

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ตัวเก็บรังสีอาทิตย์

ตัวเก็บรังสีอาทิตย์ (Solar collector) มีความสำคัญต่อเทคโนโลยี เกี่ยวกับการนำพลังงานแสงอาทิตย์มาใช้ประโยชน์ในรูปของความร้อน เมื่อตัวเก็บรังสีอาทิตย์รับพลังงานแสงอาทิตย์ที่อยู่ในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อน ให้กับระบบผลิตน้ำร้อนรังสีอาทิตย์ พลังงานจากรังสีอาทิตย์ถ่ายโอนไปยังของไหลในตัวเก็บรังสีอาทิตย์ ความร้อนที่ได้ส่งผ่านจากตัวเก็บรังสีอาทิตย์ไปเก็บในถังเก็บน้ำร้อนและนำไปใช้งานตามความต้องการ ตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบท่อสุญญากาศที่ให้ประสิทธิภาพสูงกว่าแบบแผ่นเรียบส่งผลให้มีราคาสูงกว่า ทั้งนี้ เพราะกระบวนการสร้าง ต้องอาศัยเทคโนโลยีสุญญากาศและวัสดุที่มีราคาสูง ในปัจจุบันได้มีการวิจัยเพื่อลดต้นทุนการผลิต ให้สามารถนำตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบท่อสุญญากาศไปใช้งานต่างๆ ได้กว้างขวางขึ้น ระบบผลิตน้ำร้อนที่ดีต้องมีประสิทธิภาพสูงสามารถแปลงรังสีอาทิตย์ให้เป็นพลังงานความร้อนและส่งความร้อนนั้นไปใช้งานได้เต็มประสิทธิภาพ ปัจจุบันตัวเก็บรังสีอาทิตย์ในท้องตลาดมีความแตกต่างกันทั้งในด้านคุณภาพ สมรรถนะ การติดตั้ง และราคา [4, 5]

ประเภทตัวเก็บรังสีอาทิตย์

ตัวเก็บรังสีอาทิตย์ สามารถจำแนกประเภทได้ตามการติดตามดวงอาทิตย์ (Tracking) โดยประเภทที่ไม่มีการติดตามดวงอาทิตย์ (Stationary Collectors) มีการนำไปใช้งานที่อุณหภูมิต่ำและสูง เช่น ตัวเก็บรังสีแบบแผ่นเรียบ (Flat-plate collector, FPC) แบบท่อสุญญากาศ (Evacuated tube collector, ETC) และแบบรางพาราโบลา (Compound parabolic collector, CPC) ตัวเก็บรังสีอาทิตย์ประเภทนี้มีค่าอัตราส่วนการรวมรังสี (Concentration ratio) ที่ต่ำ เนื่องจากพื้นที่ของชุดสะท้อนแสง (Area of aperture, A_a) และพื้นที่ของตัวเก็บรังสี (Area of receiver, A_r) มีค่าเท่ากันตามสมการที่ 1 สำหรับประเภทที่มีการติดตามดวงอาทิตย์ (Sun-tracking concentrating collectors) นำมาประยุกต์ใช้กับงานที่ต้องการอุณหภูมิสูง เช่น ตัวเก็บรังสีอาทิตย์ชนิดรวมแสงแบบรางพาราโบลาที่มีการติดตามดวงอาทิตย์ (Parabolic trough collector, PTC) ตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบหอคอยรวมแสง (Heliostat field collector, HFC) เป็นต้น แสดงดังตารางที่ 1 โดยตัวเก็บรังสีประเภทที่มีการติดตามดวงอาทิตย์นี้ มีค่าอัตราส่วนการรวมรังสี

ที่สูงกว่า เนื่องจากพื้นที่ของตัวรับแสงน้อยกว่าพื้นที่ของชุดสะท้อนตามสมการ (1) และจากตาราง 1 แสดงให้เห็นว่าเมื่ออัตราส่วนการรวมรังสีอาทิตย์มีค่าสูง มีผลให้ได้อุณหภูมิสูงขึ้นตามไปด้วย [6]

$$\text{Concentration ratio} \quad C = \frac{A_a}{A_r} \quad (1)$$

เมื่อ C = อัตราส่วนการรวมรังสีอาทิตย์
 A_a = พื้นที่ของชุดสะท้อนแสง, m^2
 A_r = พื้นที่ของตัวเก็บรังสีอาทิตย์, m^2

ตาราง 1 ประเภทของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ [7, 8]

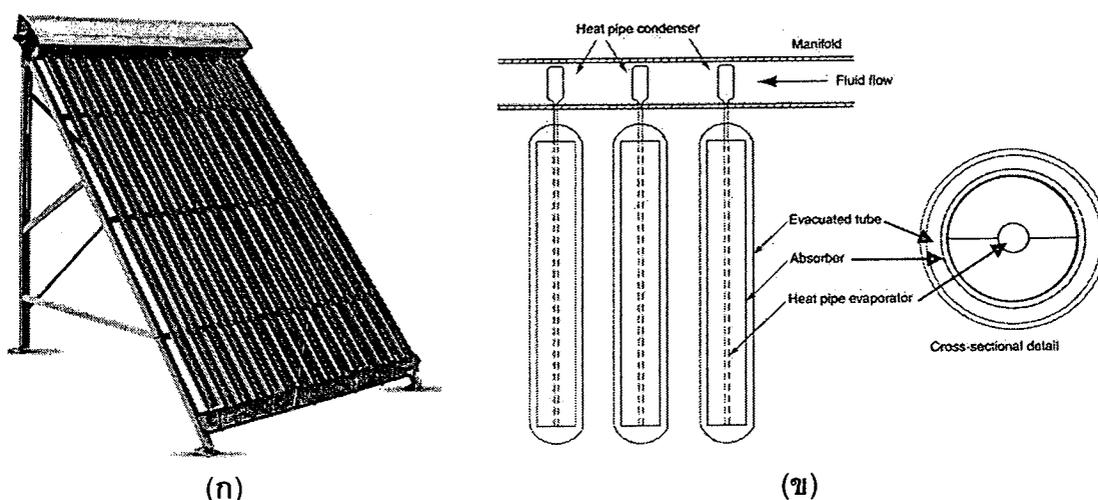
Motion	Collector type	Concentration ratio	Indicative temperature range (°C)
Stationary Collectors	Flat-plate collector (FPC)	1	30–80
	Evacuated tube collector (ETC)	1	50–200
	Compound parabolic collector (CPC)	1–5	60–240
Sun-tracking concentrating collectors	Compound parabolic collector (CPC)	5–15	60–300
	Linear Fresnel reflector (LFR)	10–40	60–250
	Cylindrical trough collector (CTC)	15–50	60–300
	Parabolic trough collector (PTC)	10–85	60–400
	Parabolic dish reflector (PDR)	600–2000	100–1500
	Heliostat field collector (HFC)	300–1500	150–2000

ตัวเก็บรังสีชนิดสุญญากาศ (Evacuated Tube Collectors, ETC)

1. ลักษณะทั่วไป

จากภาพ 1 ตัวเก็บรังสีอาทิตย์ประกอบด้วยหลอดแก้วสองชั้นระหว่างชั้นของแก้วทั้งสองมีความเป็นสุญญากาศ (ตำแหน่ง 2) เพื่อลดการสูญเสียความร้อน ที่บริเวณผิวนอกของหลอดแก้วชั้นใน (ตำแหน่ง 4) ถูกเคลือบด้วยสารเลือกรับรังสีอาทิตย์ทำหน้าที่รับรังสีอาทิตย์ เปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อนให้กับสารทำงานที่บรรจุอยู่ภายในท่อนำความร้อน (Heat pipe evaporator) ของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ [4, 8, 9]

2. ส่วนประกอบ



ภาพ 2 ลักษณะการติดตั้งของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ชนิดสุญญากาศและส่วนประกอบภายในของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ชนิดท่อสุญญากาศ

หมายเหตุ: (ก) ลักษณะการติดตั้งของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ชนิดสุญญากาศ [10]

(ข) ส่วนประกอบภายในของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ชนิดท่อสุญญากาศ [7, 11]

2.1 ท่อแก้วสุญญากาศ

ท่อแก้วสุญญากาศสองชั้นปิดสนิท โดยมีสารเลือกรับรังสีอาทิตย์อยู่ที่ผิวของหลอดแก้วชั้นใน สามารถแบ่งเป็นสองประเภทคือ แบบไหลผ่านโดยตรง (น้ำในท่อแก้ว) และท่อความร้อน (สารทำงานในท่อแก้ว) ที่มีการจัดเรียงเป็นหลายๆ แถว ดังภาพ 2 (ก) ช่องว่างระหว่างท่อชั้นในกับชั้นนอกเป็นสุญญากาศ เพื่อป้องกันการสูญเสียความร้อนโดยการแผ่รังสีความร้อนให้กับสิ่งแวดล้อมและเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของตัวเก็บความร้อน ซึ่งสามารถทำอุณหภูมิสูงสุด

ประมาณ 200°C ภายในท่อแก้วทั้งสองบรรจุแผ่นอะลูมิเนียมที่ถูกปั๊มขึ้นรูปและท่อความร้อน (Heat pipe) ประกอบกันดังภาพ 2 (ข) เมื่อความร้อนถูกส่งผ่านชั้นของท่อแก้วทั้งสองแล้วส่งต่อไปยังท่อความร้อน อุณหภูมิสารทำงานภายในท่อความร้อนสูงขึ้นแล้วถ่ายโอนความร้อนให้กับระบบ [7, 8, 12]

2.2 การดูดกลืนรังสีอาทิตย์

2.2.1 รังสีอาทิตย์

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 [6, 13, 14, 15]

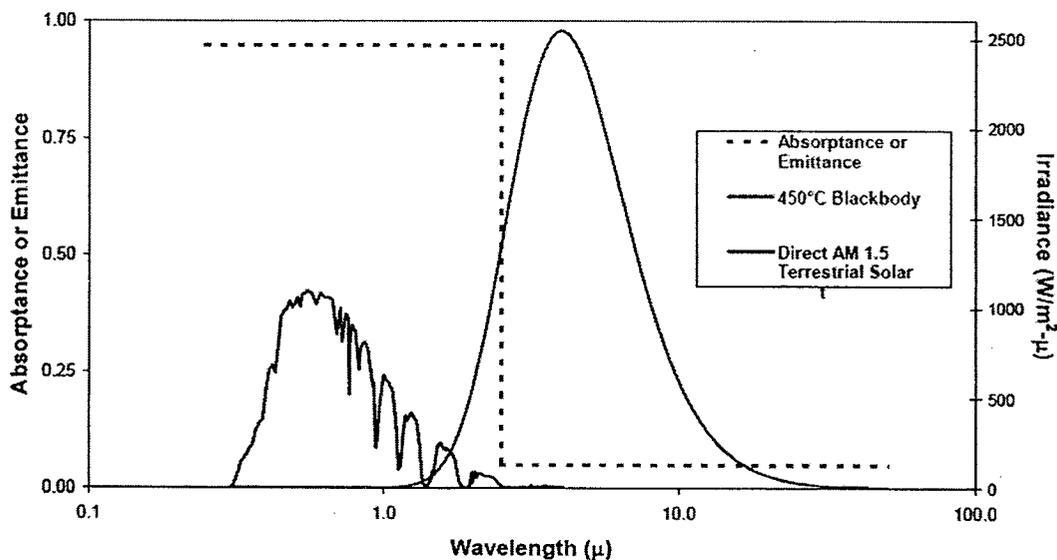
2.2.2 สารเลือกรับรังสีอาทิตย์

การดูดกลืนรังสีอาทิตย์เพื่อเปลี่ยนความร้อนต้องอาศัยตัวดูดกลืน (Absorber) หรือที่เรียกว่า “ตัวดูดกลืนรังสีอาทิตย์” (Solar selective absorber) ทำหน้าที่รับและถ่ายโอนความร้อน ไหลผ่านช่อง (ท่อ) จากตัวดูดกลืนรังสีอาทิตย์เปลี่ยนเป็นความร้อน และนำความร้อนที่เกิดขึ้นไปยังสารทำงานภายในท่อนำความร้อน (Heat pipe) [4]

การเคลือบผิวตัวดูดกลืนรังสีอาทิตย์ในอดีต มีกรรมวิธีการเคลือบผิวต่างๆ ได้แก่ การทาสีโซลาร์ (Solar paint) ที่ไม่มีคุณสมบัติเลือกรับรังสีอาทิตย์ สำหรับการเคลือบที่มีคุณสมบัติเลือกรับรังสีอาทิตย์ เช่น การเคลือบอะลูมิเนียมออกไซด์ที่มีผงนิกเกิลบนแผ่นอะลูมิเนียม (Nickel-pigmented aluminium oxide on aluminium) การเคลือบโครเมียมสีดำที่ขนาบด้วยชั้นของนิกเกิลบนแผ่นทองแดง (Black chrome with nickel sandwich layer on copper) การเคลือบโครเมียมสีดำบนแผ่นทองแดงโดยตรง (Black chrome directly on copper) และการเคลือบ

โคบอลต์ซัลไฟด์/ออกไซด์บนแผ่นเหล็ก (Cobalt sulphide /oxide (selective) on steel sheet) นอกจากนี้การเคลือบอีนาเมลแบบมีคุณสมบัติเลือกรับรังสีอาทิตย์บนแผ่นเหล็ก (Selectively acting enamel on steel) เพื่อให้ความร้อนที่ถ่ายเทจากตัวดูดกลืนมาข้างของไหลมีความสม่ำเสมอตลอดพื้นที่รับรังสี ปัจจุบันสารเคลือบตัวดูดกลืนรังสีอาทิตย์มีการใช้สารเคลือบโครเมียมดำเป็นหลัก ยกตัวอย่างเช่น นิกเกิลดำ ผลึกดำ เป็นต้น [4]

คุณสมบัติของตัวดูดกลืนรังสีอาทิตย์ในอุดมคติ คือ มีค่าการสะท้อน รังสีอาทิตย์ที่ต่ำ ($R = 0$) และมีค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนรังสีอาทิตย์ที่สูง ($\alpha = 1$) ในช่วงความยาวคลื่น 300 – 2,500 นาโนเมตร [4, 16] ซึ่งเป็นช่วงความยาวคลื่นของรังสีอาทิตย์ที่ผ่านมายังโลก ในขณะที่ช่วงความยาวคลื่น มากกว่า 2,500 นาโนเมตรเป็นต้นไป ซึ่งเป็นช่วงความยาวคลื่นอินฟราเรด มีค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์ที่ต่ำ ($R = 1$) และมีค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนรังสีอาทิตย์ที่สูง ($\alpha = 0$) (เส้นประ,) - - - - [16] จากความสัมพันธ์ดังกล่าว สามารถอธิบายได้ด้วยภาพ 3 ซึ่งสมบัตินี้มีความแตกต่างกับวัตถุดำ คือ วัตถุดำมีค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนรังสีอาทิตย์ที่สูง ($\alpha = 1$) และมีค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์ที่สูง ($R = 1$)



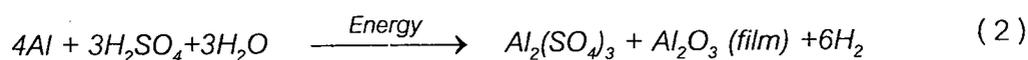
ภาพ 3 Spectral performance of an ideal selective solar absorber [16]

2.2.3 วิธีการเคลือบสารเลือกรับรังสีอาทิตย์

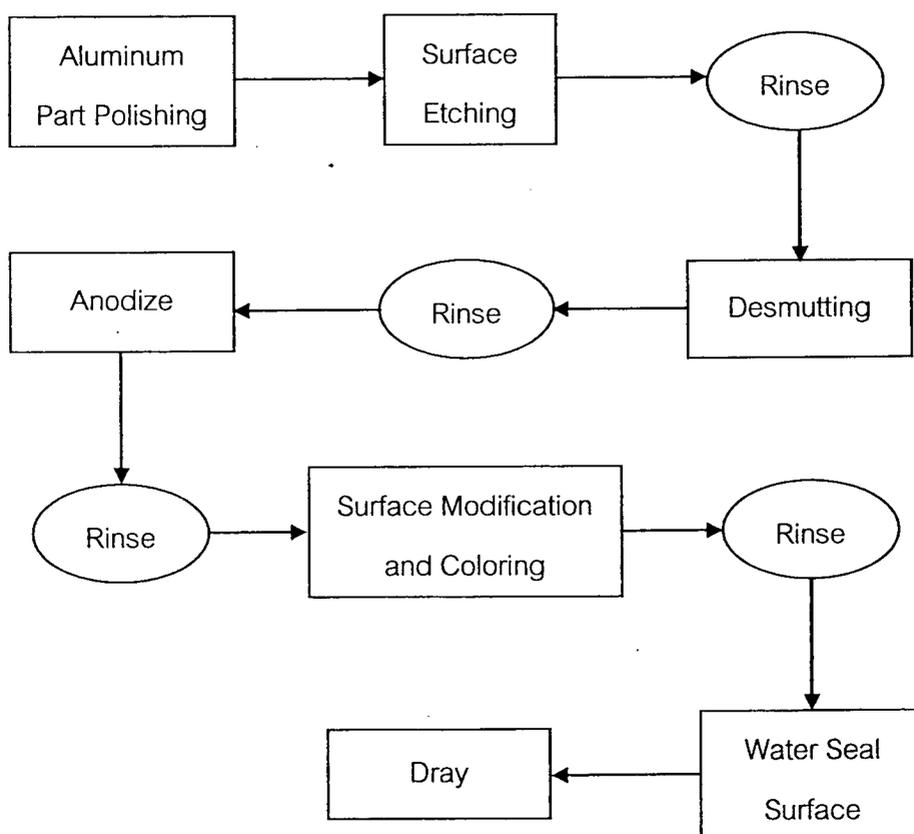
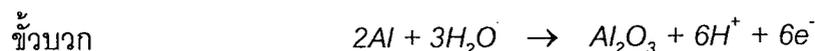
การเคลือบผิวของวัสดุดูดกลืนรังสีอาทิตย์บนท่อรับรังสีนั้น ถือว่ามีความสำคัญ เนื่องจากโดยปกติพื้นผิวของโลหะมีการสะท้อนแสงสูง และท่อรับรังสีส่วนใหญ่ทำจากโลหะ จึงต้องมีการเคลือบผิวเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการดูดกลืนช่วงคลื่นแสงอาทิตย์ได้มากขึ้น (เพิ่มสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง) การอะโนไดซ์เป็นหนึ่งในวิธีการเคลือบที่ถูกนำมาใช้ในการเคลือบสารเลือกรับรังสีอาทิตย์เชิงพาณิชย์สำหรับตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบแผ่นเรียบ [4, 8]

อะโนไดซ์ (Anodizing) เป็นกระบวนการทำผิวของอะลูมิเนียมให้เป็นอะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) ในลักษณะที่เป็นฟิล์มบาง เพื่อให้ผิวชั้นงานอะลูมิเนียมอมัตัวด้วยฟิล์มของอะลูมิเนียมออกไซด์ จนไม่สามารถทำปฏิกิริยากับออกซิเจนที่อยู่ในบรรยากาศหรือเมื่อสัมผัสน้ำได้อีกต่อไป ฟิล์มอะลูมิเนียมที่เกิดขึ้นมีประโยชน์ในการเพิ่มความต้านทานการผุกร่อน กระบวนการทำอะโนไดซ์ต้องให้อะลูมิเนียมอยู่ด้านแอโนด (ขั้วบวก) และให้โลหะชนิดอื่นที่เหมาะสมอยู่ด้านแคโทด (ขั้วลบ) ผิวของอะลูมิเนียมหลังจากการทำอะโนไดซ์มีลักษณะต่างๆ กันตามชนิดกรดที่นำมาใช้เป็นอิเล็กโทรไลต์ ตัวอย่างเช่น กรดซัลฟูริกเป็นกรดที่มีการใช้เป็นอิเล็กโทรไลต์มากที่สุด เนื่องจากเป็นอิเล็กโทรไลต์ที่สามารถให้ความหนาของฟิล์มอะโนไดซ์ได้หลายระดับและคุณสมบัติของออกไซด์ที่ได้ไม่มีสี (ซึ่งสามารถนำไปทำสีได้หลายวิธี) ออกไซด์ของอะลูมิเนียมที่เกิดขึ้นจากการทำอะโนไดซ์มีลักษณะผิวด้านและมีรูพรุนเล็กๆ มากๆ โดยรูพรุนนี้สามารถกักเก็บสีที่ทำการย้อมไว้ได้ การทำอะโนไดซ์เป็นการทำให้ผิวอะลูมิเนียมทนการกัดกร่อนได้มากขึ้นและเป็นฉนวนไฟฟ้า ตัวแปรของความเข้มข้นสารละลายอะโนไดซ์ อุณหภูมิของสารละลายอะโนไดซ์และกระแสไฟฟ้าที่ใช้ ล้วนแต่มีผลต่อการก่อตัวของชั้นอะลูมิเนียมออกไซด์ ความหนาของชั้นอาจแตกต่างกันหลายเท่า เมื่อเงื่อนไขและองค์ประกอบเปลี่ยนไป ชั้นของออกไซด์ที่เกิดขึ้นส่งผลทำให้เพิ่มความแข็งแรงและความสามารถในการทนการกัดกร่อน ฟิล์มออกไซด์มีการก่อตัวเป็นท่อรูปหกเหลี่ยมเรียงตัวกัน ความหนา (ความสูง) ของท่อเริ่มตั้งแต่ 5 ไมโครเมตร ซึ่งให้ชั้นงานสว่างใส และจนถึงความหนาประมาณ 150 ไมโครเมตร กระบวนการทำอะโนไดซ์ขึ้นอยู่กับประเภท และขนาดของวัสดุ เช่น หากเป็นชิ้นส่วนเล็กๆ มีการใช้การจุ่มแล้วนำลงไปในถังที่เตรียมไว้สำหรับการการอะโนไดซ์ แต่ถ้าวัสดุมีขนาดใหญ่ 9-10 เมตร ใช้ชุดมาตรฐานสำหรับการอะโนไดซ์ คือการวางชิ้นงานบนตัวยึดจับที่ได้รับการออกแบบ และเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้า สำหรับการอะโนไดซ์ อะลูมิเนียมที่ผ่านการทำอะโนไดซ์ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีประโยชน์หลากหลาย การผลิตใช้ต้นทุนต่ำ และได้ชิ้นงานที่มีลักษณะค่อนข้างเป็นรูปแบบชัดเจน ตัวอย่างการนำไปใช้งานคือ แผ่นพิมพ์ อุปกรณ์ตกแต่ง ผนัง และหลังคา เป็นต้น การอะโนไดซ์สามารถดำเนินการได้ในหลายๆ ด้านขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุที่นำมาทำอะโนไดซ์และการประยุกต์ใน

ตอนท้ายของกระบวนการ ปฏิริยาเคมีสำหรับการเกิดฟิล์มอะลูมิเนียมออกไซด์สภาวะของสารละลายกรดซัลฟิวริก (H_2SO_4) [17] แสดงดังสมการ 2 โดยกระบวนการอะโนไดซ์อะลูมิเนียมตามอุตสาหกรรมต่างๆ ในประเทศไทย สามารถสรุปเป็นขั้นตอนได้ดังภาพ 4 [18, 19]



หรือสามารถแยกเป็นกลไกการเกิดฟิล์มอะโนไดซ์ตามขั้นของการทำอะโนไดซ์ดังนี้



ภาพ 4 กระบวนการผลิตอะลูมิเนียมอะโนไดซ์ [20]

3. การถ่ายโอนความร้อน

การถ่ายเทความร้อนเกิดขึ้นเมื่ออุณหภูมิระหว่างสองตำแหน่งแตกต่างกัน โดยความร้อนถ่ายเทจากที่มีอุณหภูมิสูงไปที่มีอุณหภูมิต่ำเสมอ แบ่งเป็น 2 ชนิด

3.1 การนำความร้อน (Conduction)

การนำความร้อน เป็นการถ่ายเทความร้อนผ่านตัวกลางที่เป็นของแข็งจากบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงไปบริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำภายในตัวกลางเดียวกันหรือระหว่างตัวกลางต่างชนิดที่อยู่ติดกัน ซึ่งการถ่ายโอนความร้อนเกิดจากผลของการเคลื่อนที่ของโมเลกุลภายในตัวกลาง วัตถุแต่ละชนิดจะนำความร้อนได้ต่างกัน การนำความร้อนในท่อน้ำสามารถหาค่าการนำความร้อนได้ดังสมการ 3 [21, 22, 23]

$$Q_{cond} = -kA \frac{dT}{dx} \quad (3)$$

- เมื่อ Q_{cond} = อัตราการนำความร้อนมีหน่วยเป็นวัตต์ (W)
 k = ค่าการนำความร้อน (Thermal conductivity) ($W/m^2 \cdot ^\circ C$)
 A = พื้นที่ในการถ่ายโอนความร้อนมีหน่วยเป็นตารางเมตร (m^2)
 dT = ความแตกต่างของอุณหภูมิ ($^\circ C$)
 dx = ระยะทางในการเคลื่อนที่ของความร้อน (m)

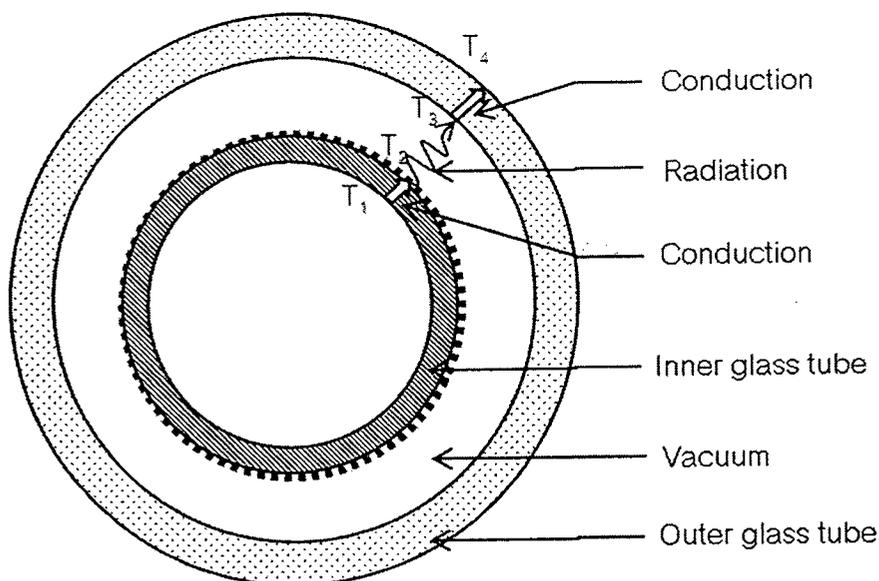
เนื่องจากความร้อนเกิดการถ่ายโอนจากจุดที่มีอุณหภูมิสูงไปยังจุดที่มีอุณหภูมิต่ำ ซึ่งทำให้เทอม มีเครื่องหมายเป็นลบ ดังนั้น เพื่อให้อัตราการนำความร้อนในระยะทาง x มีค่าเป็นบวกจึงเติมเครื่องหมายลบไว้ด้านขวามือ ในสมการการนำความร้อน [22, 23]

3.2 การแผ่รังสี (Radiation)

การแผ่รังสี เป็นการถ่ายเทความร้อนโดยไม่อาศัยตัวกลาง เคลื่อนไหวในรูปแบบของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า เกิดได้ดีในบริเวณที่เป็นสุญญากาศ เช่น พลังงานความร้อนจากดวงอาทิตย์เดินทางผ่านสุญญากาศมายังโลก [21, 22, 23]

$$Q_{rad} = \epsilon \sigma A (T_s^4 - T_{surr}^4) \quad (4)$$

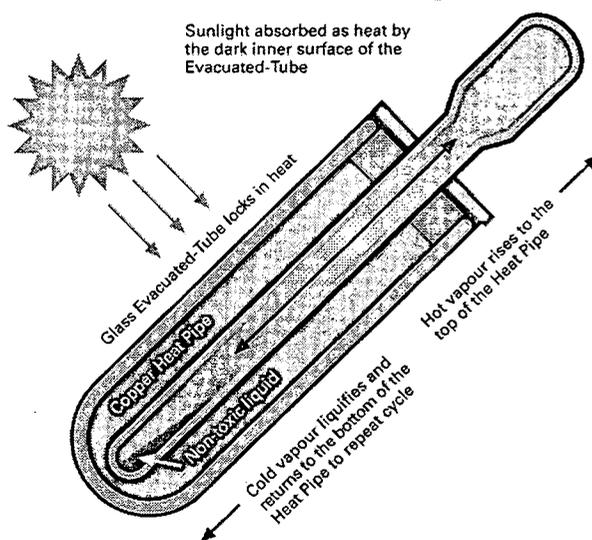
- เมื่อ Q_{rad} = อัตราการแผ่รังสีมีหน่วยเป็นวัตต์ (W)
 σ = ค่าคงที่สเตฟาน-โบลทซ์มันน์ มีค่าเท่ากับ $5.67 \times 10^{-8} \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K}^4)$
 ϵ = ค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสี (Emissivity)
 A = พื้นที่ผิวของวัตถุที่แผ่รังสีความร้อน (m^2)
 T_{surr} = อุณหภูมิโดยรอบๆ (K)
 T_s = อุณหภูมิสมบรูณ์ของวัตถุแผ่รังสีความร้อน (K)



ภาพ 5 ภาพตัดขวางแสดงการสูญเสียความร้อนแบบต่างๆ ภายในท่อแก้วสุญญากาศ

จากภาพ 5 ตัวอย่างการเกิดการสูญเสียความร้อนซึ่งเป็นการถ่ายโอนความร้อนแบบการนำความร้อน (Conduction) จากบริเวณตำแหน่ง T_1 ไปยังตำแหน่ง T_2 ผ่านชั้นของท่อแก้วชั้นใน จากนั้นความร้อนเกิดการสูญเสียความร้อนแบบการแผ่รังสี (Radiation) จากบริเวณตำแหน่ง T_2 ไปยังตำแหน่ง T_3 และเมื่อผ่านชั้นของท่อแก้วชั้นนอกเกิดการสูญเสียความร้อนแบบการนำความร้อน (Conduction) อีกครั้งหนึ่ง จากบริเวณตำแหน่ง T_3 ไปยังตำแหน่ง T_4

การถ่ายโอนความร้อนของท่อสุญญากาศแบบท่อความร้อนอาศัยหลักการท่ความร้อนร่วมด้วย ภายในท่อของตัวดูดกลืนรังสีอาทิตย์จะมีน้ำในปริมาณเล็กน้อย (หรือของไหลชนิดอื่น ขึ้นกับอุณหภูมิที่ต้องการ) เมื่อของไหลได้รับความร้อนจะระเหยเป็นไอในสภาพสุญญากาศบางส่วนและไหลขึ้นในสภาพไอ จากนั้นจะควบแน่นในคอนเดนเซอร์ และไหลกลับลงมาในสภาพของเหลว คอนเดนเซอร์จะถ่ายเทความร้อนให้กับของไหลตัวกลาง ในวงจรตัวเก็บรังสีอาทิตย์ ดังภาพ 6 [4]



ภาพ 6 การทำงานของท่อแก้วสุญญากาศ [24]

4. การประเมินสมรรถนะทางความร้อน

การประเมินสมรรถนะทางความร้อนของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ พิจารณาจากความร้อนที่ได้รับจากตัวเก็บรังสีอาทิตย์ภายใต้สภาวะคงตัว ความร้อนที่นำมาใช้ประโยชน์ได้รับจากตัวเก็บรังสีอาทิตย์มีค่าเท่ากับ พลังงานที่ถูกดูดกลืนโดยตัวเก็บรังสีอาทิตย์ลบด้วยการสูญเสียความร้อนทั้งทางตรงและทางอ้อม พลังงานความร้อนที่เป็นประโยชน์สามารถแสดงได้ดังสมการต่อไปนี้ [13, 14]

$$Q_u = \dot{m}c_p(T_o - T_i) \quad (5)$$

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 5

$$Q_u = A_c [F_R G_T (\tau\alpha) - F_R U_L (T_i - T_a)] \quad (6)$$

เมื่อ	A_c	=	พื้นที่รับรังสีของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ (m ²)
	F_R	=	แฟกเตอร์การดึงความร้อนหรือแฟกเตอร์แก้ไข
	G_T	=	รังสีอาทิตย์รวมที่ตกกระทบบนตัวเก็บรังสีอาทิตย์ (W/m ²)
	$\tau\alpha$	=	ผลคูณสัมประสิทธิ์การส่งผ่านของแผ่นครอบ (τ) และการดูดกลืนของแผ่นดูดกลืน (α) ของตัวเก็บรังสีอาทิตย์
	U_L	=	สัมประสิทธิ์การสูญเสียความร้อน (W/m ² ·°C)
	T_a	=	อุณหภูมิแวดล้อม (°C)

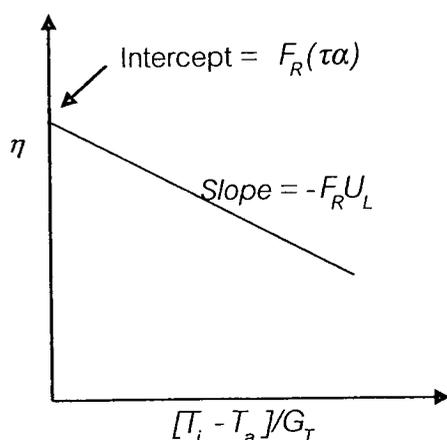
ประสิทธิภาพเชิงความร้อนที่ได้รับ สามารถหาได้จากการหาร Q_u ด้วยพลังงานที่ได้รับ ($A_c G_T$) สามารถแสดงได้ดังสมการ (7)

$$\eta = F_R(\tau\alpha) - F_R U_L \left[\frac{(T_i - T_a)}{G_T} \right] \quad (7)$$

เมื่อ η = ประสิทธิภาพทางความร้อนของตัวเก็บรังสีอาทิตย์

ในระหว่างการทดสอบตัวเก็บรังสีอาทิตย์ถูกตั้งอยู่ในลักษณะที่ตั้งฉากกับรังสีอาทิตย์ เป็นผลให้การส่งผ่านของตัวดูดกลืนรังสีอาทิตย์สอดคล้องกันกับรังสีอาทิตย์ ดังนั้น เทอมของ $(\tau\alpha)$ ถูกนำมาใช้ในสมการ 6 และ 7 ซึ่งวัสดุที่ใช้ผลิตตัวเก็บรังสีอาทิตย์ที่ดี ต้องมีค่าส่งผ่านและดูดกลืน $(\tau\alpha)$ รังสีอาทิตย์สูง (transmittance & absorptance) โดยสีดำมีค่าดูดกลืนรังสีสูงสุด ดังนั้นผิวแผ่นดูดกลืนรังสีส่วนใหญ่เคลือบผิวสีดำด้าน

สำหรับการดำเนินงานภายใต้สภาวะคงที่ของรังสีอาทิตย์และอัตราการไหล ปัจจัย F_R , $(\tau\alpha)$ และ U_L มีค่าใกล้เคียงค่าคงที่ เมื่อนำสมการ 7 มาสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพและพารามิเตอร์การสูญเสียความร้อน $[(T_i - T_a)/G_T]$ ดังแสดงในภาพ 6 ซึ่ง $F_R(\tau\alpha)$ คือค่าประสิทธิภาพสูงสุดของตัวเก็บรังสีอาทิตย์เป็นระยะตัดแกน η และ $-(F_R U_L)$ เป็นความชันของกราฟ ซึ่งเป็นผลคูณของแฟกเตอร์การดึงความร้อนและสัมประสิทธิ์การสูญเสียความร้อน [14, 15, 25]



ภาพ 7 ประสิทธิภาพของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ [15, 25]

ในความเป็นจริงค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียความร้อน U_L ไม่คงที่
ดังนั้น

$$F_R U_L = c_1 + c_2(T_i - T_a) \quad (8)$$

แทนสมการ 8 ใน 6 ได้สมการ สำหรับตัวเก็บรังสีอาทิตย์ประเภทที่ไม่มีการติดตามดวงอาทิตย์ ดังนี้

$$Q_u = A_c [F_R G_T (\tau\alpha) - c_1(T_i - T_a) - c_2(T_i - T_a)^2] \quad (9)$$

ดังนั้น ประสิทธิภาพสำหรับตัวเก็บรังสีอาทิตย์ประเภทที่ไม่มีการติดตามดวงอาทิตย์ สามารถเขียนเป็น

$$\eta = F_R (\tau\alpha) - c_1 \left[\frac{(T_i - T_a)}{G_T} \right] - c_2 \left[\frac{(T_i - T_a)}{G_T} \right]^2 \quad (10)$$

และถ้าให้ $c_0 = F_R (\tau\alpha)$ และ $x = \left[\frac{(T_i - T_a)}{G_T} \right]$

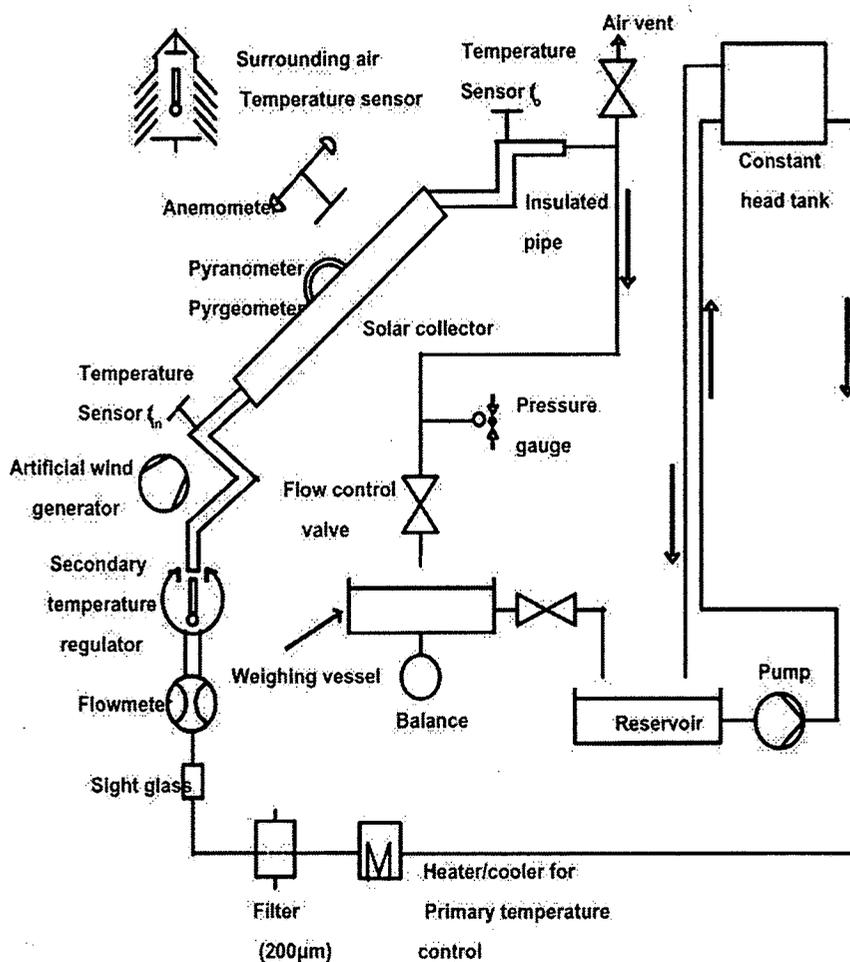
ดังนั้น

$$\eta = c_0 - c_1 x - c_2 x^2 \quad (11)$$

มาตรฐานการทดสอบตัวเก็บรังสีอาทิตย์ ISO 9806-1

เป็นมาตรฐานที่ใช้หาสมการแสดงคุณสมบัติพื้นฐานสำหรับกำหนดประสิทธิภาพทางความร้อนของการทำงานของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ โดยขั้นตอนการทดสอบสามารถทดสอบได้ทั้งกลางแจ้ง (Outdoor) และในร่ม (Indoor) โดยสภาวะที่ใช้ในการทดสอบในงานวิจัยนี้ คือ กลางแจ้ง โดยให้รังสีอาทิตย์ตกกระทบลงบนตัวเก็บรังสีอาทิตย์ในแนวตั้งจากตลอดเวลาการทดสอบ [26]

ภาพ 8 แสดงแผนภาพการทดสอบประสิทธิภาพตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบระบบเปิดตามมาตรฐาน ISO 9806-1 สมรรถนะทางความร้อนของตัวเก็บรังสีอาทิตย์จะขึ้นกับสภาพอากาศและการทำงานของระบบ



ภาพ 8 แผนภาพการทดสอบประสิทธิภาพตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบระบบเปิด [27]

การวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์

การประเมินต้นทุนพลังงาน (Levelized Cost of Energy, LCOE) เป็นการหาราคาพลังงานเฉลี่ยตลอดอายุการใช้งาน โดยนำต้นทุนที่เกิดขึ้นตลอดอายุการใช้งาน ได้แก่ ต้นทุนค่าใช้จ่ายการดำเนินงานและการบำรุงรักษา ผลการดำเนินงานและค่าใช้จ่ายน้ำมันเชื้อเพลิง สำหรับการประเมินต้นทุนพลังงาน สามารถคำนวณจากผลรวมมูลค่าปัจจุบันสุทธิเทียบกับพลังงานที่สามารถผลิตได้ เป็นราคาเฉลี่ยที่พลังงานถูกขาย โดย LCOE ต่ำ แสดงว่าต้นทุนต่อราคาพลังงานมีค่าต่ำ และถ้ามีค่าต่ำกว่าต้นทุนพลังงานปัจจุบัน แสดงว่ามีประสิทธิภาพสูงทั้งทางด้านเทคนิคและทางด้านเศรษฐศาสตร์ คำนวณ LCOE ได้ดังสมการที่ 12 [28, 29, 30]

$$LCOE = \frac{C_c + \sum_{n=1}^N \frac{C_n}{(1+i)^n}}{\sum_{n=1}^N \frac{E_n}{(1+i)^n}} \quad (12)$$

- 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)

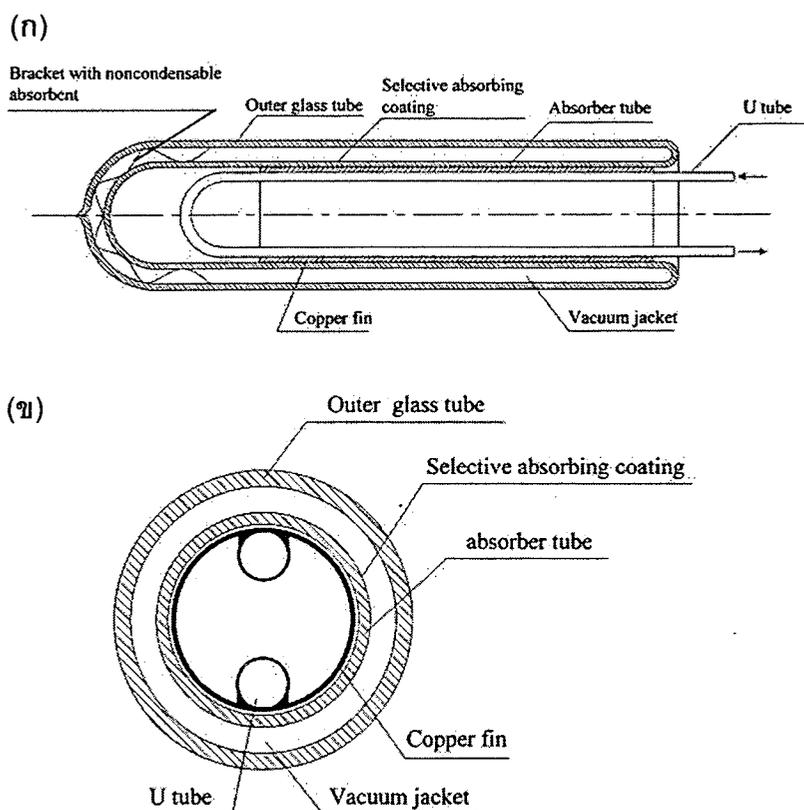
งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Tian Y. and Zhao C. [31] ได้ทบทวนเอกสารงานวิจัยเกี่ยวกับตัวเก็บรังสีอาทิตย์และการสะสมพลังงานในการประยุกต์ใช้งาน ในงานวิจัยอธิบายถึง ตัวเก็บรังสีอาทิตย์และการสะสมพลังงาน โดยในแต่ละหัวข้อสามารถแบ่งได้ดังนี้ ตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบ่งเป็นชนิดที่มีการติดตามดวงอาทิตย์และชนิดที่ไม่มีการติดตามดวงอาทิตย์ โดยชนิดชนิดที่มีการติดตามดวงอาทิตย์ประกอบด้วย ตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบแผ่นเรียบ ตัวเก็บรังสีอาทิตย์ร่วมโซล่าเซลล์ (Hybrid PVT collectors) และ ตัวเก็บรังสีอาทิตย์ร่วมกับโซล่าเซลล์ (Enhanced hybrid PVT collectors–Bifacial PVT) ชนิดที่ไม่มีการติดตามดวงอาทิตย์ประกอบด้วย ตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบหอคอยรวมแสง (Heliostat field collectors), แบบจานพาราโบลิกและแบบรางพาราโบลิก การสะสมพลังงานแสงอาทิตย์ กล่าวถึงการออกแบบและวัสดุ ซึ่งการออกแบบจะต้องคำนึงถึงประสิทธิภาพ ราคา และผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม วัสดุสะสมพลังงาน พิจารณาค่าต่างๆ ที่มีผลต่อการสะสม ดังนี้ ค่าความร้อนแฝง ค่าความร้อนจำเพาะ และค่าการสะสมพลังงานเคมี โดยในแต่ละหัวข้อจะมีการวิเคราะห์การถ่ายโอนความร้อนประกอบด้วย นอกจากนี้ในตอนท้ายของงานวิจัยยังแสดงแนวโน้มของเทคโนโลยีนี้ตัวเก็บรังสีอาทิตย์

D'Antoni M. and Saro O. [32] แสดงถึงความเป็นไปได้ในการนำเทคโนโลยีตัวเก็บรังสีอาทิตย์มาใช้อย่างกว้างขวางและหลากหลาย ระบบของพลังงานแสงอาทิตย์ที่เป็นหลักในงานวิจัยนี้คือ ตัวเก็บรังสีอาทิตย์ขนาดใหญ่ (Massive Solar Thermal Collectors, MSTC) ซึ่งสารทำงานที่ใช้ในการทดลอง คือ อากาศ ระบบที่ทดลองนี้ใช้สำหรับผลิตน้ำร้อนเท่านั้น มีการวิเคราะห์ทางความร้อนและความชื้นของ MSTC ด้วยวิธีทางคณิตศาสตร์ เหตุผลที่ผู้วิจัยสนใจงานนี้เพราะจำนวนของงานวิจัยที่เพิ่มมากขึ้น และเพื่อนำมาใช้กับโครงสร้างตัวดูดซับที่มีราคาต่ำและประสิทธิภาพคล้ายคลึงกับระบบพลังงานแสงอาทิตย์ที่มีมาก่อนหน้า กระประยุกต์ใช้ MSTC โดยทั่วไป ได้แก่ กระจายน้ำ การนำไปผลิตน้ำร้อนโดยตรง เป็นต้น การใช้คอนกรีตเป็นพื้นผิวดูดซับความร้อน ซึ่งถือว่าเป็นโครงสร้างที่แข็งแรง โดยภายในแผ่นคอนกรีตมีท่อขดไปมาฝังตัวอยู่ภายใน การติดตั้งตัวเก็บรังสีอาทิตย์ชนิดนี้ ถูกสร้างรวมไปกับตัวอาคารตามการใช้งาน

Ma L., et al. [33] วิเคราะห์ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของตัวเก็บรังสีแสงอาทิตย์แบบท่อสุญญากาศซึ่งมีลักษณะเป็นตัวยู ตัวเก็บรังสีอาทิตย์ที่ใช้ในการวิเคราะห์มีลักษณะดังภาพ 8 ซึ่งมีลักษณะเป็นท่อแก้วสองชั้น ระหว่างชั้นของท่อแก้วทั้งสองมีลักษณะเป็นสุญญากาศ ฟิล์มดูดซับถูกเคลือบอยู่บนผิวด้านนอกของท่อแก้วที่มีขนาดเล็กกว่า ซึ่งอยู่ในท่อแก้วชั้นในสุดบรรจุท่อรูปตัวยู ในการทดลองนี้ผู้วิจัยวิเคราะห์สัมประสิทธิ์การสูญเสียความร้อนและประสิทธิภาพความร้อนในสภาวะคงที่ ศึกษาอิทธิพลของชั้นอากาศระหว่างท่อดูดซับและครีบทองแดง และอิทธิพล

ของความเข้มรังสีอาทิตย์ที่มีต่อประสิทธิภาพของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า อิทธิพลของความต้านทานความร้อนของชั้นอากาศมีผลต่อประสิทธิภาพสูง เมื่อการนำความร้อน มีค่า 5-40 W/mK ส่งผลให้ประสิทธิภาพตัวเก็บรังสีอาทิตย์มีค่าลดลง 10% และอุณหภูมิของน้ำขา ออกลดลง 16% เมื่อเปรียบเทียบกับตัวเก็บรังสีอาทิตย์ที่ไม่คิดค่าความต้านทานความร้อนของ อากาศ และอุณหภูมิของผิวเคลือบของตัวดูดซับเพิ่มขึ้น 30°C



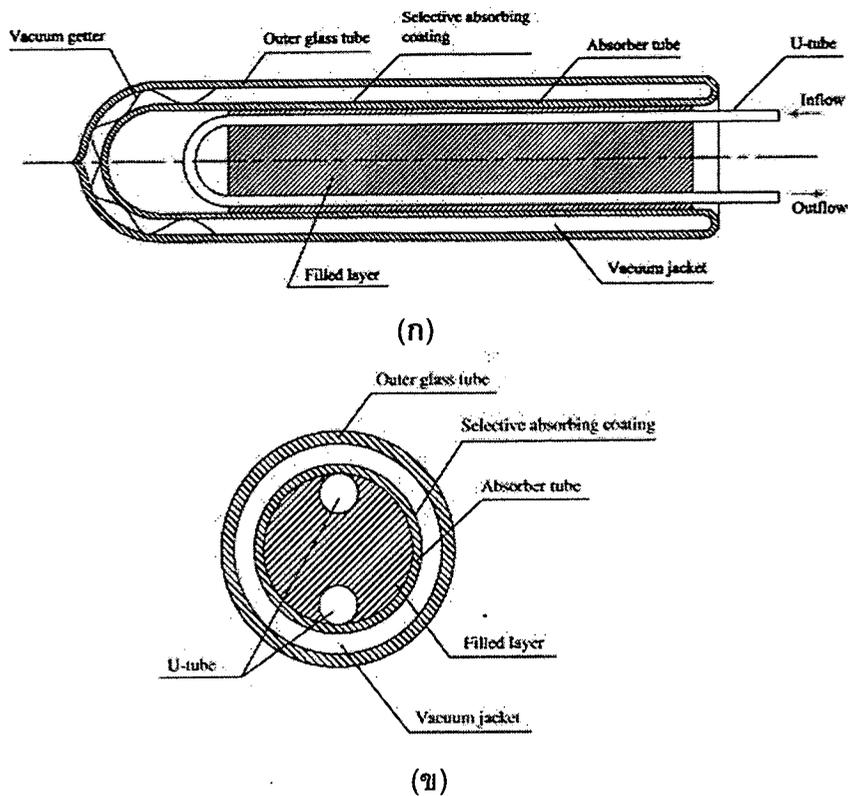
ภาพ 9 ตัวเก็บรังสีแบบท่อสุญญากาศชนิดใส่ท่อตัวดูด [33]

หมายเหตุ: (ก) องค์ประกอบของตัวเก็บรังสีอาทิตย์

(ข) ภาพตัดขวางของตัวเก็บรังสีอาทิตย์

Liang R., et al. [34] ได้ตรวจสอบทฤษฎีและทดลองเกี่ยวกับตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบท่อสุญญากาศชนิดใส่สารทำงาน ดังภาพ 9 สารทำงานทำหน้าที่ถ่ายโอนพลังงานความร้อน และศึกษาปัจจัยของความต้านทานความร้อนระหว่างท่อดูดซับและครีบทองแดงของตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบท่อสุญญากาศ การหาประสิทธิภาพใช้วิธีวิเคราะห์ทางทฤษฎีและการทดลอง โดยอุณหภูมิที่ได้รับของสารทำงานและประสิทธิภาพ ถูกคำนวณจากสมการสมดุลพลังงานสำหรับสารทำงานใน

ท่อดัวยู ผลของค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียความร้อนและการนำความร้อนของชั้นของสารทำงานผลของการทดลองแสดงให้เห็นว่าตัวเก็บรังสีอาทิตย์มีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น



ภาพ 10 ตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบท่อสุญญากาศชนิดใสสารทำงาน [34]

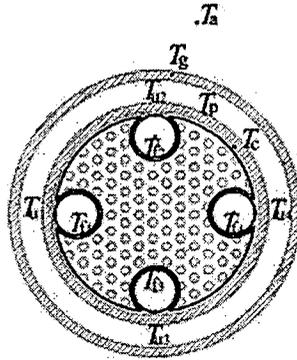
หมายเหตุ: (ก) องค์ประกอบของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ชนิดใสสารทำงาน

(ข) ภาพตัดขวางตัวเก็บรังสีอาทิตย์ชนิดใสสารทำงาน

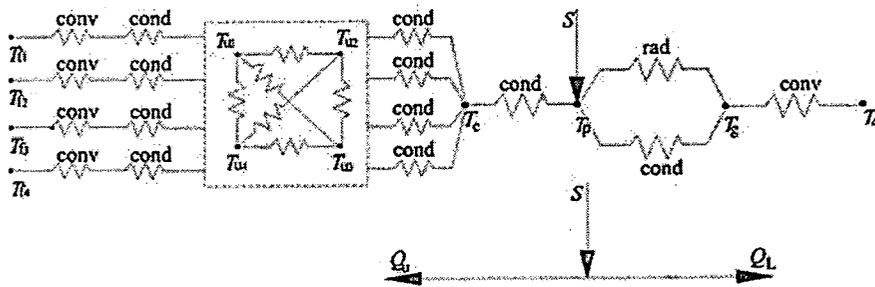
Liang R., et al. [35] ได้วิเคราะห์ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ชนิดสุญญากาศที่ได้ออกแบบขึ้นมาใหม่ โดยให้ท่อดัวยูสองอันใส่ไว้ในท่อสุญญากาศของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ภายในบรรจุสารทำงาน งานวิจัยนี้สืบเนื่องมาจาก [34] โดยเรียกตัวเก็บรังสีอาทิตย์ชนิดที่ท่อดัวยู 1 ท่อดัวยู SUFET และ 2 ท่อดัวยู DUFET โดยแบบใสท่อดัวยู 2 ท่อดัวยูมีการออกแบบดังภาพ 10 ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า ความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิขาเข้าและขาออกมีค่าเพิ่มมากขึ้น ค่าการนำความร้อนของชั้นสารทำงานมีค่าเพิ่มขึ้นภายใต้ค่ารังสีอาทิตย์เดียวกัน นอกจากนี้อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นรวดเร็ว เมื่อค่าการส่งผ่านความร้อนแบบการนำความร้อนเพิ่มขึ้น (λ_c) 0.2-10 W/mK และแนวโน้มการเพิ่มอุณหภูมิจะลดลง เมื่อค่าการส่งผ่านความร้อนแบบการนำมีค่ามากกว่า 10 W/mK

เมื่อค่ารังสีอาทิตย์มีค่า 900 W/m^2 และค่าการนำความร้อนของสารทำงานมีค่าถึง 100 W/mK DUFET มีประสิทธิภาพ 0.8 หรือ 80% และจากการเปรียบเทียบภายในเงื่อนไขเดียวกันปรากฏว่า DUFET มีประสิทธิภาพสูงกว่า SUFET 4 %

(ก)



(ข)



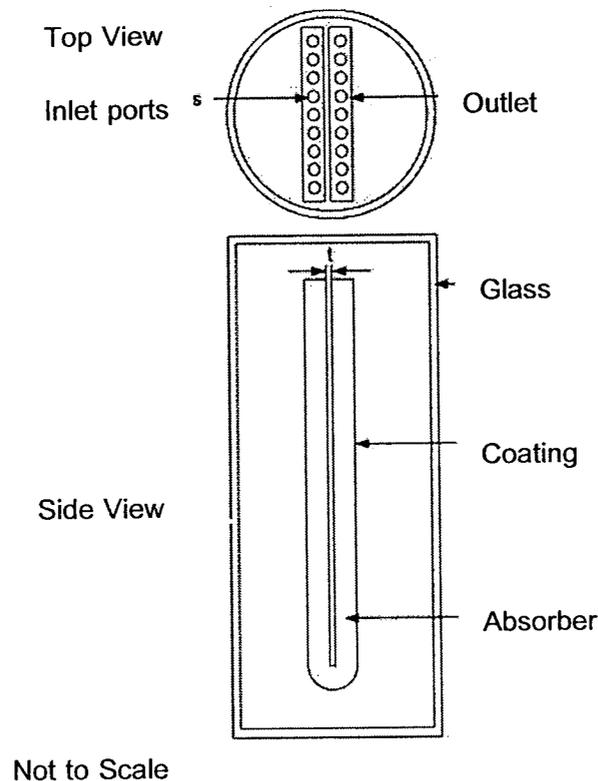
ภาพ 11 ท่อสุญญากาศแบบท่อด้วยชนิดเดิมสารทำงาน [35]

หมายเหตุ: (ก) ภาพตัดขวางลักษณะของแบบจำลองท่อสุญญากาศ

(ข) โครงข่ายความร้อนของท่อสุญญากาศแบบท่อด้วยชนิดเดิมสารทำงาน

Sharma N. and Diaz G. [36] ศึกษาประสิทธิภาพของตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบสุญญากาศที่ออกแบบขึ้นมาใหม่ ดังแสดงในภาพ 11 ภายในท่อสุญญากาศของตัวเก็บรังสีอาทิตย์มีลักษณะเป็นท่อแบนรูปตัวยูซึ่งเคลือบด้วยสารรับรังสีบนผิวชั้นนอกของท่อแบนนี้ ภายในท่อแบนบรรจุท่อรูปตัวยูเล็กๆ เรียงกันจำนวน 9 ท่อ ลักษณะดังภาพ 11 โดยระหว่างท่อรูปตัวยูเล็กๆ นั้นมีสารทำงานบรรจุอยู่ โดยตัวดูดซับถูกบรรจุในท่อแก้วสุญญากาศเพื่อลดการสูญเสียเนื่องจากการพาความร้อน ผลของรูปแบบที่สร้างขึ้นใหม่นี้แสดงให้เห็นว่ามีประสิทธิภาพเพิ่มมากขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบสุญญากาศที่ไม่ได้ใส่ท่อเข้าไปในตัวดูดซับที่ได้จากงานวิจัยภายใต้เงื่อนไขเดียวกัน ประสิทธิภาพถูกวิเคราะห์ทั้งแบบรวมแสงและไม่รวมแสง ประสิทธิภาพของ

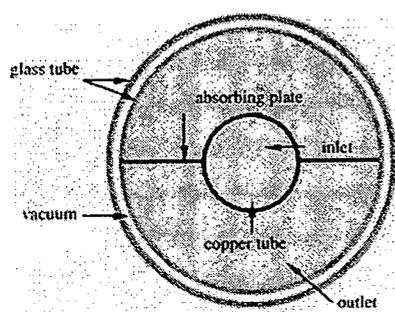
ตัวเก็บรังสีอาทิตย์ชนิดใหม่ที่สร้างขึ้นนี้ มีความไวต่อการสูญเสียความร้อนตรงช่องว่าง ซึ่งสามารถแก้ปัญหานี้ได้ โดยการเพิ่มความเหมาะสมของรูปร่างใกล้กับจุดรวมแสง คำนวณความดันตกคร่อม และประสิทธิภาพระหว่างอัตราการไหลเชิงมวล 10^{-3} kg/s และ 10^{-2} kg/s สำหรับการวิเคราะห์เชิงเรขาคณิต



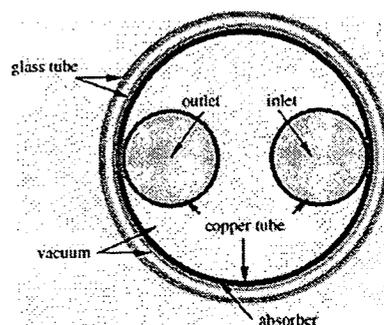
ภาพ 12 ภาพตัดขวางและด้านข้างของตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบสุญญากาศ ที่ออกแบบใหม่ [36]

Yong K. and Taebeom S. [37] เปรียบเทียบประสิทธิภาพเชิงความร้อนของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ ที่มีรูปร่างของท่อดูดซับที่แตกต่างกันจำนวน 4 รูปแบบ ดังภาพ 12 (ก-ง) แต่ละรูปแบบมีความยาว 1,200 มิลลิเมตร และเส้นผ่านศูนย์กลาง 37 มิลลิเมตร พิจารณารูปร่างที่มีประสิทธิภาพดีที่สุดจาก รังสีตรง รังสีกระจาย และเงาของท่อที่เกิดจากการจัดเรียงระยะห่างระหว่างท่อนอกจากนี้ยังทดสอบประสิทธิภาพโดยใช้ท่อ 1 ท่อของแต่ละรูปร่างมาเปรียบเทียบกัน จากการทดลองสรุปได้ว่า ประสิทธิภาพของ 1 ท่อ พิจารณาเพียงรังสีตรงเท่านั้น เมื่อมุมตกกระทบมีค่าน้อยลง รูปแบบที่ 3 ให้ค่าประสิทธิภาพสูงสุด ในทางกลับกันเมื่อมุมตกกระทบมีค่าเพิ่มขึ้น ส่งผลให้

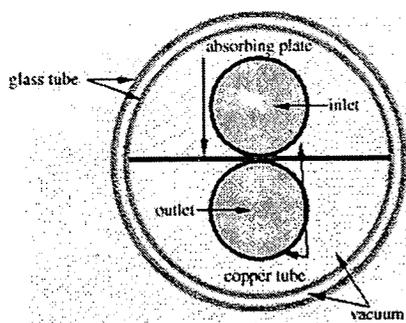
รูปแบบที่ 2 มีประสิทธิภาพมากกว่ารูปแบบที่ 3 ถึงอย่างไรก็ตามรูปแบบที่ 2 ให้ประสิทธิภาพสูงสุดสำหรับการเปรียบเทียบแบบ 1 ท่อ และเพื่อให้ได้ประสิทธิภาพที่แท้จริงในการใช้งาน จึงนำเงาของท่อที่เกิดจากจัดเรียงมาพิจารณารวมกับค่ารังสีอาทิติย์รวม ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า รูปแบบที่ 3 ให้ผลดีที่สุดในทุกๆช่วงมุมตกกระทบ ผลการทดลองที่แตกต่างกันทำให้ต้องพิจารณาระยะห่างระหว่างท่อ เมื่อระยะห่างเพิ่มขึ้นจำนวนท่อในการติดตั้งจะลดลง เนื่องจากพื้นที่จำกัด ส่งผลให้พื้นที่ดูดซับลดลงและส่งผลต่อประสิทธิภาพ แม้ว่าเมื่อจำนวนท่อเพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้เกิดเงาก็ตาม ระยะห่างระหว่างท่อที่เหมาะสมคือ 42 มิลลิเมตร ใช้ท่อจำนวน 15 ท่อ



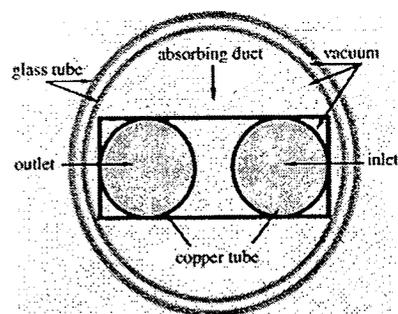
(ก) Cross-section of model I



(ข) Cross-section of model II



(ค) Cross-section of model III



(ง) Cross-section of model IV

ภาพ 13 (ก-ง) ภาคตัดขวางของรูปแบบต่างๆ [37]

Budihardjo I. and Morrison G. [38] หาประสิทธิภาพของตัวเก็บรังสีอาทิติย์แบบสุญญากาศ โดยมีน้ำไหลผ่านภายในท่อสุญญากาศเพื่อผลิตน้ำร้อนและวิเคราะห์ประสิทธิภาพจากการทดลองเชิงแสง การสูญเสียความร้อน และรูปแบบการไหลตามธรรมชาติภายในท่อ ประสิทธิภาพของตัวเก็บรังสีอาทิติย์ถูกนำไปเปรียบเทียบกับตัวเก็บรังสีอาทิติย์แบบแผ่นเรียบ ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าตัวเก็บรังสีอาทิติย์แบบท่อสุญญากาศจำนวน 30 ท่อ (พื้นที่ 2.9

ตารางเมตร) ประสิทธิภาพต่ำกว่าตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบแผ่นเรียบจำนวน 2 แผ่น (พื้นที่ 3.7 ตารางเมตร)

Kalogirou S. [8] กล่าวว่า ปัจจุบันตัวดูดซับรังสีอาทิตย์ในเชิงพาณิชย์ผลิตโดยการเคลือบด้วยไฟฟ้า (Electroplating), การอะโนไดซ์ (Anodization), การเคลือบด้วยไอระเหย (Evaporation), การเคลือบด้วยโลหะ (Sputtering) และการประยุกต์ใช้สีที่มีคุณสมบัติเป็นสารเลือกรับรังสี (Applying solar selective paints) แสดงให้เห็นว่า ความต้องการของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ที่ใช้ในเชิงพาณิชย์นั้นคือ เทคนิคสุญญากาศที่โดดเด่นด้วยต้นทุนที่ต่ำและเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม

Abbas A. [39] รายงานผิวเคลือบดูดกลืนรังสีอาทิตย์ สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิดคือ แบบไม่มีและมีความสมบัติเลือกรับรังสีอาทิตย์ ตัวอย่างผิวเคลือบที่มีความสมบัติเลือกรับรังสีอาทิตย์ เช่น Black chrome, Black nickel, black copper และ Black anodize สำหรับ Black anodize เป็นชนิดอะลูมิเนียมออกไซด์ที่มีการเติมธาตุนินทรีน (pigment) เข้าไปบนผิวเคลือบทำให้มีความสมบัติดูดกลืนรังสีอาทิตย์เท่ากับ 0.94 และค่าการนำความร้อนเท่ากับ 0.07 นอกจากนี้ยังมีการสรุป คุณสมบัติของสารเลือกรับรังสีอาทิตย์ที่ดีต้องมีความสมบัติดังต่อไปนี้ มีค่าการดูดกลืนรังสีอาทิตย์ที่สูง ($\alpha > 0.90$) มีค่าการแผ่ความร้อนที่ต่ำ ($\varepsilon < 0.20$) มีมุมการรับรังสีอาทิตย์ที่กว้าง (Large angle of acceptance) มีการใช้งานที่ยาวนานภายใต้สภาวะช่วงอุณหภูมิการทำงานและสิ่งแวดล้อมรอบๆ มีความทนทานเมื่อเกิดความร้อนเกินกำหนด (Overheating) มีความเสถียรเมื่อเกิดภาวะชะงักงัน (Stagnation) มีความเสถียรเมื่อมีความชื้น มีอายุการใช้งานเท่ากับอายุของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ สามารถนำกลับมาผลิตซ้ำได้ และมีความเหมาะสมด้านราคา

Tharamani C. and Mayanna S. [40] รายงานผลการพัฒนาของผิวเคลือบโลหะผสม Cu-Ni (Cu-Ni alloys coating) สำหรับใช้เป็นสารเลือกรับรังสีอาทิตย์ โดยวิธี Electrodeposition แบบใช้ hull cell บนแผ่น Cu foil ผลการทดลองพบว่ามีค่าการดูดกลืนรังสีอาทิตย์สูงคือ $\alpha = 0.94$ และมีค่าการแผ่ความร้อนต่ำ $\varepsilon = 0.08$ และมีความเป็นไปได้สำหรับการใช้งานในตัวเก็บรังสีอาทิตย์สำหรับการใช้งานในบ้านเรือน (Domestic water heater)

Katumba G., et al. [41] รายงานผลการเคลือบสารเลือกรับรังสีอาทิตย์ของคาร์บอนขนาดนาโนที่ผสมรวมกันกับ SiO_2 , ZnO และ NiO ในลักษณะที่เป็นเมตริกซ์ (matrix) ด้วยเทคนิคโซลเจล (Sol-gel technique) บนแผ่นอะลูมิเนียม ค่าการแผ่รังสีของตัวอย่าง พบว่ามีค่าเท่ากับ 30% สำหรับ SO_2 , 15% สำหรับ SiO_2 และ 10% สำหรับ NiO เมตริกซ์ สำหรับค่าการดูดกลืนรังสีอาทิตย์มีค่าเท่ากับ 90, 89 และ 93% สำหรับ SiO_2 , ZnO และ NiO เมตริกซ์ ตามลำดับ ดังนั้นผิว

เคลือบตัวดูดกลืนรังสีอาทิตย์ชนิด NiO มีสมบัติเป็นสารเลือกรับรังสีอาทิตย์ที่ดีที่สุด รองลงมาคือ ZnO และ SiO₂ ตามลำดับ

Antonaia A., et al. [42] ทำการศึกษาการใช้ W-Al₂O₃ cermet มาเคลือบบนท่อเก็บรังสีอาทิตย์ สำหรับการใช้งานที่อุณหภูมิสูง โดยในกระบวนการทดลองมีการอบอ่อน (annealing process) ที่อุณหภูมิ 580°C เป็นเวลา 2-30 วัน พบว่ามีค่าการดูดกลืนรังสีอาทิตย์ 93.70% และค่าแปลงรังสีความร้อนเท่ากับ 9.39% (400°C) และ 13.20% (550°C)

Ding D., et al. [43] ประสบความสำเร็จในการเตรียมสารดูดกลืนรังสีอาทิตย์แบบเลือกรับรังสีอาทิตย์ชนิดใหม่ คือ Cu-CuAl₂O₄ hybrids ในฟิล์ม anodic aluminum oxide (AAO) บนพื้นผิวอะลูมิเนียมโดยใช้กระบวนการ Electrochemical ผลการทดลองพบว่ามีค่าการดูดกลืนรังสีอาทิตย์ (α) เท่ากับ 0.923 ค่าการแผ่ความร้อน (ε) เท่ากับ 0.06 นอกจากนี้ ผลการทดลองที่ได้จากการทดลองที่สภาวะอุณหภูมิสูงและมีการควบคุมของความชื้นสูง พบว่าค่าการดูดกลืนรังสีมีค่าลดลงหลังจากผ่านการอบร้อนที่อุณหภูมิ 200°C ในอากาศเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ค่า Spectral selective (α/ε) มีค่าเท่ากับ 0.87/0.04 มีการรายงานว่าการควบคุมเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้ค่าการดูดกลืนรังสีอาทิตย์มีค่าลดลง

Wu L., et al. [44] รายงานผลการเตรียมสารเลือกรับรังสีอาทิตย์ชนิด CrN_xO_y/SiO₂ บนพื้นผิวทองแดง (Cu) โดยวิธี DC reactive magnetron sputtering ผลการทดลองพบว่ามีค่าการดูดกลืนรังสีอาทิตย์ที่สูง $\alpha = 0.947$ และมีค่าการแผ่ความร้อนที่ต่ำ $\varepsilon = 0.05$ ที่อุณหภูมิ 80°C ค่า Spectral selective (α/ε) มีความเสถียร (0.930/0.073) หลังผ่านการอบที่อุณหภูมิ 278°C ในอากาศเป็นเวลา 300 ชั่วโมง แต่ Spectral selective (α/ε) มีค่าลดลง (0.904/0.135) หลังผ่านการอบที่อุณหภูมิ 278°C ในอากาศเป็นเวลา 600 ชั่วโมง

Stepniowski W., et al. [45] ศึกษาการทำอะลูมิเนียมอะโนไดซ์ออกไซด์ ในกรดโครเมียม 0.3 M ปัจจัยของการดำเนินงาน (เช่น แรงดันอะโนไดซ์และอุณหภูมิของอิเล็กโทรไลต์) บนรูปทรงของอะลูมิเนียมออกไซด์ขั้วบวก (รวมไปถึงเส้นผ่านศูนย์กลางรูพรุน ระยะทางระหว่างแต่ละรูพรุน ความหนาของชั้นออกไซด์ และความหนาแน่นของรูพรุน) ผลการศึกษาพบความสัมพันธ์โดยทั่วไปของรูปทรงของรูพรุนอะลูมิเนียมขั้วบวกขนาดเล็กกับสภาวะการใช้งาน เช่น การเพิ่มขึ้นเป็นเชิงเส้นของรูพรุน และระยะทางระหว่างรูพรุนกับแรงดันอะโนไดซ์ การทำอะลูมิเนียมอะโนไดซ์ออกไซด์กับขั้วบวกมีลักษณะเฉพาะคือการจัดเรียงตัวต่ำ โดยพิจารณาจากการวิเคราะห์การแปลงฟูเรียร์ (Fast Fourier transforms analyses) ของภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนที่มีกำลังขยายสูง (Field Emission Scanning Electron Microscope) ซึ่งมีความเข้มข้นสูงของตำแหน่ง

ออกซิเจนที่ว่าง นอกจากนี้สภาวะการทดลองที่เหมาะสมที่ไอออนโครเมตรวมตัวสมบูรณ์ในผนังอะลูมิเนียมขั้วบวกถูกพิจารณา อัตราการเจริญเติบโตออกไซด์สูงขึ้นมากกว่าไอของโครเมตที่ถูกฝังติดอยู่ ไอออนโครเมตที่ถูกฝังติดและการรวมตัวของตำแหน่งออกซิเจนที่ว่างทำให้อะลูมิเนียมออกไซด์ขั้วบวกมีแนวโน้มเป็นวัสดุเรืองแสง (Luminescent material)

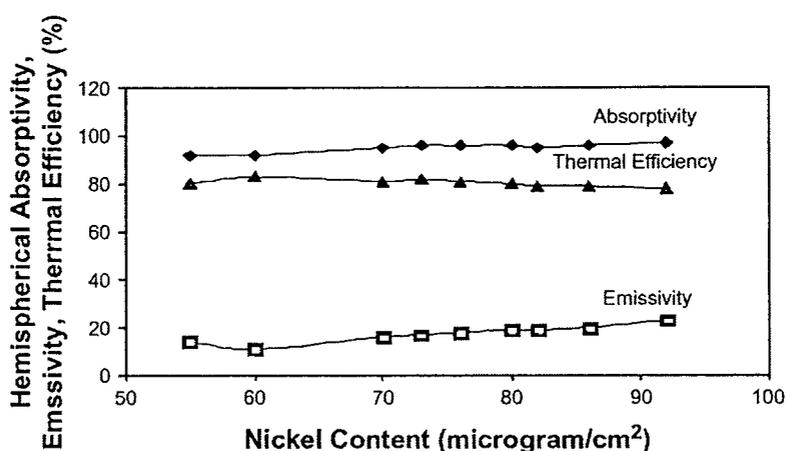
Zekry J. et al. [46] ผลิตอะลูมิเนียมอะโนไดซ์สำหรับงานชิ้นขนาดเล็กแบบสองมิติที่มีรูปทรงของรูพรุนของขั้วบวกที่แน่นอน (Porous anodic alumina, PAA) โดยเคลือบโดยการอะโนไดซ์บนอะลูมิเนียม โครงสร้างของ PAA มีลักษณะเป็นรูพรุนทรงกระบอกขนาดเล็ก ซึ่งถูกนำไปใช้งานหลากหลาย รวมทั้งการผลิตเส้นใยนาโนและระบบไฟฟ้า เครื่องกลระดับจุลภาค กระบวนการโฟโตริซิสตีในการเคลือบ ความไม่เสถียรในระหว่างกระบวนการอะโนไดซ์และขอบเขต รวมถึง การออกแบบการเคลือบทำหน้าที่เป็นขอบเขตที่สามารถเปลี่ยนตำแหน่งไป-มาด้วยตัวเอง ขอบเขตนี้ถูกสร้างขึ้นรวมกับการเคลือบของกระบวนการอะโนไดซ์ เป็นการป้องกันการเคลือบด้วยกระบวนการโฟโตริซิสตีที่ไม่พึงประสงค์และการขยายตัวของโครงสร้าง PAA ผลของขอบเขตที่พิเศษดังกล่าวส่งผลให้การขยายตัวด้านข้างของการอะโนไดซ์ลดลง จากปกติ 300 ไมโครเมตร ลดลงประมาณ 6 ไมโครเมตร ของชิ้นงานขนาด 200 มิลลิเมตร

ณัฐสมน เพชรแสง และอิ มิง ถัง [47] ศึกษาปัจจัยในการผลิตอะลูมิเนียมออกไซด์อะโนไดซ์ ได้แก่ อุณหภูมิและกระแสไฟฟ้าที่มีผลต่อโครงสร้างสัณฐานวิทยาของอะลูมิเนียมออกไซด์ เมื่อผ่านกระบวนการอะโนไดซ์ ให้ความเข้มข้นของกรดออกซาลิกคงที่ 0.3 M ความต่างศักย์ 40 V แล้ววิเคราะห์หาเส้นผ่านศูนย์กลางของรูที่อยู่บนอะลูมิเนียมออกไซด์ พบว่าการอะโนไดซ์ที่อุณหภูมิ 16 °C และกระแสไฟฟ้า 110 mA เกิดขนาดของรูที่มีการกระจายน้อยกว่าการอะโนไดซ์ที่อุณหภูมิสูงกว่า

Tesfamichael T. and Wackelgard E. [48] รายงานผลการทดลองและจำลองทางคณิตศาสตร์ เรื่องผลของมุมตกกระทบของรังสีอาทิตย์บนตัวดูดกลืนรังสีอาทิตย์สองแบบ คือ nickel pigmented aluminium oxide และ sputtered nickel/nickel oxide โดยทำการคำนวณค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์ทั้งหมดในช่วง 300-2500 นาโนเมตร สำหรับมุมตกกระทบระหว่าง 5 – 80° ผลการทดลองพบว่า ค่าการดูดกลืนรังสีอาทิตย์ของ sputtered nickel/nickel oxide มีค่าน้อยกว่า nickel pigmented aluminium oxide ที่มุมตกกระทบสูง เนื่องจาก nickel pigmented aluminium oxide มีลักษณะโครงสร้างเป็นโครงสร้างสองชั้น (double-layer structure) ทำให้สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการดูดกลืนที่มุมตกกระทบสูงๆ ได้ อย่างไรก็ตามเมื่อตัวดูดกลืนรังสีอาทิตย์ถูกรอบ

ด้วยแก้วหรือกระจกใสแล้วตามลักษณะของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ ผลการทดลองพบว่าประสิทธิภาพสมบัติทางแสงที่มุมตกกระทบสูงๆ ไม่มีความแตกต่างกัน

Wazwaz A., et al. [49] รายงานผลของปริมาณนิกเกิลบนอะลูมิเนียมอะโนไดซ์ด้วยวิธี reverse periodic plating technique ผลการทดลองพบว่า ปริมาณของนิกเกิลมีผลอย่างมากต่อประสิทธิภาพทางความร้อน (thermal efficiency) ค่าการดูดกลืนรังสีอาทิตย์ (absorptivity) และค่าการปลดปล่อยรังสี (emissivity) อย่างไรก็ตามปริมาณที่จำกัดของนิกเกิลอยู่ที่ $60 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ แสดงความสัมพันธ์ของปริมาณนิกเกิลที่มีต่อค่าเฉลี่ยสัมประสิทธิ์การดูดกลืนรังสี, ประสิทธิภาพเชิงความร้อน, สัมประสิทธิ์การสะท้อนรังสีและสัมประสิทธิ์การแผ่รังสี โดยค่าที่จำกัดนี้เพียงพอที่สามารถลดค่าดัชนีการสะท้อน (reflective index) จากชั้นขอบอะลูมินา (barrier alumina) จนถึงชั้นรูพรุนของอะลูมินา (porous alumina) ทำให้เกิดการกับเก็บรังสีอาทิตย์ไว้ภายในรูพรุนได้ด้วยผลของอนุภาคนิกเกิลที่อยู่ในรูพรุนอะลูมินา



ภาพ 14 ผลของปริมาณนิกเกิลต่อ ค่าเฉลี่ยสัมประสิทธิ์การดูดกลืนรังสี, ประสิทธิภาพเชิงความร้อน, สัมประสิทธิ์การสะท้อนรังสีและสัมประสิทธิ์การแผ่รังสี [49]

กฤษณ์ คงเจริญ และ ธันวา จิตต์สงวน [50] วิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์ของการลงทุนโครงการผลิตน้ำร้อนด้วยระบบผสมผสานพลังงานแสงอาทิตย์ : กรณีศึกษา โรงพยาบาลแกลง จังหวัดระยอง การวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ ใช้ข้อมูลจากการตรวจวัดการทำงานจริงของระบบในช่วงระยะเวลา 6 เดือน นับตั้งแต่ติดตั้งระบบ อายุโครงการเท่ากับ 16 ปี อัตราคิดลดร้อยละ 8 พบว่า โครงการมีมูลค่าปัจจุบันสุทธิ (NPV) (พ.ศ.2546) เท่ากับ 1,071,359.57 บาท อัตราส่วนผลประโยชน์ต่อต้นทุน (BCR) เท่ากับ 2.34 และ อัตราผลตอบแทนภายในของโครงการ (IRR) เท่ากับร้อยละ 31.15 ผลการวิเคราะห์ความอ่อนไหวที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงของต้นทุน

และผลประโยชน์ของโครงการเนื่องจากปัจจัยต่างๆ พบว่าโครงการยังคงมีความเป็นไปได้ทางเศรษฐศาสตร์ในการลงทุน และการทดสอบค่าความแปรเปลี่ยนของต้นทุนและผลประโยชน์ของโครงการ พบว่าต้นทุนของโครงการสามารถเพิ่มขึ้นได้ถึง 134.33 % และผลประโยชน์ของโครงการสามารถลดลงได้ถึงร้อยละ 57.33 สามารถสรุปได้ว่า โครงการมีความเป็นไปได้ทางเศรษฐศาสตร์ และมีความคุ้มค่าต่อการลงทุน

จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่ามีการใช้งานตัวเก็บรังสีอาทิตย์อย่างแพร่หลาย และหลากหลายประเภทตามความต้องการของการใช้น้ำร้อนที่อุณหภูมิแตกต่างกัน มีการคิดค้นออกแบบและพัฒนาตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบใหม่ขึ้นมากมาย เพื่อลดค่าใช้จ่าย ลดการสูญเสียความร้อนและเพิ่มประสิทธิภาพการใช้งานให้กับตัวเก็บรังสีอาทิตย์นั่นเอง เทคโนโลยีการเคลือบสารรับรังสีหลายวิธี เข้ามามีบทบาทเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพ แต่เนื่องด้วยเป็นเทคโนโลยีขั้นสูง จึงทำให้ราคาสูงตามไปด้วย อีกทั้งสารเคลือบบางชนิดนั้นไม่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม จึงประยุกต์ใช้อะลูมิเนียมออกไซด์ที่มีการเติมสารเลือกรับรังสีอาทิตย์ เพื่อเป็นตัวดูดกลืนแสงสำหรับตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบท่อสุญญากาศ โดยชุดอุปกรณ์อะลูมิเนียมออกไซด์ที่ประยุกต์ขึ้นมานี้ มีการทำงาน 2 หน้าที่ในเวลาเดียวกัน คือทำหน้าที่ดูดกลืนรังสีอาทิตย์และถ่ายเทความร้อนจากรังสีอาทิตย์ให้กับสารทำงานในท่อนำความร้อน (Heat pipe) ภายในท่อแก้วสุญญากาศแบบสองชั้น ซึ่งแตกต่างจากตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบเดิมและเป็นอีกหนึ่งทางเลือกสำหรับการพัฒนาตัวเก็บรังสีอาทิตย์