



การศึกษามัธยมศึกษาที่หกใช้กับโรงเรียนสองอาทิตย์

โดย

รศ. ดร. เชาวน ทองประเสริฐ

รศ. ดร. วิมลศรี ทองรุ่งเรือง

รศ. ดร. วัชรวิทย์ บงกชเจริญ

โครงการวิจัยเลขที่ 33-102- 2521

พิมพ์และพิมพ์การวิจัยของคณะวิศวกรรมศาสตร์

✓ สถาบันวิจัยและพัฒนาของคณะวิศวกรรมศาสตร์

คณะวิศวกรรมศาสตร์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

กรุงเทพฯ

๗๓  
๖๓ 15  
002279

พฤษภาคม 2528



การศึกษาวิชาชีพเลือกตั้งเพื่อใช้กับแผนรับส่งอาทิตย์

โดย

รศ. ดร. มาฉิ ทงประเสริฐ

รศ. ดร. สัมพันธ์ จรุงเรือง

รศ. ดร. วิทยา ยงเจริญ

โครงการวิจัยเลขที่ 33-ME- 2521

ทุนส่งเสริมการวิจัยคณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

พฤศจิกายน 2526

## บทคัดย่อ

ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของแผงรับแสงอาทิตย์แบบแผ่นจะเพิ่มขึ้น ถ้านำแผ่นดูดแสงอาทิตย์ชนิดที่มีผิวเป็นซีเล็คตีฟมาใช้แทนแผ่นดูดแสงอาทิตย์ชนิดผิวสีดำที่นิยมใช้กันอยู่ เพราะผิวซีเล็คตีฟให้ค่าการดูดแสงอาทิตย์สูงและให้ค่าการส่งออกรังสีความร้อนต่ำ ผิวซีเล็คตีฟที่นำมาศึกษามีสามชนิดคือ คอปเปอร์ออกไซด์ นิเกิลดำและแบล็คโครม วัสดุที่ใช้ทำพื้นคือทองแดง เหล็กและอลูมิเนียม คอปเปอร์ออกไซด์บนชั้นงานทองแดง เท่านั้นที่ให้ความคงทนต่อการใช้งาน ส่วนนิเกิลดำและแบล็คโครมอาจนำไปใช้ได้ดีทั้งที่ชั้นงานที่เป็นเหล็กและอลูมิเนียม การควบคุมคุณภาพของผิวซีเล็คตีฟซึ่งได้แก่ค่าการดูดแสงอาทิตย์และค่าการส่งออกรังสีความร้อนทำได้โดยศึกษาตัวแปรคือความเข้มของกระแสไฟฟ้าที่ใช้และระยะเวลาที่ใช้ชุบชั้นงานในสารละลาย การศึกษาหาค่าตัวแปรดังกล่าวที่เหมาะสมทำได้โดยการทดลองใช้ค่าตัวแปรหลายค่าสำหรับชั้นงานและผิวซีเล็คตีฟชนิดเดียวกัน แล้วเปรียบเทียบคุณสมบัติของผิวซีเล็คตีฟที่ได้

วิธีการวัดค่าการดูดแสงอาทิตย์,  $\alpha$ , และค่าการส่งออกรังสีความร้อน,  $\epsilon$ , ทำได้โดยใช้เครื่องมือซึ่งออกแบบและสร้างขึ้นเพื่อใช้เฉพาะงานวิจัยนี้ ค่าการดูดแสงอาทิตย์ของผิววัดได้โดยติดตั้งชั้นงานในภาชนะปิดซึ่งมีด้านบนโปร่งใสและภายใน เป็นสุญญากาศแล้ววัดอัตราส่วนของพลังงานความร้อนซึ่งดูดไว้โดยชั้นงานต่อพลังงานแสงอาทิตย์ที่ตกบนชั้นงาน ค่าการส่งออกรังสีความร้อนของผิววัดได้จากอัตราส่วนของพลังงานซึ่งส่งออกจากชั้นงานต่อพลังงานซึ่งชั้นงานได้รับ เมื่อชั้นงานติดตั้งในภาชนะปิดและภายใน เป็นสุญญากาศ

จากผลการทดลอง ค่าตัวแปรที่เหมาะสมของขบวนการทำผิวซีเล็คตีฟ: ค่าการดูดแสงอาทิตย์,  $\alpha$ , และค่าการส่งออกรังสีความร้อน,  $\epsilon$ , ของผิวซีเล็คตีฟที่ศึกษามีดังนี้ สำหรับคอปเปอร์ออกไซด์บนชั้นงานทองแดง  $\alpha = 0.936$  และ  $\epsilon = 0.052$  สำหรับนิเกิลดำบนชั้นงานเหล็กหรืออลูมิเนียม,  $\alpha = 0.942$  และ  $\epsilon = 0.185$  และสำหรับแบล็คโครมบนชั้นงานเหล็กหรืออลูมิเนียม  $\alpha = 0.942$  และ  $\epsilon = 0.112$

เนื่องจากต้นแบบของแผงรับแสงอาทิตย์ชนิดที่แผ่นดูดแสงอาทิตย์เป็นซีเล็คตีฟมีราคาค่าสร้างสูงมากจึงไม่ได้สร้างขึ้น ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของแผงรับแสงอาทิตย์ดังกล่าวจึงไม่ได้วัดค่าโดยตรงแต่ใช้การสร้างแผงรับแสงอาทิตย์ชนิดแผ่นดูดแสงอาทิตย์เป็นสีดำขึ้นแทนแล้วติดตั้งทดสอบหาค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนแล้วใช้วิธีเปลี่ยนค่าตัวแปร ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของแผงรับแสงอาทิตย์ซึ่งมีแผ่นดูดมีผิวเป็นซีเล็คตีฟจะคำนวณได้ จากผลการทดลองและการคำนวณได้ค่าความลาดชันของเส้นประสิทธิภาพเชิงความร้อนของแผงรับแสงอาทิตย์ที่มีผิวของแผ่นดูดแสงอาทิตย์เป็นสีดำและซีเล็คตีฟเท่ากับ  $-7.11$  และ  $-4.89$  ตามลำดับ และมีค่าจุดตัดบนแกนประสิทธิภาพเชิงความร้อนเท่ากับ  $0.74$  และ  $0.76$  ตามลำดับ

## Abstract

The thermal efficiency of a flat plate solar collector can be increased by using an absorber plate with selective surface because of its high solar absorptivity and low thermal emissivity. In this study, the production of three types of selective surfaces, i.e., copper oxide, black nickel and black chrome are investigated. The base metals used are copper, steel and aluminum. Copper oxide can only be produced from copper base metal but the black nickel and black chrome can be produced well from either steel or aluminum. The process used in producing selective surface mentioned above is electroplating process. The quality of a selective surface is depend on two major variables, duration of exposure time and intensity of electrical current. In order to be able to draw any conclusion on the dependency of property of a selective surface on these two variables, the experiments are set for various combinations of the variables.

Radiation properties of a selective surface, solar absorptivity and thermal emissivity, are measured by the instrument specially design and construction for the project. A solar absorptivity of a selective surface is measured by installing the material inside a closed vessel, transparent on top and vacuum inside, and then the ratio of thermal energy absorbed to the solar radiation incident on the material surface is recorded. A thermal emissivity of the surface is measured in term of ratio of thermal energy emitted from the surface to the total energy supplied when the material is installed in a closed and vacuum space.

From the experimental results, with the suitable combination of process variables, a solar absorptivity,  $\alpha$ , and a thermal emissivity,  $\epsilon$ , of the studied selective surfaces are as follows: Copper oxide on copper,  $\alpha = 0.936$  and  $\epsilon = 0.052$ ; Black nickel on steel or aluminum,  $\alpha = 0.942$  and  $\epsilon = 0.185$ ; and Black chrome on steel or aluminum,  $\alpha = 0.942$  and  $\epsilon = 0.112$ .

Because of the high construction cost, the thermal efficiency of a commer-

cial size of a flat plate solar collector with selective surface,  $2 \text{ m}^2$  of surface area, is not directly tested. Instead, a commercial size flat plate solar collector with ordinary black paint is tested and, by means of a technique of design variables conversion, a thermal efficiency of the collector with black chrome selective surface is evaluated. From the experiment and the calculation, slopes of the thermal efficiency curves of a solar collector with black paint surface and black chrome selective surface are  $-7.11$  and  $-4.89$  respectively, and the interception of thermal efficiency curves on a thermal efficiency axis respectively are  $0.74$  and  $0.76$ .



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



บทที่ 1.	บทนำ	
1.1.	ความนำ	1
1.2.	การดูดและการสะท้อนแสงอาทิตย์ และการส่งออกรังสีความร้อน	3
1.3.	ความสัมพันธ์ระหว่างการดูด การปล่อยและการสะท้อนของรังสี	6
1.4.	การวัดการแผ่รังสีจากผิว	6
1.5.	วิธีทำให้ได้ผิวซี เล็กตีฟ	11
1.6.	ความเป็นมาของปัญหา	14
1.7.	วัตถุประสงค์และขอบเขตของการวิจัย	14
1.8.	ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย	15
1.9.	การดำเนินการวิจัย	15
บทที่ 2.	เครื่องมือวัดค่าการดูดแสงอาทิตย์ และการปล่อยรังสีความร้อน	
2.1.	เครื่องมือวัดค่าการดูดแสงอาทิตย์ $\alpha$ , และค่าการส่งออกรังสีความร้อน $\epsilon$	17
2.2.	การออกแบบและการสร้าง เครื่องมือวัดค่าการดูดแสงอาทิตย์ $\alpha$ , และค่าการส่งออกรังสีความร้อน, $\epsilon$	20
2.3.	การทดสอบเครื่องมือวัดค่าการดูดแสงอาทิตย์ $\alpha$ , และการส่งออกรังสีความร้อน, $\epsilon$	24
บทที่ 3.	การเลือกวัสดุทำแผ่นดูดแสงอาทิตย์	
3.1.	ความนำ	28
3.2.	ผิวซี เล็กตีฟหลายแบบ	29
3.3.	การเตรียมชิ้นงานก่อนชุบ	31
3.4.	ผลการวัดค่าการดูดแสงอาทิตย์ และการส่งออกรังสีความร้อน	32
3.5.	การพิจารณาผิวซี เล็กตีฟไปใช้งาน	39
บทที่ 4.	การใช้วัสดุผิวซี เล็กตีฟทำแผงรับแสงอาทิตย์	
4.1.	แผงรับแสงอาทิตย์	40
4.2.	ทฤษฎีของแผงรับแสงอาทิตย์	41
4.3.	การนำวัสดุผิวซี เล็กตีฟมาทำแผ่นดูดแสงอาทิตย์	45
4.4.	การทดสอบแผงรับแสงอาทิตย์	46
4.5.	แผงรับแสงอาทิตย์ชนิดแผ่นดูดแสงอาทิตย์มีผิว เป็นซี เล็กตีฟ	53

บทที่ 5. สรุปผลการวิจัย	55
ภาคผนวก ก. สัญลักษณ์	59
ภาคผนวก ข. การคำนวณค่าการดูดแสงอาทิตย์ทั้งหมดจากค่าการดูดแสงอาทิตย์เอกรงค์ที่อ่านได้จาก UV-Visible spectrometer	61



สภามหาวิทยาลัย  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

เลขหมู่ <sup>ศท</sup> <sub>ศต</sub> 15  
เลขทะเบียน 002279  
วัน,เดือน,ปี 29 เม.ย. 28

## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ความนำ

การนำพลังงานแสงอาทิตย์มาใช้ประโยชน์จะต้องมีอุปกรณ์สำหรับ เปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์ให้อยู่ในรูปของ พลังงานรูปอื่นที่สะดวกต่อการนำไปใช้งาน เช่นระบบทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ต้องมีแผงรับแสงอาทิตย์ (Solar Collector) ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่รับพลังงานแสงอาทิตย์แล้วเปลี่ยนให้เป็นพลังงานความร้อน (น้ำร้อน) แล้วจึงนำไปใช้งาน เป็นต้น หรือในระบบทำความเย็นพลังงานแสงอาทิตย์แบบดูดซึม (A Solar Absorption Cooling System) ก็ต้องมีแผงรับแสงอาทิตย์เป็นอุปกรณ์ผลิตน้ำร้อนเพื่อใช้ในเยนเนอเรเตอร์เช่นเดียวกัน อุปกรณ์สำหรับ เปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์ให้เป็นพลังงานความร้อนที่กล่าวถึงนั้นมีองค์ประกอบที่สำคัญคือ (1) ต้องมีพื้นที่ส่วนที่รับแสงอาทิตย์และต้องมีคุณสมบัติดูดแสงอาทิตย์ได้ดี และในขณะเดียวกันต้องมีคุณสมบัติในการส่งออกรังสีความร้อนไม่ดี และ (2) มีคุณสมบัติในการถ่ายเทความร้อนโดยการนำที่ดี เพื่อว่าพลังงานความร้อนที่ได้จากแสงอาทิตย์จะได้ถูกถ่ายเทไปใช้ประโยชน์ได้โดยง่าย

การดูดแสงอาทิตย์ที่ดี

จากการพิจารณาเปิดตรีของกราฟแสดงสเปกตรัมของดวงอาทิตย์ตามที่แสดงไว้ในตารางที่ 1.1 พบว่ากว่า 93% ของพลังงานที่ส่งมาทั้งหมดจะถูกส่งมาที่ความยาวคลื่นต่ำกว่า 2 ไมครอนลงไป และจะเพิ่มเป็น 97.83% ถ้านับจากความยาวคลื่น 3 ไมครอนลงไป ดังนั้นพื้นผิวของวัสดุที่จะนำมาใช้ในอุปกรณ์รับแสงอาทิตย์จึงควรที่เป็นเสมือนวัตถุดำ (Black Body) ในช่วงความยาวคลื่นระหว่าง 0 ไมครอนถึงประมาณ 3 ไมครอน เป็นต้น

การส่งออกรังสีความร้อนต่ำ

เมื่ออุปกรณ์รับแสงอาทิตย์ได้รับแสงอาทิตย์ อุณหภูมิของอุปกรณ์จะสูงขึ้นกว่าอุณหภูมิของบรรยากาศโดยรอบ ก็จะมีการส่งพลังงานที่ดูดเอาไว้ออก รังสีที่ส่งออกจะอยู่ในช่วงความยาวคลื่นอินฟราเรด แต่โดยที่อุณหภูมิของอุปกรณ์รับแสงอาทิตย์โดยมากแล้วจะอยู่ในช่วงอุณหภูมิไม่เกิน 400 K ทำให้รังสีที่ส่งออกมีอัตราสูงที่ความยาวคลื่นยาวดังที่แสดงในตารางที่ 1.1 ตัวอย่างเช่นที่ความยาวคลื่นมากกว่า 3 ไมครอนพลังงานที่ส่งออกจากวัตถุดำอุณหภูมิ 400<sup>o</sup> มีค่าประมาณ 99% ของพลังงานที่ส่งออกทั้งหมด เป็นต้น ดังนั้นวัสดุที่เหมาะสมสำหรับทำอุปกรณ์รับแสงอาทิตย์จึงควรต้องมีค่าการส่งออกรังสีความร้อนที่ต่ำในช่วงความยาวคลื่นยาวกว่า 3 ไมครอน

โดยพิจารณาจากองค์ประกอบทั้งสองข้อดังกล่าวพื้นผิวของอุปกรณ์รับแสงอาทิตย์จึงควรมีคุณสมบัติทางอุดมคติ (Ideal Characteristics) ดังนี้ มีคุณสมบัติเป็นเสมือนวัตถุดำหรือตัวดูดพลังงานแสงอาทิตย์ที่ดีที่สุด ในช่วงความยาวคลื่นระหว่าง 0 ไมครอน ถึงประมาณ 3 ไมครอน และมีคุณสมบัติเป็นตัวส่งออกรังสีความร้อนที่ต่ำในช่วงความยาวคลื่นตั้งแต่ประมาณ 3 ไมครอนขึ้นไป ตามธรรมชาติจะไม่มีวัตถุใดๆที่มีคุณสมบัติดัง



ตารางที่ 1.1

อัตราส่วนของพลังงานซึ่งส่งออกจากวัตถุดำที่อุณหภูมิ 6000 K (อุณหภูมิของดวงอาทิตย์) และจากวัตถุดำที่อุณหภูมิ 400 K ระหว่างความยาวคลื่น,  $0-\lambda$  ต่อพลังงานที่ส่งออกทั้งหมด จากวัตถุดำที่อุณหภูมิเดียวกันและความยาวคลื่น,  $0-\infty$

$\lambda$ μm	$D_{\lambda}^*$ อุณหภูมิ 6000K	$D_{\lambda}^*$ อุณหภูมิ 400K
0.2	$8.1 \times 10^{-5}$	-
0.4	0.0873	-
0.6	0.3568	-
0.8	0.5602	-
1.0	0.6940	-
1.2	0.7840	-
1.4	0.8433	-
1.6	0.8861	-
1.8	0.9159	0.000003
2.0	0.9349	0.000016
2.6	0.9667	0.000501
3.0	0.9783	0.002136
4.0	0.9906	0.019728
5.0	0.9951	0.066410
6.0	0.9972	0.140290
8.0	0.9982	0.318144
10.0	0.9948	0.480911
15.0	0.9998	0.737813
-	-	-
$\infty$	1.0	1.0

\*  $D_{\lambda} = \frac{\text{พลังงานที่ส่งออกจากวัตถุดำที่อุณหภูมิใดๆ, ในช่วงความยาวคลื่น } 0-\lambda}{\text{พลังงานที่ส่งออกทั้งหมด (ความยาวคลื่น, } 0-\infty) \text{ จากวัตถุดำที่อุณหภูมิเดียวกัน.}}$

กล่าวทั้งสองข้อพร้อมกัน จึงต้องสังเคราะห์วัสดุซึ่งมีคุณสมบัติดังกล่าวขึ้น มีชื่อว่าวัสดุที่มีผิวซีเล็กทีฟ (Selective Surface)

## 1.2 การดูด , การสะท้อนแสงอาทิตย์ และการส่งออกรังสีความร้อน

พารามิเตอร์ที่แสดงลักษณะเชิงรังสีของวัตถุที่ต้องพิจารณามีดังนี้

### การดูดรังสี (Absorptance)

การดูดรังสี เอกเรงค์ที่ทิศทางหนึ่ง (Monochromatic Directional Absorptance),  $\alpha_\lambda(\mu, \phi)$

$\alpha_\lambda(\mu, \phi)$  เป็นคุณสมบัติของวัตถุซึ่งมีค่าเท่ากับอัตราส่วนของรังสีที่ถูกดูดโดยวัตถุที่ความยาวคลื่น  $\lambda$  จากทิศทาง  $\mu$  และ  $\phi$  ( $\mu$  คือโคไซน์ (Cosine) ของมุมโพล่า และ  $\phi$  คือมุมอาซิมุท) ต่อรังสีที่ตกลงบนวัตถุ สมการของความสัมพันธ์ดังกล่าวคือ

$$\alpha_\lambda(\mu, \phi) = \frac{I_{\lambda, a}(\mu, \phi)}{I_{\lambda, i}(\mu, \phi)} \quad (1.1)$$

เมื่อตัวห้อยท้าย  $a$  และ  $i$  หมายถึงการดูดรังสี (Absorptance) และการตกของรังสี (Incident) ตามลำดับ

การดูดรังสีที่ทิศทางหนึ่ง (Directional Absorptance),  $\alpha(\mu, \phi)$

$\alpha(\mu, \phi)$  คือสัดส่วนของรังสี  $I_\lambda(\mu, \phi)$  ที่ถูกดูดต่อรังสีที่ตกบนวัตถุ ตลอดช่วงความยาวคลื่น หรือ

$$\begin{aligned} \alpha(\mu, \phi) &= \frac{\int_0^\infty \alpha_\lambda(\mu, \phi) I_{\lambda, i}(\mu, \phi) d\lambda}{\int_0^\infty I_{\lambda, i}(\mu, \phi) d\lambda} \\ &= \frac{1}{I_i(\mu, \phi)} \int_0^\infty \alpha_\lambda(\mu, \phi) I_{\lambda, i}(\mu, \phi) d\lambda \end{aligned} \quad (1.2)$$

เมื่อ  $I_i(\mu, \phi)$  = ความเข้มของรังสีตกกระทบในทิศทางที่กำหนด

การดูดรังสีเอกเรงค์แบบครึ่งทรงกลม (Monochromatic Hemispherical Absorptance),  $\alpha_\lambda$

$\alpha_\lambda$  ได้จากการอินทิเกรตค่า  $\alpha_\lambda(\mu, \phi)$  ตลอดทุกทิศทางของครึ่งทรงกลม ( $0 \leq \mu \leq 1$ ,  $0 \leq \phi \leq 2\pi$ )

$$\alpha_\lambda = \frac{\int_0^{2\pi} \int_0^1 \alpha_\lambda(\mu, \phi) I_{\lambda, i}(\mu, \phi) \mu d\mu d\phi}{\int_0^{2\pi} \int_0^1 I_{\lambda, i}(\mu, \phi) \mu d\mu d\phi} \quad (1.3)$$

การดูดรังสีแบบครึ่งทรงกลม (Hemispherical Absorptance),  $\alpha$

$\alpha$  ได้จากการอินทิเกรตค่า  $\alpha_\lambda$  ตลอดทุกช่วงของความยาวคลื่น ( $0 \leq \lambda \leq \infty$ ) หรือ

$$\alpha = \frac{\int_0^\infty \int_0^{2\pi} \int_0^1 \alpha_\lambda(\mu, \phi) I_{\lambda, i}(\mu, \phi) \mu d\mu d\phi d\lambda}{\int_0^\infty \int_0^{2\pi} \int_0^1 I_{\lambda, i}(\mu, \phi) \mu d\mu d\phi d\lambda} \quad (1.4)$$

โดยทั่วไปการดูดรังสีแบบครึ่งทรงกลมนิยมเรียกกันว่า "การดูดรังสีทั้งหมด" หรือ "การดูดรังสี"

### การส่งออกรังสี (Emittance)

การส่งออกรังสี เอกเรงค์ทิศทางหนึ่ง (Monochromatic Directional Emittance),  $\epsilon_\lambda(\mu, \phi)$

$\epsilon_\lambda(\mu, \phi)$  เป็นคุณสมบัติของวัตถุซึ่งมีค่าเท่ากับอัตราส่วนระหว่างความเข้มของรังสีที่ส่งออกที่ความยาวคลื่น  $\lambda$  ในทิศทางที่กำหนด  $(\mu, \phi)$  ต่อความเข้มของรังสีที่ส่งออกจากวัตถุดำที่ความยาวคลื่นเดียวกัน หรือ

$$\epsilon_\lambda(\mu, \phi) = \frac{I_\lambda(\mu, \phi)}{I_{b\lambda}} \quad (1.5)$$

การส่งออกรังสีทิศทางหนึ่ง (Directional Emittance),  $\epsilon(\mu, \phi)$

$\epsilon(\mu, \phi)$  เป็นคุณสมบัติของวัตถุซึ่งได้จากการอินทิเกรตค่า  $\epsilon_\lambda(\mu, \phi)$  ตลอดช่วงความยาวคลื่น ดังนั้น

$$\epsilon(\mu, \phi) = \frac{\int_0^\infty \epsilon_\lambda(\mu, \phi) I_{b\lambda} d\lambda}{\int_0^\infty I_{b\lambda} d\lambda} = \frac{1}{I_b} \int_0^\infty \epsilon_\lambda(\mu, \phi) I_{b\lambda} d\lambda \quad (1.6)$$

เมื่อ  $I_b$  = ความเข้มของการแผ่รังสีของวัตถุดำที่อุณหภูมิที่กำหนด

การส่งออกรังสี เอกเรงค์แบบครึ่งทรงกลม (Monochromatic Hemispherical Emittance),  $\epsilon_\lambda$

เป็นคุณสมบัติของวัตถุซึ่งได้จากการอินทิเกรต  $\epsilon_\lambda(\mu, \phi)$  ตลอดทุกทิศทางบนพื้นผิวครึ่งทรงกลมที่ล้อมวัตถุนั้น หรือ

$$\epsilon_\lambda = \frac{\int_0^{2\pi} \int_0^\pi \epsilon_\lambda(\mu, \phi) I_{b\lambda} \mu d\mu d\phi}{\int_0^{2\pi} \int_0^\pi I_{b\lambda} \mu d\mu d\phi} = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^\pi \epsilon_\lambda(\mu, \phi) \mu d\mu d\phi \quad (1.7)$$

การส่งออกรังสีแบบครึ่งทรงกลม (Hemispherical Emittance),  $\epsilon$

เป็นคุณสมบัติของวัตถุซึ่งได้จากการอินทิเกรต  $\epsilon_\lambda$  ตลอดช่วงความยาวคลื่น

$$\epsilon = \frac{\int_0^\infty \int_0^{2\pi} \int_0^\pi \epsilon_\lambda(\mu, \phi) I_{b\lambda} \mu d\mu d\phi d\lambda}{\int_0^\infty \int_0^{2\pi} \int_0^\pi I_{b\lambda} \mu d\mu d\phi d\lambda} = \frac{1}{e_b} \int_0^\infty \epsilon_\lambda e_{b\lambda} d\lambda \quad (1.8)$$

โดยทั่วไปจะเรียก  $\epsilon$  ว่า "การส่งออกรังสีทั้งหมด" หรือบางทีก็เรียกว่า "การส่งออกรังสี"

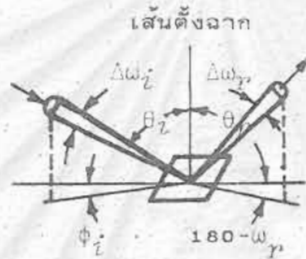
### การสะท้อนรังสี (Reflection)

เมื่อรังสีแบบตรง (Beam Radiation) ตกลงบนพื้นผิวของวัตถุ ถ้ารังสีที่สะท้อนขึ้นจากผิววัตถุเป็นแบบที่มุมตกและมุมสะท้อนของรังสีเท่ากัน (แบบการสะท้อนของแสงบนกระจก) เรียกการสะท้อนดังกล่าวเป็นแบบ "การสะท้อนแบบสเปคูลาร์ (Specular Reflection)" ถ้ารังสีที่สะท้อนจากผิววัตถุเป็นแบบที่สะท้อนออกมาโดยรอบและไม่มีทิศทาง เรียกการสะท้อนดังกล่าวว่า "การสะท้อนแบบกระจาย (Diffuse Reflection)"

การสะท้อนรังสีเอกรงค์แบบครึ่งทรงกลมมุม (Angular Hemispherical Reflectance),  $\rho_{\lambda}(\mu_i, \phi_i)$   
 $\rho_{\lambda}(\mu_i, \phi_i)$  เป็นคุณสมบัติของวัตถุซึ่งมีค่าเท่ากับอัตราส่วนของพลังงานของการแผ่รังสีที่ความยาวคลื่นหนึ่ง  
 ที่สะท้อนจากผิววัตถุในทุกทิศทาง ต่อผลึกของการแผ่รังสีที่ความยาวคลื่น  $\lambda$  ซึ่งตกกระทบภายในมุมที่กำหนด (Solid Angle),  $\Delta\omega_i$  การสะท้อนกลับของรังสีมีลักษณะตามที่แสดงในรูปที่ 1.1 สมการของ  $\rho_{\lambda}(\mu_i, \phi_i)$  คือ

$$\rho_{\lambda}(\mu, \phi) = \frac{q_{\lambda, r}}{I_{\lambda, i} \mu_i \Delta\omega_i} \quad (1.9)$$

เมื่อ  $q_{\lambda, r}$  = พลังงานของการสะท้อน =  $\frac{1}{4\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi} \rho_{\lambda}(\mu_r, \phi_r, \mu_i, \phi_i) I_{\lambda, i} \mu_i \Delta\omega_i \mu_r d\mu_r d\phi_r$



รูปที่ 1.1 แสดงการสะท้อนกลับของรังสี

การสะท้อนรังสีแบบครึ่งทรงกลมมุม (Angular-Hemispherical Reflectance),  $\rho(\mu_i, \phi_i)$

$\rho(\mu_i, \phi_i)$  ได้จากการอินทิเกรตผลึกที่ตกลงมาและสะท้อนกลับตลอดความยาวคลื่น

$$\rho(\mu_i, \phi_i) = \frac{\int_0^{\infty} q_{\lambda, r} d\lambda}{\int_0^{\infty} I_{\lambda, i} \mu_i \Delta\omega_i d\lambda} \quad (1.10)$$

การสะท้อนรังสีเอกรงค์แบบมุมครึ่งทรงกลม (Monochromatic Hemispherical-Angular Reflectance),  $\rho_{\lambda}(\mu_r, \phi_r)$

$\rho_{\lambda}(\mu_r, \phi_r)$  คืออัตราส่วนของความเข้มที่ความยาวคลื่นหนึ่งที่สะท้อนกลับในทิศทาง  $\mu$  และ  $\phi$  ต่อพลังงานที่ตกกระทบที่ความยาวคลื่นเดียวกันที่มาจากทุกทิศทางที่หารด้วย  $4\pi$

$$\rho_{\lambda}(\mu_r, \phi_r) = I_{\lambda, r}(\mu_r, \phi_r) / (q_{\lambda, i} / 4\pi) \quad (1.11)$$

การสะท้อนรังสีแบบมุมครึ่งทรงกลม (Hemispherical Angular Reflectance),  $\rho(\mu_r, \phi_r)$

$\rho(\mu_r, \phi_r)$  ได้จากการอินทิเกรต  $\rho_{\lambda}(\mu_r, \phi_r)$  ตลอดความยาวคลื่นที่เป็นไปได้

การสะท้อนรังสีเอกรงค์แบบครึ่งทรงกลม (Monochromatic Hemispherical Reflectance),  $\rho_{\lambda}$

คืออัตราส่วนระหว่างพลังงานที่สะท้อนกลับจากผิวที่ความยาวคลื่นหนึ่ง,  $q_{\mu, r}$  ต่อพลังงานที่ตกกระทบ

ที่ผิวที่ความยาวคลื่นเดียวกัน

$$\rho_\lambda = q_{\lambda,r}/q_{\lambda,i} \quad (1.12)$$

เมื่อ  $q_{\lambda,i}$  = อัตราพลังงานที่ตกบนพื้นผิวที่ความยาวคลื่น  $\lambda$

การสะท้อนรังสีแบบครึ่งทรงกลม (Hemispherical Reflectance),  $\rho$

$$\rho = \frac{q_r}{q_i} = \frac{\int_0^\infty q_{\lambda,r} d\lambda}{\int_0^\infty q_{\lambda,i} d\lambda} = \frac{\int_0^\infty \rho_\lambda G_\lambda d\lambda}{\int_0^\infty G_\lambda d\lambda} \quad (1.13)$$

เมื่อ  $G_\lambda$  = สเปกตรัลเอเอเรดิเอชัน

### 1.3 ความสัมพันธ์ระหว่างการดูด การปล่อยและการสะท้อนกลับของรังสี

พิจารณาผิวทึบ (Opaque Surface) ซึ่งวางอยู่ในภาชนะปิดไอโซเทอมัล (Isothermal Enclosure) ที่มีอุณหภูมิคงที่  $T$  ความเข้มของรังสีที่ความยาวคลื่นหนึ่งในทิศทาง  $\mu$  และ  $\phi$  จากพื้นที่เล็กๆของผิวประกอบด้วยความเข้มของรังสีที่สะท้อนกลับ และที่ส่งออกมาต้องเท่ากับ  $I_{b\lambda}(T)$

$$I_{b\lambda}(T) = I_\lambda(\mu, \phi)_{\text{ส่งออก}} + I_\lambda(\mu, \phi)_{\text{สะท้อน}} \quad (1.14)$$

$$\text{แต่ } I_\lambda(\mu, \phi)_{\text{ส่งออก}} = \epsilon_\lambda(\mu, \phi) I_{b\lambda}(T)$$

$$I_\lambda(\mu, \phi)_{\text{สะท้อน}} = \rho_\lambda(\mu, \phi) I_{b\lambda}(T)$$

$$\text{ดังนั้น } I_{b\lambda}(T) = \epsilon_\lambda(\mu, \phi) I_{b\lambda}(T) + \rho_\lambda(\mu, \phi) I_{b\lambda}(T)$$

$$1 = \epsilon_\lambda(\mu, \phi) + \rho_\lambda(\mu, \phi) \quad (1.15)$$

จากกฎของเกียร์ชอฟฟ์ (Kirchoff)

$$\epsilon_\lambda(\mu, \phi) = \alpha_\lambda(\mu, \phi)$$

$$\text{ดังนั้น } \epsilon_\lambda(\mu, \phi) = \alpha_\lambda(\mu, \phi) = 1 - \rho_\lambda(\mu, \phi) \quad (1.16)$$

สมการ (1.16) มีประโยชน์ในทางปฏิบัติเนื่องจากสามารถใช้ค่านวนค่า  $\epsilon_\lambda(\mu, \phi)$  และ  $\alpha_\lambda(\mu, \phi)$  ซึ่งวัดโดยตรงได้ลำบาก แต่เมื่ออาศัยการวัด  $\rho_\lambda(\mu, \phi)$  ซึ่งทำได้สะดวกกว่า

### 1.4 การวัดการแผ่รังสีจากผิว

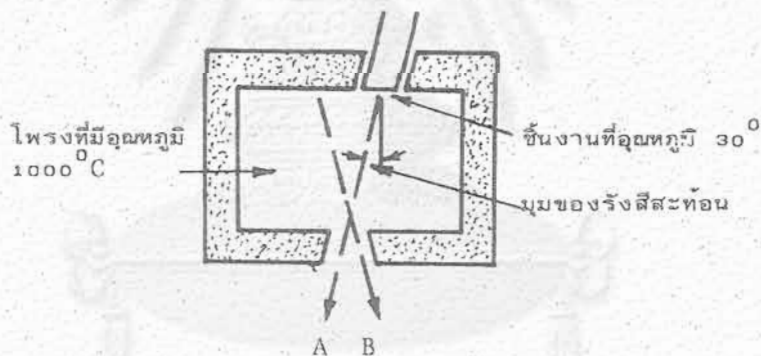
การแผ่รังสีไม่เพียงแต่จะดูดหรือปล่อยโดยผิวเท่านั้นแต่มีปริมาตรเข้ามาเกี่ยวข้องด้วย ในบางกรณี ปริมาตรจะเป็นชั้นบางตามผิวที่เป็นตัวกลางคู่รังสีที่سمىชื่อว่า "ผิวโอเพก" (Opaque Surface) ในบางกรณีวัสดุที่จะศึกษาเป็นแท่งบาง เช่น แผ่นแก้ว หรือฟิล์มพลาสติกซึ่งมีชื่อว่าผิวผ่านทะลุ (Transmitting Surface) เมื่อผิวเหล่านี้มีอุณหภูมิเท่ากับ  $T$ , จะมีลักษณะ 2 ประการที่วัดได้คือ การสะท้อนกลับและการผ่านทะลุ

การวัดคุณสมบัติของการแผ่รังสีของผิวมีหลายวิธีคือ

- 1 โดยใช้วิธีของ Gier et al [1]
- 2 โดยใช้วิธีของ Witte [2]
- 3 โดยใช้วิธีของ Kokovopoulos et al [2]
- 4 โดยใช้วิธีของ Hass et al [2]
- 5 โดยใช้วิธีของ McKenney and Beauchamp[3]

#### วิธีของ Gier et al

วิธีนี้ชิ้นงานวางอยู่ในโพรงที่มีอุณหภูมิสูงสุด  $1000^{\circ}\text{C}$  ด้านหลังชิ้นงานมีน้ำเย็นไหลผ่านทำให้อุณหภูมิของชิ้นงานคงที่ที่  $30^{\circ}\text{C}$  ด้านตรงข้ามกับชิ้นงานมีช่องทางออกของโพรงซึ่งจะติดตั้งอุปกรณ์วัดรังสีเอาไว้ ในรูป 1.2 รังสี A คือการแผ่รังสีเอกรงค์ของวัตถุที่สะท้อนออกจากชิ้นงาน รังสี B คือการแผ่รังสีของวัตถุที่จากโพรง ดังนั้นอัตราส่วนของ  $A_{\lambda}/B_{\lambda}$  ก็คือการสะท้อนรังสีเอกรงค์แบบครึ่งทรงกลม-มุม หรือแบบมุมครึ่งทรงกลม เพราะรังสีภายในโพรงเป็นรังสีแบบกระจาย



รูปที่ 1.2 แผนภาพของโพรงสำหรับการวัดค่าการสะท้อนกลับรังสีเอกรงค์แบบครึ่ง-ทรงกลม-มุม รังสี A คือการแผ่รังสีของวัตถุที่สะท้อนจากชิ้นงาน รังสี B คือการแผ่รังสีของวัตถุที่จากโพรง อัตราส่วน  $A_{\lambda}/B_{\lambda}$  คือ  $\rho_{\lambda}$  (ม.ฟ)

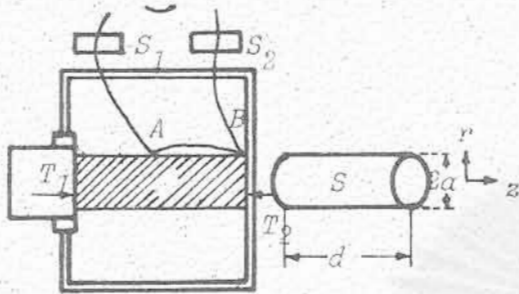
#### วิธีของ Witte (แผนภาพของเครื่องมือแสดงในรูปที่ 1.3)

ชิ้นงานรูปทรงกระบอกวางอยู่ระหว่างอุปกรณ์กำเนิดความร้อน (Heat Source) และ Temperature Sink ดังแสดงในรูปที่ 1.3 ผลต่างของอุณหภูมิระหว่าง 2 จุดตามผิวของชิ้นงานจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับค่าการส่งออกรังสีของผิว วิธีนี้เหมาะสำหรับชิ้นงานที่มีรูปร่างเป็นท่อหรือแท่งกลมที่มีผิวนอกที่สนใจจะหาค่าการส่งออกรังสี วิธีนี้สมมุติว่าอุณหภูมิ,  $T$  และ  $T_0$  มีค่าใกล้กัน จึงอาจถือได้ว่า

$$T^4 - T_0^4 = 4T_0^3(T - T_0) \quad (1.17)$$

เมื่อ  $T$  และ  $T_0 =$  อุณหภูมิสัมบูรณ์ใดๆ

สมการนี้ใช้สำหรับอุณหภูมิในช่วง  $25-40^{\circ}\text{C}$  และผลต่างของอุณหภูมิตั้งแต่จุดสองจุด,  $(T-T_0)$ , น้อยกว่า  $5^{\circ}\text{C}$  และค่าการส่งออกของชิ้นงานอยู่ในช่วง  $0.1 \leq \epsilon \leq 1.0$



$S$  - ชิ้นงาน

$T_1$  และ  $T_2$  - อุณหภูมิที่ปลายชิ้นงานมีค่าคงที่

$S_1$  และ  $S_2$  - วัดอุณหภูมิบนผิวชิ้นงาน

รูปที่ 1.3 แผนภาพของเครื่องมือที่ใช้วัดค่าการส่งออกรังสีของ Witte

วิธีของ Kokovopoulos et al (แผนภาพของเครื่องมือแสดงในรูปที่ 1.4)

โดยการวัดพลังงานความร้อนที่ส่งออกจากชิ้นงานซึ่งควบคุมอุณหภูมิให้คงที่ที่อุณหภูมิใดๆ ค่าการส่งออกรังสีความร้อนจากชิ้นงานจะคำนวณได้ เนื่องจากการถ่ายเทความร้อนเนื่องจากการนำและการพาเข้ามาเกี่ยวข้องกับ ดังนั้นในการใช้เครื่องมือจึงใช้ชิ้นงานที่ทราบค่าส่งออกรังสีความร้อนเป็นตัวอ้างอิง ได้แก่ อลูมิเนียมแผ่นและกระดาษดำซึ่งมีค่าการส่งออกรังสีความร้อนเท่ากับ 0.03 และ 0.95 ตามลำดับ ความถูกต้องของค่าการส่งออกรังสีความร้อนของชิ้นงานขึ้นกับว่าการแก้ไขผิดพลาดของการวัดค่าการถ่ายเทความร้อนโดยการนำ และการพาได้กี่เพียงใด

วิธีของ Hass et al (แผนภาพของเครื่องมือแสดงในรูปที่ 1.5)

ชิ้นงานเป็นแผ่นกลม (Disk) และบางแขวนอยู่ในสุญญากาศ โดยทำชิ้นงานให้ร้อนแล้วปล่อยให้เย็น ค่าการส่งออกรังสีความร้อนของชิ้นงานคำนวณได้จากสมการ

$$\epsilon = \frac{WC_p}{3\sigma A(\theta_2 - \theta_1)} \left[ \frac{1}{T_2^3} - \frac{1}{T_1^3} \right]$$

เมื่อ  $W$  = น้ำหนักของชิ้นงาน,  $A$  = พื้นที่ทั้งหมดของชิ้นงาน,  $T_2$  และ  $T_1$  = อุณหภูมิของชิ้นงานที่เวลา  $\theta_2$  และ  $\theta_1$ ,  $\epsilon$  = ค่าการส่งออกรังสีความร้อนแบบครึ่งทรงกลม

วิธีของ McKenney และ Beauchamp (แผนภาพของเครื่องมือแสดงในรูปที่ 1.6)

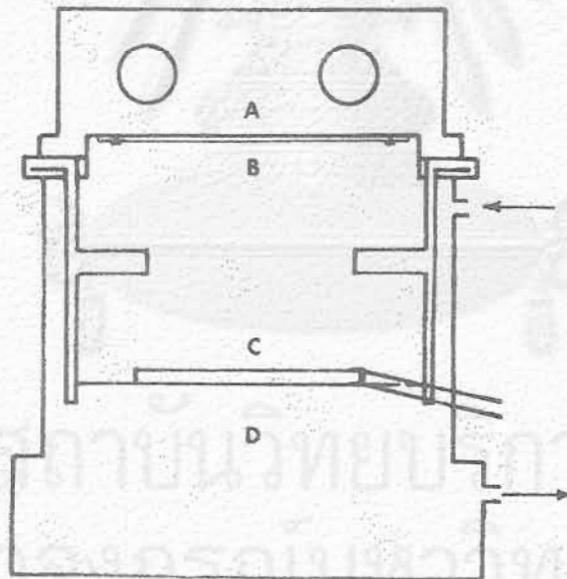
เครื่องมือนี้ใช้ได้ทั้งการวัดค่าการดูดแสงอาทิตย์ และค่าการส่งออกรังสีความร้อน รายละเอียดของส่วนประกอบของเครื่องมือมีดังนี้

เมื่อนำเครื่องมือไปใช้วัดค่าการดูดแสงอาทิตย์ให้วางชิ้นงานบนฮีทฟลักมิเตอร์และฮีทซิงค์ ด้านบนกล่องที่ติดตั้งชิ้นงานปิดด้วยกระจกใส ดูดอากาศภายในกล่องออกจนภายในกล่องเป็นสูญญากาศ นำเครื่องมือวางรับแสงอาทิตย์ โดยรอบกล่องมีน้ำหล่อซึ่งจะควบคุมอุณหภูมิให้เท่ากับอุณหภูมิของชิ้นงาน ค่าการดูดแสงอาทิตย์คำนวณได้จากสมการ

$$\alpha I = Q \text{ (อ่านจากฮีทฟลักมิเตอร์)}$$

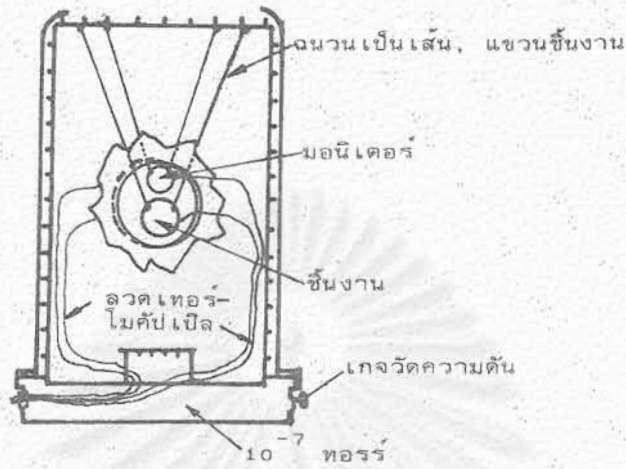
เมื่อ  $I$  พลังงานแสงอาทิตย์ที่ตกลงบนชิ้นงาน,  $\alpha$  = ค่าการดูดแสงอาทิตย์ของชิ้นงาน,  $Q$  = พลังงานความร้อนซึ่งถ่ายเทจากชิ้นงานผ่านฮีทฟลักมิเตอร์

เมื่อนำเครื่องมือไปวัดค่าการส่งออกรังสีความร้อน ให้วางชิ้นงานบนฮีทฟลักมิเตอร์และฮีเตอร์ไฟฟ้า ด้านบนกล่องปิดด้วยแผ่นโลหะ ดูดอากาศภายในกล่องออกจนเป็นสูญญากาศ ควบคุมอุณหภูมิของชิ้นงานโดยปรับฮีเตอร์ และควบคุมอุณหภูมิของกล่องโดยปรับอุณหภูมิของน้ำที่หล่อถัง พลังงานที่ส่งออกจากชิ้นงานอ่านได้จากฮีทฟลักมิเตอร์ ค่าการส่งออกรังสีความร้อนของชิ้นงานคำนวณได้

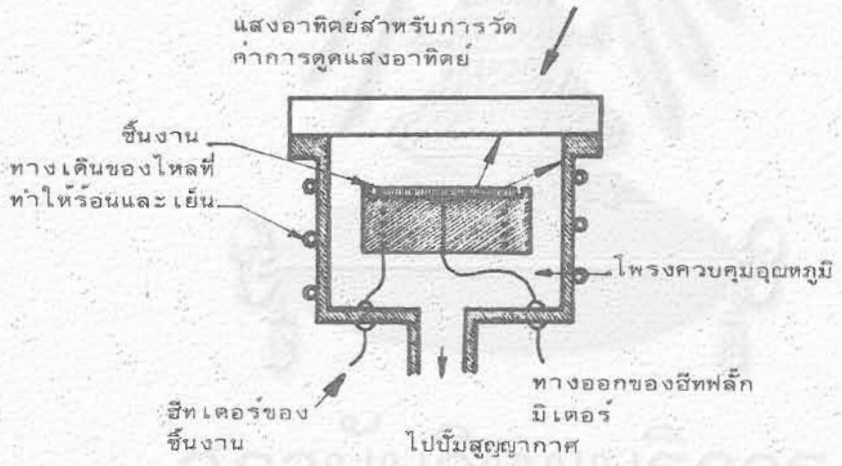


รูปที่ 1.4 แผนภาพของเครื่องมือของ Kokovopoulos et al สำหรับวัดค่าการส่งออกรังสีความร้อนของชิ้นงาน A = เทอร์โมสแตทให้ความร้อน(Heating Thermostat) B = ชิ้นงานที่แผ่รังสี(Radiating Sample). C = เครื่องมือวัดรังสี(Radiometer) และ D = ระบบให้ความเย็น(Cooling System)





รูปที่ 1.5 ภาพแสดงเครื่องมือของ Hass et al



รูปที่ 1.6 เครื่องมือสำหรับวัดค่า ค่าการดูดแสงอาทิตย์ และค่าการส่งออก รังสีความร้อน

### 1.5 วิธีที่จะให้ได้อิทธิพลของผิวซีเล็คตีฟ

วิธีทำผิววัสดุให้เป็นผิวซีเล็คตีฟอาจแบ่งได้เป็น 6 ประเภทคือ

1. ใช้วัสดุที่มีคุณสมบัติของผิวเป็นซีเล็คตีฟเอง (Intrinsic Material)
2. ใช้สารกึ่งตัวนำวางทับตัวสะท้อนแสง (Tandem Stacks of a Semiconductor Overlying a Reflector)
3. ใช้ไดอิเล็กตริกและโลหะผสมสลับกัน เข้าแทรกแซง (Interference Stacks of Alternating Dielectrics and Metals)
4. ใช้ความหยาบของผิวที่มีหน้าคลื่นแตกต่างกัน (Wavefront discriminating Surface Roughness)
5. ใช้การกระจายของหยดโลหะเล็กๆ ในพื้นโลหะหรือไดอิเล็กตริก (Dispersion of Metal Droplets in a Metal or Dielectric Matrix)
6. ใช้ผลที่เกิดจากขนาดของควันตัม (Quantum size Effects)

การวิจัยนี้จะใช้ไดอิเล็กตริกและโลหะสลับกัน เข้าแทรกแซงผิวโลหะ เพื่อให้เกิดอิทธิพลของผิวซีเล็คตีฟ หรือกล่าวง่าย ๆ ก็คือการเคลือบผิวของวัสดุด้วยวัสดุอื่นซึ่งมีคุณสมบัติเป็นซีเล็คตีฟ ขบวนการเคลือบมีหลายแบบขึ้นกับชนิดของวัสดุที่จะนำมาใช้ทำแผ่นดูดแสงอาทิตย์ ตัวอย่างของการทำผิวซีเล็คตีฟโดยใช้ไดอิเล็กตริกและโลหะสลับ เข้าแทรกแซงคือ

(1) การทำผิวโลหะให้เป็นซีเล็คตีฟโดยการเคลือบด้วยคอปเปอร์ออกไซด์ มีอยู่สองวิธีคือ

ก. โดยการสะสมหยดเล็กๆ ของแบล็คโครมทัวมิวอลูมินัมอะโนไดซ์ [3]

ข. โดยการทรีตเมนต์ (Treatment) ของแผงแผ่นผิวขัดมันด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์

(NaOH) และโซเดียมไฮโปคลอไรต์ ( $\text{NaClO}_2$ ) ในอัตราส่วน 2 ต่อ 1 เป็นเวลา 3 ถึง 10 นาที

รูปที่ 1.7 แสดงคุณสมบัติของผิวเคลือบคอปเปอร์ออกไซด์ 2 ชนิดที่กล่าวมาแล้ว เส้นโค้งที่แสดงคุณสมบัติของผิวเคลือบชนิด CuO บนทองแดงได้จากการทดลองของ Watson-Munro และ Horwitz [3] เมื่อเปรียบเทียบกับเส้นโค้งที่เกิดจากการแทรกแซงผิวโลหะ ด้วยวัสดุที่นำมาเคลือบจากการทดลองของ Hass, Schroeder และ Turner กับเส้นโค้งที่มีผิวเคลือบเป็นบัลค์คอปเปอร์ออกไซด์ (Bulk CuO) จะเห็นว่าการแทรกแซงของวัสดุเคลือบจะเพิ่มการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วจากค่าการดูดเป็นค่าการสะท้อนรังสีกลับในช่วงความยาวคลื่นมากกว่า 3 ไมครอน รูปนี้ยังแสดงผลเสียของผิวซีเล็คตีฟที่เกิดจากการแทรกแซงตามผิวหลายๆ ชั้น (4 ชั้นของอลูมินัม และซิลิคอนโมนอกไซด์ (Silicon Monoxide)) คือการเพิ่มค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับระหว่างความยาวคลื่น 0.4 และ 0.3 ไมครอน ดังนั้นผิวซีเล็คตีฟที่เกิดจากการแทรกแซงหลายๆ ชั้นจึงสู้อิทธิพลของผิวซีเล็คตีฟที่เคลือบด้วยคอปเปอร์ออกไซด์และอลูมินัมไม่ได้

(2) การชุบโลหะด้วยไฟฟ้าเพื่อทำผิวซีเล็คตีฟที่เคลือบด้วยนิเกิลดำ (Black Nickle) ได้ทดลองทำเป็น

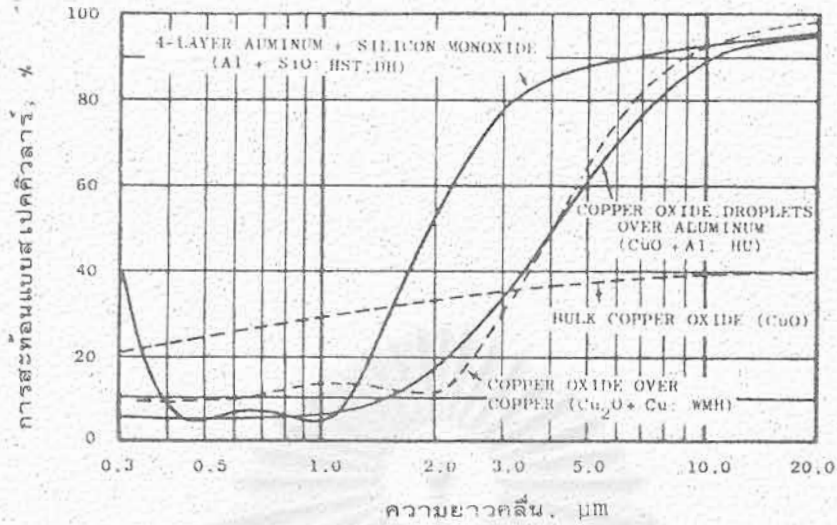
ครั้งแรกโดย Tabor[4] ดังแสดงในรูปที่ 1.8 เป็นผลการทดลองวัดค่าการสะท้อนกลับของรังสีบนผิวนิเกิลดำ การเคลือบเหล่านี้เป็นการเคลือบนิเกิลผิวมัน(Bright Nickel)บนแผ่นทองแดงด้วยการวางชั้นจากซิงค์ซัลไฟด์ ขนาดของกระแสไฟฟ้าที่แท้จริงในอ่างชุบที่บรรจุนิเกิลและซิงค์จะเปลี่ยนแปลงจนกระทั่งได้ผลที่เกิดจากหลายชั้น(Multilayer Effect) เส้นโค้งบนรูปที่ 1.8 แตกต่างจากเส้นโค้งข้างตรงที่ใช้ชั้นของซิงค์ซัลไฟด์บางกว่า

รูปที่ 1.9 แสดงเส้นโค้งสองเส้นของนิเกิลดำที่ได้จากการทดลองของ Honeywell[3] เส้นโค้งทั้งสองจะแสดงการเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมของการเคลือบ เนื่องจากมีการชุบภายหลังการให้ความร้อนแล้ว(Postplating Heat Treatment) เส้นโค้งบนแสดงคุณสมบัติของผิวสำหรับการเคลือบ ภายหลังการผลิตจะมีค่าสัมประสิทธิ์การดูดรังสีค่อนข้างสูงและค่าสัมประสิทธิ์การส่งออกรังสีต่ำ เส้นโค้งล่างแสดงการเคลือบอย่างเดียวกัน แต่ภายหลังการเคลือบแล้วนำชิ้นงานไปอบที่อุณหภูมิ  $500^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา 15 ชั่วโมงแล้วเส้นโค้งซึ่งแสดงคุณสมบัติการดูดและการส่งออกรังสีจะเลื่อนไปทางขวามือ (ความยาวคลื่นเพิ่มขึ้น) ทำให้เพิ่มค่าการดูดแสงอาทิตย์เป็นประมาณ 0.98 ค่าการส่งออกสุทธิได้เพิ่มขึ้นเป็นประมาณ 23% ของค่าการส่งออกของวัสดุดำที่อุณหภูมิ  $200^{\circ}\text{C}$  ผลอันนี้แสดงว่าสามารถควบคุม cutoff ของเส้นโค้งแสดงคุณสมบัติของการดูดและการส่งออกรังสีได้โดยการให้ความร้อนแก่โลหะที่จะเคลือบมากกว่าอุณหภูมิที่จะทำการเคลือบก่อน อุณหภูมิที่ใช้ในการเคลือบนิเกิลดำมีน้อยกว่า  $150^{\circ}\text{C}$  เมื่อเพิ่มความหนาของชั้นซิงค์ซัลไฟด์แล้วเส้นโค้งแสดงคุณสมบัติการดูดและการส่งออกรังสีจะเลื่อนไปทางขวามือ จุดสูงสุดจุดที่สองของเส้นโค้งจะอยู่เลยความยาวคลื่น 2 ไมครอน และจุดสูงสุดอีกอันหนึ่งจะเกิดขึ้นตรงความยาวคลื่น 2 ไมครอน Schmidt[3] ที่บริษัท Honeywell ได้ทำการเคลือบผิวด้วยนิเกิลดำจนได้ผิวที่มีค่าการดูดแสงอาทิตย์มากกว่า 0.9

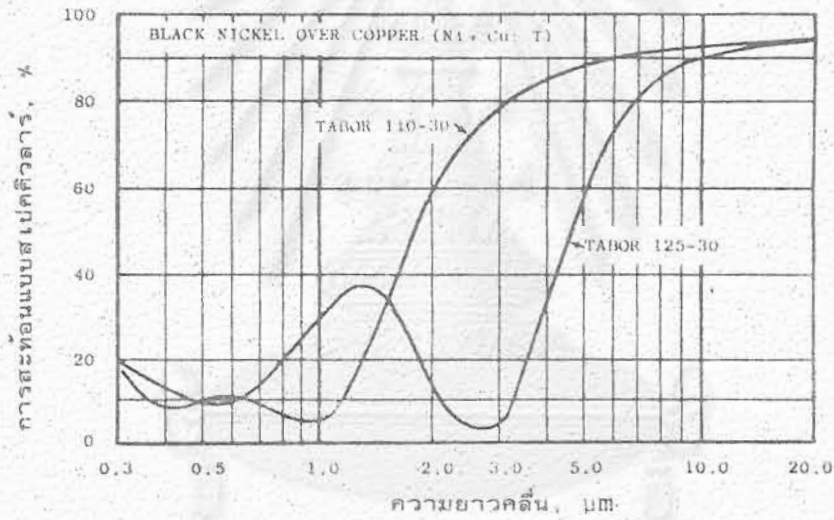
(3) การทำผิวโลหะให้เป็นผิวซีเล็กต์ฟโดยใช้โครเมียม ผิวที่เคลือบแบล็คโครม(Black Chrome)จะเป็นผิวที่ดูดแสงอาทิตย์ได้ดีเช่นเดียวกับผิวที่เคลือบด้วยนิเกิลดำ รูปที่ 1.10 แสดงเส้นโค้งชนิดต่างๆของผิวซีเล็กต์ฟที่ใช้แบล็คโครมเคลือบ ผิวแบล็คโครมอาจทำได้หลายวิธีคือ

- . โดยการใช้วิธีเคมีไฟฟ้า(Electrochemical Means)
- . โดยใช้การกลายเป็นไอในสุญญากาศ(Vacuum Evaporation)
- . โดยการใช้การเกาะผิวโดยไอที่เกิดจากเคมี(Chemical Vapor Deposition)

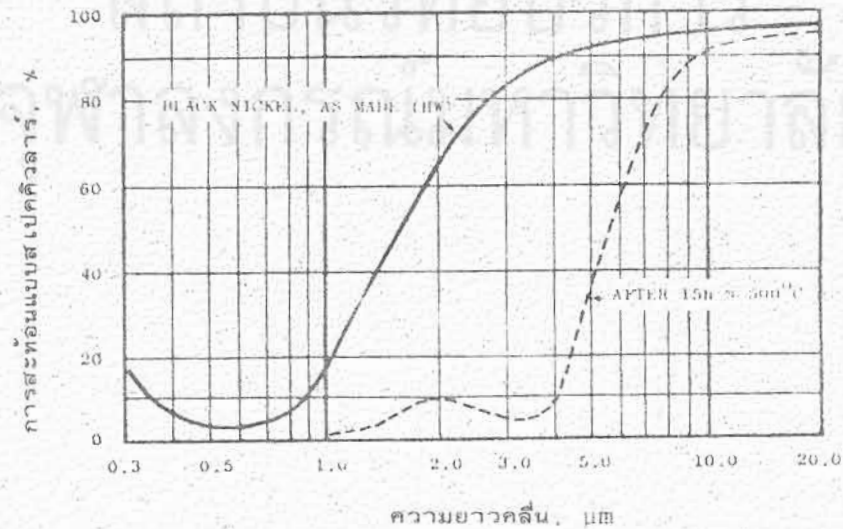
ขบวนการทั้งหลายที่ทำให้เกิดผิวซีเล็กต์ฟจะมีคุณสมบัติทางแสงและคุณสมบัติกลต่างกันมาก ผิวซีเล็กต์ฟเหล่านี้จะมีค่าการดูดแสงอาทิตย์อยู่ระหว่าง 0.93 และ 0.97 และค่าการส่งออกรังสีความร้อนอยู่ระหว่าง 0.03 และ 0.25 ขบวนการที่ Honeywell และ Sandia ใช้คือขบวนการเคมีไฟฟ้า ส่วนขบวนการที่ Helio ใช้คือขบวนการสะสมในสุญญากาศ



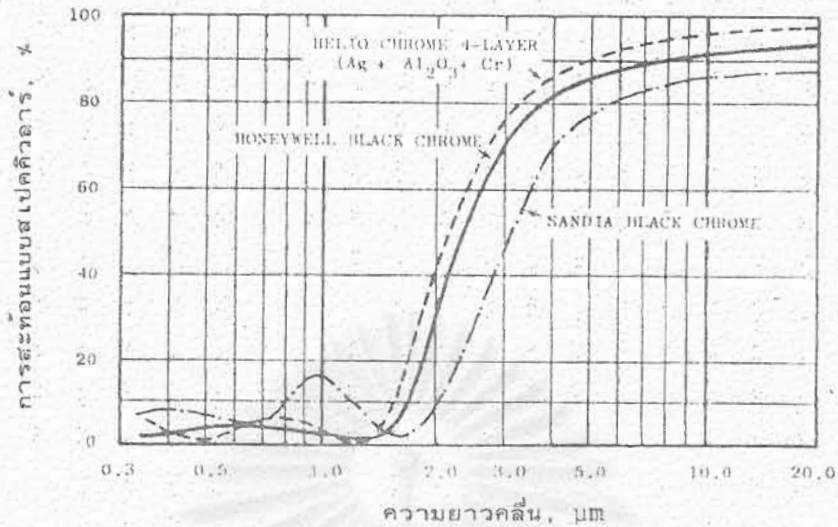
รูปที่ 1.7 คุณสมบัติการสะท้อนแบบสเปคโตรัลของผิวคอปเปอร์ออกไซด์



รูปที่ 1.8 คุณสมบัติการสะท้อนรังสีแบบสเปคโตรัลของผิวนิเกิลดำ



รูปที่ 1.9 เปรียบเทียบคุณสมบัติการสะท้อนรังสีแบบสเปคโตรัลของผิวนิเกิลดำกับผิวนิเกิลดำซึ่งถูกนำไปอบที่อุณหภูมิ 500°C เป็นเวลา 15 ชั่วโมง



รูปที่ 1.10 คุณสมบัติการสะท้อนรังสีแบบสเปกตรัมของผิวแบล็คโครม

#### 1.6 ความเป็นมาของปัญหา

ในหลายหัวข้อที่ผ่านมาได้กล่าวถึงการหาวัสดุซึ่งมีผิวลักษณะที่ให้ค่าการดูดแสงอาทิตย์สูง แต่มีค่าการส่งออกรังสีความร้อนต่ำ เพื่อนำไปใช้ทำแผ่นดูดแสงอาทิตย์ วัสดุที่มีผิวซึ่งให้คุณสมบัติดังกล่าวไม่ได้เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ แต่อาจสังเคราะห์ขึ้นได้ ผิวดังกล่าวมีชื่อว่า "ผิวซีเลกตีฟ" ผิวซีเลกตีฟยังแบ่งออกได้เป็นหลายชนิด ต้องเลือกให้เหมาะสมกับชนิดของชิ้นงาน

ตัวแปรค่าที่ควบคุมคุณภาพของผิวซีเลกตีฟมีอยู่หลายตัวด้วยกัน ได้แก่ เวลาที่ใช้ชุบชิ้นงานและความเข้มข้นของกระแสไฟฟ้าที่ใช้เป็นต้น ค่าตัวแปรดังกล่าวที่เหมาะสมดังกล่าวได้จากการทดลอง การทดลองแบ่งได้เป็นสองส่วนคือการชุบชิ้นงานให้ได้ผิวซีเลกตีฟโดยใช้ตัวแปรหลายค่า แล้วนำชิ้นงานที่ได้ไปทำการวัดค่าการดูดแสงอาทิตย์และการส่งออกรังสีความร้อน ชิ้นงานซึ่งให้คุณสมบัติของค่าการดูดแสงอาทิตย์สูงและให้ค่าการส่งออกรังสีความร้อนต่ำจะถูกเลือกมาใช้งาน

อุปกรณ์ที่ใช้วัดค่าการดูดแสงอาทิตย์คือ UV-Visible Spectrometer และอุปกรณ์ที่ใช้วัดค่าการส่งออกรังสีความร้อนคือ Infrared Reflectometer อุปกรณ์ทั้งสองชนิดดังกล่าวมีราคาแพงมากทำให้ไม่อาจจัดซื้อมาใช้ในโครงการวิจัยนี้ได้ เครื่องมืออย่างง่ายสำหรับวัดค่าการดูดแสงอาทิตย์ทั้งหมดและค่าการส่งออกรังสีความร้อนทั้งหมดได้รับการออกแบบและสร้างขึ้นเพื่อใช้งาน เครื่องมือนี้จะให้ค่าการดูดแสงอาทิตย์และค่าการส่งออกรังสีความร้อนไม่ละเอียดเท่าเครื่องมือสองชนิดแรก

#### 1.7 วัตถุประสงค์และขอบเขตของการวิจัย

- 1 เพื่อศึกษาและเลือกชนิดของผิวซีเลกตีฟที่เหมาะสม เพื่อมาใช้กับแผ่นดูดแสงอาทิตย์
- 2 เพื่อศึกษาหาค่าของตัวแปรที่เหมาะสมที่ใช้ในกระบวนการทำผิวซีเลกตีฟ

- 3 เพื่อศึกษาการนำผิวซี เล็กติฟที่ให้ค่าการดูดแสงอาทิตย์และค่าการส่งออกรังสีความร้อนที่เหมาะสมไปใช้ทำแผ่นดูดแสงอาทิตย์
- 4 เพื่อศึกษา เปรียบเทียบประสิทธิภาพเชิงความร้อนของแผงรับแสงอาทิตย์ที่แผ่นดูดแสงอาทิตย์เป็นสีดำ กับแผงรับแสงอาทิตย์ที่มีแผ่นดูดผิว เป็นซี เล็กติฟ

#### 1.8 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย

- 1 ได้อุปกรณ์สำหรับวัดค่าการดูดแสงอาทิตย์ทั้งหมด และค่าการส่งออกรังสีความร้อนทั้งหมดของวัสดุแผ่น
- 2 ได้ชนิดของผิวซี เล็กติฟที่เหมาะสม เพื่อใช้เป็นแผ่นดูดแสงอาทิตย์
- 3 ได้แผงรับแสงอาทิตย์แบบที่แผ่นดูดแสงอาทิตย์มีผิว เป็นสีดำ แผงรับแสงอาทิตย์ที่ได้นี้จะให้ค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนสูง สร้างขึ้นได้ง่าย และราคาต่ำ
- 4 ได้อุปกรณ์สำหรับทดสอบประสิทธิภาพเชิงความร้อนของแผงรับแสงอาทิตย์
- 5 ได้แบบสำหรับสร้างแผงรับแสงอาทิตย์ชนิดที่แผ่นดูดแสงอาทิตย์มีผิว เป็นซี เล็กติฟ และ เส้นกราฟแสดงประสิทธิภาพเชิงความร้อน

#### 1.9 การดำเนินการวิจัย

ขั้นตอนของการวิจัยมีดังนี้

- 1 สืบรวจงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ซึ่งได้แก่ งานวิจัยเกี่ยวกับผิวซี เล็กติฟ ขบวนการทำผิวซี เล็กติฟและการวัดค่าการดูดแสงอาทิตย์และค่าการส่งออกรังสีความร้อนของผิว และงานวิจัยเกี่ยวกับแผงรับแสงอาทิตย์ซึ่งได้แก่การออกแบบและสร้างแผงรับแสงอาทิตย์ขึ้นใช้งาน และการทดสอบหาค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อน
- 2 ออกแบบอุปกรณ์สำหรับใช้วัดค่าการดูดแสงอาทิตย์และค่าการส่งออกรังสีความร้อนของผิววัสดุแผ่น
- 3 ทดสอบอุปกรณ์ที่สร้างขึ้นตามข้อ 2 ชิ้นงานที่นำมาทดสอบเพื่อใช้กับอุปกรณ์ดังกล่าวคือทองแดงแผ่น ซึ่งมีผิวขัดมัน และโลหะแผ่นซึ่งเคลือบผิวด้วยสีดำด้านของ "รัลโอเลียม" เบอร์ 412 ค่าการดูดแสงอาทิตย์และค่าการส่งออกรังสีความร้อนของวัสดุทั้งสองดังกล่าวอาจดูได้จากตารางแสดงค่าคุณสมบัติของผิววัสดุในหนังสือ "การถ่ายเทความร้อน" และจากข้อกำหนดที่ผู้ผลิตสีดังกล่าวให้มา
- 4 เลือกวัสดุชนิดที่จะนำไปใช้ทำแผ่นดูดแสงอาทิตย์ซึ่งได้แก่ เหล็กแผ่น ทองแดงแผ่น และอลูมิเนียมแผ่น นำมาทำผิวให้เป็นซี เล็กติฟ แล้วนำชิ้นงานที่ได้ไปทดสอบหาค่าการดูดแสงอาทิตย์และค่าการส่งออกรังสีความร้อนโดยใช้อุปกรณ์ที่สร้างขึ้น โดยใช้ตัวแปรหลายค่า เช่น ความ เข้มของกระแสไฟฟ้าและ เวลาที่ใช้ชุบชิ้นงาน เลือกตัวแปรที่ให้ผิวซี เล็กติฟที่เหมาะสมสำหรับนำไป ใช้กับแผ่นดูดแสงอาทิตย์



- 5 ออกแบบและสร้างแสงรับแสงอาทิตย์ชนิดที่ผิวของแผ่นดูดแสงอาทิตย์เป็นสีดำ โดยแผงรับแสงอาทิตย์ที่ออกแบบนี้มีราคาต่ำ แต่ให้ประสิทธิภาพเชิงความร้อนสูง
- 6 ออกแบบและสร้างอุปกรณ์สำหรับใช้ทดสอบประสิทธิภาพเชิงความร้อนของแผงรับแสงอาทิตย์ นำแผงรับแสงอาทิตย์ที่สร้างขึ้นมาติดตั้งทดสอบ เพื่อหาตัวคงที่ของแผง เช่นค่าบอนด์คอนดักแทนของแผ่นดูดแสงอาทิตย์และท่อ เป็นต้น
- 7 ใช้ผลจากข้อ 6 เพื่อประเมินค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนของแผงรับแสงอาทิตย์ชนิดที่ผิวของแผ่นดูดแสงอาทิตย์เป็นสี เล็กติฟชนิดที่เลือกมาใช้งาน (ตามข้อ 4)
- 8 สรุปผลการวิจัยและให้ข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยโครงการที่ต่อเนื่องต่อไป



สภานันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 2

### เครื่องมือวัดค่าการดูดแสงอาทิตย์ และการปล่อยรังสีความร้อน

#### 2.1 เครื่องมือวัดค่าการดูดแสงอาทิตย์ $\alpha$ และค่าการปล่อยรังสีความร้อน $\epsilon$

เครื่องมือวัดค่า  $\alpha$  และ  $\epsilon$  ที่ออกแบบและสร้างขึ้นเป็นแบบที่ง่ายต่อการสร้างขึ้นใช้งาน ในขณะเดียวกัน ต้องให้ผลลัพธ์ของค่า  $\alpha$  และ  $\epsilon$  ที่วัดได้มีความถูกต้องสูง การทดสอบเครื่องมือดังกล่าวทำได้โดยการใช้ชิ้นงานมาตรฐานที่ทราบค่า  $\alpha$  และ  $\epsilon$  อยู่แล้วมาติดตั้งทดสอบแล้วเปรียบเทียบค่าที่วัดได้โดยเครื่องที่สร้างขึ้นกับค่า  $\alpha$  และ  $\epsilon$  ของชิ้นงานนั้น หรืออาจทดสอบโดยเปรียบเทียบค่า  $\alpha$  และ  $\epsilon$  ที่วัดได้โดยเครื่องมือดังกล่าว กับค่าที่วัดได้โดย UV-Visible Spectrophotometer และ Infrared Reflectometer

#### เครื่องมือวัดค่าการดูดแสงอาทิตย์

เครื่องมือวัดค่าการดูดแสงอาทิตย์,  $\alpha$ , แสดงในรูปที่ 2.1 ส่วนประกอบย่อยคือฮีทฟลักซ์มิเตอร์ (Heat Flux Meter) ซึ่งวางอยู่บนฮีทซิงค์ (Heat Sink) ก่อผลโลหะซึ่งมีผาต้านบนเป็นกระจกใสสำหรับใช้ติดตั้งชิ้นงานไว้ภายใน และก่ผลโลหะขนาดโตกว่าใบแรกซึ่งใช้สำหรับติดตั้งก่ผลโลหะใบแรกและน้ำซึ่งใส่ไว้เพื่อทำให้อุณหภูมิของผนังของก่ผลโลหะใบแรกสม่ำเสมอและเท่ากับอุณหภูมิของชิ้นงาน อุณหภูมิของน้ำจะถูกควบคุมให้เท่ากับอุณหภูมิชิ้นงานโดยใช้ฮีทเตอร์ไฟฟ้าและอุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิ เมื่อนำเครื่องมือดังกล่าวไปติดตั้งใช้งาน ให้นำชิ้นงานที่จะวัดค่า  $\alpha$  มาวางบนฮีทฟลักซ์มิเตอร์ ปิดผาต้านบนแล้วดูดอากาศภายในก่ผลออกจนภายในก่ผลเป็นสุญญากาศ นำเครื่องมือออกไปวางรับแสงอาทิตย์ วัดอุณหภูมิของชิ้นงานโดยใช้เทอร์โมคัปเปิล ควบคุมอุณหภูมิของน้ำโดยรอบก่ผลบรรจุชิ้นงานให้เท่ากับชิ้นงาน หลังงานแสงอาทิตย์ที่ตกลงบนชิ้นงานจะถูกดูดแล้วส่งต่อผ่านฮีทฟลักซ์มิเตอร์ลงสู่ฮีทซิงค์ เนื่องจากภายในก่ผลบรรจุชิ้นงานเป็นสุญญากาศและอุณหภูมิของชิ้นงานเท่ากับของผนังก่ผลจึงไม่มีความร้อนถ่ายเทระหว่างชิ้นงานกับผนังก่ผลบรรจุชิ้นงาน ดังนั้นอัตราความร้อนที่ผ่านฮีทฟลักซ์มิเตอร์จึงเป็นอัตราความร้อนที่ชิ้นงานดูดเอาไว้ สมการที่ใช้คำนวณค่าการดูดแสงอาทิตย์ของผิวของชิ้นงานคือ

$$A_s \{HR(\tau\alpha)\} = Q_s + Q_{st} + Q_l \quad (2.1)$$

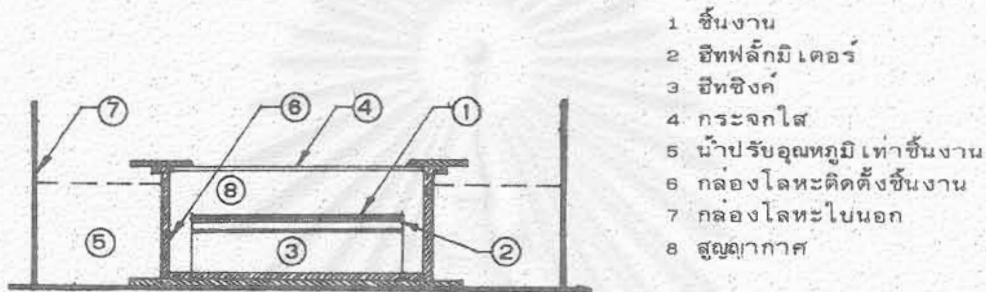
เมื่อ  $A_s$  = พื้นที่ผิวของชิ้นงาน (ส่วนที่รับแสงอาทิตย์)

$H$  = อัตราพลังงานแสงอาทิตย์ที่ตกบนระนาบซึ่งติดตั้ง เครื่องมือวัดแสงอาทิตย์

$R$  = ตัวประกอบ เปลี่ยนอัตราพลังงานแสงอาทิตย์จากระนาบซึ่งติดตั้ง เครื่องมือวัดแสงอาทิตย์ไปยังระนาบซึ่งติดตั้งชิ้นงาน



สัมประสิทธิ์การสูญเสียเท่ากับ  $0.16/\text{cm}$  และช่วงเวลาที่ทำการทดลองคือ  $10.00-14.00$  ซึ่งมุมตกกระทบของแสงอาทิตย์บนผิวหน้าของกระจกมีค่าไม่เกิน  $30$  องศา โดยใช้สมการ(2.4) ถึงสมการ(2.8) ได้  $\tau_p$  เท่ากับ  $0.92$ ,  $\tau_\alpha$  เท่ากับ  $0.94$  และ  $\tau$  เท่ากับ  $0.86$  โดยแทนค่า  $\tau$  ที่ได้และใช้  $\rho_d = 0.85$  (ใช้สมการ(2.7)ที่มุมตกกระทบ  $60$  องศา)ลงในสมการ(2.3)  $(\tau\alpha)$  ที่คำนวณได้ยังประกอบด้วยตัวที่ยังไม่ทราบค่าคือ  $\alpha$  โดยใช้สมการ(2.2)ซึ่ง  $H$  วัดค่าได้โดยใช้ไพราโนมิเตอร์และ  $R = \cos\theta$  ( $\theta$  คือมุมตกกระทบของแสงอาทิตย์บนกระจก) ค่าการดูดแสงอาทิตย์  $\alpha$  จะคำนวณค่าได้



- 1 ชั่งงาน
- 2 ฮีทฟลักซ์มิเตอร์
- 3 ฮีทซิงค์
- 4 กระจกใส
- 5 น้ำปรับอุณหภูมิเท่าชั่งงาน
- 6 กล้องโลหะติดตั้งชั่งงาน
- 7 กล้องโลหะใบนอก
- 8 สลูดอากาศ

รูปที่ 2.1 เครื่องมือวัดค่าการดูดแสงอาทิตย์ของผิววัสดุ

### เครื่องมือวัดค่าการส่งออกรังสีความร้อน

เครื่องมือสำหรับวัดค่าการส่งออกรังสีความร้อนแสดงในรูปที่ 2.21 ส่วนประกอบย่อยของเครื่องมือมีดังนี้ ฮีทฟลักซ์มิเตอร์ อุปกรณ์ให้กำเนิดความร้อนได้แก่ฮีทเตอร์ไฟฟ้า กล้องโลหะซึ่งมีผนังแข็งแรงพร้อมฝาปิดโลหะ และกล้องโลหะขนาดใหญ่กว่ากล้องโลหะใบแรก ลักษณะการทำงานของเครื่องมือมีดังนี้ นำชิ้นงานที่ต้องการวัดค่าการส่งออกรังสีความร้อนมาติดตั้งบนฮีทฟลักซ์มิเตอร์ ปิดฝากล้องแล้วดูอากาศภายในกล้องออกจนภายในกล้องเป็นสุญญากาศ ให้ฮีทเตอร์ไฟฟ้าทำงาน เพื่อเพิ่มอุณหภูมิของชิ้นงานไปที่อุณหภูมิที่ต้องการ โดยรอบกล้องบรรจุชิ้นงานจะต้องทำให้อุณหภูมิสม่ำเสมอและคงที่ เช่น ใช้น้ำแข็งมาใส่โดยรอบกล้องโลหะ เป็นต้น อุณหภูมิของชิ้นงานอ่านได้จากเทอร์โมคัปเปิล ติดตั้งให้ปลายของเส้นลวดอยู่ที่ด้านล่างของชิ้นงาน อัตราความร้อนที่ชิ้นงานได้รับอ่านค่าได้จากฮีทฟลักซ์มิเตอร์ โดยการปรับอัตราความร้อนให้ไหลเข้าชิ้นงานในอัตราที่ทำให้อุณหภูมิของชิ้นงานสูงกว่าอุณหภูมิของสิ่งแวดล้อมและใช้ค่าฮีทฟลักซ์ที่อ่านได้จากฮีทฟลักซ์มิเตอร์ซึ่งเป็นพลังงานที่ส่งออกจากชิ้นงานโดยการแผ่รังสีและอุณหภูมิของชิ้นงานที่อ่านได้จากเทอร์โมคัปเปิล แล้วใช้สมการของการแผ่รังสีความร้อนซึ่งจะกล่าวถึงต่อไป ค่าการส่งออกรังสีความร้อนของผิวชิ้นงานจะคำนวณได้

สมมุติฐานที่ใช้ในการสร้างสมการ เพื่อคำนวณค่าการส่งออกรังสีความร้อนมีดังนี้

1. ผิวของชิ้นงานและผนังภายในของกล้องบรรจุชิ้นงาน เป็นวัสดุที่มีผิวเทา (Gray Surface)

$(\tau\alpha)$  = ผลคูณของค่าการผ่านทะลุกระจกปิดด้านบนกล่องบรรจุชิ้นงานกับค่าการดูดแสงอาทิตย์ของผิวของชิ้นงาน

$Q_s$  = อัตราความร้อนที่ส่งผ่านฮีทฟลักซ์มีเตอร์ซึ่งเท่ากับอัตราความร้อนซึ่งถูกดูดเอาไว้โดยชิ้นงาน

$Q_L$  = อัตราพลังงานที่สูญเสียจากชิ้นงาน

$Q_{st}$  = อัตราพลังงานที่สะสมในชิ้นงาน

ถ้าทำการทดลองที่สภาวะคงที่ทำให้  $Q_{st} = 0$  และถ้าควบคุมให้อุณหภูมิของชิ้นงานเท่ากับอุณหภูมิของผนังกล่องที่บรรจุชิ้นงานแล้วจะทำให้  $Q_L = 0$  ดังนั้นสมการ (2.1) ลดรูปเป็น

$$A_s \{HR(\tau\alpha)\} = Q_s \quad (2.2)$$

สำหรับ  $(\tau\alpha)$  มีสมการเป็น

$$(\tau\alpha) = \tau\alpha \sum_{n=0}^{\infty} [(1-\alpha)\rho_d]^n = \frac{\tau\alpha}{1-(1-\alpha)\rho_d} \quad (2.3)$$

$$\tau = \tau_r \tau_\alpha \quad (2.4)$$

สำหรับกระจกชั้นเดียว  $\tau_r = \tau_{r,1}$

$$\tau_{r,1} = (1-\rho)^2 \sum_{n=0}^{\infty} \rho^{2n} = \frac{(1-\rho)^2}{(1-\rho^2)} = \frac{1-\rho}{1+\rho} \quad (2.5)$$

$$\tau_\alpha = e^{-KL} \quad (2.6)$$

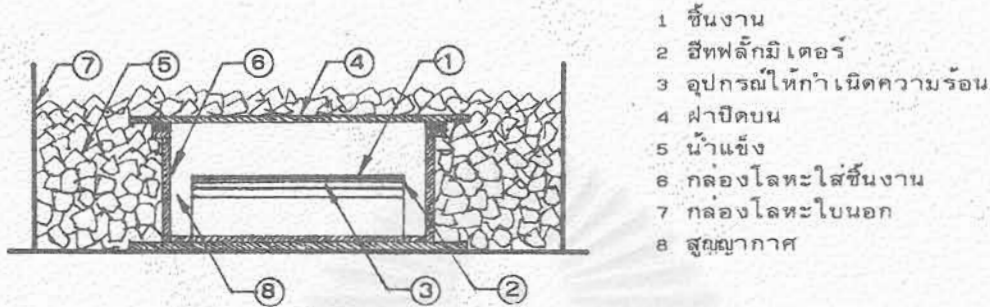
เมื่อ  $\tau$  = การผ่านทะลุทั้งหมดของแสงอาทิตย์บนกระจกแผ่น,  $\tau_r$  = การผ่านทะลุของแสงอาทิตย์บนกระจกเมื่อไม่คิดว่ากระจกดูดแสงอาทิตย์ไว้,  $\tau_\alpha$  = การผ่านทะลุของแสงอาทิตย์เมื่อกระจกมีคุณสมบัติดูดแสงอาทิตย์,  $\tau_{r,1} = \tau_r$  สำหรับกระจกชั้นเดียว,  $K$  = สัมประสิทธิ์การสูญหาย (Extinction Coefficient) ของกระจก,  $L$  = ความหนาของกระจก,  $\alpha$  = การดูดแสงอาทิตย์ของแผ่นดูดแสงอาทิตย์,  $\rho_d$  = การสะท้อนแสงอาทิตย์แบบกระจายของกระจก,  $\theta_1$  และ  $\theta_2$  = มุมตกและมุมหักเห (Incident and Refraction Angle) เมื่อแสงตกลงบนกระจก,  $n_1, n_2$  = ดัชนีหักเหของแสงอาทิตย์ในตัวกลาง 1 และ 2 ตามลำดับ.

$$\rho = \frac{1}{2} \left[ \frac{\sin^2(\theta_2 - \theta_1)}{\sin^2(\theta_2 + \theta_1)} + \frac{\tan^2(\theta_2 - \theta_1)}{\tan^2(\theta_2 + \theta_1)} \right] \quad (2.7)$$

$$\frac{n_1}{n_2} = \frac{\sin\theta_2}{\sin\theta_1} \quad (2.8)$$

เครื่องมือสำหรับวัดค่า  $\alpha$  ที่ออกแบบนี้ใช้กระจกขนาดความหนา 4 mm และเป็นกระจกชนิดที่ไร้ค่า

2. ผิวของชิ้นงานและของผนังของกล่องบรรจุชิ้นงานมีคุณสมบัติดูดและส่งออกรังสีความร้อนแบบกระจาย
3. อุณหภูมิของชิ้นงานและของผนังของกล่องบรรจุชิ้นงานสม่ำเสมอ



รูปที่ 2.2 เครื่องมือวัดค่าการส่งออกรังสีความร้อน

โดยที่พื้นที่ผนังของกล่องบรรจุชิ้นงานมีขนาดใหญ่เมื่อเทียบกับขนาดพื้นที่ของชิ้นงาน ดังนั้นสมการของการแลกเปลี่ยนรังสีความร้อนซึ่งแลกเปลี่ยนระหว่างชิ้นงานและผนังของกล่องบรรจุชิ้นงานคือ [ 5 ]

$$Q_s = -Q_w = \frac{A_s \sigma (T_s^4 - T_w^4)}{\frac{1}{\epsilon_s} + \frac{A_s}{A_w} \left( \frac{1}{\epsilon_w} - 1 \right)} \quad (2.9)$$

เมื่อ  $Q_s$ ,  $Q_w$  = อัตราความร้อนที่ส่งออกจากชิ้นงานและส่งออกจากผนังของกล่องบรรจุชิ้นงานตามลำดับ,  
 $T_s$ ,  $T_w$  = อุณหภูมิสัมบูรณ์ของผิวของชิ้นงานและผิวหน้าของผนังกล่องบรรจุชิ้นงานตามลำดับ,  $\epsilon_s$ ,  $\epsilon_w$  = ค่าการส่งออกรังสีความร้อนของผิวของชิ้นงานและของผิวหน้าของผนังกล่องบรรจุชิ้นงานตามลำดับ,  $A_s$ ,  $A_w$  = พื้นที่ของชิ้นงานและของผนังของกล่องบรรจุชิ้นงานส่วนที่แลกเปลี่ยนรังสีความร้อนกับชิ้นงาน

โดยที่เครื่องมือดังกล่าวออกแบบให้มีรูปร่างในลักษณะที่ให้พื้นที่ผนังของกล่องบรรจุชิ้นงานคลุมชิ้นงานและยังออกแบบให้พื้นที่ของผนังของกล่องบรรจุชิ้นงานมีขนาดใหญ่มากเมื่อเทียบกับพื้นที่ของชิ้นงาน ดังนั้นสมการ (2.9) ลดรูปเป็น

$$Q_s = \epsilon_s A_s \sigma (T_s^4 - T_w^4) \quad (2.10)$$

โดยใช้สมการ (2.10) อัตราความร้อน  $Q_s$  อ่านได้จากฮีทฟลักมิเตอร์ อุณหภูมิของชิ้นงาน  $T_s$  อ่านได้จากเทอร์โมคัปเปิลที่ติดตั้งไว้ที่ชิ้นงาน และเพื่อให้ผนังกล่องบรรจุชิ้นงานมีอุณหภูมิสม่ำเสมอจึงใส่น้ำแข็งล้อมรอบกล่องซึ่งทำให้อุณหภูมิของผิวหน้ากล่องบรรจุชิ้นงาน  $T_w$  สม่ำเสมอเท่ากับ 273 K ค่าการส่งออกรังสีความร้อน,  $\epsilon$ , จะคำนวณได้จากสมการ

2.2 การออกแบบและการสร้างเครื่องมือวัดค่าการดูดแสงอาทิตย์  $\alpha$  และค่าการส่งออกรังสีความร้อน  $\epsilon$  เครื่องมือที่จะออกแบบและสร้างขึ้นใช้งานจะใช้ได้ทั้งสำหรับวัดค่า  $\alpha$  และค่า  $\epsilon$  ส่วนประกอบของ

อุปกรณ์ย่อยในเครื่องมือพร้อมทั้งขนาดแสดงในรูปที่ 2.3 อุปกรณ์ย่อยส่วนใหญ่จะเหมือนกันยกเว้นแผ่นปิดด้านบนของกล่องที่ติดตั้งชิ้นงานและอุปกรณ์กำเนิดความร้อนให้กับชิ้นงานเท่านั้น กล่าวคือเมื่อนำเครื่องมือไปใช้วัดค่าการดูดแสงอาทิตย์  $\alpha$  ให้ใช้ปิดด้านบนเป็นกระจกใสและไม่ต้องใช้อุปกรณ์กำเนิดความร้อน แต่ถ้านำเครื่องมือไปใช้วัดค่าการปล่อยรังสีความร้อน  $\epsilon$  ให้แผ่นปิดด้านบนเป็นกระจกใสและไม่ต้องใช้อุปกรณ์กำเนิดความร้อน รายละเอียดของส่วนประกอบย่อยของเครื่องมือมีดังนี้

#### กล่องโลหะสำหรับติดตั้งชิ้นงาน

วัสดุที่ใช้ทำกล่องเป็นโลหะซึ่งมีการนำความร้อนสูงได้แก่ทองแดง ขนาดของกล่องที่จะออกแบบขึ้นกับขนาดของชิ้นงาน สำหรับการวิจัยนี้ใช้ชิ้นงานขนาดเท่ากับอีทพลังมิเตอร์เท่ากับ  $12 \times 110$  mm และความสูงของผนังกล่องต้องไม่บังแสงอาทิตย์ที่ตกบนชิ้นงานระหว่างเวลา 10.00-14.00 น.ตามที่ได้กล่าวมาแล้วในขณะเดียวกันเนื้อที่ของผนังกล่องต้องให้ใหญ่กว่าขนาดของชิ้นงานมาก โดยอาศัยข้อกำหนดดังกล่าวขนาดของกล่องโลหะคือ  $120 \times 200 \times 70$  mm.

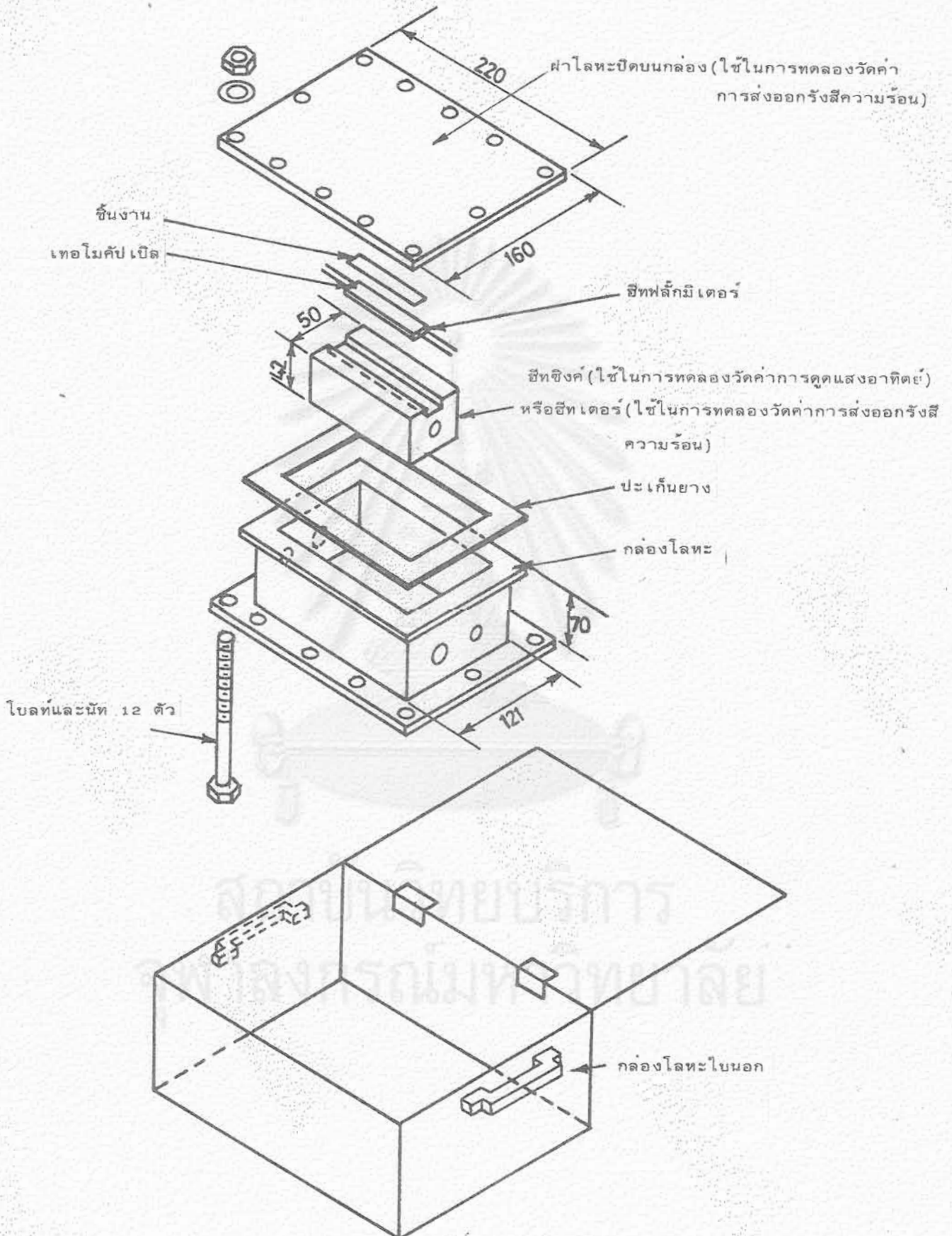
โลหะที่ใช้ทำกล่องเป็นทองแดงแผ่นขนาดความหนา 6 mm ด้านบนทำเป็นบ่าเพื่อรองรับปะเก็นและแผ่นปิดด้านบนซึ่งเป็นกระจกใสหรือโลหะแผ่นแล้วแต่ว่าจะใช้เครื่องมือไปวัดค่า  $\alpha$  หรือ  $\epsilon$  เพื่อไม่ให้มีการรั่วไหลของอากาศภายนอกเข้าภายในกล่อง ผ่าปิดด้านบนของกล่องยึดติดกับกล่องด้วยสลักเกลียวตามที่แสดงในรูปที่ 2.3 สายไฟฟ้าและสายเทอโมคัปเปิลต่อเข้าในกล่องผ่านทางรูเจาะด้านข้าง ส่วนรูรับบริเวณที่สายไฟเข้ากล่องจะอุดด้วยซิลิโคน อากาศภายในกล่องจะถูกดูดออกโดยรูเจาะทางด้านข้างที่บริเวณใกล้เคียงกับรูเจาะทางออกของสายไฟ

#### ฮีทซิงค์ และอุปกรณ์ทำความร้อน

ฮีทซิงค์ทำด้วยวัสดุซึ่งมีความจุความร้อนต่อหน่วยน้ำหนักสูงได้แก่ทองแดง ฮีทซิงค์จะใช้ในกรณีที่ใช้เครื่องมือวัดค่า  $\alpha$  ขนาดของฮีทซิงค์เท่ากับ  $120 \times 40 \times 10$  mm ด้านล่างของฮีทซิงค์มีอุปกรณ์ถ่ายเทความร้อนขนาดเล็กซึ่งทำได้โดยนำน้ำจากภายนอกไหลเข้าตามท่อมาหล่อเย็นฮีทซิงค์ อัตราไหลของน้ำควบคุมได้ทำให้สามารถปรับระดับอุณหภูมิของฮีทซิงค์ได้ เมื่อต้องการให้อุณหภูมิของชิ้นงานสูง ทำได้โดยการปรับระดับอุณหภูมิของฮีทซิงค์ให้สูง ทำให้ความร้อนถ่ายเทจากชิ้นงานเข้าสู่ฮีทซิงค์อยู่ที่อัตราค่าซึ่งจะมีผลทำให้อุณหภูมิของชิ้นงานเพิ่ม เพื่อว่าพลังงานที่ชิ้นงานได้รับจากแสงอาทิตย์จะได้ถ่ายเทลงฮีทซิงค์ได้หมด

อุปกรณ์กำเนิดความร้อนมีลักษณะเป็นแผ่นจะใช้ในกรณีที่ใช้เครื่องมือวัดค่าการส่งออกรังสีความร้อน อัตราพลังงานจากอุปกรณ์กำเนิดความร้อนควบคุมโดยใช้ Variac Transformer ควบคุมแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่เข้าอุปกรณ์ ขนาดของอุปกรณ์ดังกล่าวประมาณ 5 Watt เมื่อใช้แรงเคลื่อนไฟฟ้าสูงสุด, 220 V

ฮีทซิงค์และอุปกรณ์ทำความร้อนติดตั้งอยู่บนแท่งฉนวนสี่เหลี่ยมและวางอยู่ในกล่องบรรจุชิ้นงานตามที่แสดงในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 ส่วนประกอบของเครื่องมือวัดค่าการดูดแสงอาทิตย์ และการส่งออกรังสีความร้อน

### กล่องใบนอก

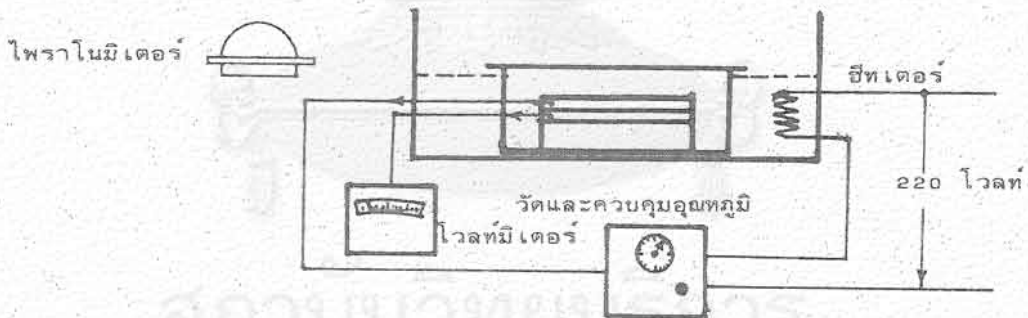
กล่องใบนอกเป็นกล่องโลหะมีขนาดโตกว่ากล่องที่ติดตั้งชิ้นงาน ในกรณีที่นำกล่องใบนอกไปใช้กับเครื่องมือวัดค่าการดูดแสงอาทิตย์ ให้ใส่น้ำไว้และติดตั้งฮีตเตอร์ไฟฟ้าขนาด 1 KW เพิ่มเติมเพื่อควบคุมให้ระดับอุณหภูมิของผนังของกล่องบรรจุชิ้นงานสม่ำเสมอ เท่ากับอุณหภูมิของชิ้นงาน ในกรณีที่นำกล่องใบนอกไปใช้กับเครื่องมือวัดค่าการส่งออกรังสีความร้อนให้ใส่น้ำแข็งแทน

### อุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิ

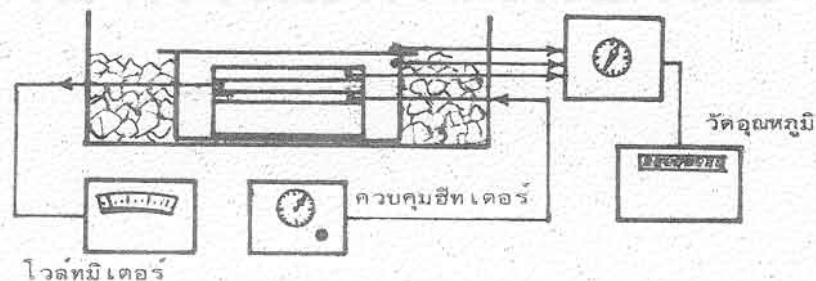
อุปกรณ์ที่ใช้สำหรับวัดและควบคุมอุณหภูมิในการทดลองประกอบด้วย

1. อุปกรณ์วัดอุณหภูมิ เป็นเทอร์โมคัปเปิลแบบ K หน่วยแสดงค่าเป็นของบริษัท RKC อ่านได้ละเอียด  $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$  ตำแหน่งที่ติดตั้งปลายลวดเทอร์โมคัปเปิลแสดง ในรูปที่ 2.4 และ รูปที่ 2.5
2. ฮีทฟลักซ์มิเตอร์เป็นของบริษัท EKO Instruments Trading Co., Model CN 81 มีค่าคงที่เท่ากับ  $17 \text{ cal/cm}^2\text{min}$
3. อุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิเป็นของบริษัท Omega, Model 49, range  $0-200^{\circ}\text{C}$  อ่านได้ละเอียด  $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$

การต่อชุดควบคุมอุณหภูมิกับเครื่องมือวัดค่า  $\alpha$  และ  $\epsilon$  แสดงไว้ในรูปที่ 2.4 และรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.4 แผนภาพแสดงอุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิในเครื่องมือวัดค่า  $\alpha$



รูปที่ 2.5 แผนภาพแสดงอุปกรณ์ควบคุมในเครื่องมือวัดค่า  $\epsilon$

### 2.3 การทดสอบ เครื่องมือวัดค่าการดูดแสงอาทิตย์ $\alpha$ และการส่งออกรังสีความร้อน $\epsilon$

การทดสอบ เครื่องมือวัดค่า  $\alpha$  และค่า  $\epsilon$  ต้องแยกกันทำ การทดสอบทำได้โดยการนำชิ้นงานที่ทราบค่า  $\alpha$  และ  $\epsilon$  อยู่แล้วมาติดตั้งเพื่อการทดสอบ แล้วเปรียบเทียบผลที่ได้จากการใช้เครื่องมือที่สร้างขึ้นกับค่า  $\alpha$  และ  $\epsilon$  ของวัสดุนั้น

#### การทดสอบ เครื่องมือวัดค่าการดูดแสงอาทิตย์ $\alpha$

ชิ้นงานมาตรฐานที่ใช้ได้แก่ทองแดงแผ่นผิวขัดมันซึ่งให้ค่า  $\alpha$  เท่ากับ 0.35 [5] และโลหะแผ่นเคลือบสีดำของ Rust Oleum #412 ซึ่งให้ค่า  $\alpha$  เท่ากับ 0.94 นำชิ้นงานมาตรฐานดังกล่าวมาติดตั้งบนฮีทฟลักซ์มิเตอร์ตามที่แสดงในรูปที่ 2.1 ปิดฝาแล้วดูดอากาศภายในกล่องออก ใส่น้ำโดยรอบกล่องบรรจุชิ้นงาน ตั้งระดับอุณหภูมิของน้ำที่อุปกรณ์ควบคุมที่  $50^{\circ}\text{C}$  แล้วเปิดให้แสงอาทิตย์ฉายลงบนชิ้นงาน รอจนให้ระบบอยู่ในสภาวะสมดุลซึ่งหมายถึงอุณหภูมิของชิ้นงานเท่ากับ  $50^{\circ}\text{C}$  ด้วย แล้วอ่านอัตราความร้อนที่ชิ้นงานส่งผ่านฮีทฟลักซ์มิเตอร์ซึ่งได้จากอุปกรณ์แสดงค่าเป็นแรงเคลื่อนไฟฟ้า mV โดยใช้ค่าคงที่ของฮีทฟลักซ์มิเตอร์เปลี่ยนแรงเคลื่อนไฟฟ้าดังกล่าวให้เป็นปริมาณพลังงาน ในขณะที่เดียวกันต้องวัดค่ามุมตกของแสงอาทิตย์ลงบนกระจกปิดด้านบนของกล่องติดตั้งชิ้นงานหรืออาจใช้สมการคำนวณมุมตกของแสงอาทิตย์ (ดูรายละเอียดในภาคผนวก ข) ก็ได้ แล้วใช้สมการ (2.2) คำนวณค่าการดูดแสงอาทิตย์ต่อไป

ผลการทดสอบ เครื่องมือวัดค่า  $\alpha$  ที่สร้างขึ้นพบว่า ค่าการดูดแสงอาทิตย์มีความถูกต้องอยู่ในช่วง  $\pm 0.05$  หรือถ้าชิ้นงานมีค่า  $\alpha = 0.9$  ความถูกต้องของเครื่องมือจะเท่ากับ  $\pm 5.5\%$  เป็นต้น ค่า  $\alpha$  ที่ได้เป็นคุณสมบัติของวัสดุที่เคลือบผิวโลหะที่มีต่อแสงอาทิตย์ซึ่งประกอบด้วยรังสีส่วนที่มองเห็นได้ประมาณ 50% และที่เหลือก็เป็นรังสีที่มีความยาวคลื่นสั้นที่ไกล เคียงกับความยาวคลื่นของรังสีที่มองเห็น ดังนั้นผิวที่ปรากฏเป็นสีดำเมื่อมองเห็นจะมีคุณสมบัติดูดแสงอาทิตย์เสมอ การพิจารณาว่าผิวใดมีค่า  $\alpha$  สูงจึงทำได้ง่ายซึ่งผิดกับค่า  $\epsilon$  ซึ่งจะได้กล่าวถึงในรายละเอียดต่อไป

#### การทดสอบ เครื่องมือวัดค่าการส่งออกรังสีความร้อน

ชิ้นงานมาตรฐานที่ใช้ทดสอบความถูกต้องของเครื่องมือได้แก่ทองแดงแผ่นผิวขัดมันซึ่งให้ค่า  $\epsilon$  เท่ากับ 0.041 ที่อุณหภูมิ 338 K และโลหะแผ่นเคลือบผิวสีดำด้านของ Rust Oleum #412 ซึ่งให้ค่า  $\epsilon = 0.87$  ติดตั้งที่ตำแหน่ง 1 ดังที่แสดงในรูปที่ 2.2 ปิดฝากล่องแล้วดูดอากาศภายในออก นำน้ำแข็งใส่โดยรอบกล่อง ให้อุปกรณ์กำเนิดความร้อนทำงานโดยเพิ่มกระแสไฟเข้าไปที่ละน้อยจนได้อุณหภูมิของชิ้นงานที่ต้องการ อุณหภูมิของชิ้นงานที่ให้อยู่ในช่วง  $50^{\circ}\text{C}$  -  $80^{\circ}\text{C}$  โดยจะทำการทดลองที่สามตำแหน่งของอุณหภูมิในช่วงดังกล่าว แล้วจึงนำมาหาค่าเฉลี่ยให้มีความเป็น  $\epsilon$  ก่อนอ่านค่าฮีทฟลักซ์มิเตอร์ต้องรอจนระบบอยู่ในสภาวะสมดุลซึ่งอาจสังเกตได้จากอุณหภูมิของชิ้นงานไม่เปลี่ยนแปลง อ่านอุณหภูมิของชิ้นงานแล้วใช้สมการ (2.10)



คำนวณค่าการส่งออกรังสีความร้อน,  $\epsilon$ , ของผิวชิ้นงานต่อไป

จากการทดสอบพบว่าอัตราพลังงานความร้อนที่ส่งผ่านฮีทฟลักมิเตอร์ไม่ได้ถ่ายเทผ่านชิ้นงานอย่างเดียวนิวบางส่วนที่ถ่ายเทโดยการนำความร้อนผ่านตัวยึดชิ้นงานและถ่ายเทโดยการนำความร้อนเข้าสู่กล่องโลหะที่ติดตั้งชิ้นงาน ดังนั้นจึงใช้อัตราความร้อนที่อ่าน จากฮีทฟลักมิเตอร์เป็น  $Q_s$  ไม่ได้ จะต้องเอาอัตราความร้อนที่สูญเสียโดยการนำความร้อนผ่านที่ยึดชิ้นงานออกเสียก่อน

รูปที่ 2.6 แสดงชิ้นงานและตัวยึดจับชิ้นงาน ให้  $Q_t$  แทนอัตราความร้อนที่ออกจากอุปกรณ์ทำความร้อน  $Q_t$  แบ่งออกได้เป็นสามส่วน ส่วนแรกส่งผ่านชิ้นงานออกสู่สิ่งแวดล้อมโดยการแผ่รังสี  $Q_r$  ส่วนที่สองโดย ถ่ายเทผ่านตัวยึดชิ้นงานโดยการนำความร้อน  $Q_{cc}$  เข้าแท่นรองรับชิ้นงาน และกล่องบรรจุชิ้นงานตามลำดับ และส่วนสุดท้ายถ่ายเท เข้าตัวยึดชิ้นงานแล้วถ่ายเทโดยการแผ่รังสีให้สิ่งแวดล้อม  $Q_{cr}$  ในการทดลองแม้ว่าจะ เปลี่ยนวัสดุที่ใช้ทำตัวยึดชิ้นงาน เป็นวัสดุชนิดที่นำความร้อนต่ำ เช่น เมกกาไลท์แล้วก็ตาม เทอม  $Q_{cc}$  และ  $Q_{cr}$  ก็ยังมีค่าสูงเมื่อเทียบกับ  $Q_r$  อยู่ดี การตัดแปลงวิธีคำนวณให้ได้ค่า  $\epsilon$  ถูกต้องทำดังนี้

นำชิ้นงานมาตรฐานที่ผิว เป็นสีดำมาติดตั้งในที่ทดลอง ปิดฝากล่องแล้วดูอุณหภูมิภายในกล่องออก ให้ อุปกรณ์ทำความร้อนทำงาน ปรับกระแสไฟที่เข้าอุปกรณ์ทำความร้อน รอจนระบบอยู่ในสภาวะสมดุลย์ ได้ อุณหภูมิของชิ้นงาน เป็น  $T_s$  และของกล่องบรรจุชิ้นงาน เป็น  $T_a$  แล้วใช้สมการ 2.10 โดยแทนค่าการส่งออกรังสีความร้อนเท่ากับ 0.87

$$Q_t - Q_{cr} - Q_{cc} = 0.87\sigma(T_s^4 - T_a^4)A_s \quad (2.11)$$

เมื่อ  $T_s$  และ  $T_a$  = อุณหภูมิสัมบูรณ์ของชิ้นงานและของผนังของกล่องบรรจุชิ้นงานตามลำดับ

ในทำนองเดียวกันสำหรับชิ้นงานที่เป็นทองแดงผิวขัดมัน เมื่อนำมาติดตั้งเพื่อทำการทดสอบ โดยกำหนดให้เมื่อระบบอยู่ในสภาวะสมดุลย์ อุณหภูมิของชิ้นงานเป็น  $T'_s$  อัตราพลังงานที่ถ่ายเทเข้าชิ้นงาน  $Q'_t$  อัตราความร้อนที่ถ่ายเทจากตัวยึดชิ้นงานโดยการนำและโดยการแผ่รังสีเป็น  $Q'_{cc}$  และ  $Q'_{cr}$  ตามลำดับ และใช้ค่าการส่งออกรังสีความร้อนของชิ้นงานเท่ากับ 0.041 แทนค่าในสมการ(2.10)ได้

$$Q'_t - Q'_{cr} - Q'_{cc} = 0.041\sigma[(T'_s)^4 - (T'_a)^4]A_s \quad (2.12)$$

เมื่อ  $T'_s$  และ  $T'_a$  = อุณหภูมิสัมบูรณ์ของชิ้นงานและของผนังของกล่องบรรจุชิ้นงานตามลำดับ และ  $\sigma$  = ค่าคงที่ของโบลซ์มานมีค่าเท่ากับ  $5.6697 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ K}^4$

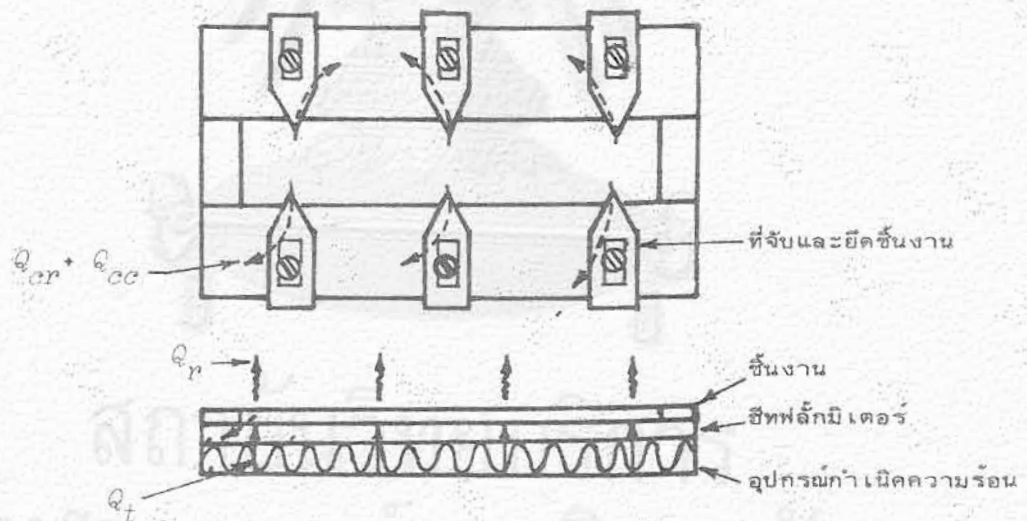
พิจารณาสมการ(2.11) และสมการ(2.12) ถ้า  $T_s$  เท่ากับ  $T'_s$  และอุณหภูมิของกล่องบรรจุชิ้นงานเท่ากับอุณหภูมิของน้ำแข็ง  $0^\circ\text{C}$  แล้วจะทำให้  $Q_{cr} = Q'_{cr}$  และ  $Q_{cc} = Q'_{cc}$  ดังนั้น



$$Q_t - Q'_t = \sigma(T_s^4 - T_a^4)A_s \quad (0.829) \quad (2.13)$$

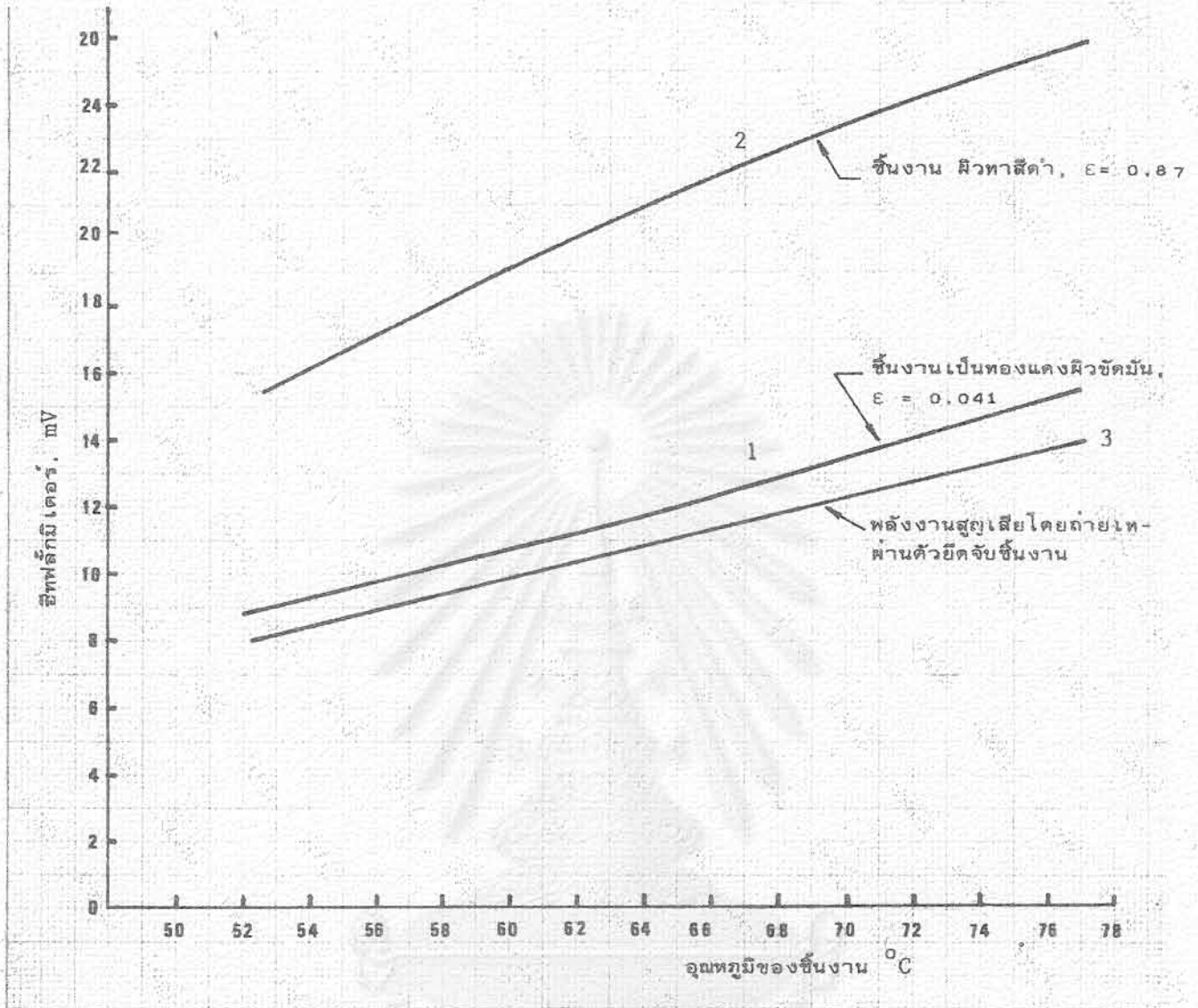
จากสมการ(2.13) ทั้ง  $Q_t$  และ  $Q'_t$  อ่านได้จากฮีฟลักซ์มิเตอร์เมื่อชั้นงานผิวสีดำ ( $\epsilon=0.87$ ) และชั้นงานเป็นทองแดงผิวขัดมัน ( $\epsilon=0.041$ ) ตามลำดับ ฮีฟลักซ์มิเตอร์จะแสดงค่าออกมาเป็นแรงเคลื่อนไฟฟ้าซึ่งเมื่อหารด้วยค่าคงที่ของฮีฟลักซ์มิเตอร์จะได้  $Q_t$  และ  $Q'_t$

พิจารณาสมการ(2.11)และสมการ(2.12) เมื่อเปลี่ยนอุณหภูมิของชั้นงาน  $t_s$  จะได้ความสัมพันธ์ของ  $Q_t$  และ  $Q'_t$  กับอุณหภูมิของชั้นงาน  $t_s$  ตามที่แสดงไว้ในรูปที่ 2.7 เส้นโค้งหมายเลข 1 และหมายเลข 2 แทนความสัมพันธ์ของอัตราพลังงานที่ถ่ายเทจากชั้นงานเมื่อชั้นงานมีอุณหภูมิเป็น  $t_s$  และมีค่าการส่งออกรังสีความร้อนเป็น 0.041 และ 0.87 ตามลำดับ ผลต่างของเส้นโค้งทั้งสอง(แทนด้วยระยะห่างระหว่างเส้น) แทนอัตราพลังงานความร้อนที่สูญเสียจากชั้นงานโดยการแผ่รังสีอย่างเดียวเมื่อชั้นงานมีค่าการส่งออกรังสีความร้อนเป็น 0.829 และมีอุณหภูมิเป็น  $t_s$  ในกรณีที่ชั้นงานมีค่าการส่งออกรังสีความร้อนเป็นศูนย์ การสูญเสียความร้อนจากชั้นงานจะมีลักษณะตามที่แสดงโดยเส้นโค้งหมายเลข 3 อัตราความร้อนตามเส้นโค้งหมายเลข 3 ก็คือความร้อนที่สูญเสียผ่านตัวยึดชั้นงาน



รูปที่ 2.6 แสดงตัวยึดชั้นงาน ชั้นงาน และทิศทางการไหลของความร้อนผ่านชั้นงาน และตัวยึดชั้นงาน

ชั้นงานใดๆซึ่งนำมาติดตั้งทดสอบ ให้ดำเนินการทดสอบตามวิธีที่กล่าวมาข้างต้น เมื่อชั้นงานอยู่ในสภาวะสมดุลแล้ว อ่านค่าอัตราความร้อนที่ส่งผ่านฮีฟลักซ์มิเตอร์และอุณหภูมิของชั้นงาน แล้วคำนวณค่าการส่งออกรังสีความร้อนจากสมการ



รูปที่ 2.7 กราฟแสดงอัตราความร้อนที่ถ่ายเทจากชิ้นงานสองแบบ

$$E(\text{ชิ้นงานตัวอย่าง อุณหภูมิ } t_s) = 0.041 + \frac{Q_t'' - Q_t'}{Q_t - Q_t'} \times 0.829 \quad (2.14)$$

เมื่อ  $Q_t''$  = อัตราความร้อนที่ปล่อยจากชิ้นงาน ค่า  $Q_t'$  อ่านได้จากซีฟลักมีเตอร์ มีหน่วยเป็น mV

ตัวอย่างการใช้รูปที่ 2.7

ชิ้นงานอันหนึ่ง เมื่อนำมาทดสอบหาค่า  $\epsilon$  มีข้อมูลดังนี้ อุณหภูมิของชิ้นงาน  $60^\circ\text{C}$  อัตราความร้อนที่ส่งผ่านซีฟลักมีเตอร์เทียบได้กับแรงเคลื่อนไฟฟ้า 14 mV ค่าการส่งออกรังสีความร้อนของชิ้นงานคือ

$$\epsilon = 0.041 + \frac{14 - Q_t'}{Q_t - Q_t'} \times 0.829$$

ที่อุณหภูมิ  $60^\circ\text{C}$  อ่านค่าอัตราความร้อน  $Q_t$  และ  $Q_t'$  ได้จากรูปที่ 2.7 แทนค่าในสมการได้

$$\epsilon = 0.041 + \frac{(14 - 10.55)}{(18.7 - 10.55)} \times 0.829 = 0.391$$

### บทที่ 3

#### การเลือกวัสดุทำแผ่นดูดแสงอาทิตย์

##### 3.1 ความนำ

แผงรับแสงอาทิตย์ประกอบด้วยส่วนประกอบที่สำคัญคือแผ่นดูดแสงอาทิตย์ซึ่งทำหน้าที่รับแสงอาทิตย์และ เปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อนแล้วถ่ายเทให้ของไหลทำงาน เช่นน้ำที่ไหลผ่านแผงรับแสงอาทิตย์ แผ่นดูดแสงอาทิตย์ต้องเป็นวัสดุที่มีค่าการนำความร้อนสูง น้ำหนักเบา ราคาถูก ทนทานโดยไม่ทำปฏิกิริยากับของไหลทำงาน เช่นไม่เป็นสนิม และต้องมีคุณสมบัติเป็นตัวดูดแสงอาทิตย์ที่ดีในขณะที่เป็นตัวปล่อยรังสีความร้อนที่เร็ว วัสดุที่มีคุณสมบัติครบทุกประการตามที่กล่าวที่ เกิดขึ้นตามธรรมชาติไม่มี โดยเฉพาะคุณสมบัติการดูดแสงอาทิตย์และการปล่อยรังสีความร้อน เพราะวัสดุที่ให้ค่าการดูดแสงอาทิตย์สูงก็จะให้ค่าการส่งออกรังสีความร้อนสูงไปด้วย การศึกษาในที่นี้ก็เพื่อหาวิธีสังเคราะห์ที่เหมาะสมที่จะทำให้แผ่นดูดแสงอาทิตย์ที่เลือกมาใช้งานมีคุณสมบัติใกล้เคียงที่ต้องการมากที่สุด

โลหะ เช่น เหล็กแผ่น ทองแดงแผ่นและอลูมิเนียมแผ่น เป็นวัสดุที่นิยมนำมาทำแผ่นดูดแสงอาทิตย์ เพราะมีคุณสมบัติใกล้เคียงกับคุณสมบัติที่ต้องการ โลหะแต่ละชนิดมีข้อได้เปรียบและเสียเปรียบดังที่แสดงการเปรียบเทียบในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1

ตารางเปรียบเทียบคุณสมบัติ การนำความร้อน น้ำหนัก และราคา ของแผ่นโลหะที่จะเลือกมาใช้ทำแผ่นดูดในแผงรับแสงอาทิตย์แบบแผ่น

ชนิดโลหะ	การนำความร้อน W/m <sup>o</sup> C	น้ำหนัก kg/m <sup>3</sup>	ราคา* เปรียบเทียบ	ทนต่อสภาพใช้งาน (corrosion resistant)
แผ่นเหล็ก (steel sheet)	48	7850	1	ปานกลาง
แผ่นอลูมิเนียม	210	2680	4	ปานกลาง
แผ่นเหล็กไร้สนิม	46	7900	5	สูง
แผ่นทองแดง	385	8795	7	สูง

\* ราคาเปรียบเทียบโดยเทียบกับเหล็กแผ่น

โดยที่แผงรับแสงอาทิตย์แบบแผ่นแบบที่แผ่นจุด เป็นแผ่นและท่อ (Plate and Tubes) เป็นแบบที่สร้างได้ง่าย ทนต่อความดันของของไหลทำงานซึ่งรายละเอียดจะได้นำมากล่าวโดยละเอียดในบทต่อไป ดังนั้นแผ่นจุดแสงอาทิตย์แบบแผ่นและท่อจึง เป็นแบบที่จะนำมาศึกษาและพัฒนาผิวซีเล็กตีฟขึ้นเพื่อใช้งาน ในแผ่นจุดแสงอาทิตย์แบบแผ่นและท่อ ของไหลทำงานไม่ได้สัมผัสโดยตรงกับแผ่นจุดแต่จะไหลในท่อซึ่ง เชื่อมอยู่กับแผ่นจุดแสงอาทิตย์ ดังนั้นการทนทานต่อการทำปฏิกิริยากับของไหลทำงานจึงไม่ใช่ตัวแปรที่สำคัญอีกต่อไป ดังนั้นแผ่นเหล็กโรสนิมซึ่งให้ค่าการนำความร้อนระดับเดียวกับ เหล็กแต่ราคาสูงกว่าเหล็กประมาณ 4 เท่าจึงจะไม่นำมาพิจารณาใช้งาน หนึ่งสำหรับโลหะอื่นคือทองแดงและอลูมิเนียมซึ่งมีค่าการนำความร้อนสูงกว่าเหล็กเป็น 8 เท่าและ 4.3 เท่าตามลำดับนั้น เมื่อนำมาใช้งานความหนาของวัสดุจะลดลงเป็น 8 และ 4.3 เท่าด้วย ทำให้ตัวแปรด้านราคาลดความสำคัญลงมาจากเดิม ดังนั้นวัสดุทั้งสามชนิดคือ เหล็กแผ่น อลูมิเนียม และทองแดงจึง เป็นวัสดุที่เลือกมาทำแผ่นจุดแสงอาทิตย์ซึ่งหมายถึงจะใช้เป็นชิ้นงาน เพื่อทำผิวให้เป็นซีเล็กตีฟ

### 3.2 ผิวซีเล็กตีฟหลายแบบ

ดังที่ได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อที่แล้วถึงโลหะ 3 ชนิดที่เลือกมาใช้ทำแผ่นจุดแสงอาทิตย์ ดังนั้นผิวซีเล็กตีฟที่เหมาะสมสำหรับโลหะทั้งสามคือ คอปเปอร์ออกไซด์ (Copper Oxide) นิเกิลดำ (Black Nickel) และแบล็คโครม (Black Chrome)

#### คอปเปอร์ออกไซด์

ชิ้นงานเฉพาะที่เป็นทองแดงและอลูมิเนียม เท่านั้นที่จะนำมาทำผิว เป็นคอปเปอร์ออกไซด์ได้ดี [4] ขบวนการทำคอปเปอร์ออกไซด์มีดังนี้

คอปเปอร์ออกไซด์บนชิ้นงานที่เป็นทองแดง สารละลายที่ใช้ประกอบด้วย น้ำกลั่น 1 litre โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) 100 gm. และโซเดียมไฮโปคลอไรด์ (Sodium Hypochloride,  $\text{NaClO}_2$ ) 50 gm. ในกรณีที่ต้องการสารละลายที่มากกว่านี้ให้เพิ่มตามอัตราส่วนที่กำหนดสำหรับน้ำ 1 litre ขึ้นไป นำสารทั้งสามมาใส่ในภาชนะรวมกัน คนให้สาร NaOH และ  $\text{NaClO}_2$  ละลายในน้ำให้หมดแล้วนำขึ้นอุ่นให้อุณหภูมิประมาณ  $90^\circ\text{C}$  เพื่อเร่งให้ออกซิเจนในสาร  $\text{NaClO}_2$  ให้แตกตัวออกมาทำปฏิกิริยากับทองแดง นำทองแดงแผ่นลงแช่ในสารละลาย โดยที่เวลาที่ใช้ต้มชิ้นงาน เป็นตัวแปรที่สำคัญเพราะถ้าใช้เวลามากจะได้ผิวดำมาก ขณะเดียวกันค่าการส่งออกรังสีความร้อนก็จะมากด้วย [4] ในการศึกษาที่ใช้เวลาเป็น 3, 5 และ 7 นาทีตามลำดับ นำชิ้นงานภายหลังการต้มในสารละลายแล้วไปทดสอบค่าการดูดแสงอาทิตย์และค่าการส่งออกรังสีความร้อนต่อไป

ในการต้มสารละลายต้องไม่ให้เดือด เพราะถ้าเดือดออกซิเจนส่วนเกินที่ได้จากสารละลายจะแยกตัวจากสารละลายด้วยอัตราสูง ทำให้สารละลาย มีอายุการใช้งานสั้น

คอปเปอร์ออกไซด์บนชิ้นงานอลูมิเนียม การทำผิวอลูมิเนียมแผ่นให้เป็นคอปเปอร์ออกไซด์แบ่งเป็นสองขั้นตอนคือทำ "อะโนไดซ์" ชิ้นงานเสียก่อนแล้วจึงนำชิ้นงานไปต้มในสารละลายและทำการอบต่อไป การทำอะโนไดซ์มีดังนี้ ใช้สารละลายที่ประกอบด้วยน้ำกลั่น 1 litre ซึ่งมีกรดซัลเฟอร์ริก 3% โดยปริมาตร กรดฟอสฟอริก(Phosphoric Acid) 3 %โดยปริมาตร ใช้แท่งคาร์บอนเป็นขั้วบวก และชิ้นงานเป็นขั้วลบ ใช้ความเข้มของกระแสไฟฟ้าเท่ากับ 6 mA/cm<sup>2</sup> และชุบชิ้นงานในสารละลายนาน 30 s แล้วล้างชิ้นงานด้วยน้ำสะอาด แล้วนำชิ้นงานลงต้มในสารละลายซึ่งประกอบด้วยน้ำกลั่น 1 litre, คอปเปอร์ไนเตรท (Copper Nitrate, Cu(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>·6H<sub>2</sub>O) 25 gm, กรดไนตริกเข้มข้น 3 cc, ด่างทับทิม(Potassium Permanganate) 15 gm. เวลาที่ใช้ต้มชิ้นงาน 10-20 min แล้วนำชิ้นงานที่ต้ม แล้วมาแขวนทิ้งไว้ในอากาศจนแห้ง แล้วจึงนำชิ้นงานเข้าอบในเตาอบที่อุณหภูมิประมาณ 400°C เป็นเวลาประมาณ 1 hr

ตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อขบวนการทำผิวคอปเปอร์ออกไซด์คือ ความเข้มของกระแสไฟฟ้าที่ทำอะโนไดซ์ชิ้นงาน, ระยะเวลาที่ใช้ต้มชิ้นงานในสารละลาย สำหรับการทดลองจะใช้กระแสไฟฟ้าในการทำอะโนไดซ์เท่ากับ 3, 6, และ 9 mA/cm<sup>2</sup> และระยะเวลาที่ใช้ต้มชิ้นงานในสารละลายเป็น 10, 15, และ 20 min ดังนั้นจำนวนชิ้นงานที่ใช้เท่ากับ 9 ชิ้น

#### นิเกิลดำ

สารละลายที่ใช้ทำนิเกิลดำประกอบด้วยส่วนผสมดังนี้ นิเกิลซัลเฟต (Nickel Sulphate) 100 gm, แอมโมเนียมซัลเฟต (Ammonium Sulphate) 15 gm, ซิงค์ซัลเฟต (Zinc Sulphate) 22 gm, โซเดียมไทโอไซยาเนต (Sodium Thiocyanate) 15 gm, น้ำกลั่นปริมาณที่ทำให้สารละลายสุดท้ายเท่ากับ 1 litre นำสารละลายไปวัดค่า pH โดยสารละลายต้องมีค่า pH อยู่ระหว่าง 5.5-6.0 อุณหภูมิของสารละลายต้องควบคุมให้อยู่ในช่วง 26°-32°C และความเข้มของกระแสไฟฟ้าที่ใช้ประมาณ 2 mA/cm<sup>2</sup>

ชิ้นงานที่ใช้ได้แก่ เหล็กและอลูมิเนียม ถ้าชิ้นงานที่เป็นเหล็กเมื่อทำความสะอาดผิวแล้ว นำมาชุบไฟฟ้าในสารละลายได้เลย แต่ถ้าชิ้นงานที่เป็นอลูมิเนียมขบวนการที่ใช้จะซับซ้อนกว่าเพราะต้องเพิ่มขบวนการของ VOGT[6] เสียก่อนเพื่อป้องกันไม่ให้ผิวอลูมิเนียมเป็นออกไซด์ แล้วชุบไฟฟ้าชิ้นงานด้วยนิเกิลขาวเสียก่อนจึงเริ่มขบวนการของนิเกิลดำได้ สำหรับงานวิจัยนี้มีจุดประสงค์ที่การศึกษาคุณสมบัติการดูดแสงอาทิตย์และการปล่อยรังสีความร้อนของผิวชิ้นงาน ดังนั้นจึงจะทำการทดลองทำนิเกิลดำบนชิ้นงานที่เป็นเหล็กเท่านั้น

ตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อขบวนการทำนิเกิลดำได้แก่ เวลาที่ใช้ ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าที่ใช้ สำหรับการทดลองที่ทำการศึกษาค้นคว้าจะใช้เวลาในการชุบไฟฟ้าของชิ้นงานเป็น 10, 15, และ 20 min ตามลำดับ และกระแสไฟฟ้าที่ใช้คือ 3.75, 5, และ 6.25 mA/cm<sup>2</sup> ตามลำดับ จำนวนชิ้นงานที่ใช้ 9 ชิ้น

### แบล็คโครม

ผิวแบล็คโครมได้จากการชุบด้วยไฟฟ้าของชิ้นงานในสารละลายโครมิกแอซิด(Chromic Acid)โดยใช้กระแสไฟฟ้าประมาณ  $220 \text{ mA/cm}^2$  ในทางปฏิบัติผิวที่ได้จะไม่สม่ำเสมอ ทำให้ชิ้นงานดูไม่สวยงาม ในการชุบแบล็คโครมทางด้านการค้านั้นจะเติมสารเพิ่ม(Additive Agent) เข้าไปในสารละลายของโครมิกแอซิดเพื่อเพิ่มสมรรถนะการจับของโครมิกแอซิดบนชิ้นงาน ชนิดและปริมาณของสารเพิ่มจะไม่มี การเปิดเผยถือว่าเป็นความลับในเชิงการค้า แต่อาจซื้อได้จากบริษัทผู้ผลิต เพื่อลดภาระในการหาสารมาเพิ่มในขบวนการผลิตแบล็คโครมผู้วิจัยจึงได้ติดต่อซื้อสารเพิ่มดังกล่าวข้างต้นจากบริษัท ฮาร์ชอ(Harshaw) (Harshaw Chemicals Limited, P.O. Box 4, Daventry, Northamptonshire, England) ชื่อทางการค้าของสารเคมีสำเร็จรูปดังกล่าวคือ CHROMONYX รายละเอียดพอสังเขปของขบวนการที่ใช้ทำแบล็คโครมมีดังนี้ ใช้โครมิกแอซิด 54 oz/gal. สารเพิ่ม(Additive Agent) CHROMONYX 27% โดยปริมาตร อุณหภูมิของสารละลาย  $24^{\circ}\text{C}$  ความเข้มของกระแสไฟฟ้า 200 ASF เวลาที่ใช้ 5 min ใช้คาร์บอนสตีลเป็นขั้วบวก และใช้อัตราส่วนของพื้นที่ขั้วบวกต่อพื้นที่ของขั้วลบเป็น 2.5 ต่อ 1

ชิ้นงานเป็นเหล็ก อลูมิเนียม และทองแดงนำมาทำผิวให้เป็นแบล็คโครมได้ ชิ้นงานที่เป็นเหล็กนำมาชุบไฟฟ้าในสารละลายแบล็คโครมได้โดยตรง แต่ถ้าเป็นชิ้นงานอลูมิเนียมแล้วการชุบไฟฟ้าในสารละลายดังกล่าวโดยตรงจะไม่ได้ผล เพราะผิวของอลูมิเนียม เป็นออกไซด์ที่ง่ายและออกไซด์ที่เกิดขึ้นจะจับกับสารที่วิ่งมาเกาะชิ้นงาน ทำให้เนื้อของอลูมิเนียมไม่จับกับสารแบล็คโครมที่วิ่งมาเกาะ วิธีแก้ไขทำได้โดยนำชิ้นงานอลูมิเนียมไปทำผิวให้เป็นกลางเสียก่อนโดยใช้วิธีของ VOGT[5] แล้วใช้ขบวนการชุบไฟฟ้าเคลือบผิวชิ้นงานด้วยนิเกิลขาว(Bright Nickle) แล้วจึงเริ่มขบวนการทำผิวแบล็คโครม โดยวิธีที่กล่าวนี้จะได้ชิ้นงานที่มีผิวแบล็คโครมสม่ำเสมอ

ในการทดลองจะใช้ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าเป็น  $0.125 \text{ amp/cm}^2$ ,  $0.187 \text{ amp/cm}^2$  และ  $0.250 \text{ amp/cm}^2$  ตามลำดับ ดังที่กล่าวมาแล้วว่าขบวนการทำแบล็คโครมต้องใช้ความเข้มของกระแสไฟฟ้าสูงมาก จึงได้มีการทดลองใช้ความเข้มของกระแสไฟฟ้าลดลงเพื่อการหาจุดทางลดต้นทุนการผลิตผิวแบล็คโครมดังกล่าวลง ดังนั้นเวลาที่ใช้ในขบวนการในการทดลองจึงใช้เพิ่มจากที่ทางบริษัทผู้ผลิตสารเคมีสำเร็จแนะนำ เวลาที่ใช้ในการทดลองคือ 9, 12, และ 15 min ตามลำดับสำหรับชิ้นงานที่เป็นเหล็ก และสำหรับชิ้นงานที่เป็นอลูมิเนียมจะใช้ความเข้มของกระแสไฟฟ้าเป็น  $0.187 \text{ amp/cm}^2$ ,  $0.218 \text{ amp/cm}^2$  และ  $0.25 \text{ amp/cm}^2$  และเวลาที่ใช้เป็น 6, 7 และ 8 min ตามลำดับ

### 3.3 การเตรียมชิ้นงานก่อนการชุบ

ชิ้นงานที่เตรียมมีขนาดเท่าขนาดของอีพลิปส์มิเตอร์ ก่อนนำชิ้นงานไปชุบต้องทำความสะอาดเสียก่อน การ

ทำความสะอาดชิ้นงาน เป็นสิ่งจำเป็นมากในการชุบ ถ้าหากว่าชิ้นงานไม่ได้ผ่านการทำความสะอาดที่ถูกต้อง แล้วอาจทำให้ผลการชุบออกมาได้ผลไม่ดีเท่าที่ควร การทำความสะอาดชิ้นงาน เพื่อให้ผิวสะอาดเหมาะกับการชุบคือการกำจัดไขมัน น้ำมัน และรอยเปราะเปื้อนอื่นๆที่ติดมากับชิ้นงาน เพราะกรรมวิธีในการผลิต เช่น การกลึง การบีม ถ้าชิ้นงานไม่เป็นสนิม ให้นำชิ้นงานลงต้มในน้ำด่างร้อน (Soak Clean) แต่ถ้าชิ้นงานเป็นเหล็กและ เป็นสนิมต้องขัดสนิมออกเสียก่อน หรือโดยใช้กรดกำมะถันกัดสนิมออก รายละเอียดของแต่ละวิธีมีดังนี้

น้ำด่างร้อน สารละลายของด่างประกอบด้วย โซเดียมไฮดรอกไซด์ 15 gm/litre, โตรโซ-เดียมฟอสเฟต 25 gm/litre, โซเดียมคาร์บอเนต 25 gm/litre, โซเดียมเมตาซิลิเกต 8 gm/litre, นำสารละลายของด่างใส่ภาชนะเช่น แก้วหรืออะลูมิเนียม อุ่นน้ำยาให้อุณหภูมิประมาณ 60-70°C แล้วนำชิ้นงานลงจุ่มและแกว่งไปมา แล้วนำชิ้นมาล้างด้วยน้ำสะอาด

การล้างชิ้นงานด้วยกรด ถ้าชิ้นงานเป็นสนิมบางๆ ให้ใช้น้ำยาซึ่งมีส่วนผสมต่อไปนี้กัดชิ้นของสนิมออกเสียก่อน น้ำยาประกอบด้วย กรดกำมะถัน (ถ.พ. 1.84) 35 cc, เติมน้ำให้ได้ปริมาตร 1 litre, ชิ้นงานอื่นนอกจากเหล็ก เช่น ทองแดงหรือนิกเกิลก็อาจใช้สารละลายนี้ล้างก่อนการชุบได้เช่นเดียวกัน

การกัดด้วยกรดเกลือ ถ้าชิ้นงานเป็นสนิมมาก ให้ใช้สารละลายที่ประกอบด้วยกรดเกลือเข้มข้น 1 ส่วน และน้ำ 5 ส่วน โดยปริมาตรผสมกัน แล้วนำชิ้นงานลงแช่ แล้วนำชิ้นมาล้างด้วยน้ำสะอาด

หลังจากที่ทำความสะอาดชิ้นงานตามวิธีดังกล่าวแล้วจึงเริ่มขบวนการชุบตามรายละเอียดที่กล่าวในหัวข้อที่แล้ว

### 3.4 ผลการวัดค่าการดูดแสงอาทิตย์ และการส่งออกรังสีความร้อน

นำชิ้นงานที่ผ่านขบวนการทำผิวซีเล็กตีฟแล้วไปวัดค่าการดูดแสงอาทิตย์ และการส่งออกรังสีความร้อนด้วยเครื่องมือที่สร้างขึ้นตามรายละเอียดในบทที่ 2 เพื่อเป็นการเปรียบเทียบยังได้นำชิ้นงานไปวัดค่าการดูดแสงอาทิตย์  $\alpha$  และการส่งออกรังสีความร้อน  $\epsilon$  โดยใช้เครื่อง UV-Visible Spectrometer, model DMS 80, Verion Techtron Pty, Limited, Australia และ Infrared Reflectometer, model DB 100, Dynatech Instruments, Inc. U.S.A ที่คณะวัสดุและพลังงาน สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า ธนบุรี ค่าการดูดแสงอาทิตย์ที่ได้จาก UV-Visible Spectrometer เป็นค่าการดูดแสงอาทิตย์แบบเอกรงค์ (Monochromatic Absorptivity)  $\alpha_\lambda$  ในช่วงความยาวคลื่น 0.3-0.85  $\mu\text{m}$  จึงต้องเปลี่ยนเป็นค่าการดูดแสงอาทิตย์แบบทั้งหมด  $\alpha$  เช่นเดียวกับค่าที่ได้จากวัดโดยใช้เครื่องมือที่สร้างขึ้นเพื่อจะได้ทำการเปรียบเทียบค่ากันได้ รายละเอียดของการคำนวณ  $\alpha$  จาก  $\alpha_\lambda$  ได้แสดงในภาคผนวก ข

ตารางที่ 3.2 แสดงค่าการดูดแสงอาทิตย์ และการส่งออกรังสีความร้อนของชิ้นงานทองแดงซึ่งมีผิวเป็นคอปเปอร์ออกไซด์ โดยการสังเกตจากการทดลองต้มชิ้นงานที่เวลาต่างกันพบว่า ถ้าเวลาที่ใช้ต้มชิ้นงาน

## ตารางที่ 3.2

ตารางแสดงค่าการดูดแสงอาทิตย์ และการส่งออกรังสีความร้อน ของ  
ชิ้นงานเป็นทองแดง ผิวเป็นคอปเปอร์ออกไซด์

เวลาที่ใช้, min	ค่าการดูดแสงอาทิตย์		ค่าการส่งออกรังสี ความร้อน		$\alpha/\epsilon$
	$\epsilon$	$\epsilon^*$	$\alpha$	$\alpha^*$	
3	0.052	0.102	0.936	0.940	18.00
5	0.098	0.153	0.938	0.950	9.57

\*  $\epsilon$ ,  $\epsilon$  = ค่าการส่งออกรังสีความร้อนวัดโดยใช้เครื่องมือที่สร้างขึ้น และโดยใช้ Infrared Reflec-  
tometer

\*  $\alpha$ ,  $\alpha$  = ค่าการดูดแสงอาทิตย์วัดโดยใช้เครื่องมือที่สร้างขึ้น และโดยใช้ UV-Visible Spectro-  
meter

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ต่ำกว่า 3 นาทีแล้วผิวของชิ้นงานจะยังไม่ดำ และถ้าเวลาที่ใช้ต้มชิ้นงานสูงกว่า 3 นาทีแล้วผิวของชิ้นงานจะไม่ดำขึ้นถ้าสังเกตด้วยตาเปล่า แต่จากการทดลองวัดค่าพบว่า เมื่อเพิ่ม เวลาที่ใช้ต้มชิ้นงานนานขึ้น ค่าการดูดแสงอาทิตย์จะเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยแต่ค่าการส่งออกรังสีความร้อนจะเพิ่มขึ้นมาก ดังนั้นจึงอาจถือว่าเวลาที่เหมาะสมคือ 3 นาทีซึ่งให้ค่า  $\alpha/\epsilon$  เท่ากับ 9.57

ตารางที่ 3.3 แสดงผลการทดลองเมื่อชิ้นงานเป็นอลูมิเนียมและผิวเป็นคอปเปอร์ออกไซด์ จากการพิจารณาคุณภาพทางด้านความคงทนของชิ้นงานพบว่า ผิวคอปเปอร์ออกไซด์ที่ได้ไม่ดี ถูออกได้ง่าย แม้ว่าจะวัดค่าการดูดแสงอาทิตย์และการส่งออกรังสีความร้อนแล้วพบว่าชิ้นงานที่ใช้เวลาดำในสารละลายจะให้ค่า  $\alpha/\epsilon$  เฉลี่ยประมาณ 2.65 ซึ่งแสดงว่ามีคุณสมบัติเป็นซีเล็คทีฟก็ตาม ก็ไม่เหมาะสมจะนำมาใช้เป็นผิวของแผ่นดูดแสงอาทิตย์ การทดลองวัดค่าการดูดแสงอาทิตย์ของชิ้นงานที่เหลือจึงไม่ได้ทำต่อไป

ตารางที่ 3.4 แสดงผลการทดลองเมื่อชิ้นงานเป็นเหล็ก รองพื้นด้วยนิเกิลขาวและผิวเป็นนิเกิลดำ สำหรับช่วงของ เวลาและกระแสไฟฟ้าที่ใช้ชุบชิ้นงานในการทดลองพบว่า เวลาและกระแสไฟฟ้าที่เหมาะสมคือ 10 นาที และ  $3.75 \text{ mA/cm}^2$  ตามลำดับซึ่งให้ค่า  $\alpha/\epsilon$  เท่ากับ 5.10 จากการพิจารณาผิวของชิ้นงานพบว่าถ้าลดเวลาที่ใช้ชุบและกระแสไฟฟ้าที่ใช้ลงกว่านี้แล้ว นิเกิลดำจับผิวชิ้นงานไม่สม่ำเสมอ และถ้าเพิ่มเวลาและกระแสไฟฟ้าต่อไปผิวที่ได้จะมีสีดำขึ้น และเมื่อทำการวัดค่าการส่งออกรังสีความร้อนพบว่ามีค่าเพิ่มขึ้นมาก ในขณะที่ค่าการดูดแสงอาทิตย์เพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย ดังนั้นจึงอาจถือว่าเวลาที่ชุบและกระแสไฟฟ้าตามที่กล่าวข้างต้น เป็นค่าที่เหมาะสม

ตารางที่ 3.5 และ 3.6 แสดงผลการทดลองเมื่อชิ้นงานเป็นเหล็กและอลูมิเนียม รองพื้นด้วยนิเกิลขาวและผิวเป็นแบล็คโครม จากการพิจารณาผิวของชิ้นงานที่ได้พบว่า เมื่อชิ้นงานเป็นเหล็กเวลาและกระแสไฟฟ้าต่ำสุดที่ควรใช้คือ 9 นาทีและ  $0.125 \text{ A/cm}^2$  และถ้าชิ้นงานเป็นอลูมิเนียม เวลาและกระแสไฟฟ้าต่ำสุดที่ควรใช้คือ 6 นาทีและ  $0.187 \text{ A/cm}^2$  ตามลำดับ ถ้าเวลาและกระแสไฟฟ้าสูงไปกว่านี้พบว่าทั้งค่าการดูดแสงอาทิตย์และค่าการส่งออกรังสีความร้อนจะเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยในทิศทางเพิ่มขึ้น แต่เมื่อพิจารณาจากค่า  $\alpha/\epsilon$  แล้วจะมีค่าเกือบคงที่ ดังนั้นเมื่อนำค่าใช้จ่ายของขบวนการมาประกอบการพิจารณาแล้วเห็นว่าควรใช้ เวลาและกระแสไฟฟ้าต่ำสุดดังที่กล่าวข้างบน

โดยการเปรียบเทียบค่าการดูดแสงอาทิตย์และค่าการส่งออกรังสีความร้อนที่ได้จากการใช้เครื่องมือที่สร้างขึ้นกับค่าที่ได้เมื่อใช้เครื่อง Spectrometer และ Reflectometer โดยถือว่าค่าที่ได้จากเครื่องมือคู่หลังเป็นค่าที่ถูกต้องแล้ว ค่าการดูดแสงอาทิตย์จะแตกต่างกันประมาณ 0.015 ส่วนค่าการส่งออกรังสีความร้อนจะแตกต่างกันประมาณ 0.0416 ความผิดพลาดระดับนี้จะยอมรับได้ถ้านำชิ้นงานไปใช้ทำแผ่นดูดของแผงรับแสงอาทิตย์ แต่ถ้านำไปใช้กับงานบางประเภทที่ต้องการความถูกต้องสูงไปกว่านี้ เช่นการวิจัยเฉพาะ เรื่องผิวซีเล็คทีฟ เช่นการหาค่าออฟติมิซึมของค่าการดูดแสงอาทิตย์และค่าการส่งออกรังสีความร้อนของผิวซีเล็คทีฟแต่ละชนิด เป็นต้นจะใช้ไม่ได้

ตารางที่ 3.3

ตารางแสดงค่าการดูดแสงอาทิตย์และการส่งออกรังสีความร้อนของชิ้นงานอลูมิเนียม สีว เป็นคัลป์ เพอร์ออกไซด์

เวลาที่ใช้ min	กระแสไฟฟ้าที่ใช้ทำ อะโนดซ์ ชิ้นงาน mA/cm <sup>2</sup>														
	3					6					9				
	$\epsilon$	$\epsilon^*$	$\alpha$	$\alpha^*$	$\alpha/\epsilon$	$\epsilon$	$\epsilon^*$	$\alpha$	$\alpha^*$	$\alpha/\epsilon$	$\epsilon$	$\epsilon^*$	$\alpha$	$\alpha^*$	$\alpha/\epsilon$
10	.741	-	-	-	-	.621	-	-	-	-	-	-	-	-	-
15	.579	-	-	-	-	.426	-	-	-	-	-	-	-	-	
20	.487	.505	.905	.880	1.85	.270	.286	.902	.890	3.34	.330	.340	.903	.900	2.74

$\epsilon^*$   $\epsilon$  = ค่าการส่งออกรังสีความร้อนวัดโดยใช้เครื่องมือที่สร้างขึ้น และโดยใช้ Infrared Reflectometer ตามลำดับ  
 $\alpha^*$   $\alpha$  = ค่าการดูดแสงอาทิตย์วัดโดยใช้เครื่องมือที่สร้างขึ้น และโดยใช้ UV-Visible Spectrometer ตามลำดับ  
 - = ไม่ได้ทำการวัด

สถาบันวิทยบริการ  
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 3.4

ตารางแสดงค่าการดูดแสงอาทิตย์และการส่งออกรังสีความร้อนของชิ้นงานเหล็ก นิกเกิล เป็นร่องพื้น และผิวเป็นนิกเกิลดำ

เวลาที่ใช้ min	กระแสไฟฟ้า mA/cm <sup>2</sup>														
	3.75					5					6.25				
	$\epsilon$	$\epsilon^*$	$\alpha$	$\alpha^*$	$\alpha/\epsilon$	$\epsilon$	$\epsilon^*$	$\alpha$	$\alpha^*$	$\alpha/\epsilon$	$\epsilon$	$\epsilon^*$	$\alpha$	$\alpha^*$	$\alpha/\epsilon$
10	.188	.260	.942	.930	5.01	.394	.441	.958	.943	2.43	.625	.572	.962	.950	1.54
15	.404	.434	.954	.945	2.36	.491	.493	.962	.949	1.95	.710	.681	.959	.943	1.35
20	.503	.404	.961	.952	1.91	.675	.541	.958	.945	1.42	.756	.650	.950	.935	1.26

$\epsilon^*$ ,  $\epsilon$  = ค่าการส่งออกรังสีความร้อนวัดโดยใช้เครื่องมือที่สร้างขึ้น และโดยใช้ Infrared Reflectometer ตามลำดับ  
 $\alpha^*$ ,  $\alpha$  = ค่าการดูดแสงอาทิตย์วัดโดยใช้เครื่องมือที่สร้างขึ้น และโดยใช้ UV-Visible Spectrometer ตามลำดับ

ตารางที่ 3.5

ตารางแสดงค่าการดูดแสงอาทิตย์และการส่งออกรังสีความร้อนของชิ้นงานเหล็ก นิกเกิลรองพื้น สีว เป็นแบล็คโครม

เวลาที่ใช้ min	กระแสไฟฟ้า A/cm <sup>2</sup>														
	0.125					0.187					0.250				
	$\epsilon$	$\epsilon^*$	$\alpha$	$\alpha^*$	$\alpha/\epsilon$	$\epsilon$	$\epsilon^*$	$\alpha$	$\alpha^*$	$\alpha/\epsilon$	$\epsilon$	$\epsilon^*$	$\alpha$	$\alpha^*$	$\alpha/\epsilon$
9	.118	.136	.910	.890	7.63	.159	.081	.918	.905	5.77	.140	.135	.935	.921	6.68
12	.125	.097	.939	.925	7.51	.127	.160	.943	.931	7.42	.140	.120	.935	.918	6.68
15	.112	.134	.923	.921	8.24	.154	.110	.923	.909	5.99	.159	.140	.933	.915	5.87

$\epsilon^*, \epsilon$  = ค่าการส่งออกรังสีความร้อนวัดโดยใช้เครื่องมือที่สร้างขึ้น และโดยใช้ Infrared Reflectometer ตามลำดับ  
 $\alpha^*, \alpha$  = ค่าการดูดแสงอาทิตย์วัดโดยใช้เครื่องมือที่สร้างขึ้น และโดยใช้ UV-Visible Spectrometer ตามลำดับ

สถาบันวิทยบริการ  
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 3.6

ตารางแสดงค่าการดูดแสงอาทิตย์ และการส่งออกรังสีความร้อนของชิ้นงานอลูมิเนียม นิกเกิล เป็นร่องพื้น ผิวนเป็นแบล็คโครม

เวลาที่ใช้ min	กระแสไฟฟ้า A/cm <sup>2</sup>														
	0.187					0.218					0.25				
	$\epsilon$	$\epsilon^*$	$\alpha$	$\alpha^*$	$\alpha/\epsilon$	$\epsilon$	$\epsilon^*$	$\alpha$	$\alpha^*$	$\alpha/\epsilon$	$\epsilon$	$\epsilon^*$	$\alpha$	$\alpha^*$	$\alpha/\epsilon$
6	.124	.109	.947	.930	7.64	.127	.099	.944	.927	7.43	.159	.077	.948	.921	5.96
7	.112	.116	.942	.925	8.41	.118	.150	.950	.930	8.05	.141	.179	.949	.927	6.73
8	.125	.117	.941	.925	7.53	.154	.073	.956	.931	6.21	.140	.084	.950	.930	6.78

\*  $\epsilon$ ,  $\epsilon^*$  = ค่าการส่งออกรังสีความร้อนวัดโดยใช้เครื่องมือที่สร้างขึ้น และโดยใช้ Infrared Reflectometer ตามลำดับ  
 $\alpha^*$ ,  $\alpha$  = ค่าการดูดแสงอาทิตย์วัดโดยใช้เครื่องมือที่สร้างขึ้น และโดยใช้ UV-Visible Spectrometer ตามลำดับ

สถาบันวิทยบริการ  
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

### 3.5 การพิจารณาผิวซีเล็กตีฟไปใช้งาน

โดยพิจารณาจากผลการทดลองวัดค่าการดูดแสงอาทิตย์และการส่งออกรังสีความร้อนในหัวข้อที่ผ่านมาอาจสรุปผลการเลือกผิวซีเล็กตีฟเพื่อไปใช้งานได้ดังนี้

ผิวซีเล็กตีฟแบบคัปเปอร์ออกไซด์จะเหมาะสมสำหรับชิ้นงานที่เป็นทองแดงเท่านั้น ขบวนการทำผิวชนิดนี้ทำง่าย ให้ค่าของอัตราส่วนการดูดแสงอาทิตย์ต่อการส่งออกรังสีความร้อนสูง เช่น เมื่อใช้เวลาต้มชิ้นงานในสารละลายที่เตรียมขึ้น 3 นาที จะได้ผิวคัปเปอร์ออกไซด์ซึ่งให้ค่า  $\alpha/\epsilon$  ประมาณ 18 ซึ่งสูงกว่าผิวซีเล็กตีฟชนิดอื่นทั้งหมด ชิ้นงานอลูมิเนียมนำมาทำผิวคัปเปอร์ออกไซด์ได้แต่จะไม่มีคุณภาพ เพราะเพียงการถูผิวคัปเปอร์ออกไซด์ที่จับอยู่บนชิ้นงานก็จะลบบอก ดังนั้นจึงไม่อาจนำผิวชนิดนี้ไปใช้ได้ทางปฏิบัติ

ผิวซีเล็กตีฟแบบนิเกิลดำจะเหมาะสมสำหรับชิ้นงานที่เป็นเหล็กและอลูมิเนียม ถ้าชิ้นงานเป็นเหล็กให้รองพื้นด้วยนิเกิลขาวเสียก่อนแล้วจึงมาทำผิวเป็นนิเกิลดำ การนำชิ้นงานเหล็กมาทำผิวเป็นนิเกิลดำโดยตรงจะทำได้ยาก นิเกิลดำจะเกาะที่ชิ้นงานไม่สม่ำเสมอ และถ้าเหล็กเป็นสนิมก็จะทำให้ผิวนิเกิลดำเสียไปด้วย สำหรับชิ้นงานอลูมิเนียมต้องเพิ่มขบวนการรองพื้นด้วยสังกะสีเสียก่อน แล้วทับด้วยนิเกิลขาวและนิเกิลดำตามลำดับก็จะให้ผิวนิเกิลดำที่ดี เช่นเดียวกัน จากผลจากการทดลองพบว่า เวลาที่ใช้ชุบและความเข้มข้นของกระแสไฟฟ้าที่เหมาะสมคือ 10 นาที และ  $3.75 \text{ mA/cm}^2$  ตามลำดับ ถ้าเวลาหรือกระแสไฟฟ้ามากเกินไปกว่านี้พบว่า การจับของนิเกิลดำบนชิ้นงานจะไม่สม่ำเสมอ หรือถ้าใช้เวลาและกระแสไฟฟ้ามากเกินไปกว่านี้ ชิ้นงานที่ได้จะให้ค่า  $\alpha/\epsilon$  ต่ำไป เพราะค่าการดูดรังสีความร้อนจะไม่เพิ่มแต่ค่าการส่งออกรังสีความร้อนเพิ่ม สำหรับในประเทศไทยมีโรงงานที่ชุบนิเกิลดำอยู่หลายแห่ง การผลิตแผงรับแสงอาทิตย์ซึ่งมีปริมาณไม่สูงระดับที่จะนำชิ้นงานมาชุบเอง ดังนั้นโดยการอาศัยโรงงานชุบที่มีอยู่ก็จะทำให้สามารถผลิตแผ่นดูดแสงอาทิตย์ผิวซีเล็กตีฟแบบนิเกิลดำขึ้นได้

ผิวซีเล็กตีฟแบบแบล็คโครมจะใช้ได้กับชิ้นงานชนิดใดก็ได้แต่ขบวนการจะแตกต่างกัน สำหรับการศึกษานี้ใช้ชิ้นงานอยู่สองชนิดคือ เหล็กและอลูมิเนียมซึ่งพบว่าให้ผิวแบล็คโครมที่ระดับเดียวกัน ขบวนการของแบล็คโครมจะใช้ค่าใช้จ่ายสูง โรงงานชุบผิวแบบนี้ในประเทศไทยยังไม่มี ถ้าจะใช้ผิวแบบนี้สำหรับแผ่นดูดแสงอาทิตย์ก็ต้องทำการชุบเองซึ่งต้องเสียค่าใช้จ่ายมาก เว้นเสียแต่ว่าจะมีอัตราการผลิตสูงถึงจะเป็นไปได้ในทางการค้า คุณสมบัติที่ดีมากประการหนึ่งคือแม้จะเปลี่ยนระดับความเข้มข้นของกระแสไฟฟ้าที่ใช้และเวลาชุบไปก็ตาม ค่าการส่งออกรังสีความร้อนจะอยู่ในช่วง 0.112 ถึง 0.159 เท่านั้นส่วนค่าการดูดแสงอาทิตย์จะอยู่ในระดับ 0.9 ขึ้นไป สำหรับการทดลองที่ทำการศึกษาพบว่า เวลาชุบที่เหมาะสมคือ 7 นาทีและกระแสไฟฟ้าที่ใช้คือ  $0.187 \text{ A/cm}^2$  ซึ่งให้อัตราส่วนของค่าการดูดแสงอาทิตย์ต่อค่าการส่งออกรังสีความร้อนเท่ากับ 3.41

อนึ่งการที่จะบอกได้แน่ชัดว่าผิวซีเล็กตีฟแบบใดเหมาะสมต่อแผงรับแสงอาทิตย์ที่ผลิตในเชิงการค้า จะต้องต้องมีข้อมูลอื่นมาประกอบการพิจารณาด้วย เช่น อัตราการผลิต ราคาขายของแผง อัตราดอกเบี้ยเงินกู้ เงินลงทุน เป็นต้นถึงจะสามารถบอกได้แน่ชัดว่าผิวชนิดไหนเหมาะสมซึ่งการพิจารณาดังกล่าวอยู่นอกเหนือจากการศึกษาของงานวิจัยนี้

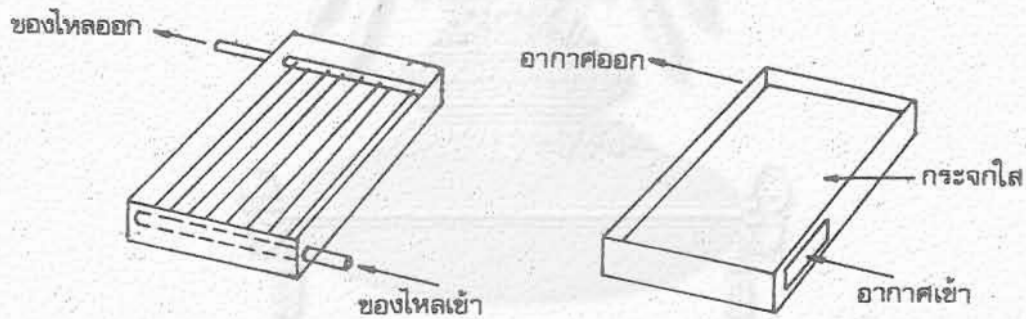
## บทที่ 4

### การใช้วัสดุผิวซีเล็กตีฟทำแผงรับแสงอาทิตย์

#### 4.1 แผงรับแสงอาทิตย์

##### รูปร่างทั่วไป

ลักษณะทั่วไปภายนอกของแผงรับแสงอาทิตย์แบบแผ่น (A Flat Plate Solar Collector) เป็นกล่องสี่เหลี่ยมตามที่ได้แสดงในรูปที่ 4.1 ภายในมีแผ่นดูดแสงอาทิตย์ซึ่งทำหน้าที่รับแสงอาทิตย์แล้วเปลี่ยนให้เป็นพลังงานความร้อนแล้วถ่ายเทให้ของไหลทำงานซึ่งไหลผ่านแผ่นดูดแสงอาทิตย์ ของไหลทำงานเมื่อไหลผ่านแผ่นดูดแสงอาทิตย์จะมีอุณหภูมิสูงขึ้นซึ่งจะถูกนำไปใช้ประโยชน์ต่อไป ด้านล่างและด้านข้างของกล่องบุไว้ด้วยฉนวนเพื่อกั้นความร้อนซึ่งถ่ายเทโดยการนำสู่ภายนอก ด้านบนของกล่องเป็นกระจกใสเพื่อรับแสงอาทิตย์ที่ตกลงบนด้านบนของแผงรับแสงอาทิตย์ขณะเดียวกันก็ป้องกันไม่ให้พลังงานความร้อนจากแผ่นดูดแสงอาทิตย์ถ่ายเทโดยการแผ่รังสีออกสู่ภายนอก

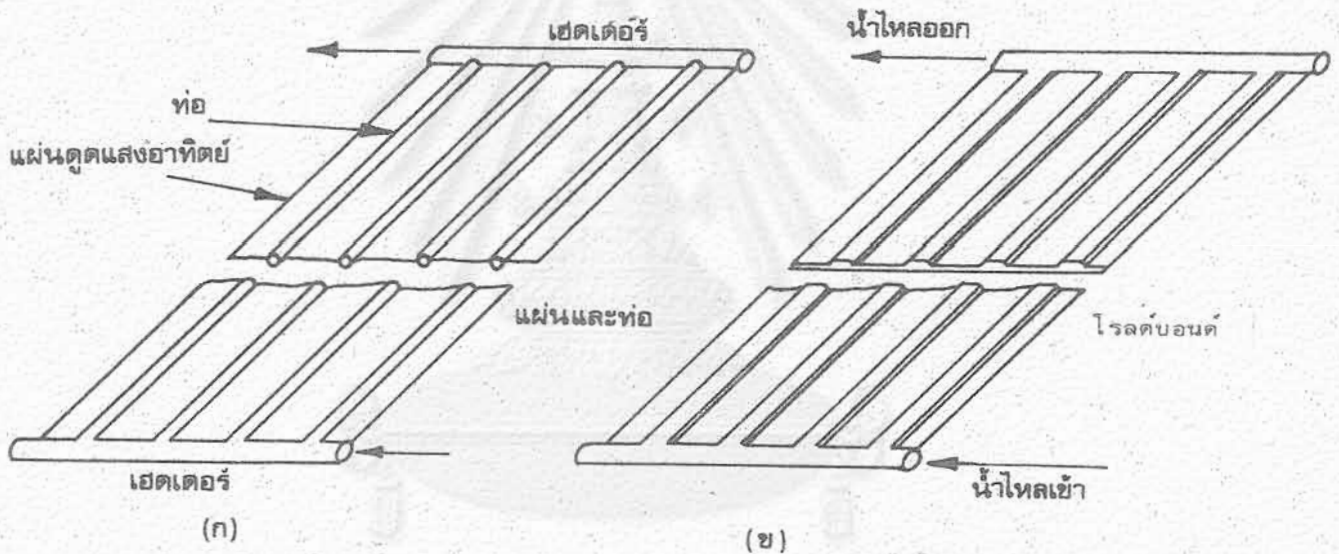


รูปที่ 4.1 แผงรับแสงอาทิตย์แบบแผ่น

ของไหลทำงานที่ใช้ในแผงรับแสงอาทิตย์มีสองประเภทคือ ของเหลว เช่นน้ำและแก๊ส เช่นอากาศ สำหรับประเทศไทยแผงรับแสงอาทิตย์ประเภทที่ของไหลทำงานเป็นน้ำมีใช้อยู่แพร่หลาย เช่นใช้ทำน้ำร้อนสำหรับที่อยู่อาศัย โรงแรม และโรงงานอุตสาหกรรมประเภทที่ใช้น้ำร้อนเป็นดิน ส่วนแผงรับแสงอาทิตย์ประเภทที่ใช้อากาศเป็นของไหลทำงานซึ่งใช้ผลิตอากาศร้อนสำหรับการอบแห้ง เช่นการอบแห้งผลผลิตทางการเกษตร เป็นต้นแต่ยังไม่แพร่หลาย ดังนั้นการศึกษาการนำวัสดุผิวซีเล็กตีฟไปใช้ทำแผ่นดูดแผงรับแสงอาทิตย์จึงศึกษาเฉพาะการนำไปใช้กับแผงรับแสงอาทิตย์ประเภทที่ใช้น้ำเป็นของไหลทำงานเท่านั้น

แผ่นดูดแสงอาทิตย์ที่ใช้ของไหลทำงานเป็นของเหลวแบ่งออกเป็นสองแบบคือ แบบแผ่นและท่อ (Plate and Tubes) และแบบโรลล์-บอนด์ (Rolled Bond) ตามที่ได้แสดงในรูปที่ 4.2 แผ่นดูดแสงอาทิตย์แบบ

แผ่นและท่อ เหมาะสำหรับระบบซึ่งมีความดันของของไหลทำงานที่ไหลผ่านแผงรับแสงอาทิตย์สูงกว่า 1 บรรยากาศขึ้นไป การทำแผ่นดูดแบบแผ่นและท่อทำได้ง่ายกว่าแบบโรลด์-บอนด์ ข้อดีของแผ่นดูดแสงอาทิตย์แบบโรลด์บอนด์คือสมรรถนะในการถ่ายเทความร้อนระหว่างฟิน (Fin) กับของไหลในท่อจะสูงกว่าแบบแผ่นและท่อ ส่วนข้อที่ไม่ดีของแผ่นดูดแสงอาทิตย์แบบโรลด์บอนด์ก็คือจะนำไปใช้กับระบบที่มีความดันภายในต่ำกว่าแผ่นและท่อ ทางด้านราคา ถ้าอัตราการผลิตแผงรับแสงอาทิตย์สูงกว่า 12,000 ตารางเมตรต่อปี [7] แล้วราคาแผ่นดูดแสงอาทิตย์แบบโรลด์บอนด์จะลดลงต่ำกว่าแบบแผ่นและท่อ จากคุณสมบัติดังกล่าวแผ่นดูดแบบแผ่นและท่อจึงเหมาะสำหรับผู้ผลิตแผงรับแสงอาทิตย์ภายในประเทศ เพราะตลาดของแผงรับแสงอาทิตย์ยังมีขนาดเล็ก และรูปแบบการใช้ของแผงรับแสงอาทิตย์มักจะเป็นแบบที่น้ำซึ่งมีความดันสูงไหลผ่านโดยตรงเข้าแผงรับแสงอาทิตย์ การศึกษาที่จะทำต่อไปจะกล่าวถึงแต่แผ่นดูดแสงอาทิตย์แบบแผ่นและท่อ เท่านั้น



รูปที่ 4.2 แผ่นดูดแสงอาทิตย์สองแบบ (ก) แบบแผ่นและท่อ (ข) แบบโรลด์-บอนด์

#### 4.2 ทฤษฎีของแผงรับแสงอาทิตย์

##### สมการทั่วไป

สมการของพลังงานใช้ประโยชน์ (Rate of Useful Energy) และสมการของประสิทธิภาพเชิงความร้อน (Thermal Efficiency) ของแผงรับแสงอาทิตย์คือ

$$Q_u = F_R A [I(\tau\alpha) - U_L(T_i - T_a)] \quad (4.1)$$

$$\eta = \int \frac{Q_u}{A} d\theta / \int I d\theta \quad (4.2)$$

เมื่อ  $Q_u$  = อัตราพลังงานที่นำไปใช้ประโยชน์

$\eta$  = ประสิทธิภาพเชิงความร้อน



- $A$  = พื้นที่รับแสงอาทิตย์  
 $I$  = อัตราพลังงานแสงอาทิตย์ตกบนแผงรับแสงอาทิตย์  
 $\tau$  = ค่าการผ่านทะลุของแสงอาทิตย์ของกระจก  
 $\alpha$  = ค่าการดูดแสงอาทิตย์ของแผ่นดูดแสงอาทิตย์  
 $U_L$  = สัมประสิทธิ์การสูญเสียความร้อนทั้งหมดของแผงรับแสงอาทิตย์ซึ่ง เท่ากับสัมประสิทธิ์การสูญเสียความร้อนทางด้านบน  $U_t$  และสัมประสิทธิ์การสูญเสียความร้อนทางด้านล่าง  $U_b$   
 $T_i, T_a$  = อุณหภูมิของของไหลทำงานที่ไหล เข้าแผงรับแสงอาทิตย์และอุณหภูมิอากาศรอบแผงตามลำดับ  
 $\theta$  = เวลา  
 $F_R$  = ตัวประกอบของการถ่ายเทความร้อนจากแผงรับแสงอาทิตย์ไปยังของไหลทำงาน (Collector Heat Removal Factor)

สมการสำหรับคำนวณสัมประสิทธิ์การสูญเสียความร้อนทางด้านบนของแผง เมื่อแผงวางเอียงเป็นมุม  $s, U_t (s)$

$$\begin{aligned}
 U_t(s) = & [1 - (s - 45)(0.00259 - 0.00144\epsilon_p)] \left[ \left\{ \frac{N}{(344/T_p)[(T_p - T_a)/(N+f)]} + \frac{1}{h_w} \right\} \right. \\
 & \left. + \left\{ \frac{\sigma(T_p + T_a)(T_p^2 + T_a^2)}{[\epsilon_p + 0.0425N(1 - \epsilon_p)]^{-1} + [(2 + f - 1)/\epsilon_g] - N} \right\} \right] \quad (4.3)
 \end{aligned}$$

$$U_b = k_b/L$$

- เมื่อ  $N$  = จำนวนกระจกปิดบนแผงรับแสงอาทิตย์  
 $f = (1.0 - 0.04 \times h_w + 5.0 \times 10^{-4} h_w^2)(1.0 + 0.058N)$   
 $\epsilon_g$  = ค่าการส่งออกรังสีความร้อนของกระจก  
 $\epsilon_p$  = ค่าการส่งออกรังสีความร้อนของแผ่นดูดแสงอาทิตย์  
 $h_w$  = สัมประสิทธิ์ฟิล์มที่ผิวกระจกสัมผัสกับอากาศรอบแผงรับแสงอาทิตย์  
 $k_b$  = สัมประสิทธิ์การนำความร้อนของฉนวนภายในแผงรับแสงอาทิตย์  
 $L$  = ความหนาของฉนวน  
 $T_p$  = อุณหภูมิของแผ่นดูดแสงอาทิตย์

สมการของตัวประกอบ  $F_R$  คือ

$$F_R = \frac{GC}{U_L} [1 - \exp\{- (U_L F' / GC_p)\}] \quad (4.4)$$

- $G$  = อัตราการไหลของของไหลทำงาน  
 $C_p$  = ความร้อนจำเพาะที่ความดันคงที่ของของไหลทำงาน

$F'$  = ตัวประกอบของประสิทธิภาพของแผงรับแสงอาทิตย์ซึ่งคำนวณได้จากสมการ

$$F' = \frac{1/U_L}{W \left[ \frac{1}{U_L(D + (W - D)F)} + \frac{1}{C_b} + \frac{1}{D_i h_{f,i}} \right]} \quad (4.5)$$

เมื่อ  $W$  = ระยะระหว่างจุดศูนย์กลางของท่อ

$D, D_i$  = ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อกายนอกและภายในท่อตามลำดับ

$F$  = ประสิทธิภาพของฟิน

$C_b$  = บอนด์คอนดักแทน

$h_{f,i}$  = สัมประสิทธิ์ภายในท่อ

ประสิทธิภาพของฟินคำนวณได้จากสมการ

$$F = [\tanh(m(W - D)/2)] / [m(W - D)/2] \quad (4.6)$$

เมื่อ  $m^2 = U_L/k_F\delta$ ,  $k_F$  = สัมประสิทธิ์การนำความร้อนของวัสดุที่ใช้ทำฟิน และ  $\delta$  = ความหนาของฟิน

โดยแทนค่าสมการ (4.1) ลงในสมการ (4.2) โดยเลือกเวลาเท่ากับหนึ่งหน่วย จะได้สมการประสิทธิภาพเชิงความร้อนของแผงรับแสงอาทิตย์เป็น

$$\eta = F_R(\tau\alpha)_n - F_R U_L (T_i - T_\alpha) / I \quad (4.7)$$

สัมประสิทธิ์การสูญเสียความร้อนทั้งหมด,  $U_L$ , เป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิตั้งแต่โดยที่แผงรับแสงอาทิตย์ทำงานในช่วงอุณหภูมิประมาณ  $40^\circ\text{C}$  ถึง  $80^\circ\text{C}$  ซึ่ง  $U_L$  จะเปลี่ยนแปลงค่าน้อย จึงอาจสมมุติให้คงที่ได้ ดังนั้นสมการ (4.7) คือสมการของเส้นตรงซึ่งมีแกนนอนเป็น  $(T_i - T_\alpha) / I$  และแกนตั้งเป็น  $\eta$  ความลาดชันของเส้นคือ  $F_R U_L$  และจุดตัดของเส้นบนแกนตั้งคือ  $F_R(\tau\alpha)_n$  ตัวอย่างของกราฟแสดงประสิทธิภาพเชิงความร้อนของแผงรับแสงอาทิตย์แสดงไว้เป็นตัวอย่างในรูปที่ 4.4

ประสิทธิภาพเชิงความร้อนกับตัวแปรที่เกี่ยวข้อง

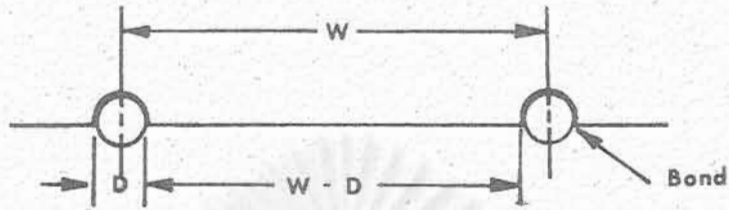
พิจารณาสมการที่ (4.7) ตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อประสิทธิภาพเชิงความร้อนของแผงรับแสงอาทิตย์อาจแบ่งออกได้เป็นสามกลุ่ม เขียนแทนได้ด้วยสมการ

$$\eta = \text{Function}[F_R, (\tau\alpha)_n, U_L] \quad (4.8)$$

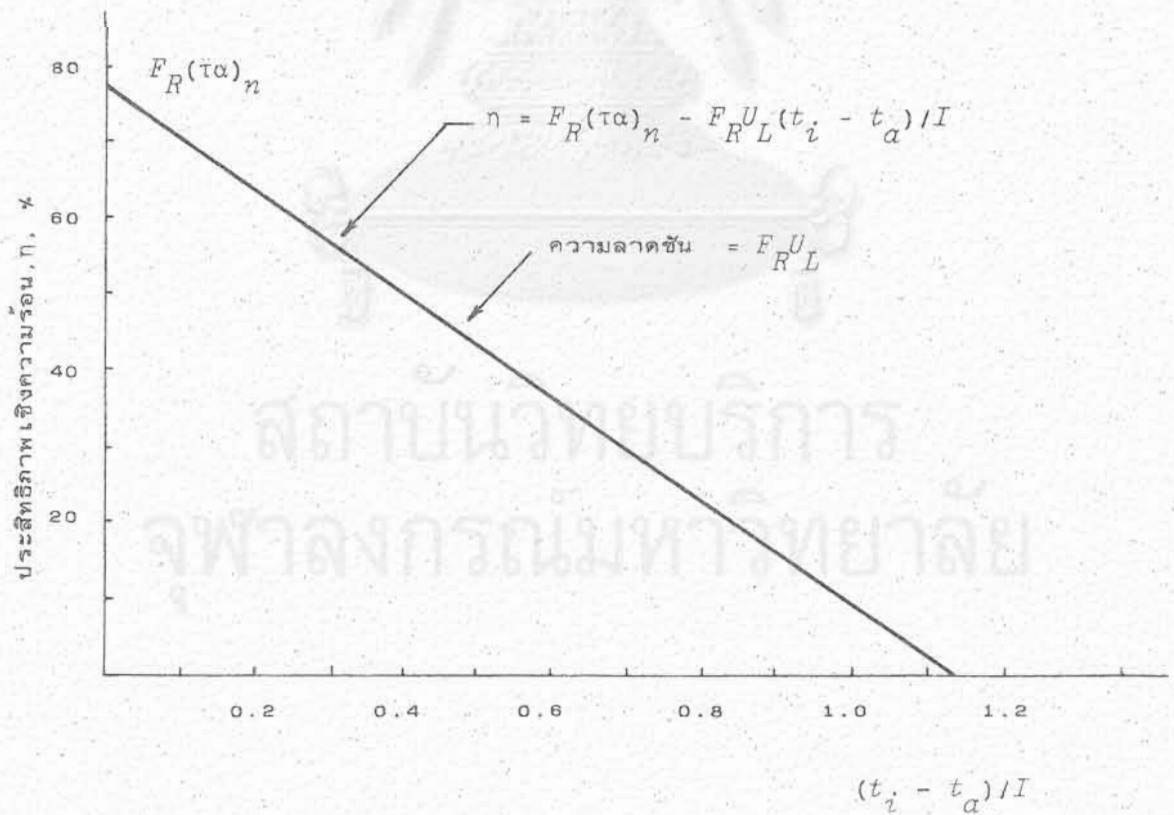
ตัวแปรกลุ่มแรกเป็นตัวแปรซึ่งควบคุมตัวประกอบการถ่ายเทความร้อนของแผงรับแสงอาทิตย์ซึ่งประกอบไปด้วย

$$F_R = F'(W, D, k_F, \delta, C_b, U_L, G, C_p, \dots) \quad (4.9)$$

ตัวแปรกลุ่มที่สองเป็นผลคูณของค่าการผ่านทะลุของแสงอาทิตย์ของกระจก,  $\tau$ , และค่าการดูดแสงอาทิตย์ของแผ่นดูดแสงอาทิตย์,  $\alpha$ , และตัวแปรกลุ่มที่สามเป็นตัวแปรซึ่งควบคุมสัมประสิทธิ์การสูญเสียความร้อนทั้งหมด



รูปที่ 4.3 แสดงพื้นและท่อของแผ่นดูดแสงอาทิตย์



รูปที่ 4.4 กราฟแสดงประสิทธิภาพเชิงความร้อนของแผงรับแสงอาทิตย์ชนิดกระจกชั้นเดียว และแผ่นดูดแสงอาทิตย์มีผิวสีดำ



ซึ่งประกอบไปด้วย

$$U_L = F''(N, \varepsilon_g, \varepsilon_p, \dots, T_p, T_\alpha, V, \dots) \quad (4.10)$$

ตัวแปรทั้งสามกลุ่มตามที่แสดงในสมการ (4.8) ถึงสมการ (4.10) บางตัวควบคุมค่าได้โดยผู้ออกแบบระบบผลิตน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์เป็นผู้กำหนด และตัวแปรบางตัวผู้ออกแบบแผงรับแสงอาทิตย์เป็นผู้กำหนดหรือเลือกวัสดุที่จะนำมาใช้ งานให้มีคุณสมบัติตามที่ต้องการ เช่น ระยะระหว่างท่อ,  $W$ , เส้นผ่านศูนย์กลางท่อ,  $D_i$ ,  $D_o$ , สัมประสิทธิ์การนำความร้อนของพิน,  $k_p$ , ความหนาของพิน,  $\delta$ , บอนด์คอนดักแทน,  $C_b$ , จำนวนกระຈก,  $N$ , การส่งออกรังสีความร้อนของแผ่นดูดแสงอาทิตย์,  $\varepsilon_p$ , และการส่งออกรังสีความร้อนของกระຈก,  $\varepsilon_g$ , เป็นต้น ตัวแปรกลุ่มที่สองขึ้นกับสภาพการใช้งานของแผงรับแสงอาทิตย์ซึ่งได้แก่ อัตราการไหลของของไหลทำงาน,  $m$ , ความร้อนจำเพาะที่ความดันคงที่,  $C_p$ , อุณหภูมิของแผ่นดูดแสงอาทิตย์,  $T_p$ , อุณหภูมิของบรรยากาศรอบแผง,  $T_\alpha$ , ตัวแปรดังกล่าวผู้ออกแบบแผงรับแสงอาทิตย์เป็นผู้เลือกหรือโดยกำหนดขึ้นตามสภาพสิ่งแวดล้อมเอง ตัวแปรกลุ่มสุดท้ายได้แก่สัมประสิทธิ์การสูญเสียความร้อนทั้งหมด,  $U_L$ , ซึ่งประกอบด้วยอัตราการสูญเสียความร้อนเนื่องจากการนำ การพาและการแผ่รังสีความร้อนจากแผ่นดูดแสงอาทิตย์ออกสู่อากาศภายนอก ตัวแปรที่กล่าวถึงทั้งสามกลุ่มยกเว้นค่าการส่งออกรังสีความร้อนของแผ่นดูดแสงอาทิตย์ ผู้ออกแบบแผงรับแสงอาทิตย์จะเลือกค่าที่เหมาะสมมาใช้งาน ดังนั้นแผงรับแสงอาทิตย์แบบแผ่นชนิดต่างๆจึงให้ค่าของตัวแปรดังกล่าวไม่แตกต่างกันมากนัก ส่วนตัวแปรที่เหลือคือการส่งออกรังสีความร้อนของแผ่นดูดแสงอาทิตย์,  $\varepsilon_p$ , ซึ่งนับว่าเป็นตัวแปรที่สำคัญมากต่อประสิทธิภาพเชิงความร้อนของแผงรับแสงอาทิตย์ ตัวแปรนี้เป็นคุณสมบัติของวัสดุที่เลือกมาใช้ทำแผ่นดูดแสงอาทิตย์ซึ่งผู้ออกแบบจะไปกำหนดเองไม่ได้ การนำวัสดุที่มีผิวเป็นซีเล็กตีฟมาใช้งานจะทำให้ค่า  $\varepsilon_p$  ลดลงซึ่งหมายถึงการทำให้อัตราการสูญเสียความร้อนจากแผ่นดูดลดลง หรือประสิทธิภาพเชิงความร้อนของแผงรับแสงอาทิตย์เพิ่มนั่นเอง

#### 4.3 การนำวัสดุผิวซีเล็กตีฟมาทำแผ่นดูดแสงอาทิตย์

ดังได้กล่าวมาแล้ววัสดุที่ใช้ทำแผ่นดูดแสงอาทิตย์ควรเป็นอลูมิเนียมแผ่นหรือเหล็ก และผิวซีเล็กตีฟควรเป็นนิเกิลดำหรือถ้าต้องการความคงทนก็ควรใช้แบล็คโครม การนำแผ่นดูดแสงอาทิตย์มาชุบไฟฟ้าเพื่อทำผิวซีเล็กตีฟดังกล่าวต้องเสียค่าใช้จ่ายสูงมากโดยเฉพาะอย่างยิ่งการทำแบล็คโครม ดังนั้นในการวิจัยนี้จึงไม่อาจสร้างแผ่นดูดผิวซีเล็กตีฟขึ้นได้ แต่จะใช้การออกแบบและสร้างแผงรับแสงอาทิตย์ชนิดที่มีผิวของแผ่นดูดเป็นสีดำซึ่งรู้ค่าการส่งออกรังสีความร้อนแทน ในแผงรับแสงอาทิตย์ซึ่งสร้างขึ้นจะเลือกใช้ค่าที่เหมาะสมของตัวแปรที่ควบคุมค่าได้ เช่น ชนิดของวัสดุ ความหนาของแผ่นดูดแสงอาทิตย์ ระยะห่างระหว่างท่อ และขนาดของท่อ เป็นต้น แล้วสร้างแผงรับแสงอาทิตย์ขึ้นเพื่อทำการทดลองเพื่อหาค่าตัวประกอบการถ่ายเทความร้อน,  $F_R$ , สัมประสิทธิ์การสูญเสียความร้อนทั้งหมด,  $U_L$ , ผลคูณของค่าการดูดแสงอาทิตย์และค่าการผ่านทะลุ,  $(\tau\alpha)$  โดยใช้

วิธีการเปลี่ยนค่าการส่งออกรังสีความร้อนและค่าการดูดแสงอาทิตย์จากผิวสีดำไปเป็นของผิวซีเล็กตีฟซึ่งได้จากการทดลองในบทที่ 3 ตัวประกอบ  $F_R$ ,  $U_L$ , และ  $(\tau\alpha)$  สำหรับแผ่นดูดซึ่งมีผิวเป็นซีเล็กตีฟก็สามารถหาค่าได้ และโดยการใช้สมการ (4.7) ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของแผงรับแสงอาทิตย์ซึ่งมีแผ่นดูดแสงอาทิตย์เป็นซีเล็กตีฟจะคำนวณหาค่าได้

#### 4.4 การออกแบบแผงรับแสงอาทิตย์

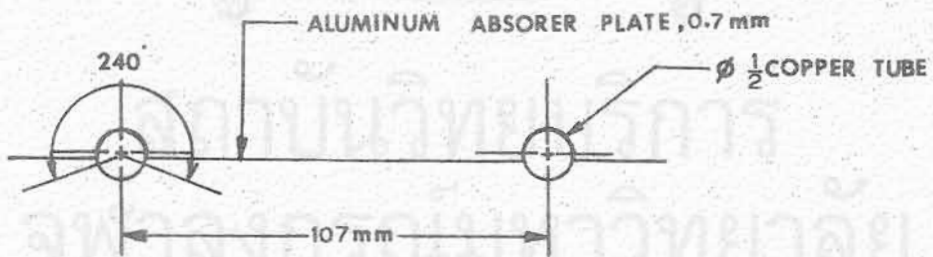
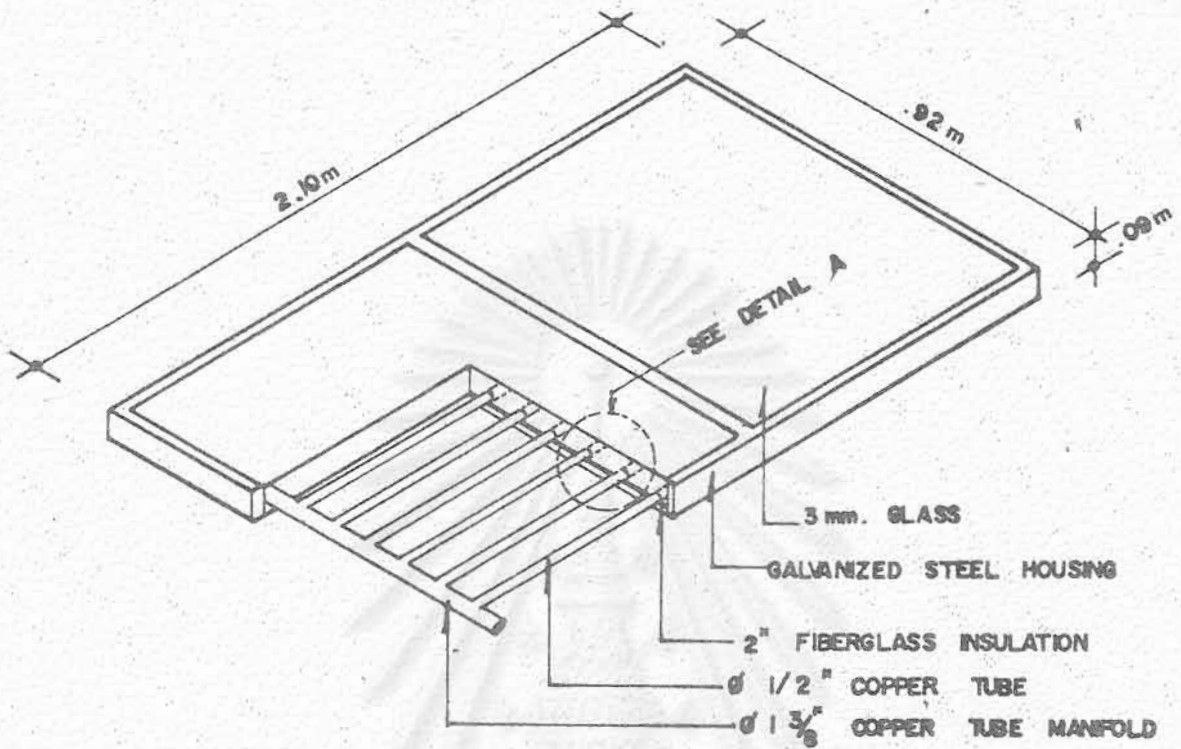
เป้าหมายของการออกแบบและรายละเอียดของแผงรับแสงอาทิตย์มีดังนี้

1. แผ่นดูดแสงอาทิตย์เป็นแบบแผ่นและท่อ ท่อเป็นท่อทองแดงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1/2 นิ้ว ฟินเป็นอลูมิเนียม รูปร่างของฟินและการยึดจับกับท่อ ระยะห่างระหว่างท่อ และความหนาของฟินรวมกันแล้วต้องให้ค่าประสิทธิภาพของฟินไม่น้อยกว่า 0.95
2. กล่องบรรจุแผ่นดูดแสงอาทิตย์ต้องทนต่อสภาพใช้งานกลางแจ้ง ไม่เป็นสนิมและราคาต่ำ ด้านบนปิดด้วยกระจกใส 1 แผ่น ภายในกล่องมีฉนวนกันความร้อน เมื่อนำแผงรับแสงอาทิตย์ติดตั้งทำงานที่อุณหภูมิของแผ่นดูดแสงอาทิตย์เฉลี่ย  $80^{\circ}\text{C}$  แล้วสัมประสิทธิ์การสูญเสียความร้อนทั้งหมดของแผงต้องไม่เกิน  $8.5 \text{ W/m}^2\text{C}$
3. ขนาดของแผ่นดูดแสงอาทิตย์ ขนาดของกล่องบรรจุแผ่นดูดแสงอาทิตย์ และขนาดของกระจกต้องมีความสัมพันธ์กันในลักษณะที่จะใช้ประโยชน์จากวัสดุขนาดมาตรฐานมากที่สุดซึ่งจะทำให้ราคาต่อหน่วยของแผงต่ำ

ตามเป้าหมายที่วางไว้คือประสิทธิภาพของฟินต้องไม่น้อยกว่า 0.95 จากการประเมินขั้นต้นพบว่าระยะระหว่างท่อ,  $W$ , เท่ากับ 0.1 m และความหนาของฟิน,  $\delta$ , เท่ากับ 0.7 mm (อลูมิเนียมแผ่นเบอร์ 22) ได้ประสิทธิภาพของฟินเท่ากับ 0.96 โดยใช้อัตราการใช้ของน้ำผ่านแผงรับแสงอาทิตย์เท่ากับ  $0.012 \text{ kg/m}^2 \text{ s}$ . และออกแบบให้ฟินยึดกับท่อด้วยแรงสปริงของโลหะ (Mechanical Bond) โดยนำอลูมิเนียมแผ่นมาขึ้นรูปในลักษณะตามที่แสดงในรูปที่ 4.5 จะได้ค่าบอนด์คอนดักแทนประมาณ  $0.01 \text{ m}^2\text{C/Watt}$  และได้ตัวประกอบของประสิทธิภาพของแผงรับแสงอาทิตย์,  $F'$ , ตามสมการ (4.5) เท่ากับ 0.917 และตัวประกอบของการถ่ายเทความร้อน,  $F_R$ , เท่ากับ 0.847 สำหรับกล่องบรรจุแผ่นดูดแสงอาทิตย์ โดยเลือกใช้เหล็กกาลวาไนซ์ซึ่งมีขนาดมาตรฐาน  $4 \times 8 \text{ ft}$  นำมาหัดด้านข้างโดยรอบเป็นของสำหรับรองรับกระจก และเมื่อนำขนาดของกระจกขนาดความหนา 3 mm ซึ่งมีขนาดมาตรฐานเป็น  $36 \times 42 \text{ inch}$  มาประกอบการพิจารณาด้วยแล้ว ได้ขนาดของกล่องเป็น  $0.92 \times 2.10 \times 0.09 \text{ m}$  ด้านบนปิดด้วยกระจก 2 แผ่นตามที่แสดงในรูปที่ 4.5

#### 4.5 การทดสอบแผงรับแสงอาทิตย์

แผงรับแสงอาทิตย์ตามที่ออกแบบไว้ตามหัวข้อ 4.4 ได้ถูกสร้างขึ้นและนำมาติดตั้งเพื่อทดสอบตัวประกอบ การถ่ายเทความร้อน,  $F_R$ , สัมประสิทธิ์การสูญเสียความร้อนทั้งหมด,  $U_L$ , และผลคูณของค่าการดูดแสงอาทิตย์ และค่าการผ่านทะลุของกระจก,  $(\tau\alpha)$



DETAIL A

รูปที่ 4.5 ภาพแสดงรายละเอียดของแผงรับแสงอาทิตย์ซึ่งออกแบบและสร้างขึ้น

อุปกรณ์ที่ใช้ทดสอบแผงรับแสงอาทิตย์เพื่อหาค่าตัวประกอบตั้งที่กล่าวข้างต้นมีลักษณะ ตามที่แสดงในรูปที่ 4.6 ประกอบด้วย ถังเก็บน้ำดิบ (1) ซึ่งจ่ายน้ำให้ถังควบคุมระดับ (2) ถังควบคุมระดับ (2) จะควบคุมให้น้ำในถัง (3) ซึ่งมีปั๊มและฮีตเตอร์ไฟฟ้ามีระดับคงที่ การทำงานของฮีตเตอร์ไฟฟ้าจะถูกควบคุมโดยอุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิ (Temperature Controller) ทำให้อุณหภูมิของน้ำในถัง (3) อยู่ที่ระดับที่ต้องการ น้ำจากถังน้ำ (3) จะถูกปั๊มขึ้นไปยังถังซึ่งมีเซตคองที่ (4) น้ำส่วนเกินในถังน้ำ (4) จะไหลกลับมายังถัง (3) น้ำซึ่งมีเซตคองที่และมีอุณหภูมิตามที่กำหนดจะไหล เข้าแผงรับแสงอาทิตย์ (5) และไหลออกทางด้านบนลงกระบอกตวง บนระนาบเดียวกับระนาบที่ติดตั้งแผงรับแสงอาทิตย์มีอุปกรณ์วัดอัตราพลังงานแสงอาทิตย์ "ไพราโนมิเตอร์" ติดตั้งอยู่ รายละเอียดของการทดสอบมีดังนี้

#### การทดสอบประสิทธิภาพ เชิงความร้อน

โดย เริ่มการทดลองที่อุณหภูมิต่ำ อุณหภูมิของน้ำเข้าแผงใกล้เคียงกับอุณหภูมิของบรรยากาศ ตั้งระดับอุณหภูมิที่อุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิ วัดอุณหภูมิของน้ำที่ไหลเข้าแผง  $t_{c,i}$  อุณหภูมินี้ต้องคงที่จึงจะ เริ่มการทดลองได้ วัดอุณหภูมิของน้ำที่ไหลออกจากแผงรับแสงอาทิตย์  $t_{c,o}$  ในขณะเดียวกันให้ใช้กระบอกตวงและนาฬิกาจับ เวลา วัดอัตราการไหลของน้ำที่ผ่านแผงรับแสงอาทิตย์ ให้อ่านอัตราพลังงานแสงอาทิตย์โดยไพราโนมิเตอร์ ให้ทำการทดลองที่อุณหภูมิ  $t_{c,i}$  เดียวกันหลายครั้ง แล้วคำนวณประสิทธิภาพ เชิงความร้อนโดยสมการ

$$Q_u = mC_p(t_{c,o} - t_{c,i})$$

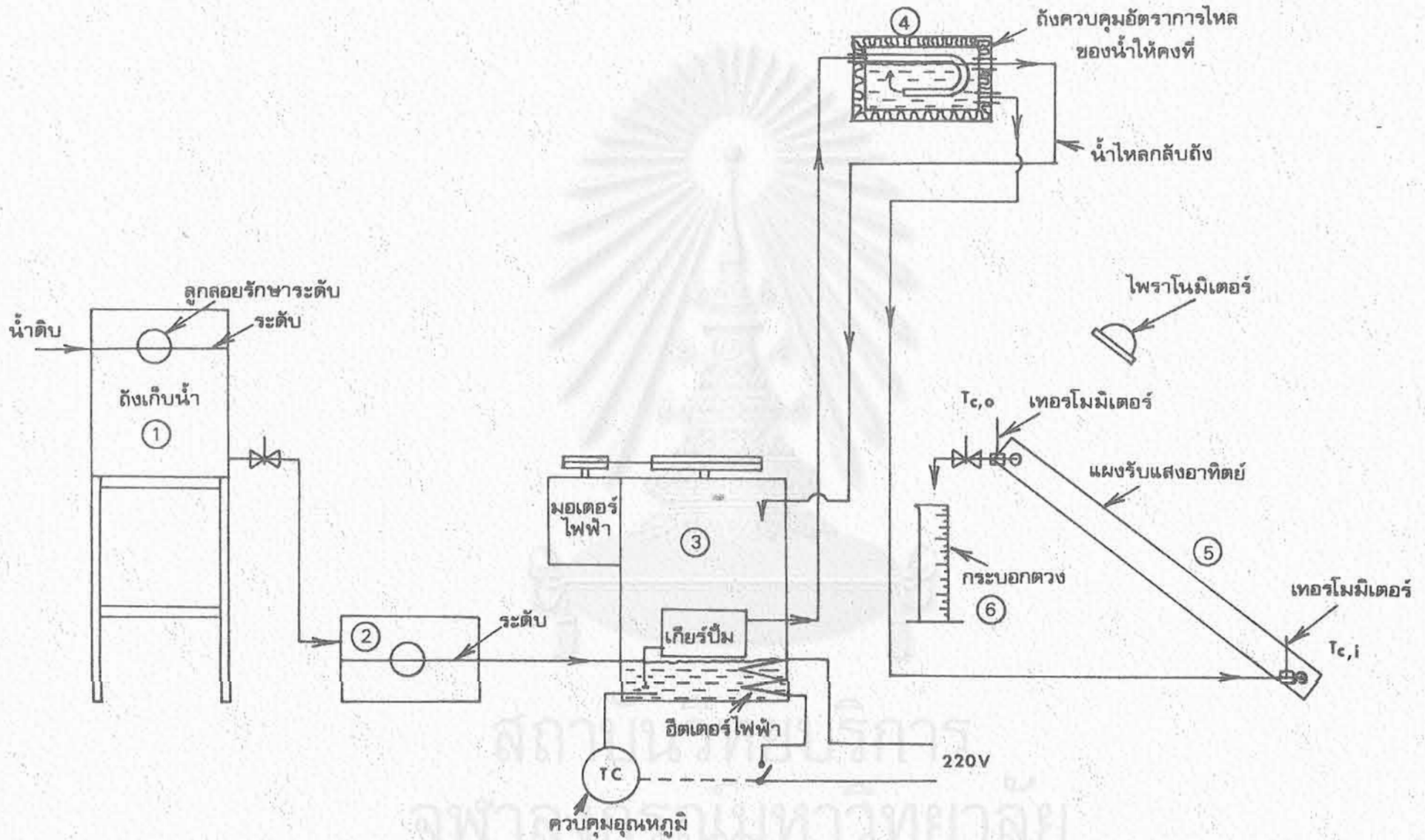
$$\eta = Q_u / IA$$

เมื่อ  $m$  = อัตราการไหลของน้ำ, kg/s.  $I$  = อัตราพลังงานแสงอาทิตย์,  $W/m^2$ ,  $A$  = พื้นที่ของแผงรับแสงอาทิตย์เท่ากับ  $1.8 \text{ m}^2$

ต่อไปให้เพิ่มระดับอุณหภูมิ  $t_{c,i}$  แล้วทำการทดลองซ้ำโดยวิธีตามที่กล่าวข้างต้น แล้วคำนวณประสิทธิภาพ เชิงความร้อนที่อุณหภูมิ  $t_{c,i}$  ใหม่ ระดับอุณหภูมิของน้ำที่เข้าแผงจะอยู่ในช่วง  $40^\circ - 80^\circ \text{C}$  ผลการทดลองแสดงไว้ในตารางที่ 4.1 และในรูปที่ 4.7

#### อุปกรณ์ที่ใช้วัดและควบคุมตัวแปรในการทดลอง

1. การวัดอุณหภูมิ ใช้เทอร์โมมิเตอร์แบบปรอทในท่อแก้ว อ่านได้ละเอียด  $\pm 0.2^\circ \text{C}$
2. การวัดอัตราการไหลของน้ำ ใช้กระบอกตวงและตาชั่งซึ่งอ่านได้ละเอียด  $\pm 0.01 \text{ kg}$
3. พลังงานแสงอาทิตย์ ใช้ไพราโนมิเตอร์ model MS-4, EKO Instruments Trading Co., Japan, sensivity  $6 \text{ mV/cal cm}^2 \text{ min}^{-1}$
4. ควบคุมฮีตเตอร์ทำน้ำร้อนก่อนไหลเข้าแผงรับแสงอาทิตย์ ใช้ Temperature Controller, Omega Engineering, Inc. U.S.A., resolution  $\pm 1^\circ \text{C}$



รูปที่ 4.6 อุปกรณ์ใช้ในการทดสอบประสิทธิภาพเชิงความร้อนของแผงรับแสงอาทิตย์



ตารางที่ 4.1

ผลการทดลองของประสิทธิภาพ เชนความร้อน

$I$ W/m <sup>2</sup>	$T_a$ °C	$T_{c,i}$ °C	$T_{c,o}$ °C	$\frac{T_i - T_a}{I}$ °C.m <sup>2</sup> /W	$m$ kg/s	$Q_u$ W	$\eta$ %
750.0	32.0	36.50	46.59	0.0060	0.0220	931	69.0
740.0	32.0	37.55	42.77	0.0075	0.0220	892	67.0
752.0	32.2	38.59	48.94	0.0085	0.0215	933	69.0
754.0	32.1	41.90	51.53	0.0130	0.0215	868	64.0
743.0	32.4	43.17	52.44	0.0145	0.0210	816	61.0
736.0	32.4	60.00	67.00	0.0375	0.0212	622	47.0
763.0	32.2	82.2	87.4	0.0655	0.0164	357	26.0
780.2	32.2	81.7	86.9	0.064	0.0167	364	25.9
758	32.2	80.8	86.5	0.0644	0.0168	401	29.3
806.3	32	79.6	87.2	0.059	0.0166	497	34.2

ตารางที่ 4.2

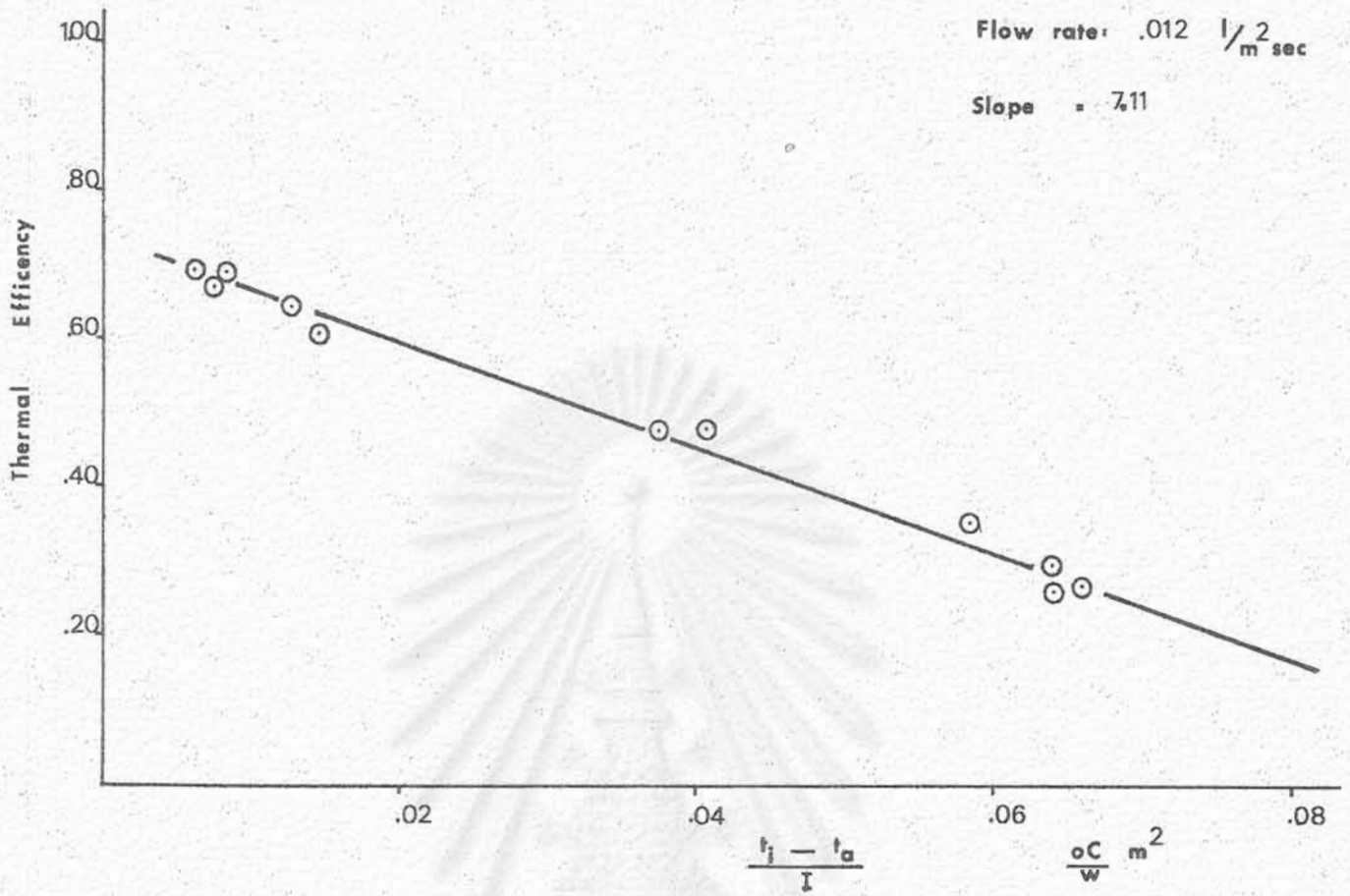
ผลการทดลองหาประสิทธิภาพการสูญเสียความร้อนทั้งหมด

$T_p$ °C	$T_a$ °C	$m$ kg/s	$T_{c,i}$ °C	$T_{c,o}$ °C	$Q_{loss}$ W	$Q_{loss}/A$ W/m <sup>2</sup>	$U_L$ W/m <sup>2</sup> °C
64	32.0	0.0147	67.7	60.8	424.9	236.1	7.37
68.5	32.0	0.0162	73.9	66.1	529.4	294.1	8.06
70.5	32.2	0.0156	76.6	68.5	530.8	294.9	7.70
72.0	32.2	0.0182	81.6	74.2	563.8	313.3	7.87

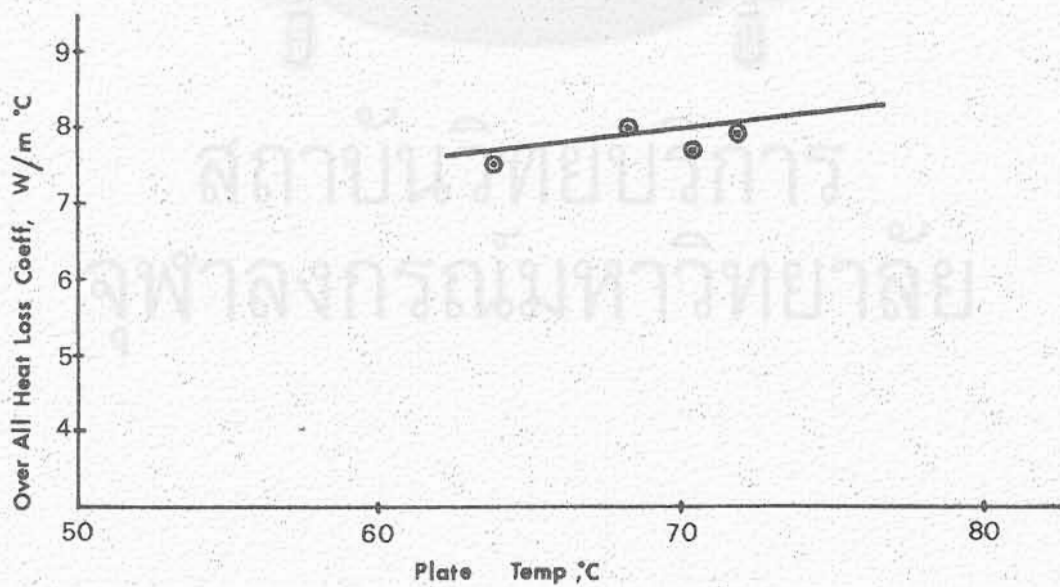
$$Q_{loss} = mC_p(T_o - T_i)$$

$$A = 1.8 \text{ m}^2$$

$$T_{c,i} = T_i, \quad T_{c,o} = T_o$$



รูปที่ 4.7 กราฟแสดงประสิทธิภาพเชิงความร้อนของแผงรับแสงอาทิตย์ซึ่งได้จากการทดลอง



รูปที่ 4.8 กราฟแสดงสัมประสิทธิ์การสูญเสียความร้อนทั้งหมดของแผงรับแสงอาทิตย์  
แผ่นดูดแสงอาทิตย์เป็นสีดำซึ่งมีค่าการส่งออกรังสีความร้อนเท่ากับ 0.87

โดยการเปรียบเทียบกราฟของประสิทธิภาพเชิงความร้อนกับสมการที่(4.7)ได้

$$\text{ความลาดชันของเส้น} = F_R U_L = 7.11$$

$$\text{จุดตัดของเส้นกับแกนตั้ง} = F_R (\tau\alpha)_n = 0.74$$

การทดลอง เพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียความร้อนทั้งหมด

อุปกรณ์ที่ใช้สำหรับการทดลองแสดงไว้ในรูปที่ 4.6 ช่วงเวลาที่ใช้ในการทดลองต้องไม่มีแสงอาทิตย์ตกลงบนแผงรับแสงอาทิตย์เป็นเวลาตั้งแต่ 16.00 น. ไปแล้วเป็นต้น ขณะทำการทดลองให้ติดตั้งฉากกันแสงอาทิตย์ทางด้านทิศตะวันตกด้วย การทำงานของอุปกรณ์ที่ใช้มีดังนี้ โดยตั้งอุปกรณ์ควบคุมการทำงานของฮีทเตอร์ในถังน้ำ(3) น้ำร้อนจากถังน้ำ(3)ไหลขึ้นถังน้ำ(4) น้ำจากถังน้ำ(4) ซึ่งมีเซตคองที่และมีอุณหภูมิที่กำหนดไหลเข้าแผงรับแสงอาทิตย์ วัดอุณหภูมิของน้ำที่ไหลเข้าแผงรับแสงอาทิตย์ได้เป็น  $T_{c,i}$  และวัดอุณหภูมิของน้ำที่ไหลออกเป็น  $T_{c,o}$  การวัดอุณหภูมิโดยใช้เทอร์โมมิเตอร์ซึ่งอ่านได้ละเอียด  $0.2^{\circ}\text{C}$  อัตราการไหลของน้ำร้อนที่ไหลผ่านแผงรับแสงอาทิตย์วัดได้โดยใช้กระบอกตวงและนาฬิกาจับเวลา อุณหภูมิของแผ่นดูดแสงอาทิตย์วัดได้โดยติดตั้งปลายลวดเทอร์โมคัปเปิลไว้ 4 ตำแหน่งห่างเท่ากันตามความยาวของแผ่นดูดแสงอาทิตย์ อัตราความร้อนที่สูญเสียทั้งหมดที่อุณหภูมิเฉลี่ยของแผ่นดูด  $T_{pm}$  คำนวณได้โดยใช้สมการ

$$Q_{loss} = mC_p(T_{c,i} - T_{c,o})$$

ขณะทำการทดลองอุณหภูมิของน้ำที่ไหลเข้าแผงรับแสงอาทิตย์  $T_{c,i}$  จะถูกควบคุมให้อยู่ในช่วง  $60^{\circ}-90^{\circ}\text{C}$  หรืออุณหภูมิของแผ่นดูดแสงอาทิตย์อยู่ในช่วง  $50^{\circ}-80^{\circ}\text{C}$  สัมประสิทธิ์การสูญเสียความร้อนทั้งหมดของแผงรับแสงอาทิตย์ที่อุณหภูมิของน้ำเฉลี่ย  $(T_{c,i} + T_{c,o})/2$  คำนวณได้จากสมการ

$$U_L = Q_{loss} / [A(T_{pm} - T_a)]$$

เมื่อ  $A$  = พื้นที่ของแผงรับแสงอาทิตย์ และ  $T_a$  = อุณหภูมิของอากาศรอบแผงรับแสงอาทิตย์ขณะทำการทดลอง

ผลของการทดลองและค่าอัตราการสูญเสียความร้อนทั้งหมดของแผงรับแสงอาทิตย์แสดงไว้ในตารางที่ 4.2 และแสดงไว้ด้วยกราฟในรูปที่ 4.8 ค่าเฉลี่ยของสัมประสิทธิ์การสูญเสียความร้อนทั้งหมดเท่ากับ  $8.5 \text{ W/m}^2\text{C}$  สำหรับอุณหภูมิของแผ่นดูดแสงอาทิตย์  $60^{\circ}-80^{\circ}\text{C}$  หรือเทียบเท่าอุณหภูมิของน้ำในขณะที่แผงรับแสงอาทิตย์ติดตั้งทำงานจริง  $52^{\circ}-72^{\circ}\text{C}$  (อุณหภูมิของน้ำแตกต่างจากอุณหภูมิของแผ่นดูดแสงอาทิตย์, โดยเฉลี่ยเท่ากับ  $8^{\circ}\text{C}$ ) โดยแทนค่า  $U_L$  ที่ได้ลงในสมการความลาดชันของเส้นประสิทธิภาพเชิงความร้อน ( $F_R U_L = 7.11$ ) ได้  $F_R$  เท่ากับ 0.836

บอนด์คอนดักแทน

สำหรับค่าบอนด์คอนดักแทนคำนวณได้โดยใช้ผลจากการทดลองและสมการที่(4.4) และสมการที่(4.5)

ตามขั้นตอนดังนี้ โดยแทนค่า  $F_R$  เท่ากับ 0.836,  $U_L$  เท่ากับ  $8.5 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$ , และ  $G$  เท่ากับ  $0.012 \text{ kg/m}^2 \text{ s}$  ซึ่งได้มาจากการทดลองลงในสมการที่(4.4)จะได้ตัวประกอบของประสิทธิภาพแผงรับแสงอาทิตย์  $F'$ , เท่ากับ 0.912 และโดยการแทนค่า  $F'$  เท่ากับ 0.912,  $U_L$  เท่ากับ  $8.5 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$ ,  $W$  เท่ากับ  $0.107 \text{ m}$ ,  $D$  เท่ากับ  $0.012 \text{ m}$ ,  $F$  เท่ากับ 0.96,  $D_i$  เท่ากับ  $0.009 \text{ m}$ , และ  $h_{fi}$  เท่ากับ  $300 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$  ลงในสมการที่(4.5)จะได้ค่าบอนด์คอนดักแทนเท่ากับ  $104.16 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$

#### 4.5 แผงรับแสงอาทิตย์ชนิดแผ่นดูดแสงอาทิตย์มีผิว เป็นซี เล็กตีฟ

ตามที่ได้อธิบายมาแล้วว่าแผ่นดูดแสงอาทิตย์ชนิดที่มีผิว เป็นซี เล็กตีฟไม่อาจทำขึ้นได้เพราะค่าใช้จ่ายสูงมาก อย่างไรก็ตามประสิทธิภาพเชิงความร้อนของแผงซึ่งมีแผ่นดูดแสงอาทิตย์ เป็นซี เล็กตีฟก็อาจสร้างขึ้นได้โดยใช้ข้อมูลจากการทดลองของแผงรับแสงอาทิตย์ซึ่งมีแผ่นดูดแสงอาทิตย์ เป็นสีดำ

โดยการเลือกอลูมิเนียมซึ่งมีผิว เป็นแบล็คโครม เป็นแผ่นพื้น ส่วนประกอบอื่นได้แก่ขนาดและระยะห่างของท่อ จะใช้เช่นเดียวกับแผงซึ่งมีแผ่นดูดแสงอาทิตย์ เป็นสีดำซึ่งได้สร้างขึ้นและทดสอบไปแล้วนั้น ค่าการดูดแสงอาทิตย์และการส่งออกรังสีความร้อนของอลูมิเนียมผิวแบล็คโครมตามที่ได้อำนาจทดลองมาแล้วคือ 0.942 และ 0.122 ตามลำดับ โดยกำหนดให้ความเร็วลมเฉลี่ยเท่ากับ  $2 \text{ m/s}$  อุณหภูมิของอากาศเท่ากับ  $32 \text{ } ^\circ\text{C}$  และ อุณหภูมิเฉลี่ยของแผ่นดูดแสงอาทิตย์เท่ากับ  $78 \text{ } ^\circ\text{C}$  โดยใช้สมการที่(4.3)สัมประสิทธิ์การสูญเสียความร้อนทางด้านบนเท่ากับ  $3.84 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$  สัมประสิทธิ์การสูญเสียความร้อนทางด้านหลังเท่ากับ  $1.8 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$  ดังนั้นสัมประสิทธิ์การสูญเสียความร้อนทั้งหมดเท่ากับ  $5.64 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$

โดยการแทนค่า  $U_L = 5.64 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$ , สัมประสิทธิ์การนำความร้อนของวัสดุที่ใช้ทำพื้น,  $k_{Fi}$ , เท่ากับ  $211 \text{ W/m } ^\circ\text{C}$  และความหนาของพื้น,  $\delta$ , เท่ากับ  $0.0007 \text{ m}$  ลงในสมการที่ (4.6)จะได้ ประสิทธิภาพของพื้น,  $F$ , เท่ากับ 0.972

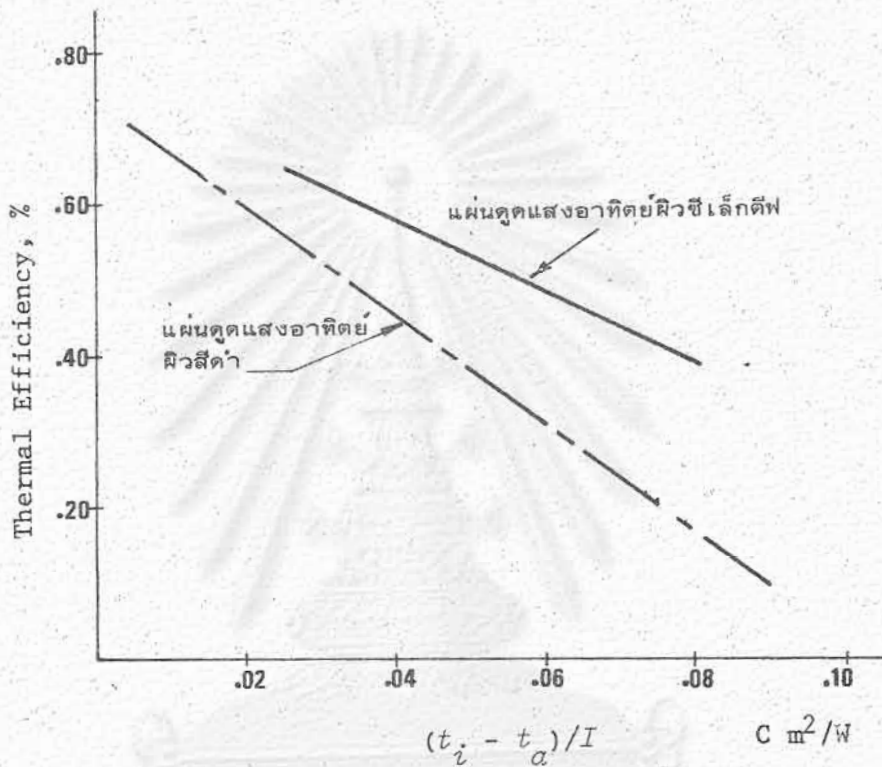
โดยการแทนค่า  $U_L$  เท่ากับ  $5.64 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$ , ระยะห่างระหว่างท่อ,  $W$ , เท่ากับ  $0.107 \text{ m}$ , เส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ,  $D$ , เท่ากับ  $0.0127 \text{ m}$ , ประสิทธิภาพของพื้น,  $F$ , เท่ากับ 0.972, บอนด์รีซีสแทน  $R_b$ , เท่ากับ  $0.0096 \text{ m}^2 \text{ } ^\circ\text{C/W}$ , และสัมประสิทธิ์ฟิล์มเท่ากับ  $300 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$ , ลงในสมการที่(4.5)จะได้ ตัวประกอบของประสิทธิภาพแผงรับแสงอาทิตย์,  $F'$ , เท่ากับ 0.913,

โดยการแทนค่าอัตราการไหลของน้ำผ่านแผงรับแสงอาทิตย์,  $m$ , เท่ากับ  $0.012 \text{ kg/m}^2 \text{ s}$ , สัมประสิทธิ์การสูญเสียความร้อนทั้งหมด,  $U_L$ , เท่ากับ  $5.64 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$  ตัวประกอบของประสิทธิภาพของแผง,  $F'$ , เท่ากับ 0.913, และความจุจำเพาะที่ความดันคงที่,  $C_p$ , เท่ากับ  $4190 \text{ J/kg } ^\circ\text{C}$  ลงในสมการที่ (4.4) จะได้ตัวประกอบการถ่ายเทความร้อนของแผงรับแสงอาทิตย์,  $F_R$ , เท่ากับ 0.876

โดยใช้ค่า  $U_L$  และ  $F_R$  ที่คำนวณได้ ดังนั้น

$$\text{ความลาดชันของเส้นประสิทธิภาพเชิงความร้อน} = F_R U_L = 4.894$$

$$\text{จุดตัดของเส้นกราฟบนแกนตั้ง} = (\tau\alpha)_n F_R = 0.767$$



รูปที่ 4.9 แสดงกราฟของประสิทธิภาพเชิงความร้อนของแผงรับแสงอาทิตย์ซึ่งมีแผ่นดูดแสงอาทิตย์เป็นซีเล็กดีฟซึ่งมีค่าการดูดแสงอาทิตย์เท่ากับ 0.942 และค่าการส่งออกรังสีความร้อนเท่ากับ 0.122

รูปที่ 4.9 แสดงประสิทธิภาพเชิงความร้อนเปรียบเทียบระหว่างแผงรับแสงอาทิตย์ซึ่งมีแผ่นดูดแสงอาทิตย์แบบผิวสีดำซึ่งสร้างขึ้นเพื่อการทดลองกับแผงรับแสงอาทิตย์แบบแผ่นดูดเป็นซีเล็กดีฟซึ่งจำลองขึ้นโดยใช้ข้อมูลจากแผงซึ่งสร้างขึ้นกับคุณสมบัติการดูดแสงอาทิตย์และการส่งออกรังสีความร้อนของชิ้นงานผิวซีเล็กดีฟซึ่งเตรียมขึ้นสำหรับการวิจัยนี้

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัย

โดยที่แผงรับแสงอาทิตย์จัด เป็นอุปกรณ์หลักที่ต้องใช้ในระบบพลังงานแสงอาทิตย์ทางขบวนการความร้อน การออกแบบและสร้างแผงรับแสงอาทิตย์ซึ่งให้ประสิทธิภาพ เชิงความร้อนสูงก็ ก็หมายถึงการเพิ่มปริมาณ พลังงานที่นำมาใช้ประโยชน์ได้จากพลังงานแสงอาทิตย์ สำหรับในประเทศไทย แม้จะมีผู้ผลิตแผงรับแสง อาทิตย์ออกจำหน่ายหลายรายด้วยกันก็ตาม แต่แผงรับแสงอาทิตย์ที่ผลิตได้ยังมีสมรรถนะต่ำ โดยเฉพาะ เมื่อ อุณหภูมิของน้ำร้อนสูงระดับ  $90^{\circ}\text{C}$  ซึ่งใช้ในระบบทำความเย็นระบบดูดซึมพลังงานแสงอาทิตย์ แผงรับแสง อาทิตย์ที่ผลิตขึ้นจำหน่ายในประเทศไทยมีสมรรถนะต่ำ ไม่เหมาะสมที่จะนำมาใช้ ทางหนึ่งที่ทำให้สมรรถนะของ แผงรับแสงอาทิตย์ เพิ่มคือการนำผิวซี เล็กตีพามาใช้กับแผ่นดูดแสงอาทิตย์

เครื่องมือสำหรับใช้วัดค่าการดูดแสงอาทิตย์และการส่งออกรังสีความร้อนของผิววัสดุแผ่นได้ถูกออกแบบ และสร้างขึ้น เป็นลำดับแรก การทดสอบความถูกต้องของค่าการดูดแสงอาทิตย์และการส่งออกรังสีความร้อน ซึ่งวัดได้จาก เครื่องมือนี้ทำได้โดยการ ใช้วัสดุที่ทราบค่าการดูดแสงอาทิตย์และการส่งออกรังสีความร้อนอยู่ แล้ว เป็นชิ้นงาน แล้ว เปรียบ เทียบค่าตัวแปรดังกล่าวที่วัดได้กับค่าการดูดแสงอาทิตย์และการส่งออกรังสีความร้อนของวัสดุนั้น วัสดุที่นำมาใช้ เป็นชิ้นงาน เพื่อจุดประสงค์ดังกล่าวคือ ทองแดงแผ่นผิวขัดมันและโลหะแผ่น ซึ่งเคลือบผิวหน้าด้วยสีดำด้านของรัสโอ เลียม เบอร์ 412

ชิ้นงานที่เลือกมาใช้ได้แก่ทองแดง เหล็กและอลูมิเนียม โลหะทั้งสามชนิดนี้นิยมใช้ เป็นวัสดุสำหรับทำแผ่น ดูดแสงอาทิตย์ ชนิดของผิวซี เล็กตีพที่เลือกมาศึกษา เพื่อให้เหมาะสมกับโลหะดังกล่าวคือคอป เปอร์ออกไซด์ สำหรับชิ้นงานที่เป็นทองแดง นิ เกิดค่าสำหรับชิ้นงานที่เป็น เหล็กและอลูมิเนียม และแบล็คโครมสำหรับชิ้นงานที่เป็น เหล็กและอลูมิเนียม ค่าการดูดแสงอาทิตย์,  $\alpha$ , และค่าการส่งออกรังสีความร้อน,  $\epsilon$ , ที่เหมาะสมสำหรับ ชิ้นงานผิวซี เล็กตีพมีดังนี้ สำหรับชิ้นงานที่เป็นทองแดงและผิว เป็นคอป เปอร์ออกไซด์ได้ค่าการดูดแสงอาทิตย์ เท่ากับ 0.936 และค่าการส่งออกรังสีความร้อนเท่ากับ 0.052 เมื่อใช้ เวลาต้มชิ้นงานในสารละลายที่ เตรียมขึ้นนาน 3 นาที สำหรับชิ้นงานที่เป็น เหล็กและมีผิว เป็นนิ เกิดค่า ก่อนชุบนี เกิดค่าให้ลองพื้นชิ้นงาน ด้วยนิ เกิด เสียก่อน กระแสไฟฟ้าและ เวลาที่เหมาะสมคือ  $3.75 \text{ mA/cm}^2$  และ 10 นาทีตามลำดับ ค่าการ ดูดแสงอาทิตย์และค่าการส่งออกรังสีความร้อนที่ได้คือ 0.942 และ 0.188 ตามลำดับ และสำหรับชิ้น งานที่เป็น เหล็กและมีผิว เป็นแบล็คโครม ก่อนชุบบล็คโครมให้รองพื้นชิ้นงานด้วยนิ เกิด เสียก่อนและถ้าชิ้นงาน ที่เป็นอลูมิเนียมให้ชุบไฟฟ้าชิ้นงานด้วยสังกะสีตามขบวนการของ VOGT[6] เสียก่อนแล้วจึงรองพื้นด้วยนิ เกิด ค่า กระแสไฟฟ้าและ เวลาที่ใช้ในขบวนการชุบที่เหมาะสมคือ  $0.187 \text{ A/cm}^2$  และ 7 นาทีตามลำดับ ค่า การดูดแสงอาทิตย์และค่าการส่งออกรังสีความร้อนที่ได้คือ 0.942 และ 0.112 ตามลำดับ ข้อสรุปของ

การเลือกผิวซีเล็กตีฟชนิดที่เหมาะสมสำหรับมาใช้กับแผ่นดูดแสงอาทิตย์มีดังนี้ สำหรับแผงรับแสงอาทิตย์ที่มีอัตราการผลิตน้อยกว่า 12,000 ตารางเมตรต่อปี ให้ใช้ผิวซีเล็กตีฟแบบนิเกิลดำถ้าชิ้นงานเป็นเหล็กหรืออลูมิเนียม ต้นทุนของการผลิตผิวซีเล็กตีฟแบบนิเกิลดำจะถูกกว่าผิวแบบแบล็คโครม อีกทั้งในวงการอุตสาหกรรมชุบโลหะในประเทศไทยมีการชุบนิกเกิลดำอยู่บ้าง ทำให้ค่าบริการจากอุตสาหกรรมดังกล่าวได้ซึ่งยังจะทำให้ต้นทุนการผลิตแผงรับแสงอาทิตย์ต่ำลงสำหรับผู้ผลิตรายย่อยที่ผลิตแผงรับแสงอาทิตย์ปริมาณน้อย สำหรับการชุบนิกเกิลดำนั้น ต้องควบคุมเวลาที่ใช้ชุบ และกระแสไฟฟ้าที่ใช้ให้เท่ากับค่าที่เหมาะสมตามที่ได้อธิบายมาแล้วมิฉะนั้นแล้วผิวซีเล็กตีฟที่ได้จะให้ค่าการดูดแสงอาทิตย์และค่าการส่งออกรังสีความร้อนสูง แต่ถ้าอัตราการผลิตแผงรับแสงอาทิตย์สูงกว่า 12,000 ตารางเมตรต่อปีแล้ว [7] ราคาต้นทุนการผลิตของแผงรับแสงอาทิตย์แบบที่แผ่นดูดแสงอาทิตย์มีผิว เป็นแบล็คโครมจะลดลงมากซึ่งจะทำให้แผงรับแสงอาทิตย์ที่ผลิตได้สามารถแข่งขันกับแผงรับแสงอาทิตย์ที่มีลักษณะคล้ายกันที่ผลิตได้จากต่างประเทศ จึงควรหันมาใช้ผิวซีเล็กตีฟแบบแบล็คโครม

ในด้านความคงทนต่อการใช้งาน ผิวนิเกิลดำจะคงทนไม่เท่าผิวแบล็คโครม โดยเฉพาะชิ้นงานที่เป็นเหล็ก เมื่อชุบด้วยนิเกิลดำแล้วจะเกิดสนิมได้ง่าย เมื่อวางทิ้งไว้ในอากาศ ผิดกับชิ้นงานที่เป็นเหล็กชุบด้วยแบล็คโครมซึ่งจะเป็นสนิมได้ยากกว่า ดังนั้นก่อนชุบชิ้นงานด้วยนิเกิลดำ และแบล็คโครมจึงต้องชุบไฟฟ้าด้วยนิเกิลเสียก่อน

โดยที่แผงรับแสงอาทิตย์โดยทั่วไปจะมีขนาดประมาณ 2 ตารางเมตร หรือแม้จะนำแผ่นดูดแสงอาทิตย์มาแบ่งออกเป็นชิ้นย่อย เช่นแบ่งเป็น 4 ชิ้นแล้วก็ตาม ค่าใช้จ่ายที่ต้องใช้ในการทำผิวซีเล็กตีฟทั้งแบบนิเกิลดำ และแบล็คโครมจะสูงเกินกว่าที่จะจัดทำขึ้นได้ในงานวิจัยนี้ ดังนั้นการสร้างแผงรับแสงอาทิตย์ที่มีแผ่นดูดแสงอาทิตย์ซึ่งมีผิวเป็นซีเล็กตีฟขึ้นเพื่อใช้ในการทดสอบจึงไม่อาจทำได้ วิธีจำลองแบบได้ถูกนำมาใช้โดยการออกแบบและสร้างแผงรับแสงอาทิตย์แบบที่มีผิวของแผ่นดูดแสงอาทิตย์เป็นสีดำขึ้นแทน แล้วทำการทดสอบหาตัวประกอบของแผงรับแสงอาทิตย์ที่ไม่อาจคำนวณได้ เช่นค่าบอนด์คอนดัคแทน และค่าการสูญเสียความร้อนของแผงรับแสงอาทิตย์ เป็นต้น แล้วใช้วิธีทางคณิตศาสตร์เปลี่ยนตัวประกอบดังกล่าวให้เป็นตัวประกอบของแผงรับแสงอาทิตย์ที่มีแผ่นดูดเป็นซีเล็กตีฟ ทำให้เส้นประสิทธิภาพเชิงความร้อนของแผงรับแสงอาทิตย์แบบที่มีแผ่นดูดเป็นซีเล็กตีฟถูกสร้างขึ้นและได้แสดงเปรียบเทียบไว้กับ เส้นประสิทธิภาพเชิงความร้อนของแผงรับแสงอาทิตย์แบบที่แผ่นดูดแสงอาทิตย์เป็นสีดำดังแสดงในรูปที่ 4.9 แผงรับแสงอาทิตย์แบบที่มีผิวของแผ่นดูดแสงอาทิตย์เป็นซีเล็กตีฟมีข้อดีหลายประการคือ ประการแรกค่าความลาดชันของเส้นประสิทธิภาพเชิงความร้อนมีค่าประมาณ 4.89 ซึ่งต่ำกว่าค่าความลาดชันของเส้นประสิทธิภาพเชิงความร้อนของแผงรับแสงอาทิตย์แบบที่มีผิวของแผ่นดูดแสงอาทิตย์เป็นสีดำซึ่งมีค่าเท่ากับ 7.11 ทำให้แผงรับแสงอาทิตย์แบบแรกสามารถผลิตน้ำ-

ร้อนได้ที่อุณหภูมิสูงกว่าแผงรับแสงอาทิตย์แบบหลังที่สภาพใช้งานเดียวกันซึ่งได้แก่อัตราการไหลของน้ำผ่านแผงรับแสงอาทิตย์ ความเข้มของแสงอาทิตย์ และการติดตั้งแผงรับแสงอาทิตย์ ตัวอย่างเช่นที่ความเข้มของแสงอาทิตย์เท่ากับ  $450 \text{ Watt/m}^2$  อุณหภูมิของน้ำเข้าแผงรับแสงอาทิตย์เท่ากับ  $80^\circ\text{C}$  และอุณหภูมิของบรรยากาศเท่ากับ  $32^\circ\text{C}$  ทำให้  $(t_i - t_a)/I = 0.106$  ที่สภาพการใช้งานดังกล่าว ถ้าใช้แผงรับแสงอาทิตย์ที่มีแผ่นดูด เป็นซี เล็กติฟจะ ให้ประสิทธิภาพเชิงความร้อนเท่ากับ 26% แต่ถ้าใช้แผงรับแสงอาทิตย์ที่มีผิวของแผ่นดูดแสงอาทิตย์ เป็นสีดำแล้วจะให้ประสิทธิภาพเชิงความร้อนเท่ากับ 0% แผงรับแสงอาทิตย์แบบแผ่นดูดมีผิว เป็นซี เล็กติฟจึง เหมาะสมที่นำไปใช้สำหรับการผลิตน้ำร้อนอุณหภูมิสูง เช่นในระบบปรับอากาศแบบดูดซึม เป็นต้น ประการที่สองแผ่นดูดแสงอาทิตย์ที่มีผิว เป็นซี เล็กติฟจะมีคุณสมบัติดูดแสงอาทิตย์และส่งออกรังสีความร้อนไม่เปลี่ยนแปลง ในขณะที่แผ่นดูดแสงอาทิตย์ที่มีผิว เป็นสีดำจะให้คุณสมบัติการดูดแสงอาทิตย์ลดลงมาก เมื่อกำหนดนำไปใช้งานนานๆ เช่นถ้าใช้ซี เล็กติฟก็จะให้อายุการใช้งานของแผ่นดูดแสงอาทิตย์ประมาณ 4 ปี และต้องซ่อมแซมสีดำ เพื่อให้ค่าการดูดแสงอาทิตย์มีค่าสูง เหมือนเดิม เป็นต้น

#### ข้อเสนอแนะ

ควรจะได้มีการศึกษาและทำการชูปแผ่นดูดแสงอาทิตย์ขนาดเท่าที่จะนำไปใช้งาน หรือถ้ามีโรงงานที่รับชูปไฟฟ้าอยู่แล้วก็ให้ใช้บริการดังกล่าว เพื่อจะได้ เป็นแนวทางสำหรับการตัดสินใจของผู้ผลิตแผงรับแสงอาทิตย์ในประเทศที่จะหันมาใช้แผ่นดูดแสงอาทิตย์ชนิดที่มีผิว เป็นซี เล็กติฟ ซึ่งถ้าแผงรับแสงอาทิตย์ที่ผลิตในประเทศใช้แผ่นดูดแสงอาทิตย์แบบที่มีผิว เป็นซี เล็กติฟ ก็จะทำให้แผงรับแสงอาทิตย์ที่ผลิตในประเทศแข่งขันในด้านประสิทธิภาพกับแผงรับแสงอาทิตย์ชั้นดีของต่างประเทศที่นำเข้ามาจำหน่ายอยู่ในขณะนี้ นอกจากนี้ถ้าทำให้ต้นทุนการผลิตและราคาจำหน่ายของแผงรับแสงอาทิตย์แบบที่มีผิวของแผ่นดูดแสงอาทิตย์ เป็นซี เล็กติฟถูก ก็จะเป็นหนทางที่จะนำแผงรับแสงอาทิตย์ไปผลิตน้ำร้อนสำหรับใช้ในอุตสาหกรรมได้ ซึ่งจะช่วยให้ตลาดของแผงรับแสงอาทิตย์ขยายออกไปได้อีกมาก



## เอกสารอ้างอิง

- 1 Duffie, J. A. and Beckman, W. A., Solar energy Thermal Processes, John Wiley & Sons, New York, 1974 .
- 2 Meinel, A. B., et al., Report: NSF/RANN/SE/GI-41895/PR/74/4. "Air-Stable Selective Surfaces for Solar Energy Collector."
- 3 Meinel, A. B. and Meinel, M. P. "Applied Solar Energy" Addison-Wesley Publishing Company, 1977
- 4 Tabor, H., Low Temperature Energy Application of Solar Energy, New York, ASHRAE 1967. "Selective Surface for Solar Collectors"
- 5 Kreith, F. and Black, W.Z. "Basic Heat Transfer," Harper & Row, Publishers, New York, 1980.
- 6 J. K. Dennis and T. E. Such, Nickel and Chromium Plating, Newnes-Butterworths, London, 1972
- 7 ไพรัช แก้วสกุล, ศิริจันทร์ ทองประเสริฐ และ มานิจ ทองประเสริฐ "การลงทุนตั้งโรงงานผลิตแผงรับแสงอาทิตย์" วิศวกรรมสาร 34(ธันวาคม 2524)

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

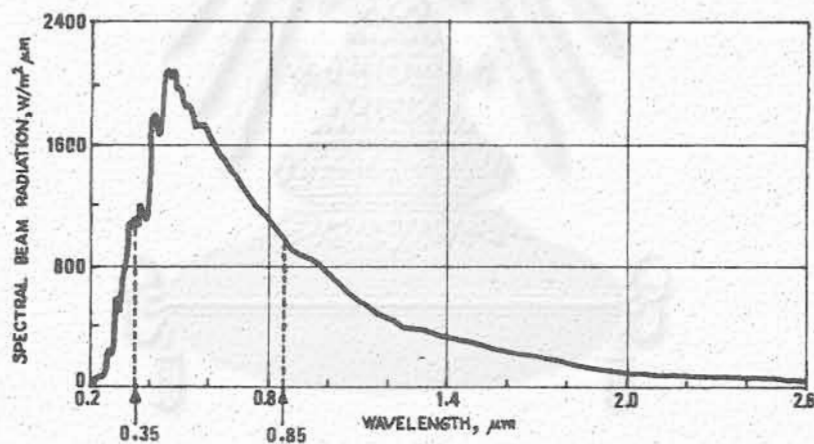
$A$	พื้นที่
$C_b$	บอนด์คอนตัทแทน
$C_p$	ความร้อนจำเพาะของของไหล
$D$	เส้นผ่านศูนย์กลางท่อ
$D_\lambda$	สัดส่วนของพลังงานที่ส่งออกจากวัตถุที่อุณหภูมิ $T$ ที่ความยาวคลื่น 0 ถึง $\lambda$ ต่อพลังงานที่ส่งออกทั้งหมดจากวัตถุ (ความยาวคลื่น 0 ถึง $\infty$ ) ที่อุณหภูมิเดียวกัน
$e, e_b$	พลังงานที่ส่งออก และพลังงานที่ส่งออกจากวัตถุตามลำดับ
$F$	สัมประสิทธิ์พื้น
$F_R$	ตัวประกอบของการถ่ายเทความร้อนจากแผ่รังสีไปยังของไหลทำงาน
$G$	เอเริติเอชัน หรืออัตราการไหลของของไหลต่อหน่วยพื้นที่แผ่รังสีอาทิตย์
$h, h_f$	สัมประสิทธิ์ฟิล์ม
$H$	อัตราพลังงานแผ่รังสีอาทิตย์ที่ตกบนระนาบที่ติดตั้งอุปกรณ์วัดแผ่รังสีอาทิตย์
$I_\lambda, I$	ความเข้มของรังสีเอกรังค์ และความเข้มของรังสีทั้งหมด
$I_b$	ความเข้มของรังสีจากวัตถุ
$k$	สัมประสิทธิ์การนำความร้อน
$K$	สัมประสิทธิ์การสูญเสีย
$L$	ความหนา
$N$	จำนวนชั้นของกระจก
$Q_t, Q_{cr}, Q_{cc}$	อัตราพลังงานสูญเสียทั้งหมด, ที่สูญเสียจากชั้นงานโดยการแผ่รังสีผ่านตัวยึดชั้นงาน และที่สูญเสียโดยการนำผ่านตัวยึดชั้นงาน
$Q_s, Q_f, Q_{st}$	อัตราพลังงานที่ส่งผ่านฮีทฟลักมิเตอร์, ที่สูญเสียจากชั้นงาน และที่สะสมในชั้นงาน
$R$	ตัวประกอบ เปลี่ยนอัตราพลังงานแผ่รังสีอาทิตย์จากระนาบซึ่งติดตั้ง เครื่องมือวัดแผ่รังสีอาทิตย์ไปยังระนาบที่ติดตั้งชั้นงาน
$t, T$	อุณหภูมิ

$t_i, t_a$	อุณหภูมิของของไหลทำงานเข้าแผงรับแสงอาทิตย์ และอุณหภูมิบรรยากาศตามลำดับ
$U_L, U_t$	สัมประสิทธิ์การสูญเสียความร้อนทั้งหมด และสัมประสิทธิ์การสูญเสียความร้อนทางด้านบนตามลำดับ
$V$	ความเร็ว
$W$	ระยะห่างระหว่างท่อ
$\alpha_\lambda, \alpha$	การดูดรังสีเอกรังสี และการดูดรังสีทั้งหมดตามลำดับ
$\Delta W$	มุมโพลิด
$\phi$	มุมอาซิมุท
$\epsilon$	ค่าการส่งออกรังสี
$\lambda$	ความยาวคลื่น
$\rho$	การสะท้อน
$\mu$	โคซายของมุมโพลา
$\sigma$	ค่าคงที่ของโบลซ์มานน์
$\tau$	การผ่านทะลุ
$\theta$	มุมตกหรือมุมหักเหของลำแสง
$(\tau\alpha)$	ผลคูณของค่าการผ่านทะลุของกระจกปิดบนและค่าการดูดแสงอาทิตย์ของชิ้นงาน (หรือแผ่นดูดแสงอาทิตย์)

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

การหาค่าการดูดรังสีทั้งหมดจากค่าการสะท้อนรังสีเอกรงค์  
ซึ่งอ่านได้จากเครื่อง UV-Visible Spectrometer

รังสีที่ส่งจากดวงอาทิตย์มีลักษณะตามที่แสดงในรูปที่ ข.1 ความยาวคลื่นที่รังสีดังกล่าวครอบคลุมคือจาก 0 ไมครอน ถึงความยาวคลื่นอนันต์ การสร้างอุปกรณ์ก่าเหน็ดรังสีให้เรียบแบบรังสีจากดวงอาทิตย์ โดยให้รังสีที่สร้างขึ้นมีความยาวคลื่นเช่นเดียวกับแสงอาทิตย์จะทำได้ไม่ในทางปฏิบัติ แต่อาจสร้างรังสีเรียบแบบขึ้นให้ครอบคลุมเฉพาะบางความยาวคลื่นเท่านั้น สำหรับ เครื่อง UV-Visible Spectrometer, model DMS 80, Verion Techtron Pty, Australia จะสร้างรังสี UV-Visible ได้สำหรับช่วงความยาวคลื่น .325  $\mu\text{m}$  ถึงความยาวคลื่น .875  $\mu\text{m}$  เท่านั้น ดังนั้นการหาค่าการดูดแสงอาทิตย์ของชิ้นงานโดยใช้เครื่องมือดังกล่าวต้องทำเป็น 2 ขั้นตอนคือ หาค่าการดูดแสงอาทิตย์ในช่วงความยาวคลื่น 0.325  $\mu\text{m}$  - 0.875  $\mu\text{m}$  แล้วจึงเปลี่ยนค่าการดูดแสงอาทิตย์ที่ได้ไปเป็นค่าการดูดแสงอาทิตย์ สมการที่ใช้คือ



รูปที่ ข.1 สเปกตรัมของแสงอาทิตย์

สมการสำหรับคำนวณค่าการดูดแสงอาทิตย์ในช่วงความยาวคลื่น 0.325  $\mu$  - 0.875  $\mu$

$$\alpha_{0.325-0.875} = \frac{\int_{0.325}^{0.875} \alpha_{\lambda} I_{\lambda,i} d\lambda}{\int_{0.325}^{0.875} I_{\lambda,i} d\lambda} \quad (\text{ข.1})$$

สมการ(ข.1) อาจเปลี่ยนให้อยู่ในรูปของการสะท้อนรังสีเอกรงค์  $\rho_{\lambda}$  ได้คือ

$$\alpha_{0.325-0.875} = \frac{\int_{0.325}^{0.875} (1-\rho_{\lambda}) I_{\lambda,i} d\lambda}{\int_{0.325}^{0.875} I_{\lambda,i} d\lambda} \quad (\text{ข.2})$$

เมื่อ  $\rho_\lambda$  = ค่าการสะท้อนรังสีเอกรงค์ซึ่งอ่านได้จาก UV-Visible Spectrometer

โดยการใช้สมมติฐานว่า ค่าการดูดแสงอาทิตย์ทั้งหมดเท่ากับค่าการดูดรังสีในช่วงความยาวคลื่น 0.325-0.675  $\mu\text{m}$  ดังนั้น

$$\alpha = \alpha_{0.325-0.675 \mu\text{m}} \quad (\text{ข.3})$$

เมื่อ  $\alpha$  = ค่าการดูดแสงอาทิตย์ทั้งหมด

#### ตัวอย่างการคำนวณค่าการดูดแสงอาทิตย์

ชิ้นงานอลูมิเนียม มีนิกเกิลลงพื้น และผิวเป็นแบล็กโครม โดยใช้ UV-Visible Spectrometer อ่านค่าการดูดรังสีเอกรงค์ได้ดังนี้

ความยาวคลื่น ไมครอน	.350	.400	.450	.500	.550	.600	.650	.700	.750	.800	.850
$\rho_\lambda \times 10^{-2}$	5.8	5.9	6.2	6.2	6.1	5.9	5.7	5.5	5.3	5.3	5.1

สำหรับรังสี UV-Visible ที่ความยาวคลื่นระหว่าง  $\lambda_0$  ถึง  $\lambda_1$  จะเป็นสัดส่วนกับพลังงานแสงอาทิตย์ทั้งหมด ค่าของสัดส่วนดังกล่าวแสดงในตารางข้างล่างนี้

ช่วงความยาวคลื่น $\lambda_0 - \lambda_1$ , ไมครอน	.325-.375	.375-.425	.425-.475	.475-.525	.525-.575	.575-.625
$D_\lambda \times 10^{+6}$	51129	61886	67055	67757	65408	61260
	.625-.675	.675-.725	.725-.775	.775-.825	.825-.875	
	56230	50930	45728	40830	36339	

โดยการใช้ค่า  $\rho_\lambda$  และ  $D_\lambda$  จากตารางข้างต้น และสมการ(ข.1) ค่าการดูดแสงอาทิตย์คำนวณได้

$$\alpha = \frac{[(1-\rho_\lambda)D_\lambda]_{.325 \leq \lambda \leq .375} + [(1-\rho_\lambda)D_\lambda]_{.375 \leq \lambda \leq .425} + \dots + [(1-\rho_\lambda)D_\lambda]_{.825 \leq \lambda \leq .875}}{\int_{0.325}^{0.875} I_{\lambda, i} d\lambda}$$

$$\alpha = \frac{[(1-0.058)0.051125 + (1-0.059)0.061886 + \dots + (1-0.051)0.036339]}{0.051129 + 0.061886 + \dots + 0.036639}$$

$$= \frac{(0.048159 + 0.05823 + \dots + 0.03448)}{0.6045} = 0.941$$