

## ภาคผนวก ก Powder-Diffract-File จากฐานข้อมูล JCPDS-ICDD

### Name and formula

Reference code: 00-001-1176  
PDF index name: Aluminum  
Empirical formula: Al  
Chemical formula: Al

### Crystallographic parameters

Crystal system: Cubic  
Space group: Fm3m  
Space group number: 225

a (Å): 4.0406  
b (Å): 4.0406  
c (Å): 4.0406  
Alpha (Å): 90.0000  
Beta (Å): 90.0000  
Gamma (Å): 90.0000

Measured density (g/cm<sup>3</sup>): 2.69  
Volume of cell (10<sup>6</sup> pm<sup>3</sup>): 65.97  
Z: 4.00

RIR: -

Status, subfiles and quality

Status: Marked as deleted by ICDD  
 Subfiles: Inorganic  
 Quality: Blank (B)

Comments

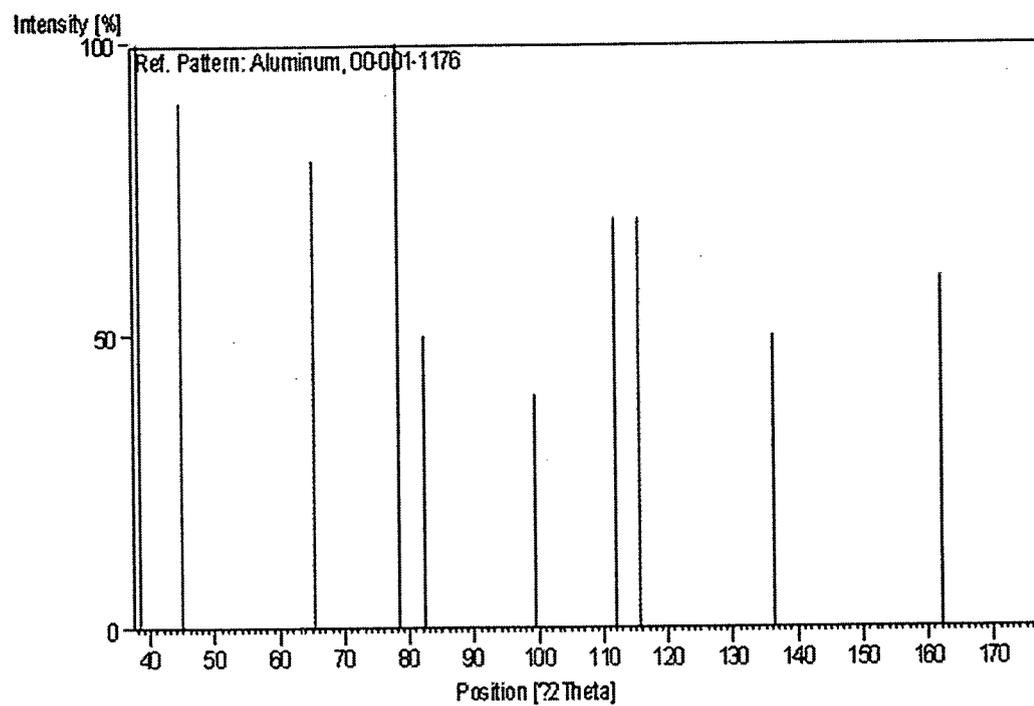
Deleted by: Deleted by NBS card.  
 Color: White  
 Melting point: 660

References

Primary reference: Davey., *Phys. Rev.*, 25, 753, (1925)  
 Optical data: *Data on Chem. for Cer. Use, Natl. Res. Council Bull.*  
 107  
 Unit cell: *The Structure of Crystals, 1st Ed.*

Peak list

No.	h	k	l	d [Å]	2Theta[deg]	I [%]
1	1	1	1	2.34000	38.439	100.0
2	2	0	0	2.02000	44.833	90.0
3	2	2	0	1.43000	65.186	80.0
4	3	1	1	1.22000	78.306	100.0
5	2	2	2	1.17000	82.352	50.0
6	4	0	0	1.01000	99.401	40.0
7	3	3	1	0.93000	111.845	70.0
8	4	2	0	0.91000	115.662	70.0
9	4	2	2	0.83000	136.273	50.0
10	5	1	1	0.78000	161.909	60.0
11				0.72000		20.0

Stick Pattern

Name and formula

Reference code: 00-001-1305  
 PDF index name: Aluminum Oxide  
 Empirical formula:  $\text{Al}_2\text{O}_3$   
 Chemical formula:  $\text{Al}_2\text{O}_3$

Crystallographic parameters

Crystal system: Unknown  
 RIR: -

Status, subfiles and quality

Status: Marked as deleted by ICDD  
 Subfiles: Inorganic  
 Quality: Blank (B)

Comments

Deleted by: similar to 4-878.  
 General comments: Aluminum Research Lab.

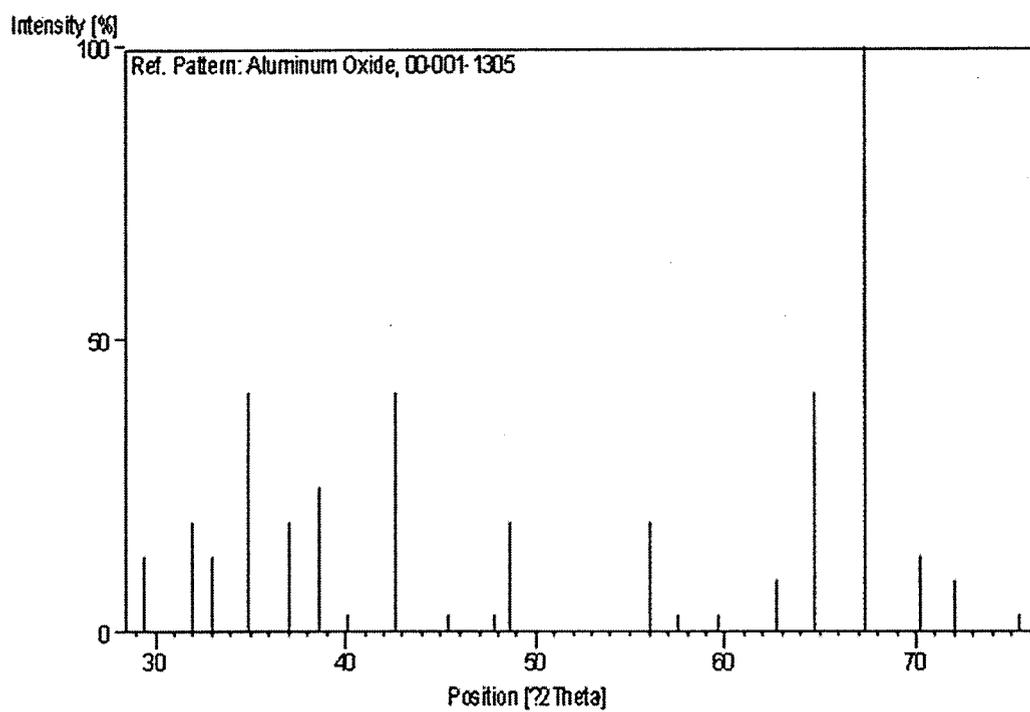
References

Primary reference: Alumnum Co. of America, New Kensintgon, PA, USA.,  
*Private Communication*

Peak list

No.	h	k	l	d [Å]	2Theta[deg]	I [%]
1				3.03000	29.455	13.0
2				2.80000	31.937	19.0
3				2.71000	33.027	13.0
4				2.57000	34.882	41.0
5				2.43000	36.963	19.0

6	2.33000	38.610	25.0
7	2.25000	40.041	3.0
8	2.12000	42.612	41.0
9	2.00000	45.306	3.0
10	1.90000	47.835	3.0
11	1.87000	48.652	19.0
12	1.64000	56.029	19.0
13	1.60000	57.559	3.0
14	1.55000	59.599	3.0
15	1.48000	62.728	9.0
16	1.44000	64.678	41.0
17	1.39000	67.307	100.0
18	1.34000	70.178	13.0
19	1.31000	72.033	9.0
20	1.26000	75.374	3.0

Stick Pattern

**Name and formula**

Reference code: 00-001-1260  
PDF index name: Nickel  
Empirical formula: Ni  
Chemical formula: Ni

**Crystallographic parameters**

Crystal system: Cubic  
Space group: Fm3m  
Space group number: 225  
  
a (Å): 3.5175  
b (Å): 3.5175  
c (Å): 3.5175  
Alpha (Å): 90.0000  
Beta (Å): 90.0000  
Gamma (Å): 90.0000

Measured density (g/cm<sup>3</sup>): 8.90  
Volume of cell (10<sup>6</sup> pm<sup>3</sup>): 43.52  
Z: 4.00

RIR: -

**Status, subfiles and quality**

Status: Marked as deleted by ICDD  
Subfiles: Inorganic  
Quality: Blank (B)

Comments

Deleted by: Deleted by NBS card.

Color: White

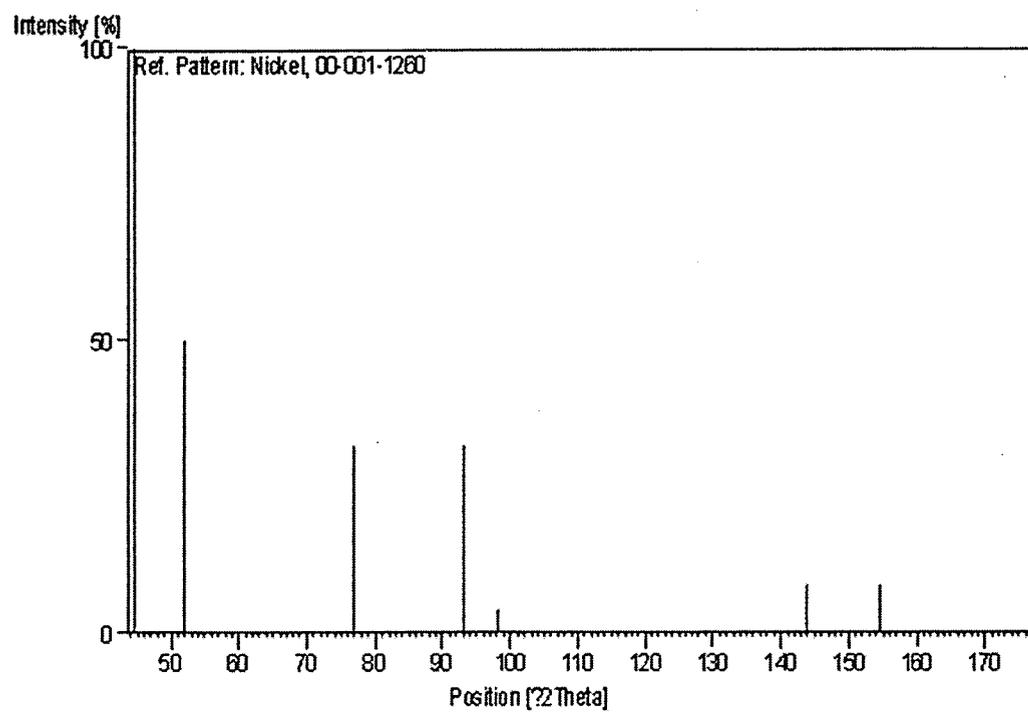
Melting point: 1455

ReferencesPrimary reference: Hanawalt et al., *Anal. Chem.*, **10**, 475, (1938)Optical data: *Data on Chem. for Cer. Use, Natl. Res. Council Bull.*

107

Unit cell: *The Structure of Crystals, 1st Ed.*Peak list

No.	h	k	l	d [Å]	2Theta[deg]	I [%]
1	1	1	1	2.03000	44.600	100.0
2	2	0	0	1.76000	51.911	50.0
3	2	2	0	1.24000	76.809	32.0
4	3	1	1	1.06000	93.221	32.0
5	2	2	2	1.02000	98.085	4.0
6	3	3	1	0.81000	143.974	8.0
7	4	2	0	0.79000	154.356	8.0
8	4	2	2	0.72000		8.0
9	5	1	1	0.68000		8.0

Stick Pattern

**Name and formula**

Reference code: 00-001-1239  
Mineral name: Bunsenite  
PDF index name: Nickel Oxide  
Empirical formula: NiO  
Chemical formula: NiO

**Crystallographic parameters**

Crystal system: Cubic  
Space group: Fm3m  
Space group number: 225  
  
a (Å): 4.1710  
b (Å): 4.1710  
c (Å): 4.1710  
Alpha (Å): 90.0000  
Beta (Å): 90.0000  
Gamma (Å): 90.0000

Measured density (g/cm<sup>3</sup>): 6.80  
Volume of cell (10<sup>6</sup>pm<sup>3</sup>): 72.56  
Z: 4.00

RIR: -

**Status, subfiles and quality**

Status: Marked as deleted by ICDD  
Subfiles: Inorganic  
Mineral  
Quality: Blank (B)

Comments

Deleted by: Deleted by NBS card.

Color: Green

Optical data: B=2.37

Melting point: 1955

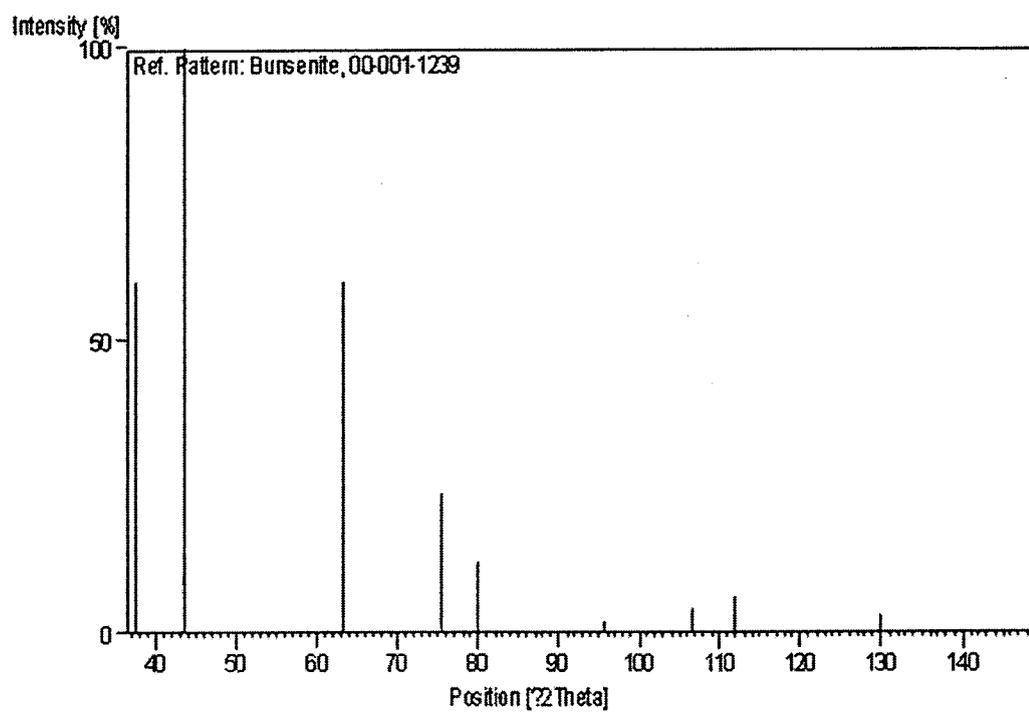
References

Primary reference: Hanawalt et al., *Anal. Chem.*, **10**, 475, (1938)

Unit cell: *Dana's System of Mineralogy, 7th Ed.*

Peak list

No.	h	k	l	d [Å]	2Theta[deg]	I [%]
1	1	1	1	2.40000	37.442	60.0
2	2	0	0	2.08000	43.473	100.0
3	2	2	0	1.47000	63.204	60.0
4	3	1	1	1.26000	75.374	24.0
5	2	2	2	1.20000	79.870	12.0
6	4	0	0	1.04000	95.578	2.0
7	3	3	1	0.96000	106.719	4.0
8	4	2	0	0.93000	111.845	6.0
9	4	2	2	0.85000	129.980	3.0
10	5	1	1	0.80000	148.678	2.0

Stick Pattern

ภาคผนวก ข ค่าการดูดกลืนรังสีอาทิตย์

ตาราง 14 การคำนวณค่าการดูดกลืนรังสีอาทิตย์ ของฟิล์มอะลูมิเนียมหนา 16 ไมโครเมตร

wavelength	Direct circumsolar	$I_{sol}$	Reflectance	$1-R(\lambda)$	intigrate $I_{sol}*(1-R(\lambda))$	intigrate Isol	Absorptance	Absorptance*Isol
nm	$W*m^{-2}*nm^{-1}$	$W*m^{-2}$	(1)				(%)	(%)
$\lambda$	$I_{sol}$	$I_{sol}(\lambda)$	R		$\int I_{sol}(1-R(\lambda))d\lambda$	$\int I_{sol}(\lambda)d\lambda$	$\alpha$	$\alpha \cdot I_{sol}$
300	4.56E-04	1.52E-06	0.0145	0.9855				
301	9.19E-04	3.05E-06	0.0152	0.9848	3.01E-06	3.05E-06	98.4757	9.05E-04
302	1.46E-03	4.82E-06	0.0161	0.9839	4.75E-06	4.82E-06	98.3887	1.43E-03
303	3.73E-03	1.23E-05	0.0170	0.9830	1.21E-05	1.23E-05	98.2956	3.67E-03
304	5.10E-03	1.68E-05	0.0180	0.9820	1.65E-05	1.68E-05	98.1979	5.01E-03
305	8.93E-03	2.93E-05	0.0190	0.9810	2.87E-05	2.93E-05	98.0957	8.76E-03
306	1.02E-02	3.32E-05	0.0201	0.9799	3.25E-05	3.32E-05	97.9858	9.95E-03
307	1.52E-02	4.97E-05	0.0212	0.9788	4.86E-05	4.97E-05	97.8775	1.49E-02
308	2.08E-02	6.74E-05	0.0224	0.9776	6.59E-05	6.74E-05	97.7631	2.03E-02
309	2.23E-02	7.22E-05	0.0235	0.9765	7.05E-05	7.22E-05	97.6471	2.18E-02
310	2.78E-02	8.98E-05	0.0247	0.9753	8.75E-05	8.98E-05	97.5281	2.71E-02
311	4.54E-02	1.46E-04	0.0259	0.9741	1.42E-04	1.46E-04	97.4075	4.42E-02

ตาราง 14 (ต่อ)

wavelength	Direct circumsolar	$I_{sol}$	Reflectance	$1-R(\lambda)$	intigrate $I_{sol}*(1-R(\lambda))$	intigrate Isol	Absorptance	Absorptance*Isol
nm	$W*m^{-2}*nm^{-1}$	$W*m^{-2}$	(1)				(%)	(%)
$\lambda$	$I_{sol}$	$I_{sol}(\lambda)$	$R$		$\int I_{sol}(1-R(\lambda))d\lambda$	$\int I_{sol}(\lambda)d\lambda$	$\alpha$	$\alpha \cdot I_{sol}$
312	5.09E-02	1.63E-04	0.0271	0.9729	1.59E-04	1.63E-04	97.2885	4.95E-02
313	5.83E-02	1.86E-04	0.0283	0.9717	1.81E-04	1.86E-04	97.1680	5.67E-02
.	.	.	.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.	.	.	.
2465	2.40E-02	9.74E-06	0.1303	0.8697	2.09E-02	2.40E-02	86.9721	2.09E-02
2470	1.66E-02	6.73E-06	0.1305	0.8695	2.93E-05	3.37E-05	86.9492	1.45E-02
2475	1.64E-02	6.61E-06	0.1307	0.8693	2.87E-05	3.31E-05	86.9278	1.42E-02
2480	8.00E-03	3.23E-06	0.1316	0.8684	1.40E-05	1.61E-05	86.8439	6.95E-03
2485	5.58E-03	2.25E-06	0.1315	0.8685	9.76E-06	1.12E-05	86.8469	4.85E-03
2490	3.50E-03	1.40E-06	0.1316	0.8684	6.10E-06	7.02E-06	86.8408	3.04E-03
2495	2.86E-03	1.15E-06	0.1320	0.8680	4.98E-06	5.74E-06	86.7966	2.49E-03
2500	7.03E-03	2.81E-06	0.1331	0.8669	1.22E-05	1.41E-05	86.6882	6.10E-03
		<b>รวม</b>			<b>1.1900</b>	<b>1.2562</b>	<b>0.9473</b>	

ภาคผนวก ค ประสิทธิภาพตัวเก็บรังสีอาทิตย์

ตาราง 15 ข้อมูลสำหรับคำนวณประสิทธิภาพตัวเก็บรังสีอาทิตย์ที่ประยุกต์ใช้  
แผ่นอะลูมิเนียมอะโนไดซ์ความหนา 16 ไมโครเมตร

พื้นที่ตัวเก็บรังสีอาทิตย์ 1.08 ตารางเมตร  
อัตราการไหล 0.0213-0.0218 Kg/s

$T_{in} (C)$	$T_{out} (C)$	$T_{am} (C)$	$G_t (W/m^2)$	$(T_{in} - T_{am})/G_t$	$\eta$
36.35	40.64	32.0576	800.88	0.0054	0.7280
36.35	40.64	32.0576	800.88	0.0054	0.7280
36.22	40.46	31.9249	807.25	0.0053	0.7220
36.22	40.46	31.9249	807.25	0.0053	0.7220
36.23	40.42	31.6909	804.25	0.0056	0.7201
36.23	40.42	31.6909	804.25	0.0056	0.7201
36.26	40.39	31.7576	801.48	0.0056	0.7024
36.26	40.39	31.7576	801.48	0.0056	0.7024
36.33	40.28	31.7564	811.75	0.0056	0.7005
36.33	40.28	31.7564	811.75	0.0056	0.7005
36.33	40.28	31.7564	811.75	0.0056	0.7005
36.33	40.28	31.7564	811.75	0.0056	0.7005
36.19	40.42	31.8111	806.02	0.0054	0.6940
36.19	40.42	31.8111	806.02	0.0054	0.6940
36.19	40.42	31.8111	806.02	0.0054	0.6940
36.19	40.42	31.8111	806.02	0.0054	0.6940
36.39	40.76	31.9753	801.50	0.0055	0.6921
36.39	40.76	31.9753	801.50	0.0055	0.6921
36.39	40.76	31.9753	801.50	0.0055	0.6921
36.39	40.76	31.9753	801.50	0.0055	0.6921
40.89	44.49	32.6719	810.03	0.0102	0.6479
40.86	44.52	32.3720	812.75	0.0104	0.6474

ตาราง 15 (ต่อ)

$T_{in}$ (C)	$T_{out}$ (C)	$T_{am}$ (C)	$G_t$ (W/m <sup>2</sup> )	$(T_{in}-T_{am})/G_t$	$\eta$
40.91	44.57	32.3350	812.45	0.0105	0.6471
40.80	44.58	32.4998	809.43	0.0102	0.6463
40.92	44.49	32.7857	809.15	0.0101	0.6446
40.94	44.51	32.6380	809.52	0.0103	0.6445
40.98	44.52	32.5065	810.72	0.0104	0.6444
40.98	44.57	32.5612	812.37	0.0104	0.6431
40.88	44.56	32.4588	815.35	0.0103	0.6431
40.88	44.58	32.3337	813.74	0.0105	0.6427
40.89	44.48	32.4074	810.97	0.0105	0.6426
40.84	44.48	32.5860	810.33	0.0102	0.6409
40.89	44.37	32.4288	805.72	0.0105	0.6407
40.97	44.54	32.5591	812.65	0.0103	0.6407
40.85	44.48	32.5481	811.04	0.0102	0.6398
40.87	44.56	32.4304	826.51	0.0102	0.6397
40.84	44.52	32.4077	814.34	0.0103	0.6394
40.84	44.53	32.4472	809.54	0.0104	0.6392
40.82	44.34	32.4438	807.35	0.0104	0.6387
40.82	44.55	32.5221	819.33	0.0101	0.6382
45.39	48.47	32.8979	804.57	0.0155	0.5469
45.39	48.47	32.8979	804.57	0.0155	0.5469
45.42	48.46	32.7481	801.67	0.0158	0.5458
45.42	48.46	32.7481	801.67	0.0158	0.5458
45.43	48.48	32.6245	805.79	0.0159	0.5451
45.43	48.48	32.6245	805.79	0.0159	0.5451
45.38	48.39	32.9930	804.14	0.0154	0.5433
45.38	48.39	32.9930	804.14	0.0154	0.5433

ตาราง 15 (ต่อ)

$T_{in}$ (C)	$T_{out}$ (C)	$T_{am}$ (C)	$G_t$ (W/m <sup>2</sup> )	$(T_{in}-T_{am})/G_t$	$\eta$
45.38	48.49	33.0569	801.40	0.0154	0.5402
45.38	48.49	33.0569	801.40	0.0154	0.5402
45.50	48.47	33.0594	802.36	0.0155	0.5397
45.50	48.47	33.0594	802.36	0.0155	0.5397
45.58	48.55	33.1670	806.11	0.0154	0.5395
45.41	48.46	32.7212	824.86	0.0154	0.5394
45.47	48.44	33.0888	803.00	0.0154	0.5378
45.47	48.47	32.6096	810.65	0.0159	0.5378
45.32	48.32	32.7787	810.78	0.0155	0.5348
45.50	48.38	33.0074	803.05	0.0156	0.5272
45.50	48.38	33.0074	803.05	0.0156	0.5272
45.34	48.33	32.7395	807.16	0.0156	0.5271
50.42	52.79	33.3686	812.99	0.0210	0.4361
50.30	52.77	33.0530	819.95	0.0210	0.4359
50.43	52.76	33.0034	815.65	0.0214	0.4359
50.31	52.78	33.1765	808.19	0.0212	0.4357
50.45	52.85	33.3973	811.25	0.0210	0.4351
50.35	52.78	33.1258	806.24	0.0214	0.4336
50.30	52.72	33.0111	808.25	0.0214	0.4316
50.40	52.75	33.3101	802.27	0.0213	0.4297
50.34	52.72	33.2019	807.89	0.0212	0.4295
50.48	52.79	33.3655	804.87	0.0213	0.4290
50.48	52.85	33.4123	800.09	0.0213	0.4284
50.32	52.76	33.1089	807.76	0.0213	0.4281
50.44	52.80	33.0995	808.47	0.0214	0.4271
50.48	52.83	33.2994	813.33	0.0211	0.4256



ภาคผนวก ง พลังงานรายปี

กำหนดค่าพารามิเตอร์ ดังนี้

$$\begin{array}{llll}
 T_a & = 30 & T_i & = 35 & T_o & = 60 \\
 T_m = (T_i + T_o) / 2 & = 47.5 & T_m - T_a & = 17.5 & G_T (W/m^2) & = 800 \\
 E (kWh/m^2) & = 1800 & Tm^* = (t_m - t_a) / G_t & = 0.02188 & Tm^{*2} & = 0.000479
 \end{array}$$

\* E = ค่าพลังงานแสงอาทิตย์เฉลี่ยรายปีของประเทศไทย (ที่มา พพ.)

ตาราง 16 รายละเอียดการคำนวณพลังงานรายปี

ชื่อ	สมการ	$\eta_o$	$F_R U_L$	$(T_i - T_a) / G_t$	Eff	พลังงานรายปี (kWh/m <sup>2</sup> )
<b>ตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบประยุกต์อะลูมิเนียมอะโนไดซ์</b>						
11	$\eta = 0.7169 - 15.6591(T_i - T_a) / G_t$	0.71	15.66	0.00625	0.61	1101.83
12	$\eta = 0.7222 - 15.8255(T_i - T_a) / G_t$	0.72	15.83	0.00625	0.62	1117.91
16	$\eta = 0.8182 - 18.5618(T_i - T_a) / G_t$	0.81	18.56	0.00625	0.69	1249.20

ตาราง 16 (ต่อ)

ชื่อ	สมการ	$\eta_o$	$F_R U_L$	$(T_i - T_a)/G_t$	Eff	พลังงานรายปี (kWh/m <sup>2</sup> )
<b>ตัวรับรังสีอาทิตย์แบบแผ่นเรียบ</b>						
Company A	$\eta = 0.57 - 21.91(T_i - T_a)/G_t$	0.57	21.91	0.00625	0.43	779.51
Company B	$\eta = 0.62 - 10.37(T_i - T_a)/G_t$	0.62	10.37	0.00625	0.56	999.34
Company C	$\eta = 0.64 - 16.24(T_i - T_a)/G_t$	0.64	16.24	0.00625	0.54	969.30
Company D	$\eta = 0.45 - 3.60(T_i - T_a)/G_t$	0.45	3.60	0.00625	0.43	769.50
Company E	$\eta = 0.65 - 21.81(T_i - T_a)/G_t$	0.65	21.81	0.00625	0.51	924.64
Company F	$\eta = 0.65 - 9.23(T_i - T_a)/G_t$	0.65	9.23	0.00625	0.59	1066.16
Company G	$\eta = 0.66 - 8.40(T_i - T_a)/G_t$	0.66	8.40	0.00625	0.61	1093.50
Company H	$\eta = 0.88 - 8.84(T_i - T_a)/G_t$	0.88	8.84	0.00625	0.82	1484.55
<b>ตัวรับรังสีอาทิตย์แบบหลอดแก้วสุญญากาศ Heat Pipe</b>						
			$a_1$	$a_2$		
Company I	$\eta = 0.57 - 0.54(T_m^*) - 0.0036 G_t$ $(T_m^*)^2$	0.57	0.54	0.0036	0.56	1002.26
Company J	$\eta = 0.80 - 2.77(T_m^*) - 0.0200 G_t$ $(T_m^*)^2$	0.80	2.77	0.02	0.73	1317.15

ภาคผนวก จ ค่าการแปลงหน่วย Conversion Factors

ตาราง 17 ปริมาณพลังงานของเชื้อเพลิง (ค่าความร้อนสุทธิ)

ประเภท (หน่วย)	กิโลแคลอรี/ หน่วย kcal/UNIT	เทียบเท่า น้ำมันดิบ/ ล้านหน่วย toe/10 <sup>6</sup> UNIT	เมกะจูล/ หน่วย MJ/UNIT	พันบีทียู/ หน่วย 10 <sup>3</sup> Btu/UNIT
<b>พลังงานเชิงพาณิชย์</b>				
1. น้ำมันดิบ (ลิตร)	8680	860.00	36.33	34.44
2. คอนเดนเสท (ลิตร)	7900	782.72	33.07	31.35
3. ก๊าซธรรมชาติ				
3.1 ขึ้น (ลูกบาศก์ฟุต)	248	24.57	1.04	0.98
3.2 แห้ง (ลูกบาศก์ฟุต)	244	24.18	1.02	0.97
4. ผลิตภัณฑ์ปิโตรเลียม				
4.1 ก๊าซปิโตรเลียมเหลว(ลิตร)	6360	630.14	26.62	25.24
4.2 น้ำมันเบนซิน (ลิตร)	7520	745.07	31.48	29.84
4.3 น้ำมันเครื่องบิน (ลิตร)	8250	817.40	34.53	32.74
4.4 น้ำมันก๊าด (ลิตร)	8250	817.40	34.53	32.74
4.5 น้ำมันดีเซล (ลิตร)	8700	861.98	36.42	34.52
4.6 น้ำมันเตา (ลิตร)	9500	941.24	39.77	37.70
4.7 ยางมะตอย (ลิตร)	9840	974.93	41.19	39.05
4.8 ปิโตรเลียมโค้ก (กก.)	8400	832.26	35.16	33.33
5. ไฟฟ้า (กิโลวัตต์ชั่วโมง)	860	85.21	3.60	3.41
6. ไฟฟ้าพลังน้ำ (กิโลวัตต์ชั่วโมง)	2236	221.54	9.36	8.87
7. พลังงานความร้อนใต้พิภพ (กิโลวัตต์ชั่วโมง)	9500	941.24	39.77	37.70
8. ถ่านหินนำเข้า (กก.)	6300	624.19	26.37	25.00
9. ถ่านโค้ก (กก.)	6600	653.92	27.63	26.19
10. แอนทราไซต์ (กก.)	7500	743.09	31.40	29.76
11. อีเทน (กก.)	11203	1110.05	46.89	44.45
12. โพรเพน (กก.)	11256	1115.34	47.11	44.67

## ตาราง 17 (ต่อ)

ประเภท (หน่วย)	กิโลแคลอรี/ หน่วย Kcal/UNIT	ตันเทียบเท่า น้ำมันดิบ/ ล้านหน่วย toe/10 <sup>6</sup> UNIT	เมกะจูล/ หน่วย MJ/UNIT	พันบีทียู/ หน่วย 10 <sup>3</sup> Btu/UNIT
13. ลิกไนต์				
13.1 ลี้ (กก.)	4400	435.94	18.42	17.46
13.2 กระบี่ (กก.)	2600	257.60	10.88	10.32
13.3 แม่เมาะ (กก.)	2500	247.70	10.47	9.92
13.4 แจ็คอน (กก.)	3610	357.67	15.11	14.32
<b>พลังงานใหม่และหมุนเวียน</b>				
1. ฟืน (กก.)	3820	378.48	15.99	15.16
2. ถ่าน (กก.)	6900	683.64	28.88	27.38
3. แกลบ (กก.)	3440	340.83	14.40	13.65
4. กากอ้อย (กก.)	1800	178.34	7.53	7.14
5. ชยะ (กก.)	1160	114.93	4.86	4.60
6. ชีเสื่อย (กก.)	2600	257.60	10.88	10.32
7. วัสดุเหลือใช้ ทางการเกษตร (กก.)	3030	300.21	12.68	12.02
8. ก๊าซชีวภาพ (ลูกบาศก์เมตร)	5000	495.39	20.93	19.84

## ตาราง 17 (ต่อ)

		หน่วยทั่วไป	
		General	
1	กิโลแคลอรี (kcal)	= 4186	จูล (joules)
		= 3.968	บีทียู (Btu)
1	ตันเทียบเท่าน้ำมันดิบ (toe)	= 10.093	จิกะแคลอรี (Gcal)
		= 42.244	จิกะจูล (GJ)
		= $40.047 \times 10^6$	บีทียู (Btu)
1	บาร์เรล (barrel)	= 158.99	ลิตร (litres)
1	ลูกบาศก์เมตรของไม้ (cu.m. of solid wood)	= 600	กิโลกรัม (kg.)
1	ลูกบาศก์เมตรของถ่าน (kg. of charcoal)	= 250	กิโลกรัม (kg.)
5	กิโลกรัมของฟืน (kg. of fuel wood)	= 1 กิโลกรัมของถ่าน (kg. of charcoal product)	
1	ลิตรของก๊าซปิโตรเลียมเหลว (litre of LPG)	= 0.54	กิโลกรัม (kg.)

ที่มา: รายงานพลังงานของประเทศไทยรายปี กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน

ภาคผนวก จ การคำนวณต้นทุนพลังงาน (LCOE)

ตาราง 18 ต้นทุน-ผลประโยชน์ทางเศรษฐศาสตร์ของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ที่ประยุกต์ใช้  
แผ่นอะลูมิเนียมอะโนไดซ์ความหนา 16 ไมโครเมตร

ปีที่	ต้นทุน (Cost)		ผลประโยชน์ (Benefit)	
	เงินลงทุน เบื้องต้น	ต้นทุนการ ดำเนินการ	พลังงานความ ร้อนที่ผลิตได้ (kWh-year)	มูลค่าซาก
0	22,840.56		1,349.14	
1		106.98	1,349.14	
2		100.22	1,349.14	
3		93.88	1,349.14	
4		87.94	1,349.14	
5		82.38	1,349.14	
6		77.17	1,349.14	
7		72.29	1,349.14	
8		67.72	1,349.14	
9		63.44	1,349.14	
10		59.43	1,349.14	
11		55.67	1,349.14	
12		52.15	1,349.14	
13		48.85	1,349.14	
14		45.76	1,349.14	
15		42.87	1,349.14	857.41
รวม	22,840.56	1,056.77	21,586.24	857.41
ต้นทุนพลังงาน				1.11 บาท/kWh

ตาราง 19 การคำนวณต้นทุนพลังงาน (LCOE) ของแต่ละชนิดพลังงาน

ชนิดพลังงาน	ราคาพลังงาน/หน่วย (บาท)	จำนวนหน่วยพลังงานที่ใช้			ราคาสุทธิ (บาท)			LCOE (บาท/kWh)		
		ความหนาของชั้นฟิล์ม (ไมโครเมตร)			ความหนาของชั้นฟิล์ม (ไมโครเมตร)			ความหนาของชั้นฟิล์ม (ไมโครเมตร)		
		11	12	16	11	12	16	11	12	16
ก๊าซปิโตรเลียมเหลว (ลิตร)	24.39	2,574.84	2,612.43	2,919.24	62,800.43	63,717.22	71,200.32	3.30	3.30	3.30
ไฟฟ้า (กิโลวัตต์ ชั่วโมง)	3.93	9,039.54	19,317.48	21,586.18	74,825.38	75,917.72	84,833.67	3.93	3.93	3.93
แกลบ (กก.)	0.70	4,759.88	4,829.37	5,396.54	3,331.92	3,380.56	3,777.58	0.18	0.18	0.18

- หมายเหตุ:
1. พลังงานที่ใช้ในการคำนวณคือ 19039.54 ,19317.48 และ 21586.18 kWh ตามลำดับความหนาของชั้นฟิล์ม
  2. จำนวนหน่วยพลังงาน = พลังงานที่สามารถผลิตได้ / ค่าความร้อนสุทธิ ของแต่ละชนิดพลังงาน
  3. ราคาพลังงานแต่ละชนิดพลังงาน = ราคาต่อหน่วย x จำนวนหน่วยพลังงาน



การพัฒนาและประยุกต์ใช้อะลูมิเนียมอะโนไดซ์เป็นตัวดูดกลืนรังสีอาทิตย์ในตัวเก็บ  
รังสีอาทิตย์แบบท่อสุญญากาศ  
พรนิภา นุโนชา<sup>1\*</sup> ธวัช สุวิงษ์<sup>1</sup> และทศพล ตรีจริราภพงศ์<sup>2</sup>

Development and Application of Anodized Aluminium for Selective Absorber in  
Evacuated Tube Collector (ETC)

Pornnipa Nunocha<sup>1\*</sup> Tawat Suriwong<sup>1</sup> and Thotsaphon Thirerujirapapong<sup>2</sup>

<sup>1</sup>วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยนเรศวร พิษณุโลก 65000

<sup>2</sup>ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร พิษณุโลก 65000

<sup>1</sup>School of Renewable Energy Technology, Naresuan University Phitsaaulok 65000

<sup>2</sup>Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Naresuan University Phitsaaulok 65000

\*Corresponding author. E-mail address: Pornnipa.n@gmail.com, tawats@nu.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการประยุกต์ใช้แผ่นอะลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการทำฟิล์มอะโนไดซ์ที่มีผงนิกเกิล (Ni-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) หรือแผ่นอะลูมิเนียมอะโนไดซ์ มาเป็นตัวดูดกลืนรังสีอาทิตย์ในตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบท่อสุญญากาศแบบ 2 ชั้น โดยท่อนแก้วสุญญากาศไม่มีการเคลือบสารเลือก  
รับรังสีอาทิตย์ โดยเปลี่ยนตำแหน่งของการเคลือบจากเดิมที่เคลือบที่ผิวแก้วท่อนใน มาเป็นเคลือบที่แผ่นอะลูมิเนียม แผ่นอะลูมิเนียมอะ  
โนไดซ์มีการวิเคราะห์หาเฟส สัณฐานวิทยา และค่าการดูดกลืนรังสีอาทิตย์ด้วยเทคนิค ด้วยเครื่อง X-ray Diffraction (XRD), Scanning  
Electron Microscope (SEM), Energy Dispersive Spectrometry (EDS), และ Ultraviolet-Visible-Near Infrared Spectrometer  
การทดสอบประสิทธิภาพเชิงความร้อนในตัวเก็บรังสีอาทิตย์ ( $\eta$ ) ที่มีการใช้แผ่นอะลูมิเนียมอะโนไดซ์มาเป็นตัวดูดกลืนรังสีอาทิตย์ ตาม  
มาตรฐาน ISO 9806-1 ผลการทดลอง พบว่า ค่าการดูดกลืนรังสี ( $\alpha$ ) และค่าการสะท้อนรังสี ( $R$ ) ของแผ่นอะลูมิเนียมอะโนไดซ์มีค่า  
0.94 และ 0.06 ตามลำดับ ความหนาเฉลี่ยของชั้นฟิล์มอะลูมิเนียมอะโนไดซ์เท่ากับ 11.8 ไมโครเมตร ผลการประเมินค่าประสิทธิภาพ  
ทางความร้อนสูงสุด ( $\eta_{max}$ ) มีค่าเท่ากับ 0.72 และ 0.69 สำหรับกรณีที่มีการพิจารณาว่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียความร้อนรวม ( $U_L$ ) มีค่าคงที่  
และไม่คงที่ ตามลำดับ

คำสำคัญ: ตัวเก็บรังสีอาทิตย์ ท่อนแก้วสุญญากาศ อะลูมิเนียมอะโนไดซ์ สารเลือกรับรังสีอาทิตย์

Abstract

The objective of present research is focused on to apply the Ni-pigmented on aluminium oxide films or anodized aluminium (Ni-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) through anodizing process as solar absorber in evacuated tube collectors (ETC). In this study, double layers evacuated tube was used without coating solar on outer surface of the inside glass vacuum tube. The solar absorber was coated on aluminium sheets. Anodized aluminium was characterized phase, morphology and solar absorbance by X-ray Diffraction (XRD), Scanning Electron Microscope (SEM), Energy Dispersive Spectrometry (EDS) and Ultraviolet-Visible-Near Infrared Spectrometer. Collector thermal efficiency ( $\eta$ ) for using the aluminium anodized as solar absorber in ETC were evaluated, according to ISO 9806-1. In the results, absorbance ( $\alpha$ ) and reflectance ( $R$ ) of sample were 0.94 and 0.06, respectively. The average thickness of Ni-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> films was 11.8  $\mu$ m. The maximum thermal efficiency ( $\eta_{max}$ ) of solar collector was 0.72 and 0.69 for constant and non-constant of the overall heat loss coefficient ( $U_L$ ), respectively.

Keywords: Solar collector, Vacuum tube, Anodize aluminium, Selective solar absorber



## บทนำ

พลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานจากธรรมชาติที่มีความสะอาดปราศจากการก่อมลพิษต่อสิ่งแวดล้อม การนำพลังงานแสงอาทิตย์มาใช้ประโยชน์จำแนกเป็นสองด้านหลักๆ คือ การผลิตไฟฟ้าและการผลิตความร้อน โดยเทคโนโลยีการผลิตความร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์คือ การใช้ตัวเก็บรังสีอาทิตย์ (Solar Collector) มาผลิตน้ำร้อนเพื่อนำไปใช้ในการอุปโภคบริโภค สามารถจำแนกได้สองประเภทตามระดับอุณหภูมิที่ใช้งานคือระบบผลิตความร้อนที่อุณหภูมิสูงกว่า  $100^{\circ}\text{C}$  และระบบผลิตน้ำร้อนที่อุณหภูมิต่ำที่ต่ำกว่า  $100^{\circ}\text{C}$  ตัวเก็บรังสีอาทิตย์มีการนำมาใช้ในประเทศไทยแล้วไม่น้อยกว่า 25 ปี ตัวเก็บรังสีอาทิตย์สามารถจำแนกประเภทได้ตามการติดตามดวงอาทิตย์ (Tracking) และแบบที่ไม่มีการติดตามดวงอาทิตย์ (Stationary Collectors) ในปัจจุบันตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบไม่ติดตามดวงอาทิตย์เป็นที่ยอมรับและได้มีการนำมาใช้ในการผลิตน้ำร้อนสำหรับบ้านเรือน โรงแรม โรงพยาบาล อย่างกว้างขวาง ที่นิยมใช้คือตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบแผ่นเรียบ (Flat-plate collector, FPC) และแบบท่อสุญญากาศ (Evacuated tube collector, ETC) อย่างไรก็ตาม สำหรับประเทศไทยตัวเก็บรังสีอาทิตย์ทุกชนิดมีการนำเข้าจากต่างประเทศเป็นหลักและผลิตเองในประเทศบางส่วน ในปัจจุบันท่อเลือกรับรังสีอาทิตย์ของตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบท่อสุญญากาศ มีการเคลือบสารเลือกรับรังสีอาทิตย์ที่บริเวณผิวแก้วชั้นใน ซึ่งกระบวนการเคลือบสารเลือกรับรังสีอาทิตย์นี้ต้องใช้เทคโนโลยีขั้นสูง (การเคลือบด้วยโลหะ) เช่น Sputtering, Evaporation Pyrolysis, Electrodeposition และการทำอะโนไดซ์ (Anodization) Kennedy. (2002); Kalogirou. (2004, pp. 231-295); Wazwaz, Salmi, & Bes. (2010, pp. 1679-1683). ซึ่งการผลิตในประเทศไทยทำได้ยาก เนื่องจากเทคนิคส่วนใหญ่ต้องใช้เครื่องมือที่มีขนาดใหญ่และราคาแพง ถึงสามารถพบท่อรับรังสีอาทิตย์ขนาดความยาวมากกว่า 1 เมตร ได้ ทำให้มีเพียงเทคนิคการทำอะโนไดซ์ที่สามารถผลิตได้และมีอุตสาหกรรมนี้ภายในประเทศ อีกทั้งตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบท่อสุญญากาศมีข้อจำกัดคือเมื่อท่อรับรังสี

สุญญากาศมีความเสียหายเกิดขึ้นเช่น ท่อแก้วได้รับการกระแทก เกิดการแตกหักเสียหายและ/หรือเสียความเป็นสุญญากาศภายในท่อ ซึ่งส่งผลให้ท่อรับรังสีอาทิตย์ไม่สามารถใช้งานได้เต็มประสิทธิภาพและต้องทำการเปลี่ยนท่อรับรังสีอาทิตย์เป็นท่อใหม่ทั้งชุดพร้อมกับสารเลือกรับรังสี ทำให้เสียงบประมาณการซ่อมบำรุงหรือการเปลี่ยนที่สูงขึ้น เนื่องจากต้องทำการเปลี่ยนท่อแก้วสุญญากาศและสารเคลือบเลือกรับรังสีอาทิตย์พร้อมกัน สารเลือกรับรังสีอาทิตย์ยังก่อให้เกิดมลพิษ เนื่องจากสารเลือกรับรังสีอาทิตย์บางชนิดไม่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม

งานวิจัยที่ผ่านมา มีการรายงานถึงความเป็นไปได้ในการนำเทคโนโลยีตัวเก็บรังสีอาทิตย์มาใช้อย่างกว้างขวางและหลากหลายโดย D'Antoni, & Saro, (2012, pp. 3666-3679). และ มีการพัฒนาการออกแบบที่คำนึงถึง ประสิทธิภาพ ราคา และผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม วัสดุสะสมพลังงาน Tian, & Zhao. (2013, pp. 538-553); Ma, Lu, Zhang, & Liang. (2010, pp. 1595-1957). รายงานผลการวิเคราะห์ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของตัวเก็บรังสีแสงอาทิตย์แบบท่อสุญญากาศซึ่งมีลักษณะเป็นตัวอู วิเคราะห์สัมประสิทธิ์การสูญเสียความร้อนและประสิทธิภาพความร้อนในสภาวะคงที่ รวมทั้งศึกษาอิทธิพลของชั้นอากาศระหว่างท่อคู่ชั้นและครีบทองแดงและความเข้มรังสีอาทิตย์ที่มีต่อประสิทธิภาพของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ ในประเทศไทยมีการรายงานค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนและประเมินค่าพลังงานของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ที่มีขายในประเทศจำนวน 10 บริษัท (จักรชัย ศิริสัมพันธ์, รัฐพร เงินมีศรี, นิพนธ์ เกตุจ้อย และวิสุทธิ์ แซ่มสะอาด. 2555) โดยตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบท่อแก้วสุญญากาศทั้งหมดมีการเคลือบสารเลือกรับรังสีอาทิตย์บนผิวท่อแก้วชั้นใน นอกจากนี้มีการรายงานผลของปริมาณนิกเกิลบนอะลูมิเนียมอะโนไดซ์มีผลอย่างมากต่อประสิทธิภาพทางความร้อน (thermal efficiency) ค่าการดูดกลืนรังสีอาทิตย์ (absorptivity) และค่าการปลดปล่อยรังสี (emissivity) (Wazwaz, Salmi, & Bes, 2010, pp. 1679-1683)

จากงานวิจัยที่ผ่านมา ยังไม่มีการวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนตำแหน่งสารเลือกรับรังสีอาทิตย์ คณะผู้วิจัยจึงมีแนวคิดในการพัฒนาตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบท่อ



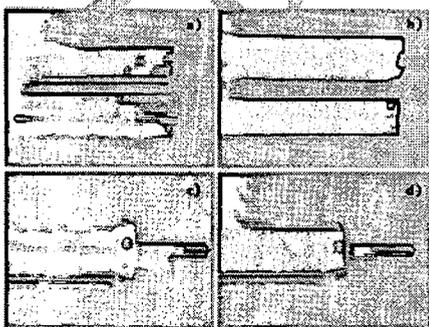
สุญญากาศด้วยการเปลี่ยนตำแหน่งของตัวดูดกลืนรังสีอาทิตย์จากเดิมที่เคลือบบนผิวท่อแก้วชั้นใน มาเคลือบบนครีบบนแผ่นอะลูมิเนียมที่ใส่ไว้เพื่อหาหน้าที่นำความร้อนจากท่อแก้วชั้นในไปยังท่อความร้อน (Heat pipe) การประยุกต์ใช้แผ่นอะลูมิเนียมเคลือบสารเลือกรับรังสีอาทิตย์ด้วยกระบวนการทำอะโนไดซ์ หรือแผ่นอะลูมิเนียมอะโนไดซ์มาเป็นตัวดูดกลืนรังสีอาทิตย์ร่วมกับท่อแก้วสุญญากาศ 2 ชั้น โดยแผ่นอะลูมิเนียมนี้ทำหน้าที่สองอย่างพร้อมกันคือ ทำหน้าที่ดูดกลืนรังสีอาทิตย์และถ่ายเทความร้อนจากรังสีอาทิตย์ให้กับสารทำงานในท่อความร้อนภายในท่อแก้วสุญญากาศแบบสองชั้น ซึ่งแตกต่างจากตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบเดิม ซึ่งเป็นอีกหนึ่งทางเลือกสำหรับการพัฒนาตัวเก็บรังสีอาทิตย์ โดยไม่มีการเคลือบสารเลือกรับรังสีอาทิตย์บนท่อแก้วในงานวิจัยมีการวิเคราะห์เฟส สัณฐานวิทยา และค่าการดูดกลืนรังสีของแผ่นอะลูมิเนียมอะโนไดซ์ รวมถึงการประเมินประสิทธิภาพทางความร้อนของตัวเก็บรังสีอาทิตย์

วิธีการทดลอง

งานวิจัยนี้เป็นงานวิจัยเชิงทดลองเพื่อพัฒนาและประยุกต์ใช้แผ่นอะลูมิเนียมอะโนไดซ์เป็นตัวดูดกลืนรังสี

อาทิตย์ในตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบท่อสุญญากาศ นำแผ่นอะลูมิเนียมขึ้นรูปหนา 0.002 เมตร ยาว 1.6 เมตร (รูป 1a) ไปผ่านกระบวนการทำฟิล์มอะโนไดซ์ที่มีนิกเกิลในชั้นฟิล์ม (Nickel-pigmented aluminium oxide, Ni-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) หรือแผ่นอะลูมิเนียมอะโนไดซ์ (รูป 1b) ณ บริษัท แอลเมทไทย จำกัด จังหวัดสมุทรปราการ ทำการวิเคราะห์เฟส สัณฐานวิทยา (Morphology) และค่าการสะท้อนรังสีของแผ่นอะลูมิเนียมอะโนไดซ์ ด้วยเครื่องมือวัดเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray Diffractometer, XRD) กล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) ที่มีการติดตั้งเทคนิคการวิเคราะห์ Energy Dispersive Spectrometry (EDS) และเครื่อง Ultraviolet-Visible-Near Infrared Spectrometer ที่ช่วงความยาวคลื่น 250-2,500 นาโนเมตร ค่าการดูดกลืนรังสีอาทิตย์ (Solar absorptance,  $\alpha$ ) คำนวณได้จากสมการที่ (1) เมื่อ  $R(\lambda)$  คือ สเปกตรัมของการสะท้อนรังสีของผิวตัวอย่าง และ  $I_{sol}(\lambda)$  คือสเปกตรัมความหนาแน่นกำลังรังสีอาทิตย์ ( $W/m^2 \cdot \mu m$ ) ตามมาตรฐาน ASTM G173-03 ที่ air mass เท่ากับ 1.5 (1.5 AM) (Katumba, et al., 2008, pp. 1285-1292).

$$\alpha = \frac{\int_{0.3 \mu m}^{2.5 \mu m} I_{sol}(\lambda)(1-R(\lambda))d\lambda}{\int_{0.3 \mu m}^{2.5 \mu m} I_{sol}(\lambda)d\lambda} \tag{1}$$



รูปที่ 1 a) แผ่นอะลูมิเนียม b) แผ่นอะลูมิเนียมอะโนไดซ์ที่มีการเคลือบฟิล์มอะลูมิเนียมออกไซด์ c) ท่อแก้วสุญญากาศสองชั้นที่ไม่มีการเคลือบสารเลือกรับรังสีอาทิตย์ที่ผิวท่อด้านนอกของท่อชั้นใน d) การประกอบแผ่นอะลูมิเนียมอะโนไดซ์เข้ากับท่อแก้วสุญญากาศสองชั้น

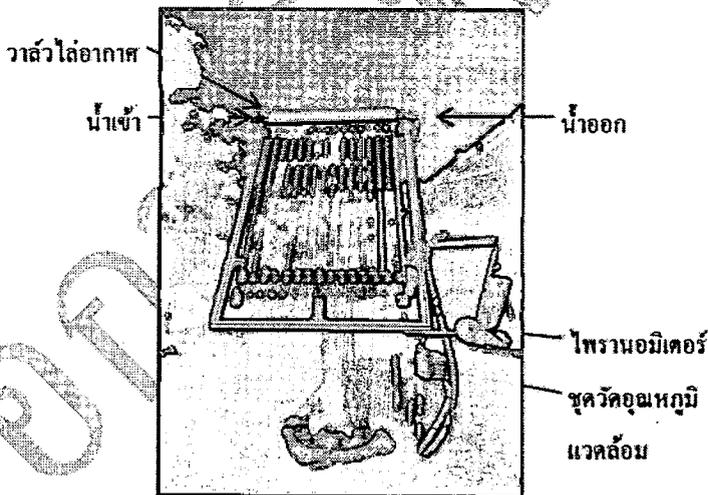


จากนั้นนำแผ่นอะลูมิเนียมอะโนไดซ์ที่ประกอบเข้ากับท่อแก้วสุญญากาศสองชั้นที่ไม่มีการเคลือบสารเลือกรับรังสีอาทิตย์ที่ผิวท่อนอกของท่อชั้นใน (รูปที่ 1c) โดยท่อแก้วสุญญากาศสองชั้นที่ประกอบเข้ากับแผ่นอะลูมิเนียม-อะโนไดซ์ ดังรูปที่ 1d โดยทำการประกอบจำนวน 15 ท่อ และทำการทดสอบประสิทธิภาพเชิงความร้อนตามมาตรฐาน ISO9806-1 บันทึกผลและเก็บข้อมูลพารามิเตอร์ต่างๆ แสดงในตารางที่ 1 ดังนี้ ค่ารังสีอาทิตย์ ( $G$ ) อุณหภูมิแวดล้อม ( $T_a$ ) อัตราการไหล

เชิงมวล ( $m$ ) อุณหภูมิของน้ำขาเข้าตัวเก็บรังสีอาทิตย์ ( $T_i$ ) ซึ่งมีค่าคงที่ แบ่งเป็น 5 ชุดข้อมูล คือ 35 40 45 50 และ 55°C และอุณหภูมิของน้ำขาออกตัวเก็บรังสีอาทิตย์ ( $T_o$ ) อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบประสิทธิภาพเชิงความร้อนที่มีการติดตั้งระบบดังแสดงในรูปที่ 2 การทดสอบที่การเปลี่ยนแปลงค่า  $\Delta T$  ( $\Delta T = T_o - T_i$ ) ตามอุณหภูมิของน้ำขาเข้าตัวเก็บรังสีอาทิตย์และอุณหภูมิแวดล้อมเพื่อหาค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนของตัวเก็บรังสีอาทิตย์

ตารางที่ 1 ค่าพารามิเตอร์ (Parameter) ที่ใช้ในการทดสอบประสิทธิภาพเชิงความร้อน

พารามิเตอร์ (Parameter)	ค่าตัวแปร
ค่ารังสีอาทิตย์, $G$ , (Test solar irradiance)	$800 \pm 50 \text{ W/m}^2$
อุณหภูมิแวดล้อม, $T_a$ , (Surrounding air temperature)	$29-31 \text{ }^\circ\text{C}, \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$
อัตราการไหลเชิงมวล, $m$ , (Fluid mass flowrate)	$0.216 \text{ kg/s}, \pm 1\%$
อุณหภูมิของน้ำขาเข้าตัวเก็บรังสีอาทิตย์, $T_i$ , (Fluid temperature at the collector inlet)	$35-55 \text{ }^\circ\text{C}, \pm 0.1 \text{ }^\circ\text{C}$



รูปที่ 2 ชุดทดสอบประสิทธิภาพเชิงความร้อนของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ ณ วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยนเรศวร ตั้งอยู่บนละติจูด  $16^\circ 44'$  เหนือ และลองจิจูด  $100^\circ 11'$  ตะวันออก

การวิเคราะห์หาประสิทธิภาพเชิงความร้อนสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2) และ (3) สำหรับสัมประสิทธิ์การสูญเสียความร้อนรวม (Overall heat loss coefficient,  $U_L$ ) ที่มีค่าคงที่และไม่คงที่ ตามลำดับ โดย

การสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $\Delta T$  ( $\Delta T = T_o - T_i$ )/ $G$ , กับ  $\eta$  โดยทำการเปลี่ยนแปลงค่า  $\Delta T$



$$\eta = F_R(\tau\alpha)_n - F_R U_L \frac{(T_i - T_a)}{G_i} \quad (2)$$

$$\eta = F_R(\tau\alpha) - c_1 \frac{(T_i - T_a)}{G_i} - c_2 \frac{(T_i - T_a)^2}{G_i} \quad (3)$$

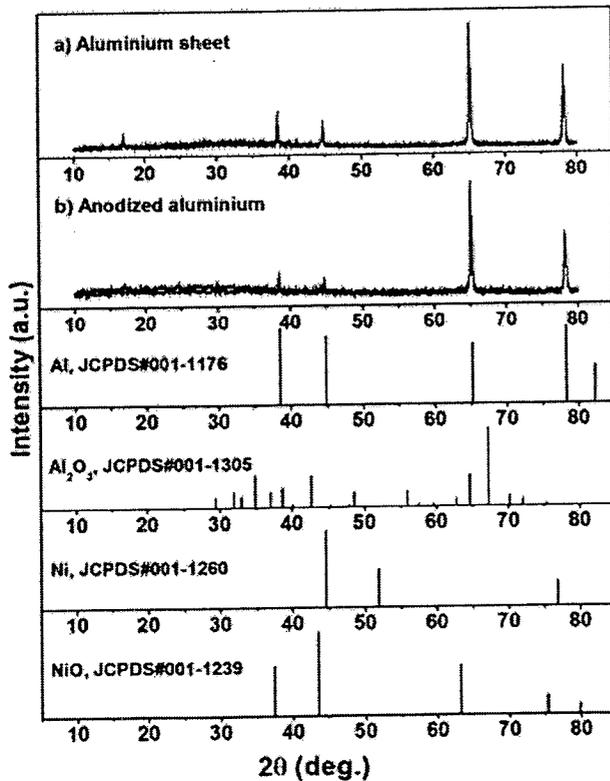
$$F_R U_L = c_1 + c_2(T_i - T_a)$$

- เมื่อ  $F_R$  = แฟกเตอร์การดึงความร้อนหรือแฟกเตอร์แก้ไข (Heat remove factor)  
 $G_i$  = รังสีอาทิตย์รวมทั้งตกกระทบลงบนตัวเก็บรังสีอาทิตย์ (Global solar irradiance),  $W/m^2$   
 $\tau$  = สัมประสิทธิ์การส่งผ่านรังสีอาทิตย์ของท่อนแก้วครอบ (Transmission factor of cover), %  
 $\alpha$  = สัมประสิทธิ์การดูดกลืนรังสีอาทิตย์ของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ (Absorption factor), %  
 $U_L$  = สัมประสิทธิ์การสูญเสียความร้อนรวม (Overall heat loss coefficient),  $W/m^2 \cdot ^\circ C$   
 $T_a$  = อุณหภูมิแวดล้อม (Ambient temperature),  $^\circ C$   
 $T_o$  = อุณหภูมิของเหลวขาออก (Outlet temperature),  $^\circ C$   
 $T_i$  = อุณหภูมิของเหลวขาเข้า (Inlet temperature),  $^\circ C$

#### ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง

รูปแบบ XRD ของแผ่นอะลูมิเนียมและแผ่นอะลูมิเนียมอะโนไดซ์ที่มีนิกเกิล แสดงดังรูปที่ 2 ผลการวิเคราะห์เฟสของตัวอย่างทั้งสองกับเฟสมาตรฐาน JCPDS ของ Al,  $Al_2O_3$ , Ni และ  $NiO$  (Peuser, Remmers, & Schnauss, 2002) พบว่ารูปแบบ XRD ของแผ่นอะลูมิเนียมและแผ่นอะลูมิเนียมอะโนไดซ์มีเฟสที่ตรงและสอดคล้องกับเฟสมาตรฐานของอะลูมิเนียมเพียงเฟสเดียว ที่มีโครงสร้างผลึกแบบ cubic ที่มี space

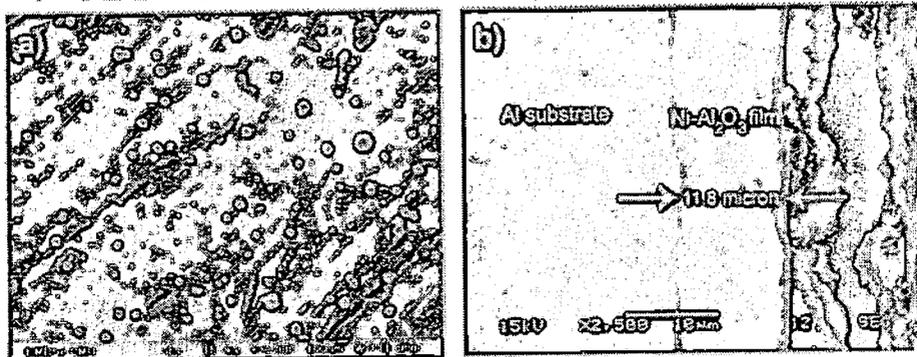
group เป็น Fm3M และ space group number เท่ากับ 225 หรือตรงกับฐานข้อมูล JCPDS รหัส 001-1176 (Al, JCPDS#001-1176) อย่างไรก็ตามผลการทดลองของแผ่นอะลูมิเนียมอะโนไดซ์ไม่ปรากฏรูปแบบ XRD ของอะลูมิเนียมออกไซด์ ( $Al_2O_3$ ) และนิกเกิล (Ni) หรือนิกเกิลออกไซด์ ( $NiO$ ) ที่เคลือบอยู่ในฟิล์มของอะลูมิเนียมออกไซด์ อาจจะเป็นเนื่องจากเป็นฟิล์มที่มีลักษณะที่ค่อนข้างบางและมีปริมาณนิกเกิลที่ต่ำ ทำให้ไม่สามารถวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD



รูปที่ 3 รูปแบบ XRD ของ a) แผ่นอะลูมิเนียม และ b) แผ่นอะลูมิเนียมอะโนไดซ์ เทียบกับฐานข้อมูล JCPDS ของ Al, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Ni และ NiO, ตามลำดับ

การวิเคราะห์สัณฐานวิทยาของแผ่นอะลูมิเนียมอะโนไดซ์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด แสดงในรูปที่ 4 รูป SEM ของตัวอย่างในรูป 4a) แสดงการเกิดฟิล์มอะลูมิเนียมออกไซด์ที่มีนิกเกิลบนพื้นผิวหน้าของแผ่นอะลูมิเนียม นอกจากนี้ยังพบว่าพื้นผิวแผ่นอะลูมิเนียมมีความหยาบและรอยร้าวจากกระบวนการ

ผลิตแผ่นอะลูมิเนียมด้วยกระบวนการรีดร้อน รูป SEM 4b) แสดงภาพภาคตัดขวางของฟิล์มอะลูมิเนียมออกไซด์ที่มีนิกเกิลผสมอยู่ในชั้นฟิล์ม ความหนาของฟิล์มอะลูมิเนียมออกไซด์มีความคงที่ตลอดชิ้นงานและมีความหนาเฉลี่ยประมาณ 11.8 ไมโครเมตร

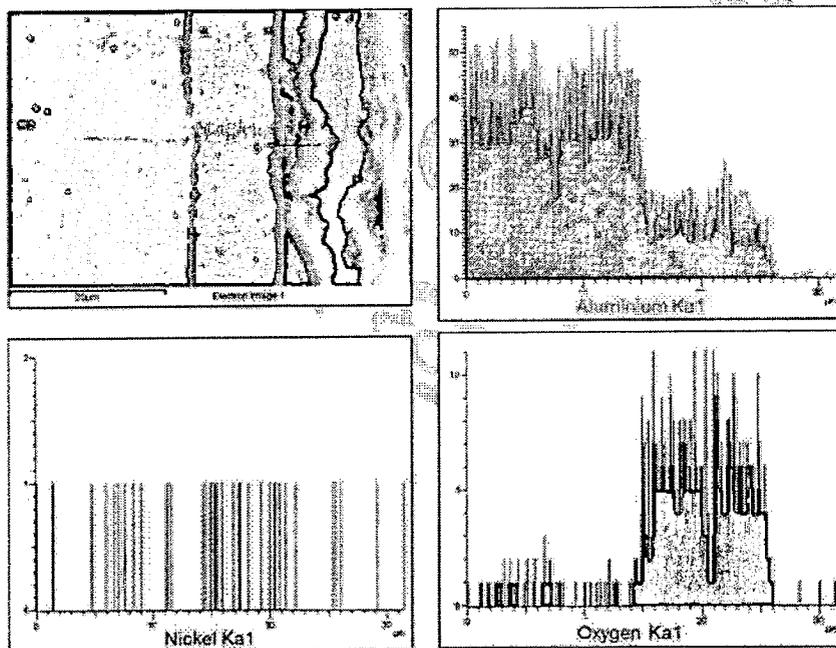


รูปที่ 4 รูป SEM ของ a) พื้นผิวหน้า และ b) ภาพตัดขวางของแผ่นอะลูมิเนียมอะโนไดซ์



การหาส่วนประกอบของธาตุเคมีเพื่อยืนยันการมีนิกเกิลผสมอยู่ในฟิล์มอะลูมิเนียมออกไซด์ของแผ่นอะลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการทำฟิล์มอะโนไดซ์สามารถวิเคราะห์ได้โดยการถ่ายภาพ SEM ที่เพิ่มเครื่อง Energy Dispersive Spectroscopy หรือ EDS โดยเครื่อง SEM ที่มีการติดตั้งหัววัดรังสีเอ็กซ์เฉพาะธาตุ (characteristic X-ray) ซึ่งแต่ละธาตุเคมีก็มีรังสีเอ็กซ์เฉพาะธาตุแตกต่างกัน จึงทำให้สามารถนำมาใช้ประโยชน์ในการวิเคราะห์หาธาตุเคมีของตัวอย่างได้ ผลการวิเคราะห์แสดงในรูปที่ 5 จากการศึกษาพบว่าชั้นฟิล์มอะลูมิเนียมออกไซด์ประกอบด้วยธาตุเคมีดังนี้ อะลูมิเนียม นิกเกิล และ

ออกซิเจน แต่ปริมาณของนิกเกิลมีปริมาณที่น้อยเมื่อเทียบกับอะลูมิเนียมและออกซิเจน ซึ่งผลที่ได้สอดคล้องกับผลจากการวิเคราะห์ XRD และกระบวนการทำอะลูมิเนียมอะโนไดซ์ที่มีการสโตนิกเกิลในชั้นฟิล์มของอะลูมิเนียมออกไซด์ ( $Al_2O_3$ ) ที่มีส่วนประกอบทางเคมีหลักเป็นอะลูมิเนียมและออกซิเจน สำหรับชั้นแผ่นอะลูมิเนียม นั้นมีเพียงส่วนประกอบธาตุเคมีเดียวคืออะลูมิเนียม จากผลการวิเคราะห์ SEM-EDS ยืนยันได้ว่าชั้นฟิล์มอะลูมิเนียมออกไซด์มีส่วนประกอบของนิกเกิลผสมอยู่จริง และมีปริมาณเพียงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับอะลูมิเนียมและออกซิเจน



รูปที่ 5 ผลวิเคราะห์ SEM-EDS ของภาพตัดขวางของแผ่นอะลูมิเนียมอะโนไดซ์

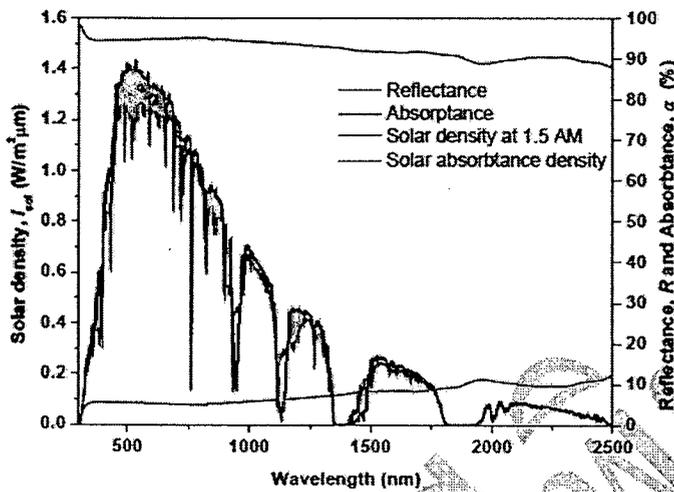
ผลจากการวัดค่าการสะท้อนรังสีด้วยเครื่อง Ultraviolet-Visible-Near Infrared Spectrometer ที่ช่วงความยาวคลื่น 250-2,500 นาโนเมตร และนำผลที่ได้มาคำนวณหาค่าการดูดกลืนรังสีตามสมการที่ (1) ผลที่ได้แสดงในรูปที่ 6 ค่าการสะท้อนรังสีของแผ่นอะลูมิเนียมอะโนไดซ์ที่มีนิกเกิลมีค่าที่ค่อนข้างต่ำและมีค่าการดูดกลืนรังสีที่สูง โดยมีค่าเฉลี่ยตลอดช่วงความยาวคลื่นเท่ากับ 6% และ 94% ตามลำดับ โดยผลการทดลองสอดคล้องกับสมบัติตัวดูดกลืนรังสีอาทิตย์ตามทฤษฎีคือ มีค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์ที่ต่ำและการ

ดูดกลืนรังสีอาทิตย์ที่สูงในช่วงความยาวคลื่น 300-2,500 นาโนเมตร ("NREL", n.d.; Kumar, Kumar, Nagar, & Yadav, 2013, p. 524715) เมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยที่ผ่านมาและที่มีการใช้งานจริงในท้องตลาดสำหรับตัวดูดกลืนรังสีอาทิตย์แบบมีสมบัติเลือกรับรังสีอาทิตย์พบว่า มีค่าการดูดกลืนรังสีอยู่ในช่วง 0.85-0.95 (Kennedy, 2002, 520-31267; Kumar, Kumar, Nagar, & Yadav, 2013, p. 524715) แสดงให้เห็นว่าค่าการดูดกลืนรังสีของแผ่นอะลูมิเนียมอะโนไดซ์มีค่าใกล้เคียงและอยู่ในช่วงที่มีการดูดกลืนรังสีที่สูง ผลการ



คำนวณค่าการดูดกลืนรังสีของแต่ละความยาวคลื่นมาเทียบกับความหนาแน่นกำลังรังสีอาทิตย์ที่ air mass เท่ากับ 1.5 AM (เส้นสีน้ำเงิน) ผลที่ได้แสดงค่าการดูดกลืนกำลังรังสีอาทิตย์ในแต่ละความยาวคลื่นของรังสีอาทิตย์ (เส้นสีแดง) โดยมีค่าการดูดกลืนกำลังรังสี

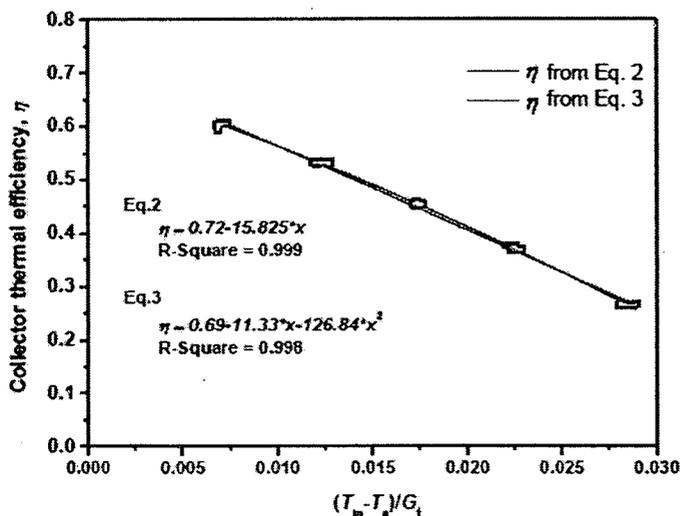
อาทิตย์ใกล้เคียงกับความหนาแน่นกำลังรังสีอาทิตย์ ดังแสดงในรูปที่ 6 จากผลการทดลองทำให้สามารถสรุปได้ว่าแผ่นอะลูมิเนียมอะโนไดซ์สามารถใช้เป็นตัวดูดกลืนรังสีอาทิตย์ได้



รูปที่ 6 ค่าการสะท้อนแสง (Reflectance) ค่าการดูดกลืนแสง (Absorbance) และค่าการดูดกลืนรังสีอาทิตย์ของอะลูมิเนียมอะโนไดซ์เทียบกับความหนาแน่นกำลังรังสีอาทิตย์ที่ air mass เท่ากับ 1.5 AM ในช่วงความยาวคลื่น 250-2,500 นาโนเมตร

ผลการทดสอบและคำนวณหาประสิทธิภาพเชิงความร้อนของตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบท่อสุญญากาศที่ประยุกต์ใช้อะลูมิเนียมอะโนไดซ์เป็นตัวดูดกลืนรังสีอาทิตย์และนำผลทดสอบมาเปรียบเทียบกับสมการที่ 2 และ 3 แสดงในรูปที่ 7 โดยการเปลี่ยนแปลงค่า  $\Delta T$  ( $\Delta T = T_i - T_o$ ) ของอุณหภูมิน้ำขาเข้าตัวเก็บรังสีอาทิตย์และอุณหภูมิแวดล้อม เพื่อหาค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ ในกรณีนี้พิจารณาว่า  $U_L$  มีค่าคงที่และไม่เปลี่ยนแปลง ตามสมการที่ 2 พบว่าค่าประสิทธิภาพทางความร้อนสูงสุด ( $\eta_{max}$ ) ที่อุณหภูมิน้ำขาเข้ามีค่าเท่ากับอุณหภูมิสิ่งแวดล้อม ( $\Delta T = T_i - T_o = 0$ ) มีค่าเท่ากับ 0.72 และมีค่าผลคูณของแฟกเตอร์การดึงความร้อนกับสัมประสิทธิ์การสูญเสียความร้อนรวมหรือค่าการสูญเสียความร้อน ( $-F_R U_L$ ) เท่ากับ  $-15.83 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$  (ความชันของกราฟ) สำหรับกรณีนี้พิจารณาว่า  $U_L$  มีค่าไม่คงที่และมีค่าเปลี่ยนแปลงตามสมการที่ 3 พบว่า ค่า  $\eta_{max}$  ที่  $\Delta T = 0$  มีค่าเท่ากับ 0.69 และมีค่าการสูญเสียความร้อน ( $-F_R U_L = c_1 + c_2(T_i - T_o)$ ) เท่ากับ  $-11.33 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$  เมื่อ  $\Delta T = 0$  ค่า  $\eta_{max}$  ของ

ทั้งสองสมการมีค่าใกล้เคียงกันและสูงกว่าค่าที่มีการรายงานผลการวิจัยที่มีผ่านมาสำหรับตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบท่อสุญญากาศ  $\eta_{max} = 0.55-0.70$  (Ma, Lu, Zhang, & Liang, 2010, pp. 1595-1957; Kim, & Seo, 2007, pp. 772-795; Zambolin, & Col, 2010, pp. 1382-1396; ฉัตรชัย ศิริสัมพันธ์วงศ์, รัฐพร เงินมีศรี, นิพนธ์ เกตุจ้อย, และวิสุทธิ์ แซ่มสะอาด, 2555, น. 16-23) อย่างไรก็ตามในปัจจุบันมีการพัฒนาชนิดของสารเลือกรับรังสีอาทิตย์ รูปแบบของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ และกลไกการถ่ายเทความร้อน เพื่อช่วยให้ตัวเก็บรังสีอาทิตย์มีค่า  $\eta_{max}$  มีค่าสูงที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ สรุปได้ว่าแผ่นอะลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการทำฟิล์มอะโนไดซ์ที่มีนิเกิลในชั้นฟิล์มอะลูมิเนียมออกไซด์ สามารถประยุกต์เป็นตัวดูดกลืนรังสีอาทิตย์แบบท่อสุญญากาศแบบสองชั้น โดยมีหน้าที่เป็นตัวดูดกลืนรังสีอาทิตย์และตัวนำความร้อนไปยังท่อความร้อน ซึ่งสามารถผลิตได้ภายในประเทศ และลดการนำเข้าจากต่างประเทศ ทำให้ตัวเก็บรังสีอาทิตย์มีราคาถูกลง ซึ่งเป็นแรงจูงใจให้มีการใช้งานมากขึ้นได้ในอนาคต



รูปที่ 7 ประสิทธิภาพประสิทธิภาพตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบท่อสุญญากาศประยุกต์ใช้อะลูมิเนียมอะโนไดซ์เป็นวัสดุเคลือบรังสีอาทิตย์

#### สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ประสบความสำเร็จในการประยุกต์ใช้แผ่นอะลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการทออะโนไดซ์ที่มีนิกเกิลในชั้นฟิล์มอะลูมิเนียมออกไซด์ ( $\text{Ni-Al}_2\text{O}_3$ ) โดยรูปแบบ XRD ของแผ่นอะลูมิเนียมและแผ่นอะลูมิเนียมอะโนไดซ์แสดงให้เห็นว่ามีเฟสที่ตรงและสอดคล้องกับเฟสมาตรฐานของอะลูมิเนียมเพียงเฟสเดียว ผลการวิเคราะห์รูป SEM ของภาพภาคตัดขวางของฟิล์มอะลูมิเนียมออกไซด์ที่มีนิกเกิลภายในชั้นฟิล์มมีความหนาของฟิล์มอะลูมิเนียมออกไซด์ที่คงที่ตลอดชิ้นงานและมีความหนาเฉลี่ยประมาณ 11.8 ไมโครเมตร และผลการวิเคราะห์ SEM-EDS ยืนยันได้ว่าชั้นฟิล์มอะลูมิเนียมออกไซด์มีส่วนประกอบของนิกเกิลผสมอยู่จริง และมีปริมาณเพียงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับอะลูมิเนียมและออกซิเจน ค่าการสะท้อนรังสีของแผ่นอะลูมิเนียมอะโนไดซ์มีค่าที่ค่อนข้างต่ำและมีการดูดกลืนรังสีที่สูง โดยมีค่าเฉลี่ย เท่ากับ 6% และ 94% ตลอดช่วงความยาวคลื่น 250-2,500 นาโนเมตร ตามลำดับ ค่าการดูดกลืนกำลังรังสีอาทิตย์ในแต่ละความยาวคลื่นรังสีอาทิตย์ของแผ่นอะลูมิเนียมอะโนไดซ์มีค่าใกล้เคียงกับความหนาแน่นกำลังรังสีอาทิตย์ที่ air mass 1.5 AM ผลการประเมินค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนสูงสุด ( $\eta_{max}$ ) ที่อุณหภูมิน้ำเข้าเข้ามีค่าเท่ากับอุณหภูมิสิ่งแวดล้อม ( $\Delta T = 0$ ) มีค่า

เท่ากับ 0.72 และ 0.69 และมีค่าผลคูณของแฟกเตอร์การดึงความร้อนกับสัมประสิทธิ์การสูญเสียความร้อนรวมหรือค่าการสูญเสียความร้อน ( $-F_r U_r$ ) เท่ากับ -15.83 และ -11.33  $\text{W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$  สำหรับกรณีที่พิจารณาว่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียความร้อนรวม ( $U_r$ ) มีค่าคงที่และไม่คงที่ ตามลำดับ

#### กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณโครงการพัฒนานักวิจัยและงานวิจัยเพื่ออุตสาหกรรม (พวอ)-ปริญญาโท ปี 2557 และสำนักงานคณะกรรมการการวิจัยแห่งชาติ (วช) ที่สนับสนุนทุนวิจัยผ่านทุนงบประมาณแผ่นดิน มหาวิทยาลัยนเรศวร ประจำปี พ.ศ. 2558 โดยให้การสนับสนุนทุนวิจัยตลอดทั้งโครงการ และขอขอบคุณวิทยาลัยพลังงานทดแทน และภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยนเรศวร สำหรับความอนุเคราะห์เครื่องมือในการทำงานวิจัย และอุปกรณ์ทดสอบต่าง ๆ

#### เอกสารอ้างอิง

ฉัตรชัย ศิริสัมพันธ์, รัฐพร เงินมีศรี, นิพนธ์ เกตุจ้อย และวิสุทธิ์ แซ่มสะอาด. (2555). การประเมินค่าพลังงานความร้อนรายปีที่ตัวรับรังสีอาทิตย์ผลิตได้. *Naresuan University journal*, 20(1), 16-23.



- D Antoni, M., & Saro, O. (2012). Massive Solar-Thermal Collectors: A critical literature review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(6), 3666-3679
- Kalogirou, S. A. (2004). Solar thermal collectors and applications. *Progress in Energy and Combustion Science*, 30, 231-295.
- Katumba, G., Olumekor, L., Forbes, A., Makiwa, G., Mwakikunga, B., & Lu, J., et al. (2008). Optical, thermal and structural characteristics of carbon nanoparticles embedded in ZnO and NiO as selective solar absorbers. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 92(10), 1285-1292.
- Kennedy, C. E. (2002). Review of Mid-to High-Temperature Solar Selective Absorber Materials, National Renewable Energy Laboratory (NREL), Colorado, NREL/TP-520-31267.
- Kim, Y., & Seo, T. (2007). Thermal performances comparisons of the glass evacuated tube solar collectors with shapes of absorber tube. *Renewable Energy*, 32(5), 772-795.
- Kumar, A., Kumar, S., Nagar, U., & Yadav, A. (2013). Experimental Study of Thermal Performance of One-Ended Evacuated Tubes for Producing Hot Air. Retrieved July 7, 2013, from <http://www.hindawi.com/journals/jsc/2013/524715/>
- Ma, L., Lu, Z., Zhang, J., & Liang, R. (2010). Thermal performance analysis of the glass evacuated tube solar collector with U-tube. *Building and Environment*, 45(9), 1595-1957.
- National Renewable Energy Laboratory (NREL), *Reference Solar Spectral Irradiance: Air Mass 1.5*. Retrieved September 24, 2013, from <http://rredc.nrel.gov/solar/spectra/am1.5/#a>
- Peuser, F. A., Remmers, K. H., & Schnauss, M. (2002). *Solar thermal Systems*. Berlin: Solarpraxis AG.
- Powder Diffraction File. (2001). International Centre for Diffraction Data (ICDD). USA: 12 Campus Boulevard, Newtown Square, PA 19073-3273.
- Tian, Y., & Zhao, C. Y. (2013). A review of solar collectors and thermal energy storage in solar thermal applications. *Applied Energy*, 104, 538-553.
- Wazwaz, A., Salmi, J., & Bes, R. (2010). The effects of nickel-pigmented aluminium oxide selective coating over aluminium alloy on the optical properties and thermal efficiency of the selective absorber prepared by alternate and reverse periodic plating technique. *Energy Conversion and Management*, 51(8), 1679-1683.
- Zambolin, E., & Col, D. D. (2010). Experimental analysis of thermal performance of flat plate and evacuated tube solar collectors in stationary standard and daily conditions. *Solar Energy*, 84(8), 1382-1396.



O-CT01

การประเมินด้านเศรษฐศาสตร์ของการประยุกต์ใช้อะลูมิเนียมอะโนไดซ์เป็นตัวดูดกลืนรังสีอาทิตย์ในตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบท่อสุญญากาศ  
Economic Evaluation of Applying Anodized Aluminium as Solar Absorber in Evacuated Tube Collector (ETC)

พรนิภา นุโนชา<sup>1\*</sup>, ธวัช สุวิงษ์<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยนเรศวร พิษณุโลก 65000

E-mail: ponnipa.n@gmail.com, tawats@nu.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการประเมินด้านเศรษฐศาสตร์ของตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบท่อสุญญากาศที่ประยุกต์ใช้แผ่นอะลูมิเนียมอะโนไดซ์ที่ผ่านกระบวนการทำอะโนไดซ์ที่มีการเติมธาตุทังสเตมในชั้นฟิล์มอะลูมิเนียมออกไซด์ (Ni-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) หรือแผ่นอะลูมิเนียมอะโนไดซ์ มาประยุกต์ใช้เป็นตัวดูดกลืนรังสีอาทิตย์ โดยค้นแบบตัวเก็บรังสีอาทิตย์มีการเปลี่ยนตำแหน่งของตัวดูดกลืนรังสีอาทิตย์ จากปกติที่เคลือบบนผิวด้านนอกของท่อแก้วขึ้นในมาเป็นตำแหน่งของแผ่นอะลูมิเนียมเดิมที่ทำหน้าที่ในการนำความร้อนจากตัวดูดกลืนรังสีอาทิตย์ไปยังท่อทำความร้อน (Heatpipe) ผลการทดสอบพบว่าแผ่นอะลูมิเนียมอะโนไดซ์มีค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนรังสีอาทิตย์ ( $\alpha$ ) เท่ากับ 0.94 และต้นแบบตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบท่อสุญญากาศที่ประยุกต์ใช้อะลูมิเนียมอะโนไดซ์เป็นตัวดูดกลืนรังสีอาทิตย์มีประสิทธิภาพเชิงความร้อนสูงสุด ( $\eta_p$ ) มีค่าเท่ากับ 0.72 ผลการประเมินทางด้านเศรษฐศาสตร์โดยกำหนดให้อายุการใช้งานของตัวเก็บรังสีอาทิตย์เท่ากับ 16 ปี สำหรับต้นทุนตลอดวัฏจักรชีวิต (LCC) พบว่าเงินลงทุนเริ่มต้นมีค่า 22,794 บาท ต้นทุนในการดำเนินงานมีค่า 1,055 บาท มูลค่าซากปึกสุดท้ายมีค่า 856 บาททำให้ค่าต้นทุนตลอดวัฏจักรชีวิตเท่ากับ 22,993 บาท และสำหรับต้นทุนพลังงาน (LCOE) พบว่าค่าพลังงานรายปีมีค่า 1,207 kW<sup>h</sup> เมื่อคำนวณต้นทุนพลังงานตลอดวัฏจักรชีวิตมีค่าเท่ากับ 1.23 บาท/kW<sup>h</sup> สรุปได้ว่า การประยุกต์ใช้แผ่นอะลูมิเนียมอะโนไดซ์เป็นตัวดูดกลืนรังสีอาทิตย์ร่วมกับการนำความร้อนในตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบท่อสุญญากาศนั้นมีความเป็นไปได้ในทางเทคนิค และมีความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์สำหรับนำมาใช้ในระบบการผลิตน้ำร้อน

คำสำคัญ: ตัวเก็บรังสีอาทิตย์; อะลูมิเนียม; ตัวดูดกลืนรังสีอาทิตย์; ต้นทุนตลอดวัฏจักรชีวิต; ต้นทุนพลังงาน

1. บทนำ

สถานการณ์พลังงานประเทศไทยปี 2556 รายงานว่ามีการใช้พลังงานเพิ่มขึ้นร้อยละ 2.6 น้ำมันสำเร็จรูปมีการใช้ในสัดส่วนที่สูงกว่าพลังงานชนิดอื่น คิดเป็นร้อยละ 47.8 ของการใช้พลังงานขั้นสุดท้ายทั้งหมด สาขาอุตสาหกรรมเป็นสาขาเศรษฐกิจที่ใช้พลังงานในสัดส่วนที่สูงกว่าสาขาอื่นๆ ร้อยละ 36.4 ของการใช้พลังงานขั้นสุดท้ายทั้งหมด(1)จากสถานการณ์ดังกล่าวส่งผลให้ประเทศไทยมีความจำเป็นต้องจัดหาพลังงานทดแทนเพื่อใช้แทนน้ำมัน รัฐบาลจึงมีนโยบายส่งเสริมการใช้พลังงานทดแทนที่สามารถผลิตได้ภายในประเทศ โดยได้มีการปรับปรุงแผนพัฒนาและส่งเสริมการใช้พลังงานทดแทน 15 ปี เป็นแผนพัฒนาพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือก 25% ใน 10 ปี (2555-2564) เพื่อผลักดันให้มีการใช้พลังงานทดแทนเพิ่มขึ้น ในรูปไฟฟ้า ความร้อน และเชื้อเพลิงชีวภาพ(2)

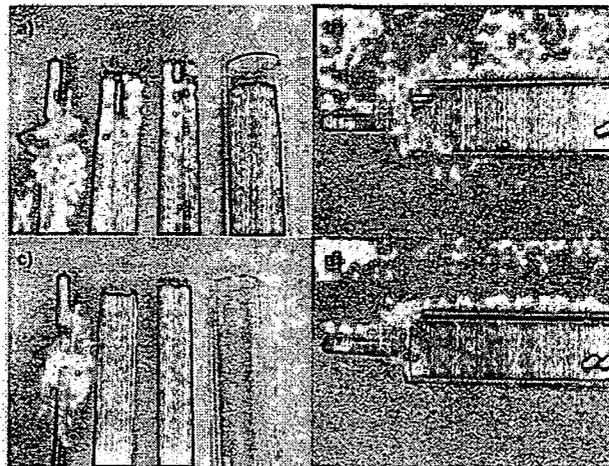
พลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานจากธรรมชาติที่มีความสะอาดปราศจากการก่อมลพิษคือสิ่งแวดล้อม การนำพลังงานแสงอาทิตย์มาใช้ประโยชน์จำนวนมากเป็นสองด้านหลัก คือ การผลิตไฟฟ้าและการผลิตความร้อน โดยเทคโนโลยีการผลิตความร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์คือ การใช้ตัวเก็บรังสีอาทิตย์ (Solar Collector) มาผลิตน้ำร้อนเพื่อนำไปใช้ในการอุปโภค บริโภค สามารถจำแนกได้สองประเภทตามระดับอุณหภูมิที่ใช้งานคือระบบผลิตความร้อนที่อุณหภูมิสูงกว่า 100°Cและระบบผลิตน้ำร้อนที่อุณหภูมิต่ำกว่า 100°C ตัวเก็บรังสีอาทิตย์มีการนำมาใช้ในประเทศไทยแล้วไม่น้อยกว่า 25 ปี ตัวเก็บรังสีอาทิตย์สามารถจำแนกประเภทได้ตามการติดตามดวงอาทิตย์ (Tracking) และแบบที่ไม่มีการติดตามดวงอาทิตย์ (Stationary Collectors) ในปัจจุบันตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบไม่ติดตามดวงอาทิตย์เป็นที่ยอมรับและได้มีการนำมาใช้ในการผลิตน้ำร้อนสำหรับบ้านเรือน โรงเรียน โรงพยาบาล อย่างกว้างขวาง ที่นิยมใช้คือตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบแผ่นเรียบ (Flat-plate collector, FPC) และแบบท่อสุญญากาศ (Evacuated tube collector, ETC) อย่างไรก็ตาม สำหรับประเทศไทยตัวเก็บรังสีอาทิตย์ทุกชนิดมีการนำเข้ามาจากต่างประเทศเป็นหลักและผลิตเองในประเทศบางส่วน อีกทั้งตัวเก็บรังสีอาทิตย์ในประเทศยังมีราคาที่สูง (3-5)

จากการทบทวนเอกสารงานวิจัยที่ผ่านมา พบว่ามีการใช้งานตัวเก็บรังสีอาทิตย์อย่างแพร่หลาย และหลากหลายประเภทอีกทั้งมีการคิดค้นออกแบบและพัฒนาตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบใหม่ขึ้นมาเรื่อยๆ เพื่อลดค่าใช้จ่าย ลดการสูญเสียความร้อนและเพิ่มประสิทธิภาพการใช้งานให้กับตัวเก็บรังสีอาทิตย์ เทคโนโลยีการเคลือบสารเคลือบรังสีหลายวิธี เช่นนาโนบัพทาเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพให้กับตัวเก็บรังสีอาทิตย์ ลดการสูญเสียความร้อน รวมถึงเคลือบใช้ง่ายในการบำรุงรักษา แต่เนื่องด้วยเป็นเทคโนโลยีขั้นสูง จึงทำให้ราคาสูงตามไปด้วยจากปัญหาดังกล่าว คณะผู้วิจัยจึงทำการประเมินความเป็นไปได้ทางเศรษฐศาสตร์ของตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบท่อสุญญากาศที่มีการเปลี่ยนตำแหน่งของตัวดูดกลืนรังสีอาทิตย์จากเดิมที่เคลือบบนผิว

ด้านนอกของท่อแก้วขึ้นใน มาเป็นเคลือบบนแผ่นอะลูมิเนียมและใช้งานร่วมกับท่อแก้วสุญญากาศ 2 ชั้นเพื่อให้แผ่นอะลูมิเนียมอะโนไดซ์ทำหน้าที่นำความร้อนจากท่อแก้วขึ้นในไปยังท่อความร้อน (Heat pipe) ซึ่งเป็นอีกหนึ่งทางเลือกสำหรับการพัฒนาตัวเก็บรังสีอาทิตย์ โดยไม่มีการเคลื่อนสารเลือกรับรังสีอาทิตย์บนท่อแก้ว ในงานวิจัยนี้มีการประเมินความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ด้วยต้นทุนตลอดวัฏจักรชีวิต(Life Cycle Cost, LCC) และต้นทุนพลังงาน (Levelized Cost of Energy, LCOE) ของต้นแบบตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบท่อสุญญากาศ

2. วิธีการทดลอง

งานวิจัยนี้เป็นการประเมินความเป็นไปได้และความคุ้มค่าทางด้านเศรษฐศาสตร์ ของการนำเอาแผ่นอะลูมิเนียมอะโนไดซ์ที่มีการเติมธาตุบิกกิ้งในชั้นฟิล์มอะลูมิเนียมออกไซด์ (Ni-AL<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) มาประยุกต์ใช้เป็นตัวดูดกลืนรังสีอาทิตย์ในตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบท่อสุญญากาศสำหรับตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบท่อสุญญากาศที่จำหน่ายในเชิงพาณิชย์มีส่วนประกอบหลักคือ ท่อน้ำความร้อน (heat pipe) แผ่นอะลูมิเนียม และท่อสุญญากาศสองชั้นที่มีการเคลื่อนสารเลือกรับรังสีอาทิตย์บนผิวด้านนอกของท่อแก้วขึ้นใน (รูป1a) และเมื่อมีส่วนประกอบทั้งหมดมาประกอบเข้าด้วยกันทำให้ได้ตัวรับรังสีอาทิตย์แบบท่อสุญญากาศ (รูป1b) ในงานวิจัยนี้มีการเปลี่ยนค่าหนึ่งตัวคือตัวดูดกลืนรังสีอาทิตย์จากผิวด้านนอกของท่อแก้วขึ้นในมาที่แผ่นอะลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการอะโนไดซ์ที่มีการเติมธาตุบิกกิ้งลงในชั้นฟิล์มอะลูมิเนียมออกไซด์เพื่อให้มีสมบัติเป็นสารเลือกรับรังสีอาทิตย์หรือเรียกว่าแผ่นอะลูมิเนียมอะโนไดซ์ และใช้ท่อแก้วสุญญากาศสองชั้นแบบใส (รูป 1c) รูป1d แสดงการประกอบต้นแบบตัวรับรังสีอาทิตย์ที่มีการเปลี่ยนตำแหน่งของตัวดูดกลืนรังสีอาทิตย์ นำต้นแบบตัวรับรังสีอาทิตย์จำนวน 15 ท่อ มาประกอบเข้ากับชุดตัวเก็บรังสีอาทิตย์ และดำเนินการทดสอบประสิทธิภาพของต้นแบบตัวเก็บรังสีอาทิตย์ที่เปลี่ยนตำแหน่งของการเคลื่อนสารเลือกรับรังสีอาทิตย์นี้ ตามมาตรฐาน ISO 9806-1 เพื่อหาสมการสมรรถนะเชิงความร้อนของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ และนำสมการสมรรถนะเชิงความร้อนมาคำนวณหาพลังงานที่ตัวเก็บรังสีอาทิตย์สามารถผลิตได้คือปีและตลอดอายุการใช้งาน



รูปที่ 1: a-b) ส่วนประกอบและการประกอบตัวรับรังสีอาทิตย์แบบท่อสุญญากาศที่มีการจำหน่ายในเชิงพาณิชย์ c-d) ส่วนประกอบและการประกอบต้นแบบตัวรับรังสีอาทิตย์แบบท่อสุญญากาศที่มีเปลี่ยนตำแหน่งตัวดูดกลืนรังสีอาทิตย์

จากนั้นทำการประเมินด้านเศรษฐศาสตร์ ซึ่งเป็นการวิเคราะห์เชิงปริมาณ (Quantitative Method) เพื่อที่พิจารณาความเหมาะสมของโครงการโดยใช้หลักการวิเคราะห์ต้นทุน-ผลประโยชน์ได้ผลการศึกษาที่เป็นการวิเคราะห์ถึงความคุ้มค่าของต้นแบบตัวเก็บรังสีอาทิตย์โดยมีขั้นตอนในการวิเคราะห์ดังนี้) 1) วิเคราะห์ต้นทุนและผลประโยชน์ (Benefit-Cost Analysis) โดยมูลค่าของต้นทุนและผลประโยชน์ที่คำนวณได้ในขั้นต้นเป็นราคาปีที่ 0 นำมาปรับมูลค่าเป็นราคาปัจจุบันสุทธิโดยการใช้อัตราดอกเบี้ยที่กำหนดโดยธนาคารกลางไทย(6)2) วิเคราะห์ความคุ้มค่าของของต้นแบบตัวเก็บรังสีอาทิตย์ (Project Analysis)

โดยการประเมินต้นทุนตลอดวัฏจักรชีวิต (Life Cycle Cost, LCC)เป็นการประเมินต้นทุนที่เกิดขึ้นตลอดช่วงอายุการใช้งานโดยในงานวิจัยนี้ทำการพิจารณาจากค่าใช้จ่ายในการลงทุนอุปกรณ์ แรงงานในการติดตั้งระบบ และค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาที่เกิดตลอดช่วงชีวิตของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ และกำหนดให้อายุการใช้งานของตัวเก็บรังสีอาทิตย์มีค่าเท่ากับ 16 ปีเท่านั้น(7)ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 1[8, 9] และการประเมินต้นทุนพลังงาน (Levelized Cost of Energy, LCOE)เป็นการหาราคาพลังงานเฉลี่ยตลอดอายุการใช้งาน โดยนำต้นทุนที่เกิดขึ้นตลอดอายุการใช้งานซึ่งในงานวิจัยนี้ มีการพิจารณาในส่วนของค่าใช้จ่ายในการลงทุนอุปกรณ์ แรงงานในการติดตั้งระบบ และค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษา นำค่าใช้จ่ายทั้งหมดนี้มาปรับคิดเป็นมูลค่าปัจจุบันสุทธิเทียบกับพลังงานที่สามารถผลิตได้ทั้งหมดทำให้ได้ราคาเฉลี่ยของต้นทุนพลังงาน โดยถ้าค่าLCOE ค่าแสดงว่า



TREC-7

การประชุมสัมมนาเชิงวิชาการ  
รูปแบบพลังงานทดแทนสู่ชุมชนแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 7  
The 1<sup>st</sup> Thailand Renewable Energy for Community Conference.

ต้นทุนต่อหน่วยพลังงานมีค่าต่ำ และถ้ามีค่าต่ำกว่าต้นทุนพลังงานปัจจุบันแสดงว่ามีประสิทธิภาพสูงทั้งทางด้านเทคนิคและทางด้านเศรษฐศาสตร์  
สมการการคำนวณค่า LCOE แสดงในสมการที่ 2 [10-12]

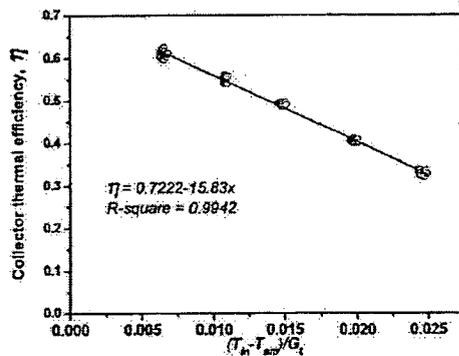
$$LCC = C_c + \sum_{n=1}^N \frac{C_n}{(1+i)^n} \frac{SV}{(1+i)^n} \quad (1)$$

$$LCOE = \frac{C_c + \sum_{n=1}^N \frac{C_n}{(1+i)^n}}{\sum_{n=1}^N \frac{E_n}{(1+i)^n}} \quad (2)$$

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

3. ผลการทดลองและวิจารณ์

ผลการทดลองประสิทธิภาพเชิงความร้อนของต้นแบบตัวเก็บรังสีอาทิตย์ที่มีการเปลี่ยนตำแหน่งของตัวดูดกลืนรังสีอาทิตย์ ที่แน่นอนลุ่มนิ่มจะ  
ในได้มีค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนรังสีอาทิตย์ ( $\alpha$ ) เท่ากับ 0.94 ผลการทดลองประสิทธิภาพเชิงความร้อนสูงสุด ( $\eta$ ) ของต้นแบบตัวเก็บรังสีอาทิตย์  
แสดงดังรูปที่ 2 เมื่อพิจารณาว่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียความร้อนรวม ( $U_L$ ) มีค่าคงที่และไม่เปลี่ยนแปลง พบว่าค่าประสิทธิภาพทางความร้อนสูงสุดที่  
อุณหภูมิน้ำเข้าเข้ามีค่าเท่ากับอุณหภูมิสิ่งแวดล้อม ( $\Delta T = T_f T_c = 0$ ) มีค่าเท่ากับ 0.72 และมีค่าหาคอมของแฟกเตอร์การดึงความร้อนกับสัมประสิทธิ์  
การสูญเสียความร้อนรวมหรือค่าการสูญเสียความร้อน ( $-F_R U_L$ ) เท่ากับ  $-15.83 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$  (ความชันของกราฟ) และมีสมการสมรรถนะทางความร้อน  
ของต้นแบบตัวเก็บรังสีอาทิตย์มีความสัมพันธ์แบบเชิงเส้นตรง คือ  $\eta = 0.7222 - 15.83x$  เมื่อเปรียบเทียบ  $\eta$  ของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ที่ประยุกต์ใช้  
อะลูมิเนียมไนโคกับตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบแผ่นเรียบและแบบท่อสุญญากาศจากงานวิจัย [13] ซึ่ง  $\eta$  มีค่า 0.676 และ 0.572 (second order  
equation) ความสำคัญเห็นได้จากค่า  $\eta$  ของต้นแบบตัวเก็บรังสีอาทิตย์ที่ประยุกต์ใช้อะลูมิเนียมไนโคเป็นตัวดูดกลืนรังสีอาทิตย์มีค่าสูงกว่างานวิจัยที่  
มีผ่านมาสำหรับการพัฒนาตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบท่อสุญญากาศ ( $\eta = 0.55-0.70$ ) [13-15]



รูปที่ 2: ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของต้นแบบตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบท่อสุญญากาศ

การคำนวณค่าพลังงานรายปีของต้นแบบตัวเก็บรังสีอาทิตย์เก็บรังสีอาทิตย์แบบท่อสุญญากาศ สามารถหาได้จากสมการสมรรถนะทางความร้อน  
ของต้นแบบตัวเก็บรังสีอาทิตย์ ซึ่งคำนวณผ่านพารามิเตอร์ต่างๆ ในตารางที่ 1 อันได้แก่  $G_c$ ,  $T_c$ ,  $T_m$  และ  $T_{m0}$  เมื่อคำนวณแล้วได้ค่าประสิทธิภาพ และ



อุณหภูมิค่าพลังงานแสงอาทิตย์เฉลี่ยรายปีของประเทศไทย ( $E$ ) ค่าพลังงานรายปีของต้นแบบตัวเก็บรังสีอาทิตย์มีค่าเท่ากับ  $1,117.9 \text{ kWh/m}^2$  เมื่ออุณหภูมิพื้นที่ยอดต้นแบบตัวเก็บรังสีอาทิตย์  $1.08 \text{ m}^2$  ทำให้ได้ค่าพลังงานที่ต้นแบบตัวเก็บรังสีอาทิตย์นี้สามารถผลิตได้ตลอดปีมีค่าเท่ากับ  $1,207.3 \text{ kWh}$  หรือ  $4,346.4 \text{ MJ}$  การผลิตพลังงานความร้อนของตัวเก็บรังสีอาทิตย์สามารถแบ่งออกเป็น 3 กลุ่ม คือ 1) มีความสามารถในการผลิตพลังงานความร้อนน้อยกว่า  $500 \text{ kWh/m}^2$  2) มีความสามารถในการผลิตพลังงานความร้อนตั้งแต่  $501-899 \text{ kWh/m}^2$  3) มีความสามารถในการผลิตพลังงานความร้อนมากกว่า  $900 \text{ kWh/m}^2$  [16] เห็นได้ว่าต้นแบบตัวเก็บรังสีอาทิตย์ที่ประยุกต์ใช้แผ่นอะลูมิเนียมอะโนไดซ์มีความสามารถในการผลิตพลังงานความร้อนอยู่ในช่วงที่สามารถผลิตได้มากกว่า  $900 \text{ kWh/m}^2$  ซึ่งเป็นกลุ่มที่สามารถผลิตความร้อนได้สูงสุด

ตารางที่ 1: ตัวแปรที่ใช้ในการวิเคราะห์ค่าพลังงานรายปี [16]

พารามิเตอร์	สัญลักษณ์	ค่าตัวแปร	หน่วย
ความเข้มรังสีอาทิตย์	$G_t$	800	$\text{W/m}^2$
อุณหภูมิอากาศแวดล้อม	$T_o$	30	$^{\circ}\text{C}$
อุณหภูมิน้ำเข้าตัวเก็บรังสีอาทิตย์	$T_i$	35	$^{\circ}\text{C}$
อุณหภูมิน้ำออกตัวเก็บรังสีอาทิตย์	$T_o$	60	$^{\circ}\text{C}$
ค่าพลังงานแสงอาทิตย์เฉลี่ยรายปีของประเทศไทย [17]	$E$	1,800	$\text{kWh/m}^2 \cdot \text{year}$

ตารางที่ 2: ต้นทุนและผลประโยชน์ของต้นแบบตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบท่อสุญญากาศที่ประยุกต์ใช้แผ่นอะลูมิเนียมอะโนไดซ์

รายละเอียด	มูลค่า(บาท)
ต้นทุน (Investment Cost)	
ค่าลงทุนอุปกรณ์ชุดผลิตน้ำร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์แบบท่อสุญญากาศ (เพื่อไม่เคลือบสารเลือกรับรังสีอาทิตย์) ( $380 \text{ USD} \times 31.72$ )	12,053.6
ค่าอุปกรณ์แผ่นอะลูมิเนียม ( $30 \times 0.81 \text{ USD} \times 31.72$ ) [18, 19]	770.80
ค่าอาคารเช่า ภาษีมูลค่าเพิ่ม	3,078.00
ค่าขนส่งจัดเก็บสินค้า	6,060.00
ค่า paper less	307.00
ค่า cargo ท่าเรือ	155.00
ค่าหัวอะลูมิเนียมอะโนไดซ์ สารเลือกรับรังสีอาทิตย์ รวมภาษีมูลค่าเพิ่ม [20]	369.79
ค่าใช้จ่ายในการดำเนินการและบำรุงรักษา (Operating and Maintenance Cost)	1,054.64
ผลประโยชน์ (Benefit)	
พลังงานที่สามารถผลิตได้	69,542.95 MJ
มูลค่าซากปัสสาวะท้ายของโครงการ [21]	855.67

ในการวิเคราะห์ความเป็นไปได้และความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ของต้นแบบตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบท่อสุญญากาศที่ประยุกต์ใช้แผ่นอะลูมิเนียมอะโนไดซ์เป็นตัวดูดกลืนรังสีอาทิตย์ มีการใช้ข้อมูลต้นทุนและผลประโยชน์ทางเศรษฐศาสตร์ที่ได้แสดงดังตารางที่ 2: ทำการวิเคราะห์โดยใช้วิธีวัดความคุ้มค่าของต้นแบบตัวเก็บรังสีอาทิตย์คือต้นทุนตลอดวัฏจักรชีวิต (LCC) และการประเมินต้นทุนพลังงาน (LCOE) ที่พิจารณาต้นทุนหรือรายจ่าย (Cost) ทางการเงินของโครงการประกอบด้วย ต้นทุน 2 ส่วน คือ ค่าลงทุนอุปกรณ์และแรงงานในการติดตั้งระบบ และค่าดำเนินการและบำรุงรักษาระบบ (0.5% ของเงินลงทุนเบื้องต้น) [7] มีการพิจารณาผลประโยชน์ของต้นแบบตัวเก็บรังสีอาทิตย์ในรูปแบบของพลังงานความร้อน โดยสามารถแสดงต้นทุนและผลประโยชน์ของตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบท่อสุญญากาศที่ประยุกต์ใช้แผ่นอะลูมิเนียมอะโนไดซ์ในแต่ละส่วนในตารางที่ 2 โดยพลังงานที่สามารถผลิตได้ตลอดวัฏจักรชีวิตเท่ากับ  $69,543 \text{ MJ}$  และมูลค่าซากเท่ากับ 855 บาท (10% ของเงินลงทุนเบื้องต้น) [21] สำหรับค่าของตัวแปรที่ใช้ในการวิเคราะห์ความเป็นไปได้ทางเศรษฐศาสตร์ของต้นทุนตลอดวัฏจักรชีวิตและการประเมินต้นทุนพลังงานแสดงในตารางที่ 3 โดยใช้เงินลงทุนเริ่มต้น และ ต้นทุนในการดำเนินโครงการ เท่ากับ 22,794 และ 1,055 บาทตามลำดับ ผลการคำนวณค่าต้นทุนตลอดวัฏจักรชีวิต (LCC) มีค่าเท่ากับ 22,993 บาท



ซึ่งเป็นค่าต้นทุนตลอดวัฏจักรชีวิตที่ต่ำกว่าตัวเก็บรังสีอาทิตย์ที่มีขายทั่วไปตามท้องตลาดที่มีราคาที่สูงกว่ามากเนื่องจากตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบท่อสุญญากาศส่วนใหญ่นำเข้าจากต่างประเทศ ไม่สามารถผลิตได้ในประเทศ ส่งผลให้ต้องใช้เงินลงทุนที่สูงตามไปด้วย

ตารางที่ 3: ตัวแปรและข้อมูลที่ใช้ในการวิเคราะห์ด้านเศรษฐศาสตร์

พารามิเตอร์	สัญลักษณ์	ค่าตัวแปร	หน่วย
เงินลงทุนเริ่มต้น	$C_c$	22,794.34	บาท
ต้นทุนในการดำเนินการ[7]	$C_n$	1,054.64	บาท
มูลค่าซากปีที่สุดท้าย[21]	$SV$	855.67	บาท
พลังงานที่สามารถผลิตได้ในแต่ละปี	$E_n$	1,207.97	kWh/ปี
อัตราดอกเบี้ย หรือ อัตราคิดลด [6]	$i$	6.75	ร้อยละ
อายุการใช้งานของตัวเก็บรังสีอาทิตย์[7]	$n$	16	ปี
จำนวนปีที่สิ้นสุดการใช้งาน[7]	$N$	15	ปี

ผลจากการวิเคราะห์ค่าต้นทุนพลังงาน (LCOE) มีค่าเท่ากับ 1.23 บาท/kWh และเมื่อเปรียบเทียบกับต้นทุนพลังงานกับต้นทุนพลังงานชนิดอื่น ๆ ในตารางที่ 4 พบว่าต้นทุนพลังงานของต้นแบบตัวเก็บรังสีอาทิตย์นี้ มีค่าต่ำกว่าต้นทุนพลังงานเชิงพาณิชย์ ได้แก่ ก๊าซปิโตรเลียมเหลวและไฟฟ้า ซึ่งมีค่าต้นทุนพลังงานเท่ากับ 3.30 และ 3.93 บาท/kWh หรือมีต้นทุนพลังงานน้อยกว่า 62.72 และ 68.70% ตามลำดับ อย่างไรก็ตาม เมื่อเปรียบเทียบกับพลังงานทดแทนคือ แกลบ (0.18 บาท/kWh) พบว่าต้นทุนพลังงานของต้นแบบตัวเก็บรังสีอาทิตย์นี้มีค่าสูงกว่า เนื่องจากราคาแกลบที่นำมาคำนวณนี้ยังไม่มีการรวมค่าขนส่ง ปัจจุบันราคาแกลบในแต่ละพื้นที่ของประเทศไทยมีราคาไม่แน่นอนขึ้นกับค่าขนส่งเป็นหลัก และมีปริมาณไม่เพียงพอต่อความต้องการนำมาเป็นวัตถุดิบสำหรับโรงไฟฟ้าชีวมวล หรือเพื่อผลิตความร้อนอื่นๆ จากผลการประเมินต้นทุนตลอดวัฏจักรชีวิตและต้นทุนพลังงานของต้นแบบตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบท่อสุญญากาศที่ประยุกต์ใช้แผ่นอะลูมิเนียมอะโนไดซ์เป็นตัวดูดกลืนรังสีอาทิตย์ สรุปได้ว่าต้นแบบตัวเก็บรังสีอาทิตย์นี้ มีศักยภาพในการแข่งขันในเชิงพาณิชย์เพื่อใช้เป็นระบบผลิตน้ำร้อนในครัวเรือนหรือในโรงงานอุตสาหกรรม

ตารางที่ 4: ต้นทุนพลังงาน (LCOE) ของต้นแบบตัวเก็บรังสีอาทิตย์เทียบกับชนิดพลังงานอื่นๆ

ชนิดพลังงาน	LCOE (บาท/kWh)
ตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบท่อสุญญากาศที่ประยุกต์ใช้แผ่นอะลูมิเนียมอะโนไดซ์	1.23
ก๊าซปิโตรเลียมเหลว (ลิตร)	3.30
ไฟฟ้า (กิโลวัตต์ชั่วโมง)	3.93
แกลบ (กก.)	0.18

4. สรุปผลการทดลอง

จากการประเมินความเป็นไปได้ทางเศรษฐศาสตร์ของต้นแบบตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบท่อสุญญากาศที่ประยุกต์ใช้แผ่นอะลูมิเนียมอะโนไดซ์เป็นตัวดูดกลืนรังสีอาทิตย์ ที่มีค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนรังสีอาทิตย์สูงเข้าใกล้อุดมคติและประสิทธิภาพเชิงความร้อน  $\eta$  เท่ากับ 0.72 ผลการประเมินความเป็นไปได้ทางเศรษฐศาสตร์พบว่าต้นแบบตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบท่อสุญญากาศมีต้นทุนตลอดวัฏจักรชีวิต (LCC) เท่ากับ 22,993 บาท และต้นทุนพลังงาน (LCOE) เท่ากับ 1.23 บาท/kWh เมื่อเปรียบเทียบกับต้นทุนพลังงานกับต้นทุนพลังงานเชิงพาณิชย์ชนิดอื่นๆ เช่น ก๊าซปิโตรเลียมเหลวและไฟฟ้า พบว่าต้นทุนพลังงานของต้นแบบตัวเก็บรังสีอาทิตย์นี้มีค่าต่ำกว่า 62.72 และ 68.70% ตามลำดับ ดังนั้นต้นแบบตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบท่อสุญญากาศที่ประยุกต์ใช้แผ่นอะลูมิเนียมอะโนไดซ์เป็นตัวดูดกลืนรังสีอาทิตย์มีศักยภาพในการแข่งขันในเชิงพาณิชย์เพื่อใช้เป็นระบบผลิตน้ำร้อนในครัวเรือนหรือในโรงงานอุตสาหกรรม

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณโครงการพัฒนานักวิจัยและงานวิจัยเพื่ออุตสาหกรรม (พวอ)-ปริญญาโท ปี 2557 และสำนักงานคณะกรรมการการวิจัยแห่งชาติ (วช) ที่สนับสนุนทุนวิจัยผ่านทุนงบประมาณแผ่นดิน มหาวิทยาลัยอัสสัมชัญ ที่ให้การสนับสนุนทุนวิจัยตลอดทั้งโครงการและขอขอบคุณวิทยาลัยพลังงานทดแทนและภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยอัสสัมชัญ สำหรับความอนุเคราะห์เครื่องมือในการทบทวนวิจัย และอุปกรณ์ทดสอบต่างๆ



#### บรรณานุกรม

- [1] กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน (พพ.) กระทรวงพลังงาน, 2556, "สถิติพลังงานของประเทศไทยปี 2556 (เบื้องต้น)," [www.dede.go.th](http://www.dede.go.th) [7 สิงหาคม 2557].
- [2] กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงานกระทรวงพลังงาน, 2555, "สถิติพลังงานของประเทศไทย(เบื้องต้น)," <http://www.dede.go.th> [7 เมษายน 2556].
- [3] Kennedy, C.E., 2002, "Review of Mid-to High-Temperature Solar Selective Absorber Materials," National Renewable Energy Laboratory (NREL), Colorado, NREL/TP-520-31267.
- [4] Kalogirou, S.A., 2004, "Solar thermal collectors and applications," *Progress in Energy and Combustion Science*, 30, p. 231-295.
- [5] Wazwaz, A., J. Salmi, R. Bes, 2010, "The effects of nickel-pigmented aluminium oxide selective coating over aluminium alloy on the optical properties and thermal efficiency of the selective absorber prepared by alternate and reverse: periodic plating technique," *Energy Conversion and Management*, 51(8): p. 1679-1683.
- [6] บมจ.ธนาคารกรุงไทย, "ดอกเบี้ยอ้างอิง ลูกค้ายรายใหญ่ขั้นต่ำ ประเภทเงินกู้แบบมีระยะเวลา (Minimum Loan Rate)," <http://www.kasikornbank.com> [11 ธันวาคม 2556]
- [7] กฤษณ์ คงเจริญ, ธนวิ จิตต์สงวน, 2549, "การวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์ของการลงทุนโครงการผลิตน้ำร้อนด้วยระบบผสมผสานพลังงานแสงอาทิตย์ กรณีศึกษา โรงพยาบาลกลาง จังหวัดระยอง (Economic Analysis of Project Investment on Hot Water Production from Integrated Solar Energy System : Case Study of Klang Hospital, Rayong Province)," กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, p. 644-651.
- [8] ชลธิชา สุทธิบุตร, 2552, "การประเมินวัฏจักรชีวิตและต้นทุนตลอดวัฏจักรชีวิตของการผลิตไบโอดีเซลจากสับปะรด," วิทยานิพนธ์ วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- [9] วราลักษณ์ มาลี, 2553, "การประเมินผลกระทบทางสิ่งแวดล้อม และต้นทุนตลอดวัฏจักรชีวิตของชุดท่อเซลล์เชื้อเพลิงแบบแบบแปรผันเปลี่ยนโปรตอน," วิทยานิพนธ์ วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- [10] Hernandez Moro, J.J.M. Martinez Duart, 2013, "Analytical model for solar PV and CSP electricity costs: Present LCOE values and their future evolution," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 20(0): p. 119-132.
- [11] Branker, K., M.J.M. Pathak, J.M. Pearce, 2011, "A review of solar photovoltaic levelized cost of electricity," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(9): p. 4470-4482.
- [12] Kombuth, K., J. Greenwood, E. Jordan, Z. McCaffrey, P.A. Erickson, 2012, "Economic feasibility of hydrogen enrichment for reducing NOx emissions from landfill gas power generation alternatives: A comparison of the levelized cost of electricity with present strategies," *Energy Policy*, 41(0): p. 333-339.
- [13] Zambotin, E.D. Del Col, 2010, "Experimental analysis of thermal performance of flat plate and evacuated tube solar collectors in stationary standard and daily conditions," *Solar Energy*, 84(8): p. 1382-1396.
- [14] Ma, L., Z. Lu, J. Zhang, R. Liang, 2010, "Thermal performance analysis of the glass-evacuated tube solar collector with U-tube," *Building and Environment*, 45(9): p. 1959-1967.
- [15] Yong, K.S. Taebeom, 2007, "Thermal performances comparisons of the glass-evacuated-tube solar collectors with shapes of absorber tube," *Renewable Energy*, 32(5): p. 772-795.
- [16] ฉัตรชัย ศรีสัมพันธ์วงศ์, รัฐพร เจริญศรี, นิพนธ์ เกตุจ้อย, วิสุทธิ์ แซ่มะฮาด, 2555, "การประเมินค่าพลังงานความร้อนรายปีที่ตัวรับสีอาทิตย์ผลิตได้," *Naresuan University journal*, 20(1): p. 16-23.
- [17] กองพัฒนาพลังงานทดแทน ฝ่ายแผนงานพัฒนาโรงไฟฟ้า การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย, 2554, "แผนศึกษากายภาพพลังงานแสงอาทิตย์ของประเทศไทย (พ.ศ. 2542)," <http://www3.egat.co.th> [25 สิงหาคม 2557].
- [18] ธนาคารกรุงศรีอยุธยา จำกัด(มหาชน), "อัตราแลกเปลี่ยนประจำวัน," <http://www.krungsri.com>



- [23 พฤศจิกายน 2556].
- [19] HAINING SUNSHINE TRADE CO., L., 25 พฤศจิกายน 2556, "COMMERCIAL INVOICE," 122 LIANHONG RD, YUAN HUA TOWN, HAINING CITY, ZHEJIANG.
- [20] พิระ โขจิตวิวัฒน์, 2557, "ราคาเคลือบสารเลือกรับรังสีอาทิตย์(อะโนไดซ์)," สมุทรปราการ: บริษัท แอลเมไทย จำกัด.
- [21] อนุรักษ์ ศรีเพชร, พิชัย นามประภาณ, 2553, "การศึกษาสมรรถนะเครื่องกลั่นน้ำรูปทรงพีระมิดที่เสริมด้วยแผงรับรังสีอาทิตย์แบบราบและหมุนวนน้ำด้วยวาล์วลอย (Study on performance of a pyramid-like solar still with an auxiliary flat-plate collector and circulating water by a floating valve)," Proceedings of the 48<sup>th</sup> Kasetsart University Annual Conference: Architecture and Engineering, 188-195.