่ำสุด เมื่อเทียบกับรูปแบบที่มีการใช้พลังงานไฟฟ้าระบบ Solar PV&Grid จะสังเกตว่าปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง โดยในรูปแบบ M_{PV&Grid,Grid} มีปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำเพิ่มสูงสุด 5.80 mg/L อุณหภูมิน้ำ 30.62 °C ที่เวลา 15.15 น. เช่นเดียวกับรูปแบบ M_{PV&Grid,Grid(DO<3)} ที่มีปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำสูงสุด 6.00 mg/L อุณหภูมิน้ำ 30.88 °C ที่เวลา 15.15 น. และตลอดทั้งวันรูปแบบ M_{PV&Grid,Grid} มีปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำสูงสุด 2.25 mg/L ที่อุณหภูมิน้ำ 29.81 °C



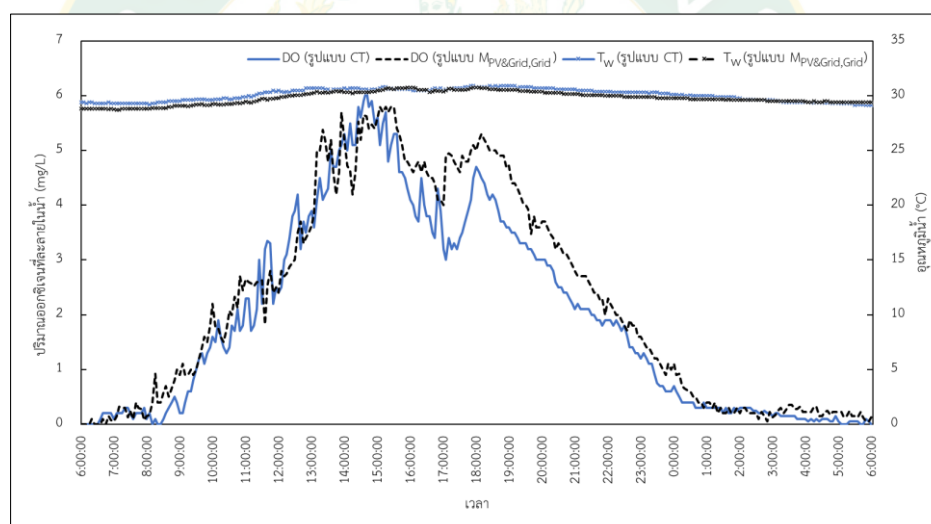
ภาพที่ 49 ปริมาณออกซิเจนที่ละลายน้ำของรูปแบบการจัดการพลังงานในระยะเวลาเลี้ยงที่ 3

โดยปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้า แสดงดังตารางที่ 17 พบว่า ในรูปแบบ $M_{PV,Grid}$ และรูปแบบ $M_{PV,Grid(DO<3)}$ เมื่อไม่มีการใช้พลังงานไฟฟ้าในช่วงกลางวันจากระบบ Grid ทำให้มีการใช้พลังงานไฟฟ้าตลอดทั้งวันทั้งสิ้น 32.22 และ 34.85 kWh/day ตามลำดับ ตามไปด้วยรูปแบบ $M_{PV\&Grid,Grid}$ และรูปแบบ $M_{PV\&Grid,Grid(DO<3)}$ จะสังเกตเห็นว่าในช่วงกลางวันในระยษะนี้มีการใช้พลังงานไฟฟ้าจากระบบ Grid มากกว่าระบบ Solar PV เนื่องจากเป็นช่วงฤดูฝนความเข้มของแสงอาทิตย์จึงมีความผันผวน ดังนั้นรูปแบบ $M_{PV\&Grid,Grid}$ จึงมีการใช้พลังงานไฟฟ้าตลอดทั้งวัน 42.88 kWh/day และรูปแบบ $M_{PV\&Grid,Grid(DO<3)}$ มีการใช้พลังงานไฟฟ้า 45.53 คิดเป็นการใช้พลังงานไฟฟ้าจากระบบ Grid ที่ 35.54 kWh/day ซึ่งมากกว่ารูปแบบ $M_{PV\&Grid,Grid}$ อยู่ที่ 2.65 kWh/day

ตารางที่ 17 การใช้พลังงานไฟฟ้าในการเติมอากาศของการเลี้ยงปลาในระยะที่ 3

รูปแบบ	G_T (MJ/m ² /day)	DO_{avg} (mg/L)	การใช้พลังงานไฟฟ้า				
			daytime		nighttime	All-day (kWh)	Grid _{all-day} (kWh)
			PV (kWh)	Grid (kWh)	Grid (kWh)		
$M_{PV,Grid}$	11.90	1.59	9.78	-	22.44	32.22	22.44
$M_{PV,Grid(DO<3)}$	11.95	1.73	9.85	-	25.00	34.85	25.00
$M_{PV\&Grid,Grid}$	12.00	2.25	9.99	10.41	22.48	42.88	32.89
$M_{PV\&Grid,Grid(DO<3)}$	11.99	2.24	9.99	10.40	25.14	45.53	35.54

เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำของรูปแบบ M ทั้งหมดพบว่า รูปแบบ $M_{PV,Grid}$ และรูปแบบ $M_{PV,Grid(DO<3)}$ ไม่เหมาะสำหรับการใช้งานในการเลี้ยงระยะที่ 3 เนื่องจาก รูปแบบ CT มีปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำเฉลี่ย 1.96 mg/L ทำให้ทั้งสองรูปแบบที่กล่าวมาข้างต้นมีปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำที่ต่ำกว่า ในขณะที่ในรูปแบบ $M_{PV\&Grid,Grid}$ และรูปแบบ $M_{PV\&Grid,Grid(DO<3)}$ ที่มีค่าเฉลี่ยใกล้เคียงกันมีปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำตลอดทั้งวันเฉลี่ย 2.25 และ 2.24 mg/L ตามลำดับ โดยจะสูงสุดในรูปแบบ $M_{PV\&Grid,Grid}$ ซึ่งมากกว่ารูปแบบ $M_{PV,Grid}$ และรูปแบบ $M_{PV,Grid(DO<3)}$ อยู่ 0.66 และ 0.53 mg/L ตามลำดับ ดังนั้นในระยะการเลี้ยงที่ 3 จึงมีการเลือกใช้รูปแบบ $M_{PV\&Grid,Grid}$ แสดงดังภาพที่ 50 อีกทั้งยังมีการใช้งานเครื่องเติมอากาศให้กับมอเตอร์ ด้วยเวลาน้อยกว่ารูปแบบ CT เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จากเดิมระบบ CT การใช้พลังงานไฟฟ้า 44.96 kWh/day ในรูปแบบ $M_{PV\&Grid,Grid}$ จึงมีความเหมาะสมในการใช้งาน โดยสามารถลดการใช้ไฟฟ้าจากระบบ Grid ได้ประมาณ 12.07 kWh/day

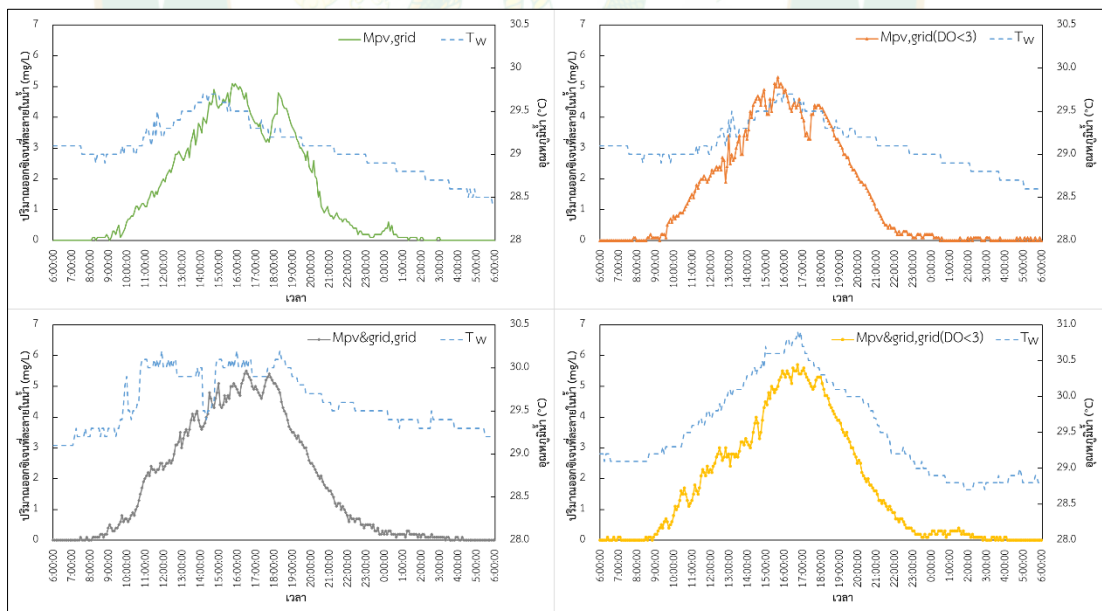


ภาพที่ 50 เปรียบเทียบปริมาณออกซิเจนที่ละลายน้ำของรูปแบบการจัดการพลังงาน และรูปแบบควบคุมในระยะการเลี้ยงที่ 3

- ระยะการเลี้ยงที่ 4

ระยะการเลี้ยงที่ 4 มีระยะของการเลี้ยงปลาชนิด 20 วัน ตั้งแต่วันที่ 10 - 30 กรกฎาคม 2562 แต่ละรูปแบบมีการทดสอบ 4 วัน ในทุกรูปแบบมีช่วงเวลาของการใช้งานเครื่องเติมอากาศเดียวกันทั้ง 2 ช่วงคือ กลางวันใช้งานเครื่องเติมอากาศตั้งแต่ 09.00-17.00 น และกลางคืนเนื่องด้วยปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำต่ำกว่า 3 mg/L ก่อนเวลา 23.00 น. ทำให้มีการใช้งานเครื่องเติมอากาศพร้อมกันที่เวลา 23.000-09.00 น.

ปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำ จากภาพที่ 51 ถึงแม้จะมีการใช้งานเครื่องเติมอากาศเป็น เวลาการทำงานที่เท่ากัน 18 ชั่วโมง (กลางวัน: 8 ชั่วโมง กลางคืน: 10 ชั่วโมง) แต่ในรูปแบบ $M_{PV\&Grid,Grid}$ และรูปแบบ $M_{PV\&Grid,Grid(DO<3)}$ ยังคงมีปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำที่สูงกว่ารูปแบบ $M_{PV,Grid}$ และรูปแบบ $M_{PV,Grid(DO<3)}$ เนื่องจากเป็นระยะสุดท้ายของการเลี้ยง ปลาชนิดการเจริญเติบโตที่ เพิ่มสูงขึ้นฉะนั้นจึงแปรผันตรงกับความต้องการออกซิเจนที่มากขึ้น ทำให้เห็นถึงความชัดเจนใน รูปแบบของการใช้พลังงานไฟฟ้าจากระบบ Solar PV&Grid และระบบ Solar PV ในรูปแบบ $M_{PV\&Grid,Grid}$ มีผลรวมรังสีแสงอาทิตย์ตกกระทบตลอดทั้งวัน 11.01 MJ/m²day ปริมาณออกซิเจนที่ ละลายในน้ำช่วงกลางวัน 3.06 mg/L ที่อุณหภูมิน้ำ 29.85 °C และช่วงกลางคืนที่เวลาใช้งานเครื่อง เติมอากาศเริ่มต้น 23.00 น. มีปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำ 0.50 mg/L ที่อุณหภูมิน้ำ 29.50 °C ทำให้มีปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำและอุณหภูมิน้ำเฉลี่ยตลอดทั้งวันสูงสุด 1.75 mg/L และ 29.60 °C ตามลำดับ รองลงมาเป็นรูปแบบ $M_{PV\&Grid,Grid(DO<3)}$ ปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำเฉลี่ย 1.70 mg/L ที่อุณหภูมิน้ำ 29.53 °C ตามด้วยรูปแบบ $M_{PV,Grid}$ และรูปแบบ $M_{PV,Grid(DO<3)}$ มีปริมาณ ออกซิเจนที่ละลายในน้ำ 1.49 และ 1.47 mg/L ที่อุณหภูมิน้ำ 29.08 และ 29.11 °C ตามลำดับ ดังนั้นเมื่อพิจารณาทุกรูปแบบในช่วงกลางวันของระบบเติมอากาศด้วยระบบ Solar PV&Grid โดย เฉลี่ยมีปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำสูงกว่าระบบ Solar PV ที่ 0.25 mg/L



ภาพที่ 51 ปริมาณออกซิเจนที่ละลายน้ำของรูปแบบการจัดการพลังงานในระยะการเลี้ยงที่ 4

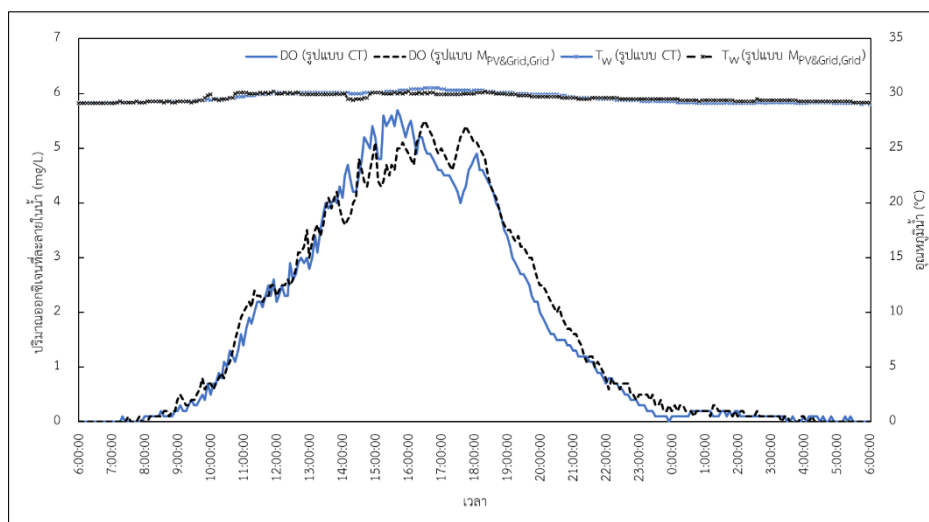
อย่างไรก็ตามในระยะนี้มีการทำงานของการเปิดเครื่องเติมอากาศให้กับมอเตอร์เป็นเวลา ที่เท่ากัน แตกต่างกันในส่วนของระบบการใช้พลังงานไฟฟ้า จากตารางที่ 18 พบว่ารูปแบบ $M_{PV,Grid}$ และ รูปแบบ $M_{PV,Grid(DO<3)}$ การใช้พลังงานไฟฟ้ารวมทั้งสิ้นที่ 33.92 kWh/day (กลางวัน: 8.83 kWh/day,

กลางวัน: 25.09 kWh/day) และ 34.47 kWh/day (กลางวัน: 8.80 kWh/day, กลางคืน: 25.67 kWh/day) เมื่อเทียบกับรูปแบบที่มีการเติมอากาศด้วยระบบ Solar PV&Grid จากรูปแบบ $M_{PV&Grid,Grid}$ และ รูปแบบ $M_{PV&Grid,Grid(DO<3)}$ ที่มีการใช้พลังงานไฟฟ้ารวม 45.75 kWh/day (กลางวัน: 20.43 kWh/day, กลางคืน: 25.32 kWh/day) และ 45.60 kWh/day (กลางวัน: 20.32 kWh/day, กลางคืน: 25.28 kWh/day) ตามลำดับ และในทุกรูปแบบช่วงกลางวันมีการใช้งานเครื่องเติมอากาศ เท่ากัน 10 ชั่วโมง จึงทำให้โดยเฉลี่ยมีการใช้พลังงานไฟฟ้าจากระบบ Grid ใกล้เคียงที่ 25.34 kWh/day

ตารางที่ 18 การใช้พลังงานไฟฟ้าในการเติมอากาศของการเลี้ยงปลานิลระยะที่ 4

รูปแบบ	G_T (MJ/m ² day)	DO_{avg} (mg/L)	การใช้พลังงานไฟฟ้า				
			daytime		nighttime	All-day (kWh)	Grid _{all-day} (kWh)
			PV (kWh)	Grid (kWh)	Grid (kWh)		
$M_{PV,Grid}$	10.97	1.49	8.83	-	25.09	33.92	25.09
$M_{PV,Grid(DO<3)}$	10.95	1.47	8.80	-	25.67	34.47	25.67
$M_{PV&Grid,Grid}$	11.01	1.75	8.83	11.60	25.32	45.75	36.92
$M_{PV&Grid,Grid(DO<3)}$	11.09	1.70	8.92	11.40	25.28	45.60	36.68

เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำและการใช้พลังงานจากตารางที่ 18 พบว่ารูปแบบ CT มีปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำเฉลี่ย 1.70 mg/L จะสังเกตว่ารูปแบบ $M_{PV,Grid}$ และรูปแบบ $M_{PV,Grid(DO<3)}$ มีปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำต่ำกว่ารูปแบบ CT ดังนั้นทั้งสองรูปแบบข้างต้นจึงไม่ได้รับการพิจารณา ดังนั้นในรูปแบบ $M_{PV&Grid,Grid}$ จึงมีความเหมาะสมสำหรับระยะการเลี้ยงที่ 4 เนื่องจากมีปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำสูงกว่าอีกทั้งมีการใช้พลังงานไฟฟ้าน้อยกว่าจากภาพที่ 52 โดยที่แต่เดิมของรูปแบบ CT มีการใช้พลังงานไฟฟ้าจากระบบ Grid ที่ 45.32 kWh/day เมื่อมีการนำรูปแบบ $M_{PV&Grid,Grid}$ เข้าไปใช้ในการจัดการพลังงานไฟฟ้าจะสามารถลดการใช้ไฟฟ้าจากระบบ Grid ได้ 8.40 kWh/day



ภาพที่ 52 เปรียบเทียบปริมาณออกซิเจนที่ละลายน้ำของรูปแบบการจัดการพลังงาน และรูปแบบควบคุมในระยะการเลี้ยงที่ 4

- การใช้พลังงานของรูปแบบการเลี้ยงของการเติมอากาศ

เมื่อพิจารณาการใช้พลังงานของรูปแบบการเลี้ยงของการเติมอากาศของการเลี้ยงปลาชนิดหนึ่งรอบในหัวข้อ 4.1.2 การประเมินรูปแบบการจัดการพลังงานสามารถนำมาสรุปของผลรวมการใช้พลังงานไฟฟ้าเติมอากาศของระบบ Grid แสดงดังตารางที่ 19 จะพบว่ากรณีของระบบ CT มีการใช้พลังงานไฟฟ้า 3,771.20 kWh/crop ในขณะที่มีการปรับเปลี่ยนการเปิดการทำงานของเครื่องเติมอากาศแต่ละระยะการเลี้ยงที่กล่าวมาข้างต้น (ระยะการเลี้ยงที่ 1 ใช้รูปแบบ M_{pv} และระยะการเลี้ยงที่ 2-4 ใช้รูปแบบ $M_{pv\&Grid,Grid}$) จะใช้ไฟฟ้าจากระบบ Grid ที่ 2,596.62 kWh/crop ดังนั้นเมื่อคิดเป็นผลประหยัดจะทำให้มีการประหยัดไฟฟ้าเท่ากับ 1,174.58 kWh/crop คิดเป็นเงิน 5,085.93 Baht/crop (ค่าไฟฟ้าเฉลี่ย 4.33 Baht/kWh)

ตารางที่ 19 ผลรวมการเปรียบเทียบการใช้พลังงานไฟฟ้าเติมอากาศของระบบไฟฟ้าพื้นฐาน

ระยะ	ช่วงเวลา (day)	รูปแบบ CT	รูปแบบการเลี้ยงใช้งาน		ผลประหยัด kWh/day
		kWh/day	รูปแบบ	kWh/day	
1	66	-	M_{pv}	-	-
2	48	46.57	$M_{pv\&Grid,Grid}$	29.12	17.45
3	14	44.96	$M_{pv\&Grid,Grid}$	32.89	12.07
4	20	45.32	$M_{pv\&Grid,Grid}$	36.92	8.40

4.3 ผลการทดสอบการเลี้ยงปลานิลด้วยรูปแบบการจัดการพลังงานที่เหมาะสม

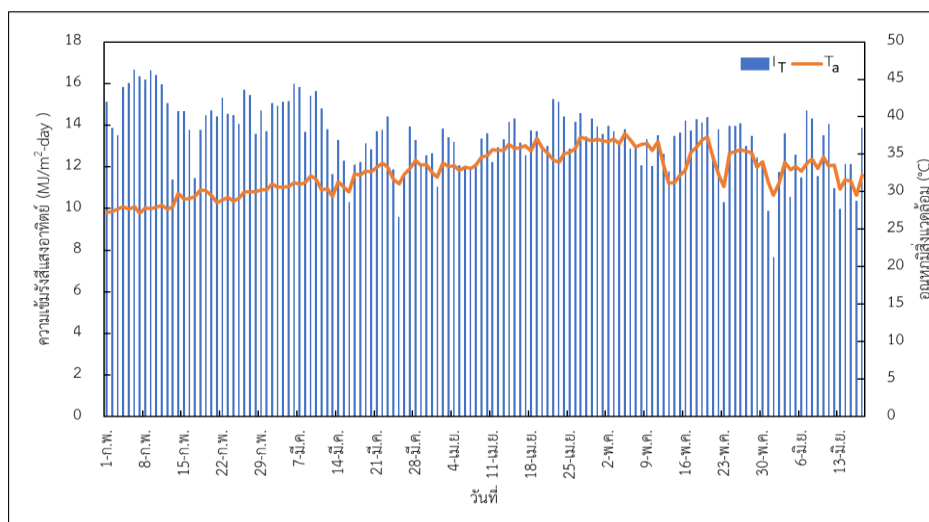
4.3.1 ผลการทดสอบการใช้พลังงานไฟฟ้าด้วยรูปแบบการจัดการพลังงานที่เหมาะสม

ในการประเมินการใช้ไฟฟ้าเป็นการประเมินการใช้พลังงานไฟฟ้าในระยะที่ 1-4 โดยการใช้รูปแบบการจัดการพลังงานไฟฟ้าตามหัวข้อ 4.2 ในข้างต้นมีการวิเคราะห์การทดสอบเปรียบเทียบรูปแบบควบคุม (รูปแบบ CT) และรูปแบบการจัดการพลังงาน (รูปแบบ M) จากการใช้พลังงานไฟฟ้าและปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำ

การจัดการพลังงานของระบบเดิมอากาศสำหรับการเลี้ยงปลานิลนั้นมีการใช้รูปแบบการจัดการพลังงาน ได้แก่ ระยะการเลี้ยงที่ 1 เลือกใช้งานของรูปแบบ M_{PV} (กลางวัน: ใช้ไฟฟ้า Solar PV, กลางคืน: Battery) และระยะการเลี้ยงที่ 2-4 ใช้งานของรูปแบบ $M_{PV\&Grid,Grid}$ (กลางวัน: ใช้ไฟฟ้า Solar PV&Grid, กลางคืน: ใช้ไฟฟ้า Grid) อีกทั้งทุกระยะที่กล่าวมาข้างต้น มีการใช้พลังงานไฟฟ้าจากแบตเตอรี่ในช่วงกลางคืนจากการชาร์จประจุไฟฟ้าเข้าไปเก็บสะสมพลังงานจากระบบในช่วงกลางวัน ตั้งแต่ 09.00-17.00 น. และมีการนำมาใช้งานในช่วงเวลากลางคืนตั้งแต่เวลา 05.00 น. หรือใช้ในกรณีเกิดเหตุฉุกเฉินที่ไฟฟ้าดับในช่วงเวลากลางคืน โดยมีผลการทดสอบดังนี้

- ความเข้มรังสีแสงอาทิตย์

ความเข้มรังสีแสงอาทิตย์และอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมโดยเฉลี่ยของระยะการเลี้ยงปลานิลในรูปแบบการจัดการพลังงาน จากภาพที่ 53 พบว่าตลอดระยะเวลาการเลี้ยงในรูปแบบของการจัดการ ตั้งแต่วันที่ 1 กุมภาพันธ์ - 17 มิถุนายน 2563 มีตลอดทั้งวันมีผลรวมรังสีแสงอาทิตย์ตกกระทบ $13.46 \text{ MJ/m}^2\text{-day}$ และอุณหภูมิสิ่งแวดล้อม $32.63 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ระยะการเลี้ยงที่ 1 ในช่วงการเลี้ยงระยะแรกมีการเลี้ยงตั้งแต่ 1 กุมภาพันธ์ ถึง 27 มีนาคม มีตลอดทั้งวันมีผลรวมรังสีแสงอาทิตย์ตกกระทบสูงสุดและอุณหภูมิสิ่งแวดล้อม $14.19 \text{ MJ/m}^2\text{-day}$ และ $30.07 \text{ }^{\circ}\text{C}$ รองลงมาเป็นระยะที่ 3 และ 2 มีช่วงการเลี้ยงตั้งแต่ 15 - 28 พฤษภาคม และ 28 มีนาคม - 14 พฤษภาคม 2563 มีตลอดทั้งวันมีผลรวมรังสีแสงอาทิตย์ตกกระทบ 13.53 และ $13.21 \text{ MJ/m}^2\text{-day}$ ตามลำดับ และมีอุณหภูมิสิ่งแวดล้อม 34.64 และ $35.09 \text{ }^{\circ}\text{C}$ น้อยที่สุดในระยะ 4 เนื่องด้วยในระยะนี้มีสภาพอากาศที่แปรปรวน ฝนตกและท้องฟ้าครึ้มจึงทำให้ค่าความเข้มของแสงอาทิตย์ลดต่ำลงไปด้วย โดยตลอดทั้งวันมีผลรวมรังสีแสงอาทิตย์ตกกระทบอยู่ที่ $11.99 \text{ MJ/m}^2\text{-day}$ และอุณหภูมิสิ่งแวดล้อม $32.60 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ในวันที่ 30 พฤษภาคม - 17 มิถุนายน 2563

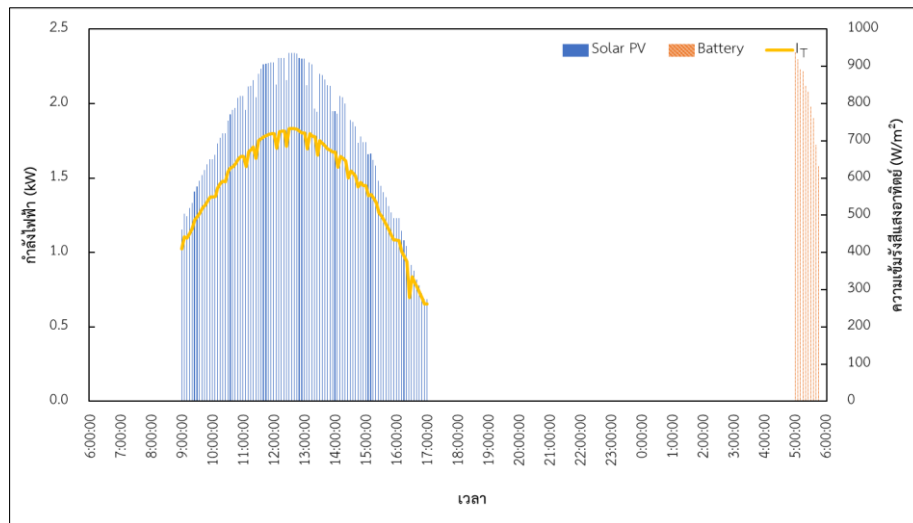


ภาพที่ 53 ความเข้มรังสีแสงอาทิตย์และอุณหภูมิสิ่งแวดล้อม

- ระยะการเลี้ยงที่ 1

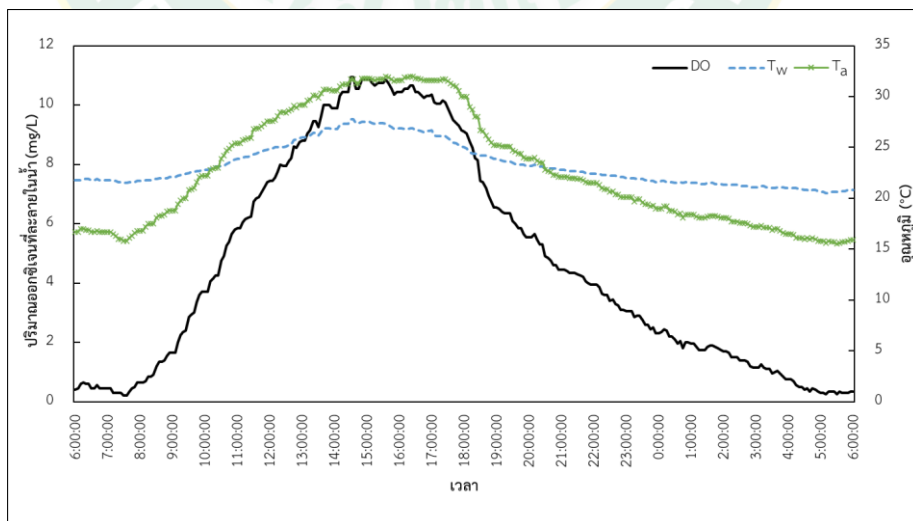
การใช้พลังงานไฟฟ้าในรูปแบบการจัดการพลังงานของการเติมอากาศระยะการเลี้ยงที่ 1 ระยะการเลี้ยงตั้งแต่วันที่ 1 กุมภาพันธ์ - 17 มิถุนายน 2563 มีการใช้รูปแบบ PV โดยเมื่อมีการใช้งาน เครื่องเติมอากาศและชาร์จเจอร์ไฟฟ้าเข้าไปการเก็บสะสมพลังงานไฟฟ้าไว้ในแบตเตอรี่พร้อมกันด้วย ระบบ Solar PV ในช่วงเวลา 09.00-17.00 น. และในช่วงเวลาตั้งแต่ 05.00 น. เป็นต้นไป มีการใช้พลังงานไฟฟ้าที่เก็บสะสมในแบตเตอรี่กับเครื่องเติมอากาศ

เมื่อพิจารณากำลังไฟฟ้าที่มีการใช้ระบบ Solar PV ผลิตไฟฟ้าให้กับเครื่องเติมอากาศเพียงอย่างเดียว จากภาพที่ 54 กำลังการผลิตไฟฟ้าสูงสุดของ 6 กุมภาพันธ์ 2563 ในระยะการเลี้ยงที่ 1 พบว่าตลอดช่วงการเลี้ยงระยะแรกในช่วงกลางวันตลอดทั้งวันมีผลรวมรังสีแสงอาทิตย์ตกกระทบ $14.11 \text{ MJ/m}^2\text{-day}$ โดยที่เวลาเริ่มต้น 09.00 น. มีความเข้มรังสีแสงอาทิตย์ 409.27 W/m^2 และเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องสูงสุดที่ 732.59 W/m^2 เนื่องจากกำลังการผลิตที่ได้นั้นจะแปรผันตรงกับความเข้มแสงอาทิตย์ที่ได้รับทำให้สามารถผลิตไฟฟ้าได้ $2,339 \text{ W}$ โดยมีกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าที่ 6.00 A และ 312.39 V และมีการประจุไฟฟ้าเข้าไปสะสมให้กับแบตเตอรี่ จากนั้นค่อยๆ ลดลงตามลำดับที่ความเข้มรังสีแสงอาทิตย์ต่ำสุด 261.13 W/m^2 จะสามารถผลิตไฟฟ้าได้ 685.7 W ดังนั้นช่วงกลางวันจึงมีกำลังการผลิตไฟฟ้าเฉลี่ยอยู่ที่ $1,755 \text{ W}$ ทำให้ตลอดทั้งวันมีการใช้พลังงานไฟฟ้าจากรวมทั้งสิ้น 16.15 kWh/day (Solar PV: 14.11 kWh/day , Battery: 2.04 kWh/day) ส่งผลให้ในช่วงกลางคืนที่เวลา 05.00 น. มีการใช้พลังงานไฟฟ้าจากแบตเตอรี่โดยมีการคายประจุแรงดันไฟฟ้าเริ่มต้นที่ 321.00 V ที่กระแสไฟฟ้า 7.30 A จากนั้นลดลงอย่างต่อเนื่องทำให้แบตเตอรี่สามารถใช้งานได้ประมาณ 50 นาที



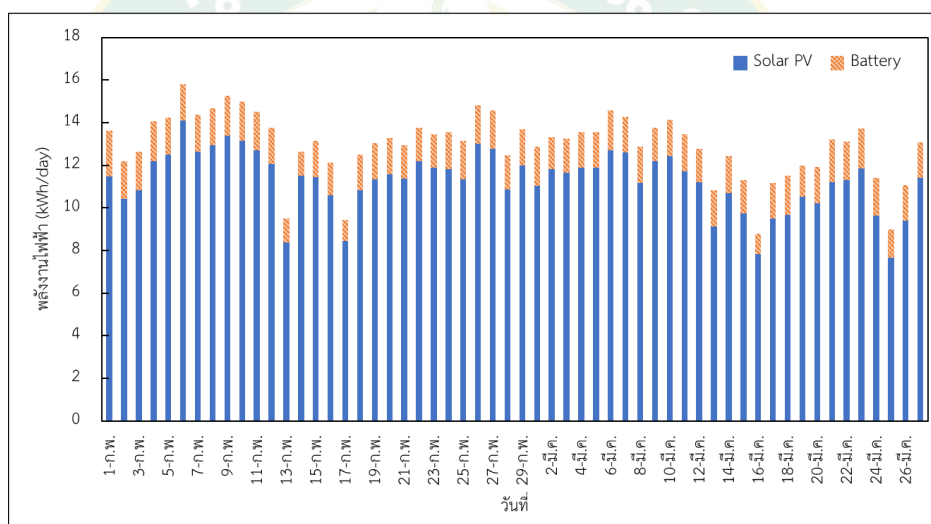
ภาพที่ 54 กำลังการผลิตไฟฟ้าสูงสุดของระยะการเลี้ยงที่ 1 (6 กุมภาพันธ์ 2563)

จากการเติมอากาศของระบบ Solar PV ข้างต้นนั้นส่งผลให้มีปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำเฉลี่ยตลอดทั้งวัน 4.64 mg/L อุณหภูมิในน้ำ 23.27 °C และอุณหภูมิสิ่งแวดล้อม 22.77 °C โดยเฉลี่ยในช่วงกลางวัน 7.90 mg/L อุณหภูมิในน้ำ 25.38 °C ที่เวลาเริ่มต้น 09.00 น. มีปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำ 1.4 mg/L และเพิ่มขึ้นต่อเนื่องสูงสุดที่ 10.9 mg/L อุณหภูมิในน้ำ 27.80 °C ที่เวลา 14.35 น. จากนั้นค่อยๆ ลดลงจนถึงในช่วงเวลากลางคืนมีปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำต่ำสุดที่ 0.3 mg/L ที่เวลา 05.40 น. ทำให้ตลอดทั้งช่วงกลางวันมีปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำเฉลี่ย 0.5 mg/L อุณหภูมิในน้ำและอุณหภูมิสิ่งแวดล้อม 17.0 และ 15.7°C ตามลำดับ แสดงดังภาพที่ 55



ภาพที่ 55 ปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำและอุณหภูมิ (6 กุมภาพันธ์ 2563) ระยะการเลี้ยงที่ 1

ดังนั้นการใช้พลังงานไฟฟ้าของระยะการเลี้ยงที่ 1 ในการเลือกใช้รูปแบบ M_{PV} แสดงดังภาพที่ 56 พบว่าพลังงานไฟฟ้าที่นำไปใช้เปิดเครื่องเติมอากาศให้กับมอเตอร์นั้นขึ้นอยู่กับความเข้มของรังสีแสงอาทิตย์เป็นหลัก เมื่อความเข้มของรังสีแสงอาทิตย์ที่สูงจึงทำให้พลังงานไฟฟ้าแปรผันตามไปด้วย ในวันที่ 6 กุมภาพันธ์ 2563 เป็นวันที่มีผลรวมรังสีแสงอาทิตย์ตกกระทบตลอดทั้งวันสูงสุด 16.67 MJ/m²day ทำให้มีพลังงานไฟฟ้าทั้งสิ้น 16.15 kWh/day โดยมีการใช้พลังงานไฟฟ้าจากระบบ Solar PV ในช่วงกลางวัน 14.11 kWh/day และพลังงานไฟฟ้าส่วนที่เหลือเป็นการนำไฟฟ้าจากแหล่งสะสมพลังงานแบตเตอรี่มาใช้งานอีก 2.04 kWh/day และน้อยที่สุดในวันที่ 25 มีนาคม 2563 มีการใช้พลังงานไฟฟ้ารวมทั้งสิ้น 9.47 kWh/day ทำให้โดยเฉลี่ยในการเลี้ยงระยะที่ 1 มีการใช้พลังงานไฟฟ้า 13.30 kWh/day โดยระบบ Solar PV มีการใช้ในช่วงกลางวัน 11.26 kWh/day และมีการเก็บสะสมพลังงานไฟฟ้าให้กับแบตเตอรี่ใช้ในเวลากลางคืน 2.04 kWh



ภาพที่ 56 พลังงานไฟฟ้าของระยะการเลี้ยงที่ 1

เมื่อพิจารณาในการผลิตไฟฟ้าตลอดในระยะการเลี้ยงที่ 1 พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการเปิดเครื่องเติมอากาศนี้มีการใช้พลังงานจากแหล่งพลังงานทดแทนทั้งสิ้นโดยส่วนที่เหลือจากการใช้งานจากระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์และเข้ากักเก็บสะสมพลังงานให้กับแบตเตอรี่ จึงทำให้ในระยะการเลี้ยงนี้ระบบมีการผลิตไฟฟ้ารวมทั้งสิ้น 725.52 kWh/Phase โดยมีการใช้พลังงานไฟฟ้าจากระบบ Solar PV ที่ 631.70 kWh/Phase หรือคิดเป็น 87.07% พลังงานไฟฟ้าส่วนที่เหลือเป็นการนำไฟฟ้าจากแหล่งสะสมพลังงานแบตเตอรี่มาใช้งานอีก 93.82 kWh/Phase แสดงดังตารางที่ 20

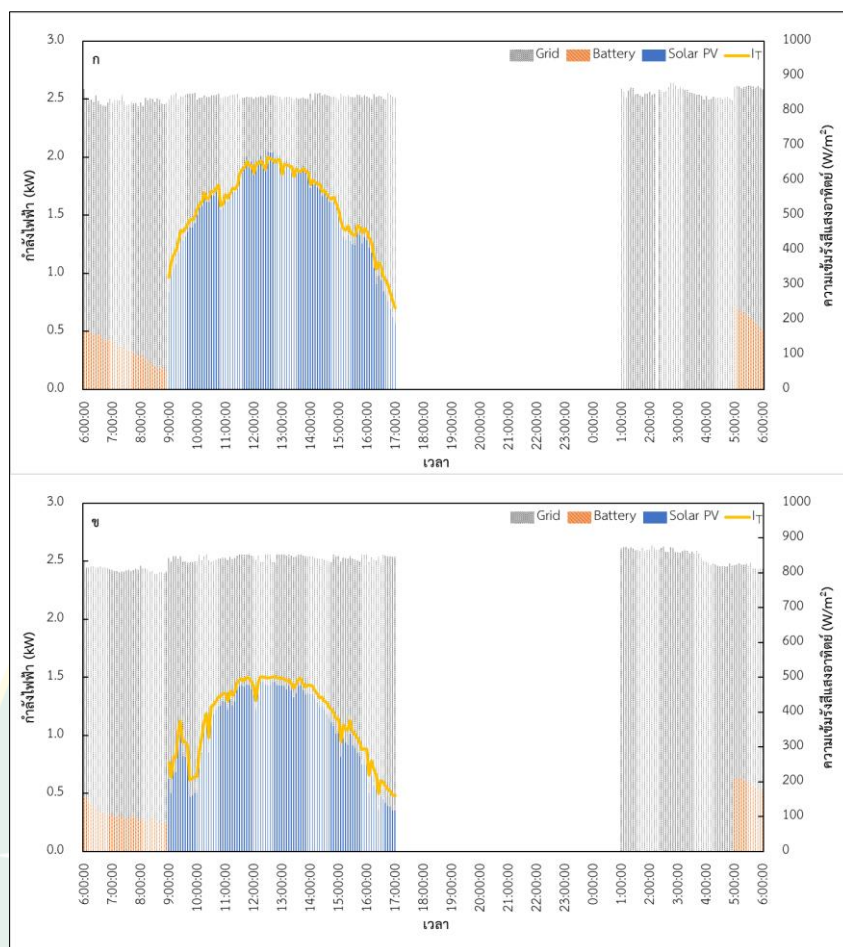
ตารางที่ 20 การใช้พลังงานไฟฟ้าเติมอากาศของระบบ Solar PV ระยะการเลี้ยงที่ 1

รายละเอียด	G_T (MJ/m ² day)	กลางวัน		กลางคืน	
		PV	Grid	Grid	Battery
พลังงานไฟฟ้าการผลิต สูงสุด (kWh/day _{max})	16.67	14.11	-	-	2.04
พลังงานไฟฟ้าการผลิต ต่ำสุด (kWh/day _{min})	9.59	7.65	-	-	1.82
พลังงานไฟฟ้าการผลิต เฉลี่ย (kWh/day)	14.19	11.26	-	-	2.04
พลังงานไฟฟ้าการผลิตรวม (kWh/Phase)		631.70	-	-	93.85

- ระยะการเลี้ยงที่ 2

การใช้พลังงานไฟฟ้าในรูปแบบการจัดการพลังงานของการเติมอากาศระยะการเลี้ยงที่ 2 มีการใช้รูปแบบ $M_{PV\&Grid,Grid}$ โดยช่วงกลางวันใช้งานเครื่องเติมอากาศให้กับมอเตอร์ด้วยระบบ Solar PV&Grid พร้อมกับมีการชาร์จประจุไฟฟ้าเข้าไปเก็บสะสมพลังงานไว้กับแบตเตอรี่ จากนั้นในช่วงเวลากลางคืนมีการใช้ไฟฟ้าจากระบบ Grid ตั้งแต่ 01.00-09.00 น. ระหว่างการใช้งานจากระบบ Grid จะมีการใช้งานร่วมจากแบตเตอรี่หรือระบบ Grid&Battery

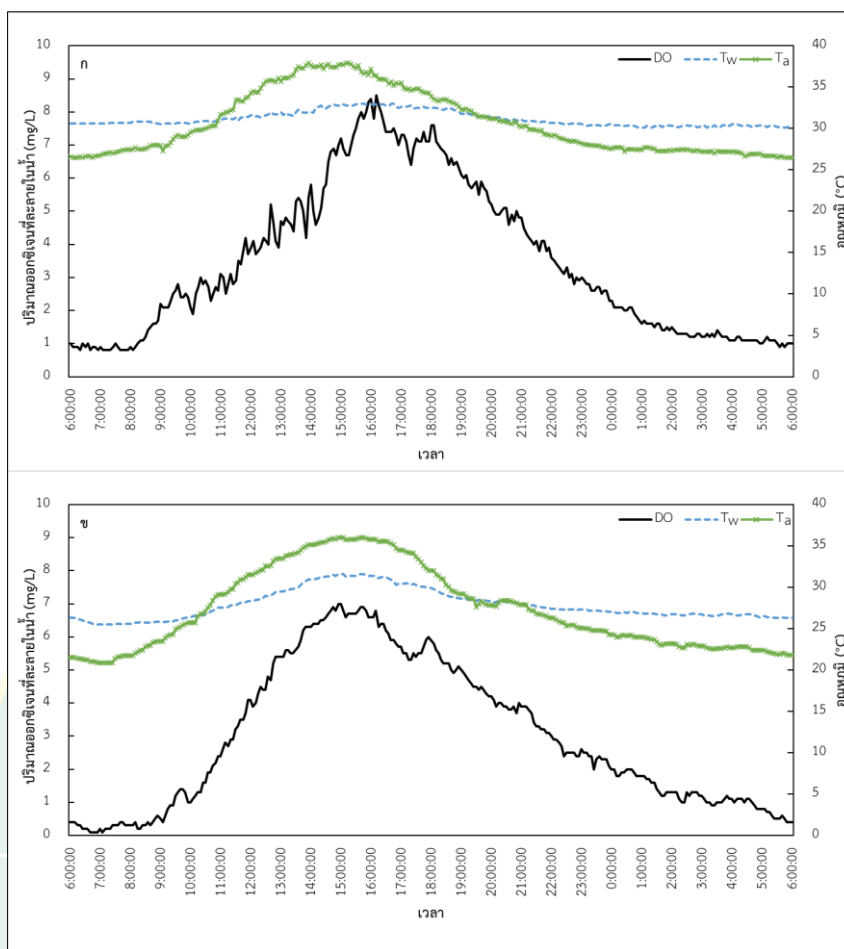
จากภาพที่ 57 พบว่าวันที่มีความเข้มของรังสีแสงอาทิตย์ต่ำสุดและสูงสุดในวันที่ 1 และ 22 เมษายน 2563 โดยมีผลรวมรังสีแสงอาทิตย์ตกกระทบบนตลอดทั้งวัน 11.03 และ 15.24 MJ/m²-day ตามลำดับ ในวันที่มีความเข้มรังสีแสงอาทิตย์สูงสุดจะมีค่ากระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าจากระบบ Solar PV ที่แปรผันตรงกับความเข้มรังสีแสงอาทิตย์ ทำให้ที่ความเข้มรังสีแสงอาทิตย์สูงสุดมีกำลังการผลิตไฟฟ้าจากระบบ Solar PV สูงกว่าระบบ Grid คิดเป็นพลังงานไฟฟ้าที่ใช้กับเครื่องเติมอากาศในช่วงกลางวัน 20.33 kWh/day (Solar PV: 12.47 kWh/day, Grid: 7.86 kWh/day) อีกทั้งระบบ Solar PV มีการชาร์จประจุไฟฟ้าเข้าไปเก็บสะสมให้กับแบตเตอรี่ส่งผลทำให้ในช่วงกลางคืนมีการใช้พลังงานไฟฟ้าจากระบบ Grid&Battery ทั้งสิ้น 20.13 kWh/day (Grid: 18.42 kWh/day, Battery: 1.71 kWh/day) แม้ในวันที่มีความเข้มแสงอาทิตย์ต่ำสุด (1 เมษายน 2563) ช่วงเวลากลางวันมีการใช้พลังงานไฟฟ้าจากระบบ Solar PV น้อยกว่าระบบ Grid ทำให้มีการใช้พลังงานไฟฟ้าจากระบบ Solar PV ที่ 8.44 kWh/day และ 11.95 kWh/day เป็นการนำพลังงานไฟฟ้าจากระบบ Grid ดังนั้นแม้ในวันที่ความเข้มของรังสีแสงอาทิตย์ต่ำนี้ก็ยังสามารถลดการใช้พลังงานไฟฟ้าจากระบบ Solar PV&Battery ลงได้ถึง 10.02 kWh/day (Solar PV: 8.44 kWh/day, Battery: 1.58 kWh/day)



ภาพที่ 57 (ก) กำลังการผลิตพลังงานไฟฟ้าสูงสุด (22 เมษายน 2563)

(ข) กำลังการผลิตพลังงานไฟฟ้าต่ำสุด (1 เมษายน 2563) ของระยะการเลี้ยงที่ 2

ในวันที่มีกำลังการผลิตพลังงานไฟฟ้าสูงสุดส่งผลให้ในตลอดทั้งวันมีปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำเฉลี่ย 3.5 mg/L อุณหภูมิน้ำและสิ่งแวดล้อม 31.2 °C และ 30.6 °C ตามลำดับ เมื่อเทียบกับวันที่มีกำลังการผลิตไฟฟ้าต่ำสุดนั้นปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำยังคงสูงกว่า จะเห็นได้ชัดในช่วง 06.00-09.00 น. โดยวันที่ 22 เมษายน 2563 มีปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำเฉลี่ย 2.97 mg/L อุณหภูมิน้ำและสิ่งแวดล้อม 27.87 และ 27.34 °C ตามลำดับ โดยในช่วงกลางวันมีปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง หลังจากพระอาทิตย์ตกมีการปิดเครื่องเติมอากาศทำให้ปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำมีการลดลงอย่างคงที่ และเมื่อมีการเปิดใช้งานเครื่องเติมอากาศอีกครั้งในช่วงกลางคืนที่เวลา 01.00 น. ปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำเริ่มต้น 1.7 mg/L อุณหภูมิน้ำ 30.1 °C และอุณหภูมิสิ่งแวดล้อม 27.7 °C ทำให้ในเวลากลางคืนมีปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำโดยเฉลี่ย 1.1 mg/L อุณหภูมิน้ำ 30.5 °C และอุณหภูมิสิ่งแวดล้อม 27.14 °C แสดงดังภาพที่ 58

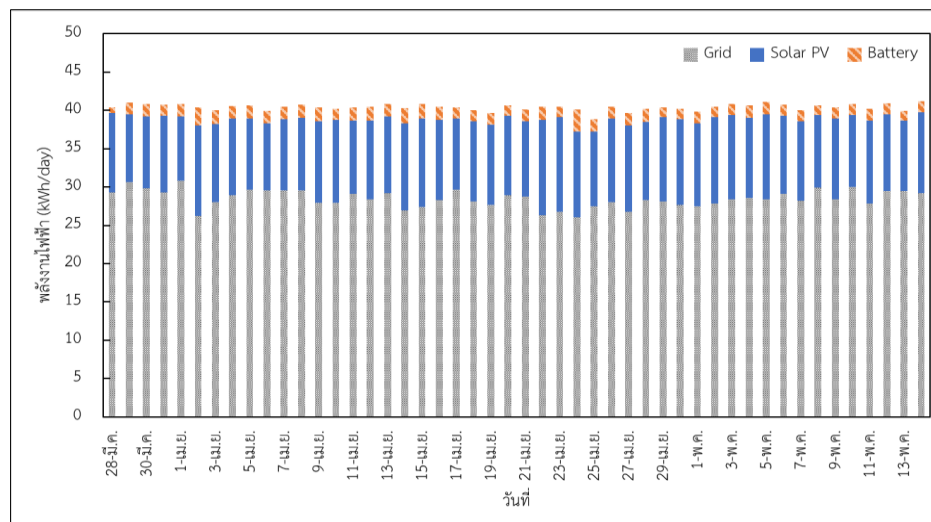


ภาพที่ 58 (ก) ปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำ (22 เมษายน 2563)

(ข) ปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำ (1 เมษายน 2563) และอุณหภูมิของระยะการเลี้ยงที่ 2

จากการเลี้ยงปลานิลในระยะที่ 2 มีการเลี้ยงตั้งแต่วันที่ 28 มีนาคม ถึง 14 พฤษภาคม 2563 จากภาพที่ 59 พบว่าตลอดทั้งวันมีผลรวมรังสีแสงอาทิตย์ตกกระทบจะอยู่ในช่วง 11.03-15.24 MJ/m²-day ในช่วงกลางวันระบบ Solar PV&Grid มีการใช้กำลังไฟฟ้ากับเครื่องเติมอากาศเฉลี่ย 2,500 W (Solar PV: 1,280 W, Grid: 1,220 W) ในขณะที่มีความเข้มรังสีแสงอาทิตย์สูงนั้นระบบ Solar PV ยังคงมีกำลังการผลิตไฟฟ้าที่สูงขึ้นเช่นกัน แต่กระแสไฟฟ้าที่จ่ายเข้าไปชาร์จอัดประจุให้แบตเตอรี่ยังคงค่อนข้างคงที่ประมาณ 1.20 A แรงดันไฟฟ้าอยู่ระหว่าง 272.83-305.31 V โดยกระแสไฟฟ้าที่ผลิตได้ส่วนใหญ่ถูกนำไปใช้กับเครื่องเติมอากาศ ทำให้ตลอดช่วงกลางวันมีการผลิตพลังงานไฟฟ้าใช้ 20.21 kWh/day (Solar PV: 10.32 kWh/day, Grid: 9.89 kWh/day) ในช่วงกลางคืนเมื่อมีการเปิดใช้งานเครื่องเติมอากาศเวลา 01.00 น. โดยเฉลี่ยจะมีการใช้กำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ 2,582 W และเมื่อมีการใช้งานจากแบตเตอรี่จ่ายให้กับเครื่องเติมอากาศทำให้กำลังไฟฟ้าจากระบบ Grid ลดต่ำสุดที่ 1,868 W ฉะนั้นในช่วงกลางคืนมีการใช้พลังงานไฟฟ้า 20.39 kWh/day (Grid:

18.77 kWh/day, Battery 1.62 kWh/day) ทั้งนี้จะเห็นว่าเฉลี่ยตลอดทั้งวันนั้นมีการลดการใช้พลังงานไฟฟ้าจากระบบ Grid ที่ 11.94 kWh/day



ภาพที่ 59 พลังงานไฟฟ้าของระยะการเลี้ยงที่ 2

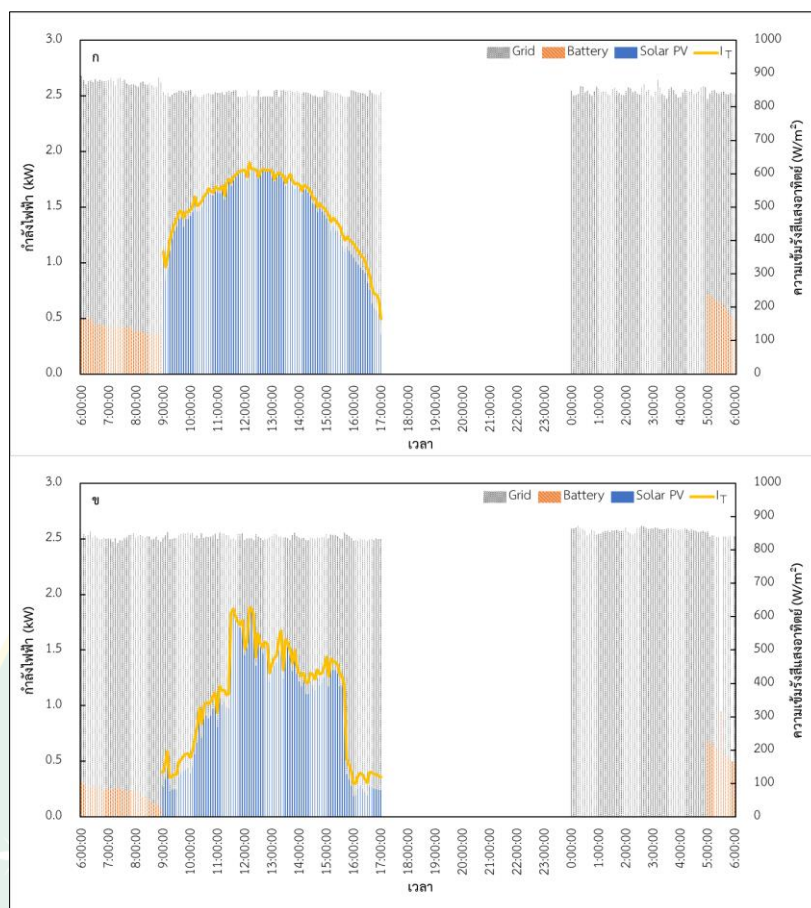
เมื่อพิจารณาในตลอดระยะการเลี้ยงที่ 2 มีการใช้พลังงานไฟฟ้าทั้งสิ้น 1940.12 kWh/Phase คิดเป็นการผลิตไฟฟ้าในช่วงเวลากลางวัน 971.07 kWh/Phase (Solar PV: 496.64 kWh/Phase, Grid: 474.42 kWh/Phase) และช่วงกลางคืน 969.05 kWh/Phase (Grid: 892.57 kWh/Phase, Battery: 76.48 kWh/Phase) สามารถลดการใช้ไฟฟ้าจากระบบ Grid 573.13 kWh/Phase คิดเป็นผลประโยชน์ 2,481.65 Baht/Phase แสดงดังตารางที่ 21

ตารางที่ 21 การใช้พลังงานไฟฟ้าเต็มอากาศของระบบ Solar PV&Grid ระยะการเลี้ยงที่ 2

รายละเอียด	G_T (MJ/m ² day)	กลางวัน		กลางคืน	
		PV	Grid	Grid	Battery
พลังงานไฟฟ้าการผลิต สูงสุด (kWh/day _{max})	15.24	12.47	7.86	18.42	1.71
พลังงานไฟฟ้าการผลิต ต่ำสุด (kWh/day _{min})	11.03	8.44	11.95	18.61	1.58
พลังงานไฟฟ้าการผลิต เฉลี่ย (kWh/day)	13.21	10.32	9.89	18.77	1.62
พลังงานไฟฟ้าการผลิตรวม (kWh/Phase)		496.64	474.42	892.57	76.48

- ระยะเวลาเลี้ยงที่ 3

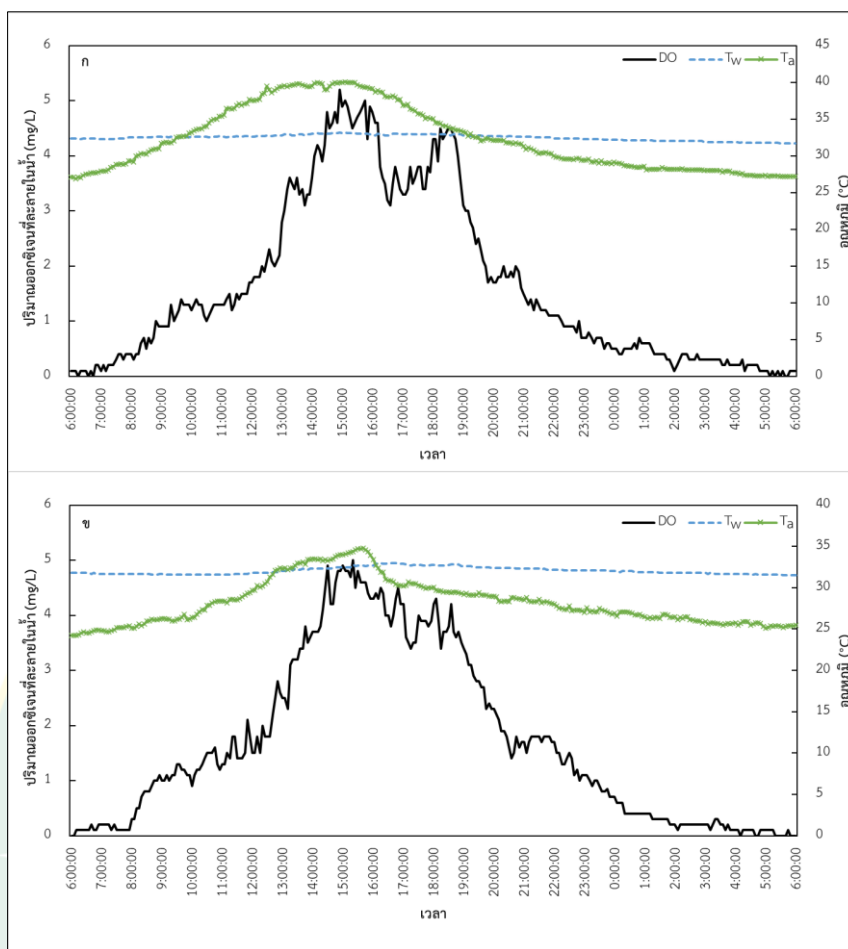
การใช้พลังงานไฟฟ้าในรูปแบบการจัดการพลังงานของการเติมอากาศระยะเวลาเลี้ยงที่ 3 มีการใช้รูปแบบ $M_{PV\&Grid,Grid}$ มีการใช้งานเครื่องเติมอากาศเช่นเดียวกับระยะข้างต้นแต่ในช่วงกลางวันจะมีการใช้ไฟฟ้าจากระบบ Grid ตั้งแต่ 00.00-09.00 น. จากภาพที่ 60 พบว่า ในวันที่ 20 พฤษภาคม 2563 เป็นวันที่มีผลรวมรังสีแสงอาทิตย์ตกกระทบบนผิวน้ำสูงสุดที่ $14.39 \text{ MJ/m}^2\text{-day}$ อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม $32.35 \text{ }^\circ\text{C}$ จากความเข้มรังสีแสงอาทิตย์ที่เวลาเริ่มต้น 366.22 W/m^2 จนสูงสุดที่ 632.48 W/m^2 ระบบจะมีกำลังการผลิตไฟฟ้าจากระบบ Solar PV มากกว่าระบบ Grid ในวันที่มีความเข้มแสงอาทิตย์สูงสุดนี้จะมีกำลังการผลิตไฟฟ้าจากระบบ Solar PV เฉลี่ย 1.44 kW ซึ่งจะมากกว่ากำลังไฟฟ้าจากระบบ Grid อยู่ 0.36 kW ทำให้ตลอดช่วงกลางวันระบบ Solar PV&Grid มีการผลิตพลังงานไฟฟ้า 20.31 kWh/day (Solar PV: 11.62 kWh/day , Grid: 8.69 kWh/day) คิดเป็นการลดการใช้พลังงานไฟฟ้าจากระบบ Grid เฉลี่ย $42.79\%/day$ ดังนั้นในช่วงกลางวันจึงมีการใช้พลังงานไฟฟ้าจากระบบ Grid&Battery ทั้งสิ้น 23.16 kWh/day (Grid: 21.24 kWh/day , Battery 1.92 kWh/day) ในทางกลับกันเมื่อวันที่ความเข้มรังสีแสงอาทิตย์ต่ำสุด กำลังการผลิตไฟฟ้าจากระบบ Solar PV จึงน้อยกว่าระบบ Grid เนื่องจากความเข้มของรังสีแสงอาทิตย์ต่ำสุดอยู่ที่ $10.31 \text{ MJ/m}^2\text{-day}$ ทำให้ช่วงกลางวันมีกำลังการผลิตไฟฟ้าจากระบบ Grid 1.53 kW ที่สูงกว่าระบบ Solar PV ที่ 0.55 kW คิดเป็นพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ในตลอดทั้งวันคิดเป็น 43.07 kWh/day (Solar PV: 7.92 kWh/day , Grid: 33.74 kWh/day , Battery 1.42 kWh/day)



ภาพที่ 60 (ก) กำลังการผลิตพลังงานไฟฟ้าสูงสุด (20 พฤษภาคม 2563)

(ข) กำลังการผลิตพลังงานไฟฟ้าต่ำสุด (23 พฤษภาคม 2563) ของระยะการเลี้ยงที่ 3

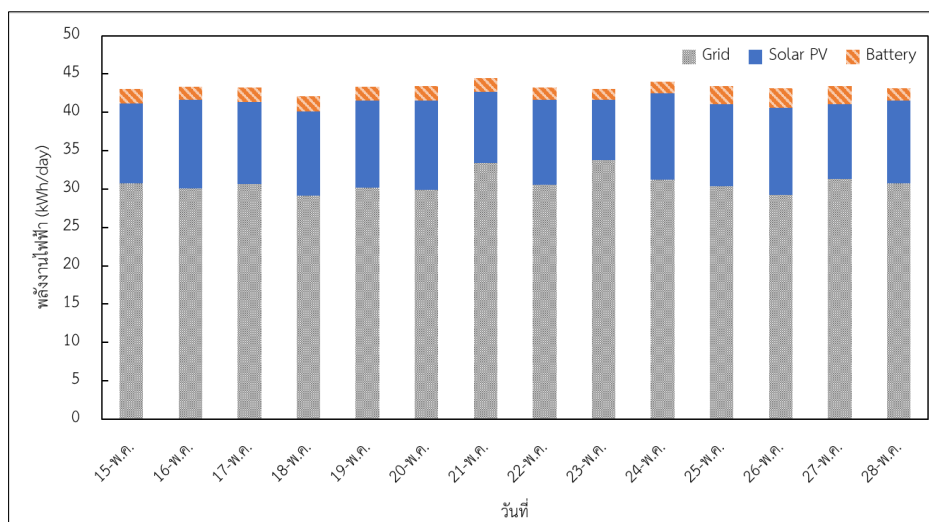
ทำให้ในวันที่มีกำลังการผลิตพลังงานไฟฟ้าสูงสุด ทำให้ปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำช่วงกลางวันเฉลี่ย 2.76 mg/L อุณหภูมิน้ำและสิ่งแวดล้อม 32.80 และ 37.36 °C ตามลำดับ จากนั้นลดลงอย่างต่อเนื่อง จนถึงช่วงเวลาเที่ยงคืนปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำลดลงอย่างคงที่ ทำให้มีปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำในช่วงกลางคืนเฉลี่ย 0.3 mg/L อุณหภูมิน้ำและสิ่งแวดล้อม 32.2 และ 28.3°C ตามลำดับ ทำให้มีปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำตลอดทั้งวันเฉลี่ย 1.65 mg/L อุณหภูมิของน้ำเฉลี่ย 32.48 °C แสดงดังภาพที่ 61 แต่ในวันที่ 23 พฤษภาคม 2563 เป็นวันที่มีความเข้มรังสีแสงอาทิตย์ต่ำนั้นแต่ก็ยังคงเปิดเครื่องเติมอากาศด้วยระบบ Solar PV&Grid จึงทำให้ปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำตลอดทั้งวันนั้นยังคงใกล้เคียงกันโดยมีปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำในเฉลี่ยที่ 1.69 mg/L อุณหภูมิของน้ำและสิ่งแวดล้อม 32.06 และ 28.22 °C ตามลำดับ



ภาพที่ 61 (ก) ปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำ (20 พฤษภาคม 2563)

(ข) ปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำ (23 พฤษภาคม 2563) และอุณหภูมิของระยะการเลี้ยงที่ 3

จากภาพที่ 62 พบว่า ในระยะการเลี้ยงปลานิลที่ 3 มีการเลี้ยงตั้งแต่วันที่ 15-28 พฤษภาคม 2563 โดยเฉลี่ยมีการใช้พลังงานไฟฟ้าตลอดทั้งระยะการเลี้ยงเฉลี่ยที่ 43.35 kWh/day ตลอดทั้งระยะการเลี้ยงนี้ในแต่ละวันนั้นมีการใช้พลังงานไฟฟ้าจากระบบ Grid ที่มากกว่าระบบ solar PV เนื่องจากในช่วงกลางวันมีการเปิดเครื่องเติมอากาศด้วยระบบ Grid อีกทั้งในช่วงกลางวันมีการใช้ระบบร่วม Solar PV&Grid โดยมีการใช้พลังงานไฟฟ้าจากระบบ Grid 30.87 kWh/day พลังงานไฟฟ้าในส่วนที่เหลือเป็นการใช้พลังงานไฟฟ้าจากระบบ Solar PV&Battery คิดเป็นการลดการใช้พลังงานไฟฟ้าจากระบบ Grid ลงที่ 28.79%



ภาพที่ 62 พลังงานไฟฟ้าของระยะการเลี้ยงที่ 3

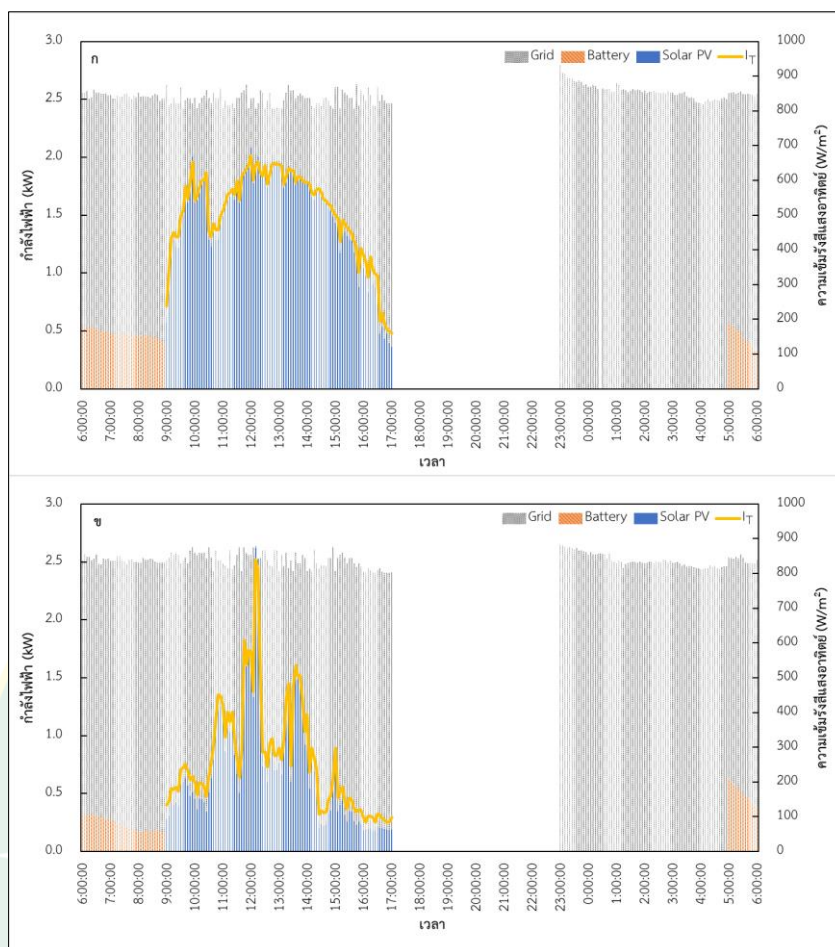
เมื่อพิจารณาทั้งระบบ Solar PV&Grid ในตลอดระยะการเลี้ยงที่ 3 มีการใช้พลังงานไฟฟ้าทั้งสิ้น 606.45 kWh/Phase คิดเป็นการผลิตไฟฟ้าในช่วงเวลากลางวัน 283.63 kWh/Phase (Solar PV: 148.78 kWh/Phase, Grid: 134.85 kWh/Phase) และช่วงกลางคืน 322.82 kWh/Phase (Grid: 296.51 kWh/Phase, Battery: 25.31 kWh/Phase) สามารถลดการใช้ไฟฟ้าจากระบบ Grid ที่ 175.09 kWh/Phase คิดเป็นผลประหยัด 758.14 Baht/Phase แสดงดังตารางที่ 22

ตารางที่ 22 การใช้พลังงานไฟฟ้าเต็มอากาศของระบบ Solar PV&Grid ระยะการเลี้ยงที่ 3

รายละเอียด	G_T (MJ/m ² day)	กลางวัน		กลางคืน	
		PV	Grid	Grid	Battery
พลังงานไฟฟ้าการผลิต สูงสุด (kWh/day _{max})	14.39	11.62	8.69	21.24	1.92
พลังงานไฟฟ้าการผลิต ต่ำสุด (kWh/day _{min})	10.31	7.92	12.41	21.38	1.34
พลังงานไฟฟ้าการผลิต เฉลี่ย (kWh/day)	13.53	10.60	9.63	21.24	1.88
พลังงานไฟฟ้าการผลิตรวม (kWh/Phase)		148.78	134.85	296.51	26.31

- ระยะการเลี้ยงที่ 4

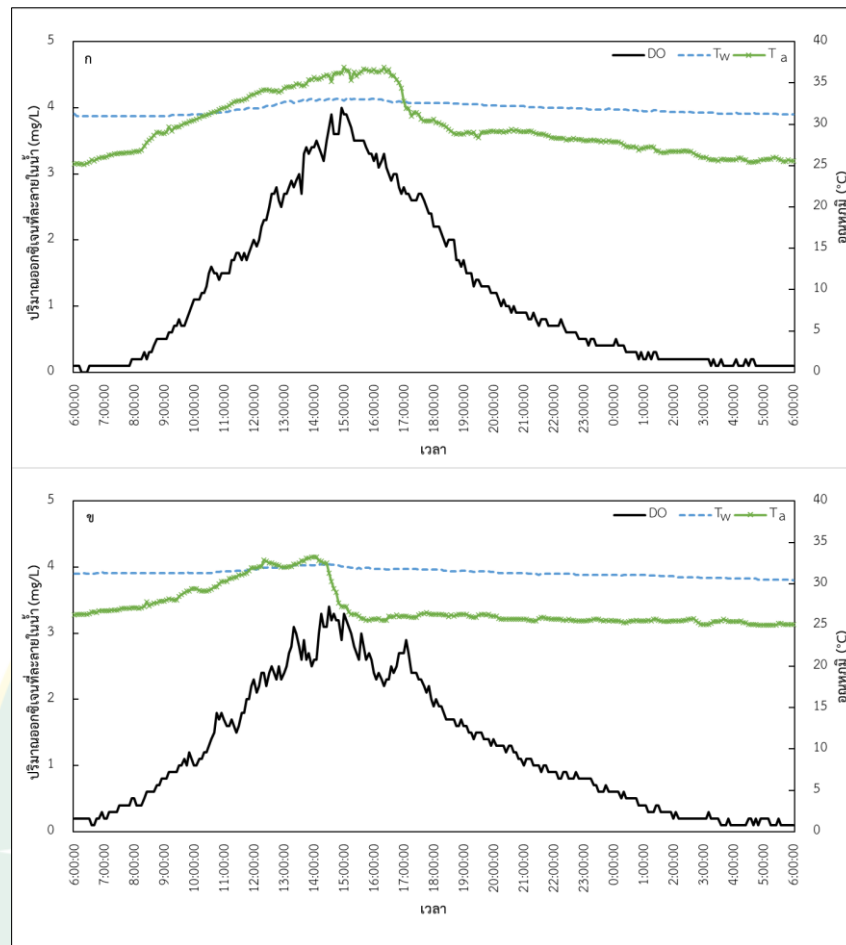
การใช้พลังงานไฟฟ้าของระยะการเลี้ยงที่ 4 เป็นการใช้อยู่แบบ $M_{PV\&Grid,Grid}$ เช่นเดียวกันแต่ในช่วงกลางวันจะมีการใช้ไฟฟ้าจากระบบ Grid ตั้งแต่ 23.00-09.00 น. ในการเลี้ยงในระยะนี้ จากภาพที่ 63 พบว่าในวันที่มีความเข้มแสงอาทิตย์สูงสุด 7 มิถุนายน มีผลรวมรังสีแสงอาทิตย์ตกกระทบตลอดทั้งวัน $14.70 \text{ MJ/m}^2\text{-day}$ อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม $33.82 \text{ }^\circ\text{C}$ จะมีกำลังไฟฟ้าจากระบบ Solar PV ที่ผลิตได้เฉลี่ย 1.49 kW เมื่อความเข้มรังสีแสงอาทิตย์เพิ่มขึ้นสูงสุดที่ 671.52 W/m^2 ทำให้ระบบ Solar PV&Grid มีการใช้กำลังไฟฟ้าสำหรับมอเตอร์เติมอากาศ 2.51 kW โดยกำลังไฟฟ้าส่วนใหญ่ได้มาจากระบบ Solar PV ที่มีการส่งจ่ายกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าที่ 6.4 A และ 324.4 V ทำให้มีกำลังไฟฟ้าจากระบบ Solar PV ที่ 2.08 kW และได้จากแหล่งจ่ายจากระบบ Grid เพียง 1.01 kW อีกทั้งในการชาร์จเข้าไปสะสมพลังงานไว้ในแบตเตอรี่ ทำให้ใช้กำลังไฟฟ้าในการชาร์จประจุไปยังแบตเตอรี่ 395 W ตามลำดับ ส่งผลให้ในช่วงกลางวันระบบ Solar PV&Grid ผลิตพลังงานไฟฟ้าได้ 20.19 kWh/day (Solar PV: 12.00 kWh/day , Grid: 8.19 kWh/day) ในช่วงกลางวันสามารถลดการใช้พลังงานจากระบบ Grid ได้ 0.38 kWh/day ในวันที่มีความเข้มแสงอาทิตย์ต่ำสุดในวันที่ 1 มิถุนายน มีความเข้มแสงอาทิตย์ $7.67 \text{ MJ/m}^2\text{-day}$ อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม $29.56 \text{ }^\circ\text{C}$ กำลังไฟฟ้าจากระบบ Solar PV ที่ผลิตได้อยู่ที่ 0.70 kW ได้จากระบบ Grid 1.81 kW ทำให้โดยเฉลี่ยมีการใช้พลังงานไฟฟ้าในช่วงกลางวัน 20.29 kW ใช้พลังงานไฟฟ้าจากระบบ Solar PV อยู่ 5.63 kWh/day หรือคิดเป็น 27.75% ส่งผลให้ในช่วงกลางวันมีการใช้พลังงานไฟฟ้าจากแบตเตอรี่ที่น้อย



ภาพที่ 63 (ก) กำลังการผลิตพลังงานไฟฟ้าสูงสุด (7 มิถุนายน 2563)

(ข) กำลังการผลิตพลังงานไฟฟ้าต่ำสุด (1 มิถุนายน 2563) ของระยะการเลี้ยงที่ 4

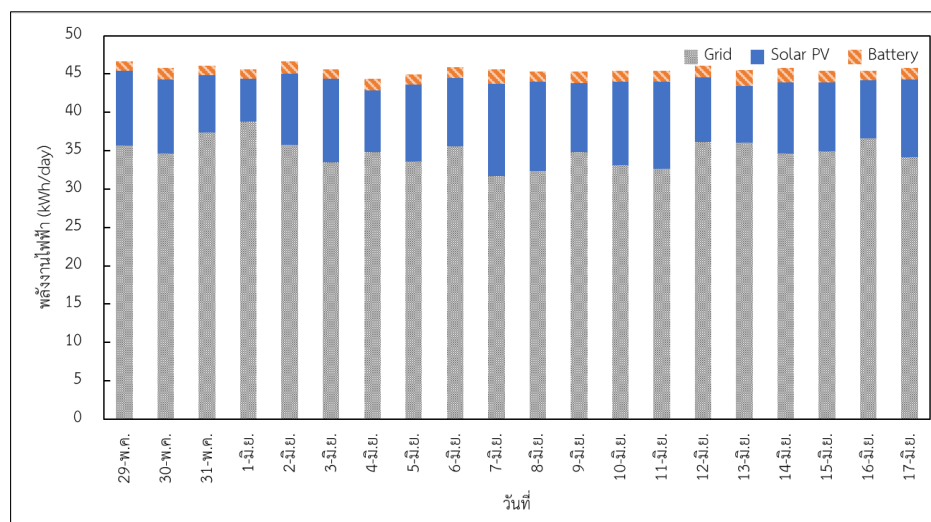
ปริมาณออกซิเจนออกซิเจนที่ละลายในน้ำในระยะที่ 4 จากภาพที่ 64 พบว่าในวันที่ 7 มิถุนายน ที่เวลาเริ่มต้น 09.00 น. ที่ 0.5 mg/L อุณหภูมิน้ำ 31.0 °C จากนั้นเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง สูงสุด 4.0 mg/L ที่เวลา 14.55 น. อุณหภูมิน้ำและสิ่งแวดล้อมอยู่ที่ 33 และ 32.5 °C ตามลำดับ จากนั้นลดลงในเวลาถัดไป ทำให้ในช่วงกลางวันมีปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำเฉลี่ย 2.41 mg/L อุณหภูมิน้ำ 32.26 °C ซึ่งโดยเฉลี่ยนั้นยังคงมีปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำในช่วงกลางวันมากกว่า ในวันที่มีความเข้มรังสีแสงอาทิตย์ต่ำสุดโดยในวันที่ 1 มิถุนายน มีปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำ ช่วงเวลากลางวันที่ 2.19 mg/L ในช่วงกลางคืนเวลา 23.00-09.00 น. เมื่ออุณหภูมิลดลงทำให้ปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำลดต่ำลงไปด้วย ทำให้โดยเฉลี่ยตลอดทั้งวันในวันที่ 7 และ 1 มิถุนายน มีปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำ 1.24 และ 1.22 mg/L ตามลำดับ



ภาพที่ 64 (ก) ปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำ (7 มิถุนายน 2563)

(ข) ปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำ (1 มิถุนายน 2563) และอุณหภูมิของระยะการเลี้ยงที่ 4

จากภาพที่ 65 ในระยะการเลี้ยงนี้เป็นช่วงที่มีสภาพอากาศที่แปรปรวน ท้องฟ้าครึ้มและมีฝนตก ทำให้ในช่วงกลางวันโดยเฉลี่ยมีการใช้พลังงานไฟฟ้าจากระบบ Grid มากกว่าระบบ Solar PV และในช่วงกลางคืนมีการใช้งานเครื่องเติมอากาศที่เวลา 23.00 น. มีการใช้กำลังไฟฟ้าจากระบบ Grid ก่อนที่จะมีการนำระบบ Grid&Battery เข้ามาใช้งานร่วม เมื่อมีการเปิดงานร่วมจากระบบ Grid&Battery พบว่ามีกำลังจากใช้ไฟฟ้าจากระบบ Grid ลดลงเนื่องจากมีการนำพลังงานจากแหล่งสะสมแบตเตอรี่เข้ามาใช้งานทำให้มีการลดการใช้ไฟฟ้าจากระบบ Grid ทำให้โดยเฉลี่ยของระยะการเลี้ยงที่ 4 มีผลรวมรังสีแสงอาทิตย์ตกกระทบตลอดทั้งวันอยู่ที่ 11.99 MJ/m²/day ระบบ Solar PV สามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าได้ 9.21 kWh/day และมีการนำพลังงานไฟฟ้าจากระบบ Grid เข้ามาใช้งานร่วม 11.33 kWh/day ในช่วงเวลากลางคืนมีการใช้พลังงานไฟฟ้าจากระบบ Grid&Battery ที่ 25.21 kWh/day ถูกนำไปใช้งานกับแบตเตอรี่ 1.49 kWh/day



ภาพที่ 65 พลังงานไฟฟ้าของระยะการเลี้ยงที่ 4

เมื่อพิจารณาการใช้พลังงานจากตารางที่ 23 มีการใช้พลังงานไฟฟ้าให้กับใช้งานเครื่องเติมอากาศทั้งสิ้น 912.96 kWh/Phase คิดเป็นการผลิตไฟฟ้าในช่วงเวลากลางวัน 413.16 kWh/Phase (Solar PV: 186.59 kWh/Phase, Grid: 226.57 kWh/Phase) และช่วงเวลากลางคืน 499.80 kWh/Phase (Grid: 470.11 kWh/Phase, Battery: 29.69 kWh/Phase) สามารถลดการใช้ไฟฟ้าจากระบบ Grid 216.28 kWh/Phase หรือ 23.69% คิดเป็นผลประหยัด 936.49 Baht/Phase

ตารางที่ 23 การใช้พลังงานไฟฟ้าเติมอากาศของระบบ Solar PV&Grid ระยะการเลี้ยงที่ 4

รายละเอียด	G_T (MJ/m ² day)	กลางวัน		กลางคืน	
		PV	Grid	Grid	Battery
พลังงานไฟฟ้าการผลิต สูงสุด (kWh/day _{max})	14.70	12.00	8.19	23.53	1.91
พลังงานไฟฟ้าการผลิต ต่ำสุด (kWh/day _{min})	7.67	5.63	14.66	24.11	1.25
พลังงานไฟฟ้าการผลิต เฉลี่ย (kWh/day)	11.99	9.21	11.33	23.72	1.49
พลังงานไฟฟ้าการผลิตรวม (kWh/Phase)		186.59	226.57	470.11	29.69

- การใช้พลังงานไฟฟ้าในรูปแบบการจัดการพลังงานของระบบเติมอากาศ

สำหรับการใช้พลังงานไฟฟ้าในการใช้งานของรูปแบบการจัดการพลังงานของระบบเติมอากาศสำหรับการเลี้ยงปลานิลในรอบนี้พบว่า ในหนึ่งรอบการเลี้ยงมีการใช้พลังงานไฟฟ้ารวมทั้งสิ้น

4,185.07 kWh/Crop เมื่อมีการนำระบบ Solar PV เข้ามาใช้งานในช่วงเวลากลางวันอีกทั้งมีการชาร์จประจุพลังงานไฟฟ้าไว้ในแบตเตอรี่เพื่อนำไปใช้ในช่วงเวลากลางคืนทำให้มีการใช้พลังงานในระบบ Solar PV&Battery รวมทั้งสิ้น 1,690.04 kWh/Crop และที่เหลือเป็นการใช้พลังงานไฟฟ้าจากระบบ Grid ที่ 2,495.03 kWh/Crop (กลางวัน: 835.84 kWh/Crop, กลางคืน: 1,659.19 kWh/Crop) คิดเป็น 59.62% ของการใช้พลังงานไฟฟ้าจากระบบ Grid แสดงดังตารางที่ 24

ตารางที่ 24 การใช้พลังงานในรูปแบบการจัดการพลังงานของการเติมอากาศ

ระยะ	กลางวัน		กลางคืน		ผลรวม Grid (kWh/Phase)
	Solar PV (kWh/Phase)	Grid (kWh/Phase)	Grid (kWh/Phase)	Battery (kWh/Phase)	
1	631.70			93.85	
2	496.64	474.42	892.57	76.48	1,366.99
3	148.78	134.85	296.51	26.31	431.36
4	186.59	226.57	470.11	29.69	696.68
รวม	1,463.71	835.84	1,659.19	226.33	2,495.03

จากตารางที่ 25 เมื่อนำไปเปรียบเทียบกับรูปแบบ CT แสดงดังตารางที่ 25 จะพบว่าในรูปแบบ M ที่มีการนำพลังงานไฟฟ้าจากระบบ Solar PV&Grid พร้อมกับมีการใช้พลังงานไฟฟ้าจากแหล่งสะสมแบตเตอรี่มีการใช้พลังงานไฟฟ้าจากระบบ Grid รวม 2,495.03 kWh/crop เข้ามาปรับเปลี่ยนการทำงานแทนรูปแบบ CT ดังนั้นจึงทำให้ลดการใช้พลังงานไฟฟ้าจากระบบ Grid ลงได้ 1,276.17 kWh/crop หรือ 33.84% คิดเป็นเงิน 5,525.82 Baht/crop (ค่าไฟฟ้าเฉลี่ย 4.33 Baht/kWh)

ตารางที่ 25 ผลรวมการใช้พลังงานระบบ Grid ในรูปแบบการจัดการพลังงานของการเติมอากาศ

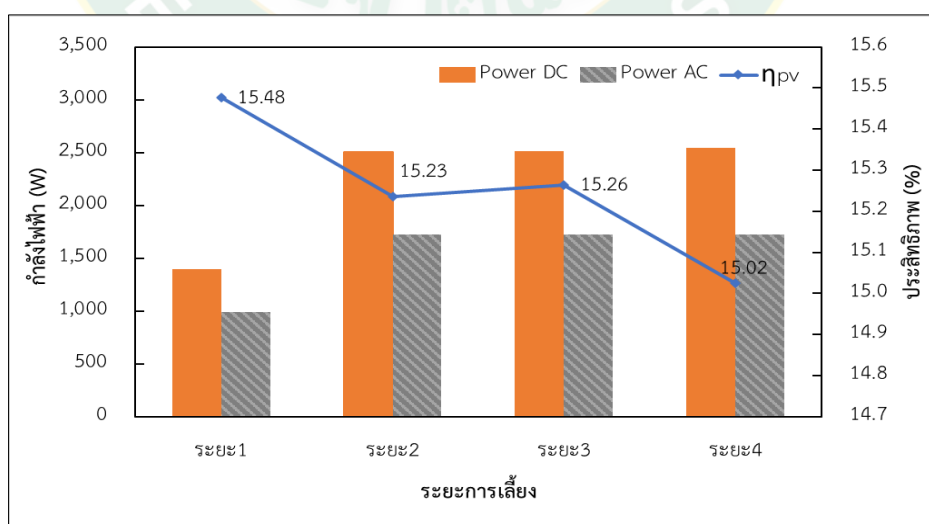
ระยะ	รูปแบบ CT	รูปแบบที่ใช้	รูปแบบ M	ผลประหยัด (kWh/Phase)
	พลังงานไฟฟ้า Grid (kWh/Phase)		พลังงานไฟฟ้า Grid (kWh/Phase)	
1	-	M _{PV}	-	-
2	2,235.36	M _{PV&Grid,Grid}	1,366.99	868.37
3	629.44	M _{PV&Grid,Grid}	431.36	198.08
4	906.40	M _{PV&Grid,Grid}	696.68	209.72
	ผลประหยัดรวม (kWh/crop)			1,276.17

4.3.2 ผลการทดสอบสมรรถนะของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์

ประเมินสมรรถนะของระบบผลิตไฟฟ้าของระบบการจัดการมีการวิเคราะห์เปรียบเทียบการผลิตไฟฟ้าของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่เชื่อมต่อกับระบบ ได้แก่ ประสิทธิภาพของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (η_{pv}) ประสิทธิภาพของเครื่องแปลงกระแสไฟฟ้า (η_{inv}) พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (Array yield) พลังงานไฟฟ้าที่ใช้งานจริงที่ผลิตได้จากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (Final yield) พลังงานไฟฟ้าที่ใช้งานจริงที่ผลิตได้จากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (Reference yield) และสมรรถนะของระบบเซลล์แสงอาทิตย์ (Performance Ratio) ดังต่อไปนี้

- ประสิทธิภาพของระบบ

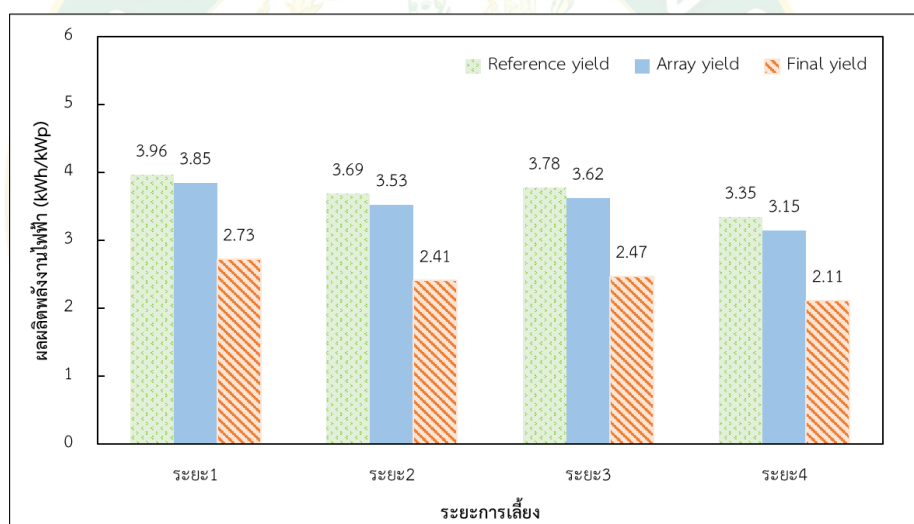
จากการใช้พลังงานไฟฟ้าตลอดระยะเวลาการเลี้ยงในหนึ่งรอบ จากภาพที่ 66 พบว่าในระยะเวลาการเลี้ยงที่ 1 มีการใช้ระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์เพียงอย่างเดียวทำให้ในระยะนี้มีกำลังการผลิตที่น้อยกว่าระยะเวลาการเลี้ยงอื่นๆ ทำให้โดยเฉลี่ยในระยะที่ 1 มีกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากพลังงานแสงอาทิตย์ 1,398.68 W เมื่อผ่านเครื่องแปลงกระแสไฟฟ้าทำให้มีกำลังไฟฟ้านำมาใช้งานจริงทางด้านกระแสสลับลดลงเหลือ 989.91 W และในระยะเวลาการเลี้ยงที่ 2-4 มีการใช้พลังงานไฟฟ้าจากระบบ Solar PV&Grid มีแนวโน้มที่ใกล้เคียงกันโดยกำลังไฟฟ้าทางด้านกระแสตรงโดยเฉลี่ย 2,521.31 W กระแสไฟฟ้าถูกนำไปใช้จริงทางด้านกระแสสลับเฉลี่ยที่ 1,721.21 W ทำให้เครื่องแปลงกระแสไฟฟ้ามีประสิทธิภาพเฉลี่ยที่ 68.84% ซึ่งประสิทธิภาพระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ในแต่ละระยะมีค่าที่ใกล้เคียงกันมากที่สุดในระยะการเลี้ยงที่ 1 อยู่ที่ 15.48% สอดคล้องกับผลรวมรังสีแสงอาทิตย์ตกกระทบบนตลอดทั้งวันของระยะเวลาการเลี้ยงนี้ที่มากที่สุดคิดเฉลี่ยต่อรอบการเลี้ยง 15.25%



ภาพที่ 66 กำลังไฟฟ้าทางด้านกระแสตรงและกระแสสลับของระบบผลิตไฟฟ้า และประสิทธิภาพแผงเซลล์แสงอาทิตย์

- สมรรถนะการผลิตไฟฟ้าของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่เชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้าพื้นฐาน

สมรรถนะการผลิตไฟฟ้าที่มีการใช้พลังงานไฟฟ้าจากของระบบ Solar PV จากภาพที่ 67 เมื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของผลผลิตพลังงานไฟฟ้าตามทฤษฎีที่ผลิตได้ ผลผลิตพลังงานไฟฟ้าด้านกระแสตรง (DC) และผลผลิตพลังงานไฟฟ้ากระแสสลับ (AC) พบว่า โดยเฉลี่ยตลอดรอบการเลี้ยงระบบมีผลผลิตพลังงานไฟฟ้าตามทฤษฎี 3.60 kWh/kWp ผลผลิตพลังงานไฟฟ้าด้านกระแสตรง 3.54 kWh/kWp และผลผลิตพลังงานไฟฟ้ากระแสสลับ 2.43 kWh/kWp ในแต่ละระยะการเลี้ยงจะมีผลผลิตพลังงานไฟฟ้าตามทฤษฎีสูงที่สุด รองลงมาเป็นผลผลิตพลังงานไฟฟ้าด้านกระแสตรง และท้ายสุดผลผลิตพลังงานไฟฟ้ากระแสสลับ อันเนื่องมาจากการเกิดการสูญเสียในระหว่างการเปลี่ยนรูปความร้อนและระหว่างอุปกรณ์จึงทำให้ผลผลิตที่ใช้งานจริงมีค่าน้อย ทำให้สมรรถนะของระบบเซลล์แสงอาทิตย์ คิดเป็น 68.61%



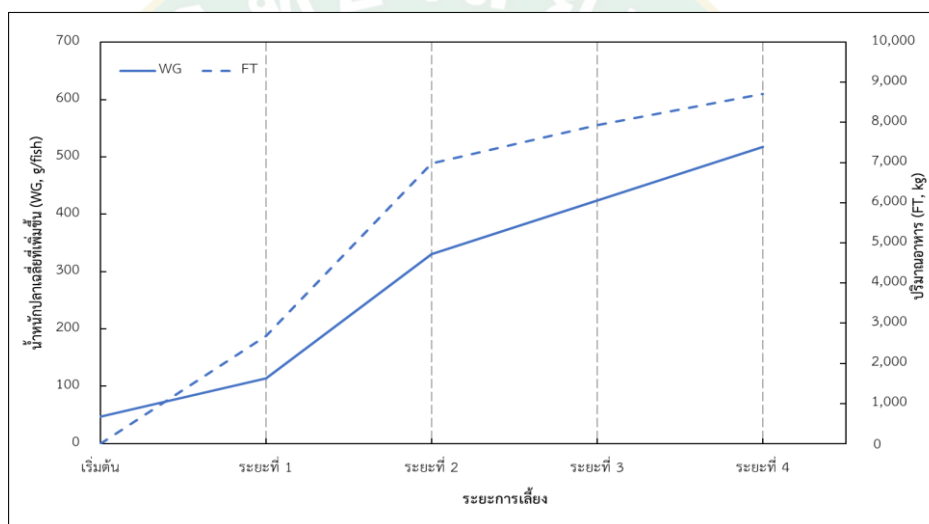
ภาพที่ 67 ผลผลิตพลังงานไฟฟ้า Array yield: Y_a , Final yield: Y_f และ Reference yield: Y_r

4.3.3 ผลการทดสอบอัตราการเจริญเติบโตของการเลี้ยงปลานิล

ในการประเมินการเจริญเติบโตของการเลี้ยงปลานิลเป็นการประเมินการเลี้ยงในระยะที่ 1-4 ของระบบควบคุมและระบบการจัดการ โดยมีการวิเคราะห์ในหัวข้อของน้ำหนักปลาเฉลี่ยที่เพิ่มขึ้น (Weight Gain: WG) อัตราการเจริญเติบโตเฉลี่ยต่อวัน (Average Daily Gain: ADG) อัตราการเปลี่ยนอาหารเป็นน้ำหนัก (Feed Conversion Ratio: FCR) ประสิทธิภาพการเปลี่ยนอาหารเป็นน้ำหนัก (FCE) และอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะ (Specific Growth Rate: SGR) ดังต่อไปนี้

- น้ำหนักปลาเฉลี่ยที่เพิ่มขึ้น

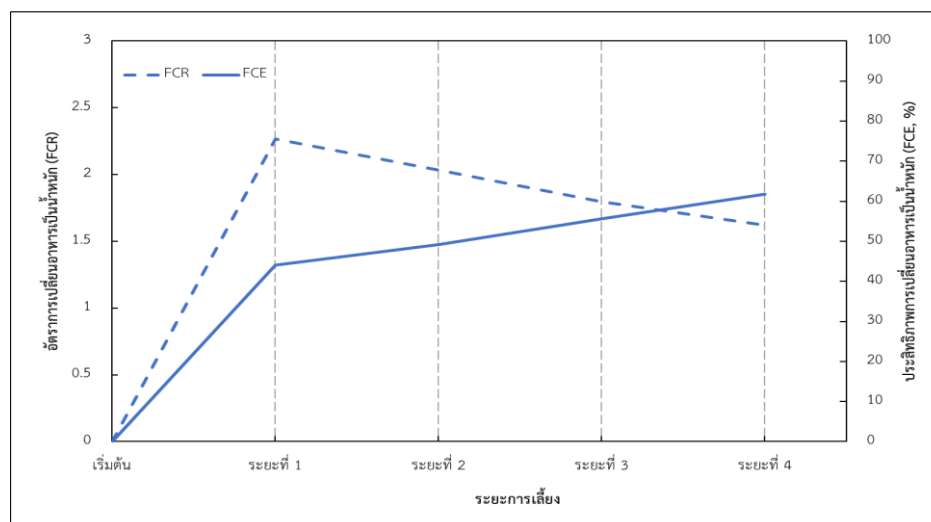
การเจริญเติบโตของการเลี้ยงปลานิลในรูปแบบ M มีการปล่อยลูกปลานิลจำนวน 10,400 fish โดยเฉลี่ยของการปล่อยมีน้ำหนักเริ่มต้น 47.17 g/fish จากภาพที่ 68 พบว่า ปริมาณอาหารในการเลี้ยงปลานิลระยะแรกมีการปริมาณการใช้อาหาร 2,676 kg ระยะที่ 2-4 มีปริมาณการใช้อาหาร 4,311, 942 และ 779 kg ไป ตามลำดับ รวมมีการใช้อาหารต่อรอบทั้งสิ้น 8,708 kg มีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันกับน้ำหนักปลานิลที่เพิ่มขึ้น โดยน้ำหนักสุดท้ายของการเลี้ยงปลานิลมีน้ำหนักโดยเฉลี่ยที่ 564.15 g ในระยะ 1-4 มีการเพิ่มขึ้นจากน้ำหนักเริ่มต้นเฉลี่ยที่ 113.44, 330.10, 424.26 และ 516.98 g ตามลำดับ ทั้งนี้จะสังเกตเห็นว่าในระยะการเลี้ยงปลานิลในหนึ่งรอบการเลี้ยงในระยะเวลาการเลี้ยงที่ 2 มีน้ำหนักเฉลี่ยที่เพิ่มขึ้นมากที่สุดคิดเป็น 46.12%



ภาพที่ 68 น้ำหนักเฉลี่ย (WG) และปริมาณอาหารของการเลี้ยงปลานิล (FT)

- อัตราการเจริญเติบโตเฉลี่ยต่อวัน

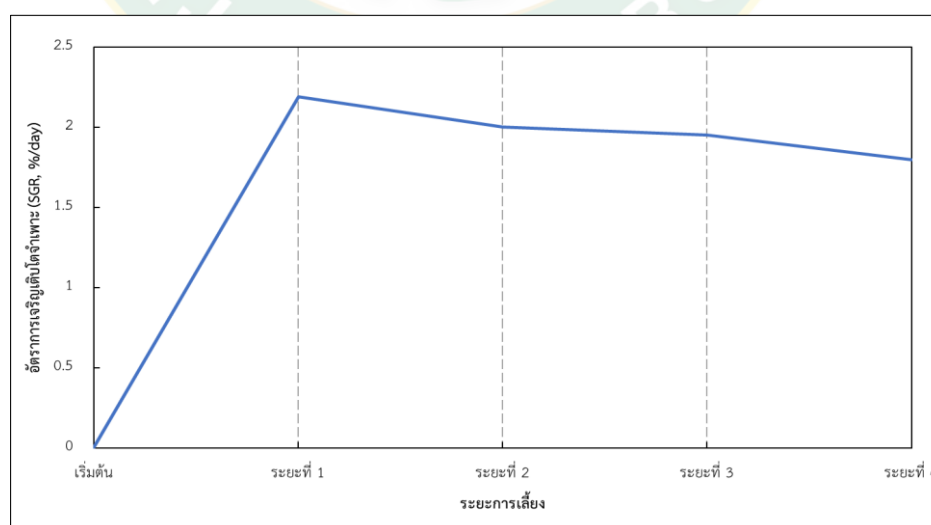
ในการเลี้ยงปลานิลทั้ง 4 ระยะจากน้ำหนักเฉลี่ยของการเจริญเติบโตที่เพิ่มขึ้นกับระยะเวลาของการเลี้ยง เมื่อนำมาวิเคราะห์อัตราการเจริญเติบโตในแต่ละวัน จากภาพที่ 69 พบว่าแต่ละระยะการเลี้ยงมีการเจริญเติบโตที่เพิ่มขึ้น โดยในระยะแรกมีอัตราการเจริญเติบโต 2.03 g/day จากนั้นเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องในระยะ 2-4 เป็น 3.17, 3.60 และ 3.75 g/day ตามลำดับ แต่จะเห็นว่าตั้งแต่ระยะ 3-4 นั้นเริ่มมีการเจริญเติบโตที่ช้าลง เพราะปลาเริ่มมีการเจริญเติบโตที่เพิ่มขึ้นรวมถึงการกินอาหารที่น้อยและความหนาแน่นเริ่มเพิ่มขึ้นจึงทำให้การเจริญเติบโตเฉลี่ยต่อวันนั้นช้าลง



ภาพที่ 70 อัตราการเปลี่ยนอาหารเป็นน้ำหนัก (FCR) และ ประสิทธิภาพการเปลี่ยนอาหารเป็นน้ำหนัก (FCE)

- อัตราการเจริญเติบโตจำเพาะ

ในแต่ละระยะการเลี้ยงมีอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะที่มีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน จากน้ำหนักตัวที่เพิ่มขึ้นกับระยะเวลาในการเลี้ยงจากหัวข้อที่กล่าวมาข้างต้น จากภาพที่ 71 พบว่าในระยะที่ 1 ของการเลี้ยงมีน้ำหนักที่เพิ่มขึ้นสูงสุดจึงทำให้ในระยะการเลี้ยงนี้มีอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะที่สูงขึ้นตามไปด้วยโดยมีอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะ 2.19%/day จากนั้นเมื่อปลาเริ่มโตขึ้นการเจริญเติบโตตัวช้าลงจากอัตราการแลกเปลี่ยนอาหารเป็นน้ำหนักข้างต้น จึงทำให้อัตราการเจริญเติบโตต่อรอบการเลี้ยงสูงหรือคิดเป็น 1.80%/Crop (เกตุณภัส ศรีไพโรจน์ และคณะ, 2556)



ภาพที่ 71 อัตราการเจริญเติบโตจำเพาะ (SGR)

4.3.4 การประเมินความคุ้มค่าทางด้านเศรษฐศาสตร์

การประเมินความคุ้มค่าทางด้านเศรษฐศาสตร์ มีการวิเคราะห์แบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือการวิเคราะห์ประสิทธิภาพพลังงานในระดับรายผลผลิตจากดัชนีการใช้พลังงานจำเพาะ (SEC) และการวิเคราะห์ต้นทุนทางด้านพลังงานเป็นการพิจารณาในส่วนของพลังงานไฟฟ้าเท่านั้น โดยผลการประเมินแสดงดังหัวข้อต่อไปนี้

- การวิเคราะห์ประสิทธิภาพพลังงานในระดับรายผลผลิตจากดัชนีการใช้พลังงานจำเพาะ

การเปรียบเทียบต้นทุนในการผลิตทางด้านพลังงานของการเลี้ยงปลานิลด้วยระบบเติมอากาศรูปแบบควบคุม (รูปแบบ CT) และระบบที่ใช้พลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับแบตเตอรี่ (รูปแบบ M) จากดัชนีการใช้พลังงานจำเพาะ (SEC) แสดงดังตารางที่ 26 พบว่าในการเลี้ยงปลานิลของรูปแบบ CT และรูปแบบ M ได้ผลผลิต 5,505 และ 5,483 kg จากการใช้พลังงานไฟฟ้าเต็มรูปแบบ CT มีการใช้พลังงานไฟฟ้าจากระบบ Grid ทั้งสิ้น 3,771.20 kWh/Crop เมื่อมีการนำรูปแบบ M เข้าใช้งานนั้น ทำให้มีการลดการใช้พลังงานไฟฟ้า 33.84% หรือ 1,276.17 kWh/Crop คิดเป็นผลประหยัด 5,525.82 Baht/crop ฉะนั้นจึงทำให้รูปแบบ M มีดัชนีการใช้พลังงานจำเพาะ (Specific Energy Consumption) ที่ 0.46 kWh/fish ซึ่งมากกว่ารูปแบบ CT นั้นหมายถึงปลานิลหนึ่งกิโลกรัมมีการใช้พลังงานไฟฟ้า 0.46 kWh

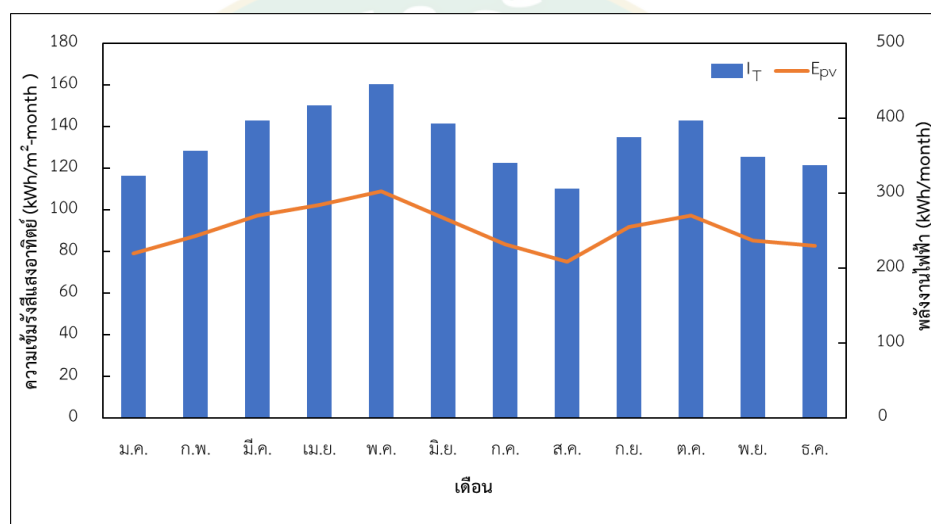
ตารางที่ 26 รายละเอียดรายรับรายจ่ายและต้นทุนของการเลี้ยงปลานิล

รายละเอียด	รูปแบบ CT	รูปแบบ M
ผลผลิต (kg)	5,505	5,483
ราคาผลผลิตที่ขายได้ (Baht/kg)	60	60
รายได้ทั้งหมด (Baht)	330,300	328,980
พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ (kWh/crop)	3,771.20	2,495.03
ค่าพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ (Baht)	16,329.30	10,803.48
Specific Energy Consumption; SEC (kWh/kg_{fish})	0.69	0.46

- การวิเคราะห์ต้นทุนทางด้านพลังงาน

ในการวิเคราะห์ต้นทุนทางด้านพลังงานจึงต้องมีการคำนวณหาพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จากระบบ Solar PV ตลอดทั้งปี จึงได้นำข้อมูลความเข้มรังสีแสงอาทิตย์ในประเทศไทยปี พ.ศ. 2562 จากสถานีวัดศูนย์บริการวิชาการที่ 7 จังหวัดเชียงใหม่ มาใช้ประกอบการคำนวณค่าความเข้มรังสีแสงอาทิตย์ในหนึ่งปีเป็นรายเดือนในหน่วย kWh/m² หรือเทียบเท่าพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ต่อพื้นที่ 1 m² พบว่าโดยเฉลี่ยตลอดทั้งปีความเข้มรังสีแสงอาทิตย์ของจังหวัดเชียงใหม่จะอยู่ที่ 133.24 kWh/m²

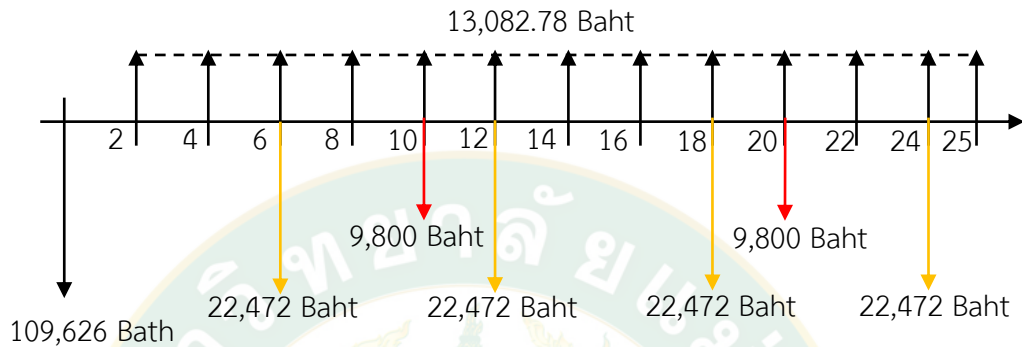
จากภาพที่ 72 พบว่า ในตลอดทั้งปีนั้นจะมีความเข้มรังสีแสงอาทิตย์สูงสุดในเดือนพฤษภาคม 160.30 kWh/m² จากเป็นช่วงฤดูร้อนท้องฟ้าโปร่งมีเมฆน้อยจึงทำให้แปรผันตรงกับความเข้มรังสีแสงอาทิตย์ เมื่อนำมาวิเคราะห์หาพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จากระบบ Solar PV สำหรับบ่อเลี้ยงปลานิล โดยพลังงานไฟฟ้าที่ได้นั้นมีการใช้ประสิทธิภาพของระบบ Solar PV จากการทดสอบจริงมีประสิทธิภาพเฉลี่ยที่ 15.25% และประสิทธิภาพของเครื่องแปลงกระแสไฟฟ้า (Inverter) ที่ 68.84% พบว่าในเดือนพฤษภาคมที่มีความเข้มของรังสีแสงอาทิตย์สูงสุดจะสามารถผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ได้ 302.91 kWh/month จึงทำให้ตลอดทั้งปีมีการผลิตไฟฟ้าจากระบบพลังงานแสงอาทิตย์รวมทั้งสิ้น 3,021.43 kWh/year คิดเป็นเงิน 13,082.78 Baht/year



ภาพที่ 72 ค่าเฉลี่ยความเข้มรังสีแสงอาทิตย์และพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จาก ระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ในแต่ละเดือนของจังหวัดเชียงใหม่ ปี 2562

จากค่าพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จากที่กล่าวมาข้างต้น จึงมีการนำไปวิเคราะห์ต้นทุนทางด้านพลังงานของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับไฟฟ้าพื้นฐานและแบตเตอรี่สำหรับบ่อเลี้ยงปลานิล ในการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้านี้มีอุปกรณ์หลัก ประกอบด้วย แผงเซลล์แสงอาทิตย์ เครื่องควบคุมประจุไฟฟ้า (Charger) แบตเตอรี่ และเครื่องแปลงกระแสไฟฟ้า (Inverter) เมื่อประเมินค่าใช้จ่ายของการลงทุนในการติดตั้งระบบ สามารถแสดง Cash Flow Diagram จากภาพที่ 73 พบว่าในการติดตั้งระบบมีการใช้เงินลงทุน 109,626 Baht โดยมีอายุโครงการ 25 year มีค่าใช้จ่ายสำหรับแบตเตอรี่ทุกๆ 6 ปี โดยหักมูลค่าซากต่อครั้ง 3,400 Baht คิดเป็น 22,472 Baht และมีการเปลี่ยนเครื่องแปลงกระแสไฟฟ้าทุกๆ 10 ปี ครั้งละ 9,800 Baht ทำให้ในการติดตั้งระบบนี้มีผลประหยัดคิดเป็น 13,082.78 Baht/year ระยะเวลาคืนทุน (Payback Period) 8.38 year มูลค่าปัจจุบันสุทธิติดลบ (Net Present Value) 1,791.08 Baht ที่อัตราดอกเบี้ย 7.13% (เมื่อคิดอัตราดอกเบี้ยเงินให้

สินเชื่อของธนาคารกรุงเทพ ประจำวันที่ 15 มีนาคม 2562) และมีอัตราผลตอบแทนภายใน (Internal Rate of Return) 6.92% ซึ่งพิจารณาวิเคราะห์ความคุ้มค่าในการลงทุนพบว่า ระบบมีการนำแบตเตอรี่เข้ามาใช้งานซึ่งมีต้นทุนในการปรับเปลี่ยนอุปกรณ์ที่สูงจึงแปรผันตรงกับมูลค่าปัจจุบันสุทธิที่ต่ำลงไปด้วย



ภาพที่ 73 Cash Flow Diagram ของการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับไฟฟ้าพื้นฐานและแบตเตอรี่

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย

5.1 สรุปผลการวิจัย

การศึกษาการจัดการพลังงานของระบบเติมอากาศสำหรับบ่อเลี้ยงปลานิลที่ใช้ระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับแบตเตอรี่และระบบไฟฟ้าพื้นฐานสามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้

1) รูปแบบการจัดการพลังงานของระบบเติมอากาศแบบหัวทรายสำหรับบ่อเลี้ยงปลานิลในการทดสอบการใช้เครื่องเติมอากาศและเลือกรูปแบบที่เหมาะสมที่สุดที่มีการใช้ไฟฟ้าน้อยที่สุด 5 รูปแบบ โดยผลการเปรียบเทียบพบว่าในระยะการเลี้ยงที่ 1 มีการใช้รูปแบบ M_{PV} (กลางวัน: ใช้ไฟฟ้าระบบ Solar PV กลางคืน: ไม่มีการเติมอากาศ) และในระยะการเลี้ยงที่ 2-4 มีการใช้รูปแบบ $M_{PV\&Grid,Grid}$ (ใช้ไฟฟ้าระบบ Solar PV&Grid กลางคืน: ใช้ไฟฟ้าระบบ Grid) โดยมีการใช้งานเครื่องเติมอากาศในช่วงกลางวันตั้งแต่ 09.00-17.00 น. และกลางคืนในแต่ละระยะการเลี้ยงที่ 2-4 มีการปรับเปลี่ยนการเปิดที่ต่างกัน คือ 01.00 น. 00.00 น. และ 23.00 น. ตามลำดับ จนถึงสิ้นสุดที่เวลา 09.00 น. เดียวกัน

2) การนำรูปแบบการจัดการพลังงานเข้ามาใช้งานจริงจะมีการใช้พลังงานไฟฟ้าจากแบตเตอรี่ในช่วงกลางคืนจากการชาร์จประจุไฟฟ้าเข้าไปเก็บสะสมพลังงานจากระบบในช่วงกลางวันตั้งแต่ 09.00-17.00 น. และมีการนำมาใช้งานในช่วงเวลากลางคืนตั้งแต่เวลา 05.00 น. การนำรูปแบบของการจัดการพลังงานเข้ามาใช้ทำให้มีการใช้พลังงานไฟฟ้าทั้งสิ้น 4,185.07 kWh/crop โดยมีการนำพลังงานไฟฟ้าจากระบบ Grid มาใช้ที่ 2,495.03 kWh/crop ส่วนที่เหลือเป็นการใช้พลังงานไฟฟ้าจากระบบ Solar PV&Battery ที่ 1,690.04 kWh/crop หรือคิดเป็น 41.38% เมื่อเปรียบเทียบกับรูปแบบ CT จากเดิมมีการใช้พลังงานจากระบบ Grid ทั้งสิ้น 3,771.20 kWh/Crop เมื่อมีการเลือกใช้รูปแบบ M หากพิจารณาในด้านของพลังงานไฟฟ้าจากระบบ Grid นั้นทำให้มีการลดการใช้พลังงานไฟฟ้า 33.84% หรือ 1,276.17 kWh/Crop คิดเป็นผลประหยัด 5,525.82 Baht/crop โดยที่ตลอดรอบของการเลี้ยงนั้นปลานิลมีหนักปลาเฉลี่ยที่เพิ่มขึ้น 516.98 g อัตราการเจริญเติบโตเฉลี่ยต่อวัน 3.75 g/day อัตราการเปลี่ยนอาหารเป็นน้ำหนัก 1.62 g คิดเป็นประสิทธิภาพการเปลี่ยนอาหารเป็นน้ำหนัก 61.74% และอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะ 1.80% คิดเป็นดัชนีการใช้พลังงานจำเพาะ 0.46 kWh/fish

3) ประสิทธิภาพระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ในแต่ละระยะการเลี้ยงโดยเฉลี่ยคิดเป็น 15.25% และประสิทธิภาพของเครื่องแปลงกระแสไฟฟ้าเฉลี่ย 68.84% ระบบมีผลผลิตพลังงานไฟฟ้าตามทฤษฎี 3.60 kWh/kWp ผลผลิตพลังงานไฟฟ้าด้านกระแสตรง 3.54 kWh/kWp และผลผลิตพลังงานไฟฟ้ากระแสสลับ 2.43 kWh/kWp ทำให้สมรรถนะของระบบเซลล์แสงอาทิตย์คิดเป็น

68.61% เมื่อประเมินการติดตั้งระบบมีการใช้เงินลงทุน 109,626 Baht โดยมีอายุโครงการ 25 year มีค่าใช้จ่ายสำหรับแบตเตอรี่ทุกๆ 6 ปี โดยหักมูลค่าซากต่อครั้ง 3,400 Baht คิดเป็น 22,472 Baht และมีการเปลี่ยนเครื่องแปลงกระแสไฟฟ้าทุกๆ 10 ปี ครั้งละ 9,800 Baht โดยประเมินพลังงานไฟฟ้าจากค่าความเข้มรังสีแสงอาทิตย์ทำให้ตลอดทั้งปีมีการผลิตไฟฟ้าจากระบบพลังงานแสงอาทิตย์รวมทั้งสิ้น 3,021.43 kWh/year ทำให้ในการติดตั้งระบบนี้มีผลประหยัดคิดเป็น 13,082.78 Baht/year ระยะเวลาคืนทุน 8.38 year

5.2 ข้อเสนอแนะ

- การศึกษาของการใช้พลังงานไฟฟ้าต่อรอบการเลี้ยงปลานั้นเป็นการศึกษาเพื่อนำมาใช้จริงของการเลี้ยงปลาหนึ่งรอบ ดังนั้นควรมีการเก็บข้อมูลเพิ่มเติมของการเลี้ยงตลอดทั้งปี เพื่อให้เกิดสมรรถนะของการนำมาใช้

- การทดสอบสมรรถนะของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับแบตเตอรี่และระบบไฟฟ้าพื้นฐาน มีการนำเครื่องแปลงกระแสไฟฟ้า (Inverter) ยี่ห้อ SINAMICS รุ่น SINAMICS V20 เข้ามาใช้ในการทดสอบนั้นพบว่าประสิทธิภาพของเครื่องแปลงกระแสไฟฟ้าต่ำส่งผลทำให้ผลผลิตทางด้านพลังงานไฟฟ้าที่นำไปใช้งานจริงต่ำลงตามไปด้วยจึงควรมีการปรับปรุงหรือปรับเปลี่ยนของอุปกรณ์ให้มีประสิทธิภาพดียิ่งขึ้น

ภาคผนวก ก

ตัวอย่างการคำนวณ

ก.1. การคำนวณผลผลิตพลังงานไฟฟ้าจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์

การคำนวณผลผลิตพลังงานไฟฟ้าจากระบบ Solar PV&Grid เป็นตัวอย่างการคำนวณในรูปแบบการจัดการระยะการเลี้ยงที่ 2

ตาราง ก.1 ผลผลิตพลังงานไฟฟ้าจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (ช่วงกลางวัน)

Time	I_T (W/m ²)	PV to Inverter		PV to Battery		Grid to Inverter		Inverter to Motor	
		(V)	(A)	(V)	(A)	(V)	(A)	(V)	(A)
12:35	600.95	315.49	5.62	292.41	1.41	221.79	3.28	192	6.07
12:40	603.20	315.78	5.64	292.40	1.41	221.90	3.24	192	6.07

ขั้นตอนที่ 1) จำนวนกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากแผงเซลล์แสงอาทิตย์สามารถหาค่าได้จากสมการที่ 1

$$\begin{aligned}
 P_{DC} &= I_m \times V_m \\
 &= 5.62 \times 315.49 \\
 &= 1,773.05 \quad \text{W} \\
 &= 1.773 \quad \text{kW}
 \end{aligned}$$

ขั้นตอนที่ 2) จำนวนพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จากแผงเซลล์แสงอาทิตย์สามารถหาค่าได้จากสมการที่ 2

$$\begin{aligned}
 E_{DC} &= \frac{P_{DC}}{t} \\
 &= (1.773 \times 5)/60 \\
 &= 0.1478 \quad \text{kWh}
 \end{aligned}$$

ขั้นตอนที่ 3) จำนวนกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากไฟฟ้าพื้นฐานสามารถหาค่าได้จากสมการที่ 1

$$\begin{aligned}
 P_{AC} &= I_m \times V_m \\
 &= 3.28 \times 221.79 \\
 &= 727.47 \quad \text{W} \\
 &= 0.72747 \quad \text{kW}
 \end{aligned}$$

ขั้นตอนที่ 4) จำนวนพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จากไฟฟ้าพื้นฐานสามารถหาค่าได้จากสมการที่ 2

$$E_{AC} = \frac{P_{AC}}{t}$$

$$= (0.727 \times 5)/60$$

$$= 0.0605 \quad \text{kWh}$$

ขั้นตอนที่ 5) คำนวณกำลังไฟฟ้าของมอเตอร์เติมอากาศสามารถหาค่าได้จากสมการที่ 8

$$P_{AC} = I \times V \times \eta_{\text{moter}} \times \sqrt{3}$$

$$= 6.07 \times 192 \times 0.85 \times \sqrt{3}$$

$$= 1,715.81 \quad \text{W}$$

$$= 1.715 \quad \text{kW}$$

ขั้นตอนที่ 6) คำนวณพลังงานไฟฟ้าของมอเตอร์เติมอากาศสามารถหาค่าได้จากสมการที่ 9

$$E_{DC} = \frac{P_{DC}}{t}$$

$$= (1.715 \times 5)/60$$

$$= 0.1429 \quad \text{kWh}$$

ขั้นตอนที่ 7) คำนวณประสิทธิภาพจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์สามารถหาค่าได้จากสมการที่ 4

$$\eta_{pv} = \frac{I_m V_m}{A_c I_c} \times 100$$

$$= [(1.773)/(9 \times 2 \times 600.95)] \times 100$$

$$= 16.38\%$$

ขั้นตอนที่ 8) คำนวณประสิทธิภาพของเครื่องแปลงกระแสไฟฟ้าสามารถหาค่าได้จากสมการที่ 10

$$\eta_{inv} = \frac{P_{DC}}{P_{AC}} \times 100$$

$$= [1.715/(1.773+0.72747)] \times 100$$

$$= 68.59\%$$

ตาราง ก.2 ผลผลิตพลังงานไฟฟ้าจากระบบ Battery&Grid (ช่วงกลางวัน)

Time	Battery to Inverter		Grid to Inverter		Inverter to Motor	
	(V)	(A)	(V)	(A)	(V)	(A)
05:00	291.99	2.42	221.97	8.42	192	6.10
05:05	291.98	2.36	222.22	8.48	192	6.10

ขั้นตอนที่ 1) คำนวณกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากแบตเตอรี่สามารถหาค่าได้จากสมการที่ 1

$$P_{DC} = 2.42 \times 291.99$$

$$= 706.61 \quad \text{W}$$

$$= 0.706 \quad \text{kW}$$

ขั้นตอนที่ 2) จำนวนพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จากแบตเตอรี่สามารถหาค่าได้จากสมการที่ 2

$$E_{DC} = (0.7066 \times 5)/60$$

$$= 0.0588 \quad \text{kWh}$$

ขั้นตอนที่ 3) จำนวนกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากไฟฟ้าพื้นฐานสามารถหาค่าได้จากสมการที่ 1

$$P_{AC} = 8.42 \times 221.97$$

$$= 1,868.98 \quad \text{W}$$

$$= 1.868 \quad \text{kW}$$

ขั้นตอนที่ 4) จำนวนพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จากไฟฟ้าพื้นฐานสามารถหาค่าได้จากสมการที่ 2

$$E_{AC} = (1.868 \times 5)/60$$

$$= 0.1557 \quad \text{kWh}$$

ขั้นตอนที่ 5) จำนวนกำลังไฟฟ้าของมอเตอร์เติมอากาศสามารถหาค่าได้จากสมการที่ 8

$$P_{AC} = 6.10 \times 192 \times 0.85 \times \sqrt{3}$$

$$= 1,724.29 \quad \text{W}$$

$$= 1.724 \quad \text{kW}$$

ขั้นตอนที่ 6) จำนวนพลังงานไฟฟ้าของมอเตอร์เติมอากาศสามารถหาค่าได้จากสมการที่ 9

$$E_{AC} = (1.724 \times 5)/60$$

$$= 0.14366 \quad \text{kWh}$$

ขั้นตอนที่ 7) จำนวนประสิทธิภาพของเครื่องแปลงกระแสไฟฟ้าสามารถหาค่าได้จากสมการที่ 10

$$\eta_{inv} = [1.724/(0.7066+1.868)] \times 100$$

$$= 66.96\%$$

ก.2 การเจริญเติบโตของการเลี้ยงปลานิล

การคำนวณการเจริญเติบโตของการเลี้ยงปลานิลเป็นตัวอย่งการคำนวณในรูปแบบ M ในระยะ 1-2 มีอัตราการปล่อย 10,400 ตัว

ตาราง ก.2 การเจริญเติบโตของการเลี้ยงปลานิล

รายละเอียด	หน่วย	เริ่มต้นการปล่อย	ระยะ 1
ปริมาณอาหาร (FT)	kg	0	2,676
ระยะเวลาการเลี้ยง (t)	day	0	56.00
น้ำหนัก (g/ตัว)	g	47.17	160.61

ขั้นตอนที่ 1) คำนวณน้ำหนักปลาเฉลี่ยที่เพิ่มขึ้นหาค่าได้จากสมการที่ 15

$$\begin{aligned} WG &= W_f - W_i \\ &= 160.61 - 47.17 \\ &= 113.44 \quad \text{g} \end{aligned}$$

ขั้นตอนที่ 2) คำนวณอัตราการเจริญเติบโตเฉลี่ยต่อวันหาค่าได้จากสมการที่ 16

$$\begin{aligned} ADG &= \frac{W_f - W_i}{t} \\ &= (160.61 - 47.17)/56 \\ &= 2.02 \quad \text{g/day} \end{aligned}$$

ขั้นตอนที่ 3) คำนวณอัตราการเปลี่ยนอาหารเป็นน้ำหนักหาค่าได้จากสมการที่ 17

$$\begin{aligned} FCR &= FT/WG \\ &= (2,676 \times 1,000)/(113.44 \times 10,400) \\ &= 2.27 \end{aligned}$$

ขั้นตอนที่ 4) คำนวณประสิทธิภาพการเปลี่ยนอาหารเป็นน้ำหนักหาค่าได้จากสมการที่ 18

$$\begin{aligned} FEC &= WG/FT \\ &= (113.44 \times 10,400)/(2,676 \times 1,000) \\ &= 44.09\% \end{aligned}$$

ขั้นตอนที่ 5) คำนวณอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะหาค่าได้จากสมการที่ 19

$$\begin{aligned} SGR &= [(\ln(W_f) - \ln(W_i))/t] \times 100 \\ &= [(\ln(160.61) - \ln(47.17))/56] \times 100 \\ &= 2.19\%/day \end{aligned}$$

ก.3 การวิเคราะห์ต้นทุนทางด้านพลังงานของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับไฟฟ้าพื้นฐานและแบตเตอรี่สำหรับบ่อเลี้ยงปลา

การวิเคราะห์ต้นทุนทางด้านพลังงานของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับไฟฟ้าพื้นฐานและแบตเตอรี่สำหรับบ่อเลี้ยงปลา ในการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้านี้มีอุปกรณ์หลักประกอบด้วย แผงเซลล์แสงอาทิตย์ เครื่องควบคุมประจุไฟฟ้า (Charger) แบตเตอรี่ และเครื่องแปลงกระแสไฟฟ้า (Inverter) โดยมีสมมุติฐานในการวิเคราะห์ดังนี้

- ขนาดระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ติดตั้ง 2.93 kW
- ใช้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด Poly Crystalline ขนาดกำลังไฟฟ้า 325 Wp/module
- พื้นที่แผงเซลล์พลังงานแสงอาทิตย์ 2 m²
- จำนวนแผงเซลล์แสงอาทิตย์ในการติดตั้ง 9 module
- ประสิทธิภาพการผลิตจากระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ 15.25%
- ประสิทธิภาพเครื่องแปลงกระแสไฟฟ้า 68.84%
- ค่าไฟฟ้าจากระบบไฟฟ้าพื้นฐาน 4.33 Baht/kWh
- อัตราดอกเบี้ยเงินให้สินเชื่อของธนาคารกรุงธนวันที่ 15 มีนาคม 2562 คิดเป็น 7.125%

โดยต้นทุนของอุปกรณ์ต่างๆ และค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาในระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์

ตาราง ก.3.1 ราคาเฉลี่ยของอุปกรณ์ในระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์

อุปกรณ์หลักในระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์	ราคา (Baht)
แผงเซลล์แสงอาทิตย์	48,060
เครื่องควบคุมประจุไฟฟ้า (Charger)	25,894
แบตเตอรี่	25,872
เครื่องแปลงกระแสไฟฟ้า (Inverter)	9,800
รวม	109,626

ตาราง ก.3.2 อายุเฉลี่ยของอุปกรณ์ในระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์

รายการ	อายุการใช้งาน (year)
อายุโครงการ	25
อายุการใช้งานแผงเซลล์แสงอาทิตย์	25
อายุการใช้งานแบตเตอรี่	6
อายุการใช้งานเครื่องแปลงกระแสไฟฟ้า (Inverter)	10

ข้อมูลความเข้มรังสีแสงอาทิตย์ในประเทศไทยปี พ.ศ. 2562 จากสถานีวัดศูนย์บริการ
วิชาการที่ 7 จังหวัดเชียงใหม่

ตาราง ก.3.3 ข้อมูลความเข้มรังสีแสงอาทิตย์ในประเทศไทยปี พ.ศ. 2562

เดือน	I_T (MJ/m ² -day)	I_T (kWh/m ² -day)	I_T (kWh/m ² month)	E_{PV} (kWh/month)	คิดเป็นเงิน (bath)
ม.ค.	13.53	3.758	116.51	220.16	953.30
ก.พ.	16.535	4.593	128.61	243.02	1,052.29
มี.ค.	16.611	4.614	143.04	270.30	1,170.39
เม.ย.	18.054	5.015	150.45	284.30	1,231.02
พ.ค.	18.615	5.171	160.30	302.91	1,311.58
มิ.ย.	16.969	4.714	141.41	267.22	1,157.04
ก.ค.	14.256	3.960	122.76	231.98	1,004.46
ส.ค.	12.816	3.560	110.36	208.54	903.00
ก.ย.	16.203	4.501	135.03	255.15	1,104.81
ต.ค.	16.616	4.616	143.08	270.38	1,170.74
พ.ย.	15.087	4.191	125.73	237.58	1,028.72
ธ.ค.	14.128	3.924	121.66	229.89	995.44

จากการคำนวณดังต่อไปนี้ จะยกตัวอย่างในการคำนวณเดือนมกราคมมีความเข้มรังสี
แสงอาทิตย์ 13.53 MJ/m²-day

ขั้นตอนที่ 1) แปลงหน่วยความเข้มรังสีแสงอาทิตย์ที่ผลิตได้จากหน่วย MJ/m²-day เป็นหน่วย
kWh/m²-day (1 kWh= 3.6 MJ)

$$= \frac{13.53 \text{ MJ / m}^2 \text{ day}}{3.6} = 3.758 \text{ kWh/m}^2 \text{-day}$$

จะได้ความเข้มรังสีแสงอาทิตย์ที่ผลิตได้ในหนึ่งเดือน

$$= 3.758 \text{ kWh/m}^2 \text{-day} \times 31 \text{ day}$$

$$= 116.51 \text{ kWh/m}^2 \text{-month}$$

ขั้นตอนที่ 2) คำนวณหาค่าพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จากระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์

$$E_{PV} = \eta_{PV} \times \eta_{inv} \times A_{CT} \\ = (15.25\%) \times (68.84\%) \times (2\text{m}^2 \times 9\text{module}) \\ \times (97.36\text{kWh / m}^2 \text{-month})$$

$$= 220.16 \quad \text{kWh/month}$$

ขั้นตอนที่ 3) คำนวณหาค่าใช้จ่ายหากคิดเป็นผลประหยัดจะได้

$$= 220.16 \text{ kWh/month} \times 4.33 \text{ Baht/kWh}$$

$$= 953.30 \quad \text{Baht/month}$$

ขั้นตอนที่ 4) ระยะเวลาคืนทุน (Payback Period) จากสมการ 23

$$\text{PB} = \frac{\text{เงินลงทุน}}{\text{ผลตอบแทนจากการลงทุน}}$$

$$= 109,626 / 13,082.78$$

$$= 8.38 \text{ year}$$

ขั้นตอนที่ 5) คำนวณหามูลค่าปัจจุบันสุทธิ (Net Present Value) จากสมการ 21

$$\text{NPV} = \sum_{n=0}^N \frac{(R_n - C_n)}{(1+i)^n}$$

$$= (13,082.78) / (1+7.125\%)^1$$

$$= -1,791.08$$

จะได้มูลค่าปัจจุบันสุทธิแสดงดังตาราง

ตาราง ก.3.4 มูลค่าปัจจุบันสุทธิ

ปี (n)	การลงทุนเบื้องต้น (Baht)	ผลตอบแทนสุทธิ (Baht)	NPV
0	109,626.00	-109,626.00	-109,626.00
1		13,082.78	12,212.63
2		13,082.78	11,400.36
3		13,082.78	10,642.11
4		13,082.78	9,934.29
5		13,082.78	9,273.55
6	22,472.00	-9,389.22	-6,212.76
7		13,082.78	8,080.98
8		13,082.78	7,543.51
9		13,082.78	7,041.78
10	9,800.00	3,282.78	1,649.43
11		13,082.78	6,136.22

ปี (n)	การลงทุนเบื้องต้น (Baht)	ผลตอบแทนสุทธิ (Baht)	NPV
12	22,472.00	-9,389.22	-4,110.92
13		13,082.78	5,347.11
14		13,082.78	4,991.47
15		13,082.78	4,659.48
16		13,082.78	4,349.57
17		13,082.78	4,060.28
18	22,472.00	-9,389.22	-2,720.16
19		13,082.78	3,538.13
20	9,800.00	3,282.78	828.75
21		13,082.78	3,083.14
22		13,082.78	2,878.07
23		13,082.78	2,686.65
24	22,472.00	-9,389.22	-1,799.90
25		13,082.78	2,341.15

ภาคผนวก ข

ผลงานทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์



<https://doi.org/10.14456/jsat.2020.6>

e-ISSN 2730-1532, ISSN 2730-1524

Energy management study of aeration system for Nile tilapia fish pond using solar photovoltaic together with utility grid system

Preeyanuch Numpha and Sarawut Polvongsri*

School of Renewable Energy, Maejo University, Chaing Mai 50280, Thailand.

*Corresponding author: saravooth@hotmail.com

Received: October 6, 2020. Revised: November 1, 2020. Accepted: November 12, 2020.

ABSTRACT

This paper presents the energy management models of the aeration system for the Nile tilapia pond using the electrical energy from solar photovoltaic (PV) and the utility grid system (Grid). The solar photovoltaic system is installed on nine panels in which each panel has a dimension of $2 \times 1 \text{ m}^2$ with 325 Wp of polycrystalline silicon solar cell type to produce the electricity for the aeration motor of 2.05 kW. In addition to using electric power, things to keep in mind are the Dissolved Oxygen (DO) that affects fish survival. In Nile tilapia aquaculture, the aeration phase is divided into 4 phases, in which each phase is determined into 4 models of energy management. The results for the period time of Phase 1, Phase 2, Phase 3, and Phase 4 are 66, 48, 14, and 20 days, respectively. Phase 1 uses the energy management model PV; electricity is used only during the daytime, and no use of the aerator at night time, so there is no effect on electricity saving. While other three Phases 2nd - 4th, the optimize energy management model is model 3, which uses the least electrical energy during the daytime from solar PV together with the utility grid system (solar PV&Grid) and at nighttime by using Grid system which the total energy consumptions are 19.21, 21.70, and 24.34 kWh/day, respectively. For one crop by choosing the energy management model can reduce the electrical energy consumption of 1,018.82 kWh/crop, and a total saving is 4,411.49 Baht/crop.

Keywords: energy management, aerator, solar photovoltaic system, dissolved oxygen, Nile tilapia

INTRODUCTION

According to the Alternative Energy Development Plan 2015-2036, Thailand needs to promote the proportion of renewable energy, increasing by about 30% (AEDP, 2015). The interesting renewable energy that has been promoted is solar energy in the form of both heat and electricity. The government sets a target to increase the proportion of solar energy from 3.10-10.24% in all sectors such as industries, commercial buildings, households, and including the agriculture sector in farming, gardening, and aquaculture.

Moo Ban Thung Yao is an agricultural community locates in San Sai District, Chiang Mai Province. The total area of the community, about 70-80% have fish farming, such as Nile Tilapia and catfish in natural ponds. The fish growth period is about 4 months per crop. During culture, fish needs to use oxygen for breath and decomposition of organic material in the pond. During the daytime, phytoplankton will photosynthesize and releases oxygen, increasing the amount of Dissolved Oxygen (DO) that is sufficient for fish. On the other hand, during night time, there is no photosynthesis process; therefore, DO is continually decreasing. Typically, the standard of DO in the fish pond is not less than 3 mg/L (Choochote, 1993). If the DO is lower, the fish

may have stress conditions, reduced food intake also results in reduced growth rate as well, and finally, it causes the fish to lack oxygen. Therefore, using the aerator in the fish pond is necessary to use the oxygen increasing in the water. Most of the farmers in Moo Ban Thung Yao use the surface propeller aerator. However, the motor of the aerator is big and consumes much electric power for motor-driven, then it causes the fish costs to increase. Therefore, a sand head aerator is used; instead, the advantage is that the motor runs at low pressure, so it uses less electricity and to reduce production costs. For the previous researches about energy management in the fish pond, Phan-Van et al. (2008) studied the assessed impact of 3 factors affecting water temperature and DO, including water depth, seasons, and fish bioturbation. Statistical data analyzed by Multifactor-ANOVA, and it was found that fish bioturbation and water depth affected the DO. Due to the activities of fish during the summer 8:30-10:00 a.m., when the depth decreased, the DO would decrease, accordingly by about 2.38-4.77, 2.08-4, and 0.62-1.08 mg/L, respectively. Tran-Duy et al. (2008) studied the DO for the Nile tilapia growth. The water flow rate was pumped at 6 L/min to gradually decrease at a continuous-time by setting weight classes (37 g small size, 90 g big size) and two DO levels ($\text{DO} \leq 3.5 \text{ mg/L}$, low and $\text{DO} \geq 5.0 \text{ mg/L}$, high). From the study,

<https://doi.org/10.14456/jsat.2020.6>

it was found that when the amount of DO increasing the growth rate of the small fish was increased more than the big fish. Nalinanon et al. (2017) studied Nile tilapia in the conventional cage in which water circulated by the aerator about 22 hr/day and turn off 2 hr from the average initial body weight was 0.25 ± 0.01 g. When feeding about 12 weeks, the average weight of the last fish was increased approximately 23 ± 0.47 g resulting in weight gain, specific growth rate (SGR) was about 19 %/day. For the normal systems, the amount of DO was between 1.9-5.8 mg/L, which was inferior in quality to the aeration in the system resulting in DO increased about 7.90 ± 0.84 5.8 mg/L. Aziz et al. (2020) mentioned the utilization of the PV-grid connected system had proven to be an effective energy supply option and had gained favor where it was accessible and that had a suitable amount of solar radiation. While the installation of off-grid PV systems is increasing dramatically around the world, solar PV systems connected to the electrical network are growing more rapidly and continue to account for the majority of global PV power.

This research provides an idea to reduce the dependence on electricity from the utility grid system. The objective of this study was to study the energy management model of the aeration system for Nile tilapia by using the solar PV system together with the utility grid system.

MATERIALS AND METHODS

Solar Photovoltaic System combined with Utility Grid

A schematic diagram of the solar photovoltaic (PV) system combined with the utility grid for the fish pond aerator is shown in Figure 1(a). The total power of solar panels is 2.925 kW, installed 9 panels of poly crystalline type in which each panel has dimension 2×1 m² with a maximum power of 325 Wp. The generated electricity will pass through 2.2 kW inverter that uses to convert direct current (DC) into alternating current (AC) (Model: SINAMICS V20, voltage range 200-240 V) to the sand head aeration motor of 2.05 kW size and 3,450 rpm/min. In the case of the electricity from solar PV system is not enough, the utility grid electricity will be used to supply the aerator when following the demand load of the aerator. The experiment solar PV and the sand head aerator are shown in Figure 1(b) and 1(c).

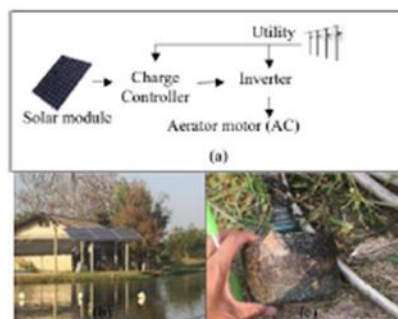


Figure 1. (a) Schematic diagram of the solar photovoltaic (PV) system combined with the utility grid system. (b) Solar PV system installation and (c) Sand head Aerator

Nile Tilapia fish farming

The experiment Nile Tilapia fish pond is located at Moo Ban Thung Yao. The fish pond area is approximately 5,000 m², the depth of the pond is 4 m. The farming density is 2 fish/m²; therefore, the farmer chooses Nile Tilapia fish size by the bodyweight of fish is not less than 30 fish/kg, with a rate of reduced to 11,900 fish before harvesting. The fish culture divides into 4 periods of time (Phase 1, Phase 2, Phase 3, and Phase 4), by the average weight of fish are 0.27, 0.44, 0.47, and 0.51 kg/fish, respectively, as shown in Figure 2. Feeding time conducts two times in the morning and evening at 10:30 a.m. and 5:00 p.m.-5:20 p.m., respectively. The total electricity usage is 2,449.00 kWh/crop or totaling 10,615.60 Baht/crop with an average electricity cost of 4.33 Baht/kWh.

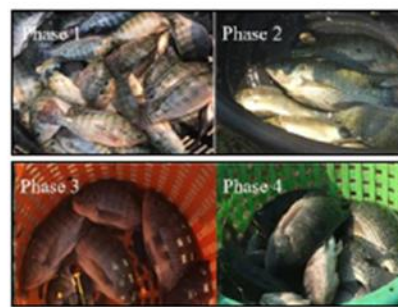


Figure 2. Size of Nile Tilapia fish in 1 crop.

Energy management model for DO analysis

Normally, the aerator motor is turned on during the daytime and nighttime between 9:00 a.m.-5:00 p.m. and 11:00 p.m.-9:00 a.m. In this condition, define it as a control system. In Table 1, five types of

energy management models of aeration systems are being studied using a solar PV system combined with a utility grid system, and there are determined for DO changing.

Table 1. Energy management models for the aeration system.

Model	Aeration system	
	Daytime ^a	Nighttime
PV ^b	Solar PV system	No use aerator
1	Solar PV system	Grid system ^c
2	Solar PV system	Grid system (DO<3mg/L) ^d
3	Solar PV&Grid systems	Grid system
4	Solar PV&Grid systems	Grid system (DO<3mg/L)

^a At daytime turns on the aerator motor between 9:00 a.m.-5:00 p.m.

^b Mode PV 1 uses only the first phase of fish culture.

^c Nighttime, modify the time to turn on all 4 phase motors, 1^a- 4^b (3:00 a.m.-9:00 a.m., 1:00 a.m.-9:00 a.m., 0:00 a.m.-9:00 a.m. and 11:00 p.m.-9:00 a.m., respectively.)

^d Nighttime, minimum time period is set for turning on the motor at 11:00 p.m.

Data collection for energy management analysis is divided into 2 parts as follows;

1) Collects data and analysis the electrical energy

The electrical data is measured by a clamp meter. The maximum voltage (V_m) and maximum current (I_m) of direct current (DC) will be calculated the maximum electrical power by using Equation (1) and calculates the electrical energy by using Equation (2).

$$P_m = I_m V_m \quad (1)$$

Where P_m is maximum power (W), I_m is maximum current (A) and V_m is maximum Voltage (V)

$$E = P_m \times t \quad (2)$$

Where E is maximum energy (Wh) and t is a time of operating (h)

Solar radiation intensity data (I_T) was collected using Apogee measuring instrument (Model: SP-100-L, Accuracy=5%), and the input and output power consumption data of the inverter was collected using clamp meter (AC/DC) (Model: UNIT UT204) measuring instruments. The diagram of measurement and data collection is shown in Figure 3.

2) Collects data and analysis the DO

The DO is measured by the DO meter (Model: Lutron DO-5512SD). Used as an indicator to compare DO with the control system for energy management in the aeration of each phase model.

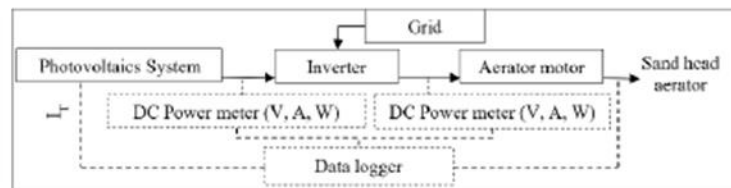


Figure 3. Measurement and data collection.

RESULTS AND DISCUSSION

The results from the energy management model of the aeration system are divided into 4 phases as follows:

Aeration of Phase 1

In Phase 1 of Nile Tilapia culture, the size fishes are small, so they do not need much oxygen for breathing. In addition, the behavior of non-breathing fish on the surface will observe in the morning so that the DO is sufficient for fish breathing. From Figure 4(a), it can be seen that in

Energy management model for DO analysis

Normally, the aerator motor is turned on during the daytime and nighttime between 9:00 a.m.-5:00 p.m. and 11:00 p.m.-9:00 a.m. In this condition, define it as a control system. In Table 1, five types of

energy management models of aeration systems are being studied using a solar PV system combined with a utility grid system, and there are determined for DO changing.

Table 1. Energy management models for the aeration system.

Model	Aeration system	
	Daytime ^a	Nighttime
PV ^b	Solar PV system	No use aerator
1	Solar PV system	Grid system ^c
2	Solar PV system	Grid system (DO<3mg/L) ^d
3	Solar PV&Grid systems	Grid system
4	Solar PV&Grid systems	Grid system (DO<3mg/L)

^a At daytime turns on the aerator motor between 9:00 a.m.-5:00 p.m.

^b Mode PV 1 uses only the first phase of fish culture.

^c Nighttime, modify the time to turn on all 4 phase motors, 1^a- 4^b (3:00 a.m.-9:00 a.m., 1:00 a.m.-9:00 a.m., 0:00 a.m.-9:00 a.m. and 11:00 p.m.-9:00 a.m., respectively.)

^d Nighttime, minimum time period is set for turning on the motor at 11:00 p.m.

Data collection for energy management analysis is divided into 2 parts as follows;

1) Collects data and analysis the electrical energy

The electrical data is measured by a clamp meter. The maximum voltage (V_m) and maximum current (I_m) of direct current (DC) will be calculated the maximum electrical power by using Equation (1) and calculates the electrical energy by using Equation (2).

$$P_m = I_m V_m \quad (1)$$

Where P_m is maximum power (W), I_m is maximum current (A) and V_m is maximum Voltage (V)

$$E = P_m \times t \quad (2)$$

Where E is maximum energy (Wh) and t is a time of operating (h)

Solar radiation intensity data (I_T) was collected using Apogee measuring instrument (Model: SP-100-L, Accuracy=5%), and the input and output power consumption data of the inverter was collected using clamp meter (AC/DC) (Model: UNIT UT204) measuring instruments. The diagram of measurement and data collection is shown in Figure 3.

2) Collects data and analysis the DO

The DO is measured by the DO meter (Model: Lutron DO-5512SD). Used as an indicator to compare DO with the control system for energy management in the aeration of each phase model.

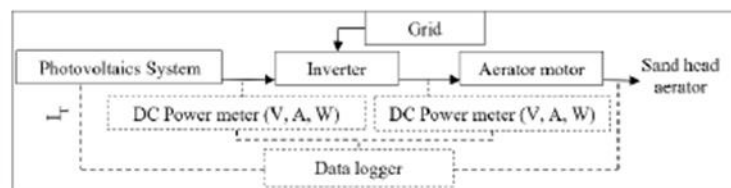


Figure 3. Measurement and data collection.

RESULTS AND DISCUSSION

The results from the energy management model of the aeration system are divided into 4 phases as follows:

Aeration of Phase 1

In Phase 1 of Nile Tilapia culture, the size fishes are small, so they do not need much oxygen for breathing. In addition, the behavior of non-breathing fish on the surface will observe in the morning so that the DO is sufficient for fish breathing. From Figure 4(a), it can be seen that in

the control system (without aerator using), the DO will increase from the morning time since 6 a.m. to 4 p.m. with the highest value of 5.70 mg/L due to many aquatic plants photosynthesis and release oxygen, however after the sun sets, the DO will begin to decrease. The lowest DO is 1.00 mg/L, and the average daily DO is 2.05 mg/L. It can be seen that the DO is lower than the standard; when there is no aeration, the oxygen content decreases rapidly. But with continuous aeration, the DO slowly decreases, and the fish can still survive. In the first phase, fish are still small, less density, and therefore have a low oxygen demand than Phases 2nd - 4th.

When the aerator is turned on by all energy management models, it is found that all models reach higher DO values than the control case. The highest DO is occurred by Model 4 followed by Model 3, Model 2, and Model 1, respectively. This investigation can be concluded that every model of

the aerator pattern can operate without the DO affecting in accordance with the conventional pattern (control system). Therefore, the quantity of electricity from the grid system is a decision for electricity choosing. The result of electrical energy using in Phase 1 is shown in Table 2.

Table 2 (Phase 1) shows the electrical energy that produces from the solar PV system and grid system. During the experiment, all days have similar, with an average value of 12.91 MJ/day. The results show that Model PV is most suitable for use during the Phase 1 cultured period because there is no electricity from Grid. While other models have to use electricity from Grid such as Model 1, and Model 3 which the electricity is used about 7.57 kWh/day, and 7.66 kWh/day, in addition, these results are less than Model 2 and Model 4, which uses electricity from Grid about 12.70 kWh/day and 12.78 kWh/day, respectively.

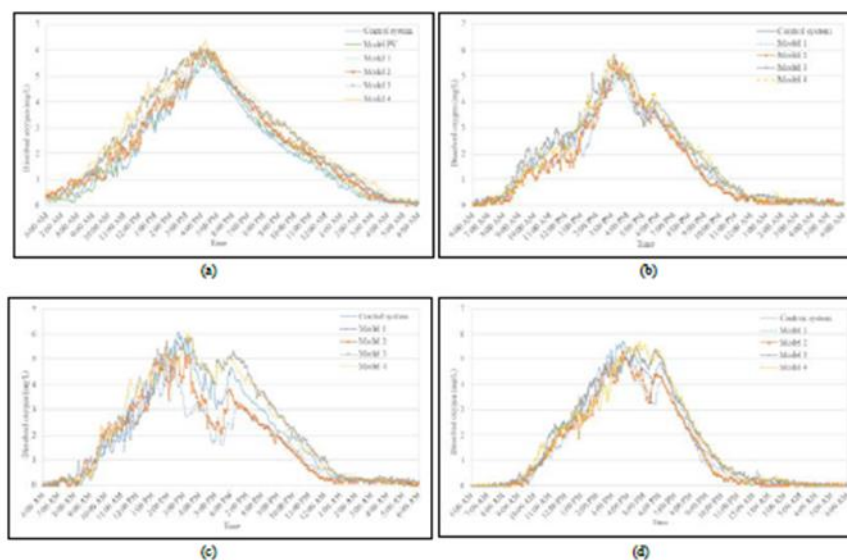


Figure 4. The amount of dissolved oxygen in all Phases.

Aeration of Phase 2

Phase 2, Nile tilapia fish is cultured around 48 days. After raising, it can be seen that the fish has increased growth and therefore needs more oxygen as well. On daytime and night time, if the aeration system operates with only a Model PV pattern in

the early morning before the sun rises, fishes breathe on the water surface in order to find oxygen, which means DO in the water is not enough for fish. Therefore, Model PV is not considered in Phase 2 culture.

the control system (without aerator using), the DO will increase from the morning time since 6 a.m. to 4 p.m. with the highest value of 5.70 mg/L due to many aquatic plants photosynthesis and release oxygen, however after the sun sets, the DO will begin to decrease. The lowest DO is 1.00 mg/L, and the average daily DO is 2.05 mg/L. It can be seen that the DO is lower than the standard; when there is no aeration, the oxygen content decreases rapidly. But with continuous aeration, the DO slowly decreases, and the fish can still survive. In the first phase, fish are still small, less density, and therefore have a low oxygen demand than Phases 2nd - 4th.

When the aerator is turned on by all energy management models, it is found that all models reach higher DO values than the control case. The highest DO is occurred by Model 4 followed by Model 3, Model 2, and Model 1, respectively. This investigation can be concluded that every model of

the aerator pattern can operate without the DO affecting in accordance with the conventional pattern (control system). Therefore, the quantity of electricity from the grid system is a decision for electricity choosing. The result of electrical energy using in Phase 1 is shown in Table 2.

Table 2 (Phase 1) shows the electrical energy that produces from the solar PV system and grid system. During the experiment, all days have similar, with an average value of 12.91 MJ/day. The results show that Model PV is most suitable for use during the Phase 1 cultured period because there is no electricity from Grid. While other models have to use electricity from Grid such as Model 1, and Model 3 which the electricity is used about 7.57 kWh/day, and 7.66 kWh/day, in addition, these results are less than Model 2 and Model 4, which uses electricity from Grid about 12.70 kWh/day and 12.78 kWh/day, respectively.

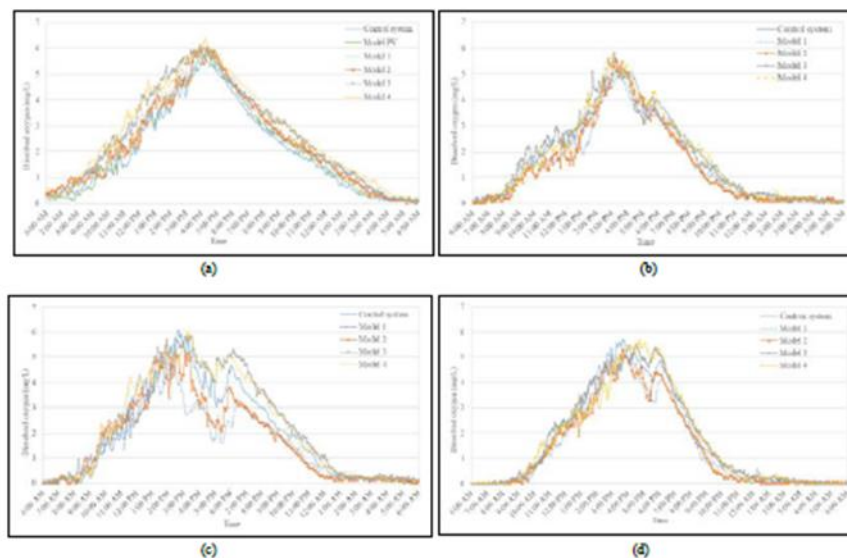


Figure 4. The amount of dissolved oxygen in all Phases.

Aeration of Phase 2

Phase 2, Nile tilapia fish is cultured around 48 days. After raising, it can be seen that the fish has increased growth and therefore needs more oxygen as well. On daytime and night time, if the aeration system operates with only a Model PV pattern in

the early morning before the sun rises, fishes breathe on the water surface in order to find oxygen, which means DO in the water is not enough for fish. Therefore, Model PV is not considered in Phase 2 culture.

Table 2. The energy consumption in the aeration.

period	Model	Total Solar radiation (MJ/m ² /day)	DO _{average} (mg/L)	Energy			Total Grid _{day} (kWh)
				PV _{active} (kWh)	Grid _{daytime} (kWh)	Grid _{nighttime} (kWh)	
Phase 1	Control	12.78	2.05	-	-	-	-
	Model PV	12.99	2.19	10.77	-	-	-
	Model 1	13.06	2.39	10.97	-	7.57	7.57
	Model 2	12.96	2.36	10.78	-	12.70	12.70
	Model 3	12.81	2.61	10.63	9.41	7.66	17.07
Model 4	12.85	2.73	10.56	9.42	12.78	22.20	
Phase 2	Control	14.08	1.77	-	20.68	13.05	33.73
	Model 1	13.99	1.52	11.40	-	10.12	10.12
	Model 2	14.13	1.53	11.44	-	12.53	12.53
	Model 3	14.13	1.79	11.48	8.94	10.18	19.12
	Model 4	14.11	1.77	11.46	8.88	12.69	21.57
Phase 3	Control	11.88	1.96	-	19.85	12.66	31.51
	Model 1	11.90	1.59	9.78	-	11.22	11.22
	Model 2	11.95	1.73	9.85	-	12.50	12.50
	Model 3	12.00	2.25	9.99	10.41	11.29	21.70
	Model 4	11.99	2.24	9.99	10.40	12.60	23.00
Phase 4	Control	11.27	1.67	-	19.77	12.88	32.65
	Model 1	10.97	1.49	8.83	-	12.55	12.55
	Model 2	10.95	1.47	8.80	-	12.83	12.83
	Model 3	11.01	1.75	8.83	11.60	12.74	24.34
	Model 4	11.09	1.70	8.92	11.40	12.72	24.12

Table 2 (Phase 2) shows energy consumption. The control system consumes electricity around 33.73 kWh/day from the grid system (Daytime: 20.68 kWh/day, Nighttime: 13.05 kWh/day). When considering all models, Model 1 and Model 2 have minimum electrical energy consumption at 10.12 kWh/day and 12.53 kWh/day followed by Model 3 and Model 4. The Model 3 has an operation time at 9:00 a.m.-5:00 p.m. and 1:00 a.m.-9:00 a.m. with total electricity consumption of 19.12 kWh/day (Daytime: 8.94 kWh/day, Nighttime: 10.18 kWh/day). For Model 4, total electricity consumption is 21.57 kWh/day (Daytime: 8.88 kWh/day, Nighttime: 12.69 kWh/day), respectively. However, when considering the DO as shown in Figure 4(b), it is found that the increase of DO is similar to the Phase 1 range, with the control system has the highest DO values 5.20 mg/L at 4:15 p.m. and the daily average DO is 1.77 mg/L.

Model 1, and Model 2 have DO lower than control systems all-time with an average of 1.52 mg/L and 1.53 mg/L, respectively; therefore, these models are not suitable for aeration system because the effect on fish growth may happen. While Model 3 and Model 4 has the DO higher than the control system with 1.79 mg/L and 1.77 mg/L, respectively. In conclusion, both the DO and electricity consumption must be considered simultaneously, so the results from Model 3 Model 4 are more suitable for aeration use, which can reduce the electricity consumption from the grid system by 14.61 kWh/day or 701.28 kWh during the Phase 2 culture.

Aeration of Phase 3

Phase 3, Nile tilapia fish is cultured around 14 days. Fish has a more increased growth rate, so the aeration system is necessarily similar to Phase 2 during the daytime. Figure 4(c), it is found that Model 1 and Model 2 are not suitable because the DO is lower than the control system, while the DO of Model 3 and Model 4 result obviously. When considering the electricity consumption, as shown in Table 2 (Phase 3), it is found

that the control system consumes higher electrical energy about 32.51 kWh/day (Daytime: 19.85 kWh/day, Nighttime: 12.66 kWh/day) than other models. In addition, Model 3 activates at 9:00 a.m.-5:00 p.m. and 0:00 a.m.-9:00 a.m. is most suitable for use because it uses less energy than Model 4, with electricity from grid system about 21.70 kWh/day (Daytime: 10.41 kWh/day, Nighttime: 11.29 kWh/day) and 23.00 kWh/day (Daytime: 10.40 kWh/day, Nighttime: 12.60 kWh/day), respectively. If considering only the electricity usage from the grid system, every model would increase electricity consumption because, during the rainy season, the solar intensity fluctuates. In the case of Model 3, it can reduce electricity consumption from the grid system by about 10.81 kWh/day or 151.31 kWh.

Aeration of Phase 4

Phase 4, Nile tilapia fish, has a culture day of 20 days. The suitable model in Phase 4 is Model 3 that has been proposed to use electricity during the daytime with a solar PV&grid system at 9:00 a.m.-5:00 p.m. and at 11:00 p.m.-9:00 a.m. with the only Grid system. The energy consumption of many models, as shown in Table 2 (Phase 4), the control system consumes electricity from a grid system about 32.65 kWh/day (Daytime: 19.77 kWh/day, Nighttime: 12.88 kWh/day). The results of Model 4 obtain has the least grid consumption about 24.12 kWh/day (Daytime: 10.40 kWh/day, Nighttime: 12.72 kWh/day); moreover, it is less than the results of Model 3, which consumes electricity from grid system about 24.34 kWh/day (Daytime: 11.60 kWh/day, Nighttime: 12.74 kWh/day). Anyway, it is found that the DO of Model 4, especially during the daytime, is lower than the DO of the control system, as shown in Figure 4(d), while The DO of Model 3 is higher than the control system. Therefore in this period culture, Model 3 is most suitable for aeration system use, which can reduce electricity consumption from the grid by about 8.31 kWh/day or 166.20 kWh.

When considering the one crop as shown in Table 3, in the case of the control system consumes electricity of 2,727.18 kWh/crop while the adjustment of the aerator operation according to the above scheme (Phase 1 use Model PV and Phase 2, Phase 3, and Phase

4 use Model 3) will consume electricity from Grid 1,708.36 kWh/crop, so the electricity-saving is equal to 1,018.82 kWh/crop, representing an electricity saving of 4,411.49 Baht/crop (the average electricity charge is 4.33 Baht/kWh).

Table 3. Energy consumption of the aeration system from the utility grid system.

Phase	Period time (day)	Energy consumption from the utility grid system					
		Control system		Model 3		Saving	
		kWh/day	kWh/Phase	kWh/day	kWh/Phase	kWh/day	kWh/Phase
1	66	-	-	-	-	-	-
2	48	33.73	1,619.04	19.12	917.76	14.61	701.28
3	14	32.51	455.14	21.70	303.80	10.81	151.34
4	20	32.65	653.00	24.34	486.80	8.31	166.20
Sum (kWh/crop)			2,727.18		1,708.36		1,018.82

CONCLUSIONS

In the experiment, five models will test the usage of aerators and choose the best model which consumes the least electricity; moreover, the DO value in the fish pond must be not lower than the control system that farmers use. The results can be summarized according to the fish culture period as follows;

During the phase 1 culture period, the suitable model of the aeration system is Model PV. During the day, the aerator is turned on from 9:00 a.m.-5:00 p.m. using only electricity from the solar PV system. But since the control system had no aeration, so there is no effect on electricity saving. While the other three Phases 2nd - 4th, the control system uses 33.73, 32.51, and 32.65 kWh/day of electricity from the grid system, respectively. The optimize energy management model is model 3, which uses the least electrical energy during the daytime from solar PV together with the utility grid system (solar PV&Grid) and at night time by using Grid system which the total energy consumptions are 19.12, 21.70 and 24.34 kWh/day, respectively, resulted in a reduction in electricity consumption by about 14.61 kWh/day (701.28 kWh), 10.81 kWh/day (151.34 kWh) and 8.31 kWh/day (166.20 kWh), respectively.

ACKNOWLEDGMENTS

The authors would like to thank the School of Renewable Energy, Maejo University, for supporting the study by a grant fund under The Generate and Development of Graduate Students in Renewable Energy Research Fund, in the ASEAN Countries in the graduate. We would like to thank the staff of the Smart Energy and Environmental Research Unit (SEEU) for supporting many suggestions, knowledge, and instruments. The authors would like to express deep gratitude to the National Research Council of Thailand (NRCT) under the Development of Alternative Energy and Its Applications in Green Communities project for funding the project

REFERENCES

- AEDP. 2015. Alternative energy development plan. Ministry of Energy, Thailand. Available from: https://www.deda.go.th/download/files/AEDP2015_Final_version.pdf. (in Thai).
- Aziz, A.S., Tajuddin, M.F.N., Adzman, M.R., Mohammed, M.F., and Ramli, R.A.M. 2020. Feasibility analysis of grid-connected and islanded operation of a solar PV microgrid system: A case study. 191:69-82.
- Choochote S. 1993. Freshwater fish farming. O. S. Printing House. Bangkok. 280 p. (in Thai).
- Nalinanon, W., Lerdswan, S., and Heamasatton, T. 2017. Comparison of moving water and aeration fish cage with a standard fish cage for Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) Culture. J Sci Technol MSU. 36(4):486-491. (in Thai).
- Phan-Van M., Rousseau, D., and De Pauw, N. 2008. Effects of fish bioirrigation on the vertical distribution of water temperature and dissolved oxygen in a fish culture-integrated waste stabilization pond system in Vietnam. Aquaculture. 281:28-33.
- Tran-Duy A., Schrama, J.W., Van Dam, A.A., and Verweij, J.A.J. 2008. Effects of oxygen concentration and body weight on maximum feed intake, growth and hematological parameters of Nile tilapia, *Oreochromis niloticus*. Aquaculture. 275:152-162.

บรรณานุกรม

- An Tran-Duy, Johan W. Schrama, Anne A. van Dam & and Johan A.J. Verreth. 2008. Effects of oxygen concentration and body weight on maximum feed intake, growth and hematological parameters of Nile tilapia, *Oreochromis niloticus*. **Aquaculture**, 275(1-4), 152-162.
- Asmae Chakir, Mohamed Tabaa, Fouad Moutaouakkil, Hicham Medromi, Maya Julien-Salame, Abbas Dandache & and Karim Alami. 2020. Optimal energy management for a grid connected PV-battery system. **Energy Reports**, 6(218-231).
- Aziz Haffaf, Fatiha Lakdja, Djaffar Ould Abdeslam & and Rachid Meziane. 2021. Monitoring, measured and simulated performance analysis of a 2.4 kWp grid-connected PV system installed on the Mulhouse campus, France. **Energy for Sustainable Development**, 62(44-55).
- B. Shiva Kumar & K. Sudhakar. 2015. Performance evaluation of 10 MW grid connected solar photovoltaic power plant in India. **Energy Reports**, 1(184-192).
- Carlos Henrique da Paixão Lemos, Cláudio Vaz Di Mambro Ribeiro, Crislaine Palmeira Barbosa de Oliveira, Ricardo David Couto & and Carlos Eduardo Copatti. 2018. Effects of interaction between pH and stocking density on the growth, haematological and biochemical responses of Nile tilapia juveniles. **Aquaculture**, 495(62-67).
- Claude E. Boyd and Craig S. Tucker. 1998. **Pond Aquaculture Water Quality Management**. Available https://books.google.co.th/books?hl=th&lr=&id=2r8GCAAQBAJ&oi=fnd&pg=PR11&dq=Water+Quality+in+Warm+Water+fish+pond&ots=plB6_0_u0_8_Cr&sig=HVgGMfl-ovCzwwfWMpkExZ7VpE&redir_esc=y#v=onepage&q=Water%20Quality%20in%20Warm%20Water%20fish%20pond&f=false
- F. Cherfa, A. Hadj Arab, R. Oussaid, K. Abdeladim & and S. Bouchakour. 2015. Performance Analysis of the Mini-Grid Connected Photovoltaic System at Algiers. **Energy Procedia**, 83(226-236).

- Ismail El Kafazi, Maryam Lafkih & and Rachid Bannari. 2020. PV generator and energy storage systems for laboratory building. **Energy Reports**, 6(672-679).
- Kim T. Tran-Ngoc, Ngu T. Dinh, Thinh H. Nguyen, Arjen J. Roem, Johan W. Schrama & and Johan A.J. Verreth. 2016. Interaction between dissolved oxygen concentration and diet composition on growth, digestibility and intestinal health of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*). **Aquaculture**, 462(101-108).
- L.M. Ayompe, A. Duffy, S.J. McCormackb & and M. Conlon c. 2011. Measured performance of a 1.72 kW rooftop grid connected photovoltaic system in Ireland. **Energy Conversion and Management**, 52(2), 816-825.
- Lutero Carmo de Lima, Leonardo de Araújo Ferreira & and Francisco Hedler Barreto de Lima Morais. 2017. Performance analysis of a grid connected photovoltaic system in northeastern Brazil. **Energy for Sustainable Development**, 37(79-85).
- Masoume Shabani, Erik Dahlquist, Fredrik Wallin & and Jinyue Yan. 2021. Techno-economic impacts of battery performance models and control strategies on optimal design of a grid-connected PV system. **Energy Conversion and Management**, 245(1-21).
- Minh Phan-Van, Diederik Rousseau & and Niels De Pauw. 2008. Effects of fish bioturbation on the vertical distribution of water temperature and dissolved oxygen in a fish culture-integrated waste stabilization pond system in Vietnam. **Aquaculture**, 281(1-4), 28-33.
- Muyiwa S. Adaramola & Emil E.T. Vågnes. 2015. Preliminary assessment of a small-scale rooftop PV-grid tied in Norwegian climatic conditions. **Energy Conversion and Management**, 90(458-465).
- N. Anang, S.N.A. Syd Nur Azman, W.M.W. Muda, A.N. Dagang & and Muhamad Zalani Daud. 2021. Performance analysis of a grid-connected rooftop solar PV system in Kuala Terengganu, Malaysia. **Energy & Buildings**, 248(1-13).
- Nowshad Amin, Chin Wen Lung & and Kamaruzzaman Sopian. 2009. A practical field study of various solar cells on their performance in Malaysia. **Renewable Energy**, 34(8), 1939-1946.
- Pragya Gawhade and Amit Ojha. 2021. Recent advances in synchronization techniques for grid-tied PV system: A review. **Energy Reports**, 7(6581-6599).

- Sonal Gaurav, Chirag Birla, Aman Lamba, S. Umashankar & Swaminathan Ganesanb. 2015. Energy Management of PV - Battery based Microgrid System. **Procedia Technology**, 21(103-111).
- Xuejiao Han, Jared Garrison & Gabriela Hug. 2022. Techno-economic analysis of PV-battery systems in Switzerland. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 158(1-22).
- กรมควบคุมมลพิษ. 2530. เอกสารวิชาการสถาบันประมงน้ำจืดแห่งชาติ ฉบับที่ 75/2530 เรื่อง เกณฑ์คุณภาพน้ำเพื่อการคุ้มครองทรัพยากรสัตว์น้ำจืด. [Online]. Available http://www.pcd.go.th/info_serv/reg_std_water06.html.
- กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. 2558. แผนพัฒนาพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือก พ.ศ. 2558–2579 (Alternative Energy Development Plan: AEDP2015). [Online]. Available http://www.dede.go.th/download/files/AEDP2015_Final_version.pdf.
- เกตุณภัส ศรีไพโรจน์ รุ่งกานตกล่าหาญ พงศนรินทรเมฆขุนทด และทองอยู่อุดเลิศ. 2556. การเปรียบเทียบอัตราการเจริญเติบโตของสายพันธุ์ปลานิลที่เลี้ยงในจังหวัดพะเยา. **วารสารเกษตร**, 29(2), 137-144.
- ณรงค์ กมลรัตน์. 2060. การศึกษารูปแบบการให้อาหารที่เหมาะสมเพื่อลดต้นทุนการเลี้ยงปลานิลในกระชังแขวนในบ่อดิน. **วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี**, 19(80-87).
- นิพนธ์ เกตุจ้อย และคงฤทธิ แม้นศิริ. 2010. การศึกษาสมรรถนะทางด้านเทคนิคของระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์แบบเชื่อมต่อเข้าระบบจำหน่ายไฟฟ้าขนาด 6.52 กิโลวัตต์. **Naresuan University Journal**, 18(3), 27-35.
- ปรีชา มหาไม้ วรวิมล วิริยะ และพิสุทธิ เพชรสุวรรณ. 2557. เครื่องเติมอากาศแบบกังหันใช้พลังงานแสงอาทิตย์ร่วมพลังงานย้อนกลับสำหรับบ่อปลา. **วารสารนเรศวรพะเยา**, 7(2), 142-150.
- พงษ์พันธ์ ราชภักดี และรุ่งโรจน์ จินต์วงศ์. 2562. เครื่องเติมอากาศผิวน้ำด้วยพลังงานแสงอาทิตย์สำหรับการเลี้ยงปลาในกระชัง. การประชุมวิชาการระดับชาติมหาวิทยาลัยทักษิณ ครั้งที่ 29 ประจำปี 2562 วิจัยและนวัตกรรมเพื่อการพัฒนาที่ยั่งยืน, 7(1), 271-277.
- พัชราวลัย ศรียะศักดิ์ นิวุฒิ หวังชัย ชนกกันต์ จิตมนัส จงกล พรมยะ และหลุยส์ เลอเบล. 2557. ผลกระทบจากสภาพอากาศและฤดูกาลต่อคุณภาพน้ำในบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำ. **KKU Res.j.**, 5(19), 743-751.
- เรวัฒน์ เต็มกล้า วิลาวัลย์ บุญศรี ประทัยเทพ และรัชชัย ชันทอง. 2562. การทดสอบประสิทธิภาพเครื่องกังหันตีน้ำพลังงานแสงอาทิตย์. **Industrial Technology Journal**, 4(3).

- วรพงษ์ นลินานนท์ สายชล เลิศสุวรรณ และธนากร เหมะสกล. 2560. การเปรียบเทียบการเลี้ยงปลานิลในกระชังระบบปลักต้นมวลน้ำและเติมอากาศกับกระชังทั่วไป. วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยมหาสารคาม, 36(4), 486-491.
- ศศิวิมล ทรงไตร พิระวุฒิ ชินวรรังสี อัครวิน หงษ์สิงห์ทอง ญัฐกานต์ อุดมเดชาณัติ ทรงเกียรติ กิตติสนธิ รักษ์ทวีวัฒน์ กระจ่างสังข์ จริญญา ศรีธาราธิคุณ และกอบศักดิ์ ศรีประภา. 2558. การประเมินสมรรถนะและความคุ้มค่าของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์แบบหลายเทคโนโลยีที่ติดตั้งบนหลังคาในประเทศไทย. *Ladkrabang Engineering Journal*, 33(1), 48-53.
- ศักดิ์ชัย ชูโชติ. 2536. การเลี้ยงปลาน้ำจืด (ระดับต่ำสุดของออกซิเจนที่สามารถทำให้ปลาตายได้). กรุงเทพมหานคร: โอเดียนสโตร์.
- ศิริวรรณ ทำนุ ชวโรจน์ ใจสิน ธงชัย มณีชูเกตุ และนรินทร์ ปิ่นแก้ว. 2561. การพัฒนาระบบควบคุมเครื่องเติมอากาศแบบอัตโนมัติในบ่อเลี้ยงปลานิล. การประชุมวิชาการสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย ระดับชาติ, 19(478-481).
- ศูนย์ความเป็นเลิศนาโนเทค. 2562. การทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์. [Online]. Available <http://www.kmutt.ac.th/hynae/รู้จักเซลล์แสงอาทิตย์>.

ประวัติผู้วิจัย

ชื่อ-สกุล	นางสาว ปรียานุช นุ่มภา
เกิดเมื่อ	15 เมษายน 2538
ประวัติการศึกษา	พ.ศ. 2560 ระดับปริญญาตรี วิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้ พ.ศ. 2556 ระดับมัธยมศึกษาตอนปลาย โรงเรียนผดุงปัญญา

