ห้องสมุดงานวิจัย สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ
247934

การเลือกขนาดหัวเก็บรังสีอาทิตย์สำหรับระบบทำน้ำร้อนเสริมด้วยปั๊มความร้อนในการควบคุมอุณหภูมิบ่อเลี้ยงปลา

กรวัฒน์ วุฒิกิจ

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมพลังงาน

บัณฑิตวิทยาลัย
มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
พฤศจิกายน 2553

b00252620

ห้องสมุดงานวิจัย สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ
247934

การเลือกขนาดตัวเก็บรังสีอาทิตย์สำหรับระบบทำน้ำร้อนเสริมด้วยปั๊มความร้อนในการควบคุมอุณหภูมิบ่อเลี้ยงปลา

กรวัฒน์ วุฒิกิจ

วิทยานิพนธ์นี้เสนอต่อบัณฑิตวิทยาลัยเพื่อเป็นส่วนหนึ่ง
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมพลังงาน

สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ห้องสมุดงานวิจัย

บัณฑิตวิทยาลัย
มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
พฤศจิกายน 2553

การเลือกขนาดตัวเก็บรังสีอาทิตย์สำหรับระบบทำน้ำร้อนเสริมด้วยปั๊มความร้อนในการควบคุมอุณหภูมิบ่อเลี้ยงปลา

กรวัฒน์ วุฒิกิจ

วิทยานิพนธ์นี้ได้รับการพิจารณาอนุมัติให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมพลังงาน

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อารีย์ อัจฉริยวิริยะ

.....กรรมการ
ศาสตราจารย์ ดร. ทนงเกียรติ เกียรติศิริโรจน์

.....กรรมการ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เดช ดำรงศักดิ์

.....กรรมการ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ณัฐวุฒิ ดุษฎี

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

.....
ศาสตราจารย์ ดร. ทนงเกียรติ เกียรติศิริโรจน์

19 พฤศจิกายน 2553

© ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเชียงใหม่

กิตติกรรมประกาศ

การวิจัยเรื่องการเลือกขนาดตัวเก็บรังสีอาทิตย์สำหรับทำน้ำร้อนเสริมด้วยปั๊มความร้อนในการควบคุมอุณหภูมิบ่อเลี้ยงปลา สำเร็จลุล่วงด้วยดีด้วยความร่วมมือจากหลายๆ ฝ่าย

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลงได้ด้วยความกรุณาจาก ศาสตราจารย์ ดร. ทนงเกียรติ เกียรติศิริโรจน์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้ซึ่งกรุณามอบความรู้ คำปรึกษา ตลอดจนตรวจสอบแก้ไขวิทยานิพนธ์จนเสร็จสมบูรณ์ ผู้เขียนขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

ขอกราบขอบพระคุณ ศาสตราจารย์ ดร. ทนงเกียรติ เกียรติศิริโรจน์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อารีย์ อัจฉริยวิริยะ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เดช ดำรงศักดิ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ณัฐวุฒิ ดุษฎี และ อาจารย์ ดร. ณัฐณี วรยศ ที่กรุณารับเป็นกรรมการตรวจและสอบวิทยานิพนธ์พร้อมทั้งให้คำแนะนำเป็นอย่างดีตลอดมา

ขอขอบคุณ คุณ นัฐพร ไชยญาติ ที่ให้ความช่วยเหลือด้วนโปรแกรมในการคำนวณและให้คำปรึกษาที่ดีตลอดมา

ขอขอบคุณ หน่วยวิจัยระบบอุณหภาพ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ที่ให้งบประมาณสนับสนุนโครงการ

ขอขอบคุณคณะเทคโนโลยีการประมงและทรัพยากรณ์ทางน้ำ มหาวิทยาลัยแม่โจ้ ที่เอื้อเฟื้อสถานที่ในการทดสอบและเก็บข้อมูล รวมทั้งเป็นสถานที่ในการวิเคราะห์และสรุปผล

ขอขอบคุณ บริษัทที ซัสอินเตอร์เนชั่นแนล จำกัด ที่อนุเคราะห์ให้พนักงานที่ช่วยเหลือในการแก้ปัญหาในการติดตั้งระบบในการทดสอบ

ขอขอบคุณเพื่อนพ้องน้องพี่ สาขาวิชาวิศวกรรมพลังงานและหน่วยวิจัยระบบทางอุณหภาพ ที่คอยแนะนำและช่วยเหลือในด้านต่างๆ เสมอมา

ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ครอบครัวและญาติพี่น้อง ที่คอยให้กำลังใจและสนับสนุนผู้เขียนทั้งในด้านการเรียน การดำเนินชีวิตด้วยดีตลอดมา

ท้ายที่สุดนี้ ผู้เขียนหวังเป็นอย่างยิ่งว่าวิทยานิพนธ์เล่มนี้คงจะมีประโยชน์สำหรับผู้อ่านไม่มากก็น้อย หากมีส่วนหนึ่งส่วนใดบกพร่องหรือผิดพลาดประการใด ผู้เขียนขออภัยเป็นอย่างสูงและขอน้อมรับคำแนะนำอันเป็นประโยชน์เหล่านั้น

กรวัฒน์ วุฒิกิจ

ชื่อเรื่องวิทยานิพนธ์	การเลือกขนาดตัวเก็บรังสีอาทิตย์สำหรับระบบทำน้ำร้อนเสริมด้วยปั๊มความร้อนในการควบคุมอุณหภูมิบ่อเลี้ยงปลา
ผู้เขียน	นายกรวัฒน์ วุฒิกิจ
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมพลังงาน)
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	ศาสตราจารย์ ดร. ทนงเกียรติ เกียรติศิริโรจน์

บทคัดย่อ

247934

โครงการวิจัยนี้ได้ศึกษาเชิงทดลองในการนำระบบทำน้ำร้อนแสงอาทิตย์เสริมปั๊มความร้อนเพื่อควบคุมอุณหภูมิบ่อเลี้ยงปลาในช่วงที่อากาศเย็น การทดสอบได้ใช้ตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบแผ่นเรียบ 2 ตัว มีค่า $F_R(\tau\alpha)_e$ และ F_RU_L อยู่ที่ 0.72 และ 10.52 W/m^2K ตามลำดับ ตัวเก็บรังสีอาทิตย์แต่ละตัวมีพื้นที่ 2 m^2 ต่อขนานกัน ให้ความร้อนแก่ถังน้ำร้อนขนาดความจุ 0.3 m^3 โดยมีปั๊มความร้อนที่ใช้ R22 ที่มีความสามารถในการให้ความร้อนประมาณ 3.5 kW เป็นอุปกรณ์ให้ความร้อนเสริม น้ำร้อนในถังจะถูกนำไปป้อนให้ความร้อนแก่บ่อเลี้ยงปลา ที่มีปริมาณน้ำประมาณ 20 m^3 และรักษาอุณหภูมิน้ำให้อยู่ที่ 28-30°C ผลการควบคุมอุณหภูมิน้ำในบ่อที่มีการควบคุมอุณหภูมิจะนำมาเทียบกับบ่อที่ไม่มีการควบคุมอุณหภูมิ

ได้ทำการทดสอบในฤดูหนาว ช่วงเดือนธันวาคม 2552 ถึงเดือนมีนาคม 2553 และในฤดูฝน ช่วงเดือนมิถุนายน 2553 ถึงสิงหาคม 2553 ที่สถานีทดสอบจังหวัดเชียงใหม่ โดยทำการปล่อยลูกปลาดุกบิ๊กอุยบ่อละ 1,000 ตัว ในเดือนกุมภาพันธ์บ่อปลาที่มีการควบคุมอุณหภูมิมีค่าอุณหภูมิเฉลี่ย 30°C บ่อปลาที่ไม่มีการควบคุมอุณหภูมิมีค่าอุณหภูมิเฉลี่ย 25°C ในเดือนสิงหาคมบ่อปลาที่มีการควบคุมอุณหภูมิมีค่าอุณหภูมิเฉลี่ย 29.5°C บ่อปลาที่ไม่มีการควบคุมอุณหภูมิมีค่าอุณหภูมิเฉลี่ย 27°C และ น้ำหนักของปลาดุกบิ๊กอุยในบ่อที่มีการควบคุมอุณหภูมิมีค่ามากกว่าบ่อที่ไม่มีการควบคุมอุณหภูมิ 1.6 และ 1.7 เท่าในฤดูหนาวและฤดูฝนตามลำดับ นอกจากนี้มีการจำลองการทำงานของระบบพบว่าใกล้เคียงกับผลการทดลอง จากการประเมินผลทางเศรษฐศาสตร์ในกรณีที่ราคาขายปลาดุกอยู่ที่ 40 บาทต่อกิโลกรัม การใช้ระบบทำน้ำร้อนแสงอาทิตย์เสริมปั๊มความร้อน ยังไม่มีความ

247934

เหมาะสม ทั้งนี้ขนาดตัวเก็บรังสีอาทิตย์ที่เหมาะสมอยู่ที่ 4 m^2 แต่ระยะคืนทุน 18.7 ปี อย่างไรก็ตาม ถ้าราคาขายเพิ่มขึ้นเป็น 65 บาทต่อกิโลกรัม ระยะคืนทุนจะดีขึ้น อยู่ที่7 ปี โดย IRR = 8%

Thesis Title	Solar Collector Sizing of Water Heating System with Assisted Heat Pump for Controlling Fish Pond Temperature
Author	Mr. Korawat Wudtigid
Degree	Master of Engineering (Energy Engineering)
Thesis Advisor	Professor Dr. Tanongkiat Kiatsiriroat

Abstract

247934

This research is to experimental study on a solar hot water system with an assisted heat pump to control a fish pond temperature in a cool weather. Two flat-plate solar collectors, each having $F_R(\tau\alpha)_e$ of 0.72, F_RU_L of 0.72 W/m^2K and an area of 2 m^2, in parallel connection were used to supply heat to a water storage having a capacity of 0.3 m^3. A 3.5 kW R22 heat pump was used to supply auxiliary heat when the temperature in the storage tank was less than a set value. The hot water in the storage tank was used to mix up with water in a 20 m^3 fish pond having around 1000 catfishes to warm and keep the pond temperature to be constant.

The experimental study was carried out during a winter season (December 2009 to March 2010) and a rainy season (June 2010 to August 2010) at a test station in Chiangmai. It could be found that for the pond with the temperature control, in February and in August the average fish pond temperatures were at 30°C and 29.5°C respectively. The pond without any temperature control, in February and August the average fish pond temperatures were at 25°C and 27°C respectively. The fish weight for the pond with temperature control was more than that without any temperature control around 1.6 times in winter and 1.7 times in rainy season. A simulation of the temperature controlled fish pond was also carried. From economic analysis, it was found that the solar heating system is not economic when the retailed price of the fish was at 40 baht/kg. For 4 m^2 of solar collector, the payback was 18.7 year. However when the retailed price was at 65 Baht/kg, the system was favorable and the payback was 7 year of which the IRR was 8%

สารบาญ

หน้า

กิตติกรรมประกาศ ค

บทคัดย่อภาษาไทย ง

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ จ

สารบาญ ฉ

สารบาญตาราง ช

สารบาญภาพ ฌ

อักษรย่อและสัญลักษณ์ ฒ

บทที่ 1 บทนำ 1

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา 1

1.2 สรุปสาระสำคัญจากเอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 2

1.3 วัตถุประสงค์ของการวิจัย 6

1.4 ประโยชน์ที่จะได้รับจากการวิจัย 7

1.5 ขอบเขตการวิจัย 7

บทที่ 2 หลักการและทฤษฎี 8

2.1 การคำนวณค่ารังสีอาทิตย์ 8

2.2 แบบจำลองอุณหภูมิอากาศ 12

2.3 การให้ความร้อนในบ่อปลาโดยใช้ระบบทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์เสริมปั๊มความร้อน 12

2.4 การวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์ 16

บทที่ 3 อุปกรณ์และวิธีการดำเนินงาน 18

3.1 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ทดสอบ 18

3.2 วิธีทำการทำวิจัย 23

สารบาญ (ต่อ)

บทที่ 4 ผลการสอบ 26

4.1 การป้อนความร้อนสู่บ่อเลี้ยงปลาโดยระบบทำน้ำร้อนแสงอาทิตย์เสริมปั๊มความร้อน 29

4.2 ผลของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ 34

บทที่ 5 การวิเคราะห์เชิงเศรษฐศาสตร์ 45

5.1 การคิดค่าใช้จ่ายของระบบ 45

5.2 การวิเคราะห์ระยะเวลาคืนทุน 49

5.3 การวิเคราะห์อัตราผลตอบแทนในการลงทุน 49

5.4 การเลือกขนาดตัวเก็บรังสีอาทิตย์โดยวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์ 50

บทที่ 6 สรุปและข้อเสนอแนะ 53

6.1 สรุป 53

6.2 ข้อเสนอแนะ 53

บรรณานุกรม 54

ภาคผนวก 56

ภาคผนวก ก ตัวอย่างการคำนวณ 57

ภาคผนวก ข ข้อมูลดิบการทดสอบ 72

ภาคผนวก ค ผลงานวิชาการที่ได้รับการเผยแพร่ 103

ประวัติผู้เขียน 112

สารบาญตาราง

ตาราง		หน้า
2.1	วันที่ที่เป็นตัวแทนของแต่ละเดือน	9
2.2	ค่าสัมประสิทธิ์ a_1, a_2, b_1, b_2 ของสถานีต่างๆ ในประเทศไทย	10
2.3	ค่าเฉลี่ยอุณหภูมิสูงสุด ต่ำสุด ในช่วง พ.ศ.2547 – 2552 ของจังหวัดเชียงใหม่	12
5.1	เงินลงทุนเบื้องต้นของระบบทำน้ำร้อนแสงอาทิตย์เสริมปั๊มความร้อน	45
5.2	ตารางแสดงการคิดค่าไฟฟ้าในแต่ละเดือน	46
5.3	ตารางแสดงค่าซื้อปลาและค่าอาหารปลา	47
5.4	ตารางแสดงค่าขายปลาดุกบิ๊กอุยต่อปี ของบ่อที่มีการควบคุมอุณหภูมิและบ่อที่ไม่มีการควบคุมอุณหภูมิ	48
ก.1	ข้อมูลการคำนวณค่าอัตราความร้อนจากตัวเก็บรังสีอาทิตย์ ค่าอัตราความร้อนจากปั๊มความร้อนและค่าความร้อนที่ป้อนให้กับน้ำในบ่อเลี้ยงปลา ของวันที่ 18-23 กุมภาพันธ์ 2553	72
ก.2	ข้อมูลการคำนวณค่าอัตราความร้อนสูญเสียสู่อากาศโดยรอบของน้ำในบ่อเลี้ยงปลาของวันที่ 18-23 กุมภาพันธ์ 2553	78
ก.3	ข้อมูลการคำนวณค่าอัตราความร้อนจากตัวเก็บรังสีอาทิตย์ ค่าอัตราความร้อนจากปั๊มความร้อน และค่าความร้อนที่ป้อนให้กับน้ำในบ่อเลี้ยงปลา ของวันที่ 18-22 มิถุนายน 2553	84
ก.4	ข้อมูลการคำนวณค่าอัตราความร้อนสูญเสียสู่อากาศโดยรอบของน้ำในบ่อเลี้ยงปลาของวันที่ 18-22 กุมภาพันธ์ 2553	89
ก.5	ข้อมูลดิบในการทดสอบเพื่อหาค่าอัตราส่วนระหว่างค่าความร้อนของคอนเดนเซอร์ต่อค่ากำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้กับระบบปั๊มความร้อน (EER) ของวันที่ 4 มีนาคม 2553	94
ก.6	ข้อมูลดิบในการทดสอบเพื่อหาค่าสัมประสิทธิการถ่ายเทความร้อนรวมของถังเก็บน้ำ (UA) ของวันที่ 9 สิงหาคม 2553	97
ก.7	ข้อมูลดิบในการทดสอบเพื่อหาประสิทธิผลของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน (ε_{HX}) ของวันที่ 8 กรกฎาคม 2553	101

สารบาญภาพ

รูป		หน้า
1.1	แผนผังการให้ความร้อนสู่บ่อเลี้ยงปลาโดยระบบทำน้ำร้อนแสงอาทิตย์เสริมปั๊มความร้อน	2
1.2	การใช้ระบบเรือนกระจกร่วมกับการทำน้ำร้อนแสงอาทิตย์ในการอุ่นน้ำบ่อเลี้ยงปลาของDas Tribeni et al. (2006)	3
1.3	บ่อปลาที่สร้างด้วยดินในสภาพอากาศนอกอาคารที่ Louisiana State University Agricultural Center Aquaculture Research Station ของ Lamoureux Jonathan et al. (2005)	3
1.4	บ่อปลาที่ทำการให้ความร้อนโดยระบบเรือนกระจกของ Dilip Jain (2005)	4
1.5	บ่อปลาที่เชื่อมต่อกับน้ำทะเลที่ปลาต่างๆใช้อยู่อาศัยในฤดูหนาวใน Porto Lagos Greece ของ Gelegenis John et al. (2005)	5
1.6	ระบบทำน้ำร้อนแสงอาทิตย์ที่มีปั๊มความร้อนเสริม ของ มารุด บูรพาและคณะ (2009)	6
2.1	แผนผังการให้ความร้อนสู่บ่อเลี้ยงปลาโดยระบบทำน้ำร้อนแสงอาทิตย์เสริมปั๊มความร้อน	13
2.2	ตัวอย่างความสัมพันธ์ระหว่างค่า EER ของระบบปั๊มความร้อนกับอุณหภูมิแตกต่างระหว่างอุณหภูมิน้ำร้อนในถังเก็บน้ำและอุณหภูมิอากาศรอบๆ (Ts-Ta) ของ มารุด บูรพา (2009)	14
3.1	การอุ่นน้ำในบ่อเลี้ยงปลาด้วยระบบทำน้ำร้อนแสงอาทิตย์เสริมด้วยปั๊มความร้อน	18
3.2	ตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบแผ่นเรียบขนาด 2 m^2 ต่อขนานกัน	18
3.3	ปั๊มน้ำขนาด 375 W	19
3.4	ระบบปั๊มความร้อน	19
3.5	ถังเก็บน้ำขนาด 0.3 m^3 ต่อกับตัวเก็บรังสีและปั๊มความร้อน	19
3.6	เกจวัดความดันของสารทำงานในระบบปั๊มความร้อน	20
3.7	อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบ Shell & Tube	20
3.8	ปั๊มน้ำขนาด 1.49 kW	21
3.9	บ่อปลาที่ทำการควบคุมอุณหภูมิ (ขวา) และบ่อที่ไม่ควบคุมอุณหภูมิ (ซ้าย)	21

สารบาญภาพ (ต่อ)

รูป		หน้า
3.10	Pyranometer	21
3.11	Thermo Couple Type K	22
3.12	Data Logger รุ่น TASK ขนาด 24 ช่องสัญญาณ	22
3.13	Computer	22
3.14	Flow meter	23
3.15	Clamp meter	23
3.16	การเก็บข้อมูลของระบบ	24
4.1	ค่าอุณหภูมิน้ำในบ่อเลี้ยงปลาที่มีการควบคุมอุณหภูมิ (Tp_heat) และค่าอุณหภูมิน้ำในบ่อเลี้ยงปลาที่ไม่มีการควบคุมอุณหภูมิ (Tp_ref) โดยภาพรวมของเดือนกุมภาพันธ์ 2553	26
4.2	ค่าอุณหภูมิน้ำในบ่อเลี้ยงปลาที่มีการควบคุมอุณหภูมิ (Tp_heat) และค่าอุณหภูมิน้ำในบ่อเลี้ยงปลาที่ไม่มีการควบคุมอุณหภูมิ (Tp_ref) โดยภาพรวมของเดือนสิงหาคม 2553	27
4.3	ค่าน้ำหนักของปลาดุกบิ๊กอุยในบ่อที่ไม่มีการควบคุมอุณหภูมิ (Weight_ref) และบ่อที่มีการควบคุมอุณหภูมิ (Weight_heat) ในฤดูหนาว	28
4.4	ค่าน้ำหนักของปลาดุกบิ๊กอุยในบ่อที่ไม่มีการควบคุมอุณหภูมิ (Weight_ref) และบ่อที่มีการควบคุมอุณหภูมิ (Weight_heat) ในฤดูฝน	28
4.5	ค่าอุณหภูมิน้ำในถังเก็บน้ำของวันที่ 18- 21 กุมภาพันธ์ 2553	29
4.6	ค่าอุณหภูมิน้ำในบ่อเลี้ยงปลาที่มีการควบคุมอุณหภูมิ (Tp_heat) เทียบกับค่าอุณหภูมิน้ำในบ่อเลี้ยงปลาที่ไม่มีการควบคุมอุณหภูมิ (Tp_ref) และอุณหภูมิอากาศ (Ta) ของวันที่ 18- 21 กุมภาพันธ์ 2553	30
4.7	ค่าอุณหภูมิน้ำในถังเก็บน้ำ (Tst) ที่ได้รับอัตราความร้อนจากปั๊มความร้อน (Qcond) ค่าอัตราความร้อนที่ป้อนสู่บ่อปลา (Qhx) และค่าอัตราการสูญเสียความร้อนของน้ำในถังเก็บน้ำสู่อากาศโดยรอบ (Qloss) ในช่วงเวลา 01:00-7:30 น. ของวันที่ 19 กุมภาพันธ์ 2553	31

สารบาญภาพ (ต่อ)

รูป		หน้า
4.8	ค่าอุณหภูมิน้ำในถังเก็บน้ำ (Tst) ที่ได้รับความร้อนจากตัวเก็บรังสีอาทิตย์ (Qcoll) ค่าความร้อนที่ป้อนสู่บ่อปลา (Qhx) และค่าอัตราการสูญเสียความร้อนของน้ำในถังเก็บน้ำสู่อากาศโดยรอบ (Qloss) ในช่วงเวลา 08:00-17:30 น. ของวันที่ 19 กุมภาพันธ์ 2553	31
4.9	ค่าอุณหภูมิน้ำในถังเก็บน้ำ (Tst) ที่ได้รับความร้อนจากปั๊มความร้อน (Qcond) ค่าความร้อนที่ป้อนสู่บ่อเลี้ยงปลา (Qhx) และค่าอัตราการสูญเสียความร้อนของน้ำในถังเก็บน้ำสู่อากาศโดยรอบ (Qloss) ในช่วงเวลา 19:00-23:00 น. ของวันที่ 19 กุมภาพันธ์ 2553	32
4.10	ค่าอุณหภูมิน้ำในถังเก็บน้ำของวันที่ 16-20 สิงหาคม 2553	33
4.11	ค่าอุณหภูมิน้ำในบ่อเลี้ยงปลาที่มีการควบคุมอุณหภูมิ (Tp_heat) เทียบกับค่าอุณหภูมิน้ำในบ่อเลี้ยงปลาที่ไม่มีการควบคุมอุณหภูมิ (Tp_ref) และอุณหภูมิอากาศ (Ta) ของวันที่ 16- 20 สิงหาคม 2553	33
4.10	ค่าอุณหภูมิน้ำในถังเก็บน้ำของวันที่ 16-20 สิงหาคม 2553	
4.11	ค่าอุณหภูมิน้ำในบ่อเลี้ยงปลาที่มีการควบคุมอุณหภูมิ (Tp_heat) เทียบกับค่าอุณหภูมิน้ำในบ่อเลี้ยงปลาที่ไม่มีการควบคุมอุณหภูมิ (Tp_ref) และอุณหภูมิอากาศ (Ta) ของวันที่ 16- 20 สิงหาคม 2553	34
4.13	ค่าอุณหภูมิของอากาศ (Ta) อุณหภูมิของน้ำในถังเก็บน้ำ (Tst) ค่าความร้อนของคอนเดนเซอร์ (Qcond) และกำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้กับคอนเดนเซอร์ (Power)	35
4.14	ความสัมพันธ์ระหว่างค่า ERR และผลต่างระหว่างค่าอุณหภูมิน้ำในถังเก็บน้ำกับอุณหภูมิของอากาศ (Tst-Ta)	36
4.15	ค่าอุณหภูมิน้ำกระแสร้อนขาเข้าอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนมีค่าเท่ากับอุณหภูมิน้ำในถังเก็บน้ำ (Thi=Tst) ค่าอุณหภูมิน้ำกระแสร้อนขาออกจากอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน (Tho) ค่าอุณหภูมิน้ำกระแสเย็นขาเข้าอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนมีค่าเท่ากับอุณหภูมิน้ำในบ่อเลี้ยงปลา (Tci=Tp) และค่าอัตราความร้อนที่ได้จากอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนจริง (Qhx,actual)	37

สารบาญภาพ (ต่อ)

รูป		หน้า
4.16	ขั้นตอนการคำนวณในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์	38
4.17	ค่าอุณหภูมิน้ำในถังเก็บน้ำที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (Tst_model) และค่าอุณหภูมิน้ำในถังเก็บน้ำที่ได้จากการทดลอง (Tst_exp) ของวันที่ 18-24 กุมภาพันธ์ 2558	39
4.18	ค่าอุณหภูมิน้ำในบ่อปลาที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (Tp_model) และค่าอุณหภูมิน้ำในบ่อปลาที่ได้จากการทดลอง (Tp_exp) ของวันที่ 18-24 กุมภาพันธ์ 2553	40
4.19	ค่าอุณหภูมิน้ำในถังเก็บน้ำและอุณหภูมิน้ำในบ่อเลี้ยงปลาที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ขนาดตัวเก็บรังสีอาทิตย์ 2, 4, 6, 8 และ 10 m^2 ตามลำดับของเดือนสิงหาคม	41
4.20	ค่าอุณหภูมิน้ำในถังเก็บน้ำและอุณหภูมิน้ำในบ่อเลี้ยงปลาที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ขนาดตัวเก็บรังสีอาทิตย์ 2, 4, 6, 8 และ 10 m^2 ตามลำดับของเดือนตุลาคม	42
4.21	ค่าอุณหภูมิน้ำในถังเก็บน้ำและอุณหภูมิน้ำในบ่อเลี้ยงปลาที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ขนาดตัวเก็บรังสีอาทิตย์ 2, 4, 6, 8 และ 10 m^2 ตามลำดับของเดือนกุมภาพันธ์	43
4.21	ชั่วโมงการทำงานต่อวันของปั๊มความร้อนในแต่ละเดือนที่ขนาดตัวเก็บรังสีอาทิตย์ 2, 4 6, 8 และ 10 m^2 ตามลำดับ	44
5.1	กราฟแสดงค่าผลตอบแทนภายในการลงทุน (Internal Rate of Return, IRR) ที่ขนาดตัวเก็บรังสีอาทิตย์ขนาดต่างๆ	50
5.2	กราฟแสดงระยะเวลาคืนทุน (Simple Payback Period, SPP) ที่ขนาดตัวเก็บรังสีอาทิตย์ขนาดต่างๆ	51
ก.1	ค่ารังสีอาทิตย์ที่ตกกระทบบนตัวเก็บรังสีอาทิตย์ในแต่ละเดือนของพื้นที่จังหวัดเชียงใหม่	60
ก.2	ค่ารังสีอาทิตย์ที่ตกกระทบพื้นราบในแต่ละเดือนของพื้นที่จังหวัดเชียงใหม่	61

สารบาญภาพ (ต่อ)

รูป		หน้า
ก.3	ค่าอุณหภูมิของอากาศในแต่ละเดือนของจังหวัดเชียงใหม่	61
ก.4	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า EER กับค่าความต่างระหว่างอุณหภูมิของน้ำในถังเก็บน้ำและอุณหภูมิของอากาศ (Tst-Ta)	62

อักษรย่อและสัญลักษณ์

a	ค่าคงที่ที่ได้จากการทดสอบปั๊มความร้อน	-
a_1	ค่าคงที่ที่สถานีต่างๆ ของประเทศไทย	-
a_2	ค่าคงที่ที่สถานีต่างๆ ของประเทศไทย	-
A_c	พื้นที่ของตัวเก็บรังสีอาทิตย์	m^2
A_p	พื้นที่ผิวด้านบนของน้ำในบ่อเลี้ยงปลา	m^2
b	ค่าคงที่ที่ได้จากการทดสอบปั๊มความร้อน	-
b_1	ค่าคงที่ที่สถานีต่างๆ ของประเทศไทย	-
b_2	ค่าคงที่ที่สถานีต่างๆ ของประเทศไทย	-
C_p	ค่าความจุความร้อนจำเพาะของน้ำ	J/kg°C
E	สมการเวลา (Equation of time)	-
EER	ค่าอัตราส่วนประสิทธิภาพพลังงาน	-
$F_R(\tau\alpha)_e$	คุณลักษณะเชิงแสงของตัวเก็บรังสี	-
$F_R U_L$	คุณลักษณะด้านการสูญเสียความร้อนรวมจากผิวดูดรังสี	$W/m^2°C$
G_{sc}	ค่าคงที่สุริยะ (Solar constant) ซึ่งมีค่าประมาณ 1353	W/m^2
H	รังสีรวมรายวันในแนวระดับ	MJ/m^2day
H_d	รังสีกระจายรายวันในแนวระดับ	MJ/m^2day
H_o	ค่ารังสีอาทิตย์เมื่ออยู่นอกชั้นบรรยากาศของโลก	MJ/m^2day
I	รังสีอาทิตย์รวมรายชั่วโมงในแนวระดับ	MJ/m^2day
i	อัตราดอกเบี้ยต่อปี	ทศนิยม
I_b	รังสีตรงรายชั่วโมงในแนวระดับ	MJ/m^2hr
I_{bT}	รังสีตรงรายชั่วโมงที่ตกกระทบตั้งฉากบนระนาบเอียง	MJ/m^2hr
I_d	รังสีกระจายรายชั่วโมงในแนวระดับ	MJ/m^2hr
IRR	อัตราผลตอบแทนภายใน	ทศนิยม
I_T	รังสีอาทิตย์รวมรายชั่วโมงที่ตกกระทบตั้งฉากบนระนาบเอียง	W/m^2
L_{loc}	ตำแหน่งเส้นลองจิจูดของบริเวณที่พิจารณา	degree
L_{st}	ตำแหน่งเส้นลองจิจูด (Longitude) ที่ใช้คำนวณเวลามาตรฐานท้องถิ่น	degree
m_c	อัตราการไหลของน้ำจากบ่อปลาเข้าอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน	kg/s

$(\dot{m}C_p)_{min}$	ค่าความจุความร้อนของน้ำกระแสเย็น	W/K
$M_{w,p}$	มวลของน้ำในบ่อเลี้ยงปลา	kg
$M_{w,st}$	มวลของน้ำในถังเก็บน้ำร้อน	kg
n	วันที่ของปีหรือวันจูเลียน (Julian date)	-
N	จำนวนตัวเก็บรังสีที่มาต่ออนุกรมกัน	-
n	อายุการใช้งานของระบบทำน้ำร้อนแสงอาทิตย์ที่มีปั๊มความร้อนเสริม	year
NCF_n	กระแสเงินสดสุทธิของปีที่ n	Baht
NPV	มูลค่าปัจจุบันสุทธิ	Baht
P_a	ค่าความดันบรรยากาศ	bar
P_{ower}	พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ทั้งหมดในระบบ	W
$\dot{Q}_c$	ค่าอัตราความร้อนจากการพา	W
$\dot{Q}_{coll}$	อัตราพลังงานความร้อนที่ได้จากตัวเก็บรังสีอาทิตย์	W
$\dot{Q}_{cond}$	อัตราความร้อนที่คอนเดนเซอร์	W
$\dot{Q}_E$	ค่าอัตราความร้อนการระเหยของน้ำในบ่อเลี้ยงปลา	W
$\dot{Q}_{HX}$	ค่าอัตราความร้อนที่อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน	W
$\dot{Q}_I$	ค่าอัตราความร้อนจากรังสีแสงอาทิตย์	W
$\dot{Q}_{loss}$	อัตราการสูญเสียความร้อนจากถังเก็บน้ำสู่อากาศโดยรอบ	W
$\dot{Q}_R$	ค่าอัตราความร้อนจากการแผ่รังสี	W
t	เวลาในหน่วยของชั่วโมงที่พิจารณา	-
T_a	อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม	°C
TIC	มูลค่าปัจจุบันของเงินลงทุนทั้งหมด	Baht
T_p	อุณหภูมิน้ำในบ่อเลี้ยงปลาที่เวลา t	°C
T_p^+	อุณหภูมิน้ำในบ่อเลี้ยงปลาที่เวลา $t+\Delta t$	°C
T_{st}	อุณหภูมิน้ำในถังเก็บน้ำที่เวลา t	°C
$T_{st}^{t+\Delta t}$	อุณหภูมิน้ำในถังเก็บน้ำที่เวลา $t+\Delta t$	°C
T_{fi}	อุณหภูมิของน้ำเข้าตัวเก็บรังสี	°C
T_{fo}	อุณหภูมิของน้ำออกจากตัวเก็บรังสี	°C
TIC	มูลค่าปัจจุบันของเงินลงทุนทั้งหมด	Baht
T_{max}	อุณหภูมิบรรยากาศสูงสุดในวัน	°C

T_{min}	อุณหภูมิบรรยากาศต่ำสุดในวัน	°C
u	ค่าความเร็วลม	m/s
UA	ค่าสัมประสิทธิการสูญเสียความร้อนรวมของถังเก็บน้ำ	W/K
α	ค่าสัมประสิทธิการดูดซับรังสีแสงอาทิตย์	-
β	มุมที่ตัวเก็บรังสีอาทิตย์เอียงทำมุมกับแนวระดับ	degree
δ	มุมเดคลิเนชัน (Declination angle)	degree
ε	ค่า Emissivity	-
ε_{HX}	ค่าประสิทธิผลของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน	-
ρ_g	แฟกเตอร์ของรังสีอาทิตย์ที่สะท้อนมาจากสิ่งแวดล้อม	-
ω	มุมชั่วโมง (Hour angle)	degree
ω_a	ค่า Humidity ratio ของอากาศ	$\frac{kg_{water}}{kg_{dry\ air}}$
ω_p	ค่า Humidity ratio ของผิวน้ำ	$\frac{kg_{water}}{kg_{dry\ air}}$
ω_s	มุมชั่วโมงที่พระอาทิตย์ตกดิน (Sunset hour angle)	degree
ϕ	มุมละติจูด (Latitude angle) หรือเส้นรุ่งของตำแหน่งที่พิจารณา	degree
θ	มุมที่รังสีตรงตกกระทบกับแกนที่ตั้งฉากบนระนาบในแนวเอียง	degree
γ	มุมอะซิมุธ (Azimuth angle)	degree
η_{coll}	ประสิทธิภาพตัวเก็บรังสีอาทิตย์	ทศนิยม
Δt	ผลต่างช่วงระยะเวลา	hr
θ_z	มุมที่รังสีตรงตกกระทบกับแกนที่ตั้งฉากบนระนาบในแนวระดับ	degree
σ	ค่าคงที่ของสเตฟานโบลต์ซมันน์ (5.67×10^{-8})	W/m^2K^4