



การพัฒนาประสิทธิภาพเชิงความร้อนผิวเลือกรับรังสีอาทิตย์สำหรับ
ผลิตลมร้อนเพื่อส่งเสริมให้เกิดการใช้พลังงานแสงอาทิตย์
สำหรับการอบแห้งอาหารทะเล

โดย
ชานนท์ บุญมีพิพิธ

สนับสนุนงบประมาณโดย
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์
ประจำปีงบประมาณ ๒๕๖๑

DEVELOP THERMAL EFFICIENCY OF HOT AIR SOLAR
SELECTIVE SURFACE TO PROMOTE USED SOLAR
ENERGY FOR SEA-FOOD DRYING

By

CHANON BUNMEPHIPHIT

Granted by

Rajamangala University of Technology Rattanakosin

Fiscal year ปีที่ได้รับทุนสนับสนุน 2017

กิตติกรรมประกาศ

การศึกษาวิจัยเรื่อง การพัฒนาประสิทธิภาพเชิงความร้อนผิวเลือกรับรังสีอาทิตย์สำหรับการผลิตลมร้อน เพื่อส่งเสริมให้เกิดการใช้งานแสงอาทิตย์สำหรับการอบแห้งอาหารทะเล ได้ดำเนินการเสร็จสิ้นโดยสมบูรณ์ คณะผู้วิจัยขอขอบพระคุณการสนับสนุนจากสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ปีงบประมาณ 2559 ภาควิชาฟิสิกส์ และวิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยนครสวรรค์ และศูนย์พลังงานเพื่อสิ่งแวดล้อม อุทยานสิ่งแวดล้อมนานาชาติสิรินธร

ชานนท์ บุญมีพิพิธ
นุชจิรา ดีแจ้
ธวัช สุริวงษ์
สิงหาคม พ.ศ. 2562



บทคัดย่อ

รหัสโครงการ : A-๕/๒๕๖๑

ชื่อโครงการ : การพัฒนาประสิทธิภาพเชิงความร้อนผิวเลือกรับรังสีอาทิตย์สำหรับผลิตลมร้อนเพื่อส่งเสริมให้เกิดการใช้พลังงานแสงอาทิตย์สำหรับการอบแห้งอาหารทะเล

ชื่อนักวิจัย : ดร.ชานนท์ บุญมีพิพิธ ผศ.ดร.นุชจิรา ดีแจ่ม ผศ.ดร.ธวัช สุริวงษ์

งานวิจัยนี้เป็นการประยุกต์ใช้สปีดเพอร์ที่มีขายตามท้องตลาด สีดำลักษณะด้านไม่มีสารเคลือบเงามาเป็นสีสำหรับสร้างผิวเลือกรับรังสีอาทิตย์สำหรับตัวรับรังสีอาทิตย์ผลิตลมร้อน

เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย เป็นกระบวนการพื้นฐานการสร้างผิวเคลือบชนิดการพ่น และทดสอบประสิทธิภาพเชิงความร้อน

ผลการวิจัยพบว่า

1. สีที่มีคุณสมบัติเหมาะสม และมีค่าการซึมซับรังสีอาทิตย์สูงสุดมีค่า 0.98
2. ผิวเคลือบลักษณะขรุขระ ไม่เกิดเงาสสะท้อน ส่งผลต่อการไม่ให้เกิดสะท้อนออกจากผิวเคลือบ
3. ประสิทธิภาพเชิงความร้อนมีค่าเท่ากับ 0.81 และมีค่าผลคูณของแฟกเตอร์การตั้งความร้อนกับสัมประสิทธิ์การสูญเสียความร้อนรวมหรือค่าการสูญเสียความร้อน ($-F_R U_L$) เท่ากับ $-18.38 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$

คำสำคัญ : อบแห้ง ตัวรับรังสีอาทิตย์ ลมร้อน อาหารทะเล

E-mail Address : Chanon.bun@rmutr.ac.th

ระยะเวลาโครงการ : ตุลาคม พ.ศ. 2560 – กันยายน พ.ศ. 2562

Abstract

Code of project : A-๕/๒๕๖๑

Project name : Develop thermal efficiency of hot air solar selective surface to promote used solar energy for sea-food drying

Researcher name : Chanon Bunmephiphit, Phd Assistanr Professor Nuchjira Dejang, Phd
Assistanr Professor Tawat Suriwong, Phd

The objective of this research applying black spray color in local market, it is flat-black color, don't mixing reflection chemical for coating solar selective surface to make up hot-air solar color.

Research mythology was standard process for coating surface by spraying and testing thermal efficiency

The result

1. The solar selective color and solar absorptance was 0.98
2. The surface was roughness, do not reflection solar radiation out of surface
3. The highest thermal efficiency was 0.81 and the term of energy loss ($-F_R U_L$) was 18.38 W/m².°C

Keywords: drying, Solar collector, Hot air, Sea-food

E-mail Address : Chanon.bun@rmutr.ac.th

Period of project : October 2016 – September 2018

คำนำ

การศึกษางานวิจัยครั้งนี้ เป็นการพัฒนาตัวรับรังสีอาทิตย์สำหรับการผลิตลมร้อนเพื่อเสริมประสิทธิภาพการผลิตความร้อนให้กับโรงเรือนอบแห้งแบบพาลาโบลาโดมที่มีอายุการใช้งานมาเป็นระยะเวลานาน และประสิทธิภาพการผลิตความร้อนลดลงและไม่สามารถจะปรับปรุงได้เนื่องด้วยปัจจัยด้านงบประมาณที่จำกัดของผู้ที่ใช้งาน ดังนั้นการเสริมประสิทธิภาพการผลิตความร้อนให้กับตู้อบลักษณะนี้ ผู้วิจัยจึงมีแนวคิดในการนำกระป๋องอลูมิเนียมเคลือบผิวด้วยสีที่มีคุณสมบัติเป็นสีเลือกรับรังสีอาทิตย์ที่เหมาะสม และสามารถจะส่งเสริมให้เกิดการใช้งานอย่างแพร่หลาย ตลอดจนการถ่ายทอดองค์ความรู้ให้กับชุมชนและสังคม โดยเฉพาะชุมชนหรือกลุ่มบุคคลผลิตอาหารทะเลอบแห้ง ที่จะทำให้ผลิตภัณฑ์อบแห้งอาหารทะเลมีคุณภาพที่สูงขึ้น



สารบัญ

หน้า

กิตติกรรมประกาศ	ค
บทคัดย่อ	ง
Abstract	จ
คำนำ	ฉ
สารบัญ	ช
สารบัญรูปภาพ	ฌ
สารบัญตาราง	ญ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญ	1
1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย	1
1.3 ขอบเขตโครงการวิจัย	1
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	3
2.1 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	3
2.1.1 ตัวรับรังสีอาทิตย์ Solar collector	3
2.1.2 สารเคลือบตัวรับรังสีอาทิตย์ Solar selective material	4
2.1.3 หลักการเคลือบผิว Coating method	6
2.1.4 การประเมินประสิทธิภาพทางความร้อน Thermal efficiency	6
2.1.5 การวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์	9
2.2 การทบทวนวรรณกรรม/สารสนเทศ	10
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย	11
3.1 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย	11
3.1.1 การเตรียมผิววัสดุก่อนทำการเคลือบผิว	11
3.1.2 ขั้นตอนการเคลือบผิว	12
3.1.3 ขั้นตอนการประกอบตัวรับรังสีอาทิตย์	13
3.1.4 ขั้นตอนการนำตัวรับรังสีอาทิตย์ไปใช้งาน	14
3.2 ขั้นตอนการทดสอบประสิทธิภาพเชิงความร้อน	14
บทที่ 4 ผลการดำเนินการวิจัย	16
4.1 UV-VIS-IR Spectrophotometer	16
4.2 ผลการวิเคราะห์ทางสัณฐานวิทยา	20
4.3 ผลการทดสอบประสิทธิภาพเชิงความร้อน	21
บทที่ 5 สรุปผล	22

บรรณานุกรม	23
ภาคผนวก	24
ภาคผนวก 1 UV-VIS-IR Spectrophotometer	25
ภาคผนวก 2 ภาพถ่ายสัณฐานวิทยา	55
ภาคผนวก 3 Apparatus and methods of testing	61



สารบัญรูปภาพ

รูปภาพ	หน้า
รูปภาพ 1 Spectral performance of an ideal selective solar absorber [1]	5
รูปภาพ 2 ประสิทธิภาพของตัวเก็บรังสีอาทิตย์	7
รูปภาพ 3 แผนภาพการทดสอบประสิทธิภาพตัวเก็บรังสีอาทิตย์	9
รูปภาพ 4 แสดงการเตรียมผิวชิ้นงาน (การเคลือบผิว)	12
รูปภาพ 5 แสดงลักษณะของแผ่นเลือกเก็บรังสีอาทิตย์	13
รูปภาพ 6 ประสิทธิภาพการซึมซับรังสีอาทิตย์ของสีที่มีคุณสมบัติเป็นสีเลือกเก็บรังสีอาทิตย์แต่ละชนิด	17
รูปภาพ 7 ค่าความเข้มรังสีอาทิตย์ตามมาตรฐาน ASTM G1073 AM 1.5	17
รูปภาพ 8 ผลการวิเคราะห์ Absorptance, Solar absorptance density ร่วมกับค่าความเข้มรังสีอาทิตย์ตามค่ามาตรฐาน ASTM G1073 AM 1.5 ตัวอย่างสี BOSNY 1039	18
รูปภาพ 9 ตัวอย่างสี BOSNY Hi-Temp Spray paint (Black) รหัสสี 1039	19
รูปภาพ 10 ตัวอย่างพื้นผิวที่เคลือบสีด้วย BOSANY Hi-Temp Spray paint (Black) 1039	20
รูปภาพ 11 แสดงลักษณะผิวขรุขระที่มีผลต่อการป้องกันการสะท้อน	20
รูปภาพ 12 ประสิทธิภาพตัวรับรังสีอาทิตย์ผลิตจากร้อนที่เคลือบผิวด้วย BOSANY Hi-Temp Spray paint (Black) 1039	21



สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
ตาราง 1 ข้อกำหนดของสี สำหรับการสร้างผิวเลือกรับรังสีอาทิตย์	12
ตาราง 2 แสดงข้อกำหนดการออกแบบตัวรับรังสีอาทิตย์	13
ตาราง 3 แสดงข้อกำหนดการทดสอบเบื้องต้น	14
ตาราง 4 แสดงผลการวิเคราะห์ค่าการซึมซับรังสีอาทิตย์ (Solar absorptance, α)	16



บทที่ 1 บทนำ

1.1 ความสำคัญ

การพัฒนาตัวรับรังสีอาทิตย์ในปัจจุบันมีการใช้เทคโนโลยี สารเคมี กระบวนการเคลือบผิวเลือกรับรังสีอาทิตย์ วัสดุเลือกรับรังสีอาทิตย์หรือแม้กระทั่งการใช้งานก็มีความซับซ้อนสูงขึ้น เช่น กระบวนการ sputtering coating technique, กระบวนการ anodization coating ซึ่งจะต้องทำในสถานะสุญญากาศ ใช้แรงดันไฟฟ้าหรือความต่างศักย์ที่สูงหรือแม้กระทั่งการใช้สารเคมีที่ฤทธิ์เป็นพิษในกระบวนการเคลือบผิวเลือกรับรังสี โดยปัจจัยดังกล่าวถึงแม้จะเป็นกระบวนการหรือวิธีการในการสร้างตัวรับรังสีอาทิตย์ที่ดี แต่หากเมื่อใดไม่มีการดูแลหรือควบคุมได้อย่างถูกวิธีแล้วเมื่อเกิดการหลุดรอดของสารเคมีสู่สิ่งแวดล้อมโดยไม่มีการบำบัดหรือทำให้ถูกวิธีก็จะส่งผลให้เกิดผลกระทบที่รุนแรง ด้วยกระบวนการที่ซับซ้อน เทคโนโลยีและกระบวนการต่างๆ จึงยังเป็นสิ่งที่ไม่อาจเผยแพร่และส่งเสริมให้เกิดการผลิตและใช้งานได้อย่างกว้างขวาง จึงทำให้ความรู้และเทคนิคต่างๆ จำกัอยู่เฉพาะผู้ประกอบการเท่านั้น ทำให้ตัวรับรังสีอาทิตย์ผลิตความร้อนไม่ถูกใช้งานกันอย่างแพร่หลาย

จากปัญหาและข้อจำกัด งานวิจัยนี้จึงเล็งเห็นความสำคัญของการใช้พลังงานจากรังสีอาทิตย์ จึงได้ศึกษาเพื่อออกแบบตัวรับรังสีอาทิตย์สำหรับผลิตความร้อนโดยใช้วัสดุจากกระป๋องอลูมิเนียมเหลือใช้ ที่เตรียมผิวและเคลือบผิวเลือกรับรังสีอาทิตย์ด้วยกระบวนการสเปรย์ ที่เพิ่มประสิทธิภาพการซึมซับรังสีอาทิตย์ด้วยผง Ni-Al เพื่อผลิตความร้อนเสริมสำหรับตู้อบพลังงานแสงอาทิตย์ โดยกระบวนการที่ศึกษาเป็นกระบวนการและขั้นตอนที่สามารถกระทำได้โดยไม่ต้องใช้เครื่องมือที่ซับซ้อน เพื่อส่งเสริมให้ผู้สนใจสามารถสร้างขึ้นเพื่อใช้งานได้ด้วยตนเองและส่งเสริมให้เกิดการพัฒนาเพื่อการอุตสาหกรรมและสร้างรายได้ โดยจะเผยแพร่องค์ความรู้สู่ชุมชนเป้าหมายประมงชายฝั่ง โดยใช้ศูนย์พลังงานและสิ่งแวดล้อม อุทยานสิ่งแวดล้อมนานาชาติสิรินธรเป็นศูนย์กลางการเผยแพร่

1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย

1.2.1 การศึกษาหลักการทำงานของตัวรับรังสีอาทิตย์แบบทรงกระบอก และกระบวนการเคลือบผิวด้วยเทคนิคสเปรย์

1.2.2 ออกแบบตัวรับรังสีอาทิตย์ที่มีประสิทธิภาพในการถ่ายเทความร้อนและการดูดกลืนรังสีได้ดี มีความเหมาะสมกับเทคนิคการเคลือบผิวด้วยการสเปรย์ และสร้างผิวเคลือบด้วยเทคนิคสเปรย์ และวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน

1.2.3 ทดสอบประสิทธิภาพเชิงความร้อนและวิเคราะห์เชิงเศรษฐศาสตร์ของตัวรับรังสีอาทิตย์

1.2.4 เผยแพร่ข้อมูลงานวิจัยสู่ชุมชน

1.3 ขอบเขตโครงการวิจัย

ออกแบบและสร้างตัวรับรังสีอาทิตย์แบบท่อเพื่อผลิตความร้อนจากกระป๋องอลูมิเนียมที่ใช้งานแล้วขนาด 16 ตารางเมตร เคลือบผิวเลือกรับรังสีอาทิตย์ด้วยสีดำที่เพิ่มประสิทธิภาพการซึมซับรังสีอาทิตย์ด้วย NiAl ด้วยกระบวนการ spray coating และทดสอบประสิทธิภาพเชิงความร้อนตามมาตรฐานสากล พร้อมทั้ง

ทดสอบการใช้งานร่วมกับตู้อบพลังงานแสงอาทิตย์แบบ Greenhouse effect ณ ศูนย์พลังงานเพื่อสิ่งแวดล้อม อุทยานสิ่งแวดล้อมนานาชาติสิรินธร อ.ชะอำ จ.เพชรบุรี และจัดทำอบรมเผยแพร่ข้อมูลกับผู้ที่เกี่ยวข้องเพื่อการใช้งานให้เกิดประสิทธิภาพต่อชุมชนและอุตสาหกรรมต่อไป



บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การบริโภคพลังงานของประเทศไทยมีอัตราเพิ่มขึ้นร้อยละ 60 ของการนำเข้าตั้งแต่ปี พ.ศ. 2554 และส่งผลต่อการนำเข้าในปี พ.ศ. 2555 เพิ่มขึ้นกว่าเดิมอีกร้อยละ 18.4 ทั้งนี้เนื่องมาจากความต้องการพลังงานไฟฟ้ามีอัตราการเพิ่มขึ้นในแต่ละปี

สำหรับประเทศไทย ซึ่งมีศักยภาพความเข้มพลังงานแสงอาทิตย์เฉลี่ยในวันหนึ่งมีค่าสูงถึง 16.9-18.2 MJ/m²/day ดังนั้นจึงเป็นแหล่งพลังงานทางเลือกแรกที่เหมาะสมกับประเทศไทย การประยุกต์ใช้พลังงานจากแสงอาทิตย์เพื่อนำมาใช้ประโยชน์หรือเปลี่ยนเป็นพลังงานรูปแบบอื่นๆ ต้องใช้อุปกรณ์และเทคโนโลยีที่แตกต่างกันออกไป ตัวอย่างเช่น การผลิตน้ำร้อนรูปแบบต่างๆ เช่น ตัวรับรังสีอาทิตย์แผ่นเรียบ ตัวรับรังสีอาทิตย์หลอดแก้วสุญญากาศ หรือเป็นการรวมแสงที่สามารถผลิตน้ำร้อนในอุณหภูมิที่สูงกว่า 100°C เพื่อนำไปใช้ประโยชน์นั้น หรือจะเป็นการทำเออาร์รังสีอาทิตย์มาใช้งานโดยตรงด้วยวิธีการอบแห้ง โดยเฉพาะการอบแห้งในระบบ Greenhouse effect ที่ถูกพัฒนาและส่งเสริมด้วยกรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน ซึ่งใช้วัสดุจำพวกพลาสติกโพลีคาร์บอเนตที่มีจะลดประสิทธิภาพการทำความร้อนเมื่อมีอายุการใช้งานเกิน 5 ปี ดังนั้นการหาแหล่งความร้อนเสริมจึงมีความจำเป็นในการรักษาระดับอุณหภูมิและประสิทธิภาพของตู้อบดังกล่าวให้มีอายุการใช้งานที่ยาวนานขึ้น

การใช้ตัวรับรังสีอาทิตย์ลักษณะทรงกระบอกเพื่อผลิตความร้อนจึงเป็นทางเลือกที่ดีในการรักษาประสิทธิภาพการอบแห้ง โดยใช้กระบวนการเคลือบผิวท่อซีเมนต์ด้วยสารสเปรย์ (spray coating technique) เป็นกระบวนการฉีดพรมของเหลว คล้ายหมอกโดยพุ่งออกไปด้วยแรงดันคงที่ไปเกาะอยู่บนพื้นผิวที่ต้องการ กลายเป็นชั้นฟิล์มบนวัสดุดังกล่าว ซึ่งกระบวนการดังกล่าวสามารถนำไปเคลือบได้กับชิ้นงานที่มีขนาดใหญ่และหลายรูปทรง ซึ่งราคาของอุปกรณ์เคลือบถูกที่สุดกว่าวิธีการเคลือบรูปแบบอื่นๆ จากข้อดีของวิธีการเคลือบด้วยการสเปรย์ จึงมีแนวคิดในการนำมาประยุกต์ในการเคลือบท่อรับรังสีอาทิตย์

2.1.1 ตัวรับรังสีอาทิตย์ Solar collector

ตัวเก็บรังสีอาทิตย์ (Solar collector) มีความสำคัญต่อเทคโนโลยี เกี่ยวกับการนำพลังงานแสงอาทิตย์มาใช้ประโยชน์ในรูปของความร้อน เมื่อตัวเก็บรังสีอาทิตย์รับพลังงานแสงอาทิตย์ที่อยู่ในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อน ให้กับระบบผลิตน้ำร้อนหรืออากาศรังสีอาทิตย์ พลังงานจากรังสีอาทิตย์ถ่ายโอนไปยังของไหลในตัวเก็บรังสีอาทิตย์ ความร้อนที่ได้ส่งผ่านจากรังสีอาทิตย์และนำไปใช้งานตามความต้องการ ตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบท่อสุญญากาศที่ให้ประสิทธิภาพสูงกว่าแบบแผ่นเรียบส่งผลให้มีราคาสูงกว่า ทั้งนี้ เพราะกระบวนการสร้าง ต้องอาศัยเทคโนโลยีสุญญากาศและวัสดุที่มีราคาสูง ในปัจจุบันได้มีการวิจัยเพื่อลดต้นทุนการผลิต ให้สามารถนำตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบท่อสุญญากาศไปใช้ในงานต่างๆ ได้กว้างขวางขึ้น ระบบผลิตอากาศร้อนที่ดีต้องมีประสิทธิภาพสูงสามารถแปลงรังสีอาทิตย์ให้เป็นพลังงานความร้อนและส่งความร้อนนั้นไปใช้งานได้เต็มประสิทธิภาพ ปัจจุบันตัวเก็บรังสีอาทิตย์ในท้องตลาดมีความแตกต่างกันทั้งในด้านคุณภาพ สมรรถนะ การติดตั้ง และราคา

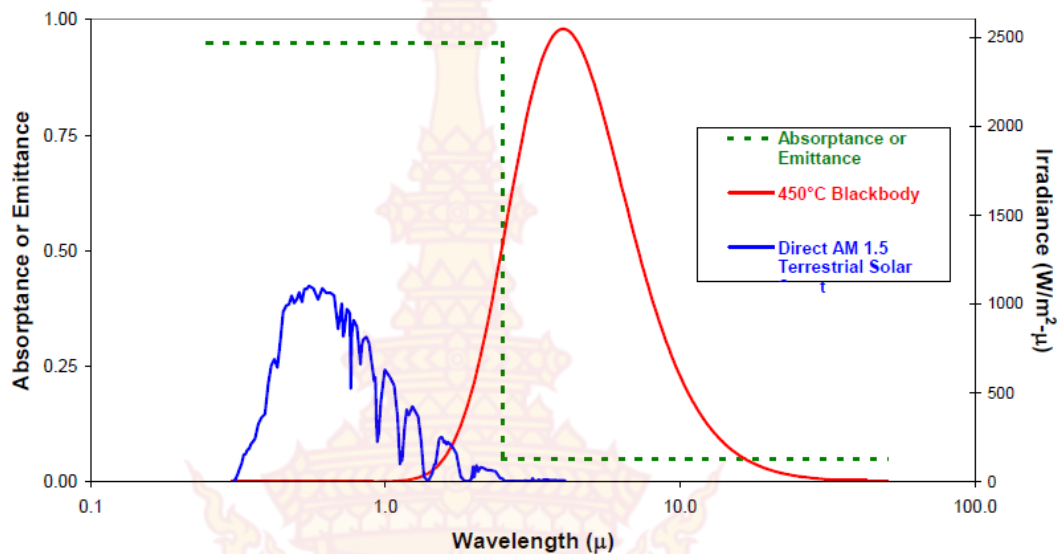
2.1.2 สารเคลือบตัวรับรังสีอาทิตย์ Solar selective material

ดวงอาทิตย์เป็นแหล่งพลังงานที่สำคัญต่อมนุษย์และสิ่งมีชีวิตบนโลกของเรา พลังงานที่แผ่ออกมาจากดวงอาทิตย์อยู่ในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความยาวคลื่นต่างๆ ตั้งแต่รังสีแกมมาไปจนถึงคลื่นวิทยุ ซึ่งเรียกกันโดยทั่วไปว่า “รังสีดวงอาทิตย์” (Solar radiation) หากพิจารณาพลังงานแสงอาทิตย์รวมทุกความยาวคลื่นที่เดินทางจากดวงอาทิตย์มาตกกระทบตั้งฉากบนโลกพื้นที่ 1 ตารางเมตร เป็นระยะทางเฉลี่ย 1 AU (149.6×10^{11} m) มีความเข้มของรังสีประมาณ $1,367 \text{ W/m}^2$ เรียกว่า “ค่าคงที่สุริยะ” (Solar constant) สามารถจำแนกส่วนของรังสีดวงอาทิตย์ที่ตกกระทบพื้นโลกได้เป็น 2 ส่วน คือ “รังสีตรง” (Direct radiation) และ “รังสีกระจาย” (Diffuse radiation) ซึ่งผลรวมของรังสีทั้ง 2 ส่วนนี้ เรียกว่า “รังสีรวม” (Global radiation) การวัดรังสีดวงอาทิตย์บนพื้นโลกสามารถกระทำได้หลากหลายวิธีการ โดยทั่วไปเครื่องมือวัดที่ใช้สำหรับวัดความเข้มรังสีรวมเรียกว่า “ไพราโนมิเตอร์” (Pyranometer) และเครื่องวัดรังสีตรงเรียกว่า “ไพเฮลิโอมิเตอร์” (Pyrheliometer) สำหรับการวัดรังสีกระจาย โดยทั่วไปมักใช้อุปกรณ์ซึ่งมีลักษณะเป็นวงแหวนหรือลูกบอล มาติดตั้งบนเครื่อง ไพราโนมิเตอร์ เพื่อทำการปิดกั้นส่วนของรังสีตรงจากดวงอาทิตย์ ให้เครื่องวัดได้รับเฉพาะรังสีที่กระจายมาจากท้องฟ้าเท่านั้น

การดูดกลืนรังสีอาทิตย์เพื่อเปลี่ยนความร้อนต้ออาศัยตัวดูดกลืน (Absorber) หรือที่เรียกว่า “ตัวดูดกลืนรังสีอาทิตย์” (Solar selective absorber) ทำหน้าที่รับและถ่ายโอนความร้อน ไหลผ่านช่อง (ท่อ) จากตัวดูดกลืนรังสีอาทิตย์เปลี่ยนเป็นความร้อน และนำความร้อนที่เกิดขึ้นไปยังสารทำงานภายในท่อนำความร้อน (Heat pipe)

การเคลือบผิวตัวดูดกลืนรังสีอาทิตย์ในอดีต มีกรรมวิธีการเคลือบผิวต่างๆ ได้แก่ การทาสีโซลาร์ (Solar paint) ที่ไม่มีคุณสมบัติเลือกรับรังสีอาทิตย์ สำหรับการเคลือบที่มีคุณสมบัติเลือกรับรังสีอาทิตย์ เช่น การเคลือบอะลูมิเนียมออกไซด์ที่มีฟังกิเกลบนแผ่นอะลูมิเนียม (Nickel-pigmented aluminium oxide on aluminium) การเคลือบโครเมียมสีดำที่ขนาบด้วยชั้นของนิกเกิลบนแผ่นทองแดง (Black chrome with nickel sandwich layer on copper) การเคลือบโครเมียมสีดำบนแผ่นทองแดงโดยตรง (Black chrome directly on copper) และการเคลือบโคบอลต์ซัลไฟด์/ออกไซด์บนแผ่นเหล็ก (Cobalt sulphide /oxide (selective) on steel sheet) นอกจากนี้การเคลือบอีนาเมลแบบมีคุณสมบัติเลือกรับรังสีอาทิตย์บนแผ่นเหล็ก (Selectively acting enamel on steel) เพื่อให้ความร้อนที่ถ่ายเทจากตัวดูดกลืนมายังของไหลมีความสม่ำเสมอตลอดพื้นที่รับรังสี ปัจจุบันสารเคลือบตัวดูดกลืนรังสีอาทิตย์มีการใช้สารเคลือบโครเมียมดำเป็นหลัก ยกตัวอย่างเช่น นิกเกิลดำ ผลิตดำ เป็นต้น

คุณสมบัติของตัวดูดกลืนรังสีอาทิตย์ในอุดมคติ คือ มีค่าการสะท้อน รังสีอาทิตย์ที่ต่ำ ($R = 0$) และมีค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนรังสีอาทิตย์ที่สูง ($\alpha = 1$) ในช่วงความยาวคลื่น $300 - 2,500$ นาโนเมตร [1, 2] ซึ่งเป็นช่วงความยาวคลื่นของรังสีอาทิตย์ที่ผ่านมายังโลก ในขณะที่ช่วงความยาวคลื่น มากกว่า $2,500$ นาโนเมตร เป็นต้นไป ซึ่งเป็นช่วงความยาวคลื่นอินฟราเรด มีค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์ที่ต่ำ ($R = 1$) และมีค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนรังสีอาทิตย์ที่สูง ($\alpha = 0$) (เส้นประ) [1] จากความสัมพันธ์ดังกล่าว สามารถอธิบายได้ด้วยภาพที่ 1 ซึ่งสมบัตินี้มีความแตกต่างกับวัตถุดำ คือ วัตถุดำมีค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนรังสีอาทิตย์ที่สูง ($\alpha = 1$) และมีค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์ที่สูง ($R = 1$)



รูปภาพ 1 Spectral performance of an ideal selective solar absorber [1]

E. ALShamilen (2010) ใช้ NiAl เป็นสารเลือกรับรังสีแสงอาทิตย์สำหรับระบบผลิตน้ำร้อน (Solar water heating system, SWHS) เป็นส่วนประกอบในการสร้างผิวเคลือบสีดำในอัตราส่วน NiAl 6% โดยมวล มีความต้านทานการกัดกร่อนตามธรรมชาติและประสิทธิภาพในการสร้างอุณหภูมิสูงกว่า เมื่อเปรียบเทียบการระบบผลิตน้ำร้อนปกติ

ความสำคัญของ NiAl ที่ลักษณะสีดำ ในการประยุกต์ใช้กับรูปแบบของอุณหภูมิสูงประกอบด้วย มีจุดหลอมเหลวสูงถึง 1,640°C มีความหนาแน่นต่ำ (5.86 g/m³) มีค่าการยืดหยุ่นสูง (193 GPa) มีคุณสมบัติเชิงกลที่ดีและมีความต้านทานต่อการเกิดออกซิเดชันภายใต้อุณหภูมิสูงได้ดีจึงสามารถประยุกต์ใช้ในรูปแบบต่างๆ ได้โดยไม่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม

Y. Wang และคณะ (2007) ได้ศึกษาลักษณะทางจุลภาค ความแข็ง การกัดกร่อน หลังจากผ่านกระบวนการพ่นด้วยเปลวไฟที่อุณหภูมิสูง (600°C) พบว่าการเคลือบ NiAl มีความแข็งแรงและสามารถชะลอการกัดกร่อนได้

O. Culha และคณะ (2008) ศึกษาการเคลือบ NiAl ลงบนพื้นผิวสแตนเลสสตีล 316L ด้วยกระบวนการพ่นด้วยความร้อนประเภท High-Velocity Oxygen Fuel (HVOF) โดยได้ศึกษาลักษณะโครงสร้างของผิวเคลือบด้วย X-ray diffraction (XRD) และกล้องจุลทรรศน์แสง (Optical microscope, OM) ผลที่แสดงออกมาก็คือ ลักษณะพื้นผิวสัมผัสมีคุณภาพสูง ความหนาแน่นสูง การเกิดออกไซด์และรูพรุนต่ำ

P.R. Gordo และคณะ (2002) ผลิตพื้นผิวเลือกรับรังสีแสงอาทิตย์ลงบนผิวนอกท่อทองแดงความยาว 2 เมตร ด้วยวิธี DC Sputtering ด้วย NiAl เพื่อประยุกต์เป็นตัวรับรังสีประเภท Compound parabolic concentrator (CPC) โดยไม่สร้างสภาวะสูญญากาศกับท่อ Absorber ผลจากการทดลองแสดงให้เห็นถึงการสร้างฟิล์มบางจาก NiAl ที่มีความสามารถในการยึดเกาะที่ดีเยี่ยมและมีการสะท้อนต่ำกว่า 1% ที่ความยาวคลื่น 550 nm

S. Sampath และคณะ (2004) ทำการทดสอบเปรียบเทียบการใช้ NiAl ในอัตราส่วน Ni5-wt.%Al ซึ่งเป็นอัตราส่วนทั่วไปในการใช้งานในโรงงานอุตสาหกรรม ด้วยวิธีการที่ต่างกัันดังนี้ วิธีการที่หนึ่ง Air plasma spraying (APS) วิธีที่สอง Twin wire-arc spraying (TWA) และวิธีที่สาม High velocity oxy-fuel (HVOF) บนพื้นผิวที่เป็นโลหะ ได้เปรียบเทียบแรงดึงผิวของกระบวนการ APS ที่สูงกว่ากระบวนการ HVOF และ TWA [20] และต่อมา S. Deshpande และคณะ (2008) กล่าวถึงการเกิดออกซิเดชันได้น้อยและการสภาพการนำความร้อนที่ดีของกระบวนการ HVOF หลังจากได้ทำการทดลองในลักษณะคล้ายคลึงกัน

2.1.3 หลักการเคลือบผิว Coating method

การเคลือบผิวของวัสดุทนความร้อนสูงที่รับรังสีนั้น ถือว่ามีความสำคัญ เนื่องจากโดยปกติพื้นผิวของโลหะมีการสะท้อนแสงสูง และที่รับรังสีส่วนใหญ่ทำจากโลหะ จึงต้องมีการเคลือบผิวเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการดูดกลืนช่วงคลื่นแสงอาทิตย์ได้มากขึ้น (เพิ่มสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง) การพ่นสีเป็นหนึ่งในวิธีการเคลือบที่ถูกนำมาใช้ในการเคลือบสารเลือกรับรังสีอาทิตย์เชิงพาณิชย์สำหรับตัวเก็บรังสีอาทิตย์ผลิตความร้อน

2.1.3.1 การพ่น Spraying coating technique

การพ่นสีหรือที่เรียกว่า ปืนพ่นสี เป็นเครื่องมือที่สำคัญของงานพ่นสีที่จะทำให้เกิดการแตกตัวของสเปรย์ สีที่เป็นของเหลวจะถูกพ่นออกทางหัวฉีดของกาพ่นสีโดยอาศัยแรงดันของลมที่ไหลตามท่อจากเครื่องปั๊มลม

2.1.4 การประเมินประสิทธิภาพทางความร้อน Thermal efficiency

การประเมินสมรรถนะทางความร้อนของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ พิจารณาจากความร้อนที่ได้รับจากตัวเก็บรังสีอาทิตย์ภายใต้สภาวะคงตัว ความร้อนที่นำมาใช้ประโยชน์ได้รับจากตัวเก็บรังสีอาทิตย์มีค่าเท่ากับ พลังงานที่ถูกดูดกลืนโดยตัวเก็บรังสีอาทิตย์ลบด้วยการสูญเสียความร้อนทั้งทางตรงและทางอ้อม พลังงานความร้อนที่เป็นประโยชน์สามารถแสดงได้ดังสมการต่อไปนี้

$$Q_u = \dot{m} c_p (T_o - T_i) \quad 1$$

เมื่อ	Q_u	=	ความร้อนที่เป็นประโยชน์ (W)
	\dot{m}	=	อัตราการไหลเชิงมวล (kg/s)
	c_p	=	ค่าความร้อนจำเพาะของของไหล (J/kg.K)
	T_o	=	อุณหภูมิของเหลวขาออก (°C)
	T_i	=	อุณหภูมิของเหลวขาเข้า (°C)

สมรรถนะทางความร้อนของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ที่ทำงานภายใต้ภาวะคงที่ สามารถแสดงได้ดังสมการ 1

$$Q_u = A_c [F_R G_T (\tau \alpha) - F_R U_L (T_i - T_a)] \quad 2$$

เมื่อ	A_c	=	พื้นที่รับรังสีของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ (m^2)
	F_R	=	แฟกเตอร์การดึงความร้อนหรือแฟกเตอร์แก้ไข
	G_T	=	รังสีอาทิตย์รวมที่ตกกระทบลงบนตัวเก็บรังสีอาทิตย์ (W/m^2)
	$\tau\alpha$	=	ผลคูณสัมประสิทธิ์การส่งผ่านของแผ่นครอบ (τ) และการดูดกลืนของแผ่นดูดกลืน (α) ของตัวเก็บรังสีอาทิตย์
	U_L	=	สัมประสิทธิ์การสูญเสียความร้อน ($W/m^2 \cdot ^\circ C$)
	T_a	=	อุณหภูมิแวดล้อม ($^\circ C$)

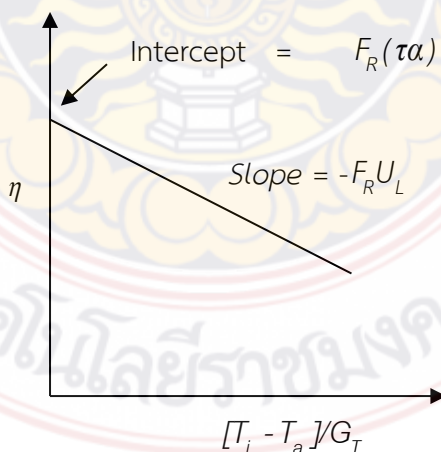
ประสิทธิภาพเชิงความร้อนที่ได้รับ สามารถหาได้จากการหาร Q_u ด้วยพลังงานที่ได้รับ ($A_c G_T$) สามารถแสดงได้ดังสมการ (3)

$$\eta = F_R (\tau\alpha) - F_R U_L \left[\frac{(T_i - T_o)}{G_T} \right] \quad 3$$

เมื่อ η = ประสิทธิภาพทางความร้อนของตัวเก็บรังสีอาทิตย์

ในระหว่างการทดสอบตัวเก็บรังสีอาทิตย์ถูกตั้งอยู่ในลักษณะที่ตั้งฉากกับรังสีอาทิตย์ เป็นผลให้การส่งผ่านของตัวดูดกลืนรังสีอาทิตย์สอดคล้องกันกับรังสีอาทิตย์ ดังนั้น เทอมของ $(\tau\alpha)$ ถูกนำมาใช้ในสมการ 2 และ 3 ซึ่งวัสดุที่ใช้ผลิตตัวเก็บรังสีอาทิตย์ที่ดี ต้องมีค่าส่งผ่านและดูดกลืน $(\tau\alpha)$ รังสีอาทิตย์สูง (transmittance & absorptance) โดยสีดามีค่าดูดกลืนรังสีสูงสุด ดังนั้นผิวแผ่นดูดกลืนรังสีส่วนใหญ่เคลือบผิวสีดำด้าน

สำหรับการดำเนินงานภายใต้สภาวะคงที่ของรังสีอาทิตย์และอัตราการไหล ปัจจัย F_R , $(\tau\alpha)$ และ U_L มีค่าใกล้เคียงค่าคงที่ เมื่อนำสมการ 3 มาสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพและพารามิเตอร์การสูญเสียความร้อน $(T_i - T_a)/G_T$ ดังแสดงในภาพ 2 ซึ่ง $F_R (\tau\alpha)$ คือค่าประสิทธิภาพสูงสุดของตัวเก็บรังสีอาทิตย์เป็นระยะตัดแกน η และ $-(F_R U_L)$ เป็นความชันของกราฟ ซึ่งเป็นผลคูณของแฟกเตอร์การดึงความร้อนและสัมประสิทธิ์การสูญเสียความร้อน



รูปภาพ 2 ประสิทธิภาพของตัวเก็บรังสีอาทิตย์

ในความเป็นจริงค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียความร้อน U_L ไม่คงที่ ดังนั้น

$$F_R U_L = c_1 + c_2(T_i - T_a) \quad 4$$

แทนสมการ 4 ใน 2 ได้สมการ สำหรับตัวเก็บรังสีอาทิตย์ประเภทที่ไม่มีการติดตามดวงอาทิตย์ ดังนี้

$$Q_U = A_c [F_R G_T (\tau\alpha) - c_1(T_i - T_a) - c_2(T_i - T_a)^2] \quad 5$$

ดังนั้น ประสิทธิภาพสำหรับตัวเก็บรังสีอาทิตย์ประเภทที่ไม่มีการติดตามดวงอาทิตย์สามารถเขียนเป็น

$$\eta = F_R (\tau\alpha) - c_1 \left[\frac{(T_i - T_a)}{G_T} \right] - c_2 \left[\frac{(T_i - T_a)}{G_T} \right]^2 \quad 6$$

และถ้าให้

$$c_0 = F_R (\tau\alpha)$$

$$x = \left[\frac{(T_i - T_a)}{G_T} \right]$$

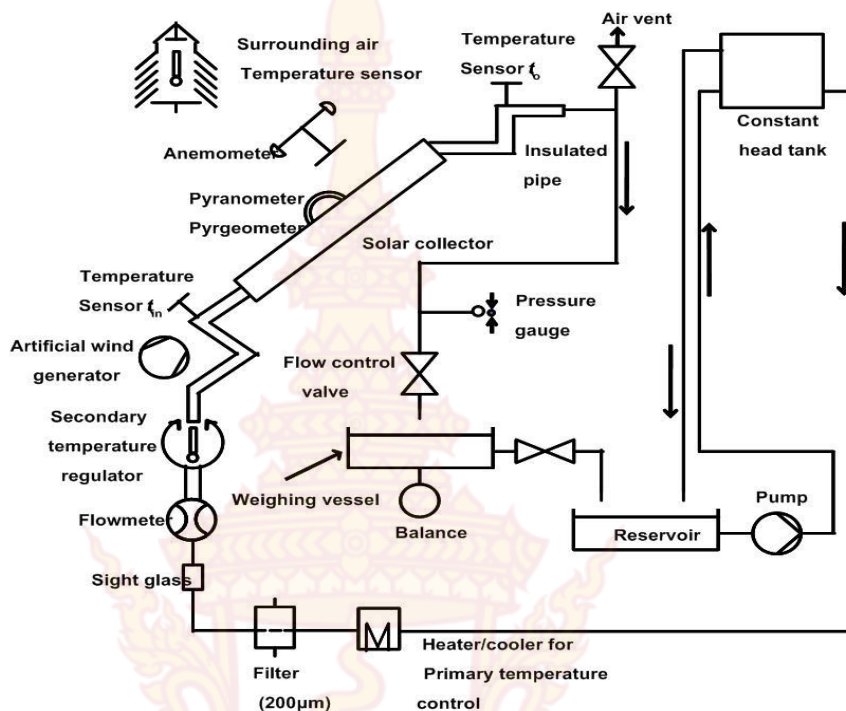
และ

ดังนั้น

$$\eta = c_0 - c_1 x - c_2 x^2 \quad 7$$

2.1.4.1 มาตรฐานการทดสอบตัวเก็บรังสีอาทิตย์

เป็นมาตรฐานที่ใช้หาสมการแสดงคุณสมบัติพื้นฐานสำหรับกำหนดประสิทธิภาพทางความร้อนของการทำงานของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ โดยขั้นตอนการทดสอบสามารถทดสอบได้ทั้งกลางแจ้ง (Outdoor) และในร่ม (Indoor) โดยสภาวะที่ใช้ในการทดสอบในงานวิจัยนี้ คือ กลางแจ้ง โดยให้รังสีอาทิตย์ตกกระทบลงบนตัวเก็บรังสีอาทิตย์ในแนวตั้งฉากตลอดเวลาการทดสอบ ภาพที่ 3 แสดงแผนภาพการทดสอบประสิทธิภาพตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบระบบเปิดตามมาตรฐาน



รูปภาพ 3 แผนภาพการทดสอบประสิทธิภาพตัวเก็บรังสีอาทิตย์

2.1.5 การวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์

การประเมินต้นทุนพลังงาน (Levelized Cost of Energy, LCOE) เป็นการหาราคาพลังงานเฉลี่ยตลอดอายุการใช้งาน โดยนำต้นทุนที่เกิดขึ้นตลอดอายุการใช้งาน ได้แก่ ต้นทุนค่าใช้จ่ายการดำเนินงานและการบำรุงรักษา ผลการดำเนินงานและค่าใช้จ่ายน้ำมันเชื้อเพลิง สำหรับการประเมินต้นทุนพลังงาน สามารถคำนวณจากผลรวมมูลค่าปัจจุบันสุทธิเทียบกับพลังงานที่สามารถผลิตได้ เป็นราคาเฉลี่ยที่พลังงานถูกขาย โดย LCOE ต่ำ แสดงว่าต้นทุนต่อราคาพลังงานมีค่าต่ำ และถ้ามีค่าต่ำกว่าต้นทุนพลังงานปัจจุบัน แสดงว่ามีประสิทธิภาพสูงทั้งทางด้านเทคนิคและทางด้านเศรษฐศาสตร์ คำนวณ LCOE ได้ดังสมการที่ 8

$$LCOE = \frac{C_c + \sum_{n=1}^N \frac{C_n}{(1+i)^n}}{\sum_{n=1}^N \frac{E_n}{(1+i)^n}}$$

8

- เมื่อ C_c = เงินลงทุนเริ่มต้น (Initial capital cost) (บาท)
- C_n = ต้นทุนในการดำเนินการ (Operating cost) ค่าซ่อมบำรุง เชื้อเพลิง และอื่นๆ ในแต่ละปี (บาท)
- E_n = พลังงานที่สามารถผลิตได้ในแต่ละปี
- i = อัตราดอกเบี้ย (Interest rate) หรือ อัตราคิดลด (Discount rate)
- n = อายุการใช้งานโครงการ (Project period)
- N = จำนวนปีที่สิ้นสุดโครงการ (Year at the end of project)

2.2 การทบทวนวรรณกรรม/สารสนเทศ

E. AlShamilen (2010) ใช้ NiAl เป็นสารเลือกรับรังสีแสงอาทิตย์สำหรับระบบผลิตน้ำร้อน (Solar water heating system, SWHS) เป็นส่วนประกอบในการสร้างผิวเคลือบสีดำในอัตราส่วน NiAl 6% โดยมวล มีความต้านทานการกัดกร่อนตามธรรมชาติและประสิทธิภาพในการสร้างอุณหภูมิสูงกว่า เมื่อเปรียบเทียบการระบบผลิตน้ำร้อนปกติ

ความสำคัญของ NiAl ที่ลักษณะสีดำ [13-14] ในการประยุกต์ใช้กับรูปแบบของอุณหภูมิสูง ประกอบด้วย มีจุดหลอมเหลวสูงถึง 1,640°C มีความหนาแน่นต่ำ (5.86 g/m³) มีค่าการยืดหยุ่นสูง (193 GPa) มีคุณสมบัติเชิงกลที่ดีและมีความต้านทานต่อการเกิดออกซิเดชันภายใต้อุณหภูมิสูงได้ดีจึงสามารถประยุกต์ใช้ในรูปแบบต่างๆ ได้โดยไม่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม

Y. Wang และคณะ (2007) ได้ศึกษาลักษณะทางจุลภาค ความแข็ง การกัดกร่อน หลังจากผ่านกระบวนการพ่นด้วยเปลวไฟที่อุณหภูมิสูง (600°C) พบว่าการเคลือบ NiAl มีความแข็งแรงและสามารถชะลอการกัดกร่อนได้

O. Culha และคณะ (2008) ศึกษาการเคลือบ NiAl ลงบนพื้นผิวสแตนเลสสตีล 316L ด้วยกระบวนการพ่นด้วยความร้อนประเภท High-Velocity Oxygen Fuel (HVOF) โดยได้ศึกษาลักษณะโครงสร้างของผิวเคลือบด้วย X-ray diffraction (XRD) และกล้องจุลทรรศน์แสง (Optical microscope, OM) ผลที่แสดงออกมาคือ ลักษณะพื้นผิวสัมผัสมีคุณภาพสูง ความหนาแน่นสูง การเกิดออกไซด์และรูพรุนต่ำ

P.R. Gordo และคณะ (2002) ผลิตพื้นผิวเลือกรับรังสีแสงอาทิตย์ลงบนผิวนอกท่อทองแดงความยาว 2 เมตร ด้วยวิธี DC Sputtering ด้วย NiAl เพื่อประยุกต์เป็นตัวรับรังสีประเภท Compound parabolic concentrator (CPC) โดยไม่สร้างสภาวะสูญญากาศกับท่อ Absorber ผลจากการทดลองแสดงให้เห็นถึงการสร้างฟิล์มบางจาก NiAl ที่มีความสามารถในการยึดเกาะที่ดีเยี่ยมและมีการสะท้อนต่ำกว่า 1% ที่ความยาวคลื่น 550 nm

S. Sampath และคณะ (2004) ทำการทดสอบเปรียบเทียบการใช้ NiAl ในอัตราส่วน Ni5-wt.%Al ซึ่งเป็นอัตราส่วนทั่วไปในการใช้งานในโรงงานอุตสาหกรรม ด้วยวิธีการที่แตกต่างกันดังนี้ วิธีการที่หนึ่ง Air plasma spraying (APS) วิธีการที่สอง Twin wire-arc spraying (TWA) และวิธีการที่สาม High velocity oxy-fuel (HVOF) บนพื้นผิวที่เป็นโลหะ ได้เปรียบเทียบแรงดึงผิวของกระบวนการ APS ที่สูงกว่ากระบวนการ HVOF และ TWA [20] และต่อมา S. Deshpande และคณะ (2008) กล่าวถึงการเกิดออกซิเดชันได้น้อยและการสภาพการนำความร้อนที่ดีของกระบวนการ HVOF หลังจากได้ทำการทดลองในลักษณะคล้ายคลึงกัน

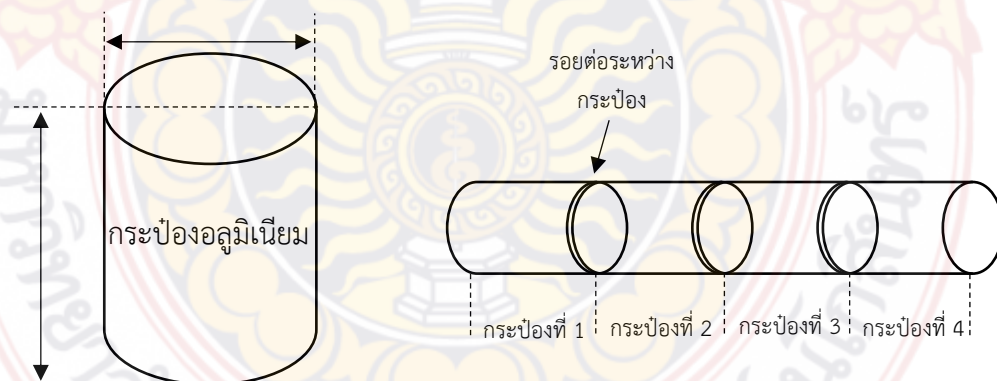
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นงานวิจัยเชิงทดลองเพื่อพัฒนาและประยุกต์ใช้กระป๋องอะลูมิเนียมพ่นสีดำที่เพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับรังสีอาทิตย์เป็นตัวดูดกลืนรังสีอาทิตย์ในตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบท่อ โดยการนำกระป๋องอะลูมิเนียมเปิดหัวทำขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 40-50 มิลลิเมตร ต่อกันเป็นท่อทรงกระบอกยาว 4 เมตร แล้วไปผ่านกระบวนการทำฟิล์มสีดำที่มีการผสม NiAl ในชั้นผิวเคลือบ ณ วิทยาลัยพลังงานและสิ่งแวดล้อมอย่างยั่งยืนรัตนโกสินทร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ ในการผลิตชั้นสีที่ทำการวิเคราะห์ลักษณะเฟส สันฐานวิทยา และค่าการสะท้อนรังสี ของท่ออะลูมิเนียมด้วยเครื่องมือวัดเทคนิคเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray Diffraction, XRD) กล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) ที่มีการติดตั้งเทคนิคการวิเคราะห์ Energy Dispersive Spectrometry (EDS) และ Ultraviolet-Visible-Near Infrared Spectrophotometer รวมถึงการประเมินประสิทธิภาพเชิงความร้อน (Thermal efficiency) และการวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ สำหรับตัวเก็บรังสีอาทิตย์ที่ใช้อะลูมิเนียมอะโนไดซ์เป็นตัวดูดกลืนรังสี

3.1 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

3.1.1 การเตรียมผิววัสดุก่อนทำการเคลือบผิว

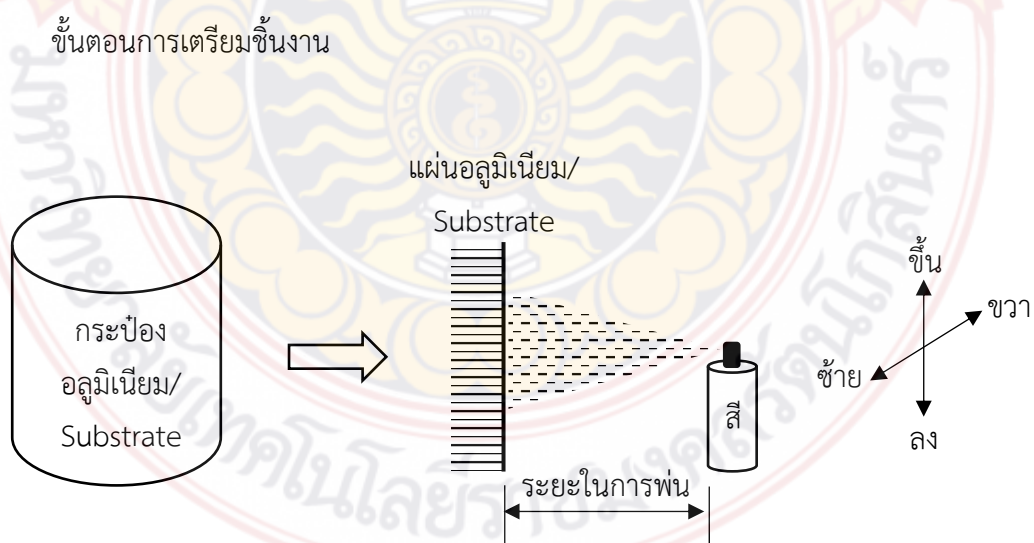
- วัสดุที่นำไปพัฒนาเป็นตัวรับรังสีอาทิตย์ (กรณีศึกษา) เป็นกระป๋องอะลูมิเนียมที่บรรจุกาแฟสำเร็จรูปลักษณะทรงกระบอก มีความหนา X ไมโครเมตร เคลือบผิวด้วยสีเพื่อทำลายผิวของแต่ละบริษัทผู้ผลิต จนมีความหนาเพิ่มขึ้นเป็น X ไมโครเมตร มีฟลูออรีนเย็บ ปิดด้านบนและล่างดังนั้นจึงต้องจัดแผนดังกล่าวออกทั้งสองฝั่งและตัดแต่งให้เสมอลดแล้ว และนำมาต่อกันด้วยกาวเคมีจนเป็นทรงกระบอกที่มีความยาวตามข้อกำหนดการออกแบบตัวรับรังสีอาทิตย์ชนิดลมร้อน



3.1.2 ขั้นตอนการเคลือบผิว

ตาราง 1 ข้อกำหนดของสี สำหรับการสร้างผิวเลือกสีอภิศาสตร์

ตัวอย่าง	เบอร์สี	ชนิด		ระยะพ่น (ซม.)	หมายเหตุ/ที่มา
		สเปรย์กระป๋อง	ผสม		
1 BOSANY Hi-Temp Spray paint (Black)	1039	/	-	30	บ.อาร์.เจ. ลอนดอนเคมีคอล อินดัสทรีส์ จำกัด
2 BOSANY Hi-Temp Spray paint (Flat Black)	1200	/	-	30	บ.อาร์.เจ. ลอนดอนเคมีคอล อินดัสทรีส์ จำกัด
3 SWAN Hi-Temp (Black)	HT310	/	-	30	บ.นำดีวิชั่นเคมีเคิล จำกัด
4 KOBE (Flat Black)	912	/	-	30	บ.ทีโอเอ เฟ้นท์ (ประเทศไทย) จำกัด (มหาชน)
5 LAZER (Flat Black)	L212(C)	/	-	30	บ.นิปปอนเพนต์ เดคโคเรทีฟ โคตรตั้ง (ประเทศไทย) จำกัด
6 Nippon paint PYLAC1000 (Flat Black)	229	/	-	30	บ.นิปปอนเพนต์ เดคโคเรทีฟ โคตรตั้ง (ประเทศไทย) จำกัด
7 Swan Spray (Flat Black)	212	/	-	30	บ.นำดีวิชั่นเคมีเคิล จำกัด
8 TOA Spray (Flat Black)	021	/	-	30	บ.ทีโอเอ เฟ้นท์ (ประเทศไทย) จำกัด (มหาชน)
9 TOA Spray 3000 Heat-Resistant(Flat Black)	051	/	-	30	บ.ทีโอเอ เฟ้นท์ (ประเทศไทย) จำกัด (มหาชน)



รูปภาพ 4 แสดงการเตรียมผิวชิ้นงาน (การเคลือบผิว)

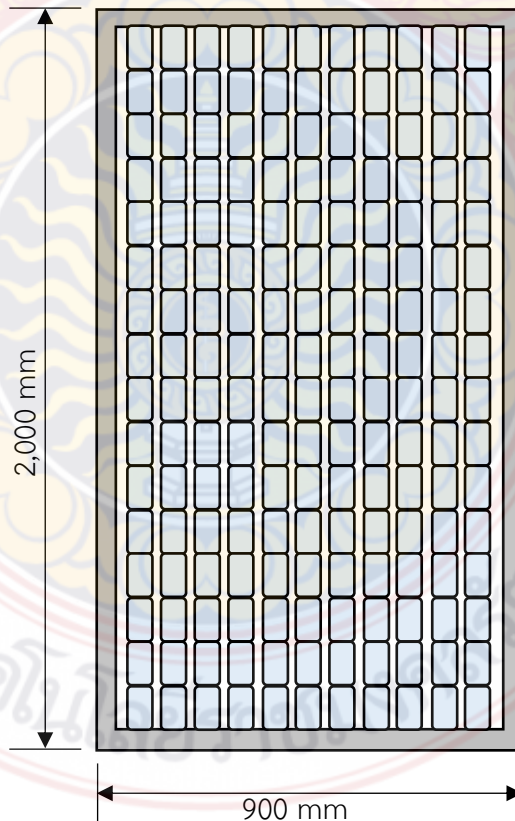
1. เตรียมกระป๋องอลูมิเนียม
2. ทำความสะอาดผิว
3. เตรียมผิวด้วยกระบวนการพ่นทราย/การทำให้หยาบด้วยกระดาษทราย
4. เคลือบผิวโดยใช้ตัวอย่างสีที่มีคุณสมบัติเป็นสีเลือกรับรังสีอาทิตย์ ดังแสดงในตารางแสดงข้อกำหนดของสี สำหรับการสร้างผิวเลือกรับรังสีอาทิตย์ เคลือบผิวชิ้นงาน ดังแสดงขั้นตอนการเตรียมผิวชิ้นงานในภาพขั้นต้น

3.1.3 ขั้นตอนการประกอบตัวรับรังสีอาทิตย์

การประกอบด้วยรับรังสีอาทิตย์เป็นไปตามข้อกำหนดดังตาราง

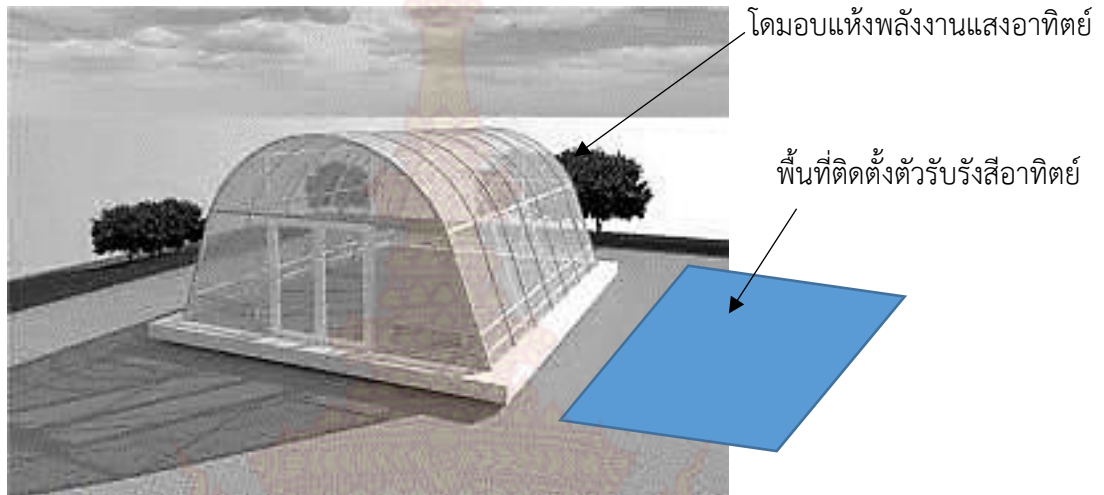
ตาราง 2 แสดงข้อกำหนดการออกแบบตัวรับรังสีอาทิตย์

ลำดับ	ข้อกำหนด	ขนาด/ค่า	หมายเหตุ
1	วัสดุส่งถ่ายความร้อน, กระจก	OD 52.7 mm Length 104.6 mm	
2	วัสดุป้องกันการสูญเสียความร้อน	900×2000 mm	กระจก
3	กรอบอลูมิเนียม	900×2000×100 mm	

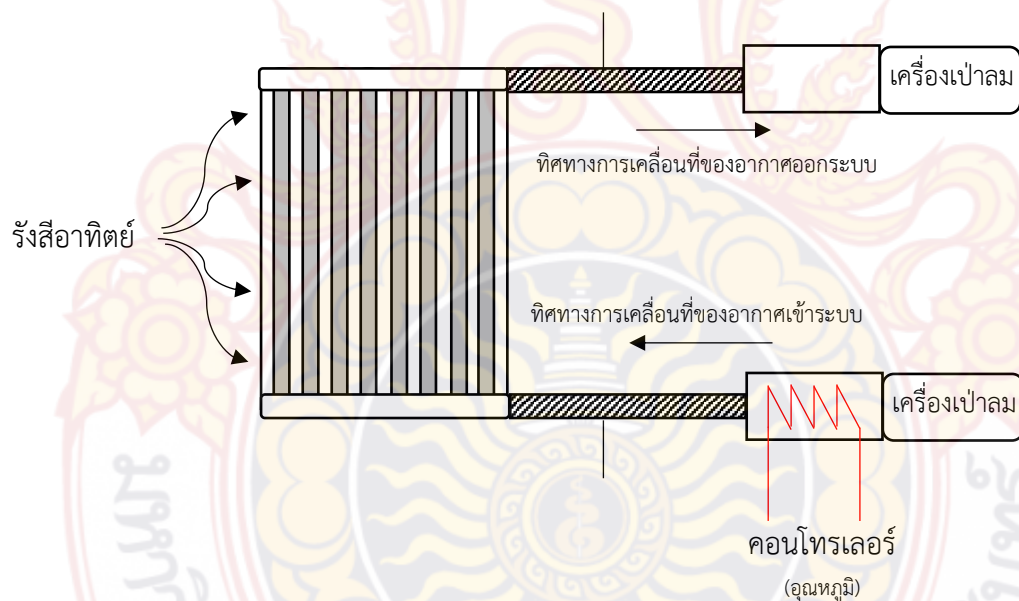


รูปภาพ 5 แสดงลักษณะของแผ่นเลือกรับรังสีอาทิตย์

3.1.4 ขั้นตอนการนำตัวรับรังสีอาทิตย์ไปใช้งาน



3.2 ขั้นตอนการทดสอบประสิทธิภาพเชิงความร้อน



ตาราง 3 แสดงข้อกำหนดการทดสอบเบื้องต้น

ลำดับ	ข้อกำหนด	คุณสมบัติ	หมายเหตุ
1	Aperture area	1.8 m ²	
2	Working fluid	Water	
3	Flow rate, \dot{m}	0.036 kg/s	0.02 kg/(s.m ²)
4	Inlet temperature, °C	10-50 °C	(T _{fi} -T _a)
5	Solar irradiance, W/m ²	790±50 W/m ²	

จากภาพแสดงผังการทดสอบประสิทธิภาพเชิงความร้อน โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อหาประสิทธิภาพในการเปลี่ยนรังสีอาทิตย์เป็นพลังงานความร้อนในสภาวะสารทำงานไม่เปลี่ยนสถานะ และไม่มีการสะสมพลังงาน (รายละเอียดเพิ่มเติมในภาคผนวก)



บทที่ 4 ผลการดำเนินการวิจัย

4.1 UV-VIS-IR Spectrophotometer

การวิเคราะห์ด้วยเครื่อง UV-VIS-IR Spectrophotometer ในช่วงความยาวคลื่น 300-2500 nm ร่วมกับค่ามาตรฐาน ASTM G1073 AM 1.5 โดยใช้สมการ

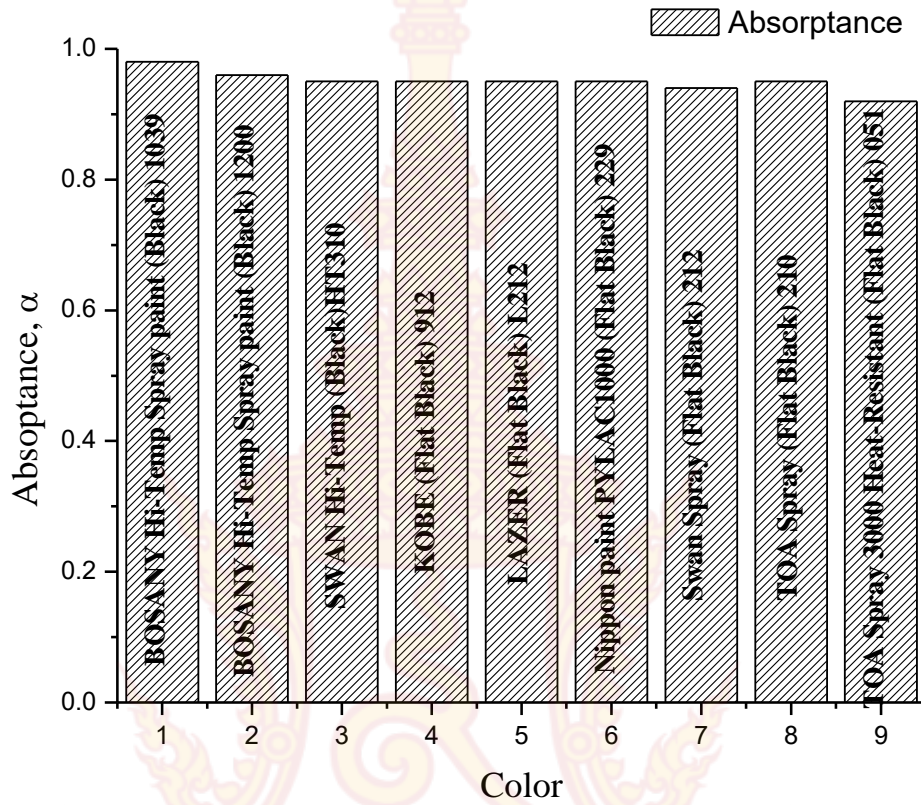
$$\alpha_{\text{sol}} = \frac{\int_{0.3\mu\text{m}}^{2.5\mu\text{m}} I_s(\lambda)[1 - R(\lambda)]d\lambda}{\int_{0.3\mu\text{m}}^{2.5\mu\text{m}} I_s(\lambda)d\lambda}$$

ประสิทธิภาพการซึมซับรังสีอาทิตย์ Solar absorptance, α ตลอดช่วงความยาวคลื่น 300-2500 nm เฉลี่ยเป็นไปตามตารางที่ 4 ตัวอย่างสีทั้งหมดมีลักษณะสีดำด้าน (Flat Black) ที่มีลักษณะดำไม่เงาเนื่องด้วยองค์ประกอบของสีทั้งหมดไม่มีส่วนผสมของสารที่ทำให้เกิดเงา เช่น แล็กเกอร์เคลือบผิว เรซิน เป็นต้น จึงทำให้เมื่อแห้งสนิทจะไม่เกิดการสะท้อนแสงซึ่งเป็นคุณสมบัติสำคัญของสีเลือกรับรังสีอาทิตย์

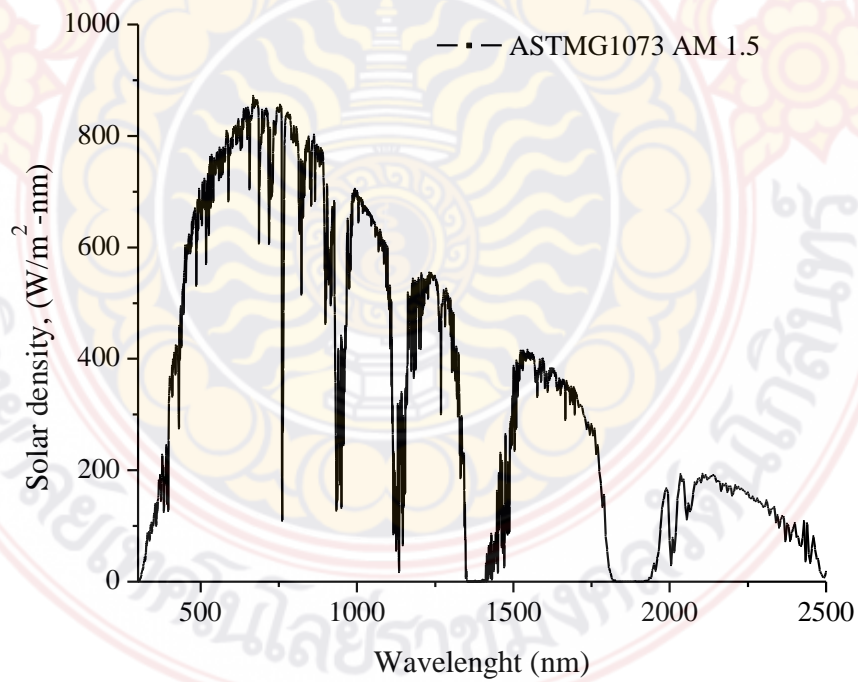
ตาราง 4 แสดงผลการวิเคราะห์ค่าการซึมซับรังสีอาทิตย์ (Solar absorptance, α)

ตัวอย่าง	เบอร์สี	Solar Absorptance, α
1 BOSANY Hi-Temp Spray paint (Black)	1039	0.98
2 BOSANY Hi-Temp Spray paint (Flat Black)	1200	0.96
3 SWAN Hi-Temp (Black)	HT310	0.95
4 KOBE (Flat Black)	912	0.95
5 LAZER (Flat Black)	L212(C)	0.95
6 Nippon paint PYLAC1000 (Flat Black)	229	0.95
7 Swan Spray (Flat Black)	212	0.94
8 TOA Spray (Flat Black)	021	0.95
9 TOA Spray 3000 Heat-Resistant (Flat Black)	051	0.92

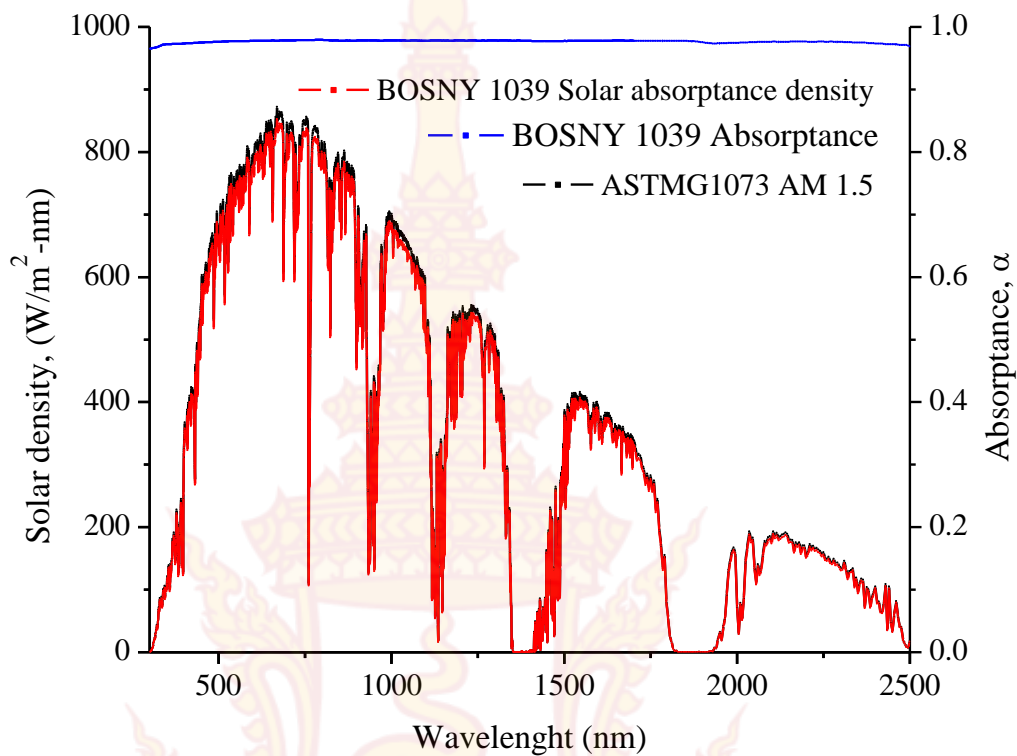
จากผลการวิเคราะห์เป็นไปตามตารางที่ 4 และรูปที่ 6 ผลเฉลี่ยตลอดช่วงความยาวคลื่น 300-2500 nm สี BOSNAY Hi-Temp spray รหัสสี 1039 มีประสิทธิภาพเฉลี่ยตลอดช่วงความยาวคลื่นดังกล่าวสูงถึง 0.98 และ BOSNAY Hi-Temp spray รหัสสี 1200 มีประสิทธิภาพเฉลี่ยลดลงมาเหลือ 0.96 ตามลำดับ ซึ่งเมื่อพิจารณาลักษณะของสีดำด้าน (Flat-Black) แล้วนั้นพบว่า ลักษณะของสีดำปกติทั่วไปจะมีคุณสมบัติเป็นตามคุณลักษณะของวัสดุดำที่มีประสิทธิภาพการซึมซับรังสีอาทิตย์สูงถึง 100% แต่สีดำด้านนั้นไม่มีส่วนผสมของสารเคลือบที่ทำให้เกิดเงา จึงทำให้ประสิทธิภาพของสีดำด้านโดยทั่วไปมีประสิทธิภาพการซึมซับแสงอาทิตย์ค่อนข้างสูง และความแตกต่างทางด้านองค์ประกอบทางเคมีตามแต่ละบริษัทผู้ผลิตจึงทำให้เกิดความแตกต่างที่เป็นปัจจัยหนึ่ง



รูปภาพ 6 ประสิทธิภาพการซึมซับรังสีอาทิตย์ของสีที่มีคุณสมบัติเป็นสีเลือกรับรังสีอาทิตย์แต่ละชนิด



รูปภาพ 7 ค่าความเข้มรังสีอาทิตย์ตามมาตรฐาน ASTM G1073 AM 1.5



รูปภาพ 8 ผลการวิเคราะห์ Absorptance, Solar absorptance density ร่วมกับค่าการดูดกลืนรังสีอาทิตย์ ตามค่ามาตรฐาน ASTM G1073 AM 1.5 ตัวอย่างสี BOSNY 1039

เมื่อนำผลการวิเคราะห์ค่าการสะท้อนร่วมกับค่ามาตรฐานความเข้มรังสีอาทิตย์ แต่ละช่วงความยาวคลื่นตามสมการขึ้นต้น แต่ละความยาวคลื่นจะมีประสิทธิภาพการซึมซับรังสีอาทิตย์ที่แตกต่างกันออกไป ผลจากการวัดค่าการสะท้อนรังสีของผิวเลือกรับรังสีอาทิตย์ทั้ง 9 ตัวอย่าง ด้วยเครื่อง Ultraviolet-Visible-Near Infrared Spectrometer ที่ช่วงความยาวคลื่น 250-2,500 nm ผลการทดสอบแสดงในภาคผนวก 1 นำผลที่ได้มาคำนวณหาค่าการดูดกลืนรังสีตามสมการ ผลที่ได้แสดงดังตาราง 4 ซึ่งทั้ง 9 ตัวอย่างมีประสิทธิภาพการซึมซับรังสีอาทิตย์แตกต่างกันอย่างไม่มีนัยยะสำคัญ เห็นได้ว่าค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์ของผิวเลือกรับรังสีอาทิตย์ที่ใช้แผ่นอุมิเนียมเคลือบผิวด้วยสีดำด้านจะมีค่าการดูดกลืนรังสีอาทิตย์ที่สูง ในช่วงความยาวคลื่น 300 – 2,500 nm โดยมีค่าเฉลี่ยตลอดช่วงความยาวคลื่น ดังแสดงในตาราง 4 และผลการเปรียบเทียบเป็นไปดังภาพที่ 6 โดยผลการทดลองสอดคล้องกับสมบัติตัวดูดกลืนรังสีอาทิตย์ตามทฤษฎี คือ มีค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์ที่ต่ำ ($R = 0$) และการดูดกลืนรังสีอาทิตย์ที่สูง ($\alpha = 1$) ในช่วงความยาวคลื่น 300-2,500 nm

เมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยที่ผ่านมาและที่มีการใช้งานจริงในท้องตลาดสำหรับตัวดูดกลืนรังสีอาทิตย์แบบมีสมบัติเลือกรับรังสีอาทิตย์พบว่ามีค่าการดูดกลืนรังสีอยู่ในช่วง 0.85-0.95 แสดงให้เห็นว่า ค่าการดูดกลืนรังสีของสีดำด้าน มีค่าใกล้เคียงและอยู่ในช่วงที่มีการดูดกลืนรังสีที่สูง ผลการคำนวณค่าการดูดกลืนรังสีของแต่ละความยาวคลื่นมาเทียบกับความหนาแน่นกำลังรังสีอาทิตย์ที่ air mass เท่ากับ 1.5 AM ผลที่ได้แสดงค่าการดูดกลืนกำลังรังสีอาทิตย์ในแต่ละความยาวคลื่นของรังสีอาทิตย์ โดยมีค่าการดูดกลืนกำลังรังสีอาทิตย์ใกล้เคียงกับความหนาแน่นกำลังรังสีอาทิตย์

เมื่อนำประสิทธิภาพจากตารางที่ 4 และภาพที่ 6 มาพิจารณา พบว่าสีดำด้านที่ผลิตโดย บ.อาร์.เจ. ลอนดอนเคมีคอลอินดัสทรีส์ จำกัด BOSNY Hi-Temp Spray paint (Black) รหัสสี 1039 ดังแสดงในภาพที่ 9 มีประสิทธิภาพการซึมซับรังสีอาทิตย์ (Solar absorptance, α) สูงที่สุดถึง 0.98 และโดยคุณสมบัติการผลิต สีชนิดนี้ออกมานั้น สามารถนำไปใช้งานได้ในช่วงอุณหภูมิสูงถึง 650°C



รูปภาพ 9 ตัวอย่างสี BOSNY Hi-Temp Spray paint (Black) รหัสสี 1039

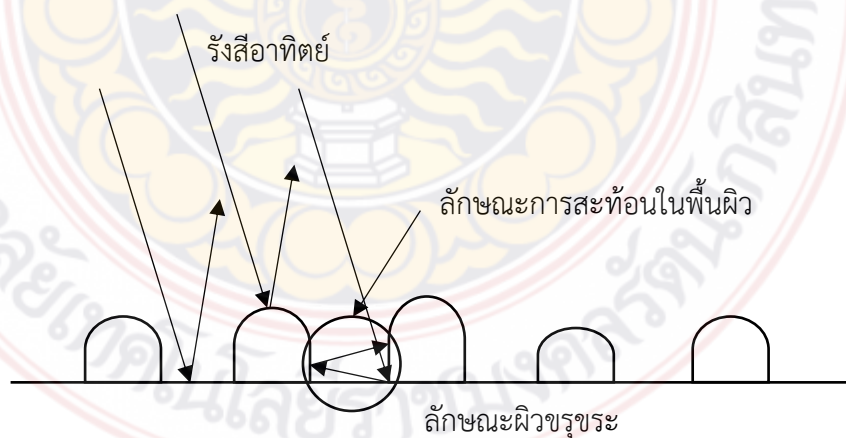
ภาพที่ 8 ผลการวิเคราะห์ Absorptance, Solar absorptance density ร่วมกับความเข้มรังสีอาทิตย์ตามค่ามาตรฐาน ASTM G1073 AM 1.5 ตัวอย่างสี BOSNY 1039 ที่พิจารณาร่วมกับความเข้มรังสีอาทิตย์แต่ละความยาวคลื่น แสดงเส้นสีดำ (—) แสดงปริมาณพลังงานที่สามารถซึมซับได้สูงสุดดังแสดงดังเส้นสีแดง (—)

4.2 ผลการวิเคราะห์ทางสัณฐานวิทยา



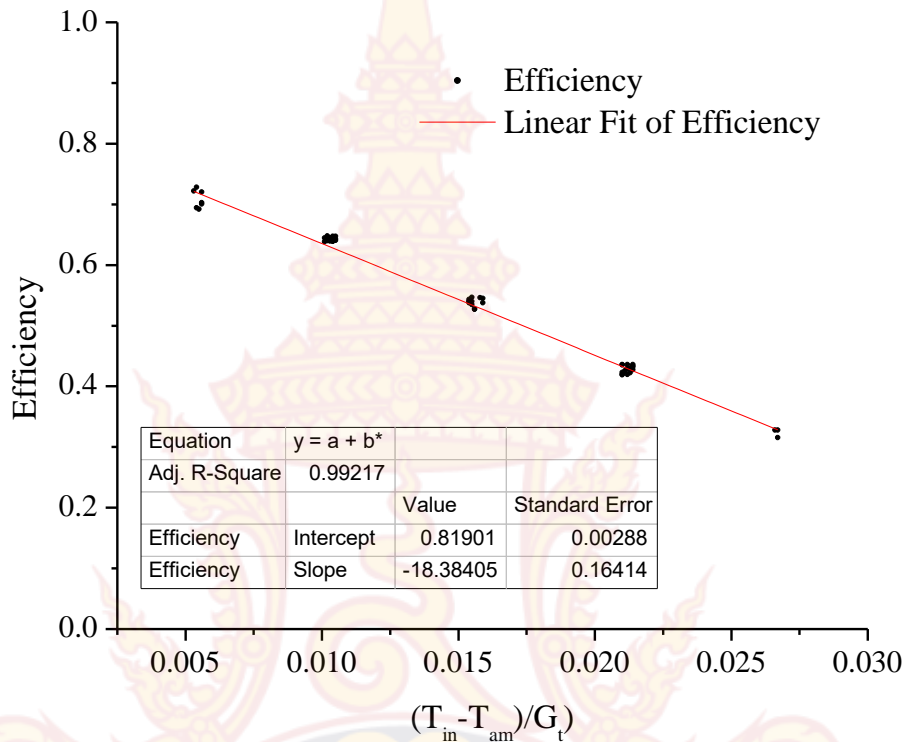
รูปภาพ 10 ตัวอย่างพื้นผิวที่เคลือบสีด้วย BOSANY Hi-Temp Spray paint (Black) 1039

ภาพที่ 10 แสดงผลลักษณะทางสัณฐานวิทยาของลักษณะผิวเล็กรับรังสีอาทิตย์ที่เตรียมผิวด้วยกระบวนการพ่นเคลือบด้วย BOSANY Hi-Temp Spray paint (Black) รหัสสี 1039 จากกระบวนการเคลือบในขั้นตอนการดำเนินการวิจัย ลักษณะของพื้นผิวเล็กรับรังสีอาทิตย์ลักษณะคล้ายกับการละลายของเกร็ดน้ำตาลหรือลักษณะของภูเขาที่มีความสูงสม่ำเสมอ ลักษณะสีดำ พื้นผิวที่มีลักษณะไม่สม่ำเสมอจะเป็นปัจจัยทางอ้อมในการป้องกันการสะท้อนออกจากพื้นผิว ความสูงที่จะมีผลต่อการป้องกันการสะท้อน ดังแสดงในภาพที่ 11



รูปภาพ 11 แสดงลักษณะผิวขรุขระที่มีผลต่อการป้องกันการสะท้อน

4.3 ผลการทดสอบประสิทธิภาพเชิงความร้อน



รูปภาพ 12 ประสิทธิภาพตัวรับรังสีอาทิตย์ผลิตลมร้อนที่เคลือบผิวด้วย BOSANY Hi-Temp Spray paint (Black) 1039

ผลการทดสอบและคำนวณหาประสิทธิภาพเชิงความร้อนของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ที่ประยุกต์ใช้ BOSANY Hi-Temp Spray paint (Black) 1039 นำผลทดสอบมาเปรียบเทียบกับสมการที่ 5 ได้ผลดังแสดงในภาพ 39 พิจารณาว่า U_L มีค่าคงที่และไม่เปลี่ยนแปลง ตามสมการพบว่าค่าประสิทธิภาพทางความร้อนสูงสุด (η_{max}) ที่อุณหภูมิเข้ามีค่าเท่ากับอุณหภูมิสิ่งแวดล้อม ($\Delta T = T_i - T_a = 0$) มีค่าเท่ากับ 0.81 และมีค่าผลคูณของแฟกเตอร์การดึงความร้อนกับสัมประสิทธิ์การสูญเสียความร้อนรวมหรือค่าการสูญเสียความร้อน ($-F_R U_L$) เท่ากับ $-18.38 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ (ความชันของกราฟ)

บทที่ 5 สรุปผล

ค่าการดูดกลืนรังสีอาทิตย์ตลอดช่วงความยาวคลื่น 300-2,500 นาโนเมตร ของสีที่มีคุณสมบัติเป็นสีผิวเลือกรับรังสีอาทิตย์ที่เหมาะสมที่สุดคือ BOSNY Hi-Temp Spray paint รหัสสี 1039 มีค่าเท่ากับ 0.98 ลักษณะผิวเลือกรับรังสีอาทิตย์ที่เกิดขึ้นมีคุณสมบัติเด่นลักษณะของผิวที่มีความไม่เรียบเสมอ ซึ่งมีผิวขรุขระที่สามารถเป็นกำบังไม่ให้เกิดการสะท้อนออกจากผิวได้ง่าย และความสามารถในการผลิตความร้อนที่ดี



บรรณานุกรม

1. Kennedy, C.E., *Review of Mid-to High-Temperature Solar Selective Absorber Materials*. National Renewable Energy Laboratory (NREL), 2002(Colorado,.NREL/TP-520-31267).
2. Peuser, F.A., K.-H. Remmers, and M. Schnauss, การออกแบบและติดตั้งระบบผลิตน้ำร้อนรังสีอาทิตย์. 2554, กรุงเทพฯ : องค์การความร่วมมือระหว่างประเทศของเยอรมัน (GIZ): Berlin : Solarparxis AG.
3. Hernández-Moro, J. and J.M. Martínez-Duart, *Analytical model for solar PV and CSP electricity costs: Present LCOE values and their future evolution*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2013. 20: p. 119-132.
4. Branker, K., M.J.M. Pathak, and J.M. Pearce, *A review of solar photovoltaic levelized cost of electricity*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2011. 15(9): p. 4470-4482.
5. Kornbluth, K., et al., *Economic feasibility of hydrogen enrichment for reducing NOx emissions from landfill gas power generation alternatives: A comparison of the levelized cost of electricity with present strategies*. Energy Policy, 2012. 41: p. 333-339.
6. (RA91), A.A., *Methods of Testing to Determine the Thermal Performance of Solar Collectors*. 1986.

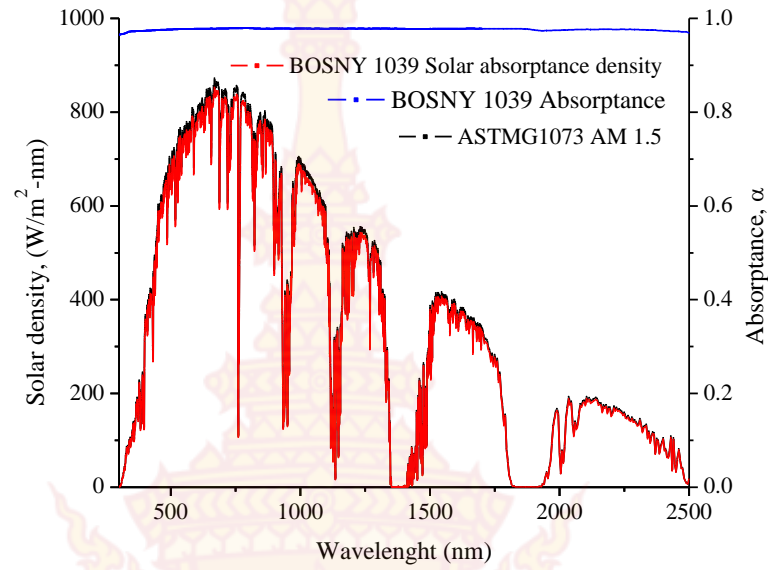




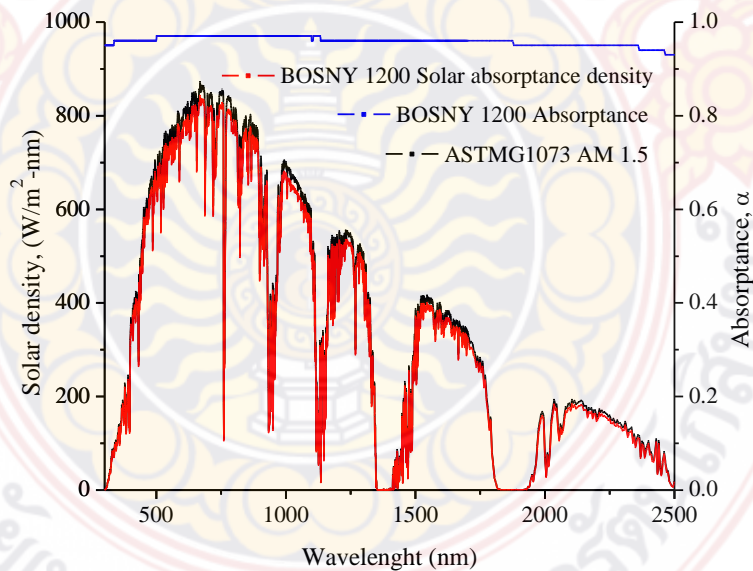
ภาคผนวก

ภาคผนวก 1 UV-VIS-IR Spectrophotometer

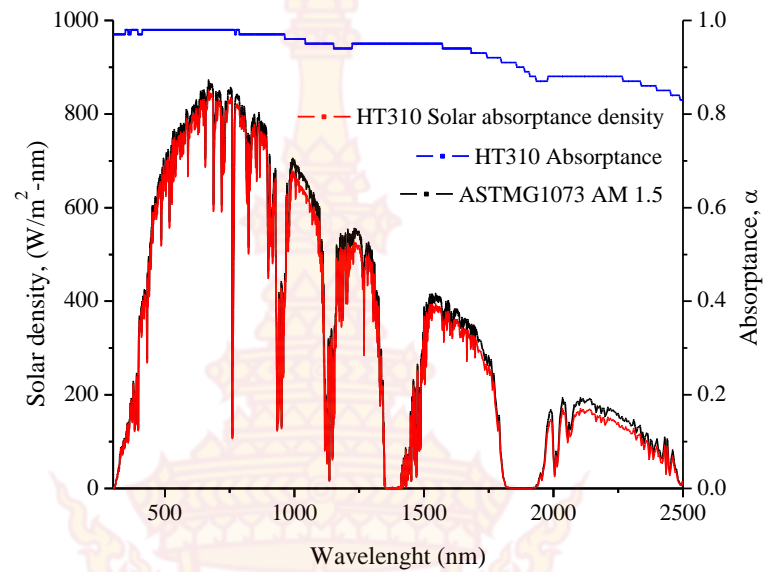




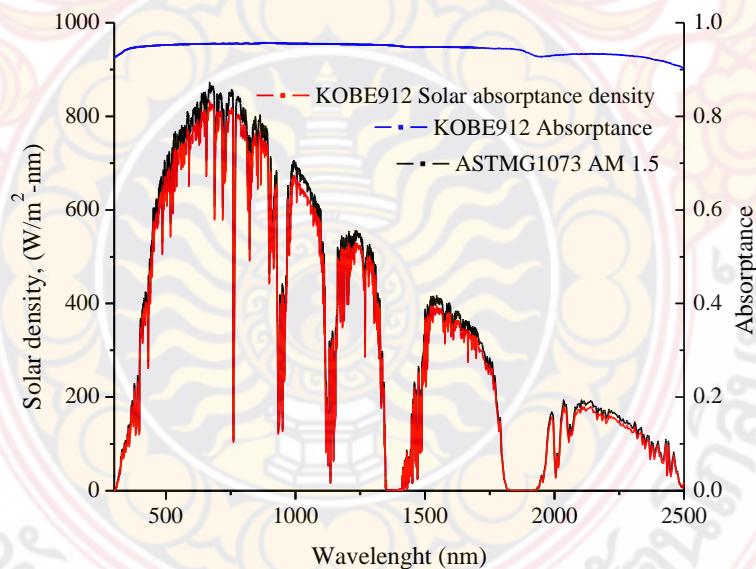
ผลการวิเคราะห์ Absorbance, Solar absorptance density ร่วมกับความเข้มรังสีอาทิตย์ตามค่า
มาตรฐาน ASTM G1073 AM 1.5 ตัวอย่างสี BOSNY 1039



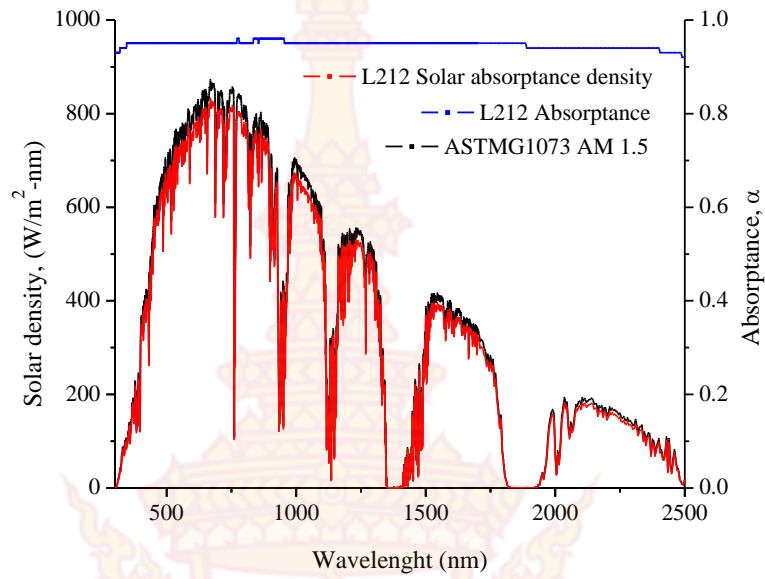
ผลการวิเคราะห์ Absorbance, Solar absorptance density ร่วมกับความเข้มรังสีอาทิตย์ตามค่า
มาตรฐาน ASTM G1073 AM 1.5 ตัวอย่างสี BOSNY 1200



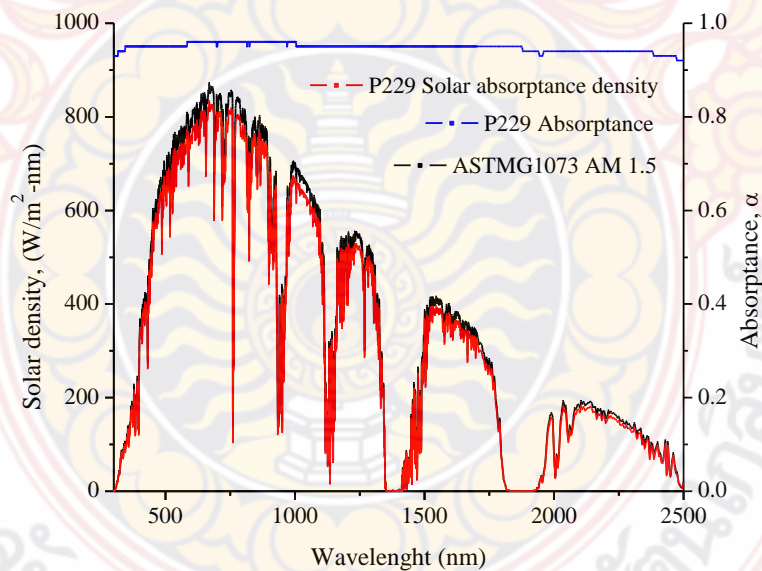
ผลการวิเคราะห์ Absorbance, Solar absorptance density ร่วมกับค่าความเข้มรังสีอาทิตย์ตามค่ามาตรฐาน ASTM G1073 AM 1.5 ตัวอย่างสี HT310



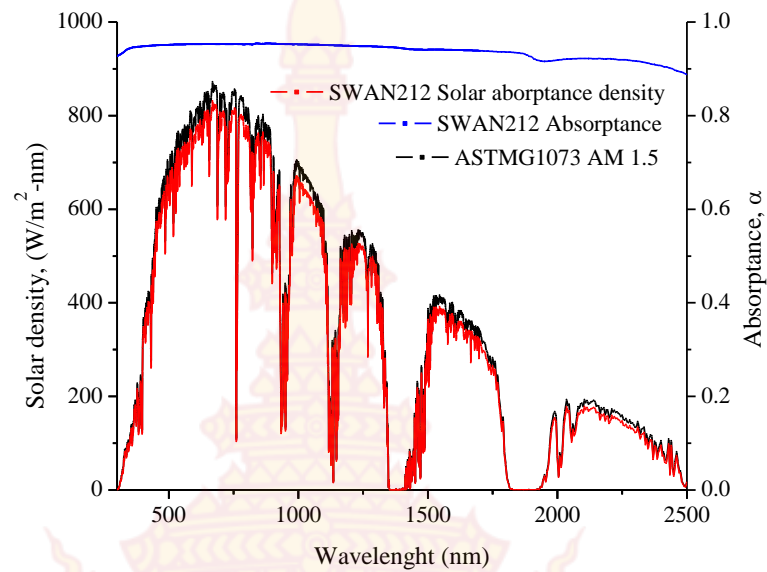
ผลการวิเคราะห์ Absorbance, Solar absorptance density ร่วมกับค่าความเข้มรังสีอาทิตย์ตามค่ามาตรฐาน ASTM G1073 AM 1.5 ตัวอย่างสี KOBE912



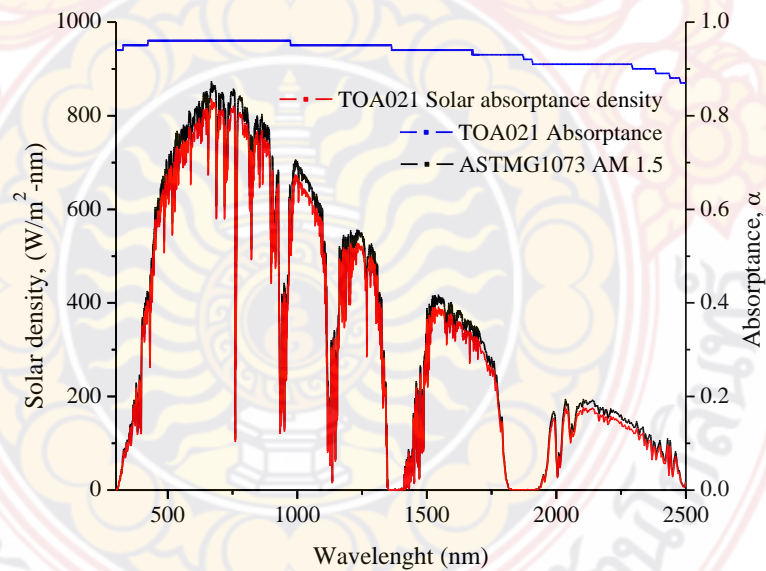
ผลการวิเคราะห์ Absorbance, Solar absorptance density ร่วมกับความเข้มรังสีอาทิตย์ตามค่า
มาตรฐาน ASTM G1073 AM 1.5 ตัวอย่างสี L212



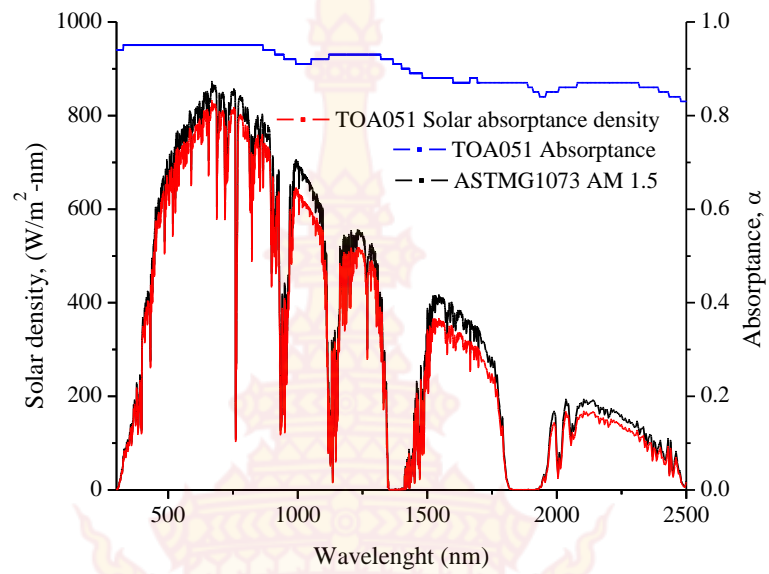
ผลการวิเคราะห์ Absorbance, Solar absorptance density ร่วมกับความเข้มรังสีอาทิตย์ตามค่า
มาตรฐาน ASTM G1073 AM 1.5 ตัวอย่างสี P229



ผลการวิเคราะห์ Absorbance, Solar absorptance density ร่วมกับค่าความเข้มรังสีอาทิตย์ตามค่ามาตรฐาน ASTM G1073 AM 1.5 ตัวอย่างสี SWAN212



ผลการวิเคราะห์ Absorbance, Solar absorptance density ร่วมกับค่าความเข้มรังสีอาทิตย์ตามค่ามาตรฐาน ASTM G1073 AM 1.5 ตัวอย่างสี TOA021



ผลการวิเคราะห์ Absorbance, Solar absorptance density ร่วมกับความเข้มรังสีอาทิตย์ตามค่า
มาตรฐาน ASTM G1073 AM 1.5 ตัวอย่างสี TOA051















































ภาคผนวก 2 ภาพถ่ายสัณฐานวิทยา

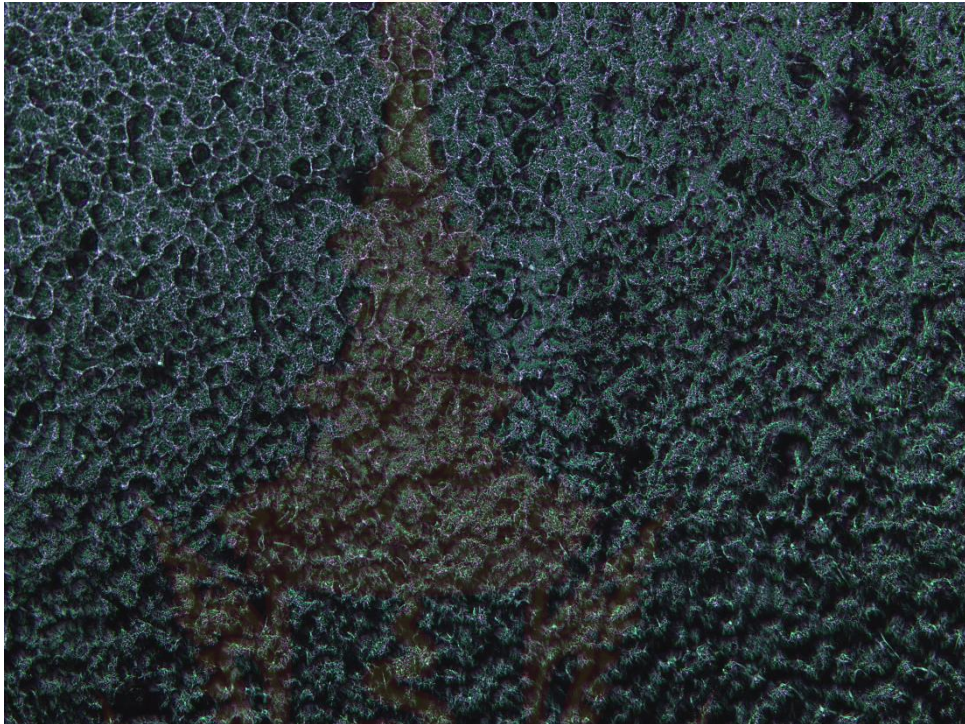




ตัวอย่างพื้นผิวที่เคลือบสีด้วย BOSANY Hi-Temp Spray paint (Black) 1039



ตัวอย่างพื้นผิวที่เคลือบสีด้วย BOSANY Hi-Temp Spray paint (Black) 1200



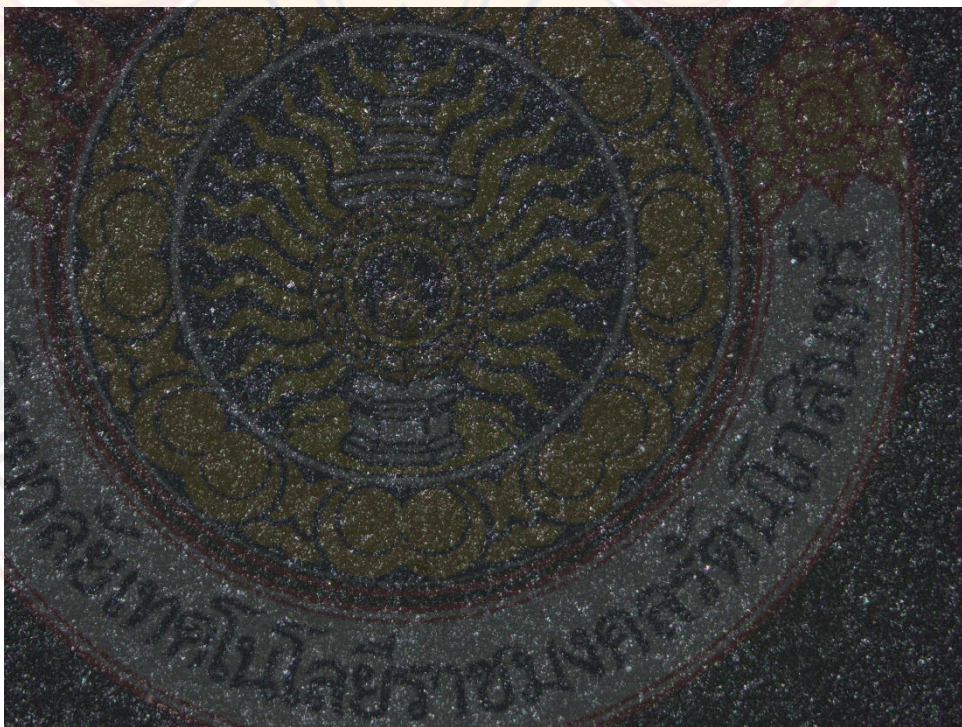
ตัวอย่างพื้นผิวที่เคลือบสีด้วย SWAN Hi-Temp (Black) HT310



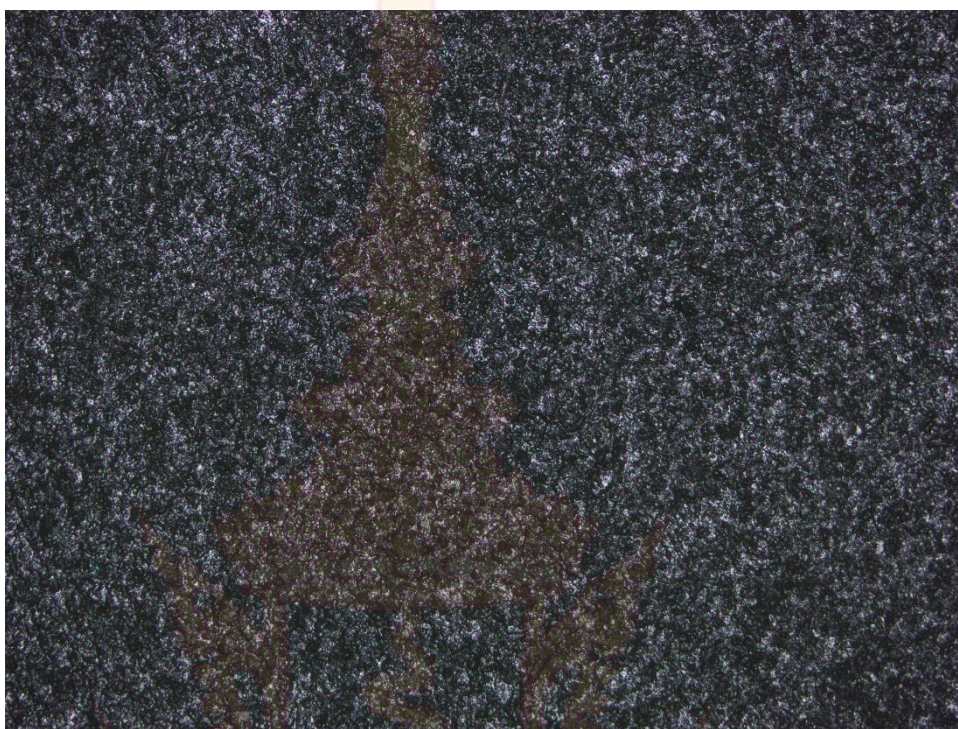
ตัวอย่างพื้นผิวที่เคลือบสีด้วย KOBE (Flat Black) 912



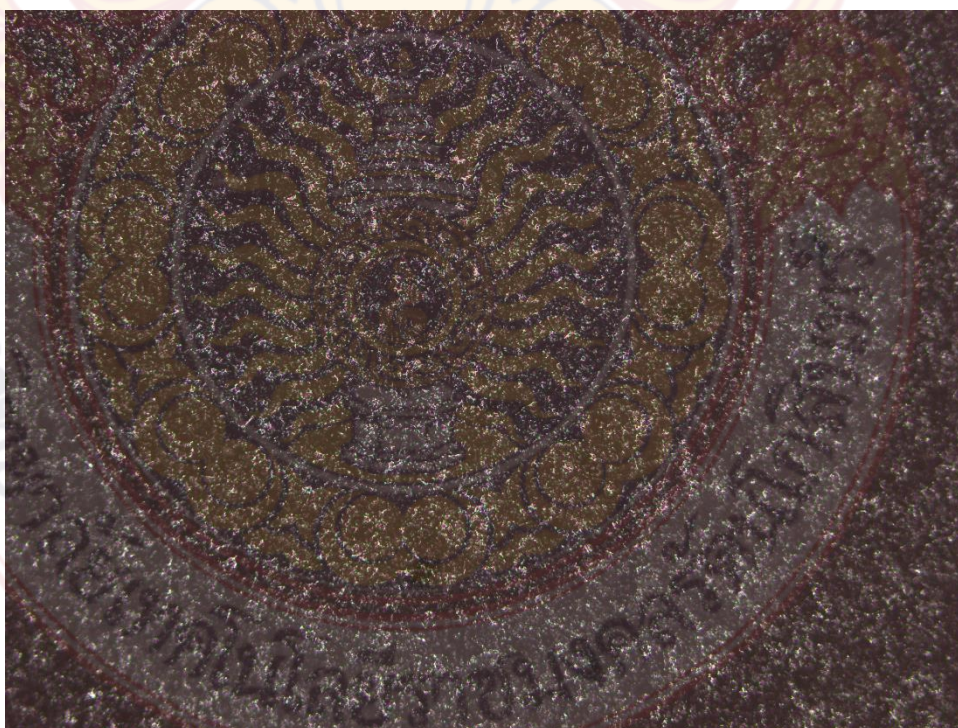
ตัวอย่างพื้นผิวที่เคลือบสีด้วย LAZER (Flat Black) L212



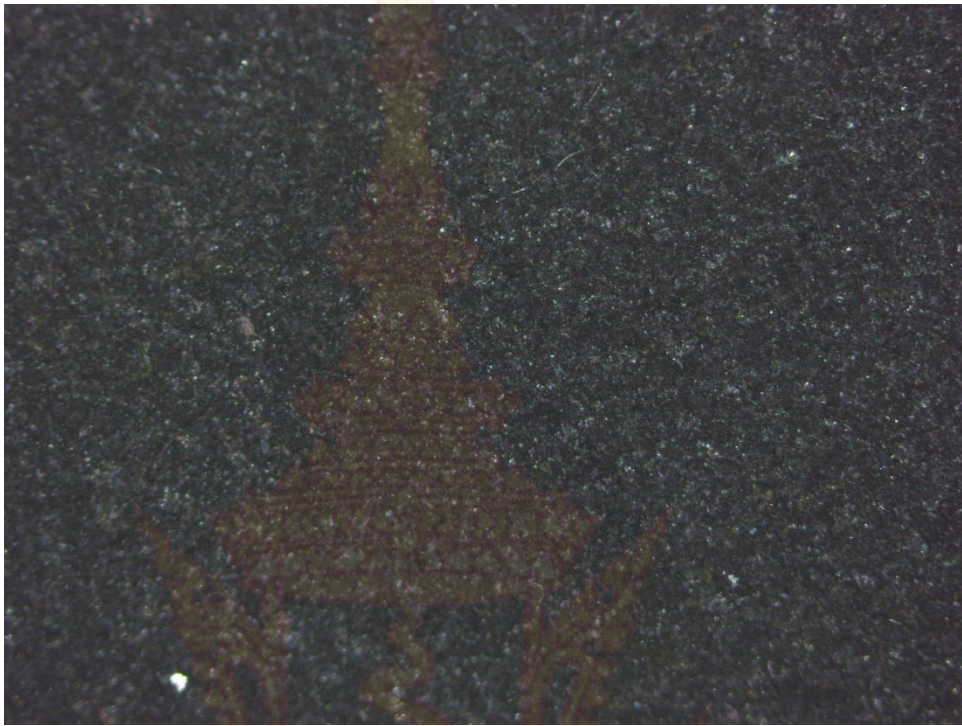
ตัวอย่างพื้นผิวที่เคลือบสีด้วย Nippon paint PYLAC1000 (Flat Black) 229



ตัวอย่างพื้นผิวที่เคลือบสีด้วย Swan Spray (Flat Black) 212



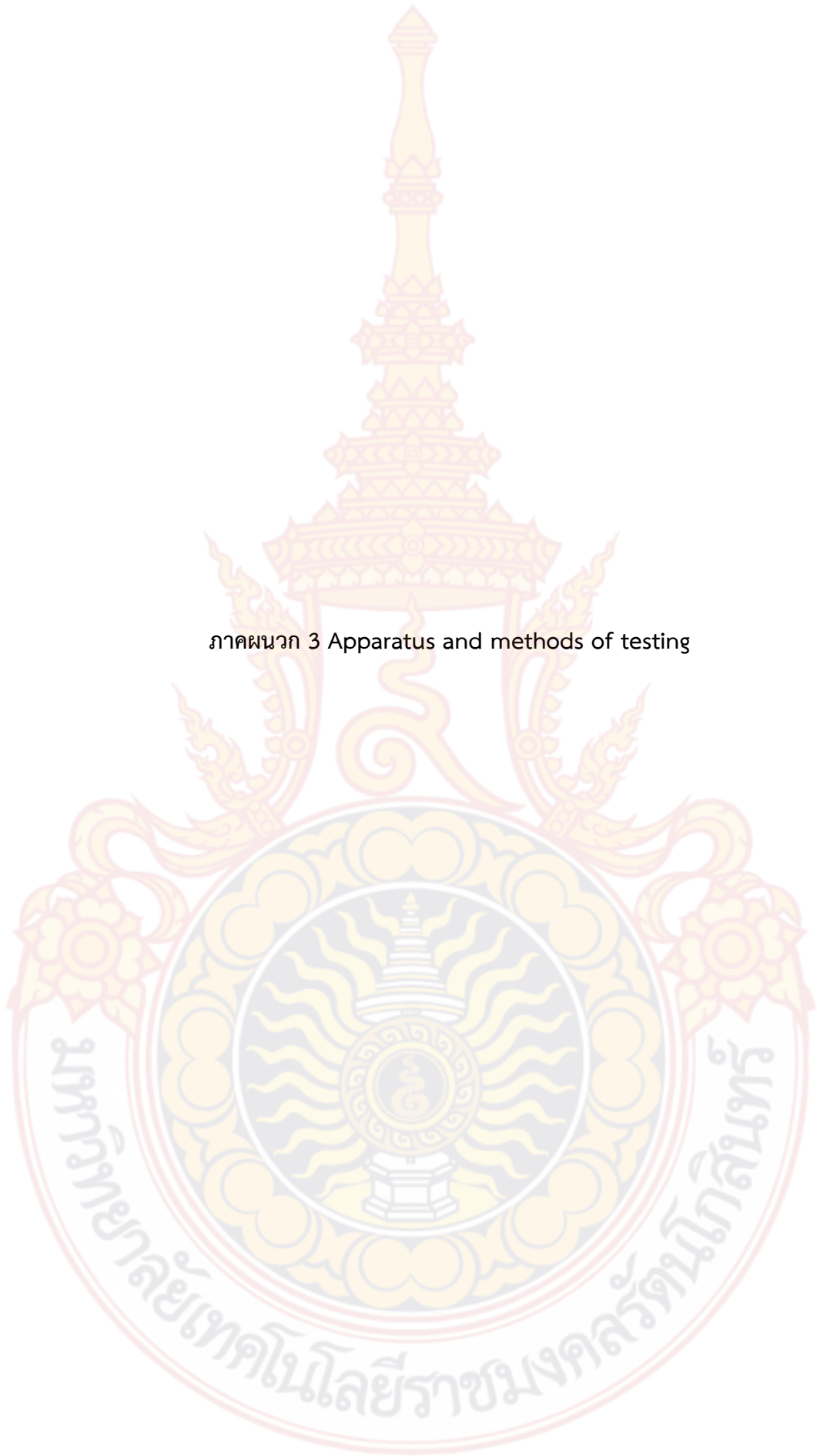
ตัวอย่างพื้นผิวที่เคลือบสีด้วย TOA Spray (Flat Black) 021



ตัวอย่างพื้นผิวที่เคลือบสีด้วย TOA Spray 3000 Heat-Resistant (Flat Black) 051



ภาคผนวก 3 Apparatus and methods of testing



แสดงผลการทดสอบประสิทธิภาพเชิงความร้อนของผิวเคลือบรังสีอาทิตย์โดยใช้สี BOSNY Hi-Temp Spray paint (Black) รหัสสี 1039

T_{in} (C)	T_{out} (C)	T_{am} (C)	Gt(W/m ²)	$(T_{in}-T_{am})/Gt$	η
36.35	40.64	32.0576	800.88	0.0054	0.7280
36.35	40.64	32.0576	800.88	0.0054	0.7280
36.22	40.46	31.9249	807.25	0.0053	0.7220
36.22	40.46	31.9249	807.25	0.0053	0.7220
36.23	40.42	31.6909	804.25	0.0056	0.7201
36.23	40.42	31.6909	804.25	0.0056	0.7201
36.26	40.39	31.7576	801.48	0.0056	0.7024
36.26	40.39	31.7576	801.48	0.0056	0.7024
36.33	40.28	31.7564	811.75	0.0056	0.7005
36.33	40.28	31.7564	811.75	0.0056	0.7005
36.33	40.28	31.7564	811.75	0.0056	0.7005
36.33	40.28	31.7564	811.75	0.0056	0.7005
36.19	40.42	31.8111	806.02	0.0054	0.6940
36.19	40.42	31.8111	806.02	0.0054	0.6940
36.19	40.42	31.8111	806.02	0.0054	0.6940
36.19	40.42	31.8111	806.02	0.0054	0.6940
36.39	40.76	31.9753	801.50	0.0055	0.6921
36.39	40.76	31.9753	801.50	0.0055	0.6921
36.39	40.76	31.9753	801.50	0.0055	0.6921
36.39	40.76	31.9753	801.50	0.0055	0.6921
40.89	44.49	32.6719	810.03	0.0102	0.6479
40.86	44.52	32.3720	812.75	0.0104	0.6474
40.91	44.57	32.3350	812.45	0.0105	0.6471
40.80	44.58	32.4998	809.43	0.0102	0.6463
40.92	44.49	32.7857	809.15	0.0101	0.6446
40.94	44.51	32.6380	809.52	0.0103	0.6445
40.98	44.52	32.5065	810.72	0.0104	0.6444
40.98	44.57	32.5612	812.37	0.0104	0.6431
40.88	44.56	32.4588	815.35	0.0103	0.6431
40.88	44.58	32.3337	813.74	0.0105	0.6427
40.89	44.48	32.4074	810.97	0.0105	0.6426
40.84	44.48	32.5860	810.33	0.0102	0.6409
40.89	44.37	32.4288	805.72	0.0105	0.6407
40.97	44.54	32.5591	812.65	0.0103	0.6407
40.85	44.48	32.5481	811.04	0.0102	0.6398
40.87	44.56	32.4304	826.51	0.0102	0.6397
40.84	44.52	32.4077	814.34	0.0103	0.6394
40.84	44.53	32.4472	809.54	0.0104	0.6392
40.82	44.34	32.4438	807.35	0.0104	0.6387
40.82	44.55	32.5221	819.33	0.0101	0.6382

T_{in} (C)	T_{out} (C)	T_{am} (C)	Gt (W/m ²)	$(T_{in}-T_{am})/Gt$	η
45.39	48.47	32.8979	804.57	0.0155	0.5469
45.39	48.47	32.8979	804.57	0.0155	0.5469
45.42	48.46	32.7481	801.67	0.0158	0.5458
45.42	48.46	32.7481	801.67	0.0158	0.5458
45.43	48.48	32.6245	805.79	0.0159	0.5451
45.43	48.48	32.6245	805.79	0.0159	0.5451
45.38	48.39	32.9930	804.14	0.0154	0.5433
45.38	48.39	32.9930	804.14	0.0154	0.5433
45.38	48.49	33.0569	801.40	0.0154	0.5402
45.38	48.49	33.0569	801.40	0.0154	0.5402
45.50	48.47	33.0594	802.36	0.0155	0.5397
45.50	48.47	33.0594	802.36	0.0155	0.5397
45.58	48.55	33.1670	806.11	0.0154	0.5395
45.41	48.46	32.7212	824.86	0.0154	0.5394
45.47	48.44	33.0888	803.00	0.0154	0.5378
45.47	48.47	32.6096	810.65	0.0159	0.5378
45.32	48.32	32.7787	810.78	0.0155	0.5348
45.50	48.38	33.0074	803.05	0.0156	0.5272
45.50	48.38	33.0074	803.05	0.0156	0.5272
45.34	48.33	32.7395	807.16	0.0156	0.5271
50.42	52.79	33.3686	812.99	0.0210	0.4361
50.30	52.77	33.0530	819.95	0.0210	0.4359
50.43	52.76	33.0034	815.65	0.0214	0.4359
50.31	52.78	33.1765	808.19	0.0212	0.4357
50.45	52.85	33.3973	811.25	0.0210	0.4351
50.35	52.78	33.1258	806.24	0.0214	0.4336
50.30	52.72	33.0111	808.25	0.0214	0.4316
50.40	52.75	33.3101	802.27	0.0213	0.4297
50.34	52.72	33.2019	807.89	0.0212	0.4295
50.48	52.79	33.3655	804.87	0.0213	0.4290
50.48	52.85	33.4123	800.09	0.0213	0.4284
50.32	52.76	33.1089	807.76	0.0213	0.4281
50.44	52.80	33.0995	808.47	0.0214	0.4271
50.48	52.83	33.2994	813.33	0.0211	0.4256
50.48	52.81	33.4031	809.52	0.0211	0.4237
50.43	52.81	33.2331	820.47	0.0210	0.4227
50.36	52.76	33.0918	811.72	0.0213	0.4224
50.45	52.82	33.2961	808.08	0.0212	0.4196
50.31	52.77	33.1404	816.25	0.0210	0.4193
50.41	52.74	33.3273	814.72	0.0210	0.4188
54.83	56.66	33.4728	801.48	0.0266	0.3281
54.83	56.66	33.4728	801.48	0.0266	0.3281
54.83	56.66	33.4728	801.48	0.0266	0.3281
54.85	56.64	33.4686	801.44	0.0267	0.3276

T_{in} (C)	T_{out} (C)	T_{am} (C)	G_t (W/m ²)	$(T_{in}-T_{am})/G_t$	η
54.85	56.64	33.4686	801.44	0.0267	0.3276
54.85	56.64	33.4686	801.44	0.0267	0.3276
54.85	56.64	33.4686	801.44	0.0267	0.3276
54.85	56.64	33.4686	801.44	0.0267	0.3276
54.85	56.64	33.4686	801.44	0.0267	0.3276
54.85	56.64	33.4686	801.44	0.0267	0.3276
54.85	56.64	33.4686	801.44	0.0267	0.3276
54.85	56.64	33.4686	801.44	0.0267	0.3276
54.85	56.64	33.4686	801.44	0.0267	0.3276
54.84	56.60	33.4432	802.70	0.0267	0.3154
54.84	56.60	33.4432	802.70	0.0267	0.3154
54.84	56.60	33.4432	802.70	0.0267	0.3154
54.84	56.60	33.4432	802.70	0.0267	0.3154
54.84	56.60	33.4432	802.70	0.0267	0.3154
54.84	56.60	33.4432	802.70	0.0267	0.3154
54.84	56.60	33.4432	802.70	0.0267	0.3154
54.84	56.60	33.4432	802.70	0.0267	0.3154
54.84	56.60	33.4432	802.70	0.0267	0.3154
54.84	56.60	33.4432	802.70	0.0267	0.3154

