การใช้ไททาเนียมไดออกไซด์เป็นสารเคลือบผิวดูดกลืนของระบบทำน้ำร้อน
พลังงานรังสีอาทิตย์ เพื่อยับยั้งแบคทีเรียในน้ำเสีย

นางสาวฟิสิกส์ อุดมทรัพย์ วท.บ. (ฟิสิกส์)

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีพลังงาน
คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
พ.ศ. 2555

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์
(ดร.ศรชล โยริยะ)

..... กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์
(รศ. ดร.ศิริชัย เทพา)

..... กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม
(ผศ. ดร.จิรศักดิ์ คงเกียรติขจร)

..... กรรมการ
(ผศ. ดร.ศศิธร พุทธวงษ์)

..... กรรมการ
(ดร.รุ่งโรจน์ สงค์ประกอบ)

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การใช้ไททาเนียมไดออกไซด์เป็นสารเคลือบผิวดูดกลืนของระบบทำน้ำร้อนพลังงานรังสีอาทิตย์ เพื่อยับยั้งแบคทีเรียในน้ำเสีย
หน่วยกิต	12
ผู้เขียน	นางสาวฟิสิกส์ อุดมทรัพย์
อาจารย์ที่ปรึกษา	รศ. ดร.ศิริชัย เทพา
	ผศ. ดร.จิรศักดิ์ คงเกียรติขจร
หลักสูตร	วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	เทคโนโลยีพลังงาน
สายวิชา	เทคโนโลยีพลังงาน
คณะ	พลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ
พ.ศ.	2555

บทคัดย่อ

ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาประสิทธิภาพของตัวรวมรังสีอาทิตย์รูปประกอบพาราโบลาแบบไม่สมมาตร (ACPC) โดยการใช้ความร้อนจากรังสีอาทิตย์เป็นตัวกลางในการเพิ่มอุณหภูมิให้แก่น้ำภายในระบบ และผลของการใช้ไททาเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาแบบใช้แสงร่วม (Photocatalysis) เพื่อยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรียในน้ำเสีย โดยมีการประยุกต์ใช้ตัวรวมรังสีอาทิตย์แบบ ACPC ซึ่งตัวรวมรังสีอาทิตย์ขนาดใหญ่มีพื้นที่ 0.30 x 0.58 m^2 วางหันมาทางทิศใต้ และตัวรวมรังสีอาทิตย์ขนาดเล็กมีพื้นที่ 0.30 x 0.30 m^2 วางหันมาทางทิศเหนือ ซึ่งทั้งสองขนาดได้ทำการหุ้มฉนวนด้านหลัง และใช้แผ่นดูดกลืนรังสีอาทิตย์ที่เคลือบด้วยไททาเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) ซึ่งทำด้วยแผ่นสแตนเลสที่มีความหนา 3 nm ขนาด 0.22 x 0.25 m^2 เคลือบด้วย TiO_2 หนา 250 nm บรรจุอยู่บนฐานของกล่องอะคริลิกใสขนาดกล่อง0.24 x 0.27 m^2 โดยอะคริลิกที่นำมาทำกล่องนั้นมีความหนา 0.5 mm ซึ่งบรรจุน้ำเสีย 4.93 L โดยผลการทดสอบของการใช้ตัวรวมรังสีอาทิตย์แบบ ACPC ร่วมกับชุดทดสอบที่มีแผ่นดูดกลืนรังสีอาทิตย์เคลือบ TiO_2 มีค่าประสิทธิภาพทางความร้อนสูงกว่าชุดทดสอบที่มีแผ่นดูดกลืนรังสีอาทิตย์เคลือบสีดำด้านเป็นชุดควบคุม มีค่าเท่ากับ 47.38 และ 40.98 ตามลำดับ โดยอุณหภูมิน้ำที่ได้จากตัวรวมรังสีอาทิตย์แบบ ACPC ร่วมกับแผ่นดูดกลืนรังสีอาทิตย์เคลือบ TiO_2 มีค่าสูงกว่า ชุดทดสอบที่มีแผ่นดูดกลืนรังสีอาทิตย์เคลือบสีดำด้าน ณ เวลา 13.33 น. อุณหภูมิน้ำมีค่าสูงสุดเท่ากับ 52.3 ^{O}C มีค่าความเข้มรังสีอาทิตย์ 975.6 W/m^2 และ มีค่าสูงสุดเท่ากับ 44.8 ^{O}C มีค่าความเข้มรังสีอาทิตย์ 997.71 W/m^2 ณ เวลา 13.03 น. ตามลำดับ ดังนั้น ความแตกต่างของอุณหภูมิน้ำของชุดทดสอบที่มีแผ่นดูดกลืนรังสีอาทิตย์เคลือบ TiO_2 และชุดควบคุม เท่ากับ 1.0-7.5 ^{O}C

ในกรณีของการทดสอบการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียในน้ำเสีย พบว่า การทดลองที่ใช้ตัวรวมรังสีอาทิตย์แบบ ACPC ร่วมกับแผ่นดูดกลืนรังสีอาทิตย์เคลือบ TiO_2 มีประสิทธิภาพสามารถลดจำนวนของเชื้อแบคทีเรียในน้ำเสียได้จากเริ่มต้น 1.70×10^6 CFU/ml หลังผ่านกระบวนการเป็น 3.4×10^5 CFU/ml เมื่ออุณหภูมิแผ่นดูดกลืนรังสีอาทิตย์ที่เคลือบด้วย TiO_2 และอุณหภูมิน้ำเสีย เท่ากับ 48.66 ^{O}C และ 46.25 ^{O}C ตามลำดับ และค่าความเข้มรังสีอาทิตย์เฉลี่ยเท่ากับ 659.38 W/m^2 ซึ่งลดลงมากถึง 5 เท่าของการทดสอบที่ใช้ตัวรวมรังสีอาทิตย์แบบ ACPC ร่วมกับแผ่นดูดกลืนรังสีอาทิตย์ที่เคลือบสีดำด้านเป็นชุดควบคุม ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เพื่อใช้ทำนายการถ่ายโอนความร้อนของน้ำในระบบทำน้ำร้อน ซึ่งผลของการศึกษาพบว่า ผลของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เมื่อเทียบกับการทดลองมีความสอดคล้องกัน โดยความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยของอุณหภูมิน้ำที่ใช้แผ่นดูดกลืนรังสีอาทิตย์เคลือบสีดำเป็นชุดควบคุม มีค่าความคลาดเคลื่อนสูงสุด 2.5% และอุณหภูมิน้ำที่ใช้แผ่นดูดกลืนรังสีอาทิตย์เคลือบ TiO_2 มีค่าความคลาดเคลื่อนสูงสุด 3.3% และเมื่อนำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ศึกษาต่อเพื่อทำนายอุณหภูมิน้ำเมื่อมีการเพิ่มพื้นที่ขนาดของอุปกรณ์ต่างๆ ของระบบ พบว่า สามารถทำอุณหภูมิน้ำได้สูงสุดเมื่อใช้ชุดทดสอบที่มีแผ่นดูดกลืนรังสีอาทิตย์เคลือบ TiO_2 เท่ากับ 50.6 ^{O}C มีค่าความเข้มรังสีอาทิตย์ 929.4 W/m^2 ณ เวลา 12.03 น. และอุณหภูมิน้ำสูงสุดเมื่อใช้ชุดทดสอบที่มีแผ่นดูดกลืนรังสีอาทิตย์เคลือบสีดำด้านเป็นชุดควบคุม เท่ากับ 54 ^{O}C มีค่าความเข้มรังสีอาทิตย์ 1000 W/m^2 ณ เวลา 12.33 น. รวมทั้งแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่นำมาใช้ในการทำนายอุณหภูมิน้ำของระบบทำน้ำร้อนในแต่ละเดือนตลอดทั้งปี พบว่า เดือนที่สามารถทำอุณหภูมิน้ำให้ได้สูงที่สุด คือ เมษายน โดยอุณหภูมิน้ำของชุดทดสอบที่มีแผ่นดูดกลืนรังสีอาทิตย์เคลือบสีดำด้านเป็นชุดควบคุม และชุดทดสอบที่มีแผ่นดูดกลืนรังสีอาทิตย์เคลือบ TiO_2 มีค่าเท่ากับ 50.73 ^{O}C และ 50.72 ^{O}C ตามลำดับ และมีค่ารังสีอาทิตย์เฉลี่ยเท่ากับ 902 W/m^2

คำสำคัญ: การยับยั้งเชื้อแบคทีเรียในน้ำเสีย/ตัวรวมรังสีอาทิตย์รูปประกอบพาราโบลาไม่สมมาตร/ไททาเนียมไดออกไซด์/ประสิทธิภาพตัวรวมรังสีอาทิตย์

Thesis Title	Inhibit Bacteria in Wastewater with Solar Water Heating System, which Use Titanium Dioxide as Coating Materials for Absorbers
Thesis Credits	12
Candidate	Miss Physics Udomsup
Thesis Advisors	Assoc. Prof. Dr. Sirichai Thepa
	Asst. Prof. Dr. Jirasak Kongkiattikajorn
Program	Master of Science
Field of Study	Energy Technology
Department	Energy Technology
Faculty	School of Energy, Environment and Materials
B.E.	2555

Abstract

This research aims to study thermal efficiency of Asymmetry Compound Parabolic Concentrator (ACPC), which obtained heat from solar radiation to increase water temperature and using ACPC with titanium dioxide (TiO_2) as a catalyst in photocatalysis for inhibiting bacterial in waste water. The larger area of ACPC was 0.30x0.58 m^2, which was placed to orientate on south and the smaller area of it was 0.3x0.3 m^2, which was placed to orientate north. The back of both plate were covered by insulation and using 0.22X0.25 m^2 stainless steel plate with a thickness of 3 mm, which was coated with TiO_2 with a thickness of 250 nm as an absorber plate. It was placed on bottom of acrylic box, which its area was 0.24x0.27 m^2 with a thickness of 0.5 mm and was contained 4.93 L of waste water. There are 2 ACPC systems were studies in this research. The result found that water temperature of ACPC system with coated TiO_2 on stainless steel were 47.38°C and 40.98°C, respectively and was higher value than ACPC control system (ACPC system with coated flat black on stainless steel). The highest water temperature was obtained from the ACPC system with coated TiO_2 on stainless steel was 52.3°C at solar radiation was 975.6 W/m^2 on 01:33 P.M. and for the ACPC control system with was 44.8°C at solar radiation was 997.71 W/m^2 on 01:03 P.M. So, the water temperature of the ACPC system with coated TiO_2 on stainless steel was higher than the ACPC control system as 1-7.5°C. For testing of inhibiting bacterial in waste water found that using the ACPC system with coated TiO_2 on stainless steel could reduce amount of bacterial in waste water from 1.70 x 10^6 CFU/ml to be 3.4 x 10^5 CFU/ml when the absorber temperature and the water

temperature were 48.66°C and 46.25 °C, respectively at average solar radiation was 659.38 W/m^2. The reduction of bacterial from the ACPC system with coated TiO_2 on stainless steel was 5 times of the ACPC control system. In addition to this research studied mathematical model for predicting heat transfer of water in hot water system. The result found that comparing data obtained from experiment and mathematical model was consistent. The highest average error of water temperature obtained from the ACPC control system and the ACPC system with coated TiO_2 on stainless steel were 2.5% and 3.3%, respectively. When increasing scale of equipments in this system, water temperature was studies and predicted by mathematical model. The result found that the highest water temperature was 50.6°C at solar radiation was 929.4 W/m^2 on 12:03 P.M. for the ACPC system with coated TiO_2 on stainless steel and was 54°C at solar radiation was 1000 W/m^2 on 12:33 P.M. for the ACPC control system. For predicting water temperature in each month a year found that the month could produce the highest water temperature was March. So, the water temperature of the ACPC control system and the ACPC system with coated TiO_2 on stainless steel were 50.73°C and 50.72°C, respectively at average solar radiation was 902 W/m^2

Keywords: Inhibiting of bacterial in waste water/Asymmetry Compound Parabolic Concentrator/ Titanium dioxide/Efficiency of ACPC

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี โดยได้รับความอนุเคราะห์สนับสนุนช่วยเหลือ การให้คำปรึกษาแนะนำ และการตัดสินใจหลายๆ เรื่อง รวมทั้งให้ข้อคิดเห็น ตลอดจนการแก้ไขปัญหาต่างๆ ในการดำเนินการ อันเป็นประโยชน์ต่อการทำงานวิจัยในครั้งนี้ ซึ่งวิทยานิพนธ์จะไม่สามารถสำเร็จได้หากไม่มีบุคคลต่อไปนี้

ผู้เขียนวิทยานิพนธ์ขอขอบพระคุณอย่างสูง ดร.ศรชล โยริยะ ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รศ. ดร.ศิริชัย เทพา และ ผศ. ดร.จิรศักดิ์ คงเกียรติขจร อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ผศ. ดร.ศศิธร พุทธวงษ์ และ ดร.รุ่งโรจน์ สงค์ประกอบ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ให้คำปรึกษาด้านการเรียบเรียงข้อความและรูปแบบของการพิมพ์วิทยานิพนธ์ และเจ้าหน้าที่ธุรการคณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ ที่ให้คำปรึกษาและช่วยเหลือหลายๆ ด้าน รวมทั้งเจ้าหน้าที่สายวิชาเทคโนโลยีพลังงานและเจ้าหน้าที่อาคารและยานพาหนะ ซึ่งให้ความอำนวยสะดวกในเรื่องเครื่องมืออุปกรณ์ และสถานที่ในการจัดทำวิทยานิพนธ์

สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณครอบครัว อุดมทรัพย์ และผู้มีพระคุณทุกท่าน รวมทั้งพี่ๆ และเพื่อนๆ ในสายวิชาเทคโนโลยีพลังงาน และห้องแลบแสงอาทิตย์ในทางเกษตรกรรม ที่ให้การช่วยเหลือและคอยให้กำลังใจเสมอมาในการทำวิทยานิพนธ์นี้ รวมทั้งขอขอบคุณตัวเองที่มีความมานะ ขยัน อดทน และพยายามทำงานวิจัยนี้จนสำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี

ประโยชน์อันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ย่อมเป็นผลจากความกรุณาของทุกท่านดังกล่าวมาข้างต้น จึงใคร่ขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ง
กิตติกรรมประกาศ ฉ
สารบัญ ช
รายการตาราง ฌ
รายการรูปประกอบ ฎ
รายการสัญลักษณ์และคำย่อ ฒ

บทที่

1. บทนำ **1**
1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย 1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย 3
1.3 ขอบเขตงานวิจัย 3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ 3

2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง **4**
2.1 จุลินทรีย์ 4
2.2 สภาพแวดล้อมที่มีผลต่อจุลินทรีย์ในแหล่งน้ำ 10
2.3 น้ำเสีย 13
2.4 ประเภทน้ำเสีย 16
2.5 ลักษณะน้ำเสียจากแหล่งชุมชน 17
2.6 กระบวนการโฟโตคะตะไลซีส 19
2.7 ไททาเนียมไดออกไซด์ 21
2.8 กระบวนการโฟโตคะตะไลติกไททาเนียมไดออกไซด์ 24
2.9 การพ่นเคลือบด้วยด้วยเปลวความร้อน 25
2.10 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการศึกษาการถ่ายโอนอุณหภูมิในน้ำ 27
2.11 แผงรับรังสีอาทิตย์แบบรูปประกอบพาราโบลา 32
2.12 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 45

หน้า

3. วิธีการดำเนินงานวิจัย **51**

3.1 ขั้นตอนการวิจัย 53

3.2 ระบบยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์ในน้ำเสีย 53

3.3 การทดสอบและเก็บผลทดสอบของระบบยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์ในน้ำเสีย 67

3.4 การทดสอบยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์ในน้ำเสีย โดยใช้ตัวรับรังสีอาทิตย์แบบไม่สมมาตรร่วมกับแผ่นดูดกลืนรังสีอาทิตย์เคลือบไททาเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) 69

3.5 การศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ 74

3.6 การนำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มาพิจารณาศึกษาต่อ 83

4. ผลการทดลองและวิจารณ์ **85**

4.1 การทดสอบประสิทธิภาพทางความร้อน 85

4.2 การทดสอบยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรียในน้ำเสีย 89

4.3 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ 92

5. สรุปผลและข้อเสนอแนะ **101**

5.1 สรุปผล 101

5.2 ข้อเสนอแนะ 103

เอกสารอ้างอิง **104**

ภาคผนวก

ก ขนาดโครงเหล็กสำหรับตัวรวมรังสีรูปประกอบพาราโบลา **110**

ข ตัวอย่างการคำนวณประสิทธิภาพตัวรวมรังสีแบบ ACPC อุณหภูมิน้ำ 112

ค ผลการทดสอบและผลการทำนายอุณหภูมิน้ำ 139

ง ผลงานวิจัยที่ได้รับการเผยแพร่ 152

ประวัติผู้วิจัย **159**

รายการตาราง

ตาราง		หน้า
2.1	ช่วงอุณหภูมิในการเจริญเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์	10
2.2	ประโยชน์ของข้อมูลค่าปริมาณของแข็งที่มีต่อการบำบัดน้ำเสีย	14
2.3	การเปรียบเทียบลักษณะสมบัติของไททาเนียมไดออกไซด์ระหว่างรูไทล์และอนาเทส	23
2.4	ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของรังสีรวมรายชั่วโมงเฉลี่ยรายเดือนและ รังสีรวมรายวันเฉลี่ยรายเดือน	29
2.5	อุณหภูมิเฉลี่ยสูงสุดและต่ำสุดของอากาศแวดล้อมในประเทศไทยในแต่ละช่วงเดือน	30
2.6	ความสัมพันธ์ของความสูง (H) ความยาวโฟกัส (f) ครึ่งมุมรับรังสี (θ_c) และเส้นรอบรูปของเป้ารับรังสี (เฉพาะด้านที่รับรังสี, a) ของ CPC	38
3.1	แสดงพารามิเตอร์ที่ใช้ในการเคลือบไททาเนียมไดออกไซด์ ด้วยเทคนิคการเคลือบแบบการพ่นเคลือบด้วยเปลวความร้อน (Thermal Spray)	61
3.2	วันที่แนะนำสำหรับแต่ละเดือนที่มีค่ารังสีอาทิตย์ใกล้เคียงกับค่ารังอาทิตย์เฉลี่ยของเดือนนั้นๆ และค่าวันที่ ของปี	84
4.1	เปอร์เซ็นต์การลดลงของเชื้อแบคทีเรียในน้ำเสีย	91
ข.1	ตารางค่ารังสีอาทิตย์รายชั่วโมง 12 เดือน ปี ค.ศ. 2010	128
ค.1	ผลของการทดสอบอุณหภูมิน้ำและประสิทธิภาพตัวรับรังสีอาทิตย์ ACPC เฉลี่ยรายครึ่งชั่วโมง (แผ่นดูดกลืนรังสีอาทิตย์ที่เคลือบสีดำด้านเป็นชุมควบคุม)	140
ค.2	ผลของการทดสอบอุณหภูมิน้ำและประสิทธิภาพตัวรับรังสีอาทิตย์ ACPC เฉลี่ยรายครึ่งชั่วโมง(แผ่นดูดกลืนรังสีอาทิตย์ที่เคลือบ TiO_2)	141
ค.3	ผลของการทำนายอุณหภูมิน้ำ รายชั่วโมง (แผ่นดูดกลืนรังสีอาทิตย์ที่เคลือบสีดำด้านเป็นชุดควบคุม)	142
ค.4	ผลของการทำนายอุณหภูมิน้ำ รายชั่วโมง (แผ่นดูดกลืนรังสีอาทิตย์ที่เคลือบ TiO_2)	143
ค.5	ผลของการทำนายอุณหภูมิน้ำ เมื่อปรับเปลี่ยนขนาดพื้นที่ (แผ่นดูดกลืนรังสีอาทิตย์ที่เคลือบสีดำด้านเป็นชุดควบคุม)	144
ค.6	ผลของการทำนายอุณหภูมิน้ำ เมื่อปรับเปลี่ยนขนาดพื้นที่ (แผ่นดูดกลืนรังสีอาทิตย์ที่เคลือบ TiO_2)	145

ตาราง (ต่อ) **หน้า**

ค.7 ผลของการทำนายอุณหภูมิน้ำ ในแต่ละเดือนตลอดทั้งปี (แผ่นดูดกลืนรังสีอาทิตย์ที่เคลือบสีดำด้านเป็นชุดควบคุม) 146

ค.8 ผลของการทำนายอุณหภูมิน้ำ ในแต่ละเดือนตลอดทั้งปี (แผ่นดูดกลืนรังสีอาทิตย์ที่เคลือบสีดำด้านเป็นชุดควบคุม) (ต่อ) 147

ค.9 ผลของการทำนายอุณหภูมิน้ำ ในแต่ละเดือนตลอดทั้งปี (แผนดูดกลืนรังสีอาทิตย์ที่เคลือบสีดำด้าน) 148

ค.10 ผลของการทำนายอุณหภูมิน้ำ ในแต่ละเดือนตลอดทั้งปี (แผ่นดูดกลืนรังสีอาทิตย์ที่เคลือบ TiO_2) 149

ค.11 ผลของการยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์ในน้ำเสีย ของระบบที่ใช้ตัวรับรังสีอาทิตย์ ACPC ร่วมกับแผ่นดูดกลืนรังสีอาทิตย์เคลือบ TiO_2 และเคลือบสีดำด้านเป็นชุดควบคุม 150

รายการรูปประกอบ

รูป **หน้า**

2.1	โครงสร้างและองค์ประกอบของผนังเซลล์แบคทีเรียแกรมบวก	5
2.2	ระยะการเจริญเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์	6
2.3	(ก) การแบ่งเซลล์ของ Esherichia coli แบบ Binary fission (ข) การแบ่งเซลล์จากกล้องจุลทรรศน์	6
2.4	กระบวนการโฟโตคะตะไลซีสบนอนุภาคตัวเร่งปฏิกิริยา	20
2.5	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าช่องพลังงานกับสารกึ่งตัวนำชนิดต่างๆ	20
2.6	โครงสร้างโมเลกุลของไททาเนียมชนิดผลึกรูไทล์และอนาเทส	23
2.7	ก) กระบวนการพ่นพอกด้วยเปลวความร้อน ข) ไดอะแกรมของ Thermal Spray Metal Coating	26
2.8	ตำแหน่งต่างๆ บนท้องฟ้า	31
2.9	รูปร่างลักษณะของ CPC ขั้นฐาน	33
2.10	ส่วนประกอบของ CPC	34
2.11	การสะท้อนรังสีอาทิตย์ของรูปประกอบพาราโบลา	34
2.12	การสะท้อนรังสีอาทิตย์เข้าเป้าของรูปประกอบพาราโบลา	35
2.13	ชนิดและส่วนประกอบของ CPC แต่ละแบบ	37
2.14	อัตราส่วนความสูงต่อหน้าตัดรับรังสี (H/A) ของ CPC แบบเต็ม และแบบที่ถูกตัดบางส่วน	40
2.15	อัตราส่วนของผิวสะท้อนรังสีต่อพื้นที่หน้าตัดแผงรับรังสีของ CPC แบบเต็ม และแบบที่ถูกตัดบางส่วน	40
2.16	ความสัมพันธ์ของมุมต่างๆ บนพื้นราบและระนาบเอียง	41
2.17	ค่ามุม γ_S การเอียงมุมของ CPC เป็น β ที่จะสามารถให้รังสีตก ทำมุม $(\beta-\theta_C)$ และ $(\beta+\theta_C)$ จากเส้นตั้งฉากกับพื้นราบ (zenith)	42
2.18	รังสี Gb_n ทำมุมกับเส้นตั้งฉากของพื้นราบ (θ_Z) และของพื้นเอียง (θ) ตามลำดับ	43
2.19	อุปกรณ์การทดสอบและผลการทดสอบของ Sichel และคณะ	45
3.1	ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย	52
3.2	ตำแหน่งของรังสีอาทิตย์ที่ตกกระทบบน CPC ตลอดปี	5
3.3	ส่วนประกอบของ CPC โดยมีเป้ารับรังสีเป็นแบบแผ่นราบ	57

รูป (ต่อ) **หน้า**

3.4	อัตราส่วนความสูงต่อพื้นที่หน้าตัดรับรังสี (H/A) ของ CPC แบบเต็มและแบบถูกตัดบางส่วน	57
3.5	หมุน CPC เป้าหาแสงทำมุม ϕ กับแนวระดับ	58
3.6	ทางเดินทำมุม θ_c กับแนวแกน CPC แผงใหญ่	58
3.7	ตัวรวมรังสีรูปประกอบพาราโบลาแบบไม่สมมาตร	59
3.8	ทางเดินของรังสีที่สะท้อนตัวรวมรังสีอาทิตย์	59
3.9	ตัวโครงของตัวรับรังสีอาทิตย์แบบไม่สมมาตร (ACPC)	60
3.10	(ก) สเตนเลสเมื่อทำความสะอาดด้วยทินเนอร์สเปรย์	61
	(ข) สเตนเลสหลังจากเข้าห้องยิงทรายเพื่อให้ผิวหน้าหยาบก่อนเคลือบ	61
	(ค) ผง TiO_2 ที่ใช้เคลือบ จากห้องปฏิบัติการThermal Spray MTEC	61
3.11	(ก) ยึดติดชิ้นงานเข้ากับฐานและ (ข) ติดตั้งเป้าพลาสมา ห่าง 3.5 in (8.89 cm)	62
3.12	(ก) กล่องอะคริลิก และ (ข) หลอดแก้วฝาเกลียว	63
3.13	ขวดแก้วเก็บตัวอย่างน้ำเสีย	63
3.14	แผ่นดูดกลืนรังสีและแผ่นตัวทำปฏิกิริยา	64
3.15	สายเทอร์โมคัปเปิล ชนิด K	64
3.16	เครื่องบันทึกข้อมูลอัตโนมัติ	65
3.17	เครื่องวัดรังสีอาทิตย์แบบรวมรังสีอาทิตย์	65
3.18	อาหารเลี้ยงเชื้อจุลินทรีย์	66
3.19	ตู้บ่มเพาะเชื้อ	66
3.20	เครื่องนึ่งฆ่าเชื้อ (Autoclave)	67
3.21	ตู้ Laminar Flow Cabinets	67
3.22	เทคนิคการเลี้ยงเชื้อจุลินทรีย์แบบ Spread Plate Technique	71
3.23	ลำดับการคำนวณประสิทธิภาพของ ACPC	77
3.24	สมดุลพลังงานบริเวณผิวอะคริลิก	79
3.25	สมดุลพลังงานบริเวณผิวระเหย	81
3.26	สมดุลพลังงานบริเวณผิวระเหย	82

รูป (ต่อ) **หน้า**

4.1 การเปรียบเทียบผลของประสิทธิภาพทางความร้อนเฉลี่ยทั้งวัน จากตัวรวมรังสีอาทิตย์ แบบ ACPCร่วมกับแผ่นดูดกลืนรังสีอาทิตย์เคลือบ TiO_2 และเคลือบสีดำด้าน เป็นชุดควบคุม (Control) (วันที่ทำการทดสอบ 23 พฤศจิกายน พ.ศ. 2555) 86

4.2 การเปรียบเทียบผลของอุณหภูมิน้ำในระบบรายชั่วโมง จากตัวรวมรังสีอาทิตย์ แบบ ACPC ร่วมกับแผ่นดูดกลืนรังสีอาทิตย์เคลือบ TiO_2 และเคลือบสีดำด้าน เป็นชุดควบคุม (Control) (วันที่ทำการทดสอบ 23 พฤศจิกายน พ.ศ. 2555) 88

4.3 การเปรียบเทียบผลของค่า COD ต่อระยะเวลาทำการทดสอบและ ค่าความเข้มรังสีอาทิตย์ โดยใช้ตัวรวมรังสีอาทิตย์แบบ ACPC ร่วมกับ แผ่นดูดกลืนรังสีอาทิตย์เคลือบ TiO_2 และเคลือบสีดำด้านเป็นชุดควบคุม (Control) (วันที่ทำการทดลอง 23/11/2555) 90

4.4 ความสัมพันธ์ของจำนวนเชื้อจุลินทรีย์ที่ลดลงต่อระยะเวลา และอุณหภูมิน้ำเสีย 92

4.5 ความสัมพันธ์จำนวนเชื้อจุลินทรีย์ที่ลดลงต่อระยะเวลา และอุณหภูมิแผ่นดูดกลืนรังสีอาทิตย์ 92

4.6 การเปรียบเทียบผลของอุณหภูมิน้ำในระบบทำน้ำร้อน จากการทดสอบและ แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยใช้ตัวรวมรังสีอาทิตย์แบบ ACPC ร่วมกับ แผ่นดูดกลืนรังสีอาทิตย์เคลือบสีดำด้านเป็นชุดควบคุม (Control) (วันที่ทำการทดสอบ 23 พฤศจิกายน พ.ศ. 2555) 95

4.7 การเปรียบเทียบผลของความถูกต้อง จากการการทดสอบและการคำนวณ ของอุณหภูมิน้ำในระบบทำน้ำร้อน โดยใช้ตัวรับรังสีอาทิตย์แบบ ACPC ร่วมกับแผ่นดูดกลืนรังสีอาทิตย์เคลือบสีดำด้านเป็นชุดควบคุม (Control) (วันที่ทำการทดสอบ 23 พฤศจิกายน พ.ศ. 2555) 95

4.8 การเปรียบเทียบผลของอุณหภูมิน้ำในระบบทำน้ำร้อน จากการทดสอบและ แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยใช้ตัวรับรังสีอาทิตย์แบบ ACPC ร่วมกับ แผ่นดูดกลืนรังสีอาทิตย์เคลือบ TiO_2 (วันที่ทำการทดสอบ 23 พฤศจิกายน พ.ศ. 2555) 97

4.9 การเปรียบเทียบผลของความถูกต้อง จากการการทดสอบและการคำนวณ ของอุณหภูมิน้ำในระบบทำน้ำร้อน โดยใช้ตัวรับรังสีอาทิตย์แบบ ACPC ร่วมกับแผ่นดูดกลืนรังสีอาทิตย์เคลือบ TiO_2 (วันที่ทำการทดสอบ 23 พฤศจิกายน พ.ศ. 2555) 97

รูป (ต่อ) **หน้า**

4.10 การเปรียบเทียบผลของอุณหภูมิน้ำในระบบทำน้ำร้อน เมื่อเพิ่มขนาดแผ่นดูดกลืนรังสีอาทิตย์ ($T_{w,new}$) (2x1.5 m^2) จากขนาดแผ่นดูดกลืนรังสีอาทิตย์เดิม ($T_{w,old}$) (0.22x0.25 m^2) ของชุดทดสอบแผ่นดูดกลืนรังสีอาทิตย์เคลือบสีดำด้านเป็นชุดควบคุม (Control) (วันที่ทำการทดสอบ 23 พฤศจิกายน พ.ศ. 2555) 97

4.11 การเปรียบเทียบผลของอุณหภูมิน้ำในระบบทำน้ำร้อน เมื่อเพิ่มขนาดแผ่นดูดกลืนรังสีอาทิตย์ ($T_{w,new}$) (2x1.5 m^2) จากขนาดแผ่นดูดกลืนรังสีอาทิตย์เดิม ($T_{w,old}$) (0.22x0.25 m^2) ของชุดทดสอบแผ่นดูดกลืนรังสีอาทิตย์เคลือบ TiO_2 (วันที่ทำการทดสอบ 23 พฤศจิกายน พ.ศ. 2555) 99

4.12 การเปรียบเทียบผลของการทำนายอุณหภูมิน้ำเฉลี่ยในแต่ละเดือนตลอดทั้งปี โดยมีแผ่นดูดกลืนรังสีอาทิตย์เคลือบ TiO_2 (0.22x0.25 m^2) และเคลือบสีดำด้านเป็นชุดควบคุม (Control) (0.22x0.25 m^2) 100

ก1 ขนาดโครงเหล็กตัวรับรังสีอาทิตย์แบบ ACPC 111

ก2 ขนาดของฐานวางกล่องบรรจุน้ำเสีย 111

ก3 ขนาดของกล่องอะคริลิกบรรจุน้ำเสีย 111

ค1 ตำแหน่งติดตั้งสาย Thermocouples 151

รายการสัญลักษณ์และคำย่อ

A_b	=	พื้นที่กล่องอะคริลิก (m^2)
A_c	=	พื้นที่รับรังสี (Aperture area) (m^2)
A_R	=	พื้นที่ของเป้ารับรังสี (Receiver area) (m^2)
A_w	=	พื้นที่ผิวของน้ำในกล่องอะคริลิกบรรจุน้ำ (m^2)
ACPC	=	Asysmrtric Compound Parabolic Concentrator
CPC	=	Compound Parabolic Concentrator
$C_{P,w}$	=	ความร้อนจำเพาะของน้ำ (J/kg ^{O}C)
$C_{p,c}$	=	ค่าความจุความร้อนของ Acrylic (1466 J/kg ^{O}C)
$C_{P,stanless}$	=	ค่าความจุความร้อนของ Stand less (480 J/kg^{O}C)
CR	=	อัตราส่วนรวมรังสี
g	=	ความเร่งเนื่องจากแรงดึงดูดของโลก (9.81 m/s^2)
Gb	=	ปริมาณรังสีตรงที่ตกตั้งฉากบนพื้นราบ (W/m^2)
Gb_n	=	ปริมาณรังสีตรง (W/m^2)
Gb_T	=	ปริมาณรังสีตรงที่ตกตั้งฉากบนพื้นเอียง (W/m^2)
Gr	=	เลขกราสโฮฟ (Grashof number)
G_{sc}	=	ค่าคงตัวรังสีอาทิตย์ (1,367 W/m^2)
h_{cw}	=	สัมประสิทธิ์การพาความร้อนจากน้ำสู่อากาศแวดล้อม ($W/m^{2\,O}C$)
h_{ct}	=	สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนของลมที่มีระยะระหว่างแผ่นราบไม่เกิน 0.5 m
h_{ew}	=	สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนของการระเหยของน้ำ ($W/m^{2\,O}C$)
h_{cb}	=	สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนระหว่างอะคริลิกกับน้ำ ($W/m^{2\,O}C$)
h_{rb}	=	สัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อนที่ด้านล่างกล่องอะคริลิก ($W/m^{2\,O}C$)
$\overline{H}$	=	ค่าเฉลี่ยรายเดือนของค่ารายวันของรังสีรวมบนพื้นราบในแนวระดับ (MJ/m^2day)
$\overline{H}_0$	=	ค่าเฉลี่ยรายเดือนของค่ารายวันของรังสีอาทิตย์ในแนวระดับเหนือบรรยากาศ (MJ/m^2day)
H_t	=	รังสีรวมรายวัน (MJ/m^2day)
I_b	=	ปริมาณรังสีตรงที่ตกตั้งฉากบนพื้นราบ (W/m^2)
I_d	=	ปริมาณรังสีกระจายที่ตกตั้งฉากบนพื้นราบ (W/m^2)
I_{dT}	=	ปริมาณรังสีกระจายที่ตกตั้งฉากบนพื้นเอียง (W/m^2)

I_t	=	ความเข้มของปริมาณรังสีอาทิตย์ (W/m^2)
k	=	สภาพนำความร้อน (W/mK)
k_i	=	ค่าสภาพการนำความร้อนของอะคริลิค
L_i	=	ความหนาของแผ่นอะคริลิก (m)
L_s	=	ความยาวของแผ่นสแตนเลส (m)
m_w	=	มวลของน้ำในระบบทำน้ำร้อน (kg)
$\overline{N}$	=	ค่าเฉลี่ยรายเดือนของค่ารายวันของความยาวนานของวัน
P_w	=	ความดันไออิ่มตัวที่ผิวน้ำ (^OC)
P_b	=	ความดันไออิ่มตัวที่ผิวอะคริลิก (^OC)
$\dot{Q}_e$	=	อัตราการถ่ายโอนความร้อนจากผิวน้ำไปสู่ผิวอะคริลิกโดยการระเหย (W)
$\dot{Q}_c$	=	อัตราการถ่ายโอนความร้อนจากผิวน้ำไปสู่ผิวอะคริลิกโดยการพาความร้อน (W)
$\dot{Q}_r$	=	อัตราการถ่ายโอนความร้อนจากผิวน้ำไปสู่ผิวอะคริลิกโดยการแผ่รังสีความร้อน (W)
$\dot{Q}_s$	=	อัตราการสูญเสียความร้อนที่ด้านล่างและด้านข้างของกล่องอะคริลิก (W)
$\dot{Q}_{air}$	=	ความร้อนสะสมของอากาศในกล่องอะคริลิกบรรจุ (W)
R_b	=	อัตราส่วนของปริมาณรังสีตรงบนระนาบเอียงต่อปริมาณรังสีบนพื้นราบ
$\overline{S}$	=	ค่าเฉลี่ยรายเดือนของค่ารายวันของชั่วโมงที่มีแดด
T_a	=	อุณหภูมิอากาศแวดล้อม (^OC)
T_b	=	อุณหภูมิอะคริลิก (^OC)
T_{steel}	=	อุณหภูมิแผงสะท้อนรังสีแผงใหญ่ (^OC)
T_{sky}	=	อุณหภูมิท้องฟ้า (K = $0.0552\,T_a^{1.5}$)
T_w	=	อุณหภูมิน้ำ (^OC)
t	=	เวลา (s)
U	=	สัมประสิทธิ์การสูญเสียความร้อนด้านข้างและด้านล่าง ($W/m^{2\,O}C$)
U_b	=	สัมประสิทธิ์การพาและการแผ่รังสีความร้อนด้านหลังแผง = $h_{cb} + h_{rb}$
U_t	=	สัมประสิทธิ์การพาและการแผ่รังสีความร้อนด้านบนแผง = $h_{ct} + h_{rt}$
v	=	ความเร็วลม (m/s)
β	=	มุมเอียงของแผงรับรังสี (Slope)
β'	=	สัมประสิทธิ์การขยายตัวเชิงปริมาตร (K^{-1})
ε_{steel}	=	ค่าการแผ่รังสีของแผงสะท้อนรังสี

σ	=	ค่าคงที่สเตฟานต์โบลน์มาน (σ=5.669×10^{-8} W/m^{2}K^4)
ε_w	=	ค่าความสามารถในการแผ่รังสีของน้ำ (0.96)
τ_c	=	ค่าสปส.การส่งผ่านของ Acrylic (0.92)
α_c	=	ค่าการดูดกลืนรังสีของ Acrylic (0.04)
ε_c	=	ค่าความสามารถในการแผ่รังสีของ Acrylic (0.95)
ρ	=	ความหนานแน่นของ Acrylic (0.04 kg/m^3)
k_c	=	ค่าการนำความร้อนของ Acrylic (0.209 W/m ^{O}C)
$\alpha_{\text{standless}} = (\tau\alpha) =$		ผลคูณค่าการส่งผ่านและการดูดกลืนรังสีของ Stand less (0.56)
$\varepsilon_{\text{standless}}$	=	ค่าการแผ่รังสีของ Stand less (0.22)
$\rho_{\text{standless}}$	=	ความหนาแน่นของ Stand less (8055 kg/m^3)
$\delta_{\text{standless}}$	=	ความหนาของ Stand less (0.0762 m)
$C_{p,\text{standless}}$	=	ค่าความจุความร้อนของ Stand less (480 J/kg^{O}C)
$k_{\text{standless}}$	=	ค่าการนำความร้อนของ Stand less (15.1 W/m^{O}C)
ε_w	=	ค่าความสามรถในการแผ่รังสีของน้ำ (0.96)
α_w	=	ค่าสภาพการดูดกลืนของน้ำ
τ_b	=	ค่าการส่งผ่านของกล่องอะคริลิค
ω	=	มุมของเวลา (Hour angle)
ω_s	=	มุมชั่วโมงพระอาทิตย์ขึ้น (องศา)
α	=	มุมอัลติจูด
αb	=	ค่าการดูดรังสีตรงของวัสดุทำเป้ารับรังสี
αd	=	ค่าการดูดรังสีกระจายของวัสดุทำเป้ารับรังสี
γ	=	มุมอะซิมุธของแผงรับรังสี
γ_s	=	มุมอะซิมุธของดวงอาทิตย์
θ	=	มุมตกกระทบบนระนาบกับรังสี
θ_c	=	ครึ่งมุมรับรังสี
θ_r	=	มุมหักเหของแสง
θ_Z	=	มุมซีนีธ
ϕ	=	มุมของเส้นรุ้ง
η_C	=	ประสิทธิภาพของแผงรับรังสีอาทิตย์