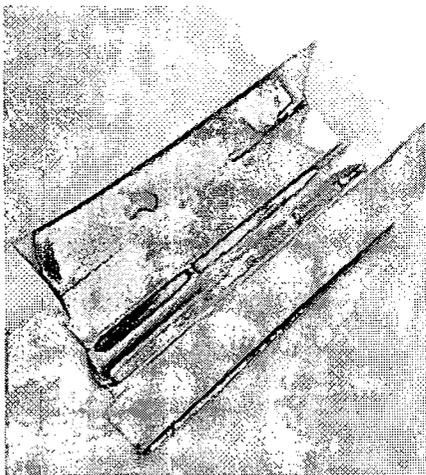


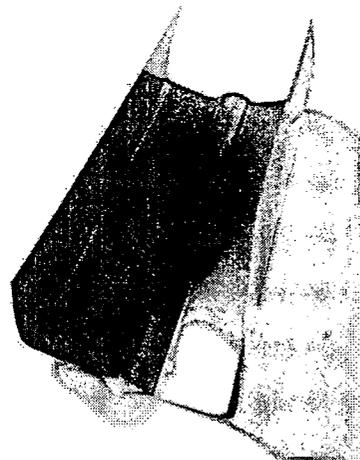
บทที่ 4

ผลการวิจัย

ในบทนี้นำเสนอผลการศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาของอะลูมิเนียมอะโนไดซ์ เพื่อประเมินความเหมาะสมของการเป็นสารเคลือบรังสีอาทิตย์ ผลการวิเคราะห์ประสิทธิภาพตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบท่อสุญญากาศที่ประยุกต์ใช้อะลูมิเนียมอะโนไดซ์เป็นตัวดูดกลืนรังสี-อาทิตย์ เพื่อประเมินความเป็นไปได้และความเหมาะสมในการประยุกต์ใช้อะลูมิเนียมอะโนไดซ์ และผลการวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์ของตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบท่อสุญญากาศที่ประยุกต์ใช้อะลูมิเนียมอะโนไดซ์เป็นตัวดูดกลืนรังสีอาทิตย์ เพื่อประเมินความเป็นไปได้ในการนำออกสู่เชิงพาณิชย์ ผลจากการศึกษาและการทดสอบมีรายละเอียดดังต่อไปนี้



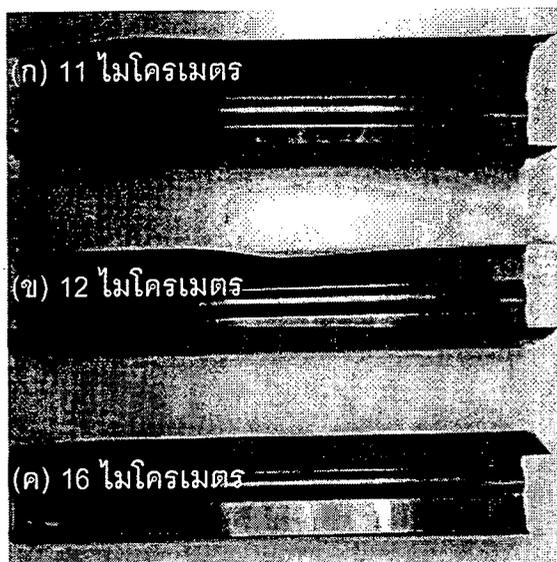
(ก) ก่อนผ่านกระบวนการอะโนไดซ์



(ข) หลังผ่านกระบวนการอะโนไดซ์

ภาพ 25 แผ่นอะลูมิเนียม ก่อน-หลัง ผ่านกระบวนการอะโนไดซ์

จากภาพ 25 แผ่นอะลูมิเนียมขึ้นรูปหนา 0.002 เมตร ยาว 1.6 เมตร ก่อนผ่านกระบวนการอะโนไดซ์ ภาพ 25 (ก) แสดงลักษณะสีเงิน มันวาว เมื่อผ่านกระบวนการทำฟิล์ม อะโนไดซ์ที่มีนิกเกิลในชั้นฟิล์ม (Nickel-pigmented aluminium oxide, $\text{Ni-Al}_2\text{O}_3$) หรือแผ่นอะลูมิเนียมอะโนไดซ์ พบว่ามีสีดำ และความมันวาวลดลง ภาพ 25 (ข)

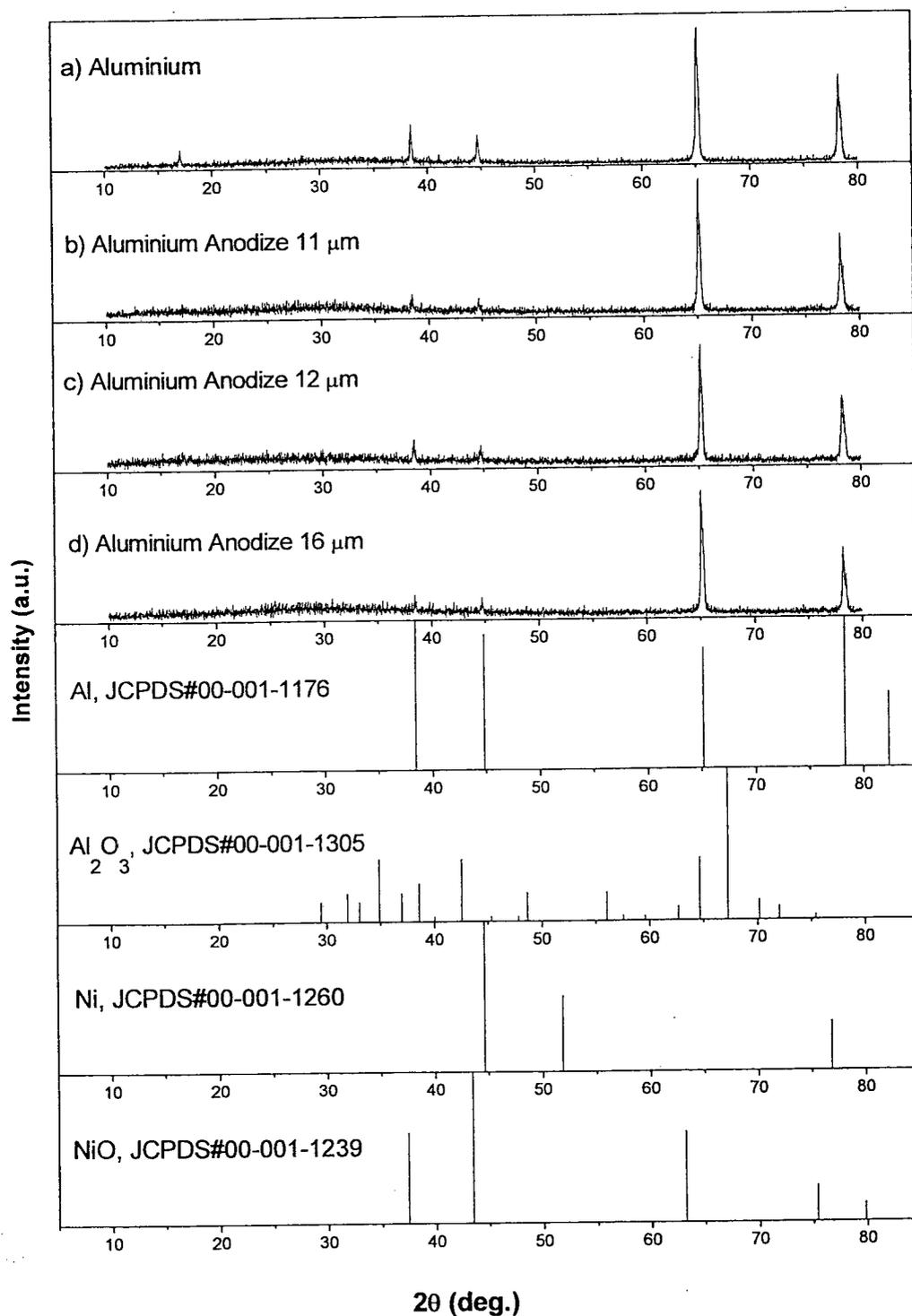


ภาพ 26 อะลูมิเนียมอะโนไดซ์ทั้ง 3 ความหนา

จากภาพ 26 ลักษณะของแผ่นอะลูมิเนียมเมื่อผ่านการอะโนไดซ์ ความหนา 11, 12 และ 16 ไมโครเมตร ทั้งสามความหนามีลักษณะคล้ายคลึงกัน ทำให้ไม่สามารถระบุความหนาและตำแหน่งของชั้นฟิล์มได้ อีกทั้งจำเป็นต้องศึกษาองค์ประกอบของชั้นฟิล์มที่เกิดขึ้น ต้องใช้เครื่องมือวัดที่ความละเอียดระดับนาโนเมตรเข้ามาช่วย จึงใช้เทคนิค XRD เพื่อระบุว่าชั้นฟิล์มนี้มีองค์ประกอบของธาตุที่ใส่ในกระบวนการอะโนไดซ์หรือไม่ ใช้เทคนิค SEM ระบุความหนาของชั้นฟิล์มที่เกิดขึ้น ใช้เทคนิค SEM-EDS เพื่อระบุปริมาณของธาตุ ซึ่งมีผลการทดลองตามเทคนิคที่ใช้ในการวิเคราะห์ดังต่อไปนี้

ส่วนที่ 1 ผลการวิเคราะห์ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของอะลูมิเนียมอะโนไดซ์

1. รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (XRD pattern)



ภาพ 27 รูปแบบ XRD ของแผ่นอะลูมิเนียมและแผ่นอะลูมิเนียมอะโนไดซ์ 3 ความหนา เทียบกับฐานข้อมูล JCPDS ของ Al, Al₂O₃, Ni และ NiO

ภาพ 26 แสดงรูปแบบ XRD ของแผ่นอะลูมิเนียมและแผ่นอะลูมิเนียมออกไซด์ที่มีนิเกิลทั้ง 3 ความหนาเทียบกับฐานมูลรูปแบบ XRD ของ JCPDS ของ Al, Al₂O₃, Ni และ NiO [55] พบว่ารูปแบบ XRD ของแผ่นอะลูมิเนียมและแผ่นอะลูมิเนียมออกไซด์มีเฟสที่ตรงและสอดคล้องกับเฟสมาตรฐานของอะลูมิเนียมเพียงเฟสเดียว ที่มีโครงสร้างผลึกแบบ cubic ที่มี space group เป็น Fm3M และ space group number ที่ 225 หรือตรงกับฐานข้อมูล JCPDS รหัส 001-1176 (Al, JCPDS#001-1176) อย่างไรก็ตามผลการทดลองของแผ่นอะลูมิเนียมออกไซด์ทั้ง 3 ความหนา ไม่ปรากฏรูปแบบ XRD ของอะลูมิเนียมออกไซด์ (Al₂O₃), นิเกิล (Ni) และ นิเกิลออกไซด์ (NiO) ที่เคลือบอยู่ในฟิล์มของอะลูมิเนียมออกไซด์ อาจจะเนื่องมาจากเป็นฟิล์มที่มีลักษณะที่ค่อนข้างบางและมีปริมาณนิเกิลที่ต่ำ ทำให้ไม่สามารถวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD

2. Scanning Electron Microscope (SEM)

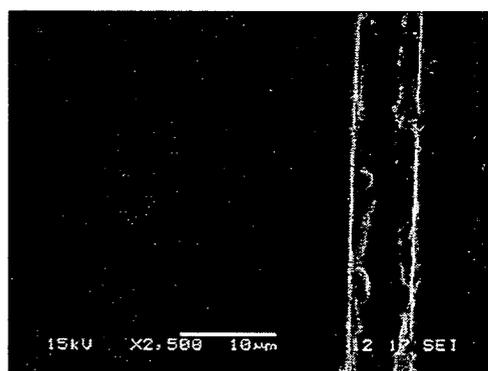
การวิเคราะห์สัณฐานวิทยาของแผ่นอะลูมิเนียมออกไซด์ด้วย SEM แสดงในภาพ 27-29 ภาพ SEM ของตัวอย่างในภาพ 28-30 (ก) แสดงการเกิดฟิล์มอะลูมิเนียมออกไซด์มีนิเกิลบนพื้นผิวหน้าของแผ่นอะลูมิเนียม นอกจากนี้ยังพบว่าพื้นผิวแผ่นอะลูมิเนียมมีความหยาบและรอยร้าว เนื่องจากกระบวนการผลิตแผ่นอะลูมิเนียมด้วยกระบวนการรีดร้อน ภาพ 28-30 (ข) แสดงภาพภาคตัดขวางของฟิล์มอะลูมิเนียมออกไซด์ที่มีนิเกิลผสมอยู่ภายในชั้นฟิล์ม ความหนาของฟิล์มอะลูมิเนียมออกไซด์มีความคงที่ตลอดชิ้นงานและมีความหนาเฉลี่ยดังตาราง 3

ตาราง 3 ความหนาเฉลี่ยของชั้นเคลือบอะลูมิเนียมออกไซด์

ความหนาชั้นฟิล์ม (ไมโครเมตร)	ความหนาชั้นฟิล์มเฉลี่ยจากที่วัดจากภาพ SEM (ไมโครเมตร)
1	11
2	12
3	16

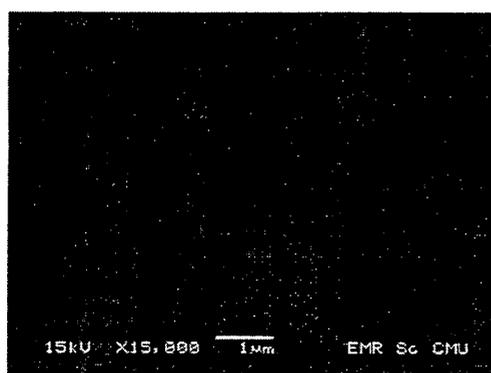


(ก) พื้นผิวหน้า

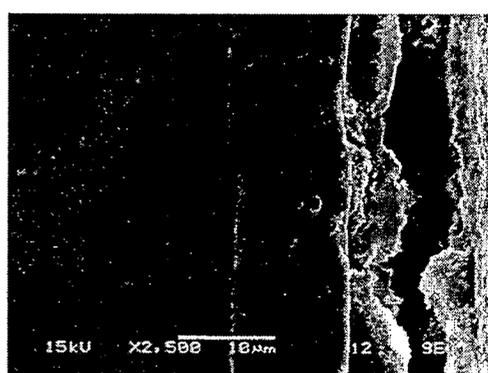


(ข) ภาคตัดขวาง

ภาพ 28 แผ่นอะลูมิเนียมอะโนไดซ์ความหนา 11 ไมโครเมตร

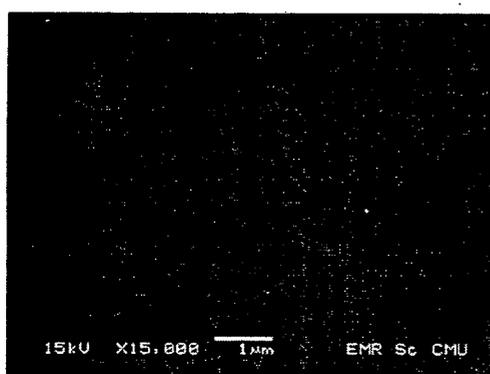


(ก) พื้นผิวหน้า

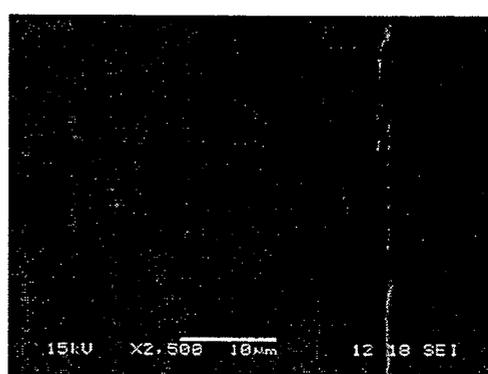


(ข) ภาคตัดขวาง

ภาพ 29 แผ่นอะลูมิเนียมอะโนไดซ์ความหนา 12 ไมโครเมตร



(ก) พื้นผิวหน้า

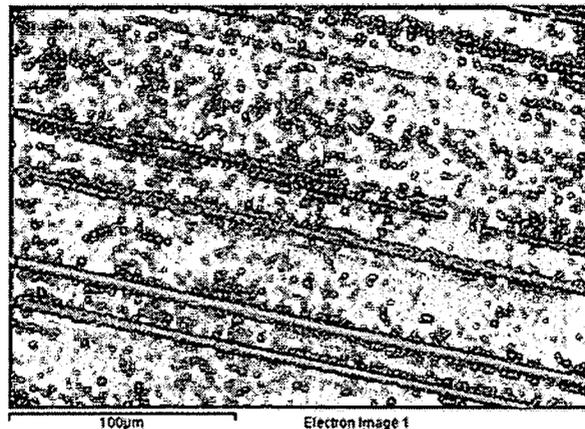


(ข) ภาคตัดขวาง

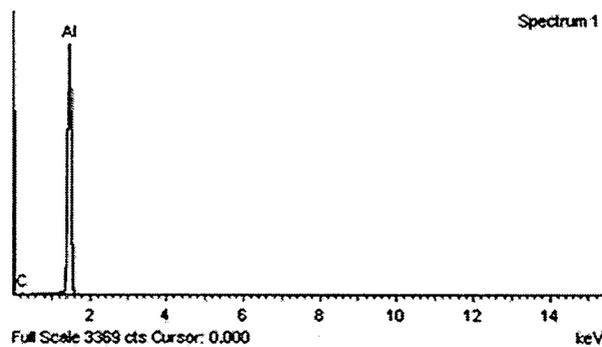
ภาพ 30 แผ่นอะลูมิเนียมอะโนไดซ์ความหนา 16 ไมโครเมตร

3. Energy Dispersive Spectroscopy (EDS)

การหาองค์ประกอบของธาตุเคมี เพื่อยืนยันความบริสุทธิ์ของแผ่นอะลูมิเนียมทำได้ โดยการใช้กล้อง SEM-EDS โดยเครื่อง SEM ที่มีการติดตั้งหัววัดรังสีเอ็กซ์เฉพาะธาตุ (Characteristic X-ray) ซึ่งแต่ละธาตุเคมี มีรังสีเอ็กซ์เฉพาะธาตุแตกต่างกัน จึงทำให้สามารถ นำมาใช้ประโยชน์ในการวิเคราะห์หาธาตุเคมีของแผ่นอะลูมิเนียม ได้ผลดังภาพ 30 ผลการ วิเคราะห์พบว่าองค์ประกอบของแผ่นอะลูมิเนียมก่อนผ่านกระบวนการอะโนไดซ์มีองค์ประกอบคือ อะลูมิเนียมเท่านั้น



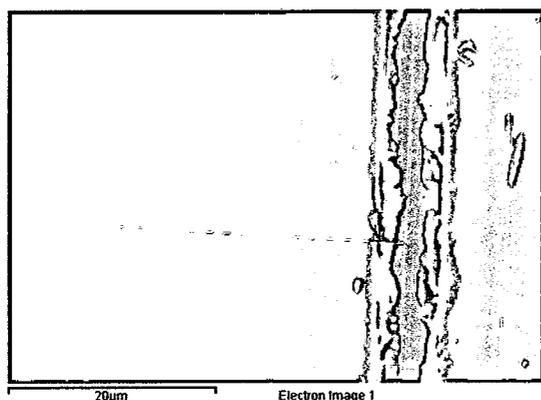
(ก) ตำแหน่งของการวิเคราะห์



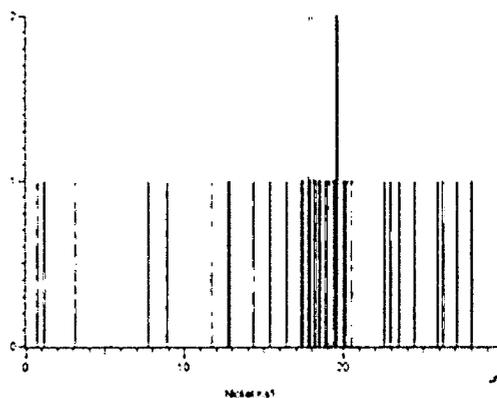
(ข) องค์ประกอบทางเคมี

ภาพ 31 ผลวิเคราะห์แผ่นอะลูมิเนียมด้วยเครื่อง SEM-EDS

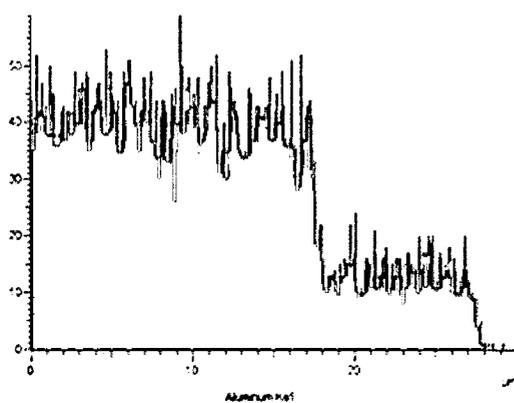
การหาส่วนประกอบของธาตุเคมี เพื่อยืนยันการมีนิกเกิลผสมอยู่ในฟิล์ม อะลูมิเนียมออกไซด์ของแผ่นอะลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการทำฟิล์มอะโนไดซ์ สามารถวิเคราะห์ได้ โดยการใช้กล้อง SEM-EDS ได้ผลการวิเคราะห์ที่แสดงในภาพ 31 จากการศึกษาพบว่าชั้นฟิล์ม อะลูมิเนียมออกไซด์ ประกอบด้วยธาตุเคมีดังนี้ อะลูมิเนียม นิกเกิล และออกซิเจน แต่ปริมาณของ นิกเกิลมีปริมาณที่น้อยมาก เมื่อเทียบกับอะลูมิเนียมและออกซิเจน ซึ่งผลที่ได้สอดคล้องกับผลจาก การวิเคราะห์ XRD และกระบวนการทำอะลูมิเนียมอะโนไดซ์ที่มีการใส่นิกเกิลในชั้นฟิล์มของ อะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) ที่มีส่วนประกอบทางเคมีหลักเป็นอะลูมิเนียมและออกซิเจน จากผล การวิเคราะห์ SEM-EDS ยืนยันได้ว่าชั้นฟิล์มอะลูมิเนียมออกไซด์ มีส่วนประกอบของนิกเกิลผสม อยู่จริง และมีปริมาณเพียงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับอะลูมิเนียมและออกซิเจน



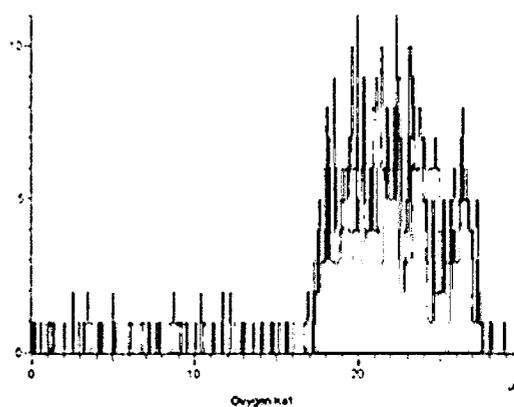
(ก) ตำแหน่งการวิเคราะห์



(ข) Nickel Ka1



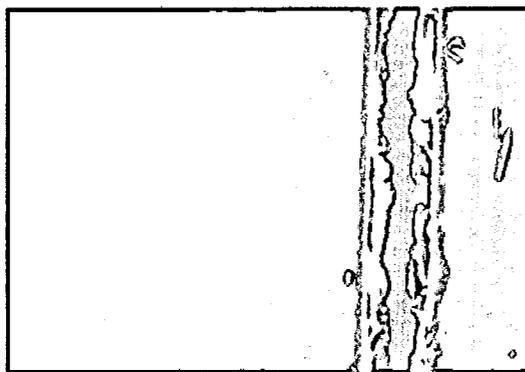
(ค) Aluminum Ka1



(ง) Oxygen Ka1

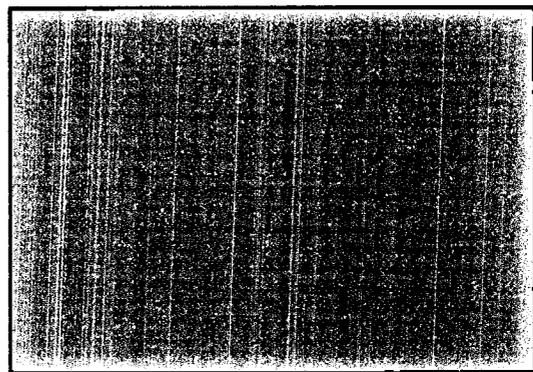
ภาพ 32 ผลวิเคราะห์ SEM-EDS linescan ของภาพตัดขวางแผ่นอะลูมิเนียมอะโนไดซ์

การระบุตำแหน่งของธาตุบนแผ่นฟิล์มอะโนไดซ์ สามารถวิเคราะห์ได้จาก SEM-EDS Mapping ภาพ 32 แสดงผลการวิเคราะห์การกระจายตัวของ อะลูมิเนียม นิกเกิล และออกซิเจน บนแผ่นฟิล์ม พบว่าชั้นฟิล์มที่เกิดขึ้นมีนิกเกิลและออกซิเจนกระจายตัวรวมกัน โดยตำแหน่งที่ใกล้กับชั้นอะลูมิเนียม พบนิกเกิลรวมกับออกซิเจน ในขณะที่ตำแหน่งผิวชั้นนอกของชั้นฟิล์มมีเพียงออกซิเจนเท่านั้นไม่พบนิกเกิล ภาพ 28-29 แสดงเพียง 1 ความหนาของชั้นฟิล์มอะโนไดซ์ที่ 16 ไมโครเมตร ส่วนความหนาของชั้นฟิล์ม 11 และ 12 ไมโครเมตร นั้นมีองค์ประกอบธาตุเคมีและรูปแบบการกระจายตัวของธาตุเหมือนกันกับความหนาชั้นฟิล์ม 16 ไมโครเมตร ยกเว้นปริมาณนิกเกิลเท่านั้นที่มีปริมาณลดลงตามความหนา ตามลำดับ



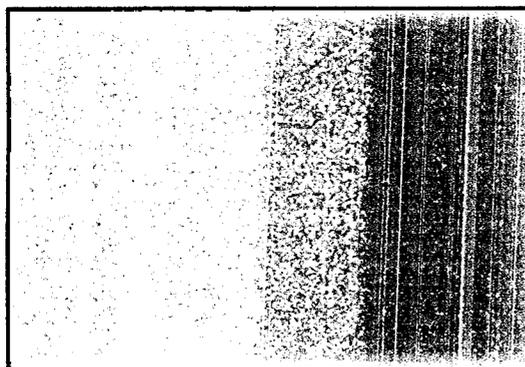
Electron Image 1

(ก) ตำแหน่งการวิเคราะห์



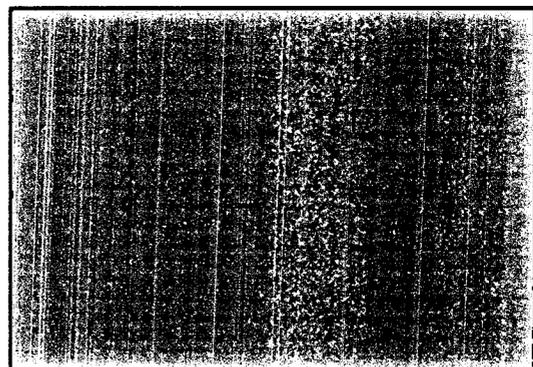
Ni Ka1

(ข) Nickle



Al Ka1

(ค) Aluminum



O Ka1

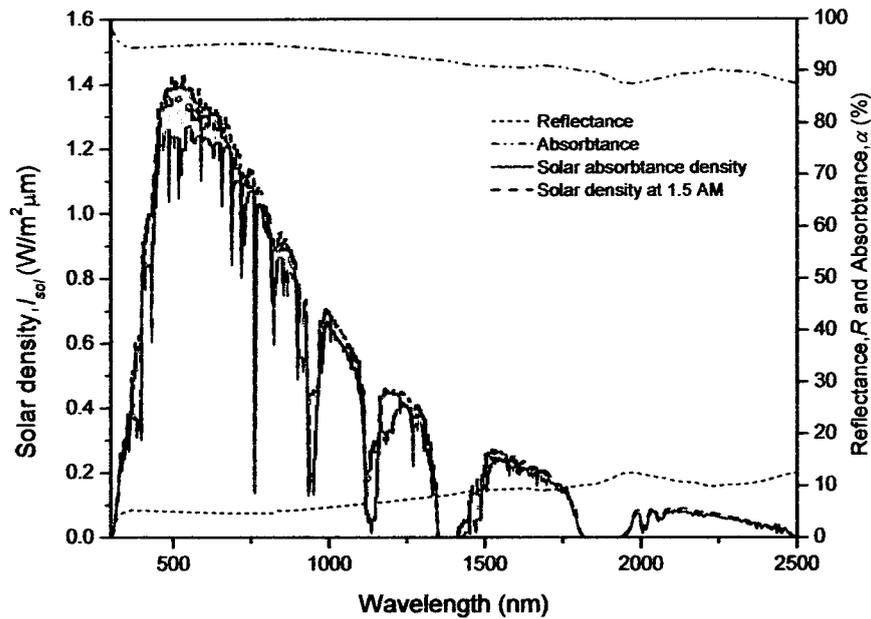
(ง) Oxygen

ภาพ 33 ผลวิเคราะห์ SEM-EDS Mapping ของภาพตัดขวางแผ่นอะลูมิเนียมอะโนไดซ์

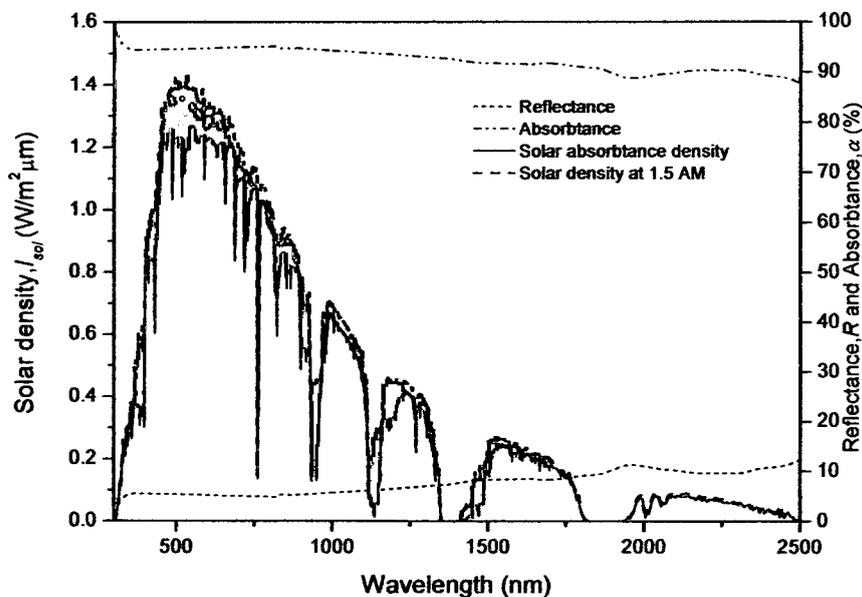
4. Ultraviolet-Visible-Near Infrared Spectrometer

ผลจากการวัดค่าการสะท้อนรังสีของแผ่นอะลูมิเนียมอะโนไดซ์ทั้ง 3 ความหนา ด้วยเครื่อง Ultraviolet-Visible-Near Infrared Spectrometer ที่ช่วงความยาวคลื่น 250-2,500 นาโนเมตร นำผลที่ได้มาคำนวณหาค่าการดูดกลืนรังสีตามสมการที่ 13 ผลที่ได้เรียงตามความหนาที่ 11, 12 และ 16 ไมโครเมตร แสดงในภาพ 33-35 ตามลำดับ ซึ่งทั้ง 3 ความหนาแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยยะสำคัญ เห็นได้ว่าค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์ของแผ่นอะลูมิเนียมอะโนไดซ์ที่มีนิกเกิลในชั้นฟิล์มมีค่าที่ค่อนข้างต่ำและมีค่าการดูดกลืนรังสีอาทิตย์ที่สูง ในช่วงความยาวคลื่น 300 – 2,500 ไมโครเมตร โดยมีค่าเฉลี่ยตลอดช่วงความยาวคลื่น ดังแสดงในตาราง 4 โดยผลการทดลองสอดคล้องกับสมบัติตัวดูดกลืนรังสีอาทิตย์ตามทฤษฎี คือ มีค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์ที่ต่ำ ($R = 0$) และการดูดกลืนรังสีอาทิตย์ที่สูง ($\alpha = 1$) ในช่วงความยาวคลื่น 300-2,500 นาโนเมตร [4, 51]

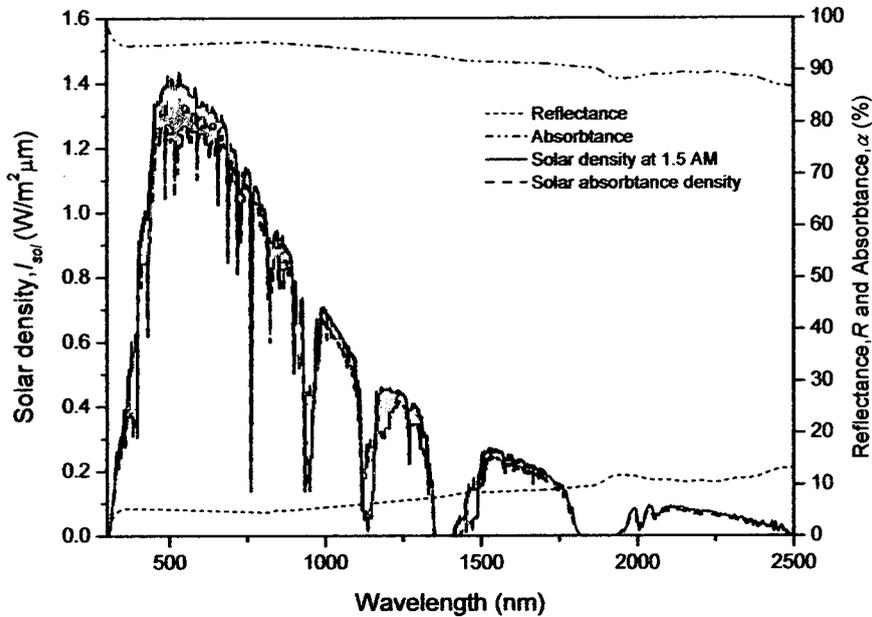
เมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยที่ผ่านมาและที่มีการใช้งานจริงในท้องตลาดสำหรับตัวดูดกลืนรังสีอาทิตย์แบบมีสมบัติเลือกัรับรังสีอาทิตย์พบว่า มีค่าการดูดกลืนรังสีอยู่ในช่วง 0.85-0.95 [4, 16] แสดงให้เห็นว่า ค่าการดูดกลืนรังสีของแผ่นอะลูมิเนียมอะโนไดซ์ มีค่าใกล้เคียงและอยู่ในช่วงที่มีการดูดกลืนรังสีที่สูง ผลการคำนวณค่าการดูดกลืนรังสีของแต่ละความยาวคลื่นมาเทียบกับความหนาแน่นกำลังรังสีอาทิตย์ที่ air mass เท่ากับ 1.5 AM (เส้นสีดำ, - - -) ผลที่ได้แสดงค่าการดูดกลืนกำลังรังสีอาทิตย์ในแต่ละความยาวคลื่นของรังสีอาทิตย์ (เส้นสีแดง, —) โดยมีค่าการดูดกลืนกำลังรังสีอาทิตย์ใกล้เคียงกับความหนาแน่นกำลังรังสีอาทิตย์ ดังแสดงในภาพ 30-32 เมื่อเปรียบเทียบระหว่างความหนาของชั้นฟิล์มอะโนไดซ์กับค่าการดูดกลืนรังสีอาทิตย์ พบว่าสัมพันธ์กันแบบแปรผันตาม เมื่อชั้นฟิล์มมีความหนาเพิ่มมากขึ้นส่งผลให้ค่าการดูดกลืนรังสีอาทิตย์มีค่าเพิ่มขึ้นด้วย เนื่องมาจากชั้นฟิล์มอะโนไดซ์ที่ความหนาเพิ่มขึ้นจะมีปริมาณนิกเกิลที่เพิ่มขึ้นตาม จากผลการทดลองทำให้สามารถสรุปได้ว่าแผ่นอะลูมิเนียมอะโนไดซ์สามารถใช้เป็นตัวดูดกลืนรังสีอาทิตย์ได้



ภาพ 34 ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนรังสี (Reflectance) ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนรังสี (Absorbance) และค่าการดูดกลืนรังสีอาทิตย์ของอะลูมิเนียมออกไซด์ที่มีความหนา 11 ไมโครเมตร เทียบกับความหนาแน่นกำลังรังสีอาทิตย์



ภาพ 35 ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนรังสี (Reflectance) ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนรังสี (Absorbance) และค่าการดูดกลืนรังสีอาทิตย์ของอะลูมิเนียมออกไซด์ที่มีความหนา 12 ไมโครเมตร เทียบกับความหนาแน่นกำลังรังสีอาทิตย์



ภาพ 36 ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนรังสี (Reflectance) ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนรังสี (Absorbance) และค่าการดูดกลืนรังสีอาทิตย์ของอะลูมิเนียมอะโนไดซ์ที่ความหนา 16 ไมโครเมตร เทียบกับความหนาแน่นกำลังรังสีอาทิตย์

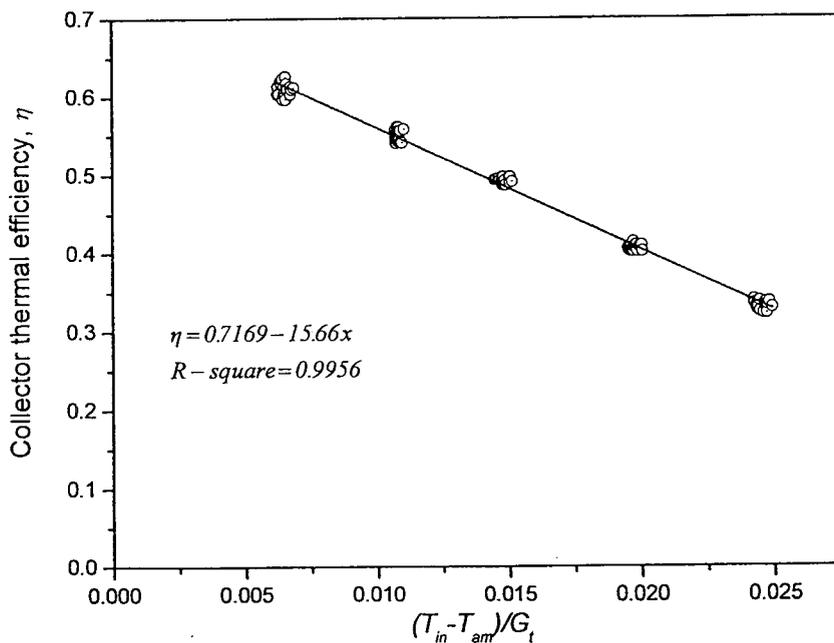
การเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนรังสีอาทิตย์และสัมประสิทธิ์การสะท้อนรังสีอาทิตย์ของอะลูมิเนียมอะโนไดซ์กับความหนา แสดงในตาราง 4 ผลการเปรียบเทียบพบว่า เมื่อความหนาเพิ่มขึ้นค่าการดูดกลืนรังสีมีค่าเพิ่มขึ้นตาม แต่ในทางกลับกันค่าการสะท้อนรังสีมีค่าลดลง ซึ่งความสัมพันธ์ของค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนรังสีอาทิตย์และสัมประสิทธิ์การสะท้อนรังสีอาทิตย์ ของวัสดุใดๆ เมื่อรวมกันแล้ว มีค่าเป็น 1

ตาราง 4 ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนรังสีอาทิตย์ (Absorbance) และสัมประสิทธิ์การสะท้อนรังสีอาทิตย์ (Reflectance) ของอะลูมิเนียมอะโนไดซ์

ความหนาฟิล์ม อะลูมิเนียมอะโนไดซ์ (ไมโครเมตร)	ค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์ (Reflectance)		ค่าการดูดกลืนรังสีอาทิตย์ (Absorbance)	
	(1)	(%)	(1)	(%)
11	0.0578	5.78	0.9422	94.22
12	0.0583	5.83	0.9417	94.17
16	0.0527	5.27	0.9473	94.73

ส่วนที่ 2 ผลการวิเคราะห์ประสิทธิภาพตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบท่อสุญญากาศที่ประยุกต์ใช้ อะลูมิเนียมอะโนไดซ์เป็นตัวดูดกลืนรังสีอาทิตย์

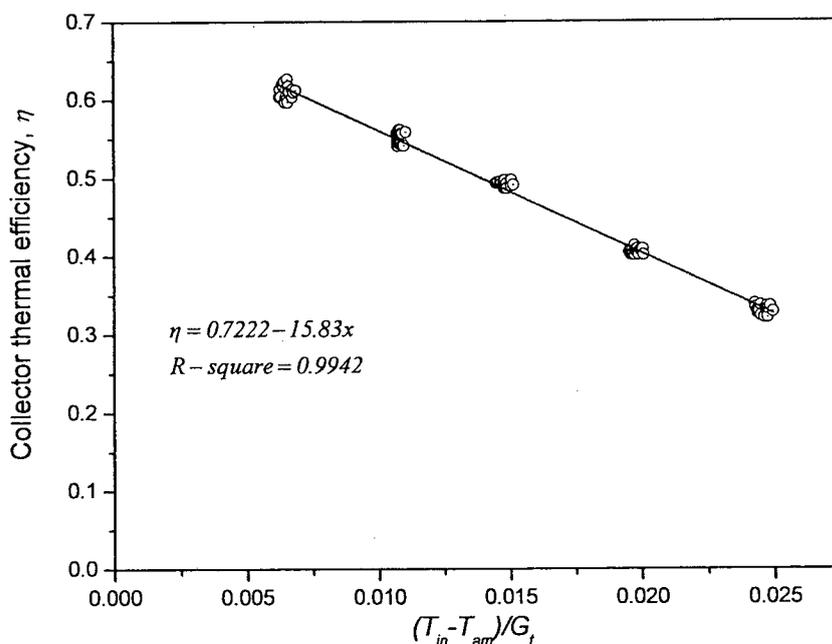
การดำเนินการทดสอบประสิทธิภาพเชิงความร้อนของตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบท่อสุญญากาศที่ประยุกต์ใช้อลูมิเนียมอะโนไดซ์เป็นตัวดูดกลืนรังสีอาทิตย์ ใช้ตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบท่อสุญญากาศ ทำจากแก้วชนิดบอโรซิลิเกต (Borosilicate) มีความยาวตลอดทั้งท่อ 1.8 เมตร จำนวน 15 ท่อ ใช้แผ่นอะลูมิเนียมอะโนไดซ์เป็นตัวดูดกลืนรังสีอาทิตย์ ทำการบันทึกและเก็บข้อมูลพารามิเตอร์ต่างๆ ดังนี้ อุณหภูมิอากาศแวดล้อม (T_a), อุณหภูมิน้ำเข้าตัวเก็บรังสีอาทิตย์ (T_i), อุณหภูมิน้ำออกจากตัวเก็บรังสีอาทิตย์ (T_o), อัตราการไหลของน้ำ (\dot{m}) และค่ารังสีอาทิตย์ (G) ในแนวตั้งฉากกับระนาบตัวเก็บรังสีอาทิตย์ โดยมีพื้นที่รับรังสีอาทิตย์ 1.08 ตารางเมตร ตำแหน่งดังภาพ 15



ภาพ 37 ประสิทธิภาพตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบท่อสุญญากาศประยุกต์ใช้อลูมิเนียมอะโนไดซ์ความหนา 11 ไมโครเมตร เป็นตัวดูดกลืนรังสีอาทิตย์

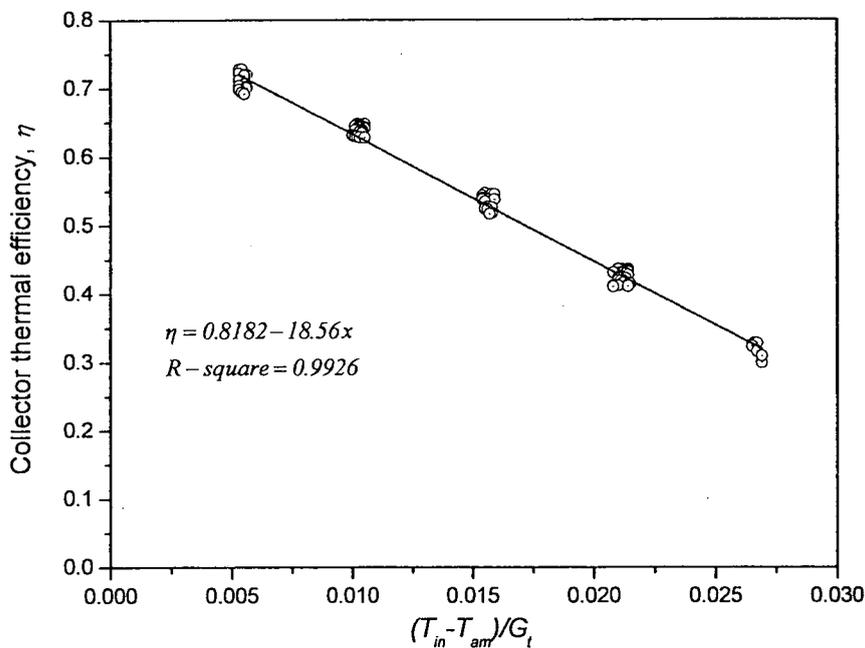
ผลการทดสอบและคำนวณหาประสิทธิภาพเชิงความร้อนของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ที่ประยุกต์ใช้ฟิล์มอะลูมิเนียมความหนา 11 ไมโครเมตร ตามค่าพารามิเตอร์ในตาราง 5 นำผลทดสอบมาเปรียบเทียบกับสมการที่ 5 ได้ผลดังแสดงในภาพ 37 พิจารณาว่า U_L มีค่าคงที่และไม่เปลี่ยนแปลง ตามสมการ 5 พบว่าค่าประสิทธิภาพทางความร้อนสูงสุด (η_{max}) ที่อุณหภูมิน้ำขาเข้ามีค่าเท่ากับอุณหภูมิสิ่งแวดล้อม ($\Delta T = T_i - T_a = 0$) มีค่าเท่ากับ 0.72 และมีค่าผลคูณของแฟกเตอร์

การดึงความร้อนกับสัมประสิทธิ์การสูญเสียความร้อนรวมหรือค่าการสูญเสียความร้อน ($-F_R U_L$) เท่ากับ $-15.66 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ (ความชันของกราฟ)



ภาพ 38 ประสิทธิภาพตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบท่อสุญญากาศประยุกต์ใช้อะลูมิเนียมอะโนไดซ์ความหนา 12 ไมโครเมตร เป็นตัวดูดกลืนรังสีอาทิตย์

ผลการทดสอบและคำนวณหาประสิทธิภาพเชิงความร้อนของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ที่ประยุกต์ใช้ฟิล์มอะลูมิเนียมความหนา 12 ไมโครเมตร ตามค่าพารามิเตอร์ในตาราง 5 นำผลทดสอบมาเปรียบเทียบกับสมการที่ 5 ได้ผลดังแสดงในภาพ 38 พิจารณาว่า U_L มีค่าคงที่และไม่เปลี่ยนแปลง ตามสมการ 5 พบว่าค่าประสิทธิภาพทางความร้อนสูงสุด (η_{max}) ที่อุณหภูมิน้ำขาเข้ามีค่าเท่ากับอุณหภูมิสิ่งแวดล้อม ($\Delta T = T_i - T_a = 0$) มีค่าเท่ากับ 0.72 และมีค่าผลคูณของแฟกเตอร์การดึงความร้อนกับสัมประสิทธิ์การสูญเสียความร้อนรวมหรือค่าการสูญเสียความร้อน ($-F_R U_L$) เท่ากับ $-15.83 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ (ความชันของกราฟ)



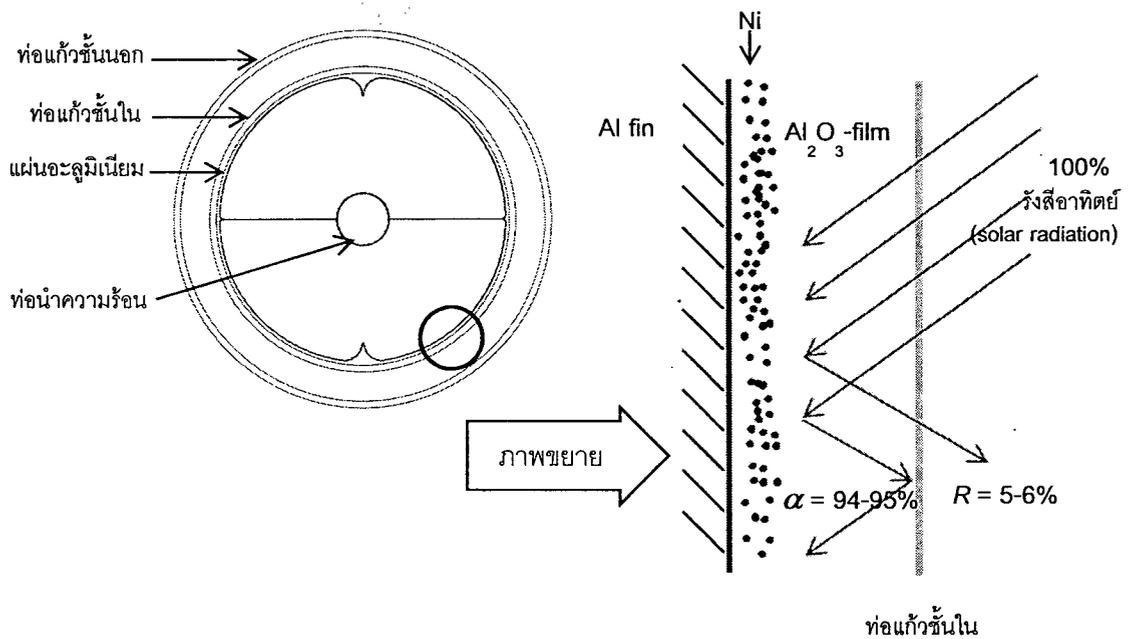
ภาพ 39 ประสิทธิภาพตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบท่อสุญญากาศประยุกต์ใช้อะลูมิเนียมอะโนไดซ์ความหนา 16 ไมโครเมตร เป็นตัวดูดกลืนรังสีอาทิตย์

ผลการทดสอบและคำนวณหาประสิทธิภาพเชิงความร้อนของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ที่ประยุกต์ใช้ฟิล์มอะลูมิเนียมความหนา 16 ไมโครเมตร ตามค่าพารามิเตอร์ในตาราง 5 นำผลทดสอบมาเปรียบเทียบกับสมการที่ 5 ได้ผลดังแสดงในภาพ 39 พิจารณาว่า U_L มีค่าคงที่และไม่เปลี่ยนแปลง ตามสมการ 5 พบว่าค่าประสิทธิภาพทางความร้อนสูงสุด (η_{max}) ที่อุณหภูมิน้ำขาเข้ามีค่าเท่ากับอุณหภูมิสิ่งแวดล้อม ($\Delta T = T_i - T_a = 0$) มีค่าเท่ากับ 0.82 และมีค่าผลคูณของแฟกเตอร์การดึงความร้อนกับสัมประสิทธิ์การสูญเสียความร้อนรวมหรือค่าการสูญเสียความร้อน ($-F_R U_L$) เท่ากับ $-18.56 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ (ความชันของกราฟ)

จากภาพ 36-39 สามารถเขียนเป็นสมการได้ ดังตารางที่ 6 สมการที่ได้จากการทดสอบด้วยแท่นทดสอบแบบกลางแจ้ง ณ วิทยาลัยพลังงานทดแทนนั้น เป็นสมการถดถอยเชิงเส้นสามารถบอกได้ถึงค่าสมรรถนะทางความร้อนของตัวเก็บรังสีอาทิตย์และผลคูณระหว่างสัมประสิทธิ์การสูญเสียความร้อนรวมของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ จากความสัมพันธ์ดังกล่าวสามารถหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ คือ ค่าประสิทธิภาพทางความร้อนสูงสุด (η_o), สัมประสิทธิ์การดูดกลืนรังสี

(α), สัมประสิทธิ์การส่องผ่าน (τ) [56], Absorbance transmittance product ($\alpha \cdot \tau$) และ สัมประสิทธิ์การสูญเสียความร้อนรวม ($-F_R U_L$) แสดงค่า ดังตารางที่ 6

เมื่อ $\Delta T = 0$ การคำนวณหาค่า η_{max} ของสมการทั้งสามความหนา พบว่ามีค่าแปรผันตามความหนาของชั้นฟิล์ม มีความสัมพันธ์กับปริมาณสารเลือกรับรังสีอาทิตย์ภายในชั้นฟิล์ม คือนิกเกิล ซึ่งนิกเกิลมีคุณสมบัติเป็นสารเลือกรับรังสีอาทิตย์ ในชั้นฟิล์มที่หนาขึ้นมีปริมาณนิกเกิลเพิ่มขึ้น ทำให้สามารถดูดกลืนแสงอาทิตย์แล้วเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อนได้มากขึ้น และมีค่าสูงกว่างานวิจัยที่มีผ่านมา สำหรับการพัฒนาตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบท่อสุญญากาศ ($\eta = 0.55-0.70$) [33, 37, 57]



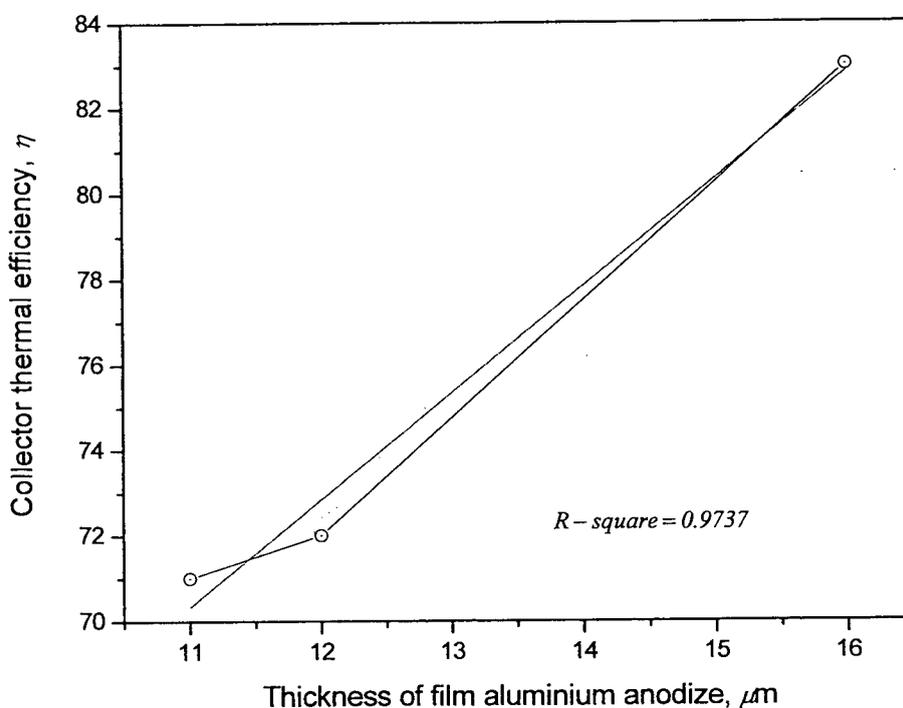
ภาพ 40 กลไกการเปลี่ยนรังสีอาทิตย์เป็นความร้อนถ่ายเทไปยังแผ่นอะลูมิเนียม

กลไกการเปลี่ยนรังสีอาทิตย์เป็นความร้อนเกิดขึ้นภายในชั้นฟิล์ม สามารถอธิบายได้ดังภาพ 40 เมื่อรังสีอาทิตย์ผ่านท่อแก้วชั้นนอกเข้ามายังชั้นของสุญญากาศแล้วผ่านท่อแก้วชั้นในไปยังชั้นของฟิล์มอะลูมิเนียมออกไซด์ที่มีการเติมนิกเกิลลงไปภายในชั้นฟิล์ม โดยนิกเกิลทำให้ฟิล์มอะลูมิเนียมอะโนไดซ์เป็นสีดำซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวดูดกลืนรังสีอาทิตย์และเปลี่ยนพลังงานรังสีอาทิตย์ให้เป็นพลังงานความร้อน เมื่อพิจารณาในส่วนของความร้อนถูกถ่ายโอนความร้อนไปยังชั้นของแผ่นครีบอะลูมิเนียมและท่อนำความร้อน (heat pipe) ตามลำดับ เนื่องจากนิกเกิลที่เติมลงไปภายในฟิล์มอะลูมิเนียมออกไซด์ส่วนใหญ่อยู่ในรูปของฟิล์มด้านที่ติดกับผิวแผ่นครีบอะลูมิเนียมเดิม ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองจากเทคนิค SEM และ SEM-EDS ดังที่กล่าวไปแล้วข้างต้น จาก

ลักษณะของฟิล์มอะลูมิเนียมออกไซด์ที่เกิดขึ้นส่งผลให้การส่งผ่านความร้อนได้ดีขึ้นเมื่อความหนาของชั้นฟิล์มอะลูมิเนียมออกไซด์มากขึ้น นอกจากนี้ในส่วนของฟิล์มอะลูมิเนียมออกไซด์ที่อยู่ด้านบนของชั้นนิกเกิลมีคุณสมบัติเป็นฉนวน (สารประกอบออกไซด์) มีส่วนช่วยในการลดค่าการสูญเสียความร้อนได้และรวมถึงลดการสะท้อนรังสีอาทิตย์ (antireflection) ซึ่งทำให้ค่าการสะท้อน (reflectance) มีค่าต่ำ (5-6%) กล่าวคือค่าความร้อนที่เกิดขึ้นถูกถ่ายโอนมายังแผ่นครีบบอะลูมิเนียมได้ดีกว่าการถ่ายโอนไปยังชั้นฟิล์มอะลูมิเนียมออกไซด์ ส่งผลทำให้แผ่นครีบบอะลูมิเนียมสามารถถ่ายโอนความร้อนให้กับท่อทำความร้อนได้ดียิ่งขึ้น

Tesfamichael, T. [58] ได้รายงานผลการทดลองว่าช่วงความยาวคลื่นของการส่งผ่านและการดูดกลืนรังสีอาทิตย์ (transmittance-absorption transition) สามารถควบคุมได้ด้วยความหนาของชั้นฟิล์มที่เคลือบที่มีคุณสมบัติเป็นสารประกอบ (composite coatings) ซึ่งชั้นฟิล์มของสารประกอบยังขึ้นอยู่กับอัตราส่วนเชิงปริมาตร (volume fraction) รูปร่างลักษณะของอนุภาค (shape of the particles) และค่าคงที่เชิงแสง (optical constants) ของสารประกอบ คุณสมบัติเหล่านี้สามารถช่วยให้ฟิล์มของสารประกอบมีความสามารถในการเป็นสารเลือกรับรังสีอาทิตย์ โดยปกติความหนาของสารประกอบมีค่าเท่ากับ 0.5-1.0 ไมโครเมตร ค่าอัตราส่วนโลหะเชิงปริมาตรอยู่ที่ 0.3-0.4 ซึ่งสารประกอบดังกล่าวมีค่าการดูดกลืนรังสีอาทิตย์ (solar absorptance) ระหว่าง 0.94-0.97 และค่าการปลดปล่อยความร้อน (thermal emittance) ประมาณ 0.10-0.20 โดยความหนาของฟิล์มสารประกอบที่มีปริมาณของรงควัตถุน้อยสามารถมีสมบัติเป็นตัวดูดกลืนรังสีอาทิตย์แต่ส่งผลทำให้มีค่าการปลดปล่อยความร้อนที่สูง ดังนั้น เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับผลการทดลองในงานวิจัยนี้ พบว่าความหนาของชั้นฟิล์มอะลูมิเนียมออกไซด์ที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่าการดูดกลืนรังสีอาทิตย์มีค่ามากขึ้นอย่างไม่มีนัยสำคัญ แต่มีความสอดคล้องกับค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ก็มีค่ามากขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของชั้นฟิล์มอะลูมิเนียมออกไซด์

ความสัมพันธ์ระหว่างค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนกับความหนาของชั้นฟิล์มอะลูมิเนียมอะโนไดซ์ จากภาพ 41 เห็นได้ว่าเมื่อความหนาของชั้นฟิล์มอะลูมิเนียมอะโนไดซ์มีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อความหนาเพิ่มขึ้นจาก 11 ไมโครเมตร เป็น 12 ไมโครเมตร คิดเป็นร้อยละ 9.09 ประสิทธิภาพเชิงความร้อนเพิ่มจากร้อยละ 71 เป็นร้อยละ 72 คิดเป็นร้อยละ 0.01 และเมื่อความหนาเพิ่มขึ้นจาก 11 ไมโครเมตร เป็น 16 ไมโครเมตร คิดเป็นร้อยละ 45.45 ประสิทธิภาพเชิงความร้อนเพิ่มจากร้อยละ 71 ร้อยละ 83 คิดเป็นร้อยละ 16.90 มีความสัมพันธ์เป็นแบบเชิงเส้น



ภาพ 41 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนกับความหนาของชั้นฟิล์มอะลูมิเนียมอะโนไดซ์

จากความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของชั้นฟิล์มอะลูมิเนียมออกไซด์กับประสิทธิภาพเชิงความร้อนแบบเชิงเส้น พบว่าเมื่อความหนาของชั้นฟิล์มเพิ่ม ประสิทธิภาพเชิงความร้อนเพิ่มตามอย่างมีนัยยะสำคัญ และจากกราฟในภาพ 41 สามารถคาดการณ์ได้ว่า หากเมื่อความหนาของชั้นฟิล์มอะลูมิเนียมออกไซด์ลดลง ย่อมส่งผลให้ประสิทธิภาพลดลงด้วย และเมื่อความหนาของชั้นฟิล์มอะลูมิเนียมออกไซด์เพิ่มขึ้น ย่อมส่งผลให้ประสิทธิภาพเพิ่มตามไปด้วย

แต่อย่างไรก็ตามความหนาของชั้นฟิล์มอะลูมิเนียมออกไซด์ ยังมีข้อจำกัด ในเรื่องของกระบวนการผลิตในโรงงานอุตสาหกรรม อีกทั้งชั้นฟิล์มอะลูมิเนียมออกไซด์นี้ มีสมบัติเป็นฉนวน หากมีความหนาหนามากขึ้น อาจส่งผลให้เป็นตัวสกัดกั้นความร้อนไม่ให้ส่งผ่านไปยังแผ่นอะลูมิเนียมได้ หรือหากเมื่อมีความหนาของชั้นฟิล์มที่น้อยมาก ก็ส่งผลให้ความสามารถในการถ่ายโอนความร้อนได้ในปริมาณที่น้อยด้วย เรื่องของขีดจำกัดของความหนานี้ จึงเป็นเรื่องที่ควรมีการศึกษาเพิ่มเติม

ตาราง 5 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดสอบประสิทธิภาพเชิงความร้อนของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ที่ประยุกต์ใช้ฟิล์มอะลูมิเนียม

พารามิเตอร์ (Parameter)	ความหนาฟิล์มอะลูมิเนียมอะโนไดซ์ (ไมโครเมตร)		
	11	12	16
ค่ารังสีอาทิตย์ (Test solar irradiance)	821-919 w/m ²	843-864 w/m ²	800-853 w/m ²
อุณหภูมิแวดล้อม (Surrounding air temperature)	30-32°C , ±1°C	29-31°C , ±1°C	31-33°C , ±1°C
อัตราการไหลเชิงมวล (Fluid mass flowrate)	0.0216 kg/s , ±1%	0.0216 kg/s , ±1%	0.0216 kg/s , ±1%
อุณหภูมิของน้ำขาเข้าตัวเก็บรังสีอาทิตย์ (Fluid temperature at the collector inlet)	35-55 °C , ±0.1°C	35-55 °C , ±0.1°C	35-55 °C , ±0.1°C

ตาราง 6 ความสัมพันธ์ระหว่างผลทดสอบประสิทธิภาพเชิงความร้อนกับความหนาของฟิล์มอะลูมิเนียมอะโนไดซ์

ความหนาฟิล์ม อะลูมิเนียมอะโนไดซ์ (ไมโครเมตร)	สมการ	η_0	α	τ [56]	$\alpha \cdot \tau$	$F_R U_L$	F_R	U_L
12	$\eta = 0.72 - 15.83(T_f - T_a)/G_t$	0.72	0.94	0.9	0.85	-15.83	0.85	18.57
16	$\eta = 0.81 - 18.56(T_f - T_a)/G_t$	0.82	0.95	0.9	0.85	-18.56	0.96	19.34

ตาราง 7 เปรียบเทียบสมการแสดงค่าสมรรถนะทางความร้อนของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ที่
 ประยุกต์ใช้อะลูมิเนียมอะโนไดซ์กับตัวเก็บรังสีอาทิตย์ที่จำหน่ายตามท้องตลาดที่
 ผ่านการทดสอบโดยวิทยาลัยพลังงานทดแทน [54]

ตัวเก็บรังสีอาทิตย์ที่ประยุกต์ใช้อะลูมิเนียมอะโนไดซ์	
11	$\eta = 0.71 - 15.66(T_f - T_a)/G_t$
12	$\eta = 0.72 - 15.83(T_f - T_a)/G_t$
16	$\eta = 0.81 - 18.56(T_f - T_a)/G_t$
ตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบแผ่นเรียบ	
Company A	$\eta = 0.57 - 21.91(T_f - T_a)/G_t$
Company B	$\eta = 0.62 - 10.37(T_f - T_a)/G_t$
Company C	$\eta = 0.64 - 16.24(T_f - T_a)/G_t$
Company D	$\eta = 0.45 - 3.60(T_f - T_a)/G_t$
Company E	$\eta = 0.65 - 21.81(T_f - T_a)/G_t$
Company F	$\eta = 0.65 - 9.23(T_f - T_a)/G_t$
Company G	$\eta = 0.66 - 8.40(T_f - T_a)/G_t$
Company H	$\eta = 0.88 - 8.84(T_f - T_a)/G_t$
ตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบหลอดแก้วสุญญากาศ Heat Pipe	
Company I	$\eta = 0.57 - 0.54(Tm^*) - 0.0036 G_t (Tm^*)^2$
Company J	$\eta = 0.80 - 2.77(Tm^*) - 0.0200 G_t (Tm^*)^2$

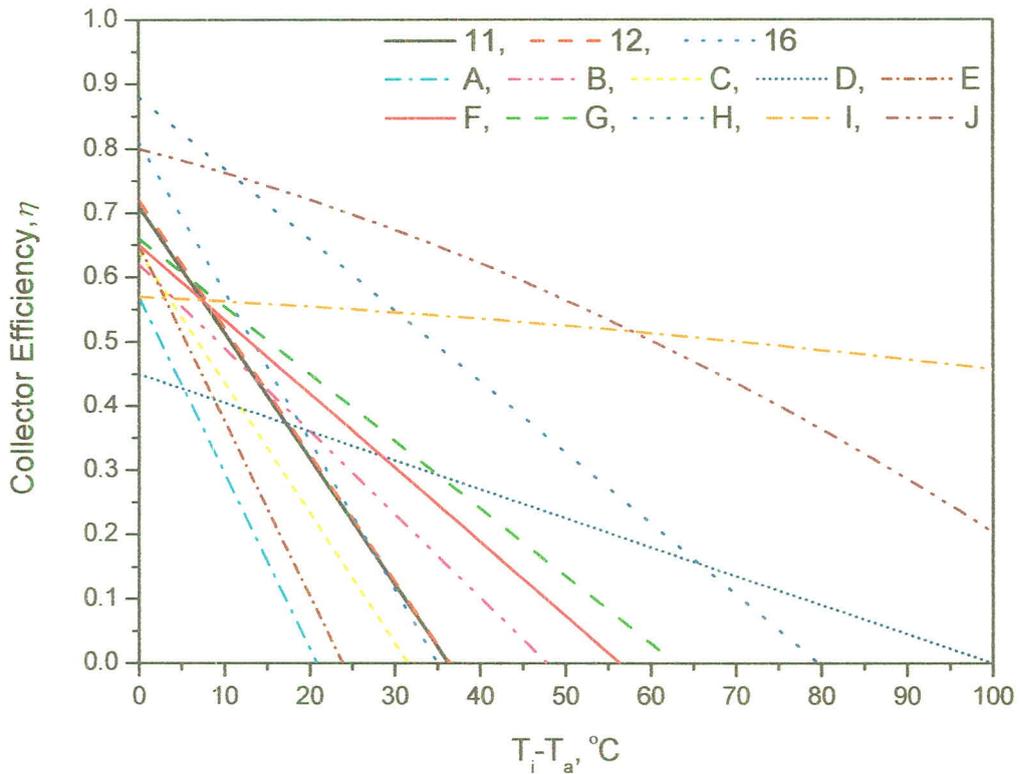
ตาราง 7 เปรียบเทียบสมการสมรรถนะทางความร้อนของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ที่ประยุกต์ใช้
 อะลูมิเนียมอะโนไดซ์ กับงานวิจัยที่ผ่านมา [54] ซึ่งเป็นสมการที่ได้จากการทดสอบด้วยแท่น
 ทดสอบแบบกลางแจ้ง ณ วิทยาลัยพลังงานทดแทน โดยแบ่งออกเป็นสมการถดถอยเชิงเส้นของตัว
 เก็บรังสีอาทิตย์แบบแผ่นเรียบ 8 บริษัท คือ บริษัท A - H และสมการถดถอยเชิงเส้นของตัวเก็บรังสี
 อาทิตย์แบบหลอดแก้วสุญญากาศ Heat Pipe 2 บริษัท คือ บริษัท I และ บริษัท J

เมื่อเปรียบเทียบ $F_R U_L$ ของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ที่ประยุกต์ใช้อะลูมิเนียมอะโนไดซ์กับตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบแผ่นเรียบ บริษัท A - H พบว่า $F_R U_L$ ของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ที่ประยุกต์ใช้อะลูมิเนียมอะโนไดซ์มีค่ามากกว่า บริษัท B, D, F, G และ H มีค่าอยู่ในช่วงเดียวกับบริษัท C และมีค่าน้อยกว่า บริษัท A และ E และเมื่อเปรียบเทียบ ของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ที่ประยุกต์ใช้ อะลูมิเนียมอะโนไดซ์กับตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบหลอดแก้วสุญญากาศ Heat Pipe บริษัท I - J พบว่า $F_R U_L$ ของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ที่ประยุกต์ใช้อะลูมิเนียมอะโนไดซ์มีค่าสูงกว่าทั้งสองบริษัท

เมื่อเปรียบเทียบ η_{max} ของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ที่ประยุกต์ใช้อะลูมิเนียมอะโนไดซ์กับตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบแผ่นเรียบ บริษัท A-H พบว่า η_{max} ของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ที่ประยุกต์ใช้ อะลูมิเนียมอะโนไดซ์มีค่ามากกว่า บริษัท A - G และมีค่าน้อยกว่า บริษัท H และเมื่อเปรียบเทียบ η_{max} ของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ที่ประยุกต์ใช้อะลูมิเนียมอะโนไดซ์กับตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบหลอดแก้วสุญญากาศ Heat Pipe บริษัท I และ J พบว่า η_{max} ของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ที่ประยุกต์ใช้ อะลูมิเนียมอะโนไดซ์มีค่าสูงกว่า บริษัท I แต่มีค่าต่ำกว่า บริษัท J

เมื่อเปรียบเทียบ η_0 ของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ที่ประยุกต์ใช้อะลูมิเนียมอะโนไดซ์กับตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบแผ่นและแบบท่อสุญญากาศจากงานวิจัย [57] ซึ่ง η_0 มีค่า 0.676 และ 0.572 (second order equation) ตามลำดับ ในขณะที่ η_0 ของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ที่ประยุกต์ใช้ อะลูมิเนียมอะโนไดซ์ มีค่าสูงกว่าที่ 0.71, 0.72 และ 0.82 ตามลำดับความหนาของชั้นฟิล์ม

จากนั้นทำการหาค่าสมรรถนะทางความร้อนที่ความเข้มรังสีอาทิตย์เดียวกัน โดยการนำสมการถดถอยเชิงเส้นของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ที่ได้จากตารางที่ 7 มาคำนวณด้วยความเข้มรังสีอาทิตย์คงที่ 800 W/m^2 และให้ค่าอุณหภูมิอากาศเข้าและอุณหภูมิแวดล้อม ($T_i - T_a$) เปลี่ยนแปลงตั้งแต่ 0 -100 ทำให้ได้ค่า ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของทุกช่วงอุณหภูมิ สร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสมรรถนะทางความร้อนและความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิอากาศเข้าและอุณหภูมิแวดล้อม ($T_i - T_a$) ดังภาพ 42 แสดงถึงค่าสมรรถนะทางความร้อนของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ กราฟที่เป็นเส้นตรงจะเป็นกราฟของตัวรับรังสีแบบแผ่นเรียบ ส่วนกราฟที่เป็นเส้นโค้งจะเป็นกราฟของตัวรับรังสีแบบหลอดแก้วสุญญากาศ Heat Pipe



ภาพ 42 สมรรถนะทางความร้อนของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ที่ค่าความเข้มรังสีอาทิตย์ 800 W/m^2

พิจารณาความสัมพันธ์ใน ภาพ 40 พบว่าตัวเก็บรังสีอาทิตย์ที่ประยุกต์ใช้อะลูมิเนียมอะโนไดซ์ เมื่อ $(T_i - T_a) = 0$ ค่า η สูง (0.71, 0.72 และ 0.82) และ η มีค่าลดลง เมื่อ $(T_i - T_a)$ มีค่ามากขึ้น เช่น เมื่อ $(T_i - T_a) = 25^\circ\text{C}$ พบว่า η มีค่าประมาณ 0.20 และ η มีค่าเท่ากับ 0 เมื่อ $(T_i - T_a) = 35^\circ\text{C}$ เนื่องจากตัวเก็บรังสีอาทิตย์ที่ประยุกต์ใช้อะลูมิเนียมอะโนไดซ์ในงานวิจัยนี้ มีค่าการสูญเสียความร้อน ($-F_R U_L$) สูง ส่งผลให้ไม่สามารถทำงานได้เมื่อ $T_i - T_a$ มีค่าแตกต่างกันมาก ($>35^\circ\text{C}$)

ในขณะที่ตัวเก็บรังสีอาทิตย์ตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบแผ่นเรียบบริษัท A C และ E มีค่า η น้อย และค่าการสูญเสียความร้อน ($-F_R U_L$) สูง จึงทำให้ ไม่สามารถทำงานได้ เมื่อ $(T_i - T_a)$ เพิ่มขึ้นถึง 20 25 และ 30°C แต่ในขณะที่ตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบแผ่นเรียบบริษัท B, D, F และ G มีค่า η น้อย และค่าการสูญเสียความร้อน ($-F_R U_L$) น้อย จึงทำให้สามารถทำงานได้ เมื่อ $(T_i - T_a)$ เพิ่มขึ้นจนถึง 48, 100, 58 และ 63°C ตามลำดับ และตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบแผ่นเรียบบริษัท H มีค่า η สูง และค่าการสูญเสียความร้อน ($F_R U_L$) น้อย ทำให้มีความสามารถทำงานได้ เมื่อ $(T_i - T_a)$ เพิ่มขึ้นสูงสุด 80°C และในขณะที่ ตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบหลอดแก้วสุญญากาศ Heat Pipe

บริษัท I - J สามารถทำงานได้แม้ $(T_i - T_a)$ มีค่ามากกว่า $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ จากกราฟนี้จึงทำให้เห็นว่า ค่าการสูญเสียความร้อน $(F_R U_L)$ มีความสำคัญต่อตัวเก็บรังสีอาทิตย์

จากผลการทดลอง ปริมาณนิกเกิลแปรตามความหนาของชั้นฟิล์ม และปริมาณนิกเกิลมีผลอย่างมากต่อประสิทธิภาพเชิงความร้อน และมีผลกับค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนรังสีแต่การเพิ่มของปริมาณนิกเกิลเพียงเล็กน้อยไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนรังสี แต่อย่างไรก็ตามในงานวิจัยนี้ ไม่ได้ทำการวัดปริมาณของนิกเกิลที่ใส่ไปชั้นฟิล์มเนื่องจากในกระบวนการเคลือบอะโนไดซ์นั้นดำเนินการที่โรงงานผู้ผลิต และไม่สามารถระบุค่าการปลดปล่อยรังสีอาทิตย์ (E) ของฟิล์มอะลูมิเนียมได้ เนื่องจากไม่สามารถหาเครื่องมือวัดได้ในประเทศ จึงไม่สามารถหาความสัมพันธ์ของค่าการแผ่ความร้อนได้ (E)

ตาราง 8 ตัวแปรที่ใช้ในการวิเคราะห์ค่าพลังงานรายปี [54]

พารามิเตอร์	สัญลักษณ์	ค่าตัวแปร	หน่วย
ความเข้มรังสีอาทิตย์	G_t	800	W/m^2
อุณหภูมิอากาศแวดล้อม	T_a	30	$^{\circ}\text{C}$
อุณหภูมิน้ำเข้าตัวเก็บรังสีอาทิตย์	T_i	35	$^{\circ}\text{C}$
อุณหภูมิน้ำออกตัวเก็บรังสีอาทิตย์	T_o	60	$^{\circ}\text{C}$
ค่าพลังงานแสงอาทิตย์เฉลี่ยรายปีของประเทศไทย	E	1,800	$\text{kWh/m}^2 \cdot \text{year}$

ดังนั้น เมื่อทราบค่าประสิทธิภาพเฉลี่ยของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ที่สภาวะเดียวกัน จากตาราง 7 วิธีการคำนวณหาค่าพลังงานรายปีที่ตัวเก็บรังสีอาทิตย์ของแต่ละความหนาผลิตได้ จึงนำสมการถดถอยเชิงเส้นจากตาราง 7 มาคำนวณผ่านพารามิเตอร์ต่างๆ ในตาราง 8 อันได้แก่ G_t , T_a , T_i และ T_o ทำให้ทุกๆ ตัวเก็บรังสีอาทิตย์ได้ค่าประสิทธิภาพ 1 ค่า นำค่าประสิทธิภาพที่ได้นี้ คูณกับค่า E พบว่าได้ค่าพลังงานรายปีของทุกๆ ตัวเก็บรังสีอาทิตย์ (แสดงค่าในภาคผนวก ง) ส่วนค่าพลังงานรายปีของตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบสุญญากาศที่ประยุกต์ใช้อะลูมิเนียมอะโนไดซ์ได้ค่าพลังงานในหน่วยต่างๆ ดังแสดงใน ตาราง 9 และค่าพลังงานรายปีของแต่ละบริษัทที่สามารถผลิตได้แสดงไว้ในภาพ 41

ตาราง 9 ค่าพลังงานความร้อนรายปีที่ตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบสุญญากาศที่ประยุกต์ใช้
อะลูมิเนียมอะโนไดซ์ผลิตได้

ความหนาฟิล์ม อะลูมิเนียมอะโนไดซ์ (ไมโครเมตร)	Annual Energy Yield (kWh/m ²)	Annual Energy Yield (kWh)	Annual Energy Yield (MJ)
11	1101.8	1190.0	4283.9
12	1117.9	1207.3	4346.4
16	1249.2	1349.1	4856.9

ตัวอย่าง

การคำนวณค่าพลังงานรายปีของตัวเก็บรังสีอาทิตย์เก็บรังสีอาทิตย์แบบท่อสุญญากาศที่
ประยุกต์ใช้อะลูมิเนียมอะโนไดซ์หนา 16 ไมโครเมตร

$$\text{จากสมการถดถอยเชิงเส้น} \quad \eta = 0.082 - 18.56 \left(\frac{(T_i - T_a)}{G_t} \right)$$

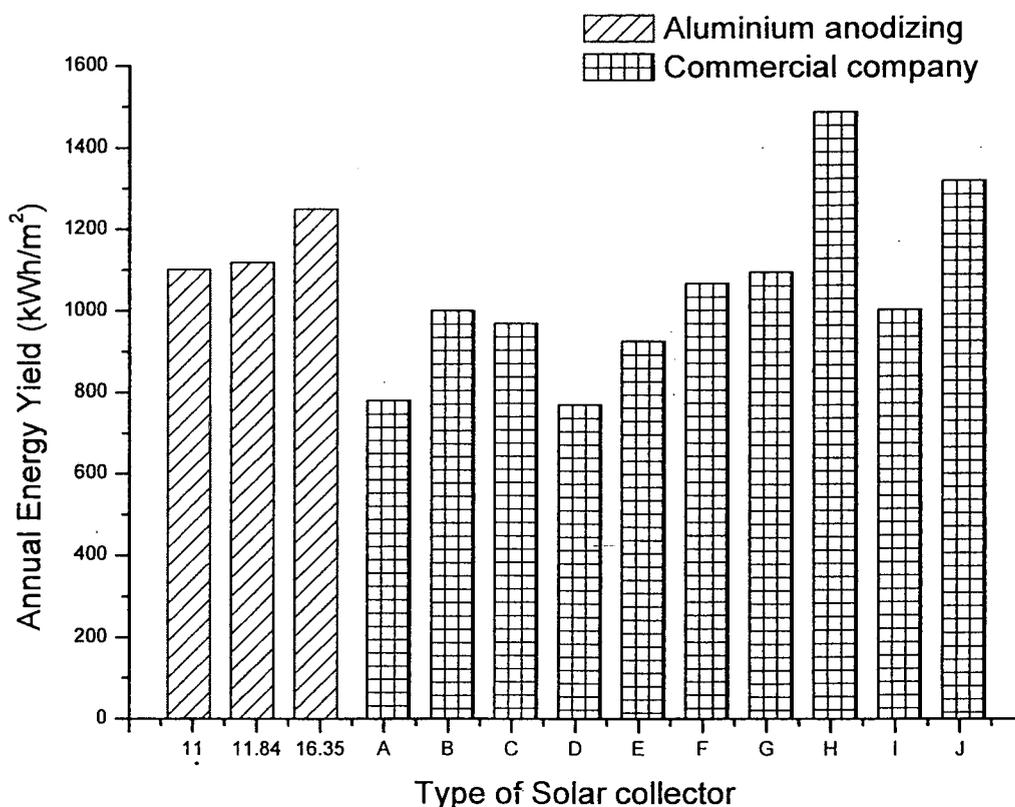
$$\text{แทนค่า คงที่จากตาราง 8} \quad \eta = 0.082 - 18.56 \left(\frac{(35 - 30)}{800} \right)$$

$$\text{ประสิทธิภาพ} \quad \eta = 0.69$$

$$\begin{aligned} \text{ค่าพลังงานรายปี} &= 0.69 \times E \text{ kWh/m}^2 \cdot \text{year} \\ &= 0.69 \times 1800 \text{ kWh/m}^2 \cdot \text{year} \end{aligned}$$

$$\text{ค่าพลังงานรายปีมีค่า} \quad 1249.20 \text{ kWh/m}^2 \cdot \text{year}$$

ค่าพลังงานรายปีของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ที่ใช้ในการเปรียบเทียบในงานวิจัยนี้
แสดงรายละเอียดไว้ในภาคผนวก ง



ภาพ 43 ค่าพลังงานความร้อนรายปีที่ตัวเก็บรังสีอาทิตย์ผลิตได้

ภาพ 43 แสดงปริมาณพลังงานที่ตัวเก็บรังสีอาทิตย์สามารถผลิตได้ภายใน 1 ปี ของตัวเก็บรังสีอาทิตย์สุญญากาศที่ประยุกต์ใช้อะลูมิเนียมอะโนไดซ์ (สีแดง, ) เปรียบเทียบกับของแต่ละบริษัทสามารถผลิตได้ (สีดำ, ) พลังงานที่สามารถผลิตได้ของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ที่ประยุกต์ใช้อะลูมิเนียมอะโนไดซ์ เปรียบเทียบกับตัวเก็บรังสีอาทิตย์ชนิดแผ่นเรียบบริษัท A-H พบว่ามีค่าพลังงานรายปีสูงกว่าตัวเก็บรังสีอาทิตย์ชนิดแผ่นเรียบเป็นส่วนใหญ่ ยกเว้น บริษัท H และเมื่อเปรียบเทียบกับตัวเก็บรังสีอาทิตย์ชนิด Heat Pipe ของบริษัท I และ J นั้น พบว่า ตัวเก็บรังสีอาทิตย์ที่ประยุกต์ใช้อะลูมิเนียมอะโนไดซ์สามารถให้ค่าพลังงานอยู่ในช่วงที่ตัวเก็บรังสีอาทิตย์ชนิด Heat Pipe ของบริษัท I และ J ผลิตได้ จากงานวิจัย [54] ยืนยันว่าตัวเก็บรังสีอาทิตย์บริษัท A-H มีความสามารถในการผลิตพลังงานความร้อนอยู่ในช่วงที่เหมาะสมสำหรับการใช้งาน ดังนั้นตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบท่อสุญญากาศที่ประยุกต์ใช้อะลูมิเนียมอะโนไดซ์ จึงมีความเหมาะสมในการผลิตพลังงานความร้อนสำหรับการใช้งานในภาคอุตสาหกรรมการผลิตและอุตสาหกรรมพลังงานทดแทน

ส่วนที่ 3 ผลการวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์ของตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบท่อสุญญากาศที่ประยุกต์ใช้อะลูมิเนียมอะโนไดซ์เป็นตัวดูดกลืนรังสีอาทิตย์

ในการวิเคราะห์ความเป็นไปได้ทางเศรษฐศาสตร์ของตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบท่อสุญญากาศที่ประยุกต์ใช้อะลูมิเนียมอะโนไดซ์เป็นตัวดูดกลืนรังสีอาทิตย์ จะใช้ข้อมูลต้นทุนและผลประโยชน์ทางเศรษฐศาสตร์ที่ได้แสดงดังตาราง 10 มาทำการวิเคราะห์ โดยใช้ตัวชี้วัดความคุ้มค่าของโครงการ คือ การประเมินต้นทุนพลังงาน (LCOE)

ต้นทุนหรือรายจ่าย (Cost) ทางการเงินของโครงการประกอบด้วยต้นทุน 2 ส่วน คือ ค่าลงทุนอุปกรณ์และแรงงานในการติดตั้งระบบ และค่าดำเนินการและบำรุงรักษาระบบ โดยสามารถแสดงถึงต้นทุนของโครงการในแต่ละส่วนได้ดังนี้

1. ค่าลงทุนอุปกรณ์และแรงงานในการติดตั้งระบบ (Investment Cost) ประกอบด้วย

1.1 ค่าลงทุนอุปกรณ์ชุดผลิตน้ำร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์แบบท่อสุญญากาศ (ท่อไม่เคลือบสารเลือกรับรังสีอาทิตย์) [59, 60]

1.2 ค่าลงทุนอุปกรณ์ครีบอะลูมิเนียม [59, 60]

1.3 ค่าลงทุนเคลือบฟิล์มอะโนไดซ์ สารเลือกรับรังสีอาทิตย์ [61]

1.4 ค่าดำเนินการต่างๆ ในกระบวนการนำเข้า เนื่องจากว่า ผู้วิจัยไม่สามารถติดต่อขอซื้อท่อสุญญากาศ (ท่อไม่เคลือบสารเลือกรับรังสีอาทิตย์) ในประเทศได้ จึงได้ติดต่อซื้อนำเข้ามาจากประเทศจีน

1.4.1 ค่าอากรขาเข้า ภาษีมูลค่าเพิ่ม

1.4.2 ค่าขนส่งและจัดเก็บสินค้า

1.4.3 paper less

1.4.4 ค่า cargo ท่าเรือ

ค่าลงทุนทางการเงินของโครงการในส่วนของการลงทุนอุปกรณ์และแรงงานในการติดตั้งระบบ ซึ่งเป็นค่าใช้จ่ายในปีที่ 0 ของโครงการ รวมเป็นเงิน 22,817.45, 22,794.34 และ 22,840.56 บาท ตามลำดับความหนาของชั้นฟิล์มอะโนไดซ์ โดยแสดงรายละเอียดของต้นทุนส่วนนี้ และรายละเอียดตัวแปรของการคำนวณไว้ในตารางที่ 10 และ 11 ตามลำดับ

2. ค่าใช้จ่ายในการดำเนินการและบำรุงรักษาระบบ (Operating and Maintenance Cost) เท่ากับ ร้อยละ 0.5 ของมูลค่าการลงทุน

ค่าลงทุนทางการเงินของโครงการในส่วนของค่าใช้จ่ายในการดำเนินการและบำรุงรักษาระบบ ซึ่งเป็นค่าใช้จ่ายที่เกิดขึ้นในทุก ๆ ปีตลอดอายุโครงการ 16 ปี กำหนดให้มีค่าเท่ากับ ร้อยละ 0.5 ของมูลค่าการลงทุน [50] หรือเท่ากับ 1,055.71, 1,054.64 และ 1,056.77 บาท ตามลำดับ

ความหนา โดยจำนวนเงินดังกล่าวถือว่าครอบคลุมค่าใช้จ่ายทั้งหมดที่เกิดขึ้นจาก ค่าไฟฟ้า ค่าบำรุงรักษา ค่าแรงงานและค่าอะไหล่ซ่อมแซมที่จะเกิดขึ้นในรอบ 1 ปี ของการดำเนินโครงการผลิตน้ำร้อนด้วยตัวเก็บรังสีอาทิตย์

อายุของโครงการคือ 16 ปี ในปีที่ 1 -15 ในขั้นตอนการวิเคราะห์จำเป็นต้องแปลงค่าให้เป็นมูลค่าปัจจุบัน (Present value : PV) เพื่อแปลงมูลค่าให้เป็นปีที่ 0 จึงใช้อัตราคิดลดร้อยละ 6.75 [62] อัตราเงินเฟ้อ ร้อยละ 3.7 [63]

ผลตอบแทนหรือผลประโยชน์ (Benefit) ทางการเงินของโครงการ คือ มูลค่าซากปีสุดท้ายของระบบ ซึ่งคิดเป็น ร้อยละ 10 ของมูลค่าการลงทุน [64] หรือเท่ากับ 856.54, 855.67 และ 857.41 บาท ตามลำดับความหนา และมูลค่าพลังงานไฟฟ้าที่ประหยัดได้ โดยผลประโยชน์นี้สามารถคำนวณได้จากการเปรียบเทียบมูลค่าของไฟฟ้าที่ใช้ในการผลิตน้ำร้อนในปริมาณที่เท่ากัน

ในระยะเวลา 1 ปี ระบบสามารถผลิตความร้อนได้ 4,283.90, 4,346.43 และ 4,856.89 MJ ตามลำดับความหนาของชั้นฟิล์มอะโนไดซ์ โดยเมื่อเปรียบเทียบกับระบบการผลิตน้ำร้อนด้วยไฟฟ้าแล้วพบว่า การผลิตน้ำร้อนในปริมาณที่เท่ากันนี้ในเวลา 1 ปี จะต้องใช้ปริมาณไฟฟ้า 1,189.97, 1,207.34 และ 1,349.14 กิโลวัตต์ต่อชั่วโมง(kWh) ตามลำดับ และนำมาคิดเป็นมูลค่าโดยใช้อัตราค่าไฟฟ้าที่ราคาหน่วยละ 3.93 บาท [65] ได้มูลค่าเท่ากับ 4,676.59, 4,744.86 และ 5,302.10 บาท ตามลำดับความหนาของชั้นฟิล์มอะลูมิเนียมอะโนไดซ์

เมื่อเปรียบเทียบกับระบบการผลิตระบบผลิตน้ำร้อนด้วยก๊าซปิโตรเลียมเหลวแล้วพบว่า การผลิตน้ำร้อนในปริมาณที่เท่ากันนี้ในเวลา 1 ปี ต้องใช้ปริมาณก๊าซปิโตรเลียมเหลว 160.93, 163.28 และ 182.45 ลิตร ตามลำดับ และนำมาคิดเป็นมูลค่า โดยใช้อัตราค่าก๊าซปิโตรเลียมเหลวที่ราคาหน่วยละ 24.39 บาท/kg [66] ได้มูลค่า เท่ากับ 3,925.03, 3,982.33 และ 4,450.02 บาท ตามลำดับความหนาของชั้นฟิล์มอะลูมิเนียมอะโนไดซ์

เมื่อเปรียบเทียบกับระบบการผลิตระบบผลิตน้ำร้อนด้วยแกลบแล้วพบว่า การผลิตน้ำร้อนในปริมาณที่เท่ากันนี้ในเวลา 1 ปี ต้องใช้ปริมาณแกลบ 297.49, 301.84 และ 337.28 กิโลกรัม และนำมาคิดเป็นมูลค่า โดยใช้อัตราค่าแกลบที่ราคาหน่วยละ 700 บาท/ตัน [67] คิด เป็น 0.7 บาท/กิโลกรัม ได้มูลค่า เท่ากับ 208.24, 211.28 และ 236.10 บาท ตามลำดับความหนาของชั้นฟิล์มอะลูมิเนียมอะโนไดซ์

ตาราง 10 ต้นทุนและผลประโยชน์ของโครงการตลอดอายุโครงการ

รายละเอียด	มูลค่า
ต้นทุน(Investment Cost)	
1. ค่าลงทุนอุปกรณ์ชุดผลิตน้ำร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์แบบท่อสุญญากาศ (ท่อไม่เคลือบสารเลือกรับรังสีอาทิตย์)	12053.6 บาท
2. (380 USD x 31.72)	
3. ค่าอุปกรณ์แผ่นอะลูมิเนียม (30 x 0.81 USD x 31.72) [59, 60]	770.80 บาท
4. ค่าอาคารเข้า ภาษีมูลค่าเพิ่ม	3078.00 บาท
5. ค่าขนส่งเจ็ดเก็บสินค้า	6060.00 บาท
6. ค่า paper less	307.00 บาท
7. ค่า cargo ทำเรือ	155.00 บาท
8. ค่าอะไหล่สารเลือกรับรังสีอาทิตย์ รวมภาษีมูลค่าเพิ่ม [61]	
1) 11 ไมโครเมตร	392.90 บาท
2) 12 ไมโครเมตร	369.79 บาท
3) 16 ไมโครเมตร	416.02 บาท
9. ค่าใช้จ่ายในการดำเนินการและบำรุงรักษา (Operating and Maintenance Cost)	
1) 11 ไมโครเมตร	1,055.71 บาท
2) 12 ไมโครเมตร	1,054.64 บาท
3) 16 ไมโครเมตร	1,056.77 บาท
ผลประโยชน์(Benefit)	
1. พลังงานที่สามารถผลิตได้	
1) 11 ไมโครเมตร	68,542.33 MJ
2) 12 ไมโครเมตร	69,542.95 MJ
3) 16 ไมโครเมตร	77,710.23 MJ
2. มูลค่าซากปีสุดท้ายของโครงการ	
1) 11 ไมโครเมตร	856.54 บาท
2) 12 ไมโครเมตร	855.67 บาท
3) 16 ไมโครเมตร	857.41 บาท

ตาราง 11 ตัวแปรและข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณ

พารามิเตอร์	สัญลักษณ์	ค่าตัวแปร			หน่วย
		ความหนาของชั้นฟิล์ม (ไมโครเมตร)			
		11	12	16	
1. เงินลงทุนเริ่มต้น	C_C	22,817.45	22,794.34	22,840.56	บาท
2. ต้นทุนในการดำเนินการ	C_n	1,055.71	1,054.64	1,056.77	บาท
3. มูลค่าซากปีที่สุดท้ายของโครงการ	SV	856.54	855.67	857.41	บาท
4. พลังงานที่สามารถผลิตได้ในแต่ละปี	E_n	1,189.97	1,207.97	1,349.14	kWh/ ปี
5. อัตราดอกเบี้ย หรือ อัตราคิดลด	i		6.75		ร้อยละ
6. อายุการใช้งานโครงการ	n		16		ปี
7. จำนวนปีที่สิ้นสุดโครงการ	N		15		ปี

ตาราง 12 มูลค่าตัวชีวิตและพลังงานที่สามารถผลิตได้

ความหนาของชั้นฟิล์ม (ไมโครเมตร)	พลังงานที่สามารถผลิตได้ตลอดวัฏจักรชีวิต (MJ)	ต้นทุนพลังงาน (LCOE) (bath/kWh)
11	68,542.33	1.25
12	69,542.95	1.23
16	77,710.23	1.11

พบว่าตัวเก็บรังสีอาทิตย์ที่ประยุกต์ใช้อะลูมิเนียมอะโนไดซ์ มีความเป็นไปได้ทาง เศรษฐศาสตร์หรือมีความคุ้มค่าในการลงทุน โดยพิจารณาจากมูลค่า การประเมินต้นทุนพลังงานมี ค่าเท่ากับ 1.25, 1.23 และ 1.11 บาท/kWh ตามลำดับความหนาของชั้นฟิล์มอะลูมิเนียมอะโนไดซ์ ดังแสดงในตารางที่ 12 เมื่อเปรียบเทียบต้นทุนพลังงานกับต้นทุนพลังงานชนิดอื่นๆ มีค่าดังตาราง 13 เห็นได้ว่า ต้นทุนพลังงานของตัวเก็บรังสีอาทิตย์นี้ มีค่าต่ำกว่าต้นทุนพลังงานเชิงพาณิชย์ ได้แก่ ก๊าซปิโตรเลียมเหลว ซึ่งมีค่าต้นทุนพลังงานเท่ากับ 3.30 บาท/kWh และไฟฟ้า ซึ่งมีค่าต้นทุน พลังงานเท่ากับ 3.93 บาท/kWh แต่เมื่อเปรียบเทียบกับพลังงานหมุนเวียน คือ แกลบ มีค่าต้นทุน พลังงานเท่ากับ 0.18 บาท/kWh พบว่าต้นทุนพลังงานของตัวเก็บรังสีอาทิตย์นี้ มีค่าสูงกว่าพลังงาน หมุนเวียน แม้ว่ามีค่าต้นทุนที่สูงกว่าแต่ในปัจจุบัน แกลบในแต่ละพื้นที่ในประเทศไทยราคาไม่ แน่นอนขึ้นกับค่าขนส่ง และมีปริมาณไม่เพียงพอต่อความต้องการนำมาเป็นวัตถุดิบสำหรับ โรงไฟฟ้าชีวมวล

จากราคาต้นทุนพลังงานดังกล่าวจะเห็นได้ว่า ตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบหลอดแก้ว สุญญากาศที่ประยุกต์ใช้แผ่นอะลูมิเนียมอะโนไดซ์ในการวิจัยครั้งนี้มีค่าน้อยกว่าต้นทุนพลังงานใน เชิงพาณิชย์ (ก๊าซปิโตรเลียมเหลวและไฟฟ้า) แต่พบว่ายังมีค่ามากกว่าต้นทุนพลังงานทดแทน (แกลบ)

ตาราง 13 ตารางเปรียบเทียบต้นทุนพลังงาน(LCOE) แต่ละชนิดเทียบกับแต่ละความหนา ของชั้นฟิล์มอะลูมิเนียมอะโนไดซ์

ชนิดพลังงาน	LCOE (บาท/kWh)		
	ความหนาของชั้นฟิล์ม (ไมโครเมตร)		
	11	12	16
ตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบหลอดแก้วสุญญากาศที่			
ประยุกต์ใช้แผ่นอะลูมิเนียมอะโนไดซ์	1.25	1.23	1.11
ก๊าซปิโตรเลียมเหลว (ลิตร)	3.30	3.30	3.30
ไฟฟ้า (กิโลวัตต์ชั่วโมง)	3.93	3.93	3.93
แกลบ (กก.)	0.18	0.18	0.18